共同利用研究成果報告

第 25号

令和3年度

九州大学応用力学研究所

発　刊　の　辞

応用力学研究所が1997年に全国共同利用研究所となって25年が経過しました。この間、毎年100～130件の共同研究が行われ、多くの成果が得られました。2020年度からのコロナ禍で研究環境が激変しました。新型コロナウイルス感染症の影響により国外からの共同研究者の訪問が困難になり、この影響は2021年度にも続いています。このような状況下で、いくつかの新しい試みも始まっています。公募申請時からの研究計画を定期的に見直し可能な体制にしました。また共同研究の実験を共同研究者である応用力学研究所の教員の助けを借りて遠隔で実施するシステムの構築を努力しました。特に高温プラズマ理工学研究センターでは外部研究者が行なっていた実験計測機器運用をセンターで運用するため、技術補佐員（後に九州大学職域限定職員）を1名採用し、その結果多くの共同研究の実験が遠隔で可能となりました。共同研究における困難な状況を緩和し、研究を加速するという目的で、データ共有サーバーの構築も進んでいます。これは、共同研究に参加された外部機関の研究者の方々と所内の研究者の間で、共同研究に必要な所内の観測・実験・シミュレーション等によって得られたデータや、共同研究の成果を共有し、公開もできるようにするものです。このような努力により、この報告書に示しますように、2021年度も特定研究26件を含む貴重な研究が数多く行われました。2011年度から実施されている国外在住の外国人研究者が代表者となる国際化推進共同研究は、18件（この18件に国際特定研究と分野融合研究のうち海外の機関に所属する研究者との3件を足した国際共同研究の実施総数としては21件）が実施され、研究所の国際化に大いに貢献しています。この中で国際ワークショップが3件開催され、国内外の研究者による活発な議論が行われました。この他にも同じ研究分野の研究者が応用力学研究所に集まり、掘り下げた討論を行う研究集会が2021年度は7件行われ、それぞれについてまとめられています。2022年度は若手キャリアアップ支援研究の代表者として、3名の採用（1名新規、2名継続）を実施し、また博士課程学生SRAを5名、博士課程学生と博士課程に進学予定の修士課程学生RAを17名それぞれ採用する等、若手育成にも努力しています。

これらの成果の一部は、2022 年 7 月 28 日－29 日に開催される「RIAM フォーラム 2022」でも報告されます。またこの報告書は、応用力学研究所のホームページ (https://www.riam.kyushu-u.ac.jp) にも掲載されます。

九州大学は 2004 年に国立大学法人として文部科学省から独立しました。応用力学研究所は、法人化後も引き続き、「力学に関する学理及びその応用の研究」を目的とする研究所として位置づけられ、重要な役割を与えられています。また応用力学研究所は、2010 年 4 月、 文部科学省により応用力学共同利用・共同研究拠点の認定を受けました。2021 年 10 月 29 日には、応用力学共同研究拠点の期末評価の通知があり、無事 2022 年 4 月 1 日から 2028 年 3 月 31 日までの継続が認められることとなりました。応用力学研究所は、これからも地球環境分野、核融合・プラズマ分野、新エネルギー分野とこれらの複数の分野にまたがる分野融合の研究領域において、国際的に高い水準の研究成果を挙げるとともに、21 世紀の人類にとって極めて重要な課題となっている地球環境問題とエネルギー問題の解決に向けた研究に、理学と工学の両面から取り組んでいきます。同時に、全国共同利用研究を基にして、全国および世界の研究者と連携し、力学とその応用の分野における世界的研究拠点となることを目指します。これからも応用力学研究所が一層発展し、日本のみならず世界の学術研究の重要な拠点であり続けることができますように、全国の研究者の方々からのより一層のご支援・ご指導・ご鞭撻のほどよろしくお願いいたします。

2022 年 3 月
九州大学応用力学研究所
所長　岡本　創

令和３年度　共同研究一覧（目次）

国際特定研究					
No.		研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究１					
—	海洋マイクロプラスチック研究に関わる国際連携体制の構築		統括責任者 磯辺 篤彦		
2021Ｓ1- 1	サブテーマ	ドローンと機械学習を用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築	チュラロンコン大学 Voranop VIYAKARN	磯辺　篤彦 ４名	2
2021Ｓ1- 2		タイにおけるプラスチックマテリアルフロー分析	中央大学 佐々木 創	磯辺　篤彦 ４名	5
2021Ｓ1- 3		2019年度国際特定研究「東南アジア海域における海洋マイクロプラスチック汚染研究の拠点形成」に係る、タイ湾における漂流プラスチックごみの現存量推定の日・タイ共同海洋調査	東京海洋大学 荒川 久幸	磯辺　篤彦 ６名	7
2021Ｓ1- 4		タイとミャンマーにおけるマイクロプラスチックの発生源検証	チュラロンコン大学 Suchana Apple Chavanic	磯辺　篤彦 ４名	9
2021Ｓ1- 5		海洋マイクロプラスチック研究に関わるタイ南部の国際連携拠点の構築	京都大学 田中 周平	磯辺　篤彦 ２名	13

分野融合					
No.	研究課題		代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究２					
—	波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング		統括責任者 稲垣 滋		
2021Ｓ2- 1	サブテーマ	時系列データに見られる短期的な不規則変動の分析	兵庫県立大学 中村 知道	稲垣　滋 １名	17
2021Ｓ2- 2		直線型ヘリコン波プラズマ装置のパラメータ比較および共通する物理課題の検討	日本大学 荒巻 光利	稲垣　滋 ３名	19
2021Ｓ2- 3		機械学習を用いたマイクロ波イメージング再構成手法の研究	兵庫県立大学 古賀 麻由子	稲垣　滋 ３名	21
2021Ｓ2- 5		分野融合研究会	九州大学 稲垣 滋	藤澤　彰英 １９名	23
2021Ｓ2- 6		LIFを用いた直線装置PANTAにおける高精度中性粒子およびイオン流速計測	九州大学 寺坂 健一郎	小菅　佑輔 ３名	25
2021Ｓ2- 7		流体波動の局所分離と不安定解析に関する研究	九州大学 大貫 陽平	稲垣　滋 ３名	27
2021Ｓ2- 8		プラズマ流2次元測定のためのマイクロ波センシングレーダーの開発	核融合科学研究所 徳沢 季彦	稲垣　滋 ３名	29
2021Ｓ2- 9		医療用CT・MRI技術を応用したプラズマ乱流計測	島根大学 荒川 弘之	稲垣　滋 ４名	31
2021Ｓ2- 10		定常状態プラズマにおけるイオン速度分布関数のベイズ推定	九州大学 徳田 悟	稲垣　滋 ６名	33
2021Ｓ2- 11		2次元画像計測によるプラズマの閉じ込め研究	核融合科学研究所 大舘 暁	稲垣　滋 ３名	35
2021Ｓ2- 12		プラズマ中光捕捉微粒子の位置揺らぎの解析	九州大学 古閑 一憲	稲垣　滋 ４名	37
2021Ｓ2- 13		直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析	九州大学 山田 琢磨	稲垣　滋 ３名	39
特定研究３					
—	マルチスケール物理現象のデータ統合・解析技術の研究開発		統括責任者 寒川 義裕 稲垣 滋 広瀬 直毅		
2021Ｓ3- 1	サブテーマ	窒化物半導体材料における形状および物性のマルチスケールデータ解析手法の構築	三重大学 秋山 亨	寒川　義裕 ２名	42
2021Ｓ3- 2		非平衡開放システムにおける時空間ダイナミクスの研究	日本大学 佐々木 真	稲垣　滋 １０名	44
2021Ｓ3- 3		東アジア縁辺海が暖候期における集中豪雨に及ぼす影響	三重大学 万田 敦昌	広瀬　直毅 ２名	46
2021Ｓ3- 4		ナノ積層構造体におけるリップロケーションの変形解析	福井大学 雷 霄雯	寒川　義裕 ３名	48
2021Ｓ3- 5		結晶成長中微斜面におけるナノスケール表面荒さとメゾスケール・マクロステップのファセット化との関係	大阪電気通信大学 阿久津 典子	寒川　義裕 １名	49
2021Ｓ3- 6		静止衛星を用いた中緯度混合相雲の発生と発達過程の研究	BAERI / NASA Ames Research Center 篠塚 陽平	弓本　桂也 ２名	51
2021Ｓ3- 7		複数ドローンによる大気流れ構造観測手法の開発	島根大学 荒川 弘之	稲垣　滋 ４名	53
2021Ｓ3- 8		沿岸海洋循環場の予測にむけた高解像度数値モデルとデータ統合手法の開発	海洋研究開発機構 石川 洋一	広瀬　直毅 ３名	55

地球環境力学分野				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
一般研究				
2021AO- 1	海洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した吹送距離延長法の確立	兵庫県立大学 高垣 直尚	磯辺 篤彦 ５名	57
2021AO- 2	日本海の流況と能登半島周辺における漁況との関係性	石川県水産総合センター 川畑 達	千手 智晴 ３名	59
2021AO- 3	等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデルの構築	京都大学 山敷 庸亮	木田 新一郎 ３名	61
2021AO- 4	波浪とGNSS反射信号との対応関係の観測	京都大学 根田 昌典	市川 香 ２名	64
2021AO- 5	若狭湾における定置網漁業の急潮対策に関する研究	福井県立大学 兼田 淳史	千手 智晴 ４名	66
2021AO- 6	瀬戸内海の伊予灘と豊後水道における乱流観測	愛媛大学 郭 新宇	遠藤 貴洋 ２名	68
2021AO- 7	東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変動	鹿児島大学 中村 啓彦	遠藤 貴洋 ６名	70
2021AO- 8	対馬暖流域における山陰沖合ー沿岸間の海況変動を把握するための観測研究	長崎大学 滝川 哲太郎	千手 智晴 ５名	72
2021AO- 9	氷晶粒子の形状や配向を考慮した衛星・地上ライダ/レーダ解析技術の改良	気象研究所 石元 裕史	岡本 創 ２名	74
2021AO- 10	逆推計手法による東アジア域排出量データベースの高度化に向けた研究	電力中央研究所 板橋 秀一	弓本 桂也 ３名	76
2021AO- 11	高潮・洪水時の海洋環境変動	神戸大学 林 美鶴	磯辺 篤彦 ４名	78
2021AO- 12	沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化	東京大学 堤 英輔	千手 智晴 １名	80
2021AO- 13	西之島火山による九州上空のエアロゾルの光学的特性	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 ３名	82
2021AO- 14	モンゴル・エルデネト鉱山における尾鉱沈殿池由来ホワイトダストの拡散動態解析	金沢大学 松木 篤	弓本 桂也 ４名	84
2021AO- 15	高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高度分布観測システムの構築	国立環境研究所 神 慶孝	弓本 桂也 ２名	86
2021AO- 16	国際共同研究体制の構築：地球温暖化に起因する東シナ海の成層構造と物質循環の変化に関する研究	富山大学 張 頸	遠藤 貴洋 ３名	88
2021AO- 17	衛星データを用いたダストエアロゾル量と雲微物理量の関係	長崎大学 河本 和明	岡本 創 １名	90
2021AO- 18	富山湾を再現した海洋モデルにおける適切な淡水流入量の推定	富山県農林水産総合技術センター水産研究所 小塚 晃	広瀬 直毅 ２名	92
2021AO- 19	インド亜大陸北東部からインドシナ半島における降水システムの長期変動に関する研究	東京大学 木口 雅司	江口 菜穂 ３名	94
2021AO- 20	表層海洋ドリフターを用いた沿岸表層海流の観測	東京大学 小平 翼	市川 香 ３名	96
2021AO- 21	表面波・内部波の非線形相互干渉に対する地形の影響	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一 ２名	99

核融合力学分野				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
一般研究				
2021FP- 1	新しい原子力材料における重イオン照射による損傷組織の発達過程	京都大学 徐 虬	渡邉　英雄 １名	101
2021FP- 2	プラズマ支援超臨界流体を用いた高耐熱性ナノ材料の創製	東北大学 成 基明	文　贊鎬 １名	103
2021FP- 3	プラズマプロセスを用いた薄膜作製による安価な水素脆化防止用材料作製	佐世保工業高等専門学校 川崎 仁晴	花田　和明 ２名	105
2021FP- 4	中性子照射原子力材料の高分解能STEM-EDS実現のための手法開発	東北大学 嶋田 雄介	渡邉　英雄 ６名	107
2021FP- 5	収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析	若狭湾エネルギー研究センター 安永 和史	渡邉　英雄 ３名	109
2021FP- 6	トカマクプラズマにおける高衝突領域での乱流輸送の定量化研究	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷　直宏 ３名	111
2021FP- 7	PLATOトカマクにおける周辺乱流密度揺動の計測のためのガスパフイメージング計測装置の開発	核融合科学研究所 小林 達哉	文　贊鎬 ３名	113
2021FP- 8	金属、合金および酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究	九州大学 橋爪 健一	渡邉　英雄 ８名	115
2021FP- 9	構造材料の破壊特性に及ぼす内在水素の影響	茨城大学 車田 亮	渡邉　英雄 ３名	117
2021FP- 10	タングステンの機械的特性評価と高熱流束材料への応用	茨城大学 車田 亮	徳永　和俊 ３名	119
2021FP- 11	プラズマ乱流の非線形発展に関する研究	法政大学 西村 征也	小菅　佑輔 ３名	121
2021FP- 12	降着円盤系における異常抵抗に関する研究	国立天文台 町田 真美	小菅　佑輔 １名	123
2021FP- 13	高エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物質の創製	量子科学技術研究開発機構 圓谷 志郎	渡邉　英雄 ２名	125
2021FP- 14	第一原理シミュレーションと数値計測による多粒子種プラズマのポテンシャル形成の定量的理解	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷　直宏 ４名	127
2021FP- 15	ランジュバン系を用いたプラズマ中の非線形現象のモデリング	富山大学 成行 泰裕	稲垣　滋 ５名	129
2021FP- 16	反転密度勾配が駆動するドリフト波による粒子ピンチ効果の理論シミュレーション研究	量子科学技術研究開発機構 矢木 雅敏	糟谷　直宏 ４名	131
2021FP- 17	ラジカル含有リチウム酸化物薄膜の水素吸収および放出過程	名城大学 土屋 文	徳永　和俊 ５名	133
2021FP- 18	遷移金属合金の照射による結晶構造・磁気変態の機構解明	岩手大学 鎌田 康寛	渡邉　英雄 ４名	135
2021FP- 19	高温下にて高エネルギーイオン照射された酸化物絶縁被覆の微細構造	核融合科学研究所 菱沼 良光	渡邉　英雄 ３名	137
2021FP- 20	トロイダルプラズマにおける非線形MHD現象の3次元構造シミュレーション解析	核融合科学研究所 佐藤 雅彦	糟谷　直宏 ２名	139
2021FP- 21	フッ化物溶融塩中での水素同位体挙動に関する研究	九州大学 片山 一成	渡邉　英雄 ４名	141
2021FP- 22	化合物合金における空孔型欠陥と注入水素原子挙動に関する研究	大阪府立大学 堀 史説	大澤　一人 ４名	143
2021FP- 23	種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー密度入射損耗解析法の開発	応用ながれ研究所 糟谷 紘一	徳永　和俊 ４名	145
2021FP- 24	プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究	京都大学 高木 郁二	花田　和明 ４名	147
2021FP- 25	長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程の解明と制御	九州大学 中村 一男	徳永　和俊 ４名	149

新エネルギー力学分野					
No.	研究課題		代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究４					
—	自然エネルギー利用を加速させるエレクトロニクス技術		統括責任者 齋藤 渉		
2021Ｓ4- 1	サブテーマ	SiC パワーデバイスを用いた直流遮断器の基礎検討	東京都立大学 和田 圭二	齋藤　渉 １名	152
2021Ｓ4- 2		アクティブゲート回路を用いた次世代パワーエレクトロニクス用パワーモジュールの設計・実装に関する研究	横浜国立大学 小原 秀嶺	齋藤　渉 １名	154
2021Ｓ4- 3		次世代パワーエレクトロニクスシステム用ヘルスモニタリング技術	九州工業大学 長谷川 一徳	齋藤　渉 １名	156
2021Ｓ4- 4		高耐圧パワーデバイス高温動作技術	近畿大学 宍戸 信之	齋藤　渉 １名	158
2021Ｓ4- 5		特殊トランス結合共振回路を用いた微弱電流高電圧パルスによる水分子の分離	鹿児島工業高等専門学校 小田原 悟	齋藤　渉 ２名	160
2021Ｓ4- 6		次世代パワーデバイス用のアイソレーション・信号伝送技術	茨城工業高等専門学校 成 慶珉	齋藤　渉 １名	162
一般研究					
2021ME- 1	風車ウエイクの気流性状把握に関する基礎的研究		三重大学 前田 太佳夫	内田　孝紀 ５名	164
2021ME- 2	医療情報を用いたデータサイエンス研究		九州情報大学 荒平 高章	東藤　貢 １名	166
2021ME- 3	光センシング技術を用いた圧力センサーの開発		広島大学 岩下 英嗣	胡　長洪 ４名	168
2021ME- 4	空力抵抗低減に向けた物体表面の流体摩擦力の光学計測		九州大学 安養寺 正之	内田　孝紀 ５名	174
2021ME- 5	回転振子式波浪発電装置の最適化に関する研究		長崎大学 経塚 雄策	胡　長洪 ４名	176
2021ME- 6	ウルトラワイドギャップ半導体ダイヤモンドおよび酸化ガリウムの欠陥の同定と素子への影響		佐賀大学 嘉数 誠	東藤　貢 １０名	178
2021ME- 7	極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎研究		同志社大学 平田 勝哉	内田　孝紀 ４名	180
2021ME- 8	OTEC深層水取水管のための自由垂下パイプの自励振動に関する実験		九州大学 宇都宮 智昭	胡　長洪 ４名	182
2021ME- 9	小型で安価な軽量ドローンとゾンデモジュールを組み合わせた気象観測システムの構築		海上保安大学校 近藤 文義	内田　孝紀 １名	184
2021ME- 10	水中ビークルの動力学の高精度推定に関する研究		九州大学 山口 悟	胡　長洪 ６名	186
2021ME- 11	バイオミティクス技術を用いたブレードの翼端形状の空力設計		沖縄工業高等専門学校 森澤 征一郎	吉田　茂雄 １名	188
2021ME- 12	強非線形境界要素法を用いた３次元浮体動揺解析プログラムの開発		秋田大学 平川 知明	胡　長洪 ２名	190
2021ME- 13	予見風速を用いたフィードフォワード制御による浮体式洋上風力発電システムの回転数変動と浮体動揺抑制		大阪府立大学 涌井 徹也	吉田　茂雄 ３名	192
2021ME- 14	三次元有限要素法による歯科矯正用アンカースクリューの下顎歯槽部への植立角度と応力分布の関係		九州大学 髙橋 一郎	東藤　貢 ４名	194
2021ME- 15	CT-FEMを用いた骨粗鬆症に起因する骨折メカニズムの解明		産業医科大学 塚本 学	東藤　貢 １名	198
2021ME- 16	骨再生用複合系足場材料の開発と機械学習による力学的特性予測		大阪大学付属病院 名井 陽	東藤　貢 １名	200
2021ME- 17	大腿骨頭骨折におよぼす大腿骨頭壊死症の力学的影響		福岡大学 山本 卓明	東藤　貢 ２名	202
2021ME- 18	CT 画像を利用した数値解析法の脳神経外科への応用		京都府立医科大学 梅林 大督	東藤　貢 １名	204
2021ME- 19	骨密度分布を利用した骨の力学特性予測法の構築		千葉大学 松浦 佑介	東藤　貢 ２名	206
2021ME- 20	上腕骨近位端骨折に関連する生体力学的問題に対するCT-FEMの応用		東北大学病院 仙台市立病院 佐野 博高	東藤　貢 １名	208
2021ME- 21	空中風力発電に用いる自立離着陸可能なカイトの研究 ―逆デルタ型カイトの開発―		熊本高等専門学校 葉山 清輝	吉田　茂雄 ２名	210
2021ME- 22	密度成層を考慮した長島海峡周辺海域で抽出可能な潮流エネルギーポテンシャルの数値計算		鹿児島大学 山城 徹	胡　長洪 ２名	213

新エネルギー力学分野				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
2021ME- 23	波成二次循環の水槽実験	京都大学 吉川 裕	胡　長洪 ２名	215
2021ME- 24	小形風車における可変ローターの開発・研究	福岡大学 江﨑 丈巳	内田　孝紀 ３名	217
2021ME- 25	風車後流の可視化技術に関する研究	弘前大学 本田 明弘	内田　孝紀 ４名	218
2021ME- 26	CFDと実験による抗力式垂直軸風車の流れの可視化	弘前大学 久保田 健	内田　孝紀 ５名	224
2021ME- 27	機械式過回転抑制機構による低コストバタフライ風車の開発研究	鳥取大学 原 豊	吉田　茂雄 ３名	226

令和３年度　研究集会一覧（目次）

地球環境力学分野						
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 講演数・参加者数	開催場所	開催日	頁
2021AO-S1	微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究	大分大学 西垣 肇	磯辺　篤彦 11件・21名	応用力学研究所 (対面･遠隔併用)	2021.11.25- 2021.11.27	229
2021AO-S2	アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会	電力中央研究所 板橋 秀一	弓本　桂也 13件・44名	遠隔会議	2022.03.03- 2022.03.04	233
2021AO-S3	東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程	名古屋大学 石坂 丞二	千手　智晴 7件・27名	応用力学研究所 (対面･遠隔併用)	2021.12.10	236
2021AO-S4	日本周辺海域における環境急変現象（急潮）のメカニズム解明および防災に関する研究集会	京都府農林水産技術センター 海洋センター 森川 晃行	千手　智晴 4件・30名	応用力学研究所 (対面･遠隔併用)	2021.11.05	240
2021AO-S5	日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会	富山高等専門学校 福留 研一	広瀬　直毅 14件・40名	応用力学研究所 (対面･遠隔併用)	2021.12.07- 2021.12.08	244
2021AO-S6	海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用	琉球大学 藤井 智史	市川　香 11件・65名	応用力学研究所 (対面･遠隔併用)	2021.12.06- 2021.12.07	375

核融合力学分野						
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 講演数・参加者数	開催場所	開催日	頁
2021FP-S1	第19回トロイダルプラズマ統合コード研究会	京都大学 村上 定義	糟谷　直宏 31件・38名	応用力学研究所 (対面･遠隔併用)	2022.01.06- 2022.01.07	378

令和３年度　若手キャリアアップ支援研究一覧（目次）

地球環境力学分野				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
若手 1	階層的全球数値モデリングを用いた氷雲におけるエアロゾル-雲相互作用の気候研究	東京大学 堀田 陽香	竹村　俊彦 ３名	386

核融合力学分野				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
若手 2	ヘリウムライン比分光を用いた電子密度と温度揺動及びそれらの位相差の計測	マックスープラズマ物理学研究所 西澤　敬之	文　贊鎬 ４名	390

新エネルギー力学分野				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
若手 3	Research on Data Driven Simulation Technologies to Support Systemic Development in Renewable Energy データ駆動型シミュレーション技術とその再生可能エネルギー開発への適用に関する研究	Hongzhong Zhu Research Institute for Applied Mechanics 九州大学 朱 洪忠	胡　長洪 ３名	392

特定研究１【国際】

海洋マイクロプラスチック研究に関わる国際連携体制の構築

Establishment of International Corroboration Regime Regarding Ocean Microplastics

統括責任者：磯辺 篤彦（地球環境力学分野）

マイクロプラスチックの海洋動態に関する研究について、欧米や東アジア、あるいは東南アジアの研究者との密な国際連携体制を構築します。研究者の招聘や研究集会の開催のみならず、現地調査等の支援を応用力学研究所が主導することで、世界の海洋プラスチック汚染研究をリードする研究機関として地位を築きます。

2021 S1-1 ドローンと機械学習を用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築

研究代表者： Voranop VIYAKARN（タイ王国/チュラロンコーン大学）

協力者;加古真一郎(鹿児島大学大学院理工学研究科)・日高 弥子臨時研究補助員(国立研究開発法人海洋研究開発機構)・松岡 大祐副主任研究員((国立研究開発法人海洋研究開発機構)

研究の背景

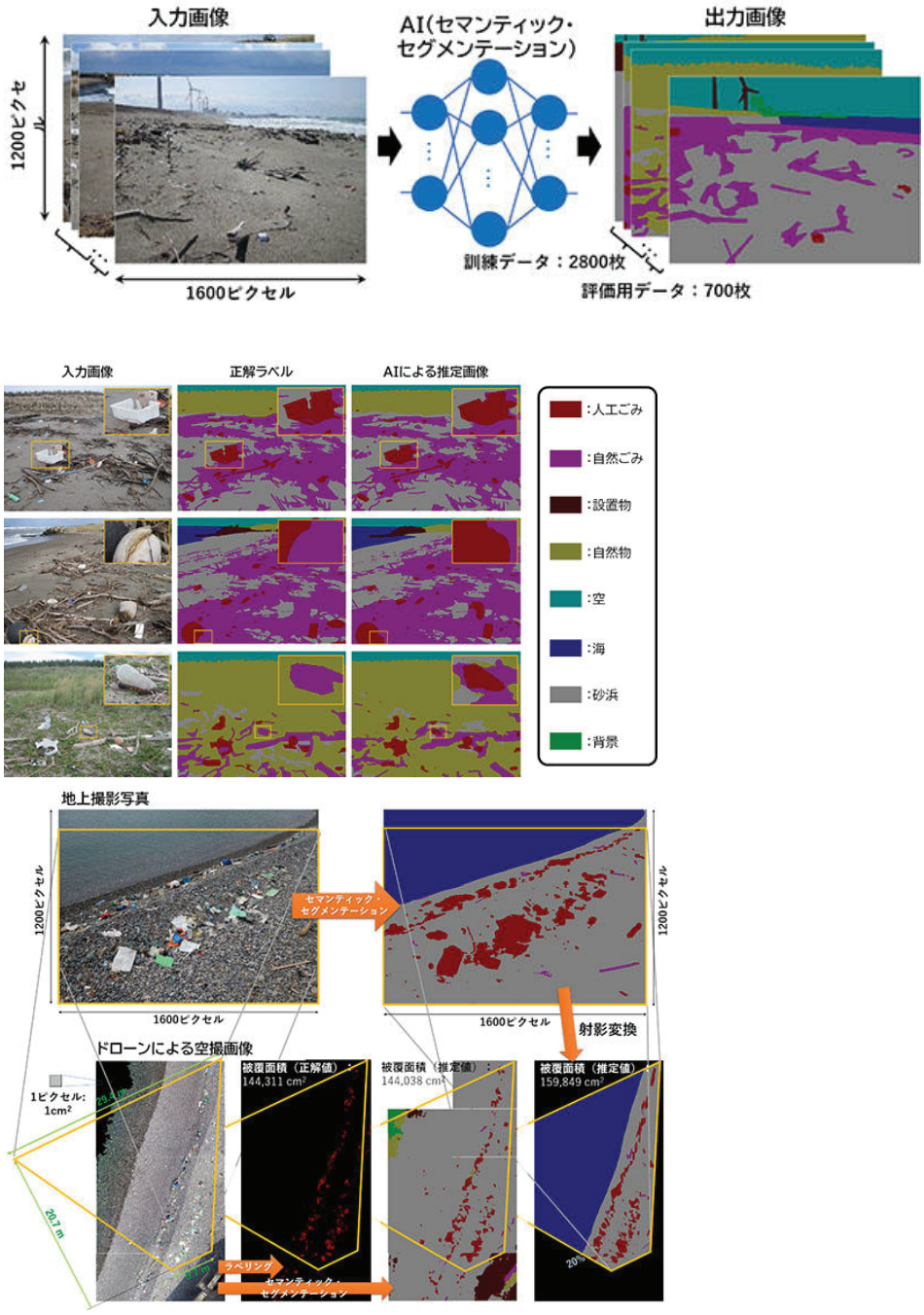
近年、国内または周辺国から大量のごみが海岸に漂着し、大きな社会問題となっています。特に海岸漂着ごみの 7 割を占めるプラスチックごみは、波や紫外線等の影響を受けて細かく砕け、マイクロプラスチックとして海洋に流出し、海洋生態系を脅かす一因となっています。また、各自治体においても、海岸機能や景観の維持を目的として、漂着ごみの回収や処理等、様々な対策を行っています。これまでは、海岸における漂着ごみの実態を把握し、海洋環境に与える影響を評価するため、研究者や自治体、NPO 等によって人手による海岸漂着ごみの現存量調査が行われてきました。しかし、人手に頼った調査は、経済的な負荷や人的または時間的な制約により、範囲や頻度においての制限が大きく、また、精度の面でも限界がありました。近年では、ドローンや人工衛星を用いた客観的な現存量調査の例が報告されていますが、求められる技術レベルやモニタリングにかかるコスト、適用可能な範囲等において課題があり、より汎用的かつ実用的な技術の確立が求められていました。

一方で近年の AI 技術の発展は目覚ましく、特にカメラ等で撮影された写真や映像の理解や解析において、大きな威力を発揮しています。例えば、自動運転や医療診断、工場生産の自動化等において実用化されている他、気象学や海洋学、生物学等、自然科学分野の研究においても活用が進んでいます。そこで本研究チームは、AI を用いた画像解析を、デジタルカメラ等で簡易的に撮影された海岸の写真に適用することにより、汎用性と実用性に優れた海岸漂着ごみの定量化を実現しようと、研究に着手しました。

【成果】

本研究では、セマンティック・セグメンテーションと呼ばれるディープラーニング手法を用い、海岸の写真からピクセル単位で漂着ごみを検出する技術を開発しました。セマンティック・セグメンテーションでは、入力された写真に対して、各ピクセルが表すクラス（人工ごみ、自然ごみ、砂浜、海、空等）を出力します。 ここで各クラスに特有のパターン（色や模様、形状等）を学習するためには、海岸の写真と、ピクセル単位でクラス毎に塗り分けられた正解ラベルのセットが必要となります。本研究では、山形県庄内総合支庁から提供を受けた海岸清潔度モニタリング写真 3500 枚に対して正解ラベルを作成し、訓練および評価用データとしました。（※下記 3 枚の画像に使用している写真も山形県よりご提供いただいたものです。）入力画像、正解ラベルおよび AI による推定画像の例プラスチック製品や瓶・缶、漁具等の人工ごみと、流木や灌木等の自然ごみをそれぞれ検出することも可能です。セマンティック・セグメンテーションと射影変換による人工ごみの被覆面積推定結果海岸漂着ごみ検出後の画像を真上から撮影した構図に射影変換することにより、海岸全体のごみの被覆面積が推定可能であることを示しました。この手法の精度は、ドローンによる空撮から得られた正解値との比較によって検証されています。

今後、さらに海岸漂着ごみの体積の推定や、プラスチックごみの個数のカウント等にも発展させる予定です。



セマンティック・セグメンテーションを用いた、海岸の写真からの海ごみ検出のイメージ図

【今後の展望】

本研究によって開発された技術は汎用性が高く、訓練データとして用いた山形県の海岸以外の海岸に対してもある程度適用可能であることがわかりました。研究の過程で作成した学習用データセットを公開することで、誰もが自分の目的に合った AI を開発することに活用できるようになります。現在、本論文の出版および学習用データセットの公開に合わせて、データの詳細を記述したデータ論文の出版に向けて準備を進めているところです。

一方で AI には、学習に用いていない特徴をもつパターンの検出精度は低下するという問題もあります。本手法が、より汎用性の高い手法として全世界で活用されるようになるためには、世界中のさまざまな特徴の海岸またはごみの写真を撮影し、そこから AI 用の学習データを作成し、チューニングを施

す必要があります。
　ここでキーワードとなるのが市民科学です。市民科学は、科学研究のプロセスにおいてアマチュア科学者が部分的または全面的に関与したものを指します。さまざまな地域に住む小中学生や自治体、または NPO の方々が、モニタリング調査や SNS 等を通じたデータ収集、学習用データの作成、または AI の活用方法の検討等、さまざまな形で研究活動に参加することで、今後、各地域に特化した AI 技術に進化していくことが期待できます。

掲載誌　Marine Pollution Bulletin 【**DOI**】 10.1016/j.marpolbul.2022.113371

タイにおけるプラスチックマテリアルフロー分析

中央大学経済学部　佐々木創

背景および目的

タイにおいては、2019 年 4 月にタイの内閣は「プラスチック廃棄物管理ロードマップ」を承認した。このロードマップの目的は、2027 年まで海洋プラスチック 50%削減とし、それを達成する数値目標として品目ごとの削減目標率と廃プラのリサイクル目標率が設定されている。この中で、2022 年までにレジ袋の使用禁止が記載されていた。しかし大手流通事業者は、2020 年年始からレジ袋の無料配布を停止することを天然資源環境省と合意し、2020 年始から実際に 75 の大手流通事業者が配布を取りやめた。

順調なスタートを切った大手流通事業者によるレジ袋の無料配布であるが、タイにおいても Covid-19 の感染を防止するため、2020 年 3 月 26 日に非常事態宣言の発令により、いわゆるロックダウンの措置が実施され生活様式が一変する。特に、タイは外食・中食文化であるがレストランや屋台では食事が出来なくなったためフードデリバリーが急増している。この急増するプラスチックの代替素材としてバイオプラスチックが注目され、それを促進するための政策であるバイオ・サーキュラー・グリーン（BCG）経済を国家戦略モデルに据えるとプラユット首相は 2021 年 1 月に表明している。

本研究では、タイにおけるプラスチックマテリアルフローに影響を与えるバイオマスプラスチックの生産動向や関連政策動向についてタイ語の 1 次文献を収集し、バイオマスプラスチック関連する各種報道や関連データなど整理・分析することを主目的とした。

研究の方法

まず、共同研究の実績がある Sujitra 講師や、SATREPS でカウンターパートとなる Manit 准教授の協力でタイ語文献の 1 次資料を収集した上で、リサイクル関連の専門翻訳において定評のある T.K. Wise Group 社に関連情報を補完し調査を委託した。本研究で翻訳した文献は以下の通りである。

1. OIE Share: Issue no, 109, April 2021 (Bioplastics, an innovation for environment and its industry in Thailand)
2. Plastics Institute of Thailand
3. BOI-Bioplastics Article 2017
4. PR News from the Ministry of Industry's website (25/08/21)

また、2 の文献を発行している Plastics Institute of Thailand が会員向けに提供しているバージン・プラスチック原料の生産や価格などの市場動向のデータベースのアクセス権も得た。

結果および考察

タイは米、キャッサバ、サトウキビ、油やしなど多くの農産品の主要な生産国であり、豊富なバイオマス資源の 4,000 万トンが未使用であり利用可能であることに優位性がある。タイ石油研究所では図 1 の右上に分類される PLA（ポリ乳酸）と PBS（ポリブチレンサクシネート）を合算して 9.5 万トンを生産するポテンシャルがあると推計している[1]。

タイ・プラスチック研究所と産業経済局（OIE）によって運営されているデータベースによると、

[1] https://image.mfa.go.th/mfa/0/YLjhuT4Hho/03_-_BOI.pdf

2020 年にはタイにバイオプラスチックのメーカーは 20 社となっている。一般的なプラスチック製品メーカーの数は 2,000 社を超えており、まだ市場は萌芽段階といえる[2]。

また、製品需要も国内市場では低く、その製造コストが一般的なプラスチック生産よりも 3〜5 倍高いため製品の大半は輸出され、タイは 2020 年に世界第 3 位のバイオプラスチック樹脂の輸出国になっている。バイオプラスチック樹脂の輸出量は、2018 年から急拡大しており、2020 年で 4.2 万トン、2021 年 10 月時点で 6.3 万トン（輸出総額 40 億バーツ）である（図 1）。

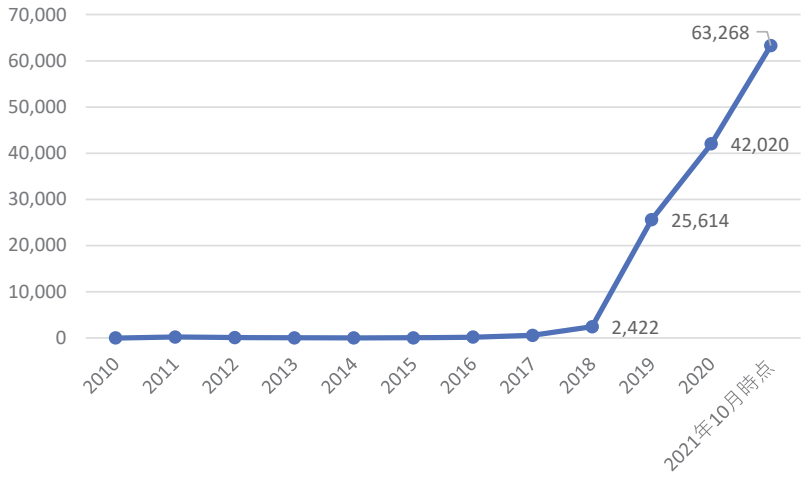


図1　バイオプラスチック樹脂の輸出量（単位:トン）

タイのプラスチック樹脂の利用量のうち容器包装の実需は 2020 年で 230 万トンであった[3]。他方で、タイ国内でのバイオプラスチック樹脂の生産統計は多く見積もっても 20 万トン程度であり、容器包装の実需の最大でも 1 割程度しかバイオプラスチックに代替できない。したがって、タイにおいてバイオプラスチックの生産が増えているにせよ、プラスチック容器包装の代替素材としてバイオプラスチックに置き換わることは、当面の間はあり得ない。もし、そのような状況になる場合は未利用のバイオマス資源だけでは賄えないため、食用の資源と競合するシナリオを検討せざるを得ないであろう。

研究組織

佐々木創　　中央大学
Manit Nithitanakul　チュラロンコン大学
Sujitra Vassanadumrongdee　チュラロンコン大学
Voranop　VIYAKARN　　チュラロンコン大学
Suchana Apple Chavanich　チュラロンコン大学

委託先

T.K. Wise Group Company Limited

[2] http://bioinnovationlinkage.oie.go.th/データの閲覧には会員登録が必要。

[3] ภาพรวมตลาดบรรจุภัณฑ์พลาสติกและแนวโน้มความต้องการใช้พลาสติกรีไซคิล, พลาสติกรีไซคิลกับบทบาทใหม่ที่ท้าทายในบรรจุภัณฑ์อาหาร วันที่ 9 พฤศจิกายน 2564

2019年度国際特定研究「東南アジア海域における海洋マイクロプラスチック汚染研究の拠点形成」に係る、タイ湾における漂流プラスチックごみの現存量推定の日・タイ共同海洋調査

東京海洋大学　海洋環境科学部門　荒川久幸

目的：

応用力学研究所が主幹機関を務める、SATREPS「東南アジア海域における海洋プラスチック汚染研究の拠点形成」の研究を東京海洋大学は分担する。東京海洋大学の担当する研究題目は、「漂流プラスチックごみの現存量推定」である。このことから、タイ湾における分布調査をタイ研究者と共同で行うことを目的に、微細なマイクロプラスチックの採取方法、分析方法をタイ側研究者と打ち合わせを行った。

実験方法：

微細なマイクロプラスチックの採取方法として、海表面では 2 重のニューストンネットを作製した。2 重ニューストンネットは、内側にメッシュサイズ 350 μm のネット（長さ 2 m）、外側にメッシュサイズ 50 μm のネット（長さ 3 m）で構成した。東京海洋大学練習船神鷹丸で 2 重ニューストンネットを日本沿岸の数か所で曳航し、海中の微細な粒子を採取した。採取した粒子は研究室に持ち帰り、酸化処理および密度分離を行って、プラスチック候補粒子を PTFE フィルタへ捕集した。PTFE フィルタ上の候補粒子は顕微 FTIR によってプラスチックの種類を決定した。PTFE フィルタ上での顕微 FTIR 計測に適切な粒子量を数値実験から求めた。

さらに、海水中の微細なマイクロプラスチックの採取方法として、水中ポンプの利用が適していると考え、機器整備を進めた。

実験結果：

2 重ニューストンネットを東京湾、静岡沖および三重沖で曳航し、微細なマイクロプラスチック採取を行った。大きな（350 μm 以上）マイクロプラスチックの濃度は東京湾では 2.47-20.5 pieces/m^3 であり、静岡沖-三重沖では、0.04-0.17 pieces/m^3 であった。これに対し、微細なマイクロプラスチックの濃度は東京湾では 3060-3220 pieces/m^3 であり、静岡沖-三重沖では 1030-5900 pieces/m^3 であった。また顕微 FTIR の分析から、大きなマイクロプラスチックはポリエチレンおよびポリプロピレンが主に存在する。一方、微細なマイクロプラスチックではペンキ由来のものが主成分であることが分かった。

2021 年度はコロナ感染症の影響により、日本からタイ王国へ行って共同の調査はできなかったが、微細なマイクロプラスチックの採取ネット（2 重ニューストンネット）をチュラロンコン大学 Prof. Voranop および SEAFDEC Dr. Sukchai へ送付し観測の準備を進めた。

次に顕微 FTIR 分析においてフィルタ上の適切な粒子量を数値実験で求めたところ、粒子の重なりが 1%以下となるフィルタ上の粒径 50 μm, 100 μm および 150 μm の粒子量は、それぞれ 150 個、41 個、および 25 個となった。

考察：

2 重ニューストンネットの構築により、5 mm-50 μm の範囲のマイクロプラスチックの濃度把握が可

能となった。このネットがタイ王国チュラロンコン大学と SEAFDEC に配置できたことにより、2022年度のマイクロプラスチック調査の準備が整った。また 2022 年度の調査計画についてタイ研究者側と調査の調整を行った。

顕微 FTIR 分析におけるフィルタ上の適切な粒子量が把握できたことにより、微細なマイクロプラスチックの誤計測を軽減できることとなった。

さらに、タイ王国から日本にかけての海域のマイクロプラスチック関連の文献調査を進めた。この結果をもとに東南アジア海域におけるマイクロプラスチックの分布について検討できた。

研究成果報告：

1. Nakano H., Arakawa H., Oceanic microplastic in Japan: A brief review on research protocol and present pollution, Reginal studies in marine science. In print.
2. Wang Y., Nakano H., Xu D., Arakawa H., Microplastics distribution on sea bottom sediment in Tokyo Bay, Estuarine, Coastal and Shelf science, 261, 107552. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107552
3. Nakano H., Uchida K., Aikawa T., Hayashi T., Arakawa H., Reevaluation of microplastics identification based on Neuston nets survey data. Marine pollution bulletin, 2021, 171, 112799. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112799
4. Nakano H., Arakawa H., Tokai T., Microplastics on the sea surface of the semi-closed Tokyo Bay. Marine Pollution Bulletin, 2021, 162, 111887. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111887

研究組織：荒川久幸（東京海洋大学）、内田圭一（東京海洋大学）、東海正（東京海洋大学）
Sukchai Arnupapboon, Ph. D (SEAFDEC), Voranop Viyakarn, Ph.D. (Chulalongkorn Univ.),
Suchana Apple Chavanich, Ph.D. (Chulalongkorn Univ.)

2021 S1-4 タイとミャンマーにおけるマイクロプラスチックの発生源検証

研究代表者： Suchana Apple Chavanich

Surveys regarding plastic pollution around Samae San and adjacent areas (1)

Corals and microplastic surveys

Introduction

Thailand is considered a hotspot for debris accumulation due to rapid economic growth, increased coastal population, poor awareness, and weak/limited management (Jang et al., 2014). The widespread occurrence of plastics in the marine environment has led to a surge of research on the potential impact that the smaller pieces of plastics termed microplastics (<5mm) (Webb et al., 2013), may have on wildlife. Microplastic particles have a similar size range with that of food and other suspended type particles (Wright et al., 2013).

Coral are passive suspension feeders that feed on plankton passing over their tentacles. Small debris, such as microplastics, can inadvertently be captured by the tentacles and ingested by the coral (Riechert et al., 2018). This debris can also be egested by the coral in many cases (Reichert et al., 2018). Hall et al., (2015) demonstrated that corals ingest microplastic and did so at rates similar to plankton uptake, which was supported in subsequent studies (Allen et al., 2017; Riechert et al., 2018). Ingested microplastics by corals could potentially reduce the energetic demands needed for calcification process by inhibiting digestion of exogenous food sources, especially in times of stress. Microplastic particles have also shown to affect fertilization and settling, although not in any significant way (Berry et al., 2019). The effects of coral fertilization by natural particles is due to interactions with sperm that results in sperm sinking, sperm limitation at the surface near the buoyant eggs and ultimately reduced fertilization rates (Ricardo et al., 2016). The sizes and types of particle also have a strong effect on sperm limitation, with smaller particles, high in organic carbon having a far more pronounced effect than larger, carbonate particles which only affect fertilization at very high concentrations (Ricardo et al., 2018). Since little is known about microplastics in the Gulf of Thailand and no previous studies have been conducted on microplastics in corals, this study will help to understand the effects of microplastics on corals.

Methods

Fragments of several genus such as *Pocillopora, Goniastrea, Acropora, Astreopora, Porites, Galaxea, Pavona, Turbinaria, Echinopora, Diploastra,* and *Favia* were collected at Maa Jor Pier near Samaesarn Island, Chonburi Province. These samples were stored in 10% Ethanol and taken back to Chulalongkorn University. Random polyps are measured for basal and mouth diameters for each genus.

Once in the laboratory, the coral samples are decalcified in a decaying concentration of formic acid starting at 50%. This concentration is reduced to 10% over a 3 day period. This is done as the amount of time taken for decalcification varies depending on genus, and tissue can be damaged or break off before analysis. Once decalcification is complete, The remaining tissue material is taken and the number of polyps present are counted under a microscope. The coral tissue was then placed in a 10% Potassium Iodide solution and left to digest overnight. It is then placed in a sonicator for 15 minutes

to digest any remaining undigested bits. After digestion is complete, saturated potassium hydroxide solution was added to enable the flotation of microplastics. This solution was then mixed thoroughly and centrifuged. After completion of centrifugation, the solution was filtered using a vacuum filtration unit using a GF/C cellulose filter with a pore size of 1.2 micron. This filter paper was then dried using a dessicator. This filter paper was then stored in glass containers. Individual pieces of microplastic were identified using a stereo microscope. These identified particles were taken and then photographed under under a Perkin Elmer Spotlight 200i and the absorbance spectra was obtained using the Perkin Elmer Spectrum IR. This absorbance spectra was matched against the library and identified.

Results

All species of corals examined contained a number of microplastics. Most plastic particles were found to be filamentous or fibrous in shape. Initial studies conducted on *Platygyra sp.* showed that 45% of the plastic particles were found in the digestive tract while around 30% of plastic particles were found in the tentacles and the remaining 25% found in the mouth area.

It can be seen that the number of plastics per polyp is highest in those with a comparatively high mouth size and polyp diameter, while those with smaller mouth size and polyp diameter has a much lower number of microplastics per polyp.

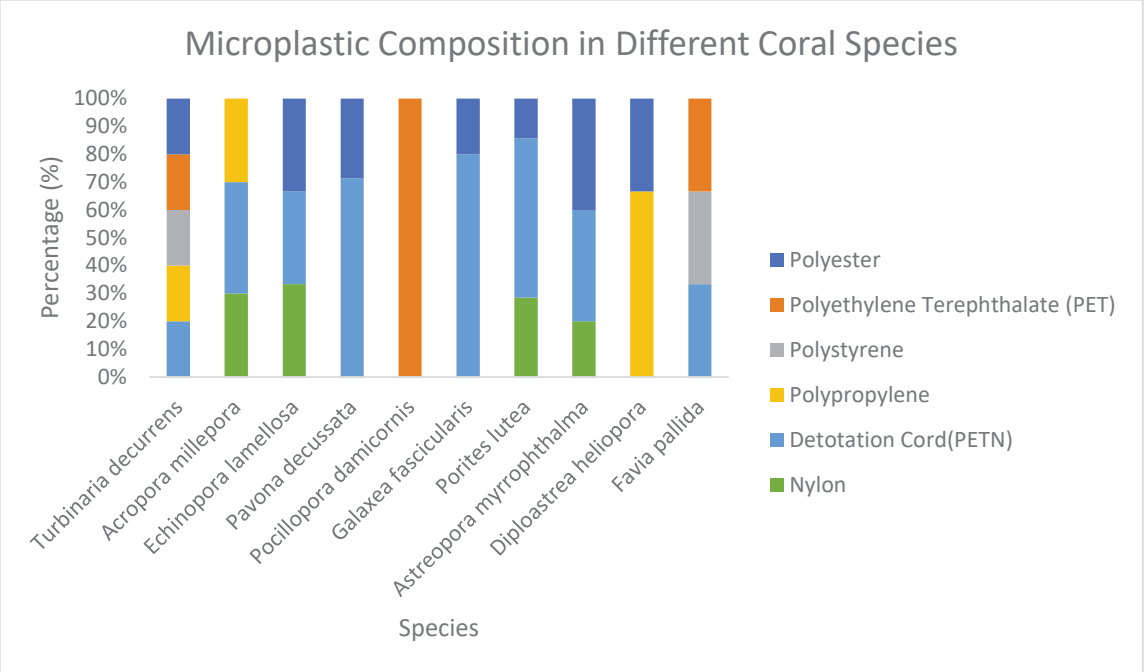


Figure 1 Microplastic compositions found in different coral species

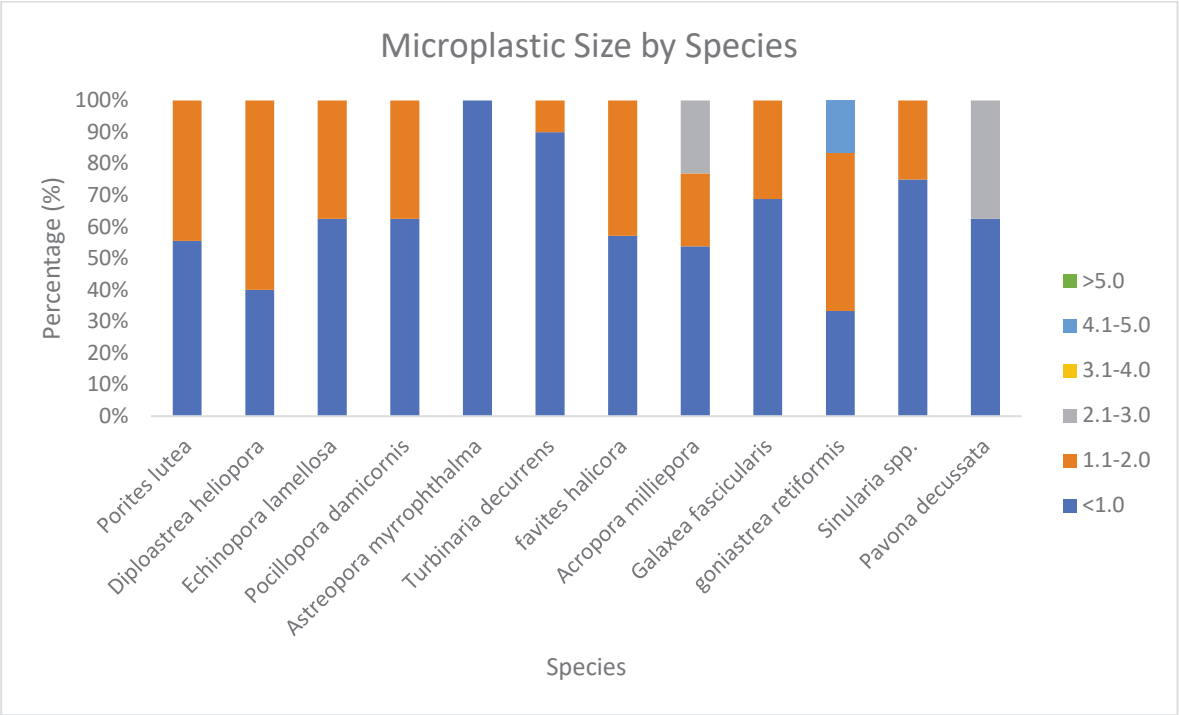


Figure 2 Sizes of microplastics found in different coral species

References

Allen, A.S., Seymore, A., Rittschof, D. 2017. Chemoreception drives plastic consumption in hard coral. Marine Pollution Bulletin. 124:198 – 205.

Berry, K. L. E., Epstein, H.E, Lewis, P. J., Hall, N. M., Negri, A. P., 2019. Microplastic contamination has limited effects on coral fertilisation and larvae. Diversity. 11(12) 228.

Hall, N.M., Berry, K.L.E., Rintoul, L., Hoogenboom, M.O. 2015. Microplastic ingestion by scleractinian corals. Marine Biology. 162, 725 – 732.

Jang, Y.C., Hong, H., Lee, J., Lee, J.S., Hong, S.S., Shim, W.J., Thiel, M., Shigeru, F., Chang, T.-d., Kosavisutte, K., Ha, T.T. 2014. Results and lessons learned from joint beach debris surveys by Asian NGOs. PICES, Yeosu, Korea Retrieved from. http://pices.int/publications/presentations/PICES-2014/2014-S8/S8-1045-SWHong.pdf.

Ricardo, G.F., Jones, R.J., Clode, P.L., Humanes, A., Gioffre, N., Negri, A.P. 2018. Sediment characteristics influence the fertilisation success of the corals *Acropora tenuis* and *Acropora millepora*. Marine Pollution Bulletin. 135:941 – 953.

Riechert, J., Schellenberg, J., Schubert, P., Wilke, T. 2018. Responses of reef building corals to microplastic exposure. Environmental Pollution. 237:955 – 960.

Webb, H.K., Arnott, J., Crawford, R.J., Ivanova, E.P. 2013. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly (ethylene terephthalate). Polymer 5:1 – 18.

Wright, S.L., Rowe, D., Thompson, R.C., Galloway, T.S. 2013. Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms. Current Biology. 23:1031 –1 033.

2021 S1-5 海洋マイクロプラスチック研究に関わるタイ南部の国際連携拠点の構築
-蛍光顕微鏡を用いたセイタカイソギンチャクによる 2.1 μm の蛍光ポリスチレン粒子の蓄積およびその排出過程の観察

研究代表者：　田中　周平(京都大学)

協力者; 京都大院・地環　石丸　佑樹、いであ株式会社　吉里　尚子、京都大院・地環　雪岡　聖、東京農工大・農　高田　秀重

1. 背景および目的

近年、マイクロプラスチック(粒径 5 mm 未満のプラスチック片、以下 MPs と記す)による生物への健康被害が懸念されており、曝露実験が行われている。イソギンチャクを対象とした実験も行われており、MPs 曝露による影響も報告されている[1)]。MPs の直接添加によるイソギンチャクの取り込みとその後の排出に関する報告はあるが、液中分散による実験とその際の取り込みに関する知見は少ない。本研究ではセイタカイソギンチャク(*Aiptasia* sp.、以下イソギンチャクと記す)に粒径 2.1 μm の蛍光ポリスチレン粒子を曝露し蛍光顕微鏡で触手中の粒子数を計数し、液中からの粒子の取り込みと排出を観察、その過程を検討することを主目的とした。

2. 実験の方法

イソギンチャクは実験室の恒温器内で半年以上飼育し、実験には 4 個体のクローンをそれぞれ用いた。曝露には粒径 2.1 μm の青色蛍光ポリスチレン粒子(Thermo scientific, 1.05 g/cm^3)を使用し、血球計算盤を用いて海水中の個数密度を調整した。実験は 2021 年 7 月および 8 月に 3 回、それぞれ約 1 週間行った。蛍光粒子の個数密度はそれぞれ 1.0×10^6 個/mL、5.0×10^6 個/mL、1.0×10^7 個/mL とした。実験対象の個体は実験の 24 時間以上前に 100 mL ビーカーにそれぞれ一個体ずつ移し、静置した。懸濁液は実験前に 5 分以上超音波洗浄器内に静置し、転倒混和を十分に行って懸濁を維持させた。実験開始とともに海水を懸濁液に置換し、24 時間静置して蛍光粒子を取り込ませた。飼育時のイソギンチャクの様子および蛍光粒子を取り込んだ様子を**図 1** に示す。観察には落射型蛍光顕微鏡を使用し、ビーカー内のイソギンチャクを下から観察して触手中の蛍光粒子数を計数し取り込み量の指標とした。大きさに個体差があったため、計数した触手中の蛍光粒子を触手体積で除して触手体積当たりの蛍光粒子個数を算出しデータを比較した。触手の体積は、イソギンチャクの触手を円錐と仮定し、実体顕微鏡で撮影したイソギンチャクの写真から触手の底辺と長さを計測して算出した。それぞれの個体の口径の長径と短径の平均値と触手体積を**表 1** に示す。曝露中は 8 時間毎に観察を行い、適宜ピペッティングにより懸濁を維持させた。曝露時の観察は一時的にイソギンチャクを海水で満たしたカップに移動させて行った。曝露終了時に蛍光粒子懸濁液を海水に置換し、その後は 24 時間ごとに水替えを行った。曝露終了後始めの 24 時間は 8 時間ごとに観察を行い、その後は 24 時間ごとの水替えの直前に観察を行った。

3. 結果および考察

3 回の実験における曝露 24 時間後のイソギンチャクの触手体積当たりの蛍光粒子の個数を**図 2** に示す。曝露 24 時間後、個数密度 1.0×10^6 個/mL 曝露時は平均 69 個/mm^3、最大 120 個/mm^3 となった。5.0×10^6 個/mL 曝露時は平均 390 個/mm^3、最大 720 個/mm^3 となった。1.0×10^7 個/mL 曝露時は平均 380 個/mm^3、最大 600 個/mm^3 となった。5.0×10^6 個/mL 曝露時のイソギンチャク触手内の粒子濃度は 1.0×10^6 個/mL 曝露時よりも高くなったが、1.0×10^7 個/mL 曝露時における触手内の粒子濃度とはあまり変わらなかった。

個数密度 1.0×10^7 個/mL 曝露時のイソギンチャクの触手体積当たりの蛍光粒子個数の経時変化を**図 3** に示す。実験開始後 120 時間で平均 83 個/mm^3、144 時間後には平均 26 個/mm^3 となり、曝露終了後 5 日で平均 90%以上の粒子が排出された。時間と共に徐々に粒子は排出された。曝露終了後に触手中の粒子が増加している個体があるが、体内に取り込んだ粒子が触手に分散した可能性が考えられる。

共生藻とともに排出された粒子が見られた。共生藻と共に排出された粒子の蛍光顕微鏡下の様子を**図 4** に示す。図の矢印に示すような粒が蛍光粒子であり、周囲に共生藻が見られた。粒

子排出時に共生藻をも排出している可能性が考えられ、粒子がイソギンチャクと共生藻の共生を阻害する可能性が示唆された。

４．まとめと今後の課題

本実験では、イソギンチャクが液中分散した蛍光ポリスチレン粒子を触手中に取り込んだ様子を観察することができた。クローン個体を蛍光顕微鏡で観察し触手中の蛍光粒子数の経時変化を計測することができた。曝露 24 時間後における触手中の蛍光粒子個数は 5.0×10^{6} 個/mL 曝露時は 1.0×10^{6} 個/mL 曝露時 よりも高かったが、1.0×10^{7} 個/mL 曝露時とはあまり変わらなかった。その後イソギンチャクは取り込んだ粒子を徐々に排出し、曝露後 5 日目には平均約 90%の粒子を排出した。

今後は長期間の曝露実験や異なる粒径の粒子を用いた実験、化学物質の吸着した粒子を用いた実験を行うことで、実環境中でイソギンチャクがどのように MPs を摂食、蓄積、排出していくのかについて検討を進める予定である。

参考文献：1)Nami *et al.*, 2018, Microplastics disturb the anthozoan–algae symbiotic relationship

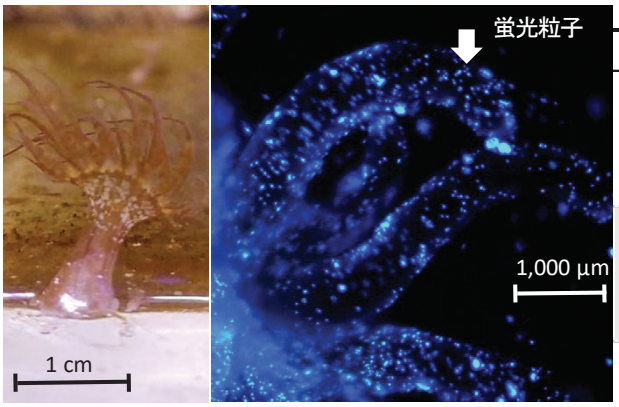


図1 飼育時のイソギンチャクの様子（左図）および蛍光粒子を取り込んだイソギンチャクの様子（右図）

表1 実験個体の口径と触手体積

曝露濃度（個/mL）	クローン元	口径（µm）	触手体積（mm^3）
1.0×10^{6}	①	1,016	0.35
	②	1,841	1.6
	③	1,518	0.40
	④	913	0.44
5.0×10^{6}	①	1,115	0.21
	②	1,462	2.8
	③	841	0.23
	④	1,072	0.50
1.0×10^{7}	①	904	0.37
	②	1,902	2.3
	③	913	0.28
	④	1,009	0.32

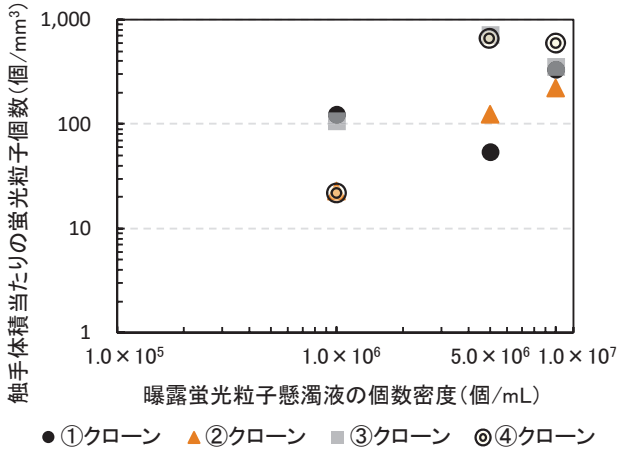


図2 曝露24時間後の触手体積当たりの蛍光粒子個数

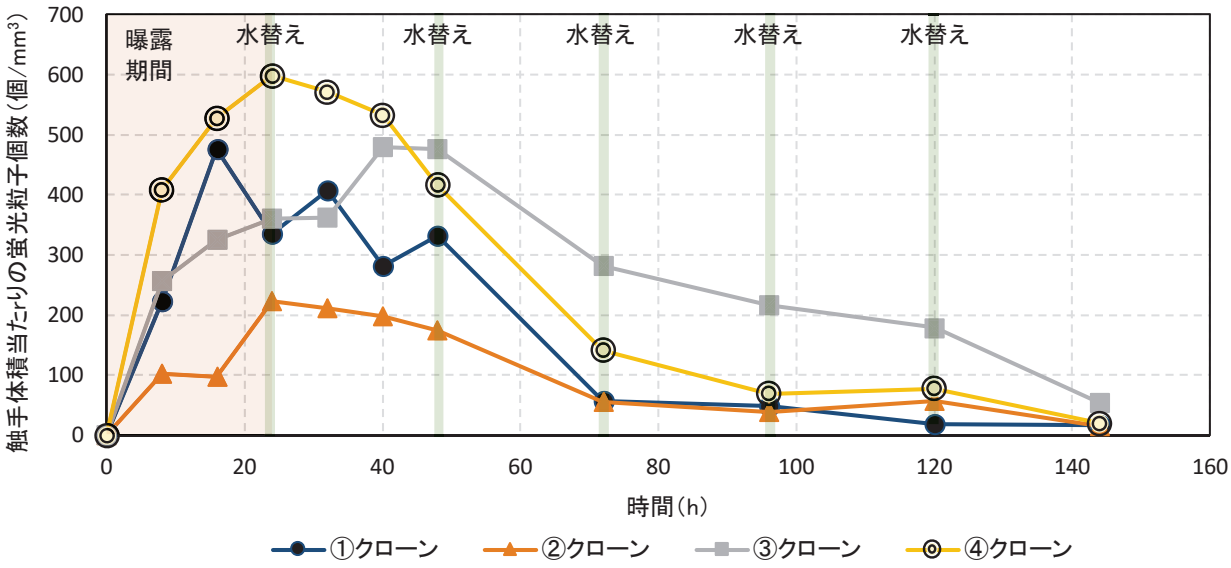


図3 1.0 × 10^7 個/mLで曝露した際のイソギンチャク触手体積当たりの蛍光粒子個数の経時変化

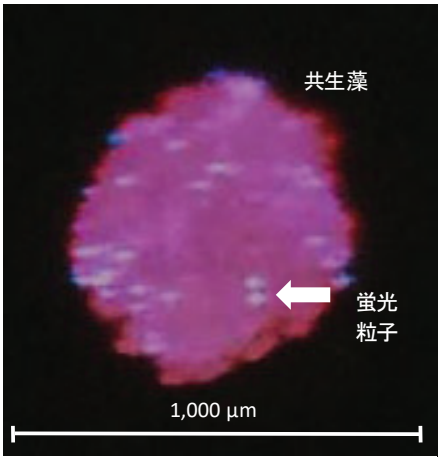


図4 共生藻とともに排出された蛍光粒子

特定研究２【分野融合】

波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング
Sensing, Mining and Modeling of Wave, Flow and Turbulence

統括責任者：稲垣 滋（核融合力学分野）

これまで液体・気体・プラズマの巨視的な物体の学理は進展しており、応用力学で用いられ、様々な工学分野で応用されています。しかし、近年、ミクロ構造の影響、流れ場における粒子の輸送、巨視的構造物との相互作用といった新たな謎に直面しています。本特定研究では、これらの謎を「波・流れ・乱流」で結びつけ、巨視的媒体の新たな学理の確立を目的とします。様々な分野で独自に開発されているセンシング技術、データマイニング技術、モデリングを更に発展させ、それらを統合することで共通化、普遍化を目指します。

2021 S2-1

時系列データに見られる短期的な不規則変動の分析

サブテーマ代表者：兵庫県立大学大学院 情報科学研究科 中村 知道

1 研究目的

超高温で磁場によって閉じ込められているプラズマの中では、密度と温度の勾配が普遍的に存在し、それによって乱流が形成される。プラズマを安定して閉じ込めるためには、この乱流の物理的性質を理解することが必要不可欠である。乱流は、プラズマ流体の密度、温度、電位等の物理諸量の不規則な振動として観測される。そのため、プラズマ流体が持つ性質を詳細に理解するためには、観測によって得られる時系列データを詳しく調べる必要がある。本研究課題代表者（中村 知道）は、時系列データの特徴を統計的に分析する手法を開発し、実データへ応用を行っている。本研究の目的は、様々な統計的な分析手法を磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波乱流の大容量時系列データに応用し、新たな知見を得ることである。

2 現在までの研究結果

2021 年度の研究では、尾崎や北川らによって開発された局所定常自己回帰モデル [1, 2] を、直線プラズマ装置におけるプラズマ乱流の実験データ解析に適用した。この手法によって、線形的な視点でプラズマ乱流が持つ定常性と非定常性の調査を行うことが出来る。その結果、調査に用いたプラズマデータは、複数の定常区間によって構成されることが分かった。また、同時に測定された他のチャンネルのデータと分析結果を比較したところ、定常性を示す区間の長さや時間など異なる結果を示したことから、プラズマ乱流が持つ非一様性の特徴の一部が検出できたと考えられる。

本研究は単なる既存手法の適用ではなく、64 チャンネルで測定されたプラズマ乱流の振る舞いについての理解も必要となるため、応用力学研究所のスタッフと議論を重ねながら、更なる分析を進めていく予定である。

3 今後の研究の方向について

プラズマ乱流は、非線形波動、大小様々な渦によって構成され、その振る舞いも複雑である。複雑な振る舞いを見せる現象を理解するための第一歩は、その現象の基本的かつ本質的な特徴を正確に把握することである。その現象が動的であるとき、そのような特徴の 1 つに周波数（周期）成分がある。プラズマ乱流の時系列データから周波数解析やスペクトル解析を行うには、 2 つのことが強く望まれる。 1 つは、時系列データに存在するあらゆる周期が検出できることが理論上は（または、理想的な状況においては）保証されている方法であること、もう 1 つは、得られるスペクトルが滑らかで、周波数やスペクトル指数といったデータや現象の特徴を明確かつ容易に読み解くことが出来ることである。そのため、統計的モデルである Redecued Auto-Regressive model を用いた分析を行う [3]。この分析を行うことで、ミクロスケール揺動、メゾスケール揺動、マクロスケール揺動に関する理解が深まるとともに、新しい知見を得ることが出来ると考える。また、これらの分析は、昨年度実施した非定常分析の精度の向上にも貢献することが出来る。

4 研究成果発表

- 中村 知道, “局所定常自己回帰モデルを用いたプラズマデータの分析”, プラズマインフォマティクス研究会、2021 年 1 月 29 日（金）、ZOOM オンライン会議（口頭発表）
- 中村 知道、稲垣 滋 “局所定常自己回帰モデルを用いたプラズマデータの分析”, 第 38 回 プラズマ・核融合学

会 年会、2021 年 11 月 22 日（月）～25 日（木）、オンライン会議（口頭発表）

5　研究組織

研究代表者　兵庫県立大学大学院 情報科学研究科 中村 知道
所内世話人　九州大学 応用力学研究所 稲垣 滋

参考文献

[1] T. Ozaki and H. Tong: “On the Fitting of Non-stationary Autoregressive Models in Time Series Analysis,” Proceeding of the 8th Hawaii International Conference on System Science, Western Periodical Co., pp. 224-226, 1975.

[2] G. Kitagawa and H. Akaike: “A procedure for the modeling of non-stationary time series,” Annals of the Institute of Statistical Mathematics volume 30, pp. 351-363, 1978.

[3] T. Nakamura, M. Small and T. Tanizawa: “Long-range correlation properties of stationary linear models with mixed periodicities”, Physical Review E, 99, 022128, 2019.

直線型ヘリコン波プラズマ装置のパラメータ比較および共通する物理課題の検討

日本大学生産工学部　荒巻光利

1. 目的

日本大学生産工学部では，基礎プラズマ実験を目的とした直線型のヘリコン波プラズマ装置を構築しており，令和 3 年度の稼働開始を予定している．この装置は，良好な光学アクセスが可能となるよう設計されており，申請者等が開発している光渦分光法，ゴーストイメージング分光法等の先進的な分光測定系により，プラズマパラメータを詳細に測定することができる．本研究は，新規に構築される日本大学のヘリコン波プラズマ装置と九州大学応用力学研究所の乱流プラズマ実験装置(PANTA) を用いた将来の共同研究の課題設定に向けて，両装置のパラメータ比較，実験環境の情報交換および共通の物理課題の検討を目的とする．

2. 装置のパラメータ比較とプラズマ分光に関する情報交換

図 1 に日本大学で開発中のプラズマ装置を示す．プラズマドリフト領域の直径が 200mm，長さが 1150mm の直線型装置で，磁場 0.04~0.1T の範囲で水素，ヘリウム，アルゴンを動作ガスとしたプラズマ実験を計画している．ヘリカル型アンテナに 13.56MHz の高周波電力を供給し，ヘリコン波プラズマを生成する．高周波電力の最大値は 3kW である．動作ガスを変更することにより，PANTA で生成したアルゴンプラズマと同程度の磁化プラズマから，非磁化プラズマまでの複数のプラズマ状態の実験が可能となる．また，アルゴン原子，イオン，ヘリウム原子の速度分布関数を測定するための波長可変レーザーも作製中である．これらを光源とした光渦分光法，ゴーストイメージング分光法等，先進的な分光法を活用することで PANTA との比較実験を行う予定である．

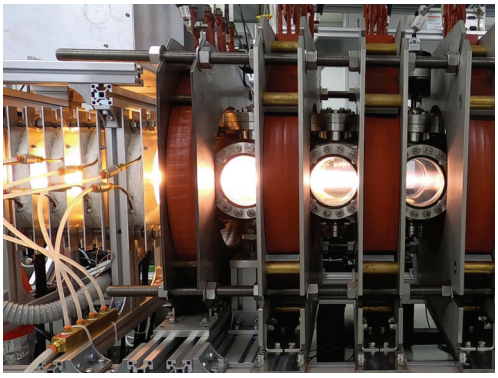


図 1　開発中のヘリコン波プラズマ源．

本共同研究での議論によって，プラズマ中の電子，イオン，中性原子の位相空間構造を観測することの重要性が再確認された．プラズマの基礎・核融合研究において重要なテーマである乱流，輸送，不安定性，再結合等の様々な現象は，位置および速度を座標軸とする 6 次元の位相空間における粒子分布によって駆動されるため，位相空間における粒子分布の構造を明らかにすることは，プラズマが関わる様々な現象を理解する上で重要な課題である．申請者のグループでは，プラズマの大域的な位相空間構造を明らかにすることを目的として，光の強度の空間構造を制御して利用するゴーストイメージング吸収分光法を開発している．

ゴーストイメージング吸収分光法は，情報フォトニクスの分野で開発されたゴーストイメージングの技術を応用して，空間 3 次元と速度 1 次元の位相空間構造を測定できる．この分光法は，光学アクセスに対する要求が少なく，SN 比の向上および測定系のコストを大幅に抑えられるといった特徴がある．

この分光法の基礎となる計算機ゴーストイメージングの基本的な測定系を図２に示す．ゴーストイメージングでは，２次元撮像デバイスを用いることなく，空間的に分解能を持たない点型光検出器のみで２次元画像が得られる．計算機で生成したランダムな光強度分布$I_r(x,y)$を持つ構造化照明生成する．この構造化照明をプローブ光として，透過率分布$T(x,y)$の測定対象に照射する．透過光をレンズで集光（空間積分）してフォトダイオード等の点検出器で積分値$b_r(=\iint I_r(x,y)\,T(x,y)dxdy)$を測定する．$I_r(x,y)$の構造をランダムに変化させながらこの過程を繰り返し，以下の演算を行うことで，測定対象の透過率分布像$T(x,y)$を得るのがゴーストイメージングの原理である．

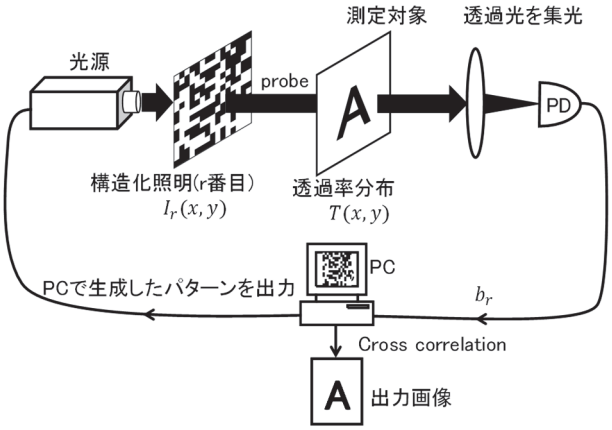


図2 ゴーストイメージングの基本的な測定系．

$$\langle b_r I_r(x,y)\rangle = \frac{1}{n}\sum_{r=1}^{n}\left(\iint I_r(x',y')T(x',y')dx'dy'\right)I_r(x,y)$$

$$\propto \iiint I_r(x',y')I_r(x,y)T(x',y')dx'dy'dr \quad (\because n\to\infty) \approx T(x,y)$$

一般的なゴーストイメージングに用いられる構造化照明は，図３(a)に示すように結像面を持たない．従って，プラズマのように厚みのある吸収体（あるいは反射体）に適用した場合，一般的な吸収分光と同様に，相互作用を積分した情報しか得られない．申請者等は，結像系を導入した構造化照明を用いることで，従来のゴーストイメージングに新たな機能を追加することを提案している．図３(b)に示すように，照明が所望の構造で結像する範囲を結像面前後の焦点深度内に限定する．従って，この光源をゴーストイメージングに適用した場合，焦点深度内でプラズマと相互作用した成分のみが構造化照明との相関計算により抽出され，吸収分光でありながら視線方向に空間分解能を持った断層測定が可能となる．さらに，結像位置を掃引することで，測定対象の 3 次元密度分布が得られる．また，光源の波長を掃引してドップラー分光を行うことで，構造化照明の伝播方向の速度分布関数も測定できるため，本測定法では空間 3 次元と速度 1 次元の測定が可能となる．

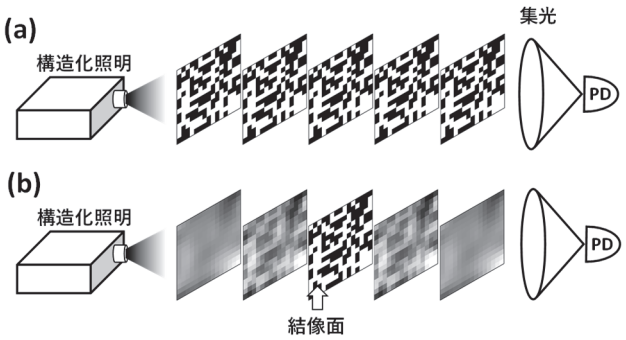


図３　(a)ゴーストイメージングの一般的な構造化照明，(b)結像系により空間分解能を持たせた構造化照明．

今後は，これらのプラズマ源および分光法の開発を進め，PANTA との比較実験へと発展させる予定である．

機械学習を用いたマイクロ波イメージング再構成手法の研究

兵庫県立大学大学院工学研究科電気物性工学専攻　古賀麻由子

1. 目的 核融合プラズマにおいて重要な役割を果たす乱流研究にはイメージング計測が不可欠である。本研究で提唱しているレンズレスマイクロ波イメージングとは、プラズマからの反射波を結像光学系（レンズ）のない2次元アンテナ群で受信し、複素振幅の測定値から計算によって、3次元画像を得ることができる計測法である。一方向からの計測で対象物の3次元情報を得ることができる本手法は、計測ポートが限られる大型装置での研究において非常に強力な計測手段となり得る。計測の原理として逆問題解法の数理は提唱されているが、逆問題を解くために必要なマイクロ波伝搬のモデルは仮定された状態であり、またその解法にも大きなコンピュータコストがかかる。本申請共同研究は、この逆問題解法に機械学習を導入できるかの検討を行っている。

2. 実験方法 機械学習には多くのサンプルデータが必要である。将来的にはPANTAなどの実際のプラズマによるサンプルデータを取得することが望ましいが、まずは答えが明確である電磁界計算モデルを使って多数のサンプルデータを生成し、これを教師データとすることとした。九州大学応用力学研究所の糟谷准教授より提供いただいた PANTA の密度シミュレーションデータを参考として反射率分布を作成し、プラズマ反射面とした。図1にいただいた密度分布データを、図2に反射率分布の一例を示す。マイクロ波を反射させるため、あえて反射率は高く設定している。株式会社アドバンステクノロジーの電磁界解析ソフト Efield により取得した伝搬関数データを用いて、この反射面にマイクロ波を照射した場合の反射波データを作成した。

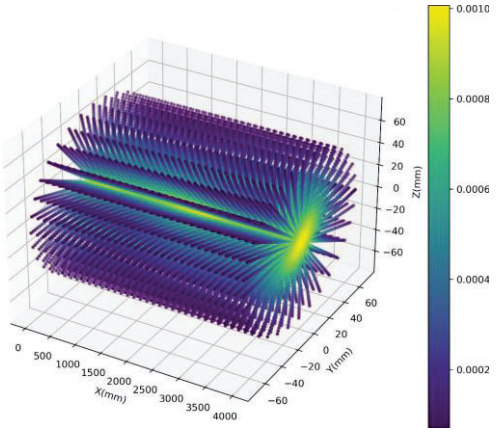


図1　PANTAの密度分布シミュレーションデータ

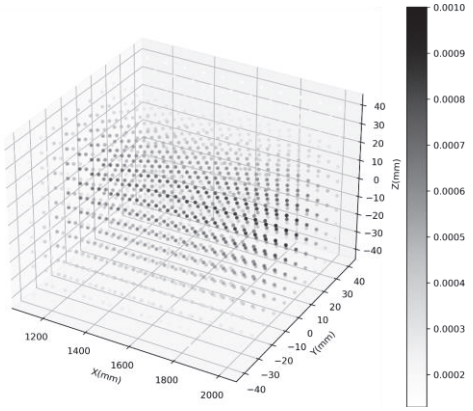


図2　反射率分布の一例

3. 実験結果 機械学習を行う前に数学的手法により逆問題を解くことができるかを確認した。ここで図3のような、誘電体で構成された微小な立方体(voxel)が集まってできた立体を考える。図のようにボクセル一つ一つが反射率 f を持っているとし、第 n ボクセルの反射率を f_n とする。マイクロ波の受信アンテナの数を M、ボクセルの数を N、n 番目のボクセルで散乱し m 番目のアンテナで受信したときの伝搬関数を h_{mn} とすると伝搬関数、反射率 f、受信信号 $\boldsymbol{g}$ は以下のように書ける。

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

伝搬関数 h_{mn} で構成される複素行列 $\mathbf{H}$ が正則である場合、式(1)は $\mathbf{H}$ の逆行列 $\mathbf{H^{-1}}$ を両辺の右側から掛けることにより $\boldsymbol{f} = \mathbf{H^{-1}}\boldsymbol{g}$ とすれば求まる。しかし複素行列 $\mathbf{H}$ が正則でない場合、一般逆行列の一種であるムーア・ペンローズの逆行列を用いる。行列 $\boldsymbol{A}$ の逆行列を $\boldsymbol{A}^{-}$、転置行列を $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ とするとき、ムーア・ペンローズの逆行列 $\boldsymbol{A}^{+}$は次の式で求まる。

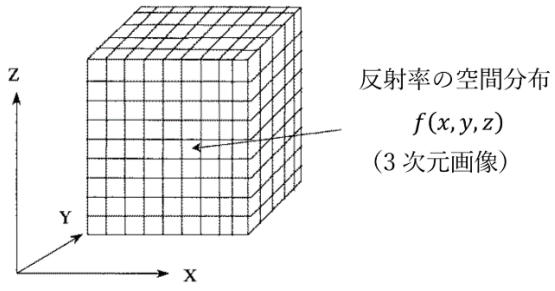


図 3 微小立方体(voxel)のイメージ

$$\boldsymbol{A}^{+} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\right)^{-}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \quad (2)$$

よって式(1)と式(2)を用いて $\boldsymbol{f} = \mathbf{H^{+}}\boldsymbol{g}$ とすれば複素行列 $\mathbf{H}$ が正則でない場合であっても解くことが可能である。

式(1)について、最小二乗法である $\|\mathbf{H}\boldsymbol{f} - \boldsymbol{g}\|^2/M \to min$ を用いると次の正規方程式が得られる。

$$(\mathbf{H}^{*}\mathbf{H})\boldsymbol{f} = \boldsymbol{H}^{*}\boldsymbol{g} \quad (3)$$

係数行列 $\mathbf{H}^{*}\mathbf{H}$ は M<N のときには必ずランク欠損となり、一般的に悪条件となる。ここで Tikhonov の正則化を考えると、正則化の複数項、つまり乗数 γ_j(>0)と正方行列 Cj の集合を持つラグランジュ関数を使用することで、次のような制約付きの最小化に拡張することができる。

$$\frac{1}{M}\left|\left|\mathrm{H}f - g\right|\right|^2 + \sum_j \gamma_j \left|\left|C_j f\right|\right|^2 \to min \quad (4)$$

本研究では、正則化項としている行列 C に単位行列を用いたものと、単位行列とラプラシアン行列の双方を用いたもので再構成した。また、γ の値を変化させ、最尤解を探索する指標である GCV (Generalized Cross Validation:一般化交差検証)の値を参考に最尤再構成結果を探索した。

図 4 に数学的手法により再構成したプラズマ反射面を示す。図 2 と見比べると、精度よく再現されていることがわかる。一般逆行列、単位行列のみを用いた Tikhonov の正則化、単位行列とラプラシアン行列を用いた Tikhonov の正則化、いずれの場合も大まかな密度分布は再現できるが、単位行列とラプラシアン行列を用いた Tikhonov の正則化が最も設定データとの平均二乗誤差が小さいという結果となった。これらの結果から、PANTA の密度分布シミュレーションデータを基にプラズマ反射面を設定し計算した受信データから画像再構成を行うことは原理的に可能であることが示された。今後は多数の受信データを作成して教師データとし、機械学習による画像再構成を試みたいと考えている。

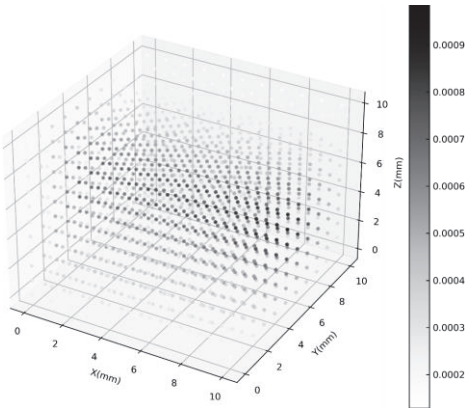


図 4 数学的手法により再構成したプラズマ反射面
(単位行列とラプラシアン行列を用いた Tikhonov の正則化を使用)

分野融合研究会

応用力学研究所　稲垣　滋

本研究は「特定研究 2: 波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング」における個別課題の成果の統合を議論する。

目的と背景

応用力学研究所は 3 つの研究分野から構成されている。そこで本研究所ならではの分野融合領域研究の開拓が求められている。プラズマ、大気海洋、新エネルギーに共通したキーワードとして流体力学が挙げられる。特に多くの流体（多成流、多相流、反応流を含む）で普遍的に観測され、エネルギーや物質の輸送に大きな影響を与える波・渦・流れに着目する。本研究では、それぞれの領域で発展してきたこの波・渦・流れ、を観測（センシング），解析（データマイニング，可視化），物理過程の抽出（モデリング）に関する情報交換及び議論を行う場を提供する事を目的とする。更には多くの分野で共通の手法となり得るデータサイエンスの導入についても議論する。そのため研究集会を開催し、特定研究 2 のサブテーマリーダー及び流体・統計情報を扱う多方面からの研究者が一堂に会して議論する機会を設ける。個別のアプローチを統合することで、研究手法そのものに新たな展開がもたらされることが期待できる。

研究集会の開催

日時:2 月 4 日 13:30-17:10

場所:online

プログラム:

13:30 非平衡開放システムにおける時空間ダイナミクスの研究

佐々木 真（日本大学）

13:50 定常状態プラズマにおけるイオン速度分布関数のベイズ推定

徳田 悟（九州大学）

14:10 LIF を用いた直線装置 PANTA における高精度中性粒子およびイオン流速計測

寺坂 健一郎(九州大学)

14:30 直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析

山田 琢磨(九州大学)

14:50 時系列データに見られる短期的な不規則変動の分析

中村 知道(兵庫県立大学)

休憩

15:30 機械学習を用いたマイクロ波イメージング再構成手法の研究

古賀 麻由子(兵庫県立大学)

15:50 プラズマ流 2 次元測定のためのマイクロ波センシングレーダーの開発

徳沢 季彦(核融合科学研究所)

16:10 医療用 CT・MRI 技術を応用したプラズマ乱流計測

荒川 弘之(島根大学)

16:30 プラズマ中光捕捉微粒子の位置揺らぎの解析

古閑 一憲(九州大学)

16:50 流体波動の局所分離と不安定解析に関する研究

大貫 陽平(九州大学)

予算の執行

旅費としての共同研究予算使途を変更し、研究の消耗品購入に使用した。

LIFを用いた直線装置PANTAにおける高精度中性粒子およびイオン流速計測

九州大学総合理工学研究院　寺坂健一郎

目的

本研究の目的は，乱流プラズマにおける流れ構造の形成に対して中性粒子が果たす役割を解明することである．近年の研究から，種々のプラズマにおいて流れ場の構造形成が報告されている[1,2]．より近年の研究[3]で，中性粒子分布に応じて最終的なイオン流分布が変化することが理論的に予測されている．本研究では，理論検証のために必要となるイオン流速と中性粒子流れをレーザー誘起蛍光ドップラー分光法（LIF）により計測する．高精度な光科学技術をプラズマに導入した先進的な実験から，理論的に予測されている最小エンストロフィー状態が実際にプラズマで実現されるかどうかという未解決課題の解明を最終目的とし，自由度の高い高精度 LIF 計測システムの構築を目的とした研究を行った．

昨年度は，LIF 計測に実績のある直線装置 HYPER-II (九州大学・総理工) を利用し，プラズマ中のイオンおよび中性粒子計測に適用できる時間分解可能な LIF システムを構築した．本年度は，このシステムを基に PANTA 装置 (九州大学･応用力学研究所) に導入された LIF システムを改良した．また，PANTA を用いたプラズマの波動や不安定性に対する中性粒子効果について実験検証に向けた検討を行った．

結果

図1に PANTA 装置における LIF システムの概略図を示す．光源 (波長可変半導体レーザー) をはじめとする基本的な光学システムは昨年度までに構築したLIFシステムと同様である．本年度は光源から出射されたビームをシングルモードファイバーに結合し，装置へ伝送するシステムを導入した．この改良により，①実験時の光学系の安定化，②目的に

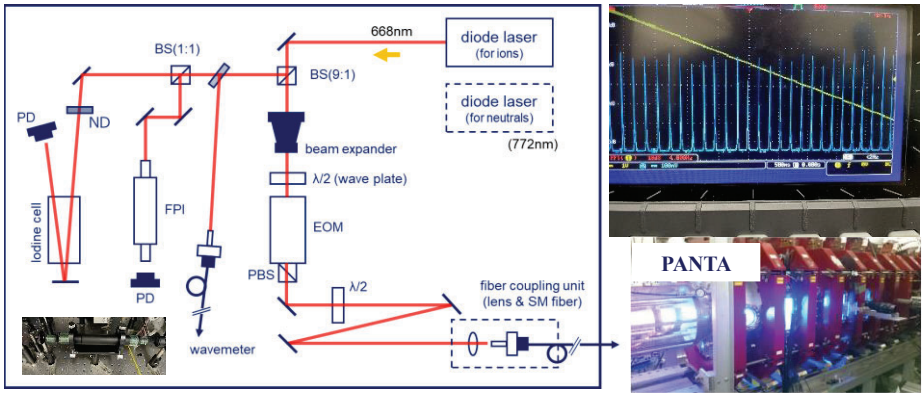


図 1. ファイバー伝送式を採用した LIF システムの概略図．　右上の写真は本年度製作した FPI からの干渉波形．

応じたレーザー入射位置 (入射ポート) の自由な選択が可能となった.

また, 本年度は凹面鏡を用いた共焦点型のファブリ・ペロー干渉計 (FPI) を新しく製作した. 本干渉計の FSR (free spectral range) は 300 MHz で対象とするイオンや中性粒子のスペクトルよりも十分狭い信号間隔に設計した (図1右上写真). これにより, レーザー周波数掃引時のモードの確認を行いながら高精度な周波数較正を行うことが可能となった. 初期実験では, 本年度改良したファイバー伝送式の LIF システムを用いて従来 (ミラー伝送システム [4]) と同程度の信号強度で計測が可能であることが確認した.

まとめと今後の展望

昨年度からの共同利用研究によって, PANTA 装置でイオンや中性粒子の速度分布関数 (流速・温度) を計測可能な LIF システムを構築した. 本年度改良したファイバー伝送式の LIF システムでは計測位置や計測方向を自由に選ぶことが出来るため, 自由度の高い実験が可能である. 本共同研究を通して, 今後のPANTAにおける主要な診断法となる計測システムを構築できたと結論付けられる.

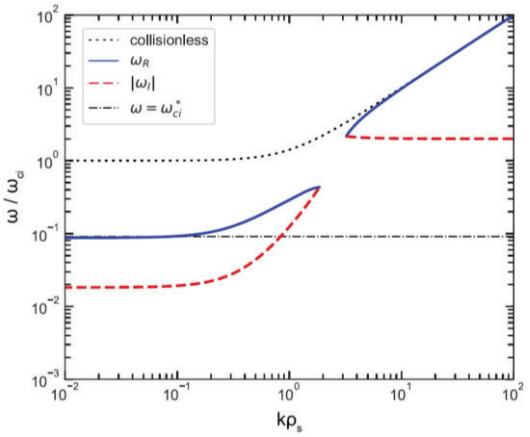


図 2. 波動場中の中性粒子の運動を考慮した場合の EIC 波の分散関係[5].

プラズマ中の中性粒子が波動伝播や不安定性に与える影響の実証に向けた検討を進めている. 図2 は静電イオントロンサイクロトロン波 (EIC波) における中性粒子挙動の効果を示す新しい結果である. PANTAにおける予備実験では, 中性粒子を多く含む放電条件で, EIC波帯の揺動が励起されることが確認されており, LIF システムを用いた中性粒子計測が明らかにされると期待される. 応用力学研究所の共同研究を通じて, プラズマの新しい性質を明らかにするための高精度な測定システムの整備ならびに理論的な提案や実験提案を行うことが出来た.

参考文献

[1] K. Terasaka *et al*., Phys. Plasmas **23**, 112120 (2016).

[2] S. Inagaki *et al*., Sci. Rep. **6**, 22189 (2016).

[3] Y. Kosuga *et al*., Plasma Phys. Control. Fusion **62**, 105002 (2020).

[4] S. Tokuda *et al*., Sci. Rep. **11**, 20810 (2021).

[5] K. Terasaka et al., Phys. Plasmas **29**, 022103 (2022).

流体波動の局所分離と不安定解析に関する研究

九州大学応用力学研究所 大貫陽平

目的

海洋や大気中には、重力・密度成層・地球自転の効果を受け、重力波・Rossby 波・慣性波といった様々な種類の波動成分が存在する。これらの波動は、エネルギーや運動量を遠方へ運び、大きなスケールの流れ場と相互作用することで、惑星規模の大気循環の形成に対して重要な役割を果たしている。あるいは、不安定を起こして微細な乱流を生成し、密度混合を促すことで、海洋の深層循環の駆動においても一翼を担っている。地球環境システムの理解向上に向け、波動現象が果たす役割を詳細に明らかにしていく必要がある。興味深いことに、地球物理に見られる流体現象と、プラズマ物理で対象とする現象には類似点が多い。例として、大規模な流れ場が不安定を起こし、乱流を生み出す過程や、微細な波動や乱流からの大規模な流れ構造の自発的発達は、それぞれの分野で注目度が高く、共通のテーマである。本研究では、申請者がこれまでに開発を進めてきた、地球流体波動の局所分離解析や局所不安定解析の技術を軸に、プラズマ物理学者との闊達な議論を通じて、種々の流体現象に共通した普遍性の高い知見を得ることを目指す。地球科学とプラズマ物理学の双方の研究者が顔を揃える応用力学研究所だからこそ実施可能な課題である。

本年度は、海洋上層のサブメソスケール現象において、楕円渦の不安定による波動のパラメトリック励起現象(楕円不安定)を研究の対象とした。楕円渦の不安定性は従来、線形解析によって議論されてきたが、本研究では最新の計算技術を利用して非線形性を考慮に入れたシミュレーションを実施し、波動の散逸過程を詳細に明らかにすることを目指した。

方法・結果

一様に密度成層した f 平面上の Boussinesq 流体において、楕円型の流線構造を持つ順圧渦流の内部に励起される波動の非線形発展を、数値シミュレーションで検証した。計算にあたっては、代表者が開発を進める時間変動座標系を利用したフーリエ・スペクトルモデル(Onuki et al. 2021)を用いることで、渦流の空間構造を直接解像することなく、重力波の砕波と微細な乱流の再現性に計算資源を割けるよう工夫した。線形安定性解析によって、回転率や渦の形状、擾乱の波数ベクトルの傾斜角に依存した不安定成長率の値を事前に見積もり、最大波長成分の重力波が最速で成長するよう計算領域の形状を調整した。格子点間隔が時間とともに変化するという特殊な状況においても、安定して計算が実施できるよう、最大波数成分付近のエネルギーレベルに応じたサブグリッド粘性モデルを開発し、その性能の検証を入念に行なった。シミュレーションの実施には、東京大学情報基盤センターの Wisteria/BDEC-01 スーパーコンピュータシステムを利用した。

背景渦の強さや形状を変化させ、幅広いパラメータ設定で計算を実施した。その結果、重

力波の散逸メカニズムには、不安定成長率に依存して、大規模な密度逆転を伴う強非線形的な砕波と波動間の弱非線形相互作用を通じた間接的な砕波という、二種類のシナリオが存在することを明らかにした(図)。後者のシナリオでは、三波共鳴相互作用の一種である parametric subharmonic instability によって低周波数成分へエネルギーが輸送され、やがて現実海洋に見られる Garrett-Munk スペクトルに似た構造の準定常周波数スペクトルが形成されるに至った。

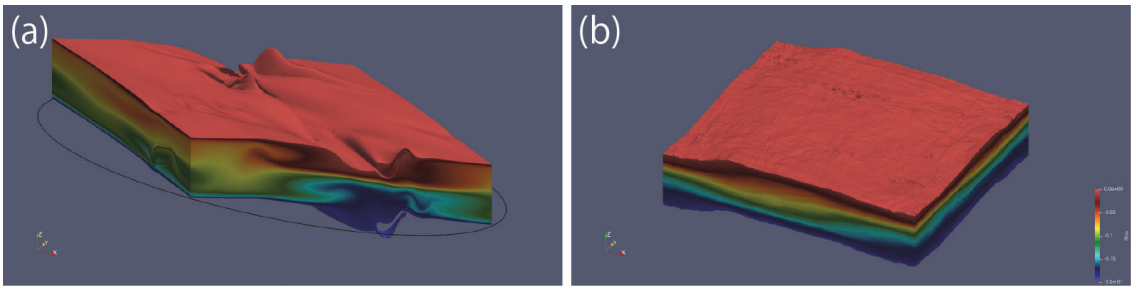


図: シミュレーション結果の一例。等密度面の上下変位と計算領域側面での密度の値を可視化している。実験パラメータは、(a)背景渦の相対渦度/惑星渦度＝1.0、楕円渦の長軸/短軸比=2.5、浮力振動数/慣性振動数=3、(b)背景渦の相対渦度/惑星渦度＝0.9、楕円渦の長軸/短軸比=1.1、浮力振動数/慣性振動数=10。

分野間の意見交換

プラズマ物理分野の研究者らにオンラインでシミュレーション結果を紹介し、意見交換を行なった。その中で、密度成層や回転の有無、対象とする現象の空間スケールや時間スケールが、不安定性の条件にどのように影響するかについて検討をした。また、エネルギーカスケードの方向が反転する可能性について提起があり、地衡流成分と波動成分のエネルギー分配の観点で議論をした。最後に、核融合プラズマにおいても長寿命の渦構造が存在することが指摘され、プラズマにおける楕円渦の不安定性を今後の課題として位置付けた。

研究組織: 大貫陽平, 稲垣滋, 小菅佑輔(九大応力研), 佐々木真(日本大学)

成果報告:

(査読論文)

Onuki, Y., Joubaud, S., & Dauxois, T. (2021). Simulating turbulent mixing caused by local instability of internal gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 915, A77. doi:10.1017/jfm.2021.119.

(研究発表)

大貫陽平, Sylvain Joubaud, Thierry Dauxois, 楕円渦の内部にパラメトリック励起される重力波の砕波シミュレーション, 2021 年度 日本海洋学会秋季大会, 21F-02-6, p27, 2021 年 9 月 14 日, オンライン.

プラズマ流 2 次元測定のためのマイクロ波センシングレーダーの開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部　　徳沢季彦

1. 目的

乱流は、自然界において普遍的に観測される物理現象であるが、磁場閉じ込め核融合プラズマ研究においても種々の乱流による物理現象の理解は最重要研究課題の一つである。高温のプラズマ内部の非等方なプラズマ流の情報は、この乱流物理現象を理解する上で非常に重要である。そこで我々は、マイクロ波を用いた新しい非接触な計測手法の開発を行い、高精度な時空間構造を観測し、乱流とプラズマ流との関係を調べることを目指している。

現在、九州大学の新しいトカマク実験装置 PLATO にて、半径方向およびポロイダル方向の 2 次元測定を目指したマイクロ波計測器の開発を行っている。以下にポロイダル方向の測定を高精度に行うための新しいドップラー反射計用のアンテナについて報告する。

2. 周波数走査型フェーズドアレイアンテナ

マイクロ波ドップラーレーダは、物体の速度計測手法として、広く用いられているが、プラズマ中の特定波数の乱流成分によって生じる散乱を観測することで乱流の速度を求めることができる。特に、申請者らが開発した周波数コムを用いた多周波数同時発生技術と組合せることで、同時に様々な半径方向位置でのポロイダル速度情報を得ることができる。ただし、散乱波数スペクトルを得るためには送信・受信アンテナの方向(すなわちマイクロ波ビームの入射方向)を変化させる必要がある。これまで、アンテナを走査するには実際にアンテナを動かすという手法がとられてきたが、情報通信の分野などでも用いられているフェーズドアレイの原理を応用すれば、アンテナは固定のままでも、ビーム走査が可能となる。

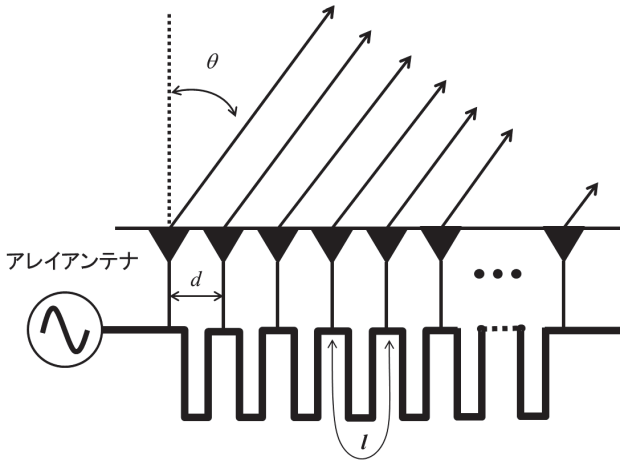


図 1：フェーズドアレイアンテナの原理

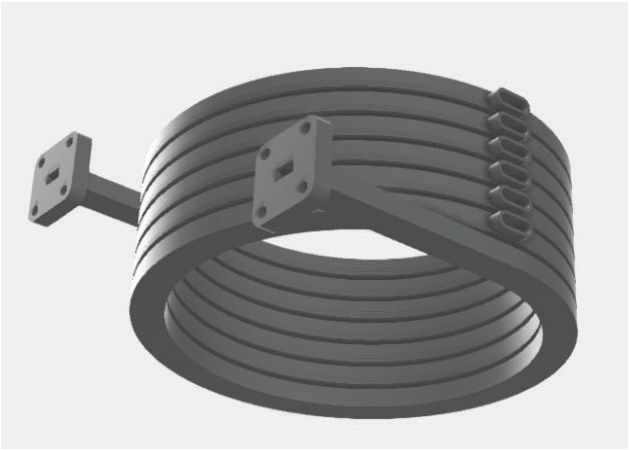


図 2：6 素子アレイアンテナのデザイン図

図 1 に導波路を用いたフェーズドアレイアンテナの原理図を示す。放射角 θ は、マイクロ波の波数 k, 導波路中の波数 k_g、導波路の光学的長さ l, アンテナ間隔 d を用いて、$\theta = sin^{-1}(-\frac{k_g}{k}\frac{l}{d})$ と書き表される。したがって、波数を変化させれば任意の角度に放射が可能となる。このような構造のアレイアンテナを構築するため図 2 に示すような漏れ波アンテナ構造を用いた 6 連のアレイアンテナをデザインし、金属 3D プリンタを用いて製造して、アンテナの周波数による放射角度の制御性能を評価した。

まずこのアレイアンテナでマイクロ波ビームが狙った方向に放射できるのか調べた。図 3 にアンテナに入力した周波数毎のビーム放射パターンを示す。角度ゼロがアンテナから直角に放射されていることを意味しており、周波数を変化させることで放射角度を約±20 度変化できていることがわかる。ドップラーレーダとして用いる際には、散乱波のドップラーシフト周波数を求めることになるため、模擬試験として、回転速度が一定のドラムを散乱対象として、ドップラーシフト周波数を求めてみた（図 4）。このように入射周波数によってドップラーシフト周波数は線形に変化しており、これはアンテナから放射されたビームの角度が制御できていることを示している。今後、このアレイアンテナを用いてプラズマの計測へと適用を行うため準備を進めている。

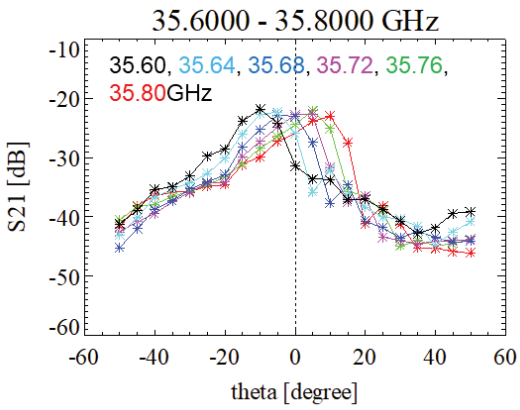


図 3：周波数の違いによるビーム放射分布。

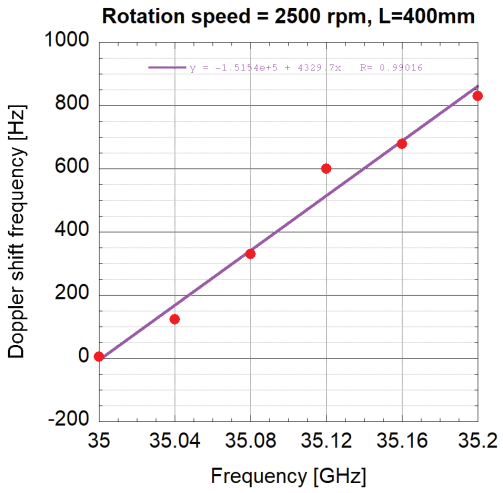


図 4：回転ドラムを用いた模擬試験で得られた、マイクロ波周波数毎のドップラーシフトの違い

3. 論文と学会発表

次の学会にて発表を行った。

1. Tokihiko Tokuzawa, T. Tsujimura, M. Nishiura, H. Igami, S. Inagaki, K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, K. Tanaka, Y. Goto, Y. Takemura, A. Ejiri, I. Yamada, and LHD Experiment Group, “Controlled turbulence excitation in LHD plasma edge region”, 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Remote e-conference@Sep.26-Oct.1,2021
2. Tokihiko Tokuzawa, “Introduction to LHD diagnostics”, International Conference on DIAGNOSTICS FOR FUSION REACTORS @Villa Monastero, Varenna, Italy, September 6 -10, 2021"
3. Tokihiko Tokuzawa, S. Inagaki, K. Ida, T. Tsujimura, K. Tanaka, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, M. Nishiura, H. Igami, Y. Goto, Y. Takemura, A. Ejiri, I. Yamada, and LHD Experiment Group, “Turbulence spreading controlled by edge ECH heat deposition”, Asia-Pacific Transport Working Group Meeting, US-EU Transport Task Force Workshop (APTWG & US-EU TTF 2021) @ Jul. 6-9, 2021
4. Tokihiko Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, and LHD Experiment Group, "Electron scale turbulence responses in deuterium and hydrogen plasmas in LHD", 47th EPS Conference on Plasma Physics @21 - 25 June 2021, P5.1072.
5. 徳沢季彦, 辻村　亨, 西浦正樹, 伊神弘恵, 稲垣滋, 居田克巳, 小林達哉, 吉沼幹朗, 田中謙治, 後藤勇樹, 武村勇輝, 山田一博, LHD 実験グループ, “LHD プラズマ周辺部における乱流伝播励起実験”, 日本物理学会 2021 年秋季大会 @2021 年 9 月 20～23 日 22pB2-9.

論文発表

1. T. Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, T. Saito, K. Yamamoto, and LHD Experiment Group, “W-band millimeter-wave back-scattering system for high wavenumber turbulence measurements in LHD”, Review of Scientific Instruments, vol.92 043536 -1 -4.

医療用 CT・MRI 技術を応用したプラズマ乱流計測

島根大学学術研究院理工学系　荒川弘之

背景と研究目標

応用力学研究所直線磁化プラズマ発生装置 PANTA では，乱流の時空間構造を高速に測定することが必要とされ、近年では、乱流への摂動がない、CT(コンピューテッド・トモグラフィー)技術を応用した手法やレーザーによる乱流測定手法の開発が進められている。本研究では、医療分野で開発が進められている圧縮センシングによる MRI・CT 手法を、レーザーによるプラズマ乱流計測に適用を行うための基礎的な検討を行う。

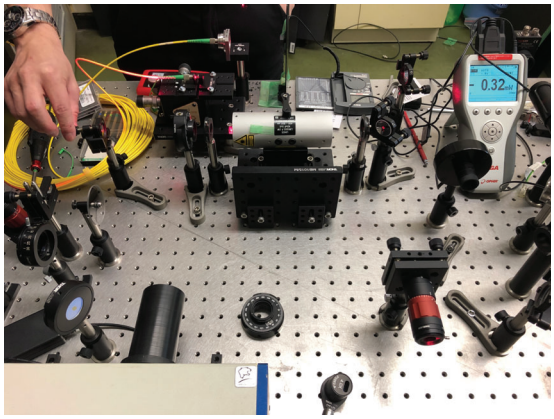
これまでの研究で、ベクトル CT 技術を用いることで、プラズマ流れの２次元観測が可能であることをシミュレーションにより確認した(荒川弘之他、2019 年度第 36 回 プラズマ・核融合学会 年会、 01Ap07)。加えて、PANTA において初期的な原理実証実験による平均流計測、及びノイズ低減のためのレーザー波長及び受光系変更による励起準位の変更を行った。今年度は、プラズマ装置改造に伴うレーザー伝送系の光ファイバー化と、さらなる集光効率改善によるノイズの低減のため、真空容器内へのレンズ系設置の設計を行った。

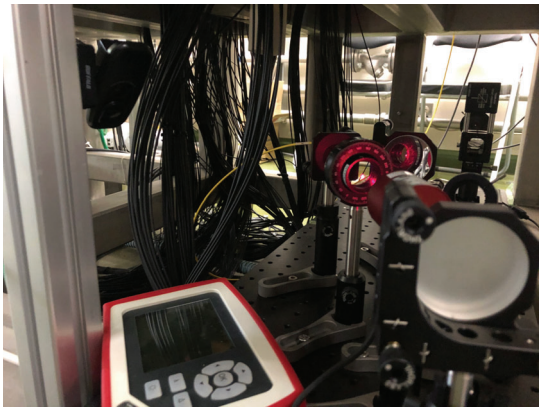
方法と検討結果

(i)　レーザー伝送系の光ファイバー化

これまでのレーザー伝送系では、光学台上のレーザー及び光強度変調用の電気光学変調器 (EOM)、ビームエキスパンダーによるビームサイズ変更の後に、一旦プラズマ装置下へレーザーを伝送している。プラズマ装置下へ伝送することで、ミラーはロータリーポンプ等の振動源の影響を受ける。よって、ビーム光軸の変動が避けられなかった。加えて、レーザーの安定化のためには、湿度を低く保つ必要があるが、プラズマ装置設置のある実験室には水冷用の装置により湿度が比較的高い条件にあり、レーザー装置の長時間の安定化は難しかった。このため、本研究では、プラズマ装置から 20 m 程度離れた小部屋へレーザー発振システムを移動し、光ファイバーによってレーザー光を伝送することとした。小部屋に設置することで温度・湿度を一定に保ちやすくなり、また光ファイバーでレーザー光をプラズマ近くまで伝送することで振動ノイズの影響を最小にすることを見込んだ。以下の左図において、伝送系を光ファイバー化した光学台の様子、及び右下図ではプラズマ下部におけるレーザー光学系を示す。光ファイバーへのレーザー光の導光効率が最終的なプラズマへの入射パワーに大きく影響するため、ビームサイ

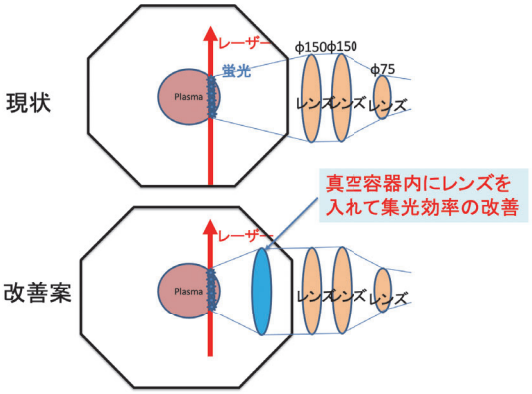
ズの最適化及び光軸合わせのための複数ミラーの設置を行った。結果として 25〜30 % 程度の効率が得られた。レーザー発振器におけるビーム形状がガウス分布から歪んでいることが効率低下の主な原因と考えられる。光ファイバーからのレーザー出射後においては、ミラー２枚によりプラズマへ入射した(右下図)。また、レーザー出射部におけるレーザーパワーモニタを行うため、web カメラを設置し、効率的に光ファイバー入射部から調整が行えるようにした。最終的に数十 mW のレーザー強度がプラズマへ入射し、励起中心波長において蛍光が確認できた。また、レーザー強度もプラズマ実験室内へ設置していた場合と比較して安定化された。





(ii)　真空容器内へのレンズ系設置の設計

プラズマ発生装置 PANTA の真空容器サイズは外径 60 cm 程度あり、プラズマ直径の 10 cm 程度に対して大きく、蛍光の集光が低くなっている。これまでの研究では真空容器外で大型のレンズを用いることで集光効率改善を見込んでいたが、より S/N 改善を見込み、真空容器内へのレンズ設置について検討を行った。



レンズ設置のための台は、プラズマ真空容器のモジュール境界部の約 10cm の凹みを利用して設置の設計を行った。PEEK 材を用いた 3D プリンタにより複雑な形状を安価に制作することを見込む。今後は、制作及び設置による集光効率の改善及び蛍光観測によるプラズマ乱流の流れ計測を行う。

成果報告：なし

定常状態プラズマにおけるイオン速度分布関数のベイズ推定

九州大学情報基盤研究開発センター　徳田悟

・目的

荷電粒子の集団であるプラズマは自らが作る電磁場や外部から流入出する粒子やエネルギーに支配される高度に自律的なシステムである。特に高温のプラズマは衝突による散逸の影響が小さく、熱平衡状態からはるかに離れた非平衡状態を維持する。こうした非平衡系は熱平衡状態では見られない豊かな現象を示すが、従来の統計力学による記述は一般に困難である。本研究では、特に非平衡定常状態におけるプラズマの流れに着目し、現象論的なアプローチによってその理解を目指す。プラズマ物理における従来研究を踏襲しつつ、研究代表者が専門とするベイズ統計を新たな切り口とすることで、空間的に不均一なイオン速度分布関数を計測データから推定する方法論を整備する。

・方法

本研究は計測・統計解析・理論の 3 つを軸とし、それらの融合によって実現するものである。

計測：研究協力者の河内氏が主体となり、PANTA 内で実現する定常状態プラズマをレーザー誘起蛍光法（LIF）によって観測し、イオン速度分布関数に対応する蛍光スペクトルを装置内の各空間点において取得した。本研究では取得したデータの校正までを計測のプロセスと位置付ける。

統計解析：研究代表者が主体となり、LIF スペクトルからそれを記述するイオン速度分布関数を推定した。従来の研究では物理的考察に基づく速度分布関数の関数形を仮定した解析が行われてきたが、本研究では仮定の妥当性をベイズ統計の立場から評価する枠組みを新たに定式化した。

理論：研究協力者の佐々木氏をはじめとした組織全体で、推定されたイオン速度分布関数の妥当性や解釈を、分光学やプラズマ物理、非平衡現象論の観点から吟味した。

・結果

PANTA 内の Ar イオンを LIF によって計測した定常状態のデータ（図 1 右）に提案法を適用した。今回は速度分布関数の候補を 3 つ（対象イオンなし、マクスウェル分布、slowing-down 分布）とし、さらにゼーマン効果の有無によりレーザー周波数領域の関数形を 5 つに分類した。ベイズ推定によるモデル選択の結果、対象イオンの速度分布関数がマクスウェル分布であるとするのが統計的に妥当で

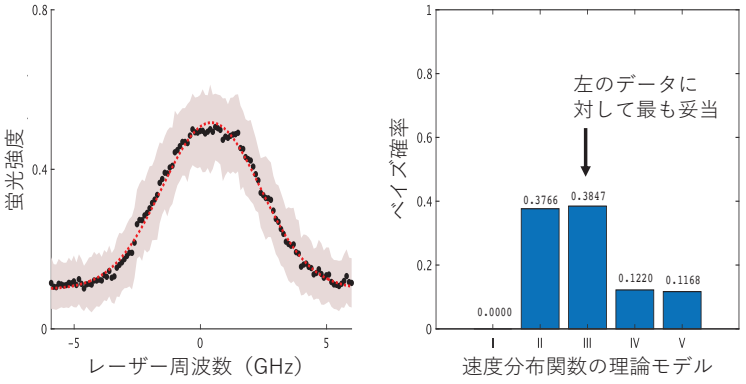


図 1：(左) Ar イオンの LIF スペクトル。(右) 各速度分布関数の事後確率 [I. 対象イオンなし、II. マクスウェル分布かつゼーマン効果無、III. マクスウェル分布かつゼーマン効果有、IV. slowing-down 分布かつゼーマン効果無、V. slowing-down 分布かつゼーマン効果有]。

あり、ゼーマン効果を考慮すべきことが示された（図 1 左)。この結果は今回の系において局所熱平衡が成立していることをサポートし、物理的な描像に無矛盾である。

・研究成果報告

1. S. Tokuda, Y. Kawachi, M. Sasaki, H. Arakawa, K. Yamasaki, K. Terasaka, and S. Inagaki: “Bayesian inference of ion velocity distribution function from laser-induced fluorescence spectra”, Sci Rep 11, 20810 (2021).
2. 徳田悟，“ベイズ推定に基づく定量的数理モデリング”，RIAM フォーラム 2021，2021 年 6 月 4 日，九州大学（オンライン).
3. 徳田悟，”ベイズ推定に基づく数理モデリングの精緻化”，令和 3 年第 1 回 人工知能リサーチグループ講演会，2021 年 10 月 1 日，日本大学（オンライン).
4. 徳田悟，河内裕一，佐々木真，荒川弘之，山﨑広太郎，寺坂健一郎，稲垣滋，”磁化プラズマにおけるイオン速度分布関数のベイズ推定”，第 38 回プラズマ・核融合学会年会，2021 年 11 月 22 日，オンライン.
5. 徳田悟，河内裕一，佐々木真，荒川弘之，山﨑広太郎，寺坂健一郎，稲垣滋，”磁化プラズマにおけるイオン速度分布関数のベイズ的モデル選択”，日本物理学会 第 77 回年次大会，2022 年 3 月 15 日（発表予定)，岡山大学.
6. “ベイズ推定を用いた速度分布関数の解析法を開発-プラズマ科学とデータサイエンスの異分野協働-“，九州大学・日本大学・島根大学・広島大学共同プレスリリース，2021 年 10 月 22 日.
   https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/archives/2021/press-release_20211022.html
   https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/676/

・研究組織

氏　　名	所　属	職名・級号俸等 （院生は学年）	役割・担当分野
徳田 悟	九州大学	助教	研究代表者
河内 裕一	九州大学	博士後期課程 3 年	研究協力者
佐々木 真	日本大学	助教	研究協力者
荒川 弘之	島根大学	准教授	研究協力者
山﨑 広太郎	広島大学	助教	研究協力者
寺坂 健一郎	九州大学	助教	研究協力者
稲垣 滋	応用力学研究所	教授	所内世話人
合計　7　名			

2 次元画像計測によるプラズマの閉じ込め研究

核融合科学研究所　大舘暁

- **目的**
  核融合プラズマの輸送の大きな部分は乱流輸送が担っている。しかしプラズマ中の乱流は波数・周波数の広いスペクトルを持つ複雑な構造を持ちその理解は十分ではない。2 次元画像計測により乱流と輸送の関係についての理解を進めたい。2 次元画像計測の解析には九州大学の PANTA デバイスの乱流の画像計測で培った手法の応用を行う。

- **実験方法**
  核融合科学研究所の大型ヘリカル装置では周辺部に密度分布に輸送障壁が形成される H-mode 的な閉じ込め状態が実現される。この周辺揺動をプラズマの 2 次元揺動を測定できるガスパフイメージング(GPI)計測で測定し、その H-mode 遷移に伴う揺動の変化の理解を行う。
- **実験結果**
  図 1 に GPI 計測の測定位置を示す。プラズマの下部のやや狭い領域(図中青〇部)を観測している。図 2 に揺動データの特異値分解を行い、その空間的な固有関数を求めた例を示すが、多くのモードが磁力線平行方向に長い相関長を持ったモード構造を持っていることがわかる。揺動の多くの成分は、縞模様の回転として観測されている。

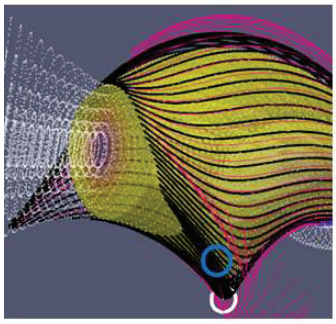


図 1 GPI 観測位置

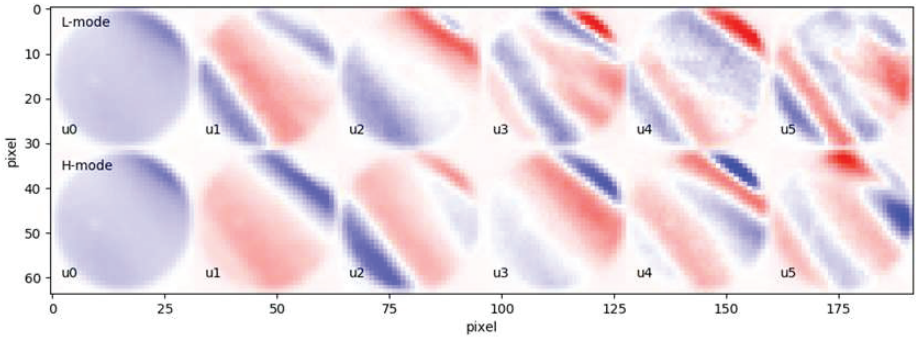
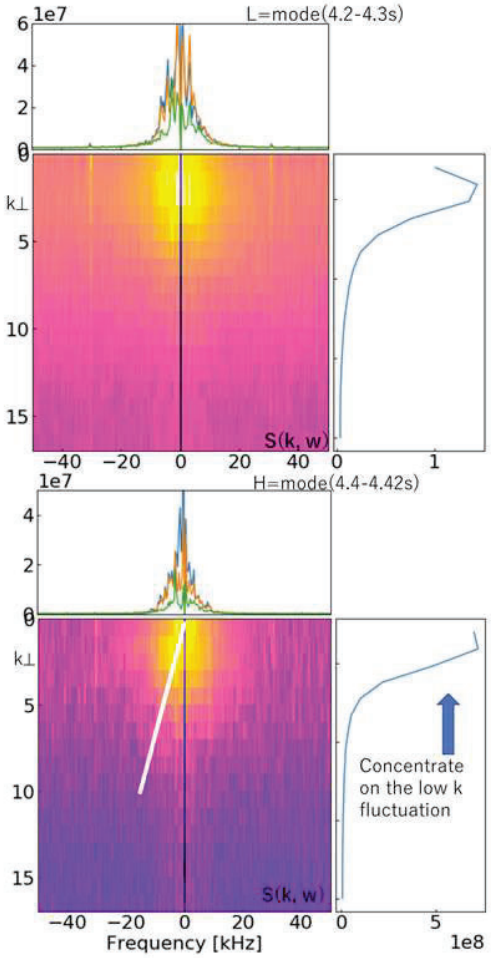
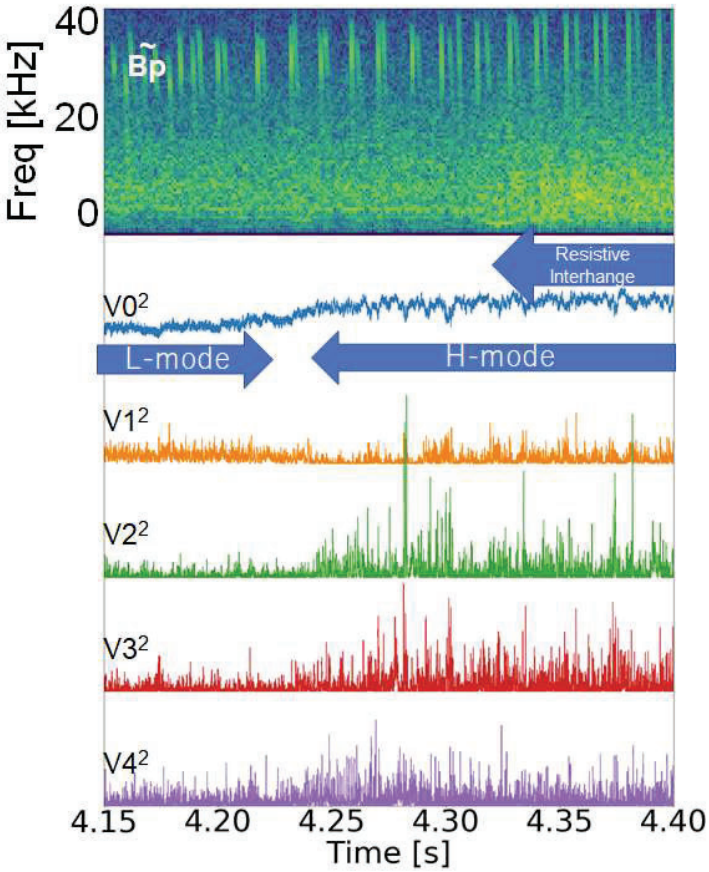


図 2 揺動データを SVD/PCA 分解し空間構造の上位 6 画像を示す

磁力線方向の次元を集約して、磁力線垂直方向の波数と、周波数のスペクトルの形で示したものを図 3 に示す。L/H 遷移後に揺動の回転速度（平均的な波の位相速度 k/ω を白線で示す）が増大しており、H-mode 時に形成される負の径電場部を観測していることを示唆している。このとき、揺動のパワーがより低いモード数に移動してる。また、磁力線平行方向の相関長が長くなることから、H-mode 時にはよりコヒーレントなモードがドミナントであることがわかる。
図 4 に磁場揺動と GPI の揺動データ(SVD 分解した時系列成分)を示す。遷移直後に V1 の成分が減少していることがわかる。輸送障壁の生成により周辺部の圧力勾配が増大するため、圧力駆動抵抗性交換型モードが LHD の H-mode プラズマでは励起され、圧力上昇を制限している。GPI のデータからは、磁場揺動のデータとの相関は見られず、電

磁的乱流の増大に伴う輸送の増大と、L/H 遷移の揺動や輸送の変化は別の現象であるこ





とを見ることができる。

図 3　揺動の磁力線垂直方向の波数と、周波数のスペクトルを示す。(L:上 H:下)

図 4　磁気プローブのスペクトルと GPI データの SVD 成分のパワーの 2 乗を示す

- **考察**

揺動の回転方向が遷移時に反転することから、本計測は輸送障壁付近の磁気面を中心に計測しているものと思われる。図 4 の V1 に示すような静電揺動の減少が見られ、この、揺動が駆動する輸送の現象が遷移を引き起こしていると考えられる。その後、圧力勾配の増大に伴いバースト的な MHD 揺動が現れて圧力勾配の上昇を制限している。揺動の変化については、回転モード・非回転モードの比が変化していること、遷移前に 30kHz 程度のコヒーレントな非回転モードが観測されるなど、揺動の性質を示す特徴をとらえることができておりさらに解析を進める。解析においては PANTA の解析でも有用であった、対称性を利用した次元圧縮(PANTA ではポロイダルモード数、LHD では磁場垂直方向のモード数)を行うことで複雑な現象を理解可能な形で整理できた。

- **研究成果報告**
  - 大舘暁ほか、大型ヘリカル装置の周辺プラズマの H alpha 発光の 2 次元構造、日本物理学会、13pB2　、2021/3、バーチャル開催
  - 上記発表の論文化を計画している。
- **研究組織**
  - 核融合研　大舘暁、小林政弘、　応用力学研究所　稲垣滋

光捕捉微粒子を用いたプラズマ揺らぎの解析

九州大学大学院システム情報科学研究院　古閑一憲

1. 研究背景

プラズマプロセスによる微細加工技術は，産業的に多用されているナノテクノロジーのひとつであり，特に半導体デバイス製造では前工程の 70%以上を占める重要な役割を担っている．従来，半導体集積回路の高性能化は微細化・高集積化によって実現されてきた．半導体デバイスプロセスの主要技術である反応性プラズマエッチングでは，シース中で基板方向に加速されたイオンが垂直加工を実現する主要な役割を担っているため，シース電場揺らぎはエッチング形状揺らぎと大きく関わっている．従って，形状揺らぎを理解する上でシース電場揺らぎの情報が不可欠であり，シース電場の高感度計測が必要である．一般的なプラズマの電場計測法にはプローブ法と.レーザー誘起蛍光法が挙げられる．プローブ法ではプラズマに与える擾乱が大きく，また電場分解能は 100 V/m 程度と悪い.レーザー誘起蛍光法による電場計測では，プラズマ自体の発光がノイズとなり S/N 比が悪くなるとともに，適用可能なガス種が極めて限定されるという問題がある．そこで，本研究では，光ピンセット手法[1]による光捕捉微粒子を用いて数 μm 程度の高い空間分解能を持ち，電場分解能 10 V/m の高感度な 3 次元の電場計測法の確立と，従来の電場計測法では観測できなかった電場揺らぎの評価を目指した．

2. 実験内容

光捕捉微粒子がプラズマ中で受ける力のつり合いの式($\boldsymbol{mg = Q_pE_z + F_{ray_z}}$, $\boldsymbol{F_{ray_r} = Q_pE_r}$)から微粒子が浮遊している位置での鉛直方向(z 方向)及び水平方向(r 方向)の電界強度を求める．ここで$\boldsymbol{Q_p}$は微粒子の帯電量，$\boldsymbol{E_z}$, $\boldsymbol{E_r}$は鉛直方向・水平方向電場を，$\boldsymbol{F_{ray_z}}$, $\boldsymbol{F_{ray_r}}$は鉛直方向，水平方向のレーザー光による力を表す．光捕捉微粒子を水平移動させ，微粒子の軌道を撮影することで，レーザー焦点からの微粒子位置のずれを計測し，レーザー光が微粒子に与える力を求めた．レーザー光が微粒子に及ぼす力の理論計算には光線光学モデル[2]を用いた．光線光学モデルは光線の軌道を幾何学的に計算し，光の運動量の変化から微粒子に作用する力を計算する方法である．光線光学モデルによる計算は，本研究のように微粒子サイズが光の波長よりも十分に大きい場合に適用できる．また微粒子の帯電量はイオン衝突を考慮した OML 理論[3]により計算した．OML 理論は，微粒子の帯電量を微粒子に流入するイオン・電子の入射軌道によって求めるものである．イオン−中性粒子間の衝突により微粒子に吸収されるイオンを考慮することで，より実験値に近い帯電量が導出できる．また上述した光線光学モデルにより計算したレーザー光の力を大気中での校正実験結果と比較した．校正実験では，プラズマ中より力の系が簡単な大気中で微粒子を光捕捉することで，力のつり合い($\boldsymbol{mg = F_{ray_z}}$)によりレーザー光による力を求めた．

3. 実験結果および考察

校正実験により光線光学モデルによる力の計算の誤差は約 3%であり，高い精度でレーザー光による力が計算できることが確認できた．レーザーパワーをパラメータとして光捕捉微粒子を水平移動させた時の 100μm ごとの浮遊位置を図 1 に示す．微粒子を水平移動させると微粒子の z 位置は上昇した．またレーザーパワーを増加させるとレーザーの垂直方向の力$\boldsymbol{F_{ray_z}}$の増加により微粒子の z 位置が上昇し，光捕

捉力の増加により微粒子が光捕捉から離脱するまでに水平移動させることができる距離が増加した.

これらの結果から、z-r 平面において, z 方向と r 方向の電場ベクトルを導出した. 水平方向の電場強度$\boldsymbol{E_r}$は容器の中心軸(r=0)から離れるほど強くなり，鉛直方向の電場強度$\boldsymbol{E_z}$は微粒子の z 位置増加に伴い(シースからプラズマに近づくに伴い)弱くなることをあきらかにした.

次に， プラズマ中光捕捉微粒子の位置揺動からプラズマ電場揺動を求めた結果を図 1 に示す.微粒子を水平移動させた方向と平行な方向の電場揺動を$\widetilde{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{x}}$(図 1 [a]), 垂直な方向の電場揺動を$\widetilde{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{y}}$(図 1 [b])とする. $\boldsymbol{E_r}$と同様に容器中心から離れるほど $\widetilde{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{x}}$は増加しているが, $\widetilde{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{y}}$は r 位置による変化は見られない. $\boldsymbol{E_z}$は z 位置の増加によって減少するが, $\widetilde{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{x}}, \widetilde{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{y}}$はどちらも z 位置の増加により大きくなる. このように，電場強度, 電場揺動はプラズマ中の位置に大きく依存し, 水平方向の電場強度が強くなる位置では， 水平方向の電場揺動が大きくなる傾向にある.

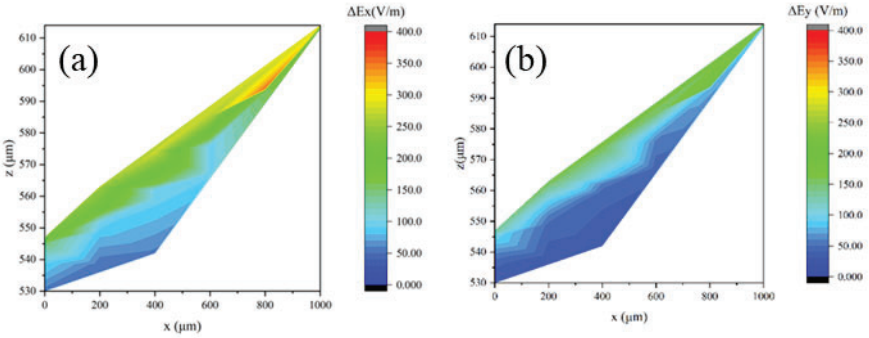


図 1. z-r 平面の電場揺動 (a) 水平移動に平行な電場揺動 (b)水平移動に垂直な電場揺動.

4. まとめ

光捕捉微粒子を用いて高精度なプラズマ電場の二次元ベクトル計測を行った． 得られた二次元電場ベクトルは PIC-MCCM によるシミュレーション結果と同様の傾向を示した．また，光捕捉微粒子を用いてプラズマ中の電場揺らぎを計測した． プラズマ電場揺らぎは微粒子の速度と強い正の相関があり， 電場揺らぎが微粒子の位置揺動に大きく関わっていることを示している． 大気中での微粒子光捕捉実験により， レーザーレーザー光による微粒子への作用力を校正し, 電場計測の精度を上げた． 本研究で開発したプラズマ計測法により， 数 μm の空間分解能で 2 次元電場ベクトルとその揺らぎの高感度計測を初めて実現した.

参考文献

[1] A. Ashkin, Biophys. J. **61** (1992) 569-582

[2] W. H. Wright, G. J. Sonek, Y. Tadir, and M. W. Bems, IEEE J.Quantum Electron. 26 (1990) 2148

[3] S. A. Khrapak, et al., Phys. Rev. 72(2005) 016406

直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析

九州大学　基幹教育院　山田 琢磨

1. 目的

プラズマ乱流の研究分野において、閉じ込めを改善する効果のあるゾーナルフローは近年広く研究されている。ゾーナルフローと同様にメゾスケールの一種であるストリーマーもまた閉じ込めを悪化させる存在ではあるが、大きな注目を集めている。ストリーマーは径方向輸送に大きな影響を与えるため、発生機構や制御・抑制を研究することは核融合プラズマの輸送を理解するうえで非常に重要となる。

九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA では、放電条件を調整することでプラズマ乱流中のミクロスケール構造であるドリフト波が非線形結合をし、乱流の塊であるストリーマー構造が発生する。この時、非線形結合により乱流の塊を形成するドリフト波を搬送波と呼び、搬送波と非線形結合をし、乱流の塊の包絡線と同じ構造を持ち位相関係がロックされている波を媒介波と呼ぶ。PANTA ではこの媒介波と搬送波が非線形結合をしてストリーマー構造を形成する様子が世界で初めて観測され、その詳細が研究されてきたが、これは直線プラズマがトロイダルプラズマに比べて低温で近接性に優れることを活かし、トロイダルプラズマでは不可能な多チャンネルプローブ計測を積極的に行ってきた結果から得られたものである。またバイスペクトル解析という非線形結合の詳細を解析できる手法を多チャンネル計測結果に適用して、時空間的に非線形結合を調査してきたことも大きい。

ところがこれまでの解析方法では、時間方向と周方向の 2 次元計測を行って得られた揺動のデータを周方向のフーリエ変換によって周方向モード数に分解し、各モード数がマッチング条件を満たす組み合わせはその周方向モード間に非線形結合が当然あるものとみなして抽出し、周波数方向でのバイスペクトル解析のみを行っていた。そこで本研究では従来までの解析法に加え、ある時刻でのタイムスライスを抽出し、その中での周方向モード数間の非線形結合を詳細に調べるために周方向のバイスペクトル解析を行うという手法も追加した。様々な視点から媒介波と搬送波の非線形結合を調査することで、ストリーマーの構造形成についてさらなる理解を深める。

2. 実験方法

九州大学の直線プラズマ実験装置 PANTA を用いてストリーマーが発生する実験を行い、多数のチャンネルを持つ周方向静電プローブアレーでイオン飽和電流の揺動（電子密度揺動に相当）を計測することで、ストリーマー構造とその発生に重要な役割を果たす媒介波、またストリーマーを形作る搬送波（ドリフト波）を観測し、両者の間に存在する非線形結合について複数のバイスペクトル解析を用いて詳細を明らかにした。PANTA は軸方向の長さが $z = 4000$ mm、内径 $r = 450$ mm の直線装置である。ソース部に付けられた内径 95 mm のガラス管に RF アンテナで 3 kW、周波数 7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生することで真空容器内部に直径が約 100 mm の直線プラズマが発生する。ストリーマー構造は、放電条件を調整することで発生する。具体的には、軸方向に 0.09 T の磁場を発生させ、内部に封入したアルゴンの圧力を 1.5 mTorr に調整することで、ドリフト波乱流内にストリーマー構造が形成される。このとき中心部の密度は 10^{19} m^{-3} 程度、電子温度は 3 ± 0.5 eV のおおよそ平坦な分布である。軸方向の磁場が 0.09 T より低い時は、プラズマ状態はコヒーレントなモードや、ある発達したモードの高調波成分が乗った周期的な孤立波（ソリタリー）モードなどとなる。

軸方向 $z = 1885$ mm、半径 $r = 40$ mm の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブが設置されている。このプローブは精密に周方向にプローブが配置されているため、特に精度の良い乱流の周方向モード数を観測するが可能である。ストリーマー構造は搬送波が周方向に自己収束した構造体であり、その包絡線は媒介波と位相関係を保持する。そのため、ストリーマーの位相構造を特定するためには、媒介波と 2 つの搬送波のバイスペクトル解析を行い、バイフェーズを計算すればよい。このバイフェーズが、搬

送波が作り出す乱流の塊の包絡線（ストリーマー構造）と媒介波の間の位相差を表す。本研究では、従来の周方向モード数に分解して周波数方向でバイフェーズを計算するのに加え、ある時刻でのタイムスライスを抜き出し、周方向空間での各モード数間のバイフェーズを計算する手法を用いた。隣り合うタイムスライスではバイフェーズの計算結果がほぼ似通ったものになるため、十分に時刻が離れたタイムスライスをいくつも抜き出し、その平均を取ることでバイフェーズの計算結果とした。

3. 実験結果と考察

PANTA のストリーマー発生放電（磁場 0.09 T、圧力 1.5 mTorr）で周方向 64 チャンネルプローブにより電子密度揺動を測定し、ストリーマーの包絡線構造、媒介波、搬送波を観測した。媒介波は周方向モード数（m_1, f_1）＝（1, –1.2 kHz）で、最も振幅が大きく媒介波との結合が強かった搬送波は、（m_2, f_2）＝（2, 7.8 kHz）や（m_3, f_3）＝（3, 6.6 kHz）の波であった。

密度揺動のタイムスライスを抜き出し、周方向モード数（1, m, m + 1）間のバイフェーズ値を計算すると、初めの 1 は媒介波に相当し、残りの 2 つは搬送波に相当するので、媒介波と搬送波の包絡線の位相差が計算できる。結果、(1, 1, 2) の結合のバイフェーズ値のみ他の結合と大きく異なる値となり、他の結合はバイフェーズ値がほぼ変わらなかった。よって（1, 1, 2）の結合はストリーマー構造の形成に寄与せず、むしろ阻害していることが分かった。

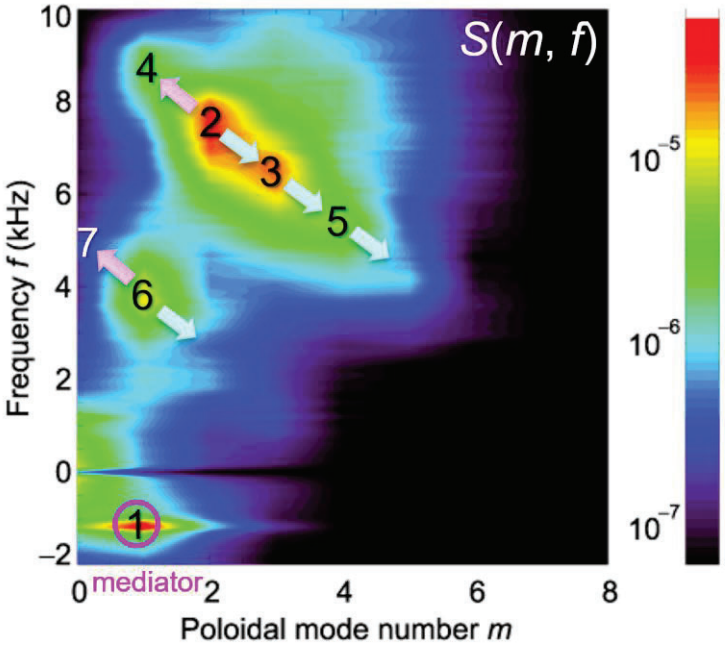


図 1. PANTA のストリーマー発生時の 2 次元スペクトル図。媒介波である 1 のモードと搬送波が非線形結合することで新しい波が発生して乱流の塊が形成されるが、右下への向きの非線形結合しか形成には寄与しないと思われる。

周方向モード数に分解したバイフェーズ解析でも詳細を調べると、図 1 の揺動の 2 次元スペクトル図で（1, 2, 3）や（1, 3, 5）の結合はストリーマー構造の形成に寄与していることが分かったが、(1, 4, 2) や（1, 7, 6）の結合はストリーマー構造の形成に寄与していないことがバイフェーズ値から示された。振幅の大きさから元々の親であるモードを推定すると、結合によって生じた新たな波は矢印で示された方向となる。すると、スペクトル図で右下に向かう結合は構造の形成に寄与しているが、左上に向かう結合は寄与していないと言える。つまり、スペクトル図における結合の方向により、ストリーマー構造の形成に貢献するかが決まってくる可能性が示唆された。今後も、この現象の詳細をさらに解析することで本研究を発展させ、ストリーマーの理解を深める。

4. 研究成果報告

[1] 山田琢磨他, “直線プラズマにおける非線形現象の先進的解析”, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 20aB1-13, オンライン開催 (Sep 20-23, 2021).

5. 研究組織

研究代表者：山田琢磨（九大）　研究協力者：稲垣滋、佐々木真（九大）、小林達哉（核融合研）

特定研究 3【分野融合】

マルチスケール物理現象のデータ統合・解析技術の研究開発

Comprehensive Study for Multiscale Phenomena Utilizing Data Science Technologies

統括責任者：寒川 義裕（新エネルギー力学分野）
稲垣 滋（核融合力学分野）
広瀬 直毅（地球環境力学分野）

様々な研究分野でダイナミックレンジの大きく異なる物理現象を統合的に理解するトレンドが現れています。例えば、材料プロセスの分野では、量子力学での解析対象となる原子スケールの表面反応と連続体力学での解析対象となる数 10cm スケールでの物質輸送等を統合的に解析する必要があります。また、核融合プラズマの粒子輸送では、数 10μm～数 cm スケールの粒子（電子／イオン）の運動と数 cm～数 10cm スケールのプラズマの流れとの相互作用、及び 1m の巨視的構造物の影響を理解する必要があります。大気海洋力学の分野では、数 m メッシュで描画される局所的な流れと数 km～数 100km メッシュで描画される大循環との相互作用を読み解き、パラメタライズする必要があります。しかし、対応するそれぞれのスケール現象を物理的・力学的に正確に繋ぐモデルを開発することは困難です。本研究テーマでは、データ同化、データマイニング等のデータ科学を応用して、対象スケールの大きく異なる物理現象を統合的に理解するための新たな学理構築を目指します。

新エネルギー力学分野
特定研究 3

窒化物半導体材料における形状および物性のマルチスケールデータ解析手法の構築

三重大学大学院工学研究科　秋山亨

1. 研究目的

窒化物半導体材料は省エネルギー社会の実現に寄与する光デバイスおよび電子デバイスに用いられている。これら窒化物半導体は、混晶や超格子を作製すること物性制御が行われているが、これらの材料の組成や構造の自由度は大きく、物性制御可能性を実験的に検証することは困難である。本研究課題では、これらの系に対して、所望の物性を得るための条件を高スループットで抽出することが出来るデータ解析手法の構築を目指す。また、窒化物半導体デバイスの作製において出現するナノ(マイクロ)スケールでの形状制御に対して、量子論にもとづく原子スケールでのデータをもとにマイクロ～ミリスケールでの形状予測を行うための解析手法の構築も行う。上記研究を遂行するために、寒川教授と共同研究を行うことで、同教授の研究室の持つマルチフィジックス・マルチスケール結晶成長シミュレーション技術のノウハウを本研究課題に対して適用させる。さらに得られた結果をもとに、窒化物半導体における物性制御および結晶成長に向けた諸現象の統合的理解を目指す。

2. 計算方法

本研究課題では以下の 2 つの研究項目に対する計算データの蓄積および解析手法の構築を行う。

1. 物性制御のためのデータ解析(担当：河村・寒川)
三重大学で得られた量子論にもとづく計算(第一原理計算)データをもとに、三重大学および九州大学においてデータ解析手法の構築を行う。特に窒化物半導体デバイスにおいて重要となるバンドギャップ値に対して機械学習を行うことで、効良く行うための手法の構築を行う。得られた成果に対して研究打ち合わせを行い、その妥当性の検証を行う。

2. 形状制御のためのデータ解析(担当：秋山・寒川)
三重大学で得られた窒化物半導体表面および各種欠陥の第一原理計算結果をもとに、マイクロ～ミリスケールでの結晶形状予測を行う。各種エネルギーのデータに対して機械学習による予測を行うとともに、これらのデータを用いた形状予測手法の構築を行う。得られた成果に対して研究打ち合わせを行い、その妥当性の検証を行う。

本年度は計算データの蓄積に関する研究を実行して、以下に記すような研究成果を得ている。なお計算は、密度汎関数理論に基づく全エネルギー電子状態計算によって実行し、計算コードとして Tokyo Ab-initio Program Package (TAPP)を用いた。また第一原理計算プログラムパッケージとして Quantum Espresso を利用した。なおバンドギャップ値の計算には、自己相互作用補正法(pSIC)を用いた補正により実験値と直接比較可能となる計算値を獲得した。

3. 研究成果

3.1 物性制御のためのデータ解析

窒化物半導体における物性制御に関する研究として、InN/AlN 系超格子におけるバンドギャップ値に対する格子歪みの影響を評価した。図 1 は a 軸方向および c 軸方向の格子定数を固定させた場合での、*m*InN/*n*AlN 超格子（*m* および *n* は InN および AlN の層数）における格子歪みとバンドギャップ値との関係を示したものである。超格子を構成する層数に依存せず、圧縮歪みがかかる状態から無歪み状態になるに従ってバンドギャップは増加し、引張り歪みが掛かると

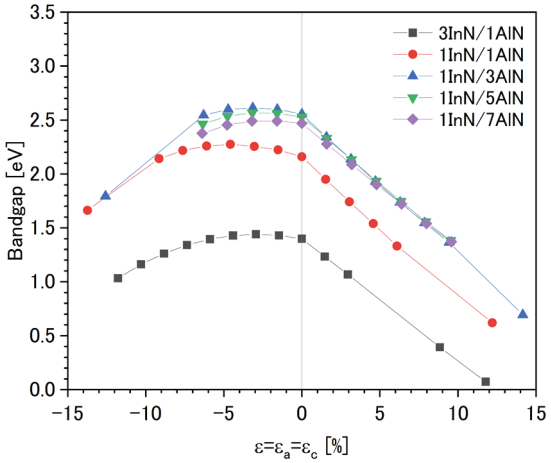


図 1.　a 軸方向および c 軸方向の格子定数を固定させた場合での *m*InN/*n*AlN 超格子における格子歪みとバンドギャップ値の関係。

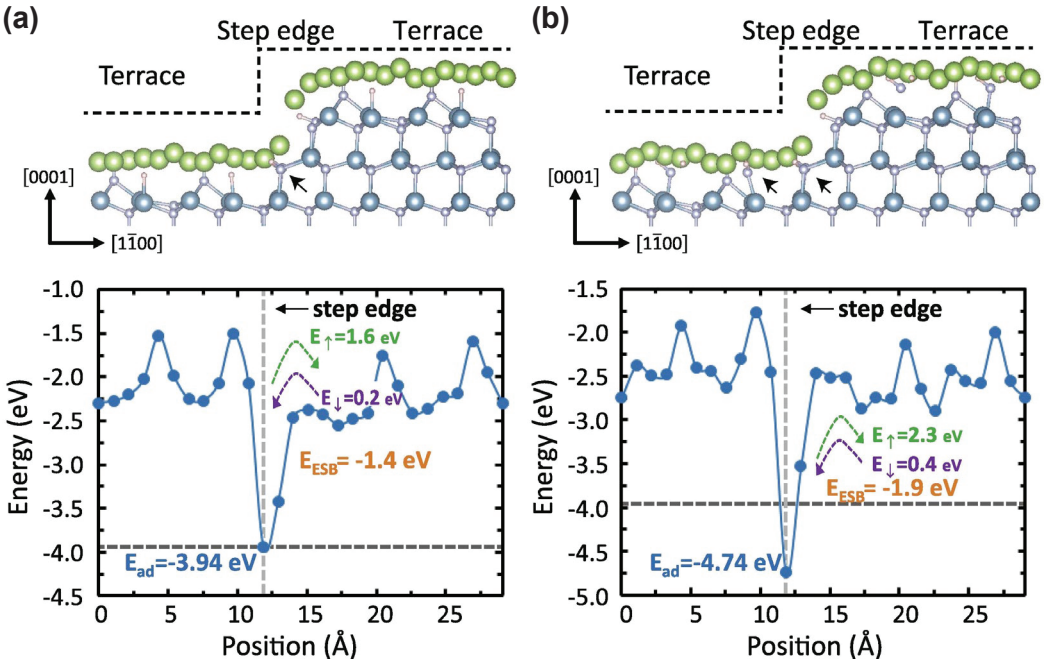


図 2. ステップを含む AlN(0001)表面における[1$\bar{1}$00]方向に沿った Al 原子の吸着位置および吸着エネルギーの変化。(a) 低 H_2 分圧条件および(b) 高 H_2 分圧条件での表面構造における計算結果を示している。

バンドギャップは減少する傾向が見られる。この計算により得られた各種パラメータ（格子定数、組成、超格子周期等）を入力とする機械学習によるバンドギャップの予測が今後の課題である。

3.2 形状制御のためのデータ解析

ナノ構造エピタキシャル成長機構に関する研究として、昨年度に引き続き成長プロセスに対する検討を行った。具体的には、AlN におけるエピタキシャル成長時の気相からの原子および分子の表面への吸着および脱離過程、これら原子および分子の表面での（マイグレーション等の）挙動を明らかにした。図 2 に示すようなステップを含む AlN(0001)表面における有機金属エピタキシャル（MOVPE）成長時での検討を行い、成長温度および圧力に依存性して変化する表面構造に起因して、Al 原子の挙動が変化することを見出した。また、これらの挙動の違いにより MOVPE 成長時での AlN 表面におけるモルフォロジーの変化が説明可能となること見いだした。

4. 研究業績

1. “Effect of surface structural change on adsorption behavior on InAs wetting layer surface grown on GaAs(001) substrate”, T. Akiyama, K. Yonemoto, F. Hishiki, T. Ito, J. Cryst. Growth **570**, 126233 (2021).
2. “Effect of step edges on the adsorption behavior on vicinal AlN(0001) surface during metal-organic vapor phase epitaxy: An ab initio study”, T. Akiyama, T. Ohka , K. Nagai , T. Ito, J. Cryst. Growth **571**, 126244 (2021).
3. “Effective approach for calculating individual energy of step edges on polar AlN(0001) and GaN(0001) surfaces", T. Akiyama, A. Nakatani, T. Shimizu, T. Ohka, and T. Ito, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 080701 (2021).
4. “*Ab initio* approach for oxidation mechanisms at 4H-SiC/SiO_2 interface: interplay of O_2 and H_2O during interfacial reaction”, T. Shimizu, T. Akiyama, T. Ito, H. Kageshima, M. Uematsu, and K. Shiraishi, Phys. Rev. Mater. **5**, 114601 (2021).
5. “Bandgap engineering of α-Ga_2O_3 by hydrostatic, uniaxial, and equibiaxial strain”, T. Kawamura, and T. Akiyama, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 021005 (2022).
6. T. Akiyama, A. Nakatani, T. Shimizu, T. Ohka and T. Ito, “Direct approach for calculating individual energy of step edges on polar AlN(0001) and GaN(0001) surfaces using density functional calculations”, International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (2021 年 11 月 4-6 日).
7. T. Kawamura, K. Basaki, S. Ohata, T. Akiyama, Y. Kangawa, “First-principles calculation of optical properties of III-V nitrite semiconductors”, The 2nd International Symposium on Wide Gap Semiconductor Growth, Process and Device Simulation (2022 年 1 月 11-12 日).

5. 研究組織

研究代表者　秋山亨 (三重大学大学院工学研究科・准教授)
所内世話人　寒川義裕 (九州大学応用力学研究所・教授)
共同研究者　河村貴宏　(三重大学大学院工学研究科・助教)

非平衡開放システムにおける時空間ダイナミクスの研究

日本大学生産工学部　佐々木真

背景と研究目標

実験室プラズマをはじめ惑星大気や海洋現象など、エネルギーや粒子の流入・流出のある開放システムには、普遍的に揺らぎや乱流等の「時空間ダイナミクス」が存在する。そして、時空間ダイナミクスに起因する輸送によってそれぞれの系の発展が支配されている。このようなシステムの発展を予測・制御することは現代物理学の最先端の課題であり、それぞれの系における詳細な研究が精力的に進められている。

本研究では、「時空間ダイナミクス」を共通の視点として、プラズマ・惑星大気・海洋現象の非線形現象を系統的に整理することを目指す。対象は、磁化プラズマにおける乱流・惑星大気における乱流と構造形成・海洋乱流現象に渡る。これらのマルチスケールな時空間ダイナミクスに対し、観測データに特異値分解や動的モード分解等のデータ駆動科学的手法を適用する事で、共通の視点から諸現象を整理する。

今年度は(1)プラズマ乱流における乱流・構造形成相互作用を波動運動論の枠組みで解析を進め帯状流密度構造形成機構とストリーマ流形成についての成果を上げた。また、(2)プラズマ乱流の時系列データに機械学習を適用することで、時系列発展を予測する際のネットワーク構造と予測特性を明らかにした。 以下でそれぞれについて概説する。

研究成果

(1) プラズマ乱流における乱流・構造形成相互作用の理論研究

プラズマの密度不均一性によって駆動されるドリフト波乱流を対象として、乱流と帯状流・ストリーマ等の構造形成間の相互作用を波動運動論の枠組みで理論的に解析を進めた。波動運動論では、構造が持つ流れの空間不均一性による乱流渦の変形効果を取り込んだモデルであり、波数空間・実空間からなる位相空間ダイナミクスを取り扱う。

帯状密度による階段状分布形成モデルとして、従来モデルに輸送変調機構を含むモデルへと拡張を行なった（Fig. 1)。本モデルでは帯状流による乱流抑制効果を輸送へ反映させる。輸送改善領域では密度勾配の急峻化とそれに伴う乱流の増加が自己無撞着に取り込まれたモデルである。本モデルを用い、

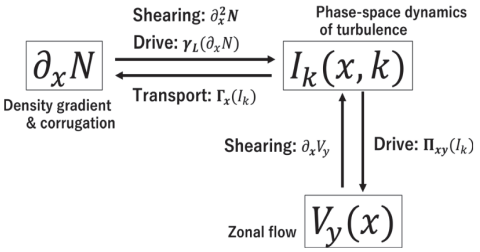


Fig. 1: 帯状密度形成モデル（[1]より引用）

乱流と帯状流・帯状密度の空間位相関係を明らかにした。乱流捕捉効果によって、乱流は帯状流曲率の負の領域に局在化する。局在化した乱流は輸送を局在化させることで密度勾配を平坦化させる。この平坦化させる成分が帯状密度として現れる。すなわち、密度勾配が平坦化した領域に乱流が局在化する事が示された。本結果は、局所的な準線形理論では予測できない分布である。今後、実験による検証が待たれる[1]。

乱流とストリーマ流の相互作用を上記、波動運動論の枠組みで議論した。ストリーマ流と乱流の相互作用は PANTA で観測されており、乱流とストリーマ流の空間位相関係が観測されていたが[e.g. T. Yamada, Nat. Phys. 2008, F. Kin, PoP 2019]、理論的説明はなされていなかった。波数空間・実空間における位相空間ダイナミクスによって、ストリーマ流による乱流の捕捉効果が起こることを波動運動論シミュレーションによって示した。得られた空間位相関係は、実験観測と矛盾しないことがわかった[2] (Fig. 2)。今後、詳細な検証が必要である。

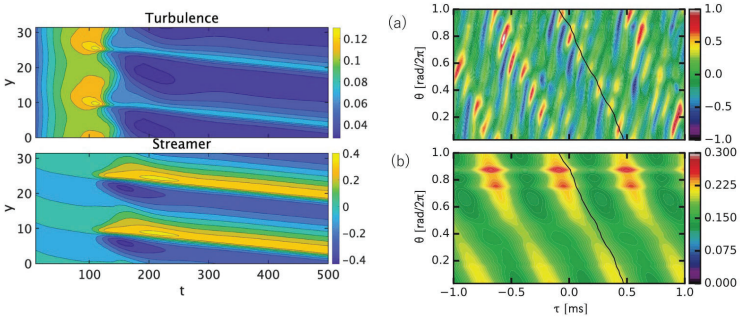


Fig. 2: 乱流変調とストリーマ流の空間伝播の様子（右：理論、左：実験）[2]より引用

(2) 機械学習を用いた時系列発展予測

非平衡システムでは、太陽フレアや集中豪雨・核融合プラズマにおける ELM やディスラプション等、しばしば突発的現象が観測される。それらの事前予測は重要な問題である。本年度は、突発現象の典型例として、PANTA で観測された多スケール乱流の時系列を対象として、機械学習を用いた予測研究を行なった。Long-short term memory (LSTM)と呼ばれるリカレント型ニューラルネットワークを用い、良好な予測特性を得た。得られた成果は論文発表準備を進めている。

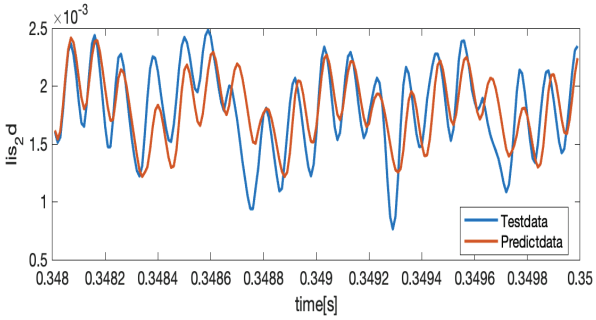


Fig. 3: 機械学習による時系列予測（青線：観測データ、赤線：予測データ）

[1] M. Sasaki, et. al., Phys. Plasmas, 28, 112304 (2021).
[2] M. Sasaki, et. al., Phys. Plasmas, 28, 102304 (2021).

応用力学研究所共同研究成果報告書

1. 課題番号：2021 S3-3

2. 課 題 名：東アジア縁辺海が暖候期における集中豪雨に及ぼす影響

3. 区　　分：(特定,) 一般, 研究集会, 若手キャリアアップ支援, 国際化推進（該当するものを選択）

4. 研究組織

所属：三重大学大学院生物資源学研究科
氏名：万田敦昌（研究代表）

所属：海洋研究開発機構
氏名：趙寧

所属：九州大学応用力学研究所
氏名：広瀬直毅（所内世話人）

5. 研究背景・目的

日本や欧州における豪雨事例において, 降水域に比較的近い中緯度海域の水温上昇の重要性が指摘されている. これらの豪雨事例では, 海面からの蒸発によって遠方から流入する暖湿気塊の対流不安定性が維持されていたことが, 豪雨発生に極めて重要な働きをしていた. 平成 30 年 7 月豪雨においても対流不安定の重要性を指摘する研究がある一方, 対流圏中層の総観規模擾乱に伴う力学的強制の重要性を強調する研究もある. 最近, 平成 30 年 7 月豪雨に対する過去約 30 年間の温暖化の影響を検討した結果が報告されているが, 水温と気温の寄与が分離されていないため, 水温上昇の寄与については不明である. そこで, 過去 30 年間の水温上昇による降水と対流不安定度への影響を領域気象モデルによる数値実験によって調査した.

6. 手法

Weather Research and Forecasting Model v. 3.7.1 を実験に使用した. まず, 前線が停滞し西日本を中心に記録的な降水量が観測された平成 30 年 7 月 5 日から 7 日までの 3 日間の西日本の降水を再現する実験 (以降, CNTL)を行った. 次に, 海面水温の影響を調べる以下の感度実験を行った. 海面水温データ 5 種 (MGDSST, ERSST, HadISST, OISSTv2, COBE)の 1982 年から 2018 年までの 7 月の月平均の線形トレンドを計算し, これらの線形トレンドのアンサンブル平均を CNTL で用いた海面水温から差し引いたデータを作成した. また, 気温についても同様に大気再解析 5 種 (NCEP1, NCEP2, JRA55, ERA-Interim, ERA5) の北緯 22-42 度, 東経 120-140 度での領域平均気温に関して, 各気圧レベルの気温の線形トレンドを計算し

た. これらの線形トレンドを CNTL における値から差し引くことで, 疑似的な 1980 年代の水温・気温分布を作成し, この分布の元で CNTL と同様の実験を行った. 相対湿度は CNTL と感度実験で同一の値を使用した. 以降, 水温・気温の双方を下げた実験, 水温のみを下げた実験, 気温のみを下げた実験をそれぞれ, AO80, O80, A80 と称する.

7. 結果

7 月 5 日から 7 日までの陸上での 3 日雨量を北緯 31.0-37.4, 東経 128.8-138.3 度の領域で平均した AO80 の雨量の CNTL からの変化率は 6.2%となり, この値は既往の研究の見積もり(7%)と整合的である (図 1). 感度実験の結果 (A80 と O80)について見ると, A80 の 3 日雨量の値が CNTL とあまり差がないのに対し, O80 は差が大きくなっている. それに加え, O80 の値は A80 と比較して AO80 に非常に近い値となっており, 日本近海の水温変化の重要性が示唆される.

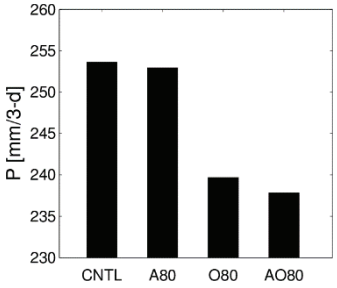


図 1 7 月 5〜7 日の 3 日雨量の陸上における領域平均値.

次に降水域の南西側の可降水量について調べたところ, A80 と AO80 では気温低下に伴い可降水量が減少しているが, 降水量の変化を説明するには不十分であった. また, 雨量の変化が大きかった O80 における可降水量の変化は A80 に比べ小さかった (図省略). 対流不安定度の指標として 1000 hPa の相当温位と 600 hPa の飽和相当温位の差をとり, 各実験の値を比較した. O80 は他の実験と比較して値が大きく減少しており, このことからも上述の海面水温変化の重要性が支持される.

発表論文

万田敦昌, 2018 年夏の西日本豪雨と記録的猛暑への海洋からの影響, 気象研究ノート, 印刷中.

[2021 S3-4]　ナノ積層構造体におけるリップロケーションの変形解析

福井大学・学術研究院工学系部門　雷霄雯

研究目的

リップロケーションをはじめとする層状固体における普遍的な変形メカニズムがあるため，ナノスケールのリップロケーションのユニークな変形メカニズムの解明を行い，マルチスケール分野への応用を目的とする.

研究方法

分子動力学(Molecular Dynamics：MD)法と微分幾何学法を用いて，完全結晶多層グラフェン(Multi-Layer Graphene:MLG)および格子欠陥を有するMLGを作成し，圧縮解析を行い，発生したリップロケーションの変形特徴について考察する. また，シミュレーションした複数のリップロケーション変形から幾何学の経験式を得ることで，少ない既知の条件からリップロケーションの変形近似曲線の作成方法を提案する.

考察

(1) MLGをアームチェア方向から局所的に圧縮することでリップロケーションが発生する.

(2) 完全結晶MLGの中間部の層数が同じ条件では，MLGの幅が長い方がヤング率が高く，リップロケーション発生数が増加する. MLG の幅が同じ条件では，中間部の層数が少ない方がヤング率が高く，リップロケーション発生数が増加する. しかし，リップロケーションの発生順序は無秩序で，発生位置の周期性はあまり見られない.

(3) 転位を有するMLGでは完全結晶MLGに比べ，リップロケーションが発生しにくく，また，タイミングが遅い. 転位の配置数が多いほど，リップロケーションの発生に対する抑制効果が大きい.

(4) 完全結晶 MLG において，リップロケーションが下層から上層に伝播し，平均曲率値とポテンシャルエネルギーは徐々に減少する. リップロケーションの発生による平均曲率の変化が顕著な部分は，ポテンシャルエネルギーの変化も大きい. また，平均曲率の 2 乗値が増加するにつれてポテンシャルエネルギーが単調増加する傾向があり，線形関係がある.

(5) 1つの特異点と層間距離から，提案した理論式とMD解析が良好に一致することが明らかとなり，理論式により単一のリップロケーションの変形の近似曲線を予測することができる.

口頭発表

1. Peng-Fei Xu, Yuichi Kojima, Xiao-Wen Lei, “Research on the deformation mechanism of ripplocation in layered solids”, *The 14th World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress*, Virtual Conference, 11-15 Jan. 2021.
2. 徐鵬飛・雷霄雯，積層構造体におけるリップロケーションの変形メカニズム解析，日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス，オンライン，2021.9.15-16.

[2021 S3-5] 結晶成長中微斜面におけるナノスケール表面荒さとメゾスケール・マクロステップのファセット化との関係

大阪電気通信大学工学部　阿久津典子

研究目的

低電力デバイスに利用される SiC や GaN といった半導体結晶について、不連続な表面張力に支配されるマクロステップのダイナミクスを、分子の着脱という量子力学現象と関連付けて制御することを目的とする。

研究方法

低電力デバイスに利用される SiC や GaN といった半導体結晶について、結晶表面における分子の着脱を寒川先生の第一原理計算で検討する。そこで得られた分子結合の値を基に格子模型を作成し、結晶育成温度付近におけるステップ諸量をランダムウォーク法で計算し、不連続な表面張力を申請者の統計力学計算手法、すなわち密度行列繰り込み群法とモンテカルロ法、でエントロピーも含めて計算する。不連続な表面張力に支配されるマクロステップのダイナミクスを分子の着脱という量子力学現象と関連付けて理解、および制御できるようにする。

2021 年度はこの方法を 1 成分系である氷に適用し、第一原理計算で得られる結果と比較し得る結合定数ー第一原理計算で得られる表面自由エネルギ-を計算した。

共同研究　特別講演会の開催等

引き続き Covid-19 の感染拡大により予定していた講演会を開催することができなかった。そのため、大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所の講演会は実施せず、（株）東京システムリサーチの松村和幸氏による「人工知能とビジネス適用の現状」という題目の授業内講演、および（株）Spectee 矢口裕介氏による「最先端の情報解析技術で、世界のあらゆる『危機』から人々を守る」という題目の授業内講演を 2021 年 7 月 8 日に遠隔で実施した。

考察

SiC や GaN と同じ結晶構造である Wurtzite 型構造を持ち 1 成分系である氷のベーサル（0001）面とプリズム（10-10）面について、2 次元格子気体模型を考えその相転移温度を密度行列繰り込み群法により精密に計算した。求めた相転移温度と固気界面、固液界面それぞれの氷のファセティング転移観測値との比較をした。それにより表面・界面における有効結合エネルギーを求めた。その値は、最近の分子動力学計算により求められた値と良く一致した。この方法は、SiC や GaN に適用することが可能である。2 次元格子気体模型を仲立ちにして寒川先生の第一原理計算とメゾスケールの観測結果との接続の第 1 歩とした。

講演会などから学んだ主成分分析を使用した次元削減による特徴量抽出は、密度行列繰り込み群による特異値分解を使用したミクロな物理量の集合から巨視的な値を抽出するという点で近隣の方法であることが理解できた。

成果報告

出版物

なし

発表論文（レフェリー有）

1. Noriko Akutsu, ``Crossover from BKT-Rough to KPZ-Rough Surfaces for Crystal Growth/Recession", *J. Phys.: Conf. Series* **2090** (2021), 012075, 1–6.
2. Noriko Akutsu, `` A Density-Matrix Renormalization-Group Study for a Two-Dimensional Lattice-Gas on the Ih-Ice Prism Surface", *J. Phys.: Conf. Series,* accepted.

