共同利用研究成果報告 第24号



令和2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 24 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 は、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できなくなり,共同利用研究の世話人である応用力学研究所 の教員から意見を集め、公募申請時からの研究計画の見直しを行いました。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。このような努力により、この報告書に示しますように、2020 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。これらの成果の一部は、2021年6月3日 -4 日に開催される「RIAM フォーラム 2021」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。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 2020 年度は 9 件行われ,それぞれについてまとめられています。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、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4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。

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。 力学とその応用に関する先端的課題に関し、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 一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・ご鞭撻をよろしくお願いいたし ます。

> 2021年3月 九州大学応用力学研究所 所長 岡本 創

令和2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3									
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									
2020 S 3- 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	チュラロンコン大学 Se Songploy	磯辺 篤彦 4名	1					
2020 S 3- 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	3					
2020 S 3- 3	⁹ 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	東京海洋大学 荒川 久幸	磯辺 篤彦 6名	5					
2020 S 3- 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 Sujaree BUREEKUL	磯辺 篤彦 4名	7					
2020 S 3- 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	9					

	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1									
	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							
2020 S 1- 1	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	稻垣 滋 1名	10					
2020 S 1- 2	統計モデルと複雑ネットワークの手法を融合した プラズマ乱流時系列データの新しい解析手法の開 発	高知工業高等専門学校 谷澤 俊弘	糟谷 直宏2名	12					
2020 S 1- 3	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	14					
2020 S 1- 4	ッ ブ 光捕捉微粒子を用いたプラズマ揺らぎの解析 テ	九州大学 古閑 一憲	稻垣 滋 3名	16					
2020 S 1- 5	ー マ 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	佐々木 真 5名	18					
2020 S 1- 6	分野融合研究会	九州大学 稲垣 滋	藤澤 彰英 20名	20					
2020 S 1- 8	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	稻垣 滋 3名	23					
2020 S 1- 9	流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシン グ技術の開発	核融合科学研究所 徳沢 季彦	稻垣 滋 2名	25					
特定研究2									
_	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 第二 義裕 稲垣 滋 広瀬 直毅							
2020 S 2- 1	結晶表面荒さと微斜面マクロステップのダイナミ クス:分子スケールから表面張力に支配されるス ケールへ	大阪電気通信大学 阿久津 典子	寒川 義裕 1名	27					
2020 S 2- 2	機械学習を用いた相界面における相互作用の解析	学習院大学 久保山 哲二	寒川 義裕 3名	29					
2020 S 2- 3	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 4名	31					
2020 S 2- 4	サブ静止衛星を用いた中緯度混合相雲の発生と発達過 テロの研究	USRA/NASA Ames Research Center 篠塚 陽平	弓本 桂也 3名	33					
2020 S 2- 5	- 窒化物半導体材料における形状および物性のマルマ 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 3名	36					
2020 S 2- 6	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	38					
2020 S 2- 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	稻垣 滋 4名	40					
2020 S 2- 8	プロセス・インフォマティクスに対する情報学的 データ解析の応用	産業技術総合研究所 安藤 康伸	寒川 義裕 2名	42					

	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				
2020AO- 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 4名	46
2020A0- 2	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 5名	48
2020A0- 3	やませによる陸奥湾の強い底入り潮発生に関する解析	弘前大学 島田 照久	磯辺 篤彦 2名	50
2020A0- 4	能登半島周辺海域における流況と漁況の関係性	石川県水産総合センター 川畑 達	千手 智晴 3名	53
2020AO- 5	海底資源探査用グライダー型海中ビークルの開発	九州大学 山口 悟	中村 昌彦 6名	55
2020AO- 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	57
2020AO- 7	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	59
2020A0- 8	ハイブリッド式自律型海中ロボットの高度知能化に関 する研究	大阪府立大学 有馬 正和	中村 昌彦 5名	61
2020A0- 9	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	64
2020AO- 10	対馬海峡から日本海南西海域にかけての海洋環境モニ タリング	長崎大学 滝川 哲太郎	千手 智晴 5名	68
2020AO- 11	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	70
2020AO- 12	係留系観測による豊後水道の底入り潮発生時の力学バ ランスの見積もり	愛媛大学 森本 昭彦	市川 香 2名	72
2020AO- 13	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	74
2020AO- 14	高潮・洪水時の海洋環境変動	神戸大学 林 美鶴	磯辺 篤彦 2名	76
2020AO- 15	雲粒子ゾンデを用いた過冷却の水雲の解消過程の解明	防衛大学校 岩崎 杉紀	岡本 創 1名	78
2020AO- 16	高度な氷晶モデルに基づくライダ/レーダ解析技術の 改良	気象研究所 石元 裕史	佐藤 可織 2名	80
2020AO- 17	浅海域用水中グライダーの動作試験と運用に関する研 究	長崎大学 森井 康宏	中村 昌彦 11名	82
2020AO- 18	海洋モデルを用いた、河川流量の変化が富山湾の海洋 構造に及ぼす影響のシミュレーション	富山県農林水産総合技術 センター 小塚 晃	広瀬 直毅 3名	84
2020AO- 19	九州北部地方におけるエアロゾルの光学的特性の長期変動	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 3名	86
2020A0- 20	洋上や海中を航走するビークルの運動や搭載機器に関 する研究	海洋研究開発機構 百留 忠洋	中村 昌彦 3名	88
2020AO- 21	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	89
2020AO- 22	衛星データを用いたダストエアロゾル量と雲相の関係 の地理分布	長崎大学 河本 和明	岡本 創 1名	91
2020AO- 23	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 2名	93
2020AO- 24	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	95
2020AO- 25	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 4名	97
2020AO- 26	非線形表面波・内部波の地形上における伝播並びに相 互干渉の数値解析	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一2名	99
2020AO- 27	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	101
2020A0- 28	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	103
2020A0- 29	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 Ristivanto Adiputra	中村 昌彦 4名	105

	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								
2020FP- 1	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	107				
2020FP- 2	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	109				
2020FP- 3	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	渡邊 英雄 1名	111				
2020FP- 4	セラミックス材料の照射欠陥形成およびその安定性	九州大学 安田 和弘	渡邉 英雄 7名	113				
2020FP- 5	降着円盤と乱流輸送	国立天文台 町田 真美	小菅 佑輔 1名	115				
2020FP- 6	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 堀 史説	大澤 一人 4名	117				
2020FP- 7	高温プラズマ曝露プラズマ対向壁表面の変質と損傷に 関する総合的研究	九州大学 吉田 直亮	渡邉 英雄 9名	119				
2020FP- 8	タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響 響	京都大学 徐 虬	徳永 和俊2名	121				
2020FP- 9	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 5名	123				
2020FP- 10	高エネルギーイオン照射された酸化物絶縁被覆の微細 構造における熱処理による回復挙動	核融合科学研究所 菱沼 良光	渡邉 英雄 4名	125				
2020FP- 11	トカマクプラズマにおけるジャイロ運動論解析による 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	127				
2020FP- 12	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	129				
2020FP- 13	フッ化物溶融塩中での金属腐食制御に関する研究	九州大学 片山 一成	渡邉 英雄 4名	131				
2020FP- 14	確率項を含むプラズマ乱流モデルの解析	富山大学 成行 泰裕	佐々木 真 2名	133				
2020FP- 15	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	135				
2020FP- 16	直線プラズマ装置PANTAにおける音速分子ビーム入射 装置を用いた密度プロファイル制御	核融合科学研究所 小林 達哉	佐々木 真 2名	137				
2020FP- 17	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	渡邊 英雄 3名	139				
2020FP- 18	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	141				
2020FP- 19	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4名	143				
2020FP- 20	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 3名	145				
2020FP- 21	プラズマ乱流における非線形伝搬と、局地集中豪雨の 統計解析への応用の研究	中部大学 杉田 暁	佐々木 真 2名	147				
2020FP- 22	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	151				
2020FP- 23	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1名	153				
2020FP- 24	超臨界流体プラズマを用いた非平衡ナノ材料の合成方 法の創製	東北大学 成 基明	文	155				
2020FP- 25	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	佐々木 真 3名	157				
2020FP- 26	直線装置PANTAにおけるITG乱流輸送シミュレーション 研究	量子科学技術研究開発機構 矢木 雅敏	糟谷 直宏4名	160				
2020FP- 27	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	162				

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				^			
	自然術	然エネルギー利用を加速させるエレクトロニクス技	統括責任者 齋藤 渉				
2020 S 4- 1		次世代パワーエレクトロニクス信頼性向上技術	東京都立大学 和田 圭二	齋藤 渉 1名	164		
2020 S 4- 2	サブ	デジタルゲートドライブ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に関す る研究	横浜国立大学 小原 秀嶺	齋藤 渉 1名	174		
2020 S 4- 3	テー	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	176		
2020 S 4- 4	7	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	178		
2020 S 4- 5		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	182		
一般研究				^			
2020ME- 1	高品	品質多元系熱電材料の単結晶成長と特性評価	宮崎大学 永岡 章	柿本 浩一 4名	184		
2020ME- 2	形物	大可変円弧翼の形状制御による垂直軸風車の出力評	弘前大学 久保田 健	内田 孝紀 4名	186		
2020ME- 3	大学	気乱流による気圧変動の直接測定のための多孔ピ ー型プローブの性能評価	海上保安大学校 近藤 文義	内田 孝紀 1名	189		
2020ME- 4	強 グ	非線形境界要素法を用いた3次元浮体動揺解析プロ ラムの開発	秋田大学 平川 知明	胡 長洪 2名	191		
2020ME- 5	ウ/ 化>	ルトラワイドギャップ半導体ダイヤモンドおよび酸 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 8名	196		
2020ME- 6	風耳	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	198		
2020ME- 7	密周流に	度成層を考慮した長島海峡周辺海域で抽出可能な潮 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	203		
2020ME- 8	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	205		
2020ME- 9	CT- 解見	-FEMを用いた骨粗鬆症に起因する骨折メカニズムの 明	産業医科大学 塚本 学	東藤 貢 1名	207		
2020ME- 10	患すの引	者 CT データを用いた三次元有限要素法による歯科 E用アンカースクリューの植立角度ならびに矯正力 強さと応力分布の関係	九州大学 髙橋 一郎	東藤 貢 3名	209		
2020ME- 11	骨征	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	211		
2020ME- 12	CT カニ	画像を用いた有限要素法による大腿骨頚部骨折メ ニズムの解明	九州大学 中島 康晴	東藤 貢 1名	213		
2020ME- 13	大朋	退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	215		
2020ME- 14	変形	形性股関節症患者の大腿骨強度に関する研究	佐賀大学 馬渡 正明	東藤 貢 1名	217		
2020ME- 15	バ~ 再生	イオセラミックスとポリマーの複合化による骨組織 生用材料の開発	大阪大学付属病院 名井 陽	東藤 貢 1名	219		
2020ME- 16	波派研究	良中の浮体・船舶に関する革新的EFD技術に関する 究	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 4名	221		
2020ME- 17	浮	r 式潮流発電装置の係留システムに関する開発研究	長崎大学 経塚 雄策	胡 長洪 3名	232		
2020ME- 18	バ <i>イ</i> 空ブ	イオミティクス技術を用いたブレードの翼端形状の 力設計	沖縄工業高等専門学校 森澤 征一郎	吉田 茂雄 1名	234		
2020ME- 19	空口研究	中風力発電に用いる自立離着陸可能な可変カイトの 究 —可変カイトの操縦性向上—	熊本高等専門学校 業山 清輝	吉田 茂雄 2名	236		
2020ME- 20	機構の	戒式過回転抑制機構による低コストバタフライ風車 開発研究	鳥取大学 原 豊	吉田 茂雄 3名	239		
2020ME- 21	医病	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	241		
2020ME- 22	極何	氏レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎 究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 4名	243		

2020ME- 23	IR-FZ法による単結晶育成における集中加熱条件の最 適化	山梨大学 綿打 敏司	柿本 浩一 2名	245
2020ME- 24	スピナーマウント圧力センサーによる風車流入風計測	三重大学 鎌田 泰成	吉田 茂雄 4名	247
2020ME- 25	固定ハブ小形風車における可変ピッチローターの開 発・研究	福岡大学 江崎 丈巳	内田 孝紀 4名	249
2020ME- 26	海ワシ類による海岸での飛翔と風況の関係の解明	徳島大学 河口 洋一	内田 孝紀 4名	252
2020ME- 27	洋上風力発電の無線電力伝送に向けた基礎検討 一データ解析と検証試験—	京都大学 梅野 健	吉田 茂雄 2名	254
2020ME- 28	確率モデル予測制御による浮体式洋上風力発電システ ムの発電出力と浮体動揺の安定化	大阪府立大学 涌井 徹也	吉田 茂雄 3名	256

令和2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				
2020A0- S1	地球流体における波動と対流現象の力 学	東京大学 伊賀 啓太	山本 勝 14件・126名	遠隔会議	2021. 03. 04- 2021. 03. 05	258				
2020A0- S2	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 8件・35名	応用力学研究所	2020. 12. 15- 2020. 12. 16	262				
2020A0- S3	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	鵜野 伊津志	開催中止		265				
2020A0- 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 舩越 裕紀	千手 智晴 5件・32名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2020. 12. 25	268				
2020A0- S5	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・20名	遠隔会議	2021. 01. 26- 2021. 01. 27	278				
2020A0- S6	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 9件・21名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2020. 12. 16- 2020. 12. 17	282				
2020A0- S7	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・19名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2020. 12. 03- 2020. 12. 05	359				

	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			
2020FP- S1	第18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 30件・38名	遠隔会議	2020. 12. 17- 2020. 12. 18	363			
2020FP- S2	国際プラズマデータ解析ワークショッ プ	九州大学 稲垣 滋	藤澤 彰英	開催中止	_	370			

	新エネルギー力学分野						
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	
2020ME- S1	第13回 九大2D物質研究会	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 15件・15名	遠隔会議	2021. 02. 23	372	

令和2年度 若手キャリアアップ支援研究一覧(目次)

	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	QUEST配位におけるCHI磁束発展の解明と最適電極形状の評価	九州大学 黒田 賢剛	花田 和明 3名	376

ドローンと AI による海岸漂着ごみ定量化手法の高度化

加古真一郎・西部留奈(鹿児島大)・Se Songploy(チュラロンコン大[タイ王国])

1. はじめに

近年、漂着ごみ量の正確な現状把握を行うため、ドローンと人工知能(AI)を組み合わせた海岸漂着プラス チックごみの体積推定手法が Kako et al. (2020)によって提案された。この手法は、過去に提案された手法

(Nakashima et al., 2011 など) と比べ、迅速で客観的かつ高精度な海岸漂着ごみの定量化が可能であるが、 汎化性能向上のために解決しなければならない問題が 2 つ存在する。1 つ目は、航空測量によって得られる 位置情報補正の問題、2 つ目は AI に基づいた画像解析の汎化性能の問題である。本研究の目的は、これらの 問題に対して新しい方法を提案し、その有効性を検討することにある。1 つ目の問題は、Differential Global Positioning System(DGPS) 方式による位置補正を導入し、その解決を試みる。衛星受信が可能であれば、場 所の如何を問わず実施可能なこの方法の有効性を、Kako et al. (2020)が用いた Real time kinematic(RTK) 方式による位置補正との比較を通して検討する。2 つ目の問題に対しては、近赤外などの多数のチャンネル を有するマルチスペクトルカメラ(Multi Spectral Camera; MSC)を導入することで解決を試みる。このカメ ラから得られた画像を用いて学習データを作成し、AI によるごみ抽出に対するその有効性の検討を行う。

2. 方法

2-1. DGPS 方式によるドローンの位置補正

本研究では、ドローンによる観測を鹿児島県内4箇所(吹上浜2箇所、 寺山公園、越路海岸)で実施し、位置補正に対するDGPS方式の有効性を 検討した。DGPS方式では、位置情報の取得をドローンと基準局において 同時に行う必要がある。この基準局は、2回の観測では観測場所に設置 したものを、その他の観測では近傍の電子基準点(金峰、笠沙)を用い た。DGPS方式は、基準局で得られた位置情報と、正確な位置情報の誤差 をその都度求め、ドローンの位置を補正する。本研究では、補正データ を250 ms 毎に取得し、観測で得られた Exif ファイルの時間情報と照ら



図1 受信機を搭載したドローン

し合わせ、同時刻の位置情報と入れ替えた。このような処理を行なった画像を用いて、Kako et al. (2020)と 同様の方法で3次元地形モデルを構築した。

2-2. MSC を用いた海岸観測

本研究ではMSCを用いた観測を、鹿児島県南さつま市の越路海岸と、長崎県五島市の大串海岸で実施した。 MSCは、赤、青、緑、赤エッジ、近赤外、RGBの6つのチャンネルを有し、それぞれを組み合わせることで、 対象物検知に適切な画像を作成することができる。海岸漂着ごみ抽出のために用いた画像解析手法は、Kako et al. (2020)と同様のAIに基づいた方法であり、この画像解析の学習データとして、RGB画像だけでなく、 MSCから得られた画像も用いた。

3. 結果

3-1. DGPS 方式によるドローンの位置補正

DGPS 方式と RTK 方式、それぞれを用いて、ドローンの位置 補正を行った結果を表 1 に示す。ここでは、3 次元地形モデ ルの標定点間の距離を求め、トータルステーション(TS)に

よる現地測量(距離約 50m)との比較を行なった。表1から、DGPS は、RTK よりも精度は劣るものの、大きく

表1 現地測量との比較

		RTK	DGPS	補正なし
ᇡᆈ	A誤差(cm)	-0.125	41.624	93.009
吹上	B誤差(cm)	0.126	44.493	93.249
±.1.	A誤差(cm)	0.781	1.707	119.676
寸山	B誤差(cm)	-0.917	0.323	111.472

位置精度を向上させることが可能であることがわかる。しかしながら、吹上浜での補正後の精度は、寺山公園のそれと比べると大きく(約40 cm)、ペットボトルなどの海岸漂着ごみを定量化する上では、この誤差は許容できない。また、近傍の電子基準点を基準局とした場合は、補正をすることができなかった。これは、電子基準点とドローン間の距離が長くなること、電子基準局の受信頻度が粗い(30s)ことに起因する。

3-2. MSC を用いた漂着ごみの検出・定量化

図2に、越路海岸、大串海岸におけるドローン観 測から得られた海岸画像の一部を示す。前者では、漂 着ごみよりも流木が多く存在し、後者では多量の漂 着ごみが存在していることがわかる。図3は、図2と 同様箇所を、MSCで撮影した画像である。越路海岸は 赤と近赤外の組み合わせ、大串海岸は近赤外から得 られたものである。この二つの画像から学習データ を作成し、それぞれの海岸で対象物の検知を行うこ とで、MSCの有効性を検討した。

その結果を図4に示す。越路海岸においては、RGB 画像のみを学習データとした場合、流木の抽出はできなかったが、MSC を学習データに用いたところ、その検出が可能となった(図4a)。一方、大串海岸における漂着ごみの検出においては、MSC の導入は、誤検出を増大する結果となった(崖の誤検知が増大;図4b,c