紀要等（レフェリー無）

なし

口頭発表

1. Noriko Akutsu, “Crossover from BKT-Rough to KPZ-Rough Surfaces for Crystal Growth/Recession”, *The 10th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (im2 2021),* September 6–9, 2021, Virtual, on-line Conference.
2. Noriko Akutsu, “CONTINUOUS GROWTH ON A FACETED-ROUGH SURFACE IN A NUCLEATION-LIMITED GROWTH”, *22nd American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-22) and 20th US Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-20),* August 2–4, 2021, On-line Conference.
3. Noriko Akutsu, “ROUGHNESS EXPONENTS AND A SCALING FUNCTION FOR A FACETED-ROUGH SURFACE WITH A MACROSTEP-DISASSEMBLING”, *22nd American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-22) and 20th US Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-20),* August 2–4, 2021, on-line Conference.
4. Noriko Akutsu, “A Density-Matrix Renormalization-Group Study for a Two-Dimensional Lattice-Gas on the Ih-Ice Prism Surface”, *XXXII IUPAP Conference on Computational Physics, (CCP2021),* August 1–5, 2021, Coventry, England, on-line Conference.
5. Noriko Akutsu, “Disassembling of Faceted Macrosteps on a Vicinal Surface for Interface-Limited Growth near Equilibrium”, *The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology,* March 3, 2021, On Line Conference.
6. Noriko Akutsu, Yoshiki Sugioka, and Naoya Murata, “Atomically Smooth but Globally Rough: Stoichiometric Deviation in Ambient Phase at Equilibrium for Two-Component Semiconductor Crystals”, *The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology*, March 3, 2021, On Line Conference.
7. 阿久津典子、「ファセット化ラフ面の 2 次元多数核形成成長とラフネス指数」 北大低温研ワークショップ「結晶表面・界面での成長カイネティクスの理論とその場観察」(2022 年 1 月 26 日、北海道大学低温研究所、オンライン開催).
8. 阿久津典子、「多様な表面荒さとファセット化したマクロステップ」 駒場物性セミナー(2021 年 11 月 26 日、東京大学、オンライン開催)
9. 阿久津典子、「ファセット化マクロステップがある微斜面の表面荒さ」 2021 年日本表面真空学会学術講演会(2021 年 11 月 3 日-5 日、オンライン開催)
10. 阿久津典子、「フファセット化マクロステップがある微斜面のラフネス指数とマクロステップ形成・解消スケーリング関数」 2021 年日本表面真空学会学術講演会(2021 年 11 月 3 日-5 日、オンライン開催)
11. 阿久津典子、「2 次元核形成律速成長における連続成長―ファセット化ラフ面―」 第 50 回結晶成長国内会議(JCCG-50)(2021 年 10 月 27 日-29 日、オンライン開催)
12. 阿久津典子、「ファセット化ラフ面のラフネス指数とスケーリング関数」 第 50 回結晶成長国内会議(JCCG-50)(2021 年 10 月 27 日-29 日、オンライン開催)
13. 阿久津典子、「ファセット化ラフな微斜面のステップダイナミクス:非平衡定常状態」 日本物理学会 2021 年秋季大会[物性](2021 年 9 月 20 日-23 日、オンライン開催)
14. 阿久津典子、「異方表面張力によって生じたマクロステップの凝集/分散スケーリング関数とラフネス指数」 日本物理学会 2021 年秋季大会[物性](2021 年 9 月 20 日-23 日、オンライン開催)
15. 阿久津典子、「「化学と AI」時代の情報教育―学ぶ AI から使う AI へ―」 日本化学会 第 101 春季年会 シンポジウム[S10-1am]「化学・情報科学の融合による新化学創成に向けて」, (2021 年 3 月 19 日、オンライン開催).
16. 阿久津典子、「BKT-ラフな面から KPZ-ラフな面へのクロスオーバー現象とカイネティックラフニング現象の関係」日本物理学会 第 76 回年次大会(2021 年 3 月 12 日-15 日、オンライン開催)

応用力学研究所共同研究成果報告

1. 課題番号：2021 S3-6

2. 課 題 名：静止衛星を用いた中緯度混合相雲の発生と発達過程の研究

3. 区　　分：**特定**, 一般, 研究集会, 若手キャリアアップ支援, 国際化推進（該当するものを選択）

4. 研究代表者

所属：BAERI/NASA Ames Research Center

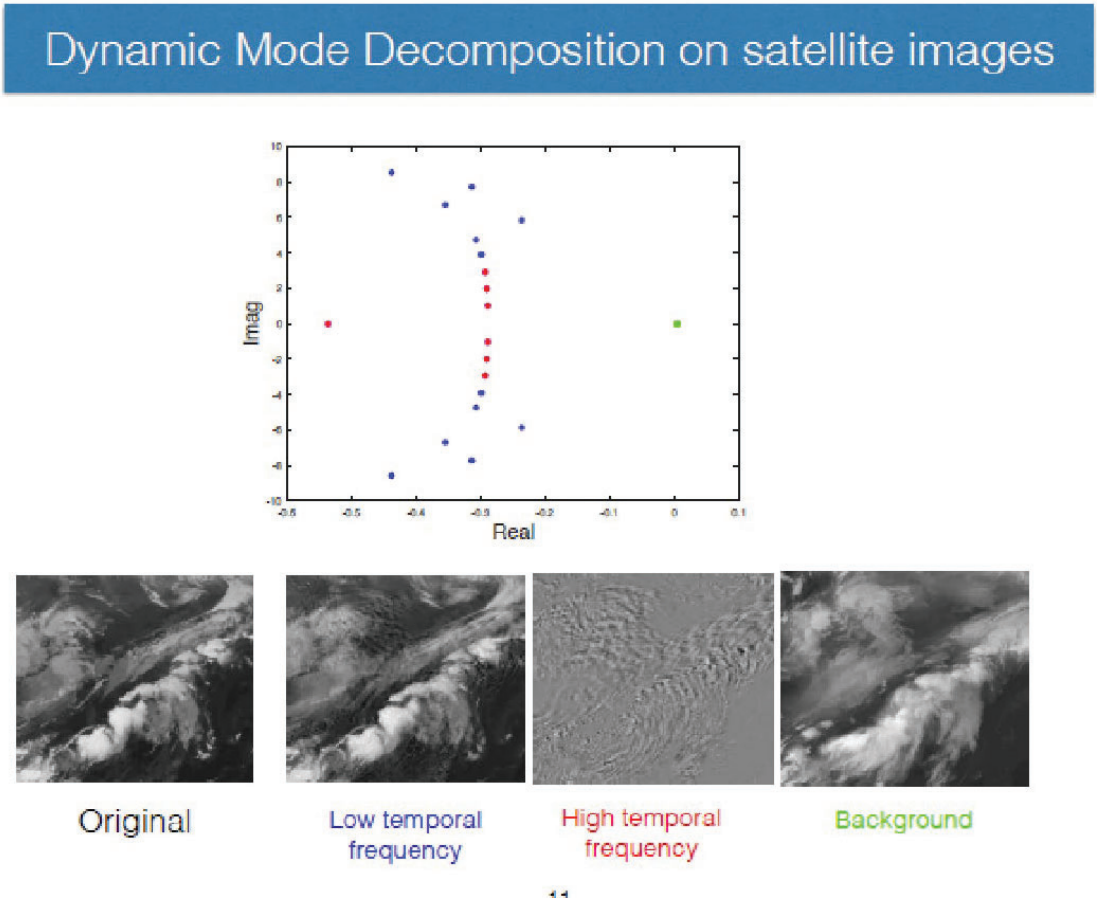
氏名：篠塚陽平

5. 所内世話人：弓本 桂也

予定していた篠塚の来所はコロナウイルスに関連する旅行の規制・自粛要請を鑑みて、残念ながら今年度も延期した。2020 年 4 月から数えて計 14 回のインターネット会議での話し合いを、本年度も当初は続けた。現在は中断している。予算は備品として使用した。

本年度当初は、昨年度に引き続き、雲の垂直方向の分布を導出する新しい手法として、動的モード分解という動画処理技術を既存のひまわりのデータにあてはめてきた。これまで参加したのは（敬称略）櫻井大督（汎オミクス計測・計算科学センター）・藤井彬人（システム情報科学府情報学専攻 1 年）Israr Haq・河原吉伸（二人ともマス・フォア・インダストリ研究所）・永尾隆（東京大学大気海洋研究所）・弓本桂也・篠塚陽平だった。

まず日本付近のひまわり画像の特定の波長を組み合わせたサンプル動画ファイルを作成・交換したり、一般的な冬の雲の性質やひまわり搭載のセンサーの特性の確認を行った。その後、雲の垂直方向の分布を導出する新しい手法を模索することに決めた。この研究方針の背景には、雲底の高さが宇宙からはなかなか観測しにくい現状と、雲底高度が今より少しでも正確に推定できれば（当共同研究の大きな目標である）エアロゾルと雲の相互作用の理解が前進するだろうという期待がある。



従来、雲の高さの判別は赤外域での雲頂温度の波長依存性に頼っており、時間に沿った変化は一般に考慮されてこなかった（観測された画像一つ一つ別々にアルゴリズムを走らせてきた）。これに対し、動的モード分解（Dynamic Mode Decomposition, DMD）と呼ばれる動画処理技術では、時系列データの時間発展に注目してモード分解を行うことで、固有 モードとそれに対応する周波数を得ることができる。気象以外の分野では、例えば動画の中で歩いている人物を固定された背景から区別することに用いられてきた。雲の観測においては、特に最新の静止衛星による 2.5 分に 1 度という高い観測頻度のおかげで、衛星観測結果を動画のように扱うことができるようになった。雲は高さによって動く速さや方向が異なる特徴を持つため、動的モード分解が、高さの識別の一助となることが期待できる。

複数ドローンによる大気流れ構造観測手法の開発

島根大学学術研究院理工学系　荒川弘之

背景と研究目標

乱流は、大気・海洋・宇宙・プラズマ等、自然の中でありふれた現象であり、様々な時間・空間スケールを伴うマルチスケール物理現象である。申請者らは、これまで磁化プラズマ中の乱流構造測定により、乱流中の輸送及び構造形成機構の解明に向けた物理、及びこれを目的とした計測・シミュレーション手法の開発を行ってきた(H.Arakawa et.al. Sci.Rep.2016 他)。本研究では、これまでのプラズマ乱流観測で培ってきた多点計測・解析手法を踏まえ、乱流現象の観測・解析手法の普遍化を目指すため、新たに大気乱流を対象とし、マルチコプターに代表されるドローンを複数利用する新しい流れ構造観測手法の開発を目指す。今年度は、ドローンによる正確な風速を測定するため、単機での野外における静的な風速応答測定法の開発、及び動的な風速応答の評価を行った。

原理

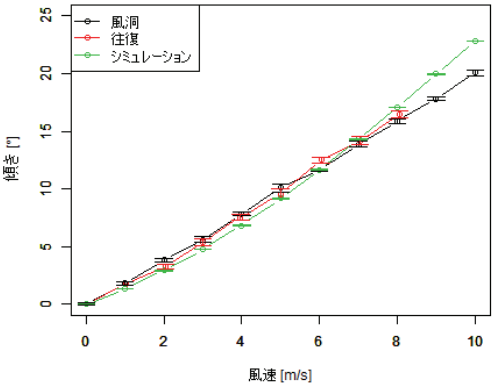
ドローンには、GNSS やアクティブソナー、オプティカルフローセンサー等を用いてホバリング状態(空間中に静止)を維持する機能を持つものがある。ドローンが横方向の風を受けた際、ホバリング状態を維持するためには、ドローン自身が傾き、風の向く方向へ逆らって力を加える必要がある。また縦方向の風を受けた場合、位置を維持するには、上昇流の場合は、プロペラの回転数を弱め、下昇流の場合は、逆に強める必要がある。このため、ドローンのプロペラ回転数、傾きセンサ等は、風速の向き・強さに影響を受ける。本研究ではこれらのデータから逆算して、ドローンが受ける局所的な速度場を推定する。

実験方法と結果

(i) 野外における風速校正法の開発

ドローンによる風速推定を行う際、風洞を用いずに簡便に校正を行うことができれば有用であると考えられる。本研究では、GNSS が移動に対する精度が高いことを利用し、野外で風速校正を行う手法を開発した。無風条件でドローンが一定速度(A m/s とする)で移動している際、ドローンに与えられる風からの力は、ドローンがホバリング状態で A m/s の風が吹いている際と同じ応答を示す。一方で、野外で無風条件である場合は殆

ど無いため、本研究では往復移動することで野外での風速を打ち消すこととした。ただし、野外での風速は一定であることを仮定した。Parrot 社製 ANAFI を用いて得られた結果に加え、風洞実験及びシミュレーションとの比較を右図に示す。8 m/s 以下の風速では何れもよく一致しており、本手法が有効であることが分かった。



(ii)時間変化を伴う風速応答計測

大気乱流を測定する際に、ドローンの時間的に変化する風速変動への応答を知る必要がある。本研究では、野外、及び室内における簡易風洞を用いた時間応答計測を行った。まず、野外において風速時間変動の観測を行った。三脚上に対向する超音波風速計を８台(４対)設置し、中央部にドローンを飛行させた(右図)。ドローンにより得られた風速変動と超音波風速計の応答を比較した。結果として、自作した超音波風速計の計測ノイズと風速変動との弁別が困難であったため、ドローンの応答を十分に評価することが出来なかった。

このため、室内で風速に周期的な変動を加えることで、時間応答の評価をおこなうこととした。右図は、簡易風洞にステッピングモータ駆動のプロペラシャッターを設置した様子を示す。シャッターを周期的に変動させることで、応答の観測を行った。得られたデータはフーリエ変換により、ランダムな成分と周期的な変動成分を弁別した。結果として 10 Hz までのドローンの応答を観測した。5 Hz 以上では、超音波風速計と比べて振幅変動が小さくなった。位相計測においては、ノイズが大きくなり、より高時間分解能な観測が必要であると考えられる。

成果報告：松浦　孝, 荒川　弘之, 杉田　暁, 佐々木　真, 稲垣　滋, 内田　孝紀
第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム, A3-07 2021.11.19

沿岸海洋循環場の予測にむけた高解像度数値モデルとデータ統合手法の開発

海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門
情報エンジニアリングプログラム　プログラム長
石川洋一

研究の目的

沿岸海洋における海洋循環は複雑な地形に支配された小さなスケールのローカルな変動から、海盆スケールの大きなスケールの影響を受けた変動までさまざまなスペクトルを持つことがよく知られており、このような変動を高精度で予測することは科学的に挑戦的な課題である。精度の高い予測結果を海運・水産など沿岸における活動へ有益な情報として提供することは社会的にも重要な課題となる。このような課題に対して本研究では沿岸域を対象とした予測手法の確立を目的として、高解像度海洋大循環モデルの開発および観測データと組み合わせたデータ同化手法に関する研究開発を行う。九州大学応用力学研究所は沿岸域における主要な観測データである HF レーダーデータに関するデータベースを保有しているとともに、そのデータの活用や海洋大循環モデル RIAMOM を用いた海況予測とその結果の水産業への活用に関する知見が豊富にあることから、沿岸域の予測精度の向上のために数値モデル・データ同化に関して共同で研究開発を行いたい。また、予測結果の活用に関して情報交換を行うことにより研究成果の社会還元にむけた知見の充実を図ることも目的とする。

研究の方法

海洋研究開発機構で開発されている海洋大循環モデル MRI.COM などの高解像度化を行い、九州大学応用力学研究所で開発されている海洋大循環モデル RIAMOM で得られた知見や DREAMS データセットなどの比較を行うことにより、沿岸域における海洋変動の再現性の向上を目指す。また、HF レーダーなどの観測データを同化するために、観測データ・数値モデルそれぞれの特性をふまえた解析手法・同化手法の開発・改良を行う。また、研究成果の水産業への活用についての情報交換・ノウハウの共有を進めることにより、成果の社会還元に関する知見を取りまとめる。

研究の結果

沿岸域の海洋モデルの再現性検証のため、HF レーダーデータとの比較を行った。JAMSTEC で運用している津軽海峡のレーダーデータに加え、宮崎県からもデータ提供をうけ、比較を行った。モデル結果と観測データの比較に際しては、流速・流向の点での比較に加え、収束・発散などの空間パターンについても比較を行った。このような高次に変換した変数

を比較することにより、単純な比較だけでは見えにくかった相違が明らかになった。例えば、モデルと観測値の差がそれほど大きくない場合でも、収束・発散でみるとパターンがずれているケースや逆にモデルと観測値にある程度の差がみられている場合でも収束発散のパターンがあっているケースもあった。これらを分析すると、いわゆる海洋内部力学によって決まっている流れと風による吹送流成分それぞれの誤差が生じる原因を分離して改善していくことが重要であることが明らかになった。

考察

今回解析を行った収束･発散成分はモデルの改善にむけて重要な情報であるだけでなく、その応用についての利用可能性も高いものである。関連研究として、海洋環境場から好適漁場を推定する際に今回得られた収束・発散成分を入力データとして利用を試みた。従来も入力データとして水温に加えて、水温勾配の強さを用いたこともあったが、収束・発散成分はパッシブトレーサーの集まりやすさや湧昇流による下層からの栄養塩供給などと直接的な関係があるので、より好適漁場形成プロセスを反映した推定値が得られる可能性があることが示された。

論文・学会発表

なし

研究組織

石川洋一（代表）　情報エンジニアリングプログラム・プログラム長　レーダーデータの解析および研究のとりまとめ

佐々木英治　アプリケーションラボ・気候変動予測情報創生グループ・主任研究員　モデル計算および解析

小室芳樹　北極環境変動総合研究センター・北極域気候変動予測研究グループ・グループリーダー　モデル計算および解析

海洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した吹送距離延長法の確立

兵庫県立大学大学院工学研究科機械工学専攻　高垣直尚

・要旨

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は，大気海洋間の運動量・熱・物質輸送に影響を及ぼすことから，この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには，外乱を除去可能な風波水槽を使用することが重要である．今年度は，応用力学研究所の共同利用水槽にて水位・差圧の同時測定を行い，運動量収支法を用いて，砕波した水面にかかる摩擦速度の推定を行った．また，その摩擦速度と波高の関係について検討を行った．

・序論

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は，大気海洋間の運動量・熱・物質輸送に影響を及ぼすことから，この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには，外乱を除去可能な風波水槽を使用することが重要である．しかし，風波水槽では，水槽長さの 100 m 程度までしか風波を発達させることは出来ず，実際の海洋での風波（30 km 程度発達し続ける）を，現在の風波水槽で生成することは不可能である．そこで本研究では，九州大学応用力学研究所の海洋シミュレータ水槽を使用して，波の持つ性質を示す統計量が同じ波を風波水槽入口から何度も送ることで長い吹送距離で発生する波を再現する，いわゆるループ法の確立を目的とする．今年度は，ループ法を用いない場合の，高風速下における，風波気液界面を通しての運動量輸送量の測定を複数の測定技法により行った．

・実験方法および実験結果

実験・解析は，吹送距離は6.5 m～33mの複数地点において，ファン回転数100回転から最大の1700回転において，実施された．表1に，2018年度の風波水槽改造により得られた最高風速の変化の程度，および，摩擦速度の値を示す．特に，摩擦速度は2018-2019年度には精度よく測定できなかったものの，運動量収支法を使用することにより，今年度初めて精度よく評価された．また，海上風速に換算した場合に風速23 m/s（最大1300回転）から43 m/s（最大1700回転）に増速することに成功したことが分かる．図1に，吹送距離33mにおける一様風速と摩擦速度の関係を示す．図より，過去の他の水槽における測定値（*Takagaki et al.*, 2012）と概ね一致するものの，測定誤差が大きいこと，特に一様風速が10m/s以下では，あまり良い一致は見られないことが分かる．これは，現在の運動量収支法においては，水位と差圧の2つの独立した測定値を使用しているためと考えられる．今後は，測定精度を向上させる必要がある．また，波高と摩擦速度との関係を検討したところ，摩擦速度の増加に伴い波高が増加する傾向を定性的に観察した．

・成果報告（論文、学会発表リスト等）

1. 高垣直尚, 海面を通しての運動量・スカラ輸送機構に関する研究, 第 3 回先進的ながれ研究会，オンライン, 2021 年 5 月 22 日.
2. 西海和希, 林 凌大, 佐々木燦汰, 西谷幸祐, 高垣直尚, 鈴木直弥, 高風速域での砕波を伴う大気・海

洋間運動量輸送量の測定手法, 波浪研究会，オンライン, 2022 年 3 月 8 日-9 日.

3. 西海和希, 高垣直尚, 微粒化を伴う気液界面を通しての運動量輸送の解明, 日本機械学会 関西学生会 2021 年度学生員卒業研究発表講演会，オンライン, 2022 年 3 月 15 日.
4. 合田総一郎, 風波水槽実験における強風域での大気・海洋間運動量輸送量の測定手法の構築, 近畿大学修士論文, 2022 年 3 月 21 日.

Table 1: Maximum wind velocity in RIAM wind-wave tank. Values of U_∞ in 2020 and 2021 were extrapolated values. Values of U_{10} in 2017 and 2019 were estimated from U_∞ using model (*Takagaki et al.*, 2012). Values of U_{10} in 2020 and 2021 were estimated from u^* using model (*Takagaki et al.*, 2012).

	N [rpm]	F [m]	U_∞ [m/s]	U_{10} [m/s]	u^* [m/s]
Takagaki et al. (2017)	1300	6.5	14.0	22.8	-
RIAM Report (2019)	1700	6.5	22.2	36.8	-
RIAM Report (2020)	1600	33	24	37.6	1.9
Present	1700	33	25	43.5	2.2

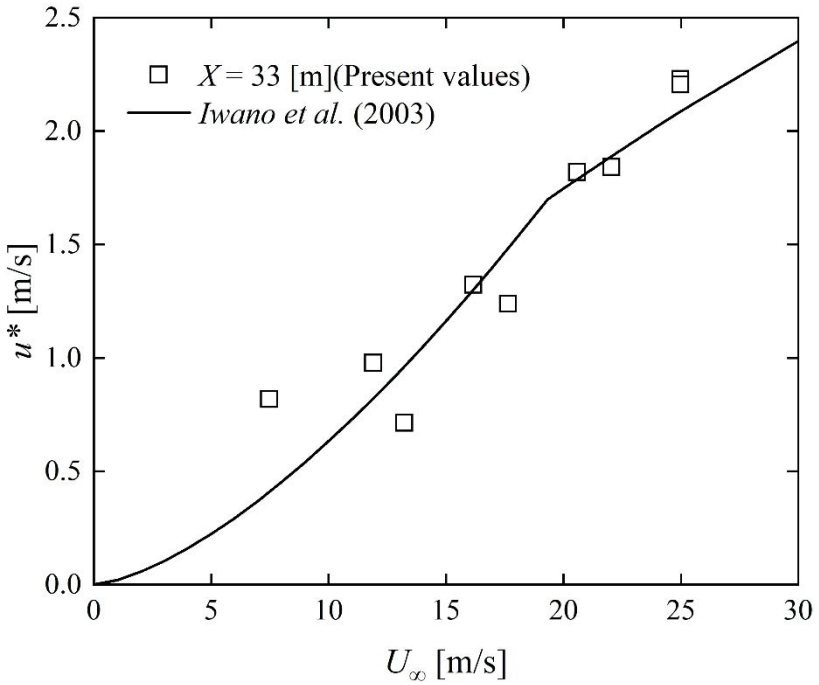


Fig. 1: Relationship between freestream wind speed U_∞ and friction velocity u^* at x = 33 m.

能登半島周辺海域における流況と漁況の関係性
～日本海における海況と石川県ズワイガニ資源量の関係性～

石川県水産総合センター　川畑　達

目的

石川県の主要な漁業のひとつに「底びき網漁業」がある．この漁業においてズワイガニは漁獲金額の約 35%を占めており，最も重要な魚種となっている．しかし，近年，石川県ではズワイガニ漁獲量の減少が著しく，漁業者の不安を招いている．このようなズワイガニ漁獲量の増減の原因の一つとしてズワイガニが孵化してから着底するまでの浮遊期の死亡率が関わっていると考えられる．過去に水産研究・教育機構は資源変動要因分析調査を行い，幼生の浮遊時の流況が資源加入量に与える影響について検証した．ただし，この調査では隠岐の資源加入量を推測しているため，石川県沖の資源加入量と海況の関係は明らかではない．また，当センターでは石川県の雌のズワイガニ（メスガニ）漁獲量については 9 年前の日本海水温との相関を確認しているがオスガニまでは分析できていない．そこで，本調査では浮遊期の水温環境が石川県の雄のズワイガニ(オスガニ)の資源動向に関係するかを明らかにするため，浮遊期の水温と県内主要港のオスガニ漁獲量との関係を調べた．

材料と方法

石川県水産総合センターの漁獲統計システムから 2002～2020 年の金沢港を対象として，オスガニの日別漁獲量が 10 箱以上のデータを抽出した．金沢港ではサイズごとに銘柄を分けてオスガニの漁獲量を集計しているため，銘柄から年齢を推定し，年別年齢別漁獲量を算出した．これらのデータを用いて各年の年齢別 CPUE（隻日数当たり漁獲量）を求めた．

オスガニでは，最終脱皮を行う年齢が個体ごとに異なり，8 歳，9 歳，10 歳の 3 つに大きく分かれ，漁獲加入はその 1 年後の 9 歳，10 歳，11 歳となる．一方，ズワイガニの産卵期は 2～3 月で浮遊期は約 3 カ月間とされており，4 月には多くの当歳個体が浮遊期にあると考えられる．そこで，九州大学応用力学研究所の海況数値モデルをベースに開発された JADE2 の各格子点について，浮遊期である 4 月 1 日の前後 10 日間の水深 200m の平均水温を求め，漁獲加入時(9 歳であれば 9 年後)の CPUE との相関分布を調べた．次に上記から得られた，相関の高い海域の水温を海況の説明変数とし，水産研究･教育機構が公表している日本海系群 A 海域西部および中部のズワイガニ親魚資源密度指数を産卵親魚量の指標として説明変数とし，各年齢のオスガニが漁獲された年の CPUE を目的変数とした重回帰分析を行った．ただし，11 歳の漁獲量は全体的に少なく，増減が激しいため，本調査では用いなかった．

結果

本調査の結果，9 歳の CPUE については山陰沖と正相関，大和堆と負相関が，10 歳の CPUE については山陰沖と正の相関がみられた(図 1)．山陰沖と大和堆の水温には相関関係は見られなかったため，両者の変数間の多重共線性はないと考えられた．9 歳の調査結果については過去に調査した金沢のメスガニの相関関係と似ており，雌雄ともに同海域の影響を受けていることが考えられた．これらの CPUE と山陰沖の水温が相関する理由として，山陰沖の隠岐堆には数年おきに冷水塊が発生しており，この冷水塊が発生すると石川県沖に稚ガニが着底しやすい流れになることが考えられた．また 10 歳が大和堆との相関関係が見られなかった原因については，今後より詳細に海流などをみていく必要がある．

これらの関係性を用いて，重回帰分析により金沢の各年の CPUE を推定した．各海域の平均水温，並びに西部および中部の資源密度指数を説明変数とした重回帰分析により CPUE を推定した結果，推定値は実際の CPUE の動向と概ね一致した．

この重回帰式から将来の CPUE 動向を予測すると，9 歳，10 歳ともに 2024 年まで減少し，2025 年から増加すると考えられた．この結果は，メスガニの傾向とも概ね一致していた．今後，金沢以外のオスガニの銘柄別サイズを把握することによるオスガニの県内主要港別の漁獲量予測を行いたい．また，2025 年以降の増加傾向となる要因を調べ，予測精度の向上に努めたい．

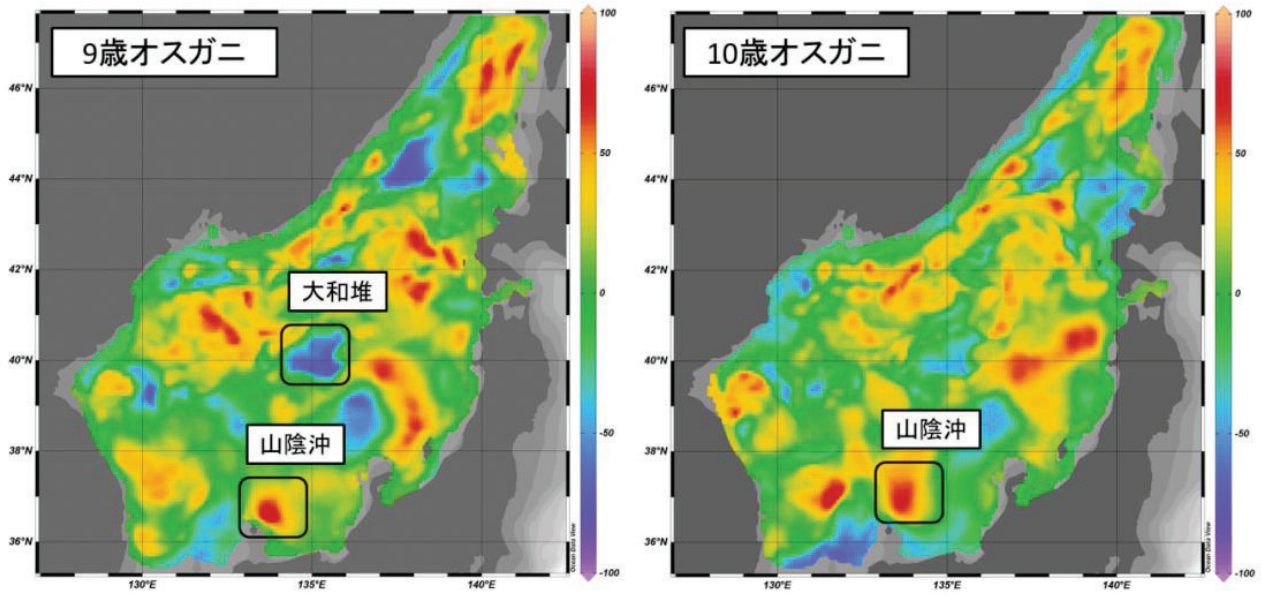


図 1. オスガニ CPUE と浮遊時の 3 月 20 日～4 月 10 日の 200m 平均水温の相関係数マップ
:相関係数の高い海域を四角で囲んだ．

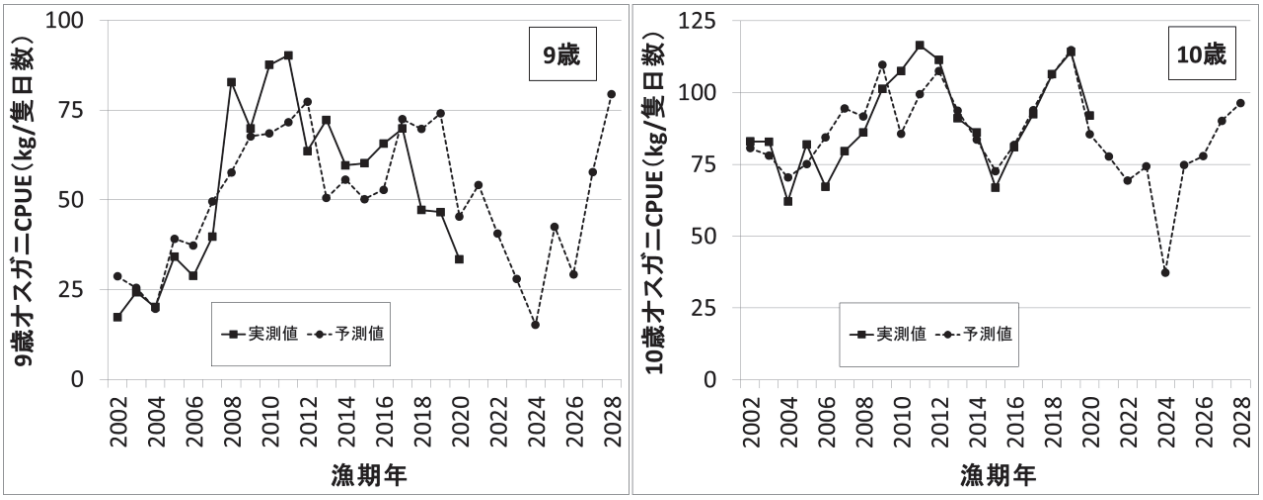


図 2. 実測値と重回帰分析による推定値の比較．漁期年は 11 月から翌 3 月とする．

等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデルの構築

京都大学・総合生存学館　山敷　庸亮

1. 研究目的

本課題では、河口を中心に起きる河川海洋相互作用を検証することが可能な河川水と海水の境界域の流れ場と物質循環を再現できる数値モデルの構築を目指す。豪雨が引き起こす河川流出は、山岳地域や平地を伴う陸域から干潮水域を経て海洋に至るため、流れのレジームが劇的に変化する。そのため、それぞれの流域の流況特性に特化したモデルが領域ごとに適用され、河口のような河川海洋接合部では河川水と海水の流れが不連続であり、十分な解析ができない領域となっていた。そこで木田と山敷らは等密度面モデルを提案し(Kida & Yamashiki, 2015)、これまで九州地方を中心とした河川・河口域への応用を進めてきた。現在、この当密度面モデルに土地利用モジュールを導入し、土地利用変化による透水係数や粗度、貯留量などについてパラメータをコントロールできるようにすることで、水文モデルへの発展的構築が進んでいる。しかし山・川・海一体型数値モデルのプロトタイプを構築には、河口の混合過程で重要な役割を担う潮汐を組み込む必要があると同時に、沿岸域の海洋循環と懸濁粒子の動態を再現する数値モデルをもとに出水時の河川水の懸濁粒子が沿岸海洋に及ぼす影響について理解を進める必要がある。

2. 解析手法

(1) 九州地方に焦点を当てた河川海洋一体型物質循環モデルを構築・検証する。これまで進めてきた観測データと河川モデルの出力結果との比較、そして高解像度標高データプロダクト毎の河川勾配の特徴を基にモデルの改良を進め、潮汐の影響を組み込んだ数値モデルを構築する。

(2) 孤島における流出過程の再現に向け、高解像度地形データを用いた数値モデルを構築する。

(3) 懸濁粒子流出過程の再現性の実現に向け、河川を通じて陸域から海洋へ運ばれる懸濁物が河口から流出する循環場に与える影響について検証する。

3. 解析結果

(1) 降水イベントが連続して発生したケースと間隔が空いて発生していたケースによる流出過程の違いを確認するため、1ヶ月間（2015 年 8 月 1 日〜31 日）の流出イベントを再現し、陸面課程の効果を検証した。出力結果は国交省の観測データとの比較が可能な一級河川（e.g. 嘉瀬川・六角川・筑後川）を中心に、ピーク流量・ピーク時間を検証した。

陸面課程は一律 60%の雨水が土壌へと到達すると仮定し、さらに一定量でより土壌深くまで吸収される効果と大気へ蒸発する効果を追加した。計算結果は、ピーク流量が観測の 50-150%の値で再現することを示していたが、ピーク時間はどれも半日ほど遅れていた。遅れの要因としては底摩擦の影響が考えられ、底摩擦係数を小さい値ほど再現性が高くなった。底摩擦を大きくすると、ピークが遅れると同時にピーク流量も弱まった。これは流出時間が増えるほど、地下や蒸発の効果を受けるためだと考えられる。土壌中の流れを想定したとき、流体で用いられているような Quadratic Law を使用するのが適当なのか、妥当だとしても陸面課程を再現するうえで最適な摩擦係数については、今後、水柱の厚さが果たす役割を考慮しながら検証する必要がある。

(2)ASTER-GDEM の高解像度地形データ(水平解像度 30m)をもとに屋久島の流出モデルを構築した。昨年度構築したモデル(90m)では解像することが難しかった小規模河川を忠実に再現することが可能になった。ただ地形には数値ノイズがあることから、今後水文学的な改良が必要である。

(3)河川から海洋へと大量に放出された懸濁物質によって水塊の密度が変わる。この効果が強く働く場合は例え河川水であっても海水の下に貫入するような流れを作り出し、沿岸域の流れ場に大きな影響をもたらすことを示した。

4. 考察

河川海洋一体型モデルで再現された流出イベントはピーク時間が観測より遅れる傾向が、モデルの解像度に起因する河川の流路幅や最大水深といった要因だけでなく、摩擦係数という物理過程の改善によって実現できるところまでモデルの開発が進んだ。ダムなど人工物による影響はモデル内に組み込むことは難しいものの、潮汐変動が導入されたことで自然な河川と海洋の再現が実現した。今後は潮汐による混合過程を再現するためのパラメータ設定が必要となる。また現行モデルの基礎方程式で近似的に表現している土壌中の流出過程の理解に加え、より現実的な陸面過程のパラメータ設定を明らかにする必要がある。今後は、高解像度海洋モデルで再現した河口における懸濁物質の輸送過程の結果をもとに、河川海洋一体型で表現するための手法を考慮する計画である。

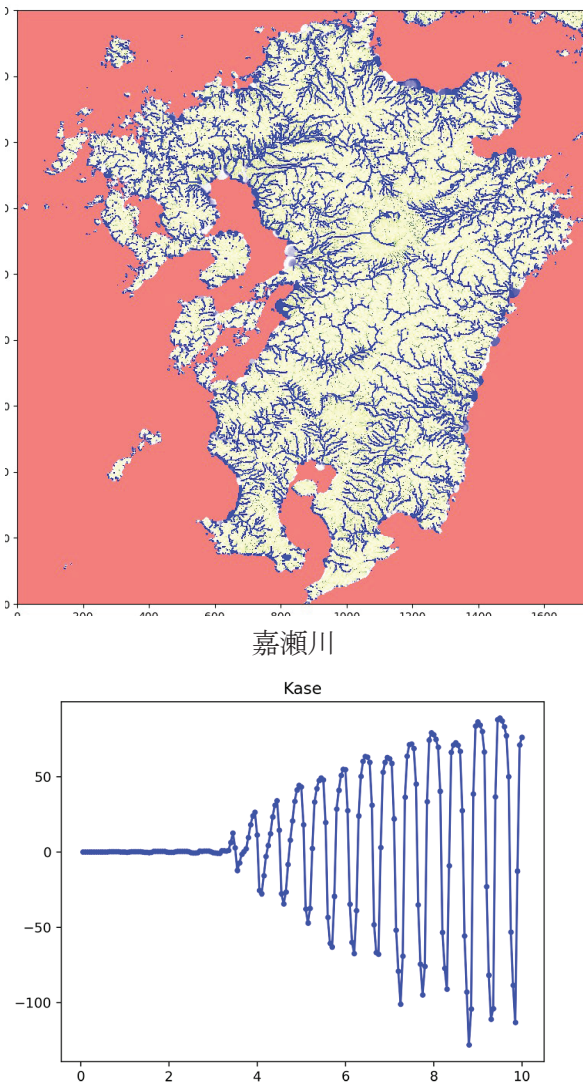


図１（上）九州モデルで再現した豪雨時の河川水流出イベント。色は淡水層の厚みを示している。（下）潮汐をモデルに導入した際の嘉瀬川の河口付近での流量変動。

5. 研究成果

学会発表

木田新一郎・阿部稜・山敷庸亮「沿岸域における河川水の行く末」日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 6/2, オンライン

佐藤 啓明・山敷庸亮「Application of an isopycnal-layered model to islands」日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 6/2, オンライン

干場康博・松村義正・伊藤幸彦・羽角博康「Application of suspended sediment and physical process interaction to river-plume simulations in the microtidal coastal region during a flood」日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 6/2, オンライン

Yasuhiro Hoshiba, Hiroyasu Hasumi, Sachihiko Itoh, Yoshimasa Matsumura, Satoshi Nakada, A MODELING STUDY FOR THE BIOGEOCHEMICAL IMPACT OF FLOODING RIVER DISCHARGE WITH HIGH SUSPENDED SEDIMENT LOAD ON COASTAL SEAS, Ocean Science Meeting 2022 年大会, 3/2, オンライン

論文発表

Yasuhiro Hoshiba, Hiroyasu Hasumi, Sachihiko Itoh, Yoshimasa Matsumura, Satoshi Nakada, Biogeochemical impacts of flooding discharge with high suspended sediment on coastal seas: a modeling study for a microtidal open bay, Scientific Reports, doi:10.1038/s41598-021-00633-8

研究組織

代表者	京都大学総合生存学館	教授	山敷庸亮
協力者	東京大学大気海洋研究所	助教	松村義正
協力者	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	干場康博
世話人	九州大学・応用力学研究所	准教授	木田新一郎

沿岸波浪と GNSS 反射信号との対応関係の観測

京都大学大学院理学研究科　根田昌典

目的

本研究は沿岸波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための基礎的な観測を実施し，検証のための波浪ブイの観測精度や沿岸や外洋の波浪の統計的な性質の抽出の信頼性の検討を行ってきた．平成 30 年度からは波浪と水面直下の乱流強度観測の結果を用いて GNSS 反射波観測によって得られる波浪情報の物理的意味を検討している．波浪と海面直下乱流観測のデータの解析や波浪・流速・GNSS 信号の同時観測を実施することによって 波浪の 2 次元スペクトルや波浪の高次モーメント量などの詳細な波浪情報を用いたデータ検証を行うとともに，波浪に伴う波成乱流の強度変化量を評価する．

手法の概要

波浪の状況は，それによる海面の状態変化が GNSS 反射信号の経路に影響する一方で，その影響を評価することができれば，海面表層の波成乱流の評価につながる可能性がある．このことから，従来取り組んできたうねりと風波の分離観測の解析に加え，波浪と海表面乱流の同時観測データの解析を行った．外洋域（紀伊半島南方）で実施した観測（新青丸航海 KS-18-13 : 平成 31 年度報告書）を調査した結果，ほぼ同一の風速に対して波浪の状況が異なるデータを得ることができた．

波浪と海面付近の乱流の同時観測は，Nortec 社製の慣性センサー付き精密 3 次元流速計(Vector)を浮体システムに装着した Vector ブイと，応用力学研究所の共同利用機器である GPS 波浪ブイをロープで連結して実施した．Vector の姿勢変化の影響を受けた観測流速はこれまでと同様に Edson et al. (1998) による船上での渦相関観測手法を応用して，以下の式に従って地球座標系における真流速値を回復した．

$$\boldsymbol{V}_{true} = T\boldsymbol{V}_{obs} + \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{T}(\boldsymbol{M} - \boldsymbol{S}) + \boldsymbol{V}_{mot}$$

ここで，V_{true} は真流速，V_{obs} は観測された流速，V_{mot} は回転による見かけ上の接線流速，T は姿勢変換行列，$\boldsymbol{\Omega}$は Vector の角速度，$\boldsymbol{M}$-$\boldsymbol{S}$ は IMU を起点とする流速観測点の位置ベクトルである．この式に Vector 付属の IMU の出力である姿勢変換マトリックスを適用して真流速を得る．

結果の概要

図 1 は実施した観測のうち，2 つのレコードにおける鉛直流速と水平流速のスペクトル密度分布を示す．各レコードは流速，加速度，各速度の 64Hz 観測を 10 分間継続して得た．観測された流速は Vector の圧力計の値から水面下 1.6-1.8m の範囲での観測であることがわかっている．C03-2-04 レコードにおいては平均風速 5.12ms^{-1}, 有義波高 1.0m であったのに対し, C06-4-05 レコードでは平均風速 5.25ms^{-1}, 有義波高は 1.2m であった．図より，風速がほぼ同等であるのに対して，有義波高が高い C06-4-05 の方が全周波数帯においてエネルギー散逸領域における流速スペクトルが高い値を示していることがわかる．鉛直流速と水平流速ともに高波数域での差が大きいが，水平流速に関しては 2Hz 程度のピーク周波数帯においても明瞭な差異がある．この違いは波浪の状況を反映していると予想し，観測時の 2 次元波浪スペクトルを示す（図 2）．両レコードは風速の条件はほぼ等しいのに対して，波浪状況には差異がある. C03-2-04 はうねりに相当する 0.1Hz 程度の周波数帯のみに波浪のエネルギーがあるが, C06-4-05 はうねりに加えて風波領域にもエネルギーがある．外洋域の記録であることから，この状況の違いの理由はおそらく吹走時間の違いによるものであろうと考えられるがまだ詳細には検討していない．このような状況下での海面直下の乱流強度は風によるシア乱流によるものだけではなく，両ケースの乱流エネルギーの差異は波浪そのものによる影響である可能性があると考えられる．波浪に伴う乱流エネルギーの生成が水位変動とどのような関係にあるのかについて，今年度は波の位相に対応して乱流エネルギーが変化するかどうかを調査することを試みる．

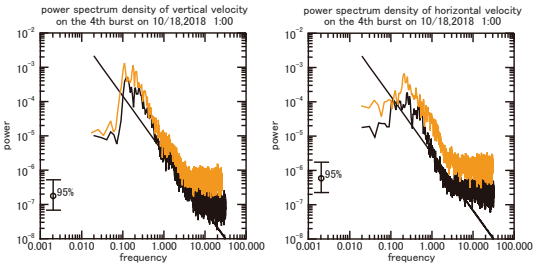


図 1 : C03-2-04（黒）と C06-4-05（橙）における海面直下の鉛直流速（左）と水平流速（右）のスペクトル密度分布

昨年度までの解析では, 海面直下の流速スペクトルの形状にみられる 2 つの特徴を指摘した．波浪の周期付近におけるエネルギー密度の極大とその高周波数側での急激なエネルギー減少であり，結果的に 1Hz から 10Hz の範囲以外では Kolgoromov の-5/3 乗則に沿わない形状となる．このような形状が水面波の位相に依存した乱流強度変化によるものである可能性を検討するために，各レコードの水面変位をゼロ・アップクロス法によって個別波に分解し，それぞれの個別波の位相を 8 分割（π/4 毎）した流速変動を取りまとめることで，波浪の位相ごとの流速スペクトルを計算した. 図 3 は C06-4-05 のレコードから抽出した個別波を示している．ただし，抽出された個別波の周期や波高はそれぞれ異なるため，見やすさのために横軸を位相とし，振幅はそれぞれの個別波の標準偏差で規格化している．また，今回は短波長の波を分解するのは難しいと考え，周期 6.14 秒（384 個の観測値，波長は約 60m）以上の波のみを抽出した．各抽出波は卓越波をよく抽出できており，それよりも短波長の複数の波を含む.

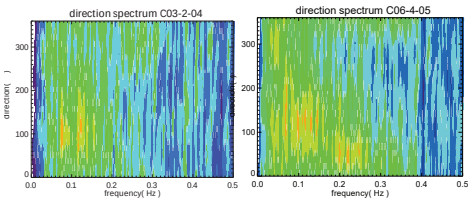


図 2:C03-2-04(左)と C06-4-05(右)の 2 次元波浪スペクトル

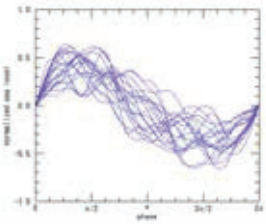


図 3 : C06-4-05 において抽出した個別波（振幅は波高の標準偏差で規格化）

図 4 と図 5 は C06-4-05 の 8 分割した位相ごとの鉛直流速成分と水平線分のパワースペクトルを示す. これらのスペクトルは各個別波の位相範囲ごとのデータから得たピリオドグラムの平均である．個別波の波長，従って各位相範囲のデータ数は異なるため，ゼロパッディングでデータ数を揃えてピリオドグラムを計算した.

C06-4-05 は風波とうねりの両方を含んでいるが，図より，各フェーズの 1Hz から 10Hz の区間でのエネルギーが異なっていることがわかる. 今回用いたゼロアップクロス法はサイン波の形状を抽出するので, 波の峰と谷の直後はそれぞれフェーズ 3 とフェーズ 7 に相当し，鉛直流速成分と水平流速成分ともにフェーズ 3 と 4 は比較的大きなエネルギーが見られる. 目視では白波は顕著ではなかったことを考えると, 明瞭な砕波ではなくても波の峰の直前の位相（時間的には峰の直後）では等方的な乱流が強いという位相依存性がある可能性がある. 鉛直流速変動のエネルギーは各フェーズで異なっている様子が見られる一方，水平流速成分ではフェーズ 3 と 4 以外でのフェーズでは明瞭な違いは見られない．これらの性質は，波運動に伴って，鉛直流速と水平流速の変動 1Hz 以上の流速変動においても非等方性がある可能性を示している．しかし，解析のケースは未だ限定的であり, 解析の妥当性の更なる検討とともに観測データを増やすことによってこれらの相違について詳細に調査することが次年度の課題である.

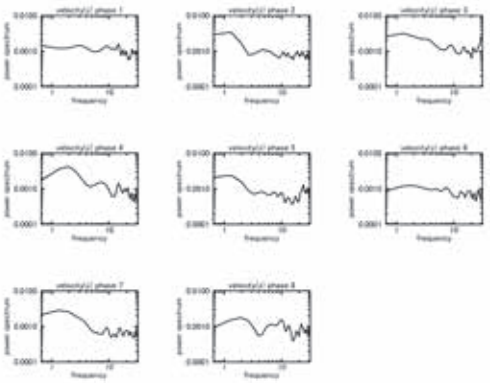


図 4:C06-4-05 で抽出した個別波の 8 分割した位相区間の鉛直流速成分から得た位相区間ごとのパワースペクトル．各フェーズはそれぞれ(0, π/4, π/2,3 π/4, π ,5 π/4,3 π/2,7 π/4)から π/4 の範囲.

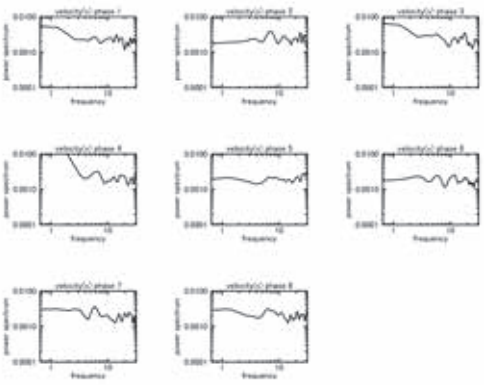


図 5 : 図 4 に同じ，ただし水平流速成分

研究成果報告

口頭発表：2 件（別紙論文リスト参照）

観測：勢水丸(2112)：水位ブイ観測（市川准教授と共同）

研究の体制

研究代表者 : 根田昌典 : 京都大学大学院理学研究科　助教

研究協力者：大迫拓馬：京都大学大学院理学研究科　M2

所内世話人：市川香：応用力学研究所　准教授

若狭湾における定置網漁業の急潮対策に関する研究

福井県立大学　海洋生物資源学部　兼田淳史

【研究の目的】

若狭湾（図 1）では急潮と呼ばれる突発的な強い流れがしばしば発生し、定置網漁場において漁具の破損など甚大な被害を及ぼす。急潮の発生状況やその対策に向けた情報収集のため、福井県と京都府は定置網付近の流れや水温を計測できる観測体制を構築している。本研究は取得した観測データを利用して「急潮の発生状況およびその特徴について明らかにすること」や「水温の変動傾向なども含めた定置網漁場の環境変化に関する知見を把握すること」を目的として実施した。

図 1 若狭湾およびここで分析事例を示す丹生と高浜の観測地点.

【観測およびデータ解析】

若狭湾の定置網近傍では、福井県水産試験場、福井県立大学、京都府海洋センターが漁業者と協力して流れや水温を計測しており、2021 年度においても、それぞれの定置網の漁期にあたる期間（通年、あるいは 5-10 月頃）に観測は無事に実施された。

【結果および考察】

ここでは本研究の一例として、丹生（にゅう）の観測結果と九州大学応用力学研究所が開発した日本海沿岸海域を対象とする海況予報モデル（DREAMS_C）のシミュレーション結果を利用して進めた急潮発生時の分析結果を紹介する。

丹生の定置網漁場で取得した ADCP（超音波多層流向流速計）による多層の流れのデータを時系列にして示した（図 2a)。5 月末から 8 月上旬までは強い流れは発生しなかったが、9 月に 50cm/s を超える強い流れ、すなわち急潮が発生していた。そこで、図 2(b)では急潮が発生していた 9 月の時系列を拡大した。9 月上旬は穏やかな流れが続いていたものの 9 月 15-16 日に南西方向へ向かう急潮が全層で発生していた。その後、流れが弱くなったものの 21-22 日には表層で最大流速が 60cm/s を超える強い 2 回目の急潮が発生していたことがわかった。これらの急潮発生時における風のデータや海洋予報モデル DREAMS_C の流れのシミュレーション結果を収集し、それぞれの急潮の発生要因について調べたところ、1 回目と 2 回目では発生要因が異なると推察された。1 回目の 9 月 15 日頃はシミュレーション結果（図は省略）によると若狭湾内に時計回りの渦が発生して

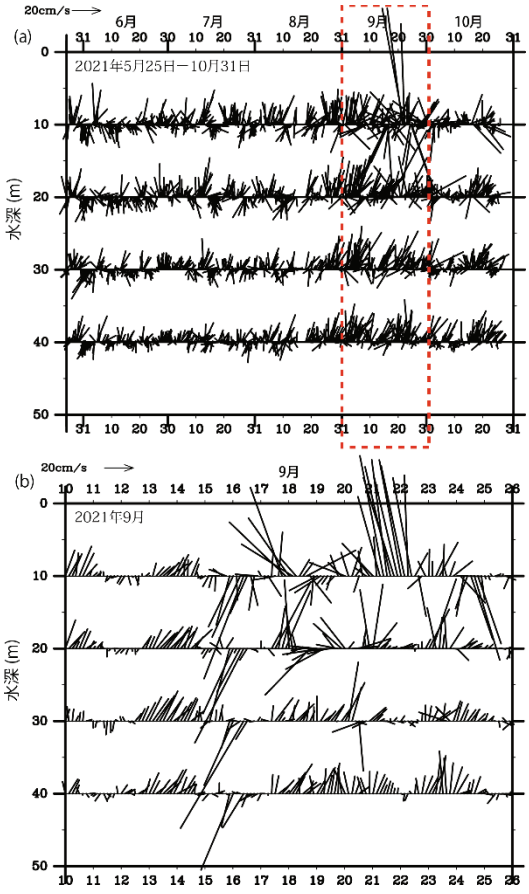


図 2. 海面下 10，2，30，40 層における流れの時系列. (a)：2021 年 5 月 25 日から 10 月 31 日まで (12 時間間隔)、(b)9 月 1 日から 30 日まで (3 時間間隔) の流れを示している.

おり、その渦が敦賀半島先端付近に当たることによって南西向きの急潮を引き起こしたと推察された。一方、9 月 21-22 日の急潮発生時の天気図は日本海を前線の通過に伴い強い風が吹いた時期で、また同時期の流れの数値シミュレーションの結果は若狭湾湾奥の複数の半島の先端付近で北向きの流れが発生していたことから(図 3 参照)、前線通過時の強風と半島の地形の効果により丹生では北へ向かう急潮が発生したと推察された。急潮に関する知見は増えてきているものの、急潮は年に数回しか発生しないため更なる知見の蓄積をするためには今後も現地観測と分析を継続する必要がある。

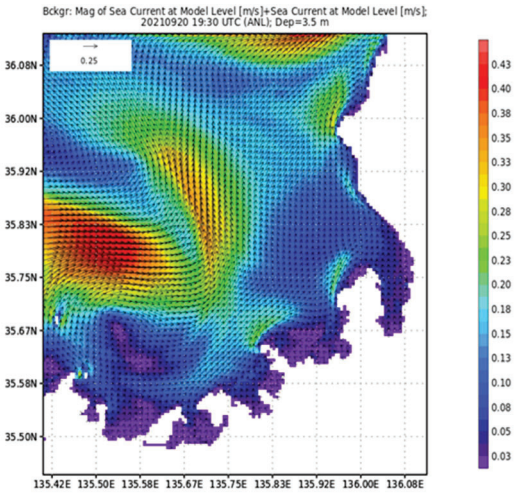


図 3. 高解像度シミュレーションモデルの計算結果：2021 年 9 月 21 日．半島の先端付近で流れの強化が確認できる．

近年、グローバルスケールの環境変化が定置網漁場においても確認できる事例がでてきた。昨年度の同報告においては遠方を通過した大型の台風が若狭湾の定置網漁場の流れに与えた影響について述べたが、今年度は 10 月の水温について報告する。2021 年 11 月、気象庁は同年 10 月の日本海、東シナ海の海面水温が平年よりかなり高くなり、解析値のある 1982 年以降では最も高くなったことを報道した（気象庁ホームページ)。若狭湾の定置網漁場における水温状況を把握するため、10 年程度にわたって水温データが蓄積されている高浜の定置網漁場の水温データを分析した。2021 年 10 月の高浜の水温時系列をみると（図 4)、確かに 10 月中旬まで表層が 25℃程度の高水温が維持され、中旬以降は急速に低下したものの 10 月全体でみると他の年より高温であった。漁場における水温の変化は漁獲される魚の種類や時期、成層構造や流れの強さなどの変化に関わっており、水温の今後の変化には注視する必要がある。

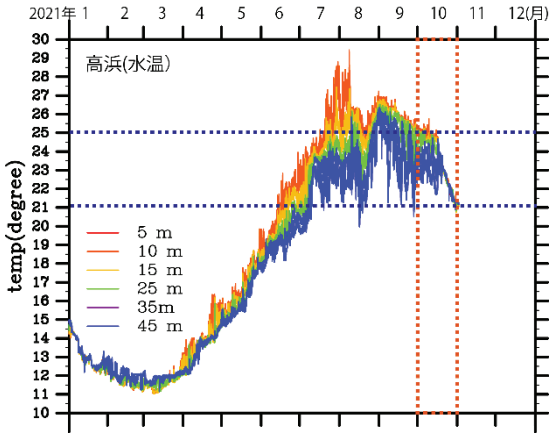


図 4. 高浜の定置網漁場にける水温変化（2021 年)．赤枠は高温が確認された 10 月である．

定置網漁場を観測プラットホームとした海況モニタリングの維持は予算や人材、コロナ禍などの影響で難しい場面もあるが、既に 10 年以上にわたって継続してきたことによる価値が生まれ始めており、今後も絶やすことなく運営することが重要であると考えられた。

【関連の成果発表（論文発表）の一例】

由良川出水に起因する若狭湾の急潮，水産海洋研究，85(2)，54-68，2021

熊木 豊，広瀬 直毅，井桁 庸介，兼田 淳史，鮎川 航太，上野 陽一郎，舩越裕紀，上野陽一郎

【研究組織】

【研究代表者】福井県立大学海洋生物資源学部　兼田　淳史
【所内世話人】九州大学応用力学研究所　千手　智晴
【研究協力者】九州大学応用力学研究所　広瀬　直毅
京都府農林水産技術センター　舩越　裕紀
福井県水産試験場・漁場環境研究グループ　岩崎　俊祐

瀬戸内海の伊予灘と豊後水道における乱流観測

研究代表者　愛媛大学沿岸環境科学研究センター　郭 新宇

背景と目的

潮汐混合と浮力加入間のバランスの空間的な違いから形成される潮汐フロントは、世界各地の内湾や大陸棚に存在し，物質循環に影響することを通じて生物生産に寄与する．我が国では豊後水道で初めて潮汐フロントの形成が報告された（柳・大庭 1985）．近年豊後水道の潮汐フロントについて，海峡部の強い潮流による移流によって位置とフロント強度が大きく変動することを衛星海面水温データの解析から明らかにされた（Dong and Guo 2021）．本研究では豊後水道の潮汐フロント域において船舶観測を実施し，潮汐フロントの形成・変動プロセスを明らかにすることを目的とする．潮汐フロントの形成・維持過程が明らかにされることは，海洋物理分野への貢献のみならず，フロント周辺の二次循環が生じる物質輸送と生物生産過程の解明へ貢献が期待できる．

研究内容

2021 年 7 月 10–11 日（大潮）と 7 月 17–18 日（小潮）に豊後水道の潮汐フロントを横断する断面においてフロント構造と乱流強度分布の調査を実施した．調査は愛媛大学沿岸環境科学研究センター練習船「いさな」により行われた．九州大学応用力学研究所の TurboMAP-5 により潮汐フロント周辺の成層構造と乱流強度を計測するとともに，いさな搭載の音響ドップラー流速計（ADCP）と表面水温計による流速と水温を計測した．また，JFE アドバンテック社の RINKO profiler と Smart-ACT の水質計による計測も実施した．潮汐フロントの移流過程を捉えるために潮時に合わせたフロント断面観測を行うとともに，ひまわり 8 号による衛星海面水温と現場観測との比較を行った（衛星海面水温は 7/11 の一部の時間帯の晴天時のみ利用が可能であった）．

図 1 a–d に 7 月 11 日の 9 時から 15 時までの 2 時間毎の衛星海面水温を示す．豊後水道では潮汐波は進行波として存在し潮位と潮汐流が概ね同位相となるため，宇和島の潮位データから，潮流は 10 時頃に上げ潮から下げ潮に転流し，14 時頃に最大の下げ潮であったと推測される．衛星海面水温からは豊予海峡部の冷水域（混合域）と豊後水道東部の暖水域（成層域）間を南北に走る水温前線（潮汐フロント）が，時間とともに南東側へ移動するとともに水温勾配が強化されている様子が確認できる（図 1 a–d）．同様の潮汐フロントの南東方向への移動とフロントの強化はいさなで計測された海面水温にも認められた（図 1 e–h）．ただしフロントが最も強化される時間帯（15 時ごろ）における水温勾配は，衛星海面水温のもの（1°C/1000 m）に比べていさなによる現場水温（5°C/500 m）の方が顕著に大きかった．図 2 にその顕著な水温勾配付近で実施した乱流観測結果を示す．この乱流計測は海面水温が 100m で約 3°C変化するフロント上で実施された．このフロント域では、表層 10m に顕著な乱流散逸（$\varepsilon \sim 10^{-5}$ W kg^{-1}）が生じており、またフロントを挟んで成層域側では強い下降流（~0.15 m s^{-1}）が生じていた．また，成層域側の表層 10~20 m では多数の密度逆転層が乱流計や水質計で観測された．

以上の結果は潮汐フロントが潮汐流によって移流・変形されることを明確に示している．潮汐フロント域で強い乱流散逸と鉛直流，及び密度逆転が生じていることは対流不安定の発生を示唆する．本調査では潮汐フロントの位置と強度の変動が移流と混合によって複雑に生じている実態の一端が捉えられ，今後の調査でその全容を明らかにするとともに，フロント域の物質循環と生態系に与える影響の評価を行う予定である．

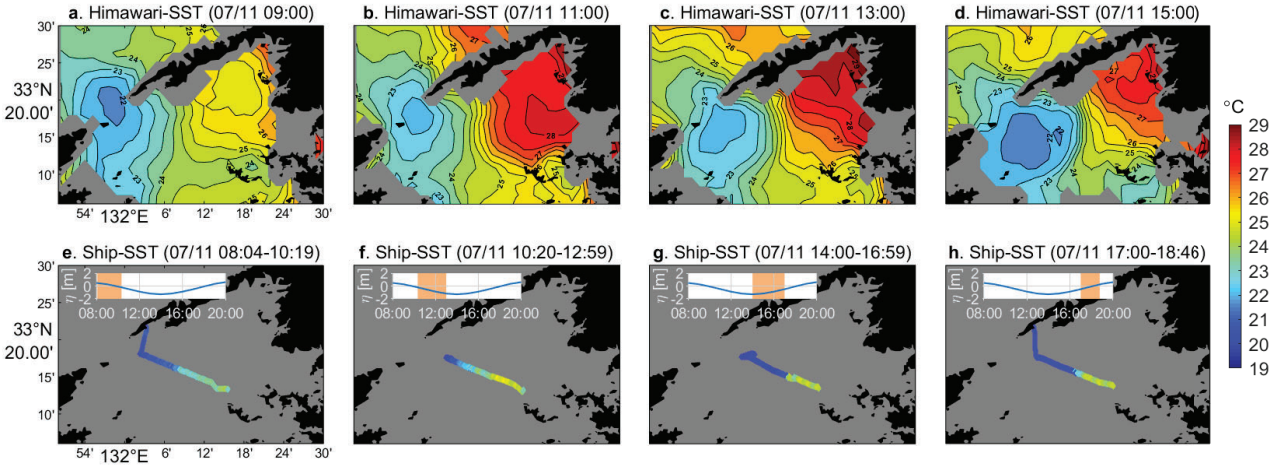


図 1　　2021 年 7 月 11 日における海面水温分布. (a–d) 2021 年 7 月 11 日にひまわり 8 号で計測された海面水温の 9 時から 15 時まで 2 時間毎の変化, (e–h) 2021 年 7 月 11 日にいさなで計測された航跡上の表層水温. (e) 8:04–10:19, (e) 10:20–12:59, (e) 14:00–16:59, (e) 17:00–18:46. 図(e–h)中の上部には宇和島における潮位偏差を青線で、いさなによる計測期間をオレンジ色で示す.

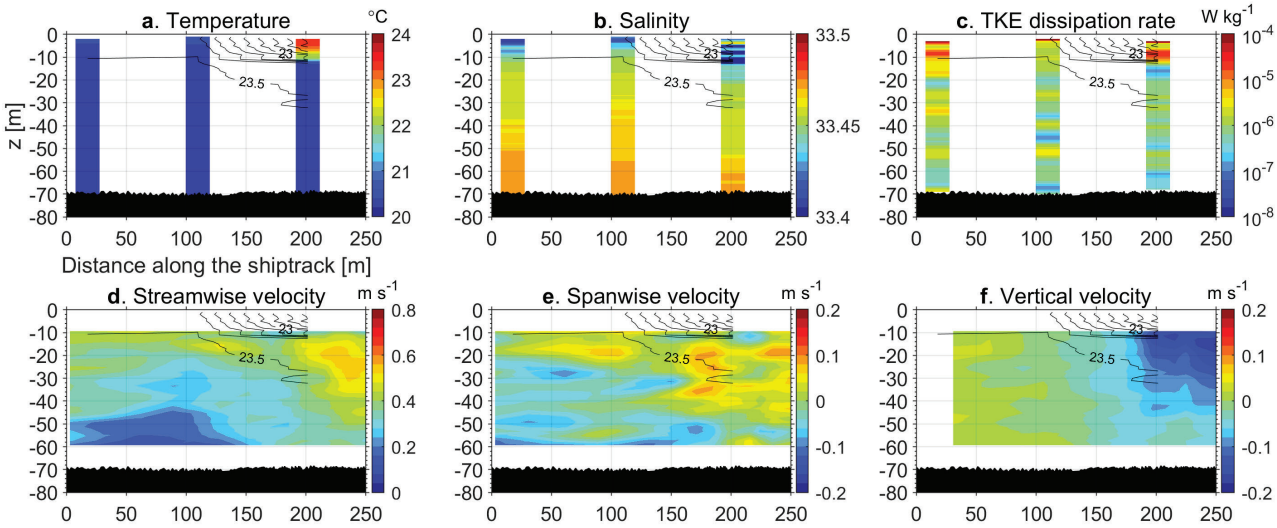


図 2　　7 月 11 日に潮汐フロント周辺において実施された乱流系と船底 ADCP による観測結果. (a) 水温, (b) 塩分, (c) 乱流運動エネルギー散逸率, (d) 流れ方向（東南東向き）の流速, (e) 流れに直交する方向（北北東向き）の流速, (f) 鉛直上向き流速. 図中の黒実線は海水密度 (σ_t), 黒いシェードは海底地形を示す.

研究組織

郭 新宇（愛媛大学沿岸環境科学研究センター、研究代表者）、遠藤 貴洋（九州大学応用力学研究所、所内世話人）、堤 英輔（東京大学大気海洋研究所、研究協力者）

東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変動

鹿児島大学水産学部　中村 啓彦

目的　黒潮流量は夏季に多く秋～冬季に少ないという観測事実がある。従来のスベルドラップ理論で予測される流量の季節変動はこの観測事実と 180 度位相が異なるが，このことは従来の理論の枠組みでは説明することができない。このような黒潮の季節変動については、黒潮直上の風応力が黒潮の大・中規模現象を駆動する入口の仕組みと黒潮の運動エネルギーが乱流スケールで散逸する出口の仕組みで支配されており，入口と出口の仕組み，そして双方を繋ぐエネルギー遷移の仕組みから統合的に調べる必要があると考えられる（中村 2017)。本研究ではこの考えに基づきエネルギー遷移から乱流散逸へと至る仕組みに関して研究を行う。特に黒潮と急峻な地形間の相互作用で生じる乱流混合過程に注目し、現場観測と数値実験によりその詳細を明らかにすることを目的とする。

研究内容　鹿児島大学水産学部練習船「かごしま丸」KG2107 航海（2021 年 6 月 13–20 日）と KG2116 航海（2021 年 11 月 13–22 日）において、トカラ海峡の黒潮流軸中に位置する海山（平瀬）上で生じる流れと地形の相互作用過程を明らかにするため、自由落下曳航式乱流計（VMP250）による乱流強度と成層構造、およびかごしま丸搭載の音響ドップラー流速計（ADCP）と計量魚探装置による流れと音響散乱強度の計測を実施した。KG2107 航海では、黒潮の流軸に沿った平瀬上の断面において、トカラ海峡で卓越する半日周潮の潮時に合わせた観測を 6 月 14 日 18 時からの 12 時間の間に 4 回実施した。KG2116 航海では平瀬上の水深約 350ｍの定点において VMP250 と ADCP による 24 時間の流れと乱流の連続計測を実施した。ただし測器の充電のため、途中に約 3 時間の中断を挟んだ。

観測結果の解釈のために、MITgcm (Marshall et al. 1997) を用いた数値実験を実施した。東経 126.5–134.5 度、北緯 25.5–32.0 度を計算領域とし、海洋モデル DREAMS (DR_M, Hirose et al. 2013) を基に初期条件と開境界における緩和条件を与えるとともに、開境界から主要 4 分潮の順圧潮汐 (Matsumoto et al. 2000) を入力した。平瀬周辺の地形と流動を精度よく解像するために、東経 128.7–130.7 度、北緯 29.1–30.6 度、海面から 600 m 深までの範囲で格子幅を水平 200 m、鉛直 5 m に設定した。数値モデルの粘性・拡散に関しては、背景の鉛直粘性・拡散係数を 1×10^{-5} m^2 s^{-1} とし、内部波の砕波による密度逆転から Thorpe scale 法に従って鉛直粘性・拡散係数を強化する Klymak and Legg (2010)のスキームを採用した。水平粘性・拡散係数は 1 m^2 s^{-1} で一定とした。

結果　KG2107 航海で実施した断面観測からは、断面上の浅瀬（水深約 150m）の下流側において、150m より浅い層では黒潮がジェットを形成する一方で深い層では流れが半日周期で向きを変化させること、及び平瀬の浅瀬上とその下流側で上流側に比べて乱流エネルギー散逸が顕著に強化されることが明らかとなった（図 1)。また、浅瀬上で密度面の大きな鉛直変位を持つ内部波が生成されている様子も捉えられた（図 1p)。KG2116 航海で実施した平瀬の浅瀬背後における定点観測からは、流れと成層構造が半日周期で変動する様子が捉えられた（図 2 左列)。乱流運動エネルギー散逸率は表層の黒潮ジェット下部の 150m~200m で著しく強化されていた。このような流れ、成層、及び乱流散逸の観測結果の特徴は本研究で実施した MITgcm によるシミュレーションで良好に再現できていることが確認された（図 2 右列)。このシミュレーション結果の解析から、平瀬下流の中底層での流れの半日周期変化は、半日周期潮汐に同期して平瀬で生成・剥離する小スケールの渦に伴う変動と良く対応することが分かった。同時に平瀬近傍で内部波が発生する点も確認された。本研究の結果から、トカラ海峡に多数存在する海山において黒潮・潮汐・地形間相互作用によって渦と内部波が生成され、流動や水塊混合、そして黒潮の運動エネルギーの散逸に影響を与えていることが示唆される。今後は渦と内部波過程の詳細を明らかにし、領域的なエネルギー散逸の評価へとつなげる予定である。

研究組織　中村 啓彦 (鹿児島大学水産学部, 研究代表者), 遠藤 貴洋 (九州大学応用力学研究所, 所内世話人), 堤 英輔 (東京大学大気海洋研究所, 研究協力者), 小針 統 (鹿児島大学水産学部, 研究協力者), 仁科 文子 (鹿児島大学水産学部, 研究協力者), 井上 龍一郎 (海洋研究開発機構, 研究協力者), 長井 健容 (東京海洋大学, 研究協力者)

謝辞　DREAMS による計算結果を提供頂いた九州大学応用研究所の広瀬直毅教授に御礼申し上げます。

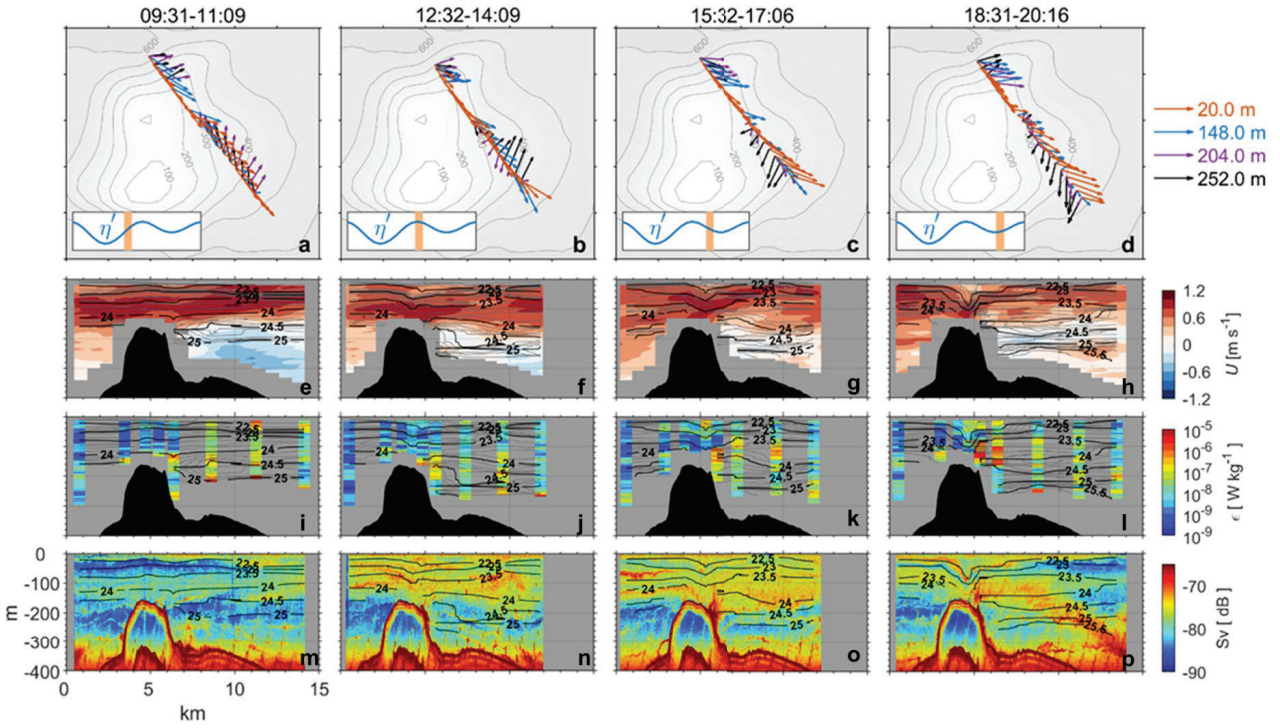


図 1　2021 年 6 月 15 日にトカラ海峡の平瀬上で実施した断面観測結果。(a–d) 海底地形と流速ベクトル (赤色: 20.0 m 深、青色: 148.0 m 深、紫色: 204 m 深、黒色: 252 m 深)、(e–h) 断面に沿う方向の流速、(i–l) 乱流運動エネルギー散逸率、(m–p) 120-kHz 計量魚探装置による音響散乱強度。図 a–d 中左下は中之島験潮所の 6 月 14 日における 24 時間の潮位変化図であり、青線が潮位偏差、橙色は断面の観測時間を表す。図 e–p 中の等値線は海水密度 (σ_θ) を示す。

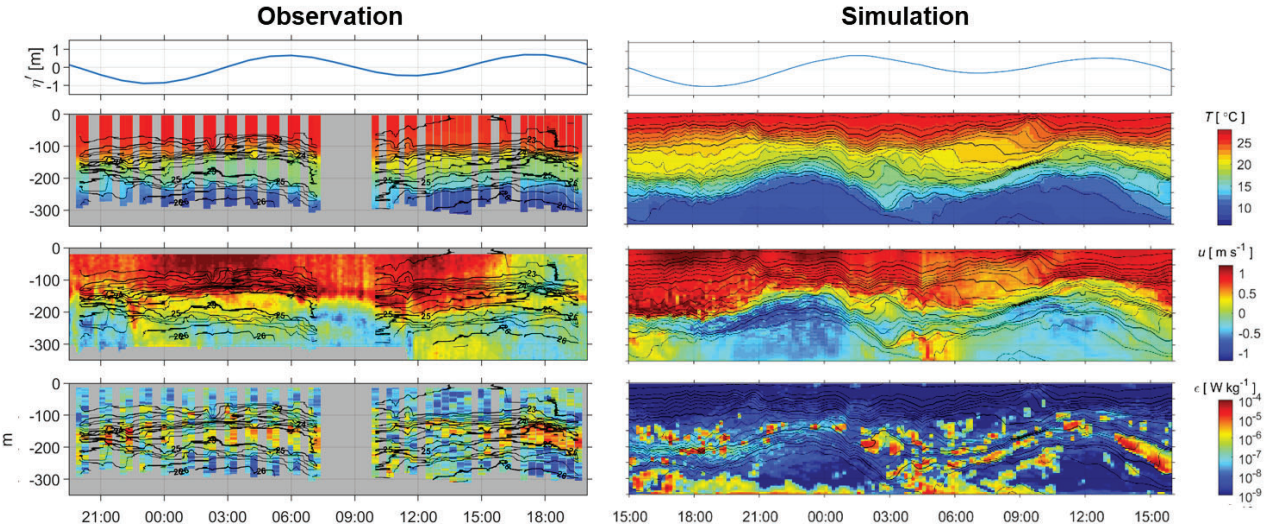


図 2　2021 年 11 月に平瀬近傍の定点で実施した流れと乱流エネルギー散逸率の 24 時間観測結果と数値モデルとの比較。(左列)　2021 年 11 月 17 日 20 時から 24 時間の時系列。図は上段から中之島験潮所における潮位偏差、水温、黒潮方向の流速、乱流運動エネルギー散逸率を表し、図中等値線は海水密度(σ_θ)を示す。(右列)　左列図と同様、ただし数値モデルによる結果であり、潮位偏差は定点上における値。

対馬暖流域における山陰沖合－沿岸間の海況変動を把握するための観測研究

長崎大学　滝川哲太郎

1. 目的

対馬暖流は東シナ海から対馬海峡を通過し、その沿岸分枝流は日本海南西海域の大陸棚上を流れる。一方、日本海の沖合には冷水が分布し、この冷水が大陸棚に近づくことにより、対馬暖流の流路やその強弱、そして水塊特性に影響を与えていると考えられる。この対馬暖流沿岸分枝の海況変動とカタクチイワシなどの浮魚類の魚群は、同様の数日の時間スケールで変動しており、海洋物理学的な興味だけなく水産学にも繋がる研究トピックである。

これまで、研究メンバーは，山口県・福岡県・長崎県の沿岸・沖合定点における海況モニタリングを行ってきた（図 1)。本研究では、これらのモニタリングに加え、沖合の大陸棚縁の海底に 2 台の流速プロファイラー（ADCP）を設置した。ADCP の回収は、2022 年 5 月を予定している。ここでは、ADCP 設置状況を記すとととともに、そのときに行った海洋観測結果について報告する。

2. 観測

長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」は、2021 年 7 月 20 日に長崎三重港を出港し、対馬海峡東水道で CTD 観測を行ったのち、ADCP 設置予定海域へ向かった。7 月 21 日、夜が明けるまで、ADCP 設置海域周辺の陸棚縁で XBT 観測を行った（図 1)。その後、TR2 で ADCP を設置予定であったが、設置の際に必要となるパラシュートブイの不具合のため、設置を延期した。ここで、TR2 と TR1 での CTD 観測、TR1 付近での海底地形調査を行った。7 月 23 日に長崎に帰港したのち、7 月 26 日に ADCP 設置のため再び出港した。7 月 27 日に TR1 と TR2 で ADCP を設置し（表 1)、それぞれの設置後に CTD 観測を行った。TR1 と TR2 の測点間距離は約 35 km である。

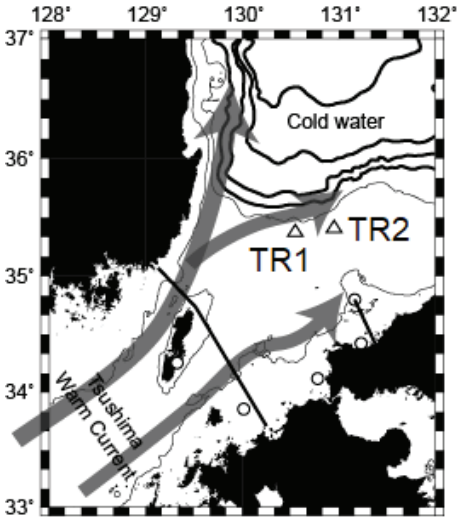


図 1. 継続的に行われている観測網（直線：フェリー航路、〇：定点モニタリング）と、新たに ADCP を設置した観測点△。

表 1. ADCP の設置情報（2021 年 7 月 26 日)。

観測点	架台	ADCP	設置時刻	緯度（N）	経度（E）	水深（m）
TR1	TRM	WH Sentinel 300kHz	06:38JST	35°24.552′	130°34.611′	160
TR2	TRBM	Sentinel V100 300 kHz	08:55JST	35°27.988′	130°57.098′	163

3. 結果と考察

図 2 に、7 月 23 日と 7 月 26 日の TR1 と TR2 の水温の鉛直プロファイルを示す（CTD 観測結果)。表層の季節水温躍層の下には、約 15～20℃の比較的水温が一様な分布が 100 m 以深まで続いている。その下層には顕著な水温躍層が存在し、海底付近には時と場所によるが 8℃以下の冷水が観測された。TR1

の底層水温は、TR2 よりも低かった。7 月 21 日と比べ 7 月 27 日の底層水温は低く、底冷水上部の躍層の水温鉛直勾配も 7 月 27 日のほうが大きかった。

AVISO（https://www.aviso.altimetry.fr）の人工衛星観測による絶対海面高度分布によると、観測海域には低気圧性渦が分布している（図 3）。海洋渦と底冷水の関係など、ADCP 流速データと組み合わせた解析が期待される。

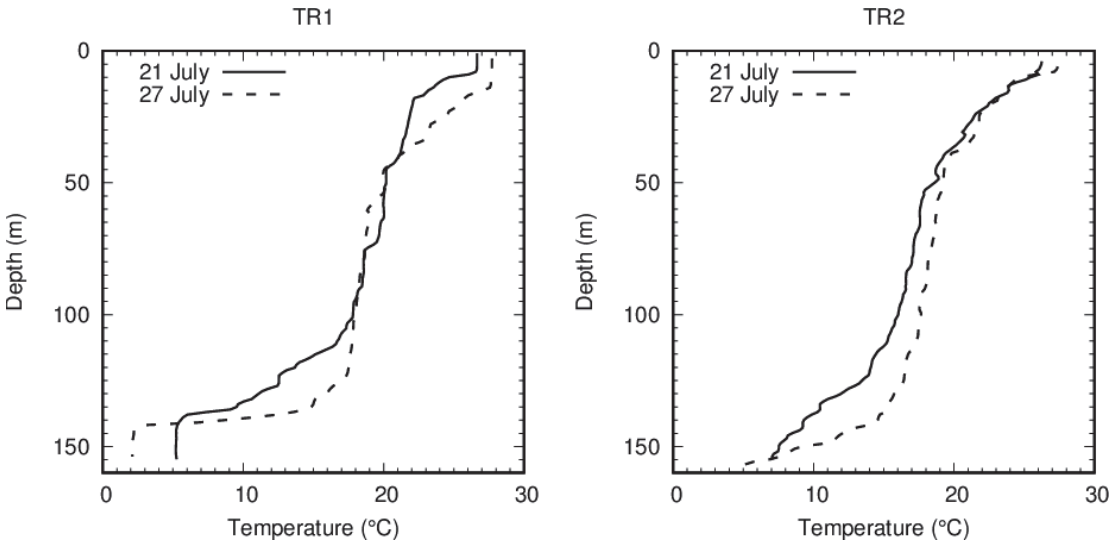


図 2. 水温の鉛直プロファイル（左図：TR1、右図：TR2、実線：2021 年 7 月 21 日、破線：7 月 27 日）。

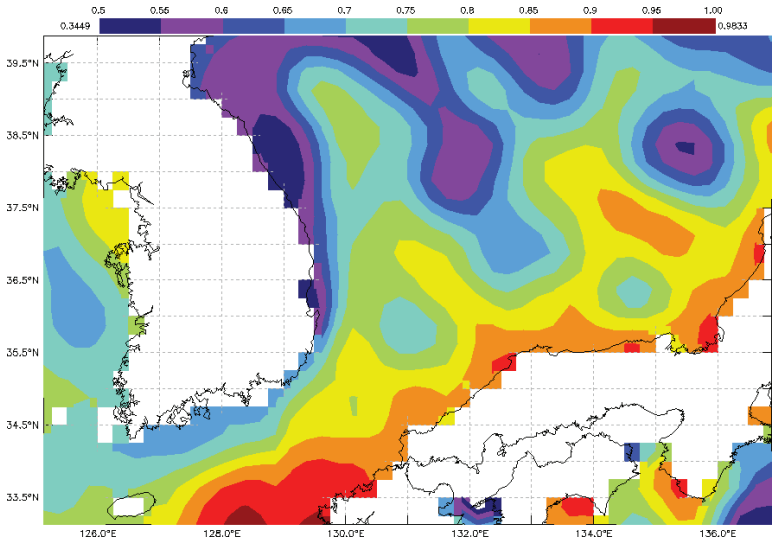


図 3. 2021 年 7 月 21 日の絶対海面高度（m）。

研究組織

長崎大学 大学院 水産・環境科学総合研究科　滝川哲太郎（研究代表者）
九州大学 応用力学研究所　千手智晴（所内世話人）
愛媛大学 沿岸環境科学研究センター　森本昭彦（研究協力者）
福岡県 水産海洋技術センター　神田雄輝（研究協力者）
山口県 水産研究センター　渡辺俊輝，廣畑二郎（研究協力者）

氷晶粒子の形状や配向を考慮した衛星・地上ライダ/レーダ解析技術の改良

気象研究所 気象観測研究部 石元裕史

・要旨および目的

大気物理研究室が主体となって開発している多重散乱型地上観測システム及び衛星搭載ライダ／レーダ解析手法(あるいはアルゴリズム)に関して、放射伝達計算による物理モデル検証等の技術支援を行う。また気象研究所で開発した氷晶モデルおよび散乱特性計算手法によって得られた計算結果を、大気物理研究室で開発している氷雲解析アルゴリズムに組み込み、高度なレーダ・ライダ複合解析技術を開発する。

・研究方法

ライダ／レーダ多重散乱については大気物理研究室の物理モデルや放射伝達計算手法の改良などを支援する。氷晶散乱特性については、粒子形状や大気中での配向の設定を精緻化(あるいは高度化)、散乱計算手法などについて検討し、散乱特性計算はその一部を気象研側が実施する。計算結果をデータベースとして大気物理研究室側で開発した解析アルゴリズムに組み込む。

・研究結果

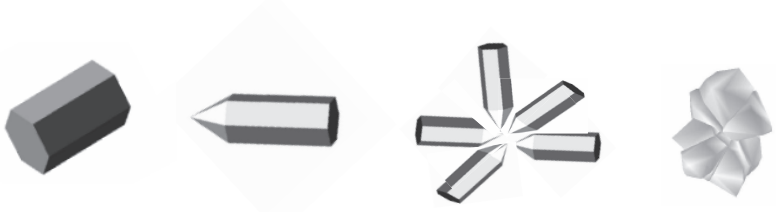
六角柱、六角板、ドロクスタル形状、砲弾型，5 枝-砲弾集合型、ボロノイ型の氷晶粒子モデルの後方散乱特性を計算しデータベースを作成している。日欧共同衛星 EarthCARE に搭載される予定の高分解スペクトルライダ(ATLID)の標準プロダクト作成などに向けた研究が進展し、国際放射学会 (IRS2022)で発表する予定である。

一方、個別の氷晶粒子モデルに注目すると、粒子の形状や 2 次元配向の状態によっては、後方散乱のサイズ依存性等が一般的な場合とは異なる特性を示す場合があることもわかってきた。具体的に次の 2 点について調査・検討を行った。

(1) 5 枝-砲弾集合型では、構成する砲弾の長さと直径の比（アスペクト比）の特性が所定のサイズを境に変化する仕様になっている。そのために、「単位体積当たりの散乱断面積」(ベータ) のサイズ依存性を見ると半径 35 ミクロン付近に極大値があることが分かった。他のモデルではベータはサイズに対して単調に減少するので、それとは異なった特徴である。

(2) 2 次元配向のボロノイ型粒子で揺らぎ幅を小さく設定すると、初期姿勢の違いによって、後方散乱特性に大きな差異を生じることが示された。

これら得られた成果は, ATLID/EarthCARE や地上設置型多視野角多重散乱ライダなどを対象とした氷晶粒子の散乱特性解析手法の評価や改良に資することが期待できる。



使用した氷晶粒子モデル　左から、六角柱，砲弾型，5 枝-砲弾集合型、ボロノイ型

参考文献

[2] Masuda, K., Ishimoto H., Y. Mano, 2012: Efficient method of computing a geometric optics integral for light scattering by nonspherical particles. Papers in Meteorology and Geophysics Vol. 63, 15–19.

[3] Masuda, K., and H. Ishimoto, 2017: Backscatter ratios for nonspherical ice crystals in cirrus clouds calculated by geometrical-optics-integral-equation method. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 190, 60-68.

[4] Ishimoto, H., K. Masuda, Y. Mano, N. Orikasa, A. Uchiyama, 2012: Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 113, 632-643.

・研究組織

研究代表者 気象研究所 石元裕史

研究協力者 九州大学応用力学研究所 佐藤可織

研究協力者 九州大学応用力学研究所 岡本 創

2021 AO-10

逆推計手法による東アジア域排出量データベースの高度化に向けた研究

一般財団法人　電力中央研究所　環境科学研究所　板橋　秀一

1. 目的

中国における窒素酸化物（NO_x）排出量は 2011 年から減少傾向に転じている．一般に排出量データは，経済統計資料等をもとに構築される（ボトムアップ法）が，その推計に数年を要する問題点がある．この点に対し，準リアルタイムの衛星観測データを拘束条件とした逆推計（トップダウン法）が有用である．本共同利用研究では，激変する東アジア域の排出量推移を継続的に把握するため，逆推計手法を構築して NO_x を対象に排出量データベースを近年まで更新することを目指している．継続 4 年目となる今年度は，新型コロナウイルス感染症が広まった 2020 年上期を主対象に，種々の衛星計測データを用いて東アジア域や国内の NO_x 排出量の変化を解析した．

2. 手法

Aura 衛星に搭載された OMI センサーや，Sentinel-5P 衛星に搭載された TROPOMI センサーによる NO_2 カラム量（大気柱総量）を用いた．前者は 2005 年から長期的な観測があるが空間解像度が粗く，一方，後者は 2017 年 10 月に打ち上げられ観測期間はまだ短いが空間解像度が大幅に向上している．OMI は Level 3 の 0.25° ×0.25°の格子点データを，TROPOMI は Level 2 の swath データを 0.06°×0.06°の格子点データに変換した上で解析に用いた．

3. 結果と考察

新型コロナウイルス感染症に対する中国のロックダウンの影響を長期的な視点で見るため，排出量が最大となった 2011 年から 2020 年までの中国華北平原（Central Eastern China: CEC）における NO_2 カラム量の経年的な変化を解析した（図 1）．ロックダウン期間（湖北省が最大で 2020 年 1 月 23 日から 4 月 8 日まで）における減少幅は，特に 2 月に顕著であったが，4 月以降はほぼ前年程度であり，また，11 月以降は例年を上回っ

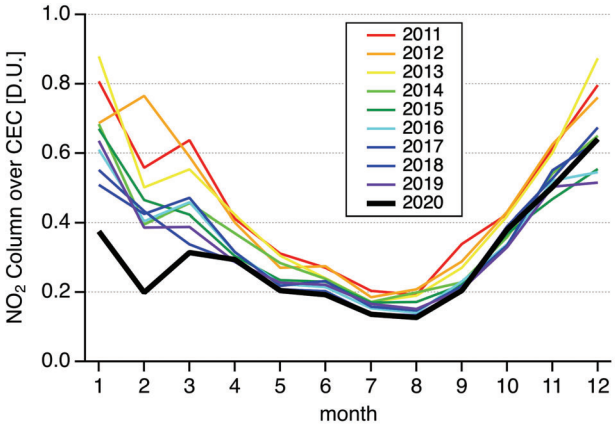


図 1．中国華北平原における 2011 年から 2020 年までの NO_2 カラム量の月平均値の経年変化．

ていた．これは中国の経済回復の状況や，清華大学により発表された最新のボトムアップ法による排出量推計値の傾向（Zheng et al., 2021）とほぼ一致していた．新型コロナウイルスの感染拡大といった社会状況が急変する際の大気汚染物質排出量の状況を把握するために，準リアルタイムの衛星計測データの活用が有効であることが示された．

また，わが国に緊急事態宣言が発令された時の排出量変化の状況を明らかとするため，TROPOMI の高解像度データをもとに，2019 年と 2020 年の 4-5 月平均，および，2019 年との差，その差の相対比を解析した（図 2）．2020 年 4-5 月には福岡，瀬戸内，大阪，中京，そして東京の大都市圏を中心に，前年からの大幅な減少が見られた．一方で相対比としては，日本のほぼ全域で前年比 1-3 割の減少であった．以上の衛星計測データの解析結果から示されるように、国内外の排出量は新型コロナウイルス感染症の拡大・対策により大幅に減少したが，その時期にはずれがあったことが特徴的であった．

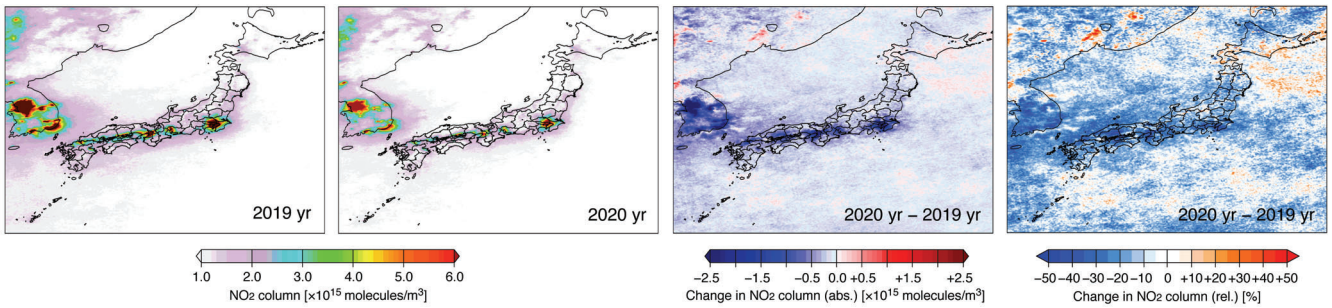


図２． 2019 年および 2020 年 4-5 月平均の NO_2 カラム量とその差，および相対比．

4. まとめ

衛星計測データの解析から 2020 年上期の排出量変化を東アジアスケールで把握することができた．逆推計手法によって排出量データベースとして構築していくことや，それをモデル入力データとして用いたシミュレーションを実施することで，排出量変化に伴う東アジア域の大気環境変化を継続して解明していく必要がある．

・参考文献

板橋: COVID-19 の感染拡大・対策に伴う大気質変化，大気環境学会誌（資料）, 57(1), A56-A61, (2022).

Zheng, B. et al.: Changes in China’s anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020, Earth Syst. Sci. Data, 13, 2895–2907 (2021).

高潮・洪水時の海洋環境変動

神戸大学 内海域環境教育研究センター　林　美鶴

1. 目的

近年、豪雨による洪水や高潮が頻発し、海洋に濁水が流出する事例が頻発している。気候変動に伴う極端気象現象の増加により高潮や洪水も増加することが見込まれるが、これに伴う海洋環境への影響は明らかにされていない。広域の濁水の広がりを把握するには、人工衛星の可視光線画像が有用である。また近年では、CDOM (Colored Dissolved Organic Matter, 有色溶存有機物)から SSS (Sea Surface Salinity, 海面塩分)を推定する研究が進んでいる。CDOM は難分解性の有機物で、水に溶出して着色する。主として陸起源であるため、塩分と相関がある事が知られている。塩分の情報は、河川出水量、海域の成層構造、密度流などの推定に有用である。一方で可視光線は日中しか画像が得られず、雲があると海面を検出できない。そこで本研究では、CDOM から SSS を推定するスキームが確立されている大阪湾を対象として、日平均衛星 SSS 画像の有用性について検討を行った。

図 1　SSS カレンダー

2. 方法

本研究では、静止海色衛星 COMS(Communication, Ocean & Meteorological Satellite)に搭載されている海色計 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)で計測された 2016 年 1 月 1 日～12 月 31 日の CDOM データを用いた。観測幅は 2500km×2500km、分解能が 500m×500m で、9 時から 16 時の毎時、1 日 8 回の観測を行っている。吸光度を測定する波長帯は 412nm、443nm、390nm、555nm、660nm、680nm、

745nm、865nm の 8 つである。CDOM は、412mm のリモートセンシング反射率 Rrs(412) と、555mm のリモートセンシング反射率 Rrs(555)との比 R= Rrs(412) /Rrs(555)を用いて、$\mathrm{CDOM} = 0.2355R^{-1.3423}$ で求められる。

中田ら(2018)は大阪湾の約 20 カ所で採水した海水の分析から、CDOM と SSS の関係式、$\mathrm{SSS} = -105.78 \times \mathrm{CDOM} + 44.06$を導いた。両者の相関係数は-0.92 で、高い負の関係性を示した。GOCI の CDOM を用いて推定した SSS と、現場観測で測定した SSS とを比較した結果、相関係数は 0.85、二乗平均平方根誤差は 1.6 で、高い推定精度を示した。この推定法により GOCI の CDOM を SSS に変換し、1 日 8 回の観測値を観測格子毎に平均して日平均値を算出した。本研究の対象海域は、図 1 に示す緯度 34.25°N～34.75°N、経度 134.85°E～135.5°E の範囲で、格子数は 6247 個である。

海面塩分に関係する要素として潮汐、日射、雲量、降水、河川水流入を考えた。雲量、日射量、降水量は、気象庁のアメダスから入手し、大阪の日平均雲量と全天日射量、淀川水系流域 29 地点の日合計降水量の平均を使用した。河川流量データは国土交通省水文水質データベースの高浜における日平均流量を使用した。月齢は国立天文台天文情報センターの、大阪の正午月齢を使用した。

3. 結果

データを可視化し、図 1 の通りカレンダー形式で並べた。推定した SSS 値が 0～40 を有効データとすると、50%未満のグリッドで有効データが得られない日は 230 日、62.8%で、これらの日は欠測とした。SSS が 28～31 を中塩分、これ以下を低塩分、これ以上を高塩分に分類した。また、特定レベルが 80%以上の面積を占める場合を支配型、40%以上を占める場合を優勢型、2 つのレベルが共に 40%以上を占める場合を混在型、全てのレベルが 40%未満の場合をグラデーション型と分類した。中塩分優勢型については、次に低塩分が多い場合を壱型、高塩分が多い場合を弐型とした。図 2 に、各パターンの典型的な SSS 画像を示し、各型の月別出現日数を示す。低塩分支配型が最も多く、次に多い低塩分優勢型と合わせ 63%だった。中塩分支配型と高・低塩分混在型は見られなかった。

各パターンを、低塩分が占める面積が多いグループ、高塩分が占める面積が多いグループ、混在とグラデーションの 3 グループに分けた。河川流量毎の各グループの出現割合は、いずれのグループも淀川流量が小さいほど出現日数割合が高く、河川流量を細かく分けた検討が必要である。日射量毎の各グループの出現割合は、低塩分グループでは日射量が小さいほど高く、混在グループでは日射量が小さい又は大きいほど低い傾向を示した。高塩分グループには明確な傾向はなかった。潮汐を大潮、小潮、中潮に分けて解析を行った。小潮から大潮に向かう中潮と大潮で混在グループの出現割合が高く、逆の時期で高塩分・低塩分グループの出現率が高かった。潮流振幅が小さい小潮では分布が維持される可能性が示唆された。降水がある日は欠測が多いため、降水量に基づく解析は出来なかった。

5. 成果報告

・M. HAYASHI *et al.*, Storm Surge Disaster Caused by Typhoon Jebi, T1821, at Fukae Harbor in Japan, Transactions of Navigation Vol.6 No. 1, pp.19-29, 2021.

・M. HAYASHI *et al.*, Analysis of Storm Surge in Kobe, Japan caused by Typhoon Jebi, T1821, by using the in-situ observation dat, ECSA 58 & EMECS 13, 2021.09.

6. 研究組織

林　美鶴　神戸大学　准教授

廣川綜一　神戸大学　技術職員

河本直樹　神戸大学　博士前期 1 年

作野裕司　広島大学　准教授

磯辺篤彦　九州大学　教授

M \ DP	支配型		混在型		優勢型				グラデーション型
	高塩分	低塩分	高中塩分	中低塩分	高塩分	中塩分壱	中塩分弐	低塩分	
JAN	0	6	1	2	0	1	1	2	0
FEB	0	4	0	0	1	0	0	4	0
MAR	0	4	0	1	0	2	1	3	1
APR	1	1	0	0	1	0	0	1	0
MAY	0	1	0	1	1	0	0	2	2
JUN	1	2	0	1	0	1	0	0	2
JUL	0	4	0	2	3	2	1	1	1
AUG	0	2	0	1	6	4	0	3	1
SEP	1	2	0	2	1	0	0	2	2
OCT	0	11	0	0	0	0	0	2	0
NOV	0	11	0	0	0	2	0	1	0
DEC	0	13	0	0	0	0	0	3	0
Total(Day)	3	61	1	10	13	12	3	24	9
Rate(%)	2	45	1	7	10	9	2	18	7

図 2　各型の月別出現日数

沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化

東京大学大気海洋研究所　堤 英輔

背景と目的

大陸棚や内湾・沿岸域における乱流混合は、熱や淡水、物質の輸送を通じて海洋環境の形成・維持に深く関わる。特に密度躍層における乱流混合は、下層の栄養塩を有光層へ供給することで海域の基礎生産を支えたり、底層へ酸素を供給し貧酸素水塊の消長を促したりと生態系おいて果たす役割が大きいが、その定量化は未だ十分でない。本研究では、沿岸海洋の密度躍層周辺で生じる乱流混合の定量化を目的として、乱流微細構造計測データの解析を行う。本年度は、沖合の地衡流場と沿岸海洋間の移行域における水塊や物質の混合過程に注目し、沿岸と沖合の両方の影響下にある海域として五島西方、豊後水道、東シナ海陸棚、及び三陸における乱流観測データを選定し、解析を実施した。

研究内容

本研究では、(a) 2015 年 7 月長崎大学水産学部練習船「長崎丸」第 419 次航海による五島西方における乱流観測、(b) 2016 年 7 月「長崎丸」第 441 次航海による東シナ海陸棚上における乱流観測、(c) 2012 年 7 月広島大学生物生産学部練習船「豊潮丸」航海と 2017 年 8 月愛媛大学沿岸環境科学研究センター調査実習船「いさな」航海による豊後水道における乱流観測、及び (d) 2021 年 10 月学術研究船「新青丸」 KS-21-24 航海による三陸の沿岸から沖合における乱流観測、計 4 海域で得られたデータを使用した。乱流データは乱流微細構造プロファイラを用いて得られ、(i)–(iii)では JFE アドバンテック社の TurboMAP5、(iv)では Rockland Scientific 社の VMP250 を使用した。乱流の計測に合わせて平均流の計測も実施し、(a)と(b)では抗トロール測流装置 TRBM で音響ドップラー流速計（ADCP）を海底設置することにより、(c)と(d)では船舶搭載の ADCP の使用により水平流速データを得た。微細構造プロファイラで計測された乱流シアから乱流運動エネルギー散逸率 ε を計算し、Osborn (1980) に基づき鉛直渦拡散係数 K_ρ を見積った ($K_\rho = 0.2\varepsilon N^{-2}$, N は浮力振動数)。海底と表層の混合層を除いた密度躍層におけるεと K_ρ を、同じ層の浮力振動数と 10 分平均流速の鉛直シア S と比較することで乱流量（ε, K_ρ）のファインスケール量（N^2, S^2）への依存性を調べた（e.g., MacKinnon et al. 2005; Palmer et al. 2016）。このファインスケールとして、(a)–(c) の観測については鉛直 4m、(d)の観測については 8m とした。

結果と考察

図 1 に乱流運動エネルギー散逸率のファインスケール依存性、図 2 に鉛直拡散係数のファインスケール依存性図を示す。各海域の背景の場には次のような特徴があった。(a) 五島西方海域における観測点（定点）では半日周期の潮汐流の影響が大きく、また非線形内部波が頻繁に到来していた。(b) 豊後水道は南部では黒潮系水塊の影響、北部では沿岸系水塊の影響が大きく、流れの鉛直シアには傾圧的な潮汐流（内部潮汐）が支配的であった。(c) 東シナ海陸棚上の観測点（定点）では、半日周期と日周期の流れが支配的であり、また非線形内部波が頻繁に到来していた。(d) 三陸の調査は沿岸の津軽暖流と沖合の親潮系水塊間のフロントを横断する断面で実施され、この海域では地衡流場に起因して生じる鉛直シアが顕著であったが、沿岸側の陸棚斜面域では半日周期の内部潮汐流が生じていたことが係留観測から認められた。乱流運動エネルギー散逸率のファインスケール依存性の特徴として、各海域において N^2、S^2 がともに大きいほど散逸率が高くなる傾向が認められた（図 1）。このような傾向は他の陸棚域でも報告されており、低次モードの近慣性内部波場や内部潮汐場の乱流散逸の特徴であるとされている（MacKinnon et al . 2005; Palmer et al. 2013）。図 2 の鉛直拡散係数の依存性図からは、N^2 が小さいほど拡散係数が大きくなる傾向が認められる。このような拡散係数の傾向は、Mellor-Yamada Scheme に代表される勾配リチャードソン数依存の数値乱流スキームでは考慮されていないが（背景の値として一定とされる）、現実には数オーダーの拡散係数の変動がある実態を示している。また、同じ N^2、S^2 パラメータの範囲においても豊後水道では他の海域に比べて散逸率が高い傾向が見られるが（図 1, 2b）、これは豊後水道では強い乱流が鉛直的な密度逆転を伴って観測されており、内部波が生成域で直接的に砕波することで強い乱流混合が生じているためだと考えられる。今後は各海域のデータを蓄積することで乱流強度のファインスケールパラメタリゼーションの確立を目指す。

研究組織

堤　英輔（東京大学大気海洋研究所、研究代表者）、千手智晴（九州大学応用力学研究所、所内世話人）

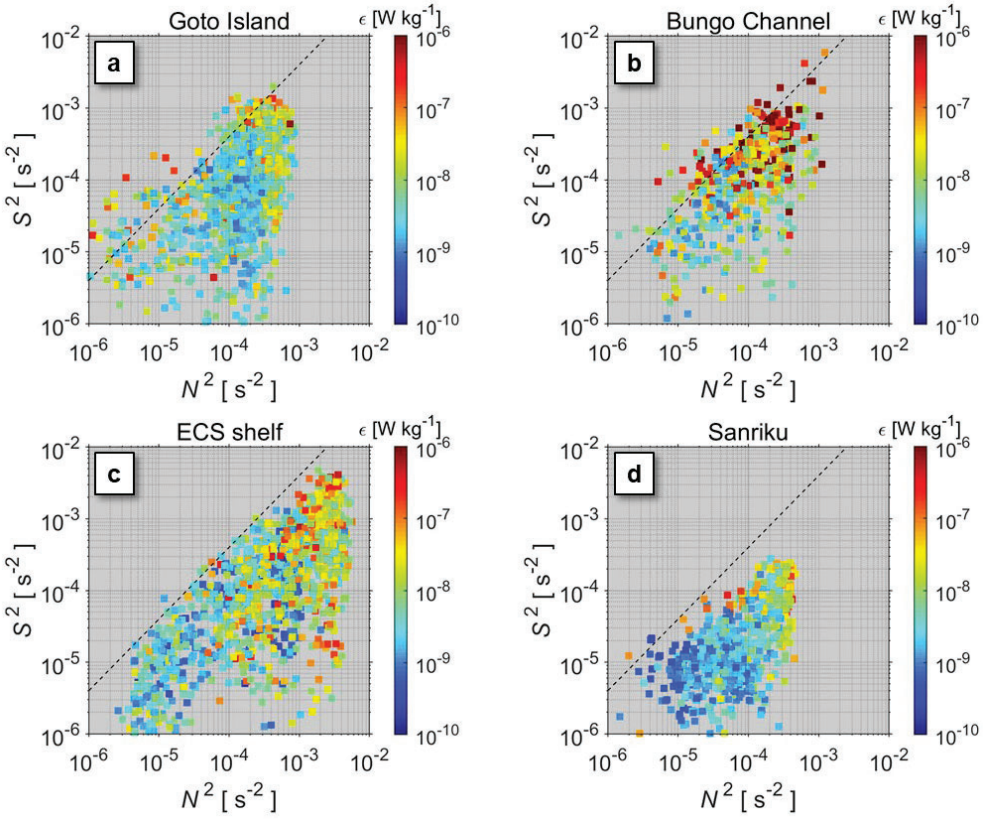


図1　乱流運動エネルギー散逸率 ε の二乗浮力振動数(N^2)と二乗鉛直シア(S^2)への依存性。(a)五島西方 (b)豊後水道 (c)東シナ海陸棚上 (d) 三陸沿岸～沖合における結果を示す。破線は勾配リチャードソン数($Ri_g = N^2/S^2$)が 1/4 となる境界を表す。

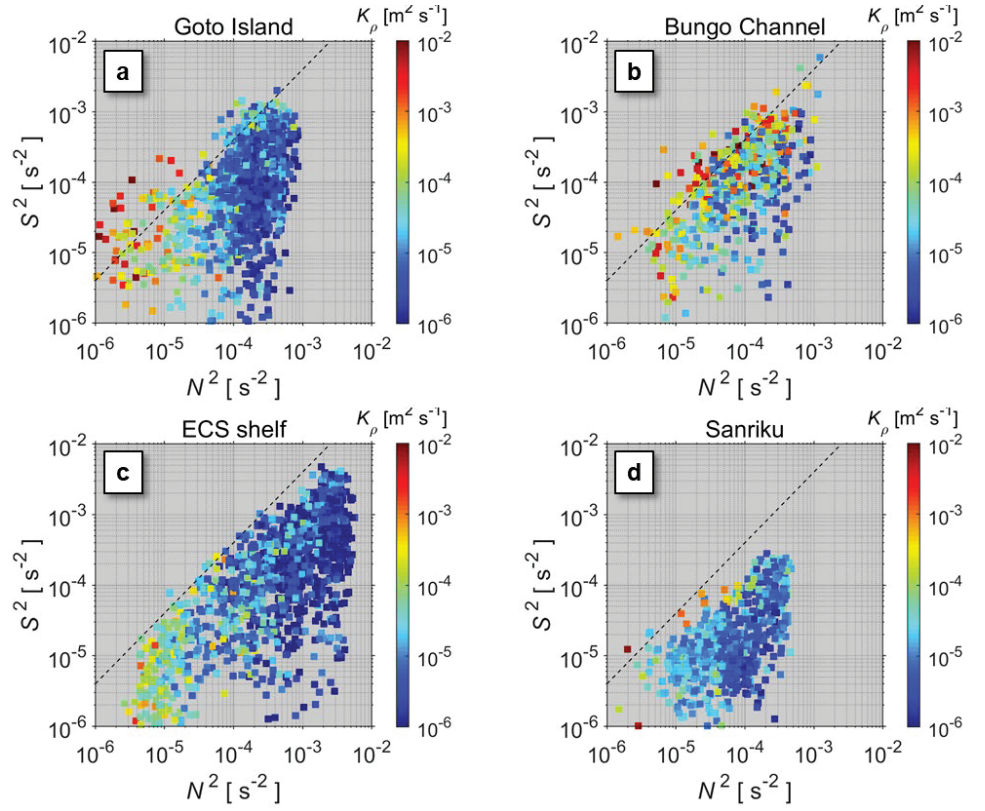


図 2　図1と同様、ただし鉛直渦拡散係数 $K_\rho (= 0.2\varepsilon N^{-2})$ の N^2、S^2 依存性。

西之島火山による九州上空のエアロゾルの光学的特性

富山大学学術研究部理学系　青木 一真

要旨

大気中に浮遊するエアロゾル粒子の時間・空間変動は、近年、日本各地でわずかながら減少傾向にある。ただし、昨今の新型コロナウイルスによる経済活動の停止や火山噴火活動など、常時観測は重要である。本研究の背景は、1996年から長崎大学おいて、2003 年からは九州大学応用力学研究所おいて、太陽光と周辺光の放射輝度を観測するスカイラジオメーターを使った自動測定を行い、エアロゾル光学的特性の解析を行っている。これらの長期観測データと地球観測衛星や数値モデルとの比較を行い、気候問題の解決に向けて、エアロゾルの光学的特性の精度向上につなげてきた。本研究は、２０２０年８月には西之島から九州へ噴煙が流れ込み、広域に大気を混濁させたため、九州上空におけるエアロゾルの光学的特性の西之島の噴火の影響について調査した。海洋上から陸域に至るまでの火山性エアロゾルの光学的特性の変動を示すことが出来た。

１．はじめに

九州上空における大気中に浮遊するエアロゾル粒子の時間・空間変動は、中国などの排出量の変化も影響し、わずかながら減少傾向にあるが、昨今の新型コロナウイルスによる経済活動の停止や火山噴火活動など、常時観測の重要性が再確認されている。エアロゾルによる我々の生活に及ぼす影響は、気候変動のみならず、喘息疾患や心疾患による健康影響など多義にわたっており、とりわけ、九州北部地方は、大陸から越境する汚染物質、黄砂粒子、森林火災などの複合的に影響を受けやすい場所である。本研究の背景は、1996年から長崎大学おいて、2003 年からは九州大学応用力学研究所おいて、太陽光と周辺光の放射輝度を観測するスカイラジオメーターを使った自動測定を行い、エアロゾル光学的特性の解析を行っている。これらの長期観測データと地球観測衛星や数値モデルとの比較を行い、気候問題の解決に向けて、エアロゾルの光学的特性の精度向上につなげてきた。本研究は、長期的な変動の中で、短期的に桜島や西之島などの噴火の影響が九州でしばしば観測されており、とりわけ、２０２０年８月には西之島から九州へ噴煙が流れ込み、広域に大気を混濁させたため、九州上空におけるエアロゾルの光学的特性の西之島の噴火の影響について調査することを目的とする。特に、気象衛星「ひまわり8号」や「しきさい（GCOM-C/JAXA）」と数値モデル（SPRINTARSなど）なども利用する。

２．観測・解析概要

大気エアロゾルの光学的特性は、九州大学応用力学研究所（気候変動科学分野所有）や長崎大学環境科学部に設置しているスカイラジオメーターにて、継続して観測行う。スカイラジオメーターは、太陽直達光と周辺光の放射輝度を自動測定出来る機器で、観測から得られたデータより、エアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数（エアロゾル粒径の指標）・一次散乱アルベド（放射吸収のパラメータ）・体積粒径分布等を解析することが出来る。また、地上と衛星観測データを地上検証として用いてSPRINTARS を改良し、精度向上を目指す。本研究で得られるデータは、気候変動科学分野で開発されているSPRINTARSなどによる次世代モデルの開発と応用の検証を行う。

３．結果及び、考察

Fig.1は、2019年1月から2021年12月までの九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）における0.5μmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオングストローム指数（Alpha）の月平均値を示したものである。概ね、エアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の季節変化は、同じような季節傾向が見られたが、時々、年による違いが見られた。

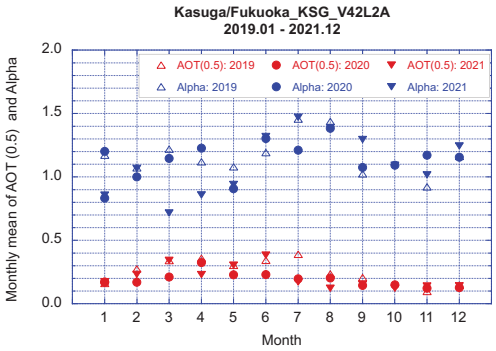


Fig.1　2019年1月から2021年12月までの九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）における0.5μmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオングストローム指数（Alpha）の月平均値

このような観測結果から、月平均値での大きな変化は見られなかったものの、広域で影響を及ぼす火山噴火活動による大気環境への影響を観測することが出来た。Fig.2は、2020年8月に西之島噴火の影響を船舶観測（R/V Mirai, JAMSTEC（8/3））と応用力学研究所（福岡県春日市（8/6））の体積粒径分布を示したものである。海洋観測では一部しか観測出来なかったのと輸送時の２次生成がないため、量的には低いものから増大しているが、噴火の影響が観測され、同時に衛星観測ともその様子を追うことができた。本年度は、昨年度に引き続き、COVID-19の影響による移動制限から、機器メンテナンスや研究に大きな支障が出たが、今後も今までと変わらずの観測的研究を継続したい。

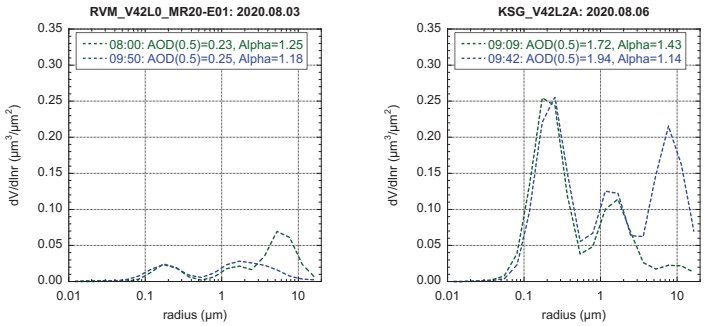


Fig.2　西の島の噴火影響時の体積粒径分布（左：海洋上 2020.08.03、右：応力研 2020.08.06）

４．研究成果

Momoi, M., Aoki, K., et. al., (2022) https://doi.org/10.1186/s40645-022-00467-6.
Maki, T., Aoki, K., et al., (2021) https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148026.
Pokhrel, A., Aoki, K., et al., (2021) https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117923.

５．　研究組織

代表者	青木 一真	（富山大学学術研究部理学系）
協力者	竹村 俊彦	（九州大学応用力学研究所、所内世話人）
	河本 和明	（長崎大学環境科学部）
	佐藤 真樹	（富山大学大学院理工学教育部・Ｄ３）

2021 AO-14
地球環境力学分野
一般研究

モンゴル・エルデネト鉱山における尾鉱沈殿池由来ホワイトダストの拡散動態解析

金沢大学　環日本海域環境研究センター　松木篤

【はじめに】

東アジア最大規模の銅・モリブデン鉱山があるモンゴル・エルデネト市周辺では、鉱山活動に伴う環境汚染が深刻化している。特に、郊外に設けられた尾鉱沈殿池には坑排水処理に伴う中和殿物が大量に堆積しており、乾燥時に干上がり露出した池底から、強風によって大量に巻き上げられた中和殿物が白い大気粉塵（ホワイトダスト）となって同市の大気質を著しく低下させる（図 1 a)。ホワイトダストは人体への直接的な曝露のみならず、拡散・輸送・沈着後に広域にわたって水質、土壌を汚染し、二次的かつ継続的な健康被害を引き起こす可能性がある。

現地では地上大気環境監視インフラの整備が進んでおらず、大気中の浮遊粒子状物質（SPM）や PM2.5 などの連続的なデータが不足しており、ホワイトダスト発生の頻度や規模も十分に明らかになっていない。そこで本研究では静止気象衛星ひまわり 8 号の高解像度画像から局所的なダストイベントを抽出する解析方法を確立し、ホワイトダストの時空間的な挙動を系統的に明らかにすることを目的とする。

【方法】

ひまわり 8 号の画像解析に基づくダストの発生地域、時間の識別、抽出には衛星コンポジット画像（Dust RGB）を用いた(Yumimoto et al., Scientific Reports, 2019)。また、現地に監視カメラとローコスト小型 PM2.5 および粉塵センサ（PS2 花粉センサ, 神栄テクノロジーを応用）を追加設置し（図 1 b)、衛星画像の解析結果と実際の大気粉塵イベント発生の様子とを比較するための地上直接観測を行った。

【結果と考察】

ひまわり 8 号の Dust RGB 画像解析に基づいて、尾鉱沈殿池から発生するホワイトダストのプルームの時空間的な分布を検出することに成功した。先行研究では、主に黄砂現象のようなメソ～総観スケール規模のイベントを対象とした報告が中心であったが、比較的雲が少ない条件下においては人為的なローカルダストのポイント発生源の検出、ならびにその拡散輸送実態の追跡にも有効であることを示した。現地での報告や粉塵センサの現場観測に基づいて、これまでの観測期間を通じて少なくとも 35 回のダストイベントが確認されている。ひまわり 8 号の画像からすべてのイベントを同定できるわけではないが、そのうち 12 のケースについて（34%）はプルームを明瞭にとらえることができている。部分的に雲に隠れてしまったイベントまで含めれば、検出率は約 50%にまで向上する。これは、現地のダスト発生の頻度が乾燥している春と秋の時期に集中し、雲に覆われるケースが少ないことも影響していると思われる。

多くのイベントは主風向である北西の風の下で発生し、2020 年 11 月の典型的なケースでは、プルームの幅や長さから、少なくとも風下の 2,750 平方キロメールの範囲にまで影響が及ぶことが明らかなっ

た。また、稀に南西風によって北東方向に輸送されるケースも確認されている。この様な解析事例をさらに増やすことで、重金属を多く含むホワイトダストよって特に強く汚染されている地域の抽出が可能になるものと期待される。今後は、ダスト RGB によるプルームとその拡散範囲の抽出アルゴリズムを改良し、地上で観測されるダストの粒径分布や大気中濃度と照らすことで、風下地域へのフラックスのより定量的な評価を目指す。

(a)　　(b)

図 1．（a）ホワイトダスト発生時の現地の様子．（b）ロシアとの国境付近に位置するエルデネト市（N49°1'38", E104°2'40）周辺の地図．今年度追加で設置した PM2.5 および粉塵センサの設置地点．写真中央上部に尾鉱沈殿池が広がる．

【研究組織】

研究代表者 松木 篤

研究協力者 鵜野 伊津志、Chultem Batbold (D2)、Sonomdagva Ch. (NMU)、谷口健司（金沢大学)、兼保直樹（産総研）

所内世話人 弓本 桂也

高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高度分布観測システムの構築

国立環境研究所地球システム領域　神　慶孝

【本研究の目的】

応力研に既設のラマンライダーでは、極めて微弱なラマン散乱光を用いるため、背景光の強い日中データから消散係数を推定することは極めて困難となる。そこで本研究では、昼夜連続でのエアロゾルの高度分布計測が可能なライダーシステムの実現を目的として、ラマンライダーと同様に消散係数の独立測定を可能とし、かつ、より高感度なライダー技術である高スペクトル分解ライダー技術（以下、HSRL 技術）を導入することで、応力研の多波長ラマンライダーを改良する。また、本改良によって得られる昼夜連続エアロゾルデータを用いた同化研究を見据えている。

【方法】

本研究では、波長 532 nm と 355 nm の 2 波長で動作する HSRL システムを導入する。エアロゾルからのミー散乱と大気分子からのレイリー散乱を分離して測定するため、波長 532 nm ではヨウ素吸収フィルターを、355 nm では走査型マイケルソン干渉計を高分解能分光素子として用いる。波長 532 nm の HSRL では、ヨウ素吸収フィルターを使ってミー散乱をブロックし、レイリー散乱の一部を透過させるため、Nd:YAG レーザーの第二高調波の波長(532 nm)をヨウ素の吸収線の中心に合わせる。レーザーの波長は周囲の気温によって変化することから、常に吸収線の中心と合うように制御する必要がある。昨年度は、送信レーザーの種光源として連続発振するシーダーレーザーを利用した波長制御システムを開発した。今年度は、上記の波長制御システムを実際に応力研ライダーに導入し、HSRL の運用を開始した。さらに、大気境界層のエアロゾル消散係数を測定するため、通常の 20cm 口径望遠鏡に加えて 5cm 口径の小型望遠鏡を設置した。大小 2 つの望遠鏡から受信される大気散乱光を同じヨウ素吸収セルに通過させるため、セルの前後に偏光ビームスプリッタを設置し、偏光の向きを制御することで両者のビームを計測するように工夫した（図 1 ）。

【結果】

図 2 (a)に 532 nm HSRL で計測したライダー信号（距離 2 乗補正信号）の例を示す。532 co-pol の信号は、ヨウ素吸収フィルターを通していない信号であり、エアロゾルや雲、大気分子からのレイリー散乱を一緒くたに受信している。一方で 532 Ray-near と 532 Ray-far については、ヨウ素吸収フィルターによってミー散乱成分がブロックされているため、レイリー散乱の信号のみ受信している。エアロゾルの消散係数はレイリー散乱信号の傾きから計算されるが、レーザーと望遠鏡の視野の重なりの関係から、20cm 望遠鏡から得られる 532 Ray-far の信号では高度 3 km 以下の消散係数が得られない。そこで、5cm 望遠鏡から得られる 532 Ray-near を使用することで、大気境界層におけるエアロゾル消散係数を取得する。

図 2 (b)-(d)にレイリー散乱信号から得られた消散係数、消散係数と後方散乱係数の比であるライダー比、粒子偏光解消度の高度プロファイルを示す。この時、高度 2 km 以下に消散係数が約 0.1 km^{-1} の光学的に薄い粒子層が観測された。この層のライダー比は 40±5 sr、粒子偏光解消度は 0.17±0.04 であり、中国大陸から輸送されてきた黄砂と考えられる。さらに、高度 10 km には消散係数のピークが約 0.8 km^{-1} の光学的に厚い粒子層が観測されている。この時のライダー比が 21±5 sr、粒子偏光解消

度が 0.32±0.02 であり、氷雲の特徴に一致する。今回の例で示したように、HSRL を導入することによって、エアロゾル・雲の光学特性の高度プロファイルを取得することに成功している。従来のラマンライダーでは、消散係数のプロファイル取得のために 1 時間以上の時間積分が必要であったが、HSRL では 5 分間の時間積分でもラマンライダーを凌駕する測定精度を達成しており、高感度化に成功したと言える。

【今後の展望】

今後、532 nm HSRL の連続観測によって得られたデータを解析し、エアロゾル光学特性の季節変動やイベント解析を進める。また、干渉計を用いた波長 355 nm HSRL についても、応力研での運用に向けて開発を進める。

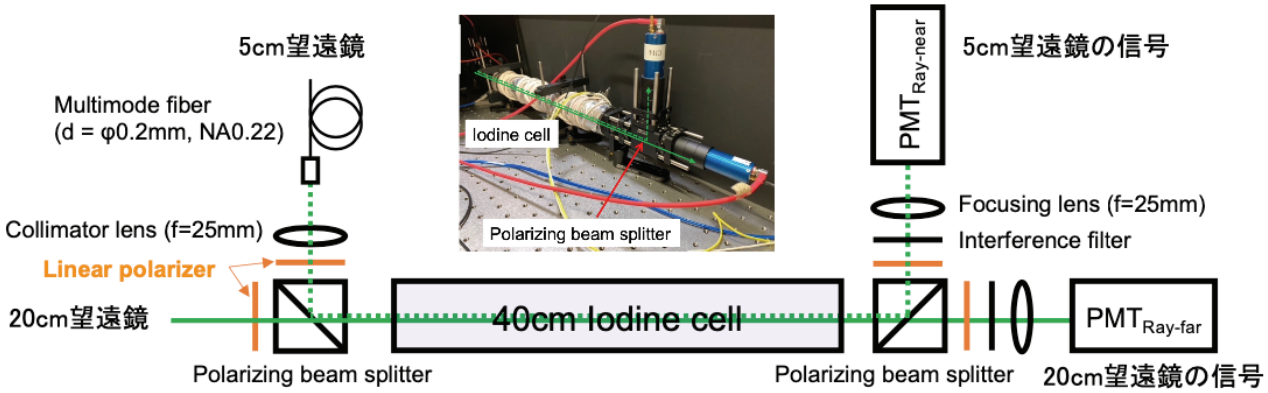


図 1 ： 2 つの望遠鏡で受信した光を同一のヨウ素フィルターに通す分光システム

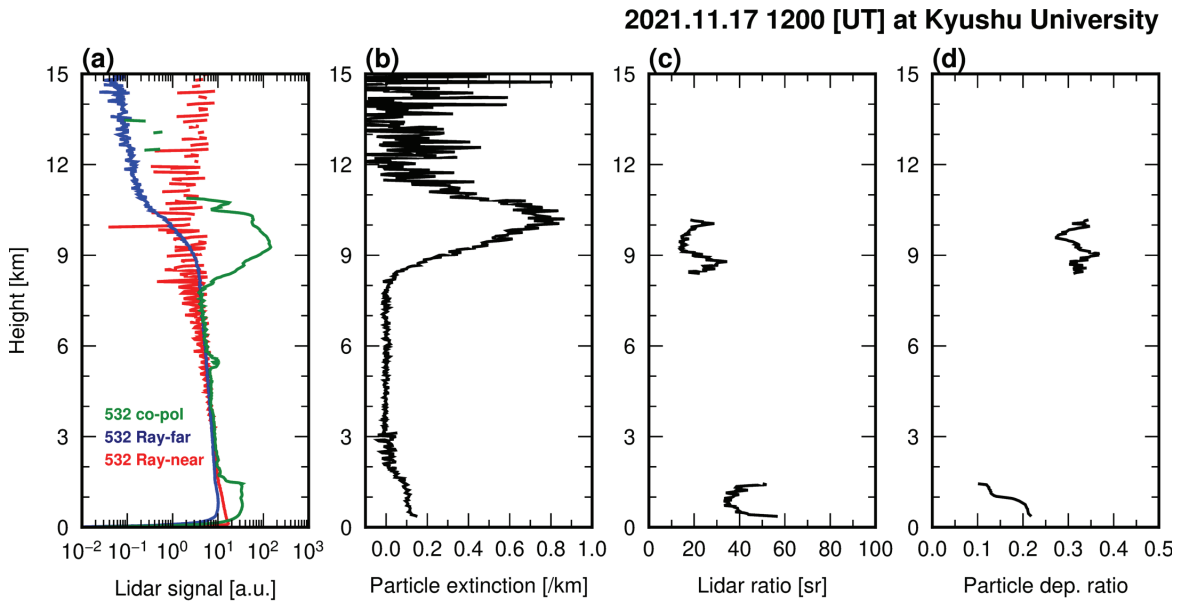


図 2 ：高スペクトル分解ライダーによるエアロゾル・雲の測定例（2021 年 11 月 17 日）

【研究成果】

Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Takakura, M. Aoki, S. Ishii, A. Yamazaki, R. Kudo, K. Yumimoto, K. Sato, and H. Okamoto: “Demonstration of aerosol profile measurement with a dual-wavelength high-spectral-resolution lidar using a scanning interferometer”, Applied Optics, in review.（その他論文 2 件、学会発表 3 件）

国際共同研究体制の構築
地球温暖化に起因する東シナ海の成層構造と物質循環の変化に関する研究

富山大学　大学院理工学研究部　張 勁

Establishment of international cooperative research: changes in stratification and material cycle in the East China Sea related to global warming

We organized the Decade Action Incubator 5 meeting of the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) and conducted a quantitative study of the composition and sources of low-oxygen water on the outer shelf of the East China Sea (ECS) via chemical tracers.

1. UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) Regional Kickoff Conference for the Western Pacific and its Adjacent Areas

The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) was held in November 2021 under the theme "Regional Launch Conference for the Western Pacific and Adjacent Regions". During the conference, the 5th incubator with a title of “Nothing marginal about the Asian Marginal Seas: the AMS as the central point for unveiling marine environment and productivity changes in a changing climate”, was held with more than 100 experts and students from various countries (Photo) hosted by Jing Zhang.

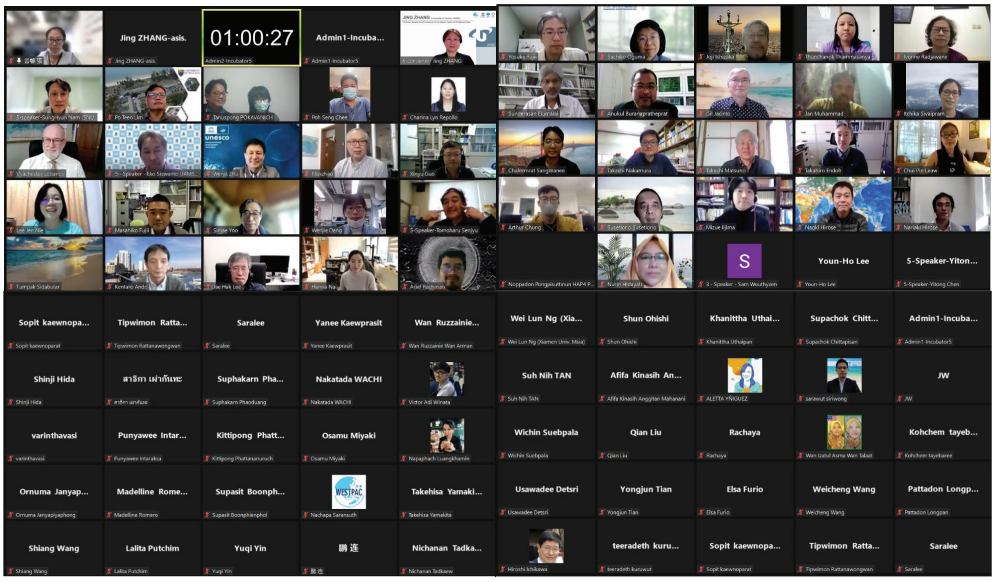


Photo: Participants of the online meeting held on 25 November 2021

In subgroup meetings, the AMS-program outline of WESTPAC, which started this year, was presented. Exchanges were made with communities outside the program,

such as fisheries and social sciences. As the program is further developed, it is important to extend the program to other communities, which will result in appropriate outputs for the general community. In order to achieve the outcomes expected by the Ocean Decade, the activities of the program should be strengthened by establishing closer relationships with fisheries, climate, and social sciences, and then with stockholders and police decision makers.

2. Water origins of low-oxygen water on the outer shelf and material transport from the East China Sea to the Kuroshio area

Low-oxygen water has been identified for the summer months of the ECS outer shelf from 2018 to 2020. Based on multiple-tracer mixing model, the sources of low-oxygen water were quantified using rare earth elements (REEs), as they allow a good distinction between different water masses. In mixed water masses, Kuroshio Subsurface Water was proved to dominate in the formation of low-oxygen water, and the contribution of middle shelf water was also confirmed. In particular, the contribution of pore water was significant, DIN transport from pore water was estimated in combination with ^{222}Rn data. The low-oxygen water near the seafloor may be influenced by particle depletion. In addition, the interaction between low-oxygen water on the continental shelf and Kuroshio water was quantified using HREEs (Figure). It indicates that the low-oxygen water can make a further impact on other sea areas following the Kuroshio.

To better understand the impact of low oxygen water in the ECS, leaching experiments of particles are expected to be conducted. In addition, future spatial and temporal analysis of low oxygen water will be performed for 2018-2020.

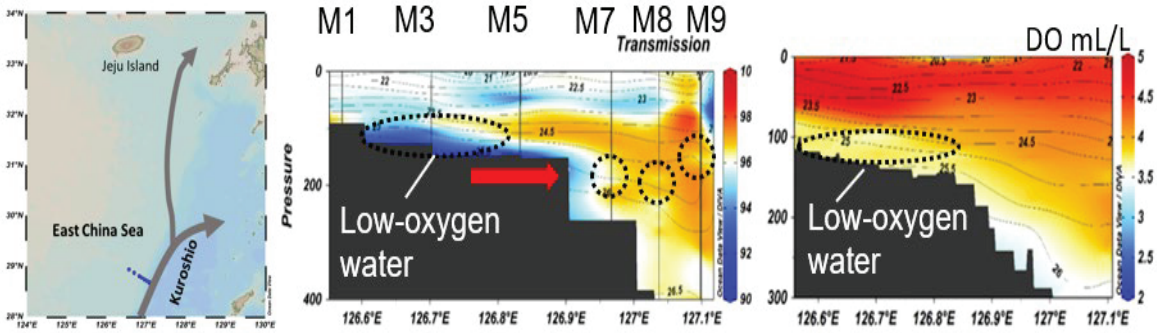


Figure: Study area and the section map of Transmission and Dissolve oxygen. Low-oxygen water is circled using black dash lines.

衛星データを用いたダストエアロゾル量と雲微物理量の関係

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科　河本和明

[要旨]
人工衛星 CALIPSO のデータを用いて推定されたダスト消散係数と雲微物理量（本研究では氷晶粒径）の関係を調べた。雲氷量が少ない場合、中程度の場合、多い場合の3つについて気温とダスト消散係数の関数として氷晶粒径の平均値をプロットした結果、氷晶粒径はいずれの場合もある温度領域で最大値を取ること、ダスト消散係数が大きい方が氷晶粒径が小さいこと、雲氷量が少ない場合がもっとも氷晶粒径が大きいことがわかった。

[目的]
雲は降水・降雪を通して水循環に関係し、また太陽放射の反射や地球放射の吸収・射出など放射過程によって気候に大きく影響している。雲には水滴でできている水雲と氷晶から成る氷雲があるが、これまでの研究で、雲全体に対する氷雲の割合（氷相割合）は第一義的には温度の関数である（特に 230K 程度の低温域と 270K 程度の高温域ではほぼ温度のみに依存する）が、250K 程度の中位の温度域ではダスト消散係数にも依存し、ダスト消散係数が大きいほうが氷相割合も高いことがわかった。一方、雲の諸特性を規定する微物理量の中で、氷晶粒径は降雪粒子への成長を考察する上でも重要な物理量の1つである。そのため、気温とダスト消散係数の関数として氷晶粒径の平均値の動態を調べた。

[方法]
使用するデータは、人工衛星 CALIPSO に搭載されたライダである CALIOP から推定されたダスト消散係数、雲氷量（IWC）、氷晶粒径である。雲氷量が少ない場合(low-IWC)、中程度の場合(mid-IWC)、 多い場合(hig-IWC)の3つのカテゴリーに分け、気温とダスト消散係数ごとに氷晶粒径の平均値を計算した。
このダスト消散係数と氷晶粒径を推定するアルゴリズムは、九州大学応用力学研究所の岡本創教授が中心となって構築されたものである。対象期間は 2006 年 12 月から 2009 年 11 月までの計 3 年とした。これらのデータは JAXA が運用している EarthCARE 研究 A-Train プロダクトモニタのサイト (https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html)からダウンロードした。

[結果と考察]
本研究では、雪氷の放射効果が高いと考えられる北半球の北緯45度以上の中高緯度を対象地域とした。図1,2,3 はそれぞれ雲氷量が少ない場合、中程度の場合、多い場合の各々のカテゴリーでの気温とダスト消散係数毎の氷晶粒径の平均値を示したものである。どのカテゴリーも概ね 260K 付近で最大値を取る上に凸の形状を取っている。この温度範囲で大きな氷晶が生じる点については凍結の種類の違いを踏まえて議論する必要があると思われる。またダスト消散係数が大きい方が氷晶粒径が小さい傾向が見て取れた。これは Twomey 効果を反映している可能性がある。さらに、雲氷量が少ない場合に最も氷晶粒径が大きかった。この一見矛盾するような結果についてはさらなる検討を要する。

[研究成果報告]
以下の学会発表1件を報告する。
渡利　晃久, 飯塚　芳徳,　藤田　耕史, 増永　浩彦, 河本　和明
グリーンランド南東ドームアイスコアから復元する硫酸エアロゾルと北半球中高緯度の雲量の関係
雪氷研究大会(日本雪氷学会)、A1-17, 2021/9/13,　千葉大学　（オンライン）

[研究組織]
河本和明（長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科、衛星データの解析・全体のまとめ）
岡本創（九州大学　応用力学研究所、雲微物理推定手法についてのアドバイス）の2名である。

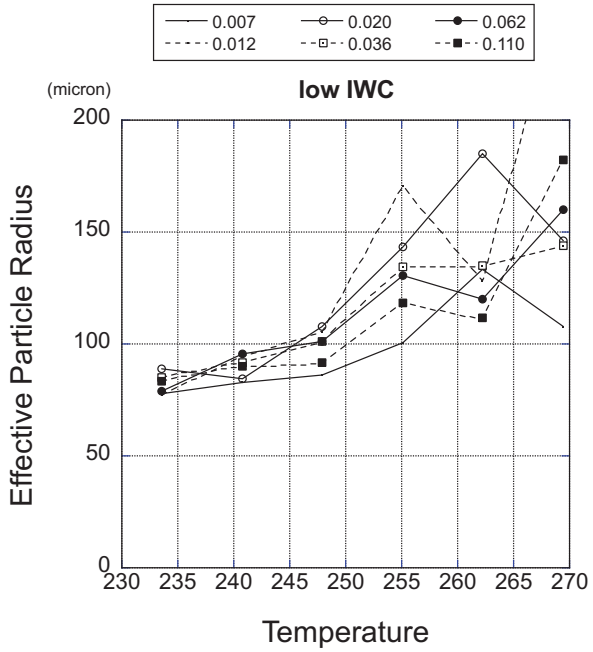


図 1　気温・消散係数と氷晶粒径の関係（少 IWC）

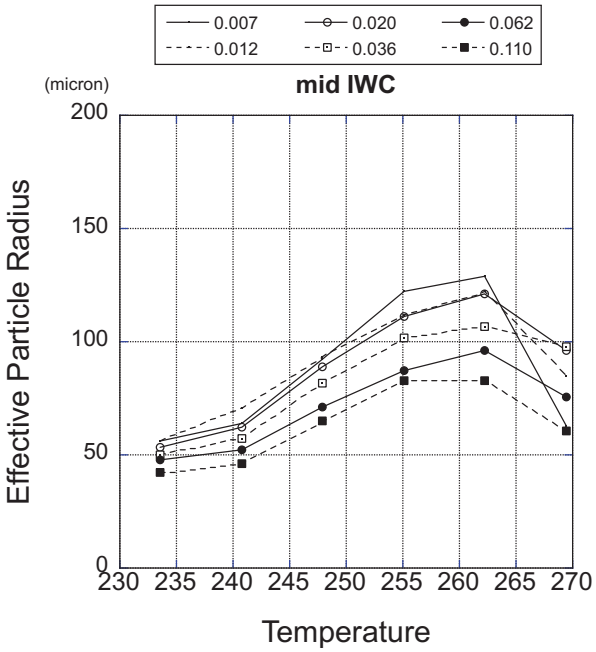


図 2　気温・消散係数と氷晶粒径の関係（中 IWC）

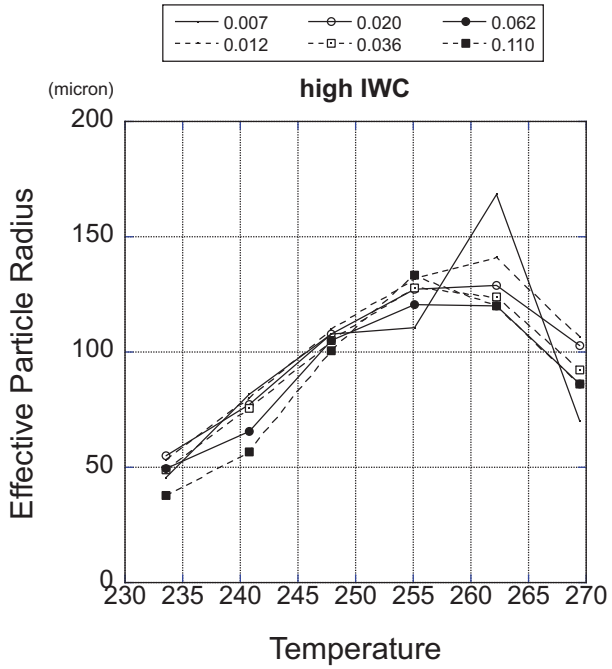


図 3　気温・消散係数と氷晶粒径の関係（多 IWC）

富山湾を再現した海洋モデルにおける適切な淡水流入量の推定

公益財団法人　環日本海環境協力センター　小塚　晃

1.　目的

富山湾では定置網漁業が盛んで、秋から冬にかけて日本海を南下する魚群を漁獲対象とし、漁獲量は魚群の来遊状況と滞留時間による影響を受けると考えられる。魚群が来遊し湾内に滞留する理由として、避寒目的で南下する生物に対して湾内に形成される暖水域などの海洋環境が影響すると考えている。

これまでの共同利用研究で、富山湾高解像度モデル(DREAMS_K)を用いた数値実験等から、冬季に湾奥で暖水域が毎年発生し、河川水由来の低密度水が湾奥上層部に形成されること、河川水と湾内の弱い風の相乗効果により湾奥の 60m 以浅がゆっくりと冷却されることが分かった。暖水域形成の外部要因として河川水、海上風が示唆されたものの、富山湾の海底湧水は河川水量の最大 25%存在する（八田ら,2005）という報告もある中で、海洋モデル自体の淡水流入量の設定を詳細に検討してこなかった。

環日本海環境協力センターにおいて実施した富山湾奥部の海洋観測結果を用いて、現場データとモデルの値を比較し、海洋モデルにおける沿岸河川からの適切な淡水流入量について検証することを目的とした。

2.　方法

本研究では、図 1 の範囲における高解像度海洋同化モデル DREAMS_K（以下、DR_K）を作成し、富山湾内を水平解像度 500m、鉛直方向に水深 1～1092m（61 層）とし、流向・流速、水温、塩分を計算した。降水は気象モデルの降水量データを同化し、さらに河川の淡水流入量を変化させるため富山湾に流れ込む 5 つの一級河川における実際の日別河川流量データを同化した(図 1)。モデルにおいて、各河口部の地形を南側に 0.5～2 ㎞程度掘り込み、実際の河口での水の混合を再現した。

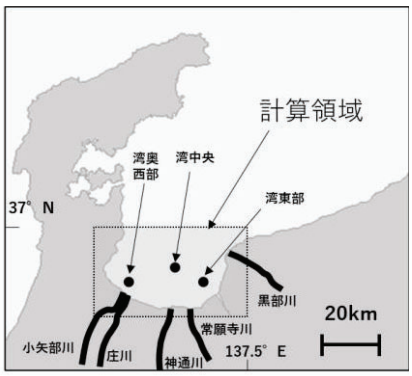


図 1. 計算領域と観測点等の位置図

2017 年 9 月 1 日～12 月 31 日の計算期間に対して、9 月中は観測された 5 河川の河川流量データを用いて計算後、10 月 1 日以降はその河川流量を実測値の 0 倍（降水のみ)、1 倍、2 倍の 3 パターンの設定で計算を行った。当センターが現場観測を実施した 2017 年 10 月 27 日時点の湾奥西部(St.8)、湾中央（St.5)、湾東部(St.2)の 3 点における 10m 深、50m 深の塩分を比較した。また、各河川流量の設定で計算した塩分の 10 月下旬における平均値を計算し、設定ごとに比較した。

3.　結果および考察

3 地点における 10 月 27 日に観測された塩分と、河川流量が 1 倍のモデルの日平均塩分を比較したところ、湾東部の 50m 深のみモデルの方が高くなったが、湾奥西部、湾中央ではモデルの方が低塩分となった

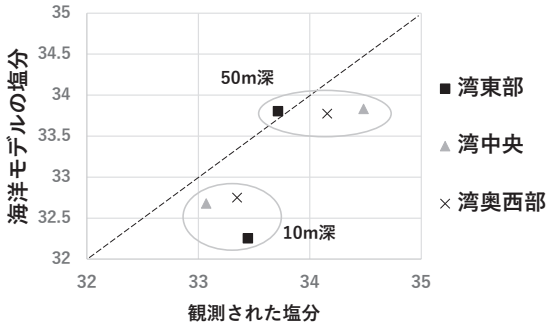


図 2. 湾内 3 定点における観測された塩分と海洋モデルの塩分の比較

（図 2)。50m 深において、モデルと実測された塩分の差の 3 地点平均は 0.31 であった。

モデルが低塩分となった理由について、DR_K の境界条件である DR_C モデルの塩分が低い可能性と、DR_K の沿岸からの河川水や海底湧水等の淡水流入量の設定が適切でなかった可能性が考えられるが、研究目的は河川流量が海洋環境へ与える影響の評価であるため、まず後者の可能性について検討した。

DR_K において、河川流量を 0 倍から 1 倍、また 1 倍から 2 倍に変化させた場合の、10 月下旬の水平的な塩分分布の変化を調べたところ、いずれの場合にも河川流量を増やすと、10m 深は計算領域全体において概ね低塩化し、50m 深においては全体的に高塩化し、特に河口部を中心に沿岸が高塩化した(図 3)。50m 深の高塩化の程度は、河川流量の変化量によって異なり、0 倍から 1 倍に変化させた場合は最大+0.2 程度、1 倍から 2 倍に変化させた場合は最大で+0.06（湾奥西部）で、湾中央では+0.02 であった。

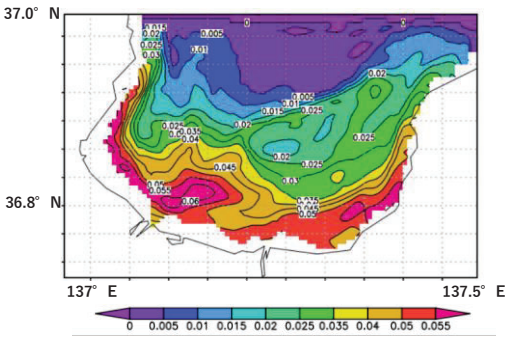


図 3. 10 月下旬、50m 深における河川流量 1 倍と 2 倍のモデル計算結果の塩分差

河川流量の 0 倍から 1 倍、1 倍から 2 倍への変化は、河川流量の変化量は同じであるが、50m 深の塩分の変化量は線形の変化ではなかった。10 月下旬は海面冷却期であり、観測されている混合層厚は 50m 程度である。0 倍から 1 倍に河川流量を変化させたときは、表層部の塩分成層の有無による鉛直混合の違いを比較したことになり、その影響は大きく、50m 深の塩分に+0.2 程度の大きな差が見られた。一方、1 倍から 2 倍への変化では、塩分成層強度の違いを比較し、塩分の差に最大+0.06 程度で小さく表れたと考えられる。変化の傾向からして、河川流量を 2 倍以上にしても 50m 塩分は大きく上昇しないと考えられる。

50m深における観測値とモデルの塩分差は平均で 0.31 であったので、DR_K の河川流量を増やして観測した塩分を再現すると、非現実的なモデルとなる。このことから、境界条件である DR_C モデルの塩分が実際より低かったと考えられ、境界条件のモデルの再現性の向上が期待される。今回の研究により、富山湾を再現した海洋モデルで河川流量を増やすと 10 月下旬に 50m 深の塩分が沿岸を中心に上昇するという応答が明らかとなり、今後、富山湾の沿岸河川と海洋環境の関係の解明につなげていきたい。

4. 研究成果報告

小塚晃、「富山湾奥部における河川水の海洋環境への影響」　第 76 回日本海海洋調査技術連絡会、2021.11.16(東京)

小塚晃、「冬期に富山湾奥に現れる暖水域とスルメイカ漁業」　第 4 回富山湾研究会、2021.3.2 (金沢)

5. 研究組織

研究代表者　公益財団法人環日本海環境協力センター　小塚　晃　主任研究員

所内世話人　九州大学応用力学研究所　広瀬　直毅　教授

研究協力者　九州大学応用力学研究所　千手　智晴　准教授

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成の他に、環境省水・大気環境局の請負業務「平成 29 年度北西太平洋地域海行動計画活動推進業務」のデータを使用し実施しました。関係各所に御礼申し上げます。

インド亜大陸北東部からインドシナ半島における降水システムの長期変動に関する研究

代表者：東京大学 未来ビジョン研究センター　木口 雅司
所内世話人：九州大学 応用力学研究所　江口 菜穂

１．研究の目的

インド亜大陸における約 100 年間の降水量データから北半球夏季インドモンスーンに伴う降水システムの変化が Fukushima et al. (2019) によって報告されている。一方で、ここ 30 年間で、北半球夏季(7-9 月)のアフリカ大陸からアジアモンスーン域の対流活発域が北進していることが明らかとなっている（Kodera, Eguchi et al., ACP, 2019; Kodera, Eguchi et al., JMSJ, 2021)。

本研究対象とするインド亜大陸東北部とインドシナ半島は、インドモンスーンの下流にあたり、かつ準 2 週間周期変動(QBO)や BSISO などの季節内変動の始点にあたる。またこの地域は特異な地形による地形性の降水システムが顕著にみられる地域で、長期的な気候変動による循環場の変化がこの地域の降水システムをどう変化させているか、またその影響が高緯度側の気象場や気候場にどのような影響をもたらしているのか明らかにしたい。一方で、熱帯域の長期変動であるインドダイポールや ENSO の影響も強く受けているので、熱帯域の経年変化との関連の調査も目指す。

本研究では、研究対象地域における地上降雨量データを収集し、アジアモンスーン降雨データベースを作成し、各現業機関の了承を得て、他の研究にも使用できるようデータベースをレポジトリサイトにて公開することを目指し、さらに季節サイクルなどの長期トレンド解析を試行する。本研究で開発するデータベースは、APHRODITE (Yatagai et al., 2012) より長い期間（APHRO_V1101 は 57 年間）のデータとなり、より長期の解析が可能となる。さらに、衛星観測データ（TRMM 等）や既存の雨量プロダクト（APHRODITE 等）を用いて、作成したアジアモンスーン降雨データベースの検証を実施しつつ、季節進行が先行研究の結果と類似しているかどうかの確認を行う。また、本研究の研究目的の達成に十分な精度を持っているか、検討することを目的とした。昨年度に引き続き COVID-19 の影響を受けて研究対象地域におけるデータ収集や特に重要である各現業機関のデータ公開に向けた了承を得るための交渉が大幅に遅れている。そのため、本報告では、既に入手した雨量データと衛星観測データ TRMM との検証結果と、研究領域は異なるが解析手法開発を先に進めるために、日本での高解像度雨量データセット開発を実施したので、それについて報告する。

２．メガラヤ高地における降水データの検証

世界有数の多雨地域であるインドとバングラデシュの国境に位置するメガラヤ高地において得られた雨量データを検証するため、観測された豪雨発生時における TRMM PR (熱帯降雨観測衛星搭載の降雨レーダー) とのマッチング比較を行った。TRMM 衛星通過時に大雨が生じている事例は、TRMM PR の走査範囲が狭いことと傾斜角 65°の太陽非同期軌道であるため数が少ないが、幸い 2010 年 5 月 19 日の豪雨事例を抽出できた。図 1 は、その豪雨時の TRMM PR 雨量 (near surface rain に相当) の分布図と、本研究でデータベースに格納された地上観測地点の位置を示した。黒い四角が TRMM PR 気候データセットでの大雨地域、その中にある地上観測地点(○で示す)は左(西)から Mawsynram、Cherrapunji、Pynursla である。この豪雨事例が TRMM で観測された時間の前後 5 分間(つまり 10 分間)での地上観測地点が観測した降水強度は、それぞれ 156.0mm、144.0mm、84.0mm であった。TRMM PR 雨量の分布と比較すると、同じ場所ではないが近接したグリッドで同程度の降水強度の雨が観測されており、良い関係性がみられた。

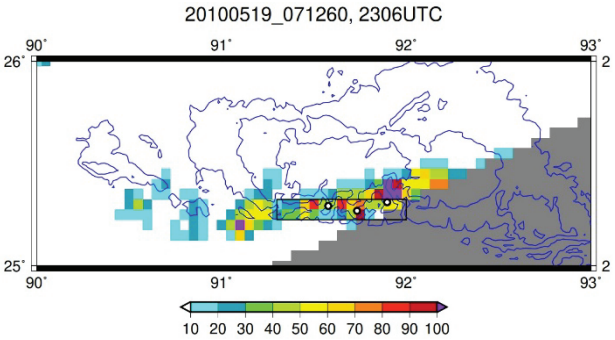


図 1：2010 年 5 月 19 日にメガラヤ高地で発生した豪雨時の TRMM PR 雨量(near surface rain に相当する雨量(mm))。黒い四角で囲まれた領域は TRMM PR 気候データセットで大雨と判別された地域、○は地上観測地点で左(西)から地上観測地点(Mawsynram, Cherrapunji, Pynursla)をそれぞれ示す。(Murata, Kiguchi, Hayashi, et al., submitted to JMSJ)

さらに 3 つの地上観測地点で 30mm/h 以上の降水強度が観測された時の、そのグリッドにおける反射強度の鉛直分布を図 2 に示す。2006 年から 2020 年の 15 年間のうち、100 個のサンプルを得られた。

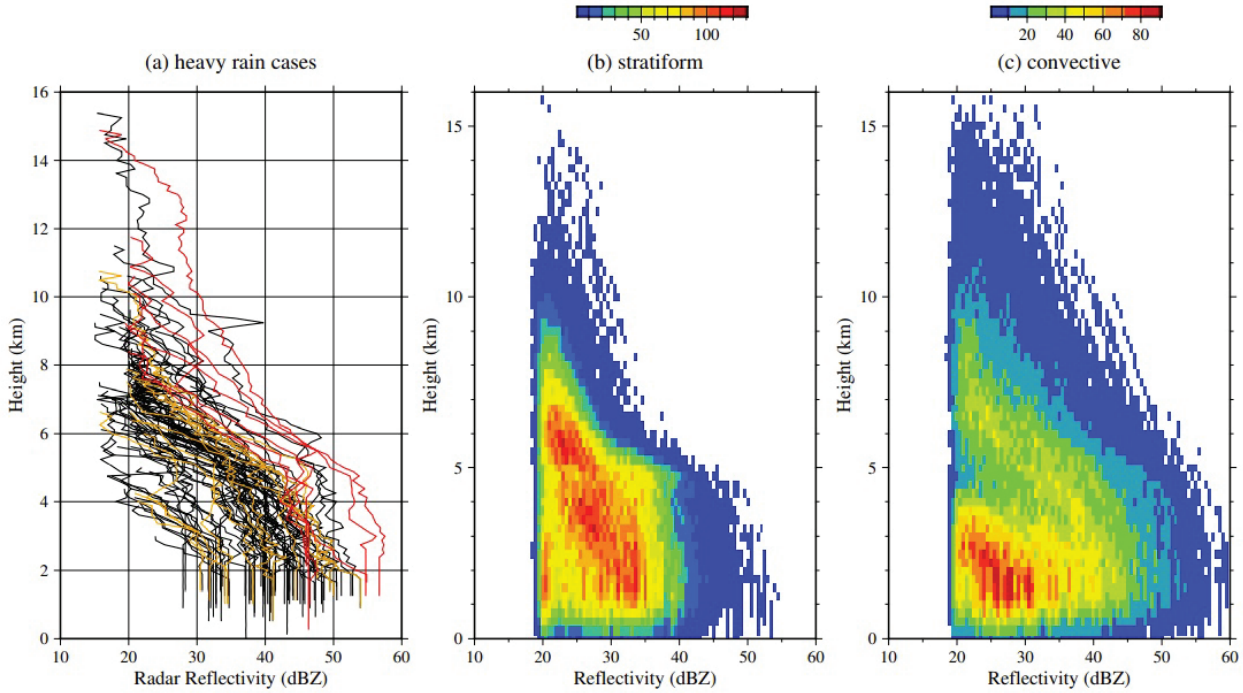


図 2：2006 年から 2020 年までの間に、地上観測地点の Mawsynram、Cherrapunji、Pynursla で 30mm/h 以上の降水強度が観測された時のそのグリッドの反射強度の鉛直分布を示す。(a)サンプル数 100 個分の鉛直分布で、黒線：30mm/h 以上、橙線：60mm/h 以上、赤線：80mm/h 以上の地上観測地点の降水強度を表す。100 個のサンプルのうち、(b)層状性降水と(c)対流性降水に分類しそれぞれ頻度分布にした。

層状性降水と対流性降水の判別は、TRMM における判別結果を用いた。この結果から、対流性と判別した降水の多くは高度 5km ほどの浅い雨であることが判明した(図 2(c))。

３．日本での高解像度雨量データセット開発

本研究の降水量データセット作成のため、COVID-19 の感染拡大によってデータの収集並びに公開に関する交渉が遅れているものの、先行してこれまで提案されている作成手法(例えば Dirks et al., 1998)を検討し、長期データが別プロジェクトで揃っていた日本において 1926 年から 2020 年までの 0.01 度の空間解像度での降水量データセットを作成した。用いたデータは、区内観測所、AMeDAS、水文水質データベースで、パラメータ推定の検証のため東京大学演習林が整備した全国演習林データベースの降水量データ（1990～2009）を準備した。Dirks et al.(1998) で提案された逆距離加重法においてパラメータ推定を行い、その結果に基づいて日本域における 0.01 度高解像度長期降水量データセットが完成した（Hatono, Kiguchi, et al., submitted to Scientific Data)。

４．まとめ

本研究では、地上観測データと衛星観測データとの関係性を検証した。また、先行して長期降水量データセットのグリッド化を目指した作成手法を日本において検討し、データセットを作成した。このデータセットは、論文が受理された後公開される。

５．研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学 未来ビジョン研究センター 特任教授
所内世話人	江口 菜穂	九州大学 応用力学研究所 助教
研究協力者	村田 文絵	高知大学 理工学部 講師
研究協力者	林 泰一	京都大学 東南アジア地域研究研究所 連携教授

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成の他に、JSPS 科研費 JP26220202、JP21K14252、JP21H05002、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム JPMX D0717935457、2017 年度住友財団環境研究助成「茶園観測データレスキューと将来予測による 19-21 世紀アジアモンスーンの降雨変化」、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-14)、中国建設弘済会技術開発支援事業によって実施された。

表層海洋ドリフターを用いた沿岸表層海流の観測

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 小平翼

1 目的

沿岸域の表層海流の面的な観測手法として短波(HF)レーダーが知られているが、観測時の有義波高や有義波周期、また航行する漁船等の船舶の存在等の環境条件によってデータの品質が変動し、データの活用に際して障害となる場合がある。一方で、昨今では GPS センサを始め、IoT 社会の台頭を可能にする廉価なセンサが多く共有されている。表層ドリフターの位置情報から海流を推定するのは古典的ではあるが、前述の社会背景を踏まえた安価な測器の利用により、観測数が増えることでより多くの海洋情報が得られる可能性がある。本研究では昨年、複数の表層ドリフターによる同時観測によって、特定海域の流れのパターンを把握する手法を検討した。今年度は、ドリフターに対する波浪の漂流影響を考察するために、ドリフターに波浪計測機能を付与し、試験を実施した。

2 実験方法

平塚総合海洋実験場付近の海域において、開発した波浪計測が可能なドリフターFZ の試験を実施した。Fig.1 に試験に利用した漂流ドリフターを掲載する。なお、漂流ならびに波浪計測の参照データを確保するにあたっては、それぞれ Pacific Gyre 社ならびに Sofar 社より販売されている CARTHE Drifter と Spotter を用いた。なお、試験海域付近では過去に九州大学所有の ADCP(RDI 1200kHz) を用いた曳航観測を実施し、潮汐流、吹走流、黒潮に伴う流れが混在することが分かっている。

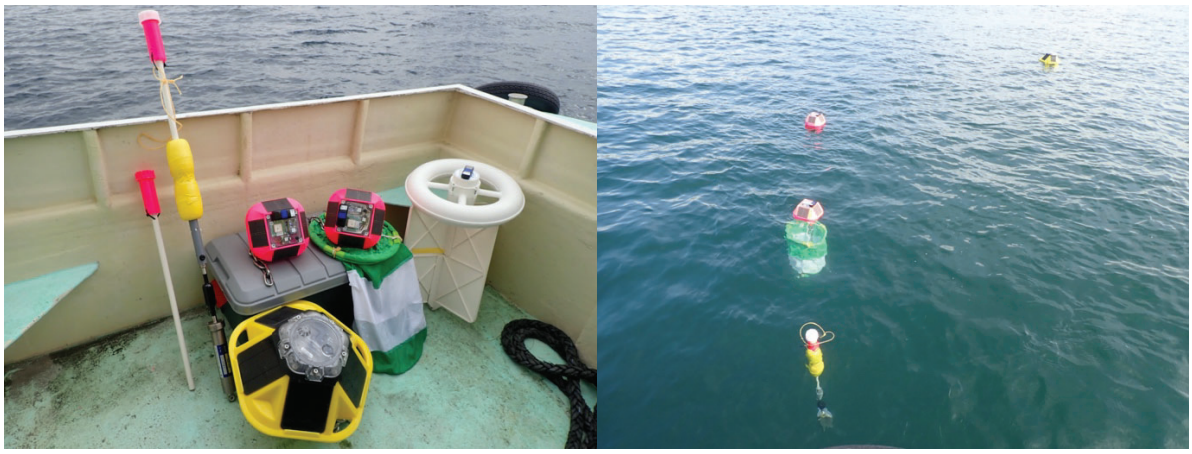


Fig. 1 漂流試験に利用した各種機器

3 実験結果

漂流試験により得られた各機器の漂流軌跡を Fig.2 に示す。なお、平塚波浪観測塔のデータによれば、漂流試験時は 5m/s 程度の北風が吹いていた。抵抗体を有するドリフターが風による漂流の影響を受けにくかったことが確認できる。また、波浪計測結果からは、開発したドリフターで鉛直位変位のスペクトルについては Spotter と整合的な結果であることが確認できた(Fig.3).

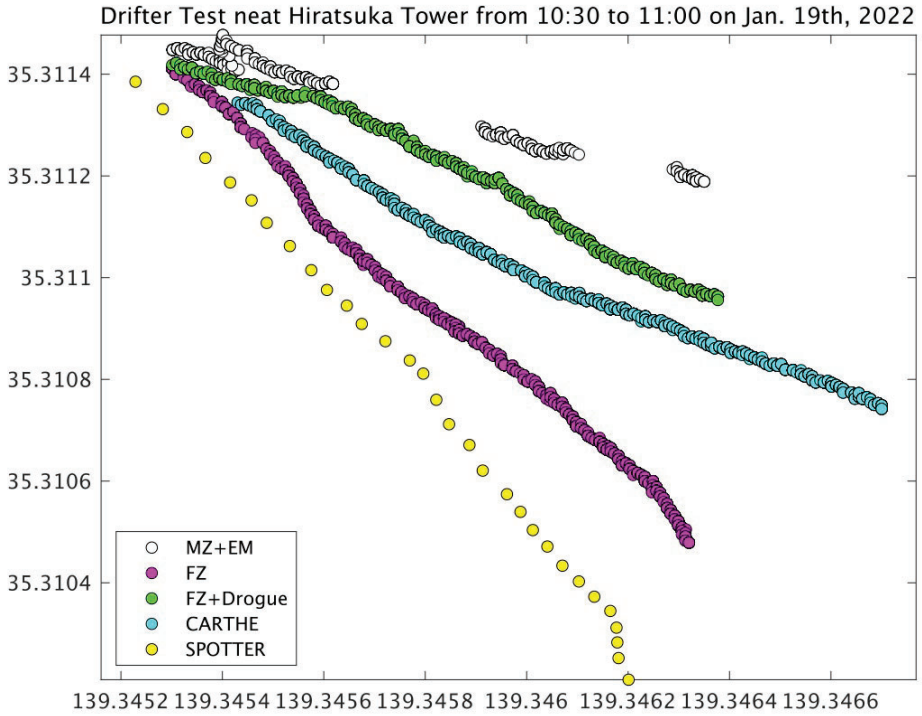


Fig. 2 漂流試験実施結果

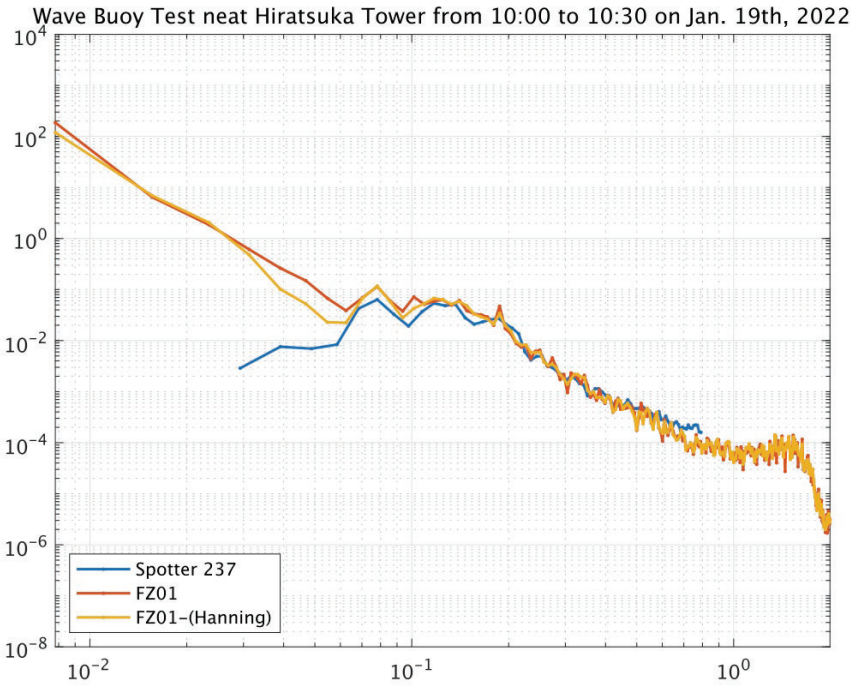


Fig. 3 Sofar 社製漂流型波浪ブイ Spotter と開発したドリフターFZ により計測された鉛直変位のパワースペクトル

4　考察

複数種類の漂流浮体の軌跡を理解するには風の影響、波浪の影響、流れの影響のそれぞれを定量的に考察する必要がある。風の影響については浮体の海面上の射影面積を減らし、海面下の射影面積を増やす抵抗体等を付与することで実施できると考えられるが、波浪の影響と表層流の影響については作用部分がどちらも表層付近であるので、水槽実験等を通じてより定量的に考察する必要があると考えられる。

5　成果報告

下記の通り、口頭発表を実施した。

小平 翼・麻埼 和大・勝野 智嵩・野瀬 毅彦・藤原 泰・内山 亮介・Jean Rabault ・ Joey Voermans・早稲田 卓爾、小型海洋ドリフター及び小型波浪観測ブイ開発の試み、海洋調査技術学会 第33回研究成果発表会、第33回海洋調査技術学会研究成果発表会講演要旨集、令和3年11月18日（木）－19日（金）、ZOOMミーティングによるオンライン学会

表面波・内部波の非線形相互干渉に対する地形の影響

研究代表者　鹿児島大学学術研究院理工学域　柿沼太郎

研究の目的

辻・及川は，2 層流体における弱非線形・弱分散モデルを用いて，孤立波の 2 次元相互作用の数値解析的研究を行ない，ソリトン共鳴に伴いステムが生成し得ることを示した．これに端を発したこれまでの共同研究において，非線形性及び分散性が強い内部波が相互作用する場合を対象として，変分法に基づく波動方程式系を適用した数値解析により，孤立波の 2 次元相互作用に起因するステムの生成や，生成されたステムの挙動に関して調べた．そして，2 層流体において，ステムの振幅増幅率が critical level により抑制されること等が示された．ところで，内部波が生成・伝播する東シナ海といった実海域は，様々な地形によって構成されているが，こうした水深の変化が，非線形波動の 2 次元伝播やソリトン共鳴にどのような影響を及ぼすのかに関しては，不明な点が多い．そこで，今年度は，表面波，または，内部波が伝播する場合を対象として，海底地形や，湾及び河口といった平面地形が，表面波，または，内部波に与える影響を数値解析に基づき調べた．本研究で対象とした非線形波の挙動特性は，東シナ海や九州西岸域を対象とした波・流れ場の研究，例えば，現在，辻が行なっているモデル計算に基づく研究等に対して，基礎的知見を与えることが考えられる．

研究の具体的方法

具体的には，2 次元伝播する表面波，または，内部波を対象とし，次の各事項に関して研究を進めた．すなわち，様々な地形や，平面形を有する領域を伝播する表面波，または，内部波の強非線形性及び強分散性を考慮して，波の挙動や，相互干渉の数値解析を実施し，特に，振幅増加及びステムの生成に関してメカニズムを考察した．

数値解析や，数値モデルの理論に関する仕事を分担し，計画の遂行にあたった．なお，メール等での議論のみならず，2022 年 3 月に，全メンバが遠隔で議論を行なう予定である．

主要な成果

変分法に基づく波動方程式系を適用した数値解析により，2 波のソリトン共鳴を調べ，修正された Miles の予測関数 $\kappa > 0$ の場合，2 番目以降のソリトン共鳴が O 型となることが明確に示された（Nakayama・Tsuji，2021）．

また，3 次元数値モデルを適用して，3 成層において breather が斜面上を進行する際に，既に提案されている 2 層に対する砕波指標が, breather の上層界面の砕波形態の分類に対して適用可能であることがわかった（田下ら，2021）．

そして，3 次元数値モデルを適用して，河川津波が河口に入射する際に，回折波が河道に入射し，地形や入射波の条件によって，河川津波の津波高さが増幅される場合のあることがわかった（Kakinuma・Kusuhara，2021）．

更に，3 次元数値モデルを適用し，実現象を対象として，東シナ海の内部波エネルギーのモデリング解析を行なった（辻，投稿中）．

研究成果報告

田下健人・中山恵介・新谷哲也: 3 成層における breather の斜面上での砕波分類, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, **77(2)**, I_343–I_348, 2021. doi: 10.2208/kaigan.77.2_I_343.

Kakinuma, T. and Kusuhara, Y.: A 3D numerical study on tsunamis ascending a river, Coastal Engineering Journal, **63(4)**, 13 pages, 2021. doi: 10.1080/21664250.2021.2015199.

Nakayama, K. and Tsuji, H.: Multiple solitary wave interactions, Physics of Fluids, **33(8)**, 10 pages, 2021. doi: 10.1063/5.0056258.

組　　織

研究代表者　柿沼太郎（鹿児島大学学術研究院理工学域　海洋土木工学プログラム）
所内世話人　辻　英一（九州大学応用力学研究所　地球環境力学部門）
研究協力者　中山恵介（神戸大学大学院工学研究科　市民工学専攻）

新しい原子力材料における重イオン照射による損傷組織の発達過程

京都大学複合原子力科学研究所　徐　虬
九州大学応用力学研究所　渡邊　英雄

1．目的

最近、ハイエントロピー合金（HEA）または多成分合金は、高強度、優れた延性と靭性、耐熱性及び耐食性を示すことから、金属材料の新しいカテゴリとして大きな注目を集めている。従って、HEA または多成分合金は先進的な原子力材料の候補として挙げられてきた。HEA または多成分合金の耐照射についての研究が多く行われてきた。その中、特に面心立方単相固溶体 CoCrFeMnNi HEA が最も研究されている。この合金の耐照射性も優れたことが報告されたいた。一般的に、構造材料の構造及び組成の安定性が優れた性能を維持するための要因である。従って、高温または照射下での CoCrFeMnNi HEA 構造及び組成の安定性の研究が必要である。本研究では、CoCrFeMnNi HEA の元素分布に及ぼすイオン照射の影響を調べた。

２．実験方法

CoCrFeMnNi HEA（20 at.%、公称組成）は、高純度（＞99.9%）の Co、Cr、Fe、Mn 及び Ni を真空誘導炉の MgO るつぼで溶融された。その後に、1473K で真空中 10 時間均一化処理を行い、放電加工により、厚み 0.2mm の正方形試験片（10mmx10mm）をインゴットから切り出した。加工中に導入された欠陥を除去するため、サンプルの表面を機械研磨し、真空中に 1273K で 1 時間焼鈍を行った。正方形試料に対して 2.8MeV の鉄イオンにより室温、373K 及び 773K で 5 × 10^{18} ions/m^2 まで照射を行った。損傷ピークは表面から約 800nm で、ピークの損傷量は約 0.5dpa であった。通常の線源法の陽電子消滅分光法で表面近傍の欠陥の測定が難しいが、エネルギーが可変の低速陽電子ビームならイオン照射による損傷の測定ができる。本研究では、2.8MeV の鉄イオンによる損傷範囲を測定するために、16keV の陽電子ビームを使った。

３．実験結果と考察

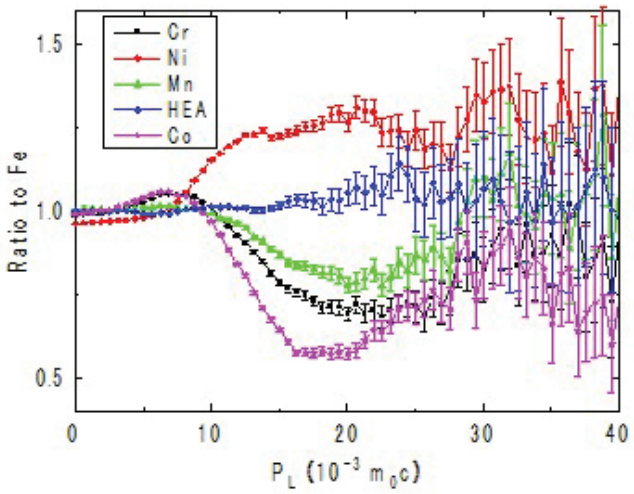
図１（a）に 1273K で 1 時間焼鈍した CoCrFeMnNi HEA の純鉄に対する CDB 比率曲線を示す。比較のため、Co、Cr、Ni と Mn の比率曲線も示す。Ni 比率曲線は約 20x$10^{-3}$$m_0$c（$m_0$:静止時の電子質量；c:光速度）にピークを示し、他の元素 Co、Cr、Mn にはピークがなく、約 17x$10^{-3}$$m_0$c、20x$10^{-3}$$m_0$c、21x$10^{-3}$$m_0$c に谷があった。これに対して、CoCrFeMnNi HEA 比率曲線が約 25x$10^{-3}$$m_0$c にピークを示したため、すべての元素のピークまたは谷と重ならなかった。従って、1273K で焼鈍しても元素の偏析が起こらなかった。25x$10^{-3}$$m_0$c に現れるピークは CoCrFeMnNi HEA に特有のものであると考えられた。

図１（b）にイオン照射と非照射の CoCrFeMnNi HEA の CDB 比率曲線を示す。照射温度は室温、573K と 773K であった。直線 y=1 は非照射試料である。イオン照射後に、低運動量領域（P_L<4x$10^{-3}$$m_0$c）においては、比率曲線の値が 1 より大きかった。特に、300K と 573K で照射された試料の値が 773K で照射された試料の値より高かった。低運動量領域で 1 より大きい値は、イオン照射によって原子空孔集合体が形成されたことを意味する。一般的に、原子空孔集合体の形成は、空孔濃度と集合体の熱安定性に依存する。空孔濃度は温度に依存する拡散と粒界などのシンク濃度に影響される。温度が高くなると、空孔の拡散速度が増加し、シンクで消滅される空孔の数が増加する。その結果、空孔濃度が低下する。一方、空孔集合体は、空孔の拡散速度が速いため、容易に成長する。場合によって、低運動量領域の比率曲線の値に寄与する空孔の総数が、温度の上昇に伴い予想されるほど減少しないことがある。従って、773K での低運動量領域での比率曲線の値の急激な減少原因は、空孔集合体の低い熱安定性だと考えられる。さらに、773K での照射の比率曲線は、他の照射より y=1 の直線に近かったことから、照射量が同じであるにもかかわらず、773K で残っている欠陥が少ないことを示している。さらに、比率曲線の高運動量領域に有意なピークが観察されなかった。これは、CoCrFeMnNi HEA に照射による偏析がなかったことを示している。

４．まとめ

CoCrFeMnNi HEA における高温焼鈍及び室温から 773K までの照射（2.8MeV の鉄イオン、5 × 10^{18} ions/m^2）による元素分布への影響について調べた。高温での焼鈍は CoCrFeMnNi HEA には有意な元素偏析の影響がなかった。また、室温、573K と 773K でイオン照射した CoCrFeMnNi HEA に析出物の形成や、元素偏析などが起こらなかった。CoCrFeMnNi HEA の耐照射性が良いことが分かった。特に、773K の高温で 0.5dpa まで照射しても欠陥が殆ど残らなかった。

（a）



（b）

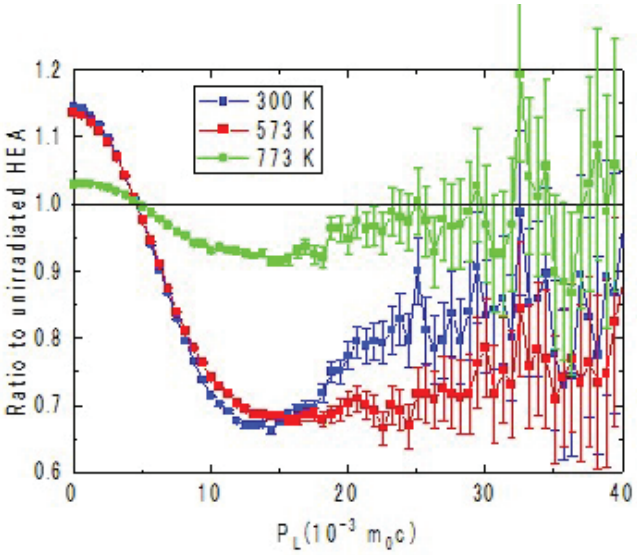


図 1　未照射試料(CoCrFeMnNi HEA)と純 Fe(a)、イオン照射した試料と未照射試料の CDB 比率曲線(ｂ)。比較のため、図 1 (a) に Co、Cr、Mn と Ni の比率曲線も示す。

プラズマ支援超臨界流体を用いた高耐熱性ナノ材料の創製

東北大学未来科学技術共同研究センター　成　基明

1. 目的

気体と液体の境界を区別できない超臨界流体では、これまで知られていない化学反応が生じる革新的な反応場であり、最近多くの関心と研究がなされている。また、非平衡反応場であるプラズマ支援超臨界流体を用いた場合、プラズマ中で形成される活性種が高密度・高拡散性を有する超臨界流体中に供給されることにより平衡から外れた非平衡系物質の合成や高速反応プロセスを行うことができる。このような利点は、これまで作ることが難しかった高性能のナノ材料を創成できるようにする。特に、タングステン合金などの数千度の熱に耐えられる複合材料は、核融合分野はもちろん、宇宙航空など他の様々な分野で注目されており、その開発が非常に大きな意味を持つ。

しかし、超臨界流体環境でのプラズマの生成、物性診断などに関してはまだ不足している点が多い。反応場のより正確な分析と制御は、新しいナノ材料の創成に深く結びついている。したがって、本共同研究では、応用力学研究所の先端プラズマ物理の研究キャパシティーに支えられ、超臨界流体プラズマプロセスの新たな可能性を開拓するとともに、耐熱性材料の開発に目的を置いている。

2. 研究方法

耐熱性材料探索における重要な因子の探索を行った。材料の融点などの特性変化は、巨視的には材料の混合や合成に見えるが、微視的には粒子の配置や結晶構造の変化に起因する。本研究では、ナノ粒子の配置に注目した。一般的に活性の高いナノ粒子は不安定である[1]。しかし、数ナノサイズのナノ粒子でも周期的配列で集まっていると、安定性が急速に高まるということが報告されている[2]。 本研究では、まず数ナノサイズのナノ粒子を合成し、単分散系の粒子と周期配列構造を有する粒子を比較分析した。

単分散系粒子を合成するために亜・超臨界水熱合成法を適用した流通式反応器を用いた。金属錯体を前駆体（Cerium 系）にし、トルエン溶媒に流し、水と混合した。また、オクタン酸を加えて表面改質を行った。周期配列構造粒子を合成するためには、$Cr(NO_3)_3$ と $Ce(NO_3)_3$ を用いた。単分散系と同様に 亜・超臨界水熱合成法を用い、付加反応を防止するために昇温速度を高めた流通式反応器を用いた。得られた粒子はエタノールを用いて沈殿させた後、遠心分離機で分離、凍結乾燥した[3]。

3. 研究成果

今年は、単分散ナノ粒子およびメソクリスタルナノ粒子それぞれの合成を重点的に研究し、特性分析に集中した。 様々なプロセスパラメータを操作しながら、最適化されたプロセス条件の検討を行った。その結果、サイズの異なるナノ粒子合成とメソ

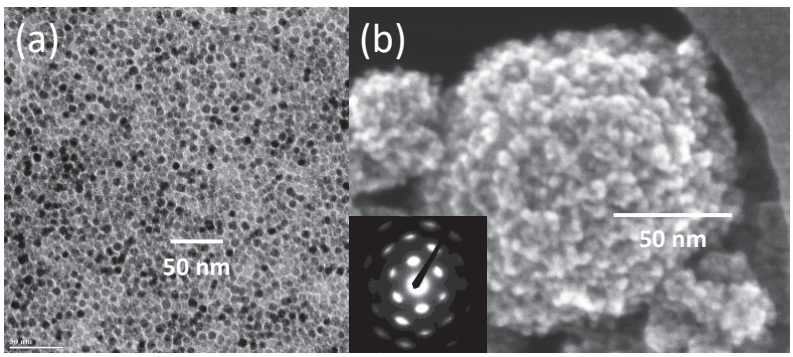


Figure 1. (a) monodispersed CeO_2 nanoparticles; (b) meso-crystal Cr-CeO_2 nanoclusters.

クリスタル合成に成功した。

図 1 は、タイプが異なるナノサイズの CeO_2 粒子を示している。(a)はオクタン酸が修飾された単分散 CeO_2 で、平均 7 nm のキューブタイプ粒子である。(b)はナノ粒子が集まってクラスターを形成している。一次粒子は 3nm で非常に小さく、それぞれの粒子が周期的に凝集しており、全体的にメソクリスタル特性を持っている。 インサートの SAED では単結晶と多結晶の中間形態をとっている。

図２は、各粒子の温度による酸素貯蔵能力(OSC)を示している。酸素貯蔵能力は CeO_2 粒子が持つ非常に優れた物性で、触媒などとしてよく知られている。ナノサイズ化及び結晶面制御で OSC の向上が期待される。{001}面が露出されたキューブタイプの CeO_2 は、一般的なランダムタイプよりも高い OSC を示した。市販の CeO_2 (ALD) はナノサイズであるが、500 度以下では活性がほとんどなかった。これに対し、キューブタイプ(Fig.1(a))は 200 度でも微小だが活性を持つ。ここに同じキューブタイプでも Cr が添加された粒子は 2-2.5 倍優れた活性を有する。そして、Fig.1(b)のように Cr がかなり添加された粒子である場合、はるかに優れた活性を有することが確認された。通常、活性が高い粒子の場合、熱的安定性が非常に低下するが、この測定では sintering による失活は確認されなかった。したがって、メソクリスタルを構成しているこの粒子は、周期構造によって相対的に熱的安定性が高まった可能性があると見られる。

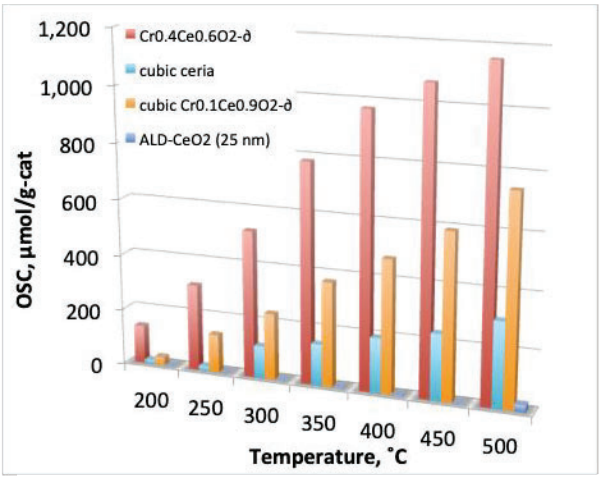


Figure 2. OSC of CeO_2 nanoparticles series.

4. 結論

耐熱性、熱的安定性の基礎研究の一環としてナノ粒子の構造的特性を研究した。まず、数ナノサイズの異なるタイプのナノ粒子を亜・超臨界水熱合成法を用いて合成に成功した。両粒子とも高い酸素貯蔵能力を有し、特にメソクリスタル構造を有する粒子は活性が高くながらも比較的熱的安定性も有している。今後、熱的安定性試験及びメカニズム開発中心の研究が計画されている。

5. 研究組織

東北大学未来科学技術共同研究センター：成　基明（代表）九州大学：文　贊鎬（所内世話人）

謝辞

This work was supported by the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University (2021 FP-2) and was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP21K04763.

参考文献

[1] R. A. Andrievski, *J Mater Sci*., 2014, **49**, 1449–1460.

[2] T. Takashi and M. Tetsuro, *NPG Asia Materials*, 2014, **6**, e100.

[3] Y. Zhu.et al., *ACS Appl. Energy Mater*. 2020, **3**, 4305−4319.

プラズマプロセスを用いた薄膜作製による安価な水素脆化防止用材料作製 II

Preparation of low-cost hydrogen embrittlement resistance thin films by plasma process

佐世保高専，川崎仁晴、須本航輝，鴛淵梨花
National Institute of Technology, Sasebo College
H. Kawasaki, K. Nakano, K. Sumoto, R. Oshibuchi

1　概要

水素の侵入により構造物が脆く壊れる「水素脆化」は、日本のお家芸である自家用車や電車等に最も多く利用されている金属材料の最大の破壊要因であり、その損失は GDP の 1%（数兆円）以上とも言われている[1-3]。さらに地球温暖化防止に役立ち、かつ天候などに左右されない安定な電力供給源となり得る「水素エネルギー」関連機器は、常に高圧の水素ガスに晒されることが宿命付けられている。よって、これらの関連機器は耐水素脆化能力をもつ高価な金属を利用しなければならず、高コストが宿命となるため、水素エネルギー関連機器の普及を妨げる要因の一つとなっている。例えば、ステンレス鋼 SUS316L やアルミニウム合金 A6061-T6 などは耐水素侵入特性が良い等の理由で水素脆化が起こりにくいとされ、高圧水素タンク等の水素利用機器の金属材料候補材として挙げられているが，これらはコストが高い。我々は以前よりこれを解決するため、水素脆化防止薄膜の作製を行っている。例えば、ステンレス鋼 SUS316L やアルミニウム合金 A6061-T6 でコーティングする研究を行い、80%以上の水素脆化防止効果があることを明らかにした。しかしながら、さらに安価な SUS304 等の母材に対しては、薄膜と母材の界面構造が大きく異なるため水素侵入防止効果は小さく、薄膜の剥離などの問題も発生した。これを解決するため、本研究では、数種類の粉体ターゲットをもちいたプラズマプロセスで、基板と薄膜の界面ではより密着性がよく、高圧水素に密着する薄膜側では水素脆化防止効果が高いような傾斜機能性薄膜の作製を試みた。

2　実験装置

実験装置を図 1 に示す。成膜には通常の高周波マグネトロンスパッタリング薄膜作製装置を用いた。基板として SUS304 および分析用の Si 基板の 2 種類を用い、ターゲットとして水素脆化効果の高いと言われる NiO 粉体と SUS304 粉体の混合粉体を成膜した。このとき、NiO／SUS304 の混合比を変えて薄膜を作製した[4-6]。成膜条件は、雰囲気ガスとして Ar、圧力を 10Pa とし、入力は 100W で成膜した。作製した薄膜は走査型電子顕微鏡（SEM：エリオニクス ERA）や XRD、AFM 等を利用して分析した。作製した薄膜の膜中の組成比は X 線光電子分光分析法（XPS:日本電子製：JPS9010）と同装置の Ar イオンによるデプスプロファイルを用いて解析した。

水素量の測定は佐世保高専機械工学科の高圧水素浸漬装置を用いて水素チャージ計測法で計測した。

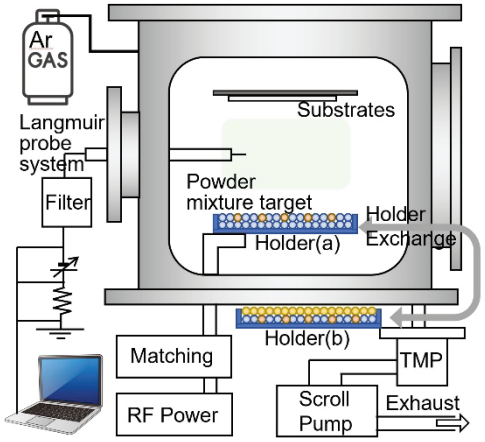


図 1　実験装置

3　実験結果

これまでの研究から、S25C 上に薄膜を作製した場合、薄膜と基板との界面までに水素がトラップされていることが確認できた。同様に SUS 基板上に Al 薄膜を作製したところ、水素脆化効果は小さく、基板と薄膜の界面の密着効果が小さいことが明らかになった。一方、ステンレス基板上に Ni や Ti 等を混合させることで水素脆性防止効果が増加することがこれまでの研究で分かっている[2-5]。そこで、まず NiO_2 と SUS を混合させた粉体ターゲットを用いて Ni がドープされた SUS 薄膜を作製した。その後、作製された薄膜中の Ni／Fe の比と、ターゲット中の NiO_2／SUS の比の

関係を XPS で調べた。結果を図 2 に示す。図から作成した薄膜中の Ni ドープ量は、ターゲットの粉体混合比にほぼ比例することが分かった。この結果を利用すると、複数の混合比の NiO_2／SUS 粉体ターゲットを準備し、徐々にその組成を変えながら成膜することで、薄膜最表面と基板と薄膜の界面とで組成を変化させ、基板との結合力が強く水素脆化効果の大きい薄膜が作製できる可能性がある。そこで、NiO／SUS304 の粉体ターゲット 0%～100%まで変化させて混合したターゲットを 11 種類準備し、通常のスパッタリング成膜装置（スパッタアップタイプ）のターゲットとして混合粉体ターゲットを利用し、薄膜作製をおこなった。はじめは SUS100%粉体を利用し、1 時間成膜、その後 NiO10%/SUS90%に変更し、同様に 1 時間成膜。これを、NiO20%/SUS80%と繰り返し、最後に NiO100%で成膜した。成膜結果を、XPS で、Ar イオンを用いて深さ方向にエッチングしながら Ni と Fe の組成比を分析した。結果を図 3 に示す。結果から、作製した粉体ターゲットの組成に比例して Ni の膜中含有率が変化していることがわかった。このことは、今回利用した粉体ターゲットによる薄膜作製法で傾斜機能性薄膜の作製が作成可能であることを示唆している。これまでの研究で TiO2/SUS の粉体を利用して同様に薄膜作製を行い、傾斜機能性薄膜の作製が可能かどうかを検討している。

4. まとめ

粉体プラズマプロセスを用いた金属表面への水素脆化防止膜の作成を行い、その作製に成功した。作製した薄膜は水素脆化防止効果を持つことが分かった。また、NiO／SUS304 の粉体ターゲットを用いて、Ni と SUS の混合比を変化させた傾斜機能性薄膜が作製できることがわかった。今後は他の組成に対しても同様に薄膜作製を行い同様に作製できるか調べるとともに、水素脆化防止効果が最適となる成膜条件の探求を行う予定である。

謝辞

この研究の一部は、本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成、科学研究費補助金基盤（A）（No. 18H03848）および基盤（C）（No.23340181 and No. 16K04999），畠山財団、加藤財団、大阪大学接合研究室,豊橋技術科学大学高専連携教育研究プロジェクト、名古屋大学低温プラズマ科学研究センターにおける共同利用・共同研究で行われた。関係各所に謝意を表する

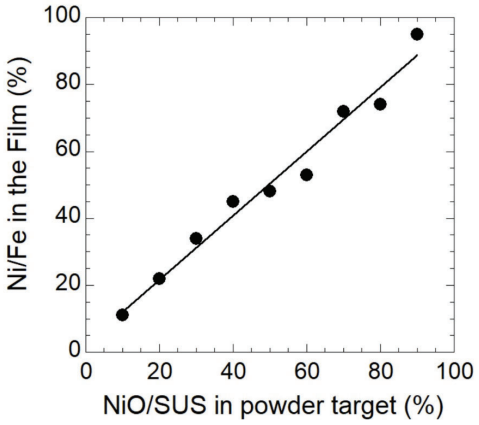


図 2　膜中の Ni／Fe の比とターゲット中の NiO_2／SUS の比の関係

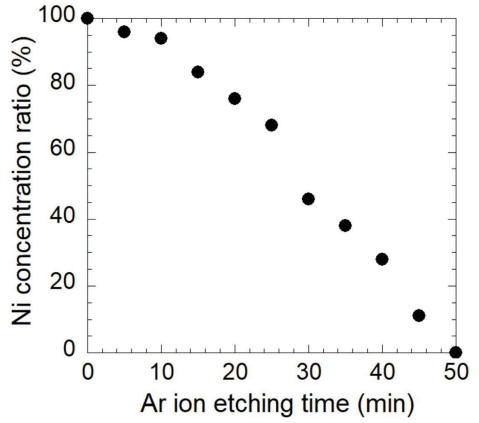


図 3　11 種類のターゲットを利用したときの薄膜の深さ方向分布

参考文献

[1] S. Matsuoka, etal, Scripta Materialis 154, 101 (2006).

[2] T. Matsuo, etal, Int. J. Hydrogen Energy **39**, 3542 (2014).

[3] Y. Ogawa, etal, Corrosion Science 161, (2019).

[4] H. Kawasaki, etal,, Jpn. J. Appl. Phys 59, SAAC01, (2019).

[5] H. Kawasaki etal, Jpn. J. Appl. Phys. 60 SAAB10 (2021)

[6] H. Kawasaki etal, Jpn. J. Appl. Phys 60(SF) (2021)

中性子照射原子力材料の高分解能 STEM-EDS 実現のための手法開発

東北大学　嶋田雄介

1. 目的

原子炉圧力容器鋼や燃料デブリなどの原子炉関連材料は高温かつ高い中性子照射下の過酷環境に曝されることで、特異な材料組織を有することが知られている。我々は、中性子照射欠陥の形成メカニズムと機械強度に及ぼす影響をさらに解明するうえで、中性子照射欠陥周りの構造と化学組成のマルチスケールな評価法確立が重要であると考えている。これまでは針状試料の TEM とアトムプローブの同視野観察を進めてきたが、針状試料で分析できる領域は数百 nm 程度のため、結晶粒界や転位と微小な照射欠陥の相互作用を精度良く捉え、統計的に十分なデータを得ることはことが困難であった。そこで、本課題ではエネルギー分散型 X 線分光法（EDS）計測時の球面収差補正走査透過電子顕微鏡法（STEM）のレンズ条件および撮影手順を最適化し、より高い分解能（例えば元素カラム分解能）と高い再現性での構造・組成マップ同時評価を実現する。それにより、圧力容器鋼中の転位周辺の元素分析および模擬デブリ中のステンレス/酸化物界面近傍での析出物形成の確認を行うことを目的とする。

2. 実験方法

本研究課題は大洗センターと応力研間の拠点を越えた連続的な組織解析により目的の達成を目指す。その中でも今年度は中性子照射圧力容器鋼(Low-Cu 材、照射温度：283-288 ℃、中性子照射量：1.2×10^{24} n/m^2)を対象材料とし、転位組織における高分解能元素分析を実現するために不可欠な TEM 観察条件の探索を実施した。具体的には TEM 像における結晶粒内歪みによる転位コントラストの変化やサイズの類似した照射欠陥と析出物の判断手法の確立を試みた。実験は大洗センターにて代表者および協力者の吉田准教授ならびに九大世話人の渡邉准教授と適宜打ち合わせながら遂行した。

まず観察試料の準備として、高分解能 STEM-EDS のために、まず試料を FIB マイクロサンプリングにより 20μm までの微小サイズに加工することで鉄鋼試料の磁場が及ぼす電子線への影響を小さくする。この効果は、FIB 試料を用いた TEM 内傾斜実験にてすでに確認している。次に、本課題に適した転位組織観察手法として WB-STEM 観察を採用し、EDS 計測のために最適となる試料傾斜範囲（X 軸傾斜で 10-15 度）において晶帯軸入射となる転位・結晶粒を特定し、その近傍に分布する照射欠陥の g・b 解析を行った。これらはすべて我々のグループが独自開発した、カートリッジ式試料ホルダーで行う。この試料ホルダーは試料傾斜機構を含む先端部をそのまま取り外し、応力研へのL型輸送が可能である。

3. 実験結果

図 1 に圧力容器鋼の照射材における WB-STEM 像を示す。結晶粒内において、輝度の異なる領域がみられるが、これは粒内ひずみによるものである。WB-STEM では通常の WB-TEM と比較してひずみ感受性が低く、方位差がプローブ収束角である 0.6° 以内であれば回折コントラストの変化を低減できる手法であることから、本試料では 1 μm 程度の結晶粒においても大きなひずみが導入されていることがわかる。中倍率像からは、粒内に多数の輝点がみられ、また、これら輝点は、高倍率像から線状コントラストでみられる転位まわりに絡みつくように分布していることがわかった。図 2 に同結晶粒における TEM 内その場加熱 WB-STEM 観察結果を示す。

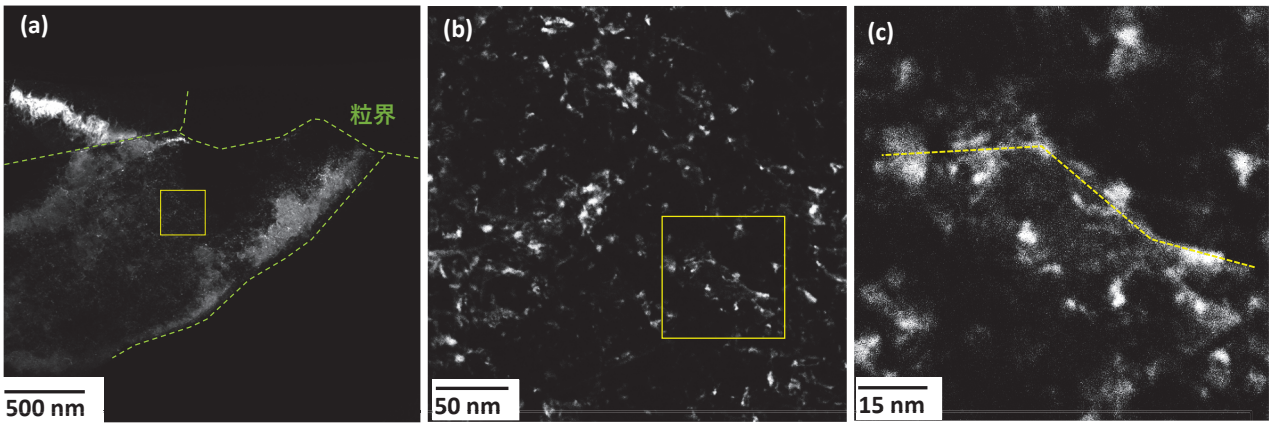


図 1　中性子照射圧力容器鋼の WB-STEM 像。低倍像(a)では粒内に輝度の異なる領域がバンド状にみられる。(a)中に示した領域の倍像(b)では、輝点が均一にみられ、さらに 1 本の転位に注目した高倍像(c)ではこれら輝点が図中の点線で示した転位に絡みついていることがわかる。

300˚C では、照射材組織から大きく変化していない一方で、450˚C において、輝点が消失し、転位ネットワーク組織に変化がみられた。

4. 考察

初期組織でみられた転位に絡みつくように分布する輝点は、450˚C において消失したことから、中性子照射によって生成した転位ループなどの照射欠陥集合体であることが予想される。これら照射欠陥集合体に転位が固着していたところ、450˚C で欠陥の回復などで消失し、転位が動けるようになったことで新たな転位ネットワークを形成したものと考えられる。今後は、まず輝点において EDS 分析を行うことで照射欠陥集合体への元素偏析を調査する。そのうえで、今回等同様の条件により加熱観察を行い、このときの転位および粒界における STEM 観察および元素分析から、照射影響によるひずみの熱緩和過程の解析を試みる。

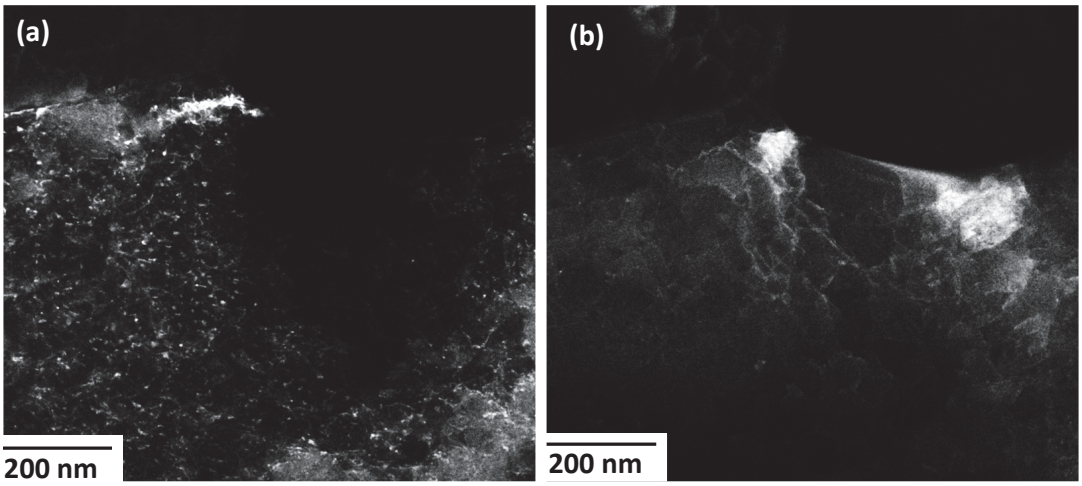


図 2　中性子照射圧力容器鋼の 300˚C(a)と 450˚C(b)における同一領域の WB-STEM 像。450˚C では、室温ならびに 300˚C でみられた輝点が消失し、また新たな転位ネットワークの形成がみられる。

収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター　安永和史

1. 緒言

Zr 合金は軽水炉の燃料被覆管材料であり、燃料被覆管は原子炉運転中に水の放射線分解により発生する水素や高温水と被覆管表面との反応により生じる水素を吸収し高燃焼度において脆化する問題がある。加圧水型の軽水炉で使用されている Zr 合金であるジルカロイ 4（Zry-4）における水素吸収を実験的に模擬するために、軽イオン注入装置を用いて重水素を照射した。どのような照射条件で水素化物が形成されるのかを明らかにすることを目的として、試料温度 300℃において照射量を変化させて重水素を照射した Zry-4 試料の微細組織を調査した。また、Zry-4 中には熱処置の時点で不純物として水素を含み水素化物として析出しているため、既存の水素化物についても事前に調査した。

2. 実験方法

Zry-4 は、試料厚み 100 μm の板材を直径 3 mm の円盤形に打ち抜き、3.0×10^{-4} Pa の真空中において 630℃で 2h の熱処理した材料である。Zry-4 の化学組成を表 1 に示す。Zry-4 は元来不純物として水素を含んでいるため、重水素未注入時（熱処理時）における微細組織を TEM 観察することにより、既存の水素化物の存在状態について調査しておく必要がある。重水素分子イオン注入実験は、九州大学応用力学研究所に設置された低エネルギーイオン注入装置を用い、試料温度 300℃、照射量 $3x10^{20}$ ～$1x10^{22}$ ions/m^2 の範囲で 30 keV の D_2^+イオンを照射した。熱処理後の試料は、電解研磨装置（TenuPol-5）を用いて電解液によるツインジェット研磨法により薄膜化した。電解液の組成は、メタノール 950 ml、過塩素酸 50 ml である。薄膜試料作製中の電解液の温度は 7 ℃、印可電圧は 24 V である。試料の微細組織観察には（公財）若狭湾エネルギー研究センターに設置された透過型電子顕微鏡（TEM、JEM-3000F、JEOL）を用い、走査透過型電子顕微鏡法（Scanning Transmission Electron Microscopy ; STEM 法）により明視野像を取得した。STEM 観察に用いた電子の加速電圧は 300 kV である。

表 1　ジルカロイ 4（Zry-4）の化学組成

Zry-4	H	Sn	Fe	Cr	Zr
wt.%	7(ppm)	1.29	0.20	0.11	Bal.

3. 結果および考察

図 1 は、Zry-4 の熱処理材に元来存在する水素化物の STEM 明視野像である。水素化物は白矢印により指示しており、アスペクト比の高い楕円形であった。図 2 は水素化物の長軸長さの分布で、図中には長軸長さの平均値及び数密度も示した。水素化物の長軸長さは 40～2100 nm と広い範囲に分布し、その平均値は 423 nm であった。また体積密度は $6.2x10^{18}$/m^3 と評価された。

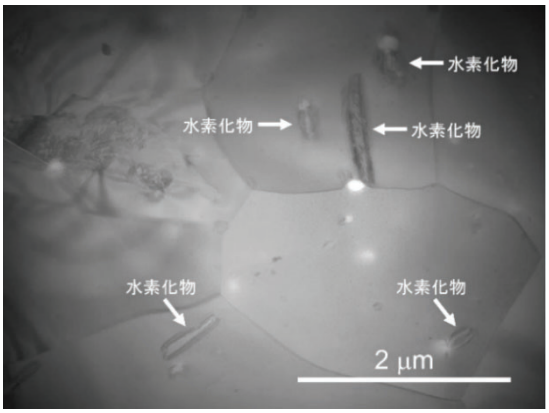


図 1　熱処理された Zry-4 に存在する水素化物。

注入実験に用いた 30 keV の D_2^+イオンの Zr への照射効果を評価するために、SRIM コードを用いて 15 keV の D^+イオンが Zr に入射した際の D の注入（黒丸）及び弾き出し（白丸）が生じる表面からの深さ分布を計算した結果を図 3 に示す。縦軸は、フラックス 1 nA/mm^2 の D^+ビームが Zr に入射した場合の 1 秒あたりの D の注入速度（implantation rate）及び弾き出し速度（damage rate）で表示している。Zr 原子の弾き出し閾エネルギーは 40 eV として計算した。重水素注入実験に用いた Zry-4 試料は薄膜で、その TEM 観察領域の厚みは約 100 nm であるため（図 3 の灰色で覆った領域）、重水素は Zry-4

試料の膜厚全体に注入されることが分かる。

図 4 は、試料温度 300℃において照射量 $3x10^{20}$ ions/m^2～$1x10^{22}$ ions/m^2 の範囲で 30 keV の D_2^+を注入した際の Zry-4 の微細組織の変化を示す STEM 明視野像である。試料温度を 300℃とした理由は、原子炉運転中の燃料被覆管の温度と対応させるためである。照射量 $3x10^{20}$ ions/m^2 においては、D_2^+照射による母相の Zr 原子の弾き出しにより生じた格子間原子が板状に集合した二次欠陥である転位ループのみが観察され、水素化物は観察されなかった。照射量 $1x10^{21}$ ions/m^2 においては、白矢印で示すように水素化物と考えられる直線状のコントラストが観察された。図 5 に具体的な数値を示すが、既存の水素化物と $1x10^{21}$ ions/m^2 の照射量で形成された新たな水素化物の大きさ及び数密度は、共に顕著に異なるため判別可能であった。照射量 $1x10^{22}$ ions/m^2 においては、粗大な水素化物の形成が顕著に観察された。

図 5 は、Zry-4 の微細組織で観察された水素化物の長軸長さ（a）及び数密度（b）を測定及び評価し、それらの平均値を D_2^+の照射量に対してプロットしたグラフである。水素化物の長軸長さの平均値は、照射量 $1x10^{21}$ ions/m^2 において 88 nm、照射量 $1x10^{22}$ ions/m^2 において 380 nm と照射量の増加に伴い増加した（図 5a）。水素化物の数密度の平均値は、照射量 $1x10^{21}$ ions/m^2 において $5.6x10^{19}$/m^3、照射量 $1x10^{22}$ ions/m^2 において $9.0x10^{19}$/m^3 と、長軸長さと同様に照射量の増加に伴い増加した（図 5b）。

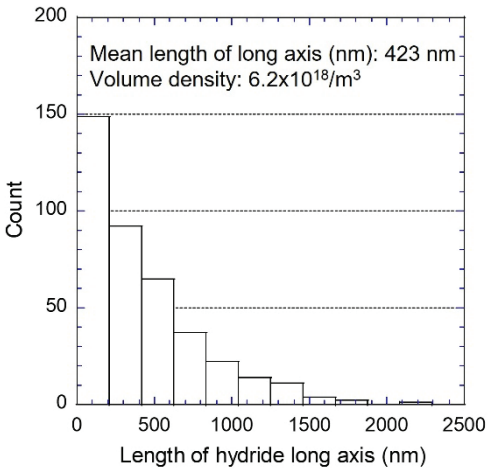


図 2　Zry-4 熱処理材に存在する水素化物の長軸長さの分布。

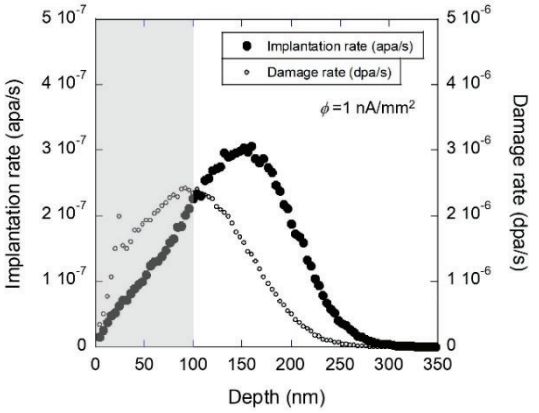


図 3　Zr に 15 keV の D^+が入射した場合の D の注入及び弾き出し速度の表面からの深さ依存。

4.　まとめ

Zry-4 の薄膜試料に対して、試料温度 300℃で 30 keV の D_2^+イオンを照射量 $3x10^{20}$～$1x10^{22}$ ions/m^2 の範囲で照射し、水素化物の形成について照射量依存性を調査した。その結果、$1x10^{21}$ ions/m^2 以上の照射量において既存の水素化物の存在下で新たな水素化物の形成が確認された。

研究組織

研究代表者：安永和史（(公財）若狭エネ研）

研究世話人：渡辺英雄（九大応力研）

研究協力者：島袋瞬、牟田口嵩史（九大応力研）

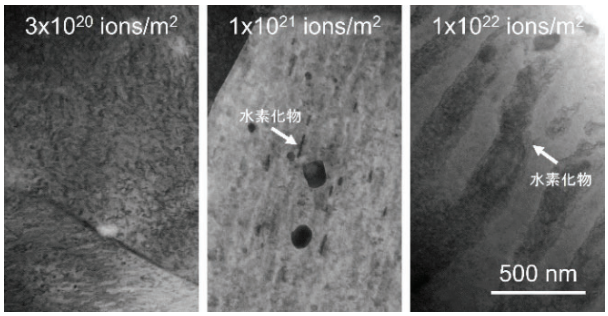


図 4　試料温度 300℃において、30 keV の D_2^+を照射した Zry-4 の微細組織の照射量依存性。

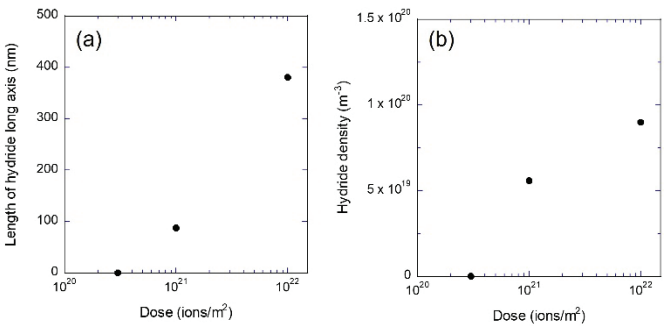


図 5　試料温度 300℃において、30 keV の D_2^+を照射した Zry-4 に形成された水素化物の長軸長さ(a)及び密度(b)の平均値の照射量依存性。

トカマクプラズマにおける高衝突領域での乱流輸送の定量化研究

核融合科学研究所　登田慎一郎

本研究の目的は、高温トロイダルプラズマにおいて、乱流輸送を定量化することである。電磁的ジャイロ運動論シミュレーションを用いて、微視的プラズマ不安定性を考察する。線形計算から不安定性の種類を調べ、不安定性の励起条件を評価する。そして非線形計算から不安定性の飽和レベルを決めることで，乱流輸送値を求める。さらに、線形計算から求められる量、混合長概算量と帯状流に関係する量の関数である簡約化乱流輸送モデルを構築する。研究対象とするプラズマ分布と磁場配位は、九州大学応用力学研究所で設置されているプラトー装置 [1] で想定されるものである。

統合コード TASK を使って、プラトー装置でのプラズマ分布や磁場配位が、予測されている [2]。これまで、プラズマ分布や磁場配位を、プラトー装置で想定されるものの一例として、線形ジャイロ運動論解析を行った。本研究では、GKV コード [3] を用いている。まず、径方向の点で、線形解析を行った。径方向での点 $\rho(=r/a)=0.65$ での規格化した電子、イオン衝突周波数は、$\nu_{*\mathrm{e}}=0.21$ と $\nu_{*\mathrm{i}}=8.7$ である。ここで、a はトカマクの小半径である。また、規格化した電子、イオン旋回半径は $\rho_{\mathrm{e}}^{*}=10^{-4}$ と $\rho_{\mathrm{i}}^{*}=10^{-2}$ 程度である。ここで予測される不安定性は、主に捕捉電子モード不安定性である [4]。

2021 年度は、運動量を保存する衝突演算子 [5] を用いた非線形ジャイロ運動論解析を始めた。このシミュレーションは、速度空間分布をより正確に解析することによって実現できた。初めに静電ポテンシャル揺動の時間発展を調べた。このとき、径方向の波数は $0.0<k_{\mathrm{x}}\rho_{\mathrm{i}}<2.0$ の領域でとってある。ここで、k_{x} は径方向波数である。一方ポロイダル波数は $0.0<k_{\mathrm{y}}\rho_{\mathrm{i}}<2.0$ の領域でとっている。ここで、k_{y} はポロイダル波数であり、ρ_{i} はイオンの旋回半径である。そして、非線形計算結果の妥当性を示すために、自由エネルギーや衝突散逸項などからなるエントロピーバランス方程式 [6] の考察をした。エントロピーバランス方程式の時間微分項は、静電ポテンシャルが飽和した後は、非常に小さくなり、定常状態になる。

今後、これまで用いていたレナードバーンスタイン型の衝突演算子と運動量を保存する衝突演算子 [5] を用いた場合の計算結果の比較を行う。プラトー装置で想定される捕捉電子モードが不安定化しているときに、非線形ジャイロ運動論シミュレーション結果を再現する粒子、熱乱流輸送モデルを提唱することが目的になる。その構築の際には、線形成長率に関係する量 (混合長概算) や帯状流の線形応答についての特徴的な物理量を用いる [7, 8, 9]。乱流輸送レベルを、線

形解析結果によって、予測するモデルであり、すでに計算コストを大幅に削減できている。また準線形流束モデルは、静電ポテンシャル揺動と温度（または密度）揺動の位相差を含んでいる。このモデルはプラズマ分布が、平坦になっている場合や、勾配が正になっている場合にも適用できる。そして、帯状流の励起条件や乱流輸送に対する影響について、詳細に調べる予定である。さらに、これまで研究を行ってきたイオン温度勾配不安定性が励起しているプラズマと、捕捉電子モード不安定性が励起しているプラズマでの帯状流が輸送に与える影響の違いを調べる。

参考文献

[1] A. Fujisawa, *AIP Conference Proceedings* **1993**, 020211 (2018)

[2] N. Kasuya *et al.*, 第 16 回統合コード研究会 (2018)

[3] T. -H. Watanabe and H. Sugama, *Nucl. Fusion* **46**, 24 (2006)

[4] 登田慎一郎、第 36 回プラズマ・核融合学会年会 30P46 (2019)

[5] H. Sugama *et al.*, *Phys. Plasmas* **16**, 112503 (2009)

[6] A. Ishizawa *et al.*, *Nucl. Fusion* **55**, 043024 (2015)

[7] S. Toda *et al.*, *Phys. Plasmas* **26**, 012510 (2019)

[8] S. Toda *et al.*, *Plasma and Fusion Research* **14**, 3403061 (2019)

[9] S. Toda *et al.*, *J. Plasma Phys.* **26**, 815860304 (2020)

PLATO トカマクにおける周辺乱流密度揺動の計測のためのガスパフイメージング計測装置の開発

核融合科学研究所　小林達哉

1. 研究目的

周辺のプラズマ乱流分布は，閉じ込め領域だけでなくその外側のスクレイプオフ層(SOL)を含む広い領域で決定されることが知られている．異なる磁場トポロジーをまたぐ領域における乱流のモデル化は開放系における複雑な物理現象を理解する上で有意義な課題である．これを検証するためには，周辺およびスクレイプオフ層での乱流揺動を，同時多点計測する必要がある．本研究では，詳細なプラズマ乱流物理研究が可能な小型トカマク装置 PLATO に於いて，新規にガスパフイメージング計測装置を導入し，乱流計測を行うことを目的とする．

2. 研究結果

本年度は新型コロナウィルスの蔓延で，九州大学に赴いての共同研究実施は断念した．一方で，ビデオ会議システムを用いた打ち合わせなどにより，計測システムの概念設計を行った．

図1にガスパフイメージング計測装置の概略設計図を示す．再現性の良いガス入射を可能にするため，高圧バッファータンクおよびソレノイドバルブを用いる．入射ガスは，プラズマへ与える摂動が小さい水素と，背景発光の影響を受けにくいヘリウムを状況によって使い分ける．TEXTOR装置で開発されたシャワー状ガス噴射ノズル[1]を用い，発散角の小さいシートビームを生成する．下側ポートに導入したCCDカメラでシートビーム幅を実測し，空間および波数分解能を計算する．

ガス発光観測のための光学系を，ガス入射装置の隣のセクションに導入する．PLATOで支配的となる波数10 cm^{-1}以下の抵抗性乱流をターゲットとする．10-20度の仰角を持つ磁力線に平行な視線を取り，空間および波数分解能を高める．Photron社の高速カメラNOVA S9を用いて、128x64ピクセル（ポロイダル方向x半径方向)，400 キロフレーム/秒での計測を行う．0.7 mm/ピクセル程度の空間分解能を持たせるため，焦点距離20mm，f/1.8のカメラレンズを対物レ

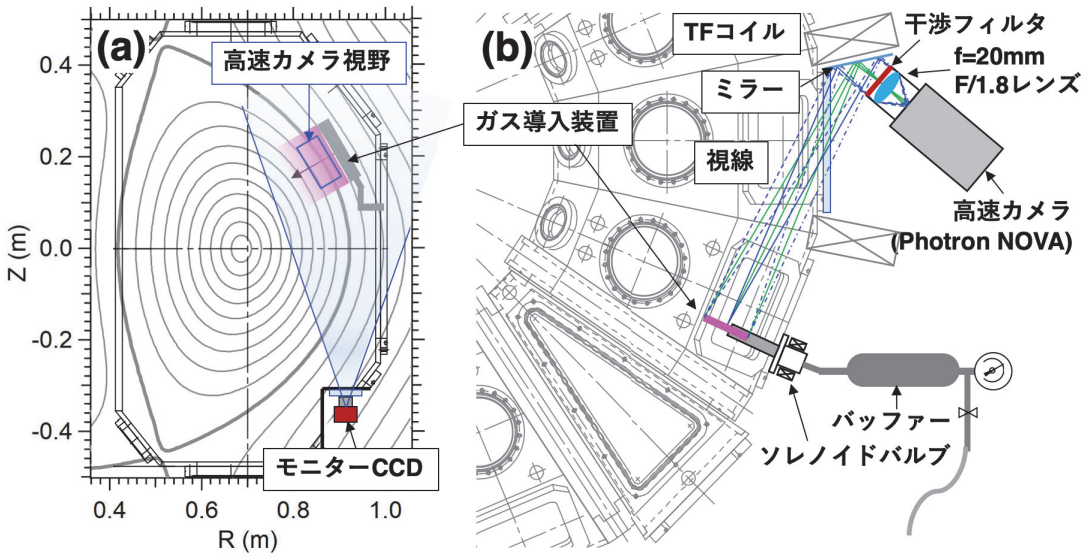


図 1.　ガスパフイメージング計測装置の概略設計図. (a) ポロイダル断面図と (b) 上面図.

ンズとして利用する. 視野の詳細調整のため, 特注の3軸調整カメラマウントを用いる. 水素発光線 (656.2 nm) またはヘリウム発光線 (587.6 nm) を計測するため, 干渉フィルターをカメラレンズにマウントする.

3. まとめ

小型トカマク装置 PLATO に導入するための, ガスパフイメージング計測装置の概略設計を行った. 来年度は, 実機の作成と計測器への導入を行う.

研究組織

文 贊鎬（九大応力研), 佐々木真（九大応力研), 藤澤彰英（九大応力研）

参考文献

[1] I. Shesterikov et al., Rev. Sci. Instrum. **84** 053501 (2013)

研究課題名：金属、合金および酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究
A study on dissolution, diffusion and desorption of hydrogen isotopes in metals, alloys and oxide ceramics

九州大学大学院総合理工学研究院
エネルギー科学部門　橋爪　健一

１．目的

高融点金属をはじめとした耐熱材料やステンレス鋼などが核融合炉のダイバータやブランケット構造材の候補材であり、国際熱核融合実験炉（ITER）でも使用される。これらの構造材には、核融合炉燃料の水素同位体が高いエネルギーを持ったまま照射され、水素同位体の照射挙動とともに溶解、透過、リサイクリングなどが重要となる。また、水素の照射と同時に炭素などのプラズマ中の不純物が水素とともにダイバータ及びその周辺部材に再堆積し、それが水素同位体（トリチウム）のリテンションやトリチウムインベントリーに影響する。本研究では、金属・合金中の水素同位体の溶解、拡散挙動および再堆積層中の水素挙動を実験的に調べるため、水素ガスの交流グロー放電を水素注入法として用いてきた。これまで、この注入、再堆積実験は室温で実施してきたが、より実環境に近い水素照射注入、再堆積形成条件を実現するために、本年度は注入装置を改良し、試料加熱を可能とすることを目的とした。装置の改良とともに SUS316 鋼を試料とし、水素同位体（重水素、D_2）を交流グロー放電プラズマにより注入し、また、同時に形成する再堆積層中の水素の高温放出挙動について昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて調べた。

２．実験

従来用いていたパイレックスガラス製の放電注入管を図 1 に示す石英ガラス製放電注入管に改良した。対向する試料電極は SUS 製（図 2）とし、直径 6mm の円板試料をセットできるようにした。試料を含む電極部は石英ガラス管の外側からセラミックスファイバー製ヒータ（坂口電熱 VC401E06A）で加熱し、500℃以上の加熱が可能とした。鏡面研磨した円板状の SUS316（約 6 mm$^{\phi}$, 0.5 mm^{t}）を水素注入試料とし 10^{-7} Torr 以下の圧力で真空焼鈍（1000℃、0.5 h）した。この試料を注入装置にセットし、、一旦 10^{-7} Torr 程度に真空引き後、TiDx の熱分解によって得た重水素を装置に満たし、市販のネオントランスを用いて商用 AC100V を昇圧し、重水素を交流グロー放電により室温で水素注入するとともに、再堆積層を形成した。放電条件を表 1 に示す。重水素注入を行った試料を取り出し、TDS 装置（QMS: Inficon H200M）にて、昇温速度 0.5 ℃/sec で 1000℃まで試料を加熱し、D_2 のスペクトルを測定した。

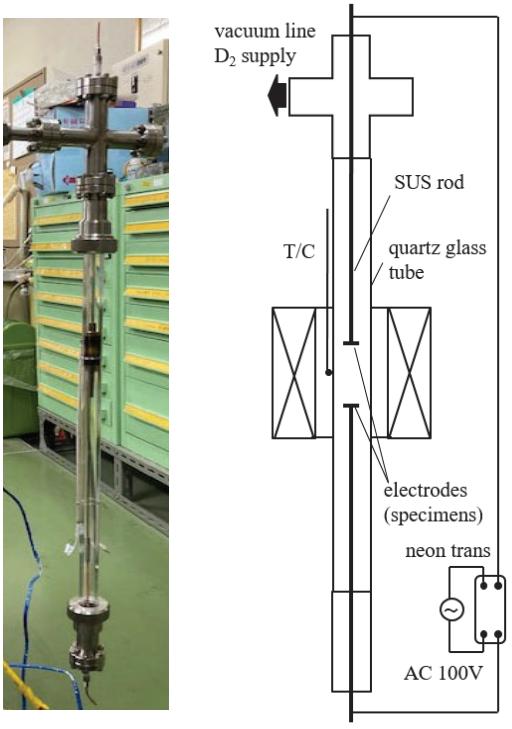


図１　交流グロー放電注入装置

図２　試料電極と SUS316 試料（6 mmϕ）

表１　D_2 交流グロー放電条件

D_2 圧力	0.5 Torr
放電電圧	2400 V
放電注入時間	1 h、3h
試料温度	室温、100℃

図３　SUS316 試料表面（左: 焼鈍後, 中: 放電注入後, 右: TDS 後）

３．結果と考察

図３に試料表面の写真を示す。放電注入後に黒色の再堆積層が観察され、TDS 後にも白色の残留物が見られた。過去の実験でも炭素を主成分とした再堆積層が生じたが、今回は、TDS 後に残留物があり、これは水素ガス中に混入した炭素系の不純物ガスとともに、石英ガラス管のスパッタ現象が生じ、SiO_2 が試料表面に残留した可能性がある。図６に室温と 100℃放電試料からの D_2 の TDS 放出スペクトル（D_2 イオン電流値）を示す。室温注入試料では放電時間が長くなるとともに放出量が増え、特に 3h 放電では 300℃程度に大きなピークをもつ放出が見られ、1000℃程度まで少量の放出が続いている。一方、100℃注入試料では、室温に比べ放出の減少、および放出温度の高温側へのシフトが見られ、再堆積層中の水素量と結合状態が、100℃程度の温度上昇でも大きく変わることが分かる。

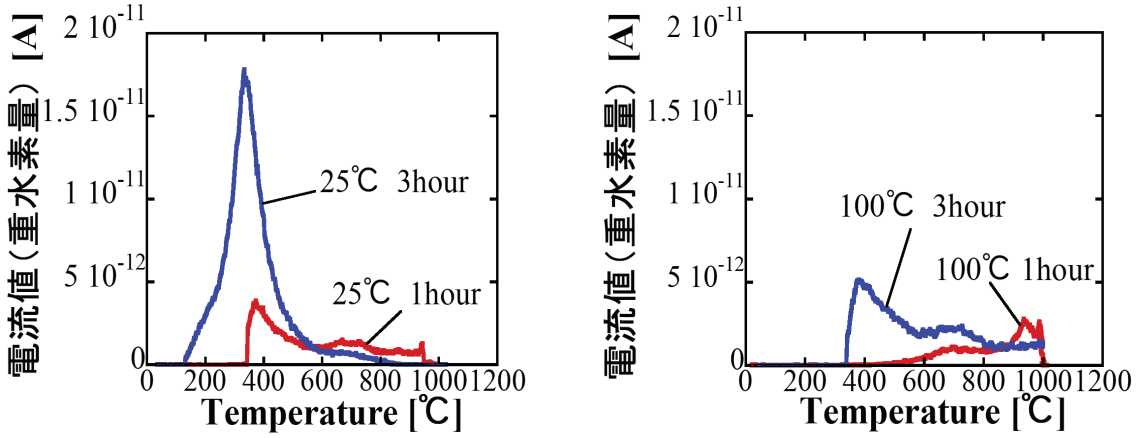


図４　TDS の結果（D_2 放出　　左：室温注入試料、右：100℃注入試料）

４．まとめ

水素放電注入装置を改良し、高温での注入を可能とした。この装置を用い SUS316 円板に低 D_2 圧力下で室温と 100℃で交流グロー放電し、炭素を主成分とする再堆積層を形成させた。100℃の比較的低い条件でも再堆積層中の水素量、結合状態に変化が生じることが分かった。今後、さらに高温での実験を進めていく予定である。

５．研究組織

九大総理工：橋爪健一　大学院生：石田輝光、蔵本創、西原昂汰　　九大工：鈴木隆玄、兼利晃吉、小林倫太郎、魚本輝介　　九大応力研：渡辺英雄

構造材料の破壊特性に及ぼす内在水素の影響

Influence of Inherent Hydrogen on Fractural Properties of Structural Materials

茨城大学工学部　車田　亮

1. 研究目的

核融合実験装置等の構造材料は、プラズマからの重水素やトリチウム等が材料内部に拡散するとともに、材料製造時の大気環境やタングステン材料の還元熱処理により、内在水素が材料中に保持されている。一方、構造材料のき裂進展や破壊には、応力腐食割れ（SCC）や活性経路割れ（APC）等がしばしば問題となり、その 1 つの要因として材料中の水素の影響が懸念されている。そこで、本研究では、構造材料（タングステン材料、低放射化フェライト鋼、ステンレス鋼等）の破壊特性（き裂発生やき裂進展等）が、材料中の内在水素によりどのように変化するかを調査することを目的とする。そのために、茨大の昇温脱離ガス分析装置（TDS）と、九大応力研の SEM・TEM の微細組織観察装置を共同研究に利用し、材料に関する豊富な知識と経験を共有しながら研究を推進するものであり、両者にとってメリットが大きい。

2. 実験方法

2.1 タングステン材料

本研究では、繊維状組織を有する未再結晶材の純タングステン（F）、ほぼ等軸状組織を有する再結晶材の純タングステン（EA）、銅を約 10%含有する銅タングステン（C10B2）、酸化セリウムを約 1%添加したセリウム入りタングステン（CeW）の 4 種類のタングステン材料を試料として用いた。各材料は、粉末状のタングステンをプレス成型、仮焼結、焼結した後、スウェージ加工によって製造されている。再結晶材の純タングステン材料は、スウェージ加工後に、2,000℃の水素雰囲気中で熱処理されている。上記の 4 種類のタングステン材料を用いて、繰り返し溶接試験用のタングステン電極を作製した[1-3]。支持部を含めた電極の寸法と形状を図 1 に示す。電極は日本タングステン（株）が独自に開発した NDB 法[4]によって、銅製の支持部に接合されている。

2.2 3,000 回繰り返し溶接試験

3,000 回繰り返し溶接試験では、0.5mm 厚のタフピッチ銅を 2 枚重ねた銅シート板を被接合材として、3,000 回までの繰り返し溶接試験を実施し、生じたき裂のき裂総長及び最大き裂幅の測定を行った。溶接条件は、通電時間を 0.35s、加圧力を 180N とした。また、電流値は溶接時の電極と被溶接材の界面の温度が 813℃となる値を予備実験で求め、その値を用いた。表 1 に各タングステン電極の溶接条件を示す。

3. 実験結果

3,000 回繰り返し溶接試験で電極に生じたき裂総長及び最大き裂幅を表 2 示す。き裂総長は、EA と C10B2 が大きく、F と CeW が小さな値を示した。また、最大き裂幅は、EA で特に大きく、他の 3 種類の電極はほぼ同程度に小さくなった。ここで、3,000 回繰り返し溶接試験は、電極と被溶接材の界面の温度が一定となる条件で実施しており、電極の熱応力の分布はほぼ同じであると考えられる。

4. まとめ

本実験の結果、繊維状組織を有する未再結晶材の純タングステン（F）及び酸化セリウムを約 1%添加したセリウム入りタングステン（CeW）は、3,000 回繰り返し溶接試験で生じたき裂総長及び最大き裂幅が小さく、破壊特性に優れていることが明らかとなった。今後、上記のタングステン材料の 3,000 回繰り返し溶接実験の結果（破壊特性）と昨年度実施したタングステン材料の内在水素の放出挙動との関係を明らかにする予定である。

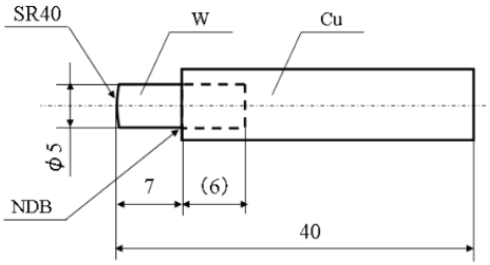


Fig. 1 Dimension of tungsten electrode.

Table 1 Welding conditions of tungsten electrodes.

	EA	F	C10B2	CeW
Welding pressure [N]	180			
Welding time [s]	0.35			
Current value [kA]	2.70	2.67	2.69	2.78
Electrode temperature [℃]	813			

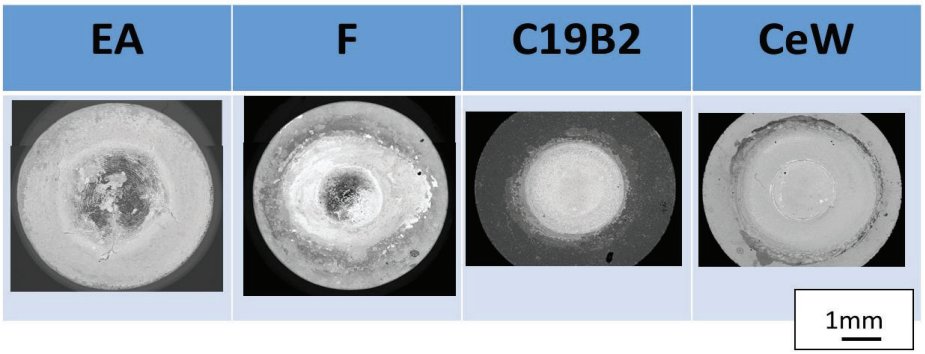


Fig. 2 Surface photographs of tungsten electrodes.

Table 2 Total crack length and maximum crack width after 3,000 times welding test.

	EA	F	C10B2	CeW
Total crack length, l /mm	9.93	3.08	12.43	4.93
Maximum crack width, b /μm	22	7	6	7

参考文献

(1) 車田亮，小野稜宙，伊藤吾朗，向江信悟，“スポット溶接用タングステン電極のき裂発生・進展挙動に及ぼす加圧力および微細組織の影響”，日本機械学会論文集，Vol. 84, No. 867, (2018), pp. 1-7.
(2) 近松宏洋，車田亮，伊藤吾朗，藤田貴弘，“スポット溶接用タングステン電極の耐久性の評価”，日本機械学会関東支部 2019 年度茨城講演会講演論文集，No.190-2, (2019.) , OS4-(2), No.409.
(3) 近松宏洋，茨城大学修士学位論文, (2020.3).
(4) 日本タングステン株式会社，“タングステン/モリブデン系抵抗溶接電極特集号”，ニッタン技報，No. 36, (2006), pp. 2-10.

タングステンの機械的特性評価と高熱流束材料への応用

茨城大学工学部　　車田　亮

【目的】原型炉のダイバータ板の表面材料には、スパッタリング特性や熱特性が良好なタングステン(W)が使用される計画である。しかし、Wは低温脆化、再結晶脆化、照射脆化等の問題がある。特に、脆性の性質を持つため、定常熱負荷やプラズマディスラプション時のパルス高熱負荷、さらに、プラズマ閉じ込め性能が良いELMs時の周期的な高熱負荷を受けた際の熱応力によりき裂などの形成による破壊が生じることが懸念されている。本研究では、研究代表者が専門の機械工学分野の固体力学的な解析を進めることにより破壊靭性評価の精度を向上させ、さらに、破壊靭性などの機械的性質が高熱流束材料としての特性とどのような関連があるかを解明することを目的とする。

【実験方法】純 W の圧延材（応力除去処理材、形状：50 mm×50 mm×12.3 mm）から、片側切欠き付き微小 3 点曲げ試験片（幅 5 mm、厚さ 3 mm、長さ 25 mm、切欠き（U ノッチ）の幅 0.15 mm、深さ 2 mm）を 4 方位に加工した。図 1 に試験片の加工方位を示した。また、パルス熱負荷実験結果と比較検討することにより、破壊靭性などの機械的特性とパルス熱負荷による損傷の関連性を調べた。

【結果】図 2 には、破壊靭性試験後の破面の SEM 像を示した。破断面は T-L 方位および L-T 方位の試験片は、比較的平らであるが、T-S 方位および L-S 方位では、破断面は大きな凹凸があることがわかる。図 3 には、破壊靭性試験後の破面を図 2 より拡大し観察した SEM 像を示した。T-L 方位では、粒内および粒界破壊が生じていることがわかる。一方 L-T 方位では、ほぼ粒内破壊により破面が形成されていることがわかる。これは、結晶粒は圧延方向に伸びているため、圧延方向と同じ方向にき裂が進行する T-L 方位では、粒界および粒内でき裂が進展する。一方、L-T 方位では、結晶粒の長手方向に垂直な方向にき裂が進行するため、粒内破壊が生じているものと考えられる。また、破壊靭性値は、T-L 方位および L-T 方位で、それぞれ、10 MPa$\sqrt{m}$ および 10～13MPa$\sqrt{m}$ と評価され、粒内破壊のみが発生している L-T 方位の破壊靭性値が高いことは、破面観察結果と一致している。T-S 方位および L-S 方位では、それぞれ、粒界破壊および粒内破壊が支配的であることがわかる。また、破面に大きな凹凸があることから、き裂は進展しにくいものと考えられる。図 4 には、RD 面および ND 面を表面とした場合のパルス熱負荷実験の結果を示した。RD 面では、TD 方向と ND 方向に格子状のき裂が観察され、格子状の中心部分に起伏が生じ、その中心部分には TD 方向と ND 方向にき裂が発生している。一方、ND 面では、円形状のき裂が一面に形成され、RD 面と同様にその中心付近に起伏やき裂が生じている。これらは、最初、繰り返しパルス熱負荷の熱疲労によりき裂が発生し、熱拡散が悪い中心部の温度上昇などにより降伏応力が下がり、これによる塑性変形により隆起が形成されたものと考えられる。このような表面形状変化を抑制するには、まず、き裂の発生を抑えることが必要であることがわかる。RD 面が表面の試料では、深さ方向は T-L 方位の破壊靭性試験片のき裂の進行方向と同じで、一方、ND 面が表面の試料では、深さ方向は T-S および L-S 方位の破壊靭性試験片のき裂の進行方向と同じである。ND 面で円形状のき裂が発生することは、T-S および L-S 方位の試験片の破面で観察されたように平面的にき裂が進展しにくいこと関連しているものと考えられる。

【まとめ】破壊靭性評価と熱負荷実験の関連性を検討した。今後、4 方位の破壊靭性値とも合わせて、熱負荷実験結果を総合的に考察し、関連性を検討する。

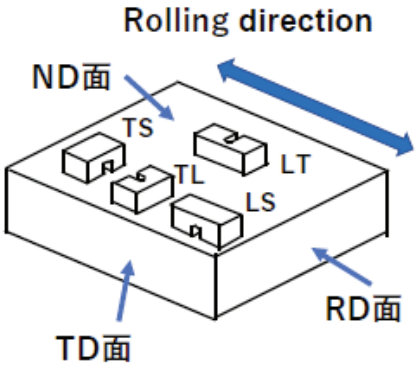


図 1　タングステン板材（応力除去処理材）からの試料の加工方位

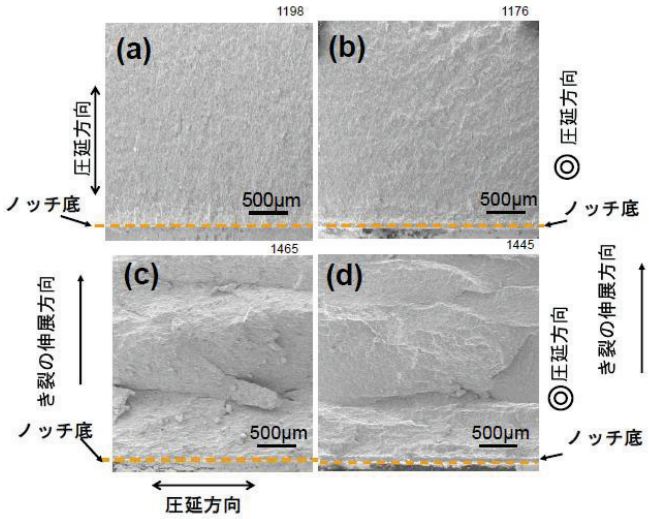


図 2　破壊靭性試験後の破面(SEM 像)、(a) T-L 方位、(b)L-T 方位、(c)T-S 方位、(d)L-S 方位

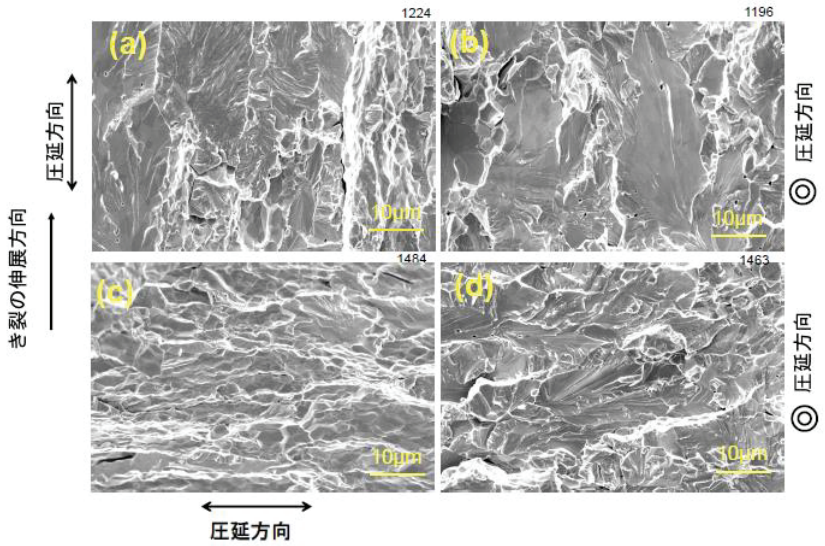


図 3 破壊靭性試験後の破面(SEM 像)、(a) T-L 方位、(b)L-T 方位、(c)T-S 方位、(d)L-S 方位

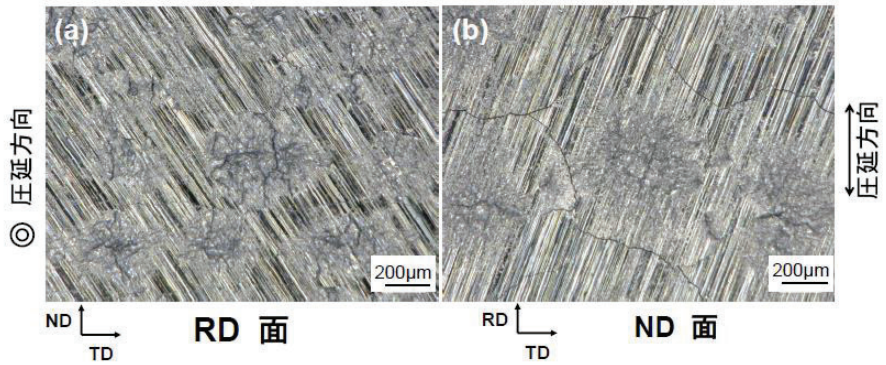


図 4　パルス高熱負荷実験後の試料表面(OM 像)

プラズマ乱流の非線形発展に関する研究

法政大学 理工学部 電気電子工学科 西村征也

【研究目的】

天体近傍の宇宙空間や磁場閉じ込め装置においては、高温プラズマが背景磁場に磁化された状態にある。このような磁化プラズマにおいては、磁気流体力学的（MHD）不安定性が発生する。

地球磁気圏におけるプラズマは地磁気を介して電離層プラズマと結合している。電離圏におけるプラズマの揺らぎが磁気圏におけるアルフベン波を励起し、このアルフベン波が電離圏におけるプラズマの揺らぎを増幅する現象をフィードバック不安定性と呼ぶ。フィードバック不安定性はオーロラのカーテン状や渦巻き状の自発的な構造形成を説明するための理論である。

フィードバック不安定性における磁気圏モデルに対しては、インピーダンスモデル、MHD モデル、二流体モデル、ジャイロ運動論的モデル、ジャイロ流体モデルが使用されてきた。特に、ジャイロ運動論的モデルとジャイロ流体モデルは、磁気圏におけるアルフベン波を運動論的アルフベン波として表現するために導入されたものであり、有限イオンラーマ半径効果や電子ランダウ減衰などの運動論的効果がフィードバック不安定性の線形安定性や非線形発展に大きな影響を与えることが明らかにされている。

本研究においては、磁気圏に対してジャイロ流体モデルを適用し、フィードバック不安定性の非線形シミュレーションを行い、フィードバック不安定性の非線形飽和状態におけるモード間結合の詳細や、ひらひらと揺らめく構造の時空間的な特徴について詳しく解析することが目的である。

【研究方法】

我々の先行研究においては、磁気圏に対するジャイロ流体モデルを導出し、電離圏の二流体モデルと連立することで、フィードバック不安定性の非線形シミュレーションを行った。

今年度の研究においては、前年度までに開発を行ったコードを用いた非線形シミュレーションを実施した。電離圏における 30km×30km の領域とそれに対応する磁気圏の領域に対してシミュレーションを実施した。磁気圏の物理量は磁気赤道におけるものを使用したが、スラブ磁場近似を用いているため、スケール長の差を加味するために、長さに関する量には実効値を用いた。磁力線に垂直な面内における正負を含む 600 個の波数に対して計算を行った。

次に、シミュレーション結果に対する解析を進めた。はじめに、時空間構造やエネルギー輸送経路を解明するための解析手法の検討を行った。研究協力者の佐々木真氏の助言により、時空間の 2 次元領域に対するフーリエスペクトル解析を行うことと、モデル方程式をエネルギーの式に書き換えることによってエネルギー輸送を分析する手法を用いることとした。

【研究結果】

1. 時空間構造解析

フィードバック不安定性の非線形発展においては、磁力線に垂直な面内において、オーロラのひらひらと揺らめく現象に類似した構造が観察される。電離圏上において x-y 平面を考える場合、構造が伝播する方向は主に x 軸のマイナス方向であり、それに垂直な方向に比較的長いスケール長を持つ。そこで、時刻を t として、y 軸の座標を固定した x-t 空間と、x 軸の座標を固定した y-t 空間における静電ポテンシャル揺動の波形を出力し、それらに対する離散フーリエ変換を実施した。

図 1 に、x-t 空間と y-t 空間に対する離散フーリエ変換のパワースペクトルを示す。横軸は振動数

であり、縦軸はモード数である。図 1 の左図より、伝播方向に対してはほぼ同じ位相速度で伝播する特徴があることが分かる。一方で、図 1 の右図より、伝播方向に垂直な方向に対しては比較的ブロードな振動数スペクトルを持つことが分かる。以上から、揺動の時空間構造は空間異方性を持つことが明らかになった。

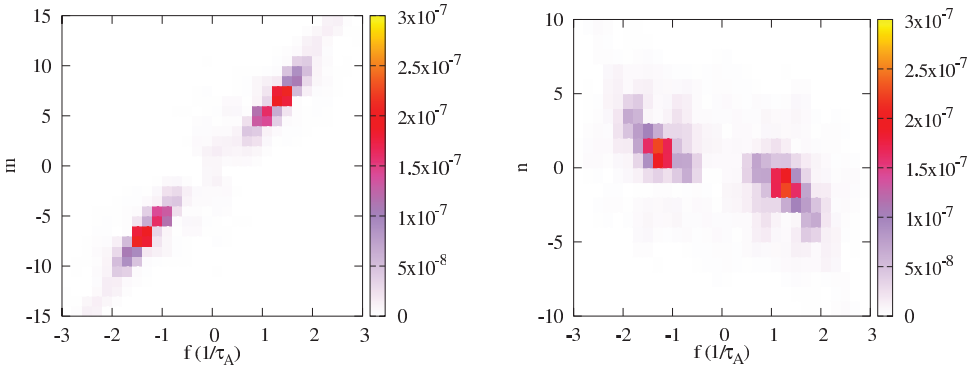


図 1 静電ポテンシャル揺動のパワースペクトル（左図：x-t 空間、右図：y-t 空間）

2. エネルギー輸送解析

線形発展においては(m,n)=(-9,2)が最も成長率が高いが、非線形発展においては、線形成長率の小さな(m,n)=(-6,1)が支配的なモードとなる。そこで、どのような機構で(m,n)=(-6,1)のモードが駆動されるかを解析した。

図 2 に、(m,n)=(-6,1)にエネルギーを与えている項ごとの寄与の時間発展を示す。ただし、線形項（黒実線）、静電的非線形項（青実線）、電磁的非線形項（赤実線）の寄与に分離し、また、それらの合計（黒波線）も示している。図 2 より、(m,n)=(-6,1)の駆動に対しては電磁的非線形項が支配的な役割を果たしていることが明らかになった。

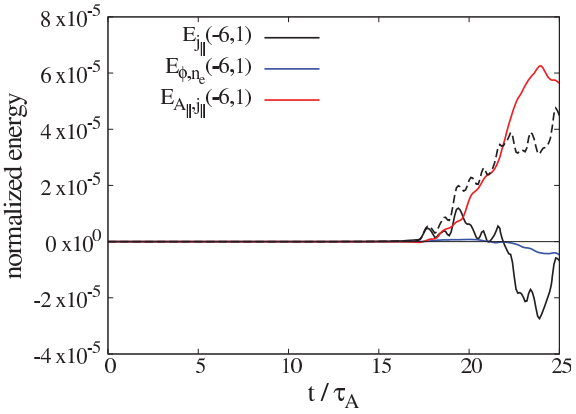


図 2 エネルギー寄与の時間発展

さらに、どのようなモード間結合が電磁的非線形項の駆動源となっているか解析した。その結果、線形的に不安定なモードとインバースカスケードによって生じる低波数のモードの非線形結合が重要であることが明らかになった。

【まとめ】

ジャイロ流体モデルを用いたフィードバック不安定性の非線形シミュレーションを行い、揺動の時空間構造解析およびエネルギー輸送解析を行った。本研究を通して、フィードバック不安定性の非線形発展に伴う揺動の時空間的な特徴には空間的な異方性が存在することが明らかになった。また、非線形発展において駆動されるモードの主な駆動源が電磁的非線形性であり、インバースカスケードを経た 2 段階の非線形結合が重要であることが明らかになった。

ジャイロ流体モデルには、線形のランダウクロージャを使用しているため、非線形ランダウ減衰を取り扱うことのできるジャイロ運動論的モデルへと磁気圏モデルを拡張させることが今後の課題である。

降着円盤系における異常抵抗に関する研究

国立天文台　町田真美

目的

天体物理の重要問題としてブラックホールへの質量降着の問題がある。質量が降着するためには角運動量の輸送が必要となり、磁気回転不安定性（MRI）不安定性による角運動量輸送の重要性が指摘されている。MRI 乱流では様々な物理過程が複合的に発生する。例えば、初期的な MRI 乱流が発達した結果、ダイナモ効果により磁場が増幅される。このダイナモ効果を理解するためには、磁場を増幅する平均場理論によるアルファ効果や、散逸を司るベータ効果が重要となる。特に、磁場の散逸は磁気再結合を引き起こすパラメータでもあり、その起源やパラメータ依存性の理解が求められている。本研究の目的は、質量降着を起こす天体円盤系での異常抵抗を引き起こす物理過程の理解を深めることである。MRI により引き起こされる異常抵抗の特徴や、電流が強くなった結果生じる種々の微視的プラズマ乱流に由来する異常抵抗の特徴をまとめ、数値実験結果との比較を行うことを目的とする。

結果

異常抵抗を始めとする種々の輸送過程の特徴を捉えるために、降着円盤系の乱流やそれに伴う質量降着の時間発展の特徴について考察を進めた。よく用いられる輸送モデルでは、異常抵抗や異常粘性などの係数と平均場を用いる平均場輸送モデルが用いられる。その一方で、降着円盤乱流や質量降着は元来非常に動的であり、輸送過程も時間的に一定となる輸送係数を用いるモデルからはかけ離れた振る舞いが予測される。図１に示す通り、質量降着率は非常に間欠的な振る舞いを示す。そのため、従来の成長と減衰のバランスや、静的な輸送モデルを

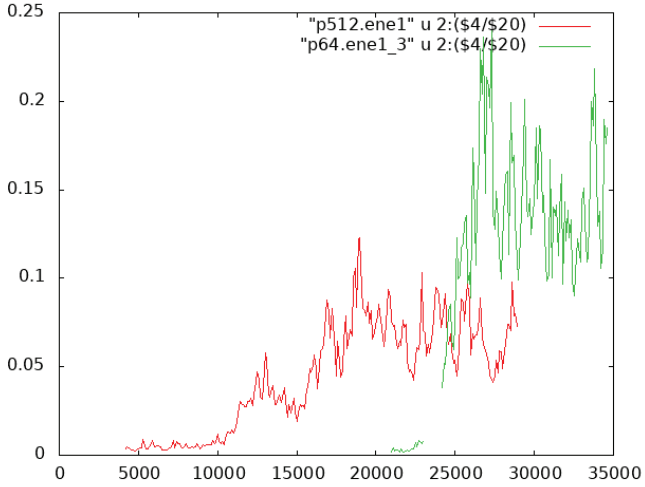


図１：質量降着率の時間発展。方位角解像度が高いものが赤、低いものが緑色。いずれの場合においても間欠的な振る舞いがみ見られる。

拡張することが求められる。

今年度の研究では、間欠的な振る舞いの起源として、海洋などにおいて観測されている一発大波、ローグ波の役割について考察を進めた。磁化プラズマを例にとり、ドリフト波に着目すると、その非線形発展の結果同様のローグ波が励起されることが理論的に予測される。同様の波形を直線装置 PANTA の時系列データから探索した結果を図２に示す。理論で予測された波形（青）を元に、相関を取ることでプラズマ実験データの中に一発大波が隠されている（赤）ことが示された。

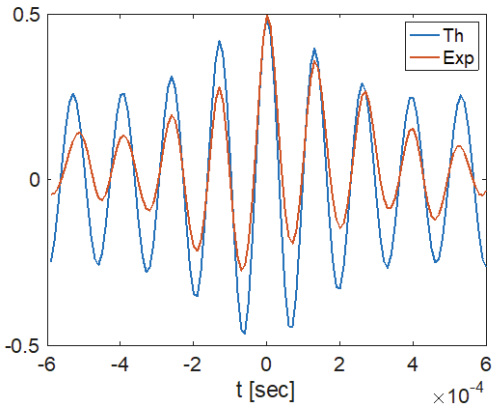


図２：磁化プラズマにおけるローグ波の励起

降着円盤の質量降着の間欠的な振る舞いは、中心に向かう動径方向速度が回転速度と比べて無視できるという近似が敗れる半径近傍で不規則に生じる高密度ガス塊の降着に起因すると推測できるが、ガス塊の落下が開始する理由は明らかになっていない。これらの結果から、同様の一発大波が降着円盤にも存在し、間欠的な振る舞いを引き起こす可能性が考えられる。海洋乱流やプラズマに開発されたローグ波の理論や探索方法を MRI 乱流などに応用し、降着円盤における一発大波を探索する、という新たな指針を得ることができた。

成果

1. 町田真美、ブラックホール天体の活動性の起源としてのプラズマの諸性質、日本物理学会第 77 回年次大会 1ppS-5, 2022. 3., 岡山大学
2. 小菅佑輔、稲垣滋、河内裕一、磁化プラズマにおける時空間偏在した巨大波、日本物理学会 2021 秋季大会、21aB1-5, 2021.9 オンライン

研究組織

町田真美（国立天文台）、小菅佑輔（九大応研）

高エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物質の創製

量子科学技術研究開発機構　高崎量子応用研究所　圓谷　志郎

1. 目的

グラフェンや六方晶窒化ホウ素（*h*-BN）などの軽元素からなる二次元層状物質は，高い放射線透過性を有することから，耐放射線材料としての応用が期待されているが，種々の放射線および粒子線照射による構造への影響等，詳細な研究は行われていない。

研究代表者らは，二次元層状物質とヘテロ原子との接合領域に高エネルギーイオンを照射することによるヘテロ原子のドーピング法を探索している[1,2]。同方法では，電子励起相互作用が支配的なエネルギー領域（数 MeV）のイオンビームをヘテロ原子と二次元層状物質の界面等の接合領域に照射することで，電子励起後の緩和過程で空間的に近接し同様に励起状態にあるヘテロ原子との間で結合の組み換え（置換）を生じさせ化合物を作製する（図 1）。本研究では，グラフェンの表面への気体分子の吸着や，グラフェンの表面を異種原子の薄膜で被覆することでグラフェンと異種原子との界面を作製し，同界面に高エネルギーイオンを照射することでグラフェンに種々の異種原子をドーピングした。本報告書ではグラフェンへの窒素のドーピングの研究成果について報告する。

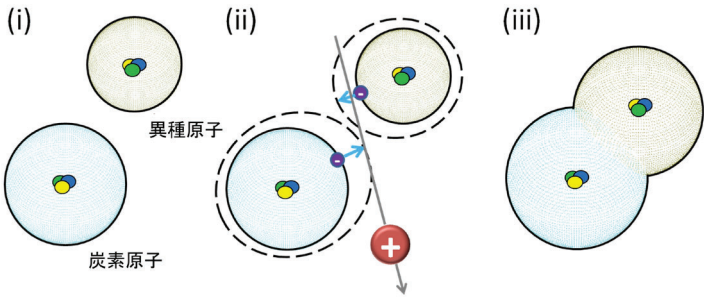


図 1　高エネルギーイオン照射による二次元層状物質へのヘテロ原子ドーピングの概念図

2. 実験方法

多結晶 Cu 箔にメタン，水素ガスを前駆体とする化学気相蒸着法によりグラフェンを成長した[3]。同グラフェンを SiO_2 基板上に転写した後にイオン照射槽に導入し，真空中において試料を液体窒素温度に保持し窒素ガスを曝露した（曝露中の真空槽の真空：10^{-3} Pa）。同状態を保持したまま高エネルギーイオン（2.4 MeV Cu^{2+}）を照射することでグラフェンへの窒素のドーピングを行った。照射量はグラフェンの原子数密度の 10 – 1%に相当する 10^{14} から 10^{13} ions/cm^2 を中心に検討した。イオン照射は九州大学応用力学研究所のタンデム加速器を用いた。グラフェンの電子状態や原子構造は X 線光電子分光（XPS）や X 線吸収端分光（XAFS），低速電子エネルギー損失分光（LEELS），顕微ラマン分光，第一原理計算により評価した。

3. 結果および考察

図 2 にイオン照射によるグラフェンのラマンスペクトルの変化を示す。イオン照射によりグラフェンの欠陥生成に起因する D バンド（1355 cm^{-1}）が現れることや 2D バンド（2710 cm^{-1}）がブロード化することが分かった。さらにグラフェンでは報告されていないシャープな構造が 2160 cm^{-1} に観察された。同構造は ν(C=N) に由来すると考えられることから，N_2/グラフェンへのイオン照射によってグラフェンの構造が変化し，窒化グラフェンが形成

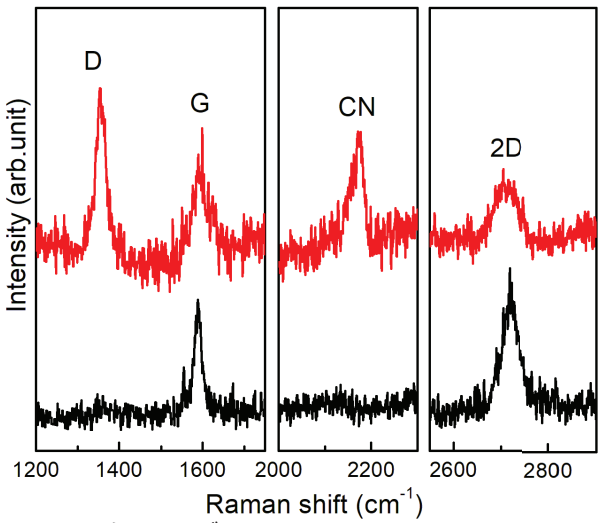


図 2　イオン照射に伴うグラフェンのラマンスペクトルの変化。未照射グラフェン/SiO_2（黒），10^{14} ions/cm^2（赤）イオン照射 N_2/グラフェン/SiO_2。

したことが示唆される。

同窒化グラフェンの構造を評価するため，XAFS を測定した（図 2）。C *K* 端 XAFS スペクトルでは，π*由来の構造（C1）が観察されるとともに，同ピーク強度が入射角に依存して変化することから，イオン照射により窒化グラフェンを形成した後もシート状の 2 次元構造が維持されることが分かった。N *K* 端 XAFS スペクトルでは，吸収端近傍に 2 つの顕著な構造が観察された（N1 および N2）。XPS や第一原理計算の結果も合わせて考えると，N1，N2 構造はそれぞれ 1 つの炭素原子を窒素が置換した欠陥であるピリジン構造およびグラフェン構造に由来することが示唆される（図 3）。これらの結果から，高エネルギーイオンの照射により 1 原子層で連続した窒化グラフェンのシートを形成できることが分かった。

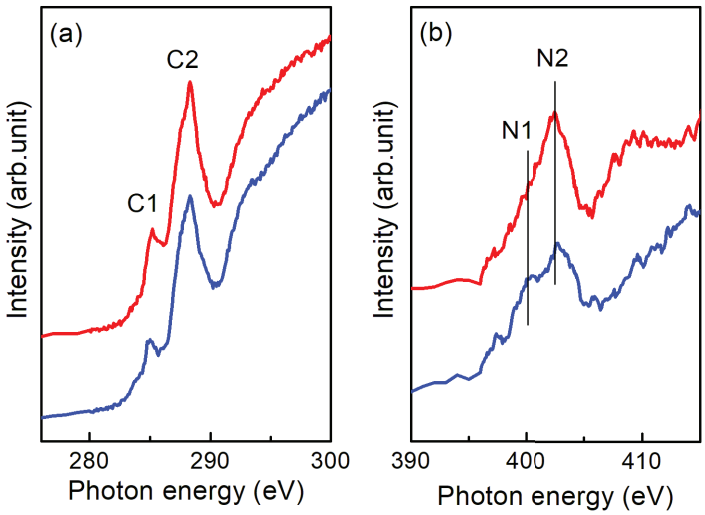


図 2 10^{14} ions/cm^2 イオン照射した N_2/グラフェン/SiO_2 の C (a)および N (b) *K* 端 XAFS スペクトル。X 線の入射角（赤：斜入射(15°)，青：垂直入射）によりピーク強度に変化がみられる。

本研究では，高エネルギーイオン照射下の非平衡励起反応場を利用することで，従来の化学的な合成手法では得られないグラフェン構造の窒素置換欠陥を有する 1 原子層の連続した窒化グラフェンを創出することができた。本技術を発展させることで従来の手法では実現困難な二次元層状物質のドーピング状態および電子状態の幅広い制御に加えて，直進性の高いイオンビームの特徴を活かしてグラフェンや *h*-BN の微小領域に位置選択的なドーピングが可能になることも考えられる。これにより，ナノエレクトロニクスやスピントロニクスの技術に新たな進歩をもたらすことが期待される。

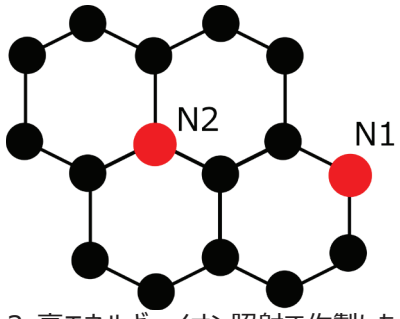


図 3 高エネルギーイオン照射で作製した窒化グラフェンの原子構造

参考文献

[1] S. Entani, *et al.*, RSC. Adv. **6**, 68525 (2016).
[2] S. Entani, *et al.*, Nanotech. **31**, 125705 (2020).
[3] S. Entani, *et al.*, Appl. Surf. Sci. **475**, 6 (2019).

研究組織

研究代表者：
圓谷 志郎 所属：量子科学技術研究開発機構
研究協力者：
水口 将輝 所属：名古屋大学未来材料・システム研究所
所内世話人：
渡邉 英雄 所属：九州大学応用力学研究所

成果報告

1) 圓谷志郎，本田充紀，滝沢優，水口将輝，渡邉英雄，針井一哉，山﨑雄一，大島武，「高エネルギーイオン照射を用いた二次元新材料の創出」，QST 高崎サイエンスフェスタ 2021 2021 年 12 月.

第一原理シミュレーションと数値計測による多粒子種プラズマのポテンシャル形成の定量的理解

核融合科学研究所 ヘリカル研究部
沼波 政倫

研究の目的

磁場閉じ込め核融合研究における重要課題の一つとして、プラズマの熱や粒子の輸送現象に対する物理機構の理解と定量予測に向け、数値研究が進められてきた。近年大幅に性能が向上した大型計算機により、極めて大規模な数値計算が可能になり、磁場閉じ込めプラズマの輸送を司る位相空間上の分布関数の時間発展を直接取り扱うことができるようになっている。この中で、ジャイロ運動論やドリフト運動論による第一原理シミュレーションは最も強力な解析手法として用いられ、プラズマの輸送レベル予測も可能になってきた。一方で、計算結果に対する定量性や精度といった要求レベルは日毎に高まっており、単に大規模計算を行うだけでなく、応用力学研究所共同研究で実施してきた数値計測研究など、実験環境や現実の観測条件に即したデータ解析手法が強く求められている。本研究では、近年の大規模シミュレーション研究で重要性が明らかになった電場やポテンシャル分布の多粒子種プラズマ輸送への影響に対して、第一原理シミュレーションによる問題の明確化と、数値計測による直接的なデータ解析によって、定量的な理解を深めることを目的に据えている。特に、大域的なドリフト運動論的新古典輸送シミュレーションによる粒子輸送現象の物理解析と、重イオンビームプローブ (HIBP) の数値計測を行い、輸送現象におけるプラズマ分布形成の物理を明らかにし、包括的な理解を目指す。

研究方法

本課題では、令和２年度に引き続き、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) における不純物ホールプラズマに注目して、ドリフト運動論に基づく大域的新古典輸送コード FORTEC-3D を用いた第一原理シミュレーションを実行し、多粒子種プラズマの輸送現象についての詳細な解析を進める。LHD 不純物ホールプラズマは、不純物イオン (炭素イオン C^{6+}) の密度がプラズマ中心領域で極端に減少する分布を有する。不純物イオンの存在は燃料の希釈や放射損失を伴うため、不純物ホール現象は核融合炉の炉心性能を向上させ得るものとして、広く注目を集めている。粒子輸送は、微視的不安定性が駆動するプラズマ乱流と、衝突および粒子軌道効果による新古典輸送が担っているが、最近の大規模乱流シミュレーションによって乱流輸送はロバストに径方向内向きの粒子輸送に寄与することがわかってきた。従って、ホール構造の形成に必要な外向きの粒子輸送は、新古典効果が引き起こしていることが期待される。このような背景の下、大域的に新古典輸送を解く FORTEC-3D によるシミュレーションが精力的に進められてきた。これまでに、粒子の大域的な軌道の効果により、正の両極性径電場が形成され、外向きの粒子輸送を引き起こし、乱流輸送と釣り合って不純物ホール分布が維持されている可能性が指摘されている。そこで、不純物イオンの密度分布による新古典粒子輸送への影響をさらに詳しく調べ、乱流輸送フラックスとの詳細比較を行う。一方、第一原理シミュレーション結果と実際の実験結果との定量的な比較解析は、数値計算の妥当性だけでなく、シミュレーションによる予測を高い信頼性を以て実行する上で必要不可欠でもある。このため、上述の運動論的シミュレーションで得られる密度揺動分布に対して、揺動の実験計測に用いられる手法である HIBP 計測を数値的に実行するコード実装と適用も同時に進める。

今年度の成果

大域的新古典コード FORTEC-3D でのシミュレーションを、磁気面平均からの静電ポテンシャル変動量 (Φ_1 分布) を考慮して、4 粒子種 (電子 e^-、水素イオン H^+、ヘリウムイオン He^{2+}、炭素イオン C^{6+}) のプラズマ

に対して実行した。また、不純物炭素の密度分布の観測結果には、プラズマ中心付近において不確定性が存在するため、複数の密度分布を仮定して計算を行なった。その結果、ホール構造が強く現れる径方向位置付近では、どの密度分布においても、炭素イオンの新古典粒子輸送フラックスは、径方向外向きであることが明確に示された[1]。このシミュレーションでは、磁気面を横切る粒子軌道の大域的効果により、局所計算では現れなかった外向きの粒子フラックス分布が堅牢に形成されていることが分かった。また、ここで得た新古典粒子輸送フラックスと、熱輸送でフラックスマッチングした乱流の粒子輸送フラックスと比較すると、双方が定量的に釣り合っていることも確かめられた。

次に、ポテンシャル揺動の数値計測について、プラズマ乱流統合観測装置 PLATO を例として、数値診断を行った．ここでは、平衡データをもとにデータ形式の異なる揺動場データに対して HIBP 計測のルーチンを作成し、数値診断を行った。計測モジュールでは、基幹コードに応じてオブジェクトクラスを導入し、各クラス内には、3 次元データの抽出やモデル仮定などのデータ形式に応じたメソッドを定義した。4 場簡約化 MHD コード（R4F）と 3 次元 MHD コード（MIPS）により作成した揺動データに対して計測模擬し、電位と密度の空間分布と時間発展を得られた(図 1) [2]。

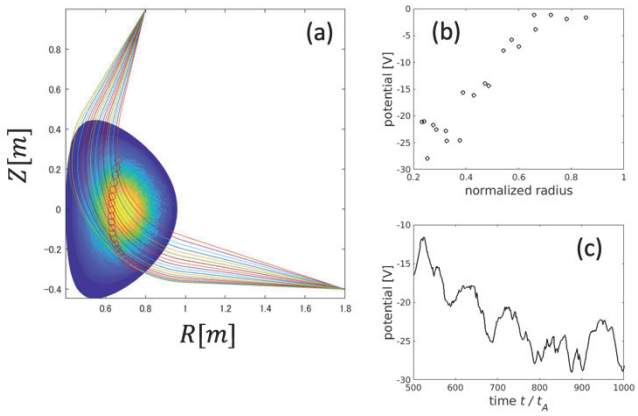


図 1　4 場簡約化 MHD コードに対する HIBP 数値計測モジュールの適用。それぞれ、(a) 密度分布に対する重イオンの軌道、(b) ポテンシャル分布のスナップショット、および (c) ポテンシャルの時間発展を表す。

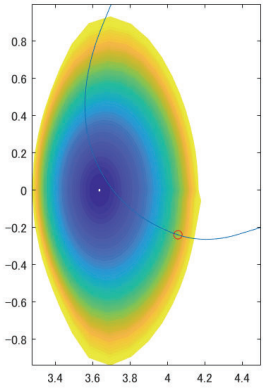


図 2　LHD プラズマの運動論シミュレーション結果に対する HIBP 数値計測モジュールの適用。

まとめ

本課題では、多粒子種プラズマにおける分布形成の理解に向けて、第一原理に基づく大規模シミュレーションと数値計測を用いて、粒子輸送や揺動分布形成に対する解析を進めた。多粒子種プラズマでは、新古典および乱流による粒子輸送が分布形成に大きく影響する中、運動論シミュレーションにより実験結果を説明し得る粒子輸送フラックスが得られ、この結果の解析に向けた HIBP 数値計測による基盤開発を進めた。今後、LHD 多粒子種プラズマのポテンシャル分布の形成に関するさらなる定量的な解析を進める（図 2）。

[1] K. Fujita, PhD thesis, SOKENDAI (2022).
[2] 吉原稜, “トーラスプラズマにおける 3 次元データを用いた HIBP 計測シミュレーションコードの開発”, プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第 25 回支部大会 (2021).

ランジュバン系を用いたプラズマ中の非線形現象のモデリング

Langevin modeling of nonlinear phenomena in plasmas

富山大学・学術研究部・教育学系　成行 泰裕

研究目的：

プラズマ中の非線形現象はスケール間結合を伴っているものが多いが、磁気流体スケールの現象の理解においては、イオン・電子スケールのミクロな現象に対しては何らかの近似や平均操作を用いた記述が必要になる。このことは、大規模な運動論シミュレーションが可能になった今でも本質的には変わっておらず、実験室プラズマと宇宙・天体プラズマ双方に共通した課題である。本研究課題は、ランジュバン系を用いた解析を通じてプラズマ中の非線形現象を新しい視点から記述すること、およびそれを踏まえて実験室プラズマと宇宙・天体プラズマの新しい接点を探索するための新しい実験の提案や新規の実験データの解析法などを提案することを目的としている。

研究方法：

本研究の推進に当たっては、それぞれの研究グループが理論解析・数値計算・実験/データ解析について発展させた結果について、定期的に議論を行うことを基本としている。

研究成果：

初年度である本年度は、実験室プラズマと宇宙・天体プラズマの接点の一つとして、PANTA でも使用されているヘリコンプラズマにおけるヘリコン波/TG 波中の電子運動のランジュバンモデルについて解析を進めた。ヘリコン波/TG 波は斜め伝搬ホイッスラー波の一種で、ヘリコンプラズマでは密度非一様性に伴うモード変換や波の衝突減衰がプラズマ生成に重要であると考えられている[1,2]。以下の解析では、Isayama et al[2]と同様にして、円柱プラズマの径方向(ここでは x 方向)に磁場の線形方程式を数値的に解くことで波形を求めた。パラメータも Isayama et al[2]と同じものを用いている。

Figure 1 は径方向に対する磁場と電子バルク速度の軸方向(y 方向)成分の波形である。ただし、この波形は時間・軸方向にフーリエ変換したものの実部であることに注意されたい。Figure 2 は求めた電磁場を実空間・実時間に戻したものを用いて電子のテスト粒子ランジュバン方程式を数値的に解くことで求めた定常状態(steady state)の軸方向速度の平均値(マーカー)および標準偏差(エラーバー)を示している。電磁場項は Buneman-Boris 法で、衝突項・確率項は Euler-Maruyama 法で時間発展を行っている。衝突周波数は 0(赤●)と印可周波数の 0.1%(青□)である。ただし、Figure 2 は与えられた電磁場から予想されるバルク速度(実線)とランジュバン系の一致を確認するために一様密度下の波形を与えて、軸方向の粒子運動もここでは解いていない。また、電磁波形はどちらの場合も衝突周波数 0 のものを用いている。Figure 2 より、ランジュバンモデルで求めた平均速度(マーカー)が線形分散関係

から予想される電子バルク速度(実線)とよく一致していることが分かる。また、エラーバーは熱速度に相当しているが、バルク速度に対して無視できない大きさであることが分かる。このような場合、電磁場が単色であっても、各電子が電場から受ける仕事の分布は平均値周りに有限の幅を持つことになる。今後は、有限振幅波動下での電子の非線形捕捉の効果を確認し、宇宙空間で生じている非一様磁場下の電子加速[3]に対する実験室プラズマからのアプローチを検討する。並行して、波動間の非線形共鳴およびイオンスケール現象との結合について、宇宙・天体プラズマとの接点を軸に検討を進める。

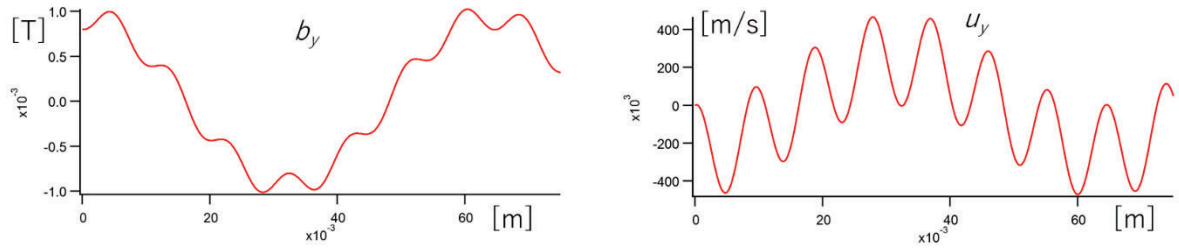


Figure 1 径方向に対する磁場(左)と電子バルク速度(右)の軸方向(y 方向)成分の波形

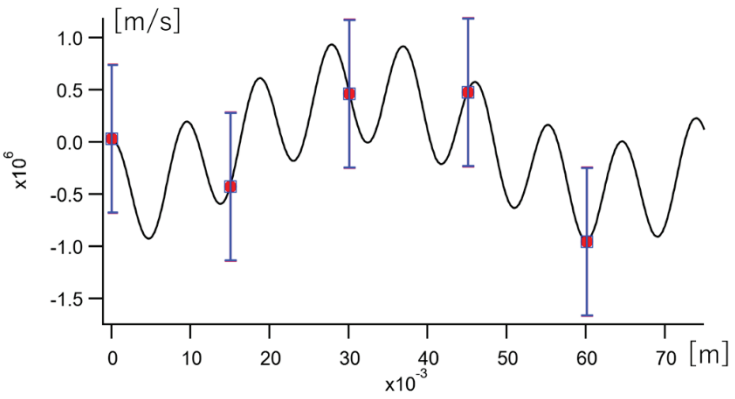


Figure 2 径方向に対する電子バルク速度。実線は線形分散関係から予想される波形で、マーカーはそれぞれランジュバンモデル計算における衝突周波数が 0(赤●)と印可周波数の0.1%(青□)の場合に対応している。エラーバーは電子速度の標準偏差である。

参考文献: [1] S. Shinohara, J. Plasma Fusion Res. 91(6), 412 (2015); S. Isayama et al, Plasma and Fusion Res., 13, 1101014 (2018); and references therein. [2] Isayama, Phys. Plasmas, 23, 063513 (2016). [3] Y. Omura, Earth Planets Space, 73, 95 (2021); and references therein.

公表状況：なし

研究組織：

成行泰裕（富大・教育学系）、佐々木真（日大・生産）、加藤雄人(東北大・理学研究科)
諫山翔伍（九大・総理工）、羽田亨（九大・総理工）、稲垣滋(九大・応力研)

反転密度勾配が駆動するドリフト波による粒子ピンチ効果の理論シミュレーション研究

量子科学技術研究開発機構　矢木雅敏

目的

トカマク型核融合炉においては燃料供給のためプラズマ周辺部にペレット入射を予定しており,プラズマ周辺部に密度のハンプが形成され反転密度勾配が実現される．このような状況では粒子ピンチ（内向きの粒子フラックス）が起こることが理論的に示されている[1,2]．粒子ピンチ効果を外部から制御できれば核燃焼プラズマ制御が可能となるのでこの研究は重要な研究課題と考えられる．本研究においては直線装置 PANTA において反転密度勾配駆動ドリフト波が不安定性として観測できないか,また,この不安定性がどの程度の内向きのフラックスを作り出せるのか,シミュレーションと PANTA 実験を通じて明らかにするとともに,輸送モデルを構築し,輸送コード TASK/TR に実装し,PLATO 実験に向けた提言を行うことを研究目的とする.

研究成果

本年度はシミュレーションコード開発と輸送モデルの構築に着手した.シミュレーションコード開発においては,これまで開発してきた１次元領域分割版５場簡約 MHD コードと２次元領域分割版のベンチマークを行い,２次元領域分割版の妥当性評価を行なった．一部，通信ルーチンの実装にバグが存在し，それを修正するのに時間を要したため，当初予定していたシミュレーションランまでに至らなかった．ここでは通信モジュールの修正に関して報告する．コードにおいてエネルギー等を計算するサブルーチン TMENR において ALLGATHERV を用いて各プロセスが保持しているローカル変数，例えば FI(1:IRMAXM,SY1:EY1,SZ:EZ)をグローバル変数 FIGW(1:IRMAXM,KYM,LZM)へ送信している箇所が存在した．ここで MPI の通信ルーチンで指定する送受信バッファーは，連続したデータのみを扱うことが可能であることに注意する．1 次元領域分割を行っていた場合には，取り扱うデータはメモリ上で連続して存在しているため不都合が存在しなかった．一方，2 次元領域分割版に拡張した場合，各プロセスの送信データはメモリ上でとびとびになってしまう．このデータの不連続性が 2 次元領域版において，計算値（出力値）が異常となっていた原因となっていた.

修正点

不連続なデータの送受信を取り扱うために派生データ型を使用した．プログラム上，本派生データを使用する位置におけるデータの状態は，X 方向に関しては各プロセスが全データを保持しており，Y 方向および Z 方向に関して 2 次元領域に分割した状態になっている.

```
ISIZE(1)=IRMAXM
ISIZE(2)=KYM
ISIZE(3)=LZM
ISUBSIZE(1)=IRMAXM
ISTART(1)=0

DO I=0,DIMS(1)*DIMS(2)-1

CALL MPI_CART_COORDS(COMM_CART, MYID, NDIMS, COORDS, IERR)

ISUBSIZE(2)=ey1_all(i)-sy1_all(i)+1
ISUBSIZE(3)=ez_all(i)-sz_all(i)+1
ISTART(2)=sy1_all(i)-1
ISTART(3)=sz_all(i)-1

CALL MPI_TYPE_CREATE_SUBARRAY(3,ISIZE,ISUBSIZE,ISTART,&
```

```
      MPI_ORDER_FORTRAN,MPI_DOUBLE_COMPLEX,ITYPE_TMENR(I),IERR)
    CALL MPI_TYPE_COMMIT(ITYPE_TMENR(I),IERR)

    ENDDO
```

1 次元領域分割版において，データの送受信には MPI_ALLGATHERV を使用していたが，MPI_ALLGATHERV では，受信バッファーのデータ型を 1 種類しか指定できない．すなわち，プロセス毎に配列を別々に指定することができない．このため MPI_BCAST を使用した通信に変更した．

```
      FIGW(1:IRMAXM,SY1_ALL(MYID):EY1_ALL(MYID),SZ_ALL(MYID):EZ_ALL(MYID)) = &
           FI(1:IRMAXM,SY1:EY1,SZ:EZ)
      CALL MPI_Barrier(COMM_CART, IERR)
      DO I=0,DIMS(1)*DIMS(2)-1
      CALL MPI_BCAST(FIGW,1,ITYPE_TMENR(I),I,COMM_CART,IERR)
      ENDDO
```

以上の修正により，2 次元領域分割版コードに生じていた不具合は解消し，コード間ベンチマークテストにおいてよい一致を得た．

準線形フラックス

電子温度勾配と電子密度勾配の比を$\eta_e = (\frac{dlnT_e}{dr})/(\frac{dlnn_e}{dr})$とする．通過電子の非断熱応答を$\delta$とすると

$$\frac{\tilde{n}_e}{n_e} = \frac{e\varphi}{T_e}(1 + i\delta)$$

分散式として

$$\omega = \omega_{*e} - i\hat{\eta}_e k\omega_{*e}^2/\omega_\chi$$

が得られる．ここで$k = 1.76, \hat{\eta}_e = 1.5\left(\eta_e - \frac{2}{3}\right), \omega_\chi = k_\parallel^2 v_e^2/\nu_e$. ω_χは磁力線方向の熱伝導率を示す[3]. Coppi らはスラブ ITG モードに対し、通過電子の非断熱効果（磁力線方向の熱伝導）を考慮し、ion mixing mode と名付け、粒子ピンチ効果を論じたが反転密度勾配下では$\hat{\eta}_e < 0$となるため、ITG モードとの結合を考えなくてもドリフト波自体が電子の非断熱応答により不安定化し内向きの粒子フラックスを生成する．

$$\Gamma \approx -3kn_e D_B^e \sum_{k>0} \frac{\eta_e \omega_{*e}}{\omega_\chi}\left|\frac{e\varphi}{T_e}\right|^2 k_\theta \sim -3kn_e \frac{(D_B^e)^2}{\omega_\chi}\frac{1}{L_T L_n^2}$$

ここで$D_B^e = \frac{cT_e}{eB}$であり，簡単のため，$\eta_e \gg \frac{2}{3}$とした．$\eta_e\omega_{*e} > 0$に注意すると粒子フラックスは内向きであることが見て取れる．

参考文献

[1] M. Yagi, K. Miki, N. Miyato and B. Scott, “Ion Mixing Mode Revisited”, 16th BPSI Meeting, 2018 Nov.29-30, Chikushi Campus, Kyushu University, Kasuga (Proceedings of 16th BPSI Meeting, Kyushu University).

[2] M. Yagi, “Particle transport model in plasma peripheral region”, 17th BPSI Meeting, 2019 Dec.5-6, Chikushi Campus, Kyushu University, Kasuga (Proceedings of 17th BPSI Meeting, Kyushu University).

[3] B. Coppi and C. Spight, Phys. Rev. Lett. 41 (1978) 551.

研究組織

矢木雅敏(量研機構)、糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(日本大)、稲垣滋(九大応力研)、糟谷和賀子(応用流れ研究所)

ラジカル含有リチウム酸化物薄膜の水素吸収および放出過程

Hydrogen absorption and release processes for radical-induced lithium oxide films

名城大学理工学部　土屋 文
Bun Tsuchiya
Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

目的　安全でクリーンな水素酸素燃料電池は、火力発電や原子力発電に替わる発電機として世界的に大きな期待を寄せられている。本研究室では、リチウム酸化物薄膜を水素(H)供給源とした水素酸素マイクロ燃料電池の開発に取り組んでいる。これまで、本研究室では、リチウム酸化物一つである Li_2ZrO_3 は多量の水(H_2O)および H を吸収し、その吸収された H の解離温度は約 100℃以下であることを発見した。しかしながら、このマイクロ燃料電池の開発を目指すためには、より低い温度で H を解離する H 供給源を必要とする。本研究では、イオン照射により Li_2ZrO_3 表面にラジカルを形成させ、H 貯蔵量の増加および H 解離温度の低下を目指す。特に、イオンビーム分析の一つである反跳粒子検出(ERD)法を用いて、Li_2ZrO_3 表面に蓄積された H 濃度を測定し、また、九州大学応用力学研究所に設置された四重極型質量分析計(Q-mass)を用いた昇温ガス脱離(TDS)法により、H の解離温度を調べ、Li_2ZrO_3 中の H 吸収および放出過程について明らかにすることを目的とした。

実験方法　これまでの研究成果に基づき、炭酸リチウム(Li_2CO_3)および酸化ジルコニウム(ZrO_2)粉末を 1100℃以上の高温および空気雰囲気において焼結することによって、直径 8 mm、厚さ 1 mm のディスク状の Li_2ZrO_3 試料を作製した。Li_2ZrO_3 試料の結晶構造、格子定数および体積密度はそれぞれ単斜晶(monoclinic)、a=c=0.541 nm、b=0.903 nm および 3.46 g/cm^3 であった。この試料を約 1×10^{-5} Pa 以下の真空中で 350℃まで加熱して残留水素を取り除いた後、室温において片面のみに 10 k eV の重水素(D_2^+)イオン(即ち、5 k eV の D^+イオン)を約 5×10^{17} ions/cm^2 の照射量まで照射して、試料表面に電荷を帯びたラジカルを形成させた。次に、20℃の室温および 30～55 %R.H.の相対湿度の空気(水蒸気)を真空装置へ約 1×10^5 Pa になるまで導入した後、精密電子天秤を用いた重量増加(WGM)法により各空気暴露時間における試料の重量およびイオンビーム分析を用いた ERD 法により試料中の H および D 濃度を測定した。

次に、水素吸収した試料を真空雰囲気においてセラミックスヒーターにより室温から 400～500℃までの各温度で 10 分間の等時加熱(isochronal annealing)した後、ERD 法により試料表面の水素濃度分布を測定し、試料からの水素放出量を求めた。また、TDS 法により、室温から 500℃まで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、放出ガス種の判別および各ガス種の解離温度を調べた。水素分子が試料から放出されていることを確認するとともに、生成された水素分子量から水素放出量を求めて、ERD 法によって求めた値と比較した。得られた結果から、表面改質された Li_2ZrO_3 の水および水素吸収、貯蔵および放出機構のメカニズムを明らかにした。

実験結果および考察　350℃で真空加熱および 5 k eV の D^+イオンが約 5×10^{17} ions/cm^2 まで照射された Li_2ZrO_3 試料表面の SEM 像より、粒径は約 5 μm 程度であり、大きな気孔(pore)等は形成されていないことがわかった。また、照射された粒子表面は活性化しており、ラジカルが形成されていると予測された。

次に、試料作製、350℃の真空加熱、5 keV D^+イオン照射および約 290 hrs の空気暴露時間後に ERD 測定を行い、Li_2ZrO_3 試料表面における H および D 濃度分布を測定した。得られた ERD スペクトルの横軸は反跳された H^+および D^+イオンのエネルギーに相当し、試料表面からの深さの情報を与える(測定限界深さ：約 400 nm)。縦軸は反跳された水素同位体(H^+および D^+)イオンの個数であり、Li_2ZrO_3 試料中のある深さに対する H および D 濃度を表す。ERD スペクトルより、多量の H が 1100℃以上の焼結時に水と反応して吸収されていることがわかった。これらの H は、真空内で 350℃の加熱によりほとんど放出されることもわかった。さらに、この試料に 5 k eV の D^+イオンを約 5×10^{17} ions/cm^2 まで照射すると、D が試料作製時と同程度の量まで試料表面に蓄積されることが ERD スペクトルよりわかる。この蓄積された D の濃度は、空気暴露によりどの深さに対してもほぼ一様に減少し、それに対して H 濃度が増加することが判明した。この水素同位体置換反応は、空気中の水蒸気が Li_2ZrO_3 試料中へ吸収されることを示してい

る。この水素同位体置換のメカニズムについては、空気中に含まれる H_2O が室温で活性化された最表面においてHとOHに分解(常温水分解)し、バルク内へ拡散したHが捕獲されたDと置き換わると考えられる。

次に、精密電子天秤を用いて各空気暴露時間に未照射 Li_2ZrO_3 および D^+イオン照射 Li_2ZrO_3 試料の重量を測定した。23～26℃の室温および30-40 %R.H.の相対湿度の条件において、空気暴露時間に対する未照射 Li_2ZrO_3 試料および約 5×10^{17} ions/cm^2 の照射量まで5 keVD^+イオン照射された Li_2ZrO_3 試料の重量変化を図1に示す。図1より、試料の重量増加の割合は、両試料に対して空気暴露時間の増加とともに増加した。この重量増加の空気暴露時間依存性はH濃度増加の結果に対応しており、重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つであると考えられる。特に、D^+イオン照射 Li_2ZrO_3 試料の重量増加の割合は、約2000 hrsで約9.5 wt%に達し、未照射 Li_2ZrO_3 試料の重量増加量の約3倍以上になることがわかった。従って、試料表面における水分解特性がイオンスパッタリング効果による表面改質によって向上されることが判明した。この重量増加は、D^+イオンスパッタリングにより酸素欠損(即ち、酸素空孔)を有する $Li_2ZrO_{3-\delta}$(δ：酸素不定比料)層等のラジカル形成が生じ、H_2O の解離速度だけなく、バルク内へのHの移動速度および貯蔵量が増加したと考えられる。

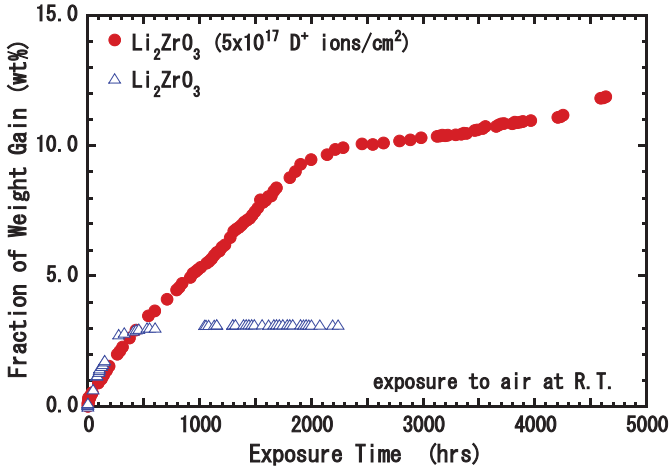


図1　Li_2ZrO_3 および D^+イオン照射 Li_2ZrO_3 試料における重量増加の空気暴露時間依存性。

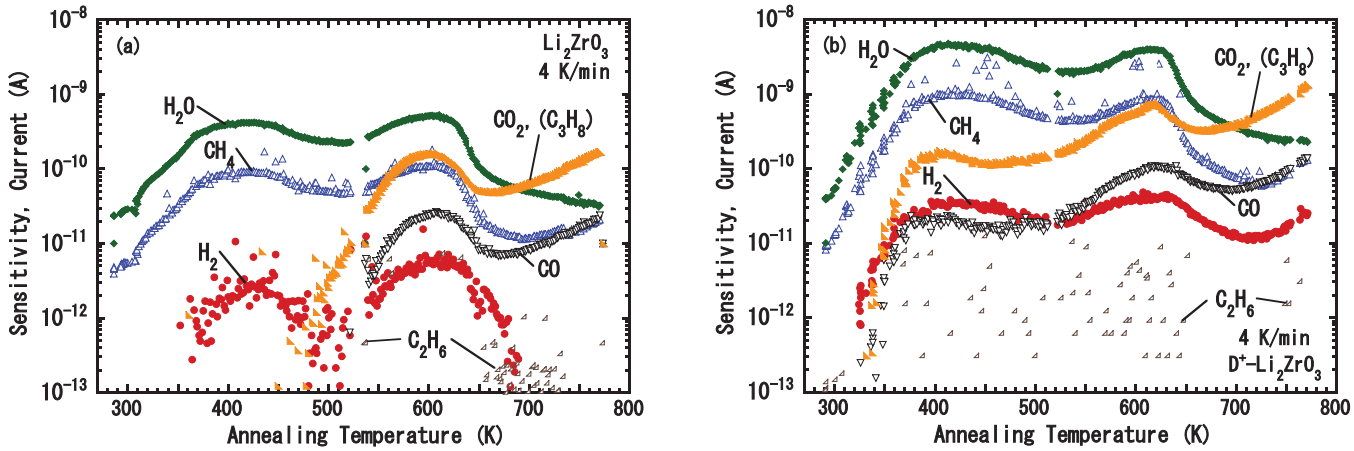


図 2　飽和重量貯蔵量まで空気暴露された(a) 未照射および(b) D^+イオン照射 Li_2ZrO_3 試料における TDS スペクトル。

次に、TDS 法により、試料から放出されるガス種の判別を行った。未照射 Li_2ZrO_3 および D^+イオン照射 Li_2ZrO_3 試料から得られた TDS スペクトルをそれぞれ図2(a)および(b)に示す。Li_2ZrO_3 試料の場合、図2(a)より、H_2O および CH_4 が約30℃の低温から放出し、続いて H_2 が約80℃、CO および CO_2 が約230℃、僅かな C_2H_6 が約260℃の温度から観測された。他方、D^+イオン照射 Li_2ZrO_3 試料の場合、図2(b)より、H_2O だけでなく H_2 が低温から放出されており、それらの放出量は、D^+イオンスパッタリング効果により約一桁増加することがわかった。従って、表面改質は H_2O を室温で分解してHを貯蔵する水分解特性を向上させ、約100℃以下の低温における H_2 放出量を増加させることが明らかになった。さらに、CH_4、CO、CO_2 および C_2H_6 の他のガス種の吸収量も増加し、重量増加の要因であることも判明した。

まとめ　D^+イオンスパッタリング効果を利用したラジカル生成による表面処理を行い、室温における H_2O 分解およびH透過能力を向上させ、Li_2ZrO_3 試料の重量貯蔵容量を約3倍以上まで増加させることができた。また、ERD 法および TDS 法を用いて、Hが室温で空気暴露された Li_2ZrO_3 中に貯蔵され、そのHが100℃以下で放出されることを確認し、Li_2ZrO_3 のH吸収、貯蔵および放出機構のメカニズムを明らかにした。

遷移金属合金の照射による結晶構造・磁気変態の機構解明

岩手大学理工学部 物理・材料理工学科　鎌田康寛

目的

原子炉や大型加速器では機器構造材の一部にステンレス鋼の Fe-Cr-Ni 合金が使われている。それらの結晶構造と磁性に与える照射効果の解明は、原子炉での磁気計測による劣化評価や、加速器の衝突性能の確保に役立つと考えられる。照射効果を調べる研究手法として、我々はイオン照射と薄膜試料を組み合わせた実験を提案している。イオン照射では中性子照射と同様にカスケード損傷が生じ、中性子照射と異なり放射化しない利点がある。一方で損傷領域が表面に限られる問題があるが、薄膜試料を用いることで全体を損傷させることができ、評価・解析が容易になる。ここで薄膜試料を作製する際、下地物質・成長温度の違いで結晶構造・磁性が変わる可能性が考えられるため、それらの選択に注意が必要である。これまで、MgO(001)上に作製した fcc-Fe-Ni 合金薄膜の磁化がイオン照射で増加したと報告してきたが[1]、Fe-Cr-Ni 合金薄膜の研究報告はほとんど無い。以上を踏まえ本研究では、組成を系統的に変えた Fe-Cr-Ni 合金薄膜を異なる下地物質・成長温度で作製し、結晶成長に与える効果を明らかにすること、作製した薄膜をイオン照射し、構造・磁性に与える照射効果を明らかにすることを目的として実験を行った。

実験方法

図 1 に試料組成と成膜の模式図を示す。超高真空中で電子ビーム蒸着により組成の異なる 5 種類の Fe-Cr-Ni 合金薄膜を作製した。基板温度と下地物質として、①低温（80℃）で MgO(001)、②低温で Cu(001)、③高温（500℃）で MgO(001)、の 3 条件の組み合わせで成長させした。低温成長の試料は、シャッターを用いて MgO(001)基板の半分に fcc-Cu(001)層を 50nm 蒸着し、その後全面に Fe-Cr-Ni を 200nm 蒸着した。成膜中に RHEED 観察を行い、結晶成長を観察した。成膜後に小片を切り出し、各種測定を実施した。各試料に対して加速電圧 2.4MeV で Cu^{2+}を室温で照射した（九大応力研）。損傷量は SRIM 計算より 0.7dpa と見積もった。照射前後の構造を XRD および EBSD で、磁化曲線を VSM で調べた。

結果及び考察

薄膜作製後の EBSD 観察により得た相マップを図 2 に示す。MgO 上に低温成長した場合、組成にかかわらず bcc(001)がエピタキシャル成長していることが分かった。一方で高温成長した場合、Ni が多い試料では bcc(001)に加えて、fcc(110)が成長していた。それに対して Cu 上に成長させた薄膜の EBSD 観察では菊池パターンが不鮮明な解析不能点が多く、ナノ結晶が成長したと考えられる。

磁化曲線を比較した結果、成長条件にかかわらず、Ni 量の増加に伴い飽和磁化が減少する傾向が見られ、さらに高温成長の方がその傾向が強いことがわかった。各試料の飽和磁化から fcc 相の体積率を推定した。高温成長した Ni 当量 33%の試料（Fe-15Cr-24Ni）では、体積率は 0.79 に達した。

高温成長した試料に対してイオン照射を行い、XRD 測定および磁化測定を実施し、照射前後の結果を比較した。照射前後で XRD プロファイルに変化は見られず、結晶構造の変化は確認できなかった。飽和磁化に関しては Fe-Ni 合金のような顕著な変化は見られなかったが、Fe-15Cr-20Ni では微増していた（図 3）。Fe-Ni 合金薄膜の先行研究[1]と合わせて、飽和磁化に与える照射の影響を Ni 当量[2]に対して整理し

た(図 4)。その結果、Fe-Ni、 Fe-Cr-Ni 合金ともに Ni 当量 29%付近で照射により磁性が変化することがわかった。バルクの fcc-Fe-Ni 合金では、Ni30%付近で低スピンと高スピンの 2 つの磁気状態があると言われている[3]。本研究の Fe-15Cr-20Ni は照射で構造変態せず、磁化が増加したことから、その原因として、照射により fcc 相が低スピンから高スピン状態に遷移した可能性が考えられる

まとめ

下地物質・成長温度を変えて、5 種類の Fe-Cr-Ni 合金薄膜を作製したところ、高温成長で fcc 相が形成しやすいことがわかった。高温成長した薄膜にイオン照射を行い、その磁気特性の振る舞いを Ni 当量の観点から整理したところ、Ni 当量 29%付近で照射により飽和磁化が増加する現象を見出した。

文献 1. 小宅ら, 第 165 回金属学会講演大会概要集(2019) 2. 平山, 小切間, 日本金属学会誌, **34** (1970) 507-510
3. R J Weiss, *Proc. Phys. Soc.*, **82** (1963) 281-288

成果報告（学会発表）:

中川一沙, 清水一行, 鎌田康寛, 渡邉英雄, “Fe-Cr-Ni/MgO(001)薄膜の構造と磁性に及ぼすイオン照射効果”, 日本金属学会 2021 年秋期講演大会(第 169 回), 2021.9.14 P56

研究組織 ： 鎌田康寛, 清水一行, 村上武, 中川一紗 ： 岩手大・理工、渡辺英雄 ： 九大・応力研

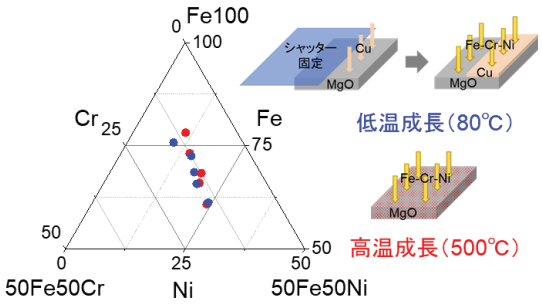


図 1　Fe-Cr-Ni 合金薄膜の
組成と成膜の模式図

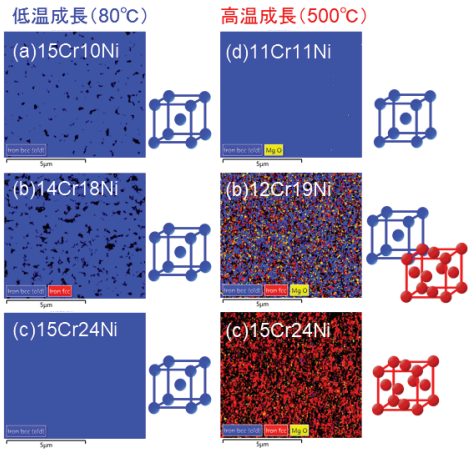


図 2　Fe-Cr-Ni 合金薄膜の相マップ

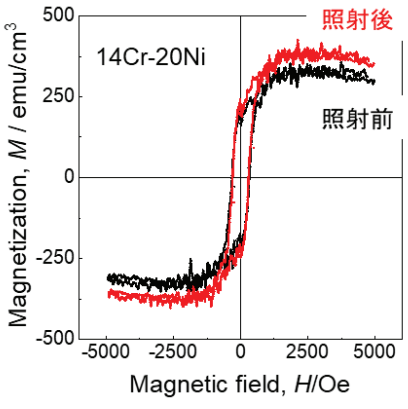


図 3 照射前後の磁化曲線

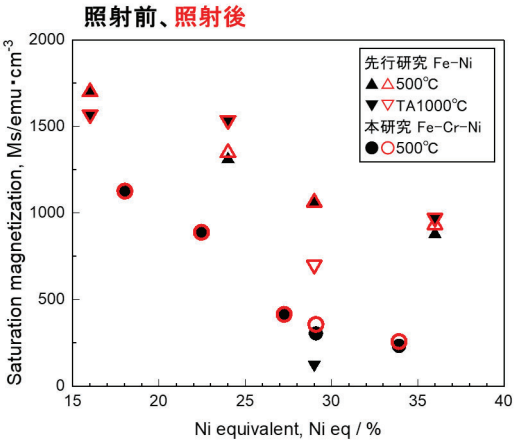


図 4 飽和磁化の Ni 当量依存性

高温下にて高エネルギーイオン照射された酸化物絶縁被覆の微細構造

核融合科学研究所　菱沼 良光

１．研究目的

液体金属や溶融塩を用いた核融合先進ブランケットの要素技術開発において、MHD による液体金属の圧損や透過によるトリチウム漏洩の抑制は大きな課題である。その対策としてブランケット部材への酸化物被覆が検討されており、酸化物被覆層における中性子照射効果は先進ブランケット設計において大変重要である。しかしながら、現状の日本では中性子照射実験は困難な状況である。一方で、重イオン照射は損傷領域が限定されるものの短時間で大きな照射量が期待できるので中性子照射の加速試験に相当し、九州大学応用力学研究所に設置されている重イオン照射システムによる照射実験は非常に有益な装置になる。これまでの共同研究にて、Fig.1 に示すように室温下での重イオン照射によって金属基板と酸化物被覆の界面に非晶質相（アモルファス）が生成することを見出し、そして非晶質相の生成によって被覆層の剥離強度は照射量に応じて低下することを見出した。

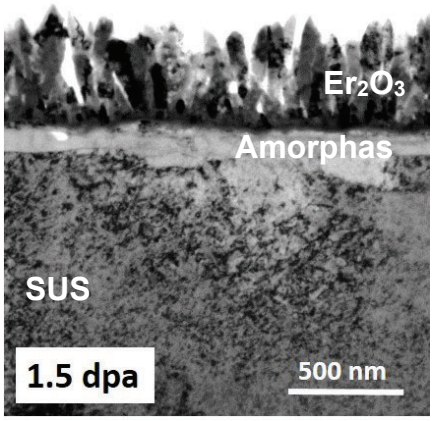


Fig. 1　室温下での 1.5 dpa の照射損傷を受けた Er_2O_3/SUS 断面における STEM 像

そこで、本研究では重イオン照射によるアモルファス相の生成条件を明らかにするために、種々の温度にて重イオン照射実験を行い、微細構造及び剥離強度における照射温度効果について明らかにする。

２．実験方法

Er_2O_3/SUS316 単層被覆材は核融合研の MOCVD 装置にて成膜された。Er_2O_3 被覆は直径 10 mm、厚さ 1 mm の SUS 基板上に成膜し、その成膜条件は 500 ℃の 3 時間とした。なお、Er_2O_3 被覆材の厚さは約 300 nm 程度であると確認した。Er_2O_3/SUS316 被覆材を九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器にて成膜表面に対してイオンビーム照射を実施した。なお、イオン源は 2.4 MeV の Cu^{2+}イオンとした。イオンビーム照射前に TRIM コードにて Er_2O_3/SUS における照射損傷速度を計算した。本研究における高温下での Cu^{2+}イオン照射量は、Er_2O_3 酸化物層における照射レート（0.12×10^{-4} dpa/sec）に対応して、試料温度を 300℃及び 500℃に設定して実施した。試料温度は Fig.2 に示すような試料ホルダーにセットアップし、試料ホルダーの Cu ブロック部材内のヒーターにて Cu ブロック部材を加熱し、熱伝導にて Er_2O_3/SUS 単層被覆試料を加熱した。

Fig. 2　高温下での照射ホルダー

Cu^{2+}イオン照射前後の Er_2O_3/SUS 単層試料に微細組織や微細構造の観察は、X 線回折（XRD）、走査型電子顕微鏡（SEM）及び走査型透過電子顕微鏡（STEM）等の分析装置を用いて実施した。なお、TEM 薄片化試料は、集束イオンビーム加工装置（FIB）にて作製した。

３．結果と考察

３－１．高温下での Cu^{2+}イオン照射前後の Er_2O_3 単層被覆の微細構造変化

Fig. 4 に Er_2O_3/SUS 単層被覆試料における 300℃及び 500℃の Cu^{2+}イオン照射後の断面 STEM を示す。Fig. 3 (a)は 300℃試料、Fig. 3 (b)は 500℃試料を示す。なお、Cu^{2+}イオン照射量は 0.15 dpa である。Fig. 3 (a)に示す 300℃でのイオン照射では、Er_2O_3 被覆と SUS 基板界面に明瞭な非晶質（アモルファス）相の生成は観察できなかった。一方、Fig. 3 (b)に示す 500℃でのイオン照射では、300℃と同様に界面付近におけるアモルファス相の生成は確認できなかった。これは、0.15dpa 程度の低い照射量では室温より高い温度にて照射しても界面付近における微細組織への影響は小さいことを意味している。しかしながら、500℃試料の SUS 基板側において、コントラストの違う組織が観察された。これは、Er_2O_3 と SUS における Cu^{2+}イオン照射損傷レートの違いによるものと考えている。前述したように、TRIM にて照射損傷速度を計算すると、SUS における照射損傷速度は Er_2O_3/SUS 界面から SUS 基板の厚さ方向に向かって上昇し、Er_2O_3 層と比較して約 5 倍大きくなっている。つまり、本研究における照射量は Er_2O_3 相にて見積もった 0.15 dpa であるために、SUS 側では 0.75 dpa 相当の照射損傷を受けていると考えられる。SUS 基板で観察されたコントラストの違う組織の生成は、SUS 基板中で起こった Cu^{2+}イオンによる弾き出し現象による微細組織の変化であると考えられる。

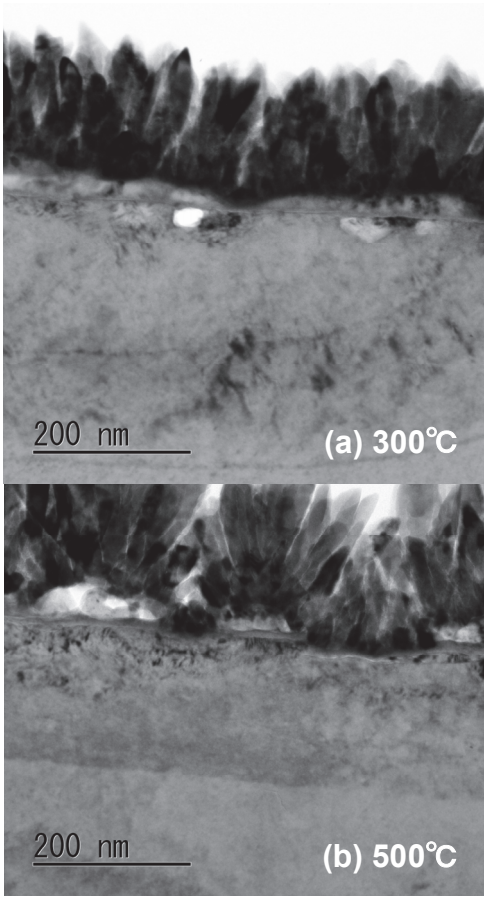


Fig. 4　高温下での 0.15 dpa の Cu^{2+}イオン照射後の Er_2O_3/SUS 単層被覆試料の断面 STEM 像 (a) 300℃、(b) 500℃

今後は、500℃試料における微細組織変化をより詳細に検討する。特に、STEM-EDX による Fe、Cr 及び Ni 等の元素分布解析を実施する。また、500℃における Cu^{2+}イオン照射実験をもっと多くのイオン照射損傷を与えて、スクラッチ試験による剥離強度を評価することを考えている。そして、高温での 1.5 dpa 相当のイオン照射損傷した試料を用意し、剥離強度や微細組織における Cu^{2+}イオン照射損傷量と照射温度との相関性を見出したい。

トロイダルプラズマにおける非線形 MHD 現象の 3 次元構造シミュレーション解析

核融合科学研究所　ヘリカル研究部　佐藤雅彦

本研究では、PLATO トカマクプラズマを対象として、磁気流体力学(MHD)不安定性が形成する 3 次元構造形成のメカニズムを非線形シミュレーションにより解析することを目的とする。これまでに PLATO トカマクにおける内部キンクモード、および、バルーニングモードの非線形シミュレーションを実施し、内部キンクモードとバルーニングモードの成長率が近い値を持つ場合、非線形段階にて両モードが相互作用する可能性を示してきた[1]。本年度の研究においては、磁気座標上でのフーリエモード分解、および、動的モード分解等の導入を進めることで、内部キンクモードとバルーニングモード間の相互作用を詳細に解析するための基盤を整備した。

本研究では、統合輸送コード TASK の EQU モジュール[2]を用いて、PLATO トカマク実験での外部コイル条件を考慮した磁場平衡を構築し、非線形 MHD シミュレーションコードである MIPS コード[3]を用いて解析を行った。MIPS コードは、円柱座標系のもとで 4 次精度の有限差分法を用いて空間方向を離散化し、時間積分は 4 次精度のルンゲクッタ法を用いている。MIPS コードには、一流体モデル、および、Hazeltine-Meiss モデル（ドリフトモデル）が組み込まれているが、本研究では一流体モデルを用いた。

図 1 に、磁気軸での安全係数が q0=0.8 の平衡に対する MHD シミュレーションから得られた、ポロイダル断面における圧力分布の時間発展を示す。この平衡では、n=1 の内部キンクモードと、トロイダルモード数(n)が 10 程度のバルーニングモードがともに不安定である。バルーニングモードの線形成長率の方が内部キンクモードの線形成長率よりも大きいため、非線形初期段階(t=350 τ_a)においては、プラズマ周辺部にてバルーニングモードによる圧力分布の変形が見られる。バルーニングモードの飽和後も n=1 の内部キンクモードは成長を続ける。その結果、図 1(d)に示すように、内部キンクモードによるコア領域の吐き出しが発生する。図 2(a)では、非線形段階である t=490 τ_a での(m,n)=(1,1)モードと n=13 モードの圧力揺動の径分布を示している。比較のため、キンクモードが最も不安定な平衡に対するシミュレーションから得られた、非線形段階でのモード構造を図 2(b)に示した。図 2(b)が示すように、内部キンクモードが最も不安定な場合においては、プラズマ中心近傍で励起した成分がプラズマ端まで伝播する。一方、図 2(a)に示した内部キンクモードとバルーニングモードが共存する場合においては、n=1 モードの揺動は、バルーニングモードが励起されている位置で一度弱まり、振幅を小さくして外側領域に伝播していることが新たにわかった。

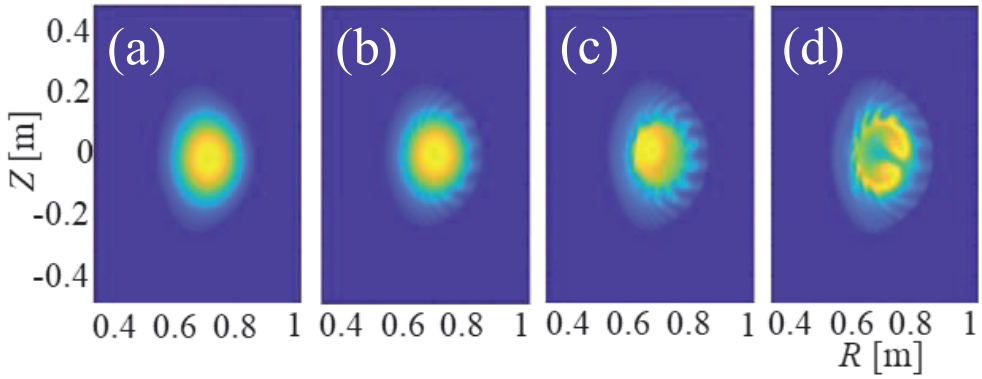


図 1. 非線形 MHD シミュレーションから得られたポロイダル断面における圧力分布の時間発展。各図の時刻は、(a) t = 0、(b) t = 350 τ_a、(c) t = 460 τ_a、 (d) t = 500 τ_a である。ここで、 τ_a はアルフヴェン時間である。

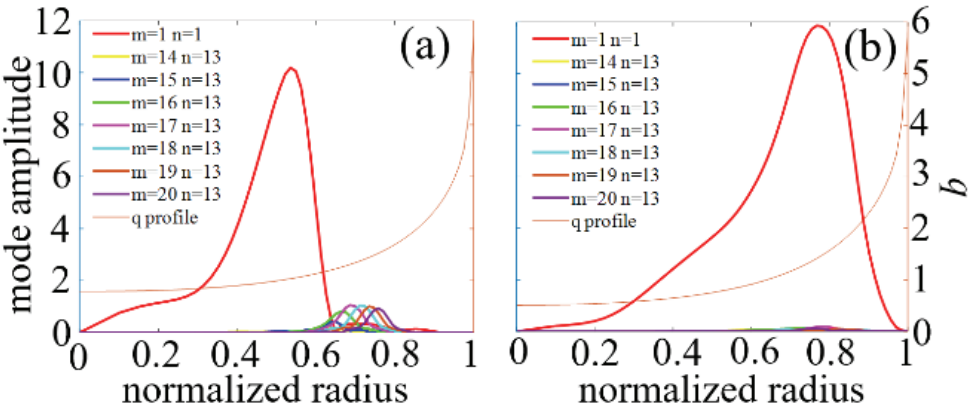


図 2. (a) t = 490 τ_a における(m,n)=(1,1)モードと n=13 モードの圧力揺動のモード構造。(b)内部キンクモードが最も不安定な平衡に対する非線形 MHD シミュレーションから得られた非線形段階での(m,n)=(1,1)モードと n=13 モードのモード構造。

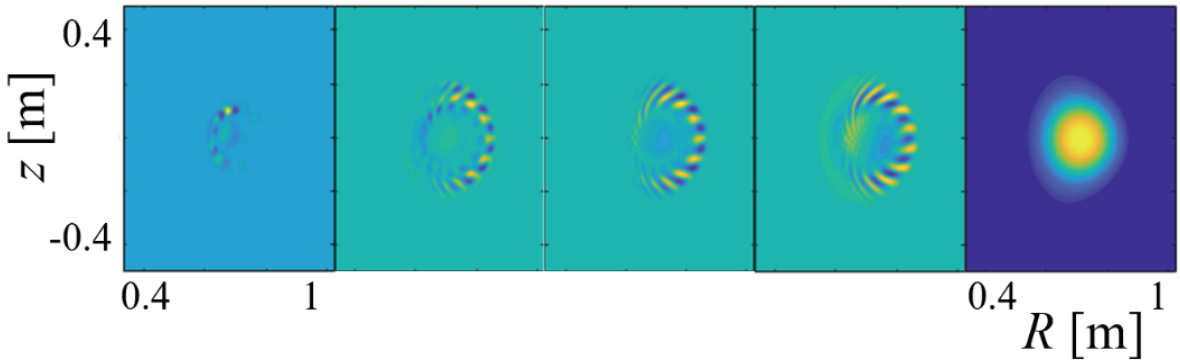


図 3. 動的モード分解により得られた局在モード、バルーニングモード、バルーニングとキンクモードの混合、平均成分。

非線形 MHD シミュレーションから得られた内部キンクモードとバルーニングモードの相互作用の詳細な解析を進めるために、モード間の相互作用の解析において近年注目を浴びている動的モード分解を用いた解析方法の導入も実施した[4]。動的モード分解では、フーリエモードでは多くのモードの足し合わせとして表現される特徴的構造の全体像の抽出が可能となる。図 3 に圧力に関する動的モード分解モードの結果を示した。各モードに高波数局在成分や高波数成分に加えたプラズマ中心付近キンクモード成分が現れている。これは高波数成分とキンクモード成分の成長率が同程度であるため、双方の成分が混在して抽出されたものと考えられる。今後は、本年度導入した動的モード解析を用いて、内部キンクモードとバルーニングモード間の相互作用についてさらに詳細な解析を行っていく予定である。

[1] S. Tomimatsu, et al., Plasma Fusion Res. **15** (2020) 1403052.
[2] http://bpsi.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/
[3] Y. Todo, et al., Plasma Fusion Res. **5** (2010) S2062.
[4] 黒田他、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第 25 回支部大会 (2021/12/18-12/19) 18pA03

フッ化物溶融塩中での水素同位体挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院　片山一成

【緒言】

高温熱媒体である溶融塩は、太陽熱発電プラント、溶融塩原子炉、高温水素製造システムなどエネルギー利用分野への幅広い適用が期待されている。また、種々の金属に対する溶解性能が高く、分離抽出操作や、金属被覆技術へも利用されている。大量の溶融塩を用いたシステムの構築には、高温溶融塩循環技術の確立が必要であり、システムを構成する各機器の開発が望まれている。リチウム含むフッ化物溶融塩を冷却材として用いる溶融塩炉では、リチウムと中性子との反応によりトリチウムが生成される。トリチウムの一部はフッ素と結合し、腐食性の強いフッ化水素として脱離するため、その挙動を把握して制御する必要がある。また、溶融塩への水素溶解度が低いことから、生成されたトリチウムの一部が金属配管を透過して外部に漏洩することが懸念される。さらに、溶融塩は製造過程で水蒸気を取り込む可能性があり、不純物として残留する水蒸気との同位体交換反応を通じて、トリチウムが水蒸気状で滞留する可能性も考えられる。トリチウムの安全管理には、溶融塩から放出されるトリチウムの化学形を把握しておく必要がある。実効的な水素溶解度を高めて、トリチウムの透過漏洩量を低減するために、溶融塩にチタン等の水素吸蔵材料を添加する方法が提案されている[1]。先行研究では、チタン(Ti)添加溶融塩に対して、水素含有ガスの吹込みにより、その有効性が示されている[2]。しかしながら、中性子照射により生成されたトリチウムに対するチタン添加の効果や、トリチウム放出化学形への影響については、評価されていない。本研究では、フッ化物溶融塩 FLiNaK を試料とし、京都大学研究用原子炉にて中性子照射を行い、溶融塩中にトリチウムを生成させた。その後、九州大学において、照射試料を加熱し放出されるトリチウムの挙動を観測した。得られた結果から、トリチウム物質移動現象について考察した。

【実験方法】

アルゴン(Ar) 雰囲気に制御されたグローボックス中において、FLiNaK の原材料である LiF、NaF、KF 粉末をモル比 46.5 : 11.5 : 42 の割合で混合調整し、Ni 製るつぼに入れ十分混合した。Ni 製るつぼを SUS304 製ポットに設置し、ガス給排気ポート及び熱電対挿入ポートが備えられたフランジで密封した。グローブボックスから取り出し、ポットを覆うようにフレキシブルヒーターを巻き付けて、Ar ガスでバブリングしながら、600℃まで昇温し、一定時間温度を保持した。その後自然放熱し、常温に戻した。自然放熱開始後の溶融塩温度の経時変化を観測し、温度降下の過程で FLiNaK の融点である約 454℃においてプラトー領域があらわれることを確認した。プラトー領域は、液相から固相への相変態が生じていることを示す。水素吸蔵金属の添加によるトリチウム放出挙動への影響を調べるため、一部の試料には、0.5wt%及び 2.5wt%で Ti 粉末を添加した。

作製した FLiNaK 試料を Ni 製るつぼから取り出し、粒子状にして少量ずつ片封じ石英管(内径 4 mm, 長さ 7 mm)に真空密封した。試料が封入された石英管を京都大学複合原子力科学研究所に移送し、試料を緩衝材で包み、ポリエチレン製のカプセルに封入した。圧気輸送管を通じて、原子炉炉心内部に送り、設定時間照射した後に炉外に取り出した。中性子フラックスは 5.5×10^{12} n/s/cm^2、照射時間は 5 分とした。試料を一定期間 KUR で保管し、その後九州大学アイソトープ総合センター伊都地区実験室に輸送した。トリチウム放出実験の装置概略図を図 1 に示す。中性子照射した試料を Mo 製るつぼに充填し、るつぼを石英反応管内に設置した。反応管にアルゴンガスを流通させながら加熱し、トリチウムを放出させた。加熱温度は 600℃、あるいは 700℃とした。放出されるトリチウムは TF、HT (T_2)、HTO (T_2O)の 3 つの形態であると考えられる[3]。そのため、トリチウムの 3 つの化学形を分けて捕集した。まず、コイル状の銅配管を約-70℃に冷却するコールドトラップを設置し、内壁に水蒸気を凝集させることで HTO を捕集した。次に、水バブラー①で親水性の TF を捕集した。最後に、酸化銅ベッドで HT を親水性の HTO に酸化させて、水バブラー②で捕集した。水バブラー③は水バブラー②でトリチウムが回収されていることを確認するために設置している。水バブラー中の水を一定時間おきに 1cc ずつサンプリングし、トリチウム濃度を液体シンチレーションカウンタで測定した。

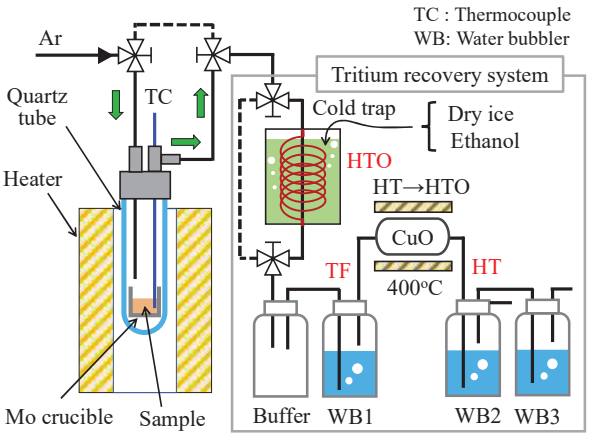


図 1　トリチウム放出実験装置概略図

【結果及び考察】

Ti を含まない FLiNaK、及び 0.5wt%Ti 混合 FLiNaK は、照射後にカプセルを開封したところ、石英管が破損しており、空気との接触が確認された。Ti を含まない FLiNaK を 500℃で 10.5 時間加熱し、トリチウム放出を観測した。その後、るつぼ内を確認すると溶融が不十分であることがわかった。そこで引き続き、700℃で 13.5 時間加熱を行った。図 2 に化学形ごとのトリチウム放出量を示す。FLiNaK は高い吸湿性を有し、長期間空気に曝露された場合ほとんどのトリチウムが水蒸気状（T_2O もしくは HTO）で放出されることが明らかにされた。この結果は、FLiNaK 循環ループ稼働初期や、機器のメンテナンス後には、水蒸気状トリチウムに対する回収設備が重要となることを示す。十分に溶融されていない 500℃加熱において、87%のトリチウムが放出されており、固体状態でも比較的速やかにトリチウムが放出されることが明らかとなった。このことは、中性子照射された FLiNaK が、温度制御の不具合により冷却管流路内で固化した場合も、トリチウムの放出が続くことを示しており、配管から透過漏洩するトリチウムへの対策が必要であることを示す。図 3 に空気接触した 0.5wt%Ti 混合 FLiNaK からのフッ化水素状および水素状トリチウムの放出曲線を示す。なお、トリチウムの多くは水蒸気状で放出されており、コールドトラップに蓄積されるため、放出速度の時間変化は観測できない。フッ化水素状よりも、水素状トリチウムの放出量が多いことがわかった。Ti の水素吸蔵能は、温度が低いほど高くなることから、700℃加熱よりも、600℃加熱の方が HT 放出量が少なくなると予測していたが、600℃加熱の方が放出量が多かった。空気接触によって取り込まれた水蒸気により Ti 表面が酸化され、600℃ではトリチウム吸蔵能が低下したものの、700℃加熱では吸蔵能がやや回復しトリチウムの吸蔵が比較的進行したと推測される。

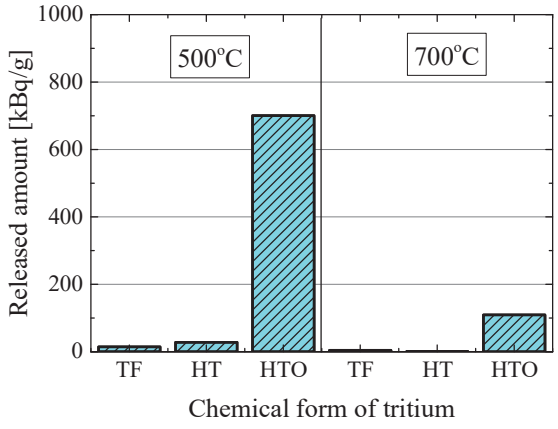


図 2 空気接触 FLiNaK からの T 放出量

2.5wt%Ti 混合 FLiNaK は、照射時の石英管が割れることはなく、空気と接触することなくトリチウム放出実験が行えた。放出化学形比率は、水素状が 70%、水蒸気状が 25%、フッ化水素状が 5%であった。図 4 にフッ化水素状及び水素状トリチウムの放出曲線を示す。当初予測通り、700℃加熱よりも、600℃加熱の方が HT 放出量が少なく、加熱温度が低いほどトリチウムが Ti に吸収され放出速度が低下することが確認された。600℃から 700℃へ昇温した際には、トリチウム放出速度が増加しており、Ti からの放出が生じたことを示唆する。

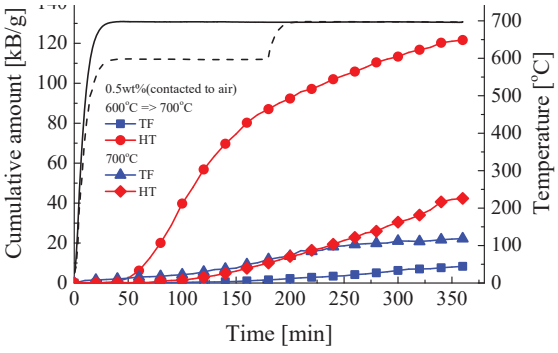


図 3 空気接触 0.5wt%Ti 混合 FLiNaK からの T 放出

【結言】

- 長期間空気に曝された FLiNaK からは、トリチウムが水蒸気状で放出される。
- 融点以下の温度であっても FLiNaK からは比較的速やかにトリチウムが放出される。
- トリチウム放出化学形は、水素状＞水蒸気状＞フッ化水素状である。
- FLiNaK に Ti を添加することで一部のトリチウムは、Ti に吸蔵され、トリチウム放出速度が低減される。

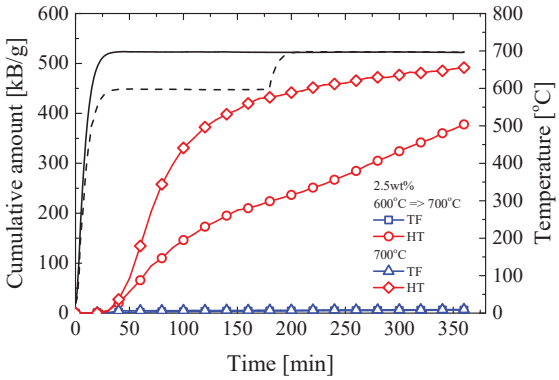


図 4 2.5wt%Ti 混合 FLiNaK からの T 放出

参考文献

[1] A. Sagara et al., Fusion Engineering and Design, 89 (2014) 2114-2120.
[2] J. Yagi et al., Fusion Engineering and Design, 98-99 (2015) 1907-1910.
[3] Y. Edao et al., Fusion Science and Technology, 55 (2009) 140-151.

金属間化合物合金における空孔型欠陥と水素原子の相互作用に関する研究

大阪府立大学・大学院工学研究科　堀史説

はじめに

核融合炉でのプラズマ壁相互作用において水素は重要な問題の一つである。これは、核融合反応閉じ込めのためのプラズマによる水素原子の材料中への侵入による脆化やボイドスエリングなど機械的強度劣化を引き起こすためである。このような相互作用は、熱伝導などの材料特性とも密接な関係を有し、さらに高エネルギーの水素は材料中に格子欠陥も同時に生成するため、これらの欠陥と水素の相互作用について様々な研究が進められており、このような欠陥への捕獲特性を生かした水素の貯蔵などへの応用も検討されている。しかし、材料中の水素状態の評価は他の元素に比べて非常に難しく、微量検出や欠陥との結合捕獲状態などの評価は限られた手法で特定のものに限られている。陽電子消滅法は原子レベルでの空孔の検出に優れており、局所的な電子密度分布の評価が可能であることから空孔に水素が捕獲された際の電子状態の変化による空孔への水素捕獲の評価が可能になってきた。これまで、体心立方格子(bcc)を有する金属での水素同位体の貯留が大きな問題になっており、タングステン中の空孔型欠陥に多量の水素が捕獲されるという報告もある。我々の研究においても、bcc を基本構造とする金属間化合物で空孔への水素原子捕獲とその安定化が少しずつ明らかになって来たが、必ずしも全ての合金で空孔への水素捕獲が起こるわけではなく、さらに同じ bcc 構造を基本とする合金でもその挙動が全く異なることを実験と計算の両側面から示してきた。中でも bcc 構造を基本とする規則構造の Fe-Al 合金は極めて特異な合金であることが次第にわかってきた。すなわち、合金への水素の侵入が非常に容易で、空孔の有無によって水素吸収量が増加する。このような現象は他の同じ B2 型 Fe-Rh 合金や Ni-Al 合金では観測されず、第一原理計算での空孔と水素の相互作用の結果とも良く対応している。しかし、Fe-Al 合金は室温での熱平衡空孔量は理論上 ppm 程度であるにもかかわらず、水素が比較的少量ではあるが保持されている実験結果がこれまで得られており、これは合金化で残留した空孔や転位などの欠陥の影響であることが考えられる。そこで、今回は化学量論組成の鉄とアルミニウム 1：1 で合金化した試料を B2 構造を保持できるような空孔除去及び転位などの欠陥除去熱処理を施し、それらに対して電子線照射の有無による注入水素の挙動を調べた。水素の注入方法は電気化学的手法である電界水素注入を行い、その前後での空孔状態の陽電子測定と加熱昇温による水素の放出挙動について調べた。

実験方法

試料はアーク溶解にて作成した Fe-50at.%Al インゴットをおよそ 10 mm×10 mm×1 mm の板状に切出し表面を鏡面研磨したものを使用した。この試料を 3×10^{-4} Pa の真空中で、1273K で 20 時間焼鈍後に 50K 毎に 5 時間の保持しながら 973K まで温度を下げて 72 時間保持した後に急冷した。この試料はエックス線回折により B2 単相であることを確認している。これらの試料に京都大学複合原子力研究所(KURRI)にて線形型電子線型加速器を用いて 8 MeV の電子線を照射温度 35～40℃で照射量 1×10^{18} e^-/cm^2 の照射を行った。照

射前後の試料に対しチオシアン酸アンモニウム溶液を用いた電解水素チャージによる水素の注入を 0.3 A/cm^2 で 10 時間行った。照射前後で陽電子消滅ドップラー拡がり測定を行った。また、これらの試料に対して昇温脱離分析（TDA）測定により等時焼鈍による水素の放出挙動を調べた。昇温速度は 1 K/s で四重極質量分析計を用いた水素放出量測定を行った。

実験結果

図 1 は Fe50%Al の電子線照射前後の試料に水素注入した場合の水素放出挙動を示している。48%Al の合金の場合は電子線照射での水素放出のメインピークは 500℃付近であった。このため、48%Al 合金では照射前に残留していた多くの空孔などの欠陥とも相互作用して２次的欠陥として複空孔などサイズの成長した欠陥への水素捕獲であったことが考えられる。これに対し、今回の試料では電子線照射前にはそのような高温での明確なピークは観察されておらず、照射前後の差分でも電子線照射を行うことにより明確な放出ピークが 380℃付近に現れている（図２）。そのため、今回の実験では単空孔への水素捕獲を示すことができた。また、今後は捕獲水素の空孔サイズ依存性についての課題が浮かび上がり、水素と相互作用する欠陥状態の詳細な同定には試料作成時の熱処理が重要な鍵となることがわかった。

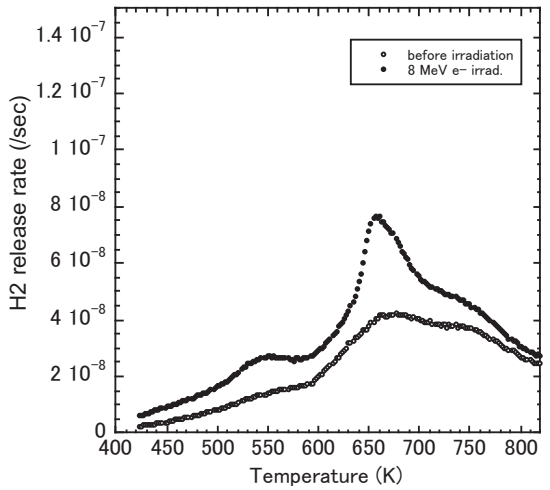


図１　水素注入した電子線照射前後のFe50%Al合金のTDA放出挙動

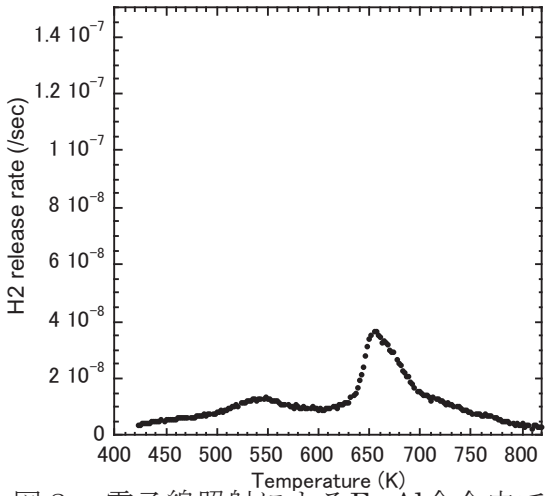


図２　電子線照射によるFe-Al合金中での空孔捕獲された水素量（照射前後の差分）

謝辞：本研究は九州大学応力研の共同利用の助成を受けており、同研究所の大澤一人先生及び京大複合原子力研の徐ギュウ准教授との共同研究の一環として実施している。また、本研究は一部を関西原子力懇談会の助成により実施させて頂きました。

研究成果発表

[1] 大友彦卓：Fe-Al 金属間化合物中における欠陥と水素放出挙動の研究、大阪府立大学大学院修士論文、2022.02

[2] F.Hori, Y.Sumikura, A.Takano, K.Sugita, Y.Kaneno, K.Ohsawa, X.Qiu, M.Maekawa, A.Kawasuso, Y.Saito, Hydrogen trapping behavior at vacancies introduced by electron irradiation with different energy in B2 ordered Fe base alloys, Jpn. J. Appl. Phys. conf. ser. (2021) accept.

種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー密度入射損耗解析法の開発

糟谷　紘一[A,B]，　コチャエフ　オレグ[B]，　井澤　靖和[B]，　徳永　和俊[C]，　川路　均[D]
[A]応用ながれ研究所，　[B]レーザー技術総合研究所，　[C]九州大学応用力学研究所，
[D]東京工業大学フロンティア材料研究所

１．概要　今年度は、レーザー変位計の利用により、表題解析法開発の可能性を調べた。デモ機併用により損耗厚さを測定したが、超音波測定法に固有のレーザー損耗厚さは十分薄く、本測定法による被測定材料の表面損耗量が許容範囲内であることを示した。代表的な核融合用構造材料等の高密度エネルギー入射損耗解析が、本超音波法により問題なくできることを示した。変位計の残り部分の追加調達により、次年度の成果がさらに期待できる。

２．研究目的　九州大学応用力学研究所の材料加熱装置を用いて諸材料を加熱し、各種計測装置により、高温下での表面損耗量（喪失総質量）等を測定する。これらの結果を生かして、極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指すことが、本共同研究の最終目標である。本研究では、近く再開する高熱流照射のために、関連計測装置の準備と新規な方法の調査・提案を行った。本年度の主要成果として、変位計の活用による試験サンプルの表面形状測定と、関連厚さ測定について、（１）被測定物に損耗の悪影響が出ないように、超音波法が使えることと、（２）サンプル厚さの極小値の測定ができることを、　それぞれ確認することができた。

３．実験装置

3-1 超音波測定システム装置　各種のインフラ破壊予防を目的として、本法による建築構造物の非破壊検査の重要性が増している。本研究は、本方法を、主として核融合炉材料に適用し、脱炭素社会の実現に寄与する試みに属する。実験装置（レーザー技術総合研究所・大阪大学吹田キャンパス支所）の全体写真を参考文献（共同利用研究報告書・2020 年度(2020-2021)東工大フロンティア材料研究所 2021/6, No.25, p23 及び p109 中の図４）に示す。レーザー技術総合研究所全体の本務の多忙な使用計画・実施から、この装置の本共同研究のための稼働は、通常、年度替わり付近の１－２日のみであった。

3-2 変位計測定システム装置　これまで長年にわたり使用してきたレーザー変位計は、使用できる被測定物表面の色や輝度や形状が限られた範囲のものであり、範囲外のサンプル測定には、より進化した変位計の調達が必要であった。そこで本研究では、マルチカラー同軸変位計を新規に調達するための準備を進めた。本年度配分研究経費内に入る部分を本年度に調達し、不足経費を次年度以降に申請することにした。但し、装置納品時の検収のために、次年度以降部分等の事前デモを依頼し、システム全体の稼働を確認した。変位計システム全体写真を図１に示す。黒色の２連小ボックスのある左半部分が変位計で、中央右寄り部にサンプルステージ駆動と表面高さ計測制御用パソコン（ウィンドウズ・ロゴが画面に出ている）、そのすぐ右側に変位計ヘッド制御計測用パソコン、その奥にサンプル稼働ステージ（変位形ヘッドは、これにマウントされている）がある。変位計ヘッド本体とサンプルステージ駆動計測部の使用 USB 規格の違いから、パソコンは必ず合計２台必要であった。稼働中の変位計計測システム近影を図２に示す。

４．実験結果 超音波厚さ測定レーザー照射後の各種サンプル材料の変位計計測結果（代表例）
超音波励起用と超音波計測用の両レーザー光照射後に、各種サンプル材料表面を変位計計測システムにより計測した。代表的な結果の例を図３に示す。将来の核融合装置用候補金属材料としてベリリウム（ここでは放射性を避けるための代替アルミニウム）とタングステン、非金属材料として炭化ケイ素とカーボンの結果を示した。損耗厚さの暫定測定結果は数ミクロンから 20 ミクロン程度（但し炭化ケイ素の場合は 40 ミクロン程度であるが、これはむしろ超音波励起用レーザー

光の出力値を特別に大きくした結果で、超音波計測法に必要以上の励起レーザー照射の場合であり）、全体として超音波法の厚さ測定利用に問題ないことが判った。

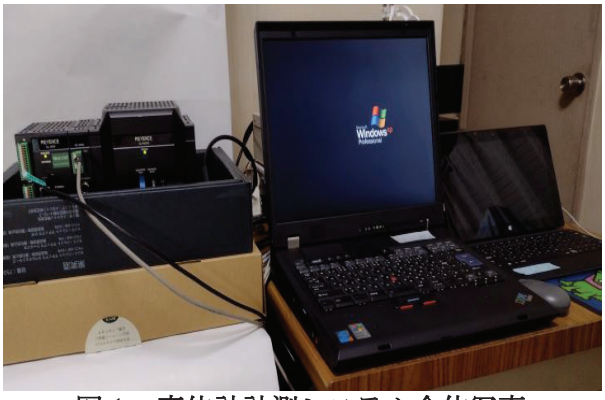


図１　変位計計測システム全体写真

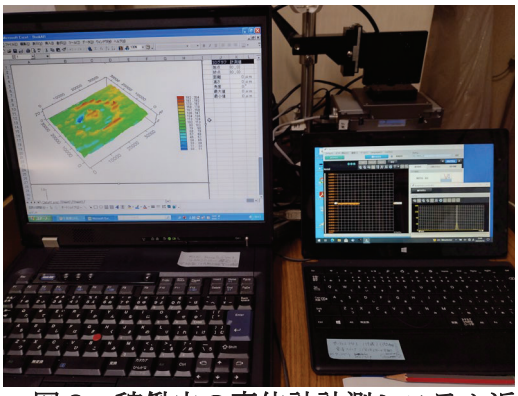
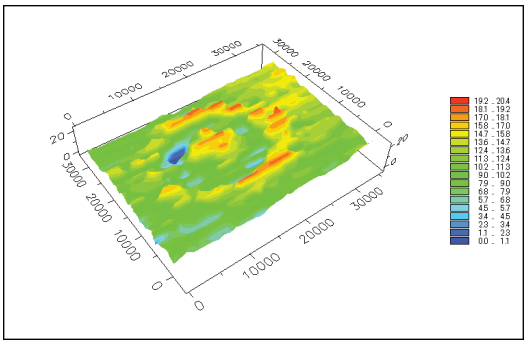
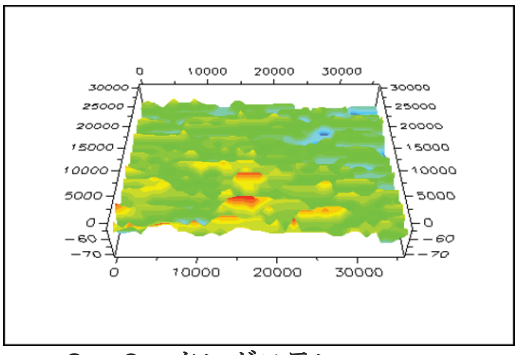


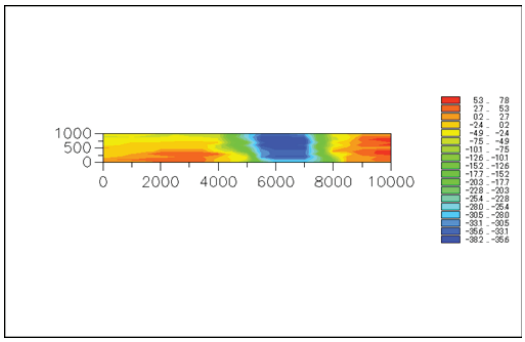
図２　稼働中の変位計計測システム近影



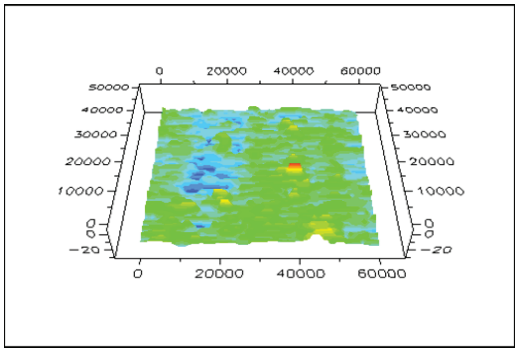
３－１　アルミニウム



３－２　タングステン



３－３　炭化ケイ素



３－４　カーボン

図３　超音波厚さ測定レーザー照射後の各種サンプル材料の変位計計測結果（代表例）

５．　あとがき　　今後、今回使用した変位計の要追加部分の調達をして、実験データの集積をさらに進め、本報告書では割愛した、変位計による薄い可視・近赤外光透過バルク材料そのものの厚さ測定や、別のレーザー分光法を含む先進計測法について詳しく検討する。

６．　謝辞　この研究は、九州大学応用力学研究所の国内共同研究費（分類番号 2021FP-23）、及び、東京工業大学フロンティア材料研究所一般 B 共同研究費（採択番号 2021-17）の援助を受けて実施した。本研究を進めるにあたり、東京工業大学フロンティア材料研究所（共同利用推進室）、九州大学応用力学研究所（糟谷直宏准教授、拠点事務室）、応用ながれ研究所（糟谷惠子副代表）、核融合科学研究所、レーザー技術総合研究所 等の各位にお世話になった。また、（１）変位計１種の部分調達（九大と東工大）とデモ機２種貸出しを（株）キーエンス・塚本努様より、（２）材料サンプルの駆動・計測ステージの既有装置（応用ながれ研究所）の試験再稼働について（株）コムス・石原和仁様よりご援助を受けた。あわせて謝意を表します。 2022/2/18 報告

プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究

京都大学大学院工学研究科　高木郁二

1．目的

プラズマ対向壁表面に吸着した水素原子が分子として放出される過程は、大別して表面原子どうしの再結合と、飛来する原子と表面原子との分子生成があり、これらの反応速度は、表面からの水素放出量や放電洗浄によるトリチウムの除染効率などを評価するうえで重要である。本研究では、QUEST の堆積層における反応速度を定量的に調べた。

2．実験方法

試料は 2017 年に QUEST の赤道部分に数ヶ月装着し、堆積層が生成した SUS316 板である。図 1 に示すように、この試料を重水素の RF プラズマに曝し続けた。それと同時に 45° 方向から 1.2MeV に加速した $^3He^+$イオンビームを照射し、重水素との核反応によって発生した陽子のエネルギースペクトルから試料中の重水素の深さ方向分布を測定した。

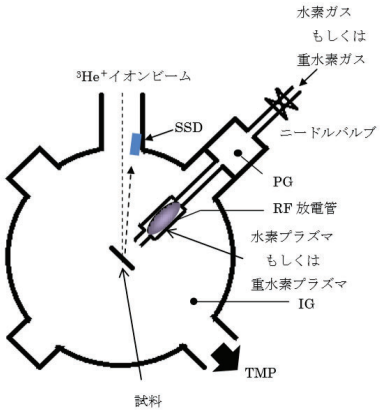


図 1　核反応法とプラズマを組み合わせた実験装置

3．実験結果

深さ方向分布は表面に重水素が集中しており、バルク部分の濃度はかなり低い値であった。そこで表面から 0.8 μm の深さまでの濃度を積分した面密度を以下で用いた。

室温において、重水素プラズマに曝し（△）、水素プラズマに切り替えて曝し（○）、再び重水素プラズマに曝し（△）、最後に真空で放置した（◇）場合の重水素面密度の時間変化を図 2 に示す。30 分という測定時間では統計誤差がやや大きいが、重水素プラズマに十分な時間曝したときは面密度が飽和し、水素プラズマに曝すと重水素は交換して減少するがゼロにはならず、真空放置では重水素は減少しないことが分かった。これらは、同位体の除去には真空放置よりも別の同位体のプラズマ曝露が極めて有効であることを示している。また、プラズマ曝露でも除去できないほど深く捕捉された重水素があることもわかった。

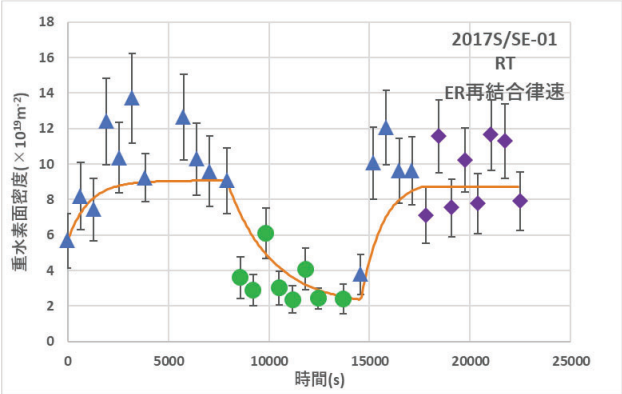


図 2　室温における重水素面密度の時間変化

一方、373K や 473K で同様の実験を行うと、室温とは傾向が異なり、図 3 に示すように真空放置でも重水素面密度が減少した。

4．考察

深さ方向の分布は考えず、水素は表面再結合または分子生成によって放出されると仮定すると、速度方程式は以下の通りとなる。

$$L\frac{dC_i}{dt} = f_i a\left(1 - \frac{\Sigma C_i}{C_0}\right) - 2k_{Lii}{C_i}^2 - k_{Lij}C_iC_j - k_{Eii}f_iC_i - k_{Eji}f_jC_i \quad (1)$$

ここに添え字 1 と 2 はそれぞれ水素と重水素を表し、C_0は水素サイト密度、C_iは水素同位体 i の濃度、Lは堆積層の厚さ、aは飛来した水素原子が表面で吸着する確率、f_iは水素フラックス、k_{Lij}は水素 i と水素 j の表面再結合定数、k_{Eij}は飛来した水素 i と試料表面の水素 j の分子生成速度定数である。式(1)はこのままではパラメータが多すぎるため、支配的な過程に注目して解析を行った。

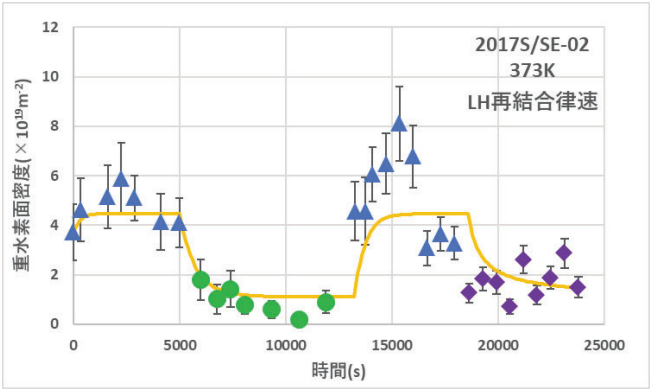


図３ 373K における重水素面密度の時間変化

室温では、真空放置しても重水素が減少しないこと（図２◇）から、表面再結合の速度は極めて遅く、分子生成によってのみ水素が放出されると考えられる。この仮定のもとで式(1)を解いたところ、図２の曲線に示すように実験値をよく再現することができた。

373K や 473K については、例えば図３◇のように真空放置すると十分に重水素が減少することから、表面再結合による放出が支配的であると仮定し、式(1)を用いて解析したところ、図３の曲線に示すように実験データを再現することができた。

温度による支配的な過程の変化は、表面再結合は熱活性化過程であって、温度が高いほど活性であるのに対し、分子生成は非熱的な過程を含んでおり、表面再結合ほど顕著な温度依存性を示さないことから訂正的に説明できる。つまり、分子生成は高温でも低温でも同じ程度の速度定数を持っているので、表面再結合がほとんどおこらない低温では支配的となり、表面再結合が活発な高温では無視できるくらいの速度になってしまうと考えられる。表面再結合定数k_{Lij}は温度 2 点でしか得られていないため、活性化エネルギーを求めるには至っていないが、仮に 373K と 473K における両者の値をアレニウス図上で室温まで外挿できるとすると、373K における値の 1/100 程度になる。この大きな差は上の説明を支持している。

本研究では捕捉サイトの存在を無視して解析した。低温では真空放置で水素が放出されないことから、この仮定は妥当と考えられるが、高温では水素プラズマに曝しても真空に曝しても同じように重水素濃度が減少していることから、脱捕捉も放出に寄与している可能性がある。表面再結合と脱捕捉の反応の次数がそれぞれ２次と１次であることから原理的には両者を区別することはできるが、実際には統計誤差が大きいために困難であった。

研究成果

家入大周「堆積層のあるプラズマ対向壁における水素同位体交換過程」、日本原子力学会 2022 年春の年会ポスター発表 2022.3.16-17（Web 開催）

研究組織

代表者	高木郁二	京都大学大学院工学研究科　教授
研究協力者	花田和明	九州大学応用力学研究所　教授
研究協力者	家入大周	京都大学大学院工学研究科　修士２年
研究協力者	蒋　振宇	京都大学大学院工学研究科　修士２年
研究協力者	高田　克	京都大学大学院工学研究科　修士２年

長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程の解明と制御

九州大学応用力学研究所　中村一男

目的：QUEST および LHD における長時間放電を支配する壁排気について、タングステンに特化してその物理過程の解明と制御を目的とする。LHD におけるヘリウム長時間放電では、Phase 1 において高い正の排気率を示し、Phase 2 において負の排気率に転じ、Phase 3 において再び正の排気率が復活する。壁飽和と堆積層で解釈されている。QUEST における水素長時間放電では、Phase 1 において高い正の排気率を示し、粒子供給は時間とともに減少する。Phase 2 において粒子供給は停止したり再開したりを繰返す。Phase 3 において粒子供給は全く行われなくなり、Hα一定制御不可となる。高温壁における APS-W の壁排気で解釈されている。本共同利用研究では、APS-W の壁排気の物理素過程を解明するとともに、その制御の方法の探索を目的とする。

はじめに：タングステン（W）は高融点、高熱伝導度、低熱膨張率、高質量密度を有する耐熱材料である。Wコーティングは核融合炉における冷却配管、熱シールドなどの表面特性の改善に利用される。Wコーティングの技術として APS と VPS がある[1]。溶射Wの壁排気の物理素過程を解明するには、溶射過程の解明、溶射Wの特性評価が必要である。溶射Wの熱的特性評価として、電子ビームを熱源とした熱負荷装置を用いた熱負荷実験、市販ソフトウェア ANSYS を用いた熱解析が共同利用研究でなされている[2]。また、タングステン（W）を ITER や原型炉のダイバータ板として使用する計画である。その使用に際しては破壊靭性の評価が必要である[3,4]。熱負荷実験後、破壊靭性実験後の試料の表面付着物の確認や損傷発生原因の推定のため、九州大学応用力学研究所では昇温脱離ガス分析(TDS)装置が活用されている[5-6]。本 TDS 装置における昇温加熱制御、ガス分析データの入出力、データ解析、解析結果表示は DOSV パソコンにて実行されているので、Windows10 パソコンに移行すべくハードウェアおよびソフトウェアを更新した。昇温加熱制御においては PID (Proportional Integral Differential) 制御を採用しているが、その制御パラメータの最適化について報告する。

PID 制御：TDS 装置における昇温加熱制御対象と制御系を次の微分方程式でモデル化する。

$$\rho c V \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + hA\,(T - T_{\mathrm{C}}) = RI^2$$

$$I = \frac{I_{\max}}{T_{\max}} K_{\mathrm{P}} \left(1 + \frac{1}{sT_{\mathrm{I}}} + sT_{\mathrm{D}}\right)(T_{\mathrm{S}} - T)$$

ρは加熱ヒータの密度、cは比熱、Vは体積、hは熱伝達率、Aは冷却水との接触面積、Rは抵抗である。Tは温度、T_{C}は冷却水温、T_{S}は設定温度、$T_{\max}$は最大温度である。Iは加熱ヒータの電流、$I_{\max}$は最大電流である。K_{P}は比例ゲイン、T_{I}は積分時間、T_{D}は微分時間である。sはラプラス変換の微分演算子である。図 1 に Scilab/Xcos による昇温加熱制御モデルを示す。目標値（設定値）はランプ波形を組合せて台形

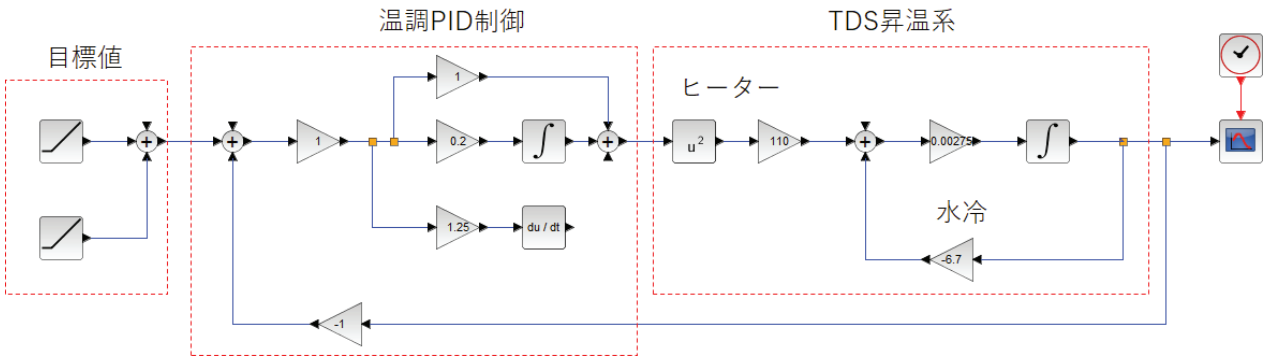


図 1．TDS 装置における昇温加熱制御モデル.

波を生成している。簡単のため、$T_C = 0$としている。また、被加熱試料は加熱ヒータと熱平衡状態にあるとしている。なお、電流は負にならないが、モデルには組み込んでいない。図２に温度を最大温度で規格化した値の昇温加熱制御結果を示す。比例ゲインが小さいと立上りの遅れ、オーバーシュートが大きくなる。比例ゲインを大きくすると遅れ、オーバーシュートが小さくなる。

PID 制御パラメータの最適化：オートチューニングを実行するには、定常振動（リミットサイクル）が生じる限界ゲイン、限界周期を求める必要がある。すなわち、制御系の閉ループ可同定条件を満足するべく、非線形要素の存在、もしくは同定用信号の印加が必要である。また、Ziegler-Nichols の PID 制御パラメータ最適化では減衰比 1/4 を仮定している。$T_D = T_I/4$としている。図３に温度調節器内臓のオートチューニング機能の利用前後の昇温加熱実験結果を示す。オートチューニングにより、比例ゲインは 1/0.30 から 1/0.05 へと大きくなったため、150℃以下における振動が無くなったことが分る。

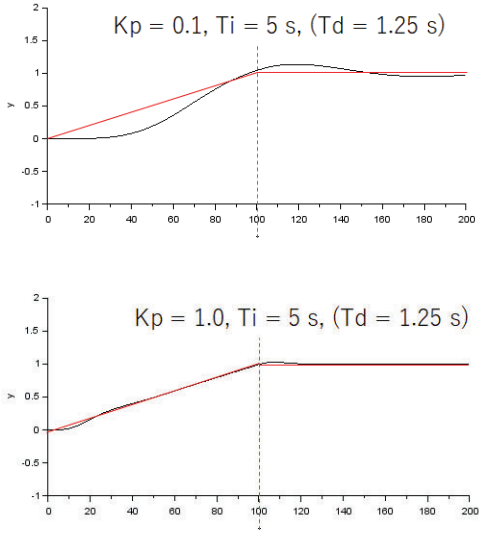


図２．K_Pを変えた昇温加熱制御結果.

おわりに：制御系の閉ループ可同定条件を満足するべく 10%~20%程度の同定用信号の印加は制御系に大きな摂動（外乱）を与えることになるので、TDS 被加熱試料なしで実施した。したがって、試料ありの場合は制御パラメータの微調整が必要である。なお、制御系の閉ループ可同定条件はセンサレス計測、センサレス制御においても満足する必要があるので、留意したい。

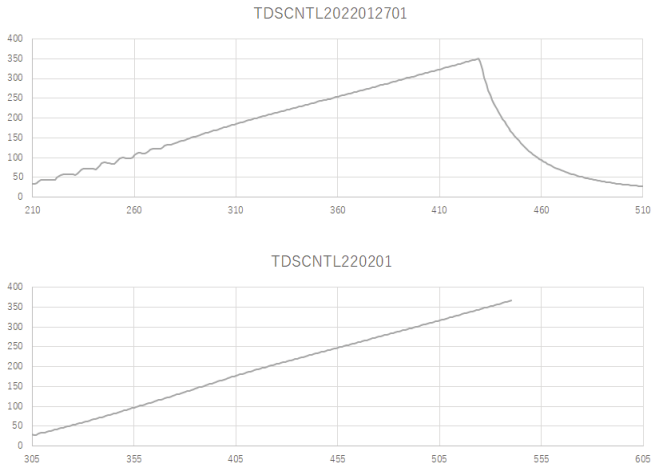


図３．オートチューニング前後の昇温加熱実験結果
縦軸：温度(℃)，横軸：時間(20 s)

[1] O. Kovarik, P. Hausild, J. Siegl, T. Chraska, J. Matejicek, Z. Pala, M. Boulos: The influence of substrate temperature on properties of APS and VPS W coatings, Surface & Coatings Technology 268 (2015) 7-14.

[2] K. Tokunaga, T. Hotta, K. Araki, Y. Miyamoto, T. Fujiwara, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Kurumada, M. Tokitani, S. Masuzaki, K. Ezato, S. Suzuki, M. Enoeda, M. Akiba: Thermomechanical Behavior of Plasma Spray Tungsten Coated Reduced-Activation Ferritic/ Martensitic Steel, Journal of IAPS, Vol.24, No.2 (2016) 73-78.

[3] K. Tokunaga, S. Matsuo, H. Kurishita, T. Toyama, M. Hasegawa, K. Nakamura, Fatigue pre-cracking and fracture toughness evaluations in an ITER-grade rolled tungsten plate, The Nineteenth International Conference on Fusion Reactor Material (ICFRM-19), 2019.11.