(a) 越路海岸
 (b) 大串海岸
 (b) 大串海岸
 (c) 大串海岸

図 2 RGB 画像

図 3 MSC 画像



赤丸部分)。故に、越路海岸では MSC を、大串海岸では RGB カメラを学習データ として使用し、これをもとに漂着ごみの体積を推定した。主観解析による画像処 理とそれぞれの結果を比較したところ、越路海岸では 10%(主観解析:7.95 m³, AI:8.81 m³)、大串海岸では 1.8%(主観解析:17.69 m³, AI:18.00 m³)の誤差で 体積推定が可能であることが示された。



図4 抽出結果

4. 考察と今後の課題

本研究では、ドローンによる航空測量を行う際の DGPS 方式による位置補正の有効性と、AI に基づいた画像 解析を行う上での MSC の有効性を検討した。使用地域に縛られない DGPS 方式は、RTK ドローンとほぼ同精度 で航空測量が可能であることがわかった。但し、電子基準点でなく基準局を観測地に設置することが必要で あり、誤差情報の取得を誤れば大きな精度低下を招くこともわかった。解析を行う際には、受信する衛星、 信号の種類、仰角マスクなどの選択を行う必要があるが、この組み合わせによって、解析結果は大きく変わ る。また、これらは、場所や天気などの観測条件により適切に選択しなければならないが、吹上浜の観測に おいては、この最適な組み合わせを見つけることができなかった。今後さらに観測を行い、正確な誤差情報 を安定して得ることができる条件について検討し、常に最善の選択をできるようになれば、DGPS を用いるこ とで、RTK が導入されていない開発途上国での正確なドローン観測が実現できる。画像解析に関しては、MSC の有効性は海岸毎に異なり、漂着ごみの抽出よりも、崖や流木などといった自然物の検知に適していること がわかった。この MSC を用いれば、漂着ごみと自然物が混ざった海岸において、その二つを分離することが できる。また、MSC と RGB カメラから得られた画像を単純に組み合わせてトレーニングした AI モデルには、 誤差が多く含まれる結果となった。故に、今後は、この二つを適切に組み合わせ、AI モデルの精度を向上さ せる試みも必要である。

研究組織・加古真一郎・西部留奈(鹿児島大)・Se Songploy(チュラロンコン大[タイ王国]

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

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。

本研究では、タイにおけるマテリアルフロー研究の基礎資料となるタイ語の1次文献を翻訳し、 2020年の年始から現在までの廃プラに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。その上で、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 社に英訳を委託した。本研究で翻訳した文献は以下の通りである。

- 1. Plastics Intelligent Center, Circular Economy, Plastics Institute of Thailand, 2020
- 2. Thiraphat Muangsaen, Eco Design For Plastics, Plastics Institute of Thailand, 2020
- 3. Sataporn Saphanuchart, Role Plastics Industry, Plastics Institute of Thailand, 2020
- 4. Waste and Hazardous Substance Management Division, *A Three-Year Government Action Plan (2020-2022)*, Pollution Control Department, 2020
- 5. Pollution Control Department, *The Analysis on the Connection of Municipal Solid Waste Statement 2019*, in Thailand State of Pollution Report 2019, pp.98-121, 2020

また、1から3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ことで、リサイクル市場価格との分析を実施した。

結果および考察

コロナ禍で生活様式が一変し、フードデリバリーが急増したことでバンコクにおける廃プラ量は 62%も増加した。廃プラ量の変化によって、タイ国内のプラスチックリサイクル市況が悪化してい る。タイ全土に1,160店舗(フランチャイズを含む)を運営する最大の買取業者である Wongpanit 社では廃プラを44種類に分けて買い取っており、その買取価格はほぼ毎日更新されている。容器包 装の中で高価である透明な廃ペットボトルの買取価格では、直近の2年間の最高値2019年8月と9月 の10バーツ/kg から2020年8月末に最安値の3バーツ/kg になっている。また、ラストマイル配送 包装としてフードデリバリーで利用される発泡スチロールも2020年4月~8月末で最安値1.5バーツ



図1 タイの主要廃プラの国内取引価格(単位:バーツ/kg)

他方で、Plastics Institute of Thailand から提供されたデータを基に分析すると、タイの生産においても PET のバージン原料は原油先物 WTI 価格などの国際市況と連動している。世界的な景気悪化によって、PET のバージン原料と国内廃ペットボトルの価格レンジの乖離が起きていたことが判明した。

したがって、廃プラの供給が過剰となる中で、バージン原料価格が低下しリサイクル材の需要は 減っており需給は緩んでいることから、廃プラの種類によっては、リサイクル工場引取時には逆有 償化しつつあることを明らかになった。

このような状況に対して、廃プラ削減自体は国際的な潮流であり意義があるが急進な取り組みよ りも、タイでは分別排出による減量化に資する収集体制の構築や容器包装リサイクル法を制定する ことが優先順位の高い課題であり、それを科学的なエビデンスとして提供できるマテリアルフロー 分析の深化が必要となると考えられる。

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

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・タイ共同海洋調査および東京湾での 予備調査

荒川久幸(東京海洋大学)·

協力:磯辺篤彦(九州大学)

1. Introduction

After COVID-19, we (Japan side of SATREPS project) has a plan to observe microplastics with SEAFDEC members in the below three plans.

- 1. Distribution of microplastics (MP; 0.35-5mm) in the Gulf of Thailand.
- 2. Small microplastics (less than 0.35mm) in the Gulf of Thailand.
- 3. Distribution of large size plastic litters.

2. Plan

The detailed plan for sampling microplastics are as follows.

Plan 1. Distribution of microplastics (0.35-5mm) in the Gulf of Thailand.

Collecting materials; Neuston net (mesh opening; 0.35 mm, boat speed; 2kt, Towing period; 10 or 20 minute), WPO treatment and density separation (NaI), MPs detection; FTIR with ATR

Plan 2. Distribution of small microplastics (less than 0.35mm) in the gulf of Thailand.

Collecting materials; Neuston net (mesh opening; 0.05 mm, boat speed; 1kt, Towing period; 10 minute), WPO treatment and density separation (NaI), MPs detection; micro FTIR

Plan 3. Distribution of large size plastic litters.. Data collecting by visual observation., Visual observation is carried out once for 1 hour between observation stations.

3. Observation schedule

• Observation positions set in Figure 1.

These observation points were just placed to understand the overall feature of MP distribution in the gulf. To understand the distribution more precisely, we might need some additional stations. Therefore, the stations in Figure 1 can be a tentative plan, which may be changed appropriately.

• A neuston net with small mesh opening (50 μ m) is needed to collect the small MPs.



Figure 1

• It may be difficult for SEAFDEC to analyze the MPs sizes

after extracting from seawater sample bottles in their laboratories. If this is the case, it is OK for us to collect seawater samples only and keep the bottles until we have a training course for analyzing to SEAFDEC members.

4. MPs in the bottom sediments in Tokyo Bay

The amount of waste plastic spilt into the ocean between 1961 and 2017 is estimated at 21.4 million tons. It was considered about 47.4% of these plastics were degraded into plastic pieces (microplastics, as MPs) less than 5 mm in diameter (Lebreton et al., 2017). Previous studies indicated that about 7.44 Mtons MPs accumulated on the seabed as sediments (Matsuguma et al., 2017). MPs in sediments are incorporated into lower ecosystems and expected to have some negative effects (Galloway et al., 2017). The impact of MPs is still unknown.

Studies on MPs smaller than 350µm in sediment are limited. A few research to evaluate the horizontal and seasonal distribution of MPs in seabed sediments. The contamination of MPs in the sediments of Tokyo Bay is few reported. In order to know the dynamics of MPs in estuary of big city,

it is necessary to clarify the horizontal distribution and seasonal changes of MPs' concentration smaller than 350µm in seabed sediments.

Sampling were conducted in May 2019 using Seiyo-Maru, and in Jan 2020 using Hiyodori. Observation points were arranged at inner bay of Tokyo Bay(three points: Stn02,Stn03,Stn04). About 5cm thickness of seabed sediment samples at each station were taken by Ekman-Birge sampler.

MPs in the sediment were comprised of various polymers, including PE, PP, PA, PS, co-polymer and other synthetic. The average concentration of MPs are 29.1 ± 4.2 , 22.4 ± 9.4 , 9.9 ± 4.9 pieces/g-dry respectively. It shows that the horizontal distribution of MPs is Stn02>Stn03>Stn04. There were significant difference between Stn02 and Stn04 (p<0.05).

	PE	PP	PA	PS	co-polymer	other synthetic	Total	Concentration (pieces/g-dry)
Stn02	5	2	0	0	2	4	13	25.2
Stn02_02	3	5	0	1	0	5	14	27.1
Stn02_03	1	8	0	1	3	5	18	34.9
Average±S.D.								29.1±4.2
Stn03	1	2	0	0	0	2	5	9.1
Stn03_02	4	7	3	0	0	2	16	29.1
Stn03_03	1	5	2	0	4	4	16	29.1
Average±S.D.								22.4±9.4
Stn04	8	1	8	0	1	4	22	16.7
Stn04_02	0	2	2	0	1	3	8	6.1
Stn04_03	1	4	2	0	1	1	9	6.8
Average±S.D.								9.9 ± 4.9

Table 1. the number of MPs in Stn02,Stn03,Stn04

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 中田晴彦(熊本大)・磯辺篤彦(九州大)・Voranop Viyakarn, Suchana Chavanich, Sujaree BUREEKUL(チュラロンコン大)

This year we conducted the investigation of deep sea debris and additives in plastic debris littered on a Samae San area of Thailand.

1. Deep sea debris

Plastic waste has become a growing concern in terms of marine pollution, but little information is available on plastic debris and its possible risks of chemical additives exposure in the deep-sea. This study focused on identification of polymer type and additive concentrations in 21 plastic debris collected from deep-sea of Sagami Bay, Japan and West Pacific Ocean under the Kuroshio Extension and its recirculation gyre (KERG) zone (water depth: 1388–5819 m). Polyethylene (PE) was dominant polymer (57% of the total) in samples, followed by polyvinylchloride (PVC), epoxy resin, polyester (PES), and polypropylene. In plastic additives, bis (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)was detected to be contained in a PVC sheet at concentration of 48%. Butylated hydroxytoluene (BHT) was also detected in PE plastic debris with median concentration of 12,000 ng/g. PES clothes were detected to contain dyeing mixtures, 1,2,4-trichlorobenzene (1,2,4-TCB), up to 42,000 ng/g. Knowing the estimated number of plastic debris under KE current, the minimum burden of chemical additives were estimated that 720 kg of dibutyl phthalate, 570 kg of BHT, 230 kg of DEHP, and 160 kg of 1,2,4-TCB exist on the seabed of KERG zone. This result strongly suggests that enormous amount of hazardous additives lie within plastic debris on abyssal level of the ocean.

2. Sampling beach litter on Samae San area

Plastic debris (Photos) sampled on a beach in the Samae San area was sent to Kumamoto University. The additives in these samples are now extracted to quantify their toxicity. The potential additives are shown in Table 1 as detected in Nurlatifah et al. (2021, Sci. Total Environ, 768, 144537).

7

Table 1 Concentrations of plastic additives (ng/g dry wt.) in plastic debris collected from western North Pacific and Sagami Bay, Japan.

Sampling ID	Sampling	Moisture	Polymer type	Plasticizers							Antioxidant	I	Dye mixtures			Flame retardants	
	location	(%)		DMP	DEP	DAP	DiBP	DBP	BBP	DEHP	DOA	BHT	1,3,5-TCB	1,2,4-TCB	1,2,3-TCB	TPhP	EHDP
Plastic bag																	
1553_D1	West Pacific Ocean	0	PE	28	52	<86	34	<150	<120	2500	<16	11,000	<7.0	<16	<16	530	<130
1553_D4	West Pacific Ocean	0	PE	150	46	<86	30	<150	<120	3800	<16	16,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1554_D4	West Pacific Ocean	0	PE	12	21	<86	20	<150	<120	13,000	2200	33,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1554_D7	West Pacific Ocean	0	PE	40	45	<86	51	<150	<120	3500	63	25,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1555_D1	West Pacific Ocean	0	PE	7.0	<6.0	<86	<3.0	<150	<120	4700	<16	17,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1555_D6	West Pacific Ocean	0	PVC	6.0	<6.0	26,000	<3.0	1700	740	2500	2800	3100	<7.0	<16	<16	<200	180
Plastic package	•																
1554_D6	West Pacific Ocean	0	PE	15	24	87	21	<150	<120	3000	550	25,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1555_D2	West Pacific Ocean	0	PE	26	<6.0	<86	<3.0	<150	<120	<90	<16	22,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1555_D5	West Pacific Ocean	0	PE	19	<6.0	160	<3.0	250	<120	<90	<16	1800	<7.0	<16	<16	<200	<130
1558_D2	Sagami Bay	0	PE	8.0	31	<86	16	170	<120	340	<16	12,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1555_D4_IN ^a	West Pacific Ocean	0	PE	39	37	<86	92	480	<120	3100	130	11	<7.0	<16	<16	<200	<130
1555_D4_OUT*	West Pacific Ocean	0	Nylon	850	470	230	450	3000	<120	2700	<16	23	<7.0	<16	<16	<200	<130
1558_D3_IN ^a	Sagami Bay	0	PP	48	63	<86	170	1300	<120	2100	2600	6400	<7.0	<16	<16	<200	<130
1558_D3_OUT*	Sagami Bay	0	PET	72	100	<86	<3.0	<150	<120	720	54	940	<7.0	<16	<16	<200	<130
Plastic sheet																	
1554_D5	West Pacific Ocean	0	PE	14	28	<86	29	<150	<120	3500	74	11,000	<7.0	<16	<16	<200	<130
1555_D3	West Pacific Ocean	0	PVC	8.0	38	300	15	3900	310	480,000,000	69	4700	<7.0	<16	<16	<200	<130
Clothes																	
1554_D2-1	West Pacific Ocean	21	Nylon	230	2500	<86	360	600	<120	3300	<16	1600	<7.0	<16	<16	<200	<130
1554_D2-2	West Pacific Ocean	39	PES	290	3100	<86	440	4200	<120	1700	63	630	<7.0	330	43	<200	<130
1553_D2	West Pacific Ocean	55	PES	260	3800	<86	660	36,000	410	2500	35	250	<7.0	42,000	9300	<200	<130
Rope																	
1553_D3	West Pacific Ocean	12	PE	170	3100	<86	470	560	<120	400	<16	130	<7.0	<16	<16	<200	<130
1558_D5	Sagami Bay	7	PP	130	2100	<86	520	870	<120	800	<16	230	<7.0	<16	<16	<200	<130
Can																	
1554_D1	West Pacific Ocean	0	Inside: Epoxy Resin	9.0	<6.0	<86	16	180	<120	280	<16	130	<7.0	<16	<16	<200	<130
			Outside: Poly(triethyleneglycol isophthalate)														
1558_D4	Sagami Bay	0	Inside: Epoxy Resin	9.0	<6.0	<86	<3.0	<150	<120	<90	<16	18	<7.0	<16	<16	<200	<130
			Outside: Poly(2,2-dimethyl-1,3-propanediol														

PE: Polyethylene, PVC: Polyvinyl chloride, PP: Polypropylene, PET: Polyethylene terephthalate, PES: Polyester. DMP: Dimethyl Phthalate: DEP: Diethyl phthalate: DAP: Diallyl phthalate: DBP: Disoburyl phthalate: BBP: Benzyl buryl phthalate: DEP: Bis(2-ethylhexyl) phthalate: BHT: Burylated hydroxytoluene; 1,3.5-TCB: 1,3.5-tricklorobenzene; 1,2.4-TCB: 1,2.4-triclorobenzene; 1,2.3-TCB: 1,2.3-tricklorobenzene; TPhP: Triphenyl phosphate; EHDP: 2-ethylhexyl diphenyl phosphate; DOA: Dioctyl adipate. * N: Inside, OUT: Outside.



ω





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 田中周平(京都大学)

協力者: ・磯辺篤彦(九州大学)・Voranop Viyakarn, (チュラロンコン大学)

Researchers in Thailand (Tables in the next page) had a small meeting on 16 Nov, 2020 to confirm possible collaboration with researchers on the Japan side. The agenda of the meeting is below.

1. Objectives:

- 1. To introduce the projects and project members
- 2. To inform and clarify on the project rules and protocols for Thai sites and Thai participants
- 3. To describe overall proposed research in the project
- 4. To discuss among researchers in each group on the details of research that will be conducted under this project

2. Accomplishments:

- 1. Thai researchers understand about the overall project activities and what benefits Thailand and Thai researchers will have under this project
- 2. Thai researchers learn about research details that Japanese site proposed
- 3. Thai researchers in each group proposed some additional activities that can help the project to be more completed and suited with the need of the Thailand government organizations

3. Schedule of the meeting:

- 0900–0930 Introduction of the project and project members
- 0930–1100 Project rules and protocols for Thai site and Thai participants
- 1100–1200 Overall proposed research in the project
- 12.00–1300 Lunch
- 13.00–1600 Discussion on the details of each research area that will be conducted under this project



2020 S1-1

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 シミュレーション学研究科 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、研究課題代表者によって開発された方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

本研究では、中村によって開発されたデータの隠れた情報を統計的に分析する small-shuffle surrogate (SSS) 法 [1] 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する。これにより、プラズマ現象の未知の部分 をあぶり出し、得られる結果の物理的意味を理解しながら、プラズマ現象のより深い理解につなげていくものである。 この SSS 法は、データに中・長期的なトレンドがあったとしても、そのデータに含まれる短期的な不規則な変動に相 関構造が存在するかどうかについて分析を行うことができる。本年度も昨年度に引き続き end-plate biasing 実験で 観察されたプラズマ密度とプラズマ電位データを用いて、2 つの分析を行った。1 つは、プラズマ密度とプラズマ電 位の間に高周波な結合 (high frequency coupling) が存在するかどうかについて調査した。その結果、印加電圧が低 いときも高いときも、プラズマ密度とプラズマ電位の間には、高周波な結合が示唆された。もう1 つは、プラズマ密 度のミクロ乱流が存在する周波数範囲に関する調査を行った。現在、本検討に関する論文を査読付き論文へ投稿準備 中である。

本研究は単なる既存手法の適用ではなく、ミクロ乱流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

ミクロ乱流はプラズマ乱流スペクトルの高周波成分に主に対応すると考えられているが、ミクロ乱流の振る舞いは インコヒーレントであると考えられているため、プラズマ乱流のスペクトルからミクロ乱流の特徴を知ることは容易 ではない。SSS 法は、データの順番を局所的に入れ替えることで、元のデータが持つ相関構造とは異なる人工的な データ(サロゲートデータ)を生成する。データを入れ替える範囲は、大きくすることも小さくすることも可能であ る。SSS 法はデータの周波数の特徴を直接操作する方法ではないが、データを入れ替える範囲を大きくすれば、より 広い高周波成分が変わることになり、データを入れ替える範囲を小さくすれば、より狭い高周波成分が変わることに なる。このようにデータを入れ替える範囲を調整することで、調査する周波数範囲を変えることが出来る。このよう な詳細なミクロ乱流の分析を行うことで、ミクロ乱流の理解が深まると共に、新しい知見を得ることが出来ると考 える。

4 研究成果発表

- 中村 知道, "プラズマ密度のミクロ乱流に関する分析", MHD 理論関連の研究会(プラズマの複雑現象を対象 としたデータマイニングの活用)、2020 年 11 月 4 日 (水)、5 日 (木)、核融合科学研究所、Microsoft Teams オンライン会議(口頭発表)
- ・ 中村 知道、稲垣 滋 "プラズマ密度とプラズマ電位間のミクロ乱流の相関構造に関する検証",第37回 プラズマ・核融合学会 年会、2020年12月1日(火)~4日(金)、オンライン会議(口頭発表)
- 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)

5 研究組織

研究代表者 兵庫県立大学大学院 シミュレーション学研究科 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] Tomomichi Nakamura and Michael Small: "Testing for correlation structures in short-term variabilities with long-term trends of multivariate time series," Physical Review E, Vol. 74, 041114 (2006).