[4] K. Tokunaga, S. Matsuo, H. Kurishita, T. Toyama, M. Hasegawa, K. Nakamura, Close-up tracing of fatigue precrack evolution and reliable fracture toughness evaluation by the precracked specimens in an ITER specification W plate, Journal of Nuclear Materials, 553 (2021) 153045.

[5] K. Tokunaga, S. Matsuo, H. Kurishita, S. Nagata, B. Tsuchiya, Q. Xu, M. Tokitani, D. Nagata, M. Hasegawa, K. Nakamura, Combined effects of low energy helium irradiation and tensile strain on surface modification in ITER, International Conference on Fusion Reactor materials, 25th-28th October 2021, Granada, Spain.

[6] 徳永和俊, 松尾悟, 栗下裕明, 永田普二, 土屋文, 徐虬, 時谷政行, 永田大介, 長谷川真, 中村一男, タングステンにおける注入 He 深さプロファイル分析と引張応力負荷の影響, 第 22 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」応用物理学会薄膜・表面物理分科会 特別研究会, 2021 年 12 月 3 日-4 日 名古屋市.

特定研究４【新エネルギー力学分野】

自然エネルギー利用を加速させるエレクトロニクス技術

New Green Electronics Technologies for Accelerating Penetration of Renewable Energy

統括責任者：齋藤 渉（新エネルギー力学分野）

自然・再生可能エネルギーの積極的導入が加速され、高度情報化社会、IoT、Eーモビリティなどのメガトレンドにあわせて、パワーエレクトロニクスはマイクロエレクトロニクス、材料技術、情報技術などと融合した新しい技術領域へ変貌し始めています。本特定課題では、将来の電力網におけるサイバーフィジカルネットワークを想定した新しいエレクトロニクスとそのシステムの実現を目指して、自然・再生可能エネルギーのさらなる有効活用、次世代のエネルギーシステムの構築のため、以下の研究を募集する予定です。

・次世代パワーデバイスおよび半導体材料（結晶成長～プロセス～デバイス）
・次世代パワーエレクトロニクスシステム集積化・応用回路・ネットワーク技術
・次世代パワーエレクトロニクス回路および部品の信頼性・評価・設計技術

SiC パワーデバイスを用いた直流遮断器の基礎検討

東京都立大学 システムデザイン研究科　和田圭二

1. 研究目的

SiC パワーデバイスを用いた直流遮断器の実用化を目指し，大電流化することを目指したパワーデバイス並列接続技術の実現するための回路技術を開発することを目的とする。本研究では，SiC-MOSFET にダイオードを並列接続技術と SiC-JFET 並列接続技術の 2 種類の方法について検討を行った

2. SiC-MOSFET にダイオードを並列接続技術

SiC ダイオードで遮断エネルギーを負担する並列接続 SiC MOSFET 遮断器半導体直流遮断器を実現するためには，導通損失を低減と遮断耐量を向上が必要である。これらの要求を満たすためには，パワー半導体デバイスの並列接続が必須である。しかし，半導体が電流遮断動作中はアバランシェ領域での動作となり，この状態における電流バランスは，デバイスのブレークダウン特性差異により影響を与えることが報告されている。そこで，電流遮断中にブレークダウン特性が低いダイオードを並列接続し，電流遮断中のエネルギーをクランプする半導体直流遮断器を提案した。提案する遮断器は，オン抵抗を低減するために SiC MOSFET を 3 並列接続し，高いアバランシェ耐量と繰り返しアバランシェ動作に対する劣化特性が低いとされる SiC MPS ダイオード を採用した。図 1 に回路図と本研究で試作

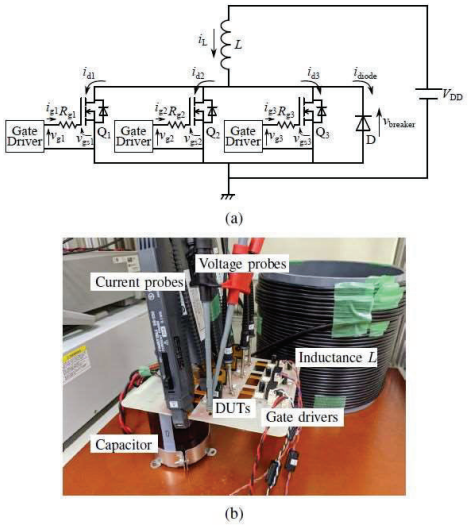


図 1 実験回路構成
(a) 回路図，(b) 実験装置写真

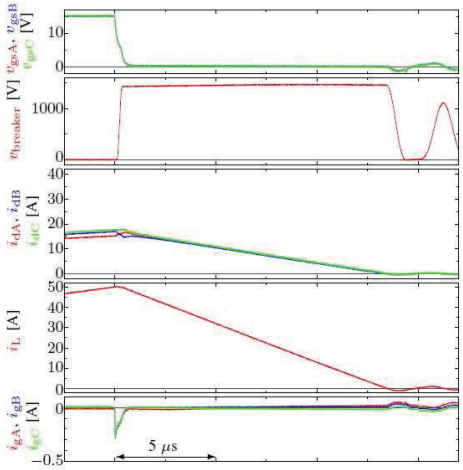


図 2 各部の電圧・電流波形

した実験装置の写真を示す。
図 2 は直流電圧 400V，電流 50A を遮断した場合の験結果を示す。実験結果より，ダイオードがアバランシェ降伏電圧に達すると，MOSFET を流れる電流はダイオード側に流れ，電流遮断動作を開始することが確認できる。本実験により，直流 400 V，電流 50 A の非クランプ誘導性スイッチング(UIS) 試験回路においてデバイスの破壊なく電流遮断を達成することが確認できた。さらに，図 2 の 3 段目には MOSFET に流れる電流波形を示しており，3 つの MOSFET の電流が均等化されていることがわかる。

3. SiC-JFET 並列接続技術

次に，SiC-JFET の並列接続技術について検討を行った。SiC-MOSFET は，電流をバランスさせることが可能であるが，デバイス劣化の点で課題がある。一方，SiC-JFET はデバイス劣化の観点において課題がない一方で，アバランシェ期間中の電流バランスに課題がある。パワーデバイスが異なる場合でも、ある程度のアバランシェ電流は発生します。本研究で，SiC-JFET と直列に低耐圧 MOSFET を直列接続するかスコード接続技術によりでんりゅバランスを達成した。図 3 は 2 並列接続した回路図，図 4 は直流 400V の実験装置を用いて行った実験結果である。これにより，SiC-JFET も並列接続により大容量化が可能であることを実験により示した。

4. まとめ

以上，本研究により SiC パワーデバイスを用いた直流遮断器の実用化に向けたヘデバイスの並列接続技術について 2 つの手法を提案し，実験によりその有用性を明らかにした。

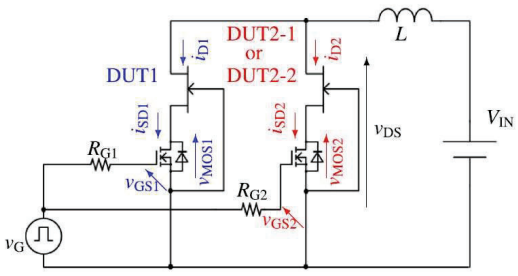


図 3 SiC-JFET 並列接続の回路図

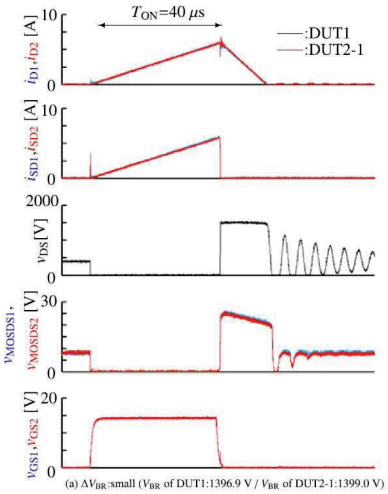


図 4 SiC-JFET 並列接続の実験結果

アクティブゲート回路を用いた次世代パワーエレクトロニクス用パワーモジュールの設計・実装に関する研究

横浜国立大学大学院工学研究院　小原 秀嶺

1．研究の背景と目的

パワー半導体デバイスの耐圧を超える電圧を扱うため，複数のパワーデバイスを直列接続する手法がよく知られている。直列接続においては，常に各パワーデバイスの主端子電圧に偏りが生じないよう動作させる必要があり，自励式変換器ではスナバ回路やゲート駆動回路，実装などに付加的な措置が必要となることから，主に高電圧大容量の他励式変換器に使用されてきた背景がある。これに対し，近年，小容量の電力変換器においても，低耐圧パワーデバイスの優れた特性を生かすことで，高耐圧パワーデバイス単体を用いるよりも高い変換器性能を実現できることが報告されている[1]。

本研究では，複数の低耐圧 Si-MOSFET の直列接続をデジタルアクティブゲート制御により実現し，制御回路を含めた回路全体を 1 つのモジュールとして実装することを検討した。この構成により，アクティブゲート制御による電圧バランス制御の煩雑さを解消し，従来のパワーモジュールと同様に扱えるように実装することを目的とする。

2．パワー半導体デバイスの直列接続とアクティブゲート制御

パワー半導体デバイスの直列接続は，直列接続された全ての素子を全く同じタイミングでターンオンおよびターンオフさせることで，過渡状態も含めて各素子の印加電圧のアンバランスを生じることなく動作させる必要がある。具体的には，各デバイスの特性のばらつきや実装による寄生インダクタンス，寄生キャパシタンスのばらつき，ゲート信号の遅延時間のばらつきなどを補償する必要がある。これまで，このような動作を実現する手法として，スナバ回路を使用する方式[2]や各ゲート回路間をトランスにより結合し，アンバランスを解消する方式[3]，各ゲート信号に微小な遅延時間を挿入する方式[4]など様々な方式が報告されている。本研究では，デジタルアクティブゲート制御を用いて直列素子の電圧バランスを実現する。デジタルアクティブゲート制御は，主回路への受動素子の追加が不要であり，回路実装後にプログラムによりゲート電流を時間スロット毎に変更可能であり，小型化や制御自由度の観点からメリットの多い手法である。

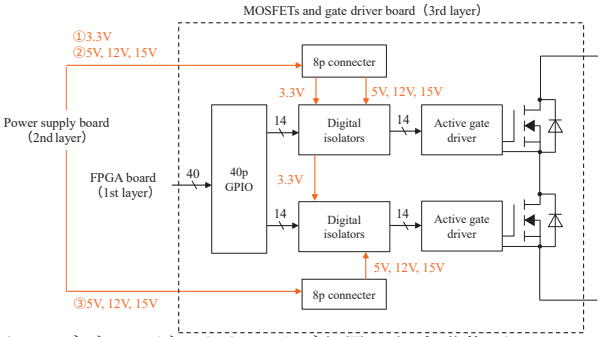


図 1　デジタルゲートドライブを用いた次世代パワーモジュールの構成

3．試作したパワーモジュール

デジタルアクティブゲート制御を用いた多直列デバイスの有用性検証のため，2 直列 Si-MOSFET を 1 素子として動作させる試作回路を設計，製作した。試作したパワーモジュールの構成を図 1 に，基板設計パターンを図 2 に示す。モジュールの外側から見るとパワーデバイス 1 つと同じ 3 端子素子であり，使い勝手は変わらないが，内部は 2 つの Si-MOSFET（200V 耐圧）が直列に

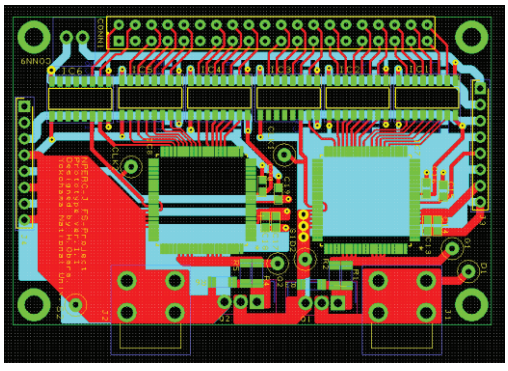


図 2　試作したモジュールの基板設計パターン

接続され，それぞれデジタルアクティブゲートドライブで駆動される。所望の性能を実現するためには，全ての MOSFET が同期して電圧のアンバランスを生じることなくスイッチング動作を行う必要がある。図 1 の構成が従来のパワーデバイス 1 つと等価なので，例えば三相インバータを構成する場合には，この構成のパワーモジュールを 6 つ用いることとなる。Si-MOSFET については，10 個の同一型番素子をカーブトレーサにより測定し，特性の近い 2 素子を選定した。各基板のフットプリントは，49×75mm であり，将来的にはさらに小型化出来る見込みである。

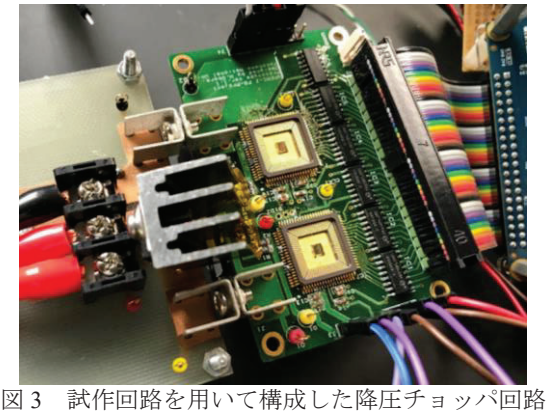


図 3　試作回路を用いて構成した降圧チョッパ回路

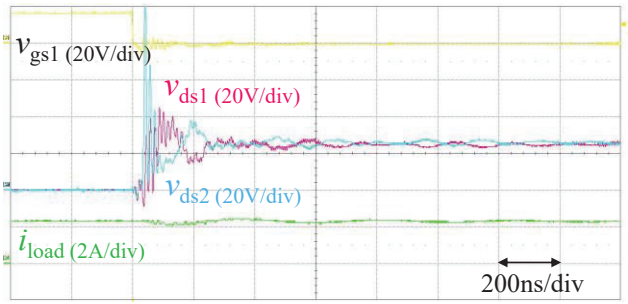


図 4　アクティブゲートパターンを用いた直列接続素子電圧バランス動作波形

4．実験

実験は，試作回路を用いて図 3 のように降圧チョッパ回路を構成し，デューティ比 50%，スイッチング周波数 10kHz の制御信号を用いた連続試験により行った。まず，探索範囲を限定するため，固定ゲートパターンを用いた探索結果を行い，直列接続素子の電圧バランスを実現するアクティブゲートパターンを探索した。実験条件によっては，固定ゲートパターンでも電圧バランスは実現可能と考えられるが，種々の条件で完全に電圧バランスを実現するには，さらに細かくゲート駆動力を変更できるゲートドライバを使用するか，時分割でゲート駆動力を変更するアクティブゲート制御を使用するかのいずれかの方法が必要であることが分かった。この知見をもとに，ゲートドライバのクロック周期毎にゲート駆動レベルを変更するアクティブゲート制御を適用した。固定ゲートパターンでの動作解析をベースに様々なパターンを試行し，図 4 のように各ドレイン-ソース電圧をほぼバランスさせるゲートパターンが存在することを確認した。このように，固定ゲートパターンに微調整を加えたアクティブゲート制御によって，直列素子の電圧バランスが実現できることを実証した。波形には大きなサージ電圧が見られるが，直列素子の電圧バランスを実現した上で，サージ電圧やスイッチング損失を低減するアクティブゲートパターンが存在すると考えられ，今後は各要素を考慮した最適化が必要である。

5．まとめ

アクティブゲート制御により複数直列接続されたパワー半導体デバイスの電圧バランスを実現する次世代パワーモジュールの実装形態を検討した。設計例として 2 直列の 200V 耐圧 Si-MOSFET で構成されるモジュールを設計，試作し，従来のパワーモジュールと同様の使用感で，デジタルアクティブゲート制御により直列素子の電圧バランスが実現できることを実証した。

参考文献

[1] M. Schweizer and T. B. Soeiro: “Heatsink-less Quasi 3-level Flying Capacitor Inverter Based on Low Voltage SMD MOSFETs”, EPE'17 ECCE Europe, 10-pages (2017)
[2] F. Zhang et al., ”Voltage Balancing Control of Series-Connected SiC MOSFETs by Using Energy Recovery Snubber Circuits” IEEE Trans. Power Electron., Vol. 35, No. 10, pp. 10200-10212 (2020)
[3] 阿部康・丸山宏二・松本康・笹川清明・松瀬貢規：「IGBT 直列接続による車両用補助電源装置の高性能化に関する検討」，電気学会論文誌 D，Vol.127，No.3，pp. 241-247 (2007)
[4] 神宮克哉・和田圭二：「ゲート信号遅延による SiC-MOSFET 直列接続時における電圧バランス制御」，電気学会論文誌 D，Vol.138，No.11，pp.864-870 (2019)

次世代パワーエレクトロニクスシステム用ヘルスモニタリング技術

九州工業大学 大学院工学研究院 電気電子工学研究系　長谷川 一徳

1. 研究目的

自然エネルギー有効活用にはパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器の普及拡大が必要不可欠であるがパワエレ機器の導入数増加とともにその信頼性向上も急務となっている。パワエレ機器を構成するパワー半導体デバイスの故障は，パワエレ機器の中で主な故障原因の一つとなっている。近年，パワー半導体デバイスが複数搭載されたパワーモジュールの信頼性研究が盛んに行われており，パワーデバイスが発生する損失による自己発熱に起因した金属接合劣化が故障要因として明らかになっている。本研究の目的は，パワーモジュールの劣化状況を観測する技術の構築である。

2. 研究の具体的方法

パワエレ機器の動作状態におけるパワーモジュールの劣化観測技術として，インバータ動作におけるモニタリングする手法を開発する。インバータ回路を動作させた状態で，パワーモジュールの温度と電流を計測し，モジュール内で発生する損失を演算し，そこからパワーモジュールの熱抵抗の変動量を求めることで，モジュールの劣化を観測する。従来，パワーモジュールの劣化評価試験では，実際のパワエレ機器動作ではなく，モジュール内に一定損失を繰り返し発生させた条件で試験が行われてきた。提案手法はインバータ動作における実温度・電流波形を用いてパワーモジュールの劣化を抽出できる点に特長がある。

提案手法を用いてパワーモジュールの劣化観測を行い，インバータの動作条件（電流・電圧波形）と計測間隔，演算モデルの関係を明らかにすることで劣化検出技術を構築する。

本研究のパワーモジュールの高精度な劣化検出技術はパワエレ機器の設計最適化につながり，高寿命化と信頼性向上に大きく貢献する。

3. V_{CE} 測定回路の製作

インバータ動作時のパワーモジュール内の IGBT チップのオン電圧 V_{CE} を測定することでその動作温度を算出できるが，オフ時の電圧をブロックする必要がある。そこで，図 1 に示す V_{CE} 測定回路を製作した。耐圧 800V のダイオードを使用し，オフ時の電圧をブロックしている。製作した回路の動作確認をダブルパルス回路内で行った。図 2 に測定した V_{CE} と電流の変化をカーブトレーサで測定した V-I 特性と比較した結果を示す。この結果より V_{CE} が測定できることを確認した。

4. チョッパ回路を用いた温度特性プロファイルの測定

三相インバータ回路での劣化を検出する前に，図 3 に示すチョッパ回路を用いてパワーモジュール動作時の温度特性プロファイルの測定を行った。この回路は測定対象の素子 Q_2 を最初の 1 秒スイッチングさせ，温度上昇を確認した。次の 10 秒では主に Q_3 をスイッチングさせ，100 回に 1 回 Q_2 をスイッチングさせて，温度の低下を確認した。

4.1 サンプルホールド回路の製作

チョッパ回路での V_{CE} の変則的なスイッチングからオン電圧 V_{CE} だけを抽出して測定するためにサンプルホールドを用いる。サンプルホールドを用いることで指定した期間での測定値のサンプリングとホールドが可能になる。この回路を前述の V_{CE} 測定回路の出力に接続した。

4.2 チョッパ回路の動作確認

素子 Q2 の V_{CE} を 11 秒間測定した。図 4 に測定した V_{CE} を温度に換算したグラフを示す。測定条件は直流電圧 100 V, 出力電流 64 A である。最初の 1 秒での温度が上昇し，後の 10 秒での下降していることを確認した。なお，直流電圧を 100 V 以上とするとサンプルホールド回路がノイズの影響で誤作動してしまった。今後ディジタル処理によるサンプルホールドを導入する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では，パワーモジュールの劣化状況を観測するため，V_{CE} 測定回路の作製とチョッパ回路を用いた温度プロファイルの測定を行った。取得した温度プロファイルはモジュールの熱抵抗算出のキャリブレーションデータとして使用できる。以上の成果は今後インバータ実動作条件における劣化試験の基礎データとして活用する。

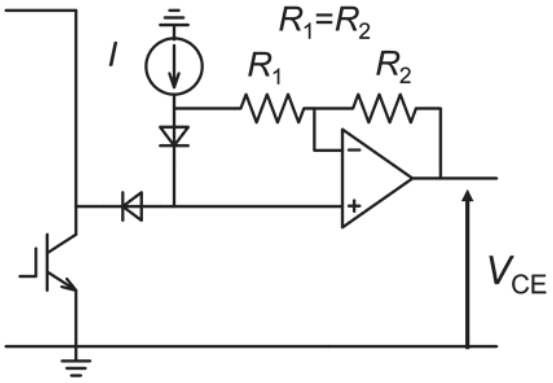


図 1. V_{CE} 測定回路

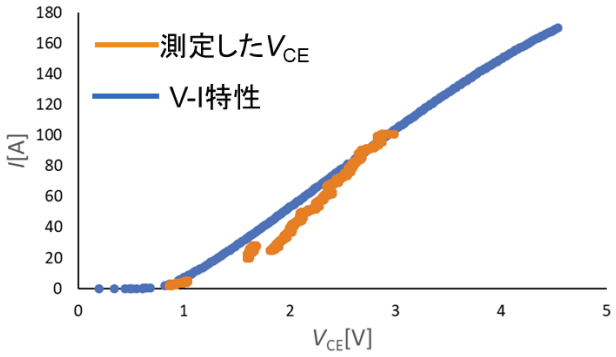


図 2　測定した V_{CE} と V-I 特性の比較

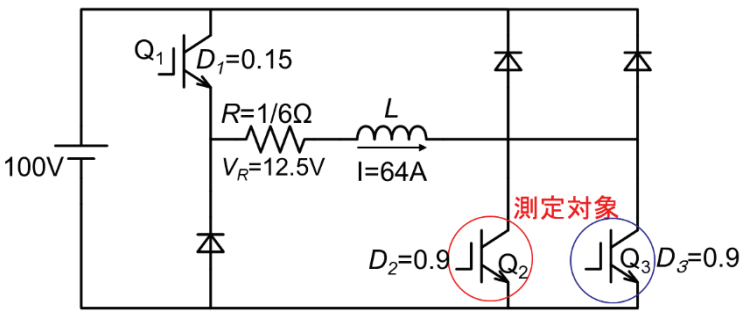


図 3　試験用チョッパ回路

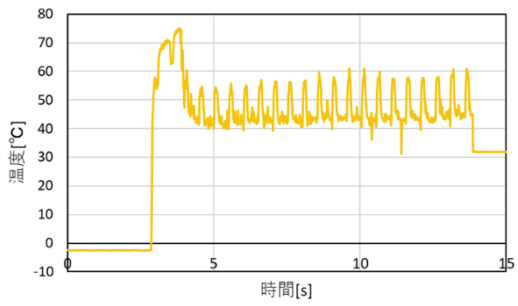


図 4　温度プロファイル測定波形

高耐圧パワーデバイス高温動作技術

近畿大学理工学部　宍戸信之

緒言

パワーデバイスは電力有効利用のためのキーデバイスである。安心安全なエレクトロニクスシステムの実現には、そのパワーデバイスからなるパワーモジュールの高信頼性・長寿命化が必須となる。特に、次世代高耐圧パワーデバイスは高温下での動作が要求されるため、異種材接合部であるデバイス電極実装部での熱疲労による破壊が深刻な問題となる。

高温下での材料の変形は弾塑性のみならずクリープまでもが複雑に絡み合うが、現状ではこのような過酷な環境下での材料物性データの蓄積が乏しいために、そこでの寿命も定性的な予測ないしは実機試験による事後評価が主体となっている。例えばパワーサイクル試験と呼ばれる電力印加による耐久試験では、従来その寿命 N_f を素子の温度変化 ΔT を用いて整理した式 $\Delta T\,(N_f)^a = C_1$ を求めて、その式を製品寿命予測に用いるのが一般的であったが、モジュールの構造寸法や材料が異なる系での定量評価に適用できる保証はない。一方、金属の熱疲労における寿命 N_f は非弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{in}$ を用いて $\Delta\varepsilon_{in}\,(N_f)^b = C_2$ のような Coffin-Manson 則で統一的に表されることが知られている。材料の非弾性変形量のみによって熱疲労寿命を決定することが可能であることを意味し、金属を介した接合構造の寿命予測には、変形を精度良く予測評価できればよい。

このような背景から、従来手法では次世代パワーエレクトロニクスで想定される高温環境下での寿命の定量予測には未だ至っていない。本研究では、材料物性データを正しく反映した数値シミュレーションによって、熱疲労における損傷モデルを元に、信頼性が確保できるパワーモジュールの試設計を行う。今年度はパワー半導体チップ直下のダイアタッチ材の膜厚を設計パラメータとして、その寿命への寄与を評価し、次世代パワーエレクトロニクスの要件を満たす接合形態・材料の探索をおこなった。このような研究成果の蓄積によって任意の構造での寿命予測が可能となれば、次世代パワーエレクトロニクスの開発を加速することが期待できる。

解析モデル

本解析では，10mm×10mm のパワー半導体チップをハンダによって DBC 基板に実装したモジュールにおける熱疲労を対象として、図1に示す 1/4 対称モデルを作成して汎用有限要素コード Marc2021 により伝熱–応力解析を行った。DBC の上面にははんだを介して Si ダイオードチップを実装した。DBC 下面は熱伝導シート材を介して水冷ヒートシンクに設置しているとして、等価な熱伝達係数を境界条件として設定した。このとき、モデルの最小要素サイズはハンダ厚 50μm に対して厚さ方向に十分な変形の解像度を与えるために 250μm×250μm×10 μm とした。標準的なパワーサイクル試験条件として t_{on}=1sec、t_{off}=2sec として t_{on} 間にチップ動作時の発熱量をチップ上面に一様に与えた。

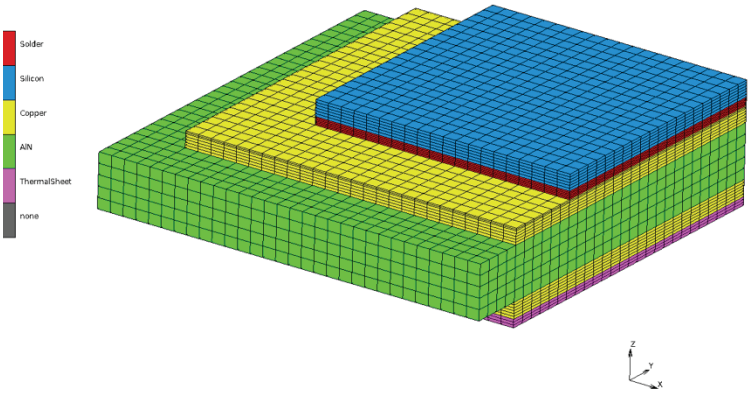


図1　パワーモジュール解析モデル（1/4 対称）

解析結果

得られた温度分布の一例を図2に、その際のクリープひずみを図3に示す。図3より半導体チップと DBC 基板の熱膨張ミスマッチをダイアタッチ材がクリープ変形によって緩和していること、特にその角部において最大値を示していることがわかる。後者の結果は実際のき裂の発生および進展が多くの場合角部から生じる傾向と一致する。同様の解析をハンダ厚 50μm、100μm、150μm の3水準で実施した。このとき得られた非弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{in}$ を図4に示す。厚膜化によってひずみの集中が緩和し、ひずみ量が低減していることがわかる。ただし、

100μm 以上になるとその緩和効果が厚さに比例するのではなく、徐々に穏やかになる傾向を示した。得られた非弾性ひずみ範囲から寿命予測式[1]を用いて厚膜化による長寿命化の効果を見積もった結果を図5に示す。厚膜化によって単調に長寿命化することを示している。

一方で、ハンダの厚膜化による系全体の熱抵抗上昇、すなわち同じ動作条件におけるチップ温度の上昇が懸念されるが、本評価対象モジュールではハンダ厚さが 50μm から 150μm へ 3 倍になってもチップ温度の上昇が 1%未満であり、その影響は軽微であった。これは、従来の寿命予測式のようにチップ温度のみを指標としていた場合、ハンダ厚変更による寿命の変化を捉えることができないことを意味する。また一方で、Elakkiya らはディスクリートモジュールで実機評価を行い、ハンダ厚に最適値があり、過剰な厚膜化は温度上昇に繋がると結論づけていた[2]が、これは半導体チップサイズが本モジュールに比して小さく、ハンダ層も同様に小さいために、当該部分の熱抵抗が系全体の熱抵抗の支配的な要素であったためと考えられる。これはパワー半導体を WBG 半導体化などにより小型化した場合、厚膜化による変形の緩和と熱抵抗上昇のトレードオフによる最適設計が必要となることを意味する。

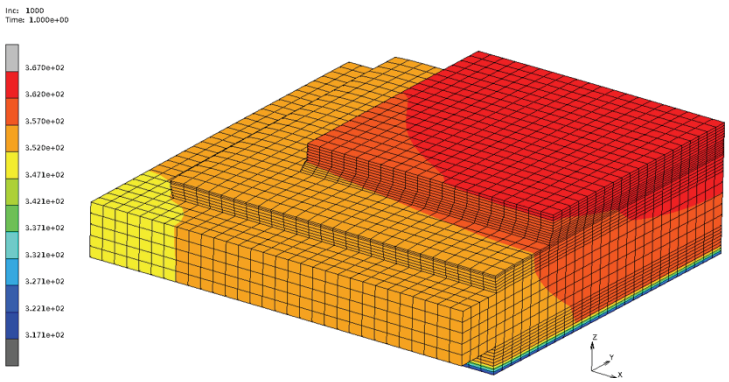


図2　昇温後のモジュール温度分布（K）

まとめ

本研究では、材料物性データを正しく反映した数値シミュレーションによって、信頼性が確保できるパワーモジュールの試設計を行った。従来の寿命予測式ではハンダ厚変更による寿命変化を表現できないこと、パワー半導体を WBG 半導体化などにより小型化した場合、厚膜化による変形の緩和と熱抵抗上昇のトレードオフによる最適設計が必要となることを示唆する結果を得た。

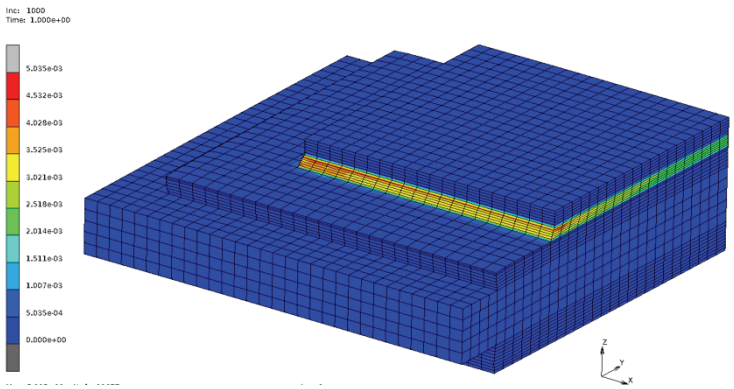


図3　昇温時の相当クリープひずみ分布

参考文献

1）苅谷義治、向井稔、はんだ材料の非線型特性と熱疲労信頼性、エレクトロニクス実装学会誌、Vol.8、No.2、(2005) pp.150~155.

2）Elakkiya R et. al., Reliability Enhancement of a Power Semiconductor with Optimized Solder Layer Thickness, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.35, No.6 (2020) pp.6397-6404.

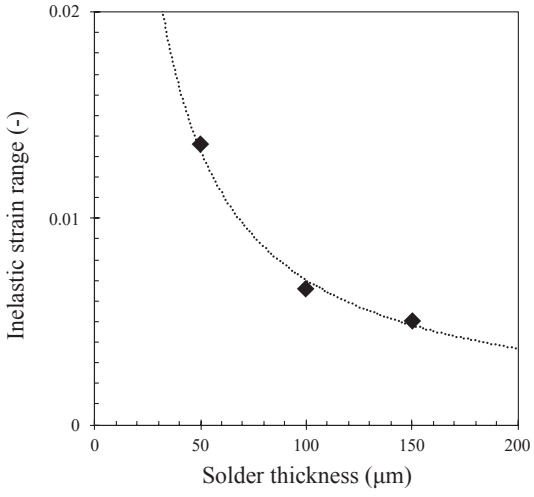


図4　ハンダ厚さと非弾性ひずみ範囲の相関

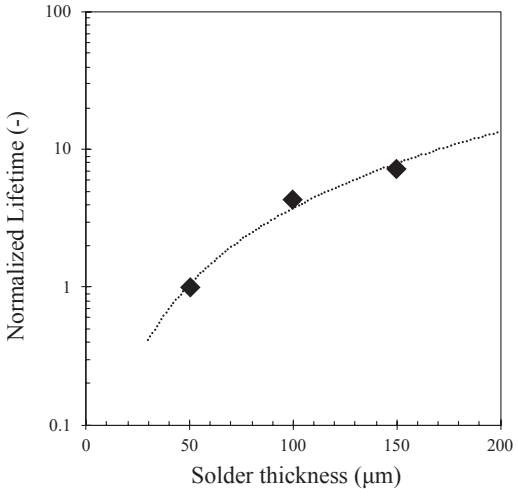


図5　ハンダ厚膜化による長寿命化

特殊トランス結合共振回路を用いた微弱電流高電圧パルスによる水分子の分離

鹿児島工業高等専門学校 機械工学科 准教授 小田原 悟

1. 緒 言 Stanley A. Meyer 氏は独自の改造車に乗ってガソリンなどの化石燃料なしで水 80 ガロンのみでアメリカ大陸を横断走破したとされている. これが事実であるとするなら, 工学的な観点から理論解析と基礎実験を通してそのメカニズムが解明されねばならない. 先ず, Stanley A. Meyer 氏が発明した特殊なトランス結合電圧増幅回路「VIC (Voltage Intensifier Circuit)」[(1)(2)]について, その理論的な原理を明らかにしなければならない. 技術資料[(1)]によると, 水が封入された容器をコンデンサと見做し, 塞流コイルと組み合わせてトランス結合 LC 回路の共振を起こすというものである. 共振点では回路論によると, コンデンサを模した水電極での電圧が極大, 電流が極小となる LC 共振現象が生じるが, これを利用している. この回路特性を利用して水分子の分解を達成し, 更に, エネルギー効率の向上を図っていたとされる.

そこで, 本研究では過熱水蒸気, 或いは, 単に水噴霧に正負の高電圧パルスを作用させ, 水分子を分解し省電力で大量の水素・酸素の混合ガスを発生させることを目指す. その際, 回路への入力電流を極限まで小さくし, 効率の向上をどこまで達成出来るかを実験的に解明する.

直流電流を用いた従来の水の電気分解に対して, 微弱な電流で高電圧のパルスを水分子に作用させることで水素酸素混合ガスの大量発生が再現できるかどうかを確認した.

2. 実験方法 本研究では特殊な手法により水分子を分解し, 燃焼性水素酸素混合ガスを製造するプロセスを再現する. そして, 入力エネルギーと得られた酸水素ガスの持つ潜在エネルギーの値を詳細に測定し, 正確なエネルギー効率を算出することを目指す. 本手法が実現出来れば, 入力のエネルギーが少ないので極めて効率よく水素自動車やエネルギー機械を動かせる. この技術の根幹となる特殊トランス VIC は微弱電流で大量に水素を発生させる為の回路である. 過熱水蒸気を用いる理由は液体の水の状態での誘電率が空気に比べて 80 倍大きいので, LC 共振の C の値を小さくする為である. LC 回路の L を大きく C を小さくすることで VIC の低電流, 高電圧ポテンシャルの共振特性を達成出来る. VIC で水電極槽を挟むように 2 つの塞流コイルを配置することでダイオードと組み合わせて電極に正負の片極性脈動パルスを発生させる. この正負の電圧ポテンシャルが本来極性を有する水分子に繰返し作用することで水素と酸素の共有結合が弱まり水素原子・酸素原子に分解できるのであろう.

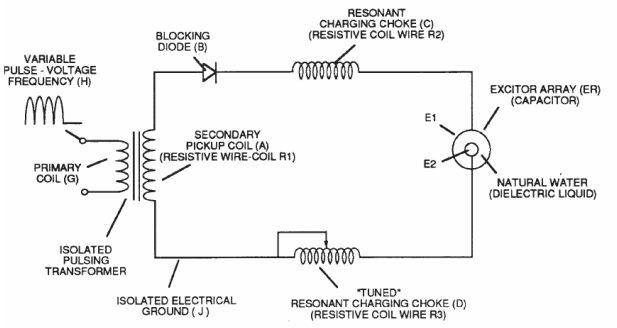


図 1 Voltage Intensifier Circuit VIC[(1)]

3. 理論回路と実験の結果

3.1 Voltage Intensifier Circuit VIC **図 1** に Stanley Meyer 氏が提案した VIC を示す. トランス結合回路で次段回路に 2 つのチョークコイル間に水槽電極を配置する形式となっている. また, 電極で片極性電圧ポテンシャルとなるようにトランスの次段コイルと 1 つ目のチョークコイルの間にブロッキングブロッキングダイオードを配置している. 次段回路での電流を抑制することを目的としてチョークコイルをステンレス製のエナメル線で巻いて製造しているのがこの回路の重要な特徴である. また, 特許[(1)]や資料[(2)]によるとトランスは一つのコアで昇圧とチョーク

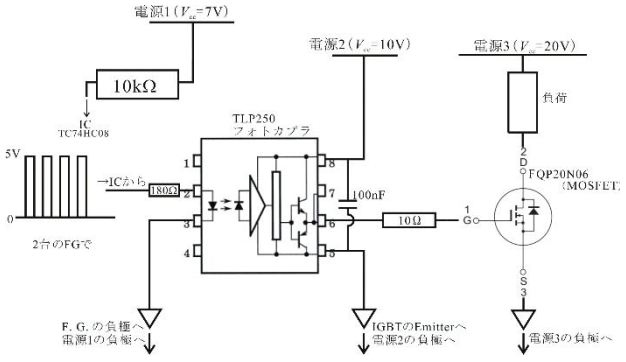


図 2 スイッチング回路

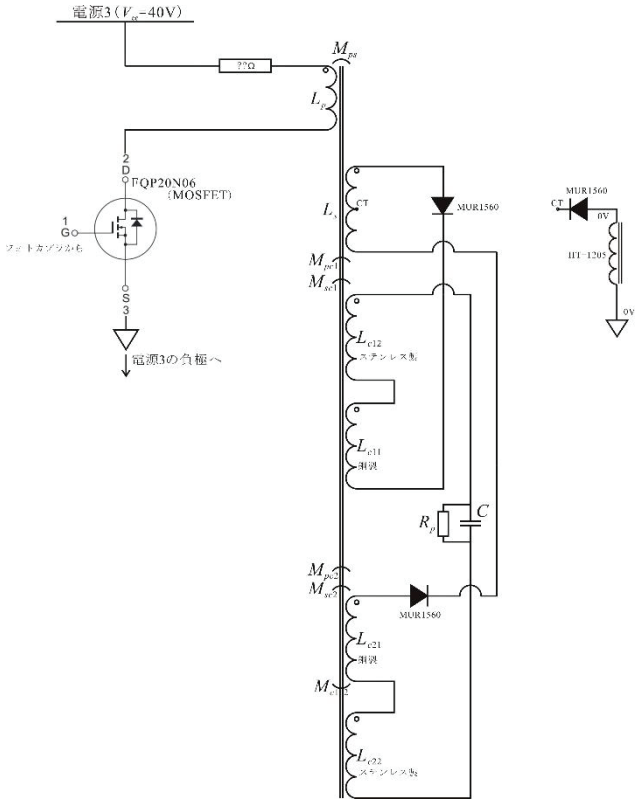


図 3 実際の VIC 回路図

コイルの 2 つを兼ねている. 即ち, 一つのコアに昇圧の為のトランスコイルと塞流コイルを同じ方向に巻いている.

3.2 実験で用いた回路　**図 2** に本実験で用いたスイッチング回路を示す. フォトカプラと FET を用いてレベルシフトをして安定化電源からの電圧をオンオフした.

図 3 にスタンリーメイヤーの技術資料にある詳細な説明に沿って組んだ回路を示す. ダイオードは MUR1560 で, CT はセンタータップのことで別の誘導コイルを介して接地に接続されている. 電極水槽, 即ち, コンデンサ C には並列抵抗 R_p が生じるが, この値が水であればかなり小さい値となって LC 共振の特性が得られない. そこで, 本研究では水とは絶縁された電極を用いて R_p が極端に大きい水槽を製作した. **図 4** にその絶縁電極容器を示す. 水が直接ステンレス製電極に触れないように石英ガラスを用いて図のように組み立てた.

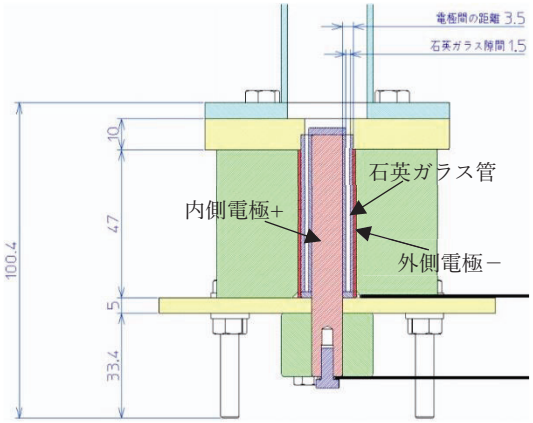


図 4 絶縁電極容器

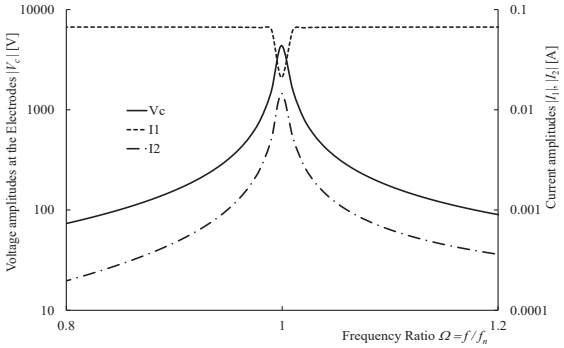


図 5 電極での電圧と電源電流の周波数応答特性(3)

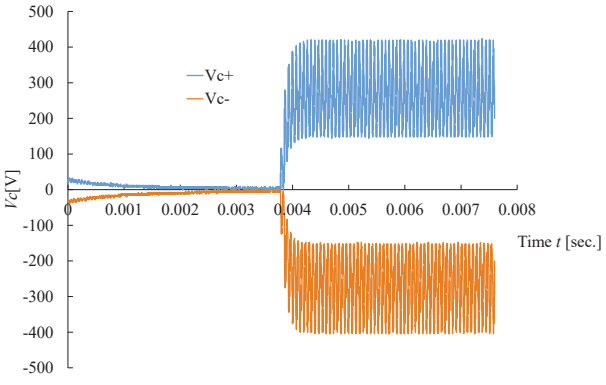


図 6 正負両極に生じる片極性電圧波形

3.3 LC 共振の理論計算　**図 1** の回路を電気回路論に従って計算したところ, **図 5** に示すような電圧振幅$|\dot{V}_c|$と電流振幅$|\dot{I}_1|$, $|\dot{I}_2|$のパルス周波数応答特性が得られた(3). 周波数比 Ω=1.0 のときに電圧$|\dot{V}_c|$, 及び, 電流$|\dot{I}_2|$が極大値, 電流$|\dot{I}_1|$が極小値となっている. 電極での電圧$|\dot{V}_c|$と電源の電流$|\dot{I}_1|$の極値が同じ周波数比$\Omega = 1$で現れるのはこの VIC の最も重要な特徴である. **図 5 は**減衰比ζ=10^{-3}, 初段コイルと次段コイルの回路の抵抗比ρ=0.5, トランスの巻き数比 n=150, 結合係数 k=0.99, $|\dot{E}| = 20$V, 等価インダクタンス L=4.47H, 電極の静電容量 C=50pF を条件として計算した例である. 共振点$\Omega \cong 1$での最大電圧振幅は$|\dot{V}_c|$= 4.37kV で電流は$|\dot{I}_1|$=21mA, $|\dot{I}_2| = 14.6$mAとなった. 実験ではこの理論計算通りに高電圧が得られれば水分子の分離現象が起こると想定される.

3.4 実験結果　**図 3** に示すようにダイオードとして 3 つの MUR1560 を組み合わせて測定をしたところ, 水槽の正負電極に**図 6** に示すようなステップ上の相対する正負の電圧が生じた. **図 6** の電圧波形は電源電圧 30V 電源電流 30mA で, 周期は数 msec.(周波数は数 10Hz)のゲートパルス上に数 10kHz の高周波の共振パルスを重畳したときの水槽電極での応答波形である. 電極での電圧が±400V 以上は生じていることが分かる. スタンリーメイヤーが技術資料(2)で主張している通りの回路を組めば, 確かに正負の片極性パルスが生じることが分かった. しかし, 次段回路で数百 mA～数 A の電流が生じてしまい, 微弱電流で数 10kV を超える高電圧パルスを再現する迄には至らなかった. 従って, 水分子の分離現象も当然ながら起きなかった.

その原因としては, 水のまま水槽に溜めて電極にすることが問題である. 技術資料には水槽電極となってはいるが実際はミスト状で噴射するノズルとなっている. 従って, 水と空気と気体状の燃料の混合気体を噴霧装置によりエンジンシリンダに噴射する瞬間に高電圧を生じさせるというものである.

今後としては, シリンダにミスト状に水を噴射したときの高電圧パルスが生じさせられるか, 即ち, 普通の火花点火機関の高電圧の点火プラグの原理の如く現象を再現できるかどうかが重要となる.

4. 結 論　Stanley Meyer 氏が発明した電圧増幅回路 VIC の再現実験をする為に特許や技術資料を基にして独自の回路と絶縁容器を製作し, 水の特殊電解が起こせるかどうかについて調査した.

1) VIC を用いることにより確かに正負電極で片極性電圧が生じることが分かった.

2) 水電極槽内は水のままでは 20kV を超えるような高電圧を発生させることは困難であることが分かった.

3) 現時点で特殊トランスや特殊電極の製作が難航しており, Stanley Meyer 氏の特許に示された通りの電圧波形特性には厳密にはなっていない.

参考文献

(1) Stanley A. Meyer: The Birth of New Technology Water Fuel Cell Technical Brief, (1996).

(2) US Patent No. 5149407, Stanley A. Meyer: Process and Apparatus for the Production of Fuel Gas and the Enhanced Release of Thermal Energy from such Gas, (1992).

(3) 小田原 悟:VIC の共振特性についての考察, 日本機械学会九州支部久留米講演会講演論文集 No.178-3, pp.169-170, 2017-10-21, 久留米高専.

次世代パワーデバイス用のアイソレーション・信号伝送技術の検討

茨城工業高等専門学校　　成　　慶珉

Abstract: In power converters that use a large number of power devices, such as matrix converters, the gate drive circuit to drive each power device hinders miniaturization and makes the circuit more complicated. Therefore, using wireless power transfer (WPT) to drive the gate of power semiconductors can not only isolate the main circuit from the control circuit, but also make the circuit smaller. The modulation scheme for WPT used in the previous study had the problem that the turn-off and turn-on times of the power semiconductors were about 1~2 μs. When the turn-on and turn-off times are long, a lot of losses are generated during the switching of power semiconductors, which prevents the high efficiency of power converters. In this study, a new modulation method is proposed to improve these problems, and in addition, a gate drive circuit is designed. The proposed modulation method is based on ASK (Amplitude Shift Keying; ASK) modulation, and the operation is inverted ASK modulation.

Keywords: Wireless Power Transfer, Gate Drive Circuit, Power Semiconductors

1. はじめに

非接触電力伝送法（Wireless Power Transfer;WPT）は空間的に離れた場所への電力伝送を高効率で行うことができるため，位置的な制約を改善できる(1,2)。著者らは，非接触電力伝送を用いてパワー半導体素子のゲート駆動のために電力と信号を同時に多重伝送できる新しいゲート駆動法を提案した(3,4)。提案したゲート駆動回路は，絶縁電源や信号絶縁素子を用いずにパワー素子を駆動することができる。

先行研究で提案された非接触ゲート駆動回路は、パワー半導体の駆動が可能であったが、ターンオフ時に信号遅延があった。先行研究の方式をアナログ方式と言う。本研究では、信号遅延時間を短くするためにデジタル方式による復調回路を検討する。

2. WPT を用いたゲート駆動

まず、先行研究の WPT を用いたゲート駆動回路を説明し、次に新しい回路とその改良点を説明する。

先行研究(4)の受信側回路構成を Fig.1.に示す。回路の受信側では、ASK 信号からスイッチング信号を取り出す。回路は電力部と信号部で分離している。信号部では、ASK 変調波を復調するため、ASK 変調波を半端整流した後、コンデンサ(C_3)で平滑し、その値を閾値と比較している。

Fig.2 にスイッチング実験の結果を示す。信号の伝達遅延が 2.6us 発生している。信号の復調回路が遅延の原因となっている。Fig.3 に信号の復調方法を示す。本アナログコンパレータを用いた復調方式では C_3 と R_2,R_3 との放電時間によってターンオン時間が決まる。

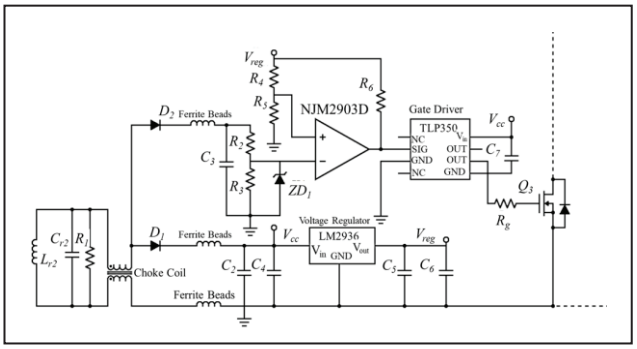


Fig.1. Analog demodulation method with WPT gate driver circuit

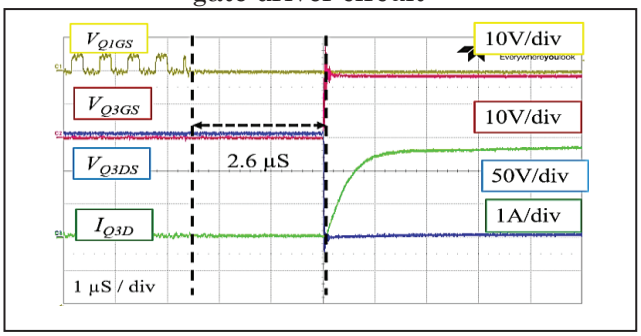


Fig.2. Waveforms of switching test

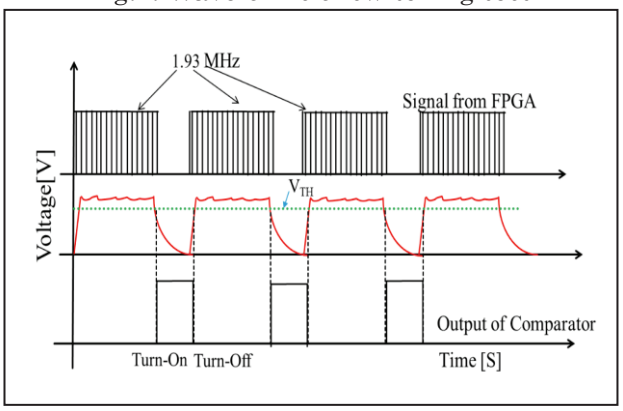


Fig.3. Demodulation method

3. デジタル方式による復調

先行研究の方式ではターンオフ時の遅延時間がターンオン時より小さい。復調回路で、コンデンサ C_3 の充電時の時定数$\tau = C_3$、放電時$\tau = C_3R_2R_3$で、充電時間の方が速い。そこで、コンデンサ充電時の立ち上がり信号のみをトリガとして使用すれば、ターンオン時の遅延がターンオン時の遅延と同じくらいに改善されると考える。信号の立ち上がりのみを検出するためにマイコンを用いることにする。

Fig.4.に回路構成を示す。アナログ方式の回路のコンパレータをマイコンで置き換えた構成である。使用したマイコンは PSoC マイコンである。PSoC マイコンはコンパレータを内蔵している。

Fig.5 に復調方式の動作結果を示す。上から ASK 変調波、PSoC マイコンの出力、ゲートドライバの出力である。ASK 信号の第 6 波目の信号で PSoC の出力が変化し、すぐにゲート電圧が変化している。伝達遅延時間は 7us である。この復調方式では、ターンオン時とターンオフ時で遅延時間は同じになるが、プログラムの動作タイミングによって、7~9us の伝達遅延となる。

4. まとめ

アナログ方式とデジタル方式の伝達遅延を Table.1 にまとめる。デジタル方式ではアナログ方式と比べて伝達遅延が大きくなった。デジタル方式において、今回作成した立ち上がり信号の検出プログラムの命令実行数は 10 命令程度である。また、このマイコンの命令実行サイクルは平均 6 クロックである。クロックが 12MHz なので、プログラムの実行時間は 5us 程度となり、表の結果となった。

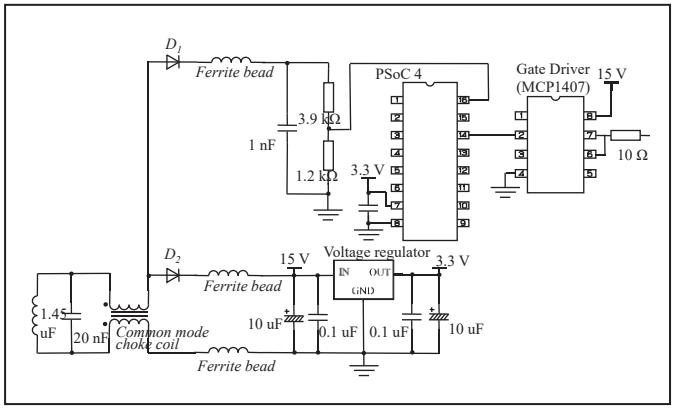


Fig.4. Demodulation method by micro-processer

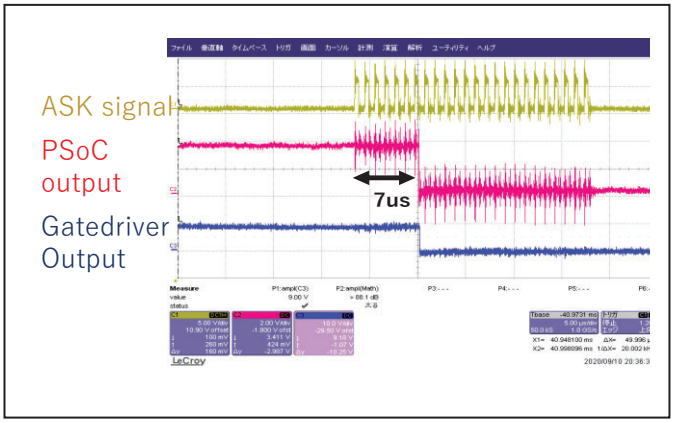


Fig.5. waveforms by digital demodulation method

Table.1. Comparison of propagation delay time

	Turn-on delay time	Turn-off delay time
Analog method	2.6us	1.1us
Digital method	7us	9us

文献

（1） 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一: 「等価回路から見た非接触 電力伝送の磁界結合と電解結合に関する研究－共振時の電磁界結合 を利用したワイヤレス電力伝送－」, 電気学会論文誌 D, Vol. 130, No. 1, pp. 84-92 (2010))

（2）A Kurs et al.,"Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances"

（3）大内洋佑, 塚本脩仁, 秋山裕信, 成慶珉 :「非接触多重伝送を用いたゲート駆動回路のスイッチング特性」, 電気学会研究会. SPC-18-156, pp7-12(2018)

（4）雨貝宗吾, 成慶珉 :「非接触電力伝送法を用いたパワー半導体のゲート駆動回路に関する研究」

風車ウエイクの気流性状把握に関する基礎的研究

三重大学　大学院工学研究科　機械工学専攻　前田 太佳夫

1. 目的

風力発電に適した高風速域は標高の高い地域に多く存在するが，これら標高の高い地域は山岳や高原などの複雑地形になっている．一方，限られた土地を有効利用するため，風車を集中配置するウィンドファーム形式による風力発電導入が多く，風車相互の風干渉となる後流の影響が大きい．そのため，地形に起因する風特性の変化と後流に起因する風特性の変化を調べることは，複雑地形上に設置された風車の発電量向上や信頼性向上に対して有益な情報を与える．

本研究では，ウィンドファーム内に設置されている風車上のナセル風速計で観測された風データを解析し，地形や風車後流による風特性の変化を考察した．また，非線形風況予測ソフトウェア RIAM-COMPACT を用いてウィンドファーム内を流れる風の数値解析を行い，地形や風車後流が原因となる風の非定常性が，観測した風データの乱流強度に影響することを示した．

2. 観測データ解析方法

本研究では，ウィンドファーム内に設置されたロータ直径 80m の風車 40 基のナセル上部に設置されている風速計で観測された風データを1年間にわたって取得した．この1年間の風データを整理することにより，平均風速や乱流強度を計算し，地形による風特性の変化や風車後流が風特性に及ぼす影響を考察した．

3. 数値解析方法

ウィンドファーム内の風の挙動を調べるため，九州大学応用力学研究所開発の RIAM-COMPACT を用いて風況解析を行った．RIAM-COMPACT は，実地形データを用いた非定常かつ非線形な解析が可能な風況シミュレータであり，風に対する地形の効果や後流の挙動を高精度に予測できる．

図1に RIAM-COMPACT の解析領域の鳥観図を示す．計算領域は主流方向(x)，主流直交方向(y)，鉛直方向(z)にそれぞれ 10km×10km×3.884km の空間を設定した．計算領域内の最大標高は 836 m，最小標高は 77 m である．解析方位は 16 方位とした．地形標高データは，国土地理院発行の空間解像度 50 m の標高データを用いた．

解析メッシュ数は，主流方向(x)，主流直交方向(y)，鉛直方向(z)にそれぞれ 200 ×200 ×40 であり，総メッシュ数は 1,600,000 である．水平面内（x 方向および y 方向）のメッシュ幅は各風車近傍で密となる不等間隔であり，最小メッシュ幅を 19 m とし，鉛直方向(z)のメッシュ幅は地面近傍が密となる不等間隔であり，最小メッシュ幅を 2.2m とした．

流入境界面にはべき法則に従う風速分布を与えた．本研究では，べき指数 α は地表面粗度区分IIに従う α=0.15 を用いた．流入風速は本サイトの年間平均風速に近い 7.0m/s を与えた．

地表面には粘着条件，側方境界面と上部境界面には滑り条件，流出境界面には対流型流出条件を課した．また，解析領域から流出方向に代表長さスケールの 5 倍の袖領域を付加することにより計算が破綻せず安定に実行できるようにした．ここで，代表長さスケールは解析領域内の最大標高と最小標高との標高差であり，本解析領域においては 759 m となる．また，代表風速スケールは流入境界面の最大標高位置における風速とした．

4. 結果と考察

本報告では，このウィンドファームの卓越風向上に位置する2基の風車 WT-6 と WT-8 の風特性について示す．下流側風車 WT-6 から見た上流側風車 WT-8 の位置は西北西であり，RIAM-COMPACT による流入風も西北西に設定した．なお，この2基の風車間距離は320m（ロータ直径の 4.0 倍）であり，比較的近い距離にあるため，

西北西の風条件では，下流側風車 WT-6 は上流側風車 WT-8 の後流の影響を受けると考えられる．

図2に風速 BIN に対する2基の風車 WT-6（下流側）と WT-8（上流側）の乱流強度を示す．各風速 BIN での乱流強度は，各風速 BIN 内にある全データの 90%タイル値を使用している．また，図中の 3 本の実線は IEC で定義されている乱流カテゴリーA，B および C による乱流強度を示している．

風車後流内の流れはロータによる旋回や後流内速度勾配などにより，主流と比べて乱流強度が増加する．そのため，図2では上流側風車 WT-8 に比べて，下流側風車 WT-6 に流入する風の乱流強度が高い．一方，風速が定格風速に達すると，風車は出力を一定に保つためピッチ角制御を行い，風を逃がす制御を行う．そのため，ピッチ角制御を行うとロータ出力を低下させると同時に推力も低下するため，ロータを通過する風速が増加する，つまり，後流の速度欠損が減少し，結果として乱流強度が減少する．本ウィンドファーム内に設置されている風車の定格風速は 13m/s であるため，一般には風速が 13m/s 以上になるとピッチ角制御を行うため，上流側風車 WT-8 を通過した後流は 13m/s 以上では乱流強度が低下した状態で下流側の WT-6 に流入すると考えられる．しかしながら，図2からは，風速 13m/s 以上の風速域でも，下流側に設置されている WT-6 の乱流強度が WT-8 に比べて顕著に高いままであることが分かる．これは，後流の影響だけでなく，他にも要因があると推測される．

図3および図4は RIAM-COMPACT で解析した瞬時の風を示しており，図3は WT-8 を通過した後流が WT-6 に流入しない場合，図4は WT-8 を通過した後流が WT-6 に流入する場合を示す．これらの図から，WT-8 よりもさらに上流の地形が影響して，WT-8 に流入する風速や風向がわずかでも変化すると，WT-8 の後流が WT-6 のロータ面を通過したり，しなかったりすることがわかる．

以上より，WT-8 の上流地形，および WT-8 と WT-6 との間の地形の影響により，後流の挙動が非定常となり WT-6 に流入する風の乱れを大きくしていると考えられる．

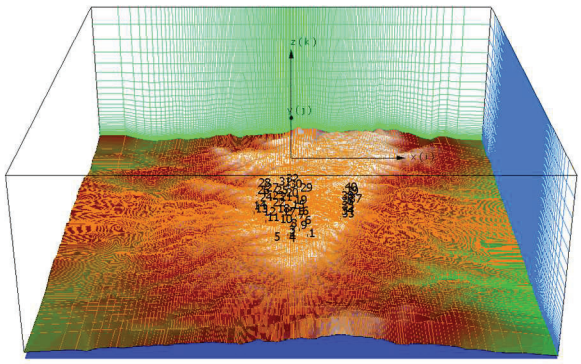


図1　解析領域の鳥観図

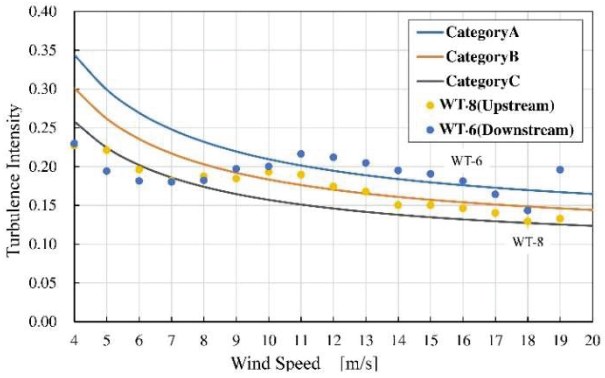


図2　観測風を風速 BIN で整理した乱流強度

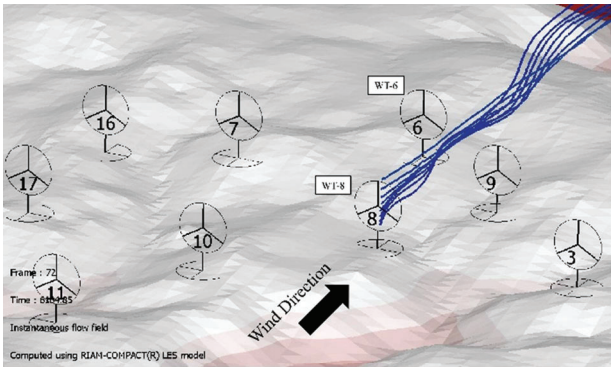


図3　下流側風車のロータ面を通過しない流れ

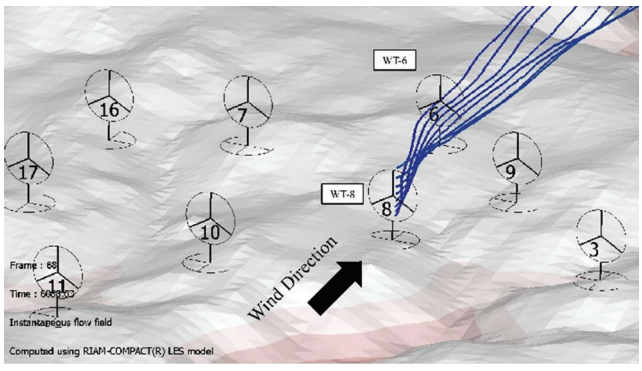


図4　下流側風車のロータ面を通過する流れ

ME-2 医療情報を用いたデータサイエンス研究

九州情報大学　荒平 高章

1. 緒言

近年，人工知能(AI)に関する研究開発が国内外を通して活発に展開されており，その応用範囲は自然科学分野から人文社会分野まで多岐にわたっている．AI 技術を駆使することで，コンピュータに人のような振る舞いを再現させようとする研究は，医学・歯学・薬学・看護・介護分野では労働者の仕事効率のスマート化や，いち早い分析とその結果の提供を目指し，盛んに研究されている[1].

一方，歯科分野において，インプラントは長期に口腔内に残り、上部構造のデザインを変えて使用していくことが可能な治療法である。しかし患者の転勤やかかりつけ歯科医院の廃院等により、インプラント治療のやり替え、あるいは継続が必要となっても、口腔内のインプラントが「どの会社の製品」で「どの規格」のインプラントであるかが不明だと、治療は著しく困難となる．国内には 100 種類以上のインプラントが存在し、経験の浅い歯科医師ではどのインプラントか鑑別できるまで、治療が始められず、右往左往することになる　本研究では，歯科医師が CT 画像などに写る歯科用インプラントの形状から製品や規格を予測するという経験的判断をコンピュータ上で人工知能によって再現することを目的とする．

2. 方法

本研究の学習データには，文献[2]に記載されているインプラントのレントゲン画像を用いた．具体的には，米国 BioHorizons 社のインターナルインプラント，エクスターナルインプラント，レーザーロックテーパード，ノーベルバイオケア社のノーベルアクティブ 3.0 の 4 種類である．4 枚の画像から計 22 個のインプラントを切り出した．本研究では，4 種類のインプラントと 2 種類のインプラントに分けて，それぞれ学習させた．本研究では前処理として，回転（-80～80 度），拡大・縮小（0.7～1.3 倍），画像サイズの統一（100×100×3），正規化（0～255 を 0～1 の範囲へ）を施した．また各データの 80%を学習用データ，学習用データの 20%を検証用データ，各データの 20%をテスト用データとした．学習用データはネットワークの重みを更新するするデータ，検証用データはネットワークの精度を検証するデータ，テスト用データはネットワークの学習後にネットワークの汎用性をテストするデータとして使用する．

3. 結果と考察

4 種類のインプラントの学習結果を表 1，2 種類の学習結果を表 2 にそれぞれ示す．4 種類のインプラントを学習させた結果，テスト用データに対する正答率は 61.7%，損失は

0.999 となった．学習中の精度は高かったが，検証用データとテスト用データで共に高い損失を示したため，過学習が起こったと考えられる．また 2 種類のインプラントを学習させた結果，5 パターンでテスト用データに対する正答率が 92.2%以上，損失が 0.236 以下と非常に高い精度を示した．しかし，インターナルインプラントとレーザーロックテーパードの学習では，テスト用データに対する正答率が 57.9%，損失が 3.029 になり，他のパターンと比べて低い精度を示した．低い精度だった原因として，解像度の悪さが考えられる．本研究では，開発環境の都合上，解像度に制限があったため，鮮明な特徴を学習することができなかった．この点に関しては，より高性能な環境で学習することで，鮮明な特徴を捉えることができ，人間が見分けることができないインプラントでも識別できると考えられる．また，本研究では多くの種類のデータを集めることができず，4 種類のデータを使った学習であった．歯科の現場で使われているインプラントの種類は更に多く，実用化を目指すには更に多くのデータを用いて学習しなければならない．

表 1　4 種類のインプラントでの学習結果

Loss	Accuracy	Validation Loss	Validation Accuracy	Test Loss	Test Accuracy
0.006	0.998	1.241	0.451	0.999	0.617

表 2　2 種類のインプラントでの学習結果

Id.1	Id.2	Loss	Accuracy	Validation Loss	Validation Accuracy	Test Loss	Test Accuracy
0	1	0.002	0.999	0.000	1.000	0.000	1.000
0	2	0.003	0.999	0.008	1.000	0.016	0.991
0	3	0.001	1.000	0.008	1.000	0.069	0.975
1	2	0.051	0.984	7.404	0.029	3.029	0.579
1	3	0.001	1.000	0.153	0.963	0.022	0.992
2	3	0.000	1.000	0.023	0.984	0.236	0.922

4. 結言

本研究では，歯科医師が CT 画像などに写る歯科用インプラントの形状から製品や規格を予測するという経験的判断をコンピュータ上で人工知能によって再現することを目的とし，前年度のインプラントの形状に似た工業用ネジを用いた画像識別を発展させ，文献内の歯科用インプラントのレントゲン画像による画像識別を行った．今後は，実際のレントゲン画像に対して本プログラムを適用し，その精度などについて検討をしていく．

参考文献

(1) 勝又 明敏，歯科画像情報の現状と将来展望，日本歯科保存学雑誌，2019 年 62 巻 5 号， 238-242．DOI https://doi.org/10.11471/shikahozon.62.238

(2) 簗瀬武史，竹島明道，栗山壮一，大橋功(2017)，『続・このインプラントなに?他医院で治療されたインプラントへの対応ガイド』，医歯薬出版株式会社．

光センシング技術を用いた圧力センサーの開発

広島大学大学院先進理工系科学研究科
教授　岩下 英嗣

1. 研究目的

現在、地球温暖化対策として CO2 排出量の削減が求めれており、それは物流という社会インフラにおいて稼働する輸送機器においても同じである。効率の良い輸送機器を設計するには抗力を低減する形状の開発が必要であり、そのためには抗力の起因となる物体表面上での圧力分布の実験計測技術の向上が求められる。

こうした背景を受け、研究代表者は長年にわたり、光センシング技術を用いた圧力センサーの開発に当たってきた[1)2)3)4)]。輸送機器の代表例として船舶を取り上げ、船体表面の圧力分布を行って来ている。そこで使用する圧力センサーは、FBG 圧力センサーであり、現在、船体模型に直接貼り付けて圧力計測が可能となっている。一方で、従来の歪式圧力センサーに比べて温度干渉を強く受けることも分かっており、計測精度の向上にはその影響を最小化することが求められている。本研究では、温度干渉影響を低減すべく新規に開発された FBG 圧力センサーを用いて船体表面の圧力を測定し、古いバージョンの FBG 圧力センサーや従来使用されて来た歪式圧力センサーとの比較を行い、温度干渉影響低減効果を確認する。

2. 研究組織

氏　名	所　属	職　名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	教授	代表者・実験解析
若原正人	株式会社シミウス		実験解析
鈴木寛太郎	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	博士 1 年	実験補助
八木敬祐	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
福光竜晟	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 1 年	実験補助
安藤悠輔	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 1 年	実験補助
山崎大樹	広島大学工学部第一類輸送・環境工学プログラム専攻	学部 4 年	実験補助

3. 実験の概要

九州大学応用力学研究所の深海機器実験水槽 ($L \times B \times d = 65 \times 5 \times 7\,\mathrm{m}$) にて、サンモジュール製 RIOS bulk carrier 模型を用いて正面向い波 (規則波) 中を曳航し、船体表面に貼付された従来の FBG 圧力センサー (Ver.6)、改良型 FBG 圧力センサー (Ver.7)、3 つの改良点を 1 つずつ施した FBG 圧力センサー (E01, E02, E03)、および船体に埋め込まれた歪式圧力センサーによってその際の船体表面圧力を計測する。計測された結果を比較することで温度干渉影響に着目した考察を行う。

3.1. 供試模型

実験で使用した供試模型を Fig. 1 に、その主要目を Table 1 に示す。

Fig. 1 供試模型 (ケミカルウッド製 RIOS Bulker)

Table 1 供試模型主要目

L_{pp}	(m)	2.4000	A_W	(m^2)	0.8354
B	(m)	0.4000	$x_B(=x_G)$	(m)	0.0510
d	(m)	0.1280	z_G	(m)	-0.200
C_b		0.8000	z_B	(m)	-0.0618
∇	(kg)	98.30	κ_{yy}/L		0.2500

3.2. FBG 圧力センサー

FBG 圧力センサーの計測原理を Fig. 2 に示す。FBG(Fiber Bragg Gratings) とは光ファイバー内に組み込まれている特定の波長だけを反射する回折格子のことである。その FBG によって反射される波長を Bragg 波長といい、FBG が圧力を受け変形することで Bragg 波長が変化する。この Bragg 波長の変化量から圧力が算出される。

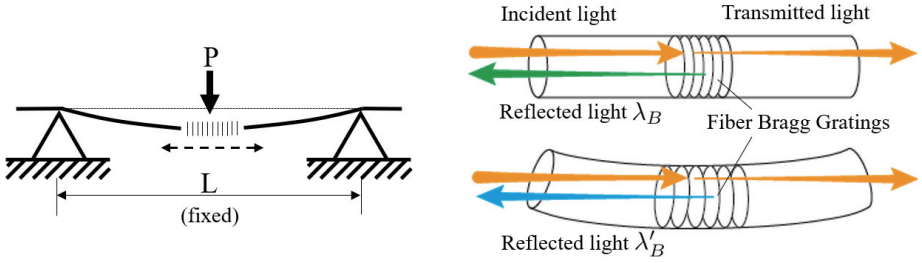


Fig. 2 FBG 圧力センサーの計測原理

FBG 圧力センサーには以下に挙げるような特徴や他のセンサーと比較した優位性がある。

(1) 小さく、薄い：計測部は長さ 15mm、幅 9mm、厚さ 0.6mm、データを伝送する光ファイバーは直径 0.155mm とセンサー自体が小さいため、船首船尾のような局率の大きい箇所での計測も可能となっている.

(2) 多点同時計測：光の特性を活かした WDM(波長分割多重伝送) 方式により、一本の光ファイバーに複数の FBG を刻むことが可能である. これにより計測システムが簡素化し、多点同時計測を行うことができる.

(3) 温度影響の補正：1 つの圧力センサーには圧力用と温度用の 2 つの FBG が刻まれている. この温度用の FBG は計測点近傍で温度影響を計測し、圧力の計測値から取り除くことを目的としている.

次に FBG 圧力センサーの、Ver. 6(旧式) から Ver. 7(新規) への 3 つの改良点を説明する。Fig. 3 に各改良点の概略図を示す。上が Ver. 6、下が Ver. 7 を表している。1 つ目の改良点は、リングフレームが変形することによる圧力算出時の係数の変化を防ぐためにフレームの剛性を向上したことである。2 つ目は、感温部と感圧部が異なる素材で覆われていたことによる温度影響の違いをなくすために、感圧部にステンレスシートを導入し金属に触れるようにしたことである。3 つ目は、温度による光ファイバーの変形具合の差を小さくするために、合計 3ヶ所ある光ファイバーの固定方法を統一したことである。今回は改良前の Ver. 6、改良後の Ver. 7、および Ver. 6 に 3 つの改良点をそれぞれ施したセンサーを比較した。以降簡単の

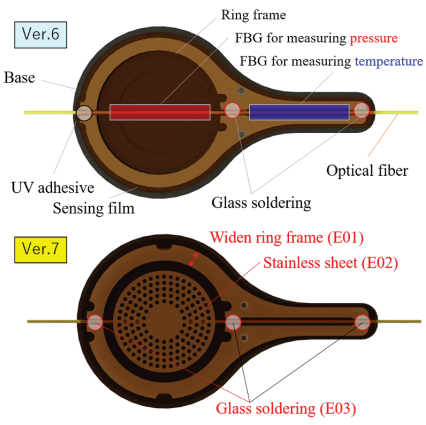


Fig. 3 センサーの改良点

ために、リングフレームの剛性向上を施したセンサーを E01、ステンレスシートを導入したセンサーを E02、ガラスソルダリングを追加したセンサーを E03 と呼称する。

3.3. 水槽実験

供試模型へのセンサーの取り付け位置を Fig. 4 に示す。ord. 9.0 にセンサーを取り付けており、各センサー位置を表すための θ は keel が $\theta = 0$deg.、喫水線が $\theta = 90$deg. と定義している。改良点の比較のための E01、E02、E03 は $\theta = 30, 45, 60$deg. に取り付けた。

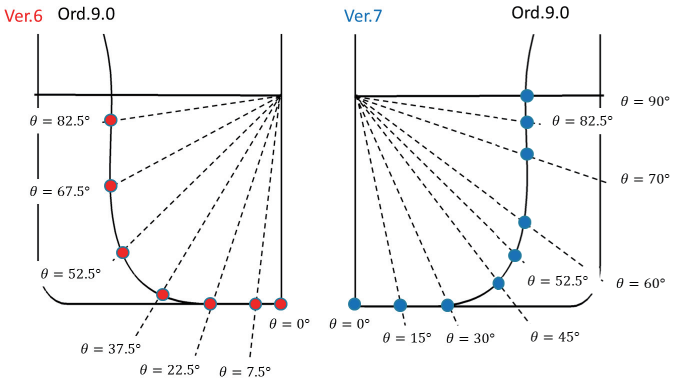


Fig. 4 センサーの取り付け位置

センサーを取り付け後 Fig. 5 に示す様に運動計測装置に設置し、$Fn = 0.18$ で $\lambda/L = 1.25$ の波条件のもと波浪中曳航試験を行った。曳航前には圧力算出に用いる較正係数を得るためのキャリブレーション試験を行っており、キャリブレーション及び曳航試験での圧力の計測システムを Fig. 6 に示す。運動計測装置に取り付けた後、昇降装置を用いることで供試模型を強制的に沈下および上昇させることで静水圧を変化させ、較正係数を得ている。

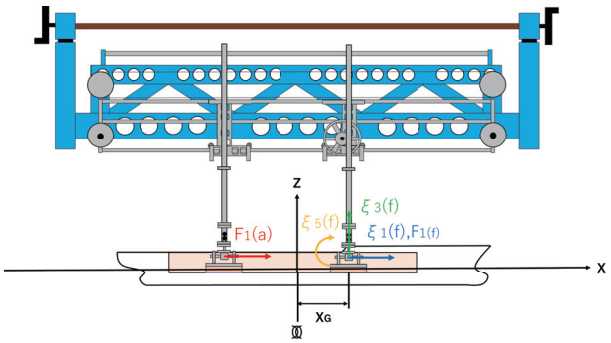


Fig. 5 運動計測装置概略図

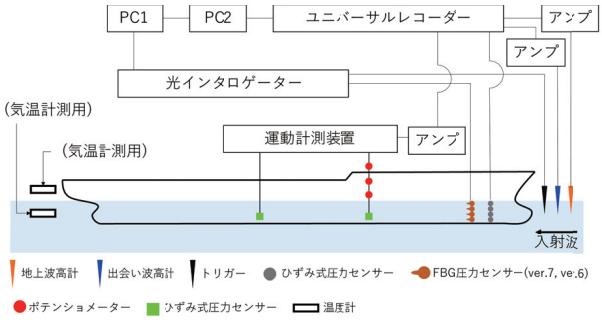


Fig. 6 計測システム図 (電気配線図)

4. 結果と考察

4.1. キャリブレーション

キャリブレーションにより得られた各センサーの較正係数を Fig. 7 に、それらのセンサーごとの平均値および標準偏差を Fig.8 に示す。上から Ver. 6、Ver. 7、E01、E02、E03 の結果である。Fig. 7 において横軸 ΔT は水温と気温の温度差であり、水面下 10cm の水温を基準とした水面上 10cm の気温である。

Fig. 7 より、これまでは Ver. 6 に関しては ΔT が大きくなるほど較正係数が大きくなる、すなわちセンサーの出力低下が確認されていたが今回はその傾向が見られなかった。これは FBG 圧力センサーが船体模型に両面テープを介して直接貼り付けられており、これまではウレタン製の模型を使用した実験を行っていたため、今回使用したケミカルウッド製の模型では出力特性が変化したのではないかと考えられる。また、Ver. 7 ではセンサーによって ΔT が大きいときに較正係数が大きくなるものも見受けられた。しかし Fig. 8 に注目してみると、Ver. 7 の方が Ver. 6 と比較して全体的に較正係数の平均値が 1 に近いことと、標準偏差が小さいことが確認できる。このことから Ver.7 は従来のものに比べセンサーの個体差が少なくなっていることと、温度によるセンサーの出力特性の変化が抑えられていると言える。

同様の比較から、E01 と E02 は温度に対する安定性が確認できるが、E03 は平均値のばらつきや標準偏差の大きさから Ver. 6 の特性に近いと言える。したがって E01 および E02 におけるそれぞれの Ver. 6 からの改良は温度干渉影響に対して効果があったと思われる。

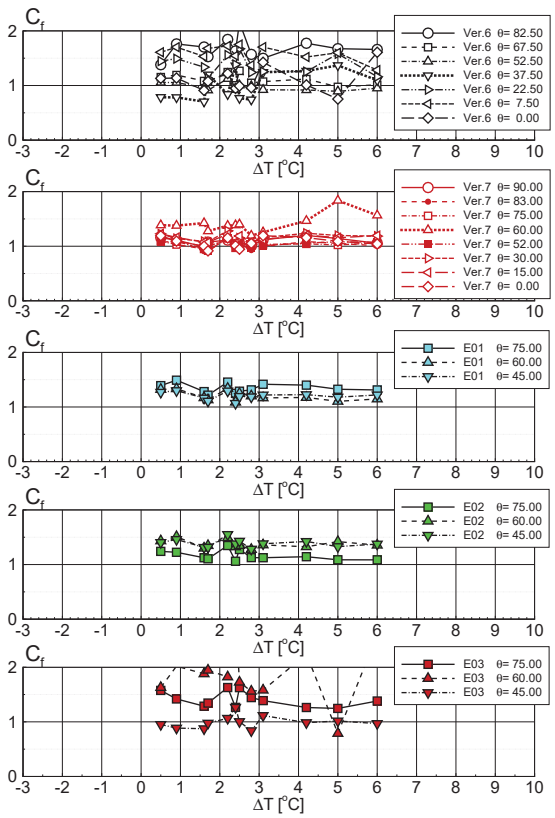


Fig. 7 キャリブレーションから得られた較正係数

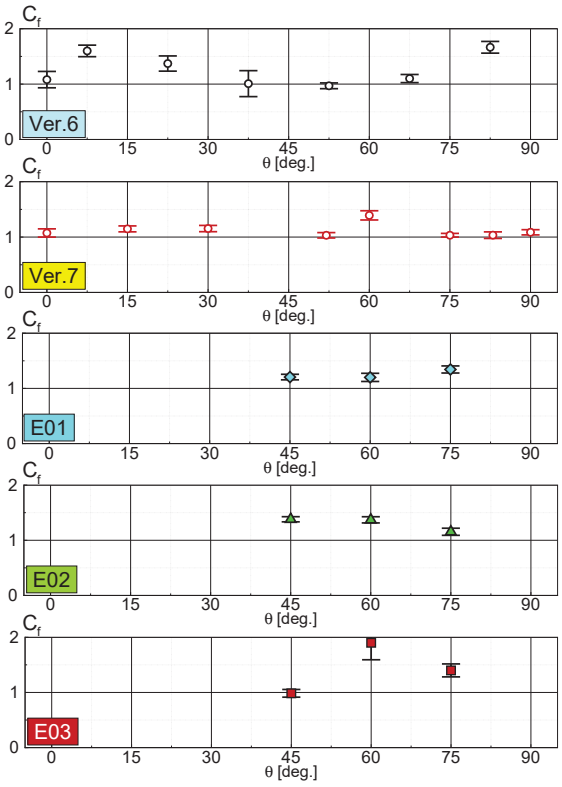


Fig. 8 較正係数の平均値および標準偏差

4.2. 定常圧と非定常圧

Fig. 9 に波浪中曳航試験により Ver. 7、Ver. 6 によって計測された船体表面の定常圧力と非定常圧力の結果を示す。上から静水圧を含まない定常圧力の $\rho U^2/2$ による無次元値、非定常圧力の ρgA による無次元値、入射波の波頂が船体中央に来たときを基準とした非定常圧力の位相差を示している。左側が温度差 6 ℃以内の 15 個のデータ、右側が温度差 2 ℃以内の 6 個のデータによる平均値と標準偏差となっている。まず、歪式圧力センサーによる計測値は標準偏差が小さく出力が安定していることが確認できる。Ver. 7 に関しては Ver. 6 と比較すると標準偏差が小さい値を示しているが、これまでの実験で歪式圧力センサーと同等の安定性を示していた温度差が小

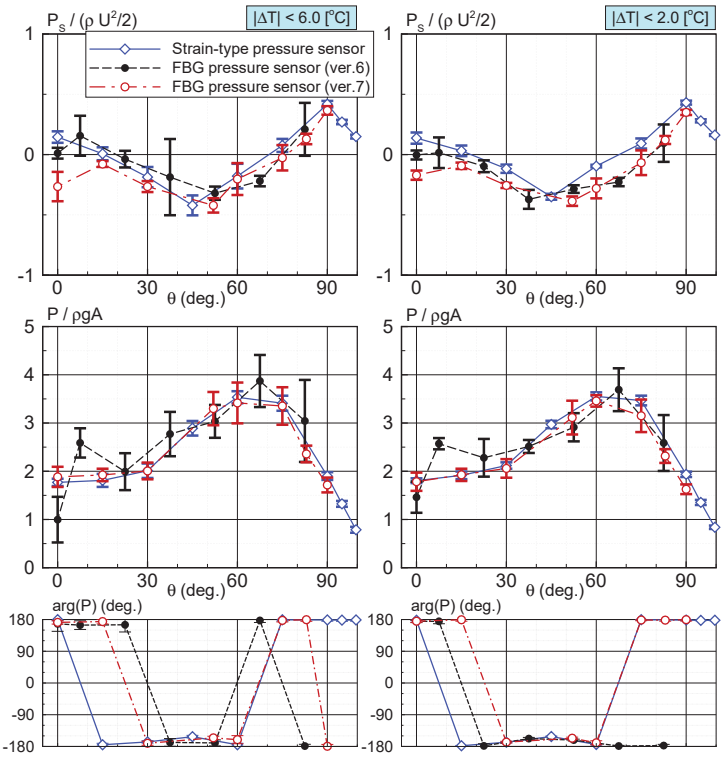


Fig. 9 Ver. 6、Ver. 7 による圧力計測結果

さい場合における安定性が劣っているように思われる。キャリブレーション同様、供試模型の材質の違いや計測条件が heave 運動の同調点付近であり、船体運動が大きかったことが原因ではないかと考えられる。しかし、平均値はどのセンサーも歪式圧力センサーによる計測値とよく一致しており、繰り返し計測を行えば十分な精度を確保することが可能であると言える。

次に各改良を施したセンサーによる計測値の結果を Fig. 10 に示す。左から E01、E02、E03 による 15 個の計測値の平均と標準偏差であり、それぞれ Ver. 7 との比較となっている。それぞれ見てみると、E01 と E02 は Ver. 7 と近い平均値を示しており標準偏差も近い値となっている。一方で E03 では定常圧力、非定常圧力共に Ver. 7 の結果とは一致しておらず、やはり Ver. 6 からの改善は見られなかった。

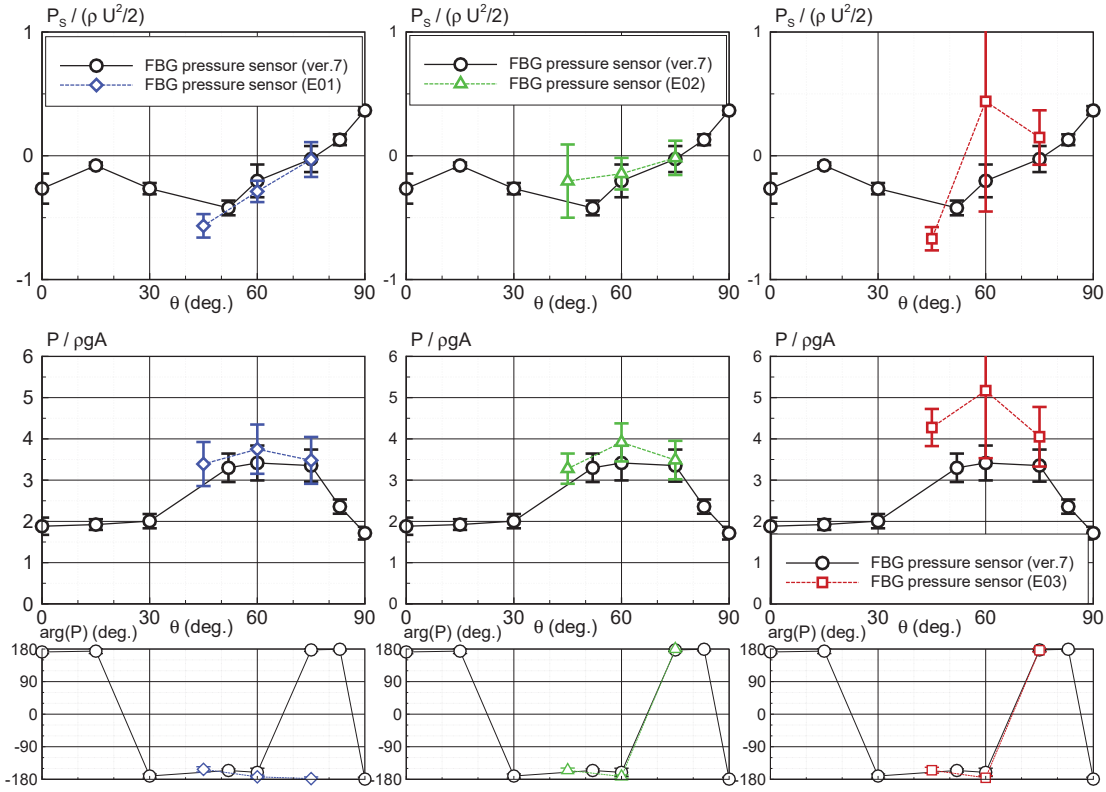


Fig. 10 較正係数の平均値および標準偏差

5. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) 新規に製作した Ver. 7 のセンサーは、旧型の Ver. 6 と比較して ΔT が大きい場合でも計測が安定して行えることが確認できた。

(2) Ver. 7 による計測値は歪式圧力センサーによるものと比較するとばらつきがあるもののその平均値はよく一致しており、繰り返し計測を行うことで平均値をとることで十分な精度の結果を得られると思われる。

(3) Ver. 7 に見られた温度干渉影響の改善には、ダイアフラムの剛性向上およびダイアフラムにステンレスシートを追加したことが起因していると考えられる。

(4) FBG 圧力センサーは船体表面に直接貼り付けて使用する。このため供試模型の材質の違いによって、圧力センサーに模型内部から熱が伝導し、その温度干渉影響のために圧力センサーの出力特

性が異なってくる可能性があると考えられる。この点に関してはFBG圧力センサーの実用的な活用に向けて検証が必要であり、今後の課題である。

参考文献

1) Iwashita, H., Kashiwagi, M.: An Innovative EFD for Studying Ship Seakeeping, Proceedings of the 33rd IWWWFB, 2018

2) Kashiwagi, M., Iwashita, H., Waskito, K.T., Hinatsu, M.: Prediction of Wave Loads with Measured Unsteady Pressure Distribution on Ship-Hull Surface, The 35th Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Seoul, Korea, 26-29 April 2020, 査読有

3) Kurniawan T. Waskito, Masashi Kashiwagi, Hidetsugu, Iwashita, Munehiko Hinatsu: Prediction of Nonlinear Wave Loads Using Measured Pressure Distribution on Ship Hull, Applied Ocean Research, 101, pp1-20, 102261, 2020, 査読有

4) Hidetsugu Iwashita: Innovative Measurement of Unsteady Pressure Distribution on Ship-Hull Surface and Its Use for Hydrodynamic Study on Seakeeping, Invited-Speaker Lecture No.4, The 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, 19-23 October, 2020, 招待講演

空力抵抗低減に向けた物体表面の流体摩擦力の光学計測

九州大学大学院総合理工学研究院
環境理工学部門　安養寺　正之

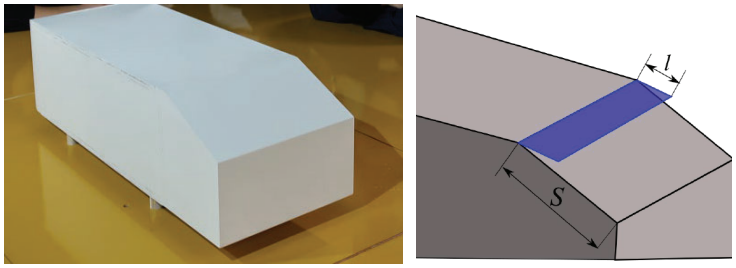
1. 目的

航空機や自動車などを始めとする高速輸送機の燃費性能向上のためには，空力抵抗の低減が必須の設計課題であり，流れ場の理解と流体物理に基づいた形状設計や各種アクチュエータの配置が要求される．本研究では航空機や自動車を対象として，物体表面の流体摩擦応力ベクトルを光学的に計測する Global Luminescent Oil-Film(GLOF)法[1]を適用することで，摩擦応力ベクトルをベースとしたミクロな流体構造解析により，各種模型形状と幅広い気流条件における空力特性と流体メカニズムの関連を明らかにすることを目指している．我々の研究グループではここ数年でこの GLOF 法を風洞試験で幅広い速度域に適用できる基礎技術開発を進めてきた．

本年度は大型境界層風洞を用いて，簡易車体模型(アハメド模型)に空力抵抗低減用のデフレクターを取り付けた際の車体後方の渦特性の変化とその効果を調べることを目的とし，GLOF 法を適用した流れの可視化試験を実施した．

2. 実験方法

本研究では，準標準簡易車体模型として用いられているアハメド模型[2](図 1 (a))を対象とした．車体の空力抵抗の主要因は車体後方に形成される後曳き渦であり，模型後方のスラント面を発生起因とする．本研究ではスラント面に図 1(b)に示すようなデフレクターを設置し，デフレクターの有無によるスラント面における渦構造の変化を計測対象とした．



(a)　アハメド模型　　(b) デフレクター

図 1 試験模型

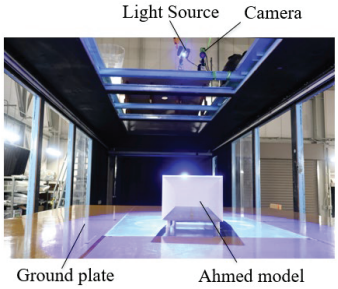


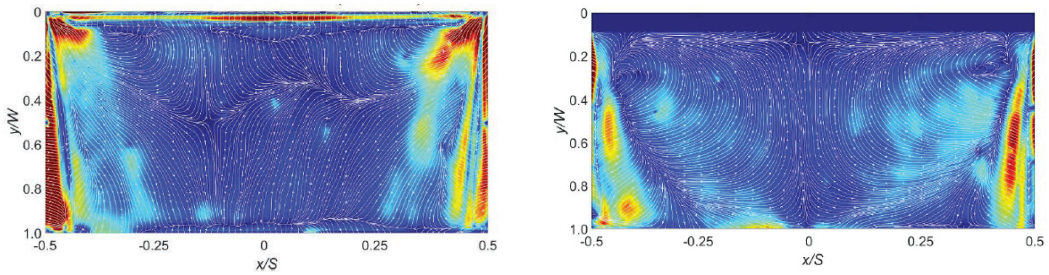
図 2 セットアップ

応用力学研究所の大型境界層風洞測定部内における模型及び GLOF 計測の光学系のセットアップを図 1 に示す．GLOF 法では，シリコンオイルに蛍光色素を含有させた蛍光油を使用する．この蛍光油は通風前に模型表面にスプレーで薄膜塗装(約 20～30 μ m)される．この蛍光油に励起光を照射させることで油を発光させる．通風中，模型表面の蛍光油は表面に生じる流体せん断力の強さと方向に応じて徐々に膜厚は変化する．時々刻々と変化するこの

膜厚変化を発光強度変化として CCD カメラにて時系列画像として撮影する．撮影された連続画像に対して，オプティカルフローの画像解析技術を適用させることで，画像上の輝度変化から流体せん断力に応じた油膜の空間変化，すなわち摩擦応力ベクトルを算出する．本画像解析に関するアルゴリズムの詳細は文献[1]を参照されたい．

3. 実験結果と考察

図 3 に GLOF 法によって得られた風速 10 m/s 時のスラント面の摩擦応力線分布及び摩擦応力強度分布について，デフレクターの有無で比較した結果を示す．摩擦応力ベクトルの向きの変化から流れの剥離及び再付着を明瞭に捉えられるのが GLOF 計測の大きな強みであるが，図 3(a)ではスラント面中央付近にω型の再付着線が観測される．一般に，スラント面ではエッジで流れが剥離するため，エッジとこの再付着線の間で剥離泡が形成さていると考えられる．一方，図 3(b)に示す摩擦応力ベクトル線からこの剥離泡の構造が大きく変化し，左右に双子渦を形成する特徴的な流れ場へと変化する興味深い流体現象が捉えられた．



(a) デフレクターなし　　(b) デフレクターあり

図 3 GLOF 法によるスラント面の摩擦応力ベクトル線分布及び摩擦応力強度分布

4. まとめ

本年度は大型境界層風洞を用いた共同研究の初年度に該当するため，初回は測定部内でセットアップ構築や本風洞固有の光学系の課題の粗い出しとその克服に重心が置かれた．これらを初期の段階で概ね克服できたことが大きく，2021 年 12 月の第二回の試験より目的としていた本計測に移行し，前述のような初期結果が得られるまでに至った．現在，その他の計測条件の画像解析を急ピッチで進めるとともに，これらの結果を纏め，2022 年 9 月開催の航空宇宙系の国際学会(ICAS2022)にて口頭発表と国際ジャーナルへの投稿を予定している．さらに次回の試験に向けて，GLOF 計測結果の補完データを得るべく，PIV 計測やスモークワイヤー法による可視化試験，さらに空力計測試験の準備を進めている．

参考文献

[1] Liu, T., “Global Luminescent Oil-Film Skin Friction Meter”, AIAA J., Vol. 46, No. 2, pp. 1−11 (2008).

[2] Ahmed, S.R., Ramm, G. and Faltin, G., “Some salient features of the times-averaged ground vehicle wake”, SAE technical paper, 1(840300) 1–31, (1984).

回転振子式波浪発電装置の最適化に関する研究

長崎大学海洋未来イノベーション機構　経塚雄策

1．はじめに

波浪は，海洋エネルギーの中でもポテンシャルが大きいことは以前から知られており，これまでも有望な装置が提案されてきたが，未だに商用化するには至っていない．その原因のひとつが，年間を通じて観測される波浪と数年に 1 度しか出現しない極限的な波浪の差が大きなことが上げられる．つまり，発電効率を上げようとして，通常の波浪に合わせて作られた装置が，極限的な波浪中では強度不足となり，事故を起こしてしまうことが実用化を阻む大きな原因となっている．その意味において，発電効率とともに大波高中における耐久性，冗長性も重要であると認識されるようになってきた．

そのような状況の中で，現在，欧州海洋エネルギーセンター(EMEC)において実証実験を行っている波浪発電装置が”Penguin”と呼ばれる装置である．これは，波浪中の浮体運動を利用して回転振子に接続された発電機を回して発電するものであり，波力を直接に受けるのではなく，浮体運動を介在させることによって冗長性が増す点が従来の装置と比較して優れていると考えられる．

Penguin の浮体としての特徴は，船型で船尾側の片舷がそぎ落とされたような形状であることである．これによって，正面からの入射波に対して，Pitching と Rolling が同程度に生じて回転振子が受動的に回転しうるようになっていると解釈されるが，この形状が必須であるかどうかについては明確ではない．

本研究では，最も単純な浮体形状として箱船について回転振子装置の設置位置を選ぶことによって Penguin と同じように波浪発電が可能であるかどうかについて数値的，実験的に明らかにすることを試みた．

2．回転振子の力学モデルと波浪中の運動方程式

波浪中の浮体の動揺に関する理論は，速度ポテンシャルを用いた線形理論によってほぼ確立しているが，ここでは浮体に搭載された回転振子との連成運動を考える必要がある．回転振子の運動は図1において単純化して考えるが，大回転運動が前提なので線形化は難しい．

そこで，規則波中において，浮体の動揺については線形化するが，回転振子については非線形として扱い，時間領域において時間発展方程式を解いて定常解を求めることにした．浮体の重心位置を(x_G, y_G, z_G)，回転振子の中心位置を(x_m, y_m, z_m)とすると回転振子の重錘の位置は

$$\left.\begin{aligned} x(t) &= X_1(t) + (z_m - z_G)X_5(t) - (y_m - y_G)X_6(t) + x_m \\ &\quad + a\cos\theta\cos\varphi(t) \\ y(t) &= X_2(t) + (x_m - x_G)X_6(t) - (z_m - z_G)X_4(t) + y_m \\ &\quad + a\cos\theta\sin\varphi(t) \\ z(t) &= X_3(t) + (y_m - y_G)X_4(t) - (x_m - x_G)X_5(t) + z_m \\ &\quad - a\sin\theta\cos(\varphi(t) - \varphi_0) \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

で与えられる．

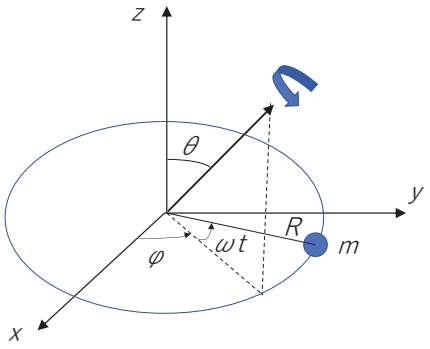


図 1　回転振子の簡易モデル

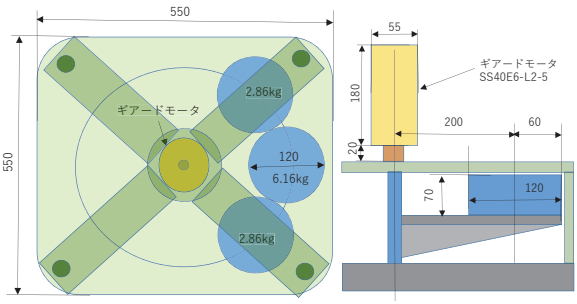


図 2　回転振子概略

この重錘の運動エネルギーをTとすれば

$$T = \frac{1}{2}m\{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2 + \dot{z}(t)^2\} \quad (2)$$

位置エネルギーをUとすれば

$$U = mgz(t) \quad (3)$$

であり，ハミルトニアンL

$$L = T - U \quad (4)$$

を用いれば，次式が成立する．

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial x_j} = 0, \quad j = 1\sim 6 \\ \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

(5)から導かれる連立方程式を離散化してRunge-Kutta法によって解いた．

3．実験装置概要およびシミュレーション結果

図２は，回転振子装置の概略を示す．重錘は手持ちのウェイト5個を3つに分けて配置した．総重量は11.88kgであり，回転アームの長さは回転軸から200mmとした．発電機は増速比1:10のギアードモーターを直結して用いた．この発電機は，強制回転する場合にはモーターとして使用する．

浮体模型は箱船(LxBxD=1.2m x 0.8m x 0.4m)とし，標準喫水をd=0.125mとし，排水量120kgとした．

図3はこの箱船の上下揺と横揺の周波数応答であり，横軸はλ/Lである．5本の曲線は，入射波角度αが0, 22.5, 45, 67.5, 90° を示している．この結果から横揺の同調点は$\lambda/L = 1$，上下揺の同調点は$\lambda/L = 1.9$付近にあることが分かる．よって，ここでは入射波の波長はλ/L=1あるいは1.9として以降のシミュレーションを行った．

回転振子に関するパラメータとしては，回転振子の位置(x_m, y_m, z_m)，振子の重量，腕の長さの5つであり，これらの組み合わせを最適化することによって一定方向に定常回転し，かつ発電量が大きなものを求めることが目的である．図4は，ワンウェィクラッチなしの場合のシミュレーション結果の一例であり，上段のグラフは浮体の左右揺，上下揺，横揺の時系列，下段は回転振子の回転角，角速度および発電量である．この例は，重錘は排水量の10%，回転アームは実験装置と同じであるが，30周期のシミュレーションでも横揺は定常に達していないこと，回転振子の角度および角速度のデータから約30° 付近で正転逆転を繰り返していることなどが分かる．

図5は，ワンウェイクラッチありの場合の同様なシミュレーション結果の一例である．この例も30周期ではまだ定常に達していないことが分かるが，ワンウェイクラッチの効果は回転振子の角度に明確に表れている．時間とともに角度が増大しており，このような運動が望ましいものであるが，実のところ角速度の記録をみると1周期の時間の中で半分ほどはゼロとなっており，その時には回転は止まっていることになる．そのことは，発電量にも表れており，間歇的な発電しかしていないので，我々が求める解ではない．

回転振子の5つのパラメータを変化させ，数値実験により望ましい回転運動および発電を実現しようとしたが，現在までのところ満足すべき結果は得られていない．これに関して，今のシミュレーションプログラムでは，回転軸の摩擦の影響を無視しているが，実際には回転振子装置は片持ち梁の先に重錘が付いているので梁と回転軸のたわみによる摩擦は避けられないので，適当な重さの重錘を用いることが望ましい．

4．水槽実験概略

令和3年11月30日(月)から12月3日(金)までの5日間に深海水槽において，主として規則波中の実験を行った．波周期はT=1～1.6secで，波高は約6cmとした．浮体は当初はロープ係留を考えていたが，波向きによる変化を観察することを容易にするために曳引車からロープ係留することにした．図6は深海水槽中に設置した模型の写真であり，横波状態のものである．

計測装置としては，当初は6自由度の加速度センサーを利用して計測する予定であったが，これに必要なケーブルの調達が間に合わず，代替えとして2軸の傾斜計およびデータロガーを搭載して浮体のPitchingおよびRollingを記録した．また，実験中のビデオ撮影も行った．

5．まとめ

今回の実験では，Penguinのような自励的な回転振子運動が実現できなかった．この原因は，主としてPitchingとRollingから構成される傾斜面が振子の回転を促すようにならなかったこと，回転振子の軸に発生する摩擦トルクが大きくて起動が出来なかったこと，またワンウェイクラッチを装着したことで摩擦トルクが大きくなった，などであると考えている．これらの課題を克服するべく研究を継続したい．

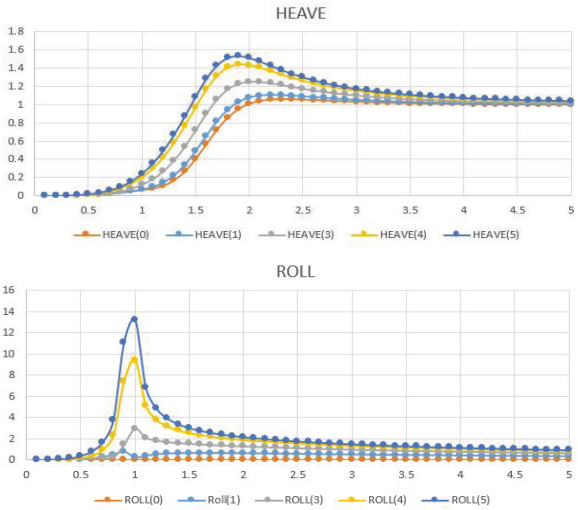


図 3　上下揺と横揺の周波数応答関数

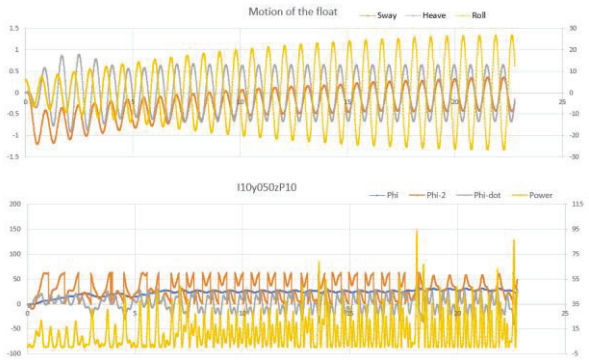


図 4　One way clutch なしの動揺と回転振子の運動

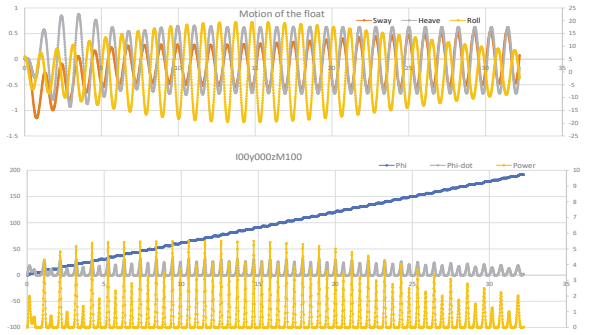


図 5　One way clutch ありの動揺と回転振子の運動

図 6　深海水槽中の模型の状況

研究組織

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	横井裕一，三明　迅(B4)
所内世話人	胡　長洪

ウルトラワイドギャップ半導体ダイヤモンドおよび酸化ガリウムの欠陥の同定と素子への影響

佐賀大学大学院工学研究科　嘉数 誠

1. 序論

β型酸化ガリウム(β–Ga_2O_3)はバンドギャップが 4.8 eV あり、SiC や GaN より広いウルトラワイドギャップ半導体で、高効率大電力パワーデバイスとして期待され、実用化研究が進んでいる。しかし同一ウェハ上の作製したデバイスでも、逆方向リーク電流や低い破壊電圧を示すデバイスがあり、その起因のキラー欠陥を明らかにし、密度を低減する必要がある。我々は縦型ショットキーバリアダイオード（SBD）を作製し、超高感度エミッション顕微鏡でその逆方向リーク電流によるエミッション発光を捉え、走査型電子顕微鏡や断面透過型電子顕微鏡により欠陥を同定した。

2. 実験方法

用いたのは 2 インチ径の EFG 成長 n 型 (001) β–Ga_2O_3 基板上に HVPE 成長したエピ層（膜厚約 10μm）に作製した n 型β-Ga_2O_3 縦型 SBD である。まず裏面全面にイオン注入、Ti/Au 蒸着、アニールを施しオーミック電極を形成し、つぎに表面に Ni/Au を蒸着し SB 電極を形成した。SBD の電流電圧特性測定後、裏面のオーミック電極をウェハ中央部のみエッチングし、裏面から、超高感度 EM-CCD カメラを備えたエミッション顕微鏡で、逆バイアス印加時の SBD を観察した。つぎに（基板結晶をエッチングせずに）SB 電極のみをエッチングし、β型 Ga_2O_3 表面を AFM やシンクロトロン X 線トポグラフィーで観察した。

3. 実験結果と議論

EFG 成長(001)基板に HVPE 成長したエピ膜に作製した同一ウェハ上の 800 μm 径の SBD で、SBD #0308 は逆方向リーク電流が無かったが、SBD #0408 では逆バイアス－100 V で−1.25 μA (−0.25 mA/cm^2) のリーク電流（密度）が確認された（図１）。SBD #0408 をエミッション顕微鏡観察したところ、リーク電流によるエミッション発光(#1, #2)が観察された（図２）。そのエミッション発光箇所は、電流電圧特性測定時に、測定用の探針を置いたところであった。

シンクロトロン光 X 線トポグラフィー(**g**= 605)で観察したところ、探針を当てた応力により表面欠陥が生成したことがわかった（図３）。同じウェハで探針の圧力と欠陥生成の関係を調べたところ、およそ 0.823GPa の圧力で表面欠陥が形成されることが明らかになった。

4. 結論

HVPE エピ膜中の酸化ガリウム SBD のリーク電流、耐電圧をもたらすキラー欠陥は、測定用の探針の圧力により生じた表面欠陥であることがわかった。

発表、論文リスト

[1] S. Sdoeung, K. Sasaki, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata, and M. Kasu, Applied Physics Express 14, 036502 (2021).

[2] S. Sdoeung, K. Sasaki, S. Masuya, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata, and M. Kasu, Appl. Phys. Lett. 118, 172106 (2021).

[3] O. Ueda, M. Kasu, and H. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys. (Invited Review) in press (2022).

研究組織：嘉数　誠（佐賀大学大学院理工学研究科）、東藤　貢（九州大学応用力学研究所）

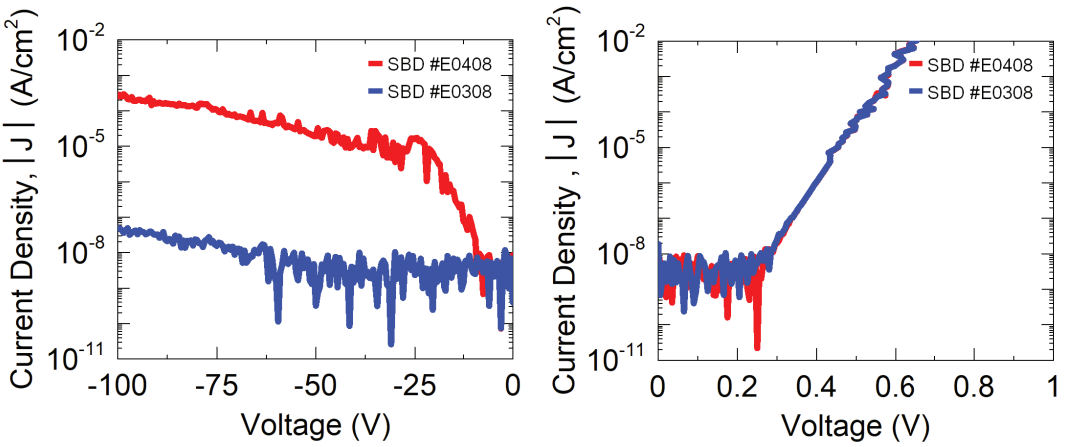


図１. HVPE 成長 b-Ga203　ショットキーバリアダイオードの電流電圧特性。SBD　#E0408 で逆方向リーク電流が認められる。

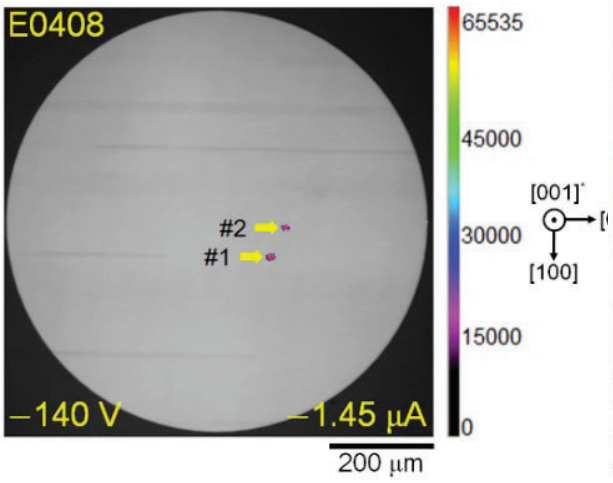


図２. エミッション顕微鏡像

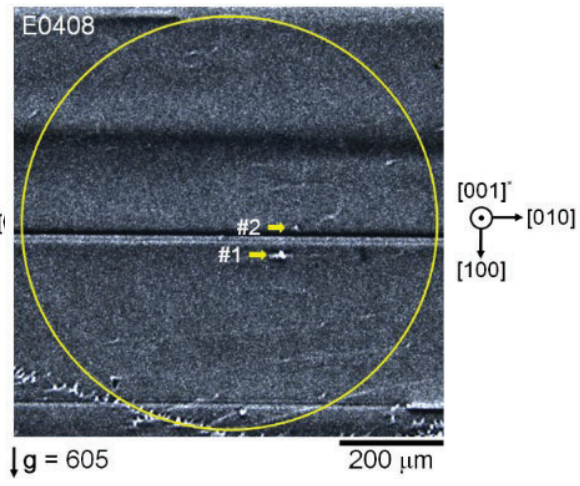


図３．シンクロトロン X 線トポグラフィー像

極低レイノルズ数翼の革新的空力向上の為の基礎研究

同志社大学 理工学部 平田 勝哉
同志社大学 理工学部 野口 尚史
同志社大学 理工学部 浜口 慶一郎
同志社大学 理工学部 神崎 雄大
九州大学 応用力学研究所 内田 孝紀
九州大学 応用力学研究所 杉谷 賢一郎

1. 研究目的

低レイノルズ数領域における翼の空力特性の把握は，無人航空機 UAV／超小型航空機 MAV の開発や昆虫／鳥／種子の飛行システムの解明，小型風力／水力発電機の開発などにおいて重要である．しかし，その様な低 *Re* 領域での翼の空力特性についての理解は，層流-乱流遷移などと関係した複雑かつ無視できない *Re* 数効果の為，未だに充分ではない．本研究では，翼周りの流れの三次元構造について，水槽を用いた可視化実験を行い，得られた画像に PIV 解析を施し，そのデータを解析する．また，数値解析で得られた流れ場の可視化図との比較を行い両者の整合性を確認する．

2. 実験方法

本実験では，翼モデル周りの流れの可視化として，作業流体に直接トレーサー粒子を混ぜる手法を行った．トレーサー粒子は比重が水に近い，ORGASOL（粒子径 50μmm 比重 1.03）を用いた．トレーサー粒子の径は充分小さく，流れによく一致する．測定面は，主流及び翼スパンに垂直な方向である．

翼モデルは，水面と直角になるように取り付ける．この時，水中に沈んでいる部分は，水面から水底より 5mm 高くなるようにした．カメラは台車と同期運動するように水中に取り付けた．また，光源にはスライドプロジェクターを利用し，スリットによって光を収束させ，シート光になるようにした．尚，この光源も翼モデルを取り付けた台車に固定されており，撮影時は台車と同期して動く．シート光は翼モデルの後方に進行方向に対して垂直な面に当たるようにし，さらに水中に浸かっている部分を長くすることで，撮影する流れが翼の 端や水面の影響が極力出ないように留意した．実験の概略図を図 1 に示す．

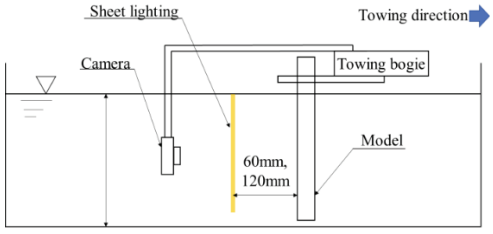


Fig. 1 Experimental apparatus

3. 結果と考察

図 2 は水槽実験によって得られた $Re = 2.0 \times 10^2 - 8.0 \times 10^2$ における $\alpha = 90$ deg.の平板翼後流の解析結果を示す．この図は，翼後縁から 4 翼弦長下流の面での主流方向渦度 ω_z の y 軸方向（主流直角かつスパン直角方向）平均を示す．つまり，この図はスパン方向に生成された三次元構造（縦渦）の時間変化を表したものである．

この図から，$Re = 2.0 \times 10^2$ において規則的な波長を確認することができた．これは，この図におけるその他の Re と比較して，三次元構造（縦渦）の間隔が大きく，スパン方向に渦度の符号が交互に変化していることから Williamson[1] が示したモード A であると考えられる．

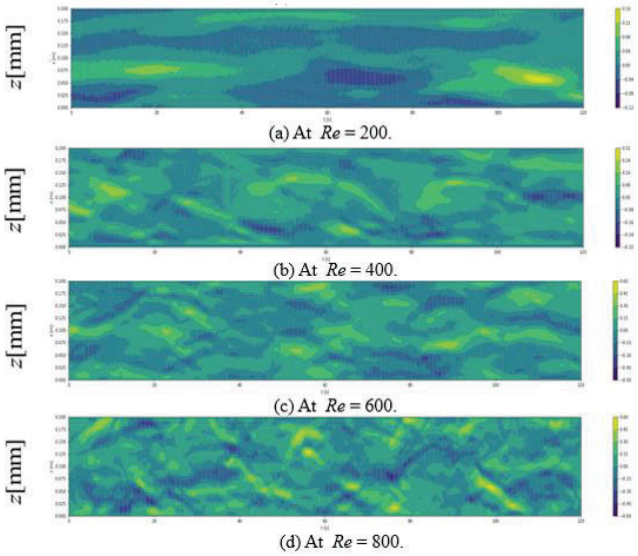


Fig. 2　at $\alpha = 90$ by water-tank experiment

Temporal variation in span-wise distribution of cross-span-wise-averaged mainstream-wise vorticity $(\omega_x)_{CWSA}$ at $x = 240mm$ (on a cross-mainstream plane 2c downstream from the trailing edge) for FP.

4. まとめ

平板翼における $Re = 2.0 \times 10^2$，$\alpha = 90$ deg.の後流の可視化に関する水槽実験において，発生した流れの三次元構造が Williamson[1] の示すモード A との対応について議論した．今後，$Re = 1.0 \times 10^2 - 3.0 \times 10^2$ での流れの三次元構造を解明する予定だ．

参考文献

(1) Williamson C.K.H., “Vortex Dynamics in the Cylinder Wake”, *Annu. Rev Fluid. Mech*. Vol.28 (1996), pp.477-529

謝辞

本研究は，九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです．

OTEC 深層水取水管のための自由垂下パイプの自励振動に関する実験

九州大学・大学院工学研究院　宇都宮 智昭

研究目的

海洋温度差発電(OTEC)の商用化に向け，大流量取水のための深層水取水管(CWP)がボトルネックとなっている．正味出力 100MW の CWP では取水量は約 200m^3/s 必要であり，直径 12m，長さ 800m で 2m/s での取水が想定される．このような流量で CWP に内部流による不安定振動が発生する可能性があり，このような流体関連振動現象を理論的に明らかにする必要がある．

2020 年度の実験では取水による振動を計測するための実験装置の構築および予備的な振動の観察を行った．しかし，振幅が小さくその定量的な評価には至っていない．今年度の実験ではこの予備実験を踏まえ，実験方法，計測装置を改善しより高い精度で振動を計測することを目的とする．また，計測された振動を既存の理論と比較しその検証を行う．

実験方法

深海機器力学水槽に図 1 の通り実験装置を構築した．図 1 中のサージタンクの底部に長さ 4m，内径 20mm，板厚 1mm のポリカーボネート製パイプを取付け，試験体とする．サージタンク内部に水中ポンプを沈め，これを介して水を水槽外に排水することで試験体に安定した取水流を発生させた．

2020 年度の実験では取水のみでは振動が小さく計測が困難であったため，今年度の実験では初期変位を与え自由減衰振動を計測するように試験方法を改めた．そのため，フレームをサージタンク・試験体の周囲に設置し，ワイヤーを通して試験体の下端に初期変位を与えるようにした．

計測は試験体上端にひずみゲージ，下端に反射テープを貼付け，それぞれ動ひずみと 3 次元変位を計測する．水槽の底に 2 台のネットワークカメラ IPC608UW (LINOVISION, https://www.linovision.com/)を設置し，反射テープの中心を対象とした画像処理・モーションキャプチャーを行えるよう，システムを構築した．

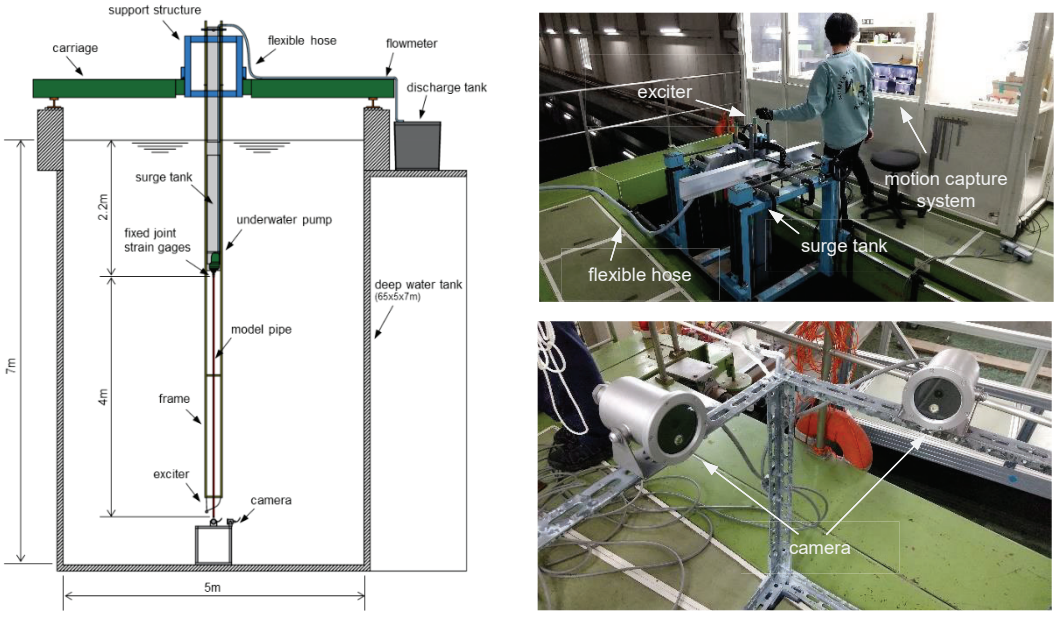


図 1 実験装置概略図と写真

研究結果・考察

取水流がある場合とない場合の計測結果の一部を図 2 に示す．まず取水流がない場合には 2 次元の典型的な自由減衰振動の特徴を示したのに対し，取水流のある場合には初期変位を与えた Y 軸方向と直交の X 軸方向にも振動が発生し 3 次元の複雑な挙動になっていることを確認した．これにより弾性管の自由振動が内部流により明確に異なった傾向を示すことを初めて確認できた．また，これは既存の理論では予測されなかった現象であり今後の理論の拡張が課題である．

実験結果を Paidoussis らによる理論と比較した結果を図 3 に示す．ただし，上図では管下端の取水口の影響を考慮しておらず，下図では考慮したモデルを導入している．上図では理論的には自励振動が発生する結果が得られているが，実験では明らかに自励振動は発生しておらず完全に減衰している．下図では理論は実験の傾向を再現している．これにより取水口の影響が重要であることを実験的に再確認し，また既存の理論と概ね一致した傾向を確認することができた．

今後はより速い流速で実験を行えるように実験装置の改善を目指すと共に，自由振動だけでなく強制振動状態での弾性管に及ぼす内部流の影響を実験的に検討する予定である．

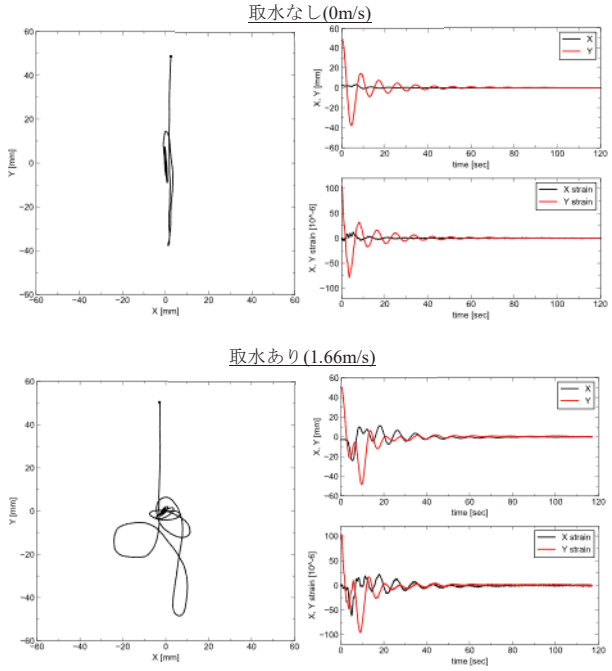


図 2 実験計測値

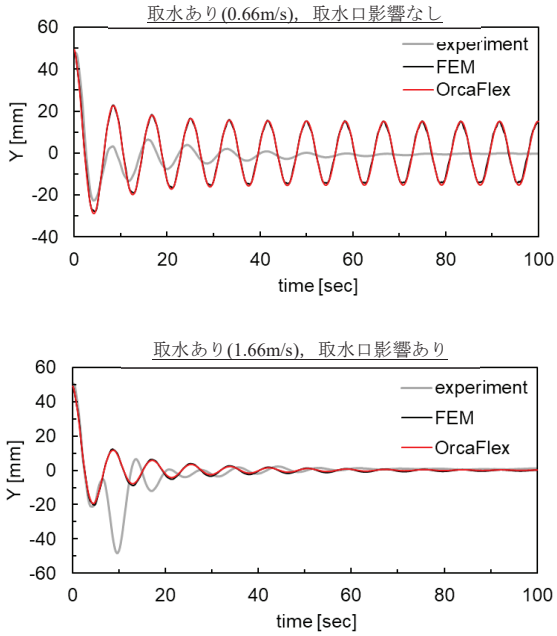


図 3 実験結果と理論の比較

研究成果報告

【査読付き国際会議】

Hisamatsu, R., Adiputra, R. and Utsunomiya, T. 2022. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Fluid-Conveying Pipe for OTEC. *Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, OMAE2022-78136, June 5-10, 2022, Hamuburg, Germany (講演予定).

小型で安価な軽量ドローンとゾンデモジュールを組み合わせた気象観測システムの構築

海上保安大学校基礎教育講座　近藤文義

１．実験目的

本研究では様々な地表面における内部境界層の発達状況を明らかにするため、地表面から高さ 150 m までの一般気象要素（風速・風向・気温・湿度・気圧）の鉛直分布を計測することのできる無人航空機（ドローン）による気象観測システムの構築を目的とした。対象としたドローンは、多くのユーザーが利用できるよう国内において圧倒的なシェアを占めており高性能で安全性の確認実績が多数ある DJI 社製の Mavic Pro とし、図１の通り気温・湿度・気圧を計測するゾンデモジュール（InterMet 社, iMet−XQ2）をドローンの頭上に固定し、さらに以下の風洞実験によりドローン自体が計測する風速・風向を含めて任意の地点における一般気象要素を計測することができる観測システムを構築した。

図１　構築したドローン気象観測システム

２．実験方法

本実験では、任意の風速場を発生させることができる境界層風洞を用い、ドローンが風を受けながら自律的に姿勢制御を行うホバリング時に出力するパラメータと風速との関係から、風速・風向を定量的に評価した。具体的には、ドローンがホバリング時に受ける２つの力（水平方向の風による空気抵抗と鉛直方向の重力）に対し、ローターの回転数（ω）と姿勢角（α）を変えることで推力と揚力をそれぞれの逆向きの力として発生させ、力のつり合い式から風速・風向を算出する。ここで、Mavic Pro は４つのローターを有するクアッドコプター型のドローンであるため、各ローターの回転数の２乗の和（$\omega^2 = \sum_{i=1}^{4} \omega_i^2$）と風速の２乗（$u^2$）とに、

$$u^2 = k \cdot \omega^2 sin\alpha$$

の関係があることを利用して、ω と α の２つのパラメータから風速・風向を評価することを試みた。k はドローンの形状や姿勢角などによって変わる受風面積や空気密度で決まる係数である。本実験では、風速は 0 m/s から最大 12 m/s までの範囲、風向はドローンの Yaw 角を 45°ずつ変えることで全方向に対して評価した。

図２　境界層風洞による実験の様子

３．実験結果

図３はドローンの Yaw 角を 0°、つまり風に対してドローンは正面に向いた状態とし、風速を 0～6 m/s まで 1 m/s ずつ変化させた時のドローンの Pitch 角・Roll 角・姿勢角（α）、各ローターの回転数の２乗の和（ω^2）、$\omega^2 sin\alpha$ の時系列を示す。ドローンの Yaw 角が 0°であるため、風速変化に対して Roll 角の変化はみられず、Pitch 角のみを変化させることで風に対し姿勢制御を行ってホバリングしている様子が確認できる。また ω^2 は風速増加に対して減少、各ローターを個別にみると前方のローターは左右共に回転数が減少、後方のローターは増加した。ω^2 は風速増加に対して減少したが、姿勢角を大きくすることで、風による空気抵抗に対する推力に相当する$\omega^2 sin\alpha$は風速と共に増加する結果となった。

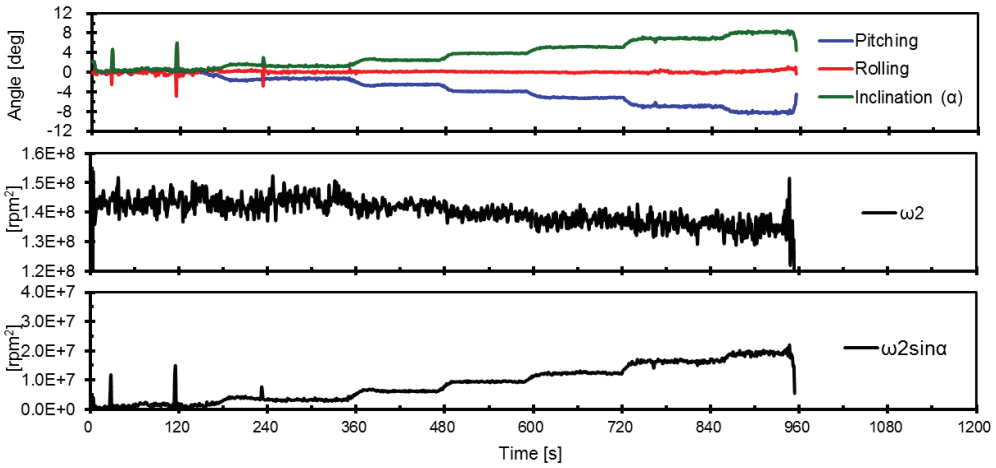


図３　風速変化に対するドローンの Pitch 角・Roll 角・姿勢角（α）、ω^2、$\omega^2 sin\alpha$ の時系列変動

図４は風速の２乗と$\omega^2 sin\alpha$との関係を示している。Yaw 角が 0°と 180°の時に一致、45°、90°、135°の時には、どの Yaw 角とも異なる関係にあることが分かった。これらの違いはドローンの形状や風速変化により生じる姿勢角の変化による受風面積の変化が原因と考えられる。図には示さないが、Yaw 角が 45°と 315°、90°と 270°、135°と 225°の時に同様の関係性が得られた。この理由については図１から分かるように、Mavic Pro は左右が対象の形状であることが主因と考えられる。本研究では同一機種間の個体差を確認するために、異なるシリアルの Mavic Pro と比較したところ異なる関係性も得られた。

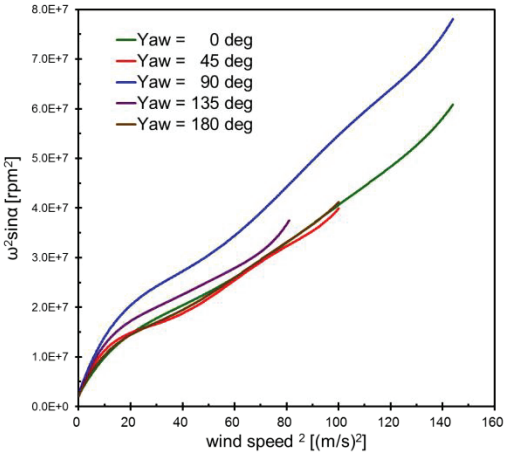


図４　風速の２乗（横軸）と$\omega^2 sin\alpha$（縦軸）との関係

４．研究成果報告

なし

５．研究組織

研究代表者・近藤文義（海上保安大学校）／　研究世話人・内田孝紀（九州大学）

水中ビークルの動力学の高精度推定に関する研究

九州大学大学院工学研究院　山口　悟

1. 研究の目的

近年、日本の領海・排他的経済水域内にメタンハイドレートやコバルトリッチクラスト、海底熱水鉱床などの海底資源の存在が確認されており、早期の開発が強く望まれている。海底資源開発を円滑に進めるには，資源の賦存量や賦存場所を把握する海洋調査が必要不可欠である。一方で，水中考古学分野における海中探査技術の応用も広がりを見せている。近年では，海底下に沈没した海底遺跡，沈船を対象として音波探査，各種ソナーによる調査が実施されている。

これらの海底資源，海中考古学探査のための海中ビークルを開発するためには，有効な機体形状を計画し，その運動を制御するために機体の運動について詳細に検討する必要がある。一方で，海中ビークルは形式，使用目的ごとに機体形状が大きく異なるため，開発の初期段階で機体の正確な運動モデルを構築することは困難である。

本研究では，CFD 計算に基づき効率的に機体の運動モデルを構築する手法について検討する。また，その精度をプロトタイプの機体を用いた水槽試験により調査する。はじめに，水中考古学探査を目的とした曳航式海中ビークルの機体形状を計画した。すなわち，海底下に埋没した海底遺跡，沈船を音波探査により調査するための曳航式の水中ビークルを開発した。ここでは，曳航体に搭載する振動子と海底面間の距離を一定に保ちながら曳航を実施するため，ビークルのトリムとヒールを制御する必要がある。機体に作用する流体力は CFD 計算により推定し，機体の構成について検討した。次に，構築された運動モデルの有効性を確認するために，深海機器力学実験水槽において曳航試験を実施した。ここでは，条件の異なる曳航状態においてビークルの運動と曳航張力を計測し，結果の解析を実施した。さらに，機体の運動制御系を実装し，その有効性について調査した。

曳航式海中ビークルのプロトタイプとして，機体形状を Fig. 1 のように計画した。

2. 数値計算による流体力の調査

数値流体計算には OpenFOAM を使用し，ビークルに作用する流体力を調査した。基礎方程式は非圧縮性粘性流体を対象とした RANS 方程式と連続の式である。ここでは，有限体積法により離散化し，SIMPLE 法により計算を行った。乱流モデルには SST k-omega model を用いている。計算に用いた格子と得られた結果の一例を Fig. 2, 3 に示す。

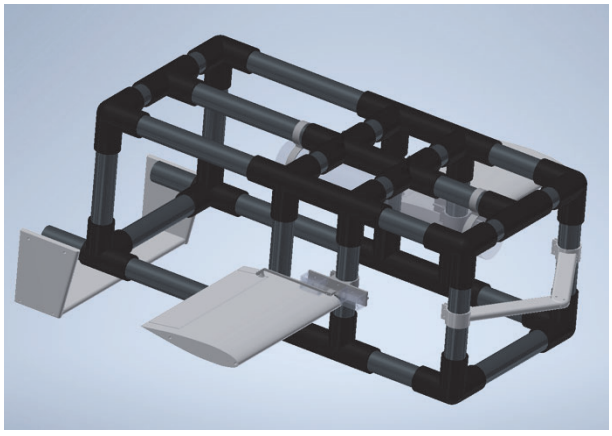


Fig. 1 Towed vehicle

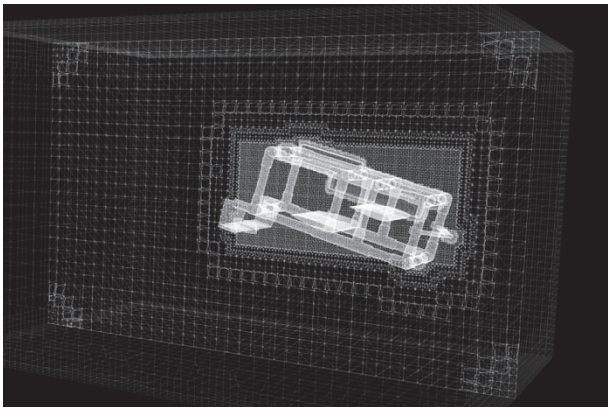


Fig. 2 Calculation mesh

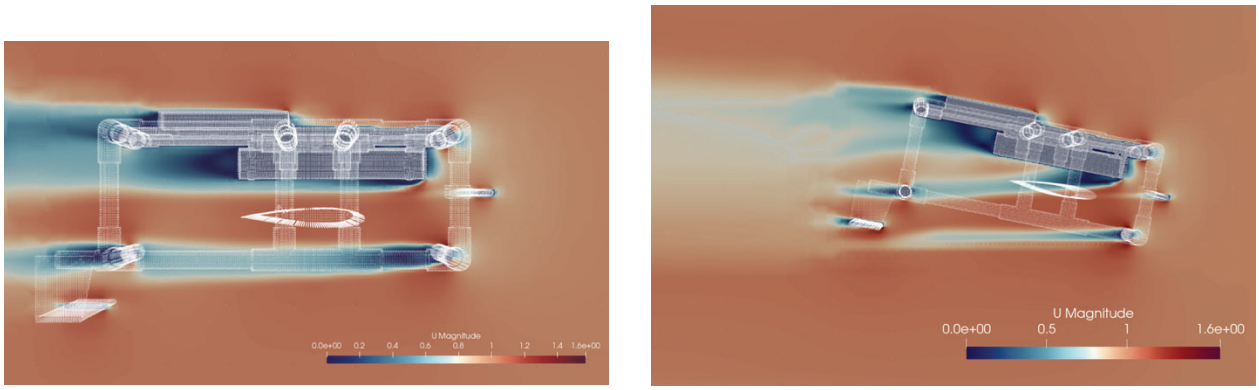


Fig.3 Calculated velocity field around the body

3. 水槽試験と運動制御系の開発

応用力学研究所の深海機器力学実験水槽において機体の曳航試験を行い，CFD 計算結果を評価するとともに，機体ヒールの運動制御系を実装し，その性能を確認した。試験に用いた曳航体を Fig. 4 に示す。本機体に PID 制御系を実装し，目標値を追従するように左右主翼角を制御した。順次，目標ヒール角を変更した際の機体ロール角の時刻歴を Fig. 5 に示す。制御系の PID ゲインの調整により，制御目的が達成されていることが確認された。

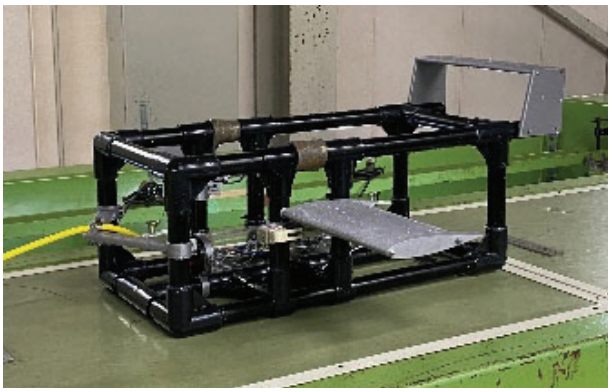


Fig. 4 Prototype of the vehicle

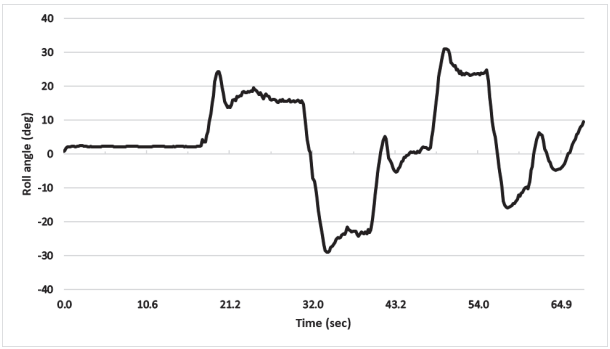


Fig. 5 Result of the heel control

4. まとめ

水中考古学探査を目的とした曳航式海中ビークルを開発するために，機体計画を実施した。機体の運動特性を調査し運動制御系を開発するため，CFD 計算結果に基づき機体形状を決定した。計算で推定された機体に作用する流体力の精度は機体の形状決定に対し十分であることが，水槽試験結果との比較により確認された。深海機器力学実験水槽における曳航試験では，ケーブル長，曳航速度等の条件を変更して試験を行い，機体運動に対する影響を調査した。これらの結果に基づき機体に実装したヒールコントロール用 PID 制御系をチューニングすることで，目的の制御性能を有する運動制御系が開発された。

今後は，機体のトリムコントロールについて調査を実施し，海底に埋没した海底遺跡，沈船の探査のための有効な観測手段となる曳航式音波探査システムを開発する予定である。

バイオミティクス技術を用いたブレードの翼端形状の空力設計

沖縄工業高等専門学校　機械システム工学科　森澤征一郎

１．研究目的

ブレード性能は翼端形状に依存し，大きな空力抵抗（特に，誘導抗力）を生み出す．この原因は翼端から生じる渦が関係し，この渦を減衰させる必要がある．一方，鷹などの鳥類は飛行効率及び静粛性に優れており，この１つの要因に翼端部が複数分岐した隙間のある翼形状(wing_grid)が重要と言われている．このような自然界の形態や機能を模倣する技術をバイオミティクス技術と呼ばれ，本研究ではこのバイオミティクス技術から派生した wing_grid の空力特性及びその流れ場の関係を考察する．

２．計算モデルとアプローチ方法

本研究で扱った計算モデルを図 1 で示す．計算モデルは wing_grid と同じ翼幅長さをもつ矩形翼の 2 種類とし，これらに対して数値流体力学（CFD）を実施した．CFD の計算ソルバーには，JAXA 宇宙科学研究所（現，東京理科大）の藤井孝藏教授らが開発した LANS3D を用いた．計算条件は，マッハ数(M_∞) : 0.2（非圧縮性流れ）及び 0.74（遷音速・圧縮性流れ）に対してレイノルズ数（翼弦長さ基準）: 6.0×10^6, 迎角(AoA) : 0° ～ 6°とした．なお，計算コストを節約するため，半裁モデルで計算を実施し，これらの翼には上反角を設けていない平面形状を扱った．

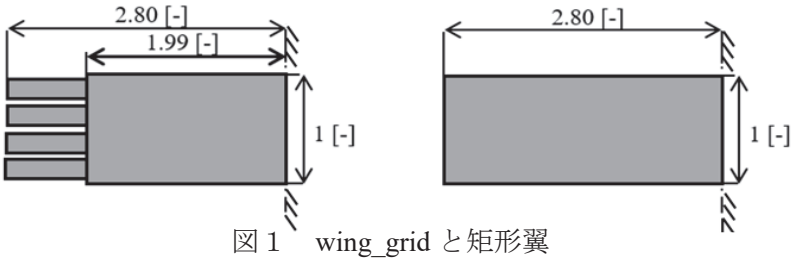


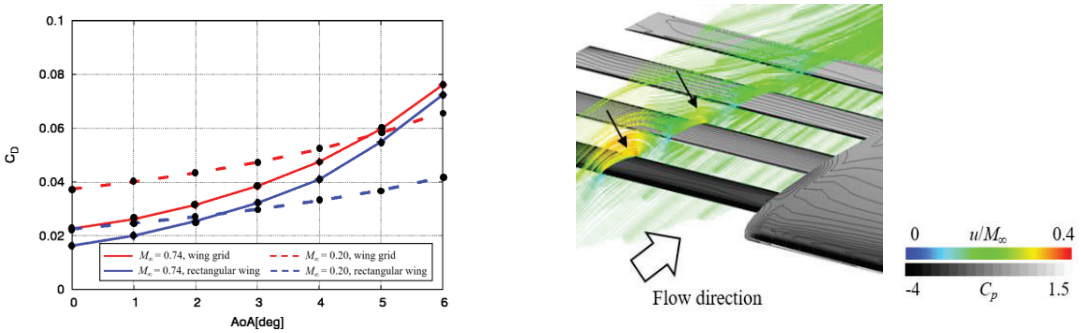
図 1　wing_grid と矩形翼

３．結果と考察

図 2 に迎角(AoA)に対する抗力係数(C_D)の分布，及び wing_grid 付近での流れ場を示す．図 2(a)より M_∞＝0.2 での wing_grid の C_L 及びその傾斜は矩形翼より大きな値を示した．一方で，M_∞＝0.74 の wing_grid ではこの傾向が逆転し，悪化している．一方，流れ場である図 2(b)を見ると 1 番目と 2 番目の wing_grid 後縁部での加速が見られる．この結果は，翼列の弦長が短いため，流れの加速が減速することなく後縁に到達し，それが抗力増加につながったと考えられる．

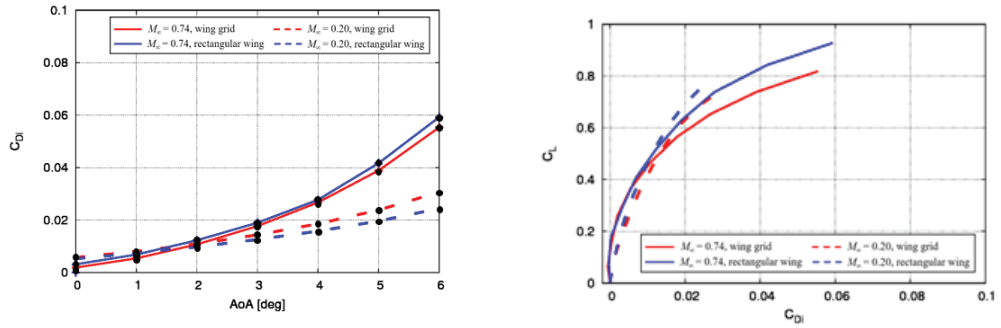
次に，誘導抗力係数(C_{Di})の関係を算出した結果を図 3 に示す．この C_{Di} は揚力係数 C_L＝0 となる際の C_D 値を 0 として差し引いた各 AoA での抗力係数である．図 3(a)より M_∞が 0.20 と 0.74 の翼格子と矩形翼の低 AoA 時の C_{Di} 差も小さいが，AoA が大きくなると差が大きくなっている．その結果，wing_grid の M_∞＝0.20 での C_{Di} は矩形翼のそれよりも高くなり，Wing Grid の M_∞＝0.74 での C_{Di} は矩形翼のそれよりも低くなった．この結果は，C_L の増加により翼格子の C_{Di} が高まったためであることが図 3(b)より確認できる．さらに，図 3(b)より M_∞が 0.20 と 0.74 のときの wing_grid と矩形翼の低 C_L での C_{Di} 差も小さく，C_L が高くなると差が大きくなった．

最後に，図 4 に AoA＝6°での wing_grid 表面を C_p の等高線で示し，各翼端を異なる色の流線で示す．その結果，M_∞ ＝0.20 と M_∞ ＝0.74 の両方から翼端渦の発生が確認できる．特に、1 番目の C_p は小さくなり、図 2(b)で述べたような流れの加速が発生する．つまり，本研究で用いた翼端では上半角がなく，1 番目，2 番目の翼端渦が強まることで，誘導抗力の増加につながったと考えられる．



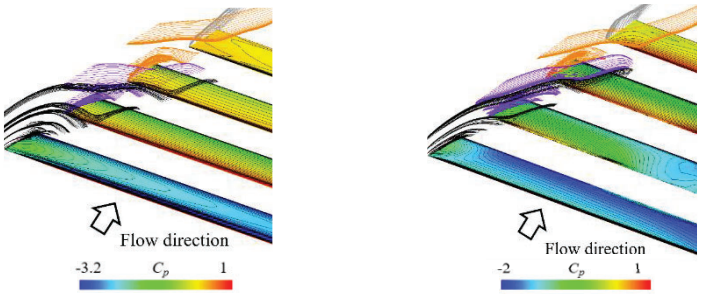
(a) 迎角に対する抗力の変化　　(b) 誘導抗力に対するポーラカーブ（AoA = 6°，M_∞＝0.2）

図 2　wing_grid と矩形翼の に関する特徴



(a) 迎角に対する誘導抗力の変化　　(b) 誘導抗力に対するポーラカーブ

図 3　wing_grid と矩形翼の誘導抗力に関する特徴



(a) M_∞ = 0.20　　(b) M_∞ = 0.74

図 4 wing_grid の各翼端部での流れ

5. 研究成果報告

S. Morizawa and S. Obayashi, “Evaluation of a Planar Wing with Wing Grid using CRM.65.airfoil”, 沖縄工業高等専門学校紀要, pp.1-14. (投稿中)

6. 研究組織

沖縄工業高等専門学校　機械システム工学科　森澤　征一郎（研究代表者）

九州大学応用力学研究所　吉田　茂雄（所内世話人）

強非線形境界要素法を用いた３次元浮体動揺解析プログラムの開発

秋田大学理工学部　平川知明

1　研究目的

波の相互作用の数値解析手法として，境界要素法（BEM）と混合オイラー・ラグランジュ法（MEL）を組み合わせた方法が長く研究開発されてきた．非線形ポテンシャル理論を基にした，速度ポテンシャル ϕ とその法線方向微分 ϕ_n に関する境界値問題を境界積分方程式を使って解く方法が BEM であり，水面の水粒子をラグランジュ的に時間発展させる方法が MEL である．

従来の BEM と MEL を使う計算方法では，構造物と水面の交わる線（喫水線）上の格子点（角点）では，時間ステップ毎に繋ぎ合わせる複雑な処理が必要である．また，この方法では，喫水線付近で数値的に不安定になりやすく，その場合安定化のための処理が必要となる．これとは別に，三角形が歪むことにより数値積分精度が悪化し計算が破綻する問題がある．これに対しては，ラプラス平滑化と補間を組み合わせた方法が広く用いられるが，補間を繰り返し節点位置を調整することは，計算精度を悪化させやすい．

一つ目の課題の解決方法としては，計算格子を水面と構造物にわけて設定するのではなく，流体格子だけを設定することで，時間ステップ毎の角点の繋ぎ換えを行わない方法が考えられる．流体格子には，構造物格子との接触を検知させ，さらに接触した構造物の法線方向および流速など参照させ，動的に境界条件を課すことにする．二つ目の課題の解決方法としては，ラプラス平滑化ではなく，Elastic Mesh Technique（EMT）と呼ばれる方法を利用することが考えられる．本研究では，この二つの方法を実装し，数値シミュレーションを通して有用性について調べる．

2　計算方法

2.1　境界要素法

水面波のシミュレーションのために，非粘性非圧縮渦なし流れを仮定し，ラプラス方程式を満たす速度ポテンシャル ϕ を定義する．境界要素法では，グリーンの定理とラプラス方程式を合わせることで得られる境界積分方程式，

$$c\phi\left(\mathbf{a}\right)=\iint_S \phi\nabla G\cdot\mathbf{n}dS-\iint_S G\nabla\phi\cdot\mathbf{n}dS. \tag{1}$$

を速度ポテンシャル ϕ と，境界面に対する法線方向の微分 ϕ_n に関する境界値問題として要素に分割して解く．滑らかな境界面では立体角を表す c は $c=-2\pi$ となる．境界面上のいくつかの節点からなるパラメトリック補間のことを要素と呼び，(1) の境界積分方程式は，この 2 次のラグランジュ補間を使って離散化した．また，時間発展に関しては，流体粒子の位置と速度ポテンシャルの常微分方程式を 4 次のルンゲクッタを使って解いた．

2.2　Elastic Mesh Technique

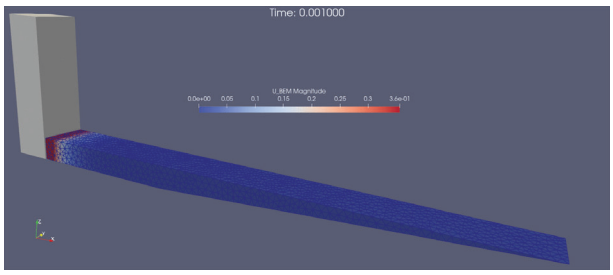
境界面の時間変化は，境界面の法線速度成分 $\mathbf{v_n}$ だけで決まり，接線速度成分 $\mathbf{v_s}$ の影響を受けない．Loewenberg and Hinch (1996) は，このことを利用して，三角形要素を均一に調整するような接線流速を加えて境界面を時間発展させる方法を考案した．この方法は，時間に依存していたため，Wang et al. (2003) は，時間によらない方法を考案している．格子調整のための接線速度 $\mathbf{v}_a$ を加えた場合，速度ポテンシャル ϕ と粒子位置 $\mathbf{x}$ の時間発展には次式を用いる．

$$\frac{D\phi}{Dt}\left(\mathbf{x}(t)+\mathbf{x_s}(t),t\right)=\frac{\partial\phi}{\partial t}+\left(\nabla\phi+\mathbf{v}_a\right)\cdot\nabla\phi,\quad \frac{D\mathbf{x}}{Dt}+\mathbf{v_s}=\nabla\phi+\mathbf{v_s} \tag{2}$$

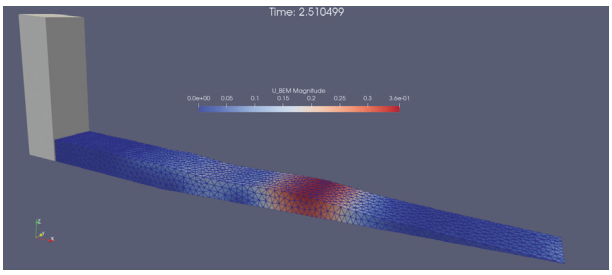
3　結果と考察

図 1 に示す造波シミュレーションでは，流体格子は，造波装置に見立てた構造物格子との接触を検知し，さらに構造物格子の法線方向および流速を参照した後，境界条件を適切に課して境界積分方程式を離散化している．こ

のような動的に境界条件を課す方法でも Goring (1979) の方法を使って，正しく孤立波を造波させることができることを確認した．



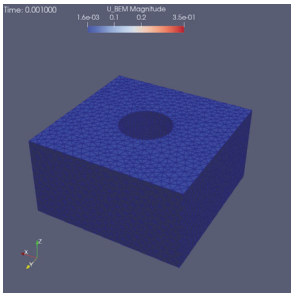
(a) 初期波形



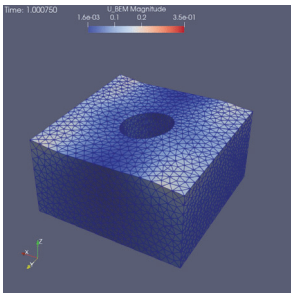
(b) $t = 2.510499$

図 1: 動的に境界条件を課した，造波シミュレーション結果

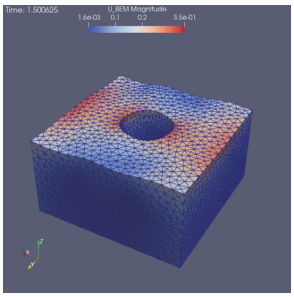
図 1 に示す造波シミュレーションの境界面は，平面的でシンプルであったため，比較的複雑なケースとして，図 2 に示すような，中心に円筒を設置した水槽を使ったスロッシングシミュレーションを行なった．スロッシングシミュレーションでは，水槽の周波数が固有周波数と一致すると，水面が激しく乱れ，喫水線付近で尖鋭化する．その場合，EMT なしでは，喫水線付近で，三角格子が歪になり，早々にシミュレーションが破綻した．一方で，EMT を導入した場合，歪な三角格子の形成を抑制でき，喫水線付近における，ロバスト性が向上し，破綻までの計算時間が大きく増加した．また，EMT において，真の流速に加える人工的な接線流速の設定は，さまざまな方法が考えられるが，Loewenberg and Hinch (1996) も指摘するように，緻密な工夫なしでも大きな効果が得られた．三角非構造格子を用いた境界要素法による水面波シミュレーションに EMT を適用した例は私の知る限り存在しなかったが，本研究で，水面波シミュレーションにおいても EMT がロバスト性を劇的に改善することを確かめることができた．



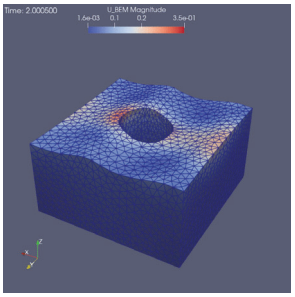
(a) 初期条件



(b) $t = 1.0$



(c) $t = 1.5$



(d) $t = 2.0$

図 2: 中央に円筒を設置した水槽におけるスロッシングシミュレーション結果

4　成果報告

なし

参考文献

Goring, D. G., 1979: Tsunamis: the propagation of long waves onto a shelf. *PhD Thesis*, **1979**, 356.

Loewenberg, M. and E. J. Hinch, 1996: Numerical simulation of a concentrated emulsion in shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **321**, 395–419.

Wang, C., B. Khoo, and K. Yeo, 2003: Elastic mesh technique for 3D BIM simulation with an application to underwater explosion bubble dynamics. *Computers & Fluids*, **32**(9), 1195–1212.

予見風速を用いたフィードフォワード制御による浮体式洋上風力発電システムの回転数変動と浮体動揺抑制

大阪府立大学　大学院工学研究科　涌井徹也

1．序論

大水深海域の広大な日本では浮体式洋上風力発電に期待が寄せられている．浮体式洋上風力発電システムでは，風だけでなく波の影響を受けることで浮体の動揺が誘起され，出力変動や疲労荷重が増大する．これまでに，出力変動と浮体動揺の抑制を両立するための制御方策に関する研究が行われており，その多くではシステム出力に応じて翼ピッチや発電機トルクを操作する受動的な制御が行われている．しかし，ローター回転数や浮体の応答は大きな慣性要素（ローターや浮体）の影響を受けるため，受動的な制御のみによって良好な運転挙動を得ることは困難である．これまでに申請者らは風速と波高の予見に基づいたモデル予測制御手法を構築し，回転数変動と浮体動揺に対する高い抑制効果を明らかにした．しかしながら，演算負荷が高く実時間制御性の点では問題を有していることもわかった．本研究では風速変動に対する回転数の変動を低減するために，風力タービン前方の予見風速に対して翼ピッチを定常特性値に追従させるフィードフォワード制御に着目する．外乱を抑制するために発電機回転数のゲインスケジューリングフィードバック制御を組み合わせたフィードバック-フィードフォワード併用制御器を構築し，乱流変動風況および不規則波高変化に対する空力-弾性-水力-制御連成シミュレーションを行うことで構築した制御方策による浮体動揺と荷重変動の抑制効果を解明した．

2．予見風速に基づくフィードフォワード-フィードバック制御器

本研究では，定格発電機回転数を保持する高風速域における制御方策に着目する．流入風速を浮体式洋上風力発電システムに対する外乱入力と捉え，ライダーによる風力タービン前方の予見風速に応じて翼ピッチを定常特性値に追従させることで，定格発電機回転数を保持するフィードフォワード制御を新たに導入する．予見風速に応じたフィードフォワード制御に外乱を抑制するための発電機回転数のゲインスケジューリングフィードバック制御を組み合わせたフィードバック-フィードフォワード制御器のブロック線図を**図 1** に示す．ゲインスケジューリングフィードバック制御器では，発電機回転数の定格値からの偏差に応じたフィードバック演算（比例積分動作）により翼ピッチ操作信号を算出する．比例ゲインは翼ピッチに応じてスケジューリングされる．フィードフォワード制御器では，ライダーで測定した風力タービン前方の予見風速に対する定常状態での翼ピッチ信号を算出する．ライダーでは空間的な分布を持つ乱流風速場に対して有限点のレーザー照射を行うため，予見風速信号には乱流変動成分が重畳する．そこで高周波フィルタとして一次遅れフィルタを使用する．両制御器の翼ピッチ操作信号を加算した後に速度飽和器を介して，翼ピッチの操作信号とする．なお，発電機トルクは定格値を保持する．

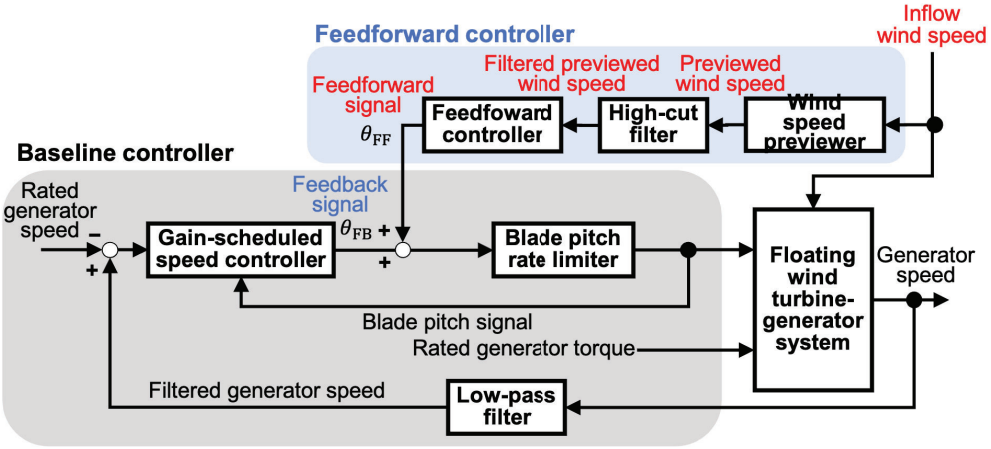


図 1 フィードフォワード-フィードバック制御器のブロック線図

３．空力−水力−弾性−制御連成解析による制御挙動分析

対象とする浮体式洋上風力発電システムの空力弾性解析には OpenFAST を使用し，フィードバック−フィードフォワード制御器は MATLAB/SIMULINK で構築した．風力タービンには NREL 5 MW 機を，また，浮体にはスパー型の NREL OC3-Hywind spar-buoy モデルを用いた．風力タービンの流入風速に関しては，受風面内の空間平均値，もしくはハブ点での点風速をサンプリング周波数 1 Hz で予見できるものと仮定し，風速予見値間を内挿して，フィードフォワード制御に用いた．乱流変動風況および不規則波高変化に対する浮体式洋上風力発電システムの連成挙動を図 2 に示す．フィードバック-フィードフォワード併用制御を導入することで，翼ピッチが予見風速の変化に応じて大きく操作されることがわかる．この翼ピッチ操作によってタービントルクの変動が小さくなり，回転数の変動が抑制される．回転数変動が小さくなることでフィードバック制御による翼ピッチ操作量が少なくなり，浮体動揺に対する負性減衰が低減する．さらに，予見風速に応じた翼ピッチ操作に応じて風力タービンスラスト力も速やかに変化することで，浮体の動揺が抑制される．しかし，ハブ点風速を予見風速とした場合には，乱流変動成分が予見風速値に含まれるため，翼ピッチの変動が空間平均値を用いた場合よりも増加する．これにより回転数の変動が増大し，また，スラスト力の変動が増加し浮体の動揺に負性減衰として作用することで，浮体ピッチの変動が回転数のゲインスケジューリング制御のみの場合と同程度に増大する．

以上より，予見風速に基づいて翼ピッチを操作するフィードフォワード-フィードバック制御器を導入することで，浮体式洋上風力発電システムの回転数変動と浮体動揺を抑制できることを明らかにした．

４．論文と学会発表のリスト

(1) T. Wakui, K. Tanaka, R. Yokoyama, “Reduction in Platform Motion and Dynamic Loads of a Floating Offshore Wind Turbine-Generator System by Feedforward Control Using Previewed Wind Speed”, Proceedings of the International Conference on Power Engineering-2021 (ICOPE-2021), (2021), Paper No. 252, 4 pages.

(2) 涌井徹也，田中弘毅，横山良平，予見風速を用いたフィードフォワード制御による浮体式洋上風力発電システムの浮体動揺および荷重変動抑制，日本機械学会第 25 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (2021), C113, 5 pages，2021 年 7 月 26，27 日．

(3) 涌井徹也，田中弘毅，横山良平，浮体式洋上風力発電システムのフィードフォワード制御における風速予見条件の影響分析，第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集，C3-02, 4 pages，2021 年 11 月 18，19 日．

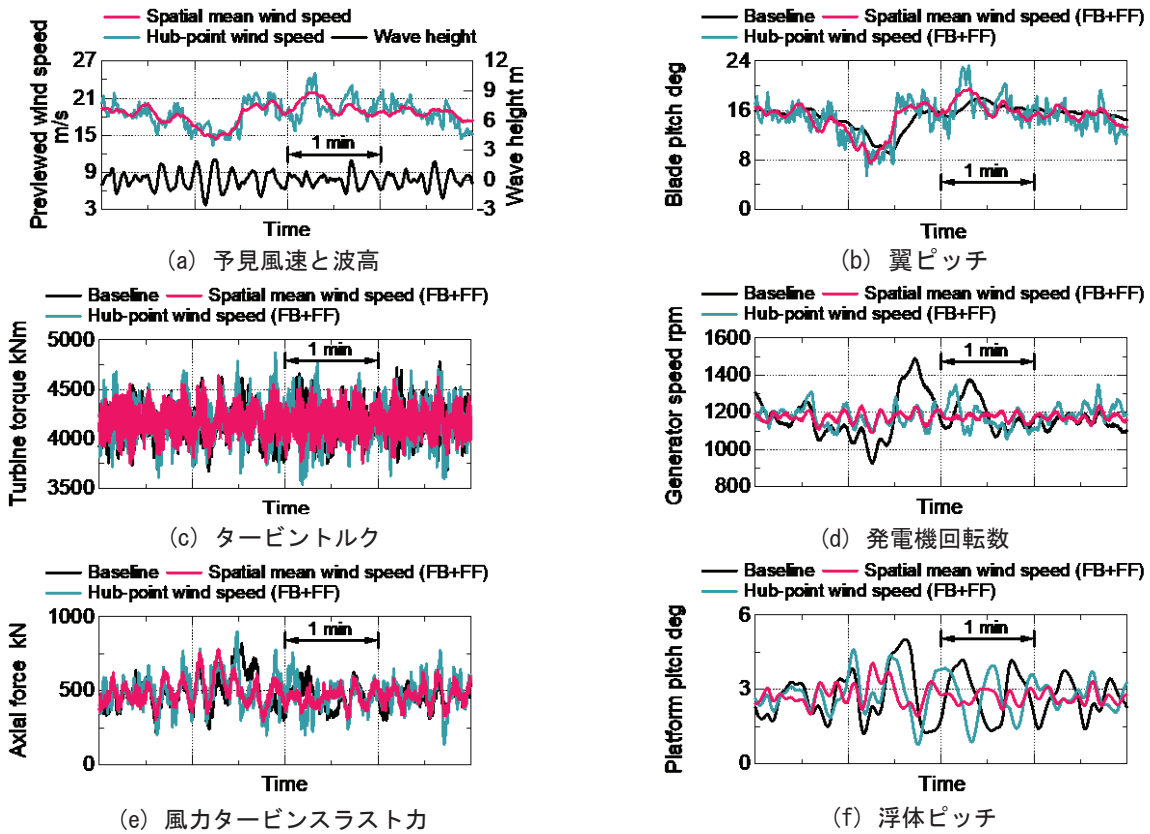


図 2 乱流変動風況および不規則波高下での浮体式洋上風力発電システムの連成挙動

歯科矯正用アンカースクリューにおける患者別３次元不均質性骨モデルを用いた有限要素解析の臨床診断への応用

九州大学大学院歯学研究院歯学部門口腔保健推進学　髙橋一郎

【研究の背景】

矯正歯科治療は、マルチブラケット装置という口腔内に装着する矯正装置により発生する矯正力を歯に伝達し、歯を動かすことによって不正咬合に伴う生理的機能障害や、歯並びの審美欠陥に起因する社会心理学的障害を改善するための治療である。この治療では、それぞれの歯に加わる力を適切に制御することが治療の成果に直結するため、その制御技術を身につけることが矯正歯科医としての高い能力を身につけるために必須である。特に、歯の位置を適切にコントロールするためには、動かしたい歯にどのように力を付加するかを考え、動かすべきではない歯を適切に動かさないように制御することが重要である。この動かしたくない歯を動かさないという概念を「固定」という。「固定」を適切にコントロールするのは大変困難であり、この能力を身につけることが矯正歯科医として最も重要なことでもあるが、それを劇的に改善したのが歯科矯正用アンカースクリュー（以下、スクリュー(図1)）である。スクリューは患者の協力を必要とせず絶対的な固定を実現できるなど多くの利点があり、現代矯正歯科治療の主役の一つであるといっても過言ではない。しかしながら、このスクリューは一度植立したら脱落することはない、ということではなく、一定程度の確率で脱落することが知られており、これが治療の進行の妨げになるため、その成功率を改善することが急務である。いくつかの臨床報告から、スクリューの成功率は 80%前後との報告があり、脱落因子として患者性質・埋入方法・スクリュー形状など様々な因子が挙げられてはいるが、スクリューの脱落を予測

図 1

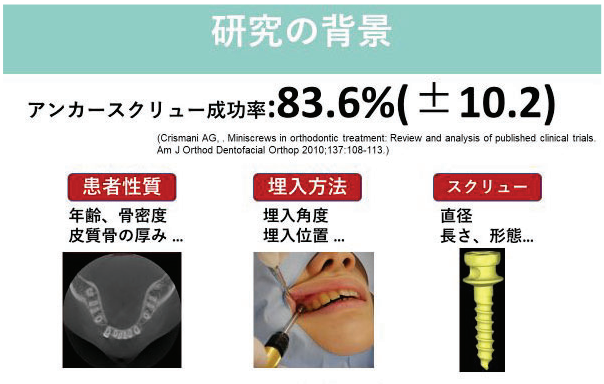


図 2

することは未だ困難であるというのが現状である（図 2）。

骨や歯などの生体硬組織は、場所により材料や密度が異なる不均質性材料であり、生体内部に存在するため、その形状や力学的特性を直接的に求めることは不可能である。その一方で、CT や MRI などの医療画像情報に基づいて生体の力学モデルを構築し力学解析を行うイメージ連成バイオメカニクスの技術が発達し、有限要素法（FEM）を用いて患者の骨強度を解析する方法の必要性は高まってきている。この個体別最適モデルを使ったシミュレーションシステムの構築は急務である。三次元有限要素法を用いたスクリュー成否要因に関する過去の研究の多くは骨の不均質性を考慮しておらず、個々の状況を詳細に反映していない。当講座では先行研究として、上顎骨に植立されたスクリューに対して骨の不均質性を反映した FEM 解析を行い脱落予測因子としての機械的パラメータを検討した。しかし、皮質骨が上顎骨より厚いとされる下顎骨の脱落予測因子は未だ特定されていない。

【目的】

本研究は、下顎骨に植立したスクリューに対する矯正力負荷が歯槽骨に与える力学的影響を、骨の不均質性を反映したモデルを用いて 3 次元有限要素法により解析し、植立の成否に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子を特定することを目的とした。

【資料および方法】

マルチブラケット装置を用いた矯正治療の対象となった症例のうち、抜歯が必要と診断された症例において犬歯遠心移動時の固定原として下顎第二小臼歯、第一大臼歯間に植立された計 32 本（成功 26 本、脱落 6 本）のスクリューを解析の対象とした。植立前 CT データより骨、第二小臼歯、第一大臼歯、歯根膜のモデルを作成した。マイクロ CT データより作成した直径 1.4mm 長さ 6mm のスクリューのモデルを、植立後 CT データより作成したモデル上で重ね合わせ、骨モデルに植立した。三次元有限要素解析ソフトウェア(Mechanical Finder)を用いて 2Nの荷重を近心方向に加えた。スクリュー表面からの距離によって骨を 4 つの領域：領域 1（0.0～0.5 mm）、領域 2（0.5～1.0 mm）、領域 3（1.0～1.5 mm）、領域 4（その他の骨）に分割し、応力とひずみに関連する 20 の機械的パラメータのピーク値を求めた。さらに、CT 画像データおよび有限要素モデルより骨密度・皮質骨の厚み・スクリューと隣接歯根との距離・スクリュー植立角度などのデータを取得し、回帰分析を行うことで下顎骨に植立されたスクリューの成否に最も関連する機械的パラメータに関与する臨床的リスク要因の検索を行った。

【結果および考察】

上下顎骨共に領域 2（0.5～1.0 mm）の主ひずみにおいて成功群と脱落群の間に差があると考えられた。スクリュー成否の評価基準として、機械的パラメータは主ひずみ、歯槽骨の領域では領域 2（0.5～1.0 mm）が適切であると推察された（図 3）。また、臨床的因子としては

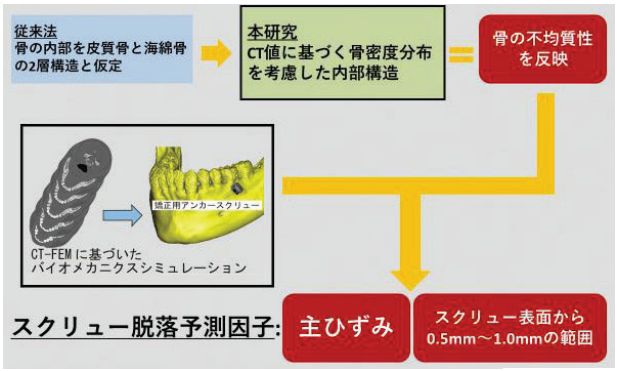


図 3

患者の骨密度、スクリューと隣接歯根との距離の増加、およびスクリューの植立角度の減少とスクリュー周囲の主ひずみの増加との間に有意な相関が認められた。スクリューの植立は先端を歯根側に傾斜させて植立する方が成功率が高いと考えられた。

【今後の展望】

スクリューは近年顎整形力への応用が盛んであり、コントロールが難しいとされる成長期の治療に今後革命をもたらす可能性がある。しかし、スクリューの患者毎の耐荷重量は未だ解明されていないのが現状である。これまでの研究で上下顎骨ともに主ひずみの増加がスクリューの脱落に関連することが推察された。この点を検討するために、まず、ブタの下顎骨を CT スキャンして作成したモデルの有限要素解析を行うことで骨の状態と脱落との関連を検討し、次に、ブタの下顎骨に実際にスクリューを植立し、スクリューが脱落するまで荷重を増加させていく実験とを実施し、患者固有の耐荷重量を推察することができるモデルを策定することをめざして研究を展開することとした。

【今後の研究目的】

今後は、上顎骨の口蓋に植立したスクリューに対する矯正力負荷が歯槽骨に与える力学的影響を骨の不均質性を反映したモデルを用いた 3 次元有限要素法により解析し、植立の成否に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子を特定することを目的として、継続的に研究を実施する。加えて、より大きな力を負荷した場合の脱落要因などを検討しする。また、こうした研究成果をとりまとめ、矯正用アンカースクリューの脱落を予防するための診断基準を策定し、矯正歯科臨床の安全性の向上に寄与することを目的として研究を進めていく。

【今後の研究方法・研究内容】

今後は、上顎骨の口蓋に植立したスクリューに対する矯正力負荷が歯槽骨に与える力学的影響を骨の不均質性を反映したモデルを用いた 3 次元有限要素法により解析し、植立の成否に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子を特定するための研究を継続的

に推進する。ブタの下顎骨を用いてスクリュー脱落の起こる荷重量や脱落のメカニズム解明を目的とする実験を実施する。ブタの下顎骨にスクリューの植立を行い、実際に脱落が起こるまで荷重を増加させていく。ブタの下顎骨のスクリュー植立前後の CT データより不均質性骨モデルを作成し有限要素解析を行う。実際にスクリュー脱落が起きた荷重値まで段階的に荷重を上げていくシミュレーションを行う。

CT-FEM を用いた骨粗鬆症に起因する骨折メカニズムの解明

産業医科大学・整形外科学　　塚本　学

１．はじめに

骨粗鬆症とは，加齢により骨密度が低下することで骨構造が変化する病気である．骨粗鬆症になると骨の強度が低下して骨折が生じやすくなり，たとえば大腿骨等が骨折すると歩行に支障をきたすため，超高齢者の場合はそのまま寝たきり状態になることもある．そこで，様々な種類の骨粗鬆症治療薬が開発され臨床応用されている．治療薬による骨構造の改善は DXA 等で計測した２次元的画像で確認されるが，３次元的骨構造においてどのような変化が生じるのか，さらには力学的骨強度にどの程度変化が生じるのかについては，いまだ明らかになっていない．本研究では，人工股関節置換術（THA）を実施した後，骨粗鬆症治療薬を２年間投与した患者の CT 画像を用いて CT-FEM を実施し，骨密度分布状態と骨強度の変化を調査した．

２．モデル作成と解析方法

2 年前に THA を行い，術後 1 週から骨粗鬆症治療薬である PTH 製剤を開始し，術後 1 年から抗 RANKL 抗体製剤に切り替えて，術前から術後 2 年まで計４回経過観察を行った患者の CT 画像データを解析用として準備した． PTH 製剤からの抗 RANKL 抗体製剤の流れは，保険適応の範囲では最も骨密度（BMD）を効果的に上昇させることができる組み合わせとして知られている．健常な右大腿骨の CT 画像から 3D 数値モデルを構築し，有限要素モデルを作成した．要素サイズは 2mm とし，骨内部は４面体要素を用いて外表面はシェル要素を用いることで硬い骨表面を再現している．シェル要素の厚さは 0.3mm とした．骨の力学的特性（弾性率と降伏圧縮強度）は，CT 値から骨密度を算出し，骨密度から Keyak の式を用いて評価した．骨密度を評価するために大腿骨を 10 の領域に分割して，各領域での平均骨密度を評価した（図 1 参照）．骨強度の評価のために境界条件として，遠位部表面を完全固定とし，骨頭に垂直に最大 5000N の分布荷重を負荷した（図２参照）．解析ステップ数は 10 であり，各ステップに 50 のサブステップを設けている．

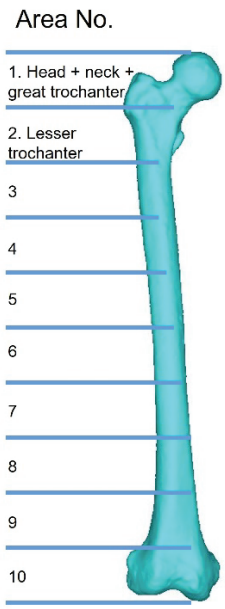


図 1 骨密度を評価した 10 の領域

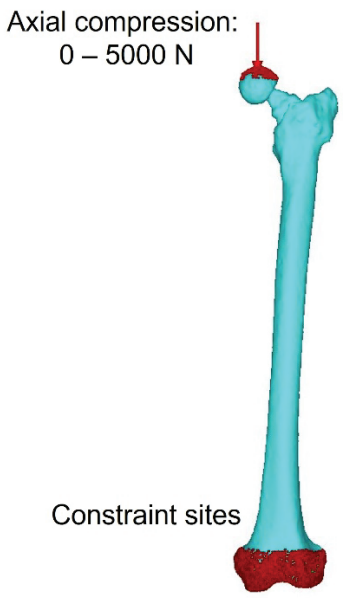


図２　骨強度を求めるための境界条件

３．結果と考察

図３に 10 分割した各領域での平均骨密度を示す．Model 1 は術前，Model 2 は術後３か月後，Model 3 は約 1 年後，Model 4 は約 2 年後である．どの領域でも術前に比べて平均骨密度は低下する傾向にあることがわかる．特に領域５での低下が大きい．また，時間の経過とともに若干ではあるが減少する傾向にある．

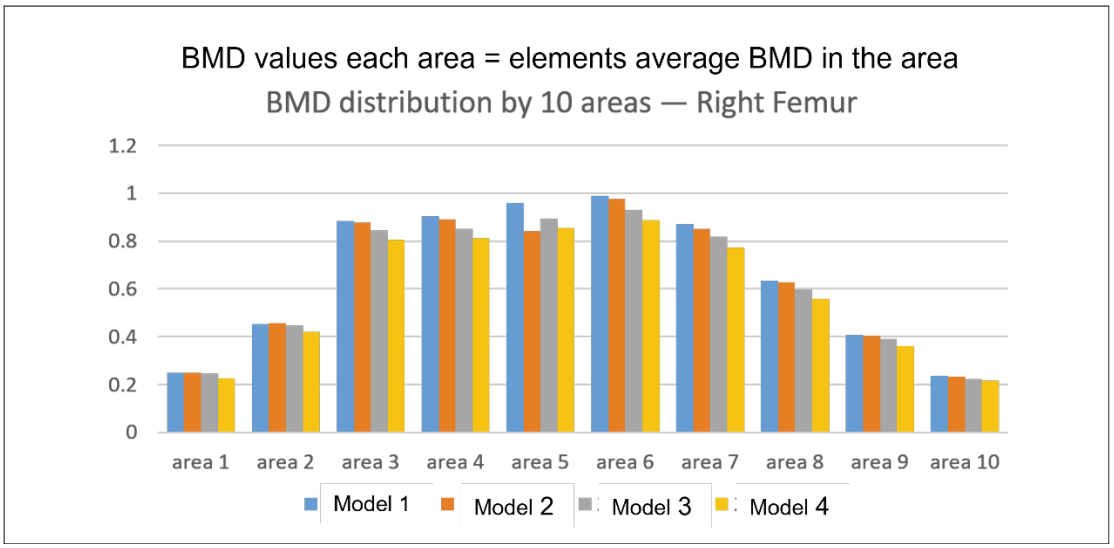


図３　各領域での平均骨密度

図４に骨強度評価の結果を示す．Model2 で若干上昇するが，その後強度は次第に低下する傾向にあることが分かる．図５に要素破壊が生じた箇所を示す．そのモデルでも頚部に近い骨頭の同じ個所で最初に要素破壊が生じており，この部位が起点となって骨折が生じることが予想される．

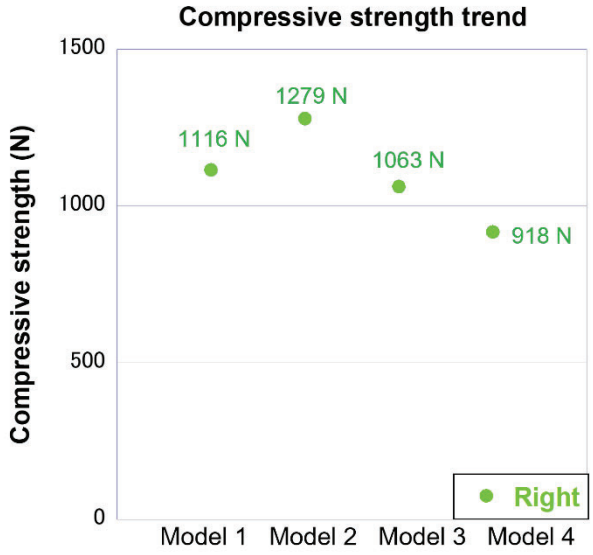


図４　骨強度

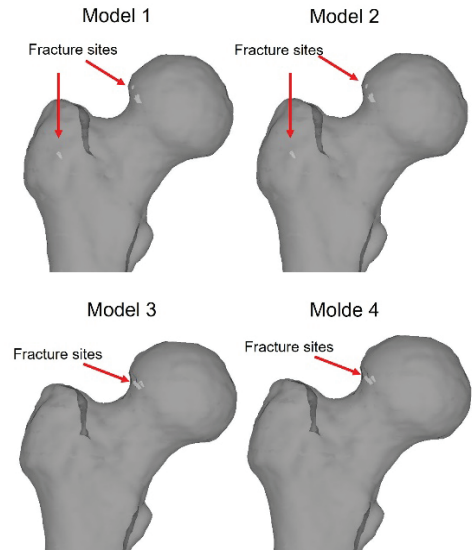


図５　骨折の発生個所

４．まとめ

人工股関節置換術後２年間骨粗鬆症治療薬を投与した患者の大腿骨ＣＴ画像データを用いて３次元的骨密度分布と骨強度について調査を行った結果，若干の平均的骨密度の低下と骨強度の低下を確認した．

骨再生用複合系足場材料の開発と機械学習による力学的特性予測

大阪大学附属病院・未来医療センター 名井 陽

1. 緒 言

組織工学用の足場材料として、合成ポリマーや天然ポリマーの利用が注目されている。これらは生体内において優れた特徴を示す一方、欠点もある。合成ポリマーは細胞播種時や生体内において構造を維持するための力学強度を提供するが疎水性のため細胞親和性は低い。一方、天然ポリマーは細胞親和性が高いが機械的強度は低い。そのため、合成ポリマーと天然ポリマーを複合化することが行われる。これまで我々の研究室では、力学特性が異なる 2 種類の生体吸収性合成ポリマー、ポリ-L-乳酸(PLLA)とポリカプロラクトン(PCL)を様々なポリマー濃度、ブレンド比で複合化し、PLLA/PCL 多孔体の作製を行い、力学特性制御可能な足場の開発を進めてきた。そこで本研究では、これら合成ポリマーと生体内に豊富に存在する Collagen を複合化した 3 成分系多孔質ポリマーブレンドの作製を実施した。Collagen は力学特性が低く単体での使用が難しいため、合成ポリマーと複合化することで機械的強度を改善するとともに、2 種の合成ポリマーブレンドにより力学特性制御可能な足場の開発に期待できる。一方、複合系足場材料の諸特性は、各成分の特性が複雑に影響し合って決定されるため、その特性を事前に予測することは困難である。そこで、機械学習を用いて力学特性を予測するシステムを構築し、今回開発した 3 成分系足場材料の予測に適応し、その有効性について検討した。

2. 実験方法

PLLA、PCL を複合化させるために、まず Collagen 多孔体を凍結乾燥法により作製した。Collagen 溶液を-80 ° C、24 h の条件で凍結処理し、-50 ° C、24 h の条件で凍結乾燥した。その後、グルタルアルデヒドによる架橋、グリシン溶液によるブロッキング、凍結乾燥を行い Collagen 多孔体を得た。次に Collagen 多孔体をポリマー濃度 4 wt%の PLLA/PCL 溶液中に 24 h 浸漬させ PLLA と PCL を複合化させた。その後、試料の凍結、凍結乾燥を経て Collagen/PLLA/PCL 多孔体を作製した。この時、PLLA/PCL のブレンド比は 100/0、80/20、60/40、40/60、20/80、0/100 であった。作製した試料に、SEM による微視構造観察、多孔質構造特性評価、圧縮力学特性評価を行った。また、Collagen/PLLA/PCL 多孔体の力学特性を、構築した人工ニューラルネットワーク(ANN)により予測し、実験結果との比較を行った。

3. 結果および考察

Fig.1 に Collagen 単体と Collagen/PLLA/PCL 多孔体の代表的な表面微視構造観察結果を示す。3 成分系の構造は Collagen 単体と比較して、明らかに複雑な多孔質構造となっており、Collagen の気孔内部に PLLA/PCL の多孔質構造相が形成され、複合化できていることが認められた。しかし、表面微視構造において、ブレンド比の違いによる構造の変化は見られなかった。

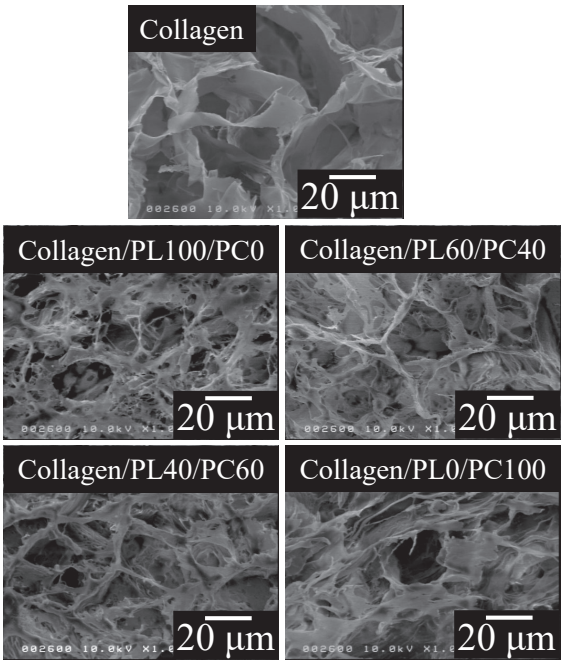


Fig.1 Porous surface microstructures

Fig. 2 に圧縮試験により得られたヤング率の結果を示す。このグラフには 4 wt% PLLA/PCL 多孔体の結果も示した。Collagen 多孔体のヤング率は 0.129 MPa であり、Collagen 多孔体に PLLA/PCL を複合化することでヤング率が増加することが認められた。これは Collagen の気孔内部に PLLA/PCL が充填されたためであると考えられる。また、PLLA/PCL のブレンド比の影響を見ると、PLLA の含有率が 100wt%と 80 wt%で同等の値を示した。これは Fig. 3 に示すように PLLA100wt%と 80 wt%では Collagen/PLLA/PCL 多孔体の側面微視構造が類似しており、構造的に PLLA/PCL の Collagen 気孔内への充填と弾性変形への影響が同様であったことが示唆される。この実験結果より、PLLA と PCL のブレンド比を変化させることで、ある程度はヤング率の制御が可能であることが示された。

これまでに実験し収集したポリマー濃度 4、6、8 wt%における PLLA/PCL 多孔体のデータと Collagen/PLLA、Collagen/PCL のデータを学習データとし、Collagen/PLLA/PCL のヤング率を予測するモデルを構築した。このとき、構築した ANN は入力のニューロン数 3(ポリマー濃度、PLLA 含有率、Collagen ヤング率)、隠れ層のニューロン数 3(層数 1)、出力のニューロン数 1(ヤング率)の[3-3(1)-1]の構成であった。Fig. 4 に ANN により予測した Collagen/PLLA/PCL のヤング率の予測結果を示す。PLLA 含有率が 80 wt%の結果を除けば今回構築した ANN モデルは高精度で予測出来ていると思われる。実際に、損失関数の値は 2.46 を示し過学習の傾向は見られず現状のデータにおける最良値を示したと思われる。PLLA80 wt%においては、ANN の学習に PLLA/PCL 多孔体の結果しか用いることができなかったため、Collagen/PLLA/PCL 特有の結果を予測できなかったと考えられる。より良い予測を行うためには、今後 3 成分系多孔体のデータ数を増やす必要があるが、それでも機械学習による予測は有用であり、データを活用することで、特性予測できる可能性を示した。

4. 結 言

本研究では、Collagen に PLLA/PCL を複合化し Collagen の低い力学特性を改善するとともに、2 種の合成ポリマーブレンドによる力学特性制御可能な 3 成分系多孔質足場材料を開発した。また、材料研究に機械学習を応用し 3 成分系足場材料の力学特性を予測した結果、ANN は一部を除き実験値に対する良い予測を出力し、新たな予測手法としての可能性を示した。

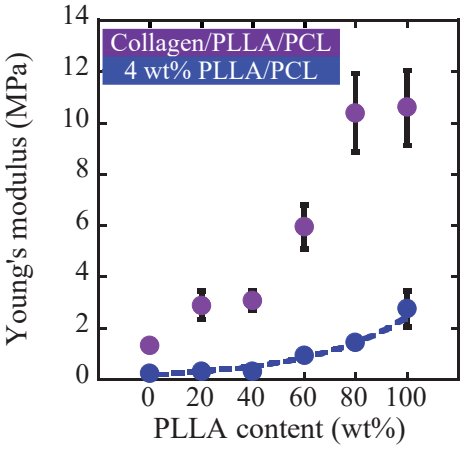


Fig.2 Variation of Young's modulus

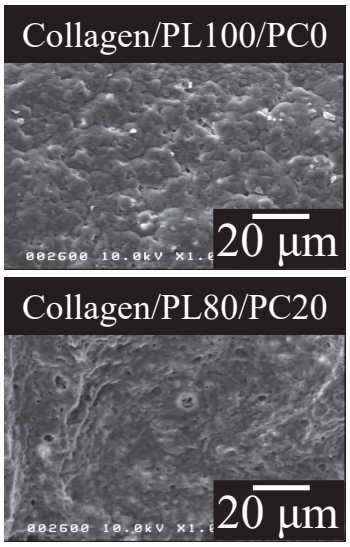


Fig.3 Sample side microstructures

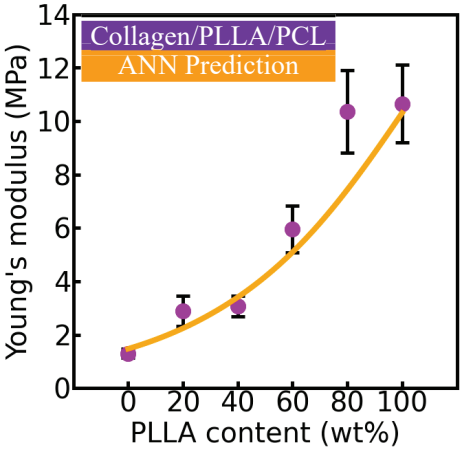


Fig.4 Prediction by ANN

大腿骨頭骨折におよぼす大腿骨頭壊死症の力学的影響

福岡大学・医学部整形外科 山本　卓明

1. INTRODUCTION

Bone diseases such as osteoarthritis (OA), avascular necrosis (AVN) and osteoporosis have considerable impact on the individual patient, resulting in pain and/or disability on society. These diseases may have some effects on the bone strength. To estimate bone strength, bone densitometry and diagnostic imaging methods have generally been used. Finite element method (FEM) has been utilized to evaluate such bone strength using CT-images. Moreover, it can analyze and predict not only the distributions of stress and strain but also fracture location and load. In the present study, CT-image based FEM (CT-FEM) was applied to predict the proximal femoral strengths of the normal and abnormal femurs.

2. METHOD

The femoral CT data of 17 patients (15 women aged 43-87 years, average age of 65.86 years; and 2 men, average age of 71.56 years) were collected from different university hospitals around the Fukuoka prefecture, Japan. Mechanical Finder v.10 was used to generate the femoral FE models. 3D imaging, meshing, material sorting and boundary condition were set, and the constructed models were simulated afterwards. Based on the patient data, the femurs were decided whether normal or abnormal. In this study, abnormal femurs were referred to OA or AVN ones. The 3D femur models are shown in Fig.1.

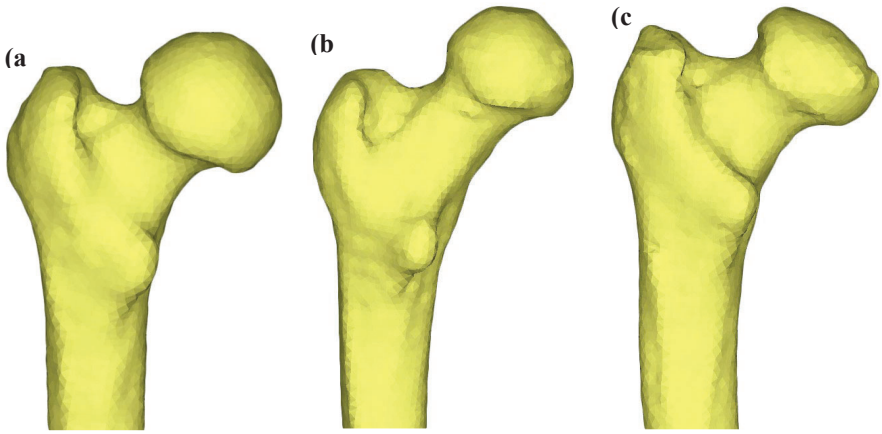


Figure 1: Type of femur models. Normal (a), OA (b), and AVN (c).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The BMD is an important parameter for predicting fracture load, and in this study, the femoral head and neck region BMDs of simulated femurs were found to be a range of 0.13 to 0.38 mg/mm^3. The BMD rang is not much difference between normal and abnormal femurs. The fracture load is, however, significantly higher in normal femurs. The correlation between fracture load and BMD is presented in Fig.2, and it is observed that the femur with more femoral head density can bear the higher fracture load. The correlation coefficient was R=0.97 for the normal and R=0.98 for the abnormal femurs, respectively. The average strength of the normal femurs is found to be 4295±337 N (range from 2300 to 5800), whereas 3365±208 N (range from 2175 to 4175) is for that of abnormal ones. In general, the normal femurs have better Young's modulus distribution than the abnormal ones, and thus, they have more ability to resist the applied load.

The Young's modulus distribution of strongest bones from each category is also illustrated in Fig.3. These coronal cross-section (medial-lateral plane) pictures confirm that the normal femur (E = 3.16 GPa) possesses a better stiffness compared to the abnormal femur (E = 2.85 GPa), and more stress is needed to create the same amount of strain.

4. CONCLUSION

The purpose of this study was to investigate the femoral strengths of normal and abnormal femurs, as well as the comparison between them. The determination of femoral strength was 4295±337 N and 3365±208 N for the normal and abnormal groups, respectively. It is noteworthy that the normal femurs are roughly 28.08 % stiffer than that of abnormal ones. Although we did not conduct for a mechanical test of human femur, the estimated fracture load of the normal femur is reasonably agreed with another study, in which the authors reported that the experimental failure load of mechanically tested fresh-frozen human femur was 4743 N.

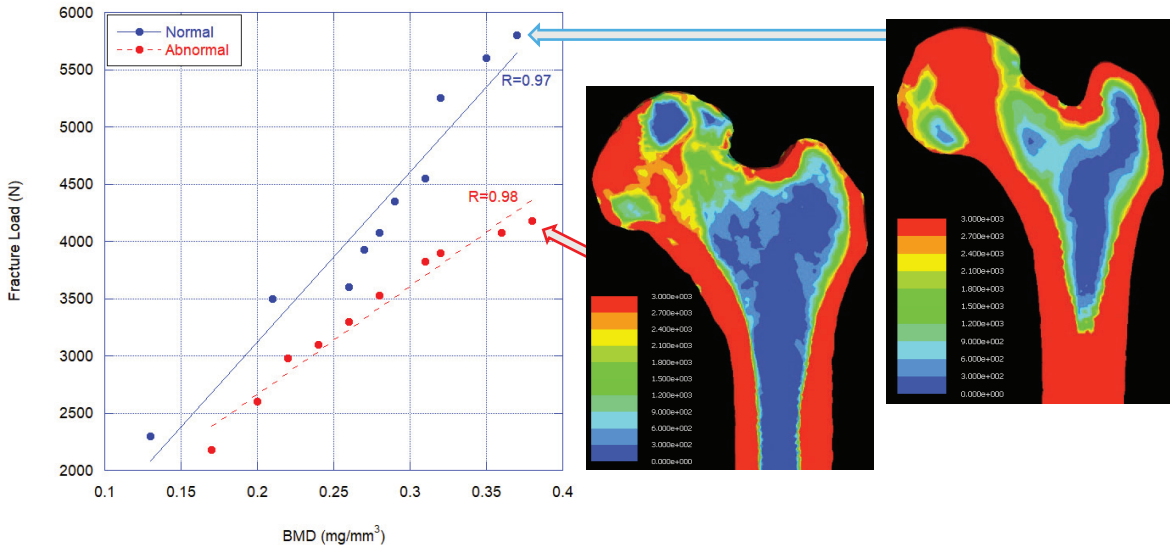


Figure 2: Correlation of fracture load and BMD, showing Young's modulus distribution of strongest femurs from different categories.

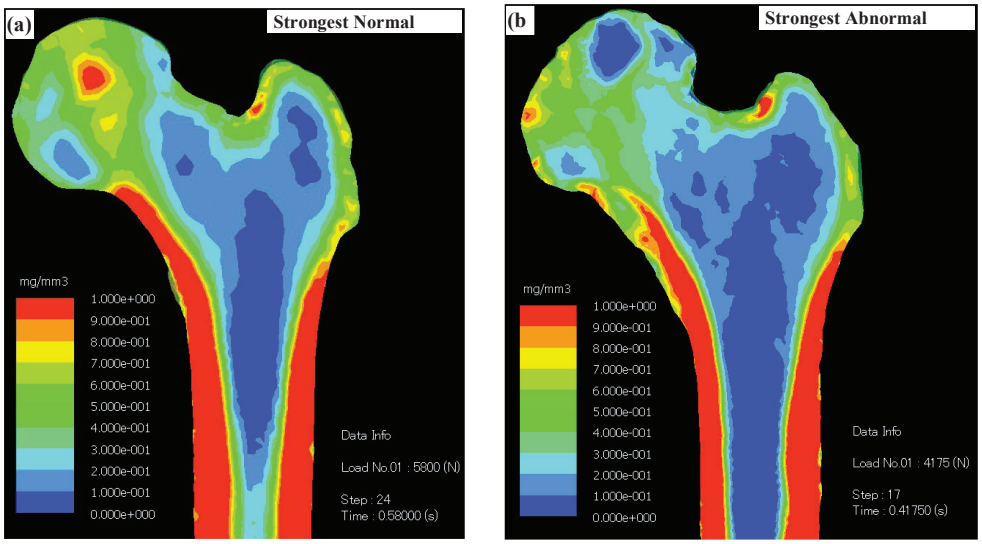


Figure 3: BMD distribution of the strongest normal femur (a) and the strongest abnormal femur (b).

CT 画像を利用した数値解析法の脳神経外科への応用

京都府立医科大学･脳神経機能再生外科学 梅林大督

1. 緒 言

現在，医療画像解析のトレンドの一つに，AI 技術を用いた臓器や器官の抽出がある．臓器を抽出することで，病気の診断に用いることができる．脊椎の抽出も骨粗鬆症の診断に利用できる．骨粗鬆症の診断方法の一つに“定量的ＣＴを用いた有限要素法による骨強度予測評価”がある．脊椎の力学状態を有限要素法解析によって求めることで，骨粗鬆症の進行度の診断や治療効果の確認ができる．個別の脊椎の力学解析を行うためには脊椎領域の抽出が必要であり，手間と時間がかかる．本研究では，この脊椎抽出作業を機械学習で代替し，その力学的影響を調べた．

2. 計算方法

脊椎の積層画像（以下，三次元画像という）を各軸方向の画像に分解し，mask R-CNN[1]を用いて学習・推定する．軸ごとにモデルの構築を行い，３軸の内，２軸が正しいと判断した領域を椎体と判断し，領域の推定を行う．推定された領域を体積方向の縮小・膨張により分離する．５人の三次元画像に骨の領域のラベル付けを行い，４人の三次元画像(サンプル a,b,c,d)を学習データ，１人の三次元画像（サンプル e）をテストデータとした．ラベル付けしたデータを図１に示す．

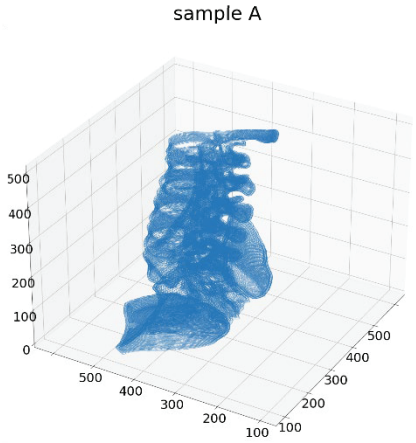


Fig1. Spine ROI label of sample a

3. 結果および考察

Ⅰ．Mask R-CNN による脊椎領域の推定

Mask R-CNN による腹部横断面 CT 画像の脊椎領域推定画像に関する評価を図２に示す．サンプル e における mean average precision(mAP)は 0.880 となった． AP のなかでは coronal が学習データ，テストデータともに低い傾向にあることがわかった．coronal 断面図は axial, sagittal 断面図と比べ，データ対称性・周期性がないという違いがある．そのため，同じ患者数で学習するにあたり，データの多様性に対して類似したデータが少ないため，学習が進まなかった．Axial 断面の推定画像は Recall が他軸と比べ低い．Axial 断面の推定画像の脊椎領域の多くが横突起や関節突起を含んでいない．そのため，False Negative が多くなり，Recall が小さくなっている．

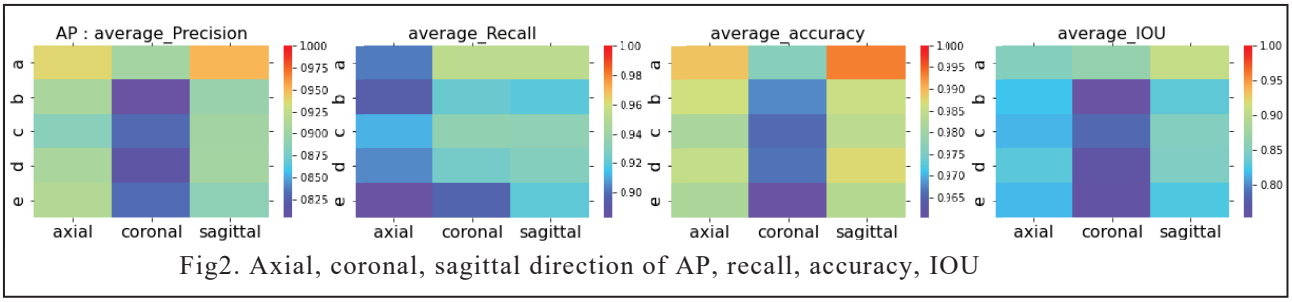


Fig2. Axial, coronal, sagittal direction of AP, recall, accuracy, IOU

本研究における脊椎抽出の目的は，有限要素法解析への応用であるため，脊椎と脊椎をそれぞれに分離する必要がある．そのため，Mask R-CNN による推定画像をもとに椎体の領域（ROI）を抽出する．抽出は以下の過程で行った．

① 体積が一定以上の領域を収縮させる．

② 一定体積以下の領域が発生した場合，摘出する（未分類領域がなくなるまで繰り返す）．

③ 各領域を収縮した回数と同じだけ膨張処理する．

④ 初期状態の体積からはみ出している領域を取り除く．

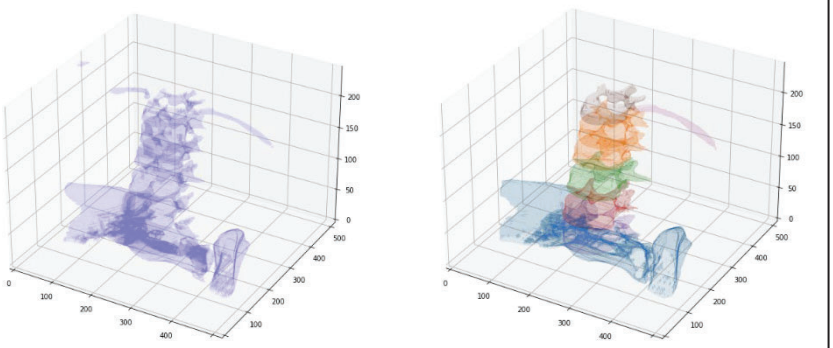


Fig3. Split Spine ROI flow

III．有限要素法解析における Mask R-CNN の影響

II で推定した脊椎 ROI を有限要素法に適応し，一般的な手法での解析結果と比較した．解析条件として，椎間板の物性を与えたブロックで垂直方向に圧縮荷重をかけていき，力学的挙動を検証する．検証の結果，手動生成 ROI を用いた解析モデルが 400N で 1000 のソリッド要素が圧縮破壊したのに対し，mask R-CNN で生成した ROI を用いた解析モデルは 300N で 1000 のソリッド要素が圧縮破壊を起こしている．また，1000 の圧縮破壊が起きた時の圧縮破壊要素分布を比較すると，両モデルで椎体中央から破壊要素が発生し，拡大している様子が見て取れた．

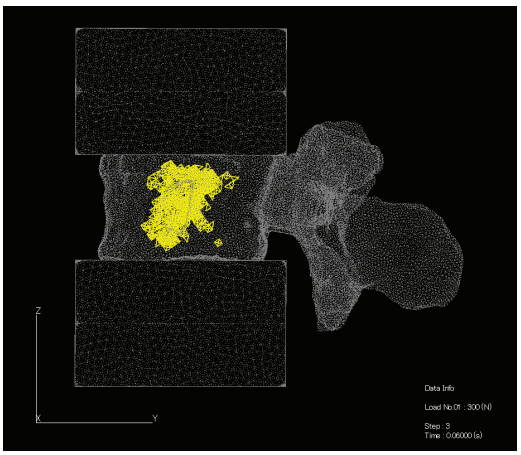


Fig4. mask R-CNN 生成 ROI による解析結果

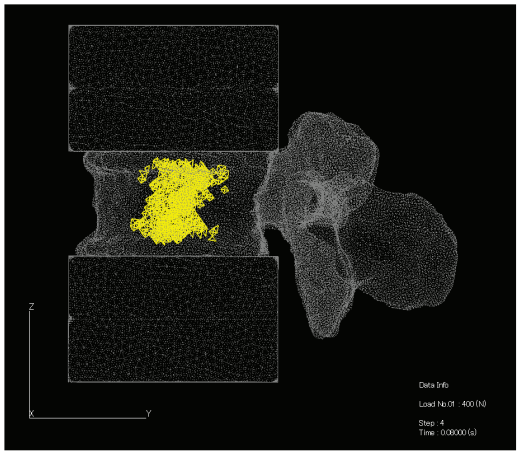


Fig5. 手動生成 ROI による解析結果

4. 結　言

Mask R-CNN による椎体関心領域の推定を行い，高い精度で ROI を抽出することができることが確認できた．推定された ROI を用いた有限要素法解析では，一般的手法による生成 ROI を用いた解析に近い解析結果を得ることができ，Mask R-CNN の有限要素法解析への応用の有用性が示された．

骨密度分布を利用した骨の力学特性予測法の構築
～骨折固定術への応用～

千葉大学大学院医学研究院　松浦　佑介

1. 緒　言

骨の力学的な評価はCTベースの有限要素解析が確立され、椎体や大腿骨など、実証試験でも良好な相関関係が得られている。しかし骨折後の骨癒合過程については仮骨のひずみの大きさで議論されることはあるが、仮骨の物性値が導出されていないこともあり、詳細な力学的評価はされてこなかった。我々の研究グループにより導出された仮骨の材料特性を用いることで、骨折部仮骨の破壊リスクを評価し、荷重に対して偽関節に陥るリスクや固定性を定量的に評価できることが期待される。大腿骨骨幹部骨折に対する髄内釘固定術は良好な成績が得られている一方で、偽関節症例も3.1%-12.5%と報告されている。偽関節の要因としては、開放骨折、喫煙、スクリュー折損、不適切な dynamization などが挙げられている。この中でスクリュー折損や不適切な dynamization などは力学的な要因であり、特に肥大性偽関節症は骨折部の固定性に起因すると考えられている。そこで、大腿骨骨幹部骨折髄内釘固定術症例への仮骨を含めたCTベース有限要素解析の適用を試みた。本研究の目的は、CTベース有限要素解析を用いて、髄内釘挿入術後の固定性、偽関節手術の有効性を定量評価することである。

2. 方　法

対象は51歳男性。バイク走行中に対向車と接触し転倒受傷。救急搬送され、左大腿骨骨幹部骨折を認めた（図１）。同日、髄内釘を用いて緊急手術が行われた。仮骨形成を認める術後６ヶ月のCT画像を用いて有限要素解析を行い、仮骨部の破壊リスクを評価した。解析モデルには実際施術に用いたStryker社製T2 Femoral nail φ11mm L360mmの髄内釘モデルを作成した。モデルは大腿骨近位、遠位骨片、仮骨、髄内釘、スクリューで構成される（図２）。また、偽関節手術のシミュレーションとして髄内釘を太くしたモデル、太く長くしたモデル、外側にプレートを追加したモデルも作成した。材料特性はネイル、スクリュー、プレートはチタン合金、骨、仮骨のヤング率、降伏応力はそれぞれMatsuyama、Suzukiの式を採用した。髄内釘-骨・仮骨、髄内釘-スクリューの境界面は接触設定を行い摩擦係数は0.0とした。境界条件は骨頭に体重の3倍（1911N）の荷重を与え、荷重方向は常に骨頭中心から膝関節中心へ向くように設定した。拘束は遠位端を完全拘束とした。評価は骨折部分の仮骨の破壊リスクに注目した。仮骨の各要素の 引張破壊リスク＝最大主応力/臨界応力 で評価した。さらに骨片間の仮骨領域のうち引張破壊に至る要素の体積率を 引張破壊体積率＝（引張破壊リスク≧１の体積）/抽出仮骨体積 として用いた。

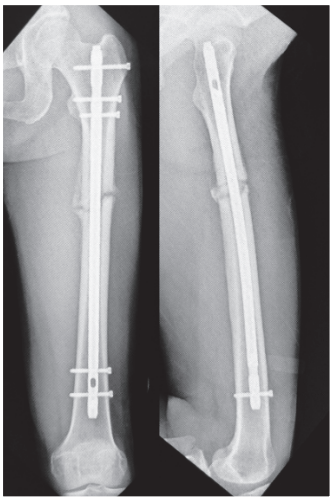


図１　術後６ケ月のレントゲン

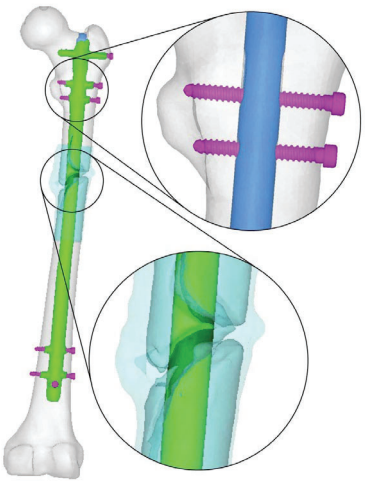


図２　解析モデル

3. 結果および考察

図３は実際に髄内釘φ11mm L360mm にて施術した術後 6 ケ月における引張破壊リスク 50%以上の要素を示しており、引張破壊体積率は体重 3 倍の荷重時 15%程度となり、歩行によっても偽関節に陥る可能性が示唆された。偽関節手術として髄内釘を太くしたモデル、太く長くしたモデル、5、6、7 穴プレートを追加したモデルの引張破壊体積率を図４に示す。径を上げると引張破壊体積率は軽減され、また髄内釘を長くした場合も軽減される傾向にあった。特に骨折部の剛性を高めるという点で太くする方が効果があると考えられる。また、プレートを設置したモデルではスクリュー距離が近いほど効果が見られ、13mm ネイル程度にまで軽減された。骨片間距離からプレート固定では外側の開きを抑えるため効果が得られたと考えられる。偽関節手術にて髄内釘を太くすることは物理的に難しいこともあり、手術の難易度という点からもプレート追加は有効な手段となることが示された。

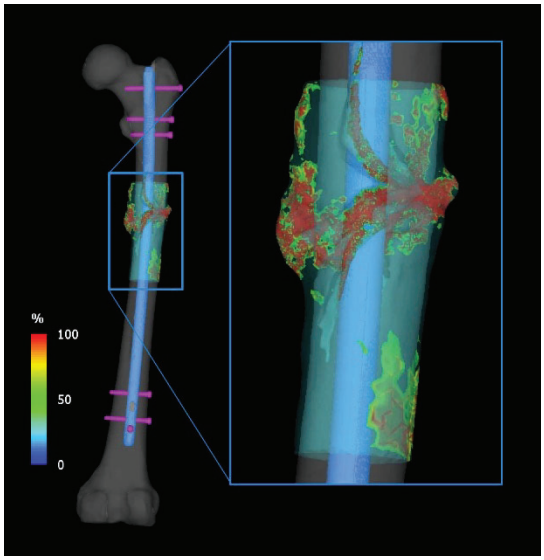


図３ 引張破壊リスク 50%以上の仮骨要素

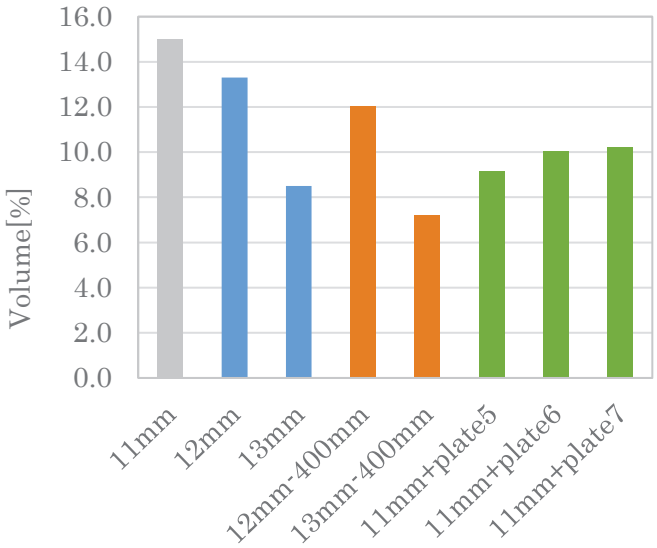


図 4 体重３倍荷重時の引張破壊リスク

4. 今後の方針

時系列変化

対象の患者は術後 12、16 ヶ月時にも CT 撮影を行っている。引張破壊体積率の時系列変化を見ることで、骨癒合の進行との関連を調べる予定である。また、仮想的に髄内釘を抜いて材料非線形解析を行うことで、抜去時骨強度を求め、時間とともに健側骨強度に近づくか解析を行う。

歩行中荷重

現在の荷重条件は軸荷重を与えており回旋がほとんど生じていない。歩行中など日常動作の中では筋力も働き、多少力学条件が異なることが考えられる。過去の文献より歩行中最大荷重時の関節反力、筋力を用いて解析を行う予定である。

上腕骨近位端骨折に関連する生体力学的問題に対する CT-FEM の応用

東北大学病院　　佐野　博高

１．はじめに

上腕骨近位端骨折は、肩関節周囲の骨折で最も多い症例であり、骨粗鬆症の女性に多い。その多くは転倒により発生し、肩関節の機能障害を残しやすく、挙上困難や疼痛などが生じる。上腕骨近位端骨折の分類としては、Neer 分類が知られており、2-part 外科系骨折、3-part 骨折、4-part 骨折等に分類される。このような異なる骨折形態は、患者の骨・関節構造、骨密度分布、外力の作用形態等に依存することが考えられるが、その力学的メカニズムについては明らかになっていない。

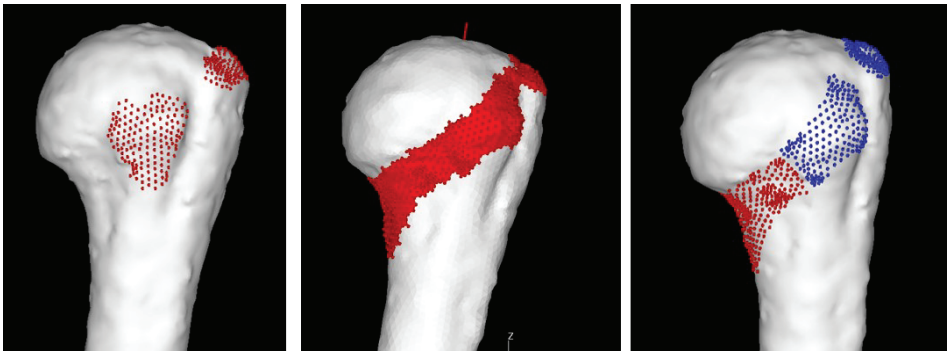
そこで本研究では、CT 画像を用いた有限要素法（CT-FEM）を利用して、上腕骨近位端骨折のメカニズムを明らかにすることを目的とした。本年度では、正常な上腕骨の CT 画像を利用して正常上腕骨モデルを作成し、異なる境界条件の下で解析を実施して、上腕骨近位端骨折の再現を試みた。また、荷重方法の変化に伴う骨折形態の変化について調査した。

２．モデル作成と解析方法

正常な上腕骨の CT 画像データを用いて３D 上腕骨モデルを作成した。図１に上腕骨モデルの外観図と弾性率分布図を示す。CT 値を骨密度に換算し、さらに Keyak の式を用いて弾性率と降伏強度を求めることで骨の力学的特性を決定した。荷重条件を図２に示す。この荷重条件は転倒時に作用する外力の一例を示している。３種類の拘束条件を図３に示す。拘束１は腱板付着部で完全に固定している。拘束２は関節包の付着部に対応する部分を完全に拘束している。拘束３は外科頚の内側に対応する部分に６種類の異なる部分拘束条件を与えている。赤色が完全固定、青色が部分固定に対応している。

図１　3D 上腕骨モデルと弾性率分布状態

図２　荷重条件



拘束条件１　　拘束条件２　　拘束条件３

図３　３種類の異なる拘束条件

３．結果と考察

３種類の拘束条件での損傷要素の分布状態を図４に示す。ここで、引張破壊が白、圧縮破壊が赤で示してある。拘束条件３において外科頚骨折に類似の損傷要素野分布状態が得られている。黄色で示した実線は骨折線に対応している。各拘束条件での最大主応力と最小主応力の分布状態を図５に示す。最大主応力の分布状態は引張破壊の発生に対応しており、一方、最小主応力は圧縮破壊の発生に対応している。拘束条件３において、外科頚骨折が生じる箇所に主応力の集中が生じていることが明らかである。

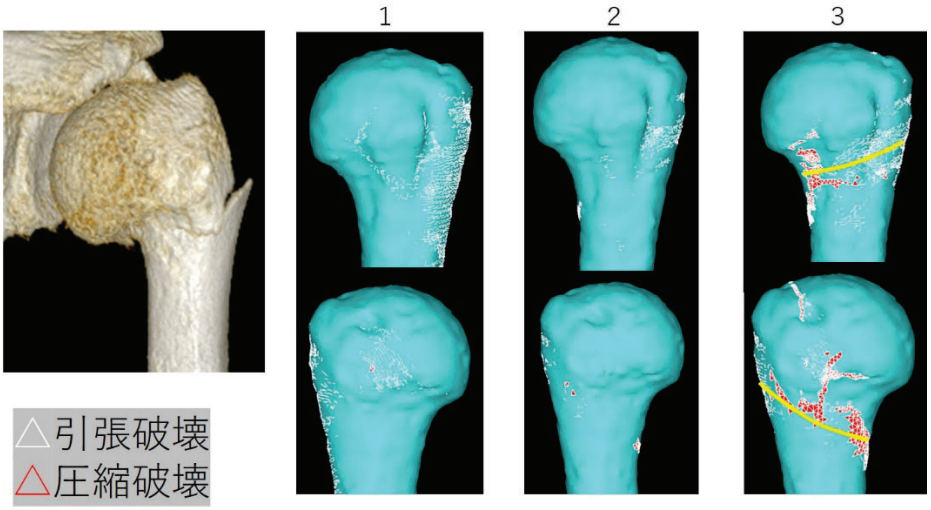


図４　異なる３種類の拘束条件における損傷要素野分布状態

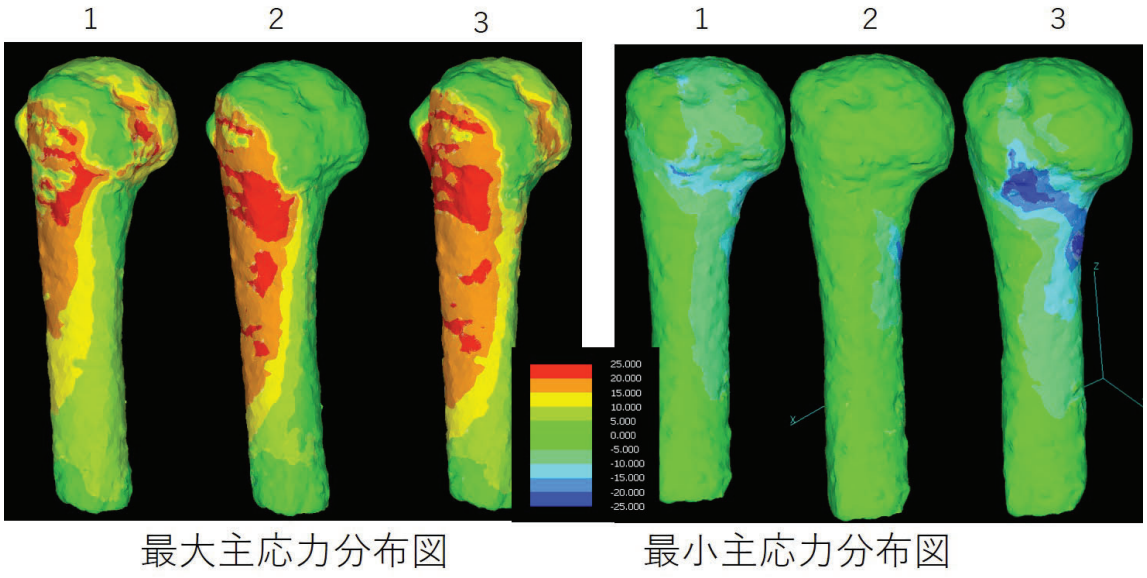


図５　最大主応力と最小主応力の分布状態

４．まとめ

健常な上腕骨の CT データを用いて３D 上腕骨モデルを作成し、転倒を模擬した外力を負荷し、近位部の拘束条件を工夫し部分拘束を与えることで、外科頚骨折に類似の骨折形態を得ることに成功した。

空中風力発電に用いる自立離着陸可能なカイトの研究 ―逆デルタ型カイトの開発―

熊本高等専門学校　拠点化プロジェクト系　葉山清輝

要旨
空中風力発電の飛行プラットフォームとして可変カイトを提案している．逆デルタ型の可変カイトを製作し，ラインの接続点を摺動し糸目を制御する機構により，飛行制御ができることを確かめた．逆デルタ型にしてバッテリーを最下部に搭載することで，マルチローターによる浮上機構を付加しても重心位置が空力中心よりも上がらないように機体を製作することができた．

1. 目的

上空の地表より強く安定した風を利用する空中風力発電について，近年は欧州や米国にて空中風力発電の実証実験が進んでいる．カイト・グライダーなどの係留ウィンチの張力を用いる発電法は，強度限界時には地上に避難できるので，台風が来襲するわが国では有望な発電方法だと考えられるが，カイト，グライダーのいずれも安全な離着陸方法が課題となっている．

一方で，飛行の自由度の高いマルチコプター型や長距離飛行が可能な固定翼機型の無人航空機の技術が発達し，空撮，測量など様々な用途が検討されている．以前我々は省電力・長距離飛行を目的として両者の利点を組合わせ主翼を有するマルチコプターを開発しており[1]，これらの知見をもとに図2に示すような空中風力発電のプラットフォームとして離着陸のためのモーター・プロペラを有し，変形により空力特性を変えることができる可変カイトを提案した[2]．昨年度までにデルタ翼型の可変カイトの試作と改良により飛行制御が可能な機体ができたが，デルタ翼型では重心位置の調整のために重量物（バッテリー）の搭載が不可欠であった．

本年度は，これまでと異なる形状で空力中心と重心の関係で有利な逆デルタ翼型のカイトを空中風力発電の飛行プラットフォームとして検討する．重心の調整が容易になるので，翼面荷重をより小さくでき高性能化が期待できる．今回は，カイトの形状変化ではなく，サーボモータを使って糸目をリモートコントロールで変化させて，左右旋回と迎角の制御を試みる．

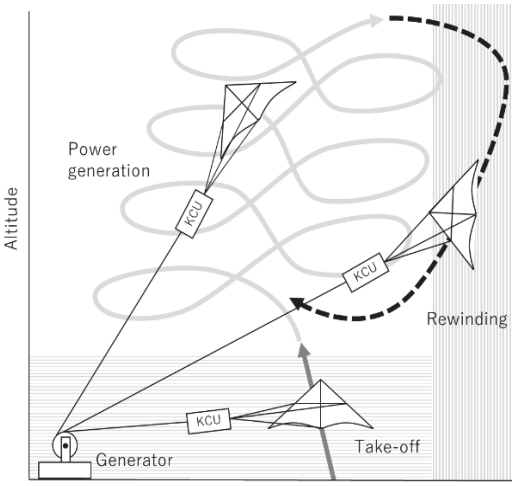


図1　カイトによる空中風力発電の概念図

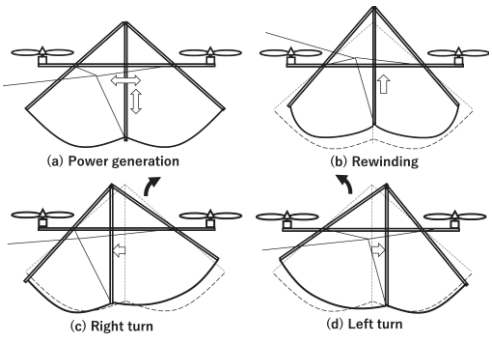


図2 マルチローター付き可変カイト

2. 実験方法

2-1　機体の製作

カイトは，直径 4 ㎜のグラスファイバーロッドを T 型に組合わせたものをフレームとしてリップストップナイロン生地を張って作製し，サーボモータを使って糸目をリモートコントロール可能な構造とする．フライトコントローラ(FC)には，ファームウェアが独自に改変できる Pixhawk4 または APM2.8 を用いる予定である．本年度は，従来のデルタ型より軽量化と翼面荷重の低下による飛行性能の改善が見込まれる逆デルタ型の機体の設計・製作までを行った．

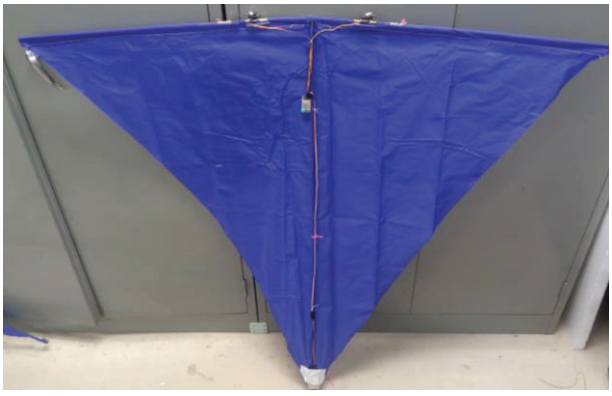


図3　試作した逆デルタ翼型のカイト

2-2　飛行実験

屋外での飛行実験により操縦性と飛行安定性について調べる. その後, FC に搭載された各種センサによる段階的な自律自立飛行実験を行うことを予定した.

表1　機体の翼面荷重の比較

機体	翼面積	浮上機器無し		浮上機器有り	
		重量	翼面荷重	重量	翼面荷重
試作 1 号機	0.4m^2	0.2kg	0.5kg/ m^2	0.38kg	0.95kg/ m^2
試作 2 号機	1.0m^2	0.3kg	0.3kg/m^2	0.52kg	0.52kg/m^2
試作 3 号機	**0.54m^2**	**0.17kg**	**0.3kg/m^2**	**※0.34kg**	**※0.63kg/m^2**

※推定値

3. 実験結果と考察

今年度試作した可変カイトを図 3 に示す. また, 本年度製作の試作 3 号機と, 一昨年度の試作1号機, 昨年度の試作 2 号機との翼面積, 機体重量, および翼面荷重の比較を表 1 に示す. 本年度の試作3号機については浮上機器無しの機体の製作までで浮上機器(FC とローター)の搭載には至っていないため, 試作 1 号機と同等の機器を搭載した場合の推定値を示している.

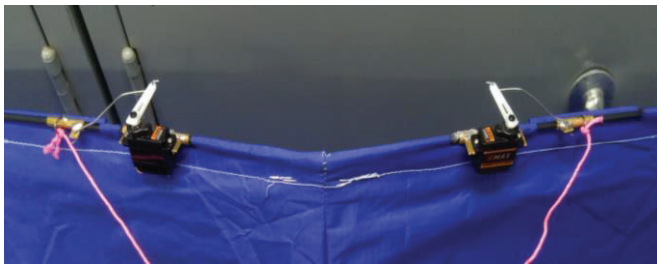


図4　可変カイトの摺動機構

翼幅が同程度の試作1号機と比較して, 翼面積の増加と摺動機構の変更による重量の軽量化に伴う翼面荷重の低下ができている.

カイトの摺動機構について図 4 に示す. 従来の試作機ではサーボモータによるリンク機構によりロッドの摺動を行っていたが, 試作3号機ではラインの接続部分をサーボモータにより摺動させて糸目の変化をさせている. 1.6kg・cmのトルクで摺動距離はそれぞれ 5cm とり, ロッドにほぼ垂直方向にラインの張力が加わることになる. 2 個のサーボモータを同方向に動かすことにより, 左右のラインの接続場所を変えて糸目を左右に動かし, また逆方向に動かすことにより糸目を上下させてカイトの迎角を変化させるようにした.

図5　可変カイトの飛行試験飛行（浮上機器無し）

試作3号機の飛行試験を行った. 図 5 は浮上機器無しでの飛行中の写真である. 従来の機体と比較して空力中心よりも重心を低くすることができ, 糸目をほぼ空力中心に合わせてた状態で, 安定に浮上できるようになった. リモートコントロールによって糸目の変化による左右移動と上下の移動(迎角の変化)が確認できた. (現時点ではカイトの調整中で墜落を避けるため左右旋回までは行っていない)

浮上機器を搭載する場合, モータ・プロペラと ESC は上部に搭載されるが, 最下部にバッテリーを搭載することで, 重心位置も未搭載の場合とほぼ同じになると推定され, 安定に浮上できると考えられる.

4. まとめ

逆デルタ型可変カイトを従来と異なる摺動機構で製作し, 安定に飛行し, リモートコントロールが可能であることを確認した. 現状では十分な高度での旋回飛行や張力の測定などはできていない. 浮上機構も未搭載なので, 今後も継続して機体の開発を行う予定である.

5. 成果報告(論文、学会発表等)

なし

参考文献

[1] 葉山清輝,工藤友裕, 入江博樹,"高空風力発電に用いる可変カイト翼付きマルチコプターの検討", 第 40 回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, 2018 年 12 月 4-5 日.

[2] Kiyoteru Hayama et al., "Prototype of Multirotor Attached Variable Wing Kite for Airborne Wind Energy Generation", The 15th International Conference on Intelligent Unmanned Systems (ICIUS2019), Beijing, China, August 27 30 2019, PaperID=90.

研究代表者　葉山清輝
研究協力者　工藤友裕

密度成層を考慮した長島海峡周辺海域で抽出可能な潮流エネルギーポテンシャルの数値計算

鹿児島大学　　山城　徹

1．はじめに

鹿児島県の長島海峡，黒之瀬戸（図-1）は東シナ海と八代海を結ぶ海峡で潮流発電の有望海域の一つである．著者らは 2013 年度から九州大学応用力学研究所／胡教授と共同で，長島海峡周辺海域における潮流発電ポテンシャルに関する研究を行っている．長島海峡周辺海域の潮流パワー密度を算定するための，潮流数値モデルを開発し，長島海峡では鳴瀬鼻沖地点，黒之瀬戸では梶折鼻沖地点に潮流発電の適地があることを指摘した（堀田他，2016 年）．さらに，2017 年度の共同研究では密度成層を考慮した数値モデル開発を行い，長島海峡，黒之瀬戸ともに成層期 7 月の潮流パワーポテンシャルは混合期 2 月と比較するとおよそ 1～2 割減少していることを示した（濱添他，2019 年）．本研究では，当初，長島海峡／鳴瀬鼻沖地点付近，黒之瀬戸／梶折鼻沖地点付近に複数台の潮流発電デバイスを設置した場合に抽出可能なエネルギー量を算定する予定であったが，モデルの開発に至らなかった．その一方で，MSM 気象予報データと DREAMS_E 海況予報データを用いて，潮流パワー密度予報システムのプロトタイプを開発していたので，ここでは，その結果を報告する．

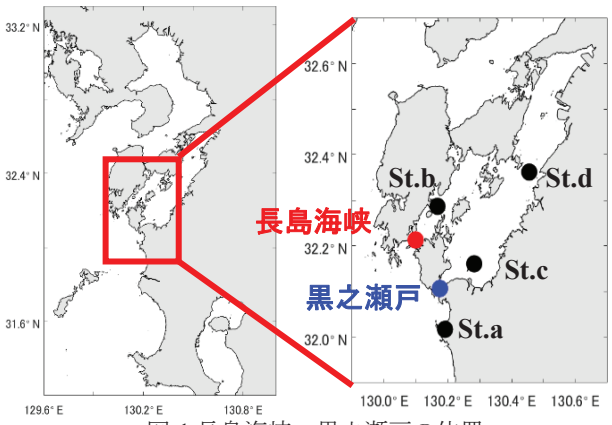


図-1 長島海峡・黒之瀬戸の位置

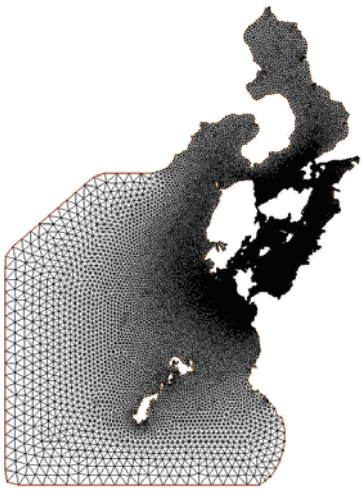


図-2　計算領域

2．数値計算

長島海峡周辺海域の潮流計算には，非構造系三角系格子の FVCOM（Chen et al.，2006 年）を用いた．計算対象領域を図-2 に示す．計算領域内の水深は日本水路協会の海底地形デジタルデータから入手した．さらに，データの充実を図るために本研究室が実施した長島海峡と黒之瀬戸の水深観測の結果もこれに加えた．格子幅は開境界で 5 km，長島海峡で 180 m とし，鉛直座標は σ 座標 20 層に分割した．開境界では NAO.99Jb（Matsumoto et al.，2000 年）の主要 8 分潮を与えた．外洋域については，DEAMS_E の水温，塩分の予報値を境界条件，初期条件として与えた．また，海面熱収支や吹送流の計算には MSM 気象予報値を利用することにした．したがって，本プロトタイプでは，熱輸送に関連する水平移流は潮流のみで黒潮や暖水渦の効果を含めていない．また，八代海や有明海へ流入する河川水の影響も考慮していない．

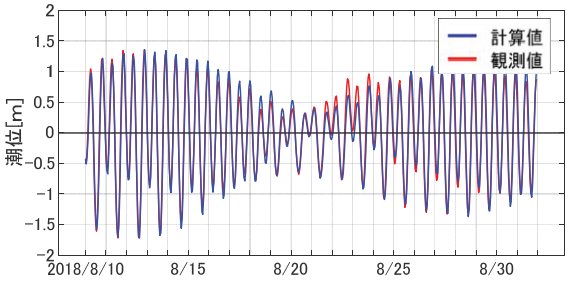


図-3　阿久根における観測潮位と計算潮位の時系列

3．潮汐・潮流の精度検証

阿久根験潮所（図-1 の St.a）における 2018 年 8 月 10 日～8 月 31 日の潮位変動の時系列について，計

算結果と観測結果を比較した(図-3). 青線が計算値，赤線が観測値である．両者は振幅，位相ともに良く一致している．計算値は観測値と高い相関を示し，相関係数は 0.98，RMSE は 12 cm である．したがって，潮汐予報について，本モデルは高い再現性を示したと言える．

長島海峡，黒之瀬戸での計算結果と観測結果の流速散布を図-4 に示す．観測が赤点，計算が青点である．長島海峡では鹿児島県が 2013 年 11 月 25 日～12 月 15 日に実施した ADCP 定点観測結果，黒之瀬戸では第十管区海上保安本部が 2012 年 1 月 15 日～2 月 29 日に実施した観測結果と比較した．観測時期は異なっているが，長島海峡では，上げ潮時，下げ潮時ともに流向は良く一致し，図中の絶対流速の平均値を求めると観測値は 1.26 m/s, 計算値は 1.21 m/s であった．一方，黒之瀬戸では上げ潮時の流向は計算が観測よりもやや北寄りとなるが，図中の絶対流速の平均値を求めると観測値は 2.15 m/s，計算値は 2.11 m/s であった．両地点ともに計算結果は観測結果を概ね予報できていると言える．

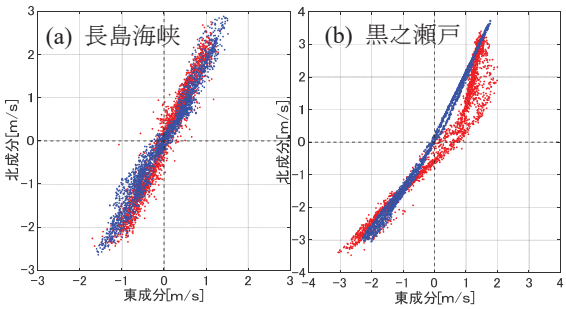


図-4　計算結果と観測結果の流速散布図

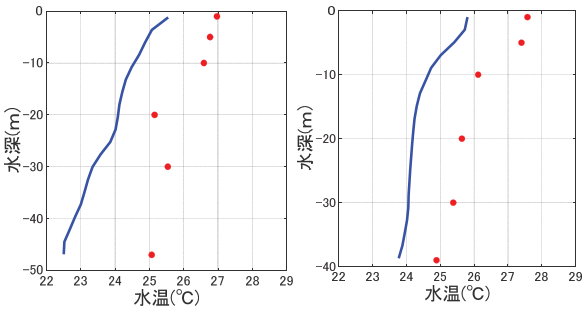


図-5　St.b と St.c における水温の観測結果と計算結果

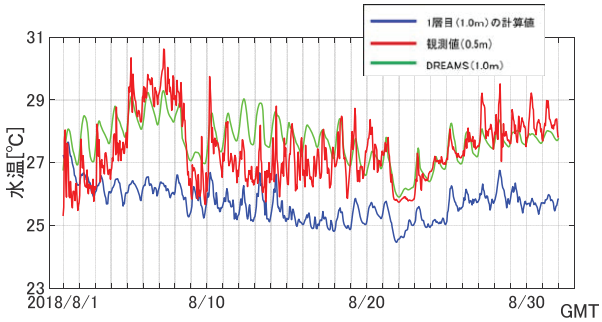


図-6　St.d における海面水温の観測結果と計算結果

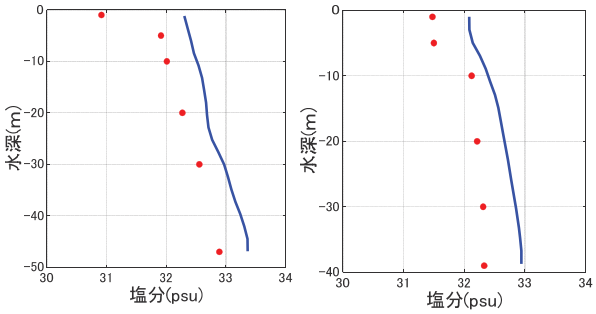


図-7　St.b と St.c における塩分の観測結果と計算結果

４．水温，塩分の精度検証

熊本県水産研究センターが 2018 年 8 月 9 日に St.b と St.c（図-1）で収集した水温の観測結果を計算結果と比較した(図-5). St.b と St.c ともに計算結果(青線）が観測結果（赤点）よりもかなり低い．田浦局（図-1 の St.d)で 2018 年 8 月に観測された海面水温の時系列を計算結果と比較して図-6 に示す．赤線は観測結果，青線は本モデルの計算結果，緑線は DREAMS_E の計算結果である．計算値は観測値の日変動を概ね再現できているが，8 月 4～8 日にかけて発生した 3℃を越える水温上昇を再現することができず，また平均的にも計算水温が観測水温よりも低い結果となっている．黒潮や暖水渦による外洋からの水平熱輸送を考慮していないことに原因していると考えられる．塩分は計算結果が観測結果よりもかなり大きい結果となった（図-7）．したがって，本モデルにおける塩分の過小評価を改善するには，有明海や八代海に流入する河川水の影響を反映できるようにモデルを改善する必要があると考える．

５．研究組織

研究代表者：鹿児島大学／山城　徹
研究協力者：鹿児島大学／池田佳樹，荒武佑哉
　　九州大学／胡　長洪

波成二次循環の水槽実験

京都大学大学院理学研究科　吉川　裕

目的　水面波が単独で鉛直混合を引き起こすか否かについて，議論が割れている。いくつかの水槽実験（e.g., Babanin and Haus, 2009; Dai et al. 2010）は水面波単独でも鉛直混合を引き起こすことを示唆するが，別の水槽実験（Beya et al. 2012）はそれを否定する。水面波は第一次近似としては渦無し流れであるため，そのままでは渦有り流れを伴う混合を引き起こせない。このため，この問題は近似下では無視される水の分子粘性の影響が，（１）どのように水面波に作用して渦有り流れを引き起こし，（２）どの程度の混合を引き起こすのか，という二つの問題に置き換えられる。Dai et al.（2010）から見積もられる鉛直混合の強さは拡散係数にして 10^{-5} m^2/s 程度と無視できないほど大きく，海洋表層における鉛直混合の不十分な再現精度が地球気候システムモデルの予測精度を低下させていることを考えると，この問題は看過できない重要な問題である。

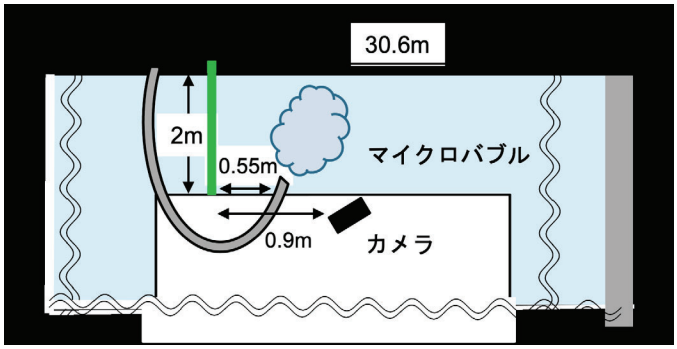
最近の波解像数値実験（Tsai et al., 2017; Fujiwara et al. 2020）は，水の分子粘性による仮想波応力が水面付近にシアー流（渦有り流れ）を引き起こし，そのシアー流と水面波の相互作用で波の伝播方向に軸をもつ二次循環を形成することを示した。同様の筋状構造は，水面波の表面の構造を可視化した水槽実験（Savelyev et al. 2012; Savelyev et al. 2020）でも確認されている。これらは（１）の問いに対する一つの答えとなっている。しかし，そのような二次循環が Dai et al.（2010）で観測されたような強い鉛直混合を引き起こすのかという（２）に関する問題については確認されていない。したがって，Dai et al.（2010）で観測された強い鉛直混合は，仮想波応力の作用で生じたシアー流と水面波の相互作用とは異なるメカニズムで生じている可能性もある。実際，Dai et al.（2010）では軌道運動流速そのものに粘性が作用することでシアー流を引きおこすという考えのもと定式化したパラメタリゼーションで，同程度の鉛直混合を説明できると主張している。このように，（１）も（２）も，確定的な答えが得られていないのが現状である。そこで本研究では，この問題に対する一定の答えを得るため，応用力学研究所の深海機器力学実験水槽で実験を行い，仮想波応力によるシアー流と水面波の相互作用による二次循環と，鉛直混合の強さを同時に評価することを試みた。

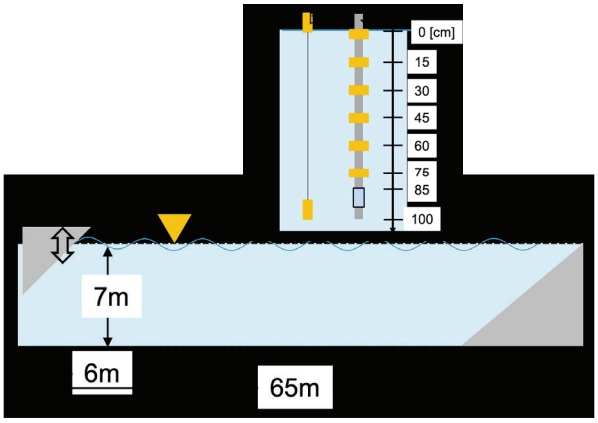
実験方法　造波器を用いて周期 1 s（波長 1.56 m），振幅 4 cm の波を発生させ，水運動の可視化（二次循環の評価）と，水温の鉛直分布の時間変化を計測（鉛直混合の評価）した。

水運動の可視化は，造波器からおよそ 30 m 離れた地点の水面下数 10 cm の位置に，マイクロバブル発生装置（リビングエナジー社，FU11 型）の吐出口を設置し，直径 100 μm 以下の泡（マイクロバブル）を発生させることで行った。造波器から約 30 m の位置にある横窓からグリーンレーザー（レーザークリエイト社，3010801-1W）を水中に照射することで，マイクロバブルの運動が可視化される。マイクロバブルはわずかに上向きの浮力を持つため水面付近に滞留するが，二次循環があれば下向きに輸送される。この下向きの運動から，水粒子の上下運動を可視化することができる。

鉛直混合の評価は，造波器から 6 m の位置で水温の鉛直分布を計測することで行った。6 つの水温計（JFE Advantec 社製，DEFI2-CT）をアレイ状に 15 cm 間隔で繋げ，1 cm ずつ下げながら水温を計測することで，水面から深度約 1 m までの水温分布を計測した。計測時刻は，波の発生前と，波の発生後 4，19，34，49 分後である。なお，水温計測が乱れを発生させる可能性があるため，水温計測のための

実験は可視化のための実験とは別に行っている。

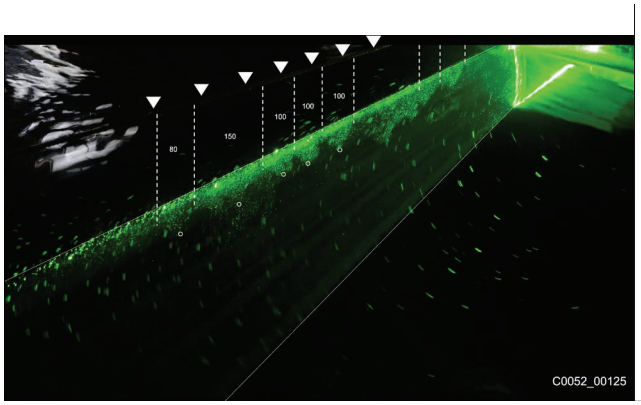


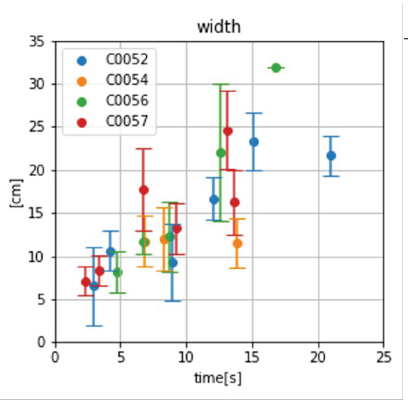


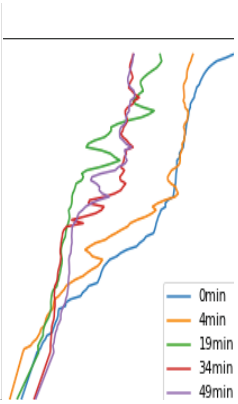
左図：可視化実験の装置配置図（上から見た図）。右側が造波器，波は左に伝播する。レーザー照射面は緑線。右図：水温分布計測実験の装置配置図。左側が造波器，波は右に伝播する。黄色い▽の地点で，水温計アレイ（組み込み図）を用いて水温分布を計測した。

実験結果　下の左図は水面付近のマイクロバブルを（図中右上の）窓から照射するグリーンレーザーで可視化した際の写真である。水面付近のマイクロバブルが，波の到達後，間隔をあけて下に落ち込んでいく様子が見て取れる。図には下に落ち込んでいる場所を白▽印で示している。この間隔を写真から読み取り，時間の関数として示したのが下の中図である。時間とともにおよそ線形てきに増加しているが，これはシアー流と水面波の相互作用により作られる二次循環と同様であり，またこの間隔は理論的に予想される値とおよそ同程度であった。以上から，本実験においてもシアー流と水面波の相互作用で二次循環が形成され，水面付近の海水が下層に輸送され混合されていることが確認された。

また，水温の鉛直分布を計測したところ，計測地点に水面波が到達してから 4 分後には水面下 10 cm まで水温が低下していることが確認され（下の右図），この深度までは混合が生じていることを確認した。なお，この水温変化は先行研究と定性的に同様であった。これらの結果は，水面波が仮想粘性応力を通じて生成されたシアー流と相互作用することで二次循環を形成し，鉛直混合を引き起こすことを実験てきに示すものである。







左図：マイクロバブルの分布。中図：下降流の間隔の時間変化。右図：水温分布の時間変化。

謝辞　技術職員の野田氏，油布氏，浜崎氏には多くの技術的な提案を積極的にして頂き，当初我々が予想していた成果より何十倍もの成果を得ることができました。記して感謝いたします。

研究組織　京都大学大学院理学研究科　教授　吉川　裕，修士 2 回生　今村　春香

研究成果報告　本研究の成果を今村春香の修士論文の一章とした。（専攻の修士論文賞に選ばれた。）

応用力学研究所共同研究成果報告要旨（日本語版）

1. 課題番号：２７ME3

2. 課 題 名：小形風車における可変ローターの開発・研究
小形風車の開発・研究

3. 区　　分：特定,●一般 研究集会，若手キャリアアップ支援，国際化推進（該当するものを選択）

4. 研究代表者
所属：福岡　大学
氏名：江﨑　丈巳

5. 所内世話人：内田　孝紀　准教授

6. 要旨（日本語：150～200 文字，または，英語：100～150 文字）：

小形風車は、固定ハブでカットアウト風速が他の半分と発電量が大幅に減る難点があった。　開発ハブでは、その複数化により固定と遊動ハブを設けてピッチを可変化することで問題の解消を図った。機構は、軸固定ハブ間に与圧トルクの遊動ハブを設け、ロータートルクによる与圧解除の過程でピッチ軸を駆動、翼仰角を変えれるようにした（cf. Fig. 1(a), Fig. 1 (b) 組立図）。　今回は、ハブのモデル化に成功したものの風洞実験には至らなかった。

＊）日本語版か英語版のいずれか１通を提出すること

風車後流の可視化技術に関する研究（2021 ME-25）

弘前大学　本田明弘

要旨　昨年度は室内実験におけるトレーサーなどの撮影方法をパラメータに結果に対する影響を調査するとともに、降雪時の屋外において得られた動画を対象に PIV の適用を図った。

目的　従来から風洞内での模型実験で流れの可視化技術の先進的な役割をしてきた応用力学研究所において、実機の可視化をにらんだ基礎的な実験技術を開発するものである。

方法

１．Qbladed における机上検討

（１）　翼形状の再現

提供された翼断面の座標をもとに、ベルリン工科大学により開発された風車設計ツールである Qblade[1]を用いた解析を実施するためのデータを作成した。作成された形状を下図に示す。

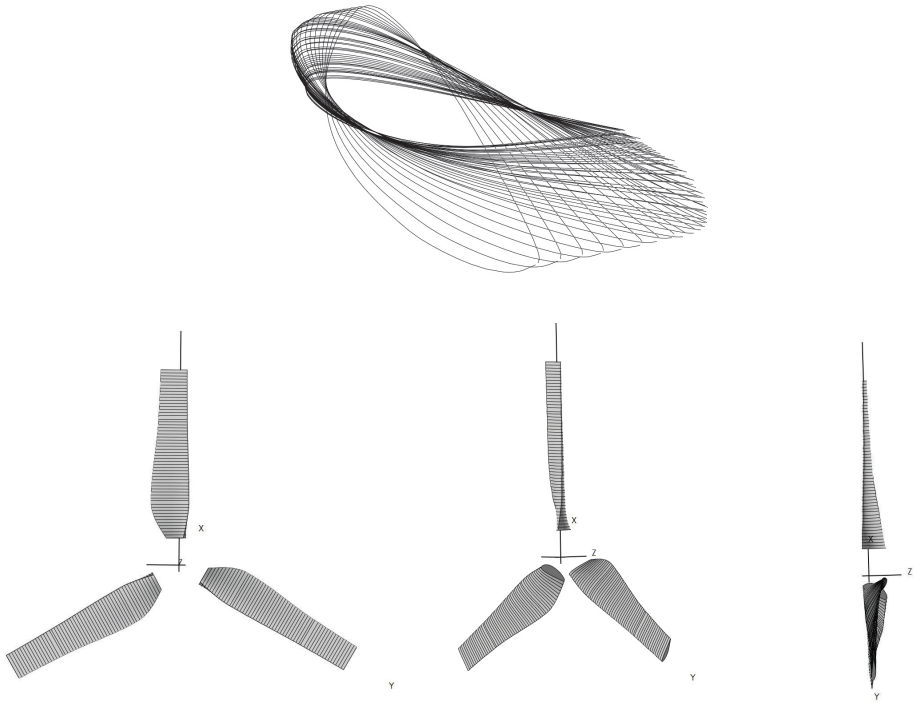


図１．Qblade における翼形状

（２） XFLR5 による空力特性推定

Qblade には断面形状から空力特性を推定する XFLR5 が装備されており、推定された空力特性を下図に示す。

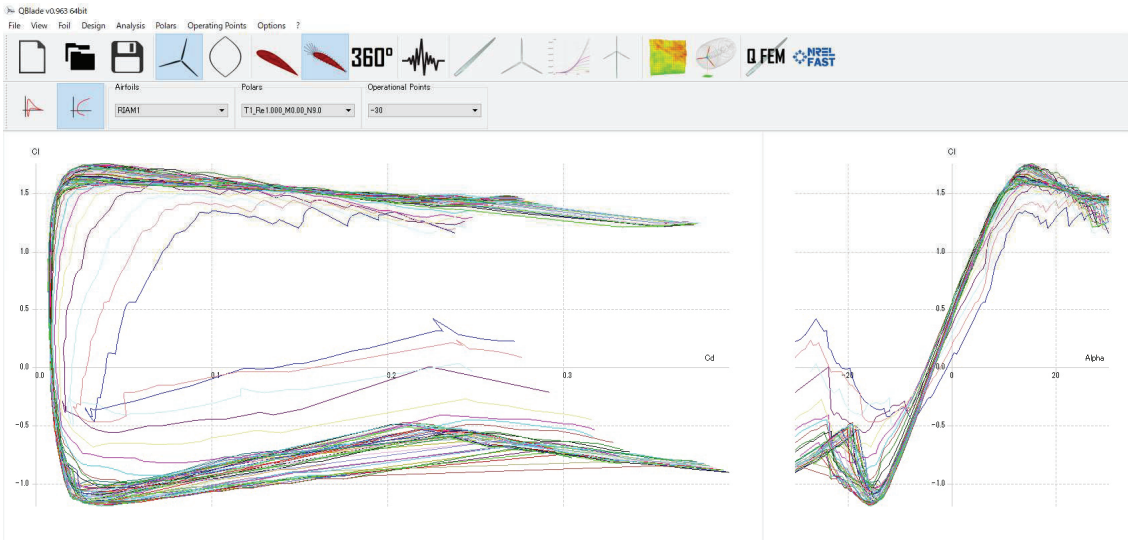
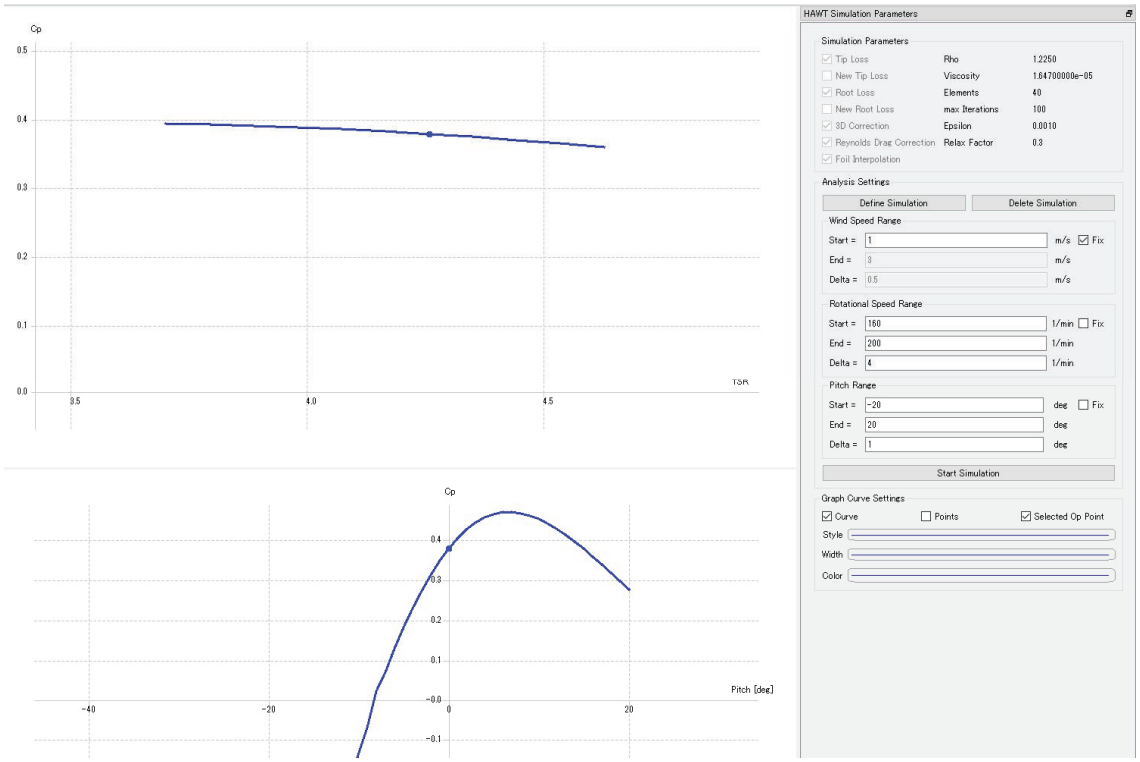


図２．XFLR5 で求められた翼素断面の空力特性（左：Cd-Cl 図、右：α―Cl 図）

（３） BEM による出力係数：Cp の計算

翼断面の空力特性から翼素運動量理論を用いてロータとしての特性を求めた結果が下図の通りである。グラフ上段は周速比 TSR、下段は翼ピッチ角と出力係数 Cp の関係を示す。



Cp=0.38@pitch=0 deg.

Cp=0.47@pitch=7 deg.

図 3．Qblade で求められたロータ回転数、ピッチ角と Cp の関係

（4）LLT（揚力線理論）による Wake 解析

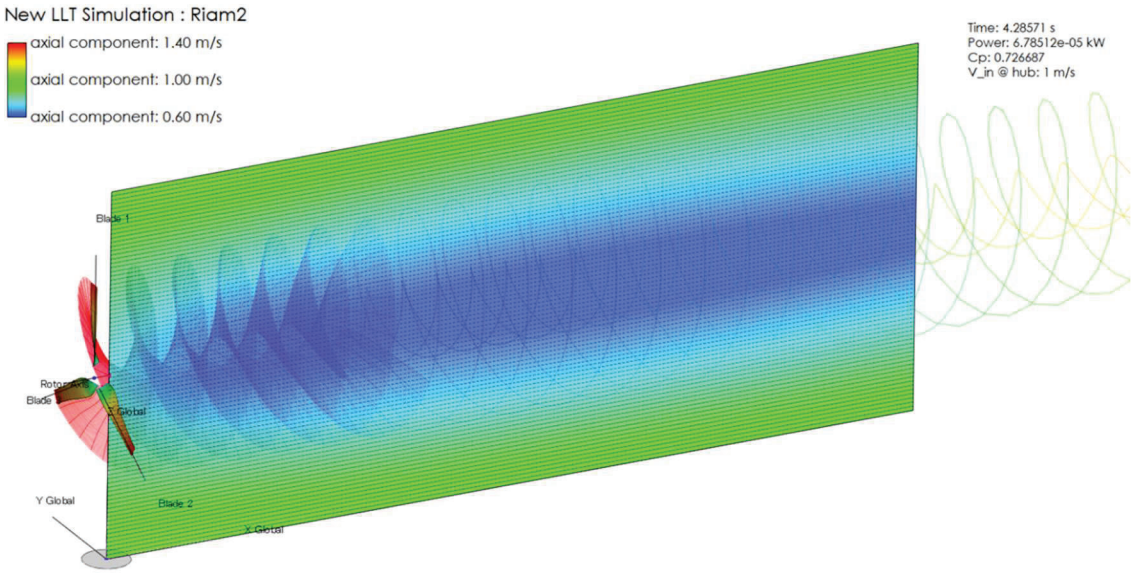


図 4. Qblade で求めた後流の軸流速分布（U_∞=1m/s、回転数 140rpm）

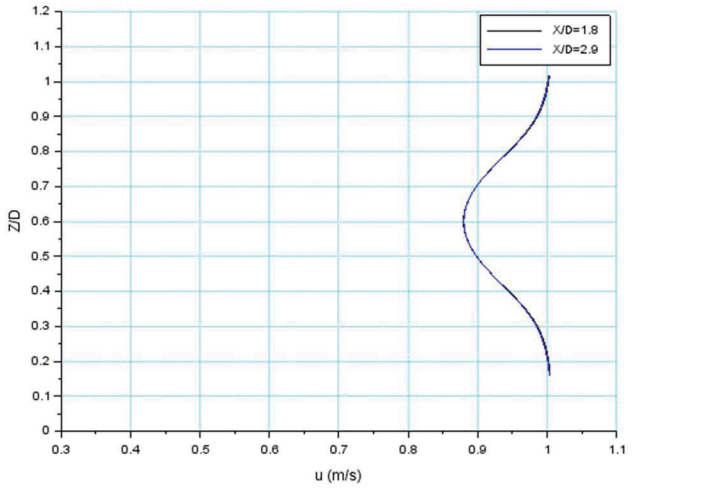


図 5. Qblade で求めた後流における軸流速分布（X=1.8D および 2.9D）

上記解析結果を見ると、当然ながら軸対称のローターの後流における流速分布も軸対称のガウシアン分布となり、中心における軸流速は 0.88 であり流下方向の速度回復も顕著でない。

一方で昨年度実施した風洞実験の結果を PIV 処理して求めた軸流速の分布を図 6 に示す。

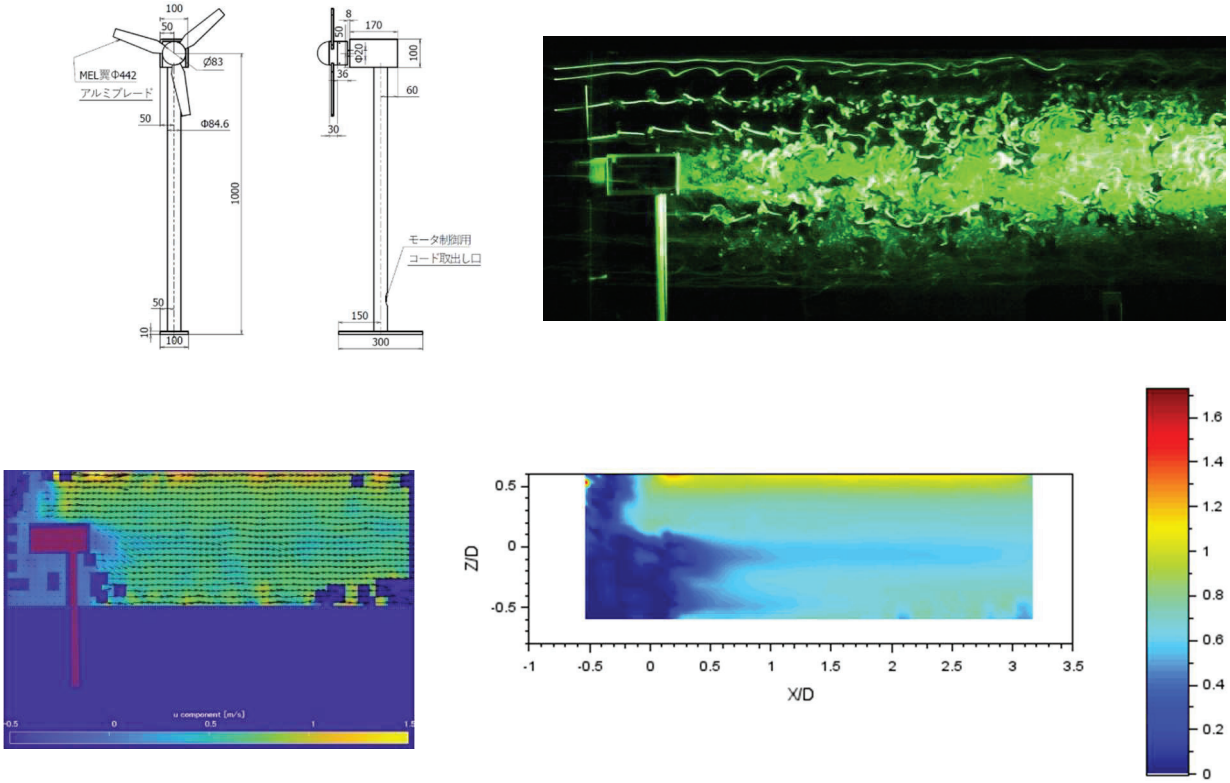


図 6. 風洞実験による可視化結果を PIV 処理した軸流速分布

この結果から X=1.8D および 2.9D の断面における時間平均の軸流速分布を求めた結果が下図であり、中心線よりも下方の流速が減少しており軸対称性が崩れている。また後流中心部分の流速は 0.6m/s を下回り、図 5 に示した最低流速 0.88m/s よりも下回る。

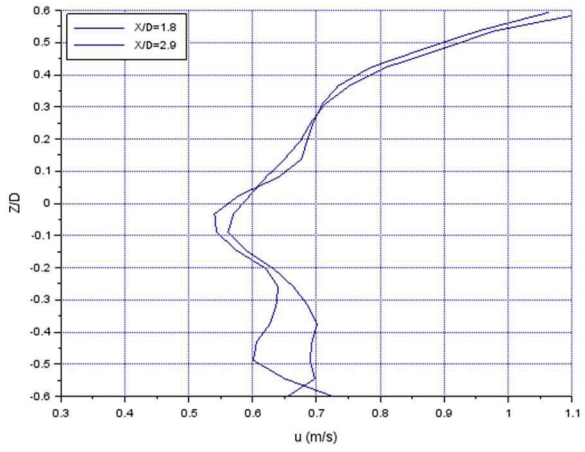


図 7. X=1.8D および 2.9D における軸流速の鉛直プロファイル

これらの原因を検討するために、Qblade においてタワーシャドーの影響を考慮した Wake 解析を実施した結果を図 8 に示す。なおタワーシャドーを考慮するために仮定した C_D=1.2、タワー直径：84.6mm である

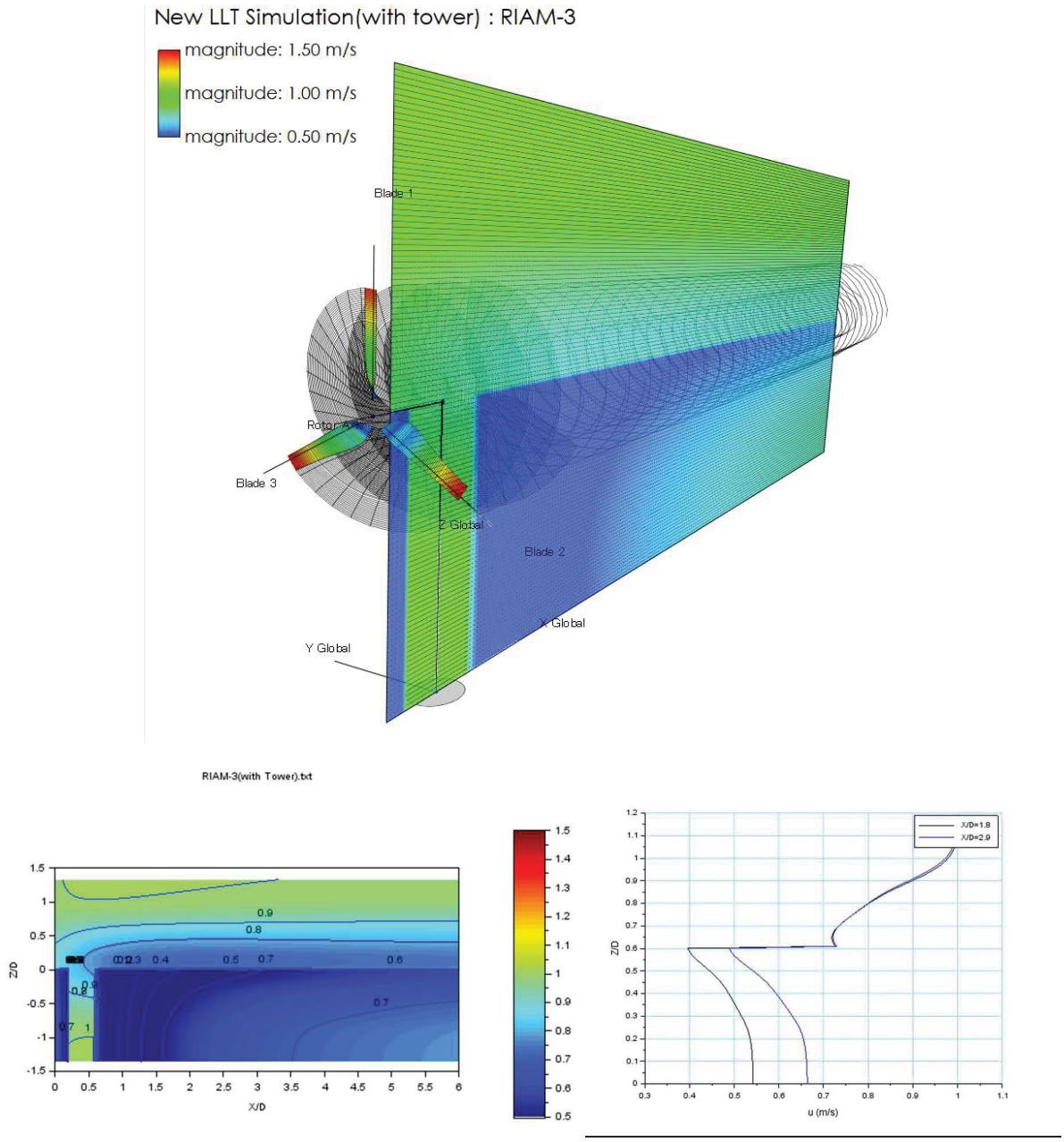


図８．X=1.8D および 2.9D における軸流速の分布および鉛直プロファイル（タワー考慮）

本図より、タワーシャドーの影響で後流中心線よりも下方での速度欠損が顕著であり、流下方向に速度が回復して、図７における実験での流速分布形状に近づくことが判る。

まとめおよび今後の課題

本年度得られた結果のまとめおよび課題を以下に示す。

① 風洞実験で得られた流速分布は、ローターの後流以外にタワーシャドーおよびナセルの影響を少なからず受けているものと考えられる。

② 上記の影響を回避するには、光源としてレーザーライトシートの面を鉛直から水平に回転させ、上方または下方から撮影する事でタワーシャドーの影響は回避できる。さらにラジコンヘリコプターのロータヘッド部分を改造し、長い回転軸を介して駆動するなどでナセルの空力的な影響を極力小さくすることが可能と考える。

今年度は COVID-19 の感染のために風洞実験を実施する事が出来ず、風洞模型の計画を実施するにとどまった。また風車後流に関しては別途小型風車を用いた降雪時における屋外での PIV を計画中である。

参考文献

1] http://www.q-blade.de/

成果報告

本研究を参考にした実機における後流観測に関して 1 件（風力エネルギー利用シンポジウム）

CFD と実験による抗力式垂直軸風車の流れの可視化

弘前大学・地域戦略研究所　　久保田　健

目的

我々の研究グループでは 8 枚直線翼で構成される垂直軸風車を用いた揚水/送気ポンプシステムを作製し、漁業の現場にて種苗生産や養殖のためのシステムとして実証試験を行っている。実証試験地は青森県津軽半島北部であって、冬場は季節風に由来する指向性が高く風速の大きな西風が吹く。その一方で、夏場はヤマセ由に由来する東風や地形に沿って流れる弱い南風の頻度も高く、概して夏場の風力エネルギーポテンシャルは低下する。前述する風力式システムを通年で利用する場合、季節によって変動する需要を考慮することは当然ながら、風の弱い夏場のシステム稼働率を高めてゆく必要があって、結論的には風車の性能向上としてパワー係数の増大や低風速始動性、実態に合わせたシステム規模の検討が稼働率の向上に資する。本報では風車形状の検討のため、CFD による数値解析と流れ場の可視化を主とした考察から性能予測を行った。

検討方法

CFD シミュレーションにはフリーソフトの OpenFOAM を用いた。風車回転時のモーメント係数（Cm）からパワー係数（Cp）やトルク係数（Ct）を導出するが、時間コストを鑑みて計算は 2 次元非定常解析とした。用いたソルバーは k-ω SST、代表風速は 7m/s、周速比（TSR:λ）は 0.1～0.6、クーラン数は 0.95、風車が 3 回転するに相当する時間を計算時間として最後の 1 周分の値を評価値とした。なお、商用コードである ANSYS-Fluent（2020R1）でも一部の仕様に限るものの、同条件について計算を行い、妥当性を確認している。

図 1 は本研究で検討する垂直軸風車の基本形であって、翼コード長は直径の 1/4、回転中心から翼外端までの直線と直線翼とのなす角度（α_1）は 35deg である。実験ではスパン長 742mm とし、上下面天板の有無についても風洞試験で確認しており、アスペクト比が 0.74 と小さいこともあり、天板の存在、つまり上下面翼端損失の程度に深く関係し、風車の空力性能に大きな影響を及ぼす（図 2）。シミュレーションは 2 次元で実施しているため、アスペクト比は∞に相当することから、天板ありのデータに近い結果が得られるとの予想される一方で、2 次元計算固有の問題である渦の取り扱いが影響し、結果が過剰に評価される点には注意が必要である。形状の再設定については、図 3 に示すように基本コード長、、折れ曲がりコード長、コード間のなす角としてパラメータ化し、OpenFOAM に組み込んだ Python によるベイズ最適化手法によって擬定常解析を行い、良好な結果として返された仕様について非定常解析を行うことで空力性能を計算した。

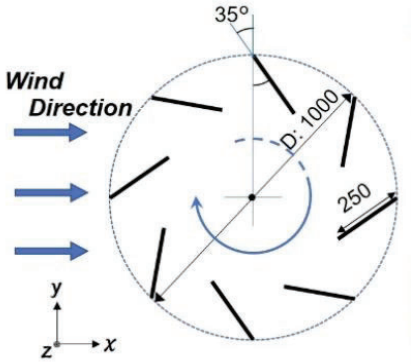


図 1 垂直軸風車（8 枚翼）の基本形状の断面図と各部位の仕様.

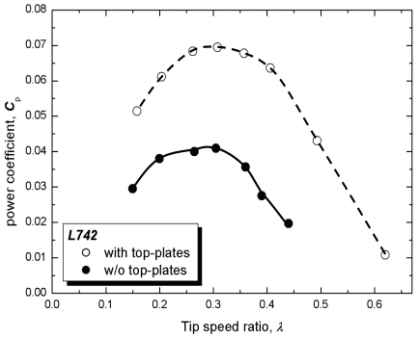


図 2 翼直線状態での風車天板のパワー係数曲線に及ぼす影響.

結果と考察

図 4 には基本形状（W250）の風車の、図 5 には改良型形状（Alter－Tyep1）の（a）流れ場と（b）渦度をそれぞれ示す。なお、設定したλは Cp 最大となる 0.3 であって、3 回転終了時のアニメーションに相当する。また、図 5 に示す翼型は内側で中央に折れ曲がっており、α_1: 53deg、L_1: 187mm、L_2: 87m、L_2: 141deg である。図から 8 時~11 時角の速度場においては、正回転方向の力が強い様子が見てとれる。また、3 時~6 時角にある翼の内端付近の気流に明瞭な差異が見られ、流体の引きずり量が少ない。結

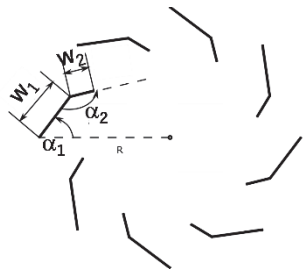


図 3 改良型風車の形状定義.

果、あくまでも計算結果ではあるが、算出される時間平均 Cm は、基本翼型で 0.258（Cp: 0.104 に相当）、改良型で 0.308 となり、Cp に置き換えればそれぞれ 0.104、0.124 となる。ここで、改良型については翼型を大きく変更しているため、Cp 最大を与えるλが 0.4 付近ではないことも予想されたが同程度であった。

図 6 は W250 と Alter-Type1 における Cm のλ依存性を示す計算結果である。なお、ここで示す Cm はトルク係数 Ct と等価と考えてよい。ここから、計算した TSR 全域において改良型翼型の回転力が大きいことが見てとれ、かつ低λであるほど数値比は漸増することがわかり、このことは風車としての始動性が良くなることを示唆している。

今回の結果について、図 3 に示すような基本翼型の CFD 結果は、数値の乖離が 30%程度存在する。これは主に 2 次元計算であることに起因すると考えるが、定性的な事象として捉えるならば、基本翼型に対して改良翼型は 20%程度の空力性能の向上を予測した結果となる。抗力型の垂直軸風車における既往研究では、直線翼よりも円弧やカップ形状の翼型で空力性能が高いことは知られており、図 1 を用いて端的に例示すれば、順回転力の得られる 10 時~12 時角で凹面、反回転力の作用する 7 時～9 時角で凸面となり、その際の抗力係数が前者で大、後者で小とする工夫の結果として性能を向上させている。今回の場合、大きく見れば翼型の円弧化による性能向上との考え方を排除できるものではないが、翼の内側端部を中心方向に僅かに折り曲げることで、流れの上流と下流の 2 領域で気流の制御が行われ、回転力が高められていると考えられる。これを精査・確認するためには、より精度の高い CFD 解析はもちろん、実験が必要であって、シミュレーション施行数を増やすとともに、実験に向けて研究を進めていく所存である。

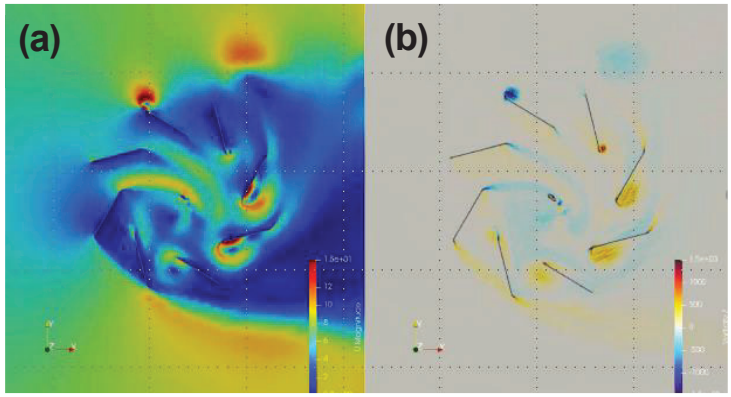


図 4 直線 8 枚翼風車の CFD 解析結果、(a)速度場、(b)渦度.

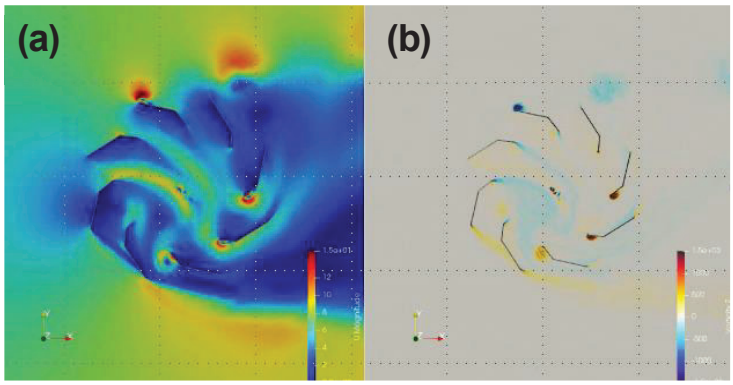


図 5 改良 8 枚翼風車の CFD 解析結果、(a)速度場、(b)渦度.

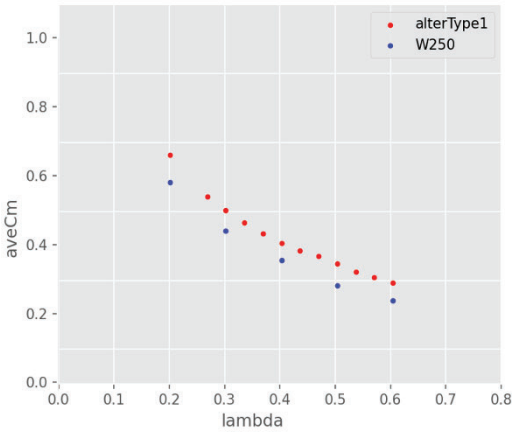


図 6 W250 と Alter-Tyep1 における Cm-λ曲線.

まとめ

今年度実施した抗力型垂直軸風車の流れ場の可視化に関する検討においては、数値流体解析を軸とし、過去の実験データを参照しつつ、より空力性能の高い風車の探索とその風車の流れ場について調査した。本報は暫定結果ながら、基本形状仕様からの僅かなデザイン変更でも流れ場は明瞭に変化し、空力性能を 20%程度向上できる可能性を見出した。

謝辞

本実験の遂行に際し、弘前大学名誉教授の南條宏肇氏、ならびに弘前大学技術職員の葛西 昭治氏にはデータ解析と討論において格別の支援を賜りました。また、関連する風洞実験を実施するに際して、九州大学応用力学研究所技術職員の松島 啓二氏、高田 青氏にご指南とご協力を、弘前大学大学院理工学研究科の志田崇氏に手厚いサポートを賜りました。この場を借りて感謝申し上げます。

機械式過回転抑制機構による低コストバタフライ風車の開発研究

鳥取大学　工学部　機械物理系学科　　原　豊

1. はじめに

本研究グループでは，新規に考案した可動アーム式過回転抑制機構を備えた直径 14 m バタフライ風車の開発を目指している．今年度は 7 m 直径のプロトタイプ機の設計開発を行い，年度内(3 月)の設置の予定である．さらに垂直軸風車用空力弾性解析システムの改良研究を進めるとともに，模型風車による可動アーム式過回転抑制機構の動作確認と特性調査を行った．本稿では，模型実験による研究結果を報告する．

2. 実験装置

図 1 に可動アーム式過回転抑制機構の模式図を示す．この機構はバタフライ風車の水平アームの一部に取付けられ，可動アーム(Movable arm : MA)および，その下に設けられた補助翼(Aileron)に作用する空気力と遠心力のバランスで動作する．動力やバネなどが不要で可動アームの回転軸を軸受で支えるだけの簡単構造であるため，耐久性に優れる．図 2 は，3D プリンターで製作した直径 300 mm，高さ 300 mm のバタフライ風車の模型であり，三角状のループ翼 3 枚からなる．水平アームの一部が可動アーム(長さ 60 mm)となっており，その下に補助翼(長さ 65 mm)が付いている．主翼・アーム・補助翼の全てが NACA 0018 の翼型断面を持ち，その翼弦長は $c = 60$ mm である．この模型風車を図 3 に示す実験装置に設置し，トルク検出器および誘導モータに接続した．小形風洞から一定の風速(5～16 m/s)を発生させ，吹出口(300 mm×300 mm)から 780 mm の位置にある模型風車を一定回転数(20 ～ 400 rpm)で回転させてトルクを計測した．風速は風洞吹出口に設置したピトー管で計測した．

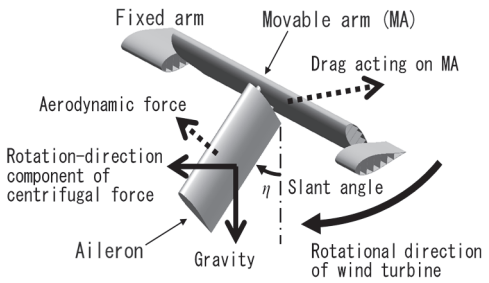


図 1　可動アーム式過回転抑制機構

図 2　模型風車

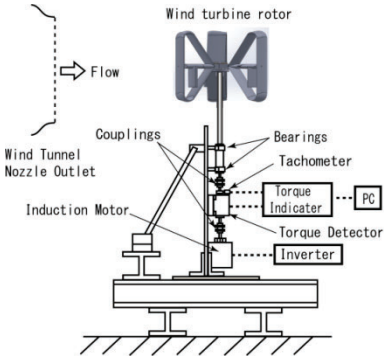


図 3　　実験装置

3. 主な結果

図 4 に，風速 V_∞が 5, 10, 15 m/s で可動アームを固定した場合のトルク特性を示す．$V_\infty = 5$ m/s では毎分回転数 N が約 300 rpm になるとトルクがマイナスとなる．$V_\infty = 10$ m/s あるいは 15 m/s では，計測の範囲において，回転数増加に伴いトルクは増加傾向にある．図 5 は可動アームの動きを許容した場合のトルク特性であり，風速は 5 m/s から 16 m/s までの 1 m/s 間隔で計測したトルクを色分けして示している．可動アームと補助翼が可動状態の場合，例えば $V_\infty = 5$ m/s では，回転数 N が約 240 rpm になるとトルクがマイナスになり，固定の場合よりも最大回転数が小さくなることがわかる．これより，本可動アーム式過回転抑制機構は，風速が低い場合には遠心力の作用によって空力ブレーキとして動作することが示されたといえる．一方，図 5 に示す $V_\infty = 16$ m/s の場合には，$N = 120$ rpm を超えるとトルクが急減し，$N = 190$ rpm 辺りでマイナスになっている．このことから風速が高い場

合には，本可動アーム式過回転抑制機構は遠心力ではなく，空気力が主に働いて傾斜をし，空力ブレーキとして動作したと考えられる．本稿では詳細を示さないが，補助翼を錘に換えた場合でも同様の特性が確認できるが，錘タイプに比べ，補助翼タイプは揚力も働くため，起動性と最大出力の増加も期待できる．

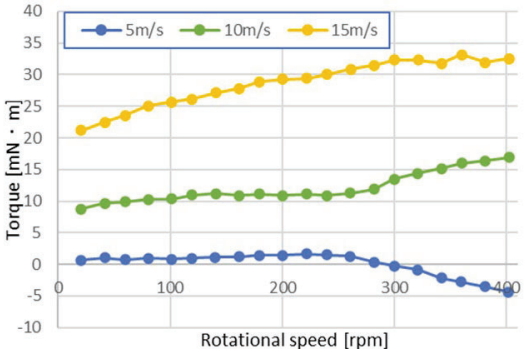


図 4　可動アームを固定した場合のトルク特性

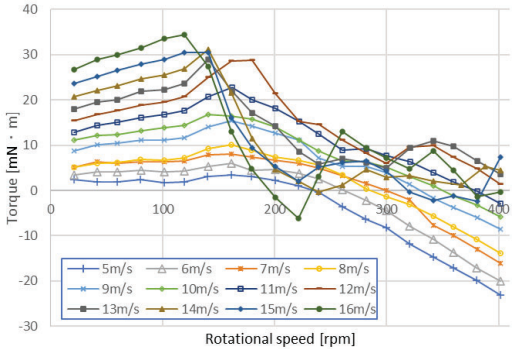


図 5　可動アームを固定しない場合のトルク特性

【研究成果報告】

(1) 安道緋呂, 原豊, 吉田茂雄, 吉田悠人, 神野直也, 垂直軸風車における翼取付位置の影響に関する CFD 解析, 日本機械学会第 99 期流体工学部門講演会, OS09-05, 2021.11.8, オンライン開催, 弘前大学.

(2) 宮下礼人, 原豊, 吉田茂雄, 住隆博, 秋元博路, バタフライ風車と直線翼垂直軸風車の後流に関する数値的研究, 日本機械学会第 99 期流体工学部門講演会, OS09-08, 2021.11.8, オンライン開催, 弘前大学.

(3) 原豊, 吉位真公, 澤田周吾, 吉田茂雄, 斎藤栄徳, 可動アーム式過回転抑制機構を備えたバタフライ風車の特性予測, 第 28 回日本流体力学会中四国･九州支部講演会, 2021.11.27, オンライン開催, 鳥取大学.

(4) 宮下礼人, 原豊, 吉田茂雄, 直線翼垂直軸風車の翼とアームの接続部に関する数値流体力学解析, 日本機械学会中国四国支部第 60 期総会・講演会, 06a1, 2022.3.4, オンライン開催, 高知工科大学　　.

(5) 吉位真公, 原豊, 澤田周吾, 吉田茂雄, 斎藤栄徳, 可動アーム式過回転抑制機構を備えたバタフライ風車の 3D プリンターモデルによる実験, 日本機械学会中国四国学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会, 07d3, 2022.3.3, オンライン開催, 高知工科大学.

(6) 吉田悠人, 原豊, 安道緋呂, 大島萌人, 神野直也, 吉田茂雄, 二次流れを考慮した翼素運動量理論に基づく垂直軸風車の空力解析, 日本機械学会中国四国学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会, 07a5, 2022.3.3, オンライン開催, 高知工科大学.

(7) 神野直也, 原豊, 安道緋呂, 大島萌人, 吉田悠人, 吉田茂雄, 直線翼垂直軸風車の空力弾性解析のための弾性変形要素を用いたマルチボディモデルの開発,日本機械学会中国四国学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会, 07b1, 2022.3.3, オンライン開催, 高知工科大学.

【研究組織】

原　豊	代表者	鳥取大学	教授
田川公太朗	協力者	鳥取大学	准教授
小野勇一	協力者	鳥取大学	教授
吉田茂雄	所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授

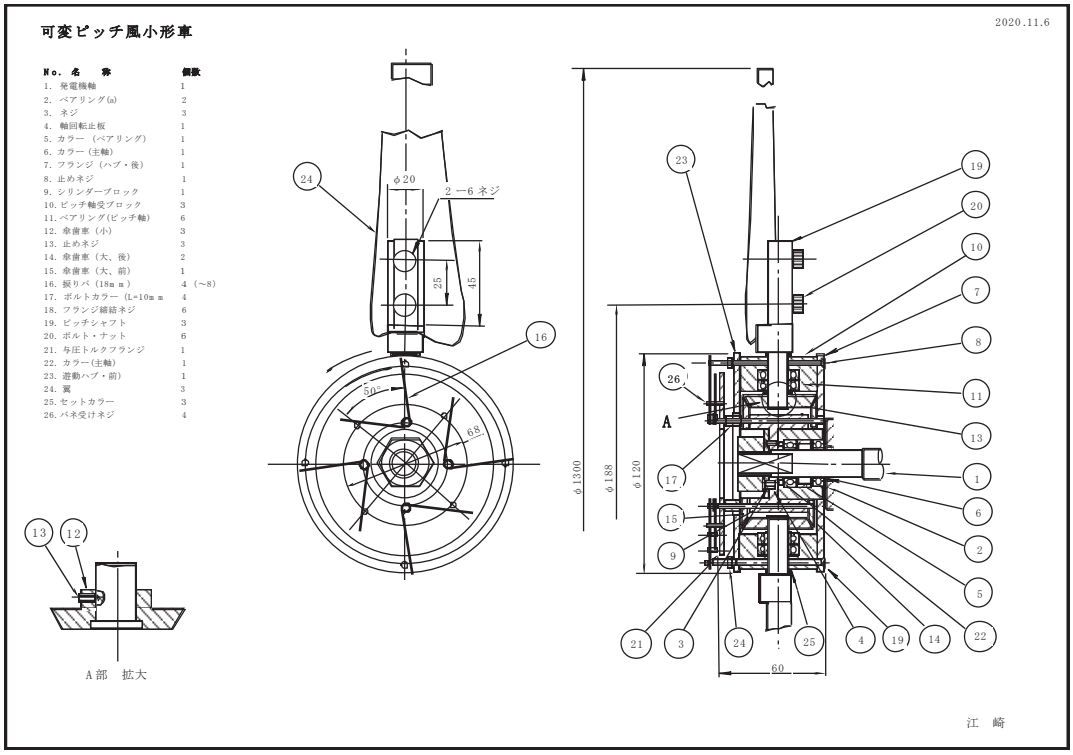


Fig. 1 （a）組立図

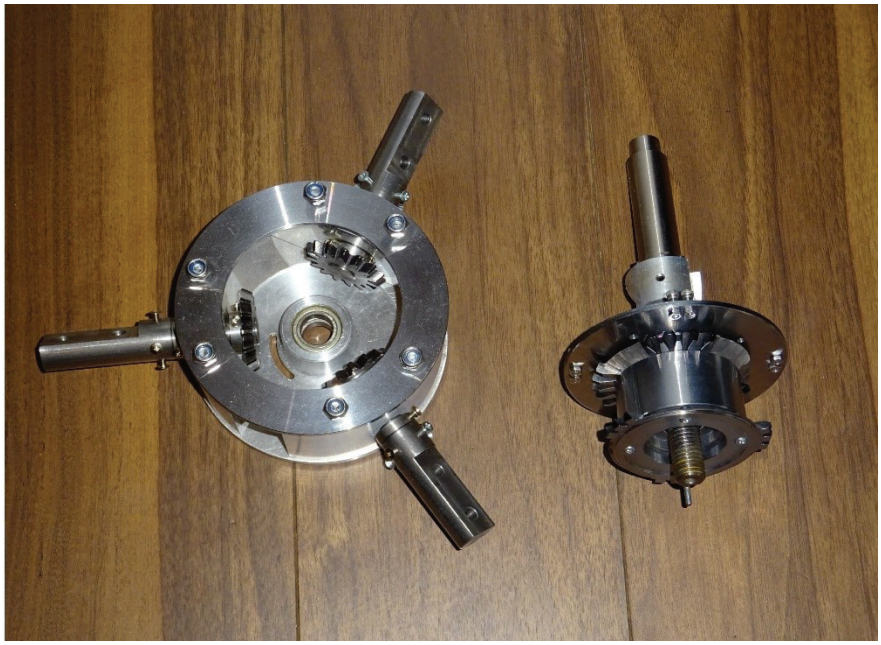


Fig. 1 （b）製品図

微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究

大分大学　理工学部　西垣　肇

目的

海水の運動や物理的性質，物質循環などの海洋現象についての知見は，近年飛躍的に増えている。これは主に観測技術，計算機技術，数値計算技術の発展によるものである。特に，海洋プラスチックや植物プランクトンなどの物質循環については，力学モデルの活用により，その把握が急速に進みつつある。しかし，海洋現象についての力学理論の進歩はその知見の増大に追いついていない。微細現象から惑星規模に至る海洋現象は，それぞれが独立の過程に見えながら相互に干渉する場合も多い。したがって，多角的かつ包括的な海洋力学理論の再構築が必要である。

このような大目標に近づくため，力学理論のみならず観測，データ解析，数値モデル，データ同化，物質循環など，さまざまな課題に携わっている研究者が集まり，集中的に海洋力学過程および関連する諸課題について議論を深める場を提供した。ここでは，学会大会のような多人数・短時間の研究発表ではなく，適正な人数で十分に時間を取り，ブレーンストーミングを経て涵養されていく多角的・包括的な情報交換と議論の深化が行われた。

研究集会の概要

2021 年 11 月 25 日～27 日に研究集会を開いた。限られた時間内で行われる学会大会の発表と異なり，特に議論の時間を十分に取った。会の開催形態については，新型コロナウイルスへの対応も考慮し，研究所内でハイブリッド方式で行った。これは，対面方式を推奨しながら電子会議によるオンライン参加も受け入れるものである。

研究集会のプログラムは，図 1 のとおりである。ただし，ブレーンストーミング的な議論の時間をとったため，時間は全体的に図 1 に示すよりも後ろ倒しになった。参加者の一覧は，表 1 のとおりである。人数は，オンライン参加者，部分参加者を含めて 21 人だった。

各講演の概要

各講演の概要を発表順に述べる。

三浦は，海洋前線と海上風との間の大気海洋相互作用に着目し，大気海洋結合モデルを用いて理想化数値実験を行った。メソスケールの海洋前線波動の寄与を調べるため，海面フラックスにメソスケールの空間変化を含むケースと含まないケースからなるケーススタディを行った。その結果，海洋前線の蛇行が大気海洋相互作用を通して海洋の鉛直循環を強化する，とのことが示唆された。

田旗は，気候が温暖だった古第三紀始新世（5600 万年～3400 万年前）における海洋熱塩循環を，全球海洋モデルを用いて数値実験的に検討した。この時期に起こったオーストラリア大陸南のタスマン海門の開通に注目し，それに伴う海洋循環の変化を調べた。その結果，海門開通の年代を 3100 万年前とするのが，古気候データと最も整合することが示された。

九州大学応用力学研究所共同利用研究

「微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究集会

日程：2021 年 11 月 25 日（木）～27 日（土）

場所：九州大学応用力学研究所（筑紫キャンパス）西棟 5 階 W501 セミナー室

オンライン参加の方には別途電子会議室のお知らせをします

11 月 25 日

14:30	開会
14:40-15:40	三浦康幹（京大理） 前線の蛇行に伴う SST-風の相互作用と鉛直循環
15:50-16:50	田旗栄太（京大理） 古第三紀始新世における海洋熱塩循環場変化の力学的機構について
17:00-18:00	水田元太（北大地球環境） ジェット中の渦間相互作用と渦位輸送

11 月 26 日

9:30-10:30	松田拓朗（東大）（※オンライン） 南極周極流における渦・平均流相互作用の空間非一様性
10:40-11:40	Tianran LIU, Naoki HIROSE (RIAM, Kyushu Univ) High-resolution modeling of ocean energy southwest of Japan
13:30-14:30	今村春香（京大理）（※オンライン） 砕波しない波による乱れについての波解像数値実験と水槽実験
14:40-15:40	蓮沼啓一（海洋総合研究所） 津軽海峡に見られる Mf 周期流とその発生機構
15:50-16:30*	西垣肇（大分大） 台風に伴う近慣性周期変動による内湾への下層海水の進入
16:40-17:40	大貫陽平 (ENS de Lyon, Laboratoire de Physique) （※オンライン） Ageostrophic anticyclonic instability によって励起される重力波の砕波シミュレーション

11 月 27 日

9:30-10:30	中野英之（気象研）（※オンライン） 二層準地衡流モデルにおける東西 jet の南北遷移
10:40-11:40	磯辺篤彦（九大応力研） マイクロプラスチックの観測とモデリングの現在
11:40-	総合討論

発表時間は質疑を含めて 60 分，*印のものは 40 分です。時間は当日ずれ込むことがあります。

代表者：西垣肇（大分大）

所内世話人：磯辺篤彦（九大応力研）

図 1　研究集会のプログラム

氏名	所属	職名
磯辺　篤彦	九大応力研	教授
Tianran LIU	九大応力研	ﾃｸﾆｶﾙｽﾀｯﾌ
西垣　肇	大分大理工	准教授
水田　元太	北大地球環境	助教
蓮沼　啓一	海洋総合研究所	代表取締役
三浦　康幹	京大理	学生 (M1)
田旗　栄太*	京大理	学生 (M2)
松田　拓朗*	東大理	学生 (D3)
今村　春香*	京大理	学生 (M2)
大貫　陽平*	ENS de Lyon	訪問研究員
中野　英之*	気象研	主任研究官

氏名	所属	職名
吉武　珠穂	九大総理工	学生 (D1)
広瀬　直毅	九大応力研	教授
辻　英一	九大応力研	助教
吉川　裕*	京大理	准教授
牛島　悠介*	気象業務支援ｾﾝﾀｰ	研究員
西野　圭佑*	電中研	研究員
尾形　友道*	JAMSTEC	研究員
藤原　泰*	東大大気海洋研	研究員
豊田　隆寛*	気象研	主任研究官
木田　新一郎*	九大応力研	准教授

表 1　参加者。*はオンラインでの参加者。

水田は，亜熱帯西岸境界流続流ジェットの南北にみられる再循環に注目し，その再循環の形成・維持過程の解明を目指して研究を進めている。その一環として，この海域にみられる中規模渦による渦間相互作用と渦位輸送について，理想化数値実験を用いて調べた。その結果，渦どうしの非線形強制によって渦位勾配を下る渦位輸送が生じることが示された。

松田（まつた）は，南極周極流における渦・平均流相互作用を数値モデルで調べた。その際，南極周極流の東西非一様性に注目し，新たな視点から力学過程を検討した。その結果，傾圧エネルギー変換と渦エネルギーの消失が，東西一様的でなく，ドレーク海峡などのホットスポットに集中して発生していることが示された。

Liu は，高解像度海洋モデルを使って，海洋の再生可能エネルギーの利用について検討した。黒潮における海流発電の場所として，足摺岬付近が適していることを示した。海洋水温差発電に関して，海洋循環による水温差の形成・維持機構を調べ，エネルギーの利用可能量を見積もった。また，データ同化モデルについて，海面高度データおよび各層水温データの有効性について検討した。

今村は，海面の波による乱流混合について，波解像数値実験と水槽実験を用いて調べた。砕波しない波単独での鉛直混合が生じるのかどうかに注目した。数値モデルにおいて，風成シア流がなくても波による鉛直混合がおこることが確認された。応力研の実験水槽を用いた実験において，水面近くの水温が鉛直一様化し，鉛直混合が示唆された。

蓮沼は，津軽海峡にみられる Mf 周期流（周期約 2 週間）に注目し，近辺での潮位データに調和解析を行った。その結果，各測点にこの周期帯でのスペクトルのピークがみられた。スペクトルの相関性には，比較的高い連動性がみられた。ただし，北海道東部と他の海域とでは相関性が比較的低く，親潮の影響が示唆された。

西垣は，台風が内湾と陸棚域との海水交換に与える影響を，数値実験で調べた。数値モデルにおいて，三陸海岸の大槌湾で観測された水温変動の特徴が再現された。検討の結果，台風が外洋に慣性振動流を引き起こし，それが大槌湾に大きな水温変動をもたらすことが示された。この現象を，比較的簡単な解析的モデルで表現できることが示唆された。

大貫は，サブメソスケールの内部重力波を念頭に，楕円型渦の基本場の安定性を，数値モデルで調べ

た。モデルでは，時間と共に変形する座標系を用いた。その結果，ageostrophic anticyclonic instability (AAI) によって重力波が成長・砕波した。この過程において，変動のエネルギーが低波数側から高波数側に移動することが示された。

中野は，黒潮続流域における北太平洋東西ジェットについて，その挙動を 2 層準地衡の理想化数値実験を用い，ジェットに伴うフロントが世代交代を伴って南進するとの観点より検討した。パラメタスタディを行い，そのいくつかの特徴を抽出した。

磯辺は，海洋プラスチックごみに関する近年の研究を概観した。研究の動向に加え，海洋中の流動の数値モデル，海岸におけるプラスチックごみの調査，海洋プラスチックごみの採集とその分析，などが紹介された。

成果

寄せられた演題は，対象スケールの小さいものから順に，表層混合層過程（今村），沿岸・内部重力波・サブメソスケール（蓮沼，西垣，大貫），中規模運動（三浦，水田，松田，Liu，中野），大洋スケールの現象（田旗，磯辺）と広範にわたった。扱う現象は，海水循環，波動，混合過程に加えて近年活発に研究されている物質循環，物質輸送も含まれた。手法は，数値実験を軸とするものが多かったが，観測データ解析，解析的理論，水槽実験を含むものもあった。

開催の形態は，議論を深めやすい対面方式と，時間と距離の制約が少ないオンライン方式を併用するハイブリッド方式で行った。諸事情を考慮すると，落としどころとして適切だったと思われる。ただし，事情が許せば，宿泊研修施設での合宿方式を採用して，より綿密な議論と情報交換を図ることが考えられる。

講演者のうち三浦，田旗，今村，松田は大学院生で，大貫は 35 歳以下の若手である。その他の講演者・参加者は若手から高齢者まで幅広い年代にわたっている。本研究会は若手研究者に（若くない研究者にも）所属機関外の研究者と深い議論をする貴重な機会を提供することができた。

参加者に関して，ブレーンストーミング的な議論には，気心の知れた常連参加者が有利である。その一方，コミュニティの活性化と継続性の観点からは，若手参加者・新規参加者が含まれることが望ましい。主催者側が参加者を決められる訳ではないが，次の機会には多少考慮に入れたい。

本研究集会には，広範なスケール，多様な現象，多様な手法を扱う研究者が集まり，綿密な質疑を通して議論を深めることができた。各課題の研究の進展に寄与することと，規模間相互作用の力学理論の構築に寄与することを期待している。

2021 AO-S2

アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会

一般財団法人　電力中央研究所　環境科学研究所　板橋　秀一

研究集会の目的

応用力学研究所の大気環境モデリング研究グループは，世界的に見てアクテイブに研究を進めるグループの一つであり，モデル研究だけでなく，多波長のレーザーレーダーの導入による黄砂・大気汚染粒子の同時計測などの先進的な研究を推進している．福岡は，特にアジア起源の黄砂・大気汚染の影響が深刻な地域であり、数値モデルとさまざまな大気環境計測データを統合した解析や，データ同化による先端的な研究は，いまだ十分に明らかにされていないエアロゾルの物理化学特性に係る重要な科学的知見をもたらすとして，国内外から大きく期待されている．本研究集会では，そのような最前線の知見を，アジア域の化学輸送モデル研究のコミュニティで共有するとともに，各分野がリンクすることによる新たなブレークスルーを生む機会を設けることを目的としており，これは，アジア域の化学輸送モデル研究の推進やモデル精緻化にとって非常に重要である．

研究集会の概要および成果

新型コロナウイルス感染症のため，2022 年 3 月 3 日（木）午後～ 4 日（金）午前に zoom を利用したオンライン開催とした．研究集会には国内の化学輸送モデルを用いた研究者にとどまらず，大気環境研究に関わる幅広い専門家が集まり、計 13 題の発表が行われ，最大で 44 名が参加した．

研究集会では，「ドローンやゾンデを利用した大気上層の大気環境計測とモデルの連携」「将来の気候変動下の大気質変化」「データ同化・機械学習による大気環境研究」「モデル間相互比較実験」「排出量インベントリの動向」などの最新の成果が報告され，活発な議論が行われた．また，オンライン開催ということもあり，今までに開催してきた過去 4 回の研究集会に比べて，学生の参加人数も多く，地方環境研究所から初めて参加される自治体もあった．本研究集会が化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングのコミュニテイにおいて大きな貢献を果たしていくことが確認された．このような大気環境研究に係る研究者間の貴重な交流の場を設けるため，来年度も引き続き研究集会を開催したい．

以下に研究集会のプログラムを掲載する．

プログラム

3 日（木）午後

日時：2022 年 3 月 3 日（木）午後～ 4 日（金）午前
場所：Zoom オンライン
主催：九州大学応用力学研究所全国共同利用研究集会（2021 AO-S2）
共催：大気環境学会 九州支部会・大気環境学会 大気環境モデリング分科会

13:00 趣旨説明　弓本 桂也（九州大学応用力学研究所）

座長：櫻井 達也（明星大学）
13:10 板橋 秀一（電力中央研究所）
　　地表面より上層の化学輸送モデルの再現性はどうか？
13:35 早崎 将光（日本自動車研究所）
　　ドローンによる気温逆転層・大気汚染物質観測
14:00 櫻井 達也（明星大学）
　　夏季の関東を対象とした大気質モデルの再現性について
14:25 河野 なつ美（国立環境研究所）
　　WRF-CMAQ を用いた日本域における大気質の将来変化
14:50 栗林 正俊（長野県環境保全研究所）
　　陸域生態系モデルによるカラマツ人工林の炭素収支の気候変動応答

15:15–15:30 休憩

座長：菅田 誠治（国立環境研究所）
15:30 弓本 桂也（九州大学応用力学研究所）
　　エアロゾル衛星リトリーバルと同化予測の一体化
15:55 小田 祐一（静岡県環境衛生科学研究所）
　　機械学習手法を用いた光化学オキシダント当日濃度ランクの予測について
16:20 齊藤 正彦（愛媛大学農学部）
　　離散カルマンフィルター（DKF）を用いた関東域の CO 排出量の推定

16:45 菅田 誠治（国立環境研究所）
大気汚染シミュレーション支援システム APOLLO について

17:10–17:30 質疑等

4 日（金）午前

座長：森野 悠（国立環境研究所）
9:30 森野 悠（国立環境研究所）
モデル相互比較に基づく有機エアロゾルの発生源寄与解析
9:55 山地 一代（神戸大学）
都市域を対象としたモデル間相互比較結果のご紹介
10:20 森川 多津子（日本自動車研究所）
マップ調査の直接利用と大気モデルへの影響
10:45 黒川 純一（アジア大気汚染研究センター）
アジア域排出インベントリ REAS の更新状況及び関連する最近の動き

11:10–11:30 総合討論・議論・総括

共同利用研究集会

「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」

"Water Circulation and Chemical-Biological Processes in the Marginal Seas in the East Asian "

研究代表者　石坂丞二（名大宇宙地球環境研究所）

１．目的と開催経過

東アジア縁辺海の生物生産には，それらの海域の流動や混合による栄養塩の流入や供給が欠かせない．特に東シナ海からの日本海への海水・淡水・物質の流入は，日本海の生態系に大きな影響を与えていると考えられる．応用力学研究所では，東シナ海の陸棚域および黒潮域・日本海やその周辺海域の循環に関する研究を長年継続的に実施しており，国内外研究機関との共同研究も多方面から進めている．その研究内容は，名古屋大学や長崎大学，富山大学等で進めている生物・化学的な研究との関連も深く，様々な研究プロジェクトを通して，多くの分野を包含した研究者コミュニティも形成されてきている．研究成果の共通理解を更に深めるため，継続的に開催できる研究集会の場を持つことが今後の共同研究の進展に大きく寄与すると思われる．この数年は東シナ海に焦点を当てた研究集会を行ってきたが，2019 年度からは東シナ海と日本海・黒潮域を含めた東アジア縁辺海での，流動や混合などの物理環境と，生物化学過程との関係を明らかにする研究集会を開催していくこととした．今年度は，午前中は来年度以降の申請について、および東アジア縁辺海での研究に利用させてもらっている長崎大学の長崎丸との関係ついて議論し、午後に研究発表を行った。

出席者は現地参加とリモート参加を合わせて 27 名あり，内訳は名古屋大学１名，長崎大学 6 名，愛媛大学 3 名，富山大学２名，東京大学１名，京都大学１名、海洋研究開発機構１名、JFE アドバンテック 2 名、および九州大学 10 名であった．

2. 研究集会の概要

研究集会は，2021 年12月10日(九州大学応用力学研究所の会場およびオンラインで行った．午前中は、次年度から申請代表が交代することを前提に、本研究集会の経緯を確認した上で、今後の方向性に関して議論を行った。特に、今後も長崎大学の練習船長崎丸を利用した研究を中心に扱うことで、長崎丸のオフィサーにも参加してもらう可能性についても議論を行った。

午後には，研究発表を行った。まず東京大学大気海洋研究所の堤が、「トカラ海峡における乱流混合の観測と数値モデリング」を発表した。鹿児島丸を利用したトカラ海峡での 11 月の乱流観測と、その状態のシミュレーションについて紹介した。半日周期の内部潮汐の下げ潮時に、200－300m で乱流が強くなり、それが下流に移動するとともに上昇していくことが示された。

次に JAMSTEC の美山が、「福徳岡ノ場からの軽石漂流シミュレーション」について発表した。今年 8 月に小笠原近傍の海底火山の噴火によって多くの軽石が形成され、それをシミュレーションした結果、10 月中旬には沖縄に漂着することが示され、報道も多く行われた。これは吹送流を含む海流によって駆動された結果であった。この他に海上に出ている部分への風の影響である windage と、風波による stokes drift の効果も考慮する必要があるとされる。比較的濃い濃度の軽石は JAXA の衛星データによって観測されているため、現在はこの軽石の漂流予測を行っており、11 月後半には伊豆近辺でも船舶観

測と一致している。ただ、すでに多くは衛星でも観測が困難であり、検証が難しくなっている。

愛媛大学の郭は、「Contribution of nutrients from Changjiang and Kuroshio to the export production from the East China Sea」を発表した。東シナ海の生態系モデルによって、黒潮、長江、大気、台湾海峡それぞれからの、窒素の Export Production を計算した。それによると、黒潮から流入する無機窒素の 70%以上が対馬方面に無機窒素として流出するが、25%程度が粒状有機物として流出している。一方、長江からの無機窒素は黒潮の 10%程度でしかないが、その 80%近くが大陸棚上で回帰しており、25%程度が対馬方面に無機窒素として、15%程度が粒状無機窒素として、25%程度が堆積しているという結果であった。

長崎大学の佐藤は、「東シナ海大陸棚・大陸斜面上における溶存鉄と有機鉄配位子の分布」を発表した。この研究では、長江希釈水の影響がみられる夏季の東シナ海大陸斜面において溶存鉄濃度およびその化学的形態を明らかにした。長江希釈水の影響を受けた低塩分・高クロロフィル水塊において強い配位子が高濃度で見られた。強い配位子に腐植様物質が占める割合は大きくなく、その寄与が高まると条件安定度が低下する可能性があった。底層の貧酸素水塊では再生により生じた高濃度の溶存鉄に加え、有機物分解により生じたと考えられる弱い配位子が、溶存鉄の増加を上回る量存在していた。黒潮支流の鉄輸送において、底層の水との相互作用の方が表層の水より鉄の濃度および化学形態に強く影響する可能性が示唆された。

名古屋大学の石坂は、「東シナ海の植物プランクトン群集把握」を発表した。長崎丸の済州島南での 4 年間の 7 月観測時の表層水の HPLC 分析結果では、黒潮側はどの年も原始緑藻を含んだ藍藻が多いのに対して、長江希釈水では 2009 年と 2013 年が藍藻類を含んだ比較的小型の藻類、2010 年と 2011 年は珪藻類が優占していた。2010 年と 2011 年のリン酸塩の濃度が高いことから、これらの年は沿岸湧昇で長江希釈水にリン酸塩が供給された考察した。また、多波長励起蛍光光度計データを HPLC データで校正することで、詳細な鉛直分布を明らかにした。また、これまで有明海で開発した手法を基に、衛星データで長江沖や 2021 年秋の北海道の赤潮について群集判別を試みている。

富山大学の Deng が「Water origins of oxygen-depleted bottom waters on the outer shelf and material transport from the East China Sea to the Kuroshio area」を発表した。東シナ海では低塩分水が観測され、最近はその面積が広がっている。2018-2020 年に大陸棚斜面外側で重希土類元素を測定した。貧酸素水塊は主に黒潮亜表層水であったが、間隙水の貢献も有意であった。溶存無機窒素・リンへの、粒子の無機化によると考えられる間隙水からの供給も大きかった。

最後に、九州大学の千手が、「日本海の Argo フロートと上部固有水の温暖化について」発表した。2001 年から 2019 年の日本海の Argo フロートデータを集め、1964-1985 年のデータと比較した。上部固有水の水温変動を調べたところ、固有水形成域のみならず、日本海全域で昇温傾向が確認され、日本海南部で速度が速く、昇温は特に 1990 年以降に顕著だった。

九州大学応用力学研究所研究集会

「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」

場所：九州大学応用力学研究所 3 階（301 号室） & オンラインのハイブリッド
日時：2021 年 12 月 10 日（金）10：00～17：30

10：00～10：05
・開会・挨拶および開催趣旨説明

10:05-11:30
・長崎丸計画と今後の研究集会についての議論・遠藤貴洋

13:00-15：00
・トカラ海峡における乱流混合の観測と数値モデリング：堤　英輔
・福徳岡ノ場からの軽石漂流シミュレーション：美山　透（オンライン）
・Contribution of nutrients from Changjiangand Kuroshio to the export production from the East China Sea ：
Guo Xinyu, Zhang Jing, Zhao Liang （現地）
・東シナ海大陸棚・大陸斜面上における溶存鉄と有機鉄配位子の分布：
佐藤光秀・涌田陽平・武田重信（長崎大院水産・環境）（オンライン）

15:20-16:50
・東シナ海の植物プランクトン群集把握：石坂丞二（現地）
・Water origins of oxygen-depleted bottom waters on the outer shelf and material transport from the East China Sea to the Kuroshio area：
Wenjie Deng, Jing Zhang, Siteng Zhu, Keiji Horikawa, Saki Katazakai, Takahiro Endoh, Yoshiko Kondo and Takeshi Matsuno（現地）
・日本海の Argo フロートと上部固有水の温暖化について：千手智晴,塩田幸平（現地）

総合討論（16:50-17:30）
閉会

発表論文

Senjyu, T., 2022. Changes in mid-depth water mass ventilation in the Japan Sea deduced from long-term spatiotemporal variations of warming trends. Front. Mar, Sci. 8:766042. doi:10.3389.fmars.2021.766042.

Xu, Q., S. Wang, C. Sukigara, J. I. Goes, H. do R. Gomes, T. Matsuno, Y. Xu, J. Luang-on, Y. Watanabe, S. Yoo, J. Ishizaka, 2022. High-Resolution Vertical Observations of Phytoplankton Groups Derived From an in-situ Fluorometer in the East China Sea and Tsushima Strait. Front. Mar, Sci. 8: 756180. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.756180.

Ishizaka, J., G. Kim, J.H. Lee, S.M. Liu, F. Yu, J. Zhang (Eds.) (2021) PICES Sci. Rep. 62, Oceanography of the Yellow Sea and East China Sea. Sidney, BC, Canada: North Pacific Marine Science Organization (PICES). https://meetings.pices.int/publications/scientific-reports/Report62/Rpt62.pdf (Sept. 2021)

日本周辺海域における環境急変現象（急潮）のメカニズム解明および防災に関する研究集会

京都府農林水産技術センター海洋センター　森川 晃行

1．目的

急潮等の海洋環境急変現象による漁業被害は，日本沿岸の地域経済に大きな打撃を与える．急潮発生等の比較的時空間スケールの小さな海洋環境場の予測に対する社会的なニーズは高い．海洋環境場の予測には，大気・海洋のモニタリングデータの解析およびモデリング等が不可欠である．地先での大気・海洋データのモニタリングおよび急潮予報の発出・漁業現場対応は，各府県の水産試験研究機関が独自に実施しているが，それらのデータや情報を共有する場がなく，海洋環境場の予測の精度向上や急潮の防災につながりにくい．本研究集会では，地先での観測データや漁業現場で発生した環境急変現象について，モニタリング・急潮予報業務等を実務とする水産試験研究機関の担当者同士や海洋物理学的な研究を継続してきた研究者，海洋観測機器メーカーおよび漁網会社や漁具等の専門家を交えて議論することで，漁業現場に求められる情報の創出や未解明の物理現象に対する研究の萌芽に努める．

2．研究集会の概要

日時：令和 3 年 11 月 5 日（金）

場所：①WEB 会議（ZOOM 開催　参加希望者に直接 URL を送付予定）
②九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 301 号室

概要：当初は現地で 2 日間の開催予定であったが，新型コロナウイルス蔓延防止の観点から，WEB 会場と現地会場を併設し，1 日間のみの開催とした。前半の部では、各府県担当者の悩み相談会として，急潮防災および海洋観測について 3 つのテーマを設定し情報交換と議論を実施した．後半の部では研究発表として，発表 15 分質疑 10 分の 1 題あたり 25 分で，4 題の発表を実施した。

3．研究成果

研究集会には，新型コロナウイルスの影響を鑑みて広く告知していないにも関わらず，都道府県担当者，研究者，漁網会社，観測機器メーカーなど，多様な立場から 30 名が参加した．（参加者の詳細については別添参照）

前半の部では、各府県が行う急潮の予測及びそれに伴い生じている課題を発表し、参加者から意見や解決方法の提案が出され、各府県間で情報共有を行い、急潮の対策を進めることとなった。また、漁網会社からは定置網の防災に関する取組の紹介があり、シミュレーション結果により定置網の海中での動きを知ることができた。最後に、各府県急潮担当者向けの流況データ解析について説明があり、海洋物理研究者の知識の底上げを図った。

後半の部では、各府県地先での観測結果や発生現象について、海洋物理，漁具など複数の観点から議論が交わされ，それぞれ他分野からの新たな着想を多く得た．さらに，急潮予測のシステムの

紹介、有毒プランクトンによる災害に対する観測データ事例の紹介を行った。

総合討論やその後の議題では，本研究集会が非常に有意義であった旨の意見が複数の参加者から聞かれ，来年度からも継続して本研究集会を開催できるよう，協力していくことを参加者全員と確認し，終了した．この場を借りて，本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所、所内世話人である千手智晴准教授をはじめとして開催に尽力いただいた関係者に深く感謝申し上げる。

九州大学共同利用研究集会
日本周辺海域における環境急変現象（急潮）のメカニズム解明および防災に関する研究集会

次　　第

【日時】2021 年 11 月 5 日（金）10:00 ～ 16:00
【場所】九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 3F（301 号室）

1. 開会・挨拶および開催趣旨説明　10:00～10:05
2. お悩み相談会（途中　昼休憩を挟む）　10:05～13:40
   (1) 趣旨説明
   (2) 自己紹介
   (3) お悩み相談会
   ○急潮予測の現状について
   石川県水産総合センター海洋資源部　奥野　充一
   島根県水産技術センター　安原　豪
   千葉県水産総合研究センター　大畑　聡
   ○定置網の防災に関する取り組み
   日東製網株式会社　細川　貴志
   ○流況データ解析の流れについて
   福井県立大学海洋生物資源学部　兼田　淳史
   ○全体質疑
3. 研究発表および話題提供　13:40～15:30
   (1) 京都府における急潮情報の発信及び潮流観測結果
   森川晃行（京都府農林水産技術センター海洋センター）
   (2) 紀伊水道外域に進入する中央分枝流による急潮の発生過程
   松田裕太（高知県水産振興部水産試験場）
   (3) 急潮情報の Push 型配信サービス「急潮アラート」の開発
   田中裕介（株式会社オーシャンアイズ）
   (4) 有害プランクトン検出センサーの観測データ事例紹介
   吉田光男（JFE アドバンテック株式会社）
4. 総合討論　15:30～15:40
5. その他（次年度について）
6. 閉会

九州大学共同利用研究集会

「日本周辺海域における環境急変現象（急潮）のメカニズム解明および防災に関する研究集会」

参加者名簿　　29 名参加（うち 15 名現地参加）

機関名	氏名	参加方法
株式会社ブルーオーシャン研究所	伊藤 喜代志	Web
日東製網株式会社技術部総合網研究課	細川 貴志	現地
（株）オーシャンアイズ	笠原 秀一	現地
（株）オーシャンアイズ	田中 裕介	Web
佐賀県玄海水産振興センター	江口 勝久	現地
佐賀県玄海水産振興センター	牟田 圭司	現地
新潟県水産海洋研究所 海洋課	大江 貢弘	Web
新潟県水産海洋研究所 海洋課	五十嵐 修吾	Web
福井県水産試験場	岩﨑 俊祐	Web
石川県水産総合センター海洋資源部	奥野 充一	Web
島根県水産技術センター	安原 豪	Web
福井県立大学海洋生物資源学部	渡慶次　力	Web
長崎大学水産学部	滝川哲太郎	Web
鳥取県水産試験場	藤岡秀文	現地
長崎県総合水産試験場	山田雄太	現地
兵庫県立農林水産技術総合センター 但馬水産技術センター	鈴木　雅巳	Web
福岡県水産海洋技術センター	金澤孝弘	現地
福岡県水産海洋技術センター	長本篤	現地
福岡県水産海洋技術センター	長倉光佑	現地
福井県立大学海洋生物資源学部	兼田淳史	Web
JFE アドバンテック株式会社	吉井 敏史	現地
JFE アドバンテック株式会社	倉垣 拓二	現地
JFE アドバンテック株式会社	吉田　光男	現地
千葉県水産総合研究センター	大畑　聡	Web（午前のみ）
神奈川県水産技術センター相模湾試験場	田村 怜子	Web
九州大学応用力学研究所	千手 智晴	現地
富山県農林水産総合技術センター水産研究所	阿部 隼也	Web
高知県水産試験場	松田 裕太	現地
京都府農林水産技術センター海洋センター	森川 晃行	現地
京都府農林水産技術センター海洋センター	木下 直樹	現地

「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」報告

富山高等専門学校商船学科　福留研一

2021 年 12 月 7 日から 12 月 8 日にかけて，九州大学筑紫キャンパスにおいて，応用力学研究所共同利用研究集会「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」が開催された．開催にあたっては感染症対策を講じた上で対面形式で実施したが，申請のあった研究者・学生に関してはリモートでの聴講も受け入れた．その結果，コロナ禍においても全体では 40 名の参加者と 14 題の講演があった．初日の 12 月 7 日は海洋モニタリングおよび数値シミュレーションの話題中心の講演となった．講演の前半では津軽海峡，下北半島太平洋沿岸，富山湾，室戸岬東部，九州北西海域といった日本周辺の様々な海域におけるモニタリング結果を用いて，海洋酸性化や放射線核種の挙動の解明，急潮の予測に向けたシミュレーション結果の検証についての講演があった．続いて，特に沿岸において重要な役割を果たす潮汐についての数値モデル結果と観測との比較における新たなダイアグラムの提案や，漁業者参加型や人工衛星等を用いた手法による新たなモニタリングツールの開発とその成果についての講演があった．2 日目の 12 月 8 日においては，海洋の流動場や水塊構造を形成する力学過程や波浪についての講演が続いた．日本海や東シナ海における流動場や水塊構造の力学過程については，その過程の解明のみならず，それらが海洋の基礎生産や水産資源に与える影響についても検討された．日本海周辺海域における波浪に関しては，縁辺海において活発である海洋開発や船舶運用にも関わる波浪の時空間変化に関する講演および，新たな計測手法を用いた波浪観測機器の紹介とその精度検証，海面画像の計測による白波砕波の抽出および数値シミュレーションについての講演があった．

2 日間を通して，日本周辺海域における海況モニタリングと波浪計測を基礎とした，幅広い海域における様々な角度からの現場観測，力学研究，数値シミュレーション等を用いた研究発表と活発な議論が行われた．海洋・水産に関わる大学および試験・研究・開発機関を中心に，現場観測に携わっている多くの方々のご参加頂いたことによって，海洋モニタリングに関してその手段の多様化が顕著であること，それらを用いた新たな取り組みと成果が生まれていることを広く共有する機会とすることが出来た．今後とも，日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わる研究者・関係者が一堂に会する集会となり、活発な議論と情報交換の場となることを期待する．最後に，本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所，集会を開催するにあたりお世話して頂いた広瀬直毅教授をはじめとする諸氏に感謝する．

日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会プログラム(12/7-12/8)

====プログラム=========
九州大学応用力学研究所 研究集会
「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」
(代表者：福留研一、九大応力研世話人：広瀬直毅)
日程： 2021年12月7日(火)～8日(水)
開催場所： 九州大学筑紫キャンパス
　応用力学研究所西棟 6 階 多目的研究交流室 (W601号室)
　(https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/center/access.html)

＊先だって行われるレーダー集会後に時間をおいて開催します.
＊各講演，質疑応答込み20～25分でお願いいたします.