2020 S1-2

統計モデルと複雑ネットワークの手法を融合した プラズマ乱流時系列データの新しい解析手法の開発

サブテーマ代表者:高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 谷澤俊弘

1 研究目的

超高温のプラズマを安定して閉じ込めるためには、プラズマが生み出す膨大な時系列データを解析し、その物理的性質を 理解しなければならない。本研究は、磁場によって閉じ込められたプラズマ中のドリフト波乱流が生み出す大容量時系列 データを、統計モデル化し、さらにそれをネットワークとして視覚化することによって、膨大な多次元時系列データから物 理的情報を抽出し、直観的に理解する新しい手法を開発することを目的とする。解析対象は、九州大学応用力学研究所の直 線磁化プラズマ実験装置(PANTA)内の周方向 64 チャンネルプローブアレーによって計測されたプラズマ乱流が生成する 時系列データである。

2 現在までの研究結果のまとめ

2.1 縮約された自己回帰モデル (Reduced Auto-Regressive model, RAR model)

この手法では,縮約された自己回帰モデル (RAR model) を用いる。この統計モデルでは,時刻 t における時系列データ x(t) をその時刻以前のいくつかの時間遅れ項 $x(t-1), x(t-2), \ldots$ とランダムノイズ $\varepsilon(t)$ を用いて

$$x(t) = a_0 + a_1 x(t - l_1) + a_2 x(t - l_2) + \dots + a_w x(t - l_w) + \varepsilon(t)$$
(1)

と線形モデル化する。ここで,パラメータ a₀, a₁,..., a_w は実際に観測された時系列データと線形モデルによって生成され るデータ間の誤差の二乗平均を最小化し,さらにモデルの最適化基準として情報量基準を合わせて用いることにより,時間 遅れ項1から最大時間遅れまでのすべての時間遅れ項から最適な部分集合を選び出すものとして決められる。

2.2 1 チャンネルデータの統計モデリング

まず,注目するチャンネルの時間遅れ項のみを用いた RAR model を構築する [1]。例として,第5 チャンネルを RAR モ デルによりモデル化した結果を示す。時間遅れの単位は 10[µs] であり,最大時間遅れを 150 として,モデル化を行った結 果は

$$x(t) = 0.00344 + 2.58x(t-1) - 2.49x(t-2) + 0.913x(t-3) - 0.0513x(t-6) + 0.004x(t-33) - 0.005x(t-47) - 0.0067x(t-55) - 0.0035x(t-61) + 0.0055x(t-115) + \varepsilon(t)$$
(2)

となる。この RAR モデルには直近の時間遅れ (1~6)の他に,非自明な時間遅れ 33, 47, 55, 61, 115 が含まれることがわ かる。図 1 は、全 64 チャンネルの時系列データを RAR モデル化して得られた時間遅れ項の度数分布である。非自明な時 間遅れとして顕著なものは、31, 50, 110, 120 で、これらは実時間に直すとそれぞれ、310[µ], 500[µs], 1100[µs], 1200[µs] に 対応し、この時間周期を振動数に直すとそれぞれ、3.2[kHz], 2.00[kHz], 0.909[kHz], 0.833[kHz] となる。

2.3 多チャンネルデータの統計モデリング

この RAR モデリングは時間遅れ項を注目するチャンネル以外に広げることで多変数の時系列データにも適用可能である [2]。この多変数 RAR モデリングの方法を全 64 チャンネルのプラズマ乱流データに適用し解析を行った。まず 64 チャンネ ル中の一つのチャンネルに注目し、ターゲットチャンネルとする。そのターゲットチャンネルを中心とする両側 15 チャン ネルずつ、合計 31 チャンネルを探索範囲とし、最大ラグを 25 として多次元 RAR モデルを構築した。ここでも時間遅れの



図1 (a) 全64 チャンネルそれぞれ(横軸)の一変数 RAR モデルに表われる時間遅れ項(縦軸)のパラメータ値を色分 けしたもの。このプロットで横方向に並ぶ項がどのモデルにも現れる時間遅れ項となる。大まかに言って,31,50,110, 120 のあたりに全 64 チャンネルを横切る項の並びが見られる。(b) 第5 チャンネルの一変数 RAR モデルのグラフ。右 端中央に現時刻(t)の項を表わすノードを置き,真上方向(時間遅れ0)から反時計回り方向を取って真下方向(時間遅 れ150)として,各項のパラメータの絶対値が大きい場合には近く,小さい場合には遠く配置している。ノード内の数値 が時間遅れである。

単位は 10[µs] である。例として、第 20 チャンネルの RAR モデルは以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} x_{20}(t) &= 0.00364x_{10}(t-1) + 0.248x_{20}(t-1) - 0.2x_{20}(t-2) \\ &+ 1.16x_{21}(t-1) - 0.556x_{21}(t-2) + 0.176x_{21}(t-4) - 0.0318x_{21}(t-6) \\ &+ 0.879x_{22}(t-1) - 0.454x_{22}(t-2) - 0.122x_{22}(t-3) \\ &+ 0.23x_{23}(t-1) - 0.36x_{23}(t-2) - 0.182x_{23}(t-3) + 0.288x_{23}(t-4) \\ &- 0.0968x_{24}(t-2) + 0.085x_{25}(t-5) - 0.0514x_{25}(t-7) + 0.00584x_{32}(t-1) \end{aligned}$$
(3)

ここで,各項の添字はチャンネル番号である。この結果を見ると,ターゲットチャンネルのデータは,大まかに言って,そ のターゲットよりも番号が大きいチャンネルのデータによって予測されており,図2に示されるように,番号の大きいチャ ンネルから小さいチャンネルに向かって,反時計回りにその影響が伝播することがわかる。



図 2 多変数 RAR モデルによる解析結果を図示したもの。代表例として,第1 チャンネル,第20 チャンネル,第40 チャンネル,第60 チャンネルの例を挙げる。時計回りがチャンネル番号の増加方向であり,一番外側が現時刻,内側に 向かって一つずつ時間遅れが増す。赤がターゲットノードで,青および茶色のノードはモデル中の時間遅れ項を表わす。 赤に対して時計回り方向のノードが多いことから,ターゲットノードに対して,反時計回り方向の影響がわかる。

参考文献

- Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: "Networks with time structure from time series," Physica A, Vol. 391, 4704-4710 (2012).
- [2] Toshihiro Tanizawa, Tomomichi Nakamura, Fumihiko Taya and Michael Small, "Constructing directed networks from multivariate time series using linear modelling technique," Physica A, Vol. 512, 437-455 (2018).

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 九州大学総理工学研究院 寺坂健一郎

背景と目的

本研究の目的は九州大学・応用力学研究所の直線装置 PANTA におけるプラズ マ中のイオン速度や中性粒子速度を計測し,流れ場の構造形成における役割を 検討することである.近年,プラズマの最終的な流れ場の分布を決めるために は、中性粒子流れとの相互作用を含めた解析が重要であることが指摘されてい る.乱流プラズマにおける流れ場構造形成において重要な役割を果たす,イオ ン流速と中性粒子流れをレーザー誘起蛍光法 (LIF)を用いて計測することを目 指し、LIF 計測に実績のある HYPER-II 装置 (九大) との装置間比較実験を通 して、PANTA における中性粒子計測に関する初期実験を行った.

結果

本年度は, 昨年度まで に構築したレーザー誘起計 測システムを用いて実際に 直線装置 PANTA における 中性粒子計測を行った. 波長可変半導体レーザーを 667.91 nm に調整すること で準安定アルゴン原子 (Ar I)を励起し, 脱励起の際に 放出される 750.59 nm へ蛍 光を観測する 3 準位系で LIF 計測を行った. しかし, 自発的な発光は観測された



図 1. 中性粒子計測用 LIF 計測システム.

ものの, 有意な LIF 信号を検出することはできなかった. この原因は, PANTA のプラズマでは 667.91 nm の遷移を起こす 4s²[3/2]⁹ 状態の数密度が 低すぎることに起因すると考えられる.

そこで, PANTA における中性粒子計測を可能にするために, より自発光の 強い準位 (励起: 772.63 nm, 蛍光: 826.68 nm) を用いた LIF 計測システムの再 構築を行った(図 1). 新しいスキー ムを用いた計測の原理実証実験は, PANTA 装置と同程度のプラズマパ ラメータを再現できるHYPER-II 装 置を用いて行った.

図2に772.63 nm をもつスキーム で計測された LIF スペクトルを示 す. PANTA におけるパルス運転を 考慮し, 条件付き平均化法を用い たスペクトルの再構成法を採用す ることで, 放電開始から定常状態



図 2. 772.63 nm を用いて計測した LIF スペクトル (1 mTorr, Ar).

に至る LIF スペクトルの時間発展を得ることに成功した.本計測では、図1に 示すように和吸収スペクトルを参照スペクトルとして同時計測することで、10 m/s 程度の流れまでを高精度に検出可能である.また、1 mTorr から 10 mTorr までの広いガス圧力において計測が可能であることも確認できている.本年度 HYPER-II 装置で開発した LIF システムを PANTA 装置へ組み込むことで、乱流 プラズマ中の中性粒子計測が可能になると期待される.

新しいスキームを用いた LIF 計測の原理実証実験の結果については,主に国 内の学会において,その成果を報告した[1-3].また,本システムの開発に関する 研究の一部は,九州大学・総合理工学府の修士論文としてまとめられており,研 究および大学教育の面において,本共同研究は非常に有意義なものであった.

成果報告

- [1] 第 37 回プラズマ・核融合学会 年会, 松尾拓実, "中性粒子の動的振る舞いがもたら す部分電離プラズマの構造形成への影響" (ポスター).
- [2] 日本物理学会 第75回年次大会, 寺坂健一郎, "非定常現象に対する中性粒子効果検 証のための時間分解 LIF 計測"(口頭).
- [3] V. Pigeon, N. Claire, C. Arnas, K. Terasaka, and S. Inagaki, "Plasma sheath material induced dependence due to secondary electron emission", Phys. Plasmas 27, 043505 (2020).

研究組織

代表者:寺坂健一郎 (九大総理工) 所内世話人:小菅佑輔 研究協力者:稲垣滋(九大応力研)荒川弘之(島根大学) 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

背景・目的

多様なナノ構造形成や半導体デバイスの3次元集積化に伴い、プラズマプロセスの理解 に基づいた超高精度ナノプロセスの創成が求められている[1].特に、プラズマプロセス揺 らぎの原因解明と制御が重要である.プロセス揺らぎはプラズマの時空間的な揺らぎや、 プラズマと材料との相互作用に起因すると考えられているが、その機構の詳細は明確では ない[2,3].プラズマ揺らぎの新規評価法として、プラズマ中に導入した微粒子の挙動を

解析する方法が報告されている[4-6]. 筆者 らはこれまでに, IR レーザーを用いた光ピ ンセット法[7,8]によりプラズマ中微粒子を 捕捉・移動に成功した.本稿では,微粒子 挙動解析によるプラズマ中の電場強度とそ の揺らぎ計測の可能性を検討するため計測 した電場の値を校正する目的で,水中での 光捕捉微実験を行った結果を報告する.

校正実験

実験装置の概要を図 1 に示す. 容器下部 のサファイアガラスの上に設置したワッシ ャーに直径 5, 10, 20 及び 30um のアクリ ル微粒子(綜研化学株式会社製)を含む蒸留 水を滴下し、蒸発を防ぐために、カバーガラス をのせた.この反応容器を落射型光学顕微鏡内 に設置した. 蒸留水中でアクリル微粒子は, 浮 力より大きい重力を受けることで容器底面に沈 む. この微粒子に容器底面から IR レーザー (λ:1064nm)を入射して光捕捉することで微粒子 はレーザーから鉛直向きの力を受け浮游する. 微粒子は図 2 に示されるようにレーザーの焦点 からの変位により受ける力が変化するため、レー ザーの出力を調節し, 微粒子の浮遊位置がレー ザーの焦点と一致する位置, つまり, 顕微鏡の ピントに合うときのレーザーの制御値を記録し た. レーザー制御値に対して出力されるレーザ



図 2 光線光学モデルによる光(z)軸方向 に作用する力 F_{ray_z}.

ーパワーを計測した結果を図 3 に示す. サファイアガラスを通したレーザー光の パワーを計測することで,微粒子に入射 するレーザーパワーを測定した.

結果と考察

校正実験結果を図 4 に示す. 図 4 は 水中での光捕捉実験において, 光線光学 モデル[9]による計算により予測される レーザーパワーと実際に実験で微粒子が 浮遊した時のレーザーの制御値から求め られたレーザーパワーの比である. この 結果は, 微粒子のサイズが小さくなるほ ど, 理論値よりも大きなレーザーパワー が必要であることを示している. レーザー のスポットサイズよりも微粒子が小さい 場合には, すべてのレーザー光が微粒子 に入射しないためであると考えられる.

まとめ

本研究で評価した微粒子の浮遊に必要 なレーザーパワーの予測値と実験値の比 から、プラズマ中電場計測に光捕捉微粒 子を用いる際には 30µm 以上の微粒子を 用いる、もしくは、微粒子に入射するレ ーザーパワーの補正を行うことが必要と なることを明らかにした.



図4 浮遊に必要なレーザーパワーの予測値と 実験地の比の微粒子半径依存性.

参考文献

- [1] M. Shiratani, et al., J. Phys. D 44 (2011)174038.
- [2] M. Shiratani, J. Plasma Fusion Res. 90 (2014) 378.
- [3] K. Ono, et al., Thin Solid Films 518 (2010) 3461.
- [4] U. Konopka, et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 891.
- [5] J. Schablinski, et al., Phys. Plasma 22 (2015) 043703.
- [6] V. Schneider, H. Kersten, ISSN 1562-6016. BAHT. (2013) 83.
- [7] A. Ashkin, Biophys. J. 61 (1992) 569.
- [8] F. Wieben, et al., Phys. Plasmas 26 (2019) 033701.
- [9] W. H. Wright, et al., IEEE J. Quantum Electron. 26 (1990) 2148.

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。医療分野で急速に開発が進んでいる、少ない点から効率的に対象を測定可能な『圧 縮センシング MRI』や『圧縮センシング CT』の手法を適用することで新たな乱流観測手 法の開発が期待できる。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次元流れ観 測が可能であることがシミュレーションにより確認された。また、レーザー誘起蛍光法 による平均流れベクトル測定を行った。

今年度は(i)乱流に同期した局所流れベクトル測定の試みと、(ii)シグナルノイズ比 (S/N)改善のためのプラズマ励起準位変更の検討を行った。

方法と検討結果

(i) 乱流に同期した局所流れベクトル測定実験

周方向に設置したラングミュアプローブと半径方向に駆動するラングミュアプロ ーブを用いて開発されたプラズマ二次元揺動再構成手法(H. Arakawa Sci. Rep. 2016)を 応用した。半径方向に駆動するラングミュアプローブをレーザーに変更し、レーザー誘 起蛍光を測定した。レーザーは、直径約10 cmの円柱プラズマを磁場に垂直に貫くよう に設置した。レーザー波長は、アルゴンイオンの3d⁴F_{7/2}準位から4p⁴D_{5/2}準位への励起 の際の吸収波長である、668.6138 nmから±4 GH z とし、プラズマ放電中に数+Hzで スキャンする。通常のレーザー誘起蛍光法では、プラズマ中の局所的な蛍光を測定する が、本研究ではレーザーのプラズマを貫く線に沿った蛍光をまとめて集光する(線積分) ことにより、信号強度の増加を目指した。442.6 nmの蛍光を直径150cmのレンズ2枚 及び直径75mmのレンズにより、1/2以下に縮小後、光ファイバーにより集光・伝送後、 光電子増倍管により電流増幅・電圧変換した。その後、ロックインアンプにより予め強 度変調したレーザーの200 kHzと同期した散乱光強度を検出した。レーザーは自動ステ ージによりプラズマの半径方向に移動可能な形とした。一方向のみのレーザー照射を行い、ラングミュアプローブによる計測データと同時計測により、レーザー波長毎・半径 方向の線積分データを得た。

得られたデータは、S/Nが十分ではなく、乱流揺動の局所計測には不適であることが 分かった。問題点として、以下が考えられる。(1)散乱光強度が弱く集光効率向上を更 に図る必要がある。(2)放電中にレーザー波長をスキャンしているが、レーザーの仕様 で波長スキャンの応答が遅く、ラングミュアプローブと蛍光強度の測定値の同期が想定 よりも悪い、ことが考えられる。

このため、今年度は集光効率の向上の一貫で、以下に示すプラズマ誘起蛍光の励起準位変更実験を行った。

(ii) S/N 改善のための励起準位変更検討

レーザー波長は、これまでアルゴンイオンの3d⁴F_{7/2}準位から4p⁴D_{5/2} 準位への励起の 際の吸収波長である、668.6138 nmから±4 GH z としていた。アルゴンイオンはこの 波長以外にも多くの吸収波長があり、レーザー波長変更により蛍光強度を大きくするこ とでS/N改善の見込みがある。この調査の為、波長計によりプラズマからの蛍光強度を 測定した。結果、レーザーの3d⁴F_{9/2}準位から4p⁴D_{7/2} 準位への励起の際の吸収波長であ る、664.55 nmの蛍光強度が、これまでの準位の蛍光強度よりも倍以上大きいことが分 かった。一方で、半径位置が3cm以上ではこれまでと同様、十分なS/Nが得られないこ とが分かった。

今後は、以下の点を行うことにより、ハードウェア及びソフトウェア両面から乱流揺 動の局所計測を目指す。(1)集光効率の向上:真空中のレンズを入れること等によりさ らに集光効率を上げる。(2)データ収集取り込みシステムの改良:放電中のレーザー波 長は一定として、レーザー波長スキャンは、放電を多数の繰り返し測定することで行う。 (3)再構成手法の改良:圧縮センシングを用いた再構成手法の適用・改良を行う。

成果報告:なし

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 1: 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。更には他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1のサブテーマリーダー及び流体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

本研究会の趣旨としては一堂に会した on-site 研究集会がふさわしいと考えてコロナ禍の中、実施可能なタイミングを模索したが断念した。その代わりに個別テーマに関して他のサブテーマリ ーダーや学生が参加できる Zoom セミナーを開催した。

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。

Zoom セミナーのまとめ 2021.03.04 荒川宏之(島根大) "ドローンによる風速推定"(予定)

2021.02.10 柴田欣秀(岐阜高専)