-----12/7（火）-----
13:30-
趣旨説明

13:35-14:00
「津軽海峡東部のpHと炭酸カルシウム飽和度の急速な低下 ～津軽海峡モニタリングから～」
〇脇田昌英，佐々木建一，永野憲（海洋研究開発機構），阿部泰人（海洋研究開発機構，北大院水産），田中雄大（水産機構資源研），長野晃輔（青森水総研），杉江恒二，金子仁，木元克典（海洋研究開発機構），奥西武（水産機構資源研），畳指祥子（海洋研究開発機構，東北環境科学サービス），吉野順，高田信（東北環境科学サービス），渡邉修一（海洋研究開発機構）

14:00-14:25
「下北半島太平洋沿岸域における流速の日周期変動について」
〇印貞治，中山智治，小藤久毅，久慈智幸（日本海洋科学振興財団）

14:25-14:50
「超音波流速計で測定された津軽海峡の海流データの整備」
〇川村英之（日本原子力研究開発機構），広瀬直毅（九州大学），中山智治（日本海洋科学振興財団），伊藤集通（日本原子力研究開発機構）

14:50-15:15
「2017年9月の室戸岬東部の急潮の要因と予測不確実性について」
〇広瀬成章，碓氷典久，坂本圭，中野英之，高野洋雄，山中吾郎（気象研）

15:15-15:25 休憩

15:25-15:50
「潮汐モデルの精度検証のためのダイアグラム」
〇坪野考樹（電力中央研究所）

15:50-16:15
「九州北西海域における漁業者参加型の海洋観測システムの構築」
〇伊藤毅史（佐賀玄海水振セ），長本　篤（福岡水海技セ），高木信夫（長崎水試），梶原伸晃（JFEアドバンテック），小久保貴幸（いであ），滝川哲太郎（長崎大），広瀬直毅（九大応力研）

16:15-16:40
「NPECで開発した海洋モニタリングツールの紹介と、富山湾モニタリング」
〇小塚 晃，寺内 元基，マウレ・エリジオ（NPEC），福留研一（富山高専）

16:40-17:00 情報交換

-----12/8（水）-----
9:00-9:25
「佐渡島沖における近慣性内部波の挙動：対馬暖流の影響を受けたFAT019/20の年内変動」
○矢部いつか，川口悠介（東大大気海洋研），和川 拓（水産機構資源研）

9:25-9:50
「東北地方の沿岸水の日本海沖合域への波及過程2」
○和川 拓，井桁庸介（水産機構資源研），坂本 圭（気象研），竹内茉莉香（National Oceanography Centre）・奥山 忍（秋田水振セ），阿部祥子（水産機構資源研）

9:50-10:15
「日本太平洋沿岸域へのマアジ新規加入量の経年変動における黒潮―対馬暖流系の流動の影響」
○井桁庸介（水産機構資源研），久賀みづき（北大低温研），佐々千由紀，北島 聡，髙橋素光（水産機構資源研），渡慶次 力（福井県大海洋生資），堀井日向（宮崎水試），和川 拓，阿部祥子，渡邊千夏子，瀬藤 聡（水産機構資源研），中村啓彦（鹿大水），広瀬直毅（九大応力研）

10:15-10:25 休憩

10:25-10:50
「日本海の波高変動について」
○久木幸治（琉球大学理学部）

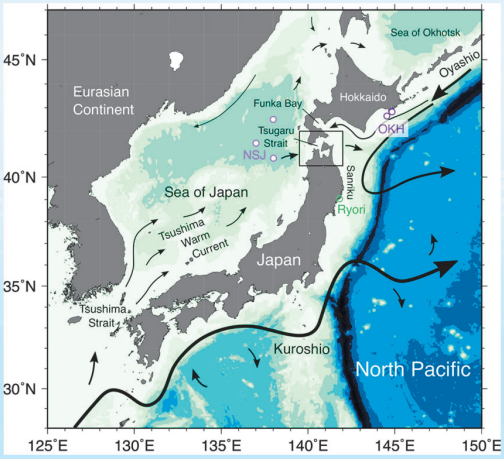
10:50-11:15
「超音波式多層流向流速計による波浪観測」
○原田浩二（三洋テクノマリン），○國分祐作（Nortekジャパン）

11:15-11:40
「海面画像データにおける白波砕波の抽出手法について」
○王宇坤，内田壮平，杉原裕司（九大・総理工），伍井 稔（いであ）

11:40-12:05
「海面画像計測結果を踏まえた白波被覆率の数値シミュレーション
○伍井 稔（いであ），杉原裕司（九大・総理工）

12:05-12:25　総合討論

津軽海峡東部のpHと炭酸カルシウム飽和度の急速な低下
～津軽海峡モニタリングから～

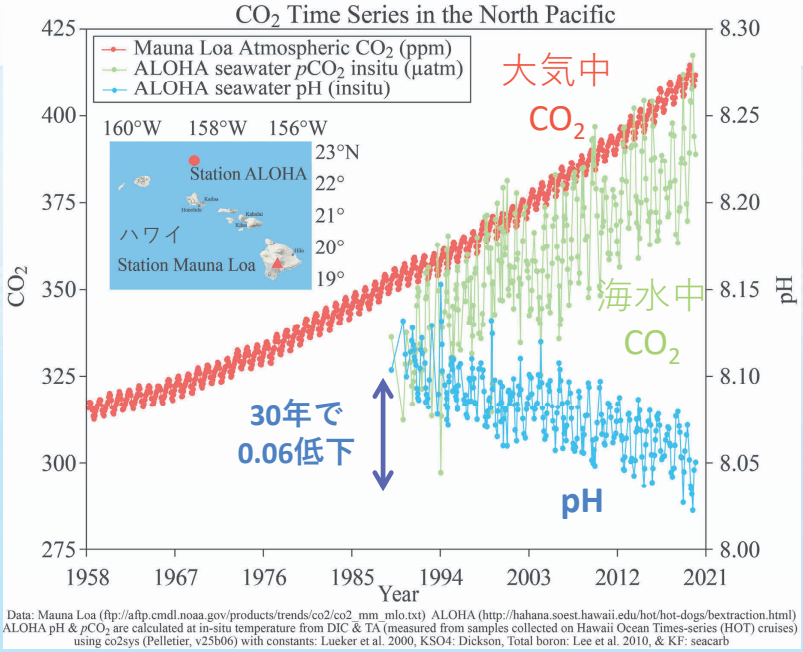


脇田昌英[1]、佐々木建一[1]、永野憲[1]、阿部泰人[1,2]、田中雄大[3]、長野晃輔[4]、杉江恒二[1]、金子仁[1]、木元克典[1]、奥西武[3]、畳指祥子[1,5]、高田信[5]、吉野順[5]、渡邉修一[1]

[1]海洋研究開発機構、[2]北大院水産、[3]水産機構資源研、[4]青森水総研、[5]東北環境科学サービス

九州大学応用力学研究所 研究集会「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」　2021/12/07 PM

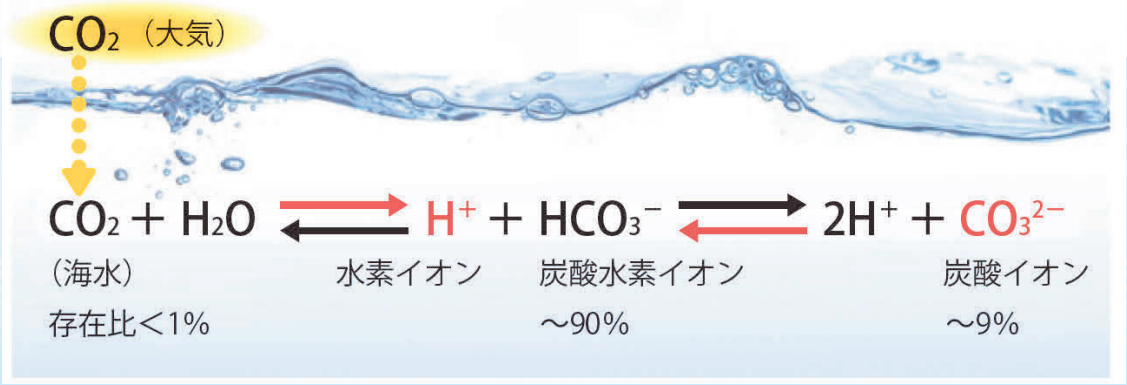
二酸化炭素 CO_2：大気・海洋



https://www.pmel.noaa.gov/co2/file/Hawaii+Carbon+Dioxide+Time-Series

海洋酸性化は、二酸化炭素の増加が原因として、
温暖化と同時に進行するため、「もう一つの二酸化炭素問題」

二酸化炭素CO_2が海に溶け込むと、



1．水素イオン（H^+）が増える → 酸性になる

指標１：pH（ピーエイチ、水素イオン指数）

$pH=-\log[H^+]$

2．炭酸イオン（CO_3^{2-}）が減少する

指標２：炭酸カルシウムの飽和度 Ω

指標２：炭酸カルシウムの飽和度　Ω

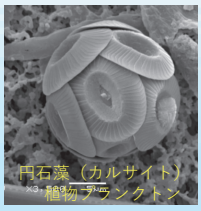
炭酸カルシウムの飽和度　Ω　（≒ $[CO_3^{2-}] / [CO_3^{2-}]_{sat}$）

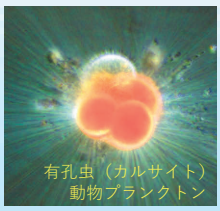
$[CO_3^{2-}]_{sat}$：飽和炭酸イオン濃度：温度・塩分・圧力から計算

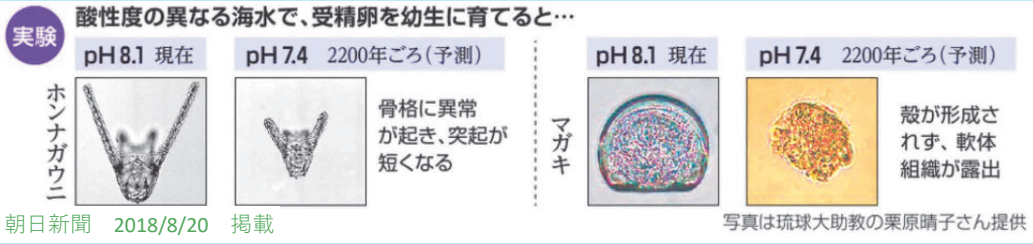
Ω＞１：生物が殻を形成可能、溶解しない　　Ω＜１：生物が殻を形成不可能、溶解する

海洋酸性化 → 炭酸イオン（CO_3^{2-}）とΩが減少 →石灰化生物の生育阻害・生息域減少

石灰化生物：炭酸カルシウム（$CaCO_3$）の殻・骨格をつくる　$Ca^{2+} + CO_3^{2-} = CaCO_3$







幼生が酸性化の被害を受け易い

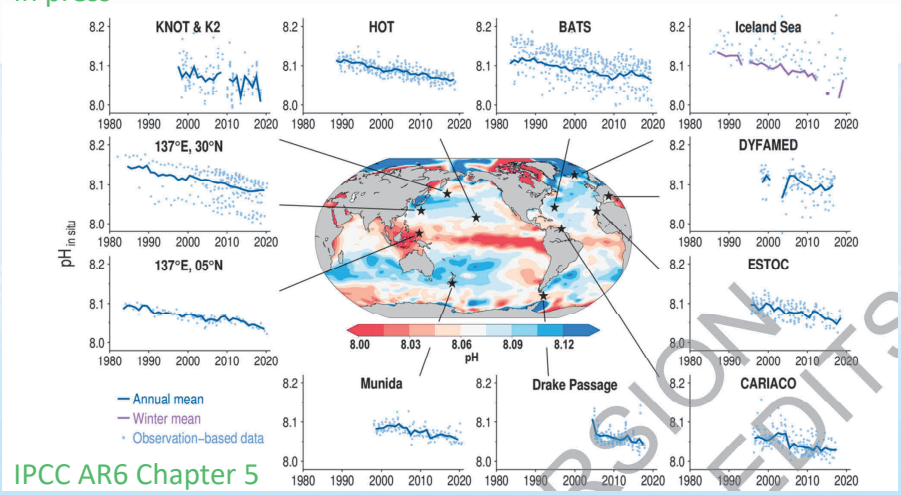
ウニ幼生　$\Omega_{アラゴナイト} < 2.3$

マガキ幼生　$\Omega_{アラゴナイト} < 1.6$

エゾアワビ幼生　$\Omega_{アラゴナイト} < 1.1$

海洋酸性化の進行

In press

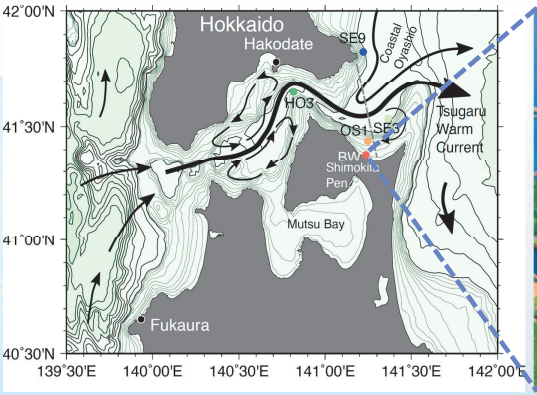


外洋域：
大気中CO_2増加に対応
$pH_T^{in\ situ}$: −0.0016 /yr
$\Omega_{aragonite}$: −0.01 /yr
[Bates et al., 2014]

✓ **沿岸域**：米西海岸のカキ・カニの幼生は酸性化による被害； [Barton et al., 2012, Bednaršek et al., 2020]
→ 沿岸域の方が酸性化に対してより脆弱の可能性 [Waldbusser & Salisbury, 2014]
✓ 酸性化は他の環境変化と密接な関連：貧酸素化、温暖化、沿岸の富栄養化、海洋循環変化等
→これらの効果が受けやすい沿岸域の酸性化は、生態系に早く影響が出る可能性

目的：津軽海峡の酸性化の進行を調べること　国内外の酸性化モニタリングサイト登録済

津軽海峡東部の海洋酸性化モニタリング



CTD sensor

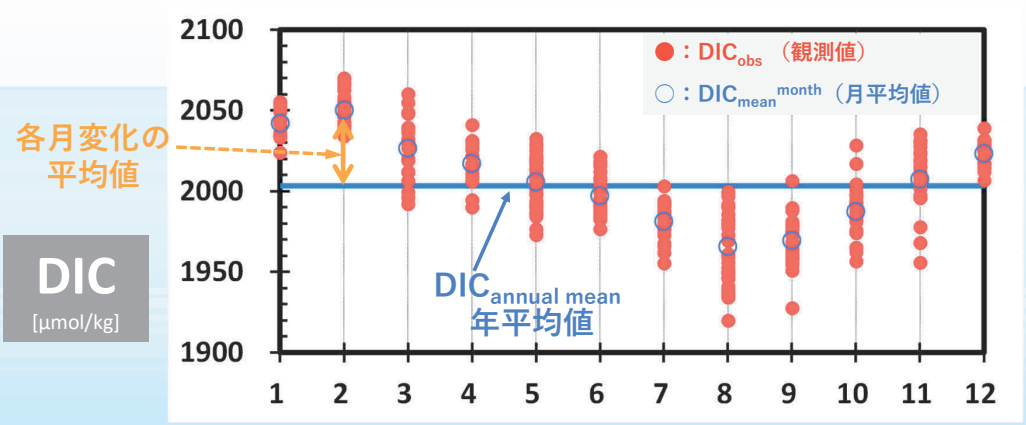
Bucket Sampling

✓ サンプリング地点
関根浜港：防波堤突堤, 浮桟橋　2014年2月から週１回　CTD＆バケツ採水
HO3/OS1/SE3/SE9：船舶観測（うしお丸・若鷹丸等）2012年8月から年4〜5回 表面〜海底までCTD採水

✓ 測定項目：温度・塩分・溶存無機炭素(DIC)・アルカリ度(TA)・栄養塩・^{18}O-H_2O
全有機炭素/全溶存無機窒素・植物プランクトン同定・クロロフィルa・溶存酸素
$pH_T^{in\ situ}$, $\Omega_{aragonite}$ ：温度・塩分・DIC・TA・ケイ酸塩・リン酸塩から計算 [Lewis and Wallace et al., 1998]

月1回: NORPACネット（有孔虫・翼足類・二枚貝幼生等）, eDNA(2019/3~),　毎時: pH/CTDO sensor (2018/2~)
2014-2019 :Sekinehama port carbon time-series data; JAMSTEC Data Catalogで公開

年平均値の計算方法

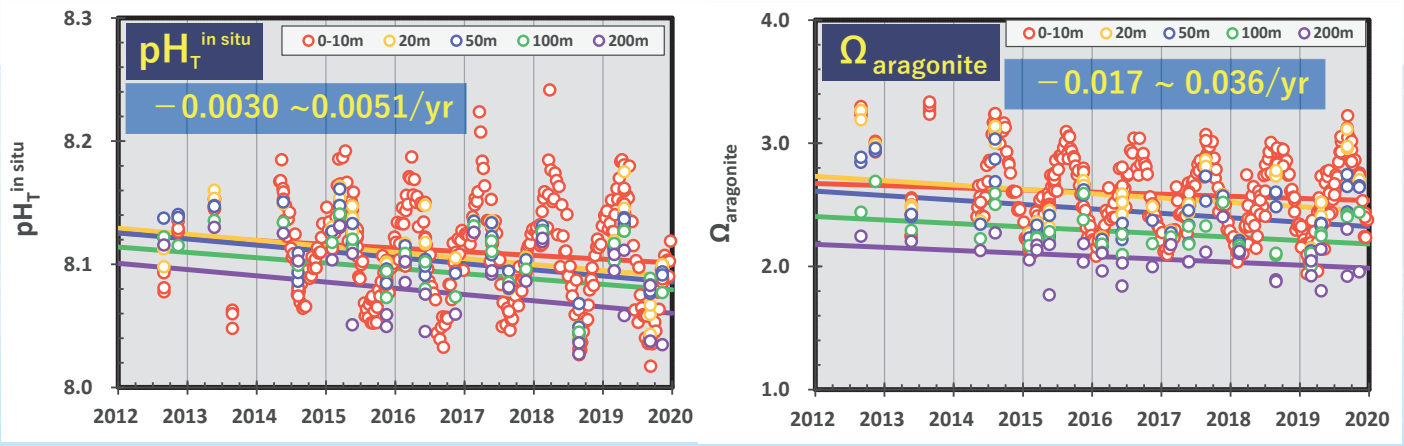


- ✓ 各観測値から、全期間の月平均値から年平均値を差し引いた**各月・季節変化の平均値**を除き、各年の年平均値を計算　→経年変化を検出（Takahashi et al., 2006）

  ex.　$DIC_{anomaly} = DIC_{obs} - (DIC_{monthly\ mean} - DIC_{annual\ mean})$

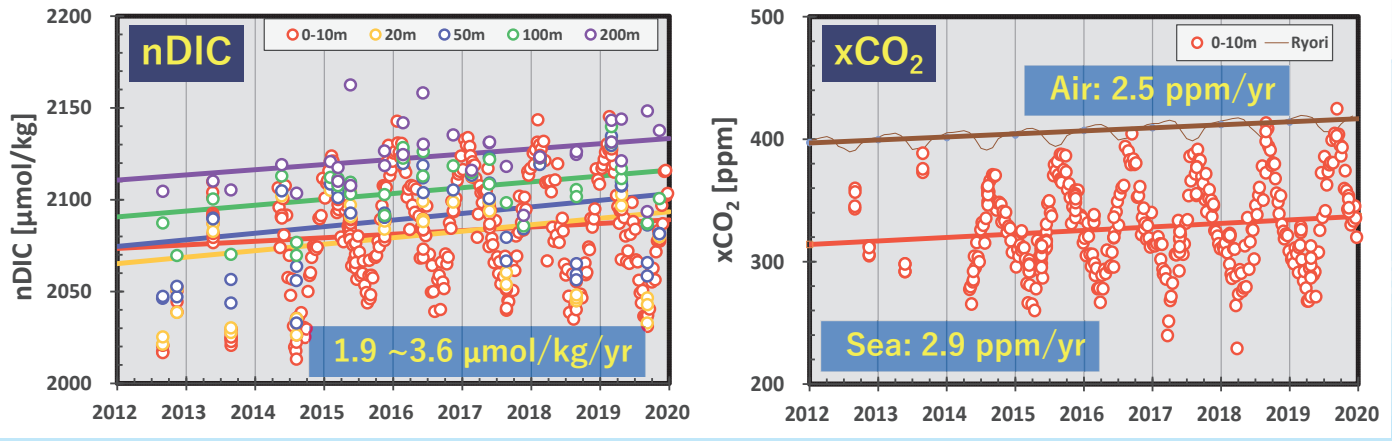
- ✓ 関根浜港突堤(毎週)、HO3、SE3、OS1(季節毎)：津軽暖流の特徴、これらの観測値を使用
  ただし、2014年冬のデータは棄却　←沿岸親潮が下北半島まで接岸したため

津軽海峡東部のpH・Ωの急速な低下



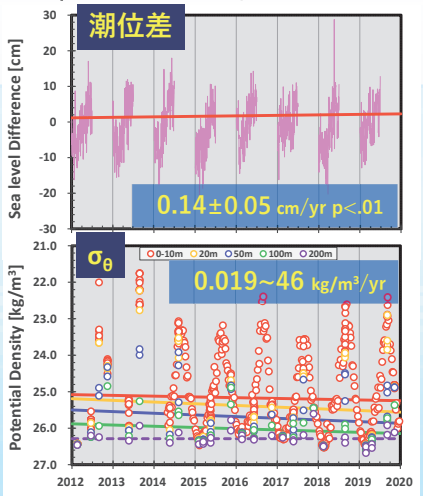
- ✓ 年平均 pH・$\Omega_{aragonite}$ ：全深度（0～200m）で有意に低下
- ✓ 表層(pH -0.0030/yr、Ω-0.017/yr)：急速な低下；外洋域（−0.0016/yr, −0.01/yr）[Bates et al., 2014]
  日本沿岸域 [Chen et al., 2017; Ishii et al., 2011; Ishizu et al., 2019; Lui & Chen, 2015].
- ✓ 中層(pH -0.0043~51/yr、Ω -0.024~36/yr)：他の海域の最大値もより急速な低下
  pH -0.004/yr(200-500m)@北太平洋 [Byrne et al., 2010] 日本海 [Chen et al., 2017]

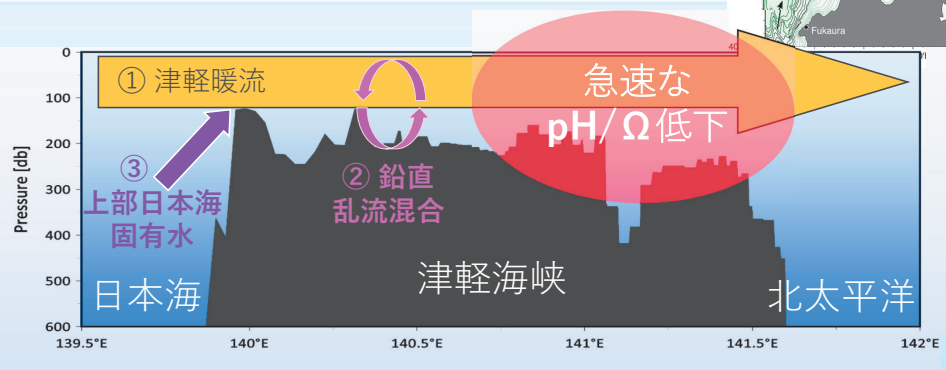
pH・Ωの急速な低下の原因：炭酸系

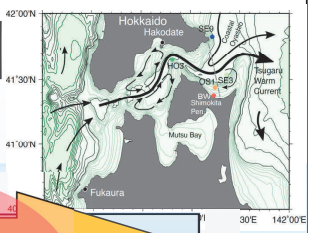


- ✓ 年平均 nDIC：全深度（0～200m）で有意に増加、大気CO_2増加平衡より速い、中層＞表層
- ✓ $pH_T^{in\ situ}$, $\Omega_{aragonite}$ ：温度・塩分・DIC・TA・ケイ酸塩・リン酸塩から計算
  →急速なｐH低下にどの成分が寄与：各成分のうち、1つだけ実測値で他は年平均で計算[Wakita, 2013]
  pH@100m：-0.0043 /yr＝nDIC増加による促進寄与:-0.0065/yr＋温度変化による抑制寄与:+0.0022/yr
- ✓ nTA：有意な変化なし→河川水(長江) [Kosugi et al., 2016]と降水による淡水の影響なし
- ✓ 大気海洋間CO_2交換：大気より海洋の方が僅かに増加速い→CO_2吸収が弱化し、DIC増加の弱化を示唆
  →急速なｐH・Ω低下の原因：人為起源CO_2の海洋の吸収に加え、表層以深からのDIC増加の強化

pH/Ω急低下を起すDIC増加強化の要因



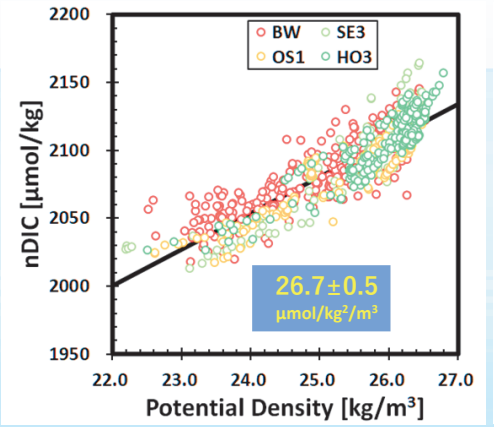




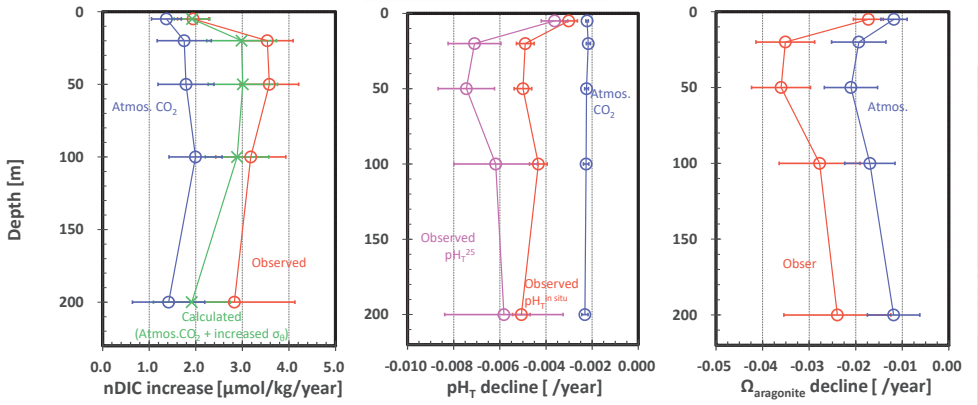
① 津軽暖流：日本海と北太平洋の海面水位差が駆動→深浦/函館の潮位差増加から**津軽暖流が強化**
② 海峡西部の複雑な海底地形による**鉛直乱流混合が強化**
③ 海峡の**表層と上部日本海固有水（低温・高塩・高DIC/Nuts）の混合が強化**→密度増加を支持
日本海固有水：深層循環の弱化による貧酸素化によって急速な酸性化進行 [Chen et al. 2017]

→津軽暖流の強化に伴う鉛直拡散混合の強化によって、上部日本海固有水（高密度・高DIC）と海峡表層水との混合が強化し、その影響が下流の海峡東部に伝播した可能性

pH/Ω急低下を起すDIC増加の強化の要因２



海峡東部のnDIC/σ_θ



nDIC・pH_T・$\Omega_{aragonite}$の経年変化の鉛直分布

- ✓ nDIC/σ_θ：相関 → σ_θ増加（0.019～46 kg/m³/yr）によるnDIC増加：0.5～1.2 μmol/kg/yr
- ✓ 大気CO_2増加平衡に対応したnDIC増加：1.4～2.0 μmol/kg/yr
- ✓ 上記の和と観測されたnDIC増加（1.9～3.6 μmol/kg/yr ）：良く一致

→pH/Ωの急速な低下を引き起こしたnDIC増加の強化は、大気CO_2増加の海洋の吸収に加え、津軽暖流の強化に伴う上部日本海固有水（高密度・高DIC）と海峡表層水との混合の強化が原因

ま　と　め

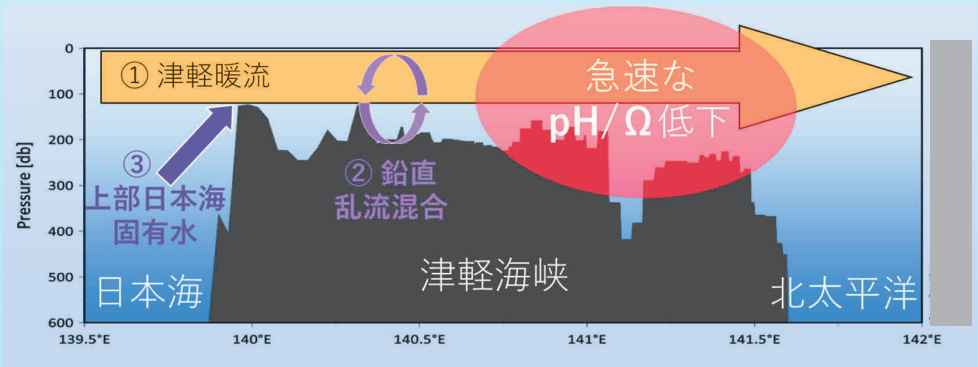
Geophysical Research Letters

RESEARCH LETTER
10.1029/2020GL091332

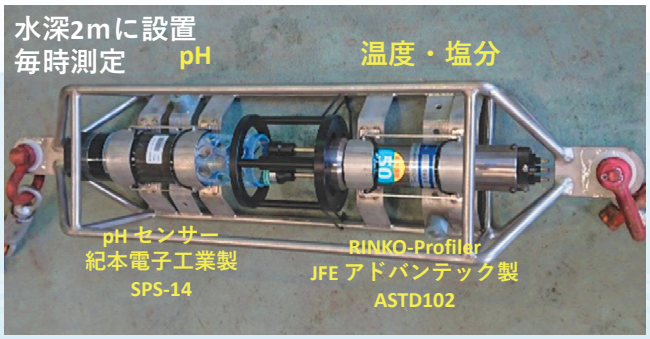
Rapid Reduction of pH and $CaCO_3$ Saturation State in the Tsugaru Strait by the Intensified Tsugaru Warm Current During 2012–2019

M. Wakita, K. Sasaki, A. Nagano, H. Abe, T. Tanaka, K. Nagano, K. Sugie, H. Kaneko, K. Kimoto, T. Okunishi, M. Takada, J. Yoshino, and S. Watanabe

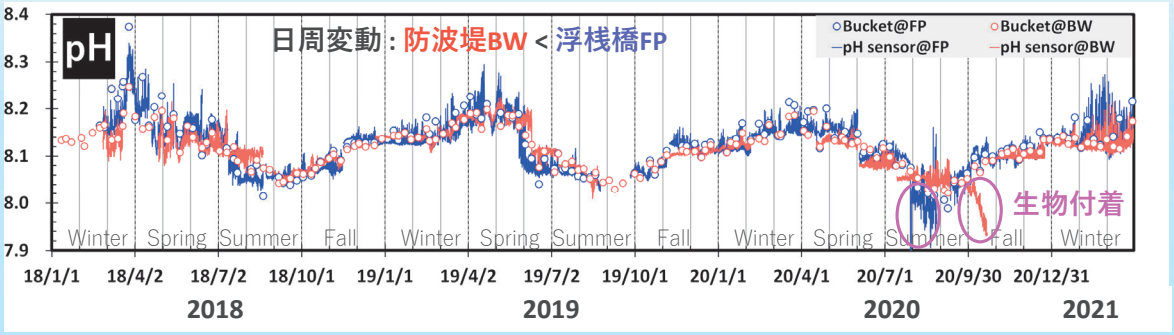
- 2012～2019年に津軽海峡東部で急速なpH・$\Omega_{aragonite}$低下が全深度で進行
  $pH_T^{in\ situ}$：－0.0030～0.0051 /yr　$\Omega_{aragonite}$：－0.017～ 0.036 /yr
  外洋域(-0.002/yr, －0.01/yr)・他の日本沿岸域よりも速いペースで進行
- 亜表層：北太平洋・日本海での過去最大値(-0.004/yr)よりも急速に進行
  →急速なpH・$\Omega_{aragonite}$は、人為起源CO_2の海洋の吸収に加え、
  津軽暖流の強化に伴う上部日本海固有水と海峡表層水との混合強化によるDIC増加の強化が原因
- 津軽暖流と下流域（陸奥湾・噴火湾・三陸沿岸）を含め、生物への影響評価は喫緊の課題



センサーによる酸性化モニタリング

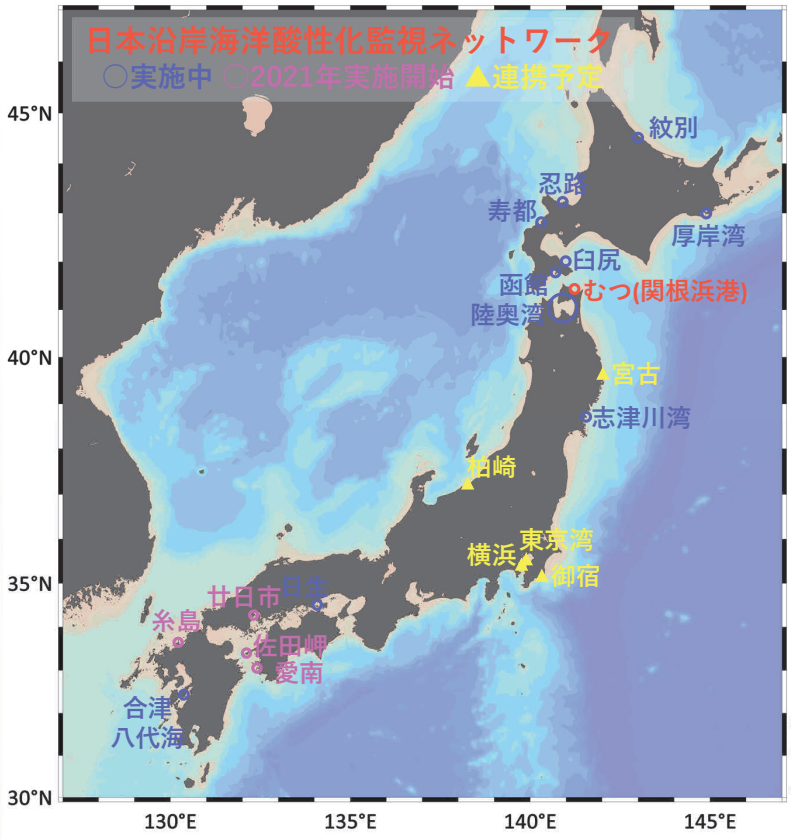


生物付着したpHセンサー



紫外線生物付着防止装置

JAMSTEC研究プラットフォーム運用開発部門と共同研究　実海域試験中



参画機関（2018年から各所で実施）
- 青森県産業技術センター水産総合研究所
- 北海道大学
  - 一環境科学研究院
  - 一水産科学研究院
  - 一北方生物圏フィールド科学センター
- 北海道蘭越町貝の館
- 紋別市役所／オホーツク・ガリンコタワー
- 熊本大学
  - くまもと水循環・減災研究教育センター
- NPO里海づくり研究会議
- 東京海洋大学
- 九州大学 大学院工学研究院環境社会部門
- 水産研究教育機構
- 愛媛大学

月1回/週1回：採水を依頼し、むつ研で分析
pHセンサー設置も有
今後、JAMSTEC data catalogueで公開

ご協力可能な方、ご連絡ください

下北半島太平洋沿岸域における流速の日周期変動について

○印貞治・中山智治・小藤久毅・久慈智幸

（日本海洋科学振興財団）

六ケ所村沖合調査

- 調査の目的
  - 使用済み核燃料再処理施設から海洋中に放出される放射性各種の挙動の解明

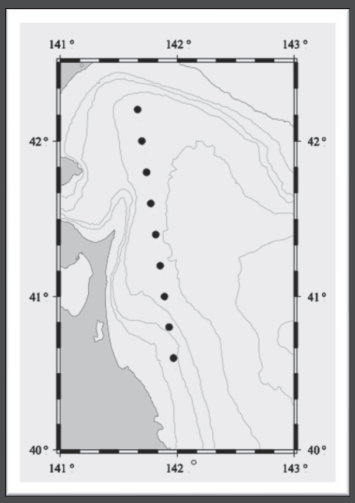
- 調査内容
  - 観測

    流速観測・水温塩分観測

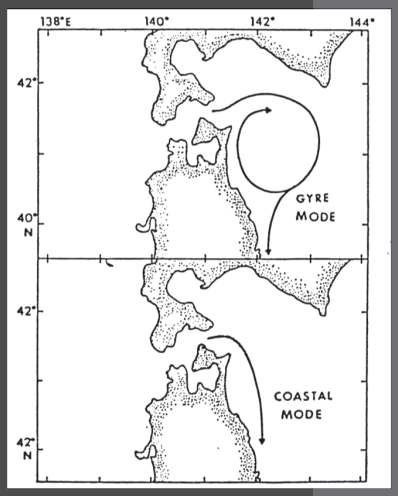
    海水放射能観測
  - モデルシミュレーション
    - 海洋モデル
    - 放射性核種移行モデル

海洋観測

- 津軽暖流の季節変動の把握
  - フェリーからのXCTD観測
    月1回程度（仙台—苫小牧）



観測点

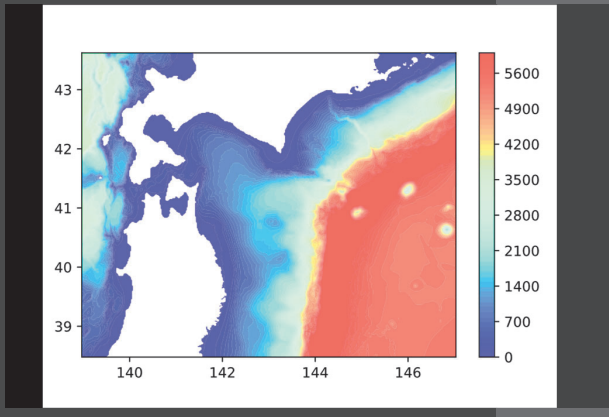


Conlon (1982)

- 六ケ所村沿岸域の海況把握
  - 係留式ブイによる六ケ所村
    沿岸域連続観測
    - ADCP観測
    - CTD観測

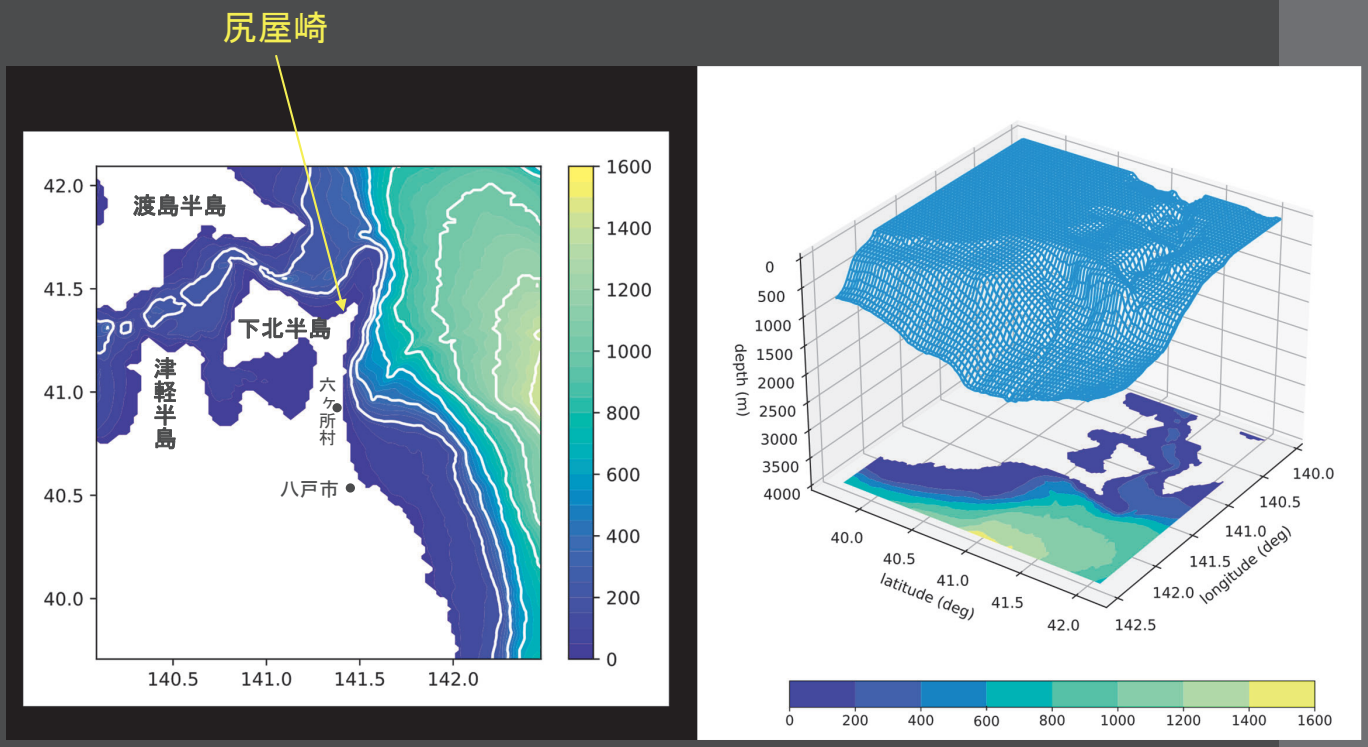
海洋モデル

- 気象研究所共用モデル（MRI.COM）
- ネスティングによって1.4 kmメッシュ
- 潮汐：NAO 99b (Matumoto et al., 2000)の潮位を与える
- Noh and Kim (1999) 混合層モデル
- 等密度面拡散
- バイハーモニックSmagorinski水平粘性
- MSM風(3時間ごと)
- NCEP(6時間ごと)

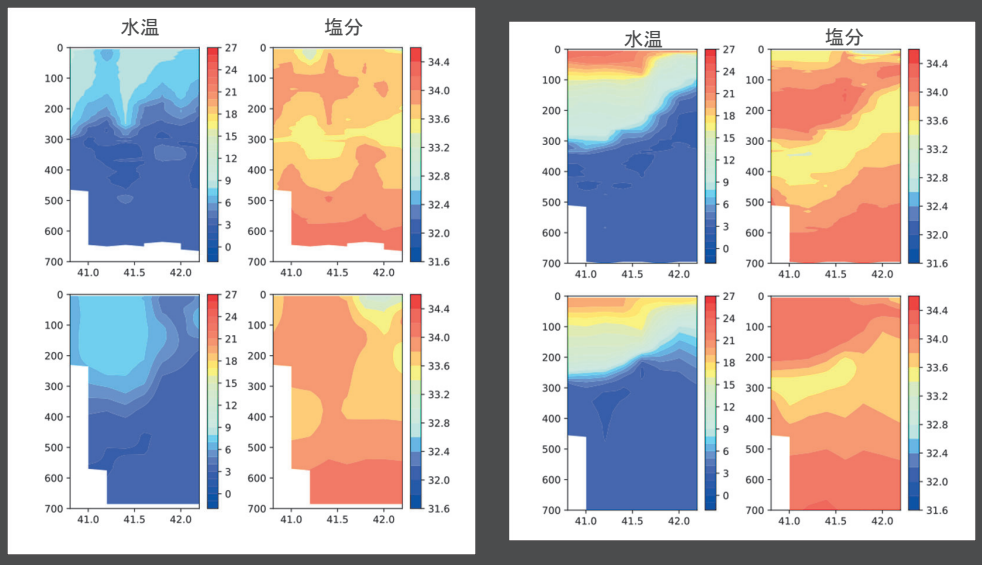


モデル領域

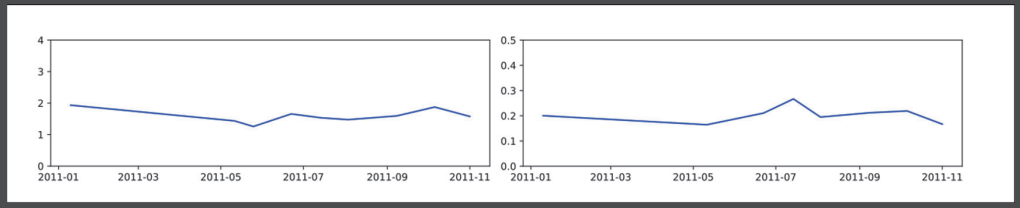
青森県東方海域の地形



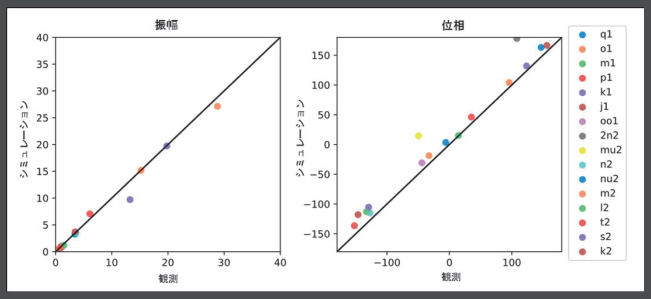
フェリー観測とモデルとの比較



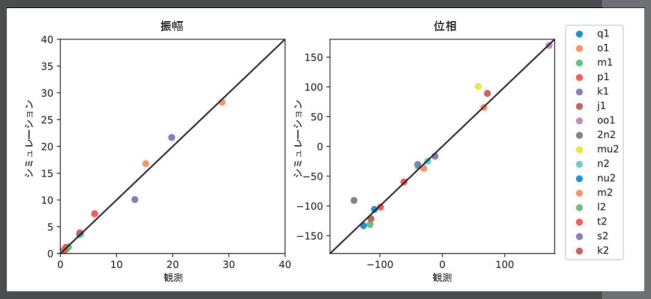
RMSエラー



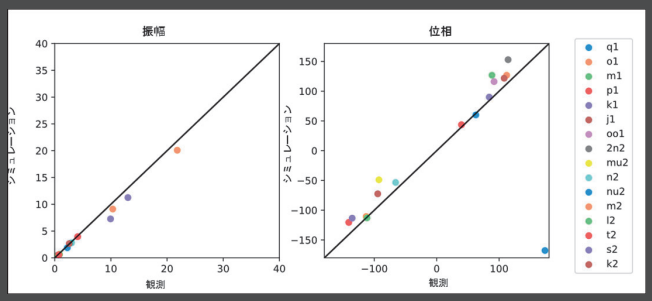
検潮所とモデルの比較



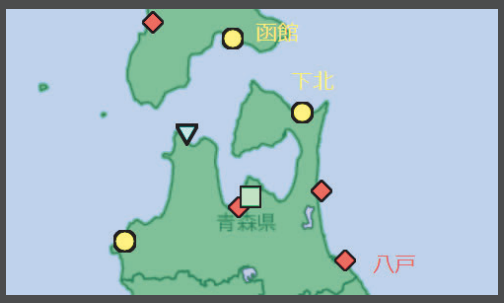
下北



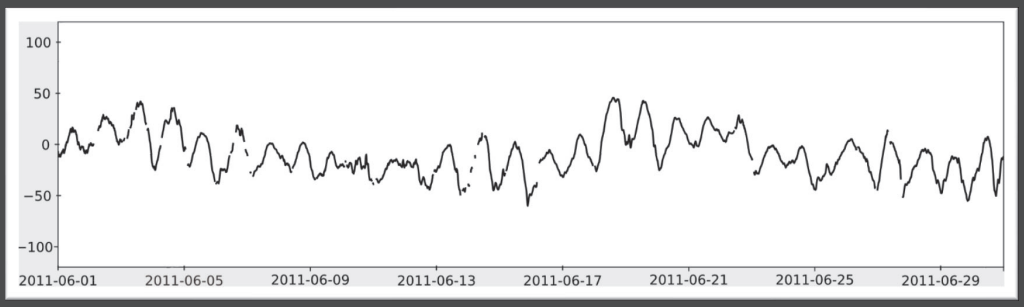
八戸



函館

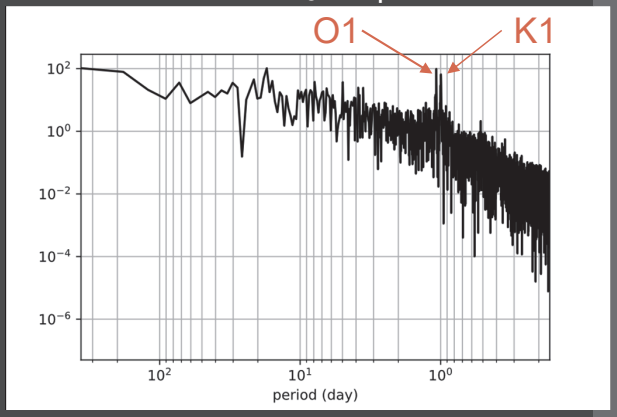


係留式ブイのADCP流速観測値



南北方向成分
2011年6月

南北流速のパワースペクトル
2011年

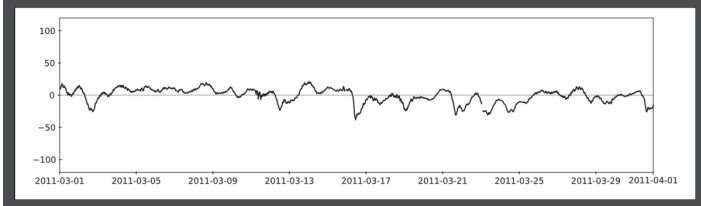


- 日周期変動が卓越
- K1とO1の周期にピークがあることから、潮汐によって引き起こされていることが示唆される
- 半日周期は弱い

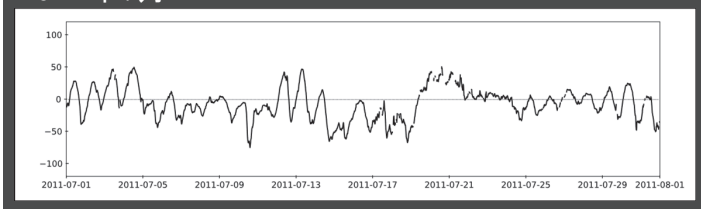
各分潮の振幅の季節変化

南北流速成分（ADCP）

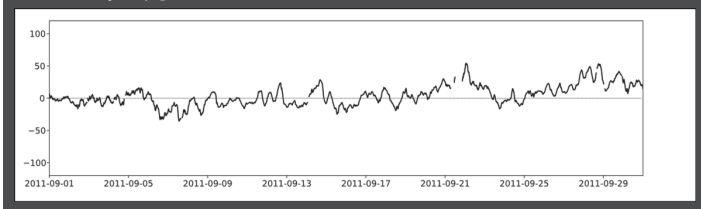
2011年3月

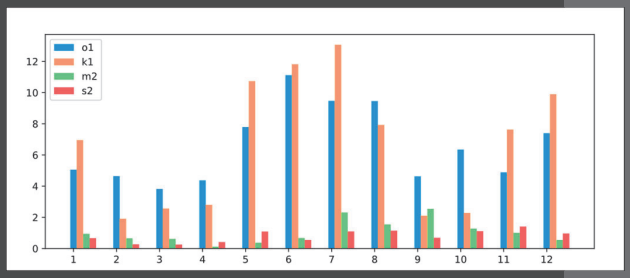


2011年7月

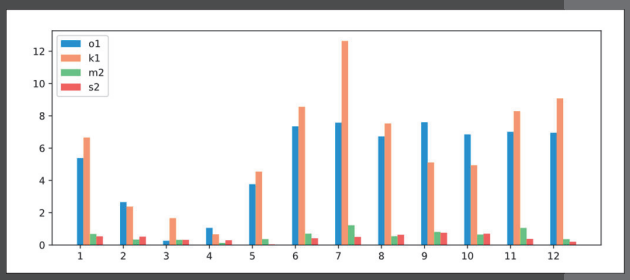


2011年9月





月ごとに調和解析した主要4分潮の振幅（ADCPの南北成分）

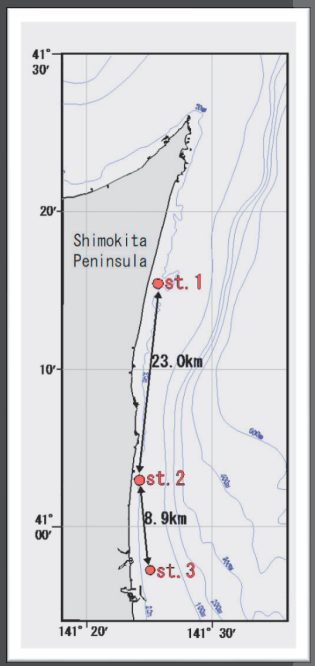


月ごとに調和解析した主要4分潮の振幅（モデルの南北流速成分）

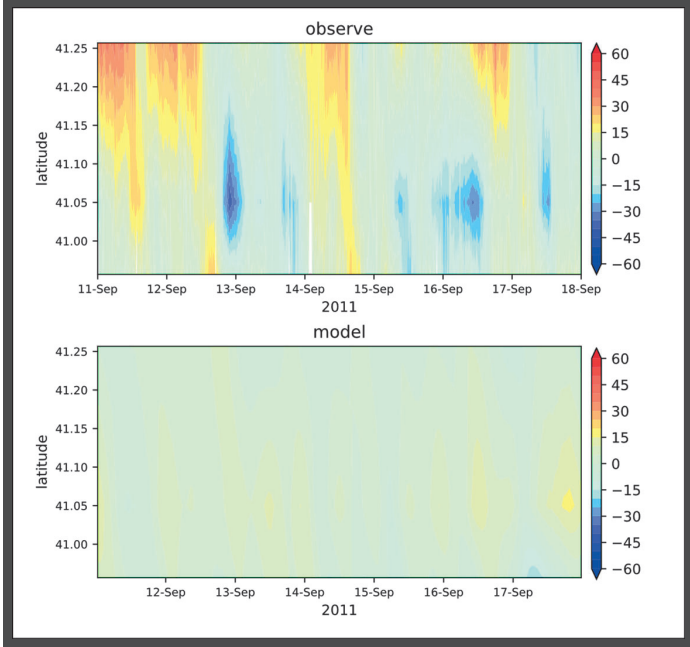
- 日周潮は夏に最大（６～７月）、春（３月）と秋（９月）に最小
- 半日周潮は年を通じて小さいが、夏から秋にやや大きい

沿岸域流速観測

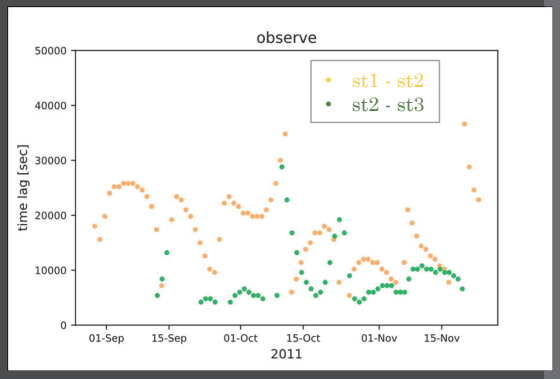
- 期間　2011年8月21日～11月30日
- 　　2013年5月10日～9月10日
- 観測点　st.1 ~ st.3
  - st.1，st.2：上記の期間での連続観測
  - st.3：係留ブイ観測
- 観測データ
  - st.1，st.2：　電磁流向流速計，CTD
  - st.3：　ADCP，CTD

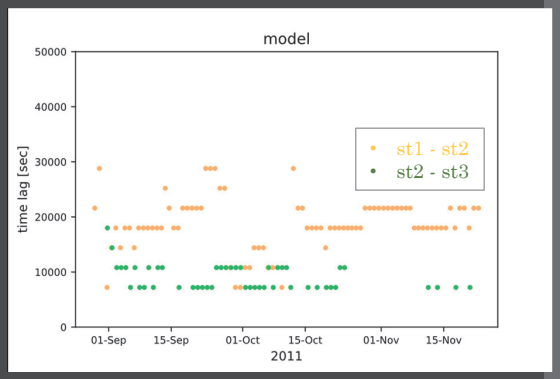


3観測点南北流速（2011年）



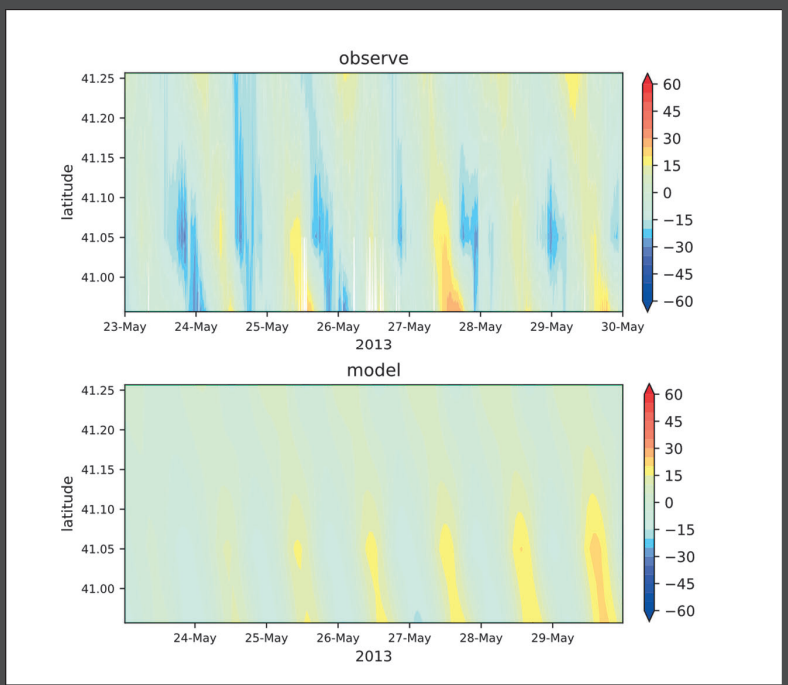
観測南北流速成分のホフメラー図
2011年9月11日～9月18日



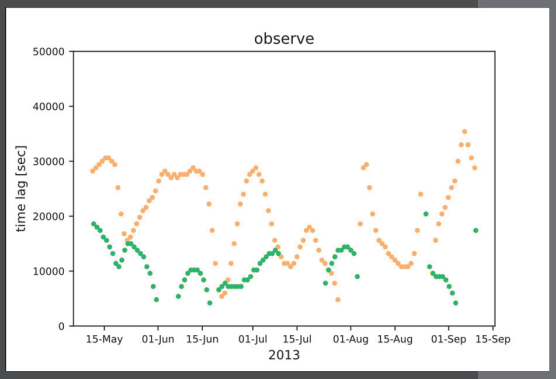


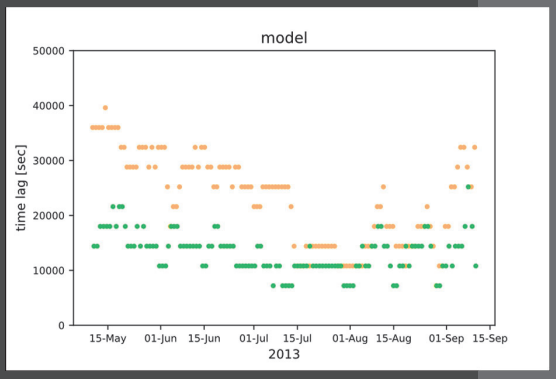
日周期の観測点間における時間差
上段：観測、下段：モデル

3観測点南北流速（2013）



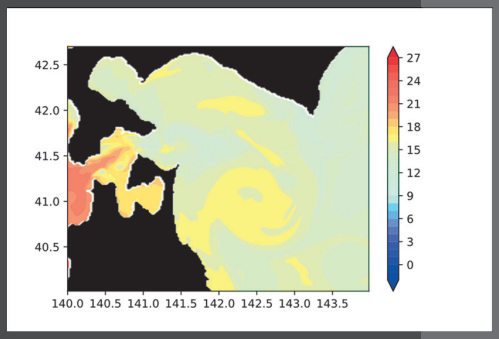
観測南北流速成分のホフメラー図
2013年5月23日～9月30日





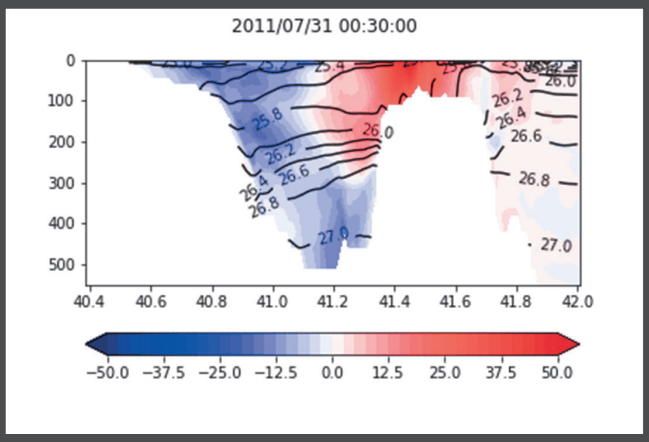
日周期の観測点間における時間差
上段：観測、下段：モデル

バンドパス(23～27時間)フィルターをかけた流速の南北方向成分(トーン)及び密度(コンター)
2011/7/31

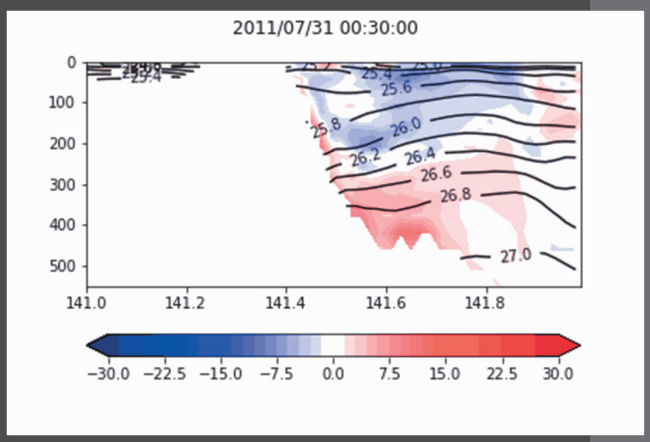


日平均水温（10 m深）

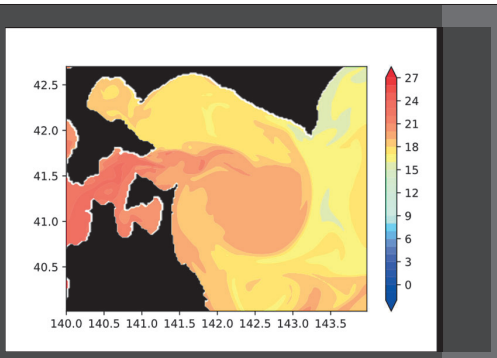
南北断面（東経141.6度）



東西断面（北緯41.1度）

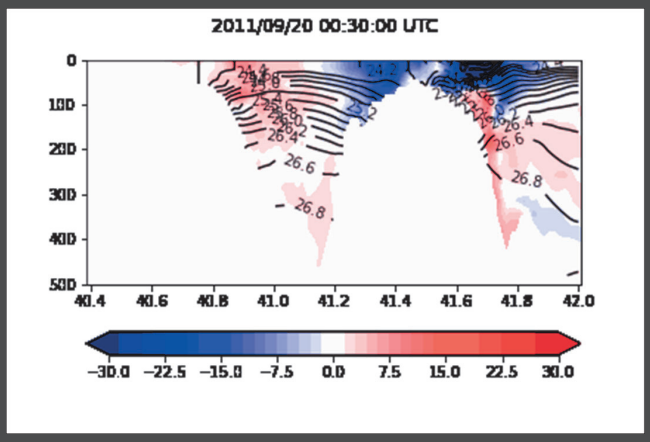


バンドパス(23～27時間)フィルターをかけた流速の南北方向成分(トーン)及び密度(コンター)
2011/9/20

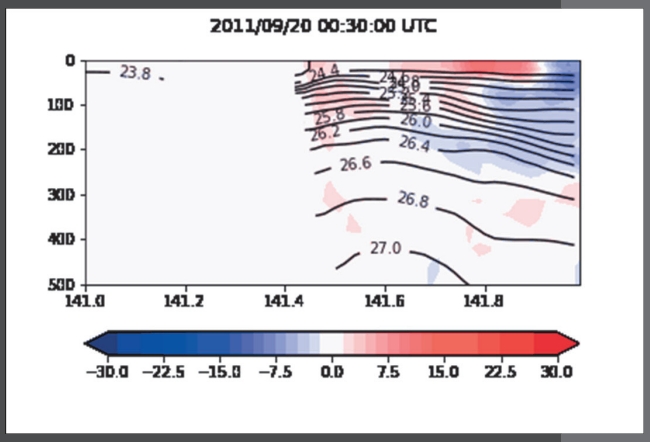


日平均水温（10 m深）

南北断面（東経141.6度）

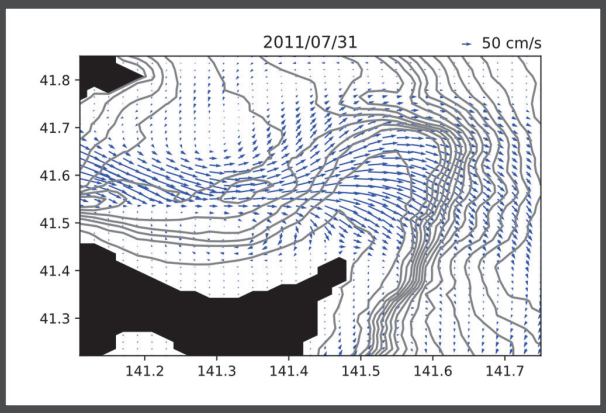


東西断面（北緯41.1度）

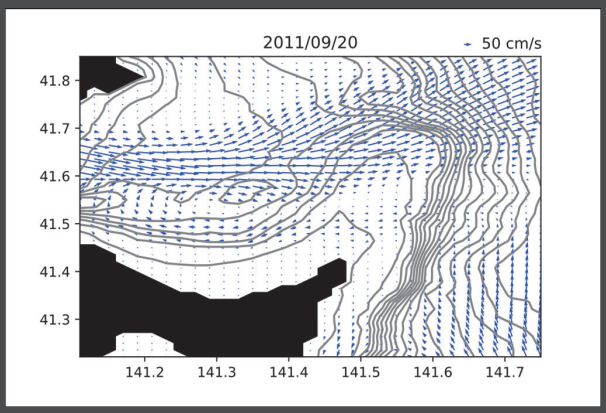


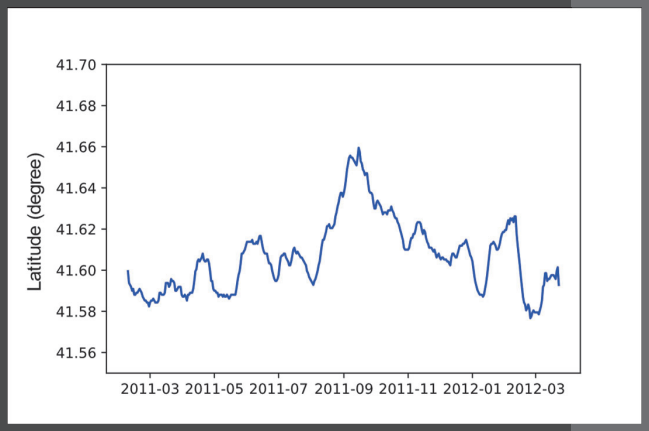
津軽海峡内日平均水平流速

2011/7/31



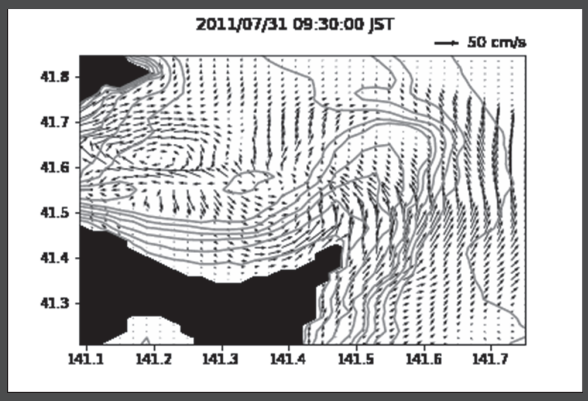
2011/9/20

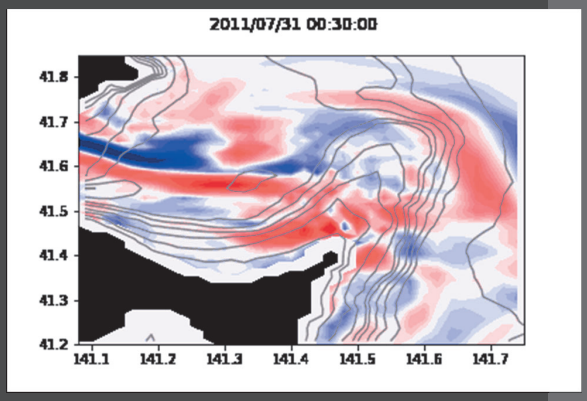




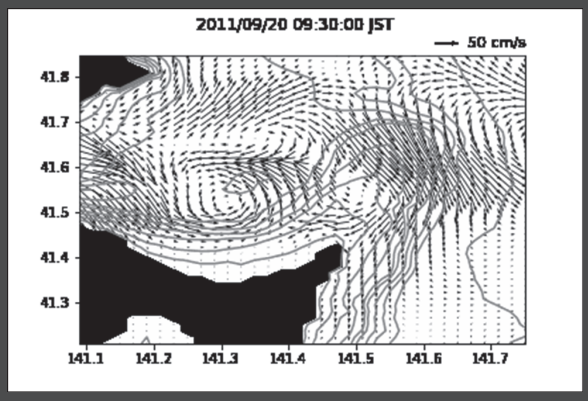
東経141.4度における津軽暖流の流軸の緯度
15日移動平均

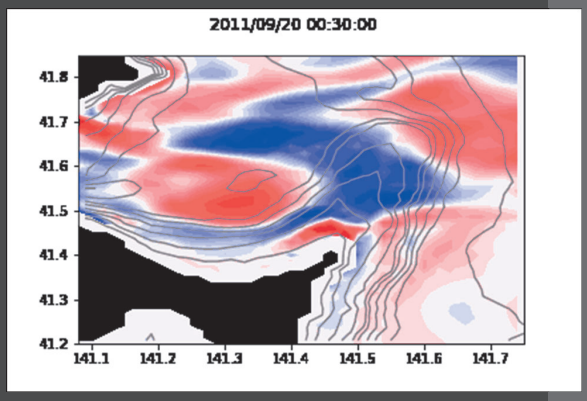
日周期変動の水平分布（左）と相対渦度（右）





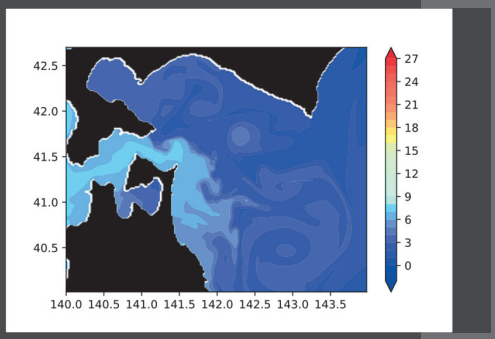
2011/7/31





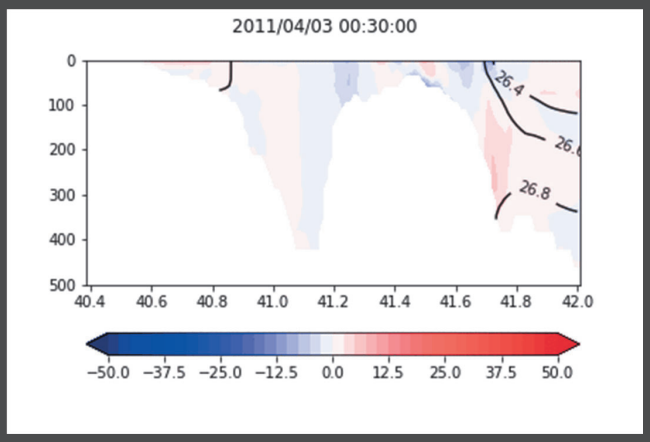
2011/9/20

バンドパス(23～27時間)フィルターをかけた流速の南北方向成分(トーン)及び密度(コンター)2011/4/3

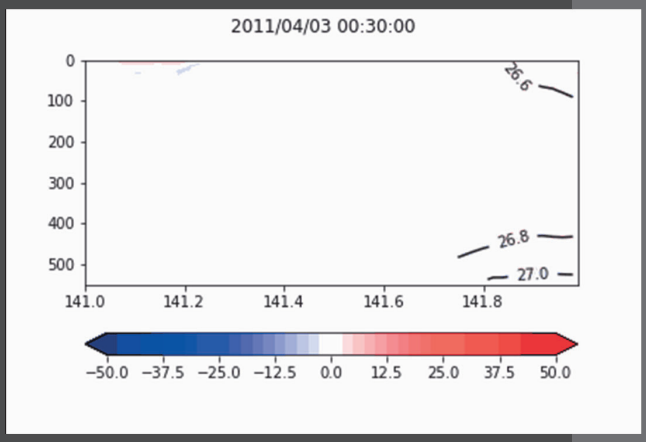


日平均水温（10 m深）

南北断面（東経141.6度）

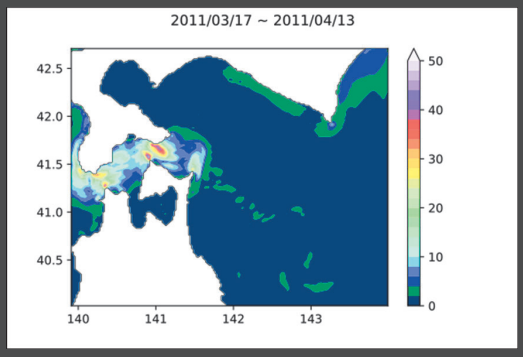


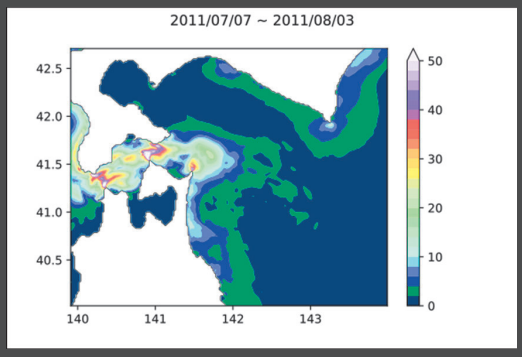
東西断面（北緯41.1度）

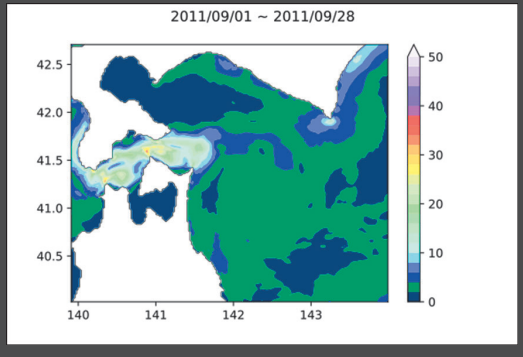


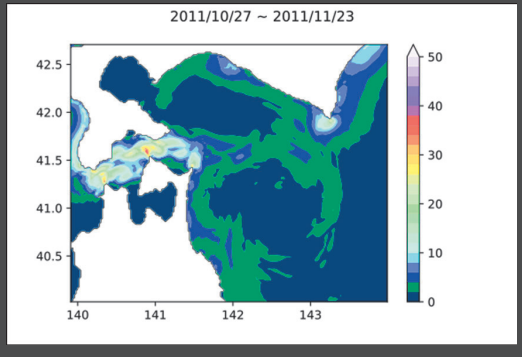
日周期変動の季節ごとの分布

日周期の流速の大きさの時間平均値



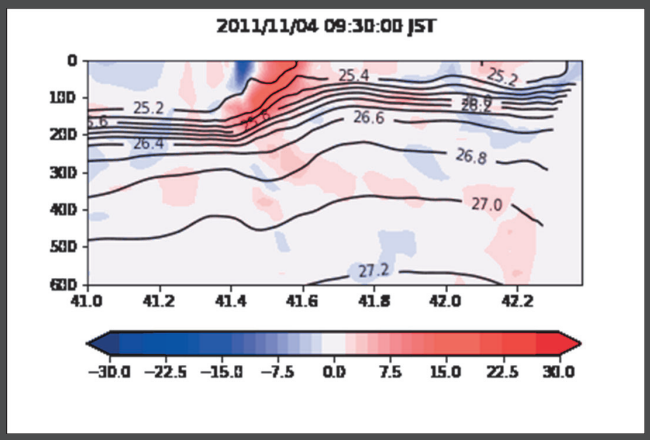




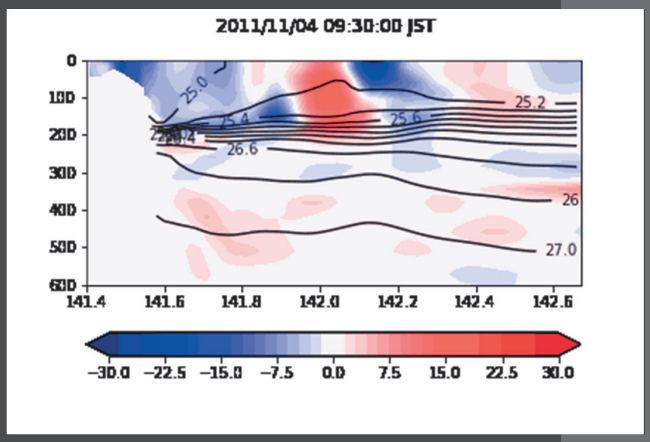


南北流速の日周期変動とポテンシャル密度

2011年11月4日



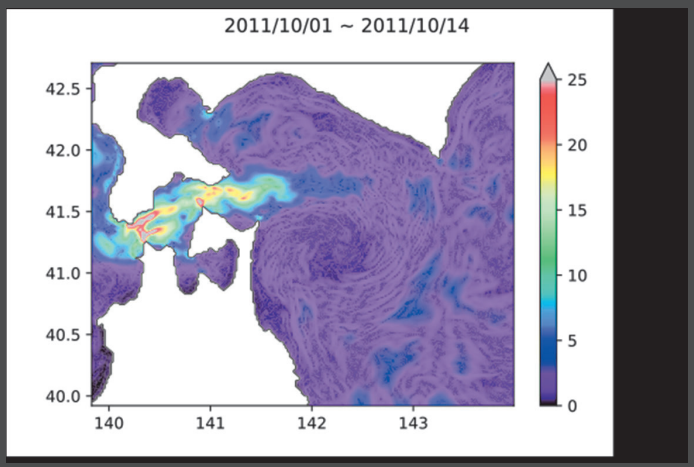
東経142° 6′南北断面



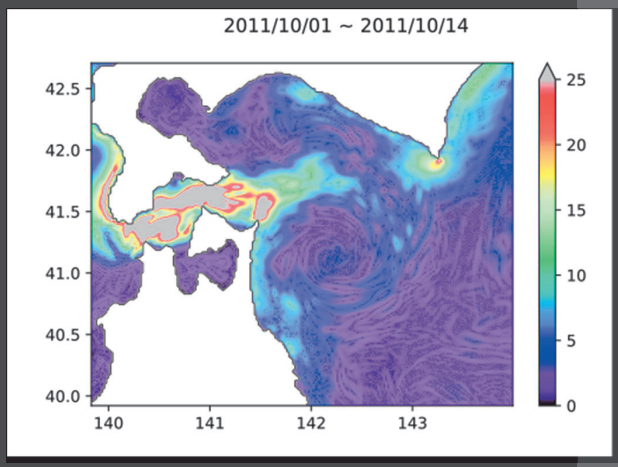
北緯45° 27′東西断面

半日周期(11時間～13時間)変動

流速の絶対値の平均値（2011/10/1~10/14）



半日周期



日周期

まとめと今後の課題

- まとめ
  - 六ケ所村での連続的流速観測から、1日周期の変動が見られた
  - 下北半島における多定点観測からこの変動は、沿岸補足波として岸沿いを北から南に移動
  - 振幅に季節変動があり、夏に大きく、冬から春と秋に小さい
  - モデルによるシミュレーションで、夏季から秋季は鉛直第1モードの内部Kelvin波に似た構造
  - 冬～春は津軽暖流と親潮の密度差が小さく、密度が鉛直一様化していることと、下北半島北部太平洋側の陸棚張り出しが小さいことが影響
  - 秋は津軽海峡内の津軽暖流の流軸の位置との関連が示唆される
  - モデルでは津軽ジャイアに沿って伝わる日周期変動が再現されている
  - 半日周期変動は下北半島沿岸に捕捉はは見られない
- 今後の課題
  - HFレーダーによって、津軽海峡内の津軽暖流の流軸の位置と尻屋海脚との関係が六ケ所村沿岸の流動場にどのような影響を及ぼすかを調べる
  - 津軽ジャイアに沿う変動は実在するか？

謝辞

本研究には青森県からの受託事業「六ケ所村沖合海洋放射能等調査」の成果を利用しました。

超音波流速計で測定された津軽海峡の海流データの整備

川村　英之[1]、広瀬　直毅[2]、中山　智治[3]、伊藤　集通[1]

[1]日本原子力研究開発機構

[2]九州大学

[3]日本海洋科学振興財団

研究の背景と目的

【背景】

■ 日本原子力研究開発機構は、1999年10月から2008年1月の間、津軽海峡を航行するフェリーに超音波流速計（ADCP）を設置し、当該海域における海流調査を実施

→ 周辺の原子力施設から放出される放射性物質の海洋拡散予測

→ 津軽暖流のメカニズムの解明

【目的】

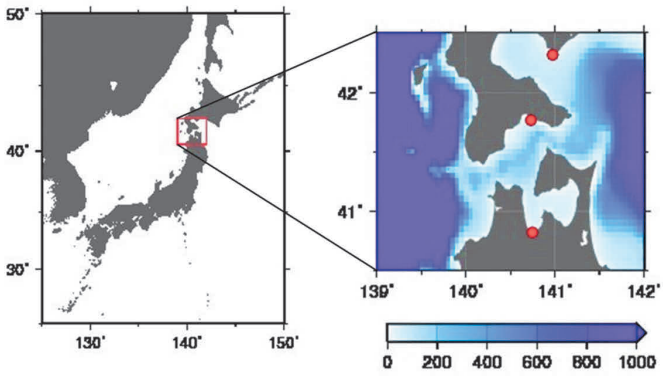
■ 蓄積した海流データを整備し、利用者が扱いやすいデータベースを構築

- データの取得

（日本海洋科学振興財団との共同研究）

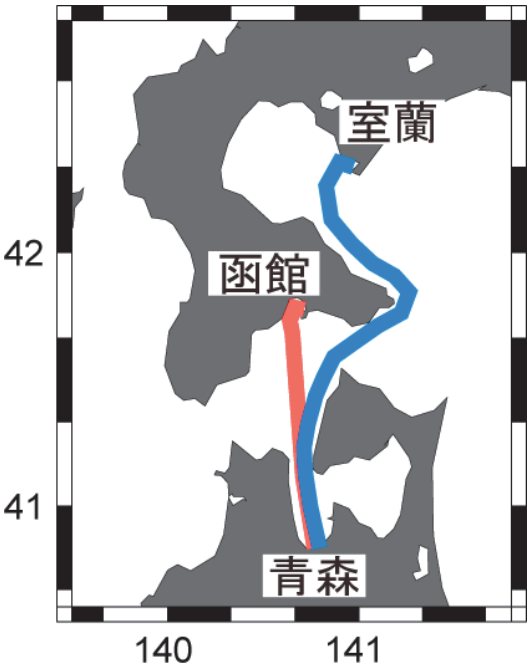
- データベースの構築

（九州大学との共同研究）



Kawamura *et al.* (2021, JAEA-Data/Code)

観測（期間・運行航路）



定期フェリーの運行航路

■定期フェリーにADCP（RDI、150kHz）を搭載し、津軽海峡の流速観測を実施

■期間：1999年10月―2008年1月

（約8年間）

■運行航路：青函と青蘭の2航路

期間	運行航路
1999.10―2000.04	青森―函館
2000.04―2005.04	青森―室蘭
2005.04―2006.09	青森―函館
2006.10―2007.08	青森―室蘭
2007.09―2008.01	青森―函館

観測（測器）

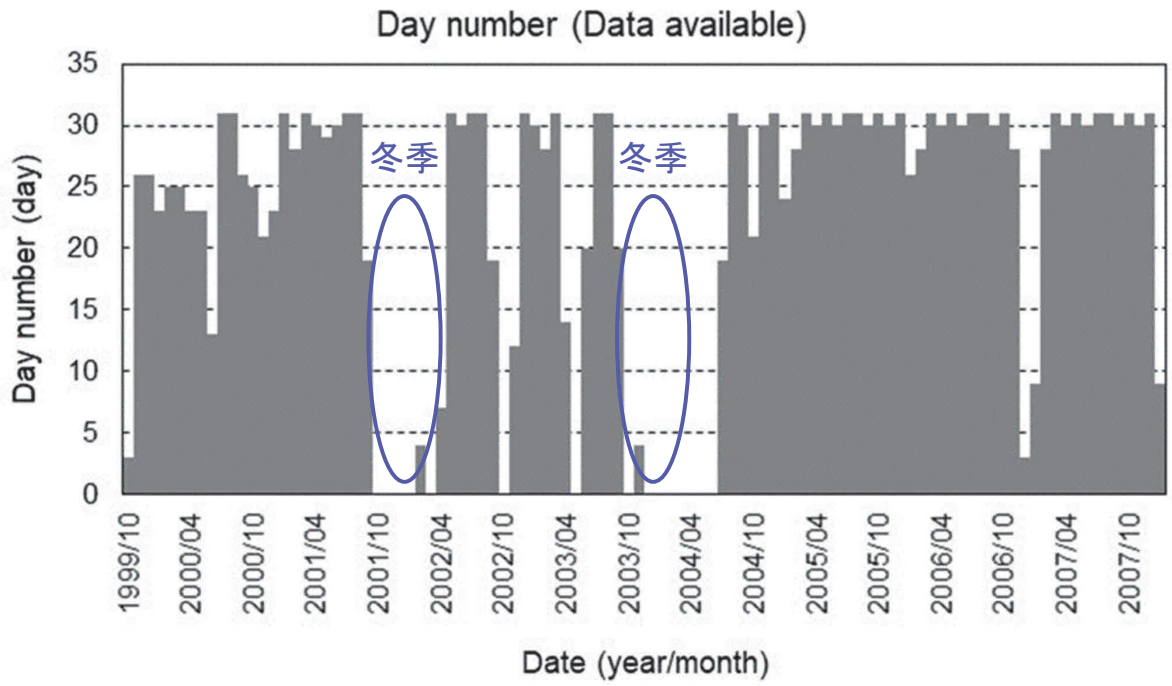
定期フェリー：びるご
（（旧）東日本フェリー所属）
（現）津軽海峡フェリー
135 m、6,706 ton

測器の概要・設置

ADCP について

- ADCP：RDI、150 kHz
- Bin長：4 m
- 測定間隔：1 min
- 設置位置：船体のほぼ中央
  水面下約5 m
- データ：船上のPCで処理・蓄積
  定期的に回収

データ取得率



Kawamura *et al.* (2021, JAEA-Data/Code)

- データ総数：2,211日分、約74%（2995日、1999年10月29日–2008年1月9日）
- 冬季にデータ取得率が低下する傾向：風の影響（船体の傾斜、泡）

海流データ

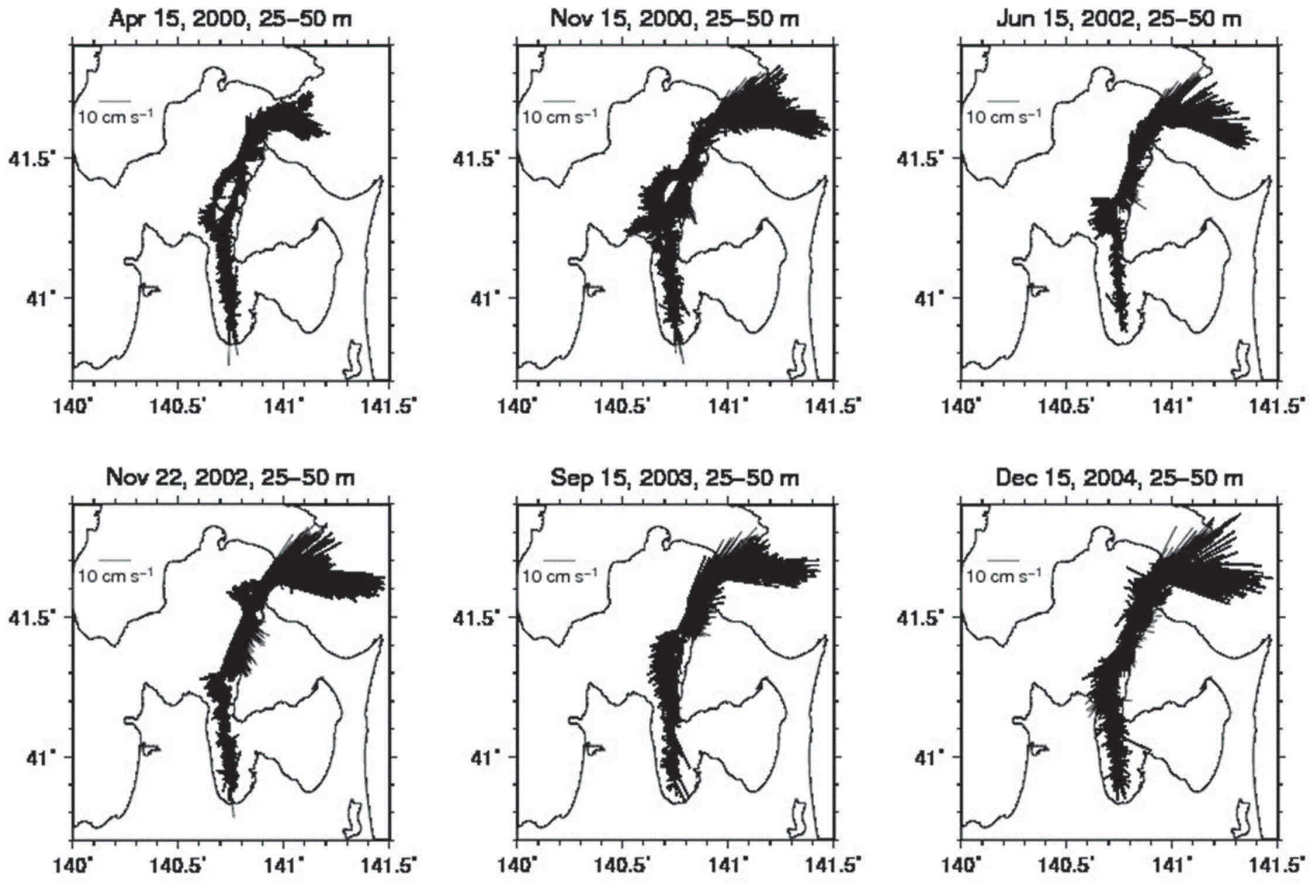
- ファイル名：YYYYMMDD.txt
- データフォーマット：Ocean Data View (ODV) spreadsheet（アスキーコード）
- カラムラベル：Cruise, Station, Type, mon/day/yr, hh:mm, Lon (E), Lat (N), Bot.Depth[m], Depth[m], QF, InstType, QF, Eastward current velocity[mm/s], QF, Northward current velocity[mm/s], QF
- 東西・南北流速のQF：0（good data）、4（questionable data）
  percent goodが75%以上

```
//Provider: Japan Atomic Energy Agency
//Format: ODV Spreadsheet
Cruise  Station Type    mon/day/yr      hh:mm   Lon(E)  Lat(N)  Bot.Depth[m]    Depth[m]        QF      InstType        QF      Eastward current velocity[mm/s] QF      Northward current velocoty[mm/s]        QF
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:29   140.6883        41.7992 0       17.4    0       CA      0       -7      0       -7      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:29   140.6871        41.7985 0       17.4    0       CA      0       -13     0       -10     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:29   140.6860        41.7977 0       17.4    0       CA      0       5       0       -10     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:30   140.6848        41.7970 0       17.4    0       CA      0       1       0       5       0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:30   140.6837        41.7962 0       17.4    0       CA      0       -12     0       -10     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:30   140.6824        41.7954 0       17.4    0       CA      0       -1      0       -6      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:30   140.6812        41.7947 0       17.4    0       CA      0       2       0       7       0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:31   140.6800        41.7939 0       17.4    0       CA      0       1       0       11      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:31   140.6788        41.7931 0       17.4    0       CA      0       1       0       -2      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:31   140.6777        41.7922 0       17.4    0       CA      0       -8      0       3       0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:31   140.6769        41.7912 0       17.4    0       CA      0       3       0       11      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:32   140.6764        41.7901 0       17.4    0       CA      0       17      0       -6      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:32   140.6759        41.7890 0       17.4    0       CA      0       -3      4       -30     4       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:32   140.6754        41.7878 0       17.4    0       CA      0       -27     0       10      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:32   140.6749        41.7867 0       17.4    0       CA      0       29      0       -33     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:32   140.6749        41.7867 0       21.4    0       CA      0       -5      0       -18     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6744        41.7856 0       17.4    0       CA      0       17      4       9       4       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6744        41.7856 0       21.4    0       CA      0       -10     0       -16     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6738        41.7845 0       17.4    0       CA      0       -11     0       26      0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6738        41.7845 0       21.4    0       CA      0       -12     0       -18     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6732        41.7833 0       17.4    0       CA      0       27      0       9       0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6732        41.7833 0       21.4    0       CA      0       8       0       -11     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6727        41.7822 0       17.4    0       CA      0       -18     0       1       0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6727        41.7822 0       21.4    0       CA      0       -28     0       5       0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6722        41.7810 0       17.4    0       CA      0       -61     4       -89     4       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:33   140.6722        41.7810 0       21.4    0       CA      0       -12     0       -36     0       0
VIRGO-AO-HA     000     B       10/29/1999      11:34   140.6717        41.7798 0       17.4    0       CA      0       -8      4       -28     4       0
```

Kawamura *et al.* (2021, JAEA-Data/Code)

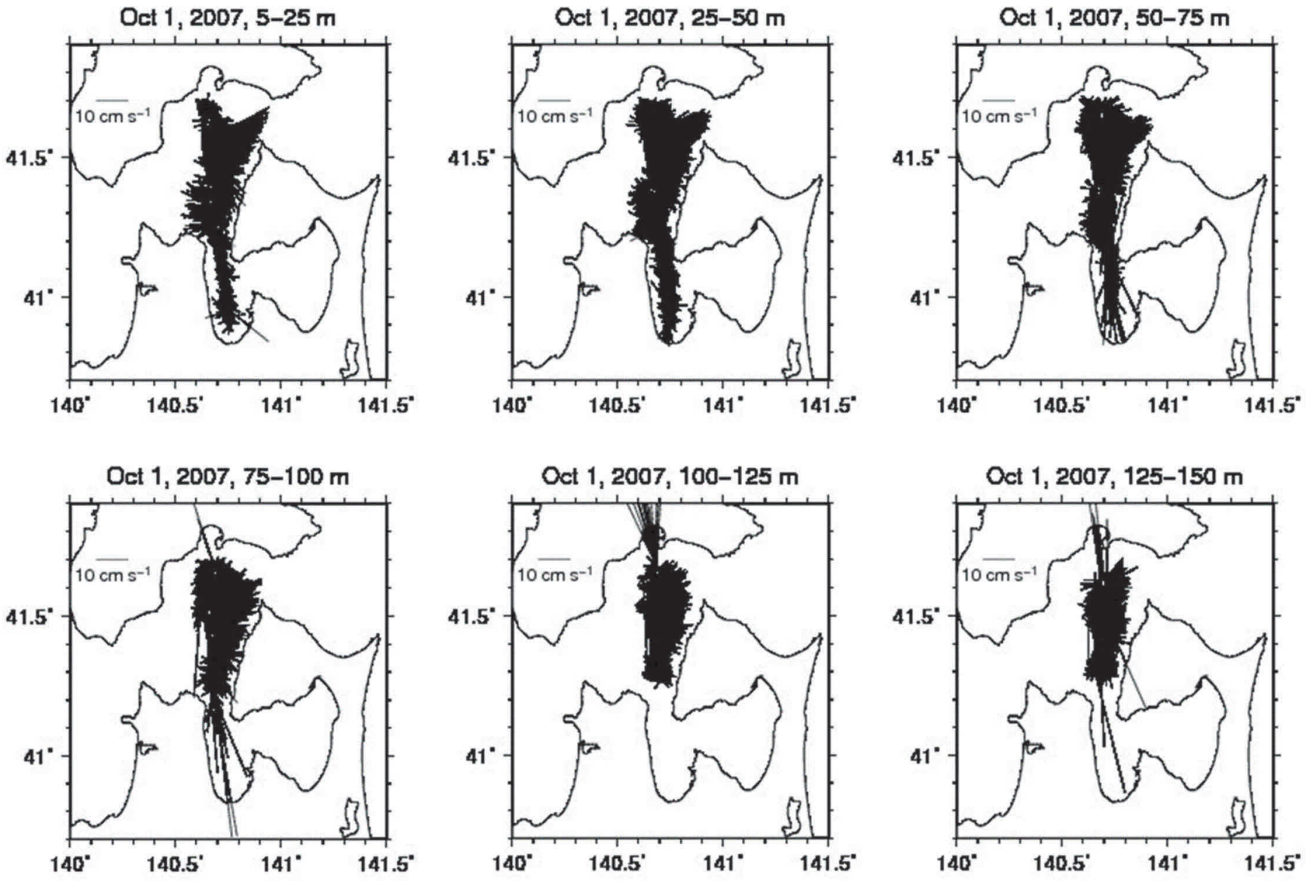
表層（25–50 m）の海流場

Kawamura *et al.* (2021, JAEA-Data/Code)



表層から深層の海流場

Kawamura *et al.* (2021, JAEA-Data/Code)



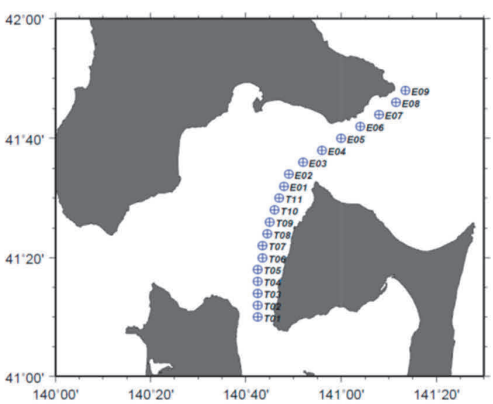
解析手法の例

■ 定点データの作成
- 領域内観測値の平均処理

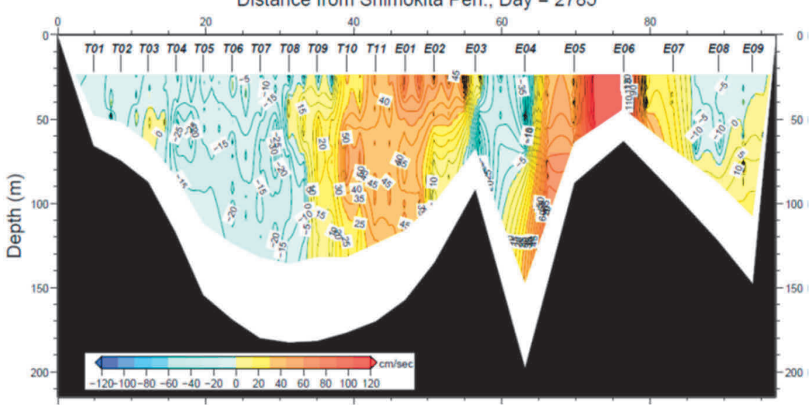
■ 異常値の除去
- 約25 mから約75%水深のデータを抽出

■ 潮汐成分の除去
- 7分潮を除去：Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2

■ 欠測値の補完
- 既存データの内挿



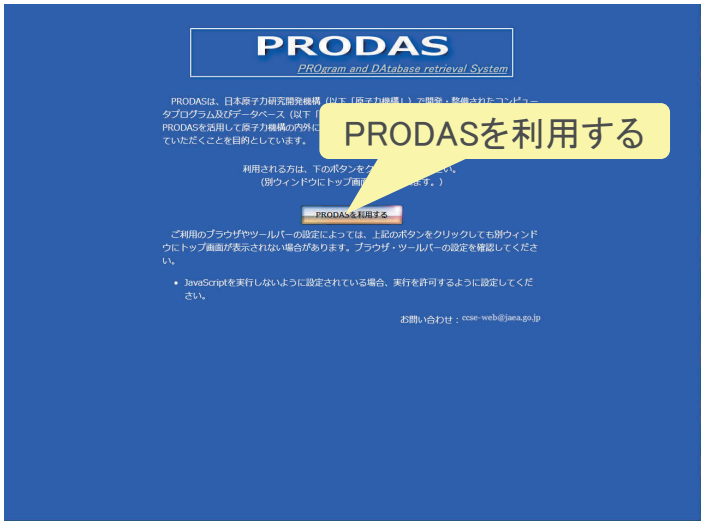
2007年8月



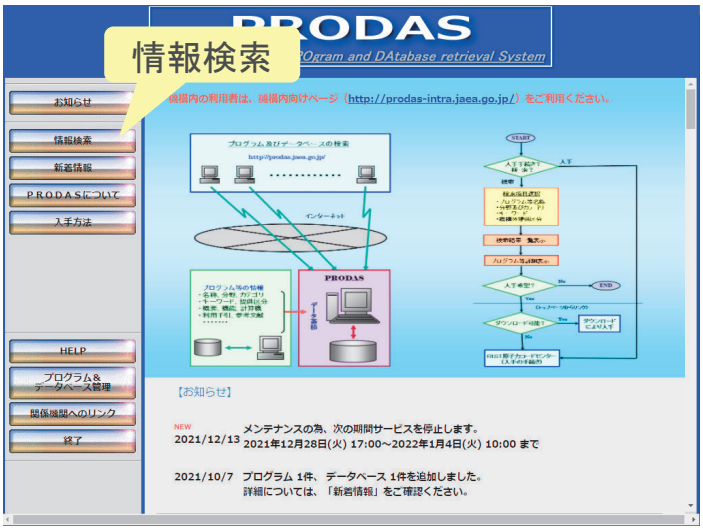
データの入手方法①

■「日本原子力研究開発機構　PRODAS」で検索

- PRODAS：PROgram and DAtabase retrieval System
- コンピュータプログラム／データベース検索システム

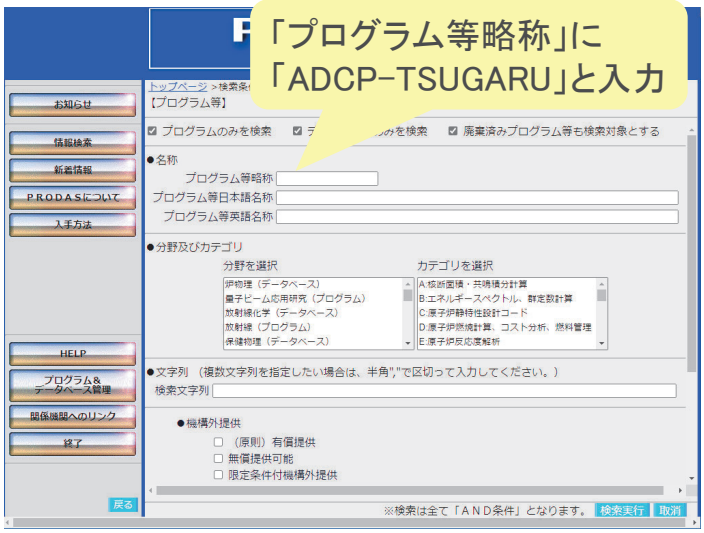


日本原子力研究開発機構のHP

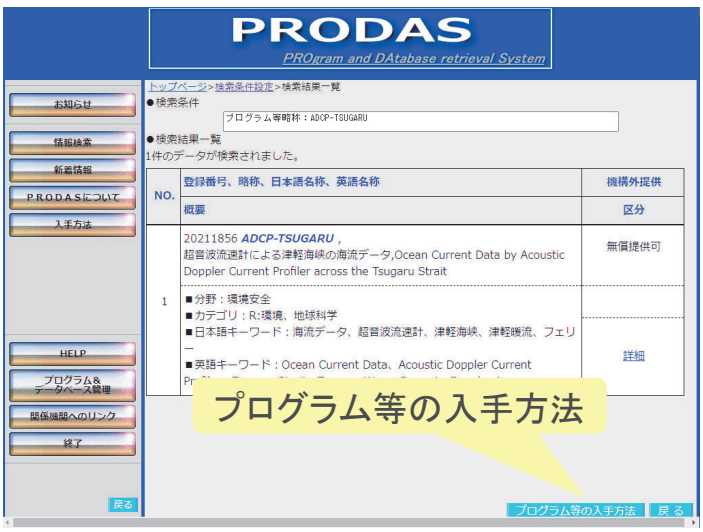


日本原子力研究開発機構のHP

データの入手方法②



日本原子力研究開発機構のHP



日本原子力研究開発機構のHP

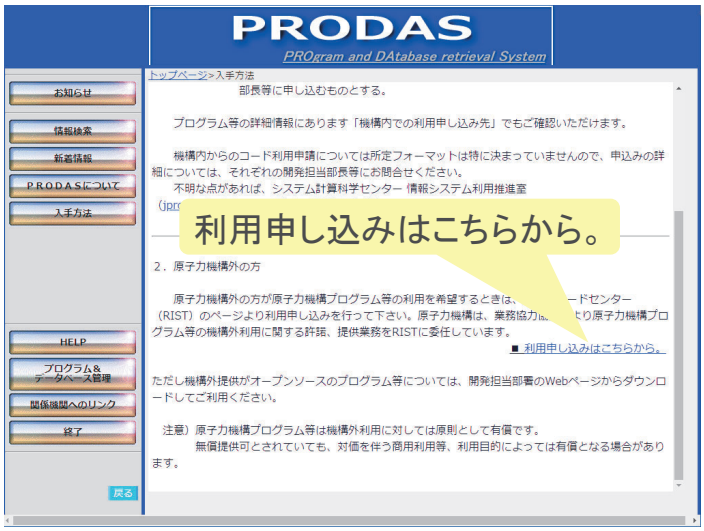
■ データベースの名称

（日本語名称）超音波流速計による津軽海峡の海流データ

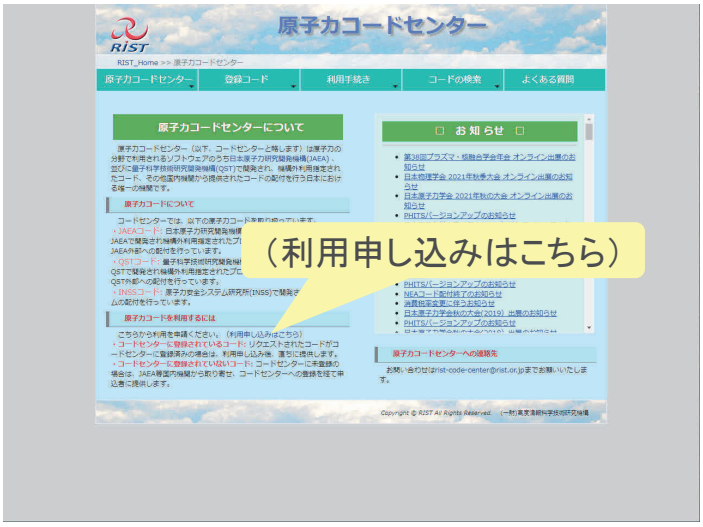
（英語名称）Ocean Current Data by Acoustic Doppler Current Profiler across the Tsugaru Starit

（略称）ADCP-TSUGARU

データの入手方法③

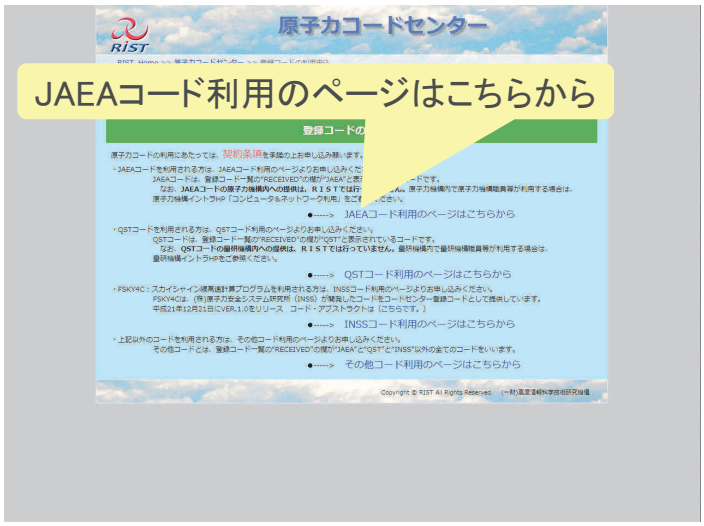


日本原子力研究開発機構のHP

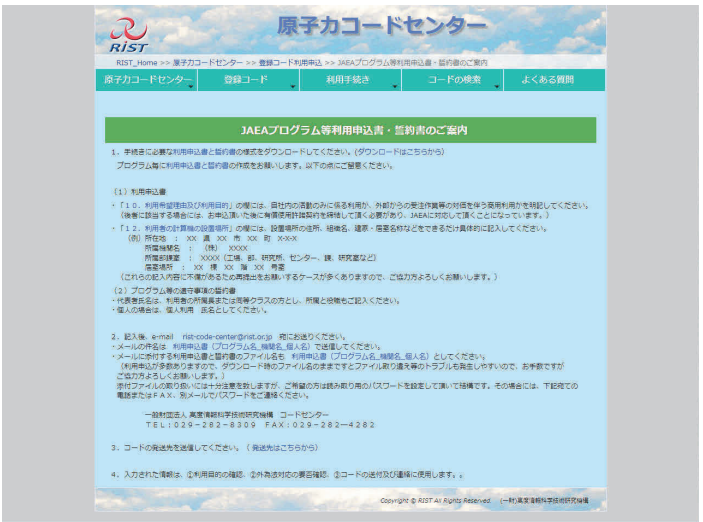


高度情報科学技術研究機構・原子力コードセンターのHP

データの入手方法④



高度情報科学技術研究機構・原子力コードセンターのHP



高度情報科学技術研究機構・原子力コードセンターのHP

申請書類をダウンロードし、メールで送付

まとめ

■ 津軽海峡を航行するフェリーに設置したADCPで測定された海流データを整備し、日本原子力研究開発機構のコンピュータプログラム／データベース検索システム（PRODAS）に登録

- 日本原子力研究開発機構外の利用者に提供可
- 準生データであるため、用途に応じた利用が可能
  （短周期変動、潮汐の解析、等）
- ODV spreadsheet形式であるため、高い利便性

本データベースは、日本原子力研究開発機構と九州大学の共同研究及び日本原子力研究開発機構と日本海洋科学振興財団の共同研究による成果である。

【期待される活用例】

- モデルの検証及び入力データ
- 津軽暖流のメカニズムの解明（対馬暖流との相関、等）

2017年9月の室戸岬東部の急潮の要因と予測不確実性について

日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会
2021年12月7日@九大応力研

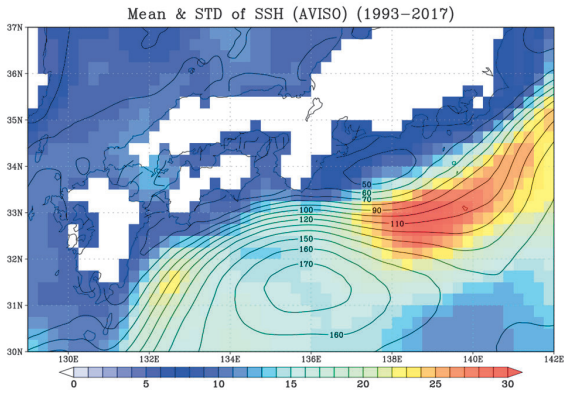
気象研究所　全球大気海洋研究部
広瀬成章・碓氷典久・坂本圭・中野英之・高野洋雄・山中吾郎

1

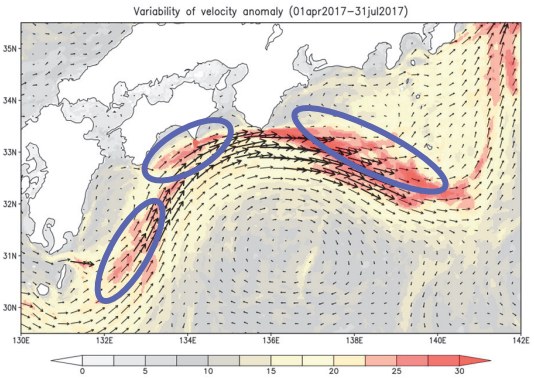
紀伊水道沖合と黒潮の関係性

紀伊水道は黒潮が重要な影響を及ぼす場所の一つ

海面高度変動(AVISO)

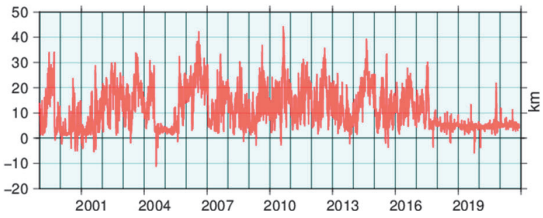


短周期流速変動
(モデルハイパス成分<15日)

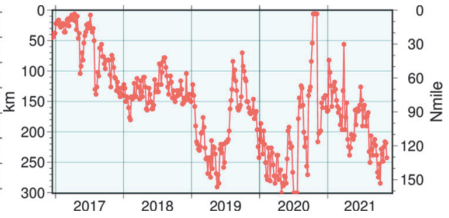


潮岬は黒潮流路(**接岸/離岸**)の重要な監視域

串本-浦神の水位差
(e.g., Kawabe, 1985)



黒潮流軸距離
(モデル50m深流速)



潮岬の黒潮接岸/離岸に対応した変動

- **接岸時**
  - 振り分け潮の発生
    - (Takeuchi et al. 1998; Nagata et al. 1999)
  - 潮岬における表層流速の加速。
    - 海底起伏上でのhydraulic control
    - (Miyama and Miyazawa, 2013, 2014)

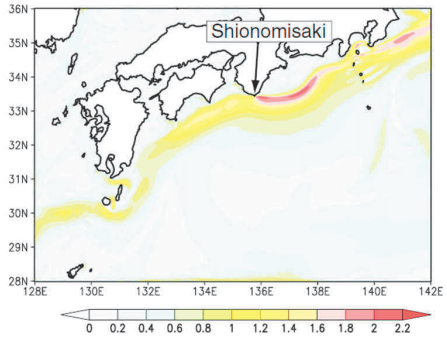


Fig. 2 (Miyama and Miyazawa, 2013)

- **離岸時**
  - 熊野灘からの低温偏差の伝播
    - (Sugimatsu and Isobe 2010, 2011)
    - 内部ケルビン波

  →大阪湾への底層からの冷水侵入(e.g., Takashi et al. 2006)の要因としての示唆

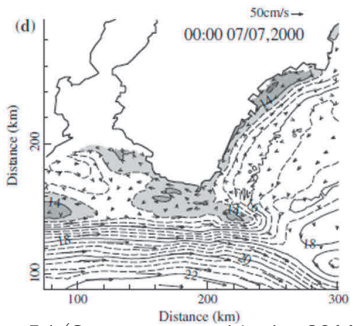


Fig. 5d (Sugimatsu and Isobe 2011)

振り分け潮

- **振り分け潮**(Kii Bifurcation Current)
  - 黒潮が紀伊半島に衝突した際の分岐流。
  - 黒潮の潮岬接岸状態に関係。
  - 紀伊水道側は、反時計回りの反流発生(Nagata et al., 1999)。
  - 福田ら(2002)によるモデル実験:
    - 1/18度の解像度では、観測(7割)に比べて発生頻度が過小(1割)。

    →**高解像度化の必要性**を指摘。

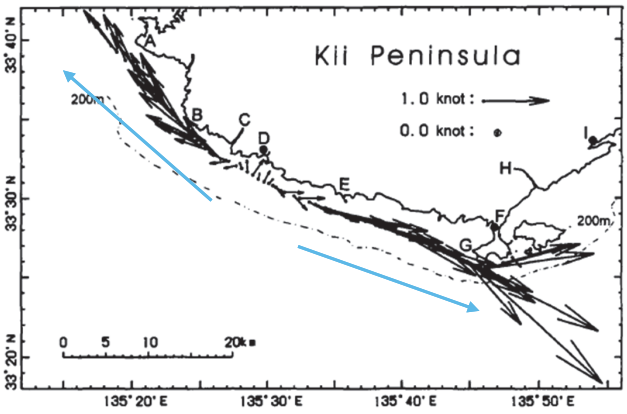


Fig.1 Takeuchi et al. 1998

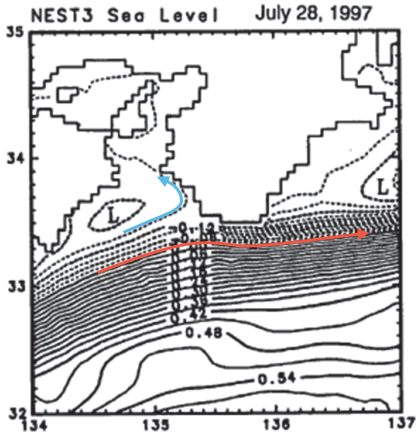
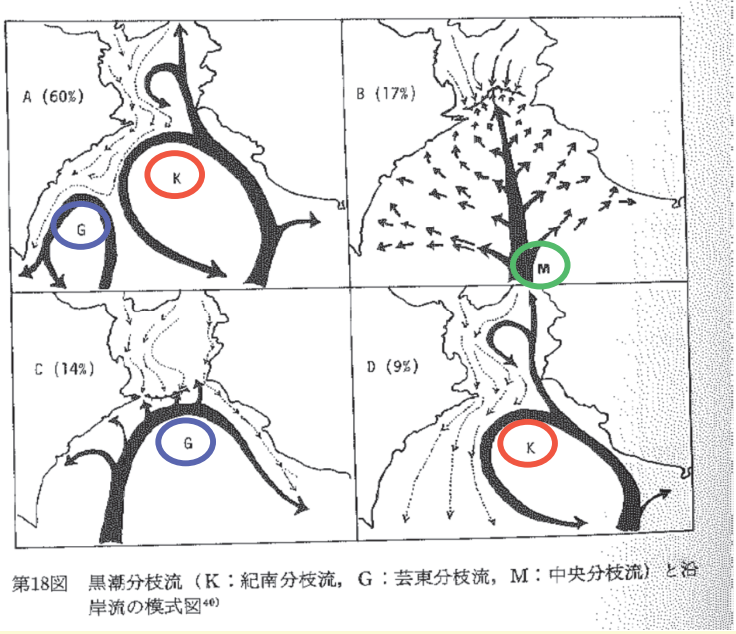


Fig.4右下 福田ら(2002)

紀伊水道沖合の流動場

- 日本沿岸全国海洋誌(1992) (元は殿谷,徳島水試, 1979)



第18図　黒潮分枝流（K：紀南分枝流，G：芸東分枝流，M：中央分枝流）と沿岸流の模式図[40]

3つのパターン

1. 紀南分枝流~振り分け潮
2. 芸東分枝流
3. 中央分枝流

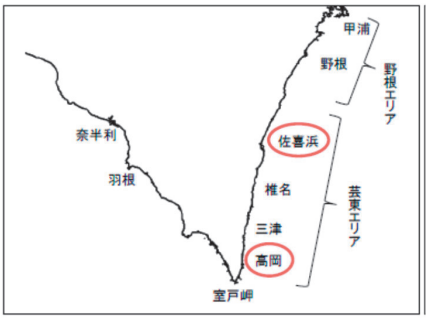


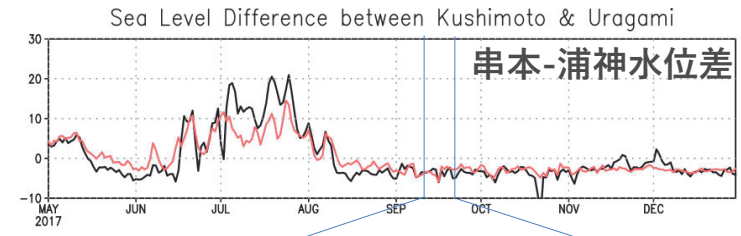
図1 潮流計を設置した芸東エリア主要大敷網

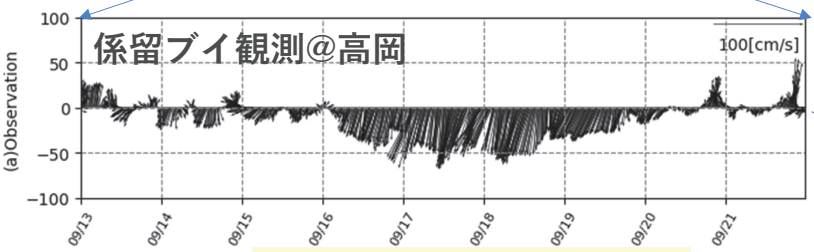
- 近年、高知県では急潮対策の流速観測を実施。
- **室戸岬東部(高岡)**では、現在も**急潮をモニタリング**中。
- **急潮事例を蓄積**してきている(猪原, 2019, 高知水試)。

急潮:
1knot(~50cm/s)以上の流速

2017年の大蛇行発生直後の急潮

- 2017年9月に黒潮大蛇行が発生
  - ✓潮岬から黒潮は離岸傾向。
  - ✓9月中旬に室戸岬東部で急潮発生。
  - ✓猪原(2018)は、中央分枝流と分類





強い南南西の流れを観測

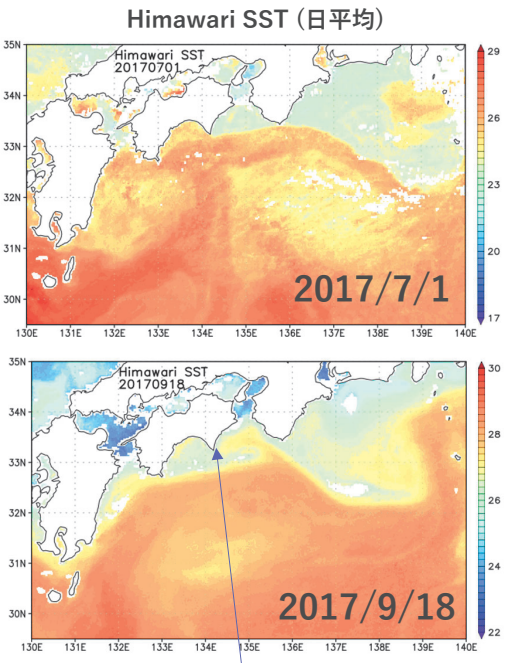
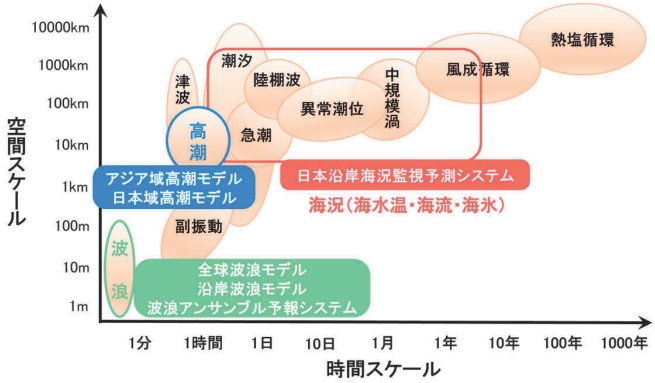


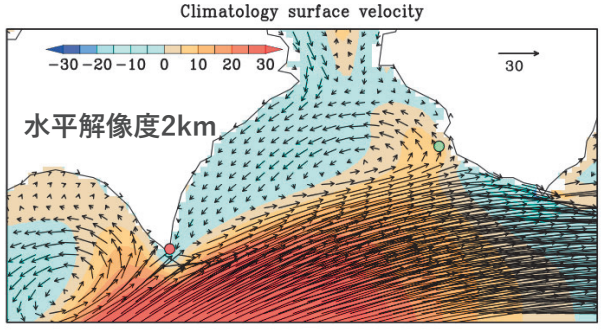
図1 潮流計を設置した長東エリア主要大敷網

現業海洋システムの発展

- 近年、高解像度海洋モデルのリアルタイム運用が増加。
  - – **水平解像度1~2km + 同化システム**
  - – JCOPE-T(Varlamov et al. 2015); DREAMS-C(Hirose et al. 2017); MOVE-JPN(Hirose et al. 2019)
- MOVE-JPN: 気象庁の新しい海況システム
  - – 日本沿岸海況監視予測システム(**JPNシステム**)
  - – **急潮・暖水波及・異常潮位**等の監視・予測も可能する。

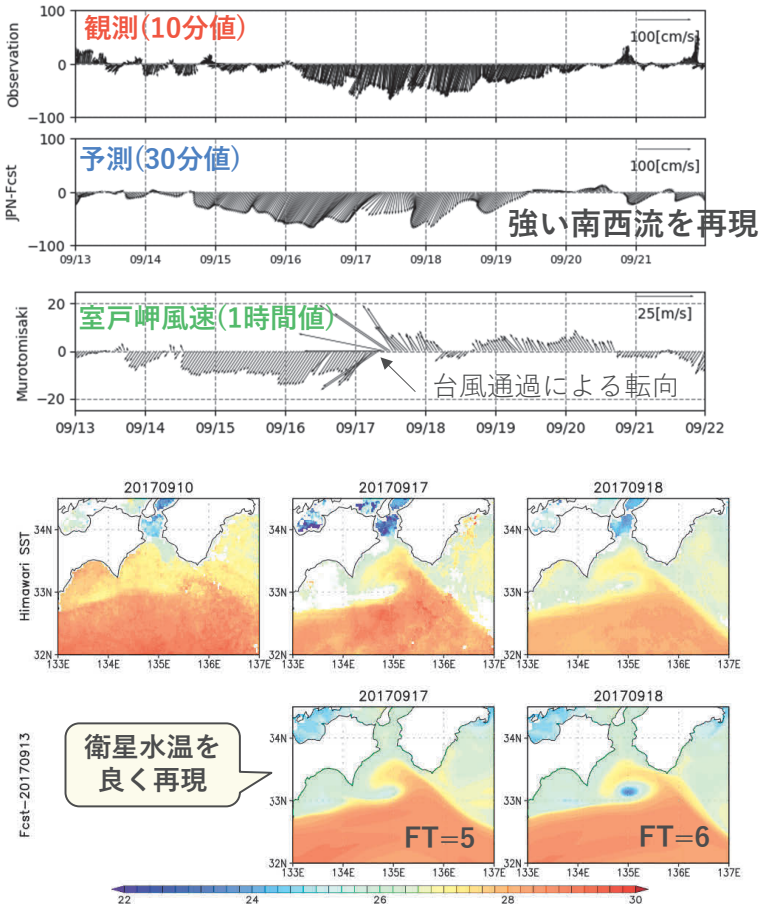


海洋現象の時空間スケールと気象庁の数値予報モデルの予測対象の図 (気象庁HP)

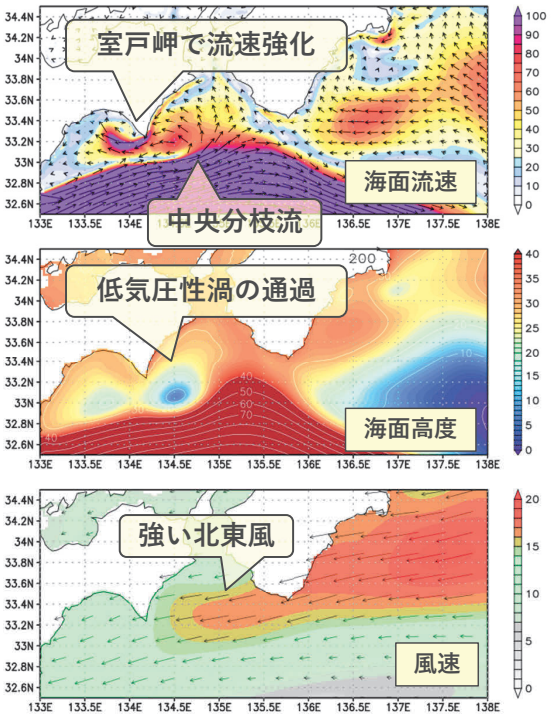


JPN解析値10年気候値の海面流速
(カラー：南北流速)

2017年9月のケース(中央分枝型)



JPNシステム予測：
2017/9/16 (init: 20170913)



8

本研究の目的

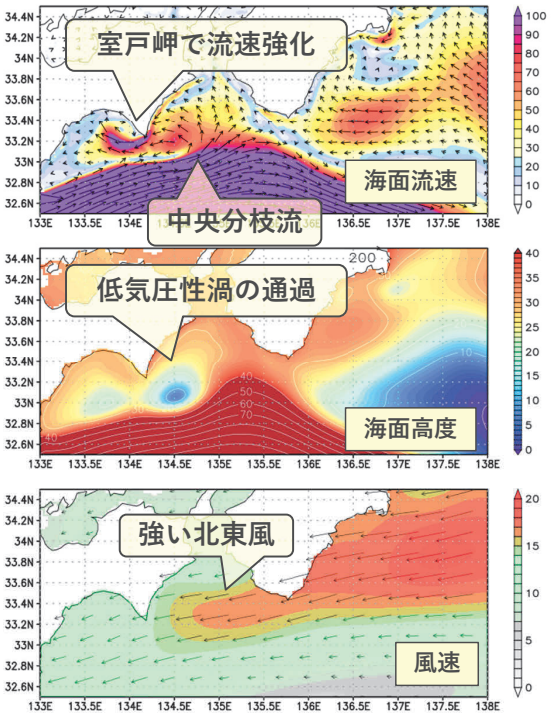
- **室戸岬東部の急潮**に焦点を当てる
  - ➢ 対象: **2017年9月中旬**の事例
  - ➢ JPNシステムの予測は概ね再現

物理プロセス及びメカニズムの理解が必要。

要因：

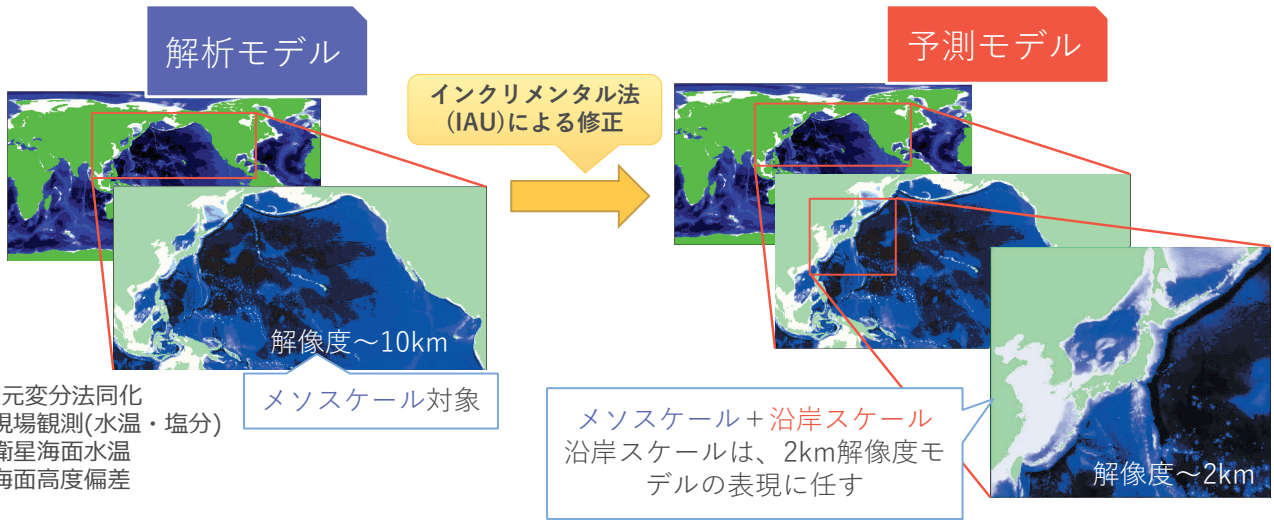
- **風の影響(吹送流)**
  - エクマン輸送による沿岸水位上昇
    →風気候値実験による感度調査
- **黒潮の影響**
  - 低気圧性の渦の東進に伴う反流

JPNシステム予測：
2017/9/16 (init: 20170913)



9

日本沿岸海況監視予測システム(JPNシステム)



4次元変分法同化
- 現場観測(水温・塩分)
- 衛星海面水温
- 海面高度偏差

	NPR	JPN
モデル	MRI.COM Ver 4.0	MRI.COM Ver. 4.6
座標系	自由海面, z*座標, 極座標	
水平分解能	(1/11°~1/5°)×(1/10°~1/6°)	1/33°×1/50°(~2km)
鉛直分解能	2-700m (60 levels, deeper than 8m)	
潮汐	なし	主要8分潮 (Sakamoto et al. 2013)
海面気圧	なし	海面気圧の押し下げ、吸い上げあり

10

実験設定

NPR-4DVAR
JPN-IAU

20170903　20170913

IAU実験 Hirose et al., (2019)

初期値作成

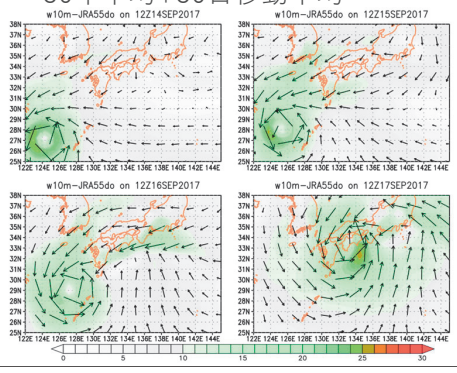
JPN-Fcst(30日)

予測実験(JRA55-do)

IAU期間: 5日
外力:
- 風・海面気圧、 海面熱フラックス (JRA55-do, Tsujino et al., 2018)
- 河川流入(JRA-55+CaMaFlood, Suzuki et al., 2018)
- NPR解析値: IAU実験と同じ外力で駆動

風気候値予測実験(WClim)

- JRA55-doの10m風及び、海面気圧を平滑化
- 30年平均+30日移動平均



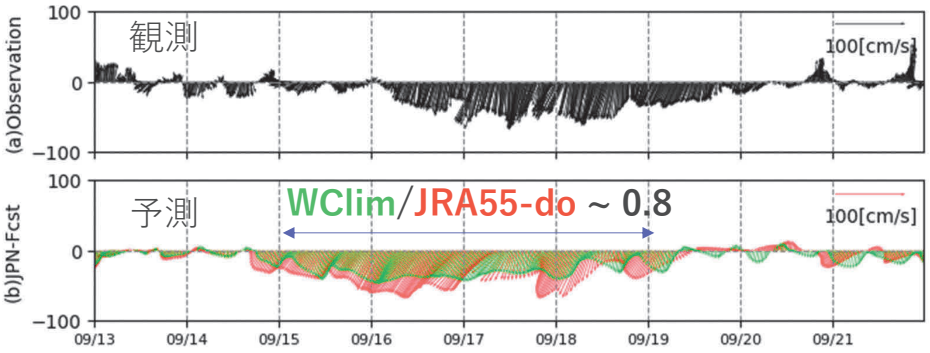
9.14~9.17
台風18号が東シナ海から西日本を縦断
9.15~9.16
日本南岸は気圧の谷場による東風

JRA55-doとWClimの実験間比較

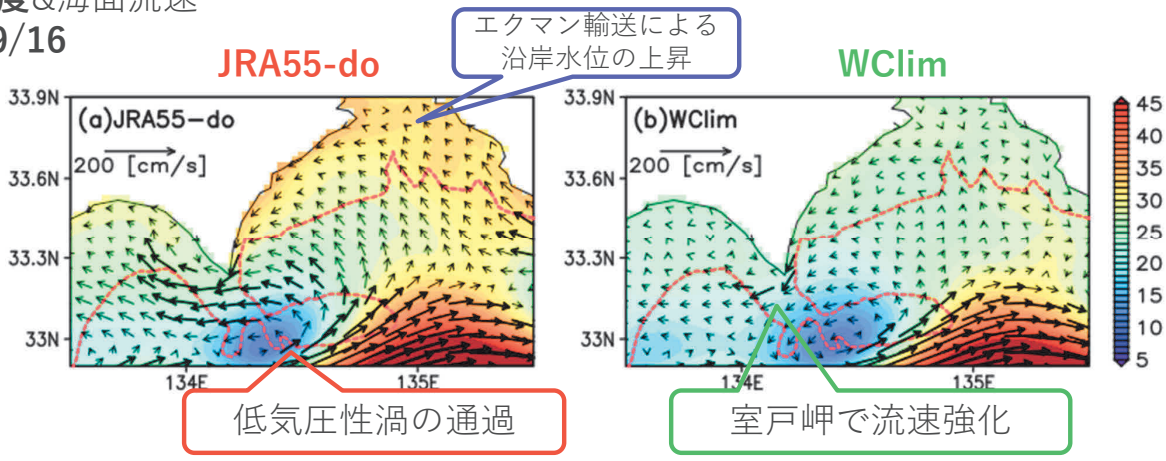
海面流速@高岡
- 観測
- JRA55-do
- WClim

↓

- 位相がやや早いが、予測は観測を概ね再現
- 風の寄与は限定的



海面高度&海面流速
2017/9/16



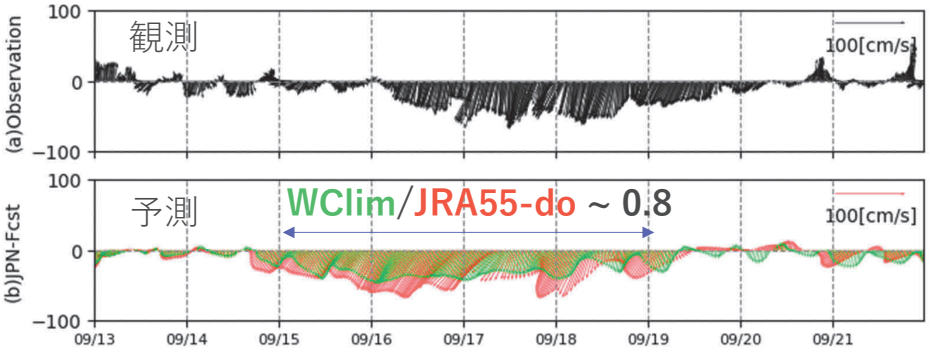
→黒潮の変動に伴う影響を示唆

JRA55-doとWClimの実験間比較

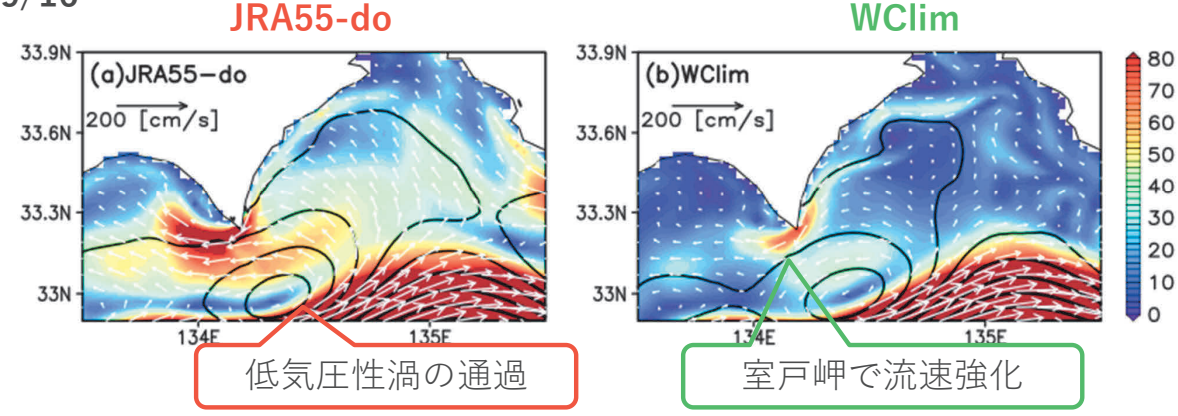
海面流速@高岡
- 観測
- JRA55-do
- WClim

↓

- 位相がやや早いが、予測は観測を概ね再現
- 風の寄与は限定的

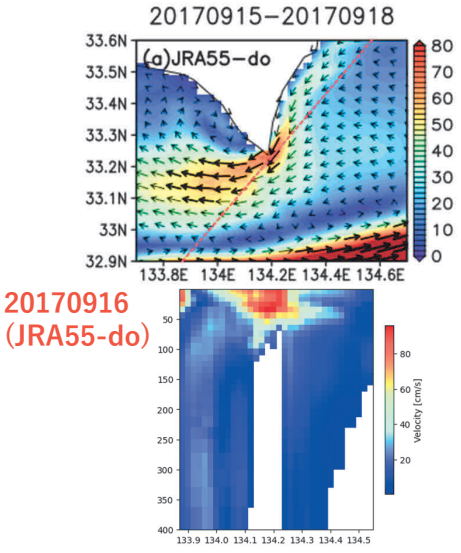


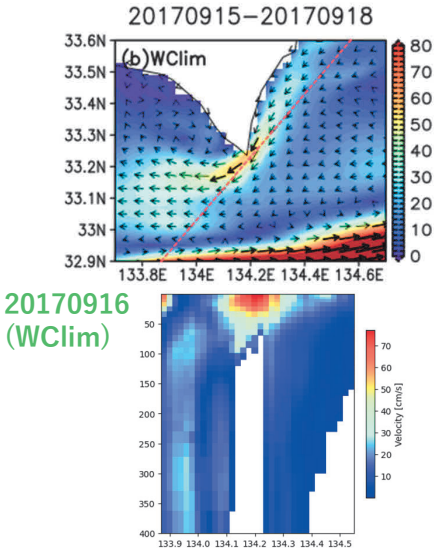
海面高度&**海面流速**
2017/9/16

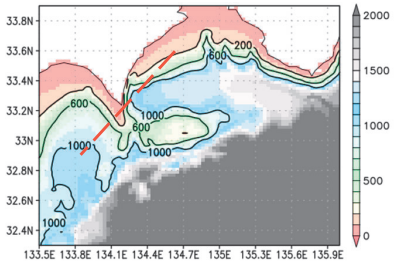


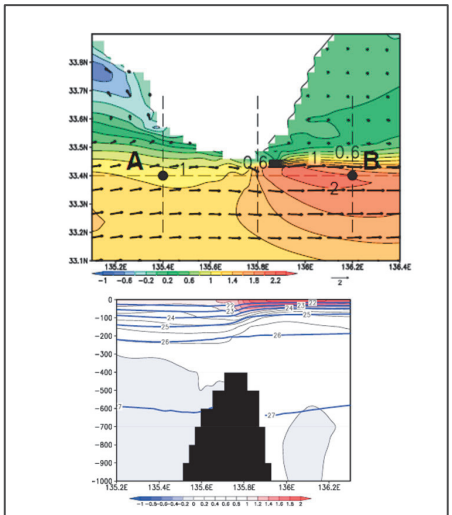
→黒潮の変動に伴う影響を示唆

室戸岬の流速加速









Miyama and Miyazawa (2013)
上: Fig.4, 下 Fig.8

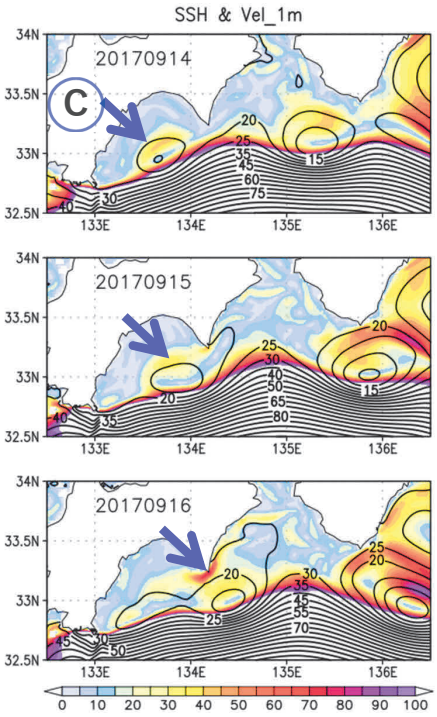
室戸岬で**表層流速の加速**

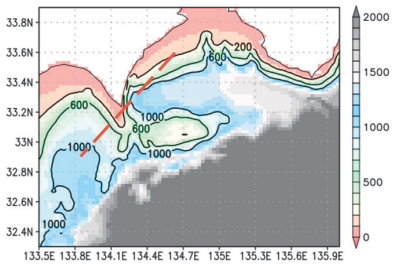
- 土佐湾(下流)で紀伊水道(上流)より強い流れ
- 潮岬における表層流速加速に類似
  - (Miyama and Miyazawa, 2013)
- **海底起伏を越えた下流側で流速強化**
  - Hydraulic controlで解釈

※室戸岬では、潮岬ほど流軸が安定しない

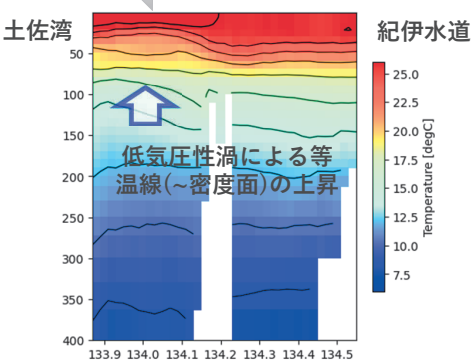
低気圧性渦の発達

海面高度(コンター)・海面流速(カラー)の時間発展
(風気候値実験)





流下方向



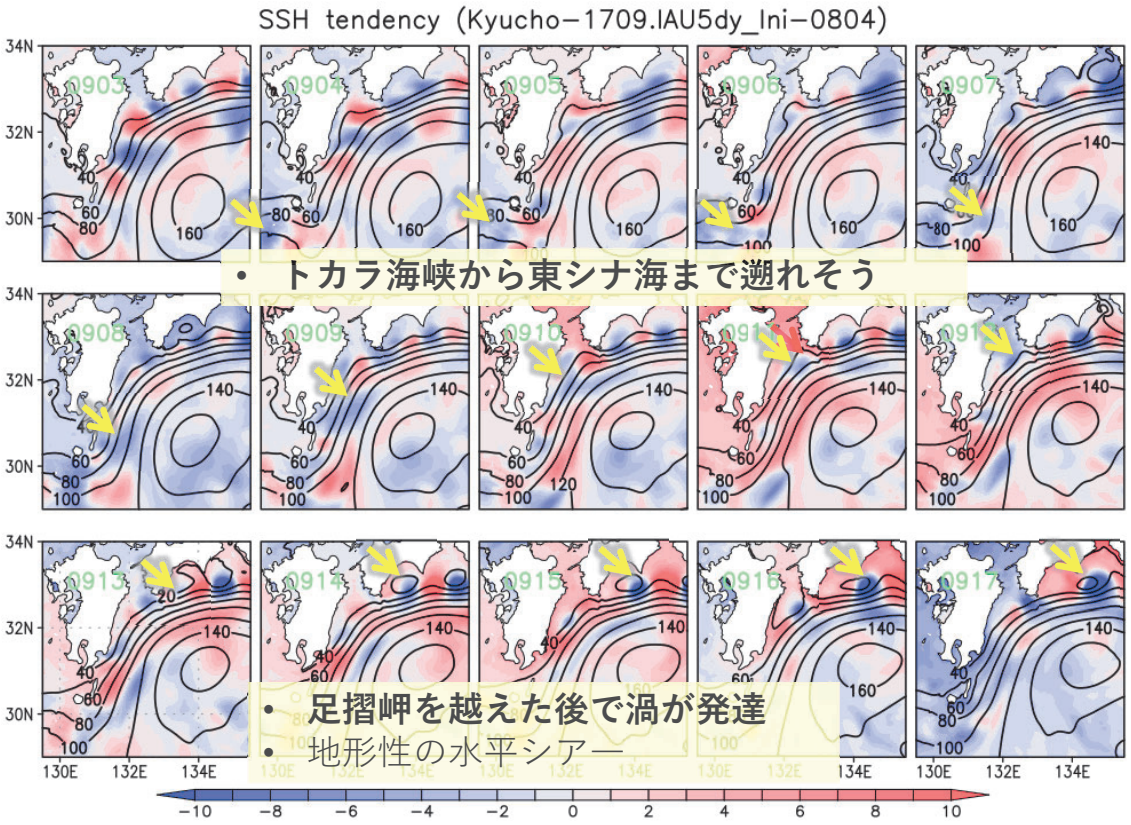
20170915(WClim)
水温断面

低気圧性渦©が発達しながら、室戸岬を通過

15

低気圧性渦の発生源

9.3 ~ 9.17低気圧性擾乱の追跡(IAU実験+JRA55-do)
(前日差の負偏差を追跡)

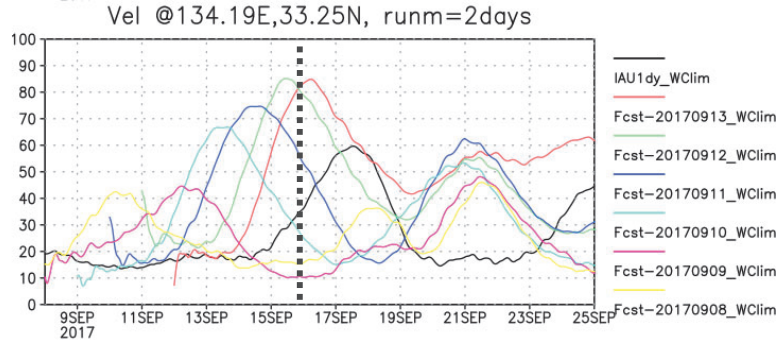


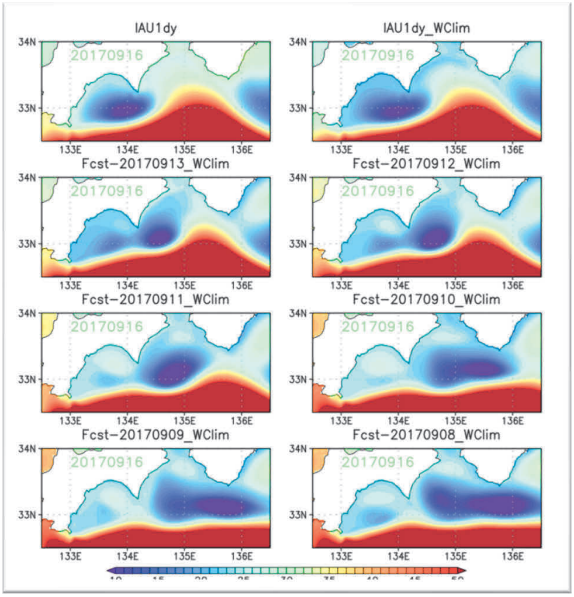
- **トカラ海峡から東シナ海まで遡れそう**
- **足摺岬を越えた後で渦が発達**
- 地形性の水平シア―

小規模渦・擾乱の予測

- 異なる初期値で同じ小規模渦・擾乱を予測できるか？
  – 類似した表現→予測可能性が高いと言えそう。

1日毎に初期値を遡った風気候値の予測実験。



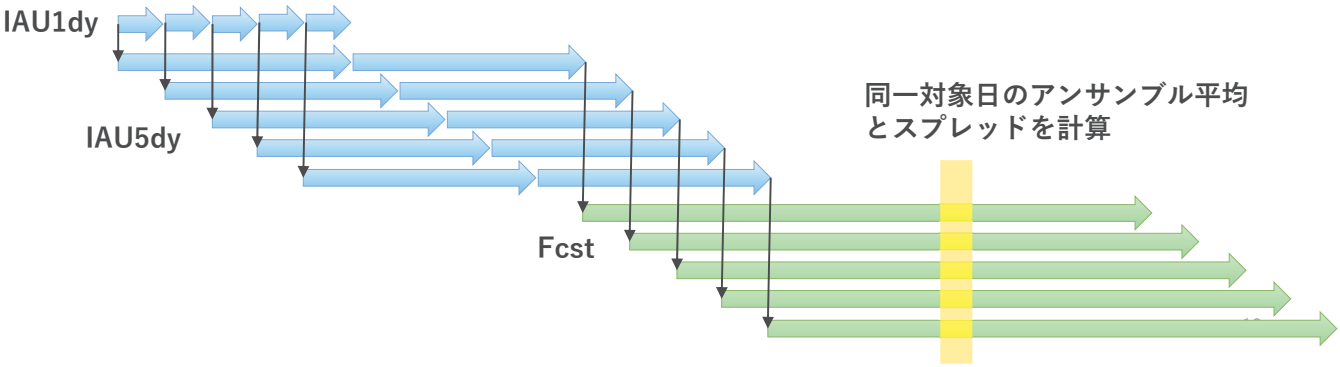


- 室戸岬での流速強化は共通している
- ただし、
  - 古い初期値は低気圧性渦が先行。
  - 小規模擾乱の表現にバラツキあり。

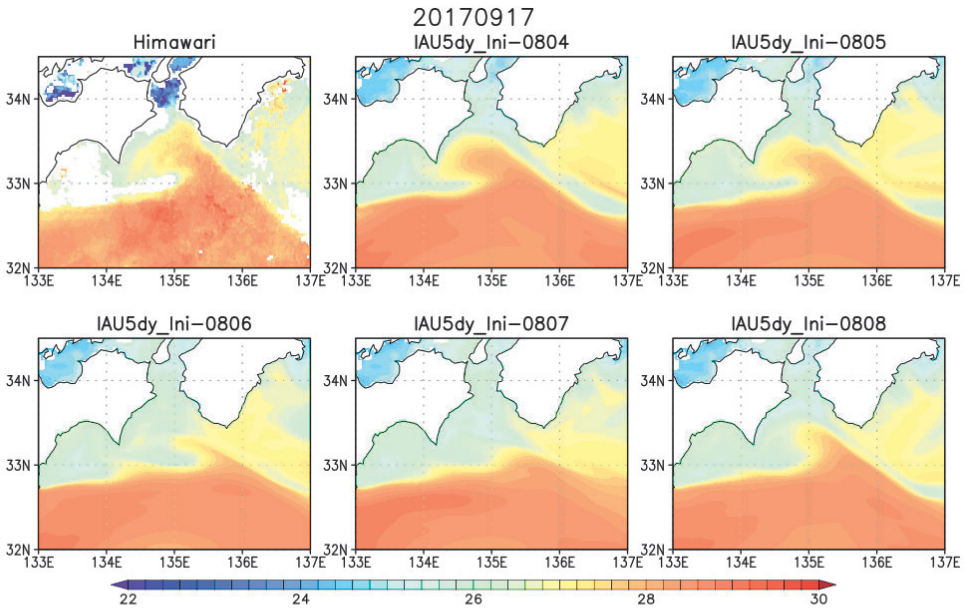
予測の不確実性についてアンサンブルスプレッドで評価してみる

アンサンブルの作成

- アンサンブルの評価方法
  - **LAF: Lagged Average Forecast**
  - (現業ルーチンは毎日11日予報を実行)
- 解析値(IAU実験, 7メンバー)
  - 5日IAU実験をずらして、1日違いの予測初期値を作成
    - » IAU1dy, IAU3dy
    - » IAU5dy_{Ini-0804, Ini-0805, Ini-0806, Ini-0807, Ini-0808}
- 予測値(予測実験, 6メンバー)
  - » Ini-0804_20170908, Ini-0805_20170909, Ini-0806_20170910,
  - » Ini-0807_20170911, Ini-0808_20170912, Ini-0809_20170913



解析値間の表現の違い(SST)



解析値の段階で、5メンバー間で小規模擾乱の振る舞いが異なる。

JPNシステムの特徴

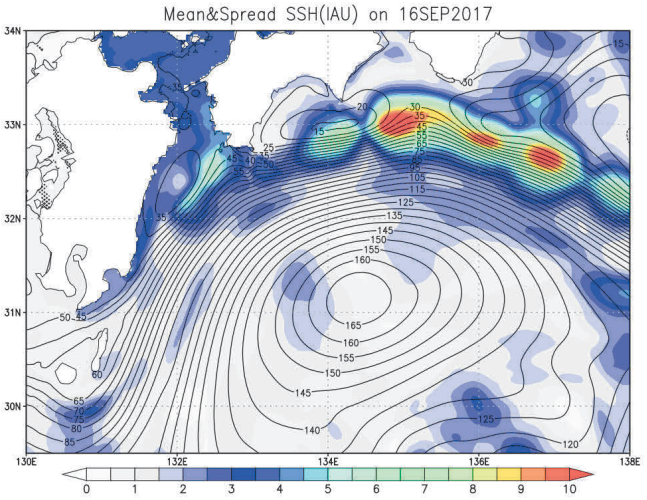
- IAU法によりメソスケールを拘束
- メソ以下の変動は2kmの表現に任せる。
  - ⇔メソ以下の変動の拘束が弱い。

19

解析値(N=7)のスプレッド

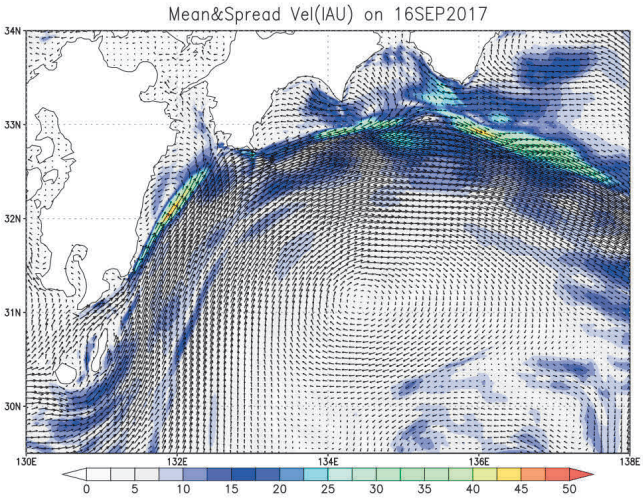
- スプレッド(カラー)・アンサンブル平均(コンター)

海面高度



- 勾配の強い所に集中
- 小規模渦のタイミングの違い
- 再循環域は小さいスプレッド

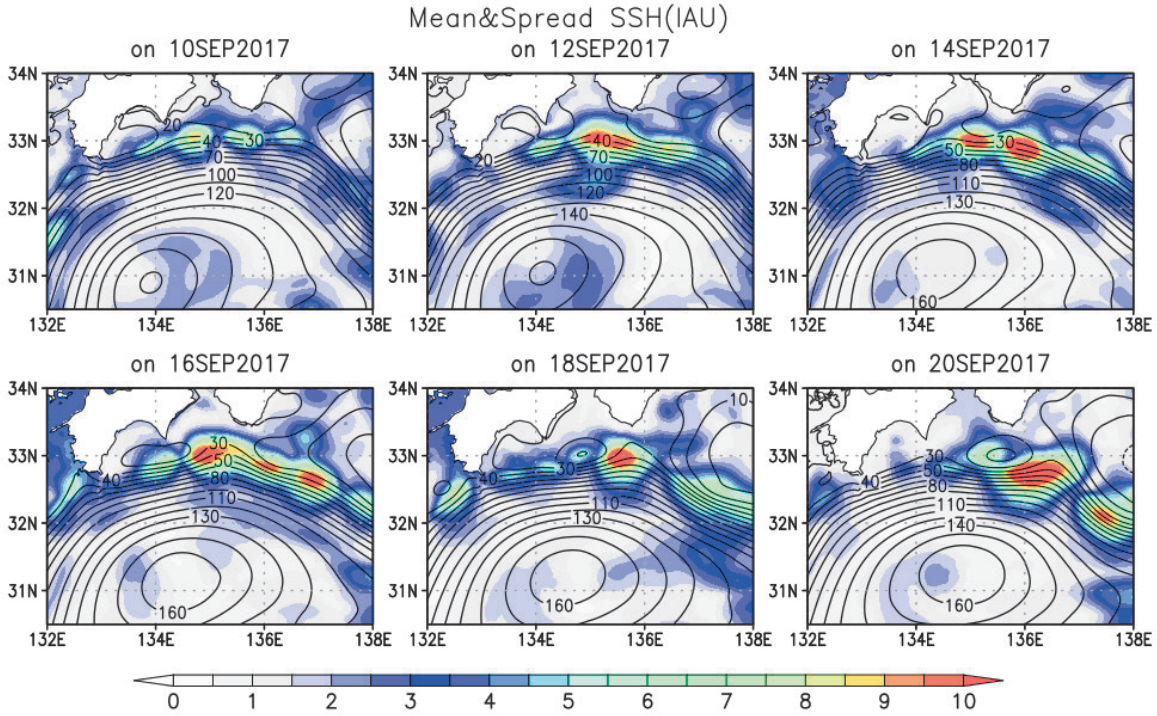
海面流速



- 黒潮内側域でスプレッドが大きい
- 室戸岬から土佐湾にかけても大

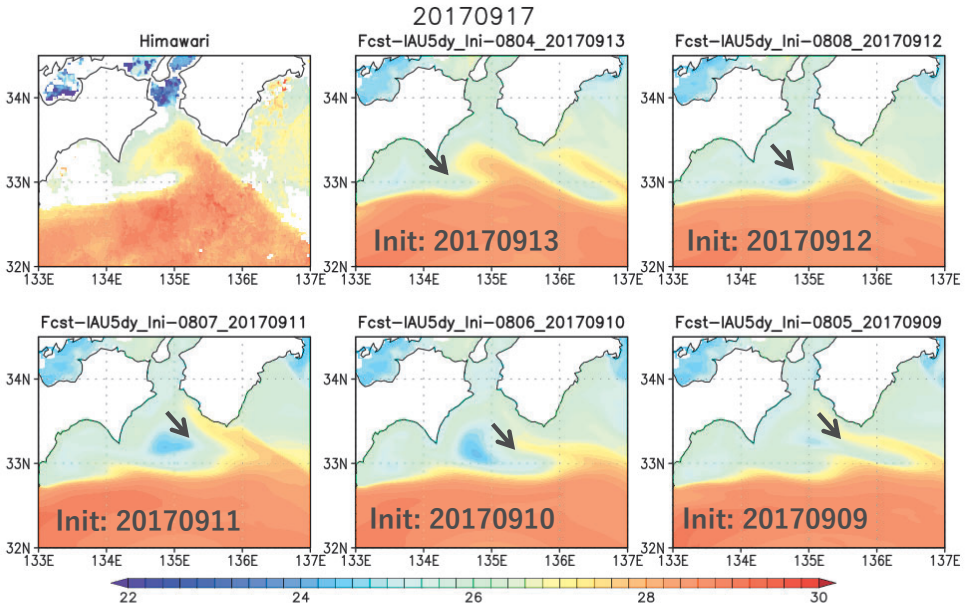
海面高度スプレッドの時間変化

- スプレッド(カラー)・アンサンブル平均(コンター)



- 足摺岬、室戸岬の下流側でスプレッドが大きい
- スプレッドのサイズ～100km

予測値間の表現の違い(SST)

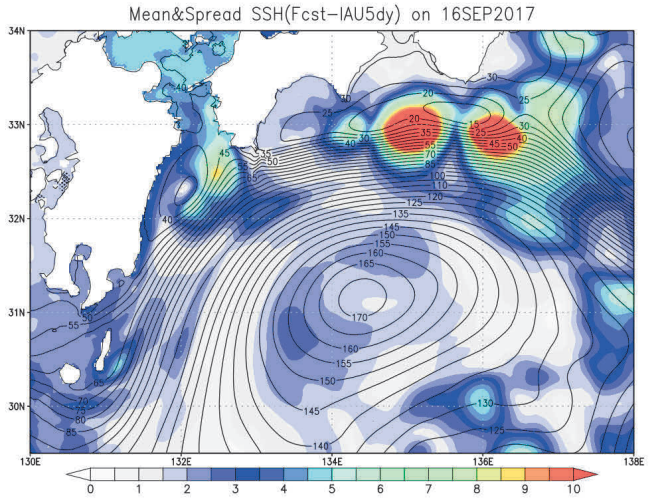


予測値の方が、解析値のよりも小規模擾乱の振る舞いにばらつき。
古い初期値の方が、小規模擾乱が下流に先行

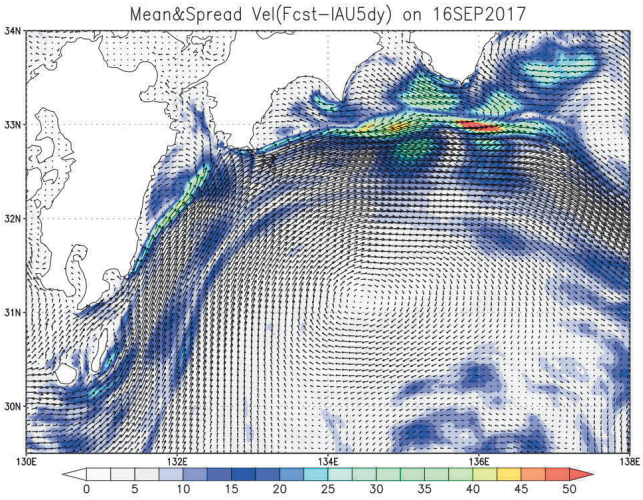
予測値(N=6)のスプレッド

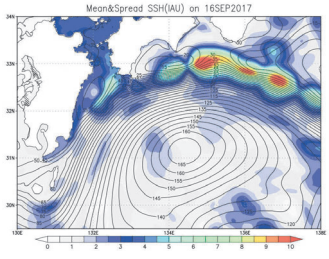
- スプレッド(カラー)・アンサンブル平均(コンター)

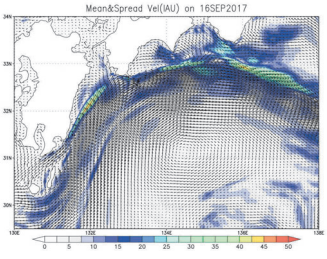
海面高度



海面流速

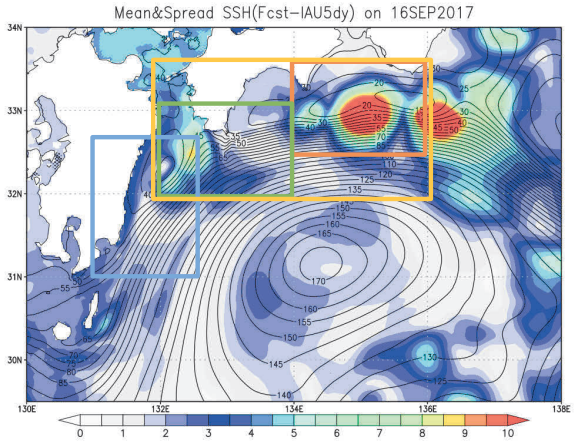


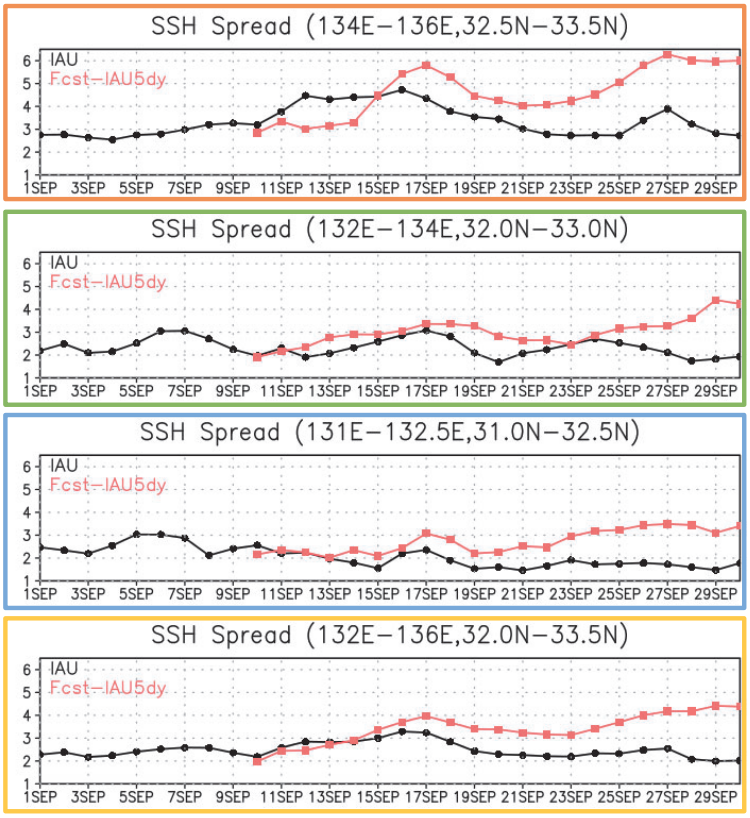




- FT=4~9
- 解析値の空間分布と類似
- やや予測の方がスプレッド大

スプレッドの予測値vs解析値





紀伊水道南部

- 9.12辺りから解析スプレッド大
- 9.16で予測スプレッド急増
- 低気圧性の渦の振る舞いの違い

9.16辺りまでは、解析と予測のスプレッドは同程度

予測の不確実性について

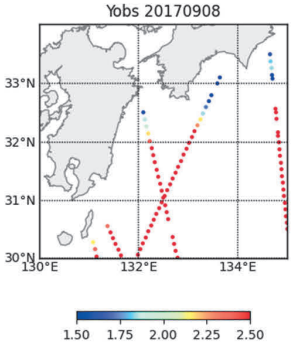
- 解析値の作成方法によって小規模擾乱の表現が異なる。
  - IAUで抑えるのはメソスケールが中心であるシステム設計に由来
- 予測値は小規模擾乱に伴うスプレッドが拡大
  - それでも、予測1週間前後は解析値と同等のスプレッド。

結果、現状として、

- 上流から伝播してくる小規模擾乱の制御は難しい
- 小規模擾乱を捉える観測網もまだ不十分。
- (現業も想定して)アンサンブルから有効な情報を抽出する

今後の改善項目

- JPNモデルの直接同化の開発
- 小規模スケールに合わせた同化手法開発



まとめ

- **2017年9月に室戸岬東部で発生した急潮**
  - ✓黒潮大蛇行の直後の潮岬からの離岸→振り分け潮以外の要因。
  - ✓室戸岬周辺を台風が通過し、低気圧性渦が通過するタイミング。

- **急潮の要因**
  - ✓JPNシステムで概ね再現
  - ✓風気候値実験→標準実験の流速の8割を説明→風の寄与は限定的
  - ✓室戸岬で表層流速の加速→海底起伏上で流速強化
  - ✓黒潮内側域の東進する低気圧性渦の発達。

- **予測の不確実性**
  - ✓小規模擾乱の表現にバラツキ。
  - ✓足摺岬~室戸岬の下流側でスプレッドが増大
  - ✓システム高度化(直接同化・小規模スケール)が今後の課題

潮汐モデルの精度検証のためのダイアグラム

坪野@電中研

背景（潮汐）

- 沿岸（湾）において，卓越している場合が多い．
- 沿岸の工学設計や水産で重要となる場合がある．
- 潮汐流の大きさが，鉛直混合に影響を与えることが知られている(Large et al., 1994; Jayne and St. Laurent, 2001)．結果フロントの位置も影響を与える(Simpson and Hunter, 1974)．
- 北太平洋クラスのモデルにおいても，潮汐が重要(e.g. Nakamura and Awaji, 2004)な役割を持ち，潮汐を含んだモデルが出ている(Schiller and Fiedler, 2007; Arbic et al., 2010; Sakamoto et al., 2013)．
- 全球海洋潮汐モデルも(Egbert and Erofeeva, 2002).
- どのモデルも，観測と比較してモデルのパラメータを推定したり，検証している．

背景：潮汐観測との比較

- １周期平均誤差を比較する場合が多い(Andrew et al., 1995; Fok et al, 2010; Wang et al. 2012; Sakamoto et al., 2013; Stammer et al., 2014; Cummins and Thupaki, 2018)
- 調和定数との違いを比較する場合もある(Dupont et al., 2005; Wang et al., 2021).
- 図化では，散布図やヒストグラムがある(Dupont et al., 2005; Schiller and Fiedler, 2007; Easton et al., 2012; Stammer et al., 2014; Pringle et al., 2018).
  - 分かりにくい場合がある．
  - 大きさの散布図，位相の散布図？
- 円筒座標のものがある．（Dupont et al., 2005）

目的：ダイアグラム（円筒座標）

- 調和定数を円筒座標に記載.
- テイラーダイアグラム（Taylor, 2001）

- たくさんの調和定数（湾内のレーダ観測された流速，潮位）にも対応できるといい.
- 準振動にも適用する.

基本

- $f^o(t) = a_0^o(t) + \sum_{i=1}^{M}\left(\mathrm{x}_i^o \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^o \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right)$と$f^c(t) = a_0^c(t) + \sum_{i=1}^{M}\left(\mathrm{x}_i^c \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^c \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right)$
- 1周期のRMSD（ Andrew et al., 1995; Fok et al, 2010; Wang et al. 2012; Cummins and Thupaki, 2018 ）
- $RMSD_i = \left[\frac{1}{L_i}\int_0^{L_i}\left\{\left(\mathrm{x}_i^c \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^c \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right) - \left(\mathrm{x}_i^o \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^o \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right)\right\}^2 dt\right]^{1/2} = \left[\frac{1}{2}\{(\mathrm{x}_i^c - \mathrm{x}_i^o)^2 + (\mathrm{y}_i^c - \mathrm{y}_i^o)^2\}\right]^{1/2}$
- 1周期の相関

- $R_i = \frac{\frac{1}{L_i}\int_0^{L_i}\left(\mathrm{x}_i^c \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^c \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right)\times\left(\mathrm{x}_i^o \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^o \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right)dt}{\frac{1}{L_i}\left\{\int_0^{L_i}\left(\mathrm{x}_i^c \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^c \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right)^2 dt\right\}^{1/2}\times\left\{\int_0^{L_i}\left(\mathrm{x}_i^o \cos\frac{2\pi t}{L_i} + \mathrm{y}_i^o \sin\frac{2\pi t}{L_i}\right)^2 dt\right\}^{1/2}} = \frac{\mathrm{x}_i^c\mathrm{x}_i^o + \mathrm{y}_i^c\mathrm{y}_i^o}{(\mathrm{x}_i^c\mathrm{x}_i^c + \mathrm{y}_i^c\mathrm{y}_i^c)^{1/2}(\mathrm{x}_i^o\mathrm{x}_i^o + \mathrm{y}_i^o\mathrm{y}_i^o)^{1/2}}.$

ここで，z= x + j yと置くと，相関は

- $Z'^{c} = \frac{z^{c}|z^{o}|}{z^{o}} = x'^{c} + j\,y'^{c},\ Z'^{o} = \frac{z^{o}|z^{o}|}{z^{o}} = x'^{o}$
- Z^{c} and Z^{o} の内積は，$|Z^{c}||Z^{o}|\cos(\theta^{c})$，なので，$\cos(\theta^{c})$ は the Pearson correlation coefficient, Rここで，θ^{c}は両者の位相差

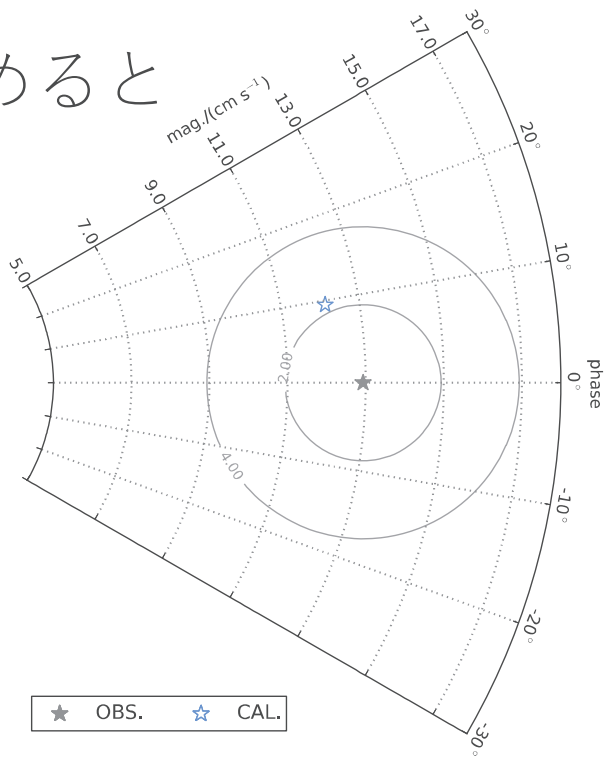
θ^{c}	±10	±18.2	±20	±30	±31.8	±36.9	±45.6	±53.1	±60
R	0.98	0.95	0.94	0.87	0.85	0.8	0.7	0.6	0.5

ここで，z= x + j yと置くと，Z'^{c}とZ'^{o}の距離Eは

- $Z'^{c} = \frac{Z^{c}|Z^{o}|}{Z^{o}} = x'^{c} + j\,y'^{c},\ Z'^{o} = \frac{Z^{o}|Z^{o}|}{Z^{o}} = x'^{o}$
- $E^{2} = |Z'^{c}|^{2} + |Z'^{o}|^{2} - 2|Z'^{c}||Z'^{o}|\cos(\theta^{c})$ ＜＝これはTaylor diagram でも出た余弦定理，計算と観測の距離を相関で引けばよい．
- $E^{2} = (x'^{c} - x'^{o})^{2} + (y'^{c})^{2}.$
- $E = \sqrt{2}\,RMSD$
- ここから，x,yを円筒座標系に描いて，観測からの距離を書けば，Taylor diagram と似た絵となる．

ダイアグラムをまとめると

- 青：計算，黒：観測
- 位相と振幅が分かる．
- 青と黒の距離が$E = \sqrt{2}\,RMSD$
- 計算は観測よりも振幅が小さい
- 計算は観測よりも位相が10度遅れている．

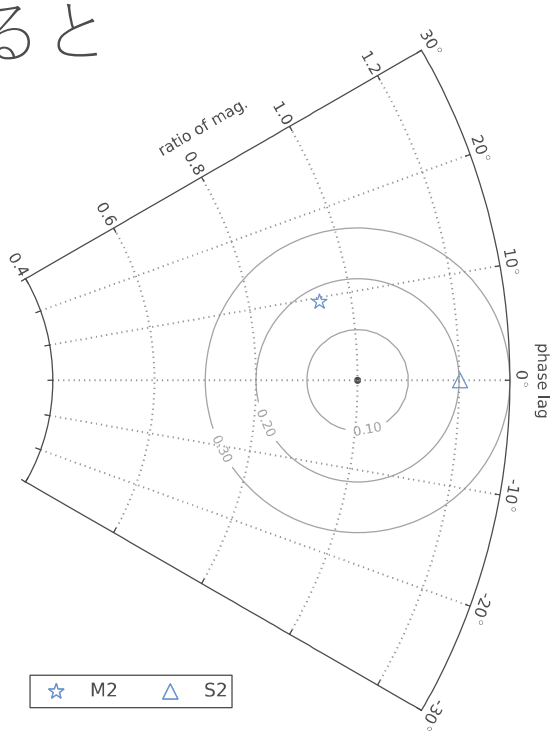


たくさんの観測結果がある場合，計算結果/観測結果：比

- $Z^{"c} = \frac{Z^c}{Z^o} = x^{"c} + j\,y^{"c},\ Z^{"o} = \frac{Z^o}{Z^o} = 1$
- ド・モルガンの法則：振幅が比となり，位相は減ずる．
- なので，相関は変わらない（位相差は変わらない．）
- 距離は，観測に対する比となる．$E_n{}^2 = \left(\frac{x_i^c}{|z_i^o|} - 1\right)^2 + \left(\frac{y_i^c}{|z_i^o|}\right)^2$
- Fok et al (2010) and Wang et al. (2012)が似た解析をしている．

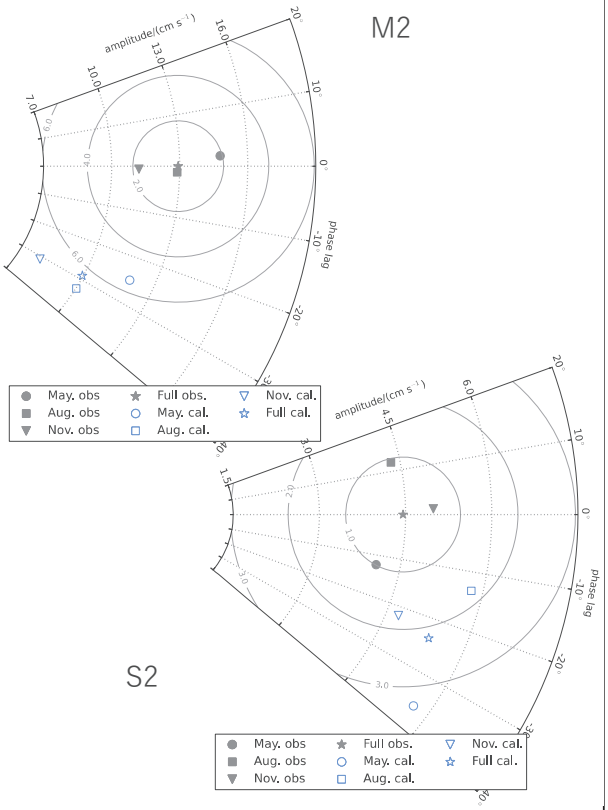
ダイアグラムをまとめると

- 青：計算，黒：リファレンス
- （1，0）がよい.
- 位相と振幅比が分かる.
- 青と黒の距離が比の$E = \sqrt{2}\,RMSD$
- 計算の散らばり具合.
- 三角は振幅が大きい，星は位相が遅れている.



適用例（数値計算）

- 境界にTPXO6の結果を与えたROMSの結果と観測された流速のM2，S2を比較した.
- 5，8，11月に15日間だけから4分潮を計算した（三角，丸，四角）．＋ギャップ付きの全区間で4分潮を計算した（★）
- M2は振幅が小さく，早めにピーク.
- S2は振幅がちょい大きく，早めのピーク
- ばらつきは，15日間しかないから.
- ばらつき具合は観測・計算ともによい.

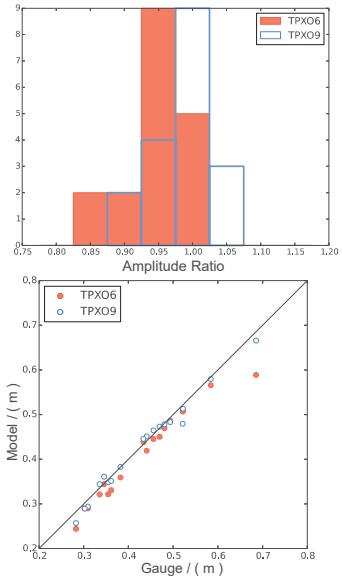


適用例：TPXO6とTPXO9

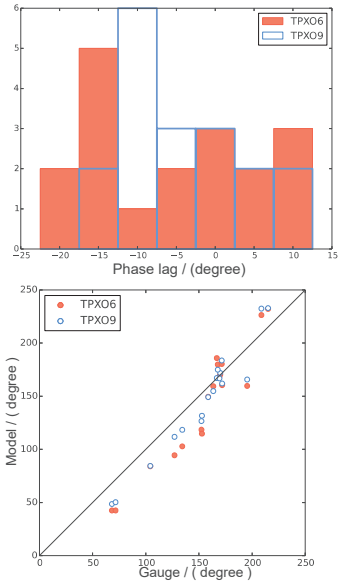
(Egbert and Erofeeva, 2002)

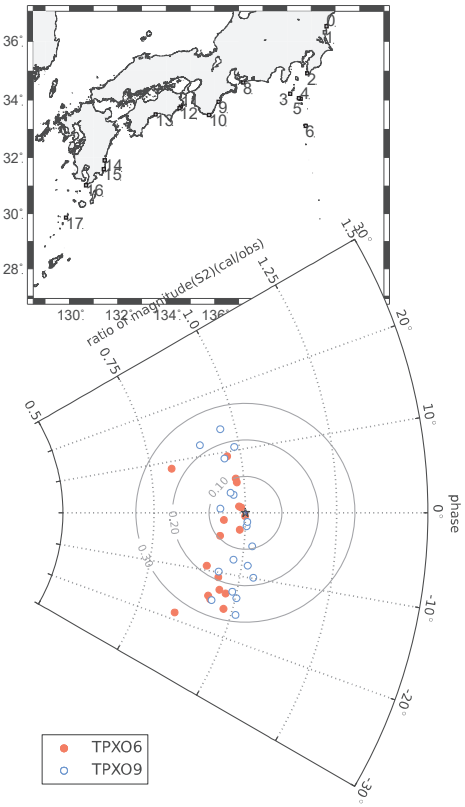
- ヒストグラムと散布図

振幅



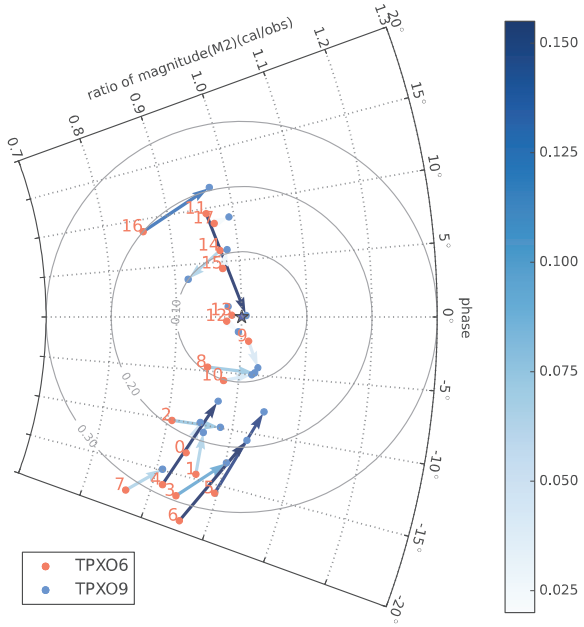
位相



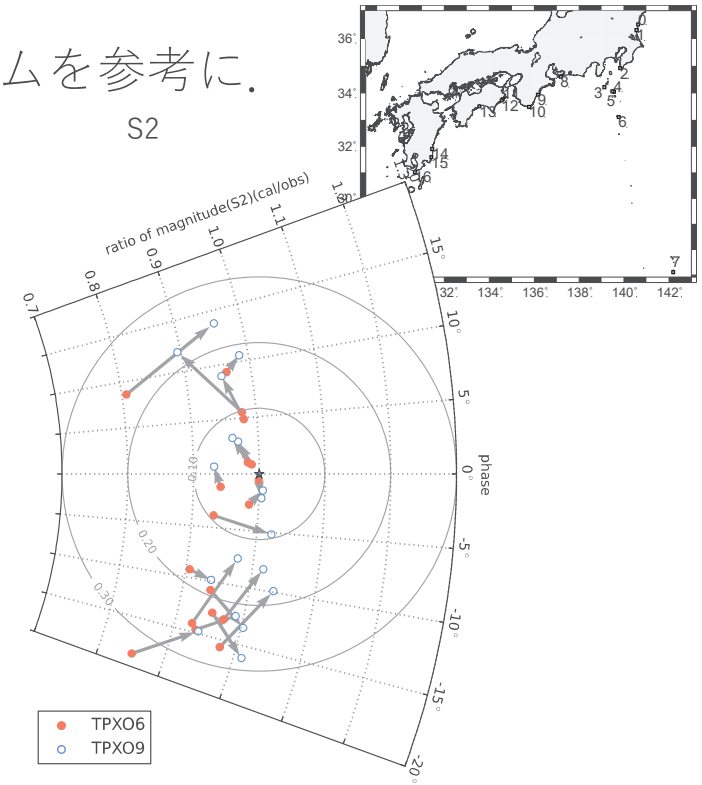


さらにテイラーダイアグラムを参考に.

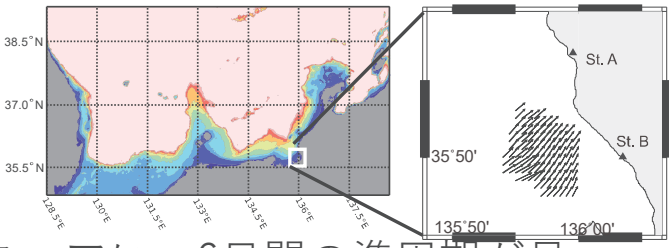
M2



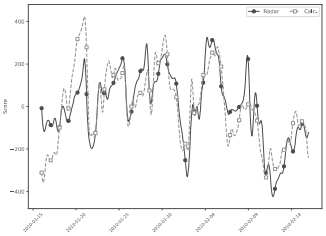
S2

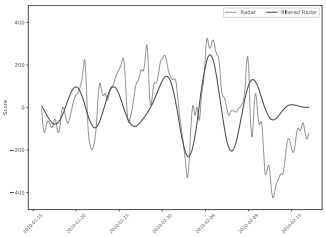


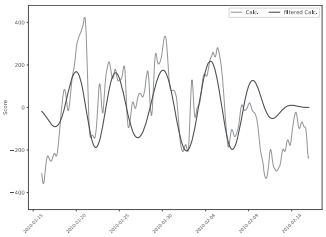
適用例：準周期



- 昔レーダ観測した結果
- 第一主成分（80%の変動量）のスコアに，6日間の準周期が見られた.
- 4−8日のバンドパスフィルター
- ヒルベルト変換した調和定数を表示した.

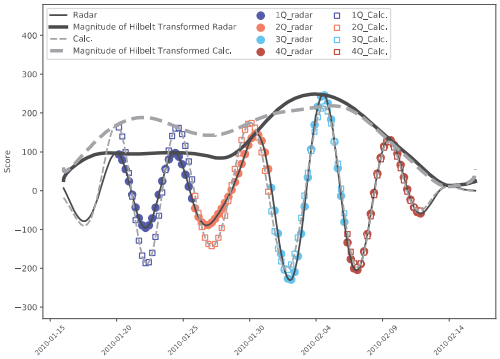


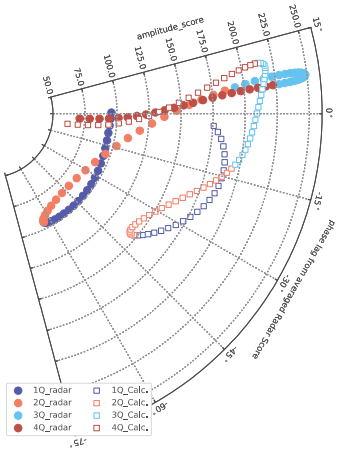


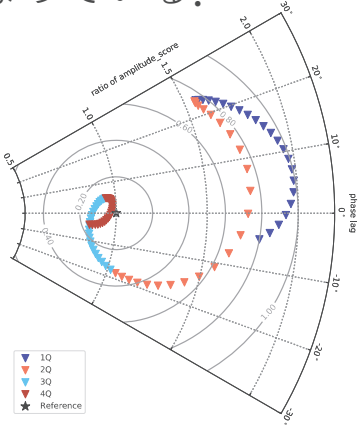


ヒルベルト変換した結果（両者と比）

- 青から赤（1，2P）はモデルの振幅が大きい
- 水色からオレンジ（3，4P）はよく一致する.
- 位相の負（正）への移動は周期が短く（長く）なっている.
- 振幅の大小も

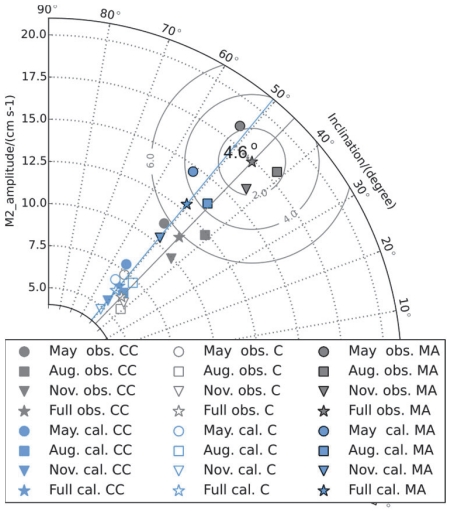


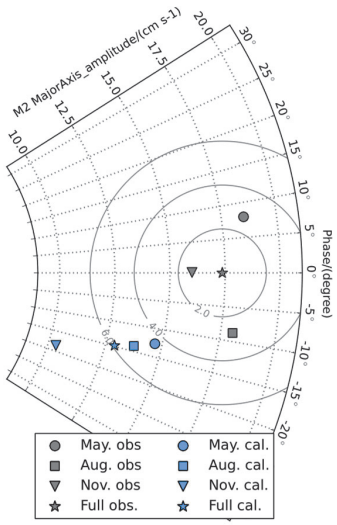




潮流楕円も

- 潮流楕円長軸をそれぞれ比較





まとめ

- 計算と観測の違いを表すダイアグラムを提案した.
- 誤差，相関，（振幅，位相差）の違いが分かる.
- たくさんの観測結果についても検討できる.
- 準周期の変調（振幅・位相）についても検討できる.
- Deep Sea Research 投稿中
- https://github.com/takakitsubono/Tideampphasediagram.

九州北西海域における漁業者参加型の海洋観測システムの構築

伊藤毅史[1]・長本　篤[2]・高木信夫[3]・梶原伸晃[4]・小久保貴幸[5]・滝川哲太郎[6]・広瀬直毅[7]

[1] 佐賀県玄海水産振興センター，[2] 福岡県水産海洋技術センター，[3] 長崎県総合水産試験場，[4] JFEアドバンテック株式会社，
[5] いであ株式会社システム開発センター，[6] 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科，[7] 九州大学応用力学研究所

本日の内容

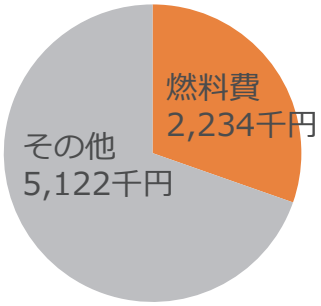
① ICT技術導入の経緯と事業概要
② 観測体制の構築（CTD）
③ 観測体制の構築（潮流計）
④ 観測の時空間分布と観測例
⑤ 現場への普及と漁業者の反応
⑥ その他の取組

① ICT技術導入の経緯と事業概要

② 観測体制の構築（CTD）
③ 観測体制の構築（潮流計）
④ 観測の時空間分布と観測例
⑤ 現場への普及と漁業者の反応
⑥ その他の取組

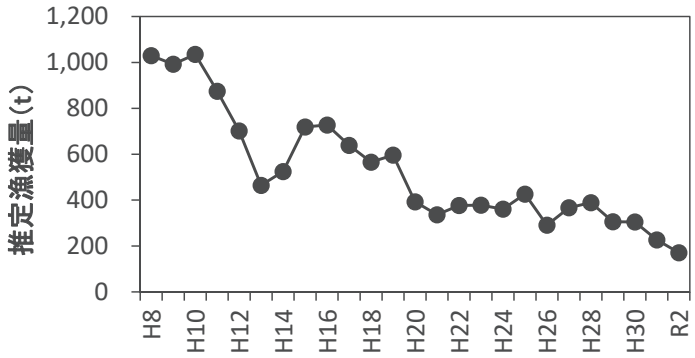
① ICT技術導入の経緯と事業概要

漁業支出に占める燃料費割合（申告書データ等より推定）



❑ 燃料費の割合は約30%※（いか釣，H28～R2）
※ H25～27の平均は約48%

ケンサキイカ推定漁獲量の推移



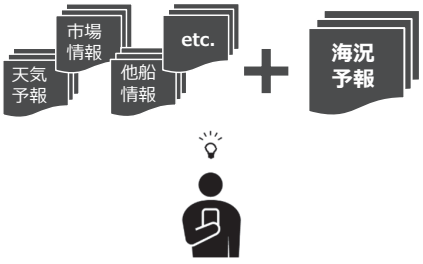
❑ 近年の漁獲量は低迷状況

「勘と経験」を頼りに出漁・操業する現状から、
“適切に資源を利用し、効率化が図られた漁業”へ

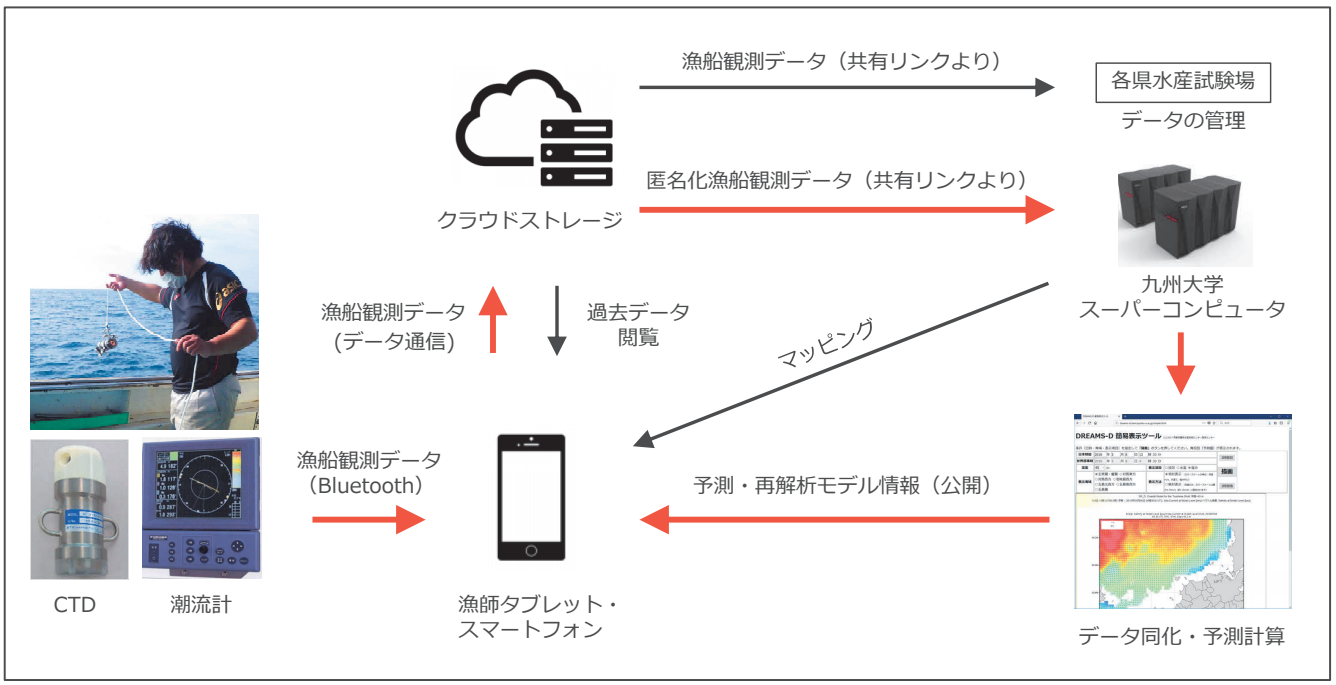
① ICT技術導入の経緯と事業概要

- 海洋予報等により、操業の効率化に繋がる（渡慶次ほか，2017）
- 潮汐や複雑な地形、観測データ不足により海況予報は低精度

▶ **漁業者参加型の観測体制・高精度な海況予報の漁業者への提供体制構築**

既存の観測体制	理想の観測体制	目指す将来像
		
❑ 県による月1回の調査	❑ 操業を妨げない簡易な観測 ❑ データ送信・収集は自動的	❑ 高精度な海況予報の活用で、操業の効率化を実現

① ICT技術導入の経緯と事業概要



漁場環境をリアルタイムに把握・データ同化させた
高精度な予報を操業情報として活用できるように

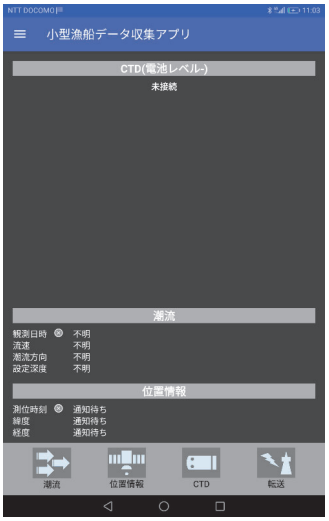
② 観測体制の構築（CTD）

① ICT技術導入の経緯と事業概要
② 観測体制の構築（CTD）
③ 観測体制の構築（潮流計）
④ 観測の時空間分布と観測例
⑤ 現場への普及と漁業者の反応
⑥ その他の取組

② 観測体制の構築（CTD）

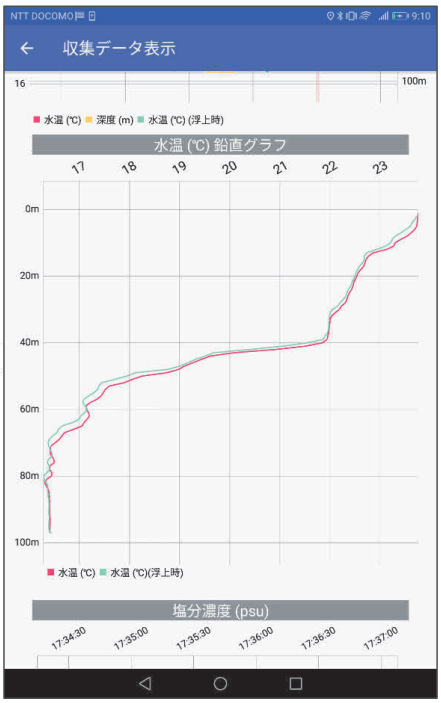
漁業向けCTD
（JFEアドバンテック株式会社製）

データ収集・転送アプリ
（いであ株式会社製）



- ❑ 小型・軽量かつ堅牢な設計（Φ70 mm × 170 mm，空中重量870 g）
- ❑ 電源オンオフは磁石、位置情報はタブレット端末とリンクし取得
- ❑ 観測データの収集・クラウドストレージへの転送はアプリを介して行う

② 観測体制の構築（CTD）

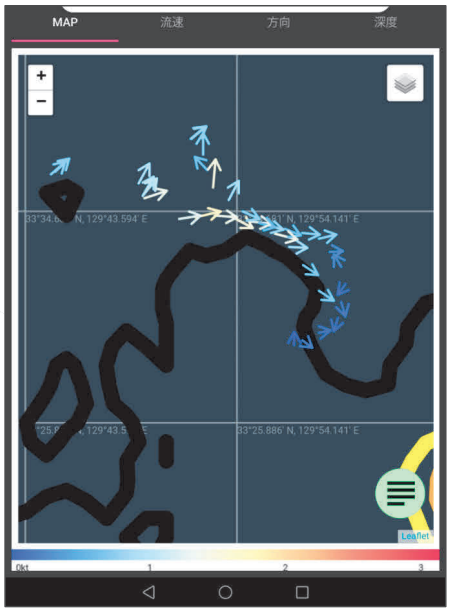


- ❑ 漁具にCTDを取り付けれない漁業種類では、ロープでの昇降
- ❑ 網漁業・延縄漁業では、漁具にCTDを取り付けて観測を実施

③ 観測体制の構築（潮流計）

① ICT技術導入の経緯と事業概要
② 観測体制の構築（CTD）
③ 観測体制の構築（潮流計）
④ 観測の時空間分布と観測例
⑤ 現場への普及と漁業者の反応
⑥ その他の取組

③ 観測体制の構築（潮流計）



- ❑ 潮流計とロガーを有線接続させることでデータの取得が可能となる
- ❑ 観測データの収集・クラウドストレージへの転送はアプリを介して行う

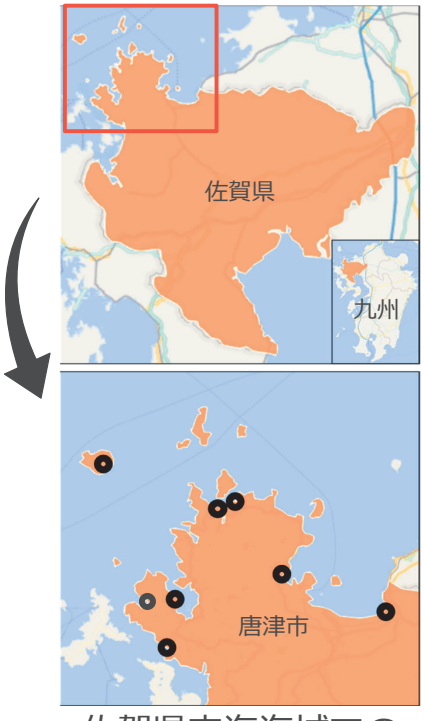
③ 観測体制の構築

■ CTD観測体制

- ◪ 佐賀県では、23隻の観測体制を構築
  - ▶ R4年度には30隻体制になる見込み
- ◪ 他県でも観測体制を構築中
  - ▶ 九州～日本海にかけて134隻の観測体制
- ◪ R2年以降はより安定的にデータ取得可能に
  - ▶ R2年は3008ファイル、R3年は3197ファイル

■ 潮流計観測体制

- ◪ 佐賀県では、17隻の観測体制を構築
  - ▶ 今年度中に23隻体制になる見込み
- ◪ 他県でも観測体制を構築中
  - ▶ 九州～日本海にかけて36隻の観測体制

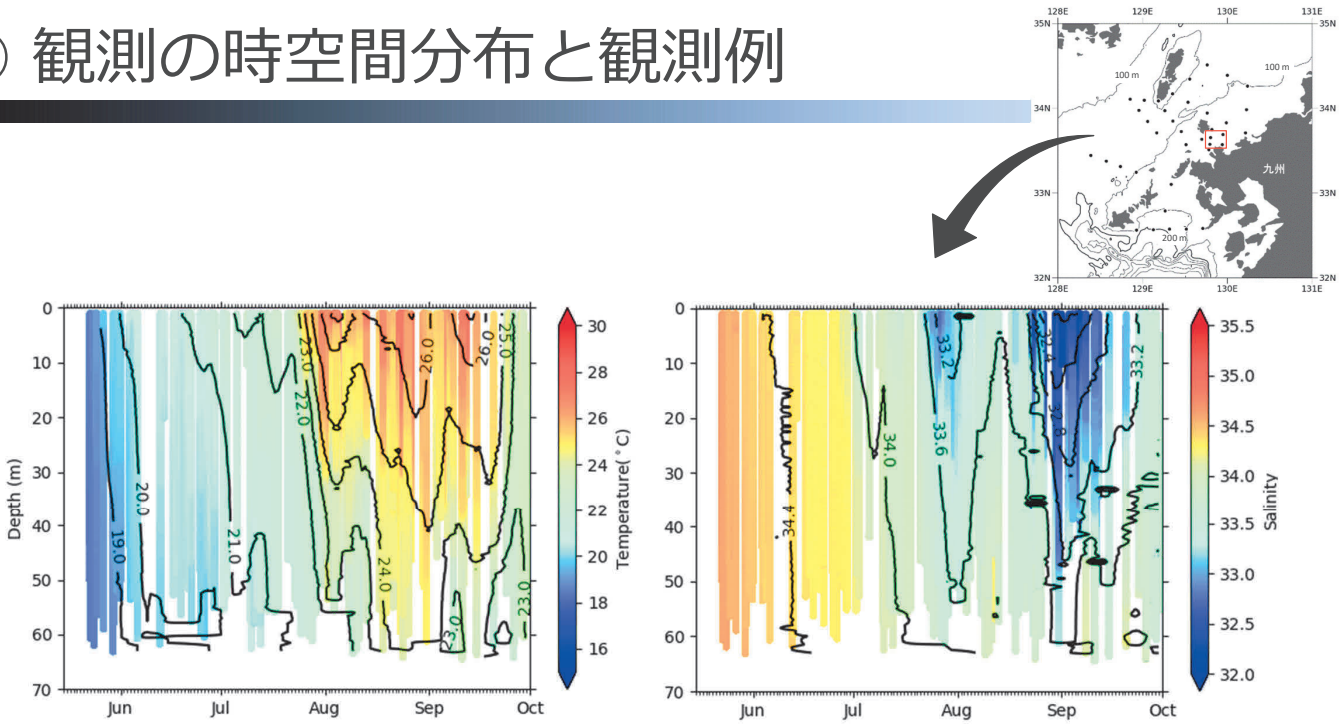


佐賀県玄海海域での
観測体制の構築状況

④ 観測の時空間分布と観測例

① ICT技術導入の経緯と事業概要
② 観測体制の構築（CTD）
③ 観測体制の構築（潮流計）
④ 観測の時空間分布と観測例
⑤ 現場への普及と漁業者の反応
⑥ その他の取組

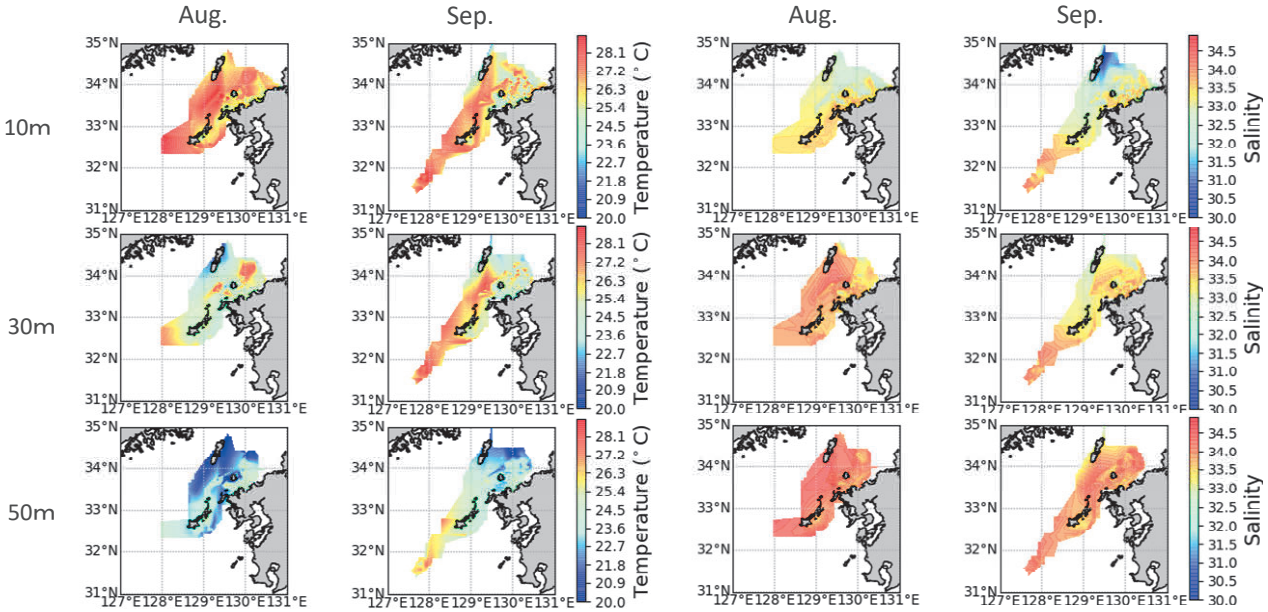
④ 観測の時空間分布と観測例



❑ 2019年5～9月の地図赤枠内での観測状況（伊藤ほか, 2021）
❑ 図中黒線は5日移動平均、地図中黒点は福岡･佐賀･長崎県の観測点を示す

※ 伊藤毅史･長本　篤･高木信夫･梶原伸晃･小久保貴幸･滝川哲太郎･広瀬直毅（2021）
九州北西海域における漁業者参加型のCTD観測システムの構築．水産海洋研究，85，1－7.

④ 観測の時空間分布と観測例



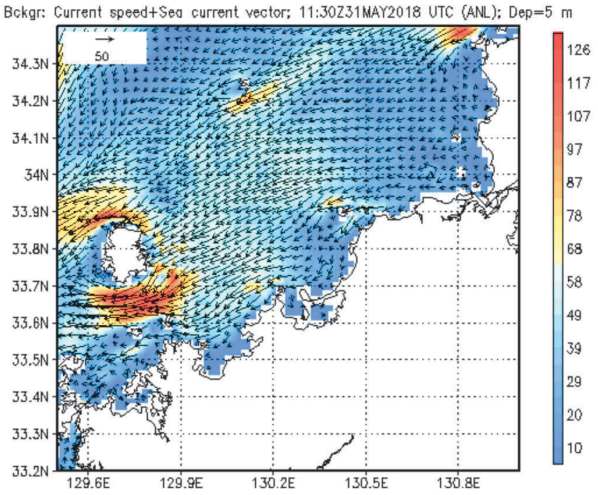
- ❑ 2019年8～9月に九州北部3県の漁業者が観測した結果（伊藤ほか, 2021）
- ❑ 観測の時空間的な偏りを避けるため、様々な漁業種類で観測体制を構築
- ❑ 各県は漁船観測で空白となりやすい海域でデータを補う観測を実施

⑤ 現場への普及と漁業者の反応

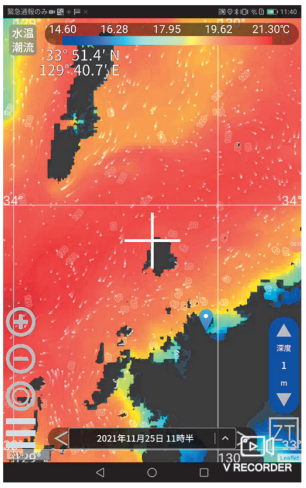
① ICT技術導入の経緯と事業概要
② 観測体制の構築（CTD）
③ 観測体制の構築（潮流計）
④ 観測の時空間分布と観測例
⑤ 現場への普及と漁業者の反応
⑥ その他の取組

⑤ 現場への普及と漁業者の反応

DREAMS_D
（九州大学応用力学研究所）



海況予報アプリ
（いであ株式会社製）



- ❏ DRをベースとした海況予報アプリで、3日先までの1時間ごとの海況予報
- ❏ 海洋観測の対価として海況予報アプリを観測協力漁業者に提供
- ❏ 2019年1月からDR_Dに漁業者の観測データが同化されはじめた

⑤ 現場への普及と漁業者の反応

■ 海況予報に関する意見

- ◪ 漁獲量を平均程度に維持しながら、操業時間・燃油使用料を削減（いか釣）
- ◪ 狙ったポイントに漁具を投入できる確率が上がり、漁獲量がアップ（延縄）
- ◪ 流れをより正確に把握でき、漁具の損傷・損失が半減（ごち網）

■ CTD観測に関する意見

- ◪ 漁具の動き（＝水深履歴）がわかり操業情報として非常に有用（ごち網）
- ◪ 観測データを漁具を入れる水深帯の目安にしている（いか釣）

■ 予報等の活用の効果

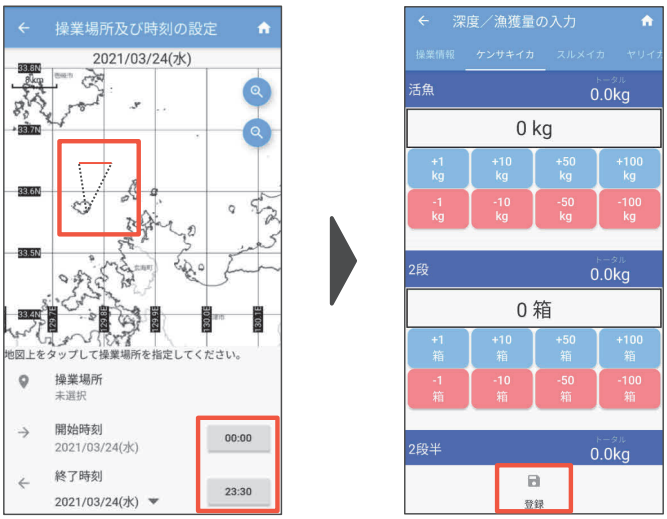
- ◪ この取組での最終目標は、スマート化効率15%以上の達成
  「単位漁獲量当たりの燃油使用量 × 出漁時間の減少率」と定義
- ◪ 観測協力漁業者30名に対してヒアリングを実施
  - ▶ 現時点で、3名の漁業者がスマート化効率15%以上を達成

⑥ その他の取組

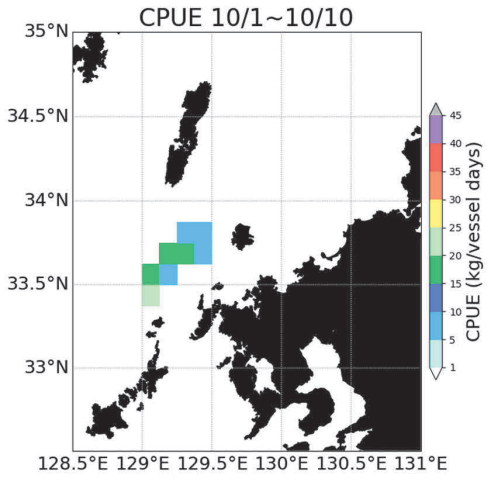
① ICT技術導入の経緯と事業概要
② 観測網の構築（CTD）
③ 観測網の構築（潮流計）
④ 観測の時空間分布と観測例
⑤ 現場への普及と漁業者の反応
⑥ その他の取組

⑥ その他の取組

電子操業日誌（いであ株式会社製）



CPUEリアルタイム情報



- ❑ 佐賀県では、観測協力漁業者から漁獲情報を収集している（2017年～）
- ❑ 今年度から、漁獲報告をアプリで行う「電子操業日誌」を現場に導入
- ❑ いか釣漁業者に対してCPUEリアルタイム情報の提供試験を開始

NPECで開発した海洋モニタリングツールの紹介と、富山湾モニタリング

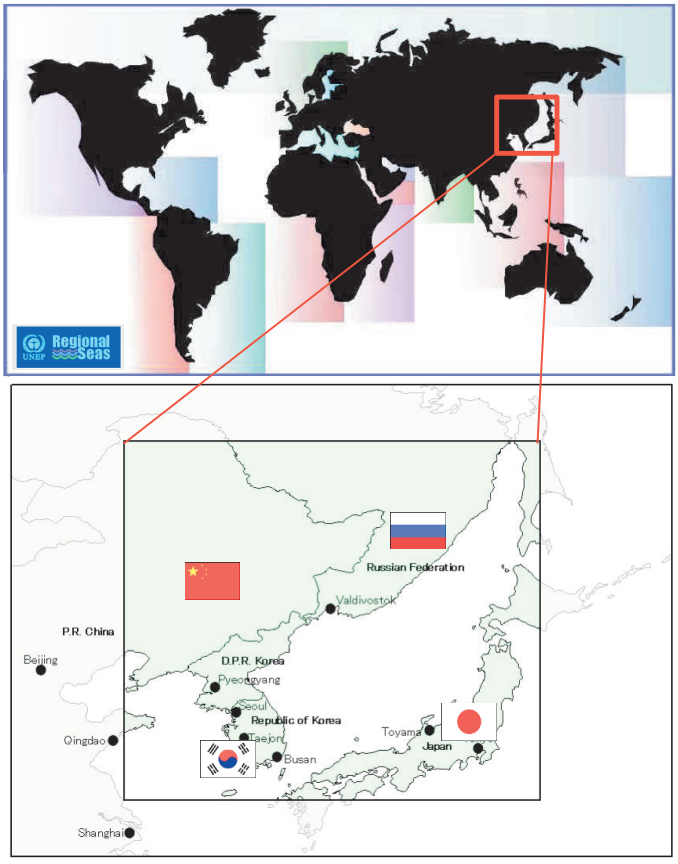
小塚晃、寺内元基、マウレエリジオ（NPEC）、福留研一（富山高専）
公益財団法人環日本海環境協力センター

2021/12/7,8

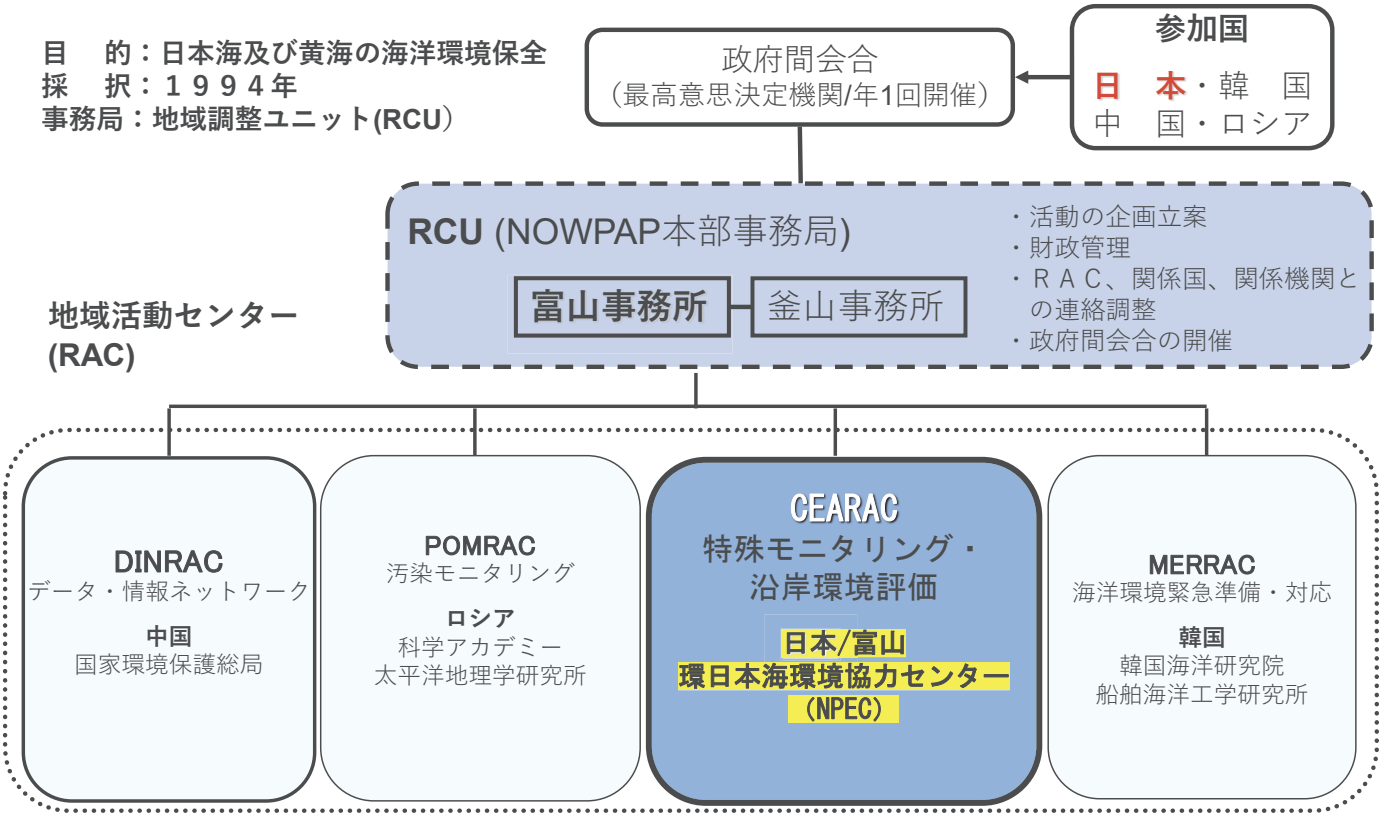
日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会@九州大学応用力学研究所

北西太平洋地域海行動計画「NOWPAP」

- UNEP地域海行動計画
  - 世界の各海域の環境悪化を受け、1974年に国連環境計画が提唱
  - 全世界で13海域が指定
- 北西太平洋地域海行動計画 NOWPAP
  - 1994年に採択
  - 日本、中国、韓国、ロシアが加盟
  - 緯度 33-52^{O}N、経度121-143^{O}E



NOWPAPにおけるNPECの役割



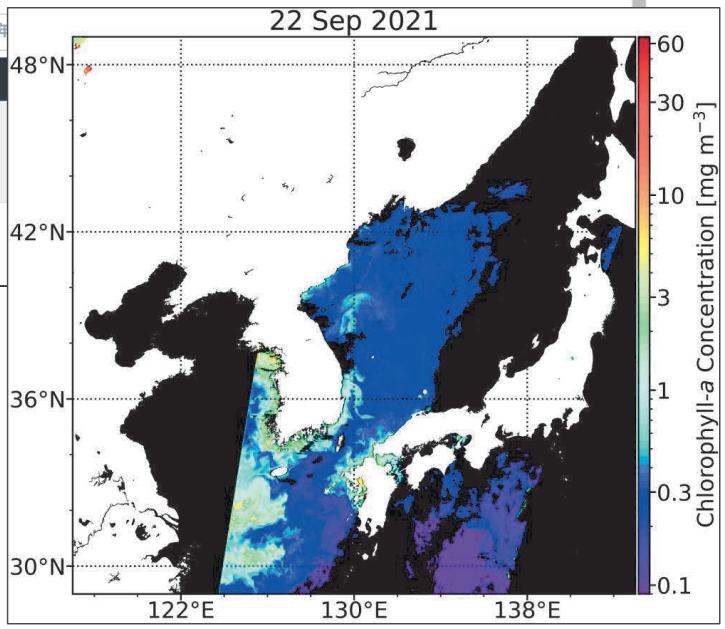
1,環日本海海洋環境ウォッチ
http://ocean.nowpap3.go.jp

- 設置年度：2002年度
- 設置主体：環境省

- 設置目的：
NOWPAPにおけるリモートセンシングによる海洋環境モニタリングの推進

- システム運用主体：
環日本海環境協力センター（NPEC）

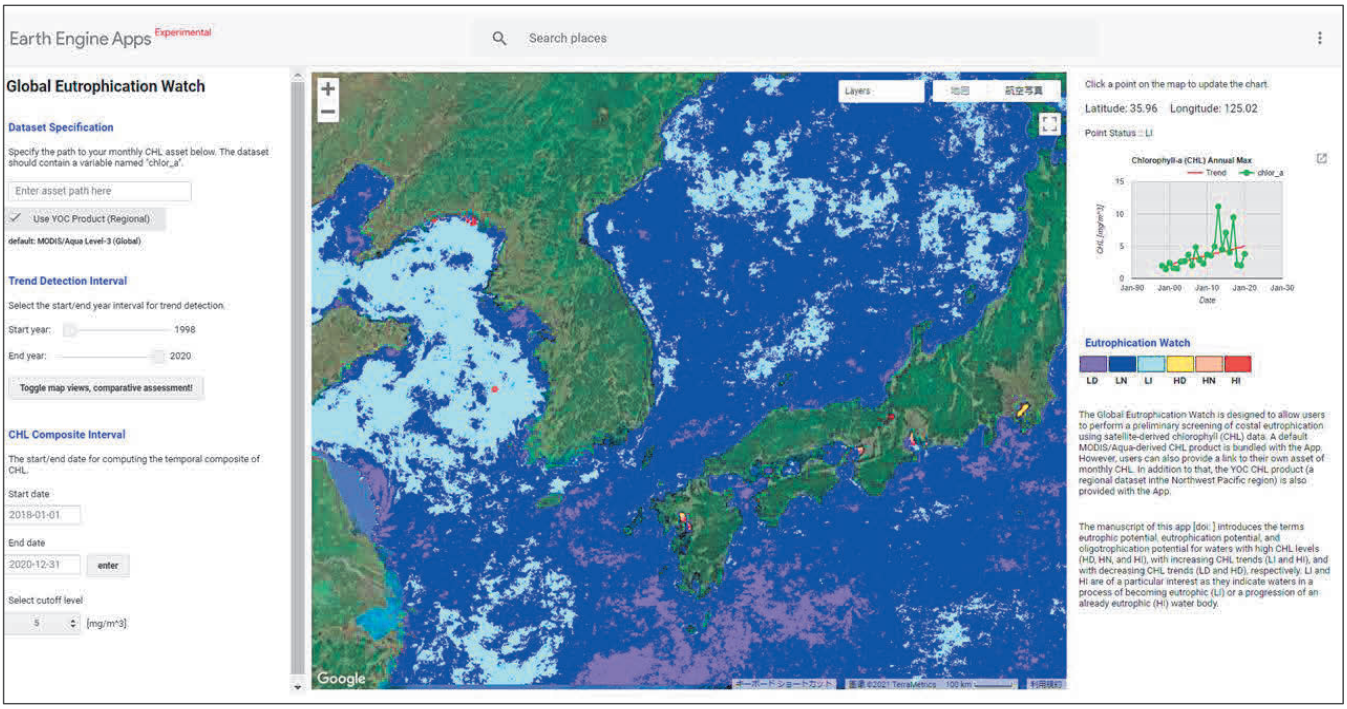
- 提供データ：
  クロロフィルa濃度
  海表面水温(Sea Surface Temperature)
  CDOM
  TSM



衛星のSST,クロロフィル濃度、CDOMなどを日別、月別等の期間で合成した画像を提供。ユーザー登録でデータ利用可能。

2,Google Earth Engineを用いた富栄養化評価ツール「Global Eutrophication Watch」

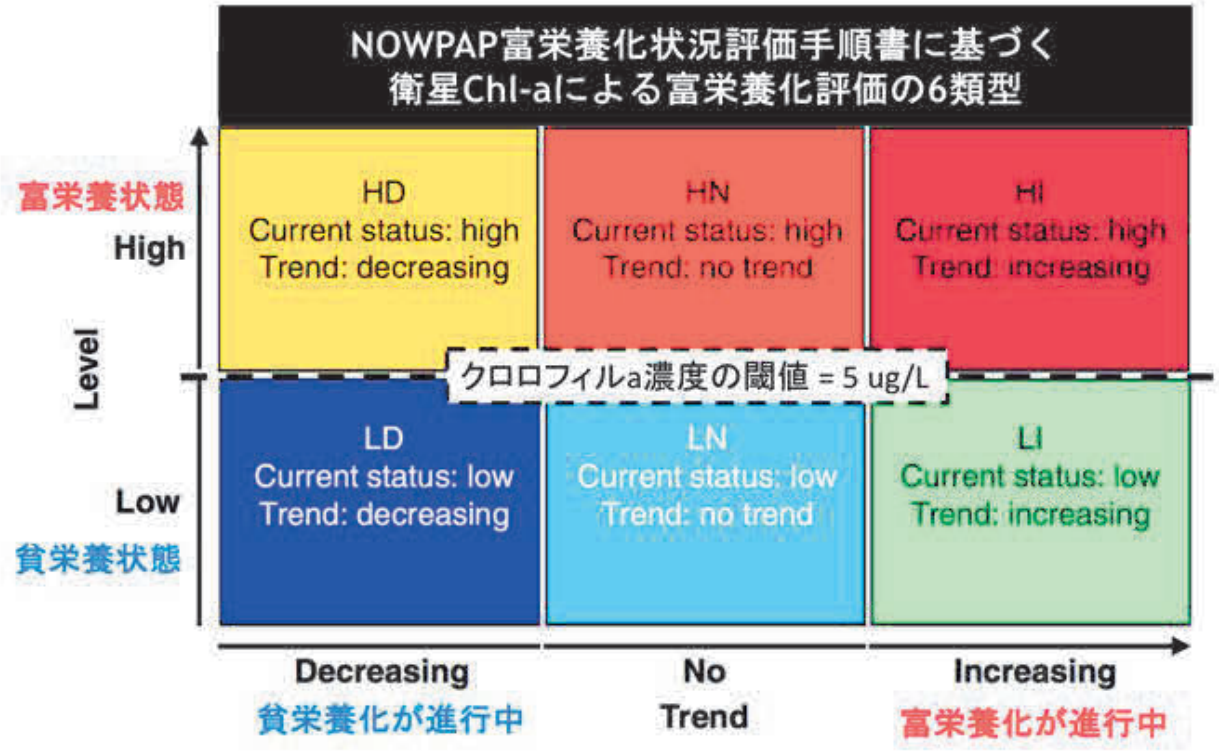
https://eutrophicationwatch.users.earthengine.app/view/global-eutrophication-watch



衛星のクロロフィルa濃度から、富栄養化（貧栄養化）傾向を地球規模海洋で予備的に判別

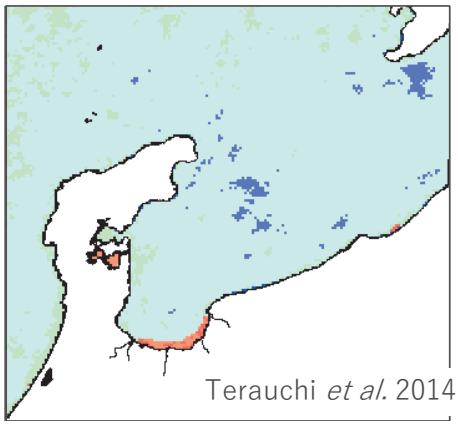
出典：Maure *et al.*(2021)

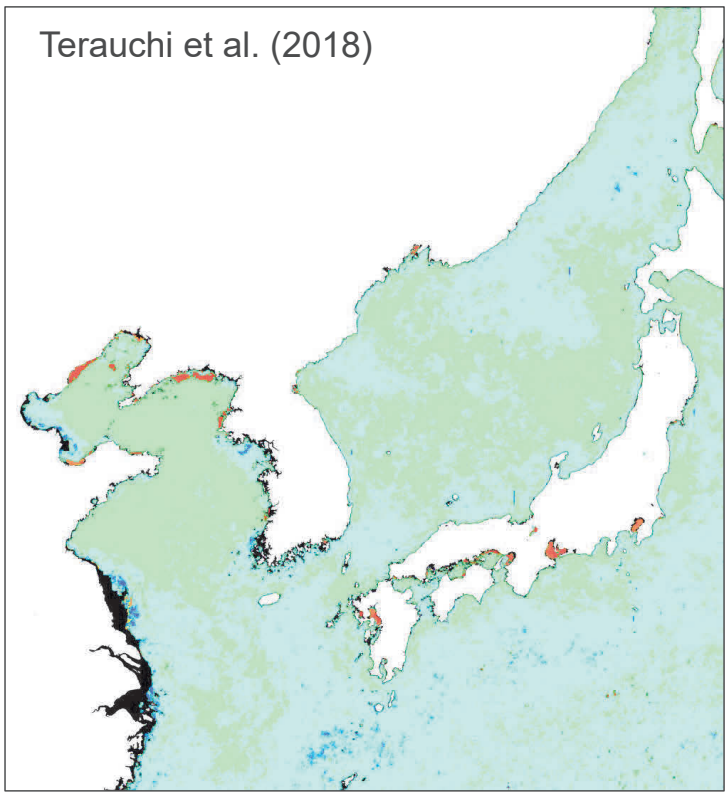
NOWPAPによる富栄養化評価の取り組み



NOWPAP CEARAC (2009, 2013)、Terauchi et al. (2014, 2018)

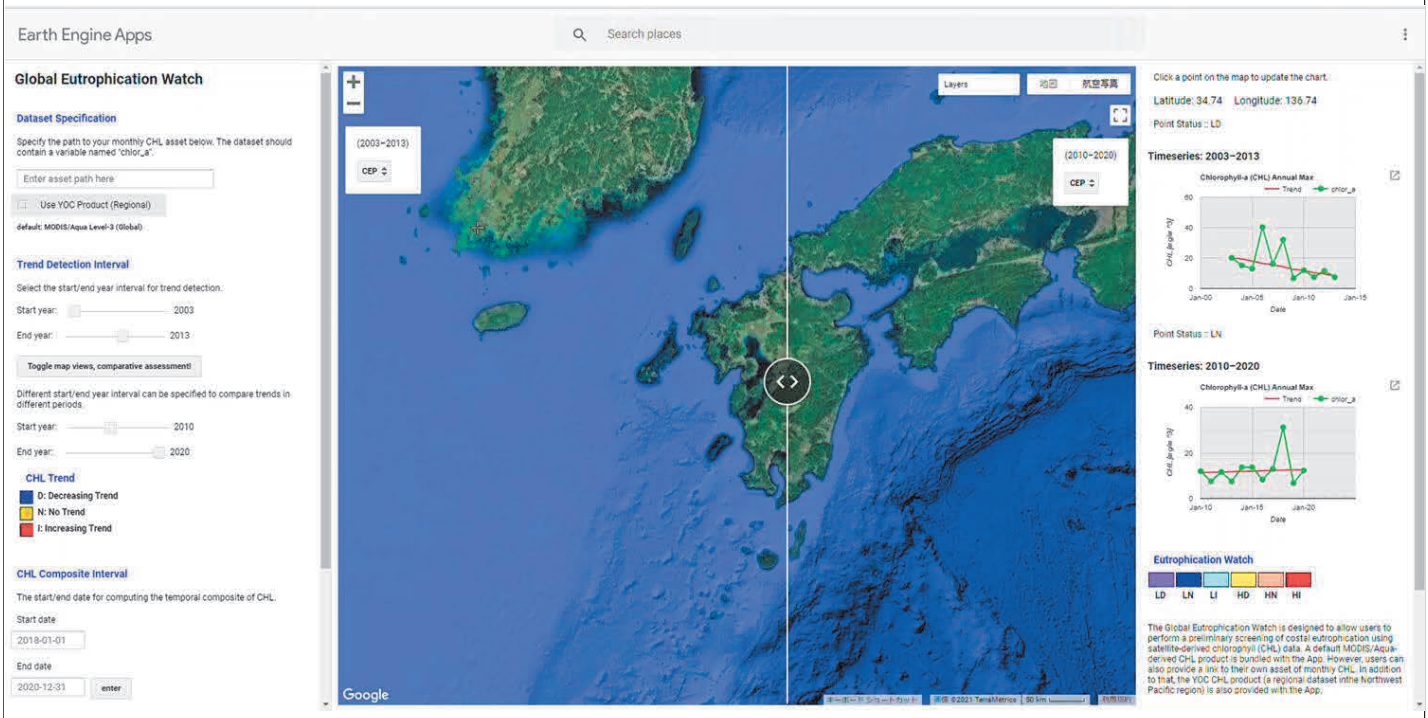
人工衛星リモートセンシングによる環日本海地域の潜在的富栄養化海域の抽出





富山発の富栄養化評価手法を環日本地域で共有

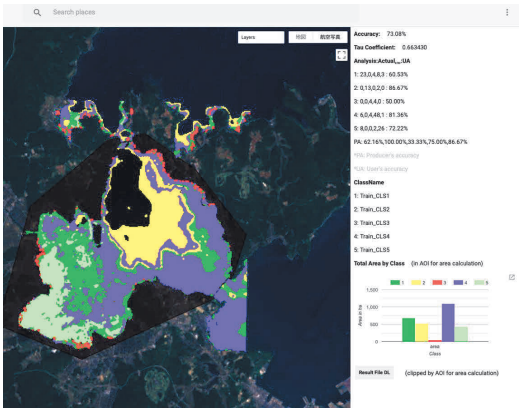
Global Eutrophication Watchのデモンストレーション

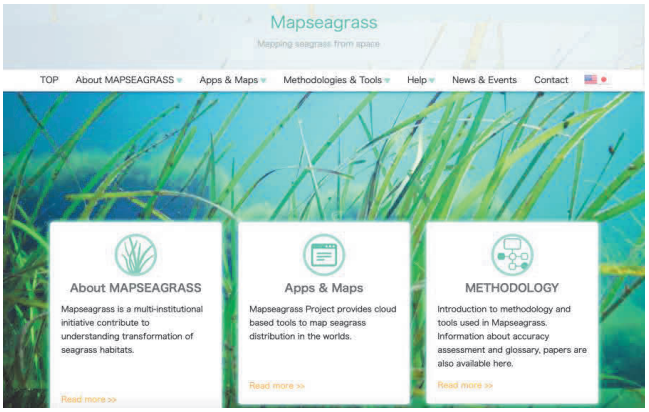


マウス操作だけで、解析期間、範囲、期間別のトレンド、ポイントでのクロロフィル濃度の年平均値の推移などが確認できる
→Google Earth Engineを使って、SSTを表示させれば、インタラクティブな海洋教育に使えるのでは？海洋の温暖化など

3,藻場マッピングに関するウェブサイトの運用

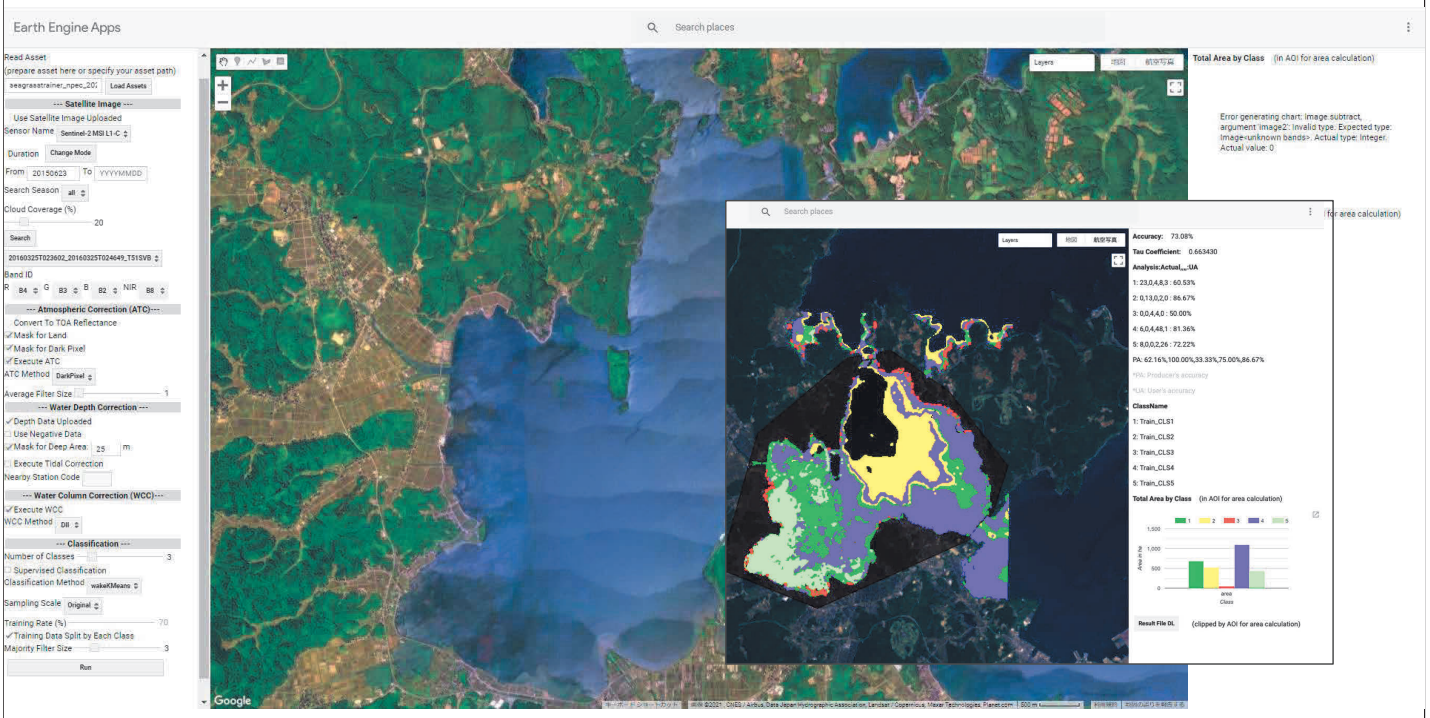
- 開発主体: 環境省、　運用維持管理: NPEC
- Seagrass Mapper / Seagrass Trainer
  - Google Earth Engineを活用した藻場マッピングツール
- Mapseagrass.org
  - 海草藻場マッピングウェブサイト





https://mapseagrass.users.earthengine.app/view/seagrassmapper (左)、
https://mapseagrass.org(右)

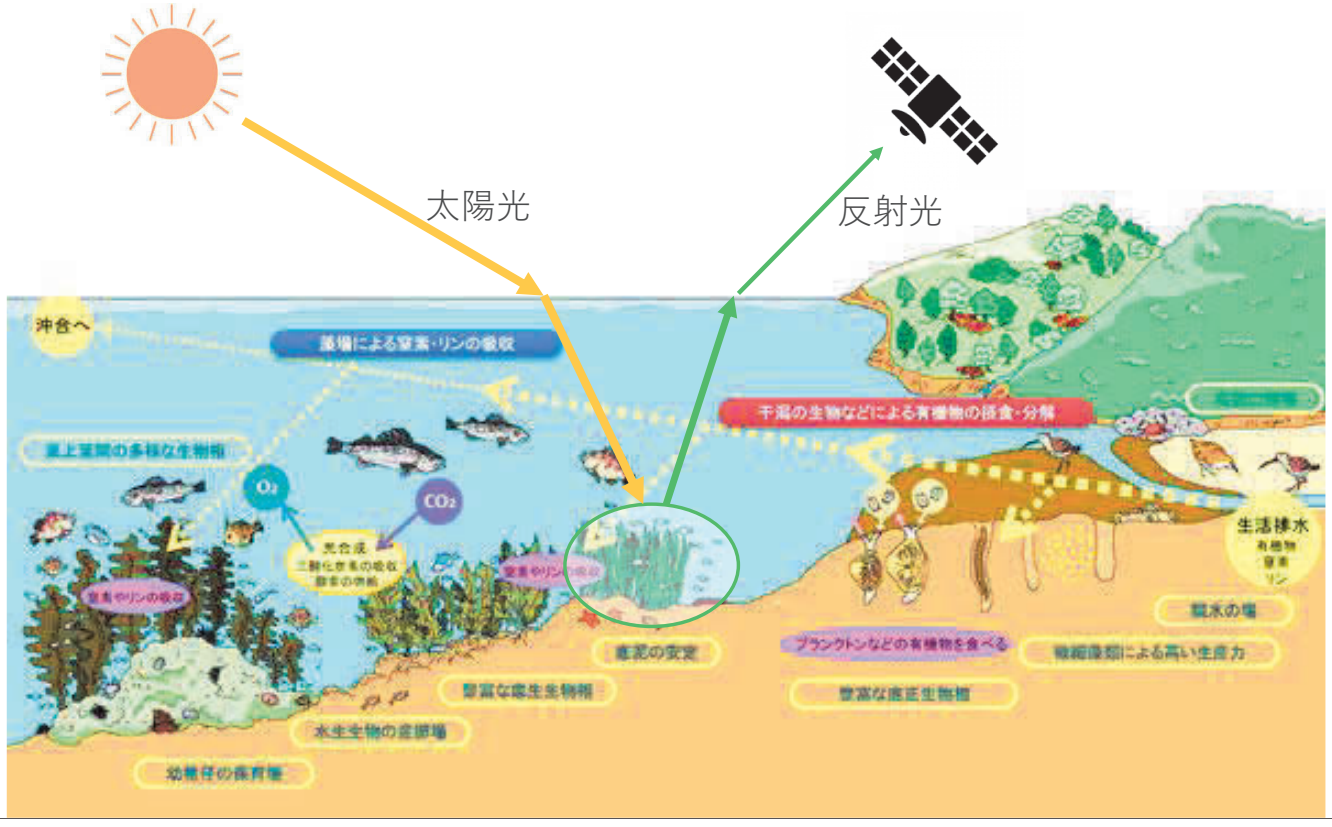
Google Earth Engine “Seagrass Mapper”



教師データやデータ補正地点の情報などを登録し、
ほぼマウス操作だけで、衛星画像から藻場をマッピングし、
面積を計算する（例・石川県七尾湾）

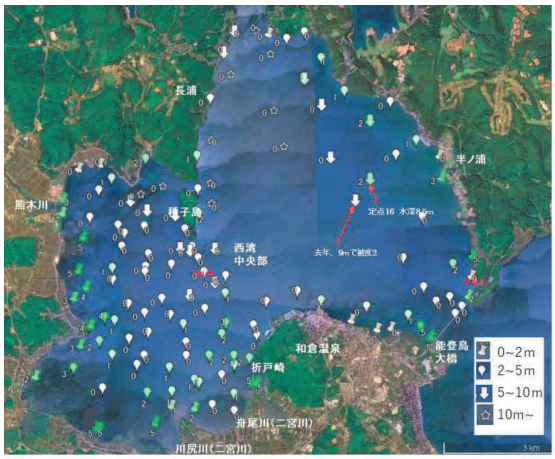
14 LIFE BELOW WATER

人工衛星による藻場のリモートセンシング



現場観察による教師データの作成
石川県七尾湾

元・石川水試の大慶さんの漁船を用船

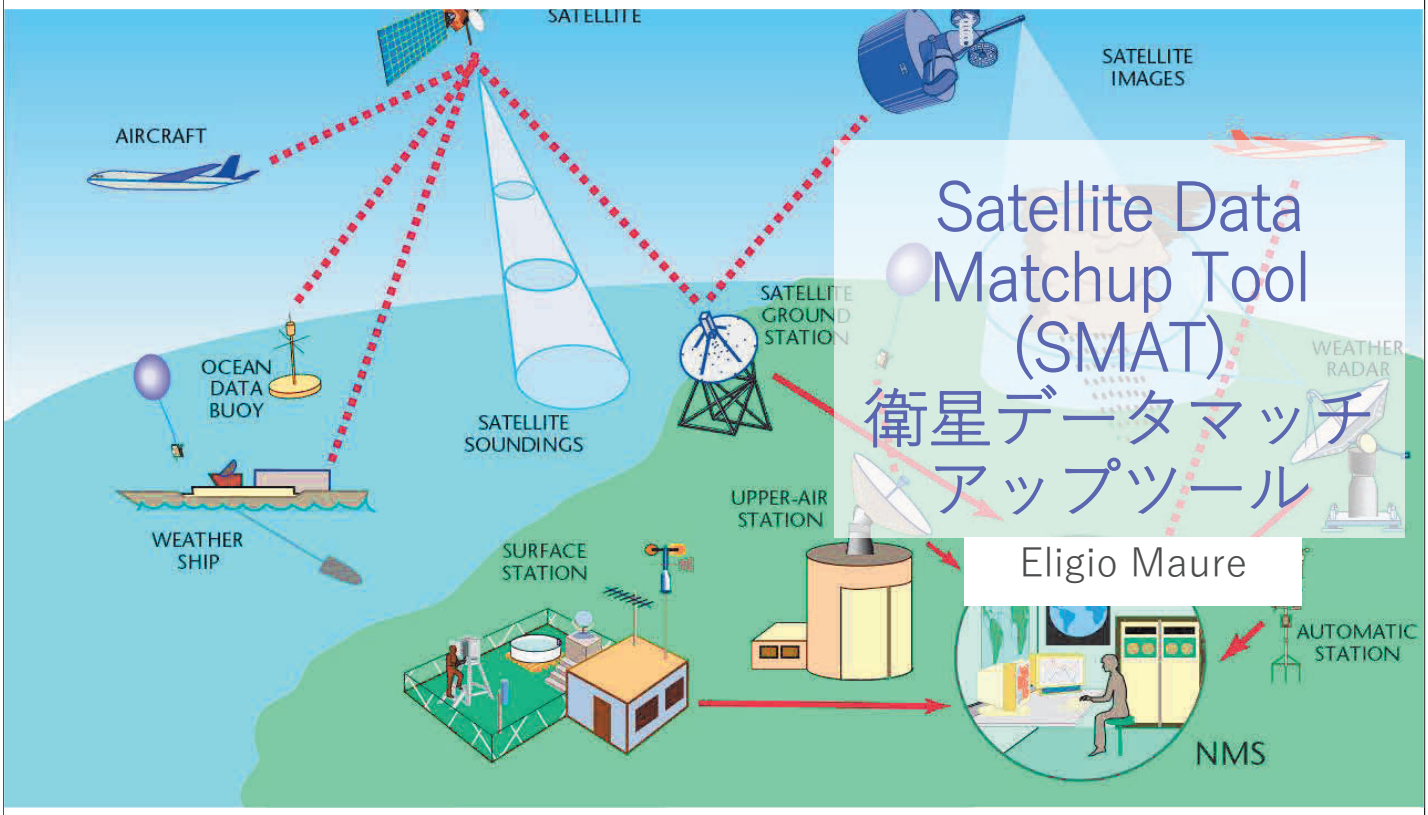


134点を2日かけて観察

アマモや底質の教師データ作成

ドローン空撮（試行的調査）

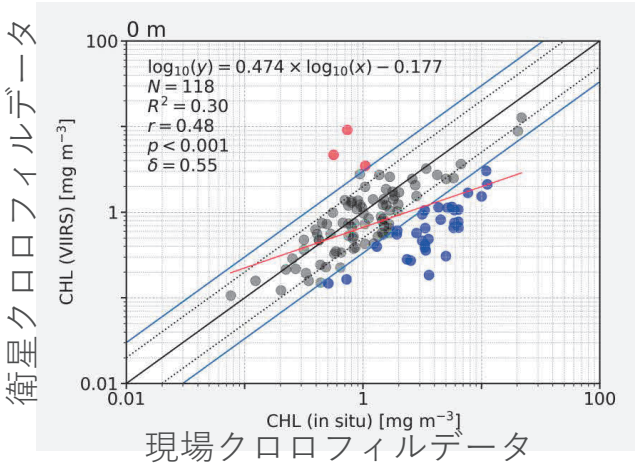
4,衛星データ検証ツール



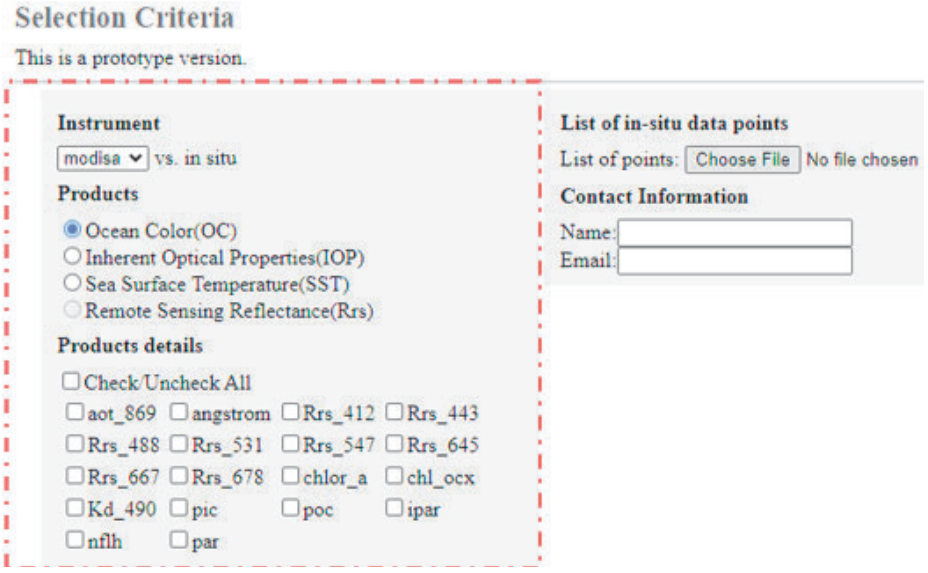
環日本海海洋環境ウォッチHP内の「データ検証」から利用可能

SMAT（マッチアップツール）でできること

- ユーザーは大きな衛星データをダウンロードせずにデータ マッチアップを実行できる
- CEARAC（NPEC）は衛星製品の検証データを収集できる



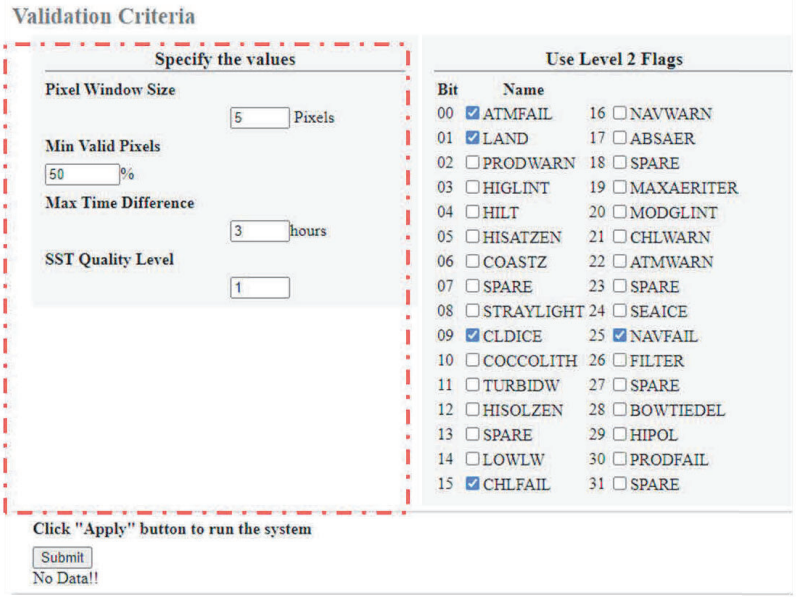
SMAT: Selection Criteria



衛星センサー、データタイプを選択し、
自分の持つ現場データ(csvファイル)を登録

→時空間的に対応する衛星観測データがメールで届く

SMAT: Validation Criteria



検索するデータのピクセルサイズや有効な時間差などを入力し、希望する品質に合致するデータを抽出できる

(in-situ−satellite time difference)

SST Quality Level

(quality number 0: best, 4: worst)

SMAT: Results

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	:BeginHeader																	
2	Using satellite data from VIIRS/NPP																	
3	Match-up generation datetime: 2021-05-24T10:16:01																	
4	VALIDATION CRITERIA applied to this match-up																	
5	-Box size of satellite extract: 5 x 5 = 25 pixels																	
6	-Minimum percent valid satellite pixels: 25.0																	
7	-Maximum time difference between satellite and in situ: 3 h																	
8	-Level-2 flags considered for data screening: ATMFAIL+LAND+CLDICE+CHLFAIL+NAVFAIL																	
9	:EndHeader																	
10	station	datetime	lat	lon	chla	Filename	Variable [Units]	StartDatetime	EndDatetime	ValidPixels	InvalidPixels	Min	Max	Mean	STD	Median	PointValue	PixelValue01
11	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	aot_862 [NA]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.19679999	0.23029999	0.21618181	0.01066795	0.2172	-32767	0.19679999
12	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	angstrom [NA]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.77320004	0.97580004	0.85019094	0.05865535	0.83510005	-32767	0.90780008
13	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_410 [sr^-1]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.002424	0.005536	0.00419346	0.0010215	0.004476	-32767	0.005124
14	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_443 [sr^-1]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.002632	0.006206	0.00462164	0.00111589	0.005056	-32767	0.005056
15	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_486 [sr^-1]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.002826	0.00518	0.00418673	0.00076959	0.004636	-32767	0.004716
16	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_551 [sr^-1]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.004162	0.005538	0.00492509	0.00038135	0.004992	-32767	0.004992
17	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_671 [sr^-1]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	-0.000498	0.000344	-0.00002145	0.00023895	0.000042	-32767	0.000106
18	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	chlor_a [mg m^-3]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	1.11184585	4.83566713	2.11782555	1.57176114	1.75953555	-32767	1.61793697
19	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	chl_ocx [mg m^-3]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	1.11184585	4.83566713	2.11782555	1.57176114	1.75953555	-32767	1.61793697
20	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	Kd_490 [m^-1]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.15259999	0.3378	0.22030911	0.06002868	0.1876	-32767	0.1662
21	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	pic [mol m^-3]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	0.00123399	0.00154199	0.001362	0.00008631	0.001346	-32767	0.00132
22	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	poc [mg m^-3]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	168	320.6000977	224.8908539	44.25477982	205.3999023	-32767	198
23	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237031200.L2_SNPP_OC.nc	par [einstein m^-2 day^-1]	2020-08-24T03:12:01	2020-08-24T03:17:59	11	14	54.8239975	54.99200058	54.91999817	0.05481264	54.92200089	-32767	54.98600006
24	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	aot_862 [NA]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.0468	0.0489	0.048	0.0007746	0.0481	-32767	-32767
25	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	angstrom [NA]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	1.07020009	1.27190006	1.19616008	0.0750433	1.22450006	-32767	-32767
26	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_410 [sr^-1]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.00651	0.007256	0.0069188	0.00028374	0.00703	-32767	-32767
27	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_443 [sr^-1]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.009574	0.010224	0.009868	0.00020755	0.009838	-32767	-32767
28	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_486 [sr^-1]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.006822	0.007384	0.0071288	0.00020759	0.007238	-32767	-32767
29	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_551 [sr^-1]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.002788	0.003126	0.0029484	0.00013138	0.002902	-32767	-32767
30	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	Rrs_671 [sr^-1]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.000348	0.000442	0.0004016	0.00003509	0.00041	-32767	-32767
31	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	chlor_a [mg m^-3]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.10784925	0.12109809	0.1151749	1.04093415	0.11424798	-32767	-32767
32	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	chl_ocx [mg m^-3]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.16111529	0.18766314	0.17511223	1.05350269	0.17417681	-32767	-32767
33	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	Kd_490 [m^-1]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.0472	0.0506	0.04896	0.00149345	0.0494	-32767	-32767
34	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	pic [mol m^-3]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	0.000304	0.00041199	0.000354	0.00004199	0.00034	-32767	-32767
35	6	2020-08-24T03:18:00	36.794	137.164	3.4	V2020237045400.L2_SNPP_OC.nc	poc [mg m^-3]	2020-08-24T04:54:00	2020-08-24T04:59:58	5	10	53.39990234	59.19970703	56.51982498	1.98632872	56.19970703	-32767	-32767

オンラインウェビナーのご案内

~~Nov 30 to Dec 2, 2021~~

~~Mapping seagrass by optical sensors~~
~~(光学センサによる藻場マッピング)~~

Dec 14 to Dec 16, 2021

Monitoring and Assessment of water quality by ocean color remote sensing
(海色リモートセンシングによる水質の監視と評価)

これからも関連するウェビナーを開催します、
興味がある方はご連絡ください。
http://cearac.nowpap.org/news-topics/

NPECの富山湾モニタリングについて

背景

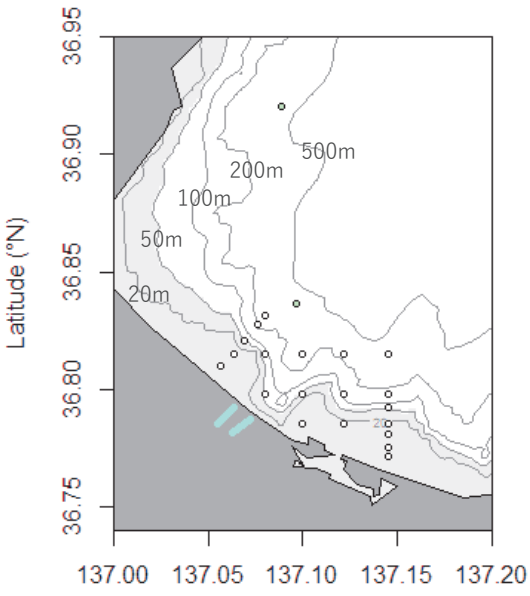
- NPECにおいて衛星を用いた海洋モニタリング技術開発

- 富山湾で船舶調査を実施

目的１：衛星と比較する現場データ取得

目的２：富山湾の特性把握

- 衛星海色データには河川からの流出する水の影響が大きいため、富山湾奥部の河口周辺を重点的に調査



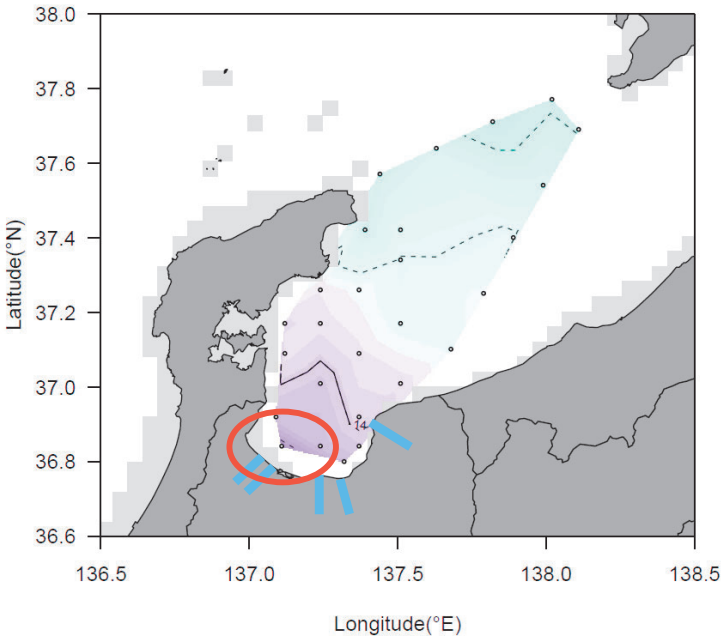
白点：NPEC調査地点
緑点：富山県水産研究所調査地点

私の長年の興味

富山湾の沿岸河川水の海洋環境への影響は、どの程度の時空間的スケールがあるのか？

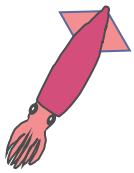
参考：富山県水産研究所　立山丸での調査
冬の水温平均分布

1月の50mの平均水温

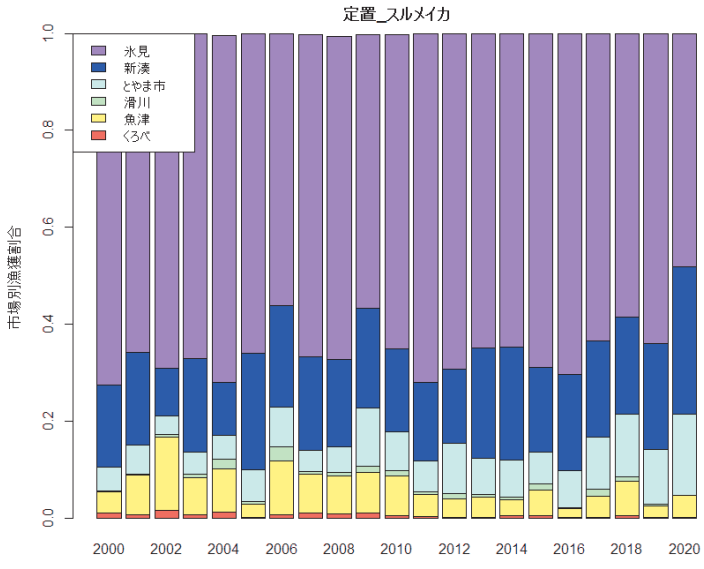


富山湾～佐渡島スケールでは、冬季、富山湾奥部に毎年、暖水塊（+1.0℃）が形成される

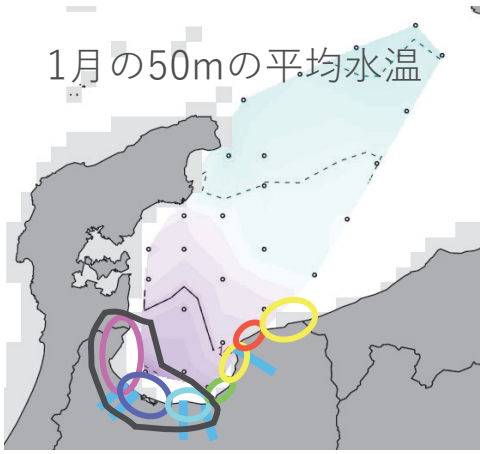
湾奥部の沿岸、河口付近ではどのような構造になっているのか？



湾内のスルメイカ漁場分布



1月の50mの平均水温



富山県漁獲の8割以上が、湾奥（湾西部～湾中央）の3漁協に集中

石川県側と比べても多い

調査方法（NPEC）

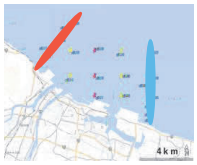
基本的に春,夏,秋,冬の年4回

小矢部川、庄川の河口の東西を50ｍまでCTD観測

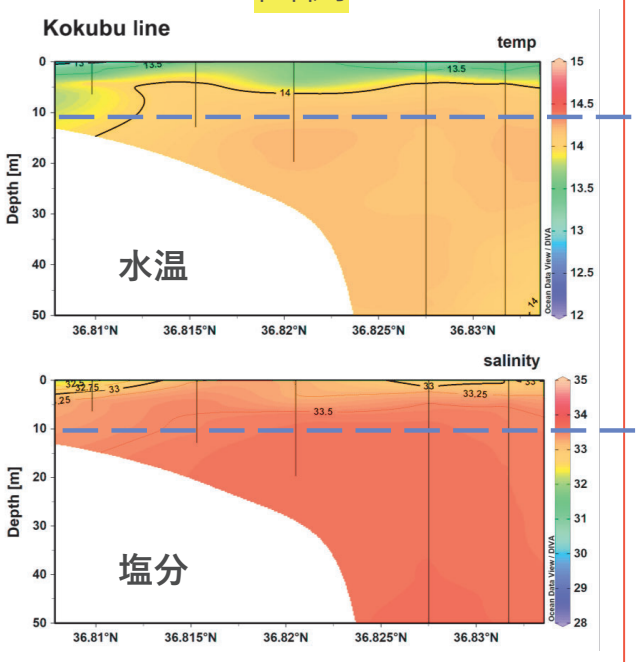
2021年1月(冬)について説明

黄マーク：CTD観測のみ実施
赤マーク：CTD観測＋水質分析（Chla,CDOM,SS）

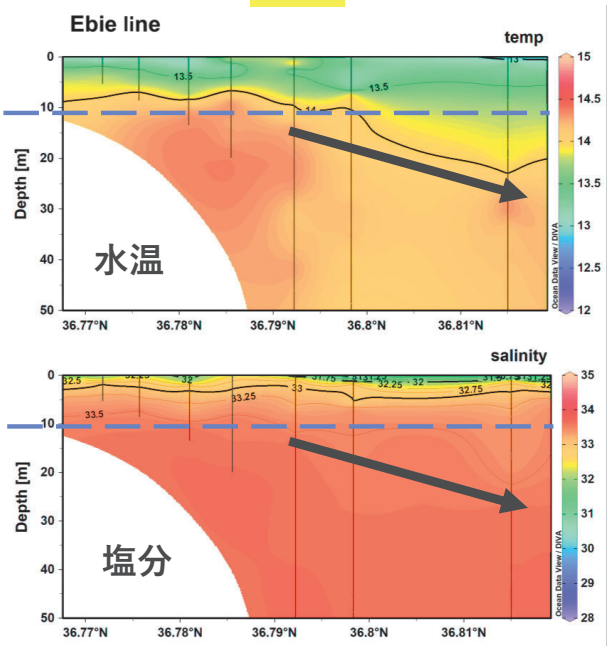
冬季　2021年1月



西側

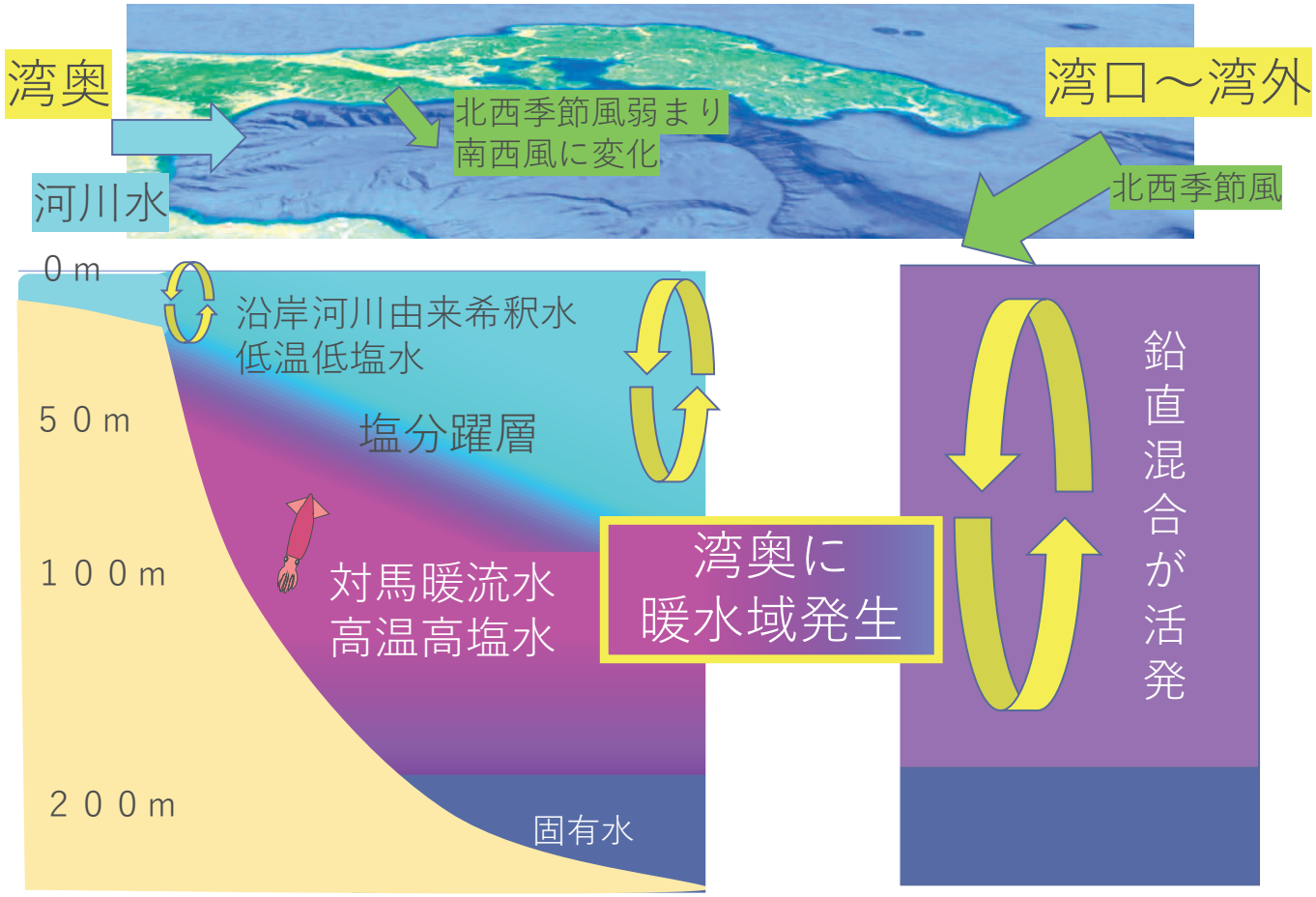


東側



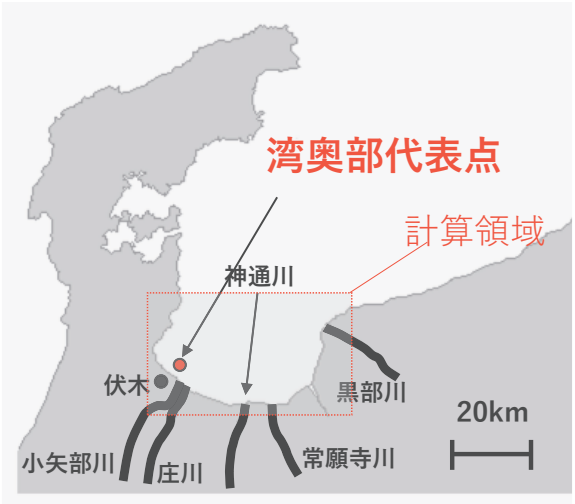
約10ｍの深さに躍層が存在。
東側のラインで、河川水が沖に行くほど混合し、
等塩分線（33.6）が10ｍ→20ｍに深くなる

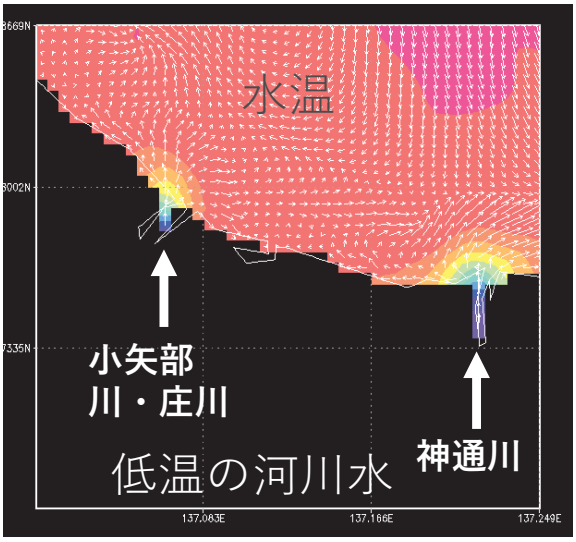
冬季湾奥暖水域発生メカニズム仮説



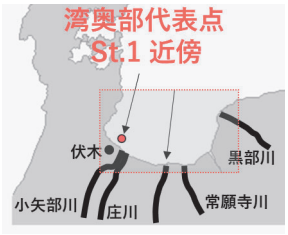
海洋モデルDREAMS_Kを用いて、河川の有無による影響をシミュレーション

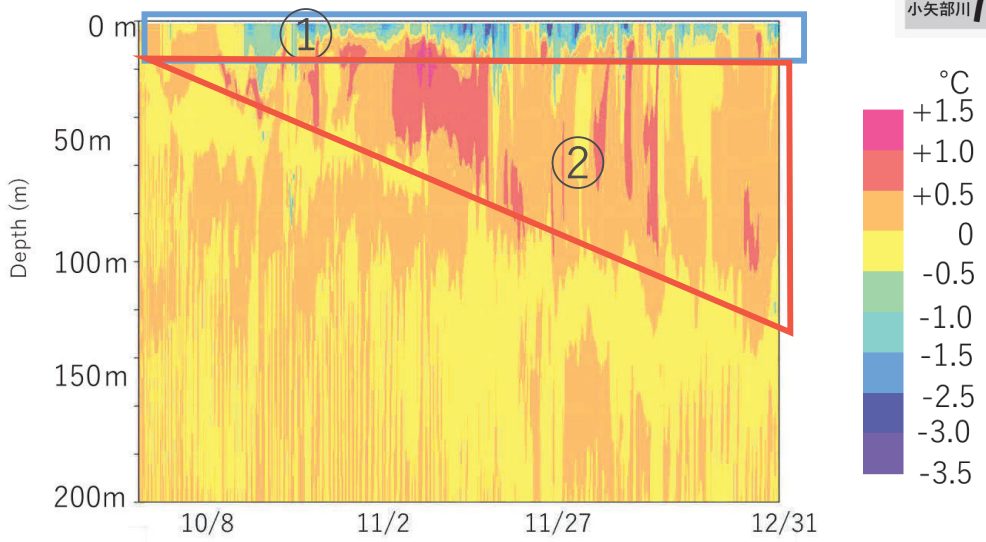
- 2017年9月1日～9月30日まで河川ありで計算後、10月1日～12月31日において河川の有り・なしの２モデルを計算
- ５つの１級河川の実測流量分の淡水を河口から投入。赤囲み部分をシミュレーション





湾奥での海洋モデル水温偏差の時間変化
河川ありー河川なしモデル
※正偏差（暖色）は、河川があると
水温が高くなることを表す





①河川水によって10m以浅部分は、水温が低下
②季節ともに正偏差領域が深くなる
→河川水があることで鉛直混合が遅くなり、暖かい（最大+1.0～1.5°C程度）

まとめ

- 富山湾奥部で冬季に暖水塊が発生する要因について、沿岸～湾内の海洋観測および海洋モデルシミュレーション実験によって調べた。

- 海洋観測では、冬季、富山湾湾奥部では、10m付近に、低温低塩の成層を形成。河口から離れるにつれて鉛直混合が進み、湾内では数十メートルまで河川水の影響が及んだ。

- 海洋モデルでは、河川のある場合とない場合の海洋環境を再現し、冬季、湾奥では、河川があることで10m以深から100m近くにおいては鉛直混合が遅れることにより暖水が現れることが示された。

謝辞

- 本研究の富山湾の海洋モデルシミュレーションに関する研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究として行われました。広瀬先生、高山様ありがとうございました。

- 富山湾の海洋観測に関するデータは、環境省水・大気環境局の請負業務「令和２年度北西太平洋地域海行動計画活動推進業務」のデータを使用し実施しました。御礼申し上げます。

東北地方の沿岸水の日本海沖合域への波及過程2

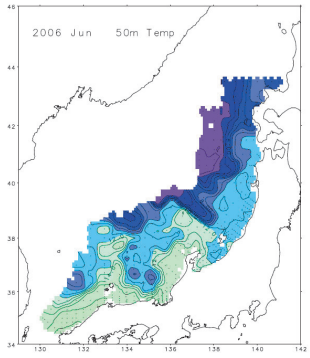
和川 拓（水産機構資源研）

井桁庸介（水産機構資源研）・坂本 圭（気象研）竹内茉莉香（NOC）

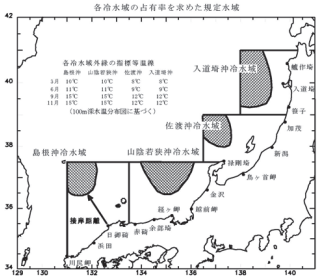
奥山 忍（秋田水振セ）・阿部祥子（水産機構資源研）

中部–東部日本海におけるメソ規模構造：詳細不明

漁海況速報



海況予報



◆スルメイカ
- 春季，漁獲対象となる前の幼イカの分布
  - ▻ 好適水温：表層（50 m深など）10°C

◆ブリ
- 秋季から冬季，ブリの分布・南下回遊経路・定置網入網予測
  - ▻ 冷水を避けて回遊
  - ▻ 冷水着岸：ブリの入網減少

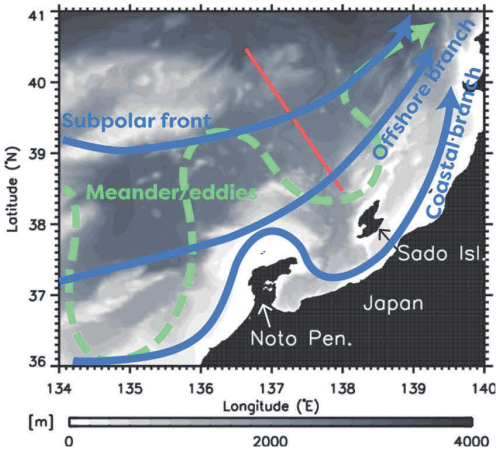
◆佐渡沖冷水域の研究
- 須田（1932），宇田（1934），山中（1951），下村・宮田（1953），加藤ら（2006）
- （海洋物理的な）実体・現象不明

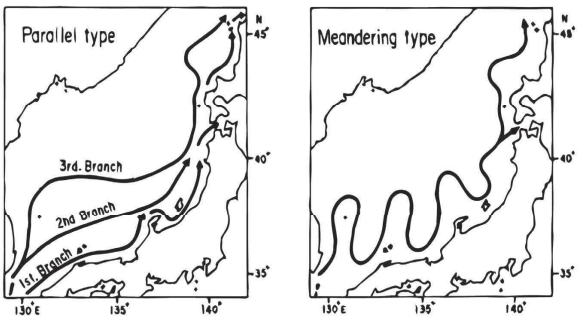
これまでの研究：

グライダー観測資料を解析し，前線・冷・暖水渦の構造とその時間変化を解明（Wagawa et al., 2020 JMS）

グライダー観測の概要

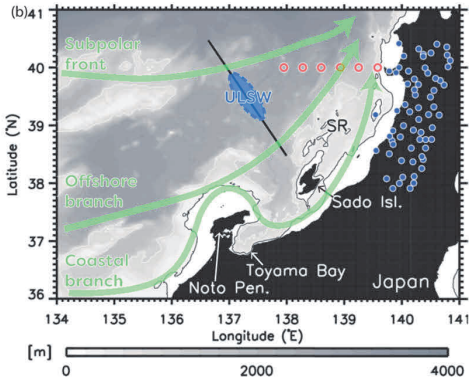
◆Seaglider（T/Sセンサーのみ）を使用
- 約2ヶ月間（2016年4/20-6/22）で2往復（4断面；1断面に1週間から10日間）
  - ▻ 2018年以降は新規購入のSeaglider （DO、Chl-aセンサ付）
    現在、11月投入、4月回収予定の5ヶ月間連続観測実施中
- SI-lineモニタリング，係留系，Jason-2と相補的に解析

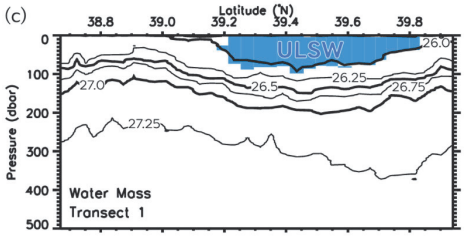




Naganuma (1975)のFig. 6

沖合域の高気圧性渦の上層に低塩分水



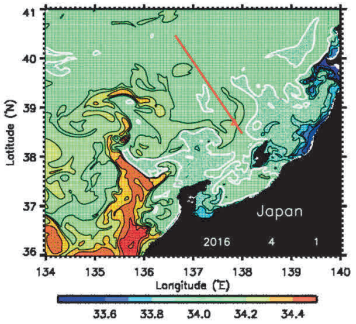


◆上層低塩水を観測
- 塩分34.0以下、水平規模は50 km程度、厚さ100 m以上
- この時期、この海域で、報告例なし

目的：上層低塩水の形成過程

上層低塩水の起源：日本沿岸と示唆される

数値実験



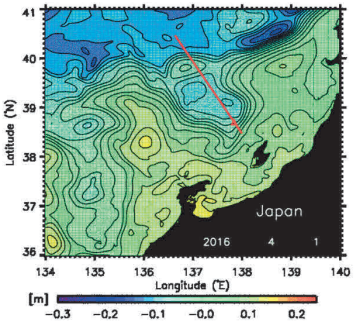
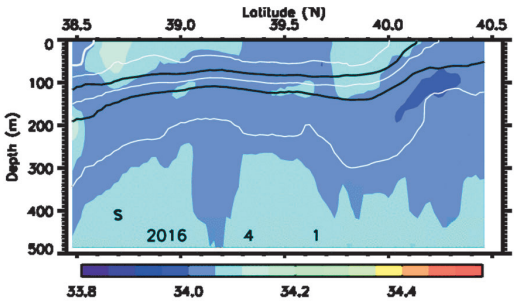
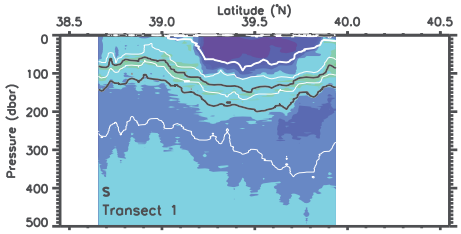


Table: Model specifications.

Model name	MRI.COM-JPN
Area	117°E–160°E, 20°N–52°N
Horizontal resolution	1/33° × 1/55° (≈ 2 km)
Vertical resolution	2–700 m (60 layers, minimum water depth: 8 m)
Horizontal mixing	Smagorinsky-like biharmonic viscosity and biharmonic diffusion
Turbulent vertical mixing	GLS scheme (Umlauf and Burchard 2003)
Background vertical diffusion	Decloedt and Luther (2010)
Nesting	On-line two-way double nesting with water volume preservation
Lateral boundary	A North Pacific model
Surface forcing	Wind and SLP: JMA MSM dataset (hourly, $\Delta x = 5$ km), other: JRA55-do dataset (3 hourly, $\Delta x \sim 55$ km)
River runoff	Based on JMA Runoff Index (hourly)
Tides	Main 8 constituents by theoretical equilibrium tide (Sakamoto et al. 2013)
Sea ice	5-category sea ice with thermodynamics and elastic-viscous-plastic rheology
Experimental period	2008 (spinup) —- 2010–2017 (for analysis)
Data assimilation	incremental 4D-VAR

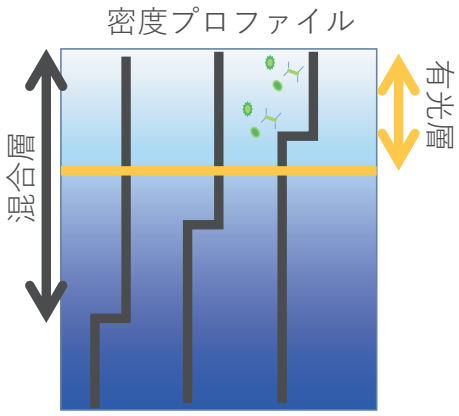




グライダー観測結果（4/24）

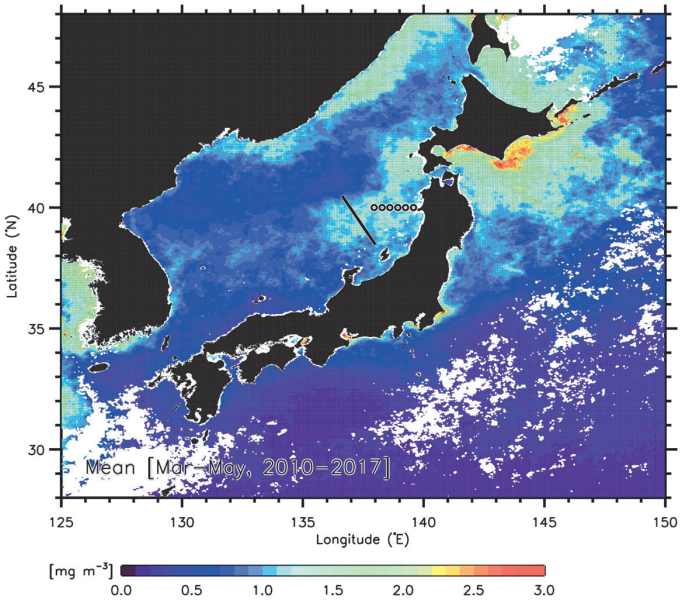
沿岸水の沖合波及のインパクト

◆沿岸水
- 春先に大量に、水質の全く異なる海洋へ流入
- 高い栄養塩水の供給
  - ▻栄養塩類を供給し、スルメイカやズワイガニなど日本海の重要水産資源の餌となる、植物プランクトンの一次生産，動物プランクトンの二次生産といった低次生物生産を高める
- 沿岸域の物理環境・物質循環・低次生物生産を激変させることに驚きはない
  - ▻富山湾などでは知見あり
- もしも沖合域に効率的に輸送するシステムがあれば、沖合域の物理場・物質循環・生態系へのインパクトは絶大



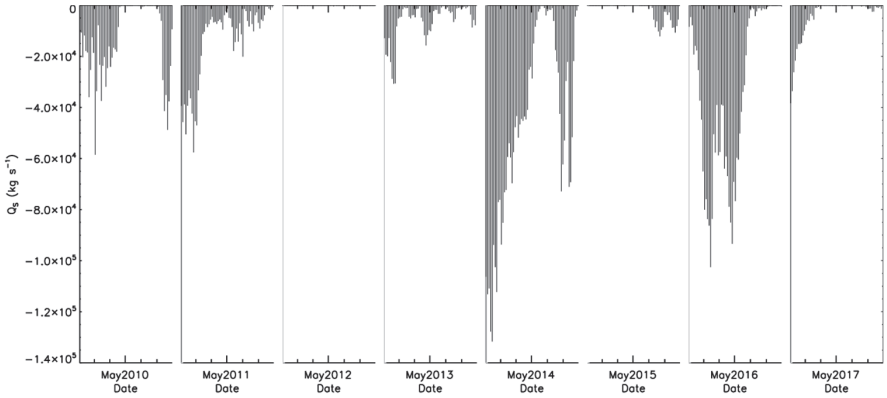
◆植物プランクトンブルーム
- 混合層が深いと、植物プランクトンが有光層より深いところまで運ばれるため生産の効率が悪い
- 春先に成層が形成されると有光層内に植物プランクトンが留まるようになり、増殖が進みクロロフィル濃度が上がる

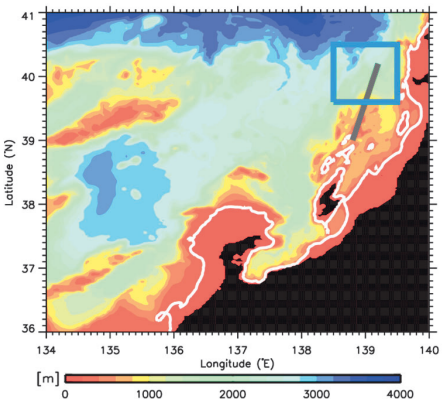
佐渡島沖合域は北太平洋の親潮域に相当する基礎生産力



2010–2017年の3–5月、人工衛星Chl-*a*

東北沿岸域から沿岸域への塩輸送：経年変化大





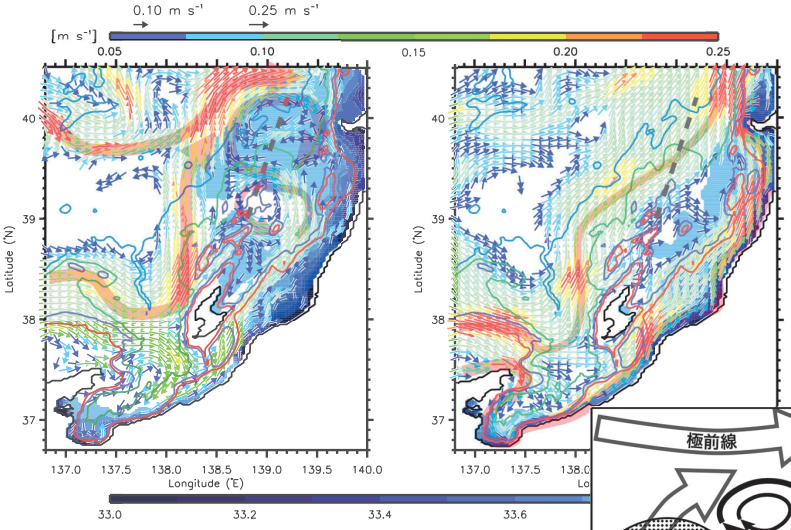
◆塩輸送

- $Q_S = \iint \rho(S - S_0) v_{NW} dxdz$
  - ▻ 基準塩分S_0=34.0、v_{NW}: 断面（灰色太線；x方向）直交（北西向き）流速成分、4–5月

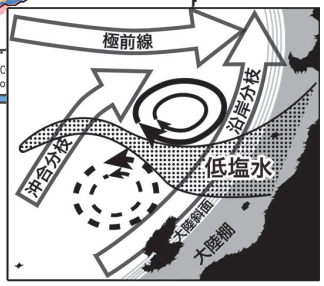
◆2014年や2016年（グライダー観測時）は大

- 2012年や2015年は小

低塩水の沖合波及：高気圧性渦、対馬暖流

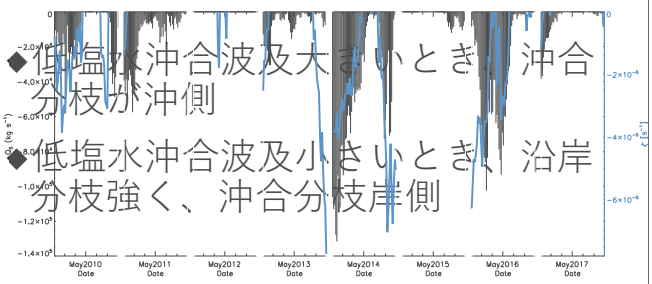


塩輸送大・小期間の海面流速・塩分（青濃淡）成図（それぞれ約25日間）
色等深線：200, 400, 1000, 2000 m
塩分33.9以上は無視、33.0以下は同青色

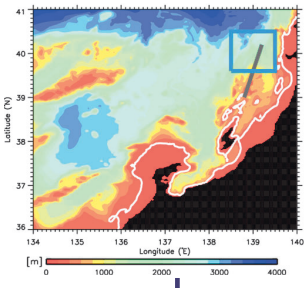


◆低塩水沖合波及大きいとき：沖合分枝が沖側

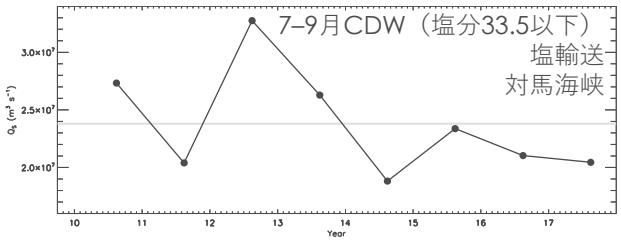
◆低塩水沖合波及小さいとき：沿岸分枝強く、沖合分枝岸側

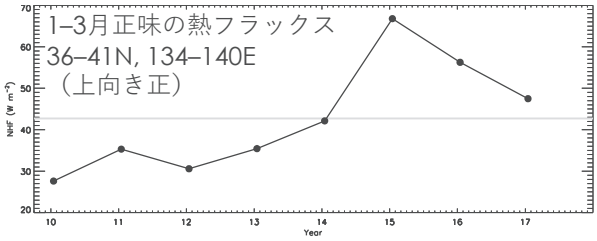


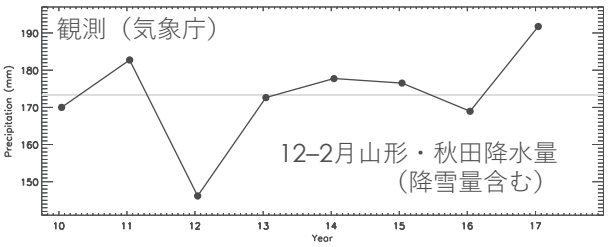
断面直交塩輸送（黒棒）と領域平均（青太線矩形）相対渦度（青線）



沿岸水の沖合波及：前年秋CDW、冬季降水・表層混合



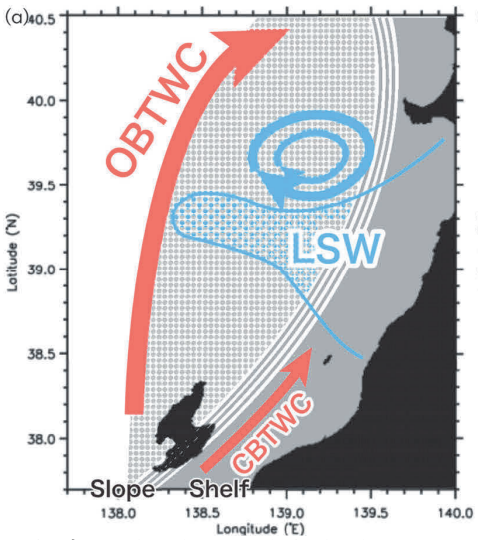


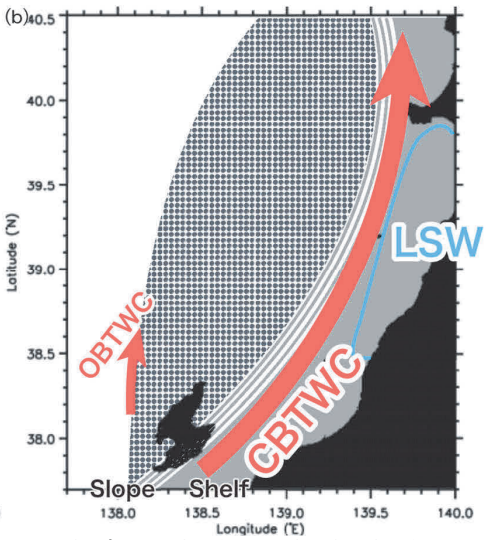


	前年の長江希釈水	降水・降雪量	海面冷却（○：弱）
2010			○
2011	○		
2012	△	△	○
2013	○		
2014			
2015	△		△
2016			△
2017		○	

◆初期条件は沿岸水波及の悪条件を規定する可能性

渦と前線：沿岸水（浮力）の拡がり





◆沖合域低塩、浮力供給で渦－プリューム的

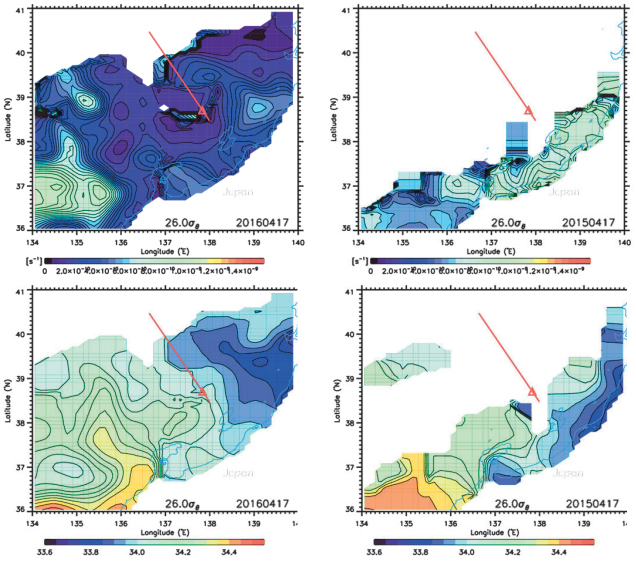
◆沖合域高塩、密度流強化

沿岸水の拡がりが大きい2016年・小さい2015年

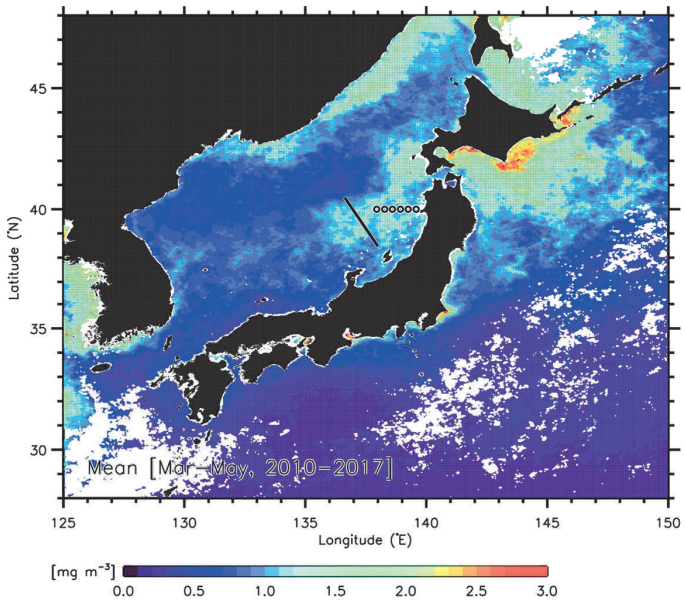
渦位

$$Q = \frac{(f + \zeta)}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}$$

塩分



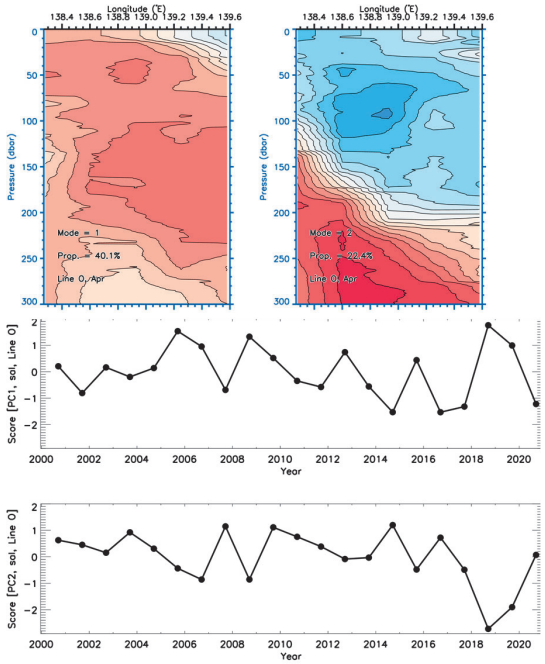
観測データとの比較：秋田県CTD定線、人工衛星Chl-a



2010–2017年の3–5月、人工衛星Chl-*a*

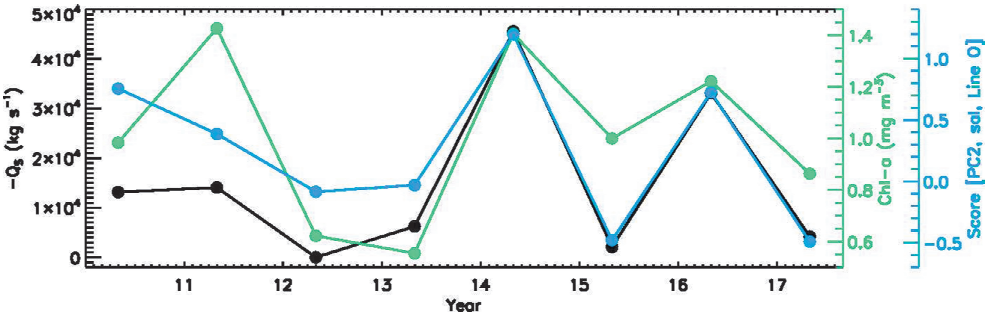
- 2000年以降の4月、秋田県CTD定線データ
  - 鉛直構造も含めた実測値で整合的な結果が出るか
- 基礎生産へのインパクトはあるのか
  - 佐渡島沖合域は北太平洋の親潮域に相当する基礎生産力

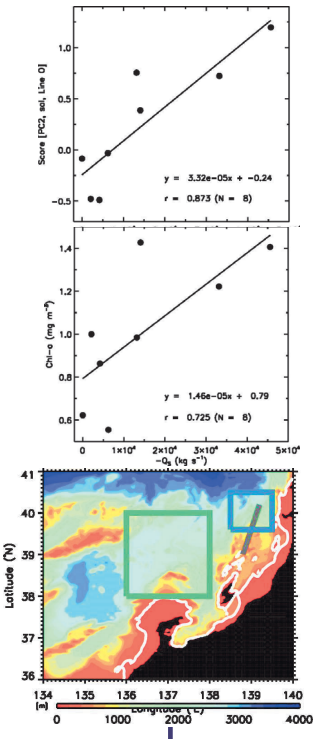
秋田CTD塩分断面構造：モデル塩輸送の分布・変動と整合



- ◆秋田県CTD定線
  - 主成分分析
    - ▻PC1：全体の変動
      やや沿岸分枝の変動のようにも見えるが、それにしては水平勾配が弱い
    - ▻PC2：沖合分枝の変動

衛星Chl-a分布：モデル塩輸送の変動と整合





- ◆人工衛星MODIS海色：3–5月平均
- ◆モデル塩輸送：4–5月平均
- ◆秋田県塩分断面PC2スコア：4月
  - モデルによる塩輸送と観測による塩分断面の変動が良く一致
    - ▻モデルと観測の結果がここまで一致するのは驚き
  - モデルによる塩輸送と観測によるChl-aの変動が一致
    - ▻基礎生産への寄与を定量化
    - ▻沿岸水は高栄養塩で表層成層化を促し、植物プランクトンブルームを加速させる証拠
    - ▻新たな生物生産機構の提示、他海域への応用性も含めれば、インパクト大

まとめ

◆沿岸水の沖合域への波及には東北沖合域の渦が重要
- 秋田CTD定線の塩分断面を解析
- 人工衛星MODISのChl-a分布を解析

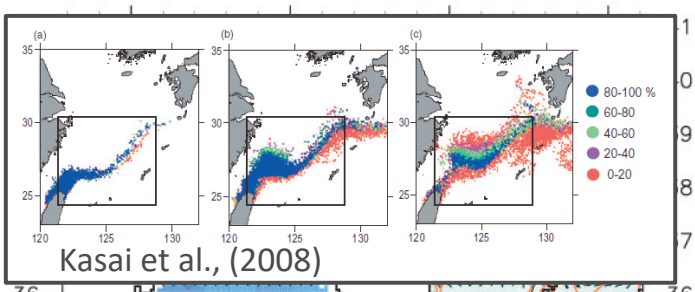
1. モデルによる塩輸送と観測による塩分断面の変動が良く一致
   - 水平・鉛直構造も整合的
     - ▻ 塩輸送大：沖合分枝強化、塩輸送小：沿岸分枝強化
     - ▻ モデルと観測の結果がここまで一致するのは驚き
2. モデルによる塩輸送と観測によるChl-aの変動が一致
   - 基礎生産への寄与を定量化
     - ▻ 沿岸水は高栄養塩で表層成層化を促し、植物プランクトンブルームを加速させる証拠
     - ▻ 新たな生物生産機構の提示、他海域への応用性も含めれば、インパクト大

日本太平洋沿岸域へのマアジ新規加入量の経年変動における黒潮―対馬暖流系の流動の影響

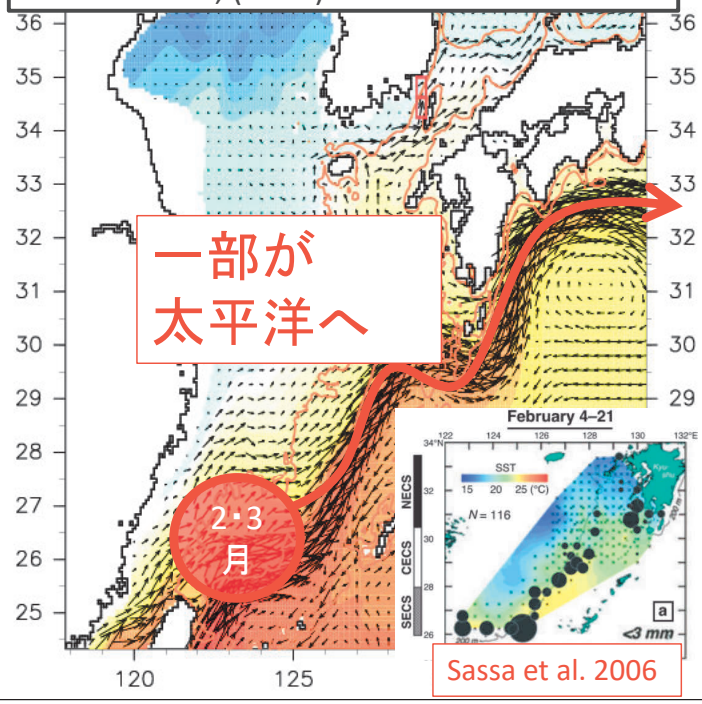
○井桁庸介*・久賀みづき**・佐々千由紀*・北島聡*・髙橋素光*・渡慶次力***・堀井日向+・和川拓*・阿部祥子*・渡邊千夏子*・瀬藤聡*・中村啓彦++・広瀬直毅+++

* 水産機構資源研　**北大低温研 ***福井県大海洋生資　+宮崎水試　++鹿大水　+++九大応力研

マアジ太平洋系群の漁獲・加入量の減少について

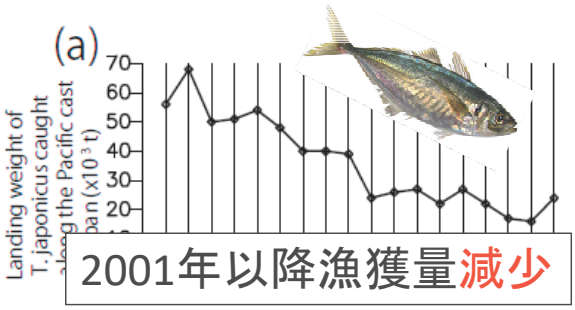


Kasai et al., (2008)

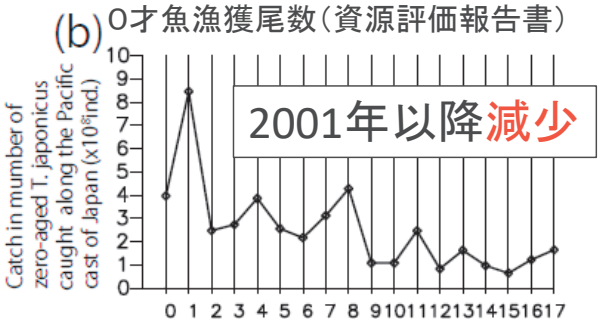


Sassa et al. 2006

太平洋岸でのマアジ漁獲量（資源評価報告書）



2001年以降漁獲量減少

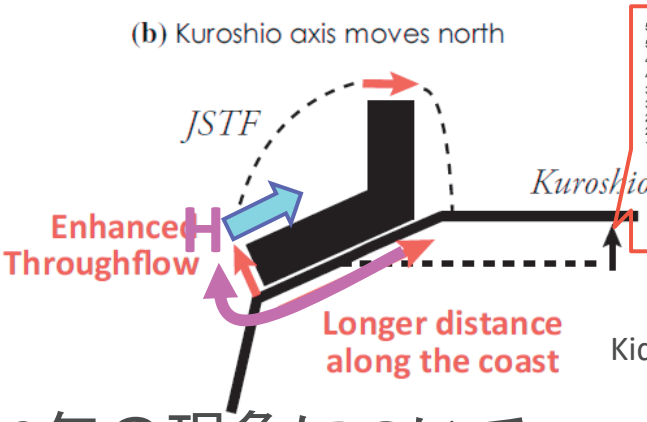


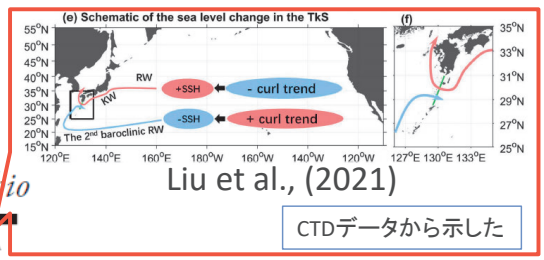
2001年以降減少

地先群・輸送・生残等の影響

黒潮等の流動の変化が影響した可能性は？

黒潮の北上に伴う対馬暖流流量の増加





Liu et al., (2021)

CTDデータから示した

Kida et al., (2021)

海洋モデル
潮位データから示した

1997-2012年の現象について

黒潮の北上により太平洋岸の潮位が上昇

↓

上昇域が沿岸捕捉波として
岸を右に見て対馬海峡まで伝播

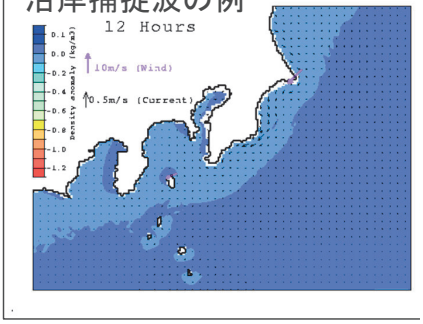
↓

九州西方の潮位が慢性的に上昇し日本海との潮位差が増加

↓

対馬暖流が強化される

沿岸捕捉波の例

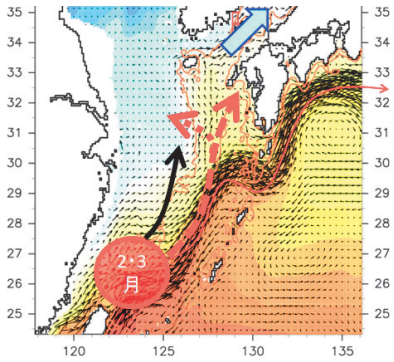


研究目的

2000年以降のマアジ太平洋岸系群の加入量減に対し、
黒潮ー対馬暖流系の経年変化が影響した
可能性はあるのか？（マアジ仔稚魚の輸送を通じて）
という事を確かめ、その可能性を提案したい

これらを明らかにすることで、
マアジの新規加入プロセスの一端を解明したい。

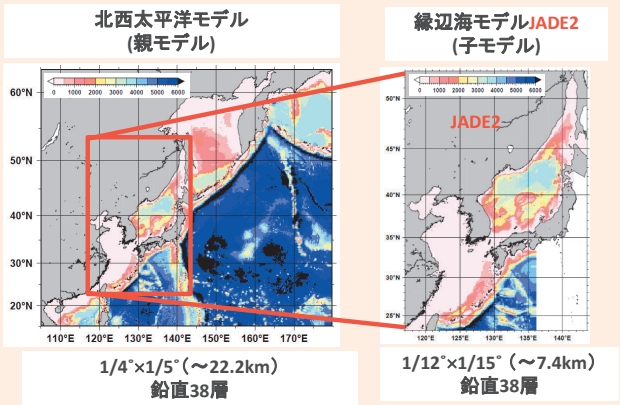
仮説：
対馬暖流流量が増加し、
東シナ南部起源のマアジが
日本海方面へ輸送されやすくなった結果、
太平洋への輸送量が減少したのでは？



対象：流動変化（生残過程ではない）
手法：粒子追跡計算

使用データと粒子漂流計算

使用データ：拡張版日本海海況予測モデルJADE2



- 側面境界条件：北西太平洋モデルの出力＋潮汐（NAO.99Jb）
- 同化計算期間：1993年～現在
- 気象外力データ：JRA25(～2007年)、GPV (2008年～)
- 風応力：20%減（JRA25期間のみ）
- 河川水：月別長江河川（～2011年）、海岸線から約80kmまでの陸地降雨を河川水として与える
- 出力変数（日平均）：
  水温・塩分、密度、流速（各層、順圧）、渦度、海面熱フラックス、混合層厚、海面水温、海面高度
- データ同化：

	同化データ	同化手法
SST	MGDSST	ナッジング
SSH	AVISO along-track	近似カルマンフィルタ
CTD	水産試験機関CTD, Argo(JADE2のみ)	近似カルマンフィルタ (力学的海面高度として同化)

解析期間：2000～2017年
計算確定値（日平均値）を実験に使用

粒子追跡実験

粒子追跡はEuler差分による積分計算で行った。乱流拡散にはランダム項を採用した.

$$\frac{dx}{dt} = u_a + u_d \qquad dx = u_a dt + u_d dt \quad u_d dt = \sqrt{2\kappa \cdot |dt|}\left(R_x, R_y\right)$$

u_a：流速（大循環モデル結果）

u_d：拡散速度

$\kappa = A\delta x\delta y\sqrt{\left(\frac{\partial u_a}{\partial x} - \frac{\partial v_a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_a}{\partial x} + \frac{\partial v_a}{\partial y}\right)^2}$：拡散係数(Smagorinsky, 1963)

A=0.1：調整係数

$\delta x\delta y$：格子間隔

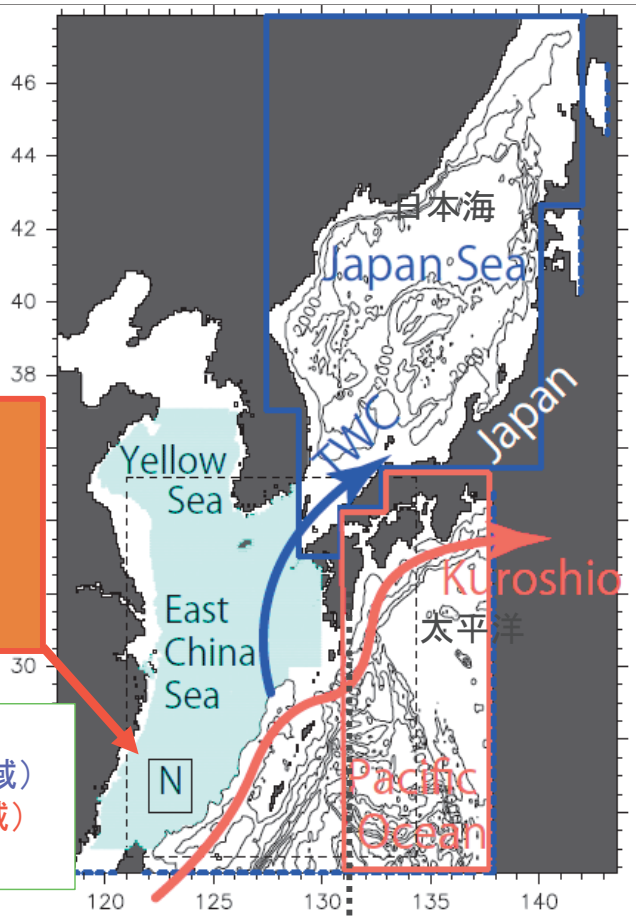
粒子追跡実験の概要

実験1：仮想マアジ移動

設置水深：22 m
設置間隔：1/96° グリッド

領域：台湾北東海域
粒子放出時期：2/10～2/19
3/10～3/19
1日1回(約2万8千個)×20回：
約55万個の粒子を放出

粒子カウント方法
日本海（34° N以北、129° E以東全域）
太平洋（34° N以南、131° E以東全域）
でそれぞれ60日後の粒子の数をカウント



マアジがふ化後約2ヶ月後に近底層に移行し（着底と呼ぶ），
その後はその海域で生活するという仮説(Takahashi et al., 2012)に基づく.

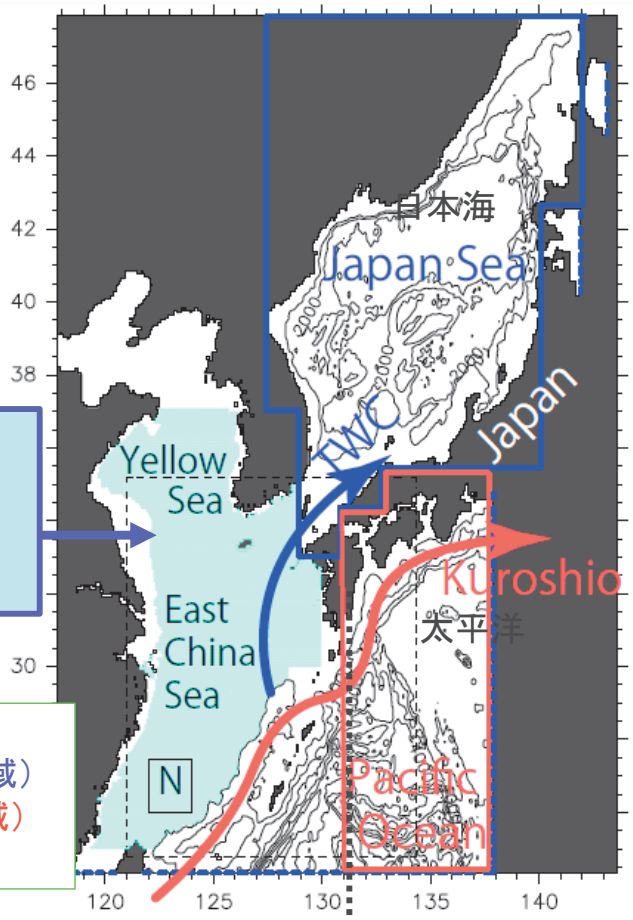
粒子追跡実験の概要

実験2：物質輸送把握

設置水深：22 m
設置間隔：1/12° グリッド

領域：台湾北東海域
粒子放出時期：毎月1日,16日
1日1回(約3万4千個)×24回：
毎年約80万個の粒子を放出

粒子カウント方法
日本海（34° N以北、129° E以東全域）
太平洋（34° N以南、131° E以東全域）
でそれぞれ60日後の粒子の数をカウント

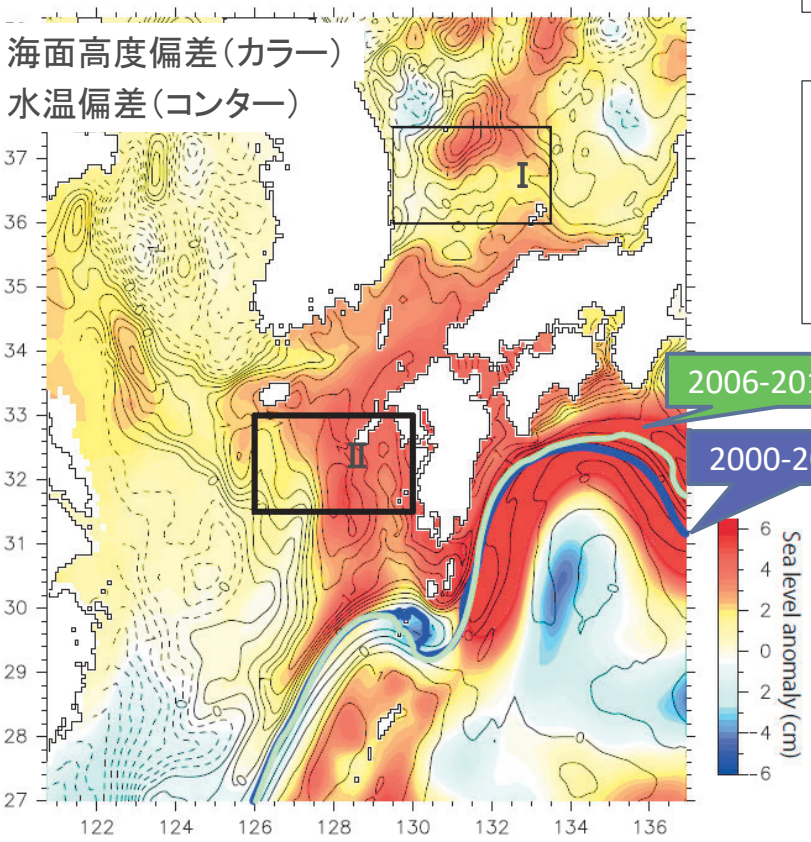


マアジがふ化後約2ヶ月後に近底層に移行し（着底と呼ぶ），
その後はその海域で生活するという仮説(Takahashi et al., 2012)に基づく.

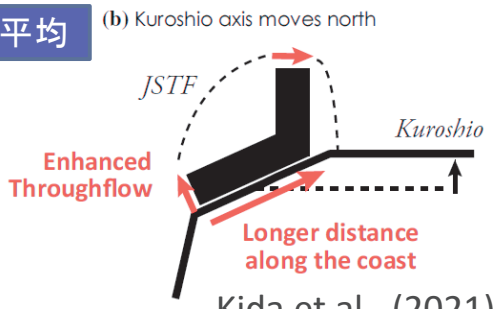
JADE2に見られた対馬暖流流量の増加

後半（2006～2017）平均－前半（2000～2005）平均
値が大きいと後半の方が海面が高いことを意味する

日本海（左図赤四角Ⅰ）の上昇幅
＜東シナ海（赤四角Ⅱ）の上昇幅



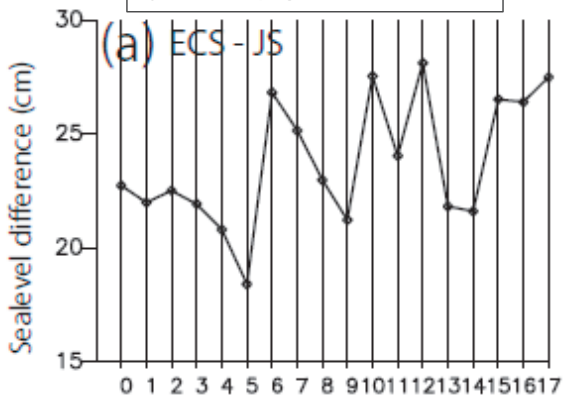
JADE2でも
東シナ海起源で
対馬海峡通過流の増加が
起きた可能性大

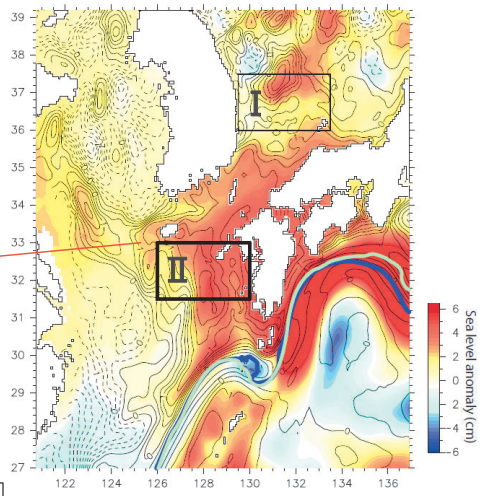


Kida et al., (2021)

JADE2に見られた対馬暖流流量の増加

東シナと日本海の水位差（Ⅱ－Ⅰ）





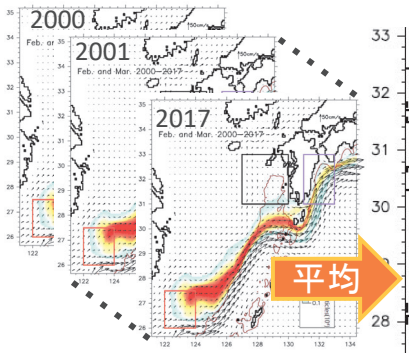
値が大きいと、東シナ海の方が日本海よりも海面高度が高かったこと、
つまり、対馬海峡通過流量が多かったことを示す。

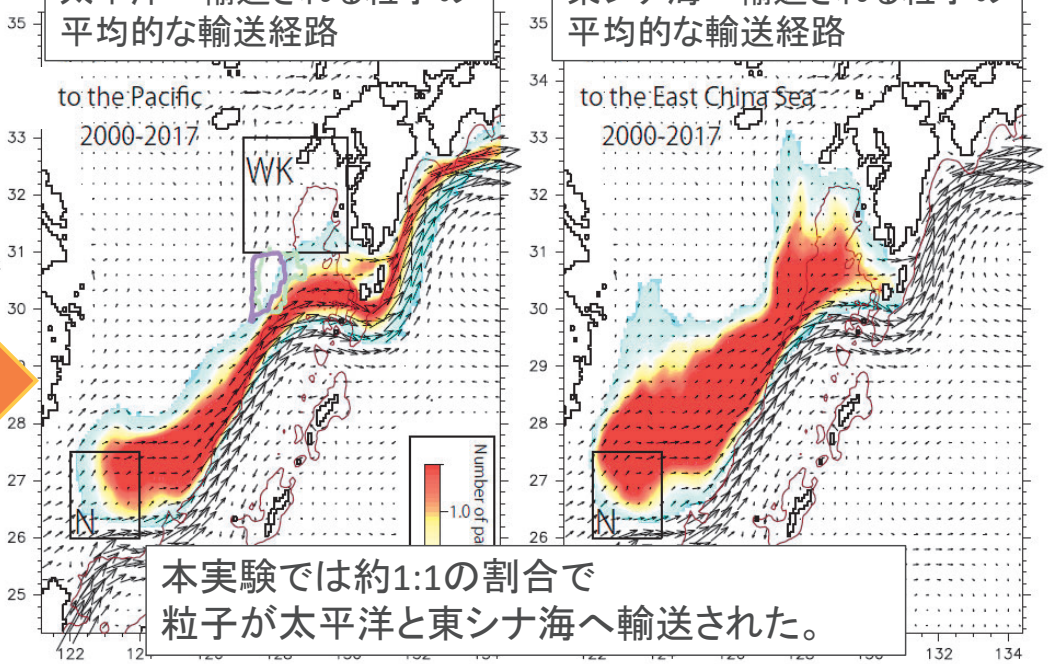
2006年以降、
日本海への流入量を増加させる状況が潜在していた

実験結果

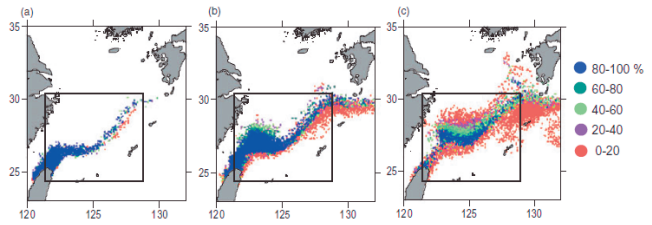
太平洋へ輸送される粒子の
平均的な輸送経路

東シナ海へ輸送される粒子の
平均的な輸送経路

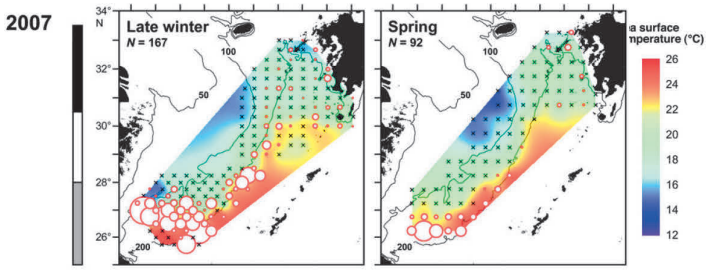




本実験では約1:1の割合で
粒子が太平洋と東シナ海へ輸送された。



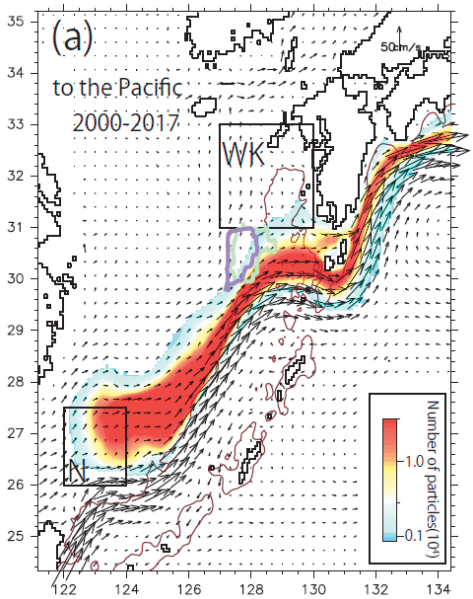
Kasai et al., (2008)

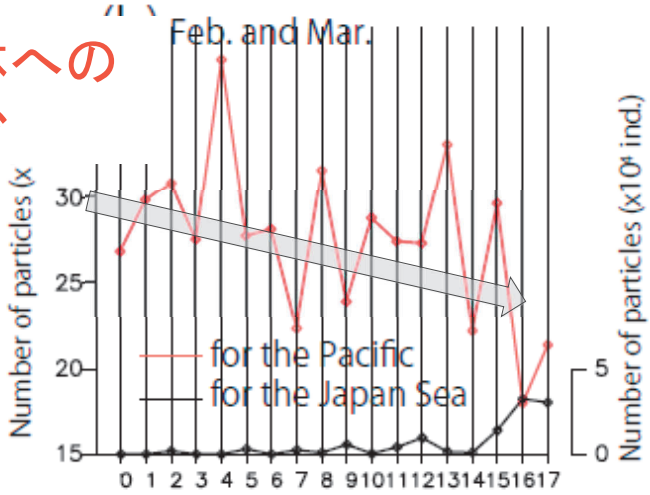


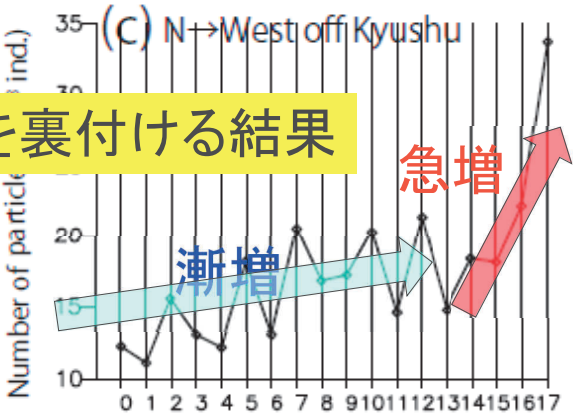
Sassa et al., (2016)

太平洋への輸送の経年変化

太平洋全体への
輸送量減少



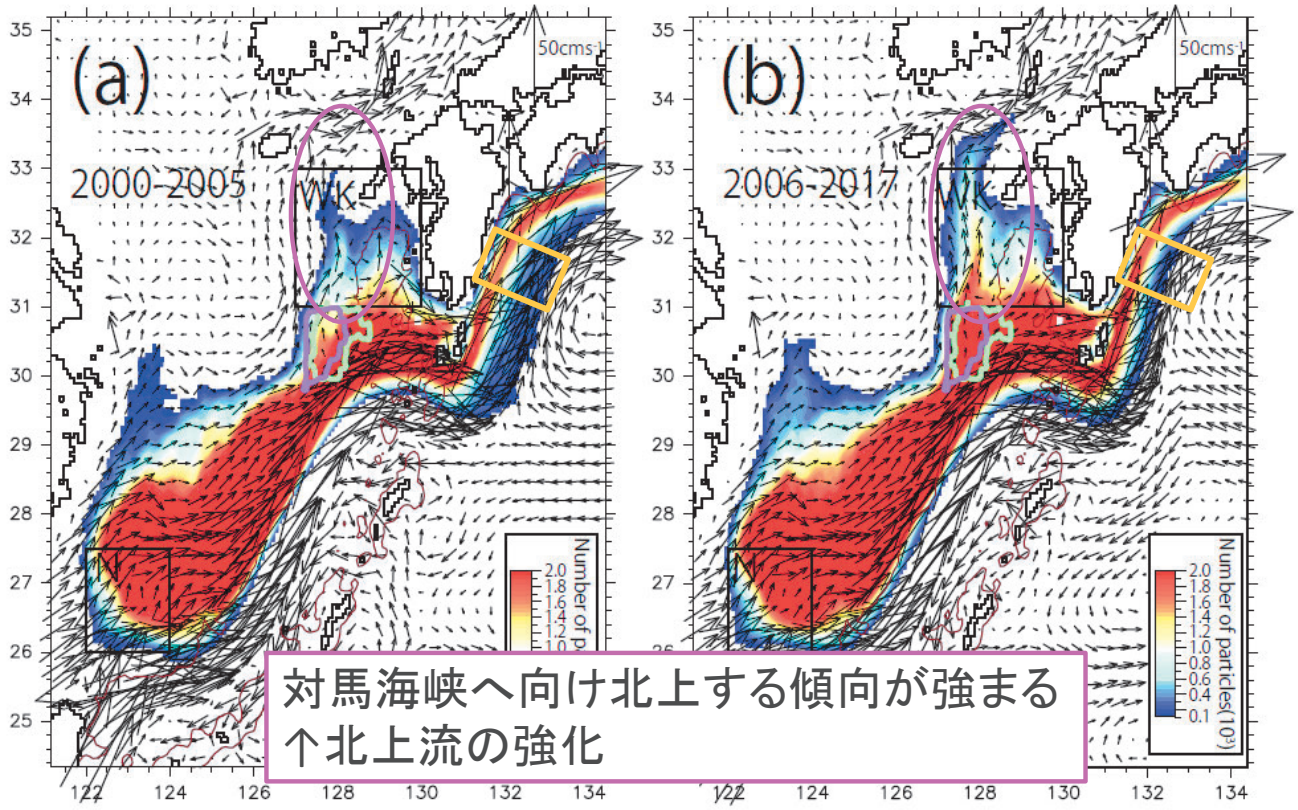




仮説を裏付ける結果

毎年同数の粒子を放流

九州西方へ向かった粒子の挙動

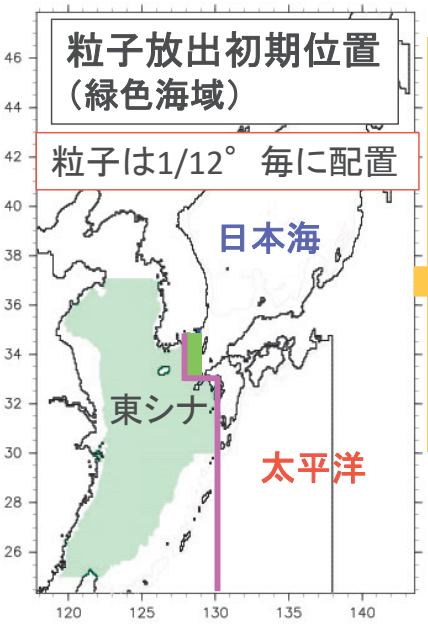


対馬海峡へ向け北上する傾向が強まる
↑北上流の強化

黒潮下流方向への輸送幅が減少
↑北上粒子増加・黒潮北上

対馬暖流源流域の見積もり方

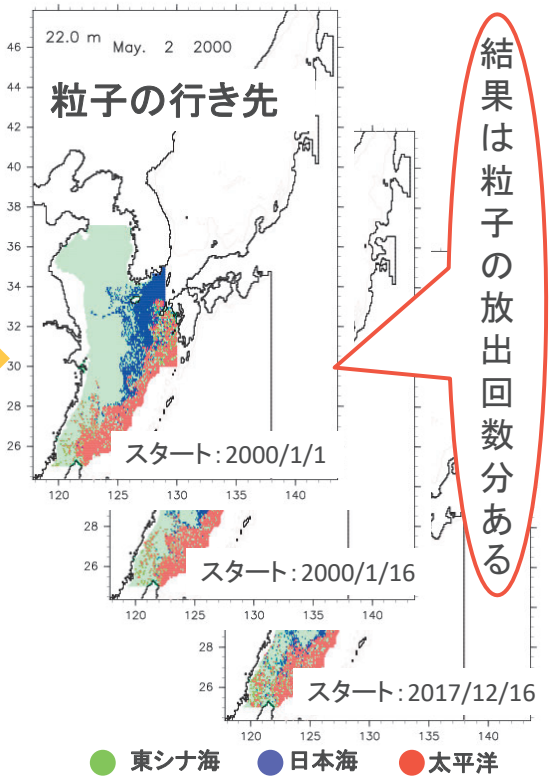
22m深で実施



東シナ・日本海・太平洋の海域を、
桃線を境界線として定義

（1）1/2～6/3に15日毎で全域から放出

（2）60日後に粒子がどの海域に居たかを検出

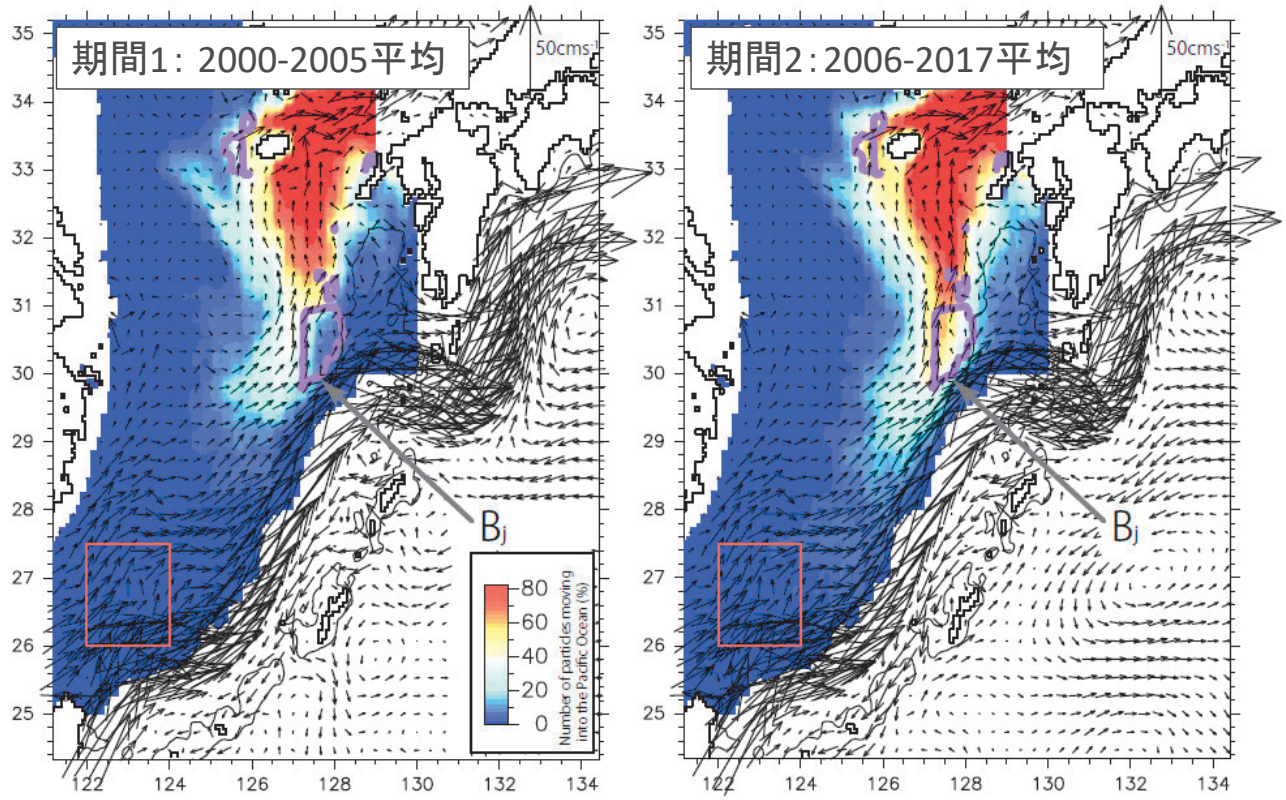


結果は粒子の放出回数分ある

粒子の行き先分布の
経年的な変化を追跡できる

対馬暖流源流域の南への伸張

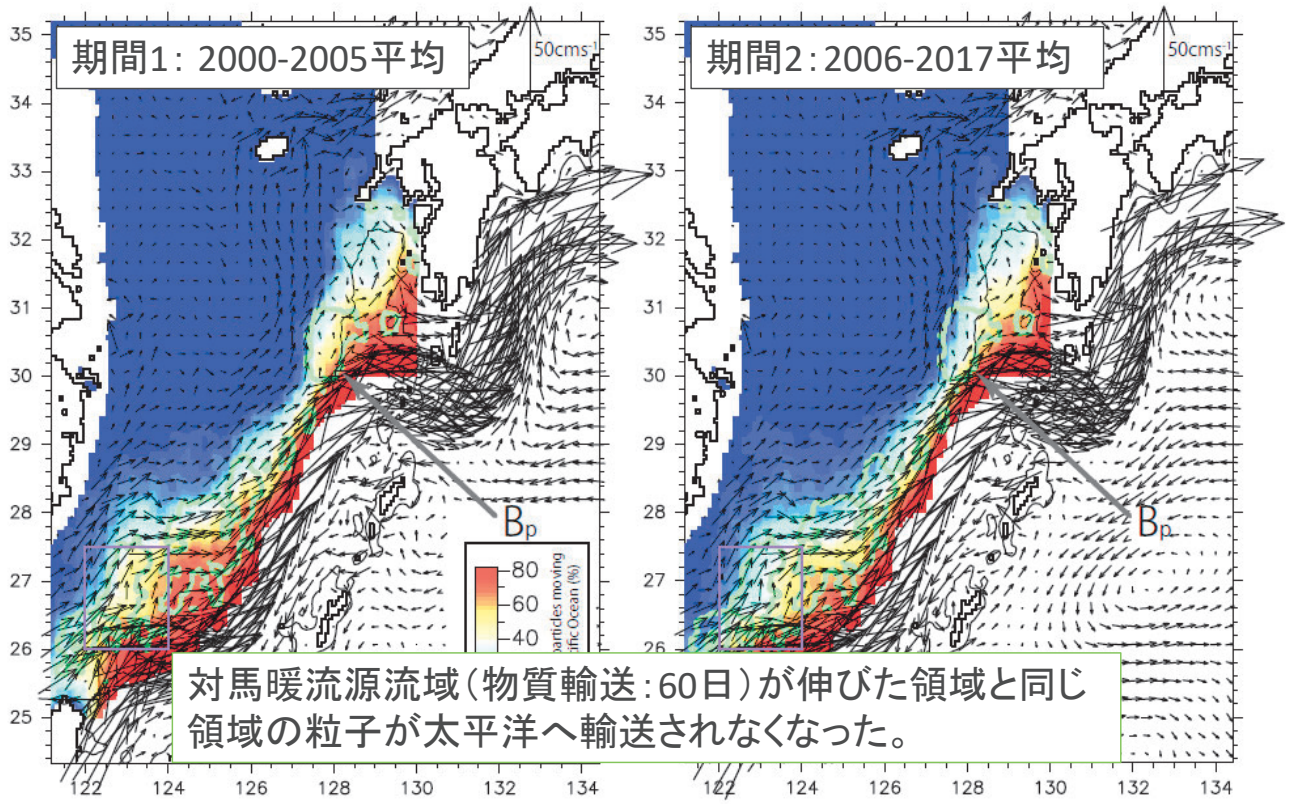
期間1の値よりも期間2の方が20%以上**増加**した領域



対馬暖流源流域の流れが強まる
↑対馬暖流の源流域（物質輸送：60日）が南に延びる。

太平洋への物質輸送の変化

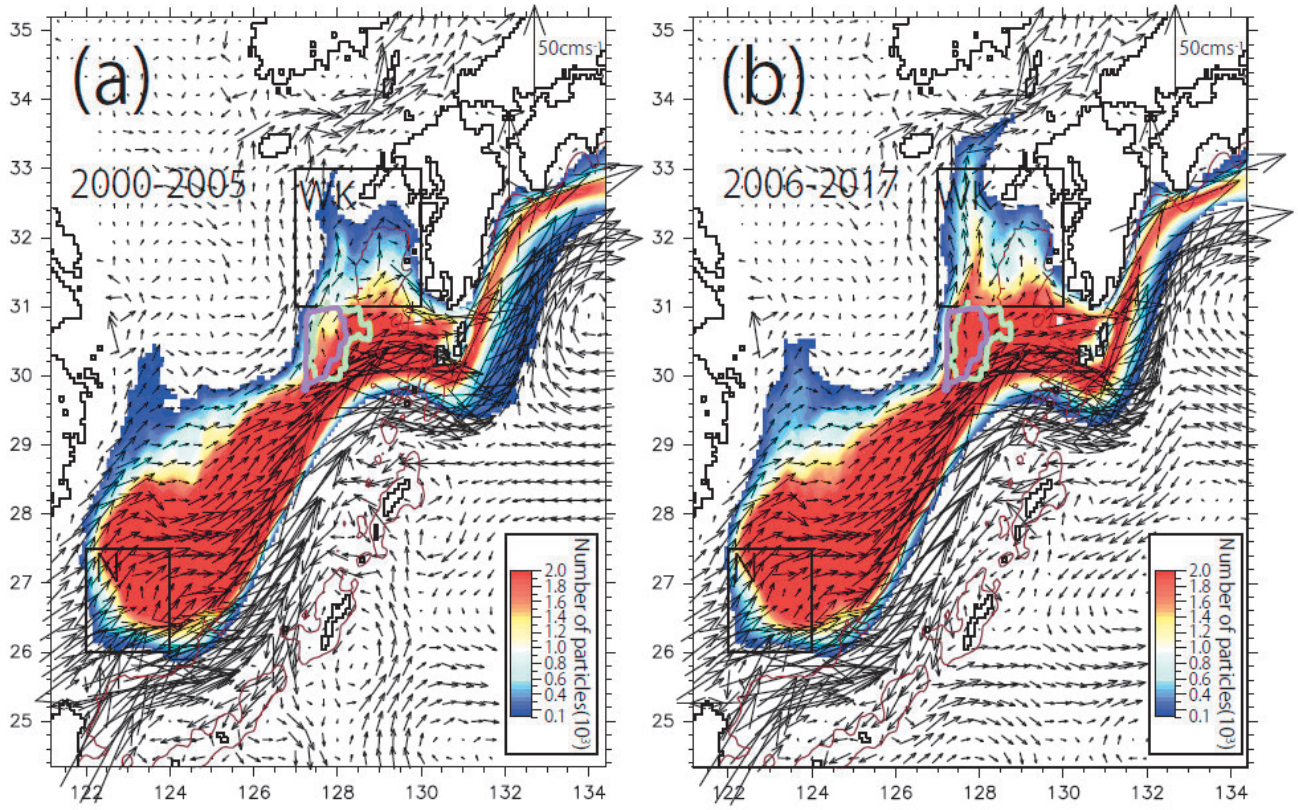
期間1の値よりも期間2の方が10%以上**減少**した領域



対馬暖流源流域（物質輸送：60日）が伸びた領域と同じ領域の粒子が太平洋へ輸送されなくなった。

マアジ仔稚魚輸送における、
太平洋ー日本海への輸送振り分けポイントが南下した

九州西方へ向かった粒子の挙動



マアジ仔稚魚輸送における、
日本海へ向けた振り分けポイントが南下した

2000年以降に継続的に起きている黒潮ー対馬暖流流動変化に対するマアジの太平洋への輸送変化シナリオ

太平洋上の風系変化

↓

黒潮流軸の北上

↓

太平洋岸の潮位上昇

↓

高潮位の九州西方への伝播

↓

対馬暖流流量の増加

↓

対馬暖流源流域の北上流の増幅

↓

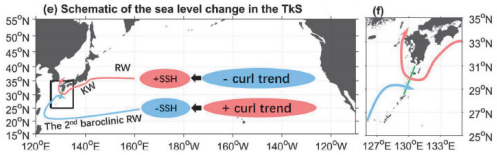
**黒潮北縁部を輸送される
マアジの九州西方への離脱**

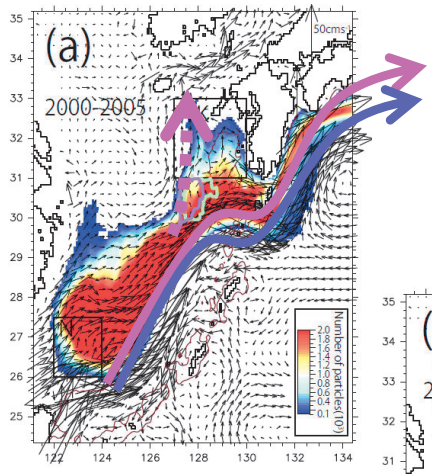
↓

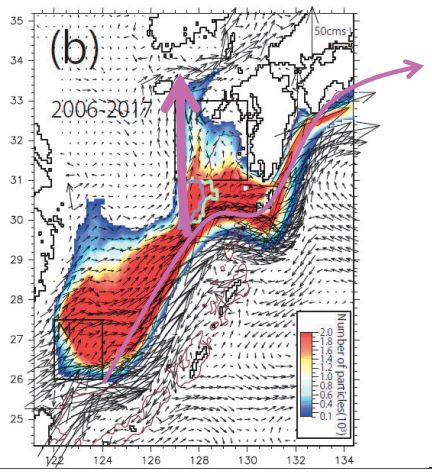
マアジの太平洋への輸送減少

↓

マアジ太平洋系群加入量減少の一因？







おわり

日本海の波高変動について

久木幸治（琉球大学理学部）

Hisaki Y.2022
Variability of wave height in the Sea of Japan.
to be published in CSR

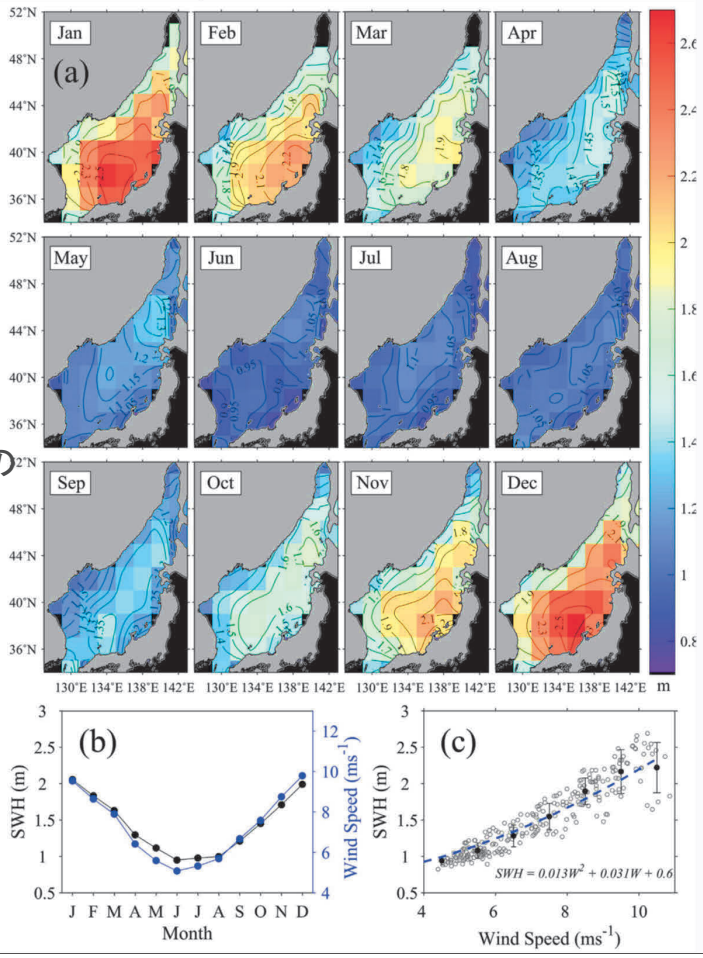
九州大学応用力学研究所 研究集会
「日本周辺海域の海況モニタリングと
波浪計測に関する研究集会」
発表日：2021年12月8日(水)
発表時間：10:25-10:50

はじめに

- 縁辺海の波候（波浪気候）：海洋開発・船舶運用計画
- 日本海：半閉鎖的
- 局所的な風に影響: 風速と吹送距離
- 日本海の波候の研究：東シナ海、南シナ海などに比べて少ない
- 多くは沿岸波浪計を使用
- 波浪の時間・空間変化
- 人工衛星（高度計）
- 波浪追算（再解析風データ）
- 波浪再解析データ

過去の研究

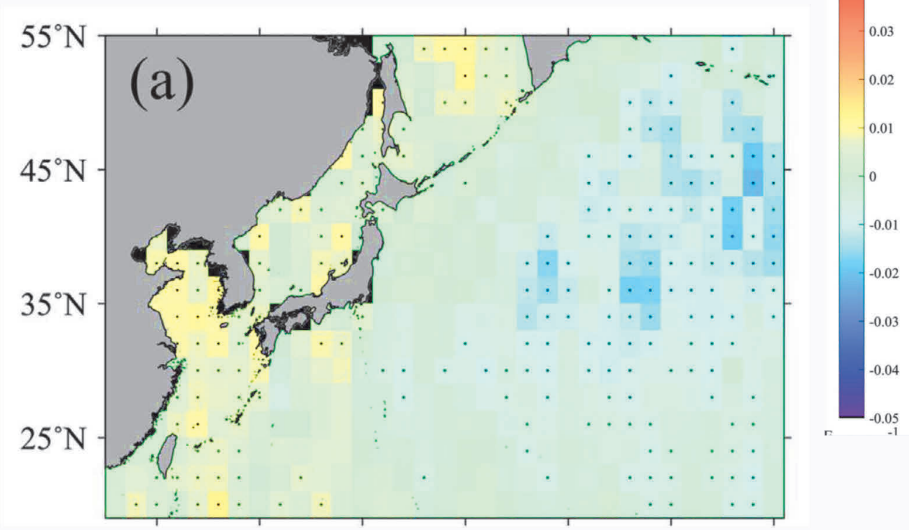
- 日本海の波高分布の季節・経年変動(Woo and Park,2017, DSRⅡ)



(a)1991年から2015年までの有義波高の月平均(m)の空間分布
(b)有義波高(黒)と風速(青)の月変化
(c)風速と有義波高

過去の研究

- 日本海の波高分布の季節・経年変動
  (Woo and Park,2017,DSR Ⅱ)



有義波高線形トレンド(m/年)

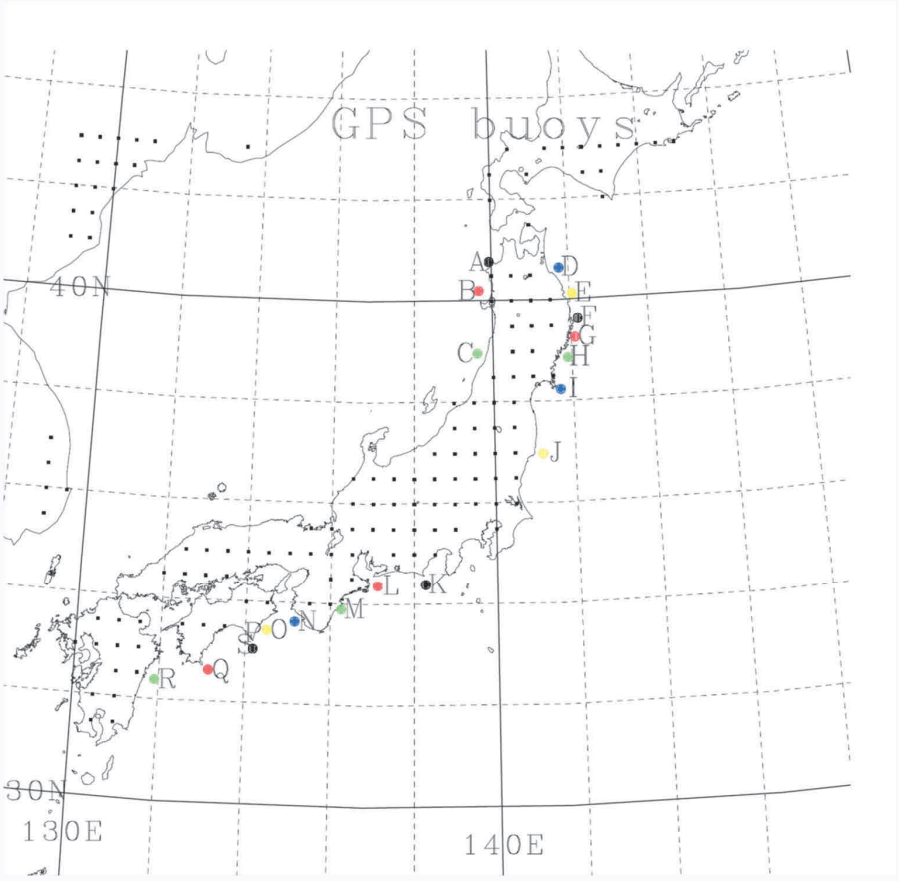
目的と使用データ

- 日本海の波高(波高偏差)の空間分布の季節・経年変動
- 風(風ベクトル・風速)分布との対応

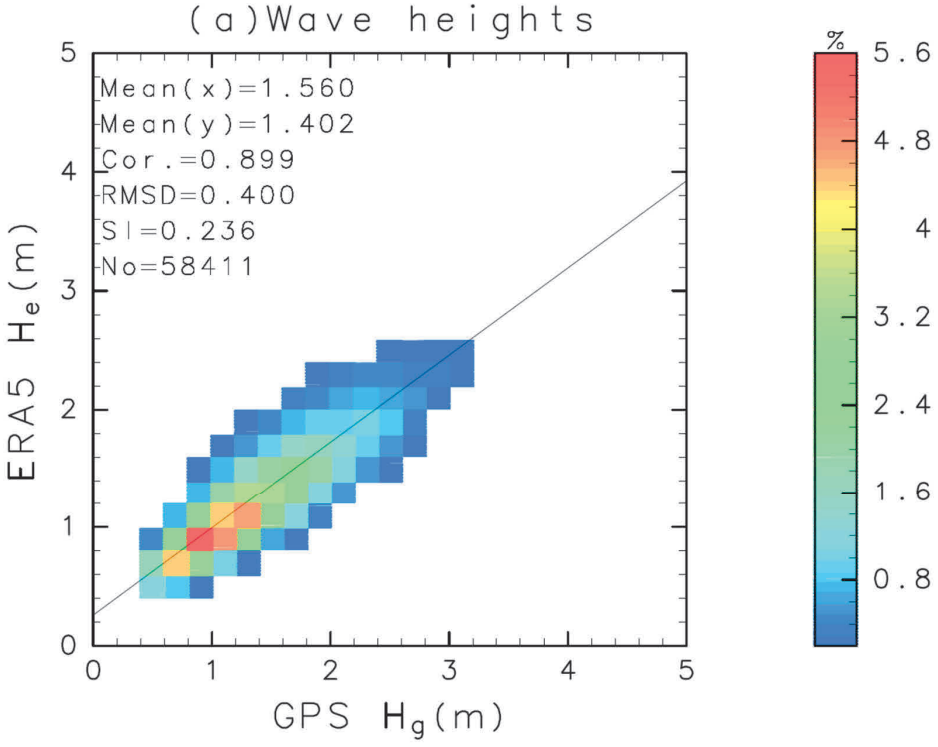
- ERA5波高月平均値(1979-2019年)
- ERA5風ベクトル・風速月平均値

- GPSブイ、気象庁係留ブイ(2000年まで)

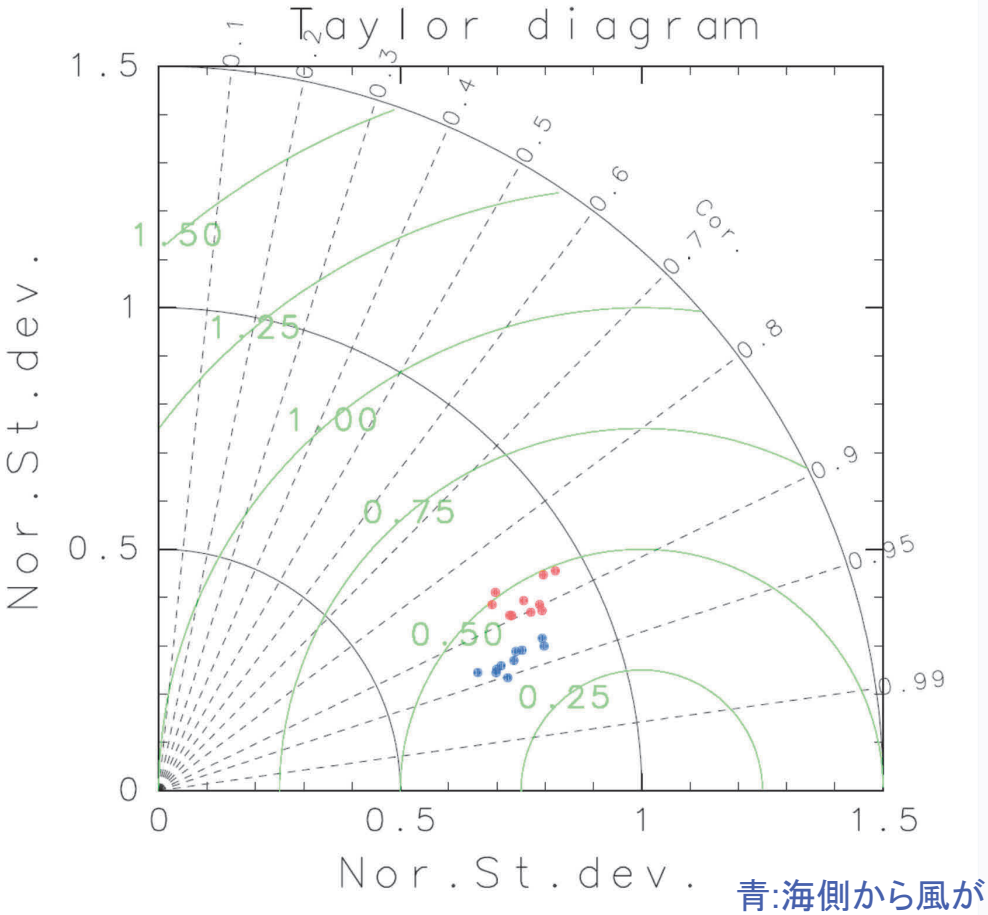
GPSブイの位置



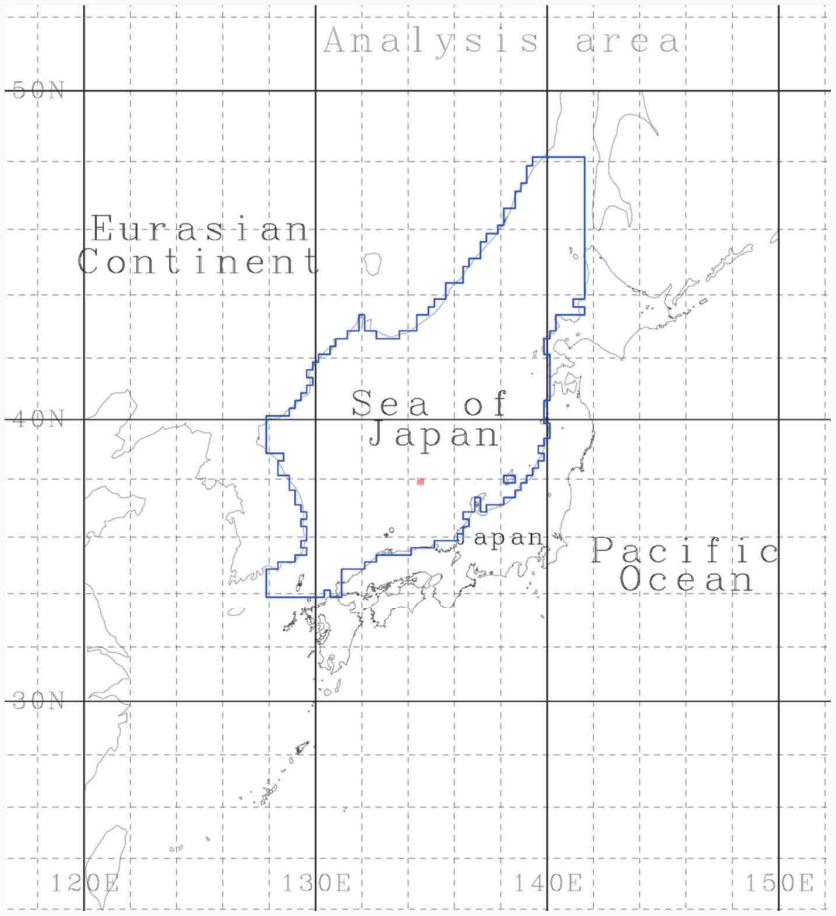
双線形補間可能なブイを対象
D,E,F,G,J,K,L,O,P,Q



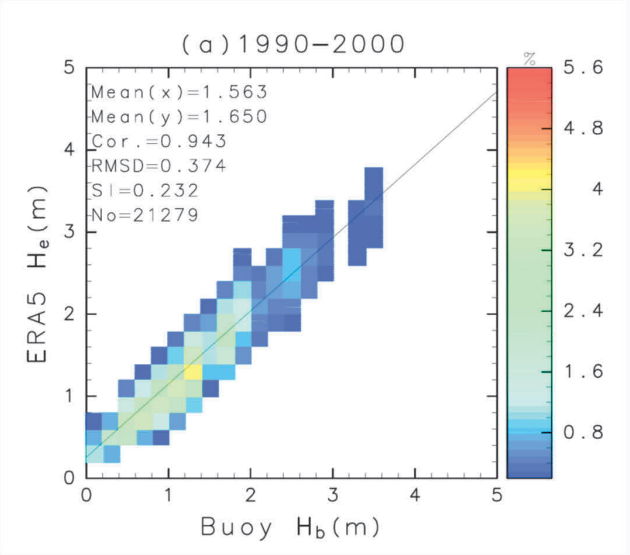
0.2mビン中のデータ個数の割合を表示

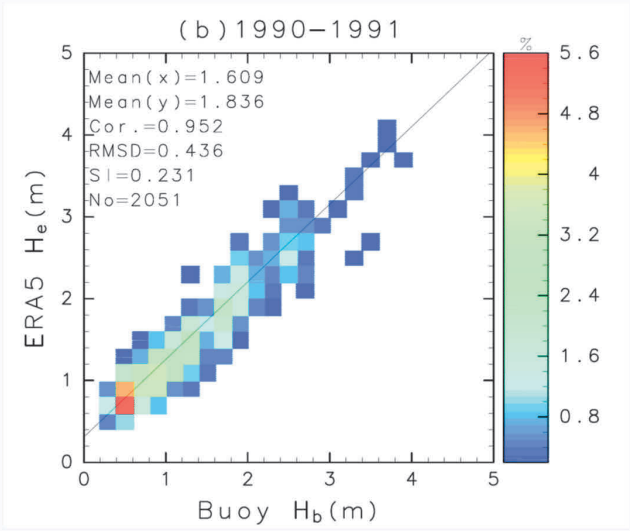


青:海側から風が吹いている場合
赤:陸側から風が吹いている場合



ブイデータとの波高比較

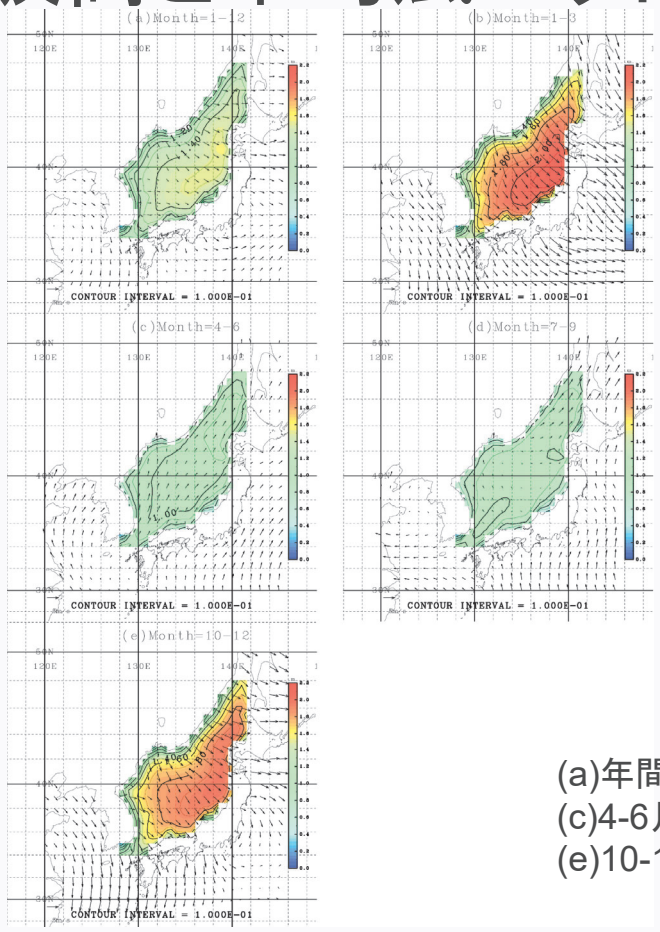




気象庁係留ブイ: 37° 55’ N ,134° 32’ E

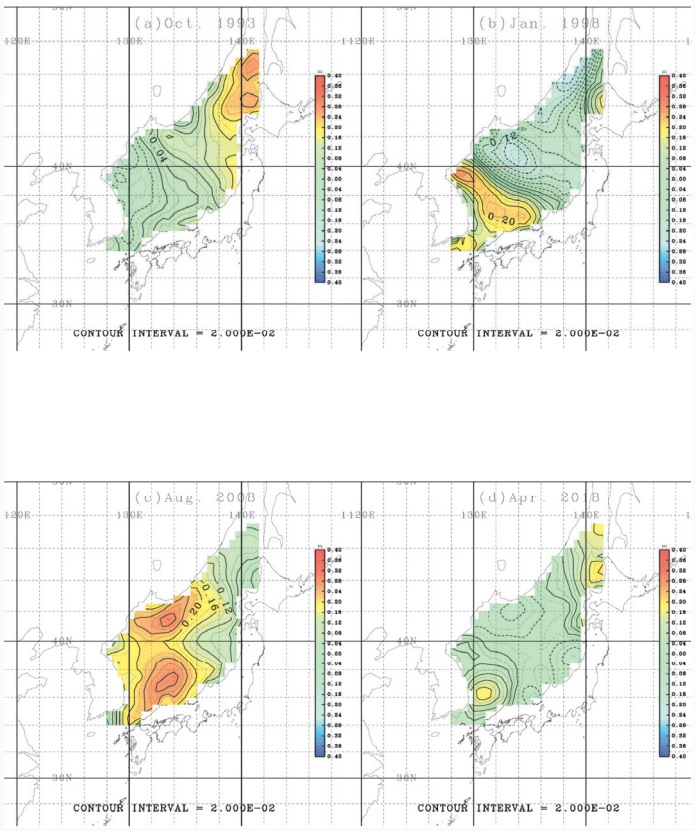
0.2mビン中のデータ個数の割合を表示
右は高度計導入以前

平均波高と平均風ベクトル

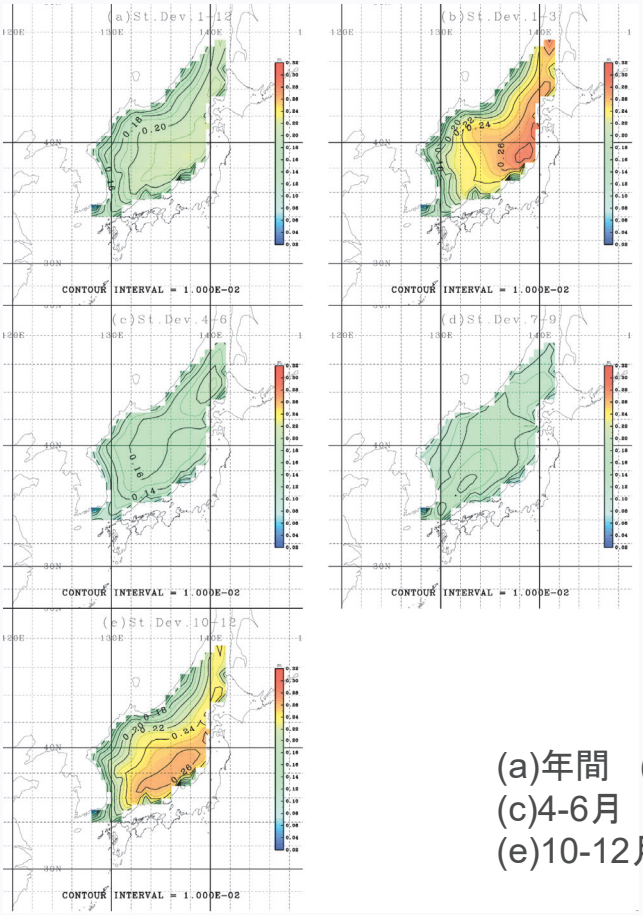


(a)年間 (b)1-3月
(c)4-6月 (d)7-9月
(e)10-12月

波高偏差の例

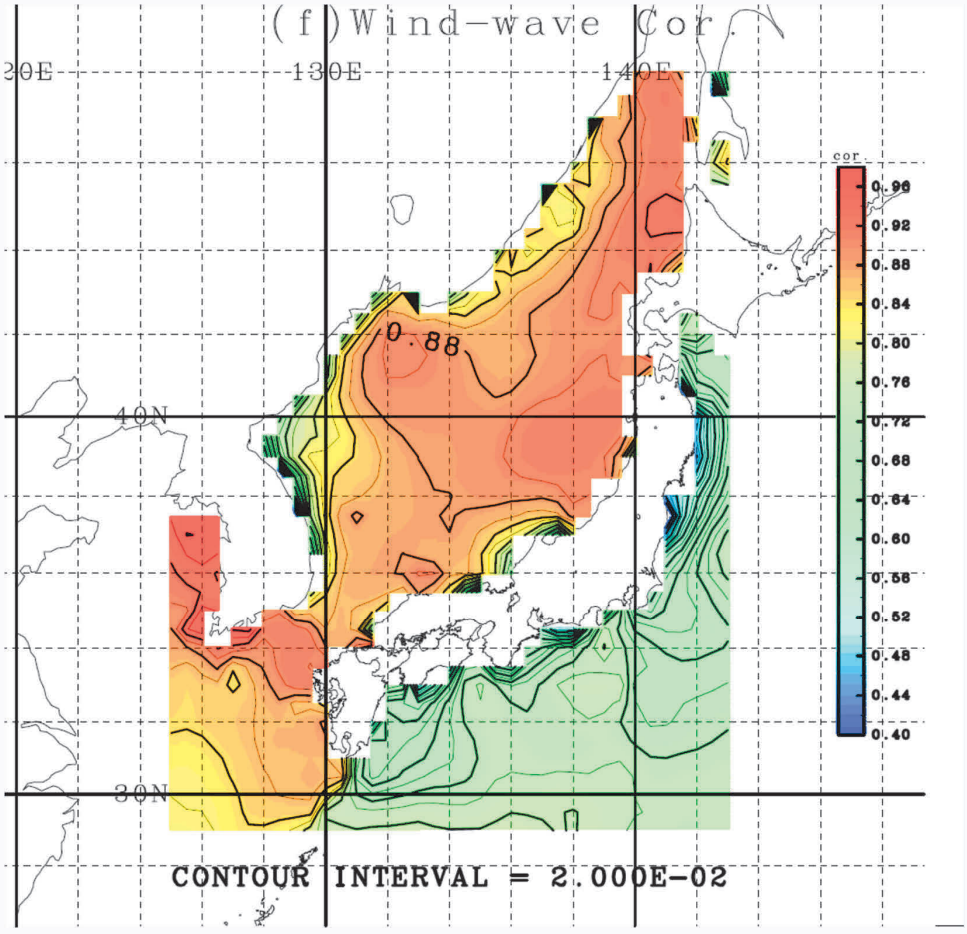


波高偏差の標準偏差

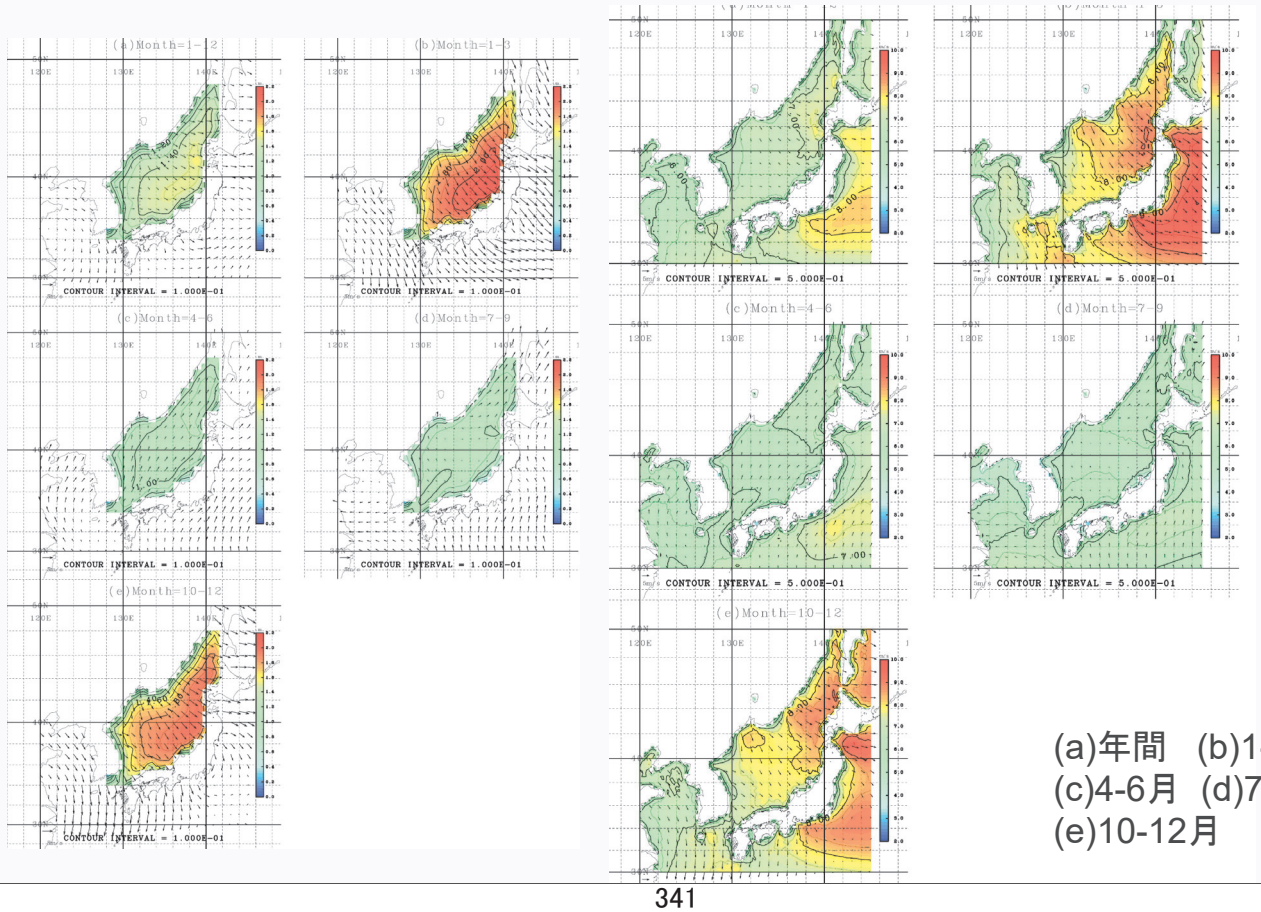


(a)年間　(b)1-3月
(c)4-6月　(d)7-9月
(e)10-12月

波高偏差と風速偏差の相関

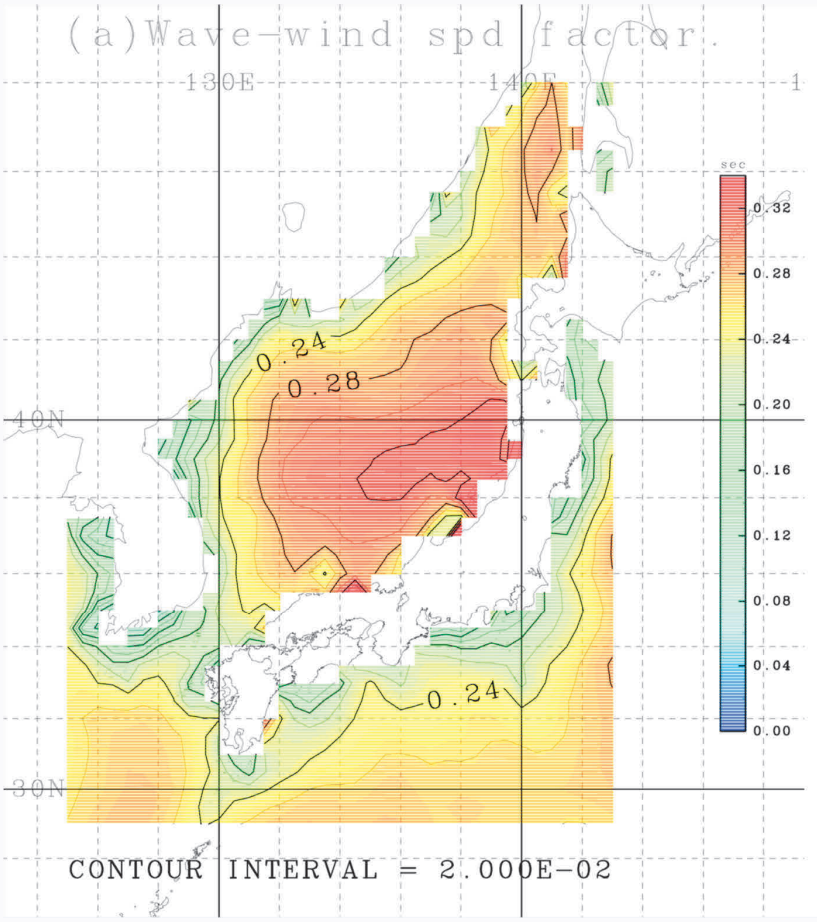


平均波高（左）と風速（右）

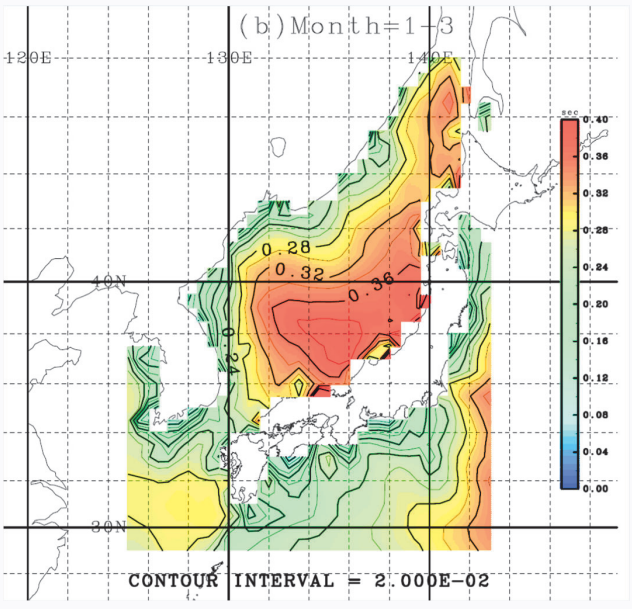


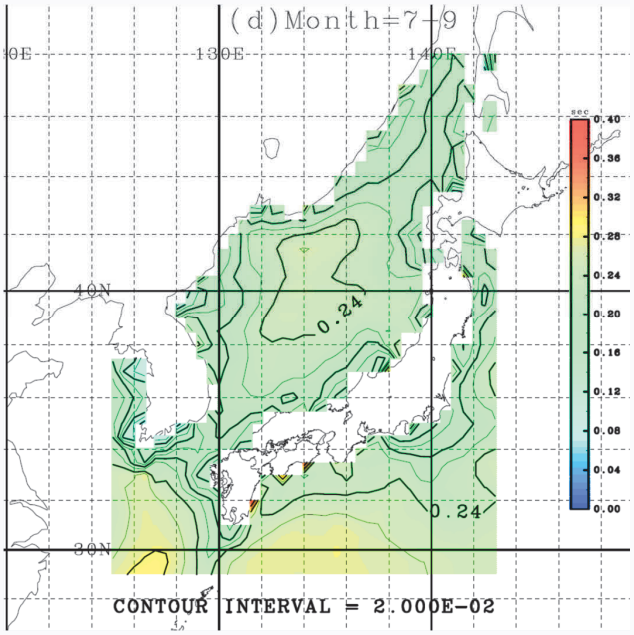
(a)年間　(b)1-3月
(c)4-6月　(d)7-9月
(e)10-12月

風速偏差と波高偏差の回帰直線の傾き

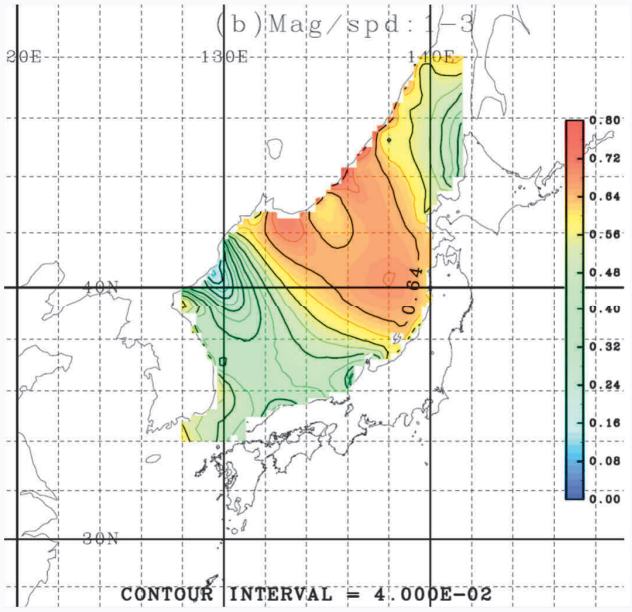


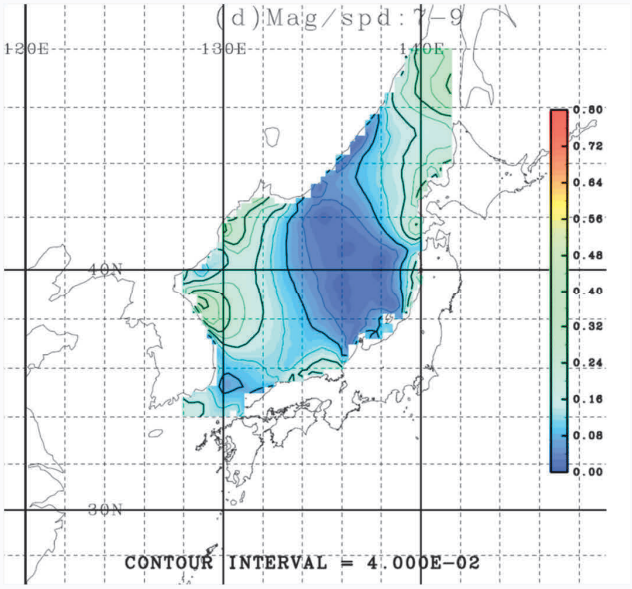
風速偏差と波高偏差の回帰直線の傾き



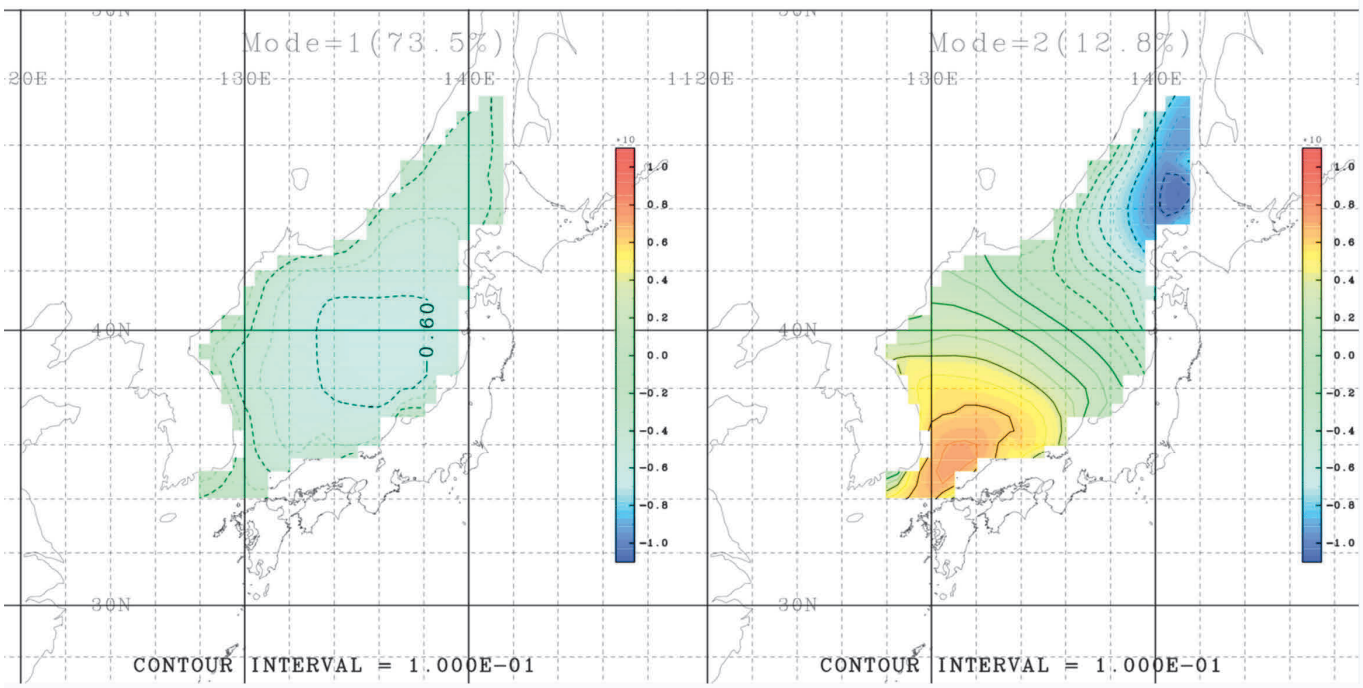


風向の安定度
(ベクトル平均の大きさ/スカラー平均)