"感染症の時空間変化と捕食者—非捕食者モデリング"

感染症の拡大に関して、プラズマ乱流の研究で使われている捕食者—非捕食者モデリングと同様のモデルが使われている。発表者の持つ感染症の件別の患者数推移のデータにこれら数理 モデルの適用を議論した。

2020.12.11 徳田 悟 (九大汎オミックスセンター)

¹ベイズ推定による不確実性定量化とモデル選択:プラズマ科学への展開に向けて¹

ベイズ推定の基礎の入門からからプラズマ計測への適用までの応用についてまとめたセミナー であった。

2020.12.07 前山伸也(名古屋大学)

"三つ組み相互作用の対称化"

プラズマ乱流における3波結合は通常バイスペクトル解析を行うが、前山氏は新たな可視化方法 を考案し、PANTA実験データに適用した。

2020.10.23 大貫陽平(九大応力研)

″変形領域における二次元乱流の統計力学″

プラズマ乱流と非常に類似性のある中性流体の二次元乱流について、その統計力学的性質を 理論解析から導き議論した。

2020.10.16 山崎広太郎(九大応力研)

"高パワー放電時に見られる m=1 揺動のねじれに関して"

PANTA の新たな実験領域で観測されたコヒーレントな構造についてトモグラフィー解析した結果 について報告があった。

2020.09.09 荒川宏之(島根大)

"孤立渦により励起された波束の時空間構造抽出とエネルギー移送の評価"

スプラッシュと呼ばれる新たな乱流構造の同定と渦的、波動的乱流成分からスプラッシュへのエ ネルギー移送を評価した。 2020.08.07 小菅佑輔(九大応力研)

"Minimum enstrophy flows in drift wave turbulence with neutral particles"

中性ガスを考慮した場合、ドリフト波乱流にはエンストロフィ最小の構造が現れる。その中で最も 低次なモード構造について議論した。

2020.07.31 川内裕一(九大応力研)

"PANTA における乱流中の非線形エネルギー移送の解析"

ケルビンヘルムホルツ型の揺動がドリフト波とゾーナル流と競合・共存する事が観測され、それら 構造間のエネルギー移送を解析した。

2020.07.17 佐々木真(九大応力研)

"Evaluation of abrupt energy transfer among turbulent plasma structures using singular value decomposition"

乱流の粗視化に関して、SVD(Singular Value Decomposition)を用いた自由度低減法を開発した。 数値直線装置シミュレーション結果に適用した例について議論した。

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

九州大学の直線プラズマ装置 PANTA を用いて、プラズマ乱流中に発生するメゾスケール構造の 一種であるストリーマー構造を観測し、その媒介波と搬送波の非線形結合を解析した。従来までの 各モード数がマッチング条件を満たす組み合わせを抽出してからのバイスペクトル解析と異なり、 ある時刻でのタイムスライスを抜き出し、周方向空間でのバイスペクトル解析を行った。結果、周 方向モード数内での非線形結合の詳細が明らかになり、周方向モード数の組み合わせによってはス トリーマー構造の形成に寄与しないような成分があることが判明した。また直線プラズマ中の磁場 を徐々に強くしていくことで、コヒーレントなモードから乱流状態への遷移を観測した。

1. 目的

ストリーマーは近年注目を集めている構造であるゾーナルフローと同様に、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することで発生するメゾスケール構造である。その存在は 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である。

九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA で用いられる直線プラズマはトロイダル プラズマに比べて低温で近接性に優れるため、乱流やメゾスケール構造の基礎的解析を行う点において 有利である。PANTA ではその利点を活かしてストリーマーの構造解析が行われており、ストリーマー 構造を形成するドリフト波乱流中の搬送波とストリーマーの媒介波の間の非線形結合を中心に解析が 進められている。

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次元計測を行った後、揺動を周方向のフー 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。そこで本研究では発想を変え、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った。一例として、 媒介波とストリーマー構造の包絡線の位相差をバイフェーズ解析により求めた。

また直線プラズマ中の磁場を変化させることでプラズマ内に発生するモードがコヒーレントなモードから乱流状態へと遷移していく様子を観測した。状態変化の遷移を詳細に観測することで、ストリーマーなどの非線形結合によって発生する構造のメカニズムの解明の手掛かりとなる。

2. 実験方法

直線プラズマ実験装置 PANTA を用いてストリーマー実験を行い、多数のチャンネルを持つ静電プロ 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/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。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 10¹⁹ 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、あるモードの高調波成分が乗った周期的な孤立波モードなどとなる。

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。

このプローブにより揺動を時間方向と周方向に詳細に観測し、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、媒介波を参 照波として、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 の時、バイフェーズが搬送波の包絡線(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 周方向での非線形結合を確認するため、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。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。

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 = 1, *f*₁ = -1.2 kHz で、最 も振幅の大きく媒介波との結合が強い 搬送波は、*m*₂=2,*f*₂=7.8 kHzの波と*m*₃= 3, f3=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 を計算した結果、(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 る値となったが、他の(1,1,2)以外の 結合はバイフェーズ値がほぼ変わらな かった。

この結果が妥当であるかを確認する ために、密度揺動の時空間構造から媒介



図 1. PANTA の軸方向の磁場を変化させたときのイオン飽 和電流揺動(電子密度揺動に相当)の周波数成分。磁場が 低い時はモードが単一のコヒーレントなモードであるが、 磁場が高くなると複数の揺動成分が発生し、乱流状態とな っていくことが分かる。

波成分を消去し、隣り合う周方向モード数のみを抜き出して重ね合わせた。すると、*m*=1&2以外の 重ね合わせの結果は媒介波の山の位置にほぼ揺動が収束して存在しストリーマー構造を形作っている ことが確認できたが、*m*=1&2を重ね合わせた場合は、揺動の収束する位置が他と全く異なり、スト リーマー構造の形成をむしろ阻害していることが分かった。今後、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る。

また図1のように、PANTAの軸方向の磁場の強度を変化させ、磁場が低い時は単一のモードのみの コヒーレントな状態であったのが、磁場が高くなるにつれて複数のモードが発生し、乱流状態となって いくことが確認できた。遷移の詳細を調べることでメゾスケール構造の解明にも繋がると期待される。

4. 研究成果報告

[1] 山田琢磨他, "PANTA における非線形現象の研究", 日本物理学会 2020 年秋季大会, 9aB1-6, オンライン開催 (Sep 8-11, 2020).

5. 研究組織

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

流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシング技術の開発

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。特に非平衡な状態、現象が時間的に 変化しているような状況における乱流の時空間構造を調べることは、この物理現象を理解する上で非常に重 要である。しかしながら、タングステンなどの重金属をも溶かしてしまう高温高密度プラズマ実験において は、その計測手段が非常に限られている。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、乱流の高精度な時空間構造を観測することを目指している。今年度、九州大学の新しいトカマク 実験装置 PLATO に開発を行っているドップラー反射計を適用する準備を進めた。今回、反射計測で測定位 置情報を得るなど効率的な実験適用を行うため、先行してミリ波干渉計を整備・適用した。初期実験で得ら れたこのミリ波干渉計のデータやシステムについて、以下に報告する。

2. PLATO トカマク装置用ミリ波反射計

プラズマの線平均電子密度を計測する手法として、 一般的なヘテロダインミリ波干渉計をPLATO 装置 に適用した。干渉計システムの概略図を図1に示す。 プラズマに入射する RF 発振器にはガン発振器(周 波数 139GHz)を用い、ヘテロダイン検波のための 局発波(LO)は、138GHzを用いて、中間周波数 (IF) 1GHz を得るように設定した。なお、発振周 波数はガン発振器のメカニカルチューニングに適切 な周波数に設定が可能である。RF 発振器からの出 力は、一部(10%)をヘテロダイン検出のために分配 し、残りをプラズマへと伝送する。今回、伝送路には、 口径 1.25 インチのコルゲート導波管を用いた(図 2)。べ ンドも含めたトータルの伝送損失は-3db 程度である。 本干渉計ではミリ波を PLATO プラズマ中を垂直方向に 通して計測する。ポート付近での伝送距離は約 1.5~2 mとなるため、当初オフセットパラボラ鏡を用いた集光 光学系を検討した。焦点距離 100mm のパラボラ鏡に 140GHzのガウシアンビームを入射しビーム径を測定し た結果を図3に示す。図の赤線のように期待したような 集光性が得られておらず、今回はコルゲート導波管をポ

RF: Gunn (139GHz) CO: Gunn (138MHz) (138MH

図1:ミリ波干渉計の概略図。



図2:コルゲート導波管伝送路と計測ラック

ートに近づけることでビーム径の広がりを抑制して適用することとした。真空窓の有効径は \$ 63mm であり、 1.25 インチの導波管の場合約半分のパワーが通過していると考えられる。この点は、真空容器内にアンテナ

25

を設置する、より強い集光光学系を開発するなどで改良が見込める。プラズマを通過したミリ波はミキサで LO と混合し、IF 信号が得られる。ヘテロダインレシーバーでは、得られた 1GHz の IF 信号をダウンコン バートして、位相計で位相検出を行うための 1MHz のデジタル信号(図 4)に変換する。この信号を位相計に 入力することで、プラズマの線平均電子密度に比例した電圧信号を得ることができる。



図 3:140GHz ガウシアンビーム伝送でのビー ム径。オフセットパラボラ鏡(赤点)、1.25 インチコルゲート導波管(青)の実測値、オレン ジは 2.5 インチの場合の予測値。緑の点線が真 空窓の有効径。

図5にPLATOプラズマ実験で得られた測定デー



図 4: ヘテロダインレシーバー出力。1GHz の IF 信号を 1MHz のデジタル出力へと変換する



図 5: PLATO プラズマの放電波形例。線積分電 子密度の時間は計(TOP)。

タを示す。この放電ではコイル通電開始1秒後からマイクロ波を約5秒間入射し、プラズマを生成・維持している。この時、線積分電子密度の時間変化は約1.5x10¹⁶m⁻²で一定に維持できているという様子 を本計測器データから取得することができた。

3. 論文と学会発表

次の学会にて発表を行った。

- 徳沢 季彦, 江尻 晶, 稲垣 滋, 出射 浩, 田中 謙治, 他「JT-60SA へのマイクロ波ドップラー反射計 適用に向けた詳細設計研究」日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 8 日~11 日(8pB2-12)
- 2. T. Tokuzawa, K. Tanaka, H. Yamada, S. Inagaki, 他、「LHD 同位体比較実験におけるイオン・電子スケール 乱流揺動の比較研究」日本物理学会 2020 年秋季大会 2020.9.8-11 (9aB2-4)
- 3. T. Tokuzawa, K. Tanaka, K. Y. Watanabe, S. Kubo, A. Ejiri, S. Inagaki, 他 "Developments of Millimeter and Sub-Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Diagnostics", 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves IRMMW-THz 2020, Nov. 8-13, 2020 Buffalo, New York, USA (P266)
- 4. T. Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, 他 "W-band millimeter-wave back-scattering system for high wave number turbulence measurements in LHD", 23rd High-Temperature Plasma Diagnostics 2020, Dec. 14-17, 2020 Buffalo, New York, USA (P4.G1)
[2020 S2-1] 結晶表面荒さと微斜面マクロステップのダイナミクス: 分子スケールから表面張力に支配されるスケールへ

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。

共同研究特別講演会の開催等

2020年度は特定研究継続2年目であった。

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永田 空比 古(ながた そらひこ)氏による「人工知能の可能性とビジネス活用」という題目の授業内講演のみ 2020 年7月 30日に遠隔で実施した。

考察

非平衡定常状態の傾いた結晶表面(微斜面)の荒さを調べ、Brezinskii-Kosterlitz-Thauless (BKT) ラフ な表面から Karder-Parisi-Zhang (KPZ) ラフな面へクロスオーバーすることをモンテカルロシミュレーシ ョンにより示した (N. Akutsu, Sci.Rep. 10, 13047 (2020))。シミュレーションモデルの制限 solid-on-solid 模型 (RSOS 模型)の特徴を生かして、1)成長駆動力が小さい場合、および平衡状態では BKT ラフで ある;2) terrace—step—kink (TSK)模型では大きい成長駆動力で KPZ ラフである;3) テラス面上の島状 クラスター形成により成長駆動力が大きくとも BKT ラフな面になる、ことを示した。

結晶表面ステップ間に点型の引力が有る定常成長微斜面について、マクロステップがファセット化し2次元核形成機構で成長していても、モンテカルロシミュレーションによりラフな面になることを示した(N. Akutsu, Sci.Rep. 11, 3711 (2021))。さらにマクロステップが分散する駆動力点で界面の幅が発散し、ラフネス指数=0.60を得た。この値は KPZ ラフな面のラフネス指数の値 0.386 より格段に大きく、現実に結晶成長で観測される値に近い。

成果報告

出版物

インタビュー記事

Noriko Akutsu, "Macrostep formation and step dynamics faceted by discontinuous surface tension", Impact, November (2020), 25--27. doi.org/10.21820/23987073.2020.5.25.

学術会議「情報科学との融合による新化学創成」小委員会、提言「化学・情報科学による新化学創成に向けて」令和2年7月7日公表。http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/division-15.html

発表論文(レフェリー有)

- 1. Noriko Akutsu, "Faceted-rough surface with disassembling of macrosteps in nucleation-limited crystal growth", Scientific Reports, **11**, 3711 (2021). doi.org/10.1038/s41598-021-83227-8
- 2. Noriko Akutsu, "Crossover from BKT-Rough to KPZ-Rough Surfaces for Interface-Limited Crystal Growth/Recession", Scientific Reports, **10**, 13057 (2020). doi.org/10.1038/s41598-020-70008-y

紀要等(レフェリー無)

- 1. 阿久津典子、川野潤、特集「固液を区別する秩序パラメタと界面との関係」、特集序文および編集後記。日本 結晶成長学会誌 47 No. 4, (2021).
- 阿久津典子、安江常夫、湯口宜明、研究報告「複雑な系の表面張力精密計算とファセット化したマクロステップ のダイナミクス」 大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所 2019 年度紀要(FERI ACTIVITY REPORT 2014) 30、96-100 (2020).

口頭発表

- Noriko Akutsu, "Roughness of Vicinal Surface: Crossover from Berezinskii-Kosterlitz-Thouless-Rough to Kardar-Parisi-Zhang-Rough Surfaces", *CCS2020: The Conference on Complex Systems 2020*, (December 10, Web Conference, Greece). eBook of Abstracts p. 21, (2020).
- 2. 阿久津典子、「微斜面の表面荒さ:BKT ラフから KPZ ラフな面へのクロスオーバー現象」 日本表面真空学会 学術講演会ポスター発表(2020年11月19日、オンライン開催)
- 阿久津典子、杉岡良樹、村田直也、「環境相成分比の偏りによる2段差4段差ステップの割合とキンク密度変化:2成分定比化合物における平衡状態微斜面」日本結晶成長国内会議(2020年11月9日、オンライン開催)
- 4. 阿久津典子、「非平衡定常状態微斜面における BKT ラフな面から KPZ ラフな面へのクロスオーバー現象」 日本結晶成長国内会議(2020年11月9日、オンライン開催)
- 5. 阿久津典子、杉岡良樹、村田直也、「環境成分比偏りにより平衡状態でファセット化したマクロステップができる のか?:2成分定比化合物」日本物理学会 2020 年秋季大会(2020 年 9 月、オンライン開催)
- 6. 阿久津典子、「制限 SOS 模型(19 頂点模型) 微斜面における BKT ラフ表面と KPZ ラフ表面間のクロスオーバー現象 I:駆動力および温度依存性」 日本物理学会 2020 年秋季大会(2020 年 9 月、オンライン開催)
- 7. 阿久津典子、「制限 SOS 模型(19 頂点模型) 微斜面における BKT ラフ表面と KPZ ラフ表面間のクロスオーバー現象 Ⅱ: 傾斜依存性」 日本物理学会 2020 年秋季大会(2020 年 9 月、オンライン開催)

機械学習を用いた相界面における相互作用の解析

学習院大学・計算機センター・教授 久保山 哲二

1. 研究目的

本研究では「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」の一環として、相界面 における非線形現象のデータ駆動解析を行う。特に、半導体材料プロセスにおける気体-固体相界面で の物理現象や核融合プラズマ・実験室プラズマにおける電離気体(プラズマ)-固体相界面での物理現象 に対して、それぞれの相互作用の主要因を読み解くことを目的としている。これまで、実験室プラズマ において計測された時空間データからの特徴的構造抽出に取り組んできた。本年度は、解析手法を改良 し、より高精度な手法の確立を目指す。

2. 研究方法

近年、流体解析分野において提案された時空間データ解析手法の他分野への適用が広がりを見せて いる。動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)は瞬時場間の線形的な遷移を仮定し、 時空間データを一定の振動数と増幅/減衰率をもつ空間パターン(DMD モード)に分解する。一方、 クープマンモード分解(Koopman Mode Decomposition, KMD)は非線形発展する時空間データを解析 するための強力な手法であり、DMD は KMD の特別な場合に相当する。非線形データを対象とすると きは、DMD ではなく KMD の範囲で解析することで、より高精度なモード分解が可能となる。KMD アルゴリズムは、以下のような形式に元データ $\mathbf{z}(t)$ を分解する。

$$\boldsymbol{z}(t) = \sum_{n} \boldsymbol{v}_{n} \lambda_{n}^{t}$$

ここで、 v_n は Koopman モード、 λ_n は Koopman 固有値である。モード数nがz(t)の空間次元数と等しい とき、このモード分解は DMD となる。本研究では任意のモード数に対して Koopman モードと Koopman 固有値を正確かつ効率的に推定する KMD アルゴリズムとして、ZZKMD を開発した。ZZKMD は上記 展開式の誤差のフロベニウスノルム (RSS)の最適化問題を直接的に解くアルゴリズムで、逆行列によ るモード推定と勾配法による固有値推定の繰り返し計算を行う。最適化の初期値として、解析的な近似 解である LSVP 解を利用することで効率的に最適解を得る。さらに、数多くのモード数で展開したのち に有害なモードを除去することで、高精度なモード分解を実現できることを見出した。以上の手続きと 同様の効果は、ハンケル動的モード分解 (Hankel DMD) とスパース動的モード分解 (SP-DMD)の組 み合わせによっても得られる。

本研究では、実験室プラズマ(直線乱流プラズマ)の計測から得られた時空間データに対して、 LSVP/ZZKMD/Filtering および Hankel DMD/SP-DMD の適用を行った。データは 64ch の周方向プロ ーブアレイにより 1 µ s 間隔で計測されたものである。 3. 結果と考察

前年度は 1ms の解析窓で SP-DMD 解析に成功していたが、より長時間の解析窓では著しくモード 分解の精度が低下していた。今回新たに適用した上記2つアプローチでは、3ms の解析窓で高精度なモ ード分解に成功した。さらに、短時間予測にも取り組んでおり、定性的には良い結果が得られている。 これらの結果は、線形的な遷移を仮定する標準的な DMD の枠組みを超えて、KMD の枠組みで解析を 行ったことによるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、実験室プラズマの時空間データに独自のクープマンモード分解アルゴリズムを適用した。その結果、従来よりも長い時間区間の高精度なモード分解と短時間予測を行うことができた。高精度なモード分解を用いると、より有意な構成要素の議論が可能になる。今後は、半導体材料プロセスにおける相界面現象の時空間データ(ステップダイナミクス等)に対しても同手法の適用を進める。また、定量的な予測性能を有する解析手法の検討を進めていく。

5. 研究成果報告

発表論文

 Long-Time Dynamic Mode Decomposition of Plasma Turbulence, Akira Kusaba, <u>Tetsuji Kuboyama</u>, Kilho Shin, Makoto Sasaki, Shigeru Inagaki, *Plasma and Fusion Research* (under review).