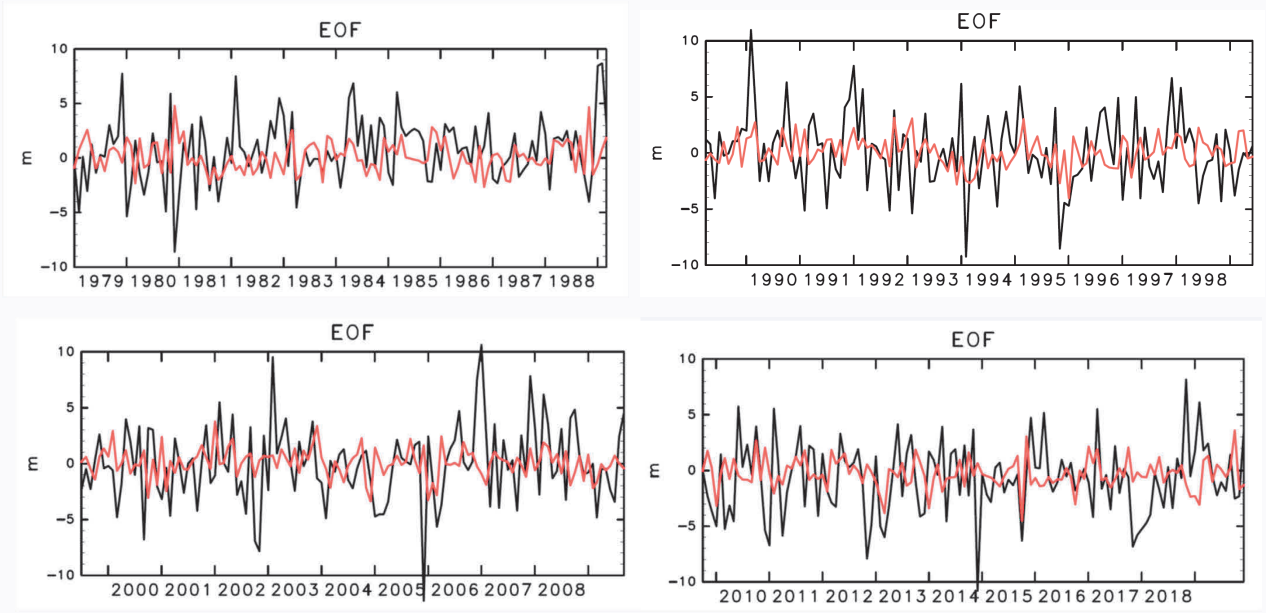




波高偏差EOFの固有ベクトル

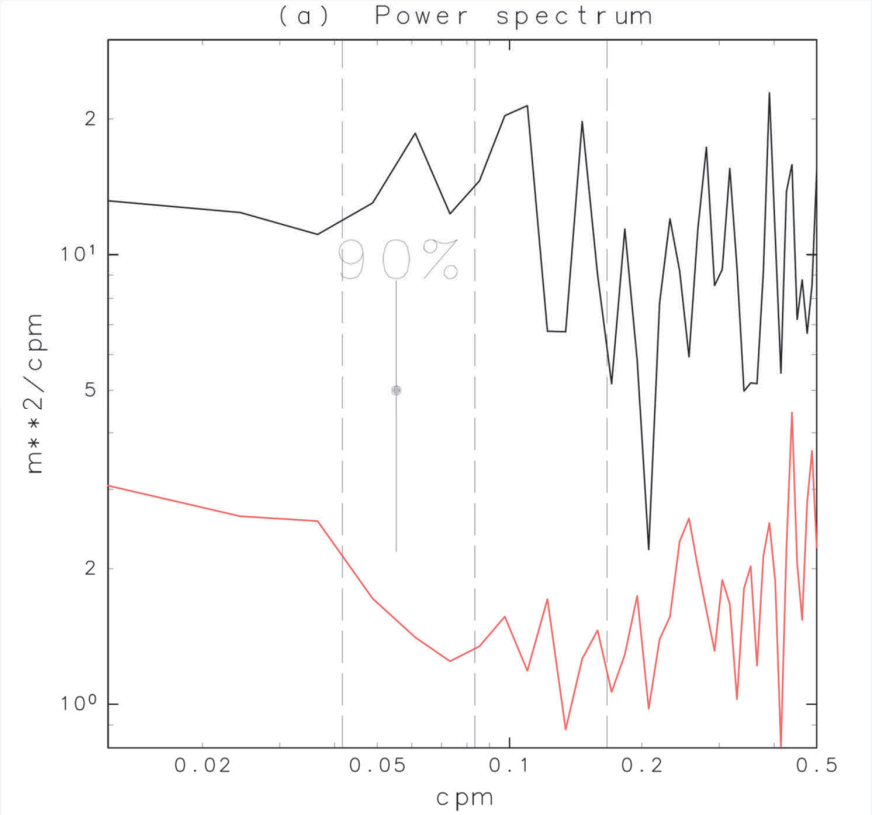


波高偏差EOF時系列

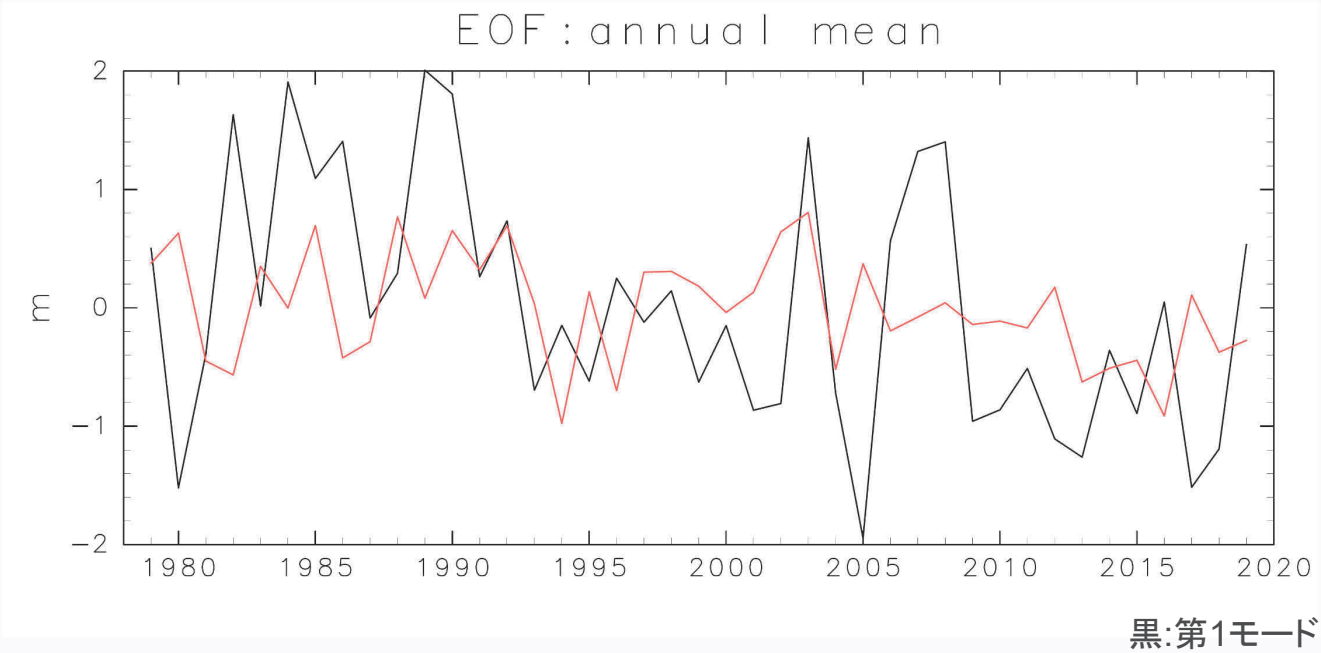


黒:第1モード
赤:第2モード

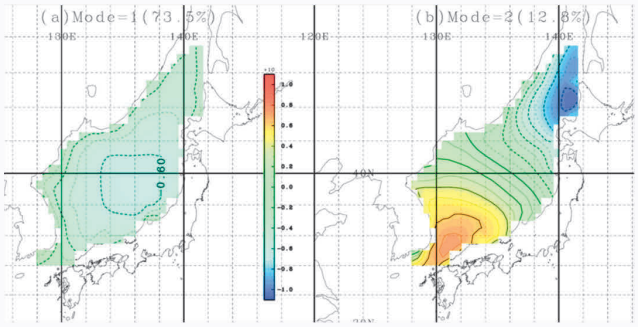
波高偏差EOF時間係数のスペクトル



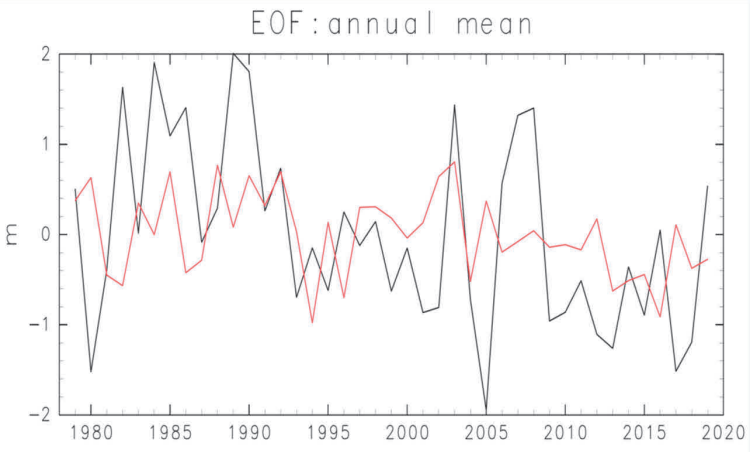
黒:第1モード
赤:第2モード



黒:第1モード
赤:第2モード



index	mode	months	cor.
AOI	1	Total	0.377*
AOI	1	JFM	0.609*
AOI	1	OND	0.385
AOI	2	JFM	0.327*
AOI	2	AMJ	−0.241
PDO	2	AMJ	−0.249
MEI	1	JFM	0.253
MEI	1	JAS	−0.215
MEI	1	OND	0.251
MEI	2	AMJ	−0.266**

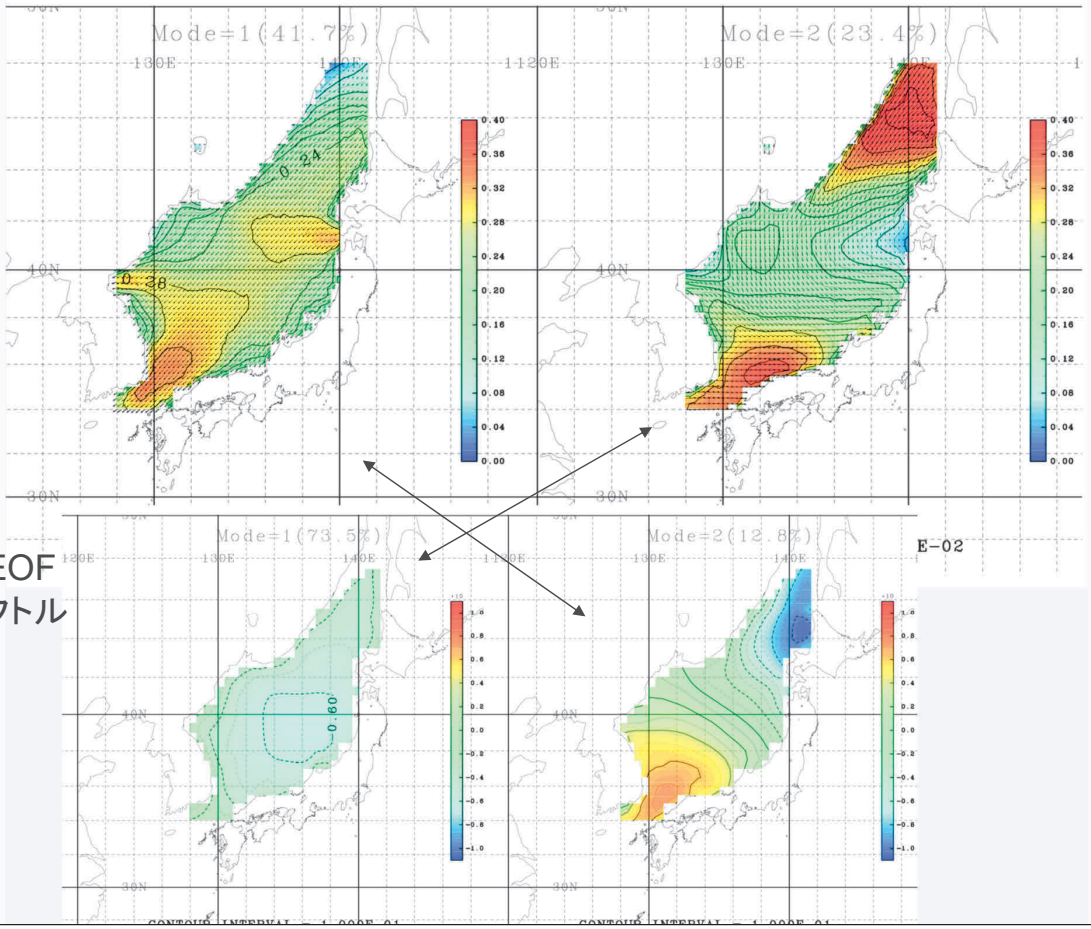


黒:第1モード
赤:第2モード

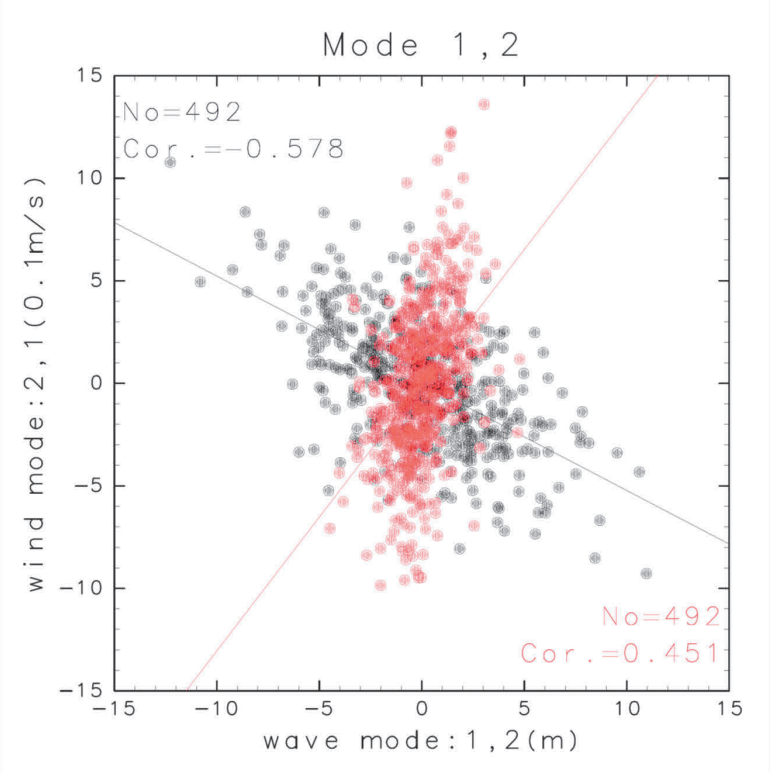
北極振動指数(AOI):正(負):北極域で低(高)圧偏差
MEI:El Ninoを表す指数
*(**):有意水準95(90)%で有意

風ベクトル偏差EOF固有ベクトル

波高偏差EOF
の固有ベクトル

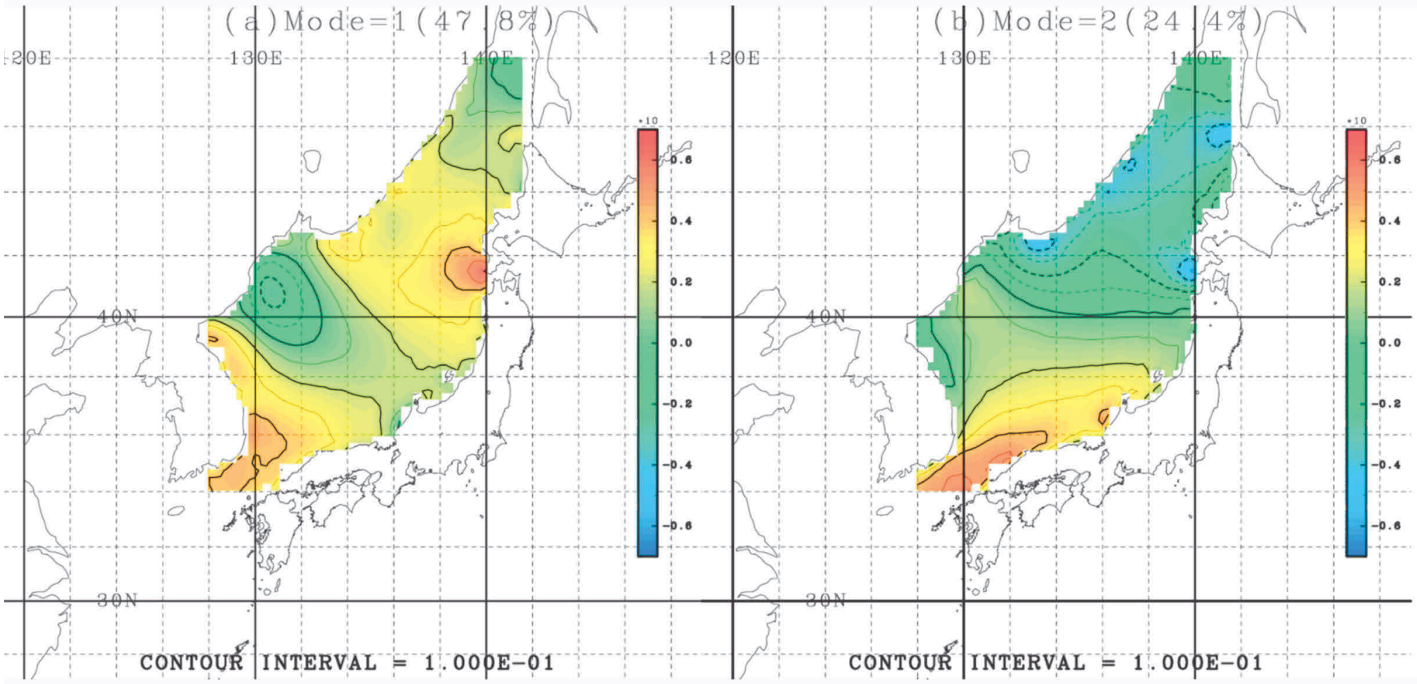


波高偏差EOFと風ベクトル偏差EOF

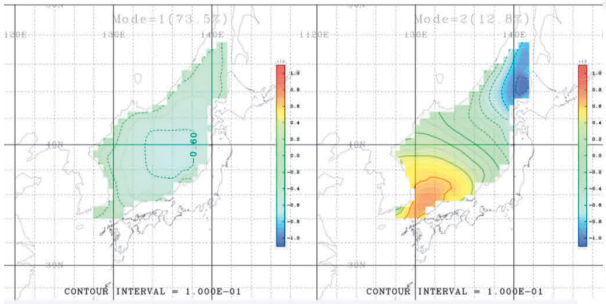


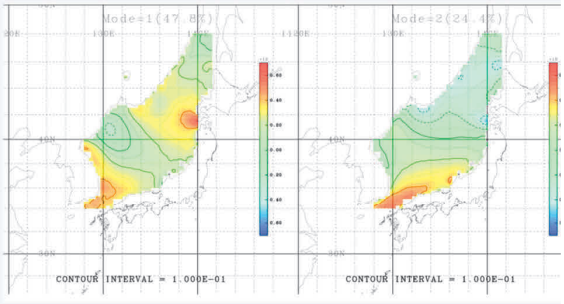
黒:波高1: 風2
赤:波高2: 風1

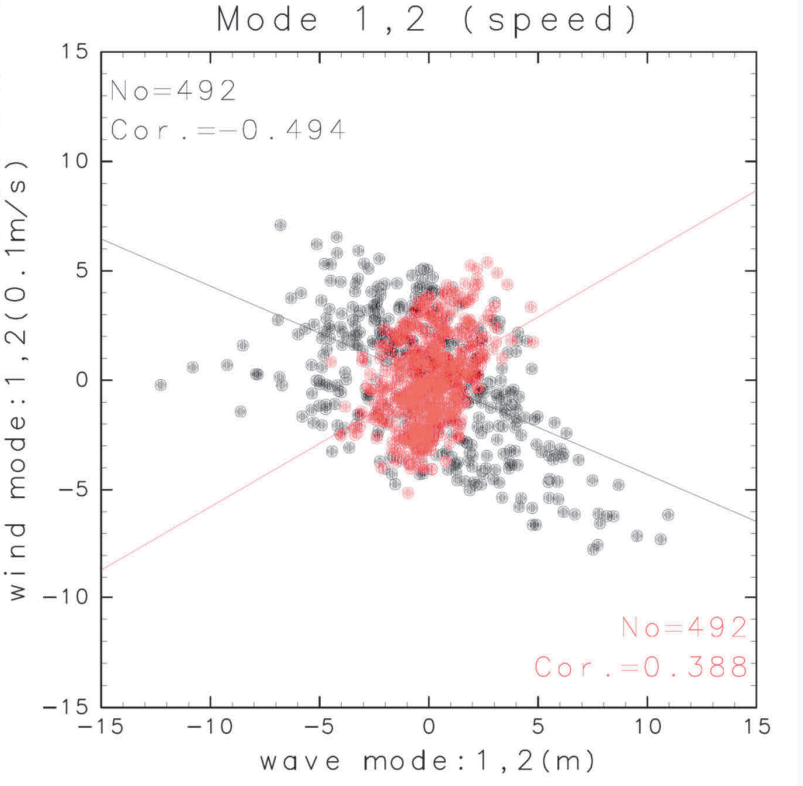
風速偏差EOF固有ベクトル



風速偏差EOFと波高偏差EOF







EOF波高偏差と風(速)偏差の季節毎の相関

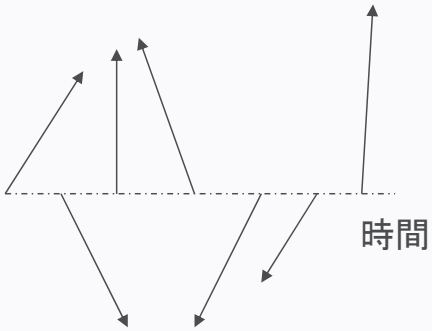
Parameter	EOF wave-1/2	Month	Cor.
Wind vector	1	JFM	−0.601
Wind vector	1	AMJ	−0.394
Wind vector	1	JAS	−0.463
Wind vector	1	OND	−0.699
Wind vector	2	JFM	0.398
Wind vector	2	AMJ	0.534
Wind vector	2	JAS	0.579
Wind vector	2	OND	0.427
Wind speed	1	JFM	−0.810
Wind speed	1	AMJ	−0.853
Wind speed	1	JAS	−0.665
Wind speed	1	OND	−0.601
Wind speed	2	JFM	0.716
Wind speed	2	AMJ	0.609
Wind speed	2	JAS	0.246
Wind speed	2	OND	0.525

自己組織化マップ法(SOM)による分類

SOMの手順

1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12

データ
スカラー値の場合、
「格子点」次元ベクトル



SOMの手順

- 以下の手順の計算を、全ての時刻のデータについて行う。
- 時刻1のデータから、この手順の計算を繰り返す。

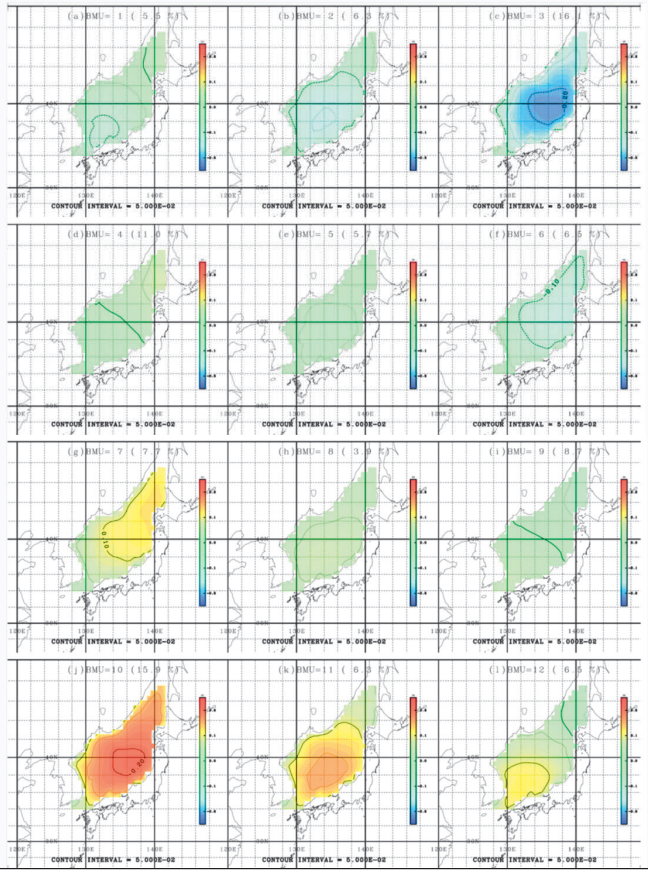
↓

4×3通りのパターン(Unit)に分類

各時刻のデータがどのパターンに類似しているかを決定(Best Matching Unit, BMU)

自己組織化マップ法(SOM)による分類

- 波高偏差の分布図を
  4×3=12通りに分類

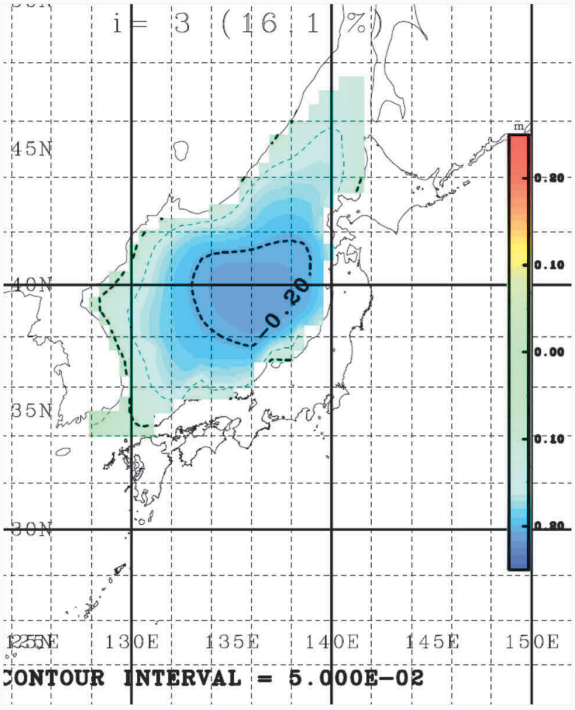


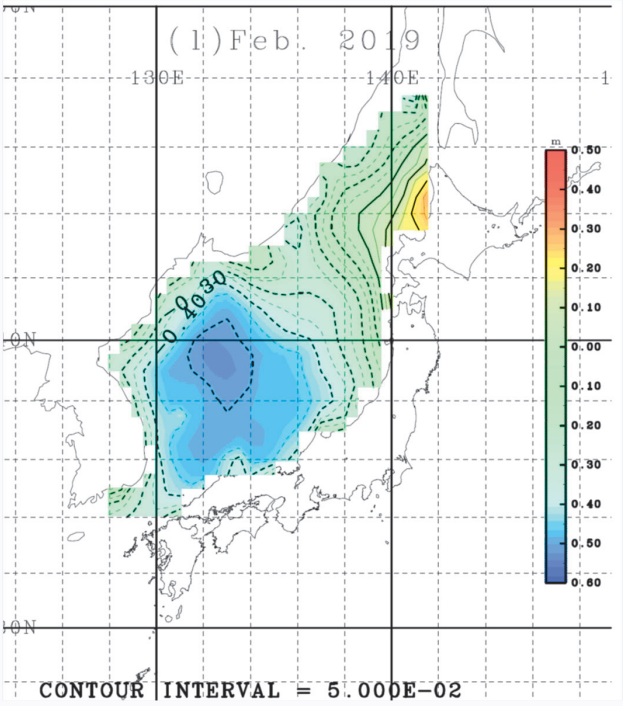
BMU:best matching unit
分類番号に相当

%：全データ数に対する頻度

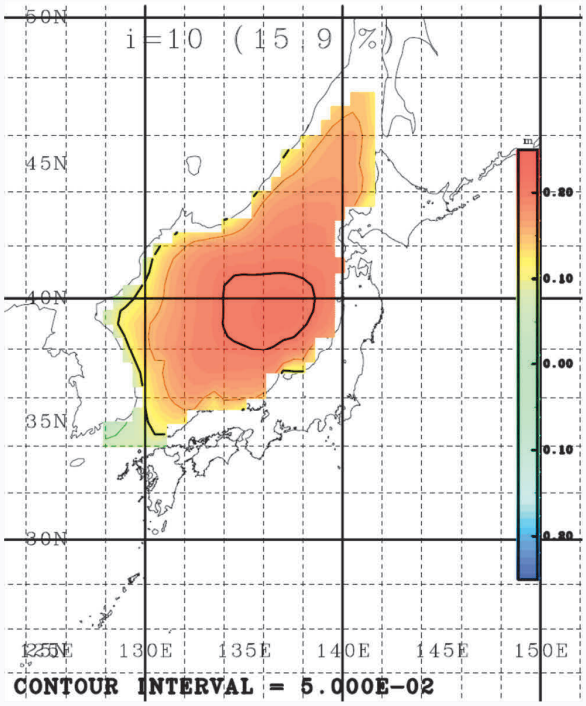
近いほど似た分布

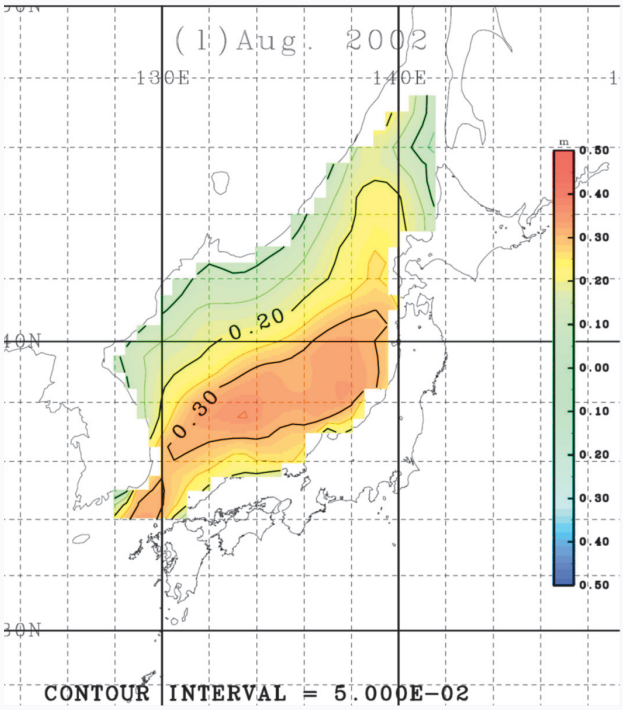
BMU=3の例



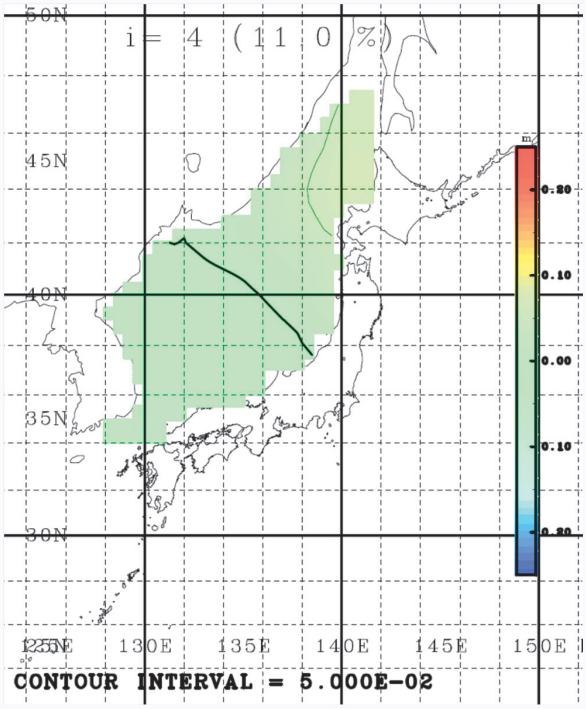


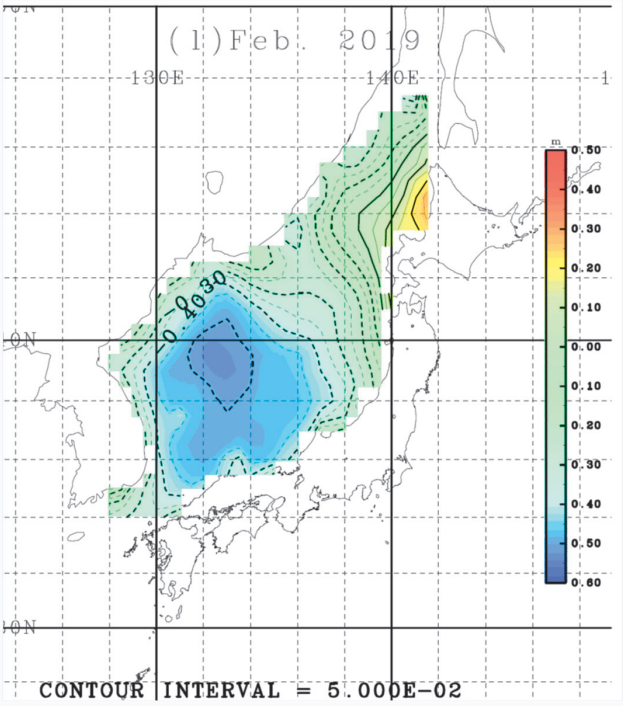
BMU=10の例



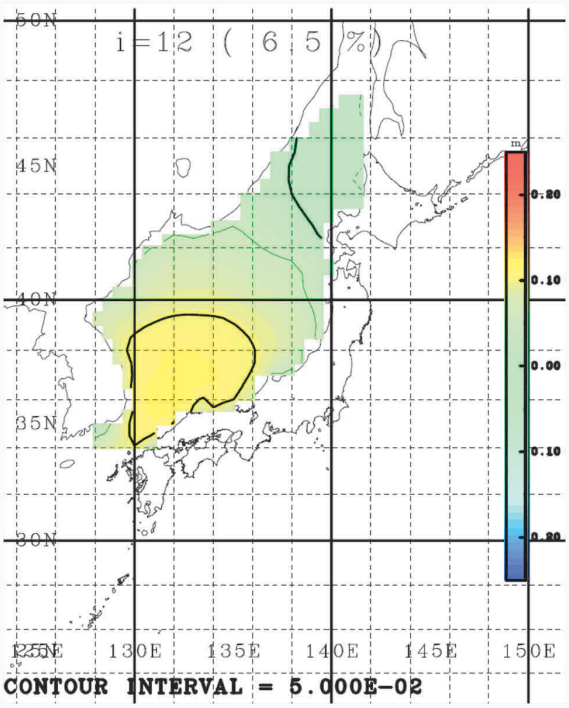


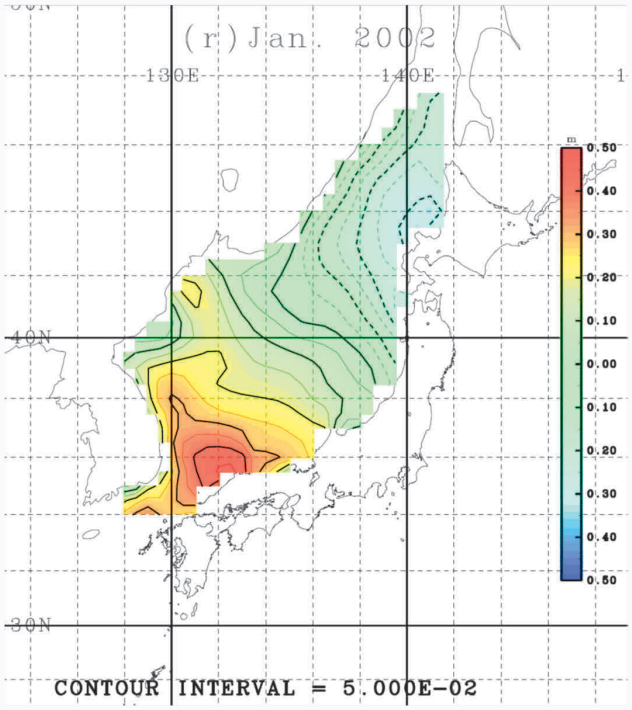
BMU=4の例

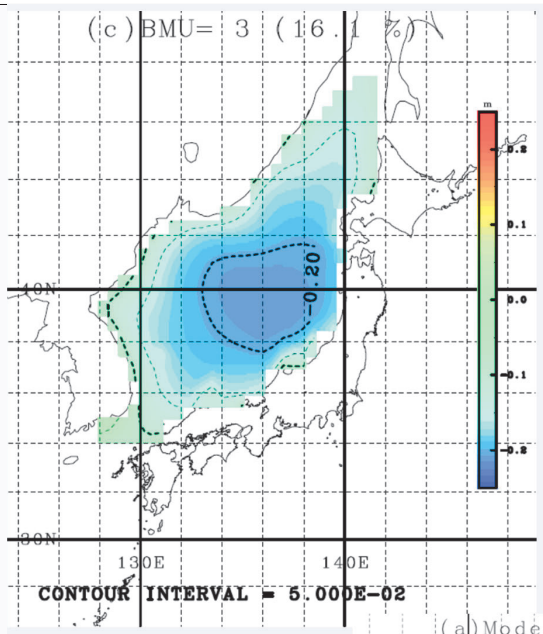


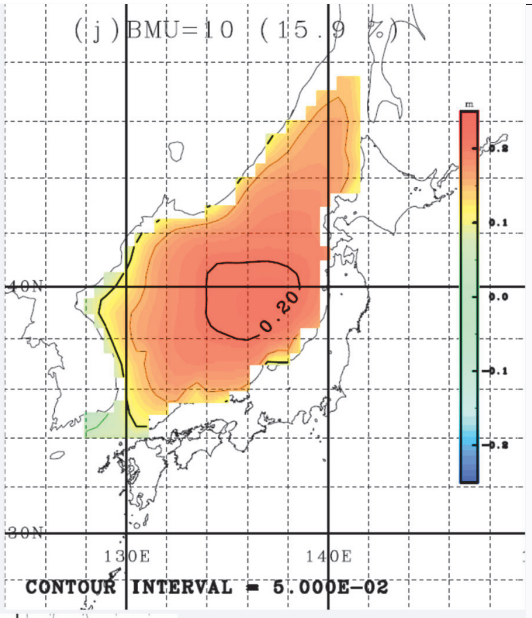


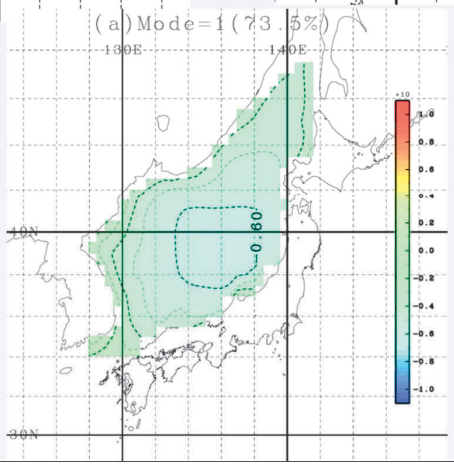
BMU=12 の例



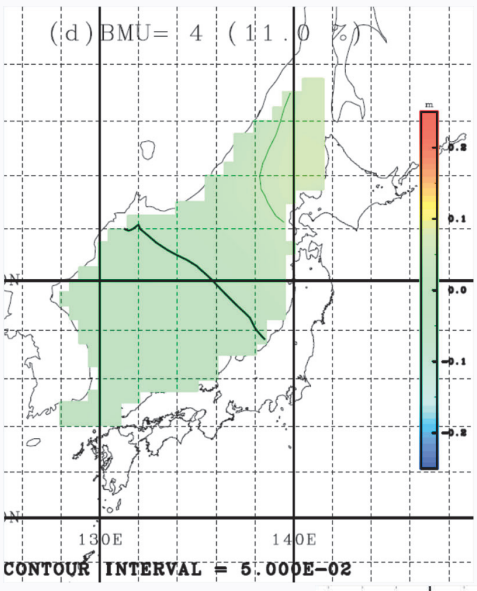


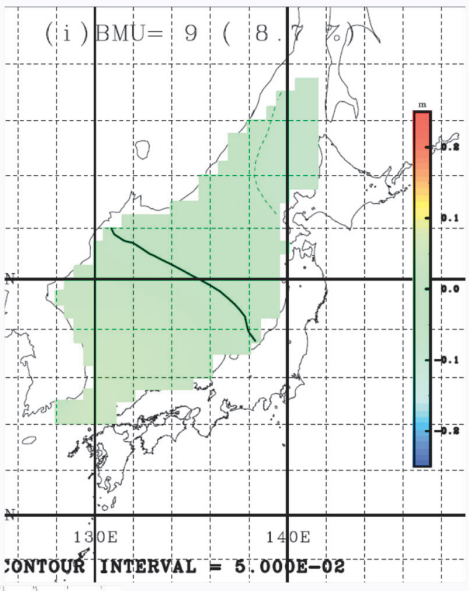


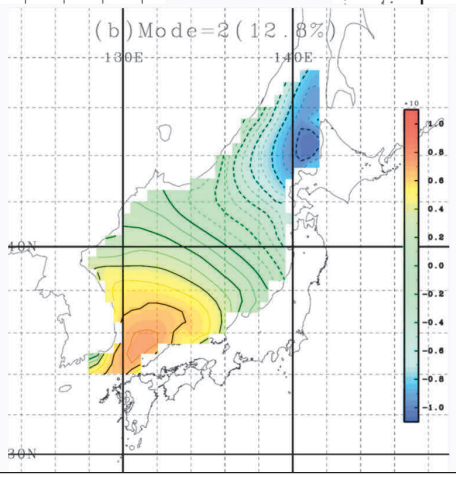




EOF第1モード固有ベクトル

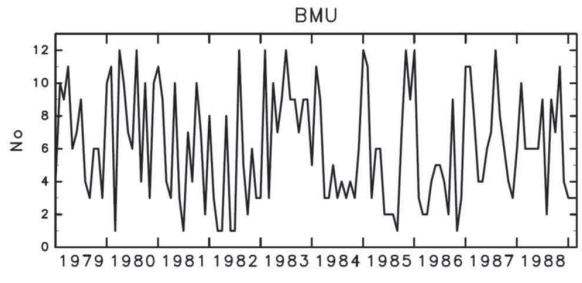


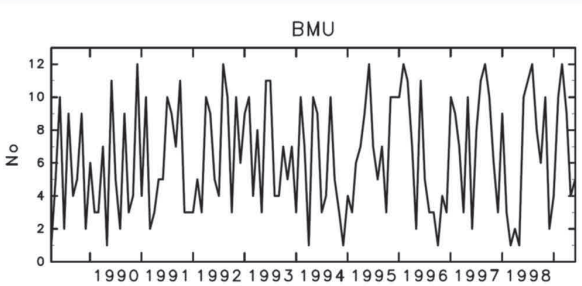


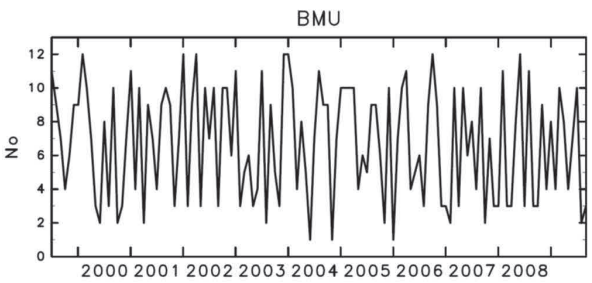


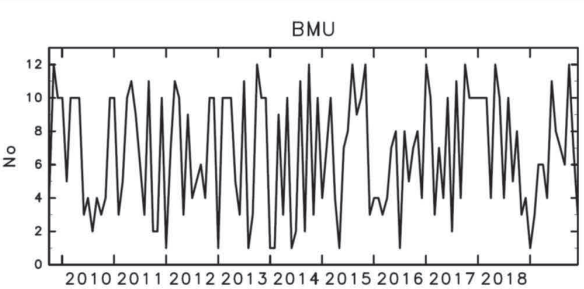
EOF第2モード固有ベクトル

波高偏差BMU時系列



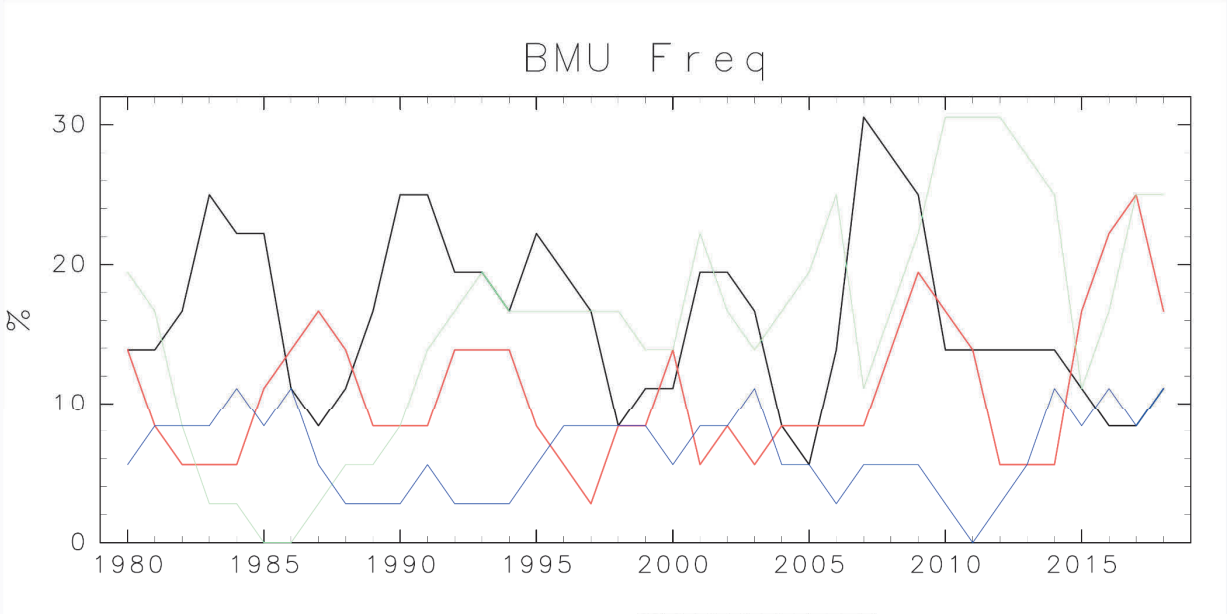


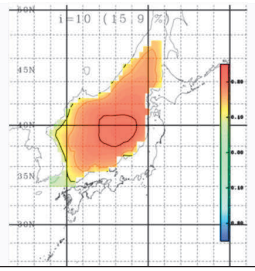




BMU:best matching unit
分類番号に相当

3年ごとのBMU頻度時系列

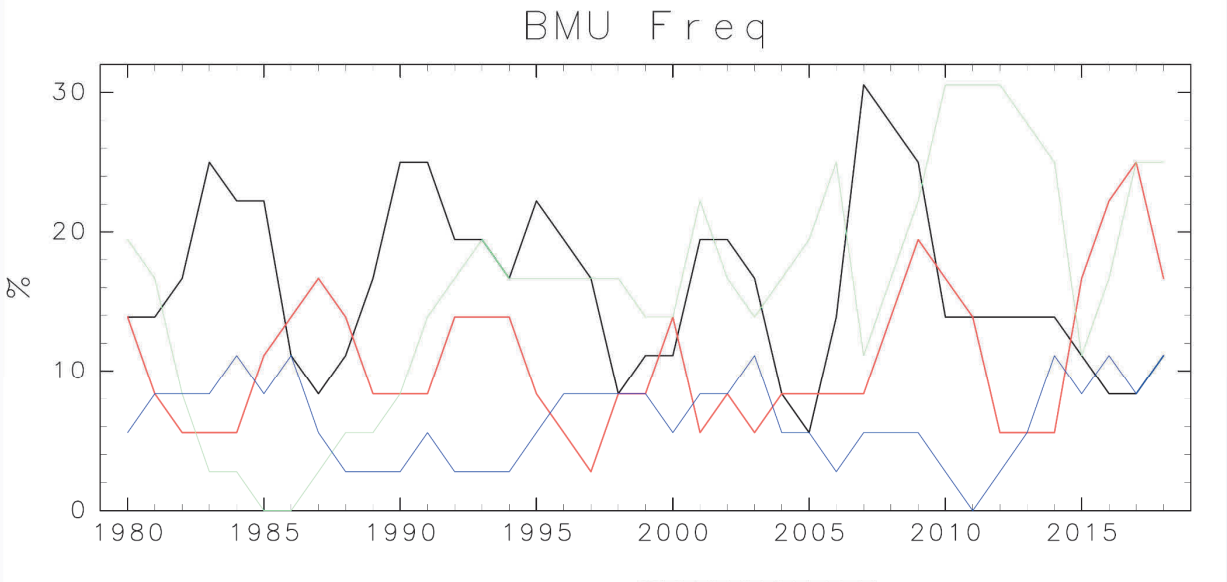


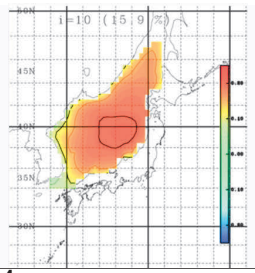


BMU:best matching unit
分類番号に相当

黒:BMU=3
赤:BMU=4
緑:BMU=10
青:BMU=12

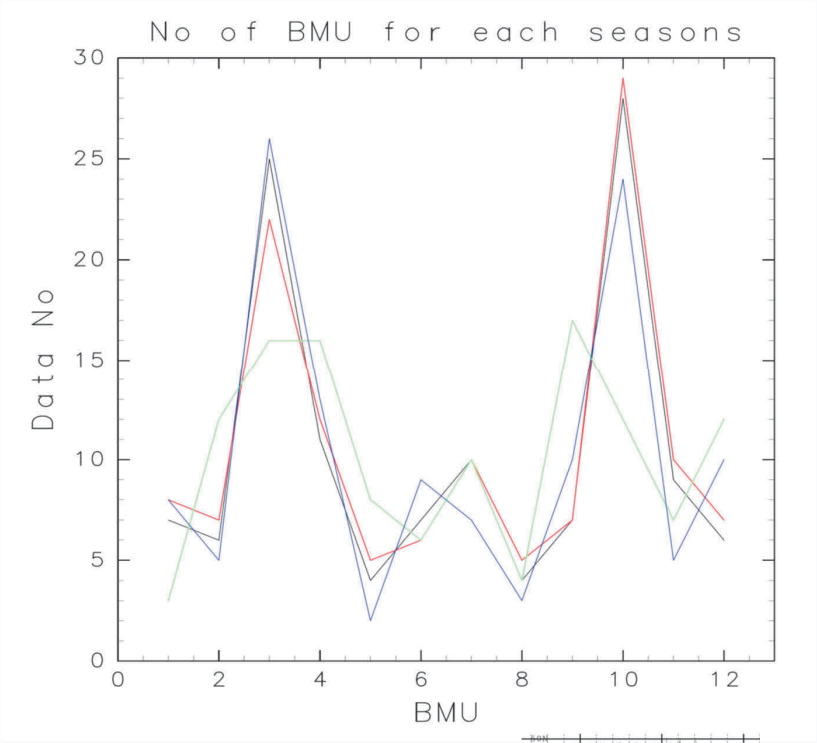
3年ごとのBMU頻度時系列

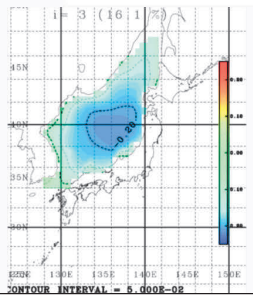


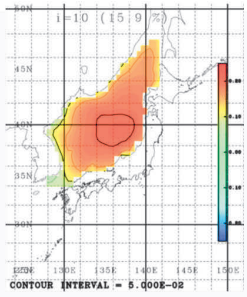


BMU:best matching unit
分類番号に相当

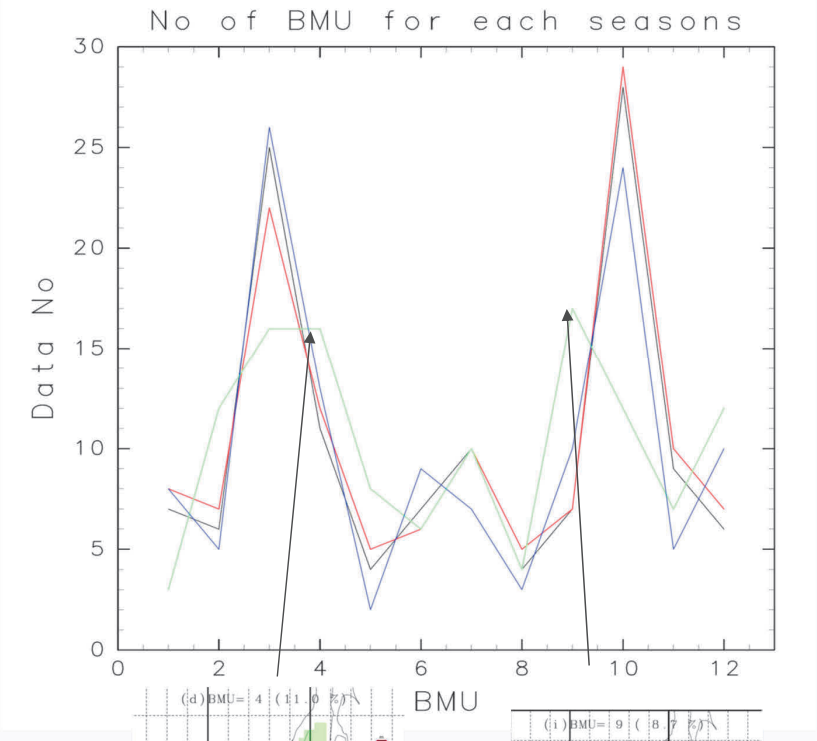
黒:BMU=3
赤:BMU=4
緑:BMU=10:増加
青:BMU=12

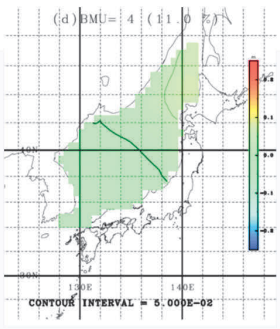


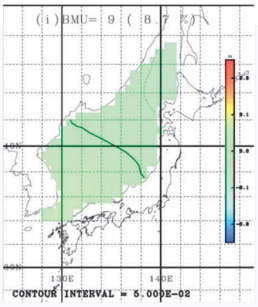




黒:1-3月
赤:4-6月
緑:7-9月
青:10-12月

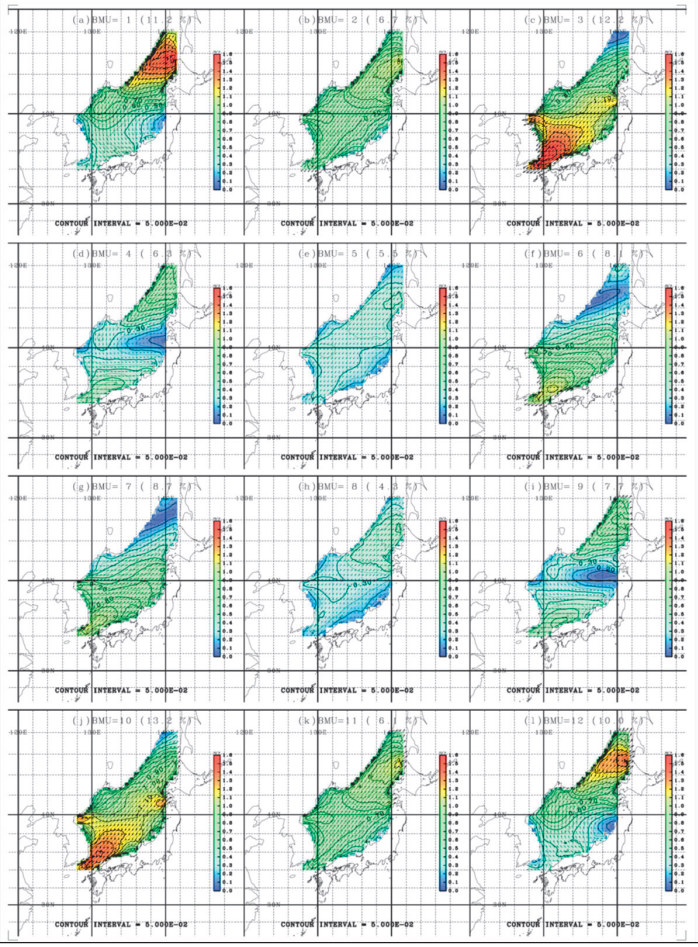




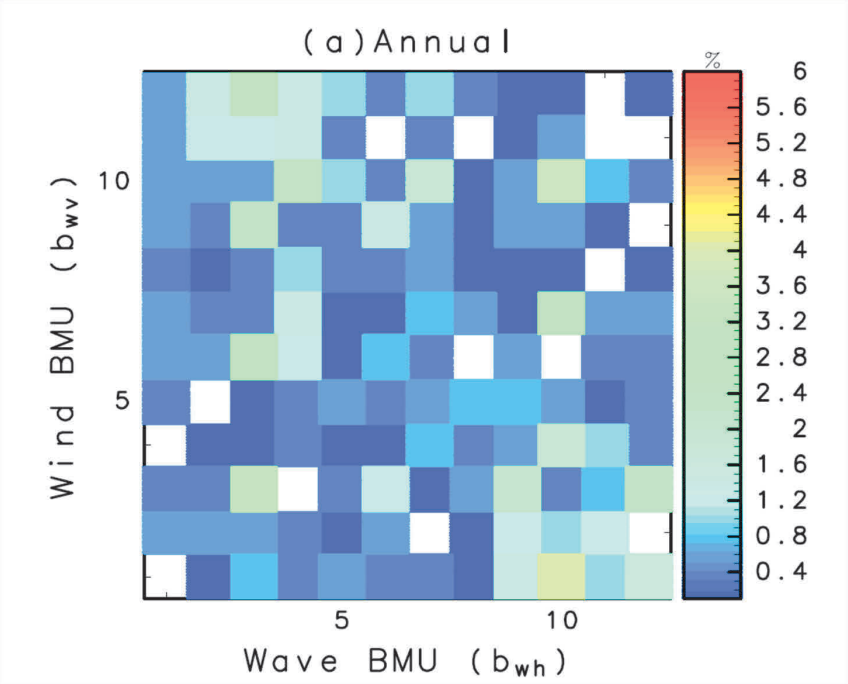


黒:1-3月
赤:4-6月
緑:7-9月
青:10-12月

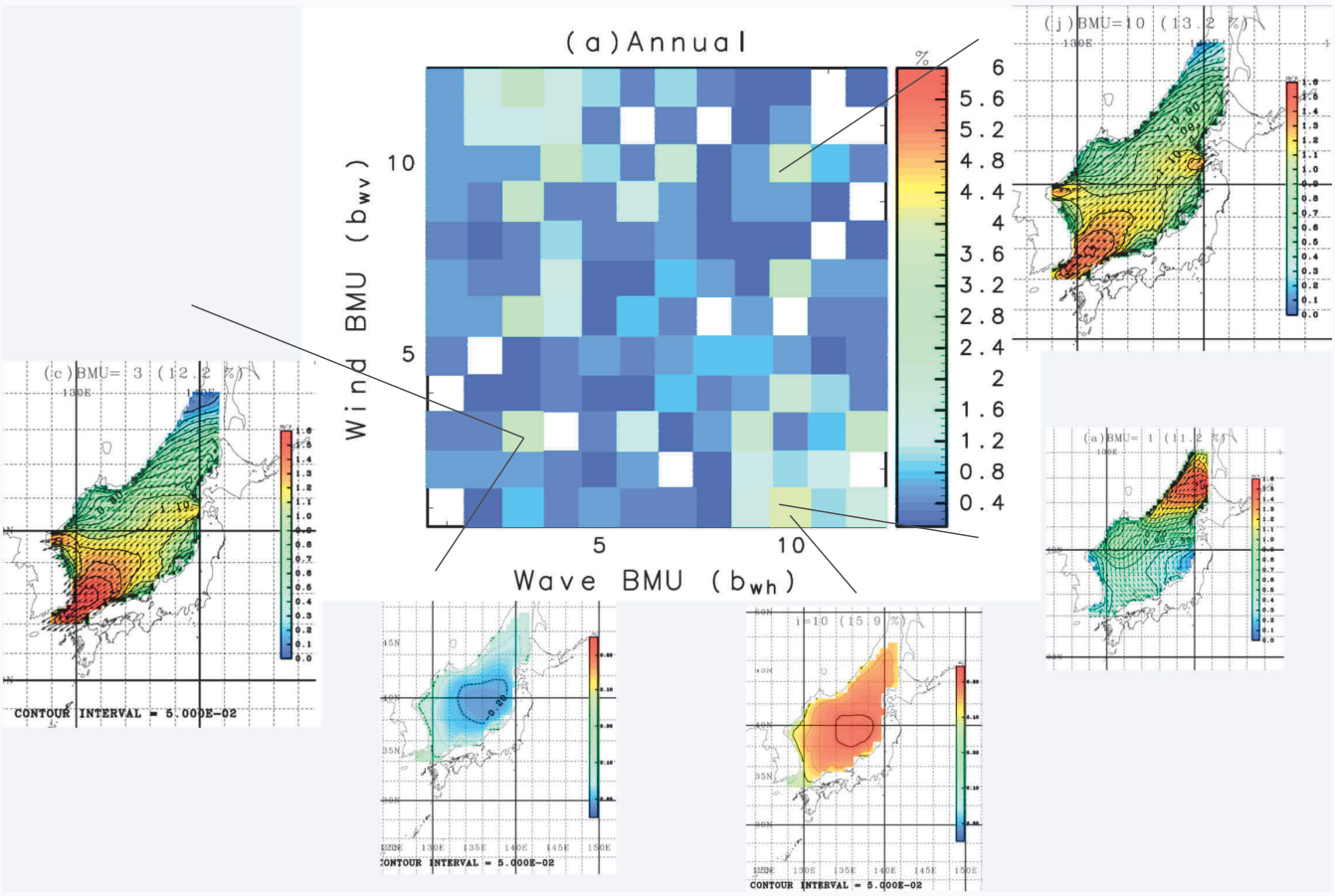
SOMによる風偏差分布図分類



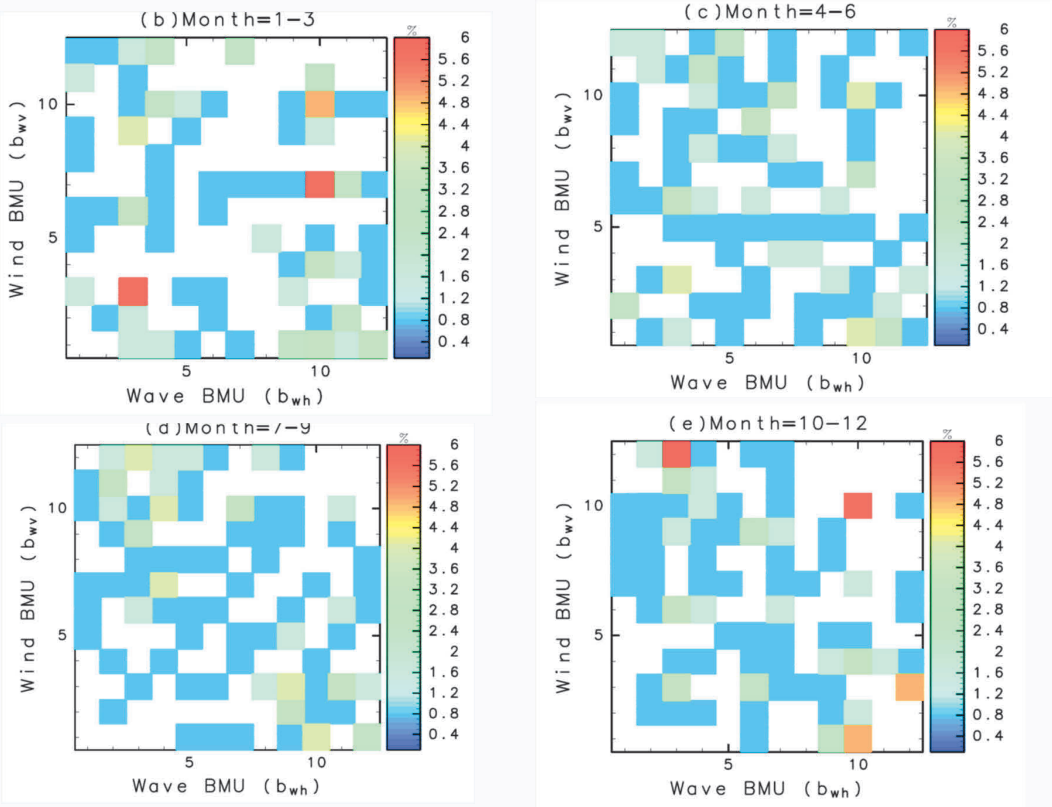
波高偏差分類と風偏差分類対応



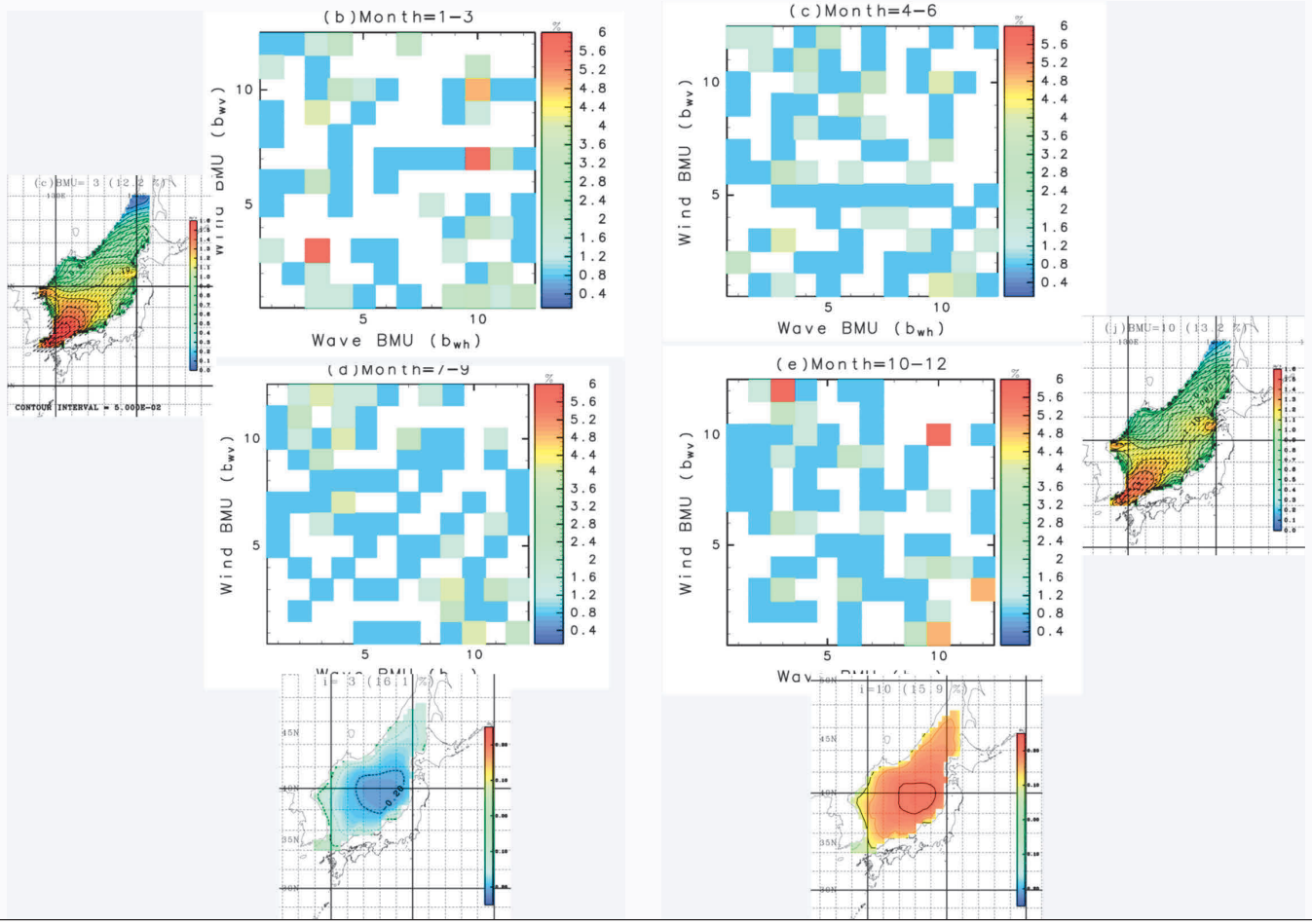
BMU:best matching unit
分類番号に相当



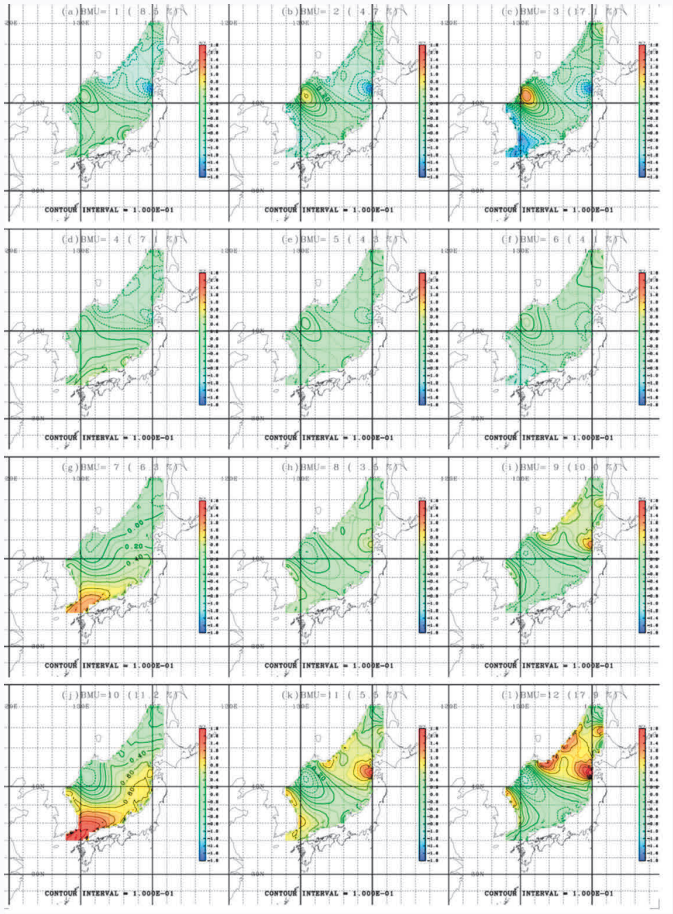
季節毎の波高偏差分類と風偏差分類対応



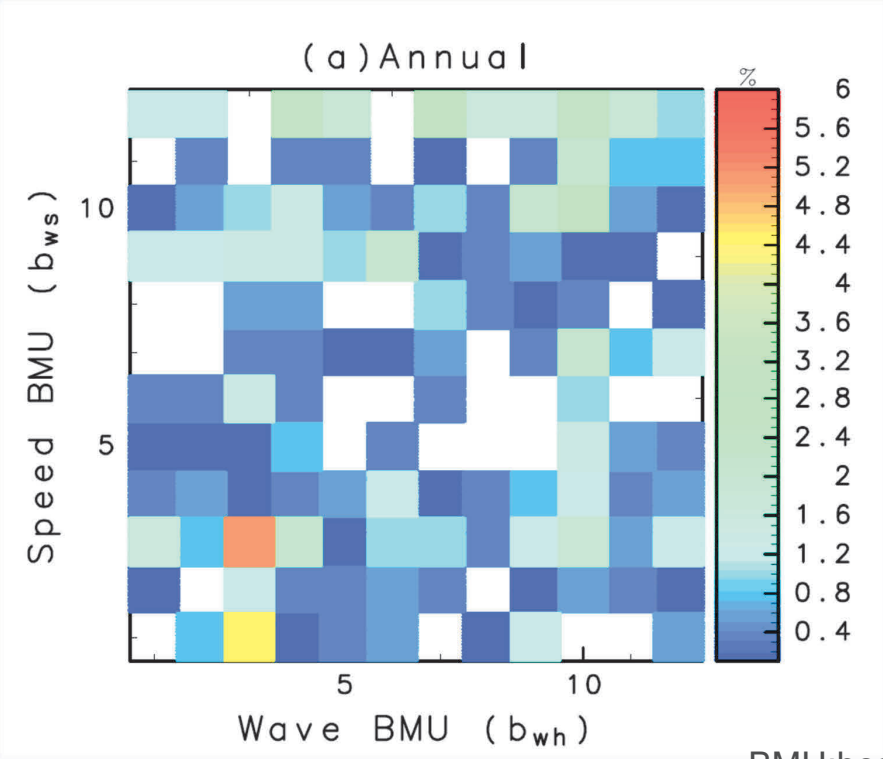
季節毎の波高偏差分類と風偏差分類対応



SOMによる風速偏差分布図分類

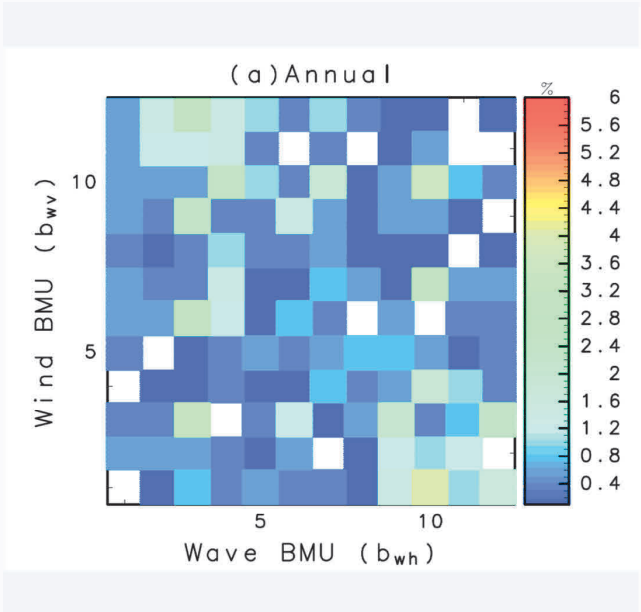


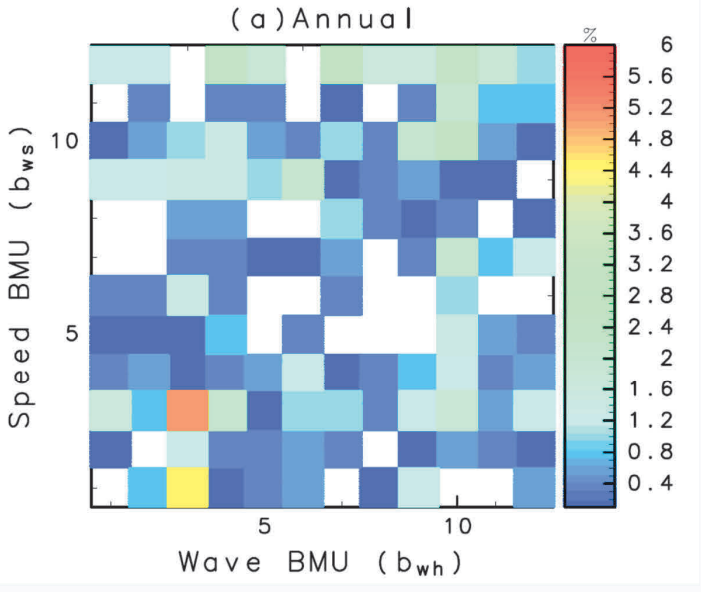
波高偏差分類と風速偏差分類対応



BMU:best matching unit
分類番号に相当

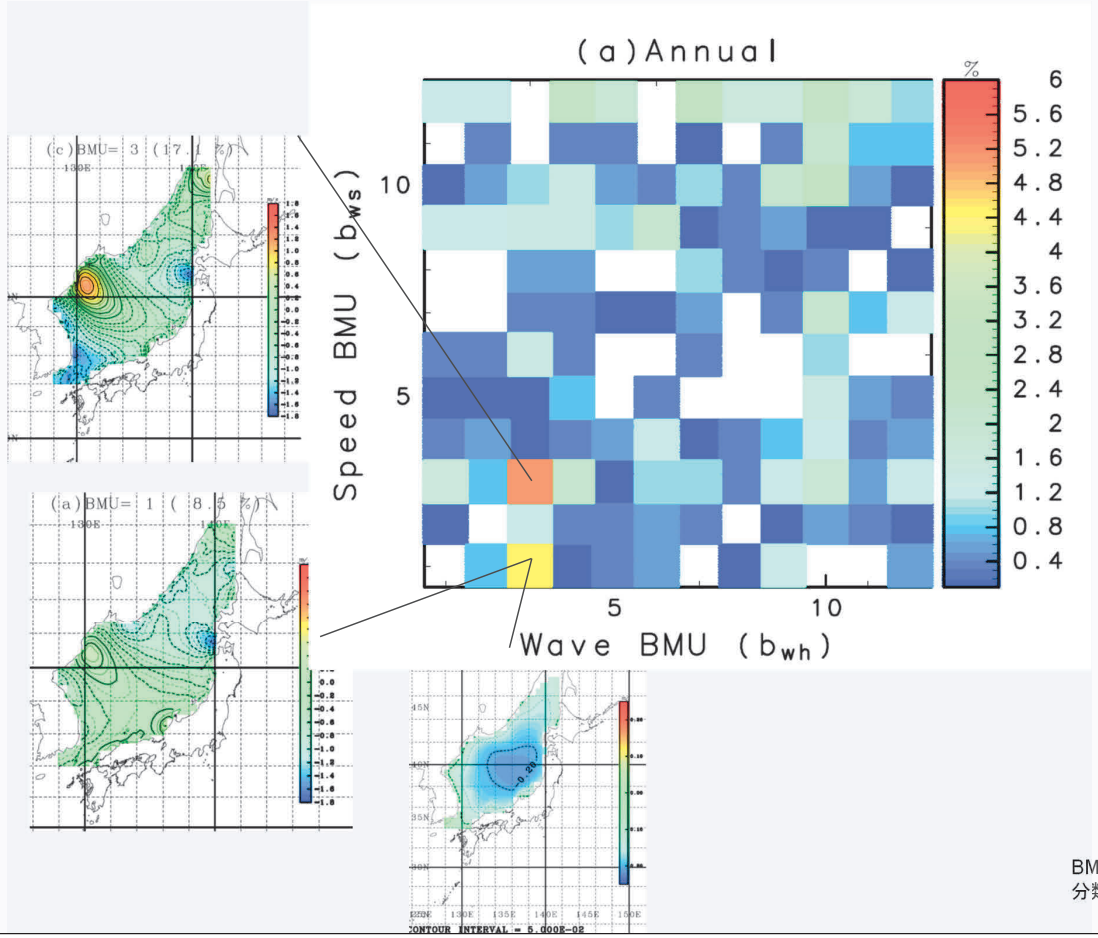
波高偏差分類と風(速)偏差分類対応





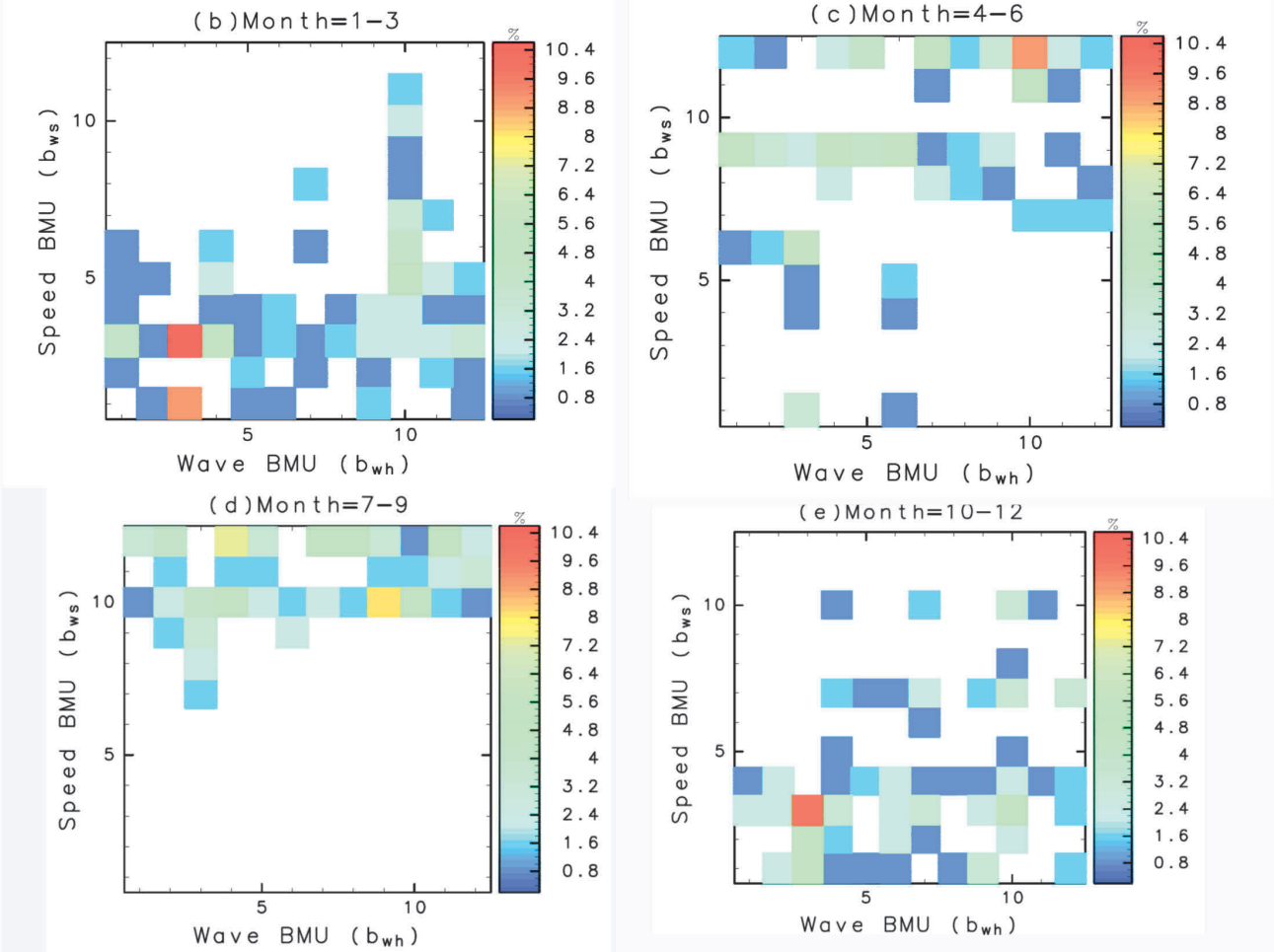
BMU:best matching unit
分類番号に相当

波高偏差分類と風速偏差分類対応

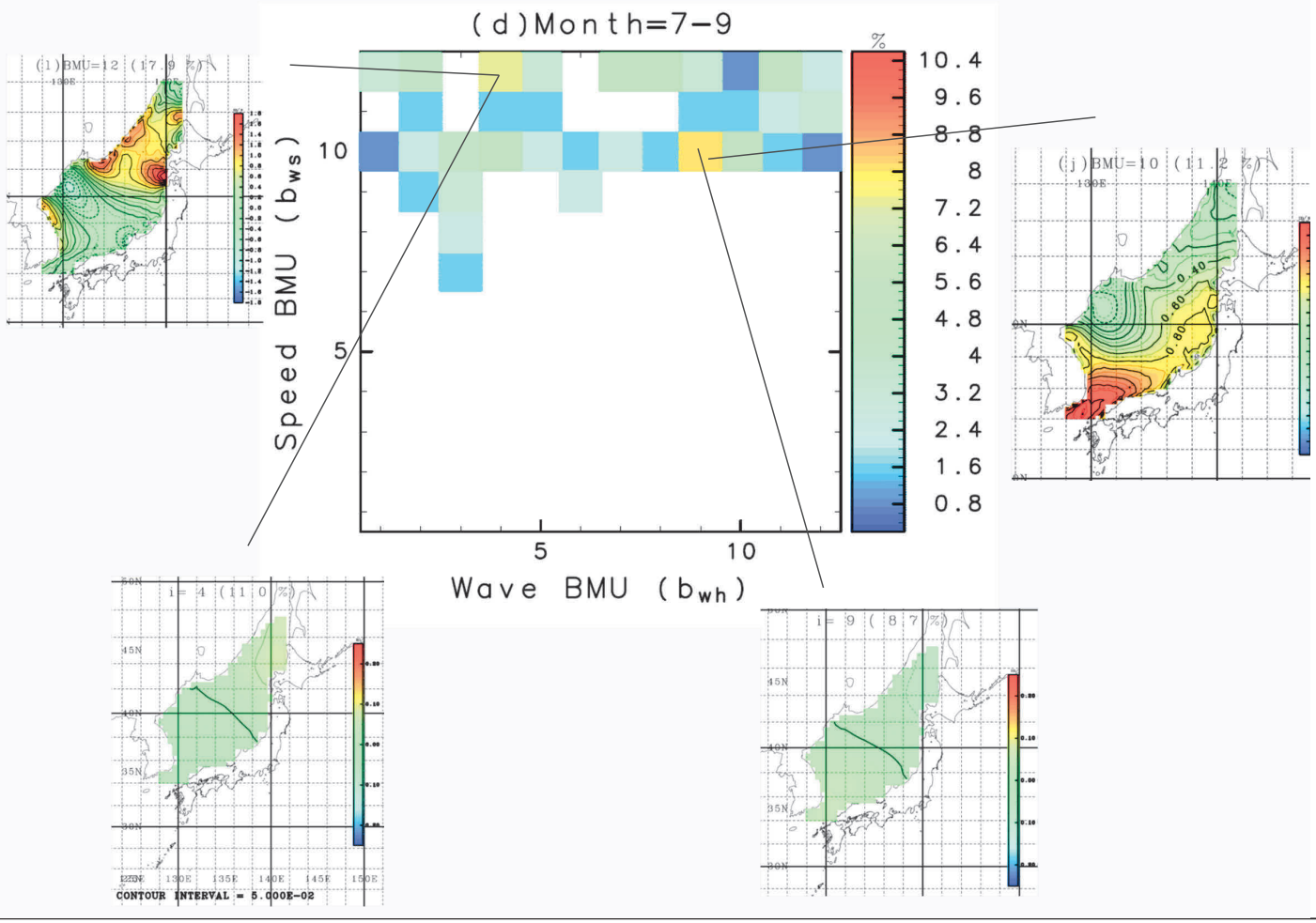


BMU:best matching unit
分類番号に相当

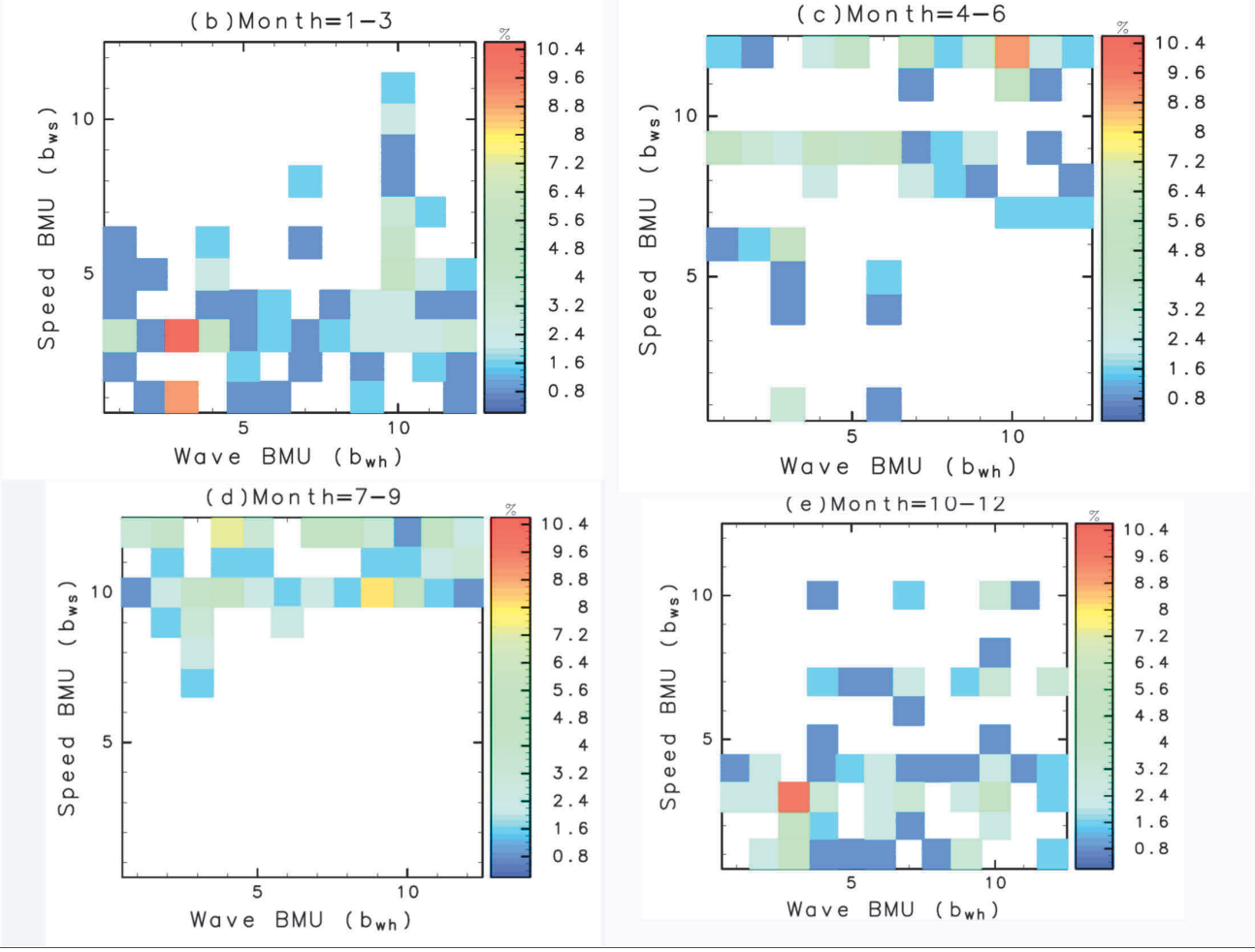
季節毎の波高偏差分類と風速偏差分類対応



季節毎の波高偏差分類と風速偏差分類対応



季節毎の波高偏差分類と風速偏差分類対応



まとめ

- ERA5波高はブイデータと一致
- 風が陸から吹く場合（吹送距離が短い場合）ERA5波高精度低下
- 波高偏差のEOF解析：第1モード：日本海中心で変動。第2モード：日本海南北で変動
- 全体では風(速)偏差のEOFとの相関は高くない。季節毎の相関は高くなる
- 波高偏差EOF第1モード:冬季平均：北極振動指数と相関

まとめ

- 自己組織化マップ法(SOM): 波高偏差EOFの第1,2モードと対応する分布存在
- 日本海中央部で波高偏差が高い分布の頻度(BMU=10)は増加傾向
- 全体では風（速）偏差のパターンと,波高偏差の分類パターンと対応は良くない
- 季節ごとでは風速偏差が,波高偏差の分類と対応

超音波式多層流向流速計による波浪観測

2021年12月8日

三洋テクノマリン株式会社

目　次

1．はじめに

2．波浪観測装置の紹介

3．比較検証事例の紹介（取得データの比較結果）

4．おわりに

1．はじめに

- 波浪観測装置とは、海底に観測装置を設置し、絶え間なく打ち寄せる波の高さ、向き、周期を計測するもの。これらデータは主に海岸構造物設計の基礎資料として利用される。
- これまでの超音波式波浪観測装置は、電磁流速計を搭載して波高と同時に流向・流速を1層で測定する機種（DL-3：株式会社ソニックやWAVE HUNTER：有限会社アイオーテクニック等）が主流であり、当社ではこれまでDL-3をメインに波浪観測業務を実施してきた。
- DL-3が数年前にメーカー保守を終了し、不具合が発生した場合のサポートが受けられない状況となっていた。
- 流向・流速を多層で波高と同時に測定できる波浪観測装置（Signatureシリーズ：Nortek社製）が登場し、導入を検討。
- 2018年以降の波浪観測業務にて、DL-3やWAVE HUNTERと共にSignatureを設置し、取得データを比較検討して実用性の検証を行った。

2．波浪観測装置の紹介

現在、海底設置して波浪観測が出来る機器は主に以下の４機種。
①のDL-3はメーカー保守が終了したため、国内の殆どの企業は②のWAVE HUNTERを使用している。

◆波浪観測用に開発された計器

① 多機能型波浪観測装置（DL-3）

② 波高・波向・流速計（WAVE HUNTER）

◆超音波多層流向流速計に波浪観測機能を搭載した計器

③ 超音波多層流向流速計（Sentinel V）

④ 超音波多層流向流速計（Signature）

※ ③は波高の測定原理が①②④と異なる

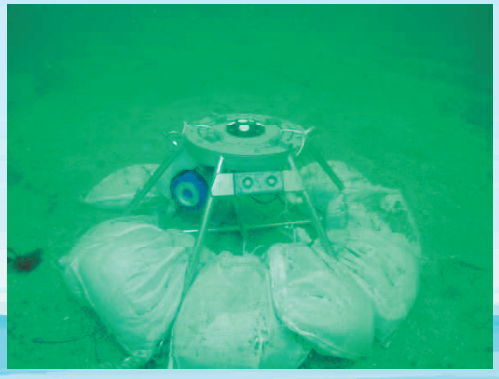
2．多機能型波浪観測装置（DL-3）

名　称	多機能型海象観測装置(DL-3 型)			
製作会社	株式会社 ソニック			
1)測定項目	X,Y 方向流速	方位	水圧変動	水面変動
2)測定方法	電磁流速センサー	方位磁石	半導体圧力センサー	超音波
3)測定精度	±1%	±3°	±0.5%FS	±0.3%FS
測定分解能	1cm/s	1°	1cm	1cm
4)測定範囲	0～±3.0m/s	0～360°	0～20m	0～20m
設置範囲	1～60m	1～60m	1～60m	2～60m
5)観測ﾓｰﾄﾞ	1～100 分(1 分間隔で設定)			
観測時間	1～100 分(待合せ最小 1 分から最長時間 1 ヶ月間まで)			
観測間隔	2～999 分まで選択可及び連続			
サンプリング間隔	0.1、0.2、0.5、1.0SEC　選択可			
6)記録方式	コンパクトフラッシュカード			
記録容量	128Mﾊﾞｲﾄ			
7)電源	6V－30Ah･リチウム電池 3 個まで搭載可			
8)外形寸法	330mm(外径) × 625mm(高さ)			
重量	空中 約 17Kg、(水中 約 5kg)			
材質	チタン合金製			

2．波高・波向・流速計（WAVE HUNTER）

名　称		WAVE HUNTER04−Σ	
製　造		IO Technic	
測定項目	測定範囲	精度	分解能
超音波	19．6m	±1%	1cm
(使用水深)	3～55m		
流速	±3m／sec	±1%	1cm／s
水圧	0～5kg／cm²	±0．5%	1g／cm²
水温	−5～40℃	±0．1℃	0．1℃
方位	0～359°	±3°	1°
ﾊｰﾄﾞｳｪｱ	寸法	400H×350φ	
	重量	重量：14kg	

2．超音波多層流向流速計（Signature1000）



名　称	Signature1000
製　造	NORTEK
周波数	1,000kHz
ビーム角	25°
ビーム数	5ビーム
耐圧	300m
測定層厚	0．2～2m
最小近接距離	0．1m
流速分解能	0．1cm/s
測定層数	最大256層
ピング発信間隔	最大 8Hz
最大波浪測定水深	30m
水圧計	精度　0．1%FS
コンパス	精度　2．0°
温度	精度　0．1℃
ハードウェア	内蔵メモリー16GB
	寸法　212H×142φ
	重量　2．21kg（空中）0．62kg（水中）

NORTEK SIGNATURE FOR WAVES

波浪測定用ADCPについて

nortekgroup.com

NORTEK

Nortek製超音波ドップラー式センサー

製品群一覧　波高・波向測定機能搭載ADCP

圧力計
海面推算
方式

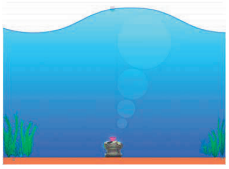
超音波式
海面計測
方式

NORTEK

nortekgroup.com

Nortekジャパン合同会社　© Nortek Japan GK. All rights reserved.

超音波式海面高度測定機能付きADCP



Signatureと従来シリーズAWAC

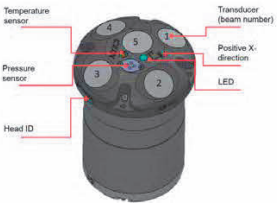
AWAC

Signature1000

Signature500

Signature250

仕様等(抜粋)	AWAC (1M, 400k, 600kHz)	Signature 1MHz	Signature 500kHz	Signature 250kHz
計測レンジ	35～100m	30m	60m	150m
耐圧	300m	300m	300m	300m
波高レンジ	-15～15m	-15～15m	-15～15m	-15～15m
波周期	0.5～50sec (機種に依存)	0.5～50sec	1～50sec	2～50sec
サンプリング間隔	2～0.5Hz (海面高度は2倍)	8Hz	4Hz	1Hz
サンプル数	2の累乗(最大2048)	連続	連続	2の累乗
音波(バンド)	ナロー	ブロード	ブロード	ブロード
波浪内部演算	✔	-	-	-



AWACシリーズ
・波浪測定に特化した観測に
・波浪の定期的な監視等(内部演算処理)

Signatureシリーズ
・波浪と流向流速を同時に測定可能
・連続測定に対応

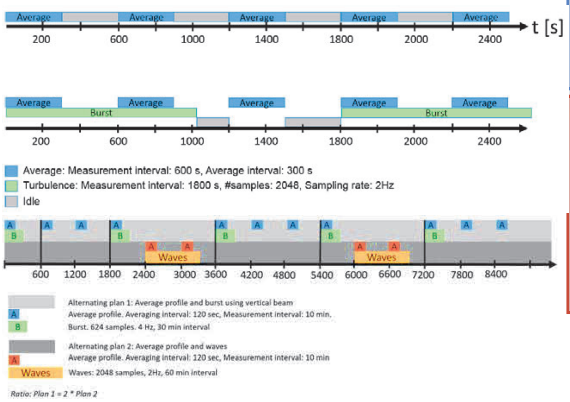
NORTEK
nortekgroup.com

Nortekジャパン合同会社 © Nortek Japan GK. All rights reserved.

Signatureの特徴:同時測定機能

Concurrent Mode(独自特許技術)

- 複数の測定モードをほぼ同時(1秒以内)に実行が可能
- フレキシブルな観測設定



ソフトウェア設定画面 Application

Single plans 単一観測モード

- ◉ Average
- ○ Average with ice drift
- ○ Average with ice drift and ice draft (keel)
- ○ Burst using 4 beams
- ○ Burst using 5 beams
- ○ Burst using vertical beam
- ○ Burst with echo sounder
- ○ Wave height and direction
- ○ Waves and burst using 5 beams

Extension ☐ Echo sounder

Concurrent plans (with) 同時観測モード

- ○ Average
- ○ Average with ice drift
- ○ Average with ice drift and ice draft (keel)

+

- ○ Burst using 4 beams
- ○ Burst using 5 beams
- ○ Burst using vertical beam
- ○ Burst with echo sounder
- ○ Wave height and direction
- ○ Waves and burst using 5 beams
- ○ Ice draft (keel)

NORTEK

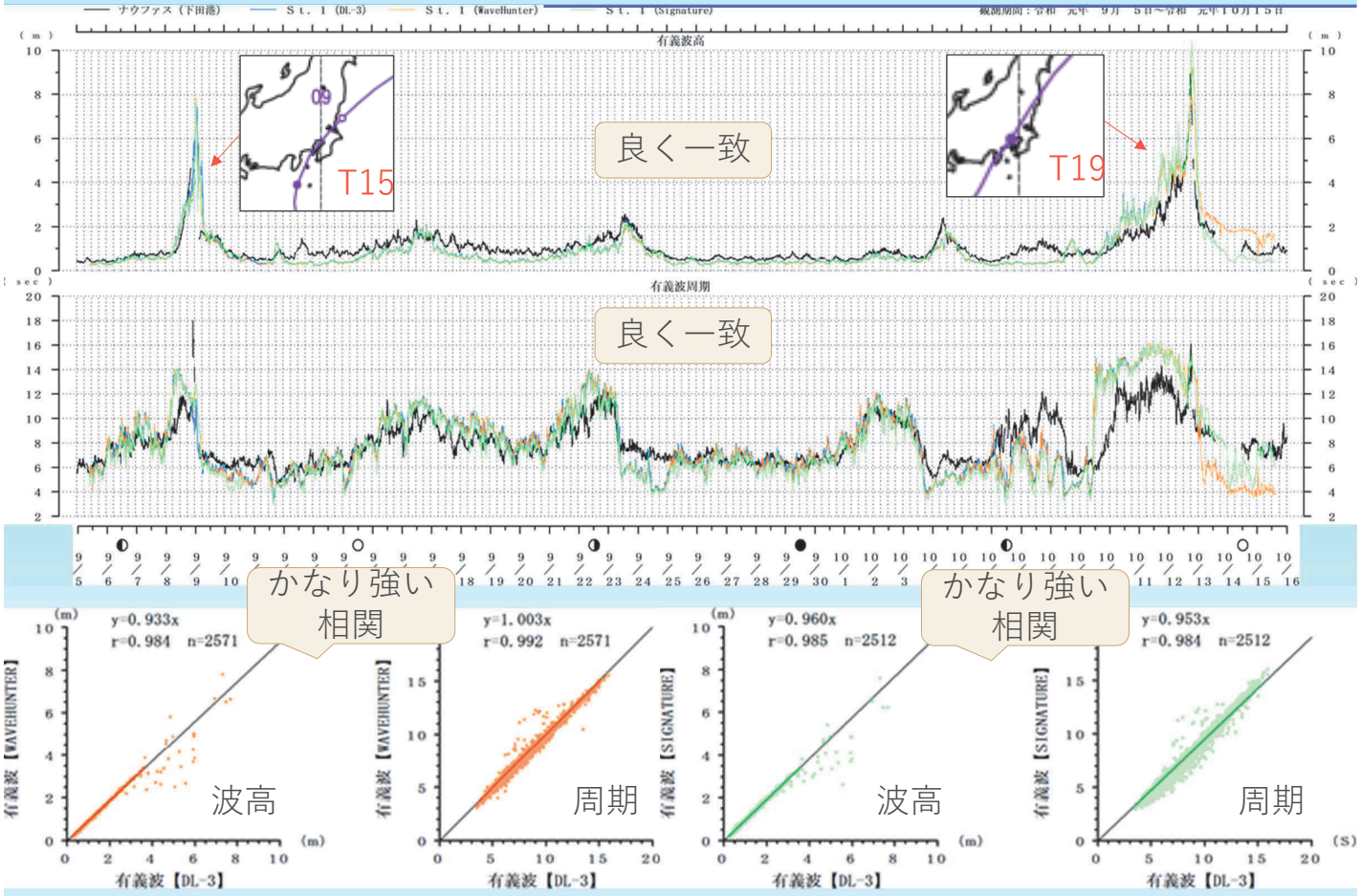
3．比較検証事例１（DL-3 vs WAVE HUNTER vs Signature）

神奈川県　三浦半島南端

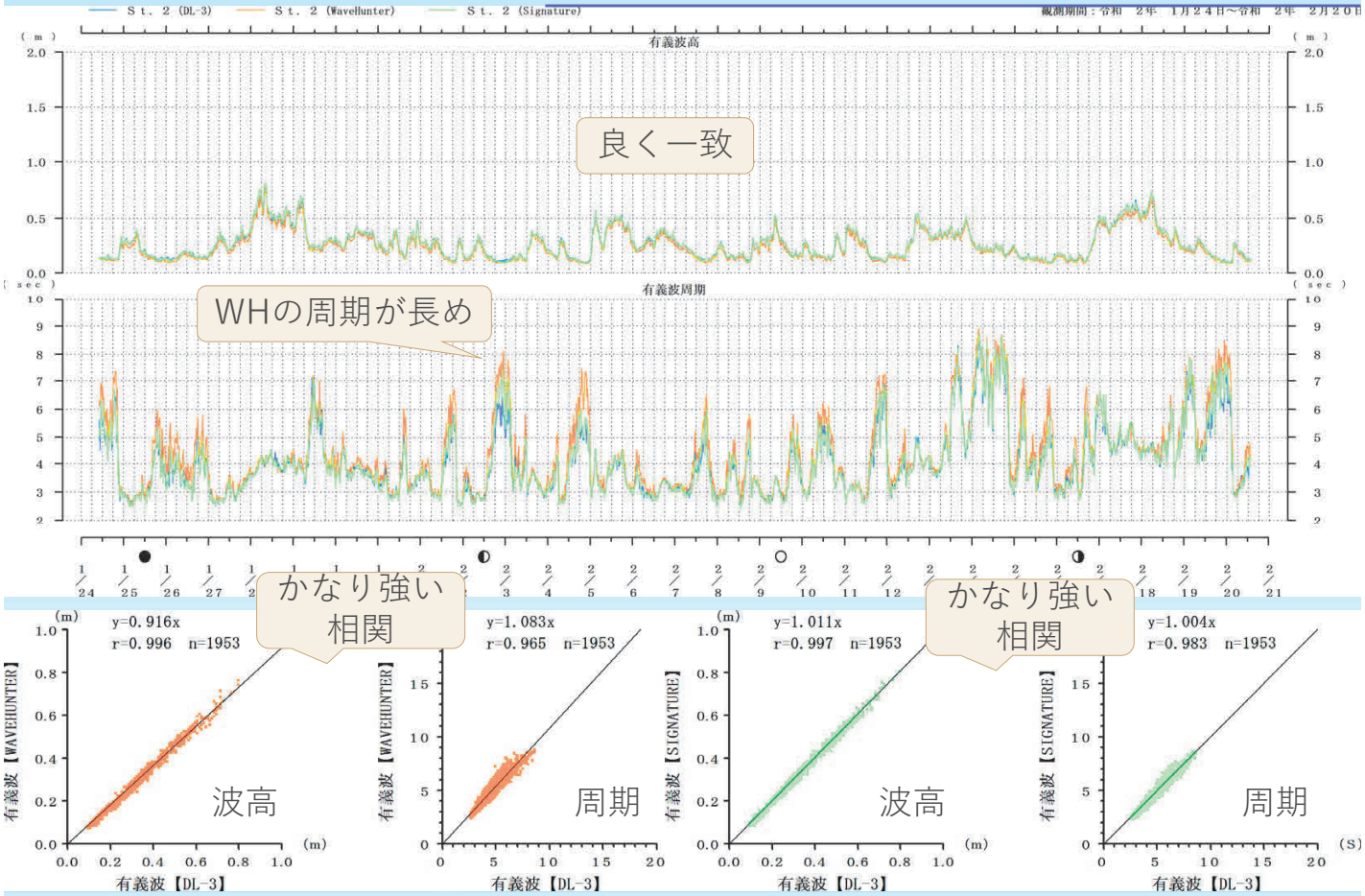
季節：秋
場所：港の防波堤の外側（水深２７ｍ）
目的：台風襲来による高波の観測

季節：冬
場所：港の防波堤の内側（水深１５ｍ）
目的：港内の静穏な環境での観測

3．取得データの比較（ DL-3 vs WAVE HUNTER vs Signature ）秋

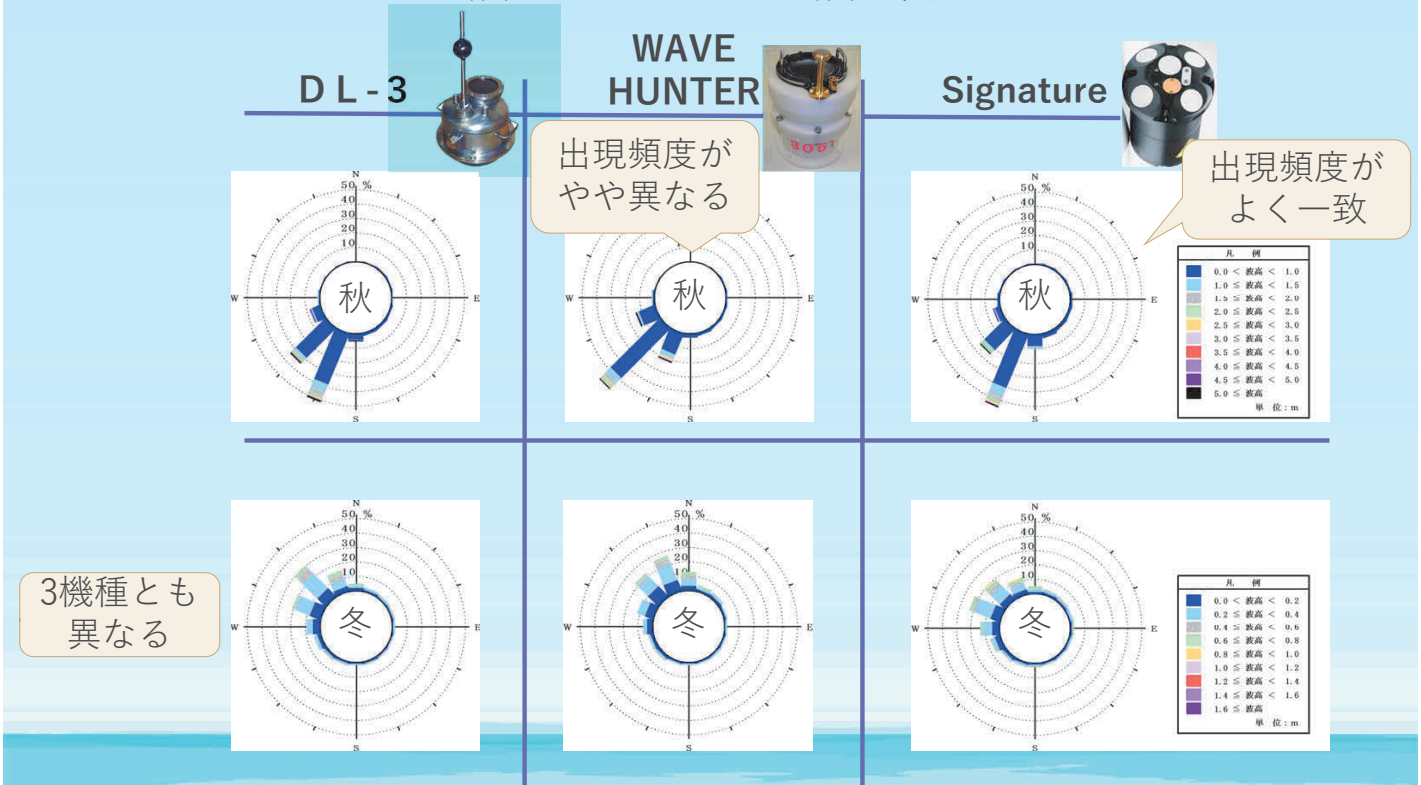


3．取得データの比較（DL-3 vs WAVE HUNTER vs Signature）冬



3．取得データの比較（DL-3 vs WAVE HUNTER vs Signature）

波　向　と　波　高



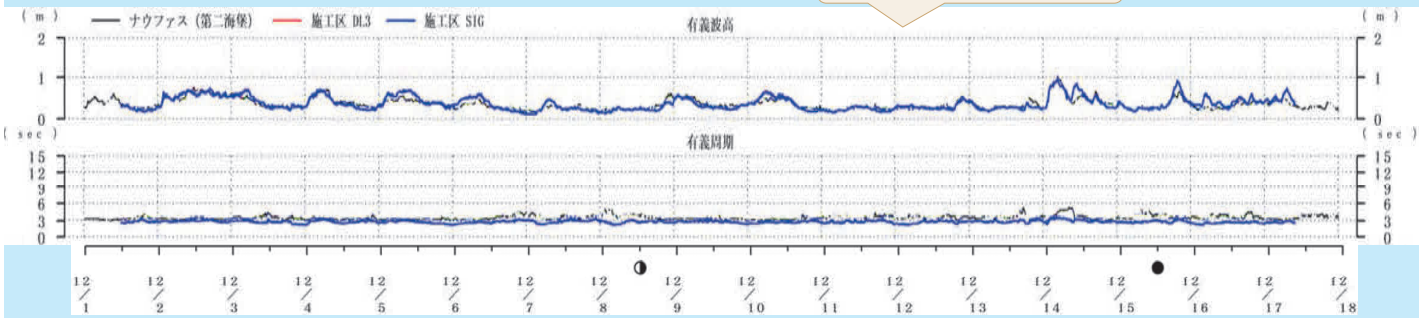
3．比較検証事例２（DL-3　vs　Signature）

東京湾

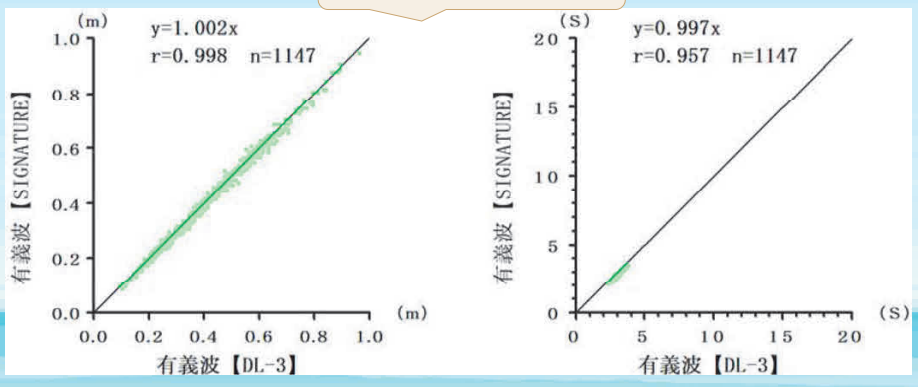
季節：冬
場所：千葉県岸壁から５０ｍ沖（水深４ｍ）
目的：冬季の季節風による高波の観測

3．取得データの比較（ DL-3　vs　Signature ）

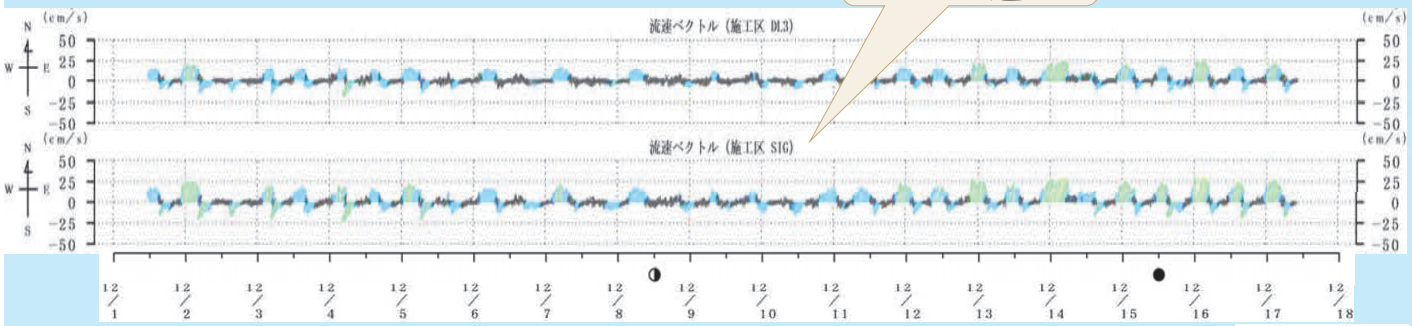
非常に良く一致



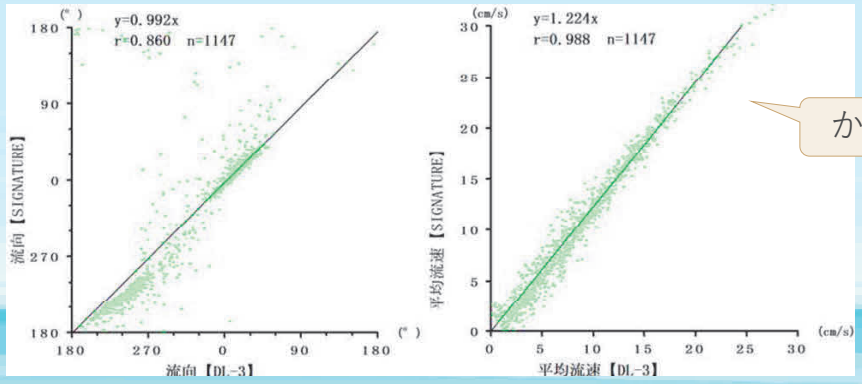
有義波高　かなり強い相関　有義波周期

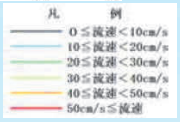


3．取得データの比較（DL-3　vs　Signature）



流向　　平均流速





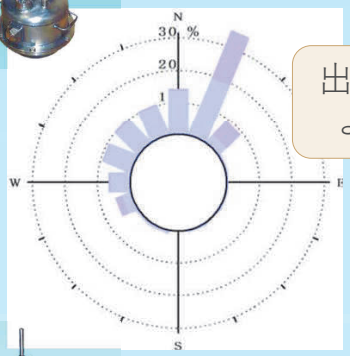
かなり強い相関

3．取得データの比較（DL-3　vs　Signature）

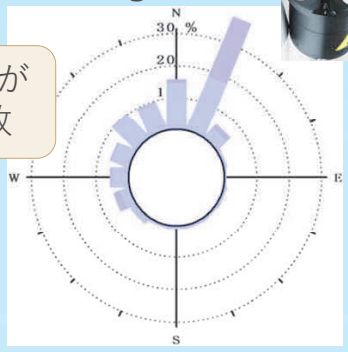
波　向　と　波　高

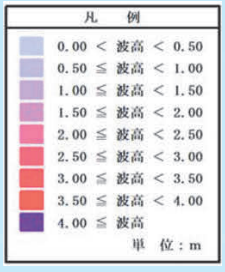
DL-3　　Signature

有義波高



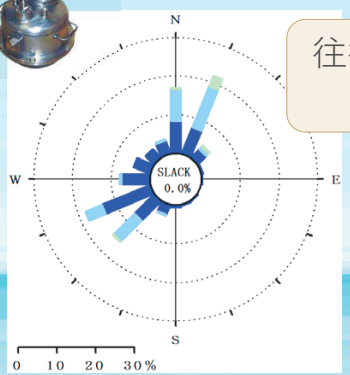
出現頻度がよく一致



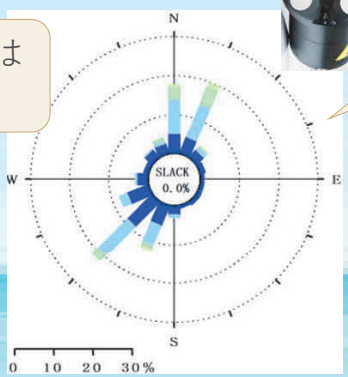


流　向　と　流　速

流向・流速



往復傾向は一致



流速がやや速い

4．おわりに

【検証結果】

WAVE HUNTER：　ＤＬ３と波向きの出現が異なる
Signature1000　：　ＤＬ３と同等な観測結果であった

機種	本体価格比(DL-3基準)	電池価格比※1(DL-3基準)	最大観測日数	検証結果	ランニングコスト
DL-3	1	1	約30日	－	△
WAVE HUNTER	0.6	0.5	60日	波向にズレ	○
Signature	0.8	0.3	90日以上※2	同等	◎

※1 観測日数30日程度の観測設定の場合
※2 内部バッテリー＋外部バッテリー2個使用時（その他設定次第で変動）

4．おわりに

【Signature導入のメリット】

1．多層で流向・流速を測定できる
　→　鉛直的な流況の分布を把握できる
　→　多層のデータを元に波向算定等、より詳細な波浪解析が可能

2．軽量である
　→　現場作業や運搬時の安全性が向上

3．ランニングコストが安価である
　→　経費削減が可能

4．外部バッテリーによる長期観測
　→　内部バッテリーと外部バッテリー（2個）の併用により、
　　交換なしで最大９０日以上※の長期連続観測が可能
　→　点検頻度を抑え経費削減が可能

※観測条件により異なる
※水深１５m、観測層厚０．５m、０．５秒連続観測、１ピング発信の場合

ご清聴ありがとう
ございました

共同利用研究集会

「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

琉球大学工学部　藤井 智史

１．目的と経緯

海洋レーダは、高い時空間分解能で継続的に沿岸海域をモニタリングすることが可能である。また、陸上設置の観測器であることから、洋上または船舶の観測に比べて運用保守などが容易であるという利点がある。この特徴を生かして、海洋環境の把握や防災への活用、海運や水産業への貢献などが期待されている。

海洋レーダを用いた沿岸域の海況監視システムの構築に向けて、精度向上や効率的運用、信号処理の高度化などのレーダ技術の発展と、観測結果の検証、応用分野や利用範囲の拡大などを議論することを目的として標記研究集会を開催した。この研究集会は、2003 年度に応用力学研究所共同利用研究の一環として開始され、国内の海洋レーダに関係する研究者、利用者が一堂に会する研究集会として継続して実施されてきたものである。

本年度も新型コロナウィルス感染が収まらない中での実施であったが感染者数がやや落ち着いた時期であったため、感染防止に配慮し、会場での密集を避け、当日もマスク着用ならびに消毒用アルコール等を用意したうえで、対面にて応用力学研究所内で開催した。同時に希望者にはオンライン配信を提供した。

２．開催概要

開催日時：　2021 年 12 月 6 日（月）　午後（14:00～17:15）
　　7 日（火）　午前（09:30～12:15）
開催場所：　九州大学 応用力学研究所西棟 6 階　多目的研究交流室（W601 号室）
参加者数：　6 日 26 名、7 日 29 名　　両日参加：22 名
　　オンライン視聴　10 名

３．発表概要

本年度も前年に引き続きコロナ禍で行動が制限される中、合計 11 件の研究発表が行われた。

1 日目は、研究集会の趣旨説明の後 6 件の講演があった。琉球大学の玉城は、海洋レーダ送受信機製作時に必要となるターゲットシミュレータを FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いて製作した。遅延と位相変化を加えることで、距離とドップラースペクトルを模擬する方法を示した。三菱電機の遠藤らは、畳み込みニューラルネットを用いた機械学習により、海洋レーダで観測した流速値を入力として未来の浸水深の時系列予測する手法について紹介した。学習データに対してノイズを付加した予測では、60 分先までの平均絶対誤差で最大で 0.16m、平均で 0.05m の精度で予測できることを示した。東京電力の寺岡らは、海底地すべりと海底活断層の重畳による津波に対して仮想津波実験を行い海洋レーダでの観測値をデータ同化し津波検知の可能性を探り、波高ピークの 9 分前で 80%の予測できることを示した。JAMSTEC むつ研の佐々木は

津軽海峡東部に設置の海洋レーダ網の Web 公開状況とその活用について紹介するとともに将来計画についても語った。JAMSTEC/オーションアイズの田中は、現在の海洋レーダの観測から数時間先の流動場予測を行うために、潮汐成分を調和定数から、残差分をモデルから求めて予測する方法を提案した。その中で 12 時間先くらいまでは予測できる可能性を示した。JAMSTEC むつ研の金子は、海洋レーダで観測された水平表層流と船底 ADCP の鉛直プロファイルおよび乱流観測データから津軽海峡東部における流速鉛直構造を相対渦度から考察した。負の相対渦度領域で海洋レーダの表層流速と船底 ADCP のデータとの差が小さく、季節では秋～冬季での差が大きいことを示した。

2 日目は 5 件の講演があった。電中研の吉井は X バンドの船舶搭載レーダを用いて散乱強度と画像情報から波浪と表層流動を解析し、波高については波高計の値と整合的であるとの結果を得たが周期や波向きについては改善が必要であるとした。宮崎県水産試験場の山田は、平成 31 年 4 月から総合漁業情報として提供している海洋レーダの流れと波高の情報について、利用状況を紹介した。また、波高情報であり得ない数値が出る場合があることから、その改善の必要性を示した。琉球大学の渡嘉敷は、宮崎の 13.5MHz レーダで観測されるドップラスペクトルにおいて 1 次散乱ピークが 2 つできる双峰型スペクトルの空間分布を明らかにした。渦度との比較や月別の出現率の変化から原因に迫ろうとした。電中研の坪野は、国土交通省が伊勢湾に設置運用しているレーダについて、前回までの解析期間を 2008～2019 年と広げて潮汐結果を用いてグリーン関数法のパラメータ調整を行い、そのモデル結果とレーダでの観測流速を比較し、潮流楕円長軸の傾きと位相のばらつきが同程度であることを示した。三菱電機の亀田は、2020 年に実施した高知でのバイスタティックレーダ実験の結果を報告した。受信強度が小さくデータ取得が不十分であったが、アレイ処理による抑圧処理と微弱な 1 次散乱抽出の工夫を示した。

４．研究集会プログラム

九州大学応用力学研究所 共同研究集会

「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

（代表者：藤井智史、九大応力研世話人：市川香）

開催日： 2021 年 12 月 6 日（月）午後～7 日（火）午前

会場：九州大学筑紫キャンパス

応用力学研究所西棟 6 階 多目的研究交流室（W601 号室）

==========

12 月 6 日（月）

14:00-14:05　趣旨説明
藤井智史（琉球大）

14:05-14:30　FPGA による短波海洋向けターゲットシミュレータ
玉城大地・長名保範・藤井智史（琉球大工）

14:30-14:55　機械学習を用いた海洋レーダーからの津波時系列予測
遠藤隆夫・吉村玄太・毬山利貞(三菱電機)、阿部郁男(常葉大)、今村文彦(東北大)

14:55-15:20　海底地すべりと活断層による津波の重畳を考慮した津波検知・予測に関する検討
寺岡駿輔・金戸俊道(東京電力ホールディングス)、木村達人(東電設計)

15:20-15:35　休憩

15:35-16:00　津軽海峡海洋レーダ観測網の状況と今後の計画について
佐々木建一(JMSTEC むつ)、橋向高幸(マリン・ワーク・ジャパン)、佐藤喜曉・金子仁・畳指祥子(JAMSTEC むつ)、藤井智史(琉球大工)

16:00-16:25　レーダーナウキャストの開発と運用
田中裕介(JAMSTEC／オーシャンアイズ)、佐々木健一・金子仁(JAMSTEC むつ)

16:25-16:50　相対渦度分布からみた津軽海峡東部における短波レーダ表面流速と船底 ADCP 流速の比較
金子仁・佐々木建一(JAMSTEC むつ)、田中雄大(水産機構資源研)、阿部泰人(JAMSTEC むつ／北大院水産)、脇田昌英(JAMSTEC むつ)、奥西武(水産機構資源研)、橋向高幸(マリン・ワーク・ジャパン)、佐藤喜曉・畳指祥子・渡邉修一(JAMSTEC むつ)

16:50-17:15　情報交換

12 月 7 日（火）

09:30-09:55　船舶用 X バンドレーダーを用いた沿岸海域観測
吉井匠・新井田靖郎(電中研)

09:55-10:20　宮崎県における海洋レーダーの利用状況と課題
山田和也(宮崎水試)

10:20-10:45　海洋レーダにおける双峰型スペクトル発生分布の変動傾向
渡嘉敷悠大・藤井智史(琉球大工)

10:45-11:10　休憩

11:00-11:25　伊勢湾海洋レーダと数値モデルの比較による流速の精度検討
坪野考樹(電中研)

11:25-11:50　海洋レーダの実験状況と今後の計画について
亀田洋志・赤間慶・高橋龍平・今津智成(三菱電機)、片岡智哉(愛媛大院工)，藤井智史(琉球大工)

11:50-12:15　総合討論

共同利用研究集会

第 19 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

19th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

研究代表者　京都大学　村上定義
所内世話人　糟谷直宏

１．研究集会の開催目的

応用力学研究所においては、これまで京都大学との共同研究により核燃焼プラズマ統合コード構想を発足させ、活動を行ってきた（http://p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/）。このプロジェクトは、科研費「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」(2004~2006)、「統合コードによる ITER プラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」(2007~2010)、「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発」(2008~2012)等によって部分的に支援されてきた。各年度の活動状況および次年度の活動計画を含めて研究会を毎年開催している。今回で第 19 回目となるが、第 11 回よりトロイダルプラズマに対象を拡大し、炉心プラズマと周辺プラズマ、MHD 現象と輸送現象、高エネルギー粒子と乱流輸送、加熱・電流駆動と長時間運転等の複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションについて、包括的なアプローチとして議論している。第 2 回～第 8 回と第 11 回～第 18 回は応用力学研究所の共同研究集会として開催してきた実績がある。

２．開催日時

開催日程： 20202 年 1 月 6 日（木）－ 7 日（金）
開催場所： オンライン
講演数：31 件、参加者数：38 名

３．研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの進展について議論するため研究集会を 2 日間にわたって開催した。外国人参加者も含めて講演 31 件(研究成果報告 25 件、サブクラスター関連 6 件)の申し込みが集まった。件数は例年と同程度である。今回はコロナ禍の影響で研究者の移動が困難な状況が続いているのでオンラインを主体としながらも、九州大学に現地会場を設けてハイブリッド開催とした。今回の特徴として企画セッション「不純物輸送」を設定したことがある。また、口頭発表とポスター発表それぞれのセッションを設定し、全体の議論を重視するか、個別の議論を深めるか各自の発表内容に合わせて選択してもらった。このように一方通行的な研究発表となることを避け、議論の活性化を図るための工夫を加えた研究会を企画した。企画セッション(口頭)6 件、口頭発表 9 件、ポスター発表 10 件とバランスの良い構成となった。口頭発表、ポスター発表ともに Zoom を利用した。2 日目午後に核融合フォーラムサブクラスターとの合同会合で内外の研究情勢の報告と今後の研究方針の議論を行った。

どれも質の高い研究成果報告であった。今回はテーマとして挙げた不純物輸送とともにデータ駆動手法に関する話題が豊富であった。学生による講演も 8 件あり、若手の活躍に今後の期待が持てる。以下に研究成果講演内容を抜粋して列挙する。

企画セッション「不純物輸送」を実施した。矢木によるセッション趣旨説明に引き続き、5 件の講演があった。相羽は日本の核融合原型炉で想定しているプラズマパラメータを実現する運転シナリオについて、原型炉設計合同特別チームで進めている検討の現状および課題について紹介した。藤田は統合輸送コード TOTAL を用いて、原型炉プラズマにおける不純物の蓄積について検討した。原型炉においては境界層／ダイバータプラズマやコアプラズマからの放射パワーが増大するのでダイバータ熱負荷を許容値以下に抑えるためにアルゴンやキセノン等の不純物の注入が考えられている。完全非誘導電流駆動のためには高い閉じ込め改善度が要求され、その比較的ピーキングした密度分布から不純物の蓄積が懸念されるので、統合コードにより評価した。持永は高温プラズマに混入した高電荷数不純物は放射損失などによりプラズマ温度を大きく低下させるので、トカマク装置のコアプラズマにおける不純物制御手法の確立を目的として、統合輸送シミュレーションコード TASK の開発を進めた。これまで新古典輸送に着目してきた不純物輸送コード TASK/TI に乱流モデルの適用を行い、複数のプラズマ主要素分布に対する不純物輸送シミュレーションの結果について報告した。また、国内でそれぞれ開発が進められている統合コードにおける不純物輸送について、林は TOPIC コードの全体像とその不純物部分 IMPACT の現状について、本多は TASK/TX コードの現状について報告した。これら不純物輸送という共通の課題に対する議論を通じて複数の統合コード間の相互理解を進めることができた。

Xu は重イオン不純物の乱流輸送についてジャイロ運動論コード GKV を用いたシミュレーションを行った。磁気シアの低減により電子捕捉モード TEM によるピンチ速度は内向きから外向きに変化できる一方で、イオン温度勾配 ITG 乱流では常に内向きであることが分かった。TEM 乱流でのピンチ反転は磁力線方向ダイナミクスによる外向き流速の増加に起因する。

滝塚は修正リープフロッグ(LF)法により時間刻みの大きな粒子シミュレーションで正しいラーマ半径計算を保てることを示した。ステップを 2 倍にしてその平均速度を用いて粒子位置計算を進めることで時間ステップに依存せずラーマ運動を正しく記述できる。

本多は定常輸送コード GOTRESS を核とした新しい統合モデル GOTRESS+を開発している。ペデスタル高さと幅を予測するモデル EPED1 の導入を完了したことで、磁気軸からプラズマ境界まで一貫したプラズマ分布予測が可能となった。GOTRESS+を用いて 2 つの JT-60SA 運転シナリオの評価を行った。

杉山は原型炉では加熱電流駆動の占めるポート領域を可能な限り小さくできることが好ましく、プラズマ運転に必要な加熱パワーを評価しておくことが重要であるので、TOPICS コードを用いて、原型炉における L-H 遷移に必要な加熱パワーの密度発展及び逆遷移条件依存性を評価した。またアルゴン入射による高加熱パワー入射時のセパラトリクスからのプラズマ損失パワー制御検討を行った。

福山は統合コード TASK による波動解析の進展について報告した。光線追跡法と速度分布関数解析を組み合わせた電子サイクロトロン波電流駆動解析、イオンビームによる波動励起解析、積分形誘電率を用いたサイクロトロン波加熱の 2 次元解析等の現状と今後の課

題について説明した。

佐々木はミクロスケール乱流が非線形結合によってストリーマや帯状流といったメゾ・マクロスケール構造を駆動し、相互作用するので、このような非線形過程を波動運動論に基づいて考察した。波動運動論では、実空間と波数空間からなる位相空間上のダイナミクスを対象とする。乱流の位相空間ダイナミクスの結果、捕捉や散乱等が起き、これらが実空間構造に重要な影響を与えることを示した。

森下はデータ同化の手法と統合輸送シミュレーションコードTASK3Dを組み合わせたデータ同化システムASTIの開発を行なっている。LHDに対する適用例を紹介するとともに、実際の観測データを用いてシミュレーションモデルを逐次最適化し、予測および解析精度を高める手法であるデータ同化を応用した核融合プラズマ制御手法の開発について報告した。

安齋は核融合原型炉において核燃焼効率を正確に評価するためには運動論的統合輸送コードの研究開発が必要なので、運動論的統合輸送コードTASK/FPに各種粒子軌道による有限軌道幅効果を導入し径方向拡散係数を正確に評価できるようにした。高エネルギー粒子の振る舞いについて新古典輸送理論と比較した結果を報告した。

横山はAI活用に関するIAEA-TMキックオフ会合に関する情報共有を通じて、世界的に進められているAI活用の現状について紹介した。

瀬戸は非線形MHDコードBOUT++で全円環トーラスを対象とした周辺乱流シミュレーションを行うために開発した数値計算手法の詳細について報告した。長波長成分も含めた計算を可能とした。

相澤は磁場閉じ込めプラズマの動的制御をする上で、乱流を含むプラズマ挙動の予測は喫緊の課題であるので、直線磁化プラズマ実験装置 PANTA におけるラングミュアプローブによって観測された多スケール乱流の時系列データを対象とし、長期・短期記憶ネットワークを用いて時系列予測を行なった。ネットワークの学習条件を変化させたときの予測特性について説明した。

黒田はトカマク型装置では MHD 不安定性の影響でプラズマの閉じ込め性能の劣化やプラズマ崩壊現象が起こるので、トカマク型装置PLATOを対象に3次元MHDシミュレーションを行った。複数の特徴的な不安定性が励起される条件において、フーリエモード展開で波数空間上の構造を評価するとともに、近年使用されるようになった動的モード分解を用いて、動的な構造の抽出を行った。

登田は簡約化輸送モデルを用いて、統合コードでマルチスケールの輸送シミュレーションを行った。簡約化モデルにより、線形解析によって非線形解析結果が再現または予測できるので、統合シミュレーションの各時間ステップで線形ジャイロ運動論解析を行う準線形流束モデルを用いたシミュレーションから定常温度分布予測を行った。

糟谷は複数シミュレーションに対する解析をあわせて行うことが多様な様相の解明に効果的であるので、統合的な数値診断プラットホームを開発している。PLATOトカマクにおけるバルーニング不安定性揺動とその重イオンビームプローブ計測の模擬について、データフォーマットの異なる2種類の揺動場データに対して計測模擬ルーチンを適用した結果を報告した。

梅崎は核融合炉の実現に向けてダイバータ板にかかる熱負荷の低減・除去は最重要課題

の一つであるが、周辺プラズマの解析に広く用いられている統合コードには粒子のエネルギー輸送や運動方向に影響を与えるイオン―中性粒子間の大角度散乱が考慮されていないので、燃料イオンに対し軌道計算を行うことでダイバータプラズマにおける大角度散乱輸送効果を検討した。

成田は準線形熱・粒子輸送モデル DeKANIS の開発を進めている。DeKANIS はニューラルネットワークモデルを用いて乱流流束を予測しており、その訓練データに含まれる輸送係数は JT-60U の粒子束の実験値に基づく乱流飽和則で求められている。予測精度を向上させるための乱流飽和則の改良について報告した。

髙橋は直線磁化プラズマ装置 PANTA で静電プローブによる高精度な乱流時空間構造の計測が可能であるので、PANTA で計測された乱流データに特異値分解等の統計解析を行った。特異値分解を用いると、フーリエ解析では困難な局在構造や突発現象を捉えることが比較的容易となる。磁場強度を変化させたときの乱流時空間構造の応答特性に焦点を当てた解析結果を示した。

野中はトカマク閉じ込め改善放電における不純物の影響を調査した。不純物としてはタングステンを対象とし、JET トカマクパラメータを用いた輸送シミュレーションを行い、Reversed shear mode 放電の不純物流入量、加熱パワーと内部輸送障壁形成の関係について調べた。Reversed shear mode 放電と L-mode 放電の比較をすることで内部輸送障壁が不純物輸送にもたらす影響について考察した。

糟谷は直線装置 PANTA を対象として密度勾配によって駆動される抵抗性ドリフト波不安定性のイオン質量依存性を評価した。放電ガス種の質量数が小さいと特徴的長さスケールであるラーマ半径が小さくなり、同一サイズのプラズマでは不安定モード数が大きくなる。アルゴンプラズマでは少数不安定モードで形成される飽和状態が、ヘリウムプラズマでは帯状流を伴う多数モードの励起された乱流状態が特徴的であることを示した。

以上のように多様な研究内容に関して、ハイブリッド開催という実施方法を最大限に利用して議論を活性化するという目的を達成した研究会を実現した。来年度はより多くの参加者が現地で直接顔をあわせることができるようになることを祈りつつ、第 20 回研究会を九州大学で開催するべく応用力学研究所共同研究に応募することとした。

４．研究集会プログラム

1 月 6 日(木)

13:00 – 13:10　事務連絡 Business announcement

企画セッション「不純物輸送」 Topical session “Impurity transport”

(座長：矢木)

13:10 – 13:20　講演 1-1　矢木 (量研)

Introduction

13:20 – 13:45　講演 1-2　相羽 (量研)

Current status and issues on developing operation scenarios of fusion DEMO reactor

13:45 – 14:10　講演 1-3　藤田 (名大)

Analysis of impurity transport with TOTAL code in tokamak DEMO

14:10 – 14:30　講演 1-4　持永 (九大)

Impurity transport simulation using integrated code TASK in tokamak plasma

14:30 – 14:40　講演 1-5　林 (量研)

Plan for developing IMPACT: overall plan of the integrated code and its part for impurity transport

14:40 – 14:50　講演 1-6　本多 (京大)

Plan for developing TASK/TX

14:50 – 15:00　議論

Discussion

15:00 – 15:15　休憩

(座長：村上)

15:15 – 15:40　講演 2-1　Xu (名大)

Reversal of heavy impurity pinch velocity in trapped electron mode turbulence by decreasing the magnetic shear

15:40 – 16:05　講演 2-2　滝塚 (阪大)

Double leap-frog method for large-time-step particle simulation to keep Larmor radius small

16:05 – 16:30　講演 2-3　本多 (京大)

Development of an integrated model GOTRESS+ and its application to assessment of JT-60SA operation scenarios including the pedestal

16:30 – 16:55　講演 2-4　杉山 (量研)

Evaluation of heating power required for L-H transition in JA DEMO

16:55 – 17:20　講演 2-5　福山 (京大)

Progress of wave analyses in toroidal plasmas using the integrated TASK

17:20 – 17:35　休憩

(座長：糟谷)

17:35 – 18:00　講演 2-6　佐々木 (日大)

Study on interaction between micro-turbulence and meso/macro-scale structures based on wave-kinetic formalism

18:00 – 18:20　講演 2-7　森下 (京大)

Development of control system for fusion plasmas using data assimilation

18:20 – 18:35　講演 2-8　安齋 (京大)

Introduction of finite orbital width effects into TASK/FP and comparison with neoclassical transport theory

18:35　散会

1 月 7 日(金)

9:00 – 11:00　ポスター講演 Poster

コアタイム core time　9:00 – 10:00 Group A

10:00 – 11:00 Group B

(開室 start 8:45、閉室 end 13:00)

11:00 – 11:10　休憩

(座長：糟谷)

11:10 – 11:35　講演 3　横山 (核融合研)

Information sharing on kick-off meeting of the IAEA-TM on AI application

(Session Leader：村上)

11:35 – 12:00　議論 Discussion

12:00 – 12:10　事務連絡 Business announcement

12:10 – 13:10　昼休み

(核融合エネルギーフォーラムサブクラスターとの合同会合)

13:10 - 13:20　林（量研）

サブクラスター関係連絡事項 (ITER の統合モデリングエキスパートグループの日本委員交代について)

13:20 - 13:50　宮戸（量研）

IFERC 計算機シミュレーションセンターの現状報告

13:50 - 14:20　横山（核融合研）

ITER に於ける統合モデリング活動の報告

14:20 – 14:50　若月（量研）

ITPA 統合運転シナリオグループ活動報告

14:50 – 15:10　星野（慶應大）

炉心プラズマ＋炉工学炉材料モデリングサブクラスター合同会合の報告

15:10 – 15:30　林（量研）

今後の予定の議論

15:30　散会

Poster list

Group A

PA-1 瀬戸春樹（量研) H. Seto

A BOUT++ extension for full annular torus tokamak edge simulations

PA-2 相澤カランザ正臣（日大) M. C. Aizawa

Prediction of turbulence temporal evolution in PANTA by long-short term memory network

PA-3 黒田侑（九大）Y. Kuroda

Analysis of three-dimensional structure of MHD instabilities in tokamak

PA-4 登田慎一郎（核融合研）S. Toda

Prediction of temperature profiles in helical plasmas by integrated code coupled with gyrokinetic transport models

PA-5 糟谷直宏（九大）N. Kasuya

Numerical diagnostic of plasma fluctuations by using 3-D simulation data in torus plasmas

Group B

PB-1 梅崎大介（九大）D. Umezaki

Large-angle scattering transport effects in edge plasma

PB-2 成田絵美（量研）E. Narita

Development of semi-empirical particle and heat transport model and improvement in its turbulent saturation rule

PB-3 髙橋凌一（日大）R. Takahashi

Spatio-temporal analysis of plasma turbulence in PANTA by using singular value decomposition

PB-4 野中奨（九大）S. Nonaka

Effect of impurities on improved confinement in tokamak discharges

PB-5 糟谷直宏（九大）N. Kasuya

Drift wave turbulent structure depending on ion mass number in cylindrical plasmas

５．参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属
林　伸彦	量研機構	滝塚知典	阪大
矢木雅敏	量研機構	筒井広明	東工大
相羽信行	量研機構	星野一生	慶大
矢本昌平	量研機構	御手洗　修	先進フュージョン研
本間裕貴	量研機構	村上定義	京大工
成田絵美	量研機構	本多充	京大工
瀬戸春樹	量研機構	福山　淳	京都大
杉山翔太	量研機構	森下侑哉	京大工
朝倉信幸	量研機構	安齋亮慶	京大工
若月琢馬	量研機構	打田正樹	京大エネ
横山雅之	核融合研	梅崎大介	九大工
登田慎一郎	核融合研	糟谷直宏	九大応力研

向井清史	核融合研	小菅佑輔	九大応力研
藤田隆明	名大	持永祥汰	九大総理工
Xu Shaokang	名大	黒田侑	九大総理工
竹本壮汰	名大	野中奨	九大総理工
佐々木真	日大	今橋優大	九大総理工
髙橋凌一	日大	吉原稜	九大総理工
相澤カランザ正臣	日大	轟晴彦	九大総理工

階層的全球数値モデリングを用いた氷雲におけるエアロゾル-雲相互作用の気候研究

東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻 堀田陽香

・目的

雲は 0℃以上では液相、-40℃以下では固相の形態をとるが、-40℃から 0℃ではエアロゾルなどの環境場に依存して、液相と固相のどちらの形態も取ることがある。熱力学的相は雲の放射特性・降水特性へ影響する。そのためモデルで雲相を正しく表現することは、気候場を正確に表現するため、そして人為起源温室効果ガスやエアロゾルの気候影響を正確に見積もるために重要である(Kay et al. 2012, McCoy et al. 2015)。
気候計算に用いられる全球エアロゾルモデルは計算資源の都合上、雲やエアロゾルの表現にパラメタリゼーションという半経験的な手法を適用せざるを得ない。しかし近年は計算機能力の向上によって、全球スケールでエアロゾルや雲の表現を陽に表現できる高解像度モデルの開発が進んできた(Satoh et al. 2019)。様々な解像度の全球モデルにおいて雲の熱力学的相を評価することで、エアロゾルが氷雲に与える影響の理解向上に資することが本研究の目的である。

・実験結果と考察

衛星観測は全球的に雲相を観測する唯一の手段であるが、衛星観測から得られる雲相の情報とモデルが表現する雲相との間にはギャップが存在する。衛星観測では厚い雲の下にある雲がサンプルされない・電磁波の情報から雲相を推定するリトリーバルに不確実性が生じる、などの制約が課されるためである。このような観測とモデルのギャップを埋めるため、全球エアロゾルモデル MIROC-SPRINTARS(Tatebe et al. 2019)に衛星シミュレータ COSP(Bodas et al. 2011)を適用し、COSP が雲相の評価に与える影響を評価した。衛星シミュレータとは、雲・降水や気温・湿度場に放射伝達計算を適用し、仮にモデルの上空を衛星が飛んだ場合に衛星搭載の観測機が受信する電磁波を再現するものである。
図 1 に、
・MIROC org (COSP を適用せず MIROC の出力を用いる)
・MIROC COSP (MIROC の出力に COSP を適用する)
・CALIPSO 観測 (GOCCP(Cesana and Chepfer 2013)のアルゴリズム)
・CALIPSO 観測 (Yoshida et al. 2010; Hirakata et al. 2014 のアルゴリズム)
の気温―水雲比率の関係を示す。
MIROC org に比べて、MIROC COSP では水雲比率が増加した。これは先行研究(Cesana and Chepfer 2013)と同様の傾向である。MIROC org は衛星観測と比較して水雲の割合が少ないと評価されていた(Mccoy et sl. 2015)が、MIROC COSP ではおよそ 2 つの観測の不確実性内におさまっている。
COSP のパラメータを変える実験から、MIROC では氷雲が水雲に比べて光学的に薄く、リトリーバル検出の閾値を下回ることが多いことが示唆された。また、MIROC COSP の結果は

COSP の鉛直解像度や、雲の重なり方の仮定に対しても感度を持つことが分かった。
一般的に、水雲に比べて氷雲が光学的に薄いことから、他の気候モデルにおいてもモデル出力と COSP を介した結果には系統的な違いが生じている可能性がある。モデルの雲相と気温の関係を正確に評価するためにはモデルに衛星シミュレータを適用し、雲の量や重なり方などの雲相評価に影響を与える要素を考慮することが望ましい。

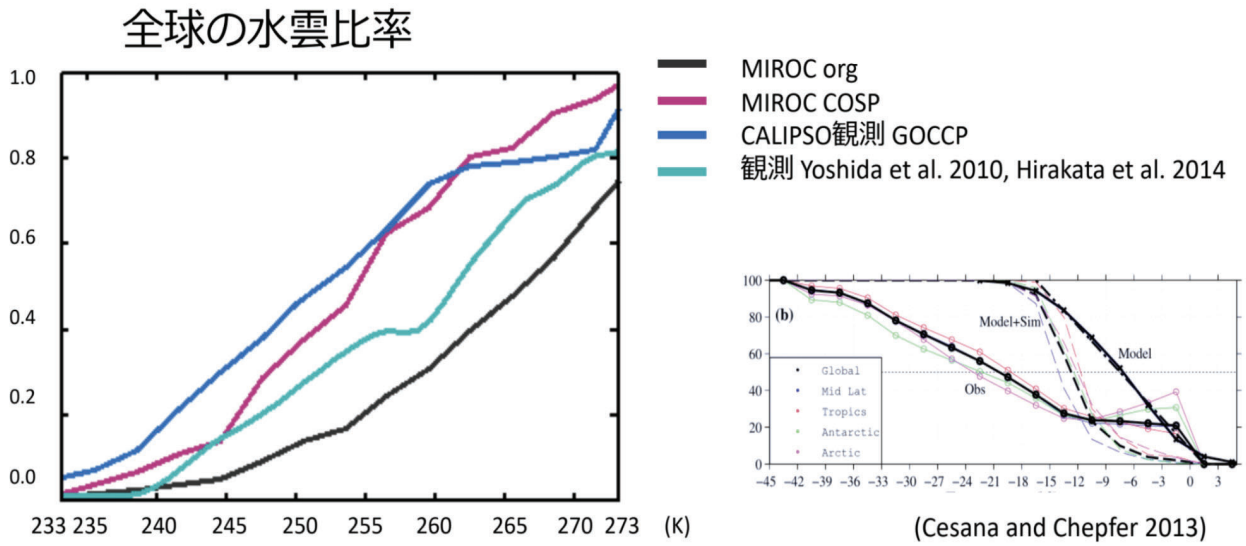


図 1　MIROC の雲相評価。気温と水雲比率（任意の気温における水雲のサンプル数/任意の気温における雲のサンプル数）の関係

また、雲とエアロゾルの仮定を陽に表現する全球モデルで雲相を評価するため、全球エアロゾルモデル NICAM-SPRINTARS を水平解像度 14m で実験し、その雲相を評価した。エアロゾルが凍結に与えるプロセスを精緻に表現するため、氷粒の数を陽に予報する NDW6 雲・降水スキーム(Seiki and Nakajima 2014)に SPRINTARS を結合した。
図 2 で NICAM-SPRINTARS と CALIPSO GOCCP(Cesana and Chepfer 2013)の雲相を比較している。IN-cont は氷晶核数 IN を気温と湿度のみの関数として与えたもの、IN-prog は、SPRINTARS が予報する氷晶核の値を与えたものである。観測データとは異なり、IN-cont、IN-prog ともに気温-27 度以下では液相の雲がほとんど存在していない。この要因として、NICAM-SPRINTARS の格子内では水雲と氷雲が均一に混ざっている仮定をとっているため、氷が昇華成長する WBF 過程が過大に表現されていることが考えられる。今後は観測条件を制約に用いながら WBF 過程のパラメータなどを調節し、氷晶核と雲相の関係を調査する予定である。

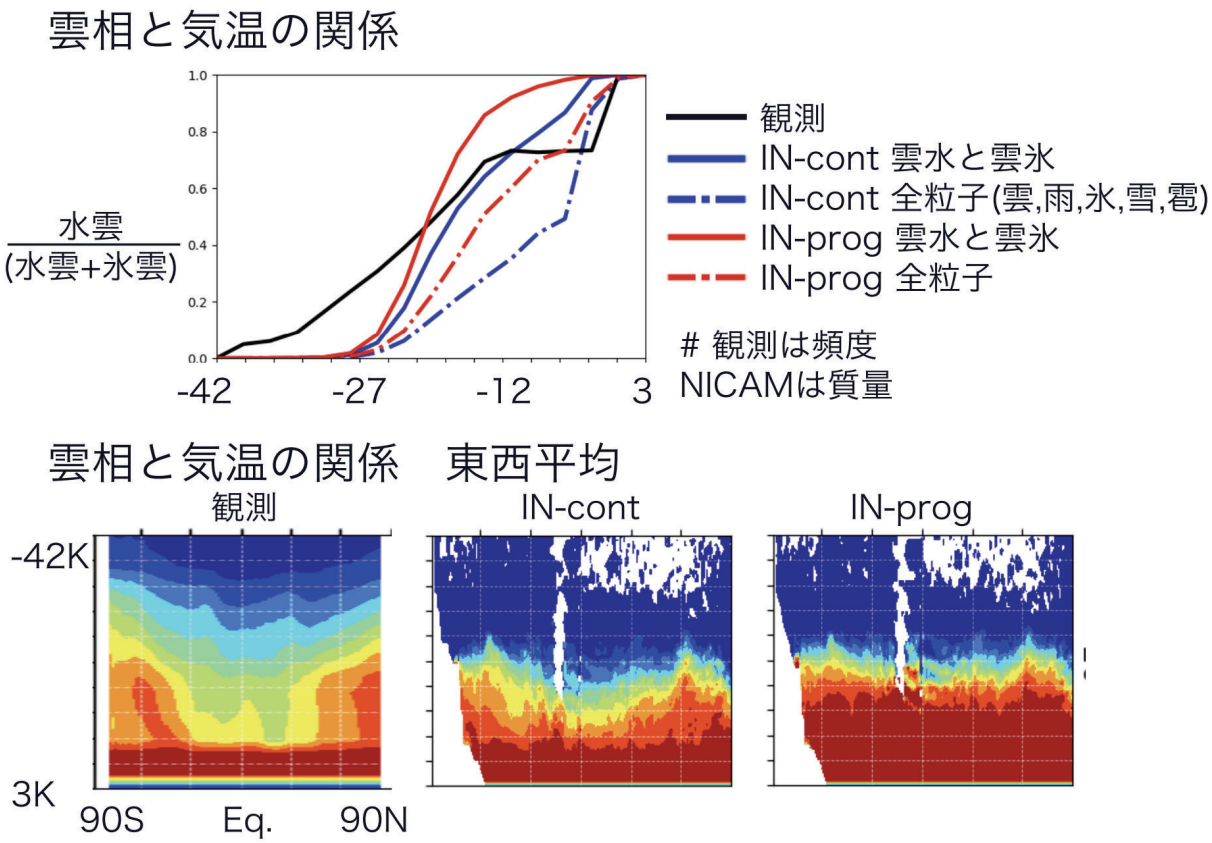


図 2 NICAM-SPRINTARS の雲相と気温の関係

・引用文献

Bodas-Salcedo, Alejandro, et al. "COSP: Satellite simulation software for model assessment." Bulletin of the American Meteorological Society 92.8 (2011): 1023-1043.
Hirakata, Maki, et al. "Comparison of global and seasonal characteristics of cloud phase and horizontal ice plates derived from CALIPSO with MODIS and ECMWF." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 31.10 (2014): 2114-2130.
Kay, J. E., et al. "Exposing global cloud biases in the Community Atmosphere Model (CAM) using satellite observations and their corresponding instrument simulators." Journal of Climate 25.15 (2012): 5190-5207.
McCoy, Daniel T., et al. "Mixed‐phase cloud physics and Southern Ocean cloud feedback in climate models." Journal of Geophysical Research: Atmospheres 120.18 (2015): 9539-9554.
Satoh, Masaki, et al. "Toward reduction of the uncertainties in climate sensitivity due to cloud processes using a global non-hydrostatic atmospheric model." Progress in Earth and Planetary Science 5.1 (2018): 1-29.
Seiki, Tatsuya, and Teruyuki Nakajima. "Aerosol effects of the condensation process on a convective cloud simulation." Journal of the Atmospheric Sciences 71.2 (2014): 833-853.
Tatebe, Hiroaki, et al. "Description and basic evaluation of simulated mean

state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6." Geoscientific Model Development 12.7 (2019): 2727-2765.
Yoshida, R., et al. "Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud‐Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio." Journal of Geophysical Research: Atmospheres 115.D4 (2010).

ヘリウムライン比分光を用いた電子密度、温度揺動とその位相差の計測

マックスプランク・プラズマ物理学研究所　西澤敬之

研究背景、目的

プラズマ閉じ込め装置を用いた乱流実験では十分な時間、空間分解能に加えて複数の物理量の揺動とそれらの相関を計測することが重要である。例えばプラズマの密度に大きな揺らぎが生じていてもそれが必ずしも大きな粒子輸送に繋がるとは限らない。径方向の速度揺動と密度の揺動の位相が 90 度ずれている場合は内向きと外向きに移動する粒子が釣り合い、時間平均では輸送は生じない。このため輸送を評価するには位相の情報が必要である。一般に輸送の軽減は経済的な核融合炉の実現に不可欠であるが物理量によっては適度な輸送が必要となる場合もある。トカマク型における H モードは局所的に輸送を大きく軽減し閉じ込め性能を向上されるが ELM と呼ばれる大域的不安定性を誘発し間欠的にプラズマのエネルギーを外部に放出する。この時に生じる内壁の熱負荷は実用的な核融合炉において材料の許容限界を超える可能性があると考えらえている。一方、熱輸送のみを選択的に軽減し粒子に対し大きな輸送を保つことで ELM を避けるシナリオ(I-mode)も見つかっており、米国にて開発されている高温超電導を用いた強磁場小型核融合炉の運転モードとして検討されている。H-mode と I-mode の例から分かるように電子密度・電子温度等の各物理量ごとに輸送過程を解明し個別に制御することが出来れば核融合炉の最適化に大きく貢献できる。

九州大学応用力学研究所では、プラズマ中の揺動乱流の研究が盛んに行われている。PANTA では可視光を用いたトモグラフィー計測システムが開発され、PLATO においても導入予定である。この手法により乱流の空間的構造を反映するプラズマの断面上での特定の輝線の発光強度の分布を得ることができる。本研究では複数の輝線のライン比から電子密度、電子温度の揺動の強度およびそれらの位相差を計測する手法の開発を行い、それを PANTA、PLATO を用いた乱流実験に応用する。

成果

新型コロナウイルスの影響により当初予定していた応用力学研究所での実験を行うことができなかった。代替として独マックスプランク・プラズマ物理学研究所の ASDEX Upgrade トカマクに設置されている Thermal helium beam diagnostic system[1]を用いてヘリウムの輝線強度の解析を行った。プラズマ計測に用いられる輝線のライン比は一般に電子密度と電子温度の両方に依存する。従来の手法では3本の輝線を計測し、複数のライン比を評価することで電子密度と電子温度を決定する。しかしこの計測法では光量不足により乱流に伴う揺動を計測するのに十分な時間分解能を得ることは難しい。そこで計測可能な輝線全て活用し、かつ相関解析によってノイズの影響を取り除く計測手法を開発した。まず計測された輝線各々に適切な係数を掛け、それぞれ分子と分母に分配する。この時の係数の選び方、分子分母への分配の仕方を調整することで電子温度、または電子密度のみに依存する量を定義できる。さらに同じ計測点においてこのような量を2つの独立な計測システムで計測し、相関スペクトルを取ることによって統計集団が増大するにつれ計測値は真の値に収束する。まず模擬データを用いてこの解析手法の有効性を実証した。次にこの手法を ASDEX の Enhanced D alpha mode 中の quasi coherent mode(QCM)の計測に応用した。この解析により得られた電子温度、電子密度の揺

動スペクトルを図 1 に示す。解析手法の詳細、ASDEX での計測結果は専門誌 Review of scientific instrument にて報告している[2]。

また ASDEX Upgrade のデータ解析の際に実験的に観測されたヘリウムの輝線の強度と衝突輻射モデルを用いた計算結果の比較を行なった。従来よく用いられてきた Open-ADAS[3]の計算結果より文献[4]に基づく手法で計算された輝度係数の方が実験結果とよく一致することを確認した。

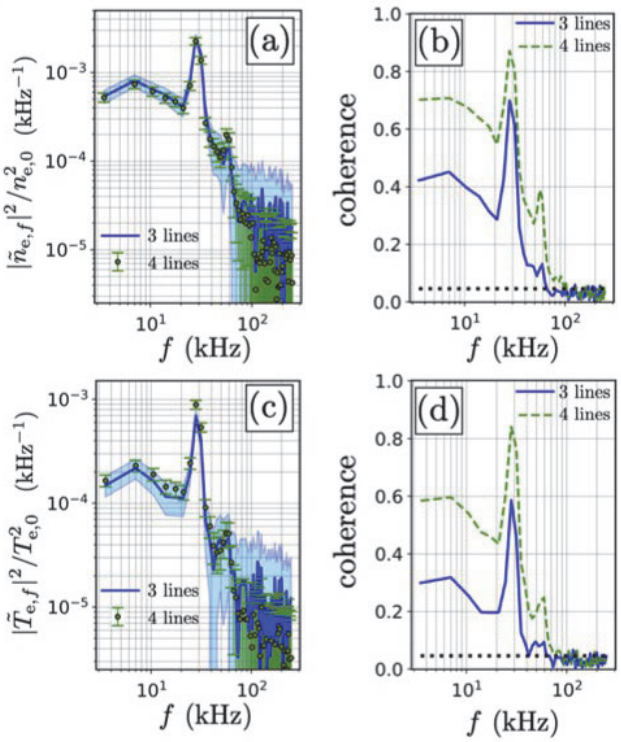


図 1 . (a), (c)QCMの電子密度電子温度揺動スペクトル. (b), (d)それらに対応するコヒーレンス関数

今後の展望

ASDEX Upgrade において本研究で開発した手法を用いて I-mode 中の Weak coherent mode の精密計測を行う。また PANTA および PLATO のトモグラフィーシステムへの応用を検討する。本研究の研究予算はトモグラフィー計測に利用できる輝線の強度の評価を目的とした小型分光器の購入に用いた。この分光器による計測結果を元に今後応用力学研究所のトモグラフィー計測システムの改良を目指す。

参考文献

[1] M. Griener, E. Wolfrum, M. Cavedon, R. Dux, V. Rohde, M. Sochor, J. M. Muñoz Burgos, O. Schmitz, and U. Stroth, Rev. Sci. Instrum. **89**, 10D102 (2018).

[2] T. Nishizawa, M. Griener, R. Dux, G. Grenfell, D. Wendler, S. Kado, P. Manz, and M. Cavedon, Review of Scientific Instru- ments **92**, 103501 (2021).

[3] Summers H P 2004 The ADAS User Manual version 2. 6th edn

[4] J. M. Muñoz Burgos, O. Schmitz, S. D. Loch, and C. P. Ballance, Phys. Plasmas **19**, 012501 (2012).

Research on Data Driven Simulation Technologies to Support Systemic Development in Renewable Energy

Hongzhong Zhu
Research Institute for Applied Mechanics

1. Introduction

In order to meet the ambitious emission-reduction targets of the Paris Agreement, Japan has promoted many national projects on decarbonization and denuclearization, especially after the 2011 Tohoku earthquake and the subsequent nuclear accident. Offshore energy resources are regarded as very important resources for the realization of carbon neutral society by 2050. In order to reduce the developing period and to help to accelerate energy projects, easy-to-use modelling methods are required as they are helpful in evaluating the reliability, power conversion efficiency and cost of projects.

Two subjects which have attracted a lot of attention are considered in this study. The first one aims to reduce the installation cost for floating platform. A ship towing system using a tugboat to tow a triangular shaped semisubmersible floater is considered. As the course stability during the towing process is highly dependent on the length of towing lines, the distance between the center of mass and the towing point, and the hydrodynamics, analysis based on conventional methods that using simplified model would not be accurate. Since model test experiments are usually necessary during prototype development, learning the course stability from experimental results directly, say, without computing the hydrodynamics of the floater and the theoretical derivation would be cost-effective. Therefore, Neural Network algorithm for predicting the course stability of the ship towing system is proposed. The second subject is to model the water column motion in wave energy converters by data fitting approach taking account of variable draft. In a floating combined wind-wave energy system, draft of WECs varies with the wind speeds and operational statuses of the wind turbine, and therefore the characteristics of WECs would vary away from the design conditions. Modeling method based on conventional linear wave theory may loss its function on estimating the water motion. To solve the problem, a model which can tackle the draft variation of WEC is presented and the coefficients of the model are determined by data fitting approach. Some main contributions of this study are explained as follows.

2. Neural Network Algorithm for Studying Course Stability of Ship Towing System

Experimental system, as shown by Fig. 1, is developed, and experiments are carried out to obtain the free-decay motion of the floater under different water flow speeds and length of towing lines. The time series data are then used to train the parameters, such as the weights and bias, for Neural Network. The Nonlinear AutoRegressive (NAR) Neural Network algorithm is applied for the training and the prediction. An example of the training and prediction result in comparison with experiment is shown in Fig. 2. The prediction by neural network can reproduce the trend of the motion, and therefore the algo-

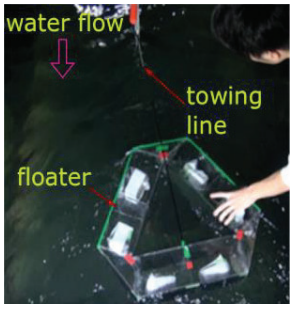


Fig. 1 Experimental towing system.

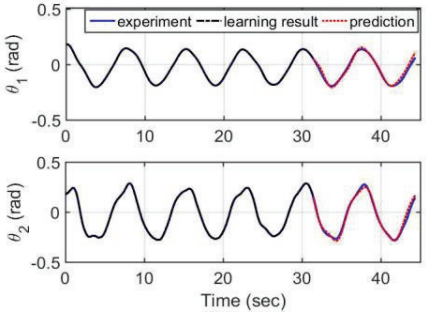


Fig. 2 Example of training and prediction results in comparison with experiment.

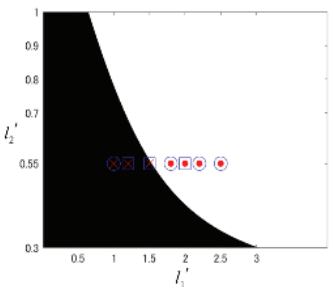


Fig. 3 Conventional results VS Neural network prediction results.

rithm is validated. The prediction results about the course stability of towing system under water flow speed of 0.45 m/s is shown in Fig. 3. The black and white regions are respectively the unstable region and stable region obtained by theoretical analysis. The '×' and '•' are unstable and stable evaluated by experiments. The '□' and '○' are the unstable and stable prediction results by Neural Network. It is found that the Neural Network can normally have a good prediction results.

3. Data Fitting Approach for Studying the Motion of Water Column

A 1:100 model of floater including three oscillating water column (OWC) devices is developed, as shown in Fig. 4. The mathematical model expressed by

$$(\rho_w A(h_0 + h) + a_h)\,\ddot{h} + b_h\dot{h} + b_2\dot{h}|\dot{h}| + \rho g A h = F$$

is applied to describe the water motion in column. The variable h_0 is used to represent the mean draft of the OWC. By the model, it becomes possible to study the interaction between OWCs and floating foundation. The parameters in the model can be identified by data-fitting approach based on least-square method. The comparison between the experiment and simulation is shown in Fig. 5. The good fitting results show that the parameters are properly estimated by the approach.

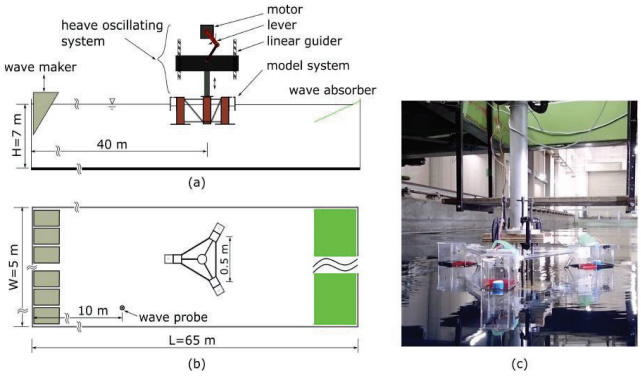


Fig. 4 Experimental system for studying water column motion.

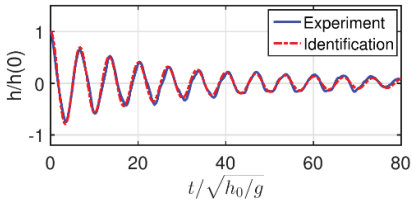


Fig. 5 Water column motion in free decay test.

4. Conclusion

From this study, it was demonstrated that deep learning technologies can be applied to support the development of offshore renewable energy. Comparing to developing new modelling technologies, experiments using small scale model would be more straightforward and save the developing period.

5. Papers

1. H. Zhu, C. Hu, "A study on Floating Overhead Power Transmission System for Offshore Energy Development: Design and Modeling Approach," *Ocean Engineering*, **236**, pp. 109528, 2021.
2. H. Zhu, C. Hu, "A Unified Seakeeping and Maneuvering Analysis of Multiple Linked Towing System with Triangular Bodies," Ocean Engineering, 222, pp. 108577, 2021.
3. R. Luo, H. Zhu, and C. Hu, "A Study on Electrical Wire and Floating Tower Interaction for an Offshore Overhead Power Transmission System," International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES), 2021.
4. 朱洪忠、岩木聡汰、胡長洪、姜欣怡、「三角形洋上浮体の針路安定性に関する研究」、日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2021S-GS14-1, 2021.
5. H. Zhu, R. Luo, C. Hu, and J. Noda, "An Experimental Study on Tower-Wire Interaction for Offshore Overhead Power Transmission Concept," 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2020A-GS13-4, Nov., 2020.