学会発表

- [2] Predictive Nonlinear Modeling by Koopman Mode Decomposition, Akira Kusaba, Kilho Shin, Dave Shepard, <u>Tetsuji Kuboyama</u>, 15th International Workshop on Spatial and Spatiotemporal Data Mining (SSTDM '20) 2020 年 11 月 17 日.
- [3] Long-Time Dynamic Mode Decomposition of Plasma Turbulence, Akira Kusaba, <u>Tetsuji Kuboyama</u>, Kilho Shin, Shigeru Inagaki, *29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research* (*ITC-29*) 2020 年 10 月 29 日.
- 6. 研究組織

研究代表者	久保山 哲二	学習院大学・教授
研究協力者	草場 彰	応用力学研究所・助教
研究協力者	稲垣 滋	応用力学研究所・教授
所内世話人	寒川 義裕	応用力学研究所・教授

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リモートに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いる。このような重層的なスケールにまたがる変動を高 精度で予測することは科学的に挑戦的な課題であるだけでなく、海運・水産など沿岸にお ける活動へ有益な情報を提供することができるので社会的にも重要な課題の一つである。 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 を用いた海況予測に関する知見が豊富にあることから、沿岸域の予 測にむけて数値モデル・データ同化に関して共同で研究開発を行いたい。

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。

研究の結果

今年度は沿岸域の高解像度モデルの開発を中心に行い、日本沿岸における再現性の向上 に関する改良の成果を評価した。高解像度のモデルの開発・改良は、2km 解像度の日本周 辺モデルにおいて、潮汐モデルを導入するとともに、河川流出に関する淡水に関する外力 を詳細化することで再現性の向上を図った。その結果、潮汐成分を陽に表現することによ り、流速成分の再現性が向上するだけでなく、改善された流速によって引き起こされる水 平・鉛直混合が水温・塩分場の構造も改善させることが明らかとなった。特に瀬戸内海に おいては複雑な地形の効果もあり、潮汐フロントが存在することが観測的にも知られてい るが、今回の改良に伴い豊後水道などにおける潮汐フロントがモデルによってよく再現で きることが示された。

沿岸域でのさらなる高解像度化として 2km 解像度モデルからのネスティングを行い、 500m 解像度、100m 解像度のモデルをいくつかの海域において開発を開始した。これによ り中小の湾内の海洋構造を再現できる見込みであるが、比較可能な観測データが少ない場 合が多く、検証の難しさが明らかとなった。

まとめと今後の課題

海洋大循環モデルの改良については RIAMOM でも行われてきており、その有効性はこれ まで RIAMOM で得られたものを追認する形であり、日本周辺の沿岸域を対象としたモデル に普遍的に当てはまるものだと考えられる。

さらなるモデルの高解像度化にける検証データの少なさについては九州大学などのグル ープが行っているように漁船に観測データを集めてもらうなどの、これまで行われてこな かった手法によって解決していくことが重要であると考えられる。これらの新しい種類の データは、従来の観測船によって得られたデータとは異なる前処理、精度検証が必要だと 考えられるので、今後九州大学と共同で利用方法を検討し、利用実証につなげていきたい。

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

小守信正 アプリケーションラボ・気候変動予測情報創生グループ・主任技術研究員 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

応用力学研究所共同研究成果報告

1. 課題番号: 2020 S2-4

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: <u>特定</u>

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と、ひまわ り観測データの試験的な解析が、当共同研究の主な活動となった。参加したのは6月頃までは (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)・弓本桂也・篠塚陽平、その後は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)・櫻井・弓本・篠塚だった。

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。



Dynamic Mode Decomposition on satellite images

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。 2021 年 2 月の時点では、この技術を既存のひまわりのデータへの適用作業を、Haq が中心となって行っている。ひまわりのどの波長の観測データを用いるか、結果をどの独立したデータを比較するかなどの検討を行っている。

新エネルギー力学分野 特定研究2

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

GaN に代表される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おり、混晶や超格子を作製することでそのバンドギャップ等の物性制御が行われている。しかしながら、これらの材料の組成や構造の自由度は膨大であり、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、量子論にもとづくナノスケールでのデータをもとにマイクロ〜ミリスケールでの材料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・中村・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九州大学 におい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半導体表面および各種欠陥のエネルギーデータをもとに、マイクロ~ミリスケール での結晶形状予測を行う。各種エネルギーに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九州大学において研究打ち合わ 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 するとともに、これまでの計算データを用いて機 械学習を用いた解析も行い、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)に本計算用に改良を施したプログ ラムによって実行した。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。これらの電子状態計算に加え全電子 FLAPW 法 による全電子計算も実施した。

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、これまでの得られた InN/AlN および InN/GaN 超格子における計算結果を用いて、バンドギャッ



図 1. AlN 基板を想定した場合での Al_{1-x}In_xN 混晶お よび *m*InN/*n*AlN 超格子の計算モデルおよびバンド ギャップ値の In 組成 *x* 依存性。

プア値に対して機械学習を用いた解析を 行った。図1は第一原理計算を用いて計 算した AIN 基板を想定した場合での *mInN/nAIN* 超格子におけるバンドギャッ プの In 組成 *x* に対する変化を示したもの であり、*mInN/nAIN* 超格子において*m* お よび*n* はそれぞれ InN および AIN の層数 を示している。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)を入力として、決定木分析による バンドギャップの予測を試みたところ、 再現性のよいデータ範囲もあったが、機 械学習は一般的に外挿が難しいため著し く再現性の低いデータ範囲もあった。そ れらの改善が今後の課題である。



図 2. GaN における異なる面方位からなる表面(複合ファセット) の模式図。緑色、青色、および桃色の領域はそれぞれ{1-100}, {1-101}および{0001}面を示す。これら複合ファセットおよび 各面における計算モデルを構築して、そこでの原子および分子 の挙動に対する第一原理計算を行う。

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、これまでの平衡状態に おけるナノ構造形状の解析に加え、成長

プロセスに対する検討を行った。具体的には、GaN における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に示すような異なる面方位からなる表面(複合ファセット)において有機金属エピタシ ャル成長でのキャリアガス依存性に対する検討を行い、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、これらの挙動が大きく変化することを見出した。また、これら挙動の違いにより GaN において形成するナノワイヤの成長様式が大きく変化することを見出した。これらの計算結果は実験結 果とも定性的に一致している。

4. 研究業績

- "Roles of growth kinetics on GaN non-planar facets under metalorganic vapor phase epitaxy condition", Y. Seta, A.-M. Pradipto, T. Akiyama, K. Nakamura, T. Ito, Applied Physics Express 13, 065505 (2020).
- "Effect of step edges on adsorption behavior for GaN(0001) surfaces during metalorganic vapor phase epitaxy: an *ab initio* study", T. Ohka, T. Akiyama, A. -M. Pradipto, K. Nakamura, T. Ito, Cryst. Growth & Des. 20, 4358 (2020).
- "Absolute surface energies of oxygen-adsorbed GaN surfaces", T. Kawamura, T. Akiyama, A. Kitamoto, M. Imanishi, M. Yoshimura, Y. Mori, Y. Morikawa, Y. Kangawa, K. Kakimoto, J. Cryst. Growth 549, 125868 (2020).
- "A simple approach to growth mode of InN and InGaN thin films on GaN (0001) substrate", K. Nagai, T. Akiyama, K. Nakamura, T. Ito, ECS Transactions 98, 155 (2020).
- "Computational discovery of stable phases of graphene and h-BN van der Waals heterostructures composed of group III–V binary compounds", T. Akiyama, T. Kawamura, and T. Ito, Applied Phys. Lett. 118, 023101 (2021).
- 6. "GaN(0001)基板上における InN および InGaN 薄膜の成長様式に関する理論的検討",永井勝也,秋山亨,中 村浩次,伊藤智徳,第49回結晶成長国内会議 10p-P07, (2020年11月9-11日).
- 7. "Recent progress in computational materials science for III-nitride epitaxial growth: effects of growth kinetics on surface morphologies and nanostructures", T. Akiyama, Y. Seta, T. Ohka, T. Ito, International Symposium on Wide Gap Semiconductor Growth, Process and Device Simulation 2021 (2021 年 1 月 19-21 日).
- 8. "Change of the effective bandgaps of InN/AlN superlattices due to lattice distortion", T. Kawamura, A. Korei, K. Basaki, T. Akiyama1, Y. Kangawa, I. Gorczyca, T. Suski, M. Wierzbowska, S. Krukowski, International Symposium on Wide Gap Semiconductor Growth, Process and Device Simulation 2021 (2021 年 1 月 19-21 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))
共同研究者	中村浩次 (三重大学大学院工学研究科·教授))

応用力学研究所共同研究成果報告書

1. 課題番号: 2020 S2-6

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

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)

6. 研究背景·目的

昨年発生した令和2年7月豪雨は、九州地方の甚大な被害を及ぼした。この豪雨においては、平年に比 べ多量の水蒸気が九州地方に流入したことが発生要因の一つして指摘されている。水蒸気フラックスの 分布からは、熱帯インド洋と熱帯太平洋からの水蒸気輸送が示唆されているが、その実態は明らかにさ れていない。そこで、豪雨発生時の水蒸気の起源を明らかにすることを目的とした数値シミュレーショ ンを行った。

7. 手法

領域気象モデル Weather Research and Forecasting Model (WRF)の version 4.1.5 を使用した。計算領域は、ベンガル湾の一部から太平洋西部までを含む範囲とし(おおよそ 10°N-45°N, 110°E-150°E),水平格子間隔は 9 km, 鉛直層数は 60 層とした。サブグリッドスケールのパラメタリゼーションとして、WSM6 microphysics scheme, Yonsei University PBL scheme, Revised MM5 surface layer scheme, United Noah Land Surface Model (Tewari et al., 2004), the RRTMG Shortwave and Longwave Schemes, and Grell–Freitas Ensemble cumulus scheme を使用した。初期・境界条件のためのデータとして、NCEP Final Analysis, OISST を使用した。計算は 2020 年 6 月 27 日 00:00 から 7 月 5 日 00:00 (UTC)まで行い、6 月 28 日以降のデータを解析に使用した。得られた流れ場を用いて、仮想気塊を用いた後方流跡線解析を行った。降水と蒸発のデータを用いて、気塊の水蒸気変化を見積もった。

8. 結果

一般に梅雨期豪雨においては熱帯からの水蒸気供給が重要であると考えれているが、本事例では熱帯から流入した水蒸気の大半は九州に向かう途中で降水として消費されてしまい、豪雨に直接関与したのは日本近海(沖縄・南西諸島周辺の西太平洋・東シナ海)における水蒸気供給であることが明らかになった。さらに、海上での浅い対流による対流圏中層への水蒸気供給が、海面からの蒸発による対流圏下層への水蒸気供給と同程度に重要であることが明らかになった。集中豪雨を引き起こすような線上降水帯の形成において、対流圏中層が湿潤であることの重要性が指摘されている。熱帯域の対流システムの発達に関して、浅い対流による対流圏中層の湿潤化の重要性を指摘する研究事例があるが、本研究では、中緯度の線上降水帯という熱帯とは異なる降水システムに関して、日本近海における浅い対流の重要性を初めて指摘した。

9. 公表論文

Zhao, N., Manda, A., Guo, X., Kikuchi, K., Nasuno, T., Nakano, M., Zhang, Y., Wang, B. (2021). A Lagrangian view of moisture transport related to the heavy rainfall of July 2020 in Japan: Importance of the moistening over the subtropical regions. Geophysical Research Letters, 48. https://doi.org/10.1029/2020GL091441

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、新しい流れ構造観測手法の開発を目指す。観測ツールとして、大 気乱流をオイラー的及びラグランジュ的共に観測可能(P. Neumann et.al. Sensors and Actuators A 235 (2015) 300-310)なマルチコプターに代表されるドローンを複数利用 する。

本研究の直接的な応用として、これまでシミュレーションや少数点の測定しかできな かった、地・海表面近傍(100m以下)の三次元的な風速構造の直接測定が可能にな ると考えられる。具体的には、風力発電装置周辺やビル間の風の流れ、海表面近傍の大 気乱流構造の直接計測が見込まれる。

今年度は、ドローンによる正確な風速を測定するため、(i)九州大学応用力学研究所 研究所の風洞施設を利用した校正実験を行った。加えて(ii)野外での校正の初期実験お よび、(iii)風力発電施設周辺におけるウエイク流れ構造観測・解析手法の検討を行っ 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 を求める。風速測定における簡単な概念図を以下に示す。



図:ドローンがホバリングを行う際に、風速(v)によるドローンへの力(F)とドローンの 推力(左図:横方向、右図:鉛直方向)との関係。ρは空気密度。Sはドローンのプロペ ラ面積。F'はホバリング状態でのドローン推力。

実験と結果

本研究では、DJI 社製 Mavic mini 及び Parrot 社製 ANAFI を用いた。

(i)九州大学応用力学研究所の大型風洞施設を用いた校正実験を行った。1m/sから 10m/sまで1m/sごとに一定の風によりドローン(Mavic mini)におけるプロペラの回転 数、傾きの関係を得た。機体間依存性や方向依存性も得た。

(ii)風洞では高精度な校正が可能であるが、鉛直方向の校正ができず、またより簡便 な校正手法の開発のため、野外での風速校正法の初期的検討を行った(Mavic mini 及び ANAFI)。ドローンの移動速度が一定条件における、プロペラの回転数と傾きは、ホバリ ング状態でその風速の風を受ける状態と同じとなることに着目し、校正を行った。ドロ ーンの移動速度は全球測位衛星システム(GNSS)により得た。

(iii) 風力発電施設は、周辺の風の影響を受け、また風車の後方には風車ウエイクと 呼ばれるゆらぎが生じる。この構造は風車のプロペラの動きに同期して生じる為、複数 ドローンを用いた2次元速度分布の再構成手法の考案を行った。本手法はプラズマにお ける2次元時空間再構成手法(H. Arakawa et. al. Sci. Rep. 2016)を応用するものである。

今後の方針

今後は、野外におけるドローン風速校正手法について、風洞実験との比較を行うこと で論文化を目指す。また、風車ウエイク計測方法を実際の風車周りで適用し、2次元ウ エイク構造観測手法として論文化を目指す。

成果報告:なし

プロセス・インフォマティクスに対する情報学的データ解析の応用

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安藤 康伸

各種の分析過程で得られるスペクトルデータは、材料探索・材料開発における最も一般的 なデータ形式のひとつであり、スペクトルデータを解析することで材料の構造や機能の同定 に役立てることができる。しかしながらスペクトルデータの解析には課題が多い。例えば、 非線形最小二乗法を用いたモデルフィッティングを行う際、初期値依存性の問題から解析に 試行錯誤を要して時間がかかり、またパラメータ推定の自動化が困難となるケースがある。 またスペクトルの成分数が不明である場合に、解析に用いた成分数が妥当であるかどうかを 客観的に評価できないケースも多い。これらの課題、すなわちスペクトルデータ解析の効率 化・自動化・客観化に取り組むためにインフォマティクスが活用されている。ここではスペ クトルデータに対するインフォマティクスの活用事例として特にスペクトルデータ解析への 応用事例を中心に報告する。

スペクトルデータのフィッティングを自動化する意義は、単に研究者の労力を削減するこ とに留まらない。それは処理できるスペクトルの絶対量に差が生じるためである。いかに熟 練の研究者であっても、100本を超えるスペクトルを常に処理し続けることは容易ではない。 さらに現在の放射光施設やハイスループット計測装置などハードウェアの進展からスペクト ルデータの生産性は日進月歩で増加しており、時に10000本以上のスペクトルがひとつの実

験系で得られることもある。これをマニュアルで処理するのは現実的ではない。大量のスペ クトルデータを漏れなく処理して最大限活用するためにも、MIの活用は不可欠である。

スペクトルデータ解析の自動化は、様々な角度から検討されている。例えば、動的シャー リー法では、シャーリー法によるバックグラウンドの除去とスペクトルフィッティングを交 互に行うことで、バックグラウンドを決定するパラメータを含めた形で最適化を自動で行う ことができる[1,2]。スペクトルフィッティングの初期値は、スムージングした曲線の微分を 評価することで推定して最小二乗法の失敗を避けている。

非線形最小二乗法を用いないような自動フィッティング手法として、EM アルゴリズム (期待値最大化法)によるモデルの最尤推定も挙げられる[3]。最尤推定は統計的機械学習 の基本として用いられ、ある確率分布を仮定したとき取得されたデータが得られる確率(尤 度)を最大化することで確率分布のパラメータを推定する手法である。複数の成分を持つ多 峰的なスペクトルを解析する場合には、混合ガウス分布に対する EM アルゴリズムを用いる ことで高速にモデルパラメータを推定することができる。

期待値最大化法のメリットとして、初期値に対するロバスト性が挙げられる。EM アルゴ リズムは初期値を設定したのちに E ステップと M ステップと呼ばれるプロセスを交互に繰 り返すことでモデルの尤度を単調に増加させることができる。そのため、初期値が大きく外 れているような場合でも数値的に安定なモデル推定を行うことができる。初期値依存性があ り局所解に陥ることに注意が必要だが、スペクトル1本あたり1秒未満でのモデル最適化が

可能である。初期パラメータのマニュアル設定やアルゴリズムとしてハイパーパラメータを 必要としていないことから自動化も容易である。

またスペクトルデータは一般に複数成分から構成されており、観測データからこれらの成 分を分解する作業はスペクトル解析の重要な目的のひとつに挙げられる。しかしながら、ス ペクトルの成分数を決定することは物理的な制約等がない限り困難であり、研究者によって 仮定が置かれること、またスムージングしたデータの微分値などから推定することが一般的 であり、主観的な判断が解析を主導してしまうケースがある。今後の課題として、現在開発 しているスペクトルデータ解析技術をベイズ推論の枠組に拡張することが挙げられる。

スペクトルの成分数をデータから決定する手法のひとつがベイズ推論である。ベイズ推論 は、モデルパラメータを確率変数として取得したデータに基づき。モデルパラメータに対す る確率分布である事後分布を推定する枠組みである。実際の計算では、尤度とパラメータに 対する事前分布からベイズの定理に基づき事後分布を計算する。また事後分布の規格化因子 を周辺尤度とよび、モデルの妥当性を統計的に評価する指標に用いることができる。スペク トル解析ではピーク本数を客観的に決定する指標となる。

永田らはこのベイズ推論の枠組で、レプリカ交換モンテカルロ法を用いたピーク本数推定 の結果を報告している[4]。この手法は統計力学研究にも広く用いられ、通常のマルコフ連 鎖モンテカルロ法に加えて温度の異なるレプリカを用意し、温度交換も実施しながらサンプ リングを実施する手法である。レプリカ交換モンテカルロ法の利点は、局所解を避け、大域

解を発見できる点、またサンプリング結果を用いることで陽に多次元積分を実施することな く、周辺尤度を計算できる点にある。一方で、計算コストが高い、技術的に難度が高いなど の課題はあるものの、最も高精度にモデル評価を行える手法に位置づけられる。これらの知 見を生かした方法論開発が今後望まれる。

参考文献

[1]松本凌,西澤侑吾,片岡範行,田中博美,吉川英樹,田沼繁夫,吉原一紘, Journal of Surface

Analysis 22, 155 (2016).

[2] A. Herrera-Gomez, M. Bravo-Sanchez, O. Ceballos-Sanchez, and M. O. Vazquez-Lepe, Surface and Interface Analysis 46, 897 (2014).

[3] T. Matsumura, N. Nagamura, S. Akaho, K. Nagata, and Y. Ando, Sci. Tech. Adv. Mater. 20, 733 (2019).

[4] K. Nagata, S. Sugita, and M. Okada, Neural Networks 28, 82 (2012).

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測定された水位・ 差圧データを使用して、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評価を行った.

・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、風波の発達過程および風波気液界面を通しての運動量輸送機構の解明を行った.

・実験方法および実験結果

実験・解析は、吹送距離は5m~35m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、今年度初めて評価された.また、海上風速に換算した場合に風速23m/s(最大1300 回転)から37m/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.

・成果報告(論文、学会発表リスト等)

1. 合田総一郎,高垣直尚,鈴木直弥,松田景吾,小森悟,Yuliya Troitskaya,強烈な砕波を伴う気液界面に おける運動量輸送量の測定手法の構築,日本機械学会 2020 年度年次大会,オンライン,2020 年 9 月 13 日-16 日.

- 合田総一郎,高垣直尚,鈴木直弥,松田景吾,小森悟,Yuliya Troitskaya,風波水槽での高風速時の砕波 を伴う大気・海洋間運動量輸送の評価,日本海洋理工学会 2020 年度秋季大会,オンライン,2020 年 11 月 19 日.
- 3. 佐々木燦汰,高垣直尚,鈴木直弥,強風時の大気・海洋間運動量輸送に及ぼす浅瀬の影響,日本海洋 理工学会 2020 年度秋季大会,オンライン,2020 年 11 月 19 日.
- 4. 佐々木燦汰,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の 構築,波浪研究会,オンライン,2021年3月1日.
- 5. 三浦徹馬,高垣直尚,高風速下における水面を通しての運動量輸送量の測定,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,2021 年 3 月 16 日.
- ・研究組織
- 研究代表者:高垣直尚
- 研究協力者:鈴木直弥
- 研究協力者:大西天真
- 研究協力者:合田総一郎
- 研究協力者:三浦徹馬
- 研究協力者:佐々木燦汰

Table 1: Wind velocity. Values of U_{10} were estimated u	using model	(Takagaki et	al., 2012).
---	-------------	--------------	-------------

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

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



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】

若狭湾では急潮と呼ばれる突発的な強流がしばしば発生し、 定置網漁場で甚大な被害を及ぼすことがある。急潮被害の低減 を目指し、福井県と京都府は流れや水温を計測できる観測体制 を構築し、九州大学は日本海沿岸海域海況予報モデル (DREAMS_C)を用いて1週間先の海の流れの予報を web 上で公 開している。本研究では、取得した観測データや予報モデルの シミュレーション結果を利用して、2020年度の急潮について分 析するとともに、急潮の防災対策に関する新たな知見を得るこ とを目的として実施した。



図1若狭湾および測点. 2020年に

【観測およびデータ解析】

福井県水産試験場、福井県立大学、京都府海洋センターは、 若狭湾(図1)の定置網近傍で流れや水温を計測している。2020

発生した急潮の例として、小樟と 、 丹生の観測データを示す。)20

年度においても、それぞれの測点で電磁流速計や ADCP(超音波多層流向流速計)を用いて流れを計測す るとともに、複数個の水温センサーを全測点で設置した。また、急潮発生時の流れの時間変化は、九州 大学応用力学研究所が開発した DREAMS_C を用いて分析を進めた。

【結果および考察】

2020年度の急潮の発生状況を分析した例として、小樟(ここのぎ)と丹生(図1参照)で発生した急 潮についてそれぞれ紹介する。

2020 年 8 月 25 日頃、若狭湾湾口に近い小樟で急潮が発生した。図 2 には小樟で観測した流れの時系 列を示している。この図から、小樟では通常は湾口方向へ向かう北-北西方向の流れが卓越しているが 8 月 25 日頃には一時的に流向が変化し、南東方向に 50 cm/s を超える強流を伴った急潮が発生したこと がわかる。いままでの研究で若狭湾の湾口東部の沿岸域では渦の接近により急潮が発生することが明ら かにされているので(Kaneda et al., 2018, J0)、高解像度シミュレーションモデルの計算結果を利用 して、渦による急潮の可能性について検証した。

図3には2020年8月20日の流れのシミュレーション結果を示しており、小樟沖では時計回りの大き な渦が発生していたことが確認できる。つまり、この急潮は渦の接近によって発生したことが確認でき た。高解像度モデルは1週間先までの予報を公開していることから、シミュレーション結果の「渦の動 き」に着目することにより、急潮の防災対策を取ることが効果的であると考えられた。





図 3:高解像度シミュレーションモデルの 計算結果(2020年8月25日)



図 4:漁具被害が発生した 2020 年 8 月 30 日頃の漁場の多層の流れ(8月 29日-9月1

また、2020 年 8 月 30 日には敦賀半島の先端付近 に位置する丹生定置で漁具被害が発生した。定置網 の道網の先端が南から北へ流され、ロープが切断さ れたのである。漁場の近傍では ADCP(超音波多層流 向流速計)や波高も計測できるリアルタイム海洋観 測ブイを設置していたことから、被害発生時の定置 網漁場の海況について詳しく調べることにした。

被害発生時の波高のデータをみたところ波高は低 く、被害を引き起こした要因とは考え難かった。次 に ADCP が計測した流れのデータを調べたところ、図 4 が示すように 8 月 30 日は底層で北-北東へ向かう 流れが発生しており、この流れが道網を北方向へ引 っ張ったと推察された。また、8 月 30 日後半から 31 日には上層では北西方向へ、下層は逆方向へ向かう 流れが卓越し、9 月 1 日からは全層で南西方向の強い 流れが発生していた。つまり、被害発生時は、流向 および流速が時々刻々と変化する非常に複雑な変動 をしていたことが明らかになった。

この被害が発生したとき、大型の台風9号と10号 が日本に接近しつつあった。台風は若狭湾から遠く 離れた九州西方を北上したものの、敦賀のアメダス データは一時的に強風が風向を変えながら吹いたこ とを記録し、強い流れは台風の通過に伴う風が引き 起こしたものと推察された。

近年、グローバルスケールの環境の変化により、

台風は大型化し、強い勢力を維持したまま日本付近を通過することが増えてきた。強い勢力をもつ大型 あるいは超大型の台風が日本に到達した場合、その影響は広範囲にわたることから、若狭湾から遠く離 れた海域を通過するときでも警戒を怠らない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、学会発表)】

- (1) 丹後半島沿岸の定置網における急潮被害と流速の鉛直構造との関係,水産海洋研究,261-271,2020 <u>舩越裕紀</u>,上野陽一郎
- (2)「福井県沿岸域における海況情報システムの活用」,<u>兼田淳史</u>ほか,日本海洋学会 2020 年度秋季大会,2019 年 10 月.

【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

やませによる陸奥湾の強い底入り潮発生に関する解析

弘前大学 理工学研究科 島田照久

目的

2017 年夏に陸奥湾西湾でホタテ籠が強く揺さぶられてホタテ貝がへい死する被害が起きた。陸奥湾 では夏季にやませによって陸奥湾口底層から津軽暖流中層水が流入する底入り潮が発生する。強い底 入り潮は,7月中旬から8月下旬にかけてやませ吹き続けたことが起因となっていると考えられる。し かしながら,やませの陸奥湾循環流への影響が不明なため,どのような要因で強い底入り潮が発生し たか解明されていない。また強い底入り潮が湾内のどの領域まで影響を及ぼすのかも解明されていな い。本研究では湾内の物理応答や湾内の水深ごとの水温を調べた。

観測と解析方法

青森県水産総合研究所は平舘の観測ブイで水温・塩分・流速 を、青森・東湾の観測ブイで水温・塩分を1時間おきに測定し ている。定点観測の他、試験船「なつどまり」で月1回、11 箇所(2017年は8箇所)の水温・塩分を測定している。本研 究では、水産総合研究所提供の2017年の観測データと青森海 上保安部の龍飛崎風速データを用い、7月下旬から8月下旬の 水温・流速を分析した。

結果と考察

図2は2017年7月25日-8月31日の平舘の水深4m, 15m,20m,25m,30m,40mの流速変化と龍飛崎の東西 風を示している。やませ期(7月27日-8月21日)の水深 4-15mは北上流,水深30-40mは南下流,つまり表層は 湾から流出し,底層は湾へ流入しており,表層と底層の流速 の差は最大で約0.7m/sである。水深20m-25mの中層は北 上流と南下流が混在しており,西風期と同様の海況となって いる。やませ期の陸奥湾は表層,中層,底層と異なる海況に なっていたと考えられる。

やませが吹き始めて 12 日後に平舘の水深 1-15m が, 17 日後に東湾の水深 1-15m が混合層となり,青森の水深 1-15m は強風の時のみ混合層となっている(図 3)。湾口と湾 内の上層ではやませの持続で鉛直混合が起こり,湾奥の表層 ではやませの強さで鉛直混合が起こると推測される。やませ 期は青森の水深 44m,東湾の水深 48m の水温は約 15℃前後



図1 陸奥湾観測地点



図 2 平舘観測地点における水深 4m, 15m,30m,40m (上段),水深 20m,25m (中段)の流速変動と龍飛崎観測地点に おける東西風風速変動(下段). で保たれているが,西風になると徐々に水温が上昇して いる

図4は定線観測が行われた8月1日の水深5m, 10m,20m,30m,40mの水温分布図である。水深5m は北上流であり,湾口から湾中央域にかけて水温が低い ことから,表層では湾中央域からの流出が多いと考えら れる。湾南部沿岸域は水深5mでは高温となっている が,水深10-40mは低温となっている。沿岸湧昇域の幅 はロスビーの内部変形半径程度なので,(1.1)式から湾南 部の湧昇域を求めた。

$$\lambda_l = \frac{c_l}{f} \tag{1.1}$$

$$(f = 2\omega \sin \varphi, C_l = \sqrt{\varepsilon g \frac{h_1 h_2}{h}}, \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2})$$

湾南部沿岸域の内部変形半径は約 11.9km であり,水深 30m では 16.5−17°C,水深 20m では 19°C,水深 10m では 21°Cの等温線とほぼ一致した。陸奥湾ではやませに より湾南部沿岸域で水深 10m 付近まで湧昇が発生し,表



図3 平舘(上段),東湾(中段上), 青森(中段下)観測地点の水温変動と 龍飛崎観測地点における東西風風速 変動(下段).

層が高温でも中層から底層にかけては湾全域で低温に保たれていることが示唆される。

夏季陸奥湾では、やませによりエスチャリー循環が発達することで底入り潮が強まり、西湾・東湾 の南部沿岸域まで底入り潮が流入し、沿岸域の湧昇によって中層から底層の湾内全域を低温に保って いると推測される。表層の湾奥は湾中央域に比べて流出が少なく高温になりやすいが、底入り潮によ り底層まで高温にならないと考えられる。今後は沿岸海洋モデルで底入り潮による陸奥湾循環流への 影響を解明していく。









図 4 2017 年 8 月 1 日の(a)水深 5m, (b)水深 10m, (c)水深 20m, (d)水深 30m, (e)水深 40mの陸奥湾 水温分布図.赤い破線は南部沿岸 (野辺地・青森)から 11.9km 地点 を示しており、黒丸は観測地点を示 している.

研究組織

代表者	島田 照久	弘前大学 理工学研究科・准教授
協力者	磯辺 篤彦	九州大学 応用力学研究所・教授
	藤嵜 里美	弘前大学 理工学研究科・技術職員

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

はじめに

石川県の主要な漁業の一つに「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,石川県では雌のズワイガニ(メスガニ)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おり,石川県沖の資源加入量と海況の関係は明らかではない.本調査では浮 遊期の水温環境が石川県の資源動向に関係するかどうかを明らかにするため,浮遊期の水温と県内主要港 のメ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2002~2019年の主要港(橋立,金沢,輪島,珠洲)を対象として、メスガニの日別漁獲量が5箱以上のデータを抽出した.それらのデータを用いて各漁期年(11月~翌年1月)別・各主要港別のCPUE(隻日数当たり漁獲量)を求めた.

メスガニが漁獲加入するのは約9歳である.一方,ズワイガニの産卵期は2~3月で浮遊期は約3カ月であ ることから,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,3月20日から4月10日の水深200mの 平均水温を求め,9年後の県内主要港の CPUE との相関を調べた.さらに,相関の高い海域の平均水温と 水産研究・教育機構が公表している日本海系群A海域のズワイガニ親魚資源密度指数を説明変数,主要港 のメスガニの9年後のCPUEを目的変数とした重回帰分析を行った.

結果と考察

本調査の結果,橋立の CPUE については山陰沖の水温との間に正相関,大和堆の水温との間に負相関 が,金沢の CPUE については山陰沖と珠洲沖の水温との間に正相関が,輪島の CPUE については山陰沖 の水温との間に負相関が,珠洲の CPUE については珠洲沖の水温との間に正の相関がみられた.橋立,金 沢,輪島の CPUE と山陰沖の水温が相関する理由として,山陰沖の隠岐堆付近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隠岐沖で発生した稚ガニが橋立,金沢よりも輪島に着底しやすい流れが できるのではないかと考えられる.その他の海域との相関の原因については,今後調べていく必要がある.

以上の関係性を用いて,重回帰分析により各主要港の CPUE を推定した.橋立では山陰沖と大和堆の水 温を,金沢では山陰沖と珠洲沖の水温を,輪島では山陰沖の水温を,珠洲では珠洲沖の水温を説明変数と し,さらに全ての主要港についてズワイガニ親魚資源密度指数を説明変数に加えて重回帰分析を行った.そ の結果,重回帰式から求めた推定値は実際の CPUE の動向を概ね再現しており,浮遊期の水温や流況が石 川県沖の資源動向に影響していることが強く示唆されたいた.

この重回帰式から将来の CPUE 動向を予測すると,橋立では 2024 年まで増加し, 2026 年に減少,金沢では 2021 年まで横ばいで, 2022~2024 年に減少し, 2024 年から増加,輪島では 2020 年以降横ばい,珠

洲では 2023 年以降変動は大きいものの増加すると考えられた. 今後, 橋立や金沢の近年の予測が過大評価 になった要因を調べるなど, 予測精度の向上に努めたい.



図 1. メスガニ CPUE と9 年前の3月 20 日~4月 10 日の 200m 平均水温の相関係数マップ (左図:橋立 CPUE との相関,右図:珠洲 CPUE との相関):相関係数の高い海域を四角で囲んだ.



図 2. 各主要港の漁期年毎の CPUE の実測値と重回帰分析による推定値の比較.

海底資源探査用グライダー型海中ビークルの開発

九州大学大学院工学研究院 山口 悟

1. 研究の目的

近年、日本近海の海底資源の開発が注目を集め、海底資源の賦存量や賦存場所を把握するための様々 な調査方法が提案されている。一方で、資源探査にかかるコストが課題となっており、従来の方式とは 異なる効率的な探査機材の開発が望まれている。本研究では、OBEM (Ocean Bottom Electromagnetometer) を用いた調査方法に着目し、グライダー型水中ビークルに OBEM を搭載し、自律的に観測・移動を実施 するための観測機材の開発を試みた。本装置の実用化により OBEM 計測において現在問題となってい る船舶による投入・回収・移動のための作業時間およびコストの増大が解消され、OBEM による広範囲、 長時間の連続調査が効率的に実施可能になると考えられる。

本年度の研究では重合格子法を用いた CFD 解析により滑空する機体の周りの非定常流れの解析を行った。また、グライダー型水中ビークルの滑空運動の安定性、滑空中の姿勢を変化させる制御性能について調査した。さらに、ビークルの自律化に関連する外界認識方法の調査として、単眼カメラを搭載した ROV を用いた水槽試験を行い、取得したデータを ORB-SLAM で解析して自己位置推定性能を評価した。

2. グライダー型海中ビークルの概要

開発中のグライダー型海中ビークルは,機体上部に装着された翼により滑空することで 目的の海底計測点に移動着底しOBEMによる 計測を実施する。その後,適当な高度まで浮上 し,再び次の調査地点へ滑空により移動する。 OBEM による計測を行うため,本機体はセン サー用電極を装着した十字形のアームを有し ているが,滑空中の流体抵抗を減少させるた めアームを覆うように翼面を形成する。翼面



下には前後に2つの耐圧容器を配置し,前方容器には水中重量調節装置,後方容器には運動制御装置(重心移動装置),各種センサー,機体制御用コンピュータを搭載する。Fig.1に機体の内部構造を示す。

3. 数値計算による過渡運動の調査

数値流体計算に OpenFOAM の overInterDyMFoam ソルバを使用し, ビークルの過渡運動について調査 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。有限体積法により 離散化し, PIMPLE 法により計算を行う。乱流モデルには SST k-omega model を用いた。計算に用いた 格子と得られた結果を Fig. 2 に示す。左図のように, 青で示す計算領域全体の構造格子に, 赤で示す機 体を内包する非構造格子を重ね合わせている。さらに, 機体近傍では格子の細分化を施し, 重合格子法 を用いることで滑空する機体周りの流体運動の解析を可能とした。重合格子法では格子領域を複数重ね 合わせて構成される格子を用いて計算を行う。物体の移動は物体を内包する重合領域ごと行われ, 重合 領域間の境界面で適切に流体の情報のやり取りを行うことで整合性のとれた流れの解析を行うことが できる。また, 機体に関する情報を記述する設定ファイルを上書きしソルバに再度読み込ませることに より計算中に機体情報を変更する解析が可能である。ここでは, 機体の重心位置の前後方向位置を変更 し計算に反映させるプログラムを作成し重心位置制御を含めた CFD 解析を可能とした。制御法として は PID 制御を採用しゲインを適切に設定することで重心位置の操作によりピッチ角を制御できる。Fig. 2の右図に,機体重心位置を制御した場合の機体ピッチ角の計算結果を示している。



Fig.2 Calculated pitching angle with motion control by weight shift

4. 水槽試験に基づく自己位置推定とマッピング手法の調査

応用力学研究所の深海機器力学実験水槽においてビデオカメラを搭載した ROV を用いて水中での映像を取得し,水底に設置した三角コーンの周りを旋回する実験と水槽壁面を撮影しながら上下に移動する実験を実施した。用いた ROV は水中ライトを搭載し暗所でもある程度の明るさで撮影が可能である。 実験結果の解析には Visual SLAM アルゴリズムの一種である ORB-SLAM を用いた。陸上での ORB-SLAM の適用例は多く存在する一方で,水中での適用例は少ない。

三角コーンの間を旋回する実験の映像を用いた解析では自己位置推定とマッピングに失敗した。すな わち,特徴となると想定していた三角コーンと壁面が ORB 特徴量として検出されなかった。これは, 遠方に位置する壁面に ROV の水中ライトの光が届かず光量が不足していたこ,水底が一様なコンクリ ート製であったためコーナーの検出がうまく行えなかったことが原因と考えられる。壁面を撮影する実 験では部分的に自己位置推定とマッピングの解析に成功した。本条件では,対象物とカメラの位置が近 く水中ライトの光量が十分であったこと,壁面の継目,汚れ等によりコーナーの検出が容易であったた めである考えられる。Fig.3 に実験の様子と解析により生成されたマップと自機の航跡の一例を示す。



Fig. 3 Experiment for localization and mapping of an ROV

5. まとめ

重合格子法を用いた CFD 解析により滑空運動をするグライダー型水中ビークルの過渡運動を調査した。計算では、重心位置を適切に設定することで定常滑空状態に至るまでの過渡運動を計算することができた。また、適切な制御系により安定したピッチ角制御が可能であることを計算により確認した。さらに、外界認識手法の調査として、水中における ORB-SLAM の有効性を水槽試験結果により評価した。

以上の検討により,重合格子法と ORB-SLAM がグライダー型水中ビークルに適用可能であることが 確認された。

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

これまで瀬戸内海・豊後水道における潮汐混合過程の解明を目的とし、応用力学研究所との共同利用研究 によって乱流観測を実施し、その中で伊予灘のサンドウェーブによる乱流混合の強化過程に注目してきた。 2020 年度は海峡部周辺の潮汐フロントに特化した観測を実施する予定であったが、観測実施直前におけるコ ロナウイルス感染拡大傾向のため、航海を断念せざるを得ない状況となった。本年度はこれまで実施した観測 データをとりまとめ統合的な解析を行うことで、伊予灘において夏季に形成される潮汐フロントと乱流混合および サンドウェーブ間の関係を調べた。

研究内容

愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用い、2012 年から 2019 年までの夏季を中心として伊 予灘の 4 断面 (図1a,b) において実施した計 530 キャストの乱流微細構造プロファイルデータから、乱流運動エ ネルギー散逸率 εを計算し、Mellor-Yamada Level-2.0 スキームによるフラックスリチャードソン数を基に乱流浮 カフラックス B を見積もった。B の鉛直・測点平均値 〈B〉を、夏季伊予灘の平均海面熱フラックス (Tsutsumi and Guo 2016)を基に計算した海面浮力フラックス Bs と比較することで、Simpson and Hunter (1974) と同様の水柱 の混合・成層化レジームについて、乱流混合の観測に基づいたより直接的な評価を行った。加えて、この解析 結果を衛星による海面水温観測データ(MODIS SST) から検出した SST フロントと比較した。

伊予灘南西部では図1c-e に示されるように水平波長が数百メートルから1キロメートル、高さが最大10メート ルを超えるようなサンドウェーブが存在している。個々の乱流観測からは、Ic、Is 断面中の巨大なサンドウェーブ 上(測点 Ic6ii-Ic7i, Is6i-Is7i)における乱流運動エネルギー散逸率の高まりが毎回計測され、そこでは常に活発 な鉛直混合が生じている様子が捉えられた(図 2)。サンドウェーブ域の北東部(Ic1-Ic6, Is5i-Is6)や断面 In、Sd では海底の起伏は穏やかで、乱流も比較的弱かった。サンドウェーブ上では強い乱流によって水温が鉛直的に 混合され北東部との間にフロント構造を形成していた(図 2)。MODIS SST の解析からもサンドウェーブが顕著な 測点 Ic7 や Is7 周辺で水温が低下し、その北東部にフロントが形成される傾向が認められた(図 f)。乱流観測デ ータの統合的な解析からは、サンドウェーブ上では非サンドウェーブ域に比べてエネルギー散逸および乱流浮 カフラックスが 10-100 倍であることが示され、この違いがサンドウェーブ上では〈B〉 > Bs の混合レジーム、非サ ンドウェーブ域では〈B〉 <Bs の成層化レジームとなる要因となっていた(図 1g-j)。この〈B〉の空間パターンは、 従来の浮力フラックスの見積もりである海底地形による抵抗を考慮せず流速の 3 乗を基にした値では説明でき ず(図 1i,j 黒線)、サンドウェーブが伊予灘のフロント構造を生じる大きな要因になっていることが示された。

成果発表

Tsutsumi, E., X. Guo, Y. Yoshie, T. Endoh, T. Matsuno and I. Itoh (2021), Tidal sandwaves promote oceanic vertical mixing and frontogenesis. 3 月上旬に英文査読誌に投稿予定。

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)



図 1 伊予灘における観測点と海底地形、水温フロント構造。(a) 伊予灘の位置 (b) 平均的な海底地形と乱流観測を実施した断面 (c) ADCP のボトムトラック計測から得た水深分布 (d) 測点 Ic6 から Ic7 および(e) 測点 Ic7 から Ic8 における水深分布の計測例 (f) 2012-2019 年夏季における MODIS SST から計算された平均水温 (等値線)と0.15 ℃/km を超える水温勾配の出現頻度分 布(シェード)。(g,h) Ic, Is 断面における鉛直積分エネルギー散逸率。灰点は個々の計測値を示し、赤点と線はそれぞれ平均値と 95%信頼区間を示す。(i,j) Ic, Is 断面における鉛直平均乱流浮力フラックス。灰点と赤線・点は図 g,h と同様で黒線と青破線はそれ ぞれ Simpson & Hunter (1974) の方法による浮力フラックスの見積もりと夏季の平均海面浮力フラックスを示す。



図 2 大潮期における観測結果例: (a,d,g,j) 2012 年 7 月 20 日における Ic 断面 (b,e,h,k) 2018 年 8 月 10 日における Ic 断面 (c,f,i,j) 2018 年 8 月 11 日における Is 断面における (d-f) 流速の絶対値 (g-i) 水温 (j-l) 乱流運動エネルギー散逸率の水平-鉛 直分布。各図における等値線は海水密度 (σ)を示し、灰色のシェードは海底地形を表す。図 a-c は松山験潮所における潮位 (青線) と各観測点における乱流計測時刻を示す (▼印)。

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

平成 28 年度に実施された文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業宇宙航空科学技術推進委託費で 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た.これまでに実施した、 GNSS レシーバを用いた観測結果を踏まえ、波浪が GNSS 反射波に与える影響についての反射波信号 と波浪の状況の比較検討を行う.また、海面直下の乱流観測を実施するための試験観測を行い、GNSS 観測による波浪の影響評価の拡張の可能性を検討する.

研究の実施体制

本研究は以下の体制で実施した.(年齢は2020年4月1日付) 研究代表者:根田昌典:京都大学大学院理学研究科 助教 所内世話人:市川香:応用力学研究所 准教授

手法と結果の概要

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. 和歌山県田辺湾における試験観測(2016年)や外洋域(紀伊半島南方)における観測(2018年)に加え、今年度は2019年10月19日に豊後水道において長崎大学練習船「長崎丸」に乗船して観測を実施したデータを解析した.豊後水道における観測は、強い北風によって急速に発達した比較的高い波高の状態での観測データの取得に成功した.一方で、持続した観測をすることができず、荒天時の観測手順に改善の余地が見受けられた.

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)を本 研究の経費で購入・作成した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(写真 1). Vector の姿勢変化の影響を受けた観測流 速は, 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.

$V_{true} = TV_{obs} + \Omega \times T(M - S) + V_{mot}$

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、 Ω は Vector の角速度、M-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.本研究でこれまでに実施した 観測と解析によって,比較的静穏な環境ではこの手法に よって妥当な流速変換値を得られることを確認している.

長崎丸における観測は2019年10月18日-20日に実施され、本観測は19日14:42から16:00にかけて実施した. Vector ブイと GPS 波浪ブイは約10mのロープで係留していたが、高波高のために両ブイの動きが互いに干渉し、15:51に波浪ブイが転覆するなど、観測の中断があった.その後も回収と転覆が数度あったため、16:00に観測の中止を決定した.そのため、有効に取得されたデータは20分毎に取りまとめた最初の3データだけである.



写真 1:長崎丸観測時の Vector ブイ(左側浮き輪 状)とGPS 波浪ブイ(右側ドーム状)の同時観測

図1はその際の2次元波浪スペクトルを示す.波浪の状態は 1 時間の間ほぼ変化がなかった. 次いで, 同時間帯の Vector 観測を実施した結果を示す.昨年までの研究によって,海面直 下の流速スペクトルの形状には、定性的に2つの特徴があるこ とがわかってきた.1つは、波浪の周期付近におけるエネルギ 一密度の極大であり、これは海面変動に伴う非回転流速変動に 伴うものであると考えられる.この周波数よりも高周波数側で は急激なエネルギー減少が見られ、おおよそ 1Hz から 10Hz の範囲では Kolgoromov の-5/3 乗則に沿った形状となる. 10Hz 以上の範囲では流速観測精度(最大値の1%程度)の制限により、 ホワイトノイズ状になる. 図2に示した流速スペクトルにはそ の特徴が表れている.示した3つデータは連続的に取得したも のであり、風速はいずれも 12m/s を超えている. 期間内の風速 変化と風波の有義波高変化は必ずしも一致しない(表1).こ れに対応した水平流速成分のスペクトル(図2)は、統計 的に有意なレベルではないが乱流領域のスペクトル密度 の大きさが有義波高(または風波の有義波高)に対応し て小さくなっており、海面風応力による乱流エネルギー の供給と区別できる可能性が示唆される.しかし、観測

を増やしていくことが次年度以降の課題である. このような,波浪と海面直下の乱流強度変化の関係を GNSSの反射波によって観測される海面状態変化と対応 させることが可能であるかどうかについて調査した.海 上風と波浪の関係に着目すると,Mean Sea Surface (MSS)との対応関係が重要であるといわれている.Chen et al. (2016, JGR-Ocean, doi:10.1002/2016JC011661)は, 外洋における波浪ブイの観測から,うねりの影響は風波 の MSS に正のバイアスを与えると指摘している.しか し,この根拠となる現場観測は1次元波浪スペクトルの みを根拠としており,風波とうねりの分離に問題があっ

ケースの蓄積は不十分であり,時間的に連続な観測結果

た.2 次元スペクトルに基づいて分離した,全波浪,風波成分,う ねり成分のそれぞれの MSS と海上風速の関係を図4に示す.長崎 丸では3個の波浪データしか得られていないため,参考のために, これまで解析した白鳳丸航海(KH-14-1)における波浪データも示し た.風速と MSS は正相関の関係にあるが,ばらつきは大きい.こ れは過去の研究でも指摘されているが,うねりと風波を2次元スペ クトルに基づいて分離すると,うねり成分の MSS は非常に小さく, 全波浪の MSS と風波成分の MSS がほとんど一致している.両者の 差はほぼうねり成分の MSS で説明でき(図非表示).この性質は両 観測で共通している.長崎丸観測における MSS は KH-14-1 の観測 よりも小さいことがわかるが,これが急激に発達しつつある風波の



図1:長崎丸観測時の2次元波浪スペクト ル.15:42からそれぞれ20分間のデータに 基づいて計算した.黒丸はうねり, 橙丸は 風波のピークを表す

	表1	観測時の波浪状況		
時刻	風速	有義波高	有義波高	有義波高
	(m/s)		(風波)	(うねり)
14:42	13.3	1.5 m	1.6 m	1.2 m
15:02	12.3	1.4 m	1.4 m	0.9 m
15.22	12.8	1.3 m	1.3 m	1.1 m



図 2:海面下水平流速スペクトル(左から 14:42, 15:02, 15:22からの観測)



図 3:風速と MSS(黒点:全波浪, 赤点:風波,青点:うねり)の関 係.図中の青線で囲った3点が長 崎丸観測のデータを示す.その他 の点は KH-14-1 で得られた結果.

性質を反映したものなのか、うねりの強弱によるバイアス成分によるものなのかについては不明である. 今後は、波齢や個別の海況によって関係が優位に変化するのかどうかについて検討する必要がある.

本研究の成果を含む研究発表

今年度に関しては0件

ハイブリッド式自律型海中ロボットの高度知能化に関する研究

□研究目的

本研究の目的は、海洋環境生態系の モニタリングを行うためのハイブリッド式 自律型海中ロボット(HAUV:Hybrid-type Autonomous Underwater Vehicle) KAUBE-1500の高度知能化を図ることで ある。この機体は、小型高圧海水ポンプを 用いた浮力調整装置と重心移動装置、4 基の 水中スラスターを装備し、水中グライダー としての推進性能と通常の AUV としての 運動性能を持ち合わせている。また、浮力 調整装置と重心移動装置を適切に制御する ことによって、鉛直姿勢での潜入および 浮上を実現することができる。

グライディングから水中(海底)での水平 移動への遷移および鉛直姿勢への円滑な 運動を実現するためには高度な自律性能が 求められるので、その自律制御システムを 確立するためには、深海水槽における多岐 に亘る基礎データの収集・解析が必要 不可欠である。研究代表者らの所属する 大阪府立大学の船舶試験水槽(長さ×幅× 大阪府立大学・大学院工学研究科 有馬 正和



Fig.1 ハイブリッド式自律型海中ロボット KAUBE-1500



Fig.2 小型 AUV

深さ:70m×3m×1.5m)は、海中ロボットの性能評価を行うには幅と水深が不十分であり、 九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実験水槽(長さ×幅×深さ:65m×5m×7m)を 使用させていただくことが本研究の進展に最も有効であると判断した。貴研究所・海洋大気 力学部門・海洋流体工学分野は、海中ビークルの運動制御に関する研究において極めて 優れた実績があり、中村昌彦准教授との技術交流や情報交換によって自律型海中ロボット に係る研究の飛躍的な進展が図れると期待した。平成 30 年度には、KAUBE-1500 を遠隔 操縦(ROV モード)によって制御を行い、2019 年度には自律制御(AUV モード)を 行って、その潜航性能評価のための貴重なデータを取得することができたので、2020 年度 は汎用化された ROS (Robot Operating System) プログラミングによる高度自律制御方式 による潜航試験を行い、最大潜航深度 1,500m の海底調査のための自律型海中ロボットの 実用化を目指した。 実海域で用いるAUVの試験は、実験施設や母船を使用できる機会が限定的であるため、 自律型海中ロボットの自律性能の向上を目指して、小型の水槽でも比較的容易に実験が できる小型 AUV の設計・開発を進めている。本研究では、Fig.2 に示す小型 AUV の潜航 性能を明らかにするための性能試験を実施する。

□研究の成果

本研究では、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽においてハイブリッド式 自律型海中ロボット KAUBE-1500 の水槽試験を実施し、その潜航性能を明らかにすること を予定していた。しかしながら、2020 年度初めより新型コロナウイルス感染症による緊急 事態宣言のため研究活動が大幅に制限されることになった。そのため、KAUBE-1500 の 制御システムの改良を進めることができず、小型 AUV を用いた制御系の確認を行うことと した。小型 AUV の仕様を Table 1 に、潜航試験の様子を Fig.3 に示す。水深 7m での耐圧 性能を確認するとともに、深度計をはじめとするセンサーの校正を行い、PID 制御による 深度・姿勢制御の潜航試験を行った。また、DVL(ドップラー式流速計)の校正を行い、 簡易 SLAM(自己位置推定・環境地図作成)の実現可能性を明らかにした。さらに、小型 AUV のアクリル製耐圧容器の内側に貼付した 4 つの圧電素子でピンガーの音響信号を受信 し、到達時間差(TDOA: Time Difference of Arrival)から音源方向の推定を試みた結果、 若干の誤差があるものの信号処理を行うことで実用範囲になることを明らかにした。

Length	1.3 m	
Breadth (wing span)	0.52 m	
Height (including upper rudder)	0.15 m	
Diameter of fuselage	0.15 m	
Mass	$16.95~\mathrm{kg}$	
Displacement	16 l	

Table 1 Specifications of small AUV.



Fig.4 小型 AUV の潜航試験の様子
□研究組織

氏 名	所 属	職 名	役割・担当分野
有馬 正和	大阪府立大学・ 大学院工学研究科	教授	代表者・総括、実験計画
宮澤 佳奈	大阪府立大学大学院	修士2年生	小型 AUV および DVL の性能 試験
竹川 源太郎	大阪府立大学大学院	修士1年生	小型 AUV の制御性能評価
伊藤 蒼馬	大阪府立大学大学院	修士1年生	水中音響観測実験
中村 昌彦	九州大学・応用力学 研究所	准教授	所内世話人

□研究成果の報告について

- 宮澤 佳奈:非線形モデル予測制御を用いた自律型海中ロボットの制御に関する 研究、 大阪府立大学大学院修士論文、2021.02
- 佐々木 敬涼:自律型海中ロボットの障害物回避手法と簡易型SLAMの開発に関する 研究、大阪府立大学大学院修士論文、2021.02
- 宮澤 佳奈,有馬 正和,谷口 友基,梅田 隼,藤原 敏文:非線形モデル予測制御に よる自律型海中ロボットの潜航シミュレーション、日本船舶海洋工学会論文集 (投稿中)

以上

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,この矛盾は従来の理論の枠組みでは説 明することができない。黒潮の季節変動は,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いう考えから、本研究で はエネルギー遷移から乱流散逸へと至る仕組みに関して、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」KG2015 航海(2020年11月15-24日)において、トカ ラ海峡の黒潮流軸付近に位置する海山(平瀬)上で生じる流れと地形の相互作用を明らかにするため、自由 落下曳航式乱流計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。黒潮の平均的な流軸に沿って平瀬を北西-南東方向に縦断 する断面において、トカラ海峡で卓越する半日周潮の潮時に合わせた観測(12時間の間に4回の繰り返し断 面観測)を11月16日と20日に行った。また、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125-134度、北緯27.5-32.5度を計算領域とし、海洋データ同化モデル DREAMS (DR_M, Hirose et al. 2013)から2020年11月16-30日の平均的な海面高度、水温・塩分、流速を初期条件と開 境界における緩和条件として与え、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高精度に再現するために、東経129.9-130.3度、北緯29.9-30.3度、海面から420m深 までの範囲で格子幅を水平100m、鉛直5mとし、そこから開境界および底境界に向かって水平約2km、鉛 直170mに格子幅を徐々に拡張した。数値モデルの粘性・拡散に関しては、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、水平 粘性・拡散係数は1m²s⁻¹で一定とした。

結果 11 月 16 日には黒潮が平瀬周辺を東向きに流れており黒潮と観測断面の向きが一致しなかったが、20 日には黒潮は南東向きに偏向し、概ね断面方向に流れていた。11 月 20 日は 8、11、14、17 時から断面観測を 開始し、それぞれ満潮前、満潮後、干潮前、干潮後に対応していた(図 1a)。断面における流れには黒潮が支 配的であったが、潮時に伴う変化も見られた(図 1b-i)。例えば 1 回目の断面観測時には、表層における南東 向き流と 200-300 m 深における北西向き流が強く傾圧性が強かったが(図 1b,f)、約 6 時間後の 3 回目の断面 観測時には、この傾向は弱まっていた(図 1d,h)。この変化は半日周期の順圧潮汐流では説明できず、内部潮 汐によるものだと推測される。また、11 時からの断面観測時には、平瀬下流(x=6-8 km)の表層 10-80 m で 流れが周囲よりも弱まるとともに、等密度面が下方に下がる内部跳水様の構造が見られた(図 1g)。乱流運動 エネルギー散逸率は、平瀬の下流側の水深 100 m 以深を中心に 10⁻⁶ W kg⁻¹ を超える値が 1 潮時を通じて観 測され(図 1 j-m)、鉛直・断面平均した値では 1,3,4 回目がそれぞれ 1.0×10⁻⁶, 1.1×10⁻⁶, 1.2×10⁻⁶ W kg⁻¹ と同程度であり、2 回目が 0.6×10⁻⁶ W kg⁻¹ であった。音響散乱強度には、平瀬の頂上と下流側に Kelvin-Helmholtz 様の不安定構造が潮時を通じて認められた(図 1 n-q)。以上のように、観測からは絶えず不安定が 生じている様子とそれに伴って大きな乱流エネルギー散逸が生じている様子が捉えられた。

数値モデルで計算された 11 月 20 日における平瀬上の流れには、黒潮が現実よりも東偏し流速も大きいといった点で課題が残ったが(図 2)、潮位変動の再現に関しては良好であった。黒潮と成層の条件が異なるため観測とモデル間の比較には注意を要するが、黒潮の流軸に沿う方向の断面で見ると 11 時頃に内部跳水様の構造が見られる点では一致していた。数値モデルで計算された乱流運動エネルギー散逸率は、モデルはシア不安定を解像できないため観測よりも小さい傾向であったが、平瀬下流側の密度躍層(~24 σ_θ)で対流不安定によってエネルギー散逸が強化される点は、観測と一致する傾向が見られた。

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 11月20日にトカラ海峡の平瀬上で実施した自由落下曳航式乱流計を用いた繰り返し観測結果。(a)種子島験潮所における潮位(青線)と観測時刻(橙)。(b-e)海底地形と観測断面における表層流速ベクトル、 (f-i)5分毎に平均した流速の断面に沿う方向成分、(j-m)乱流運動エネルギー散逸率、(n-j)120-kHz計量魚探装置による音響散乱強度。図 f-q 中の横軸は船の航跡に沿った距離を示し、等値線は海水密度(の)を示す。



図 2 数値モデルによる平瀬上の流れと乱流運動エネルギー散逸率の 2020 年 11 月 20 日 (a,e,h) 9 時、(b,f,j) 12 時、(c,g,k) 15 時、(d,h,l) 18 時における計算結果。(a-d) 海面流速の水平分布、(e-h) 断面に沿う方向の流速の 鉛直-水平断面分布、(i-l) 乱流運動エネルギー散逸率の断面分布。断面の位置は図 a-d 中の破線で示される。



プレスリリース

国立研究開発法人 水産研究・教育機構 国立大学法人 九州大学 国立大学法人 東京大学 国立大学法人 愛媛大学 国立大学法人 鹿児島大学 国立大学法人 東京海洋大学

トカラ海峡の岩礁で生じる強力な混合と黒潮の肥沃化 ~世界最大級の乱流混合・栄養塩供給のメカニズムを捉えた~

最新の計測技術を駆使した調査により,急峻な地形(岩礁)の背後で黒潮内部に生じる強力な 乱流の発達過程や,それに伴う栄養塩の表層への鉛直輸送の観測に成功しました。この肥沃効 果は驚くほど大きく,黒潮の豊かな生態系の根幹を支えていると考えられます。

黒潮の豊かな生態系の維持に不可欠である下層から光合成可能な表層への栄養塩供給機構を解明する ため、水産研究・教育機構、九州大学、東京大学、愛媛大学、鹿児島大学および東京海洋大学の共同研 究チームは、鹿児島県南方沖のトカラ海峡を黒潮が通過する際、急峻な地形により攪拌されることで、 どれだけの量の硝酸塩(植物プランクトンの成長に必要な栄養塩の一つ)が光合成可能な表層へと輸送 されているかを、最新の計測技術を駆使して調べました。その結果、黒潮がトカラ列島の岩礁にぶつか ったときに生じる強力な乱流と湧昇効果の詳細を捉えることにより、乱流による下層から表層への硝酸 塩の鉛直輸送量を正確に計測することに成功しました。計測された硝酸塩の表層への鉛直輸送量は、年 間最大で1平方キロメートル当たり約2万トン(黒潮流域の約3千トンの魚類生産を支える値)^{補足1-2} と、これまで世界の海で報告された輸送量の中でも最大規模のものです^{補足3}。この結果は、黒潮の流路 上に存在する島や岩礁・海山などの急峻な地形により引き起こされる乱流混合や湧昇による表層への 栄養塩の供給が、黒潮の豊かな生態系の維持に重要な役割を果たしている可能性を示しています。

この研究成果は、2021年3月25日午前9時(米国東部夏時間、日本時間25日22時)に米国地球物理 学連合速報誌 Geophysical Research Letters にオンライン掲載されました。

本研究は JSPS 科研費 JP15H05818, JP15H05821, JP18H04914, JP16H01590, JP18H04920 の助成を受け たものです。

2021年3月27日

【新聞】 南日本新聞

尼哥 新下 第3種郵便物認可 トカラ海峡周辺の 練習船上 乱流の仕組み 岩 碓 海峡の ラ 乱流で 栄養塩 が上昇 ぶつかり 黒潮 乱流計 検養分が浮上 平瀬 域で取れる約3千少の り約2万シで、世界最 間最大1平方でが当た る「栄養塩」の量は年 ろ、光合成する植物プ 度計で計測したとこ り、砕ける際に局所的 さ約60 於に及ぶ波を作 を調査。黒潮は深さ1 ある岩礁「平瀬」周辺 研究・教育機構などの ランクトンを増殖させ 生させていた。 にぶつかって海中に高 50
が付近で
岩礁など 年から、鹿大練習船「か 共同チームは2016 でロ之島の北東15世に 入規模だった。黒潮流 上昇する強い乱流を発 にかき混ぜられながら こしま丸」の海洋観測 豊富な栄養分を海面近くに上昇させる強力な「乱流」の発生を確認したと発表した。論文は米 26日、十島村口之島沖のトカラ海峡の岩礁など急峻な地形に黒潮がぶつかり、世界最大級の 乱流計や硝酸塩の濃 鹿大、九州大、水産 国地球物理学連合速報誌「ジオフィジカル・リサーチ・レターズ」の電子版に掲載された。 鹿大チ・ 日本近海や太平洋を流れる暖流「黒潮」の研究を続けている鹿児島大学などの共同チームは 14 魚類生産を支える値と一い発生の仕組みと魚類 持に重要な役割を果た が多いトカラ海峡は黒 理学=は「浅くて岩礁 なっている。 潮の豊かな生態系の維 啓彦教授(56)=海洋物 している。乱流の詳し 強力な 鹿大水産学部の中村 とされてきた。共同チ 分が乏しく「海の砂漠」 鎖を解明したい」と話 まる謎「黒潮パラドッ した。 ームは、アジなどが集 生産につながる食物連 黒潮はかつて、栄養 ランクトンを動物プラ クス」の解明に向けて 調査。増殖する植物プ かにし、黒潮が餌の宝 連鎖」の仕組みを明ら る「目に見えない食物 庫と証明している。 ンクトンがすぐに食べ

(永井貴士)

認

対馬海峡から日本海南西海域にかけての海洋環境モニタリング

長崎大学 滝川哲太郎

1. 目的

対馬海峡東水道を通過した対馬暖流沿岸分枝は山口県見島周辺を通過している。2012 年 8 月下旬から、沿岸の青海島と沖合の見島の間の水位差(青海島-見島)を観測している(Takikawa et al., 2017)。 令和 2 年度の報告(A-18)では、この水位差と船舶観測で得られた流速データを用いて、青海島-見島間を通過する海水の流量の見積もりについて説明した。

今回、水位計の内部電池の消耗により、時系列観測データが途切れることになった。この状況を報告 するとともに、これまでの青海島-見島間通過流量データをまとめる。

2. 観測・データ解析

青海島通と見島宇津に水圧式の小型水位計(Rugged TROLL100, In-Situ 社)を 2012 年 8 月下旬から設置し,10 分間隔で 2 測点の水位を観測している(図1)。2020 年 9 月に、現地でデータ収集を行ったと

ころ、水位計の内部電池を消耗しており、 途中で観測を終了していた。青海島と見島 の水位計は、それぞれ 2019 年 12 月上旬 と 11 月上旬までデータを記録しており、 約7年半、連続稼働していた(**表**1)。こ の水位計の電池は交換できないため、同一 機種の水位計を再設置し、2020 年 9 月か ら観測を再開した。

令和 2 年度報告 (A-18) と同様に、水 位差 Δη から青海島--見島間通過流量 *T* を見積もった。ただし、船舶 ADCP データ の期間 (2012 年 10 月~2019 年 10 月) を追加し、推定式を修正した。

 $T = 0.0365 \Delta \eta - 0.479$ … (1) 旬ごとの流量を**表 2** に示す。



図1. 青海島 (Ohmijima) と見島 (Mishima) の位置 (O)。 縦線は ADCP 定線で、流量を見積もった範囲を示す (北緯 34 度 33 分~34 度 46 分)。等値線は 20 m 間 隔の水深を表す。

表1. 各測点の水位計(Rugged TROLL100)のシリアル番号(S/N)、製造年月、観測開始・終了年月。

観測点	S/N	製造年月	観測開始	観測終了
見島	304352	9019年1日	0010年0日	2019年11月
青海島	304367	— 2012 平 1 月	2012 平 8 月	2019年12月

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)
福岡県 水産海洋技術センター	林田宜之(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)
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)

		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1月	上旬		0.026	0.045	0.081	0.071	0.096	0.210	0.077
	中旬		-0.025	0.041	0.062	0.043	0.100	0.206	0.070
	下旬		0.001	0.031	0.046	0.022	0.119	0.176	0.049
2月	上旬		0.029	0.060	0.027	0.045	0.098	0.193	0.063
	中旬		0.003	-0.129	0.074	0.055	0.088	0.136	0.044
	下旬		0.020	0.048	0.040	-0.002	0.083	0.145	0.041
3月	上旬		0.061	0.043	0.058	0.026	0.149	0.099	0.049
	中旬		0.033	0.081	0.095	0.037	-0.003	0.050	0.108
	下旬		0.050	0.116	0.091	0.061	-0.039	0.198	0.111
4月	上旬		0.062	0.118	0.024	0.091	0.022	0.220	0.088
	中旬		0.091	0.058	0.105	0.119	-0.009	0.168	0.065
	下旬		0.067	0.103	0.113	0.138	0.051	0.187	0.076
5月	上旬		0.072	0.109	0.113	0.146	0.122	0.177	0.084
	中旬		0.066	0.123	0.104	0.167	0.167	0.144	0.089
	下旬		0.085	0.139	0.131	0.172	0.162	0.206	0.143
6月	上旬		0.097	0.142	0.028	0.093	0.192	0.181	0.114
	中旬		0.181	0.144	0.037	0.141	0.173	0.167	0.079
	下旬		0.147	0.150	0.050	0.169	0.202	0.220	0.071
7月	上旬		0.160	0.140	0.059	0.142	0.330	0.164	0.086
	中旬		0.219	0.179	0.048	0.202	0.458	0.215	0.100
	下旬		0.385	0.144	0.118	0.092	0.365	0.213	0.141
8月	上旬		0.499	0.100	0.229	0.069	0.171	0.134	0.092
	中旬		0.331	0.151	0.163	0.094	0.231	0.054	0.103
	下旬		0.073	0.183	0.171	0.067	0.315	0.091	0.214
9月	上旬	-0.013	-0.091	0.062	0.106	0.137	0.204	0.113	0.165
	中旬	-0.031	-0.079	0.026	0.047	0.060	0.147	0.088	-0.067
	下旬	-0.024	0.017	0.085	-0.054	0.055	0.290	0.107	0.099
10月	上旬	0.052	0.127	-0.062	0.013	0.145	0.252	0.052	0.196
	中旬	0.020	0.078	-0.027	0.017	0.109	0.222	0.045	0.050
	下旬	0.062	0.107	0.106	-0.042	0.116	0.221	0.083	0.125
11月	上旬	-0.007	0.177	0.097	-0.007	0.125	0.220	0.000	
	中旬	0.042	0.103	0.057	0.008	0.084	0.188	0.008	
	下旬	0.032	0.109	0.029	0.037	0.083	0.222	0.021	
12 月	上旬	0.069	0.132	0.115	0.085	0.100	0.185	0.013	
	中旬	-0.003	0.096	0.078	0.062	0.055	0.172	0.080	
	下旬	0.036	0.093	0.101	0.034	0.079	0.207	0.081	

表 2. 青海島-見島間通過流量(Sv, 1 Sv = 10⁶ m³ s⁻¹)。東向きを正とする。

2020 AO-11

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年を境に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,その推計には数年を要するとい う問題点がある.この点に対して,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,東アジアスケール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.2019年12月末に中国武漢を発端とした新型コロナウイルスの蔓延によって人間活動 は大きく制限されることとなり,大気汚染物質排出量も大きく変化したことが考えられた.継続3 年目となる今年度は,TROPOMIセンサーによる高解像度データをもとに2020年の NO_x排出量変化 の初期解析を実施し,中国のロックダウン時の越境大気汚染の変化を数値モデルにより示した.

2. 手法

Sentinel-5P 衛星に搭載された TROPOMI センサーによる NO₂ カラム量 (大気柱総量) を用いた. Level 2 の swath データを 0.06°×0.06°の格子点データに変換し解析に用いた.

コロナ禍の越境大気汚染の変化を解析するため、大気化学輸送モデル CMAQ による数値シミュレーションを実施した. 人為起源排出量データはボトムアップ法による HTAP version 2.2 をベースに、2017年の発生源区分別の中国の推計値を適用したものを用いた. さらに、中国の地上観測値の報告結果などをもとに、NO_xおよび SO_x排出量が1月23日から開始された中国でのロックダウン時に半減したと仮定する感度実験を合わせて実施した.

3. 結果と考察

TROPOMIの高解像度データをもとに、九州北部や関西・関東地方を対象に2019年と2020年のNO2 カラム量を比較し、その変化を解析した。わが国では2020年4月7日に7都府県に、4月16日に 全国に緊急事態宣言が発出され、これは5月14日に39県で、25日に全国で解除となったが、この 間NO2カラム量は2019年に比較して2-3割程度低下していたことがわかった。また、このような NO2カラム量の低下は3月2日から実施された小中高の一斉休校時にも見出された。人間活動の変 化とそれに伴う排出量推移を推計することが今後の課題であり、解析を継続する。 わが国の遠隔域(長崎県五島,島根県隠岐,新潟県巻,宮城県箟岳)におけるエアロゾル化学成分 連続自動分析装置(ACSA)による地上観測結果は,2020年1-3月にPM2.5やその構成成分である硫 酸塩(SO4²⁻)と硝酸塩(NO3⁻)の大幅な濃度低下を示した.上述したわが国の排出量変化のほか, 中国のロックダウンの影響を受けた越境大気汚染の変化も考えられる.この点を明らかにするため に CMAQ を用いて中国のロックダウンに伴う排出量変化を考慮しない(気象場の変化のみを考慮) 場合と排出量変化を仮定した数値実験を実施した(図1).SO4²⁻濃度の低下には中国のロックダウン 時の排出量減少の影響が大きかった.一方,NO3⁻濃度の低下には,五島では中国の排出量減少の影 響もあったものの,2020年の気象場の変化が大きく影響していたことが示された.2020年冬季は記 録的な暖冬であり,NO3⁻が粒子化しにくい状況であったことが要因と推察された.



図1. 2020年2-3月平均の(上)硫酸塩(SO4²⁻)および(下)硝酸塩(NO3⁻)の(左)濃度,(中央)気象場の変化による濃度変化,(右)排出量の変化による濃度変化(板橋ら,2020より一部を抜粋し引用).

4. まとめ

TROPOMI 衛星観測データをもとに 2020 年の NO₂カラム量の変化を解析し,また,数値モデルによ り中国のロックダウン時の越境大気汚染の変化を示した.中国のロックダウン時の排出量変化や, 特に緊急事態宣言下のわが国の排出量変化を逆推計手法で高度化する必要があるとともに,これら に伴う大気環境変化を引き続き解明する必要がある.

・参考文献

板橋, 王, 弓本, 鵜野 (2020), 大気環境学会誌, https://doi.org/10.11298/taiki.55.239

係留系観測による豊後水道の底入り潮発生時の力学バランスの見積もり

愛媛大学沿岸環境科学研究センター 森本昭彦

1. 目的

九州と四国の間に位置する豊後水道では、夏季を中心に陸棚斜面付近の冷水が水道内に突発的に進入する「底入り潮」と呼ばれる現象が発生する。豊後水道へ流入する大きな河川がないことから、基礎生産に必要な 栄養塩は底入り潮により水道内へ供給されていると考えられている。底入り潮の報告は1990年代からあり、小潮 期に発生する傾向があることや、底入り潮の発生後に植物プランクトンが増殖することなどの論文はあるものの、 底入り潮の発生メカニズムに関する論文はなく、現在も発生メカニズムは分かっていない。

底入り潮の発生メカニズムが分からない主な原因は、底入り潮が発生する豊後水道陸棚縁および水道内部で の流速観測がほとんど行われたことがなく、底入り潮発生時の流速の時空間変化が分かっていないためである。 本研究では、豊後水道南部の陸棚縁、水道中央部、豊後水道東岸の湾内の海底上にADCP、水位計、水温塩 分計を係留し、同時に海洋レーダや人工衛星データにより黒潮や渦の変動を把握することで底入り潮の発生過 程を観測する。さらに、底入り潮の発生時を狙い、係留点を通る断面上における密度分布観測を7日間連続で 実施し、底入り潮発生時の運動方程式の各項を直接見積もることで底入り潮の力学バランスを明らかにすること を目的とする。

2. 観測・データ処理

豊後水道中央部と豊後水道東岸の湾内の海底上に海 底設置式超音波多層計と水温塩分計を6月16日~9月 15日の三ヵ月間係留した(図1)。流速は海底から鉛直方 向に4m毎の流向・流速を15分間隔で測定した。同時に 水温塩分計により海底上1mの水温と塩分を15分間隔 で測定した。得られた流速、水温、塩分データから潮流に よる変動を取り除くためタイドキラーフィルターを施した。 なお、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い大型の係留 系を設置する予定の船の運航が中止となったため、豊後 水道南部の陸棚縁への機器の係留はできなかった。

底入り潮発生時の水塊構造の変化を把握するため、底 32'37'30" 入り潮が発生する確率の高い7,8月の大潮~小潮となる 時期に計12回の断面観測を実施した(図1)。



図 1.海底設置式超音波多層流速計係留 位置(黒丸)と断面観測点(白丸)

3. 結果と考察

測点 SB における南北流の鉛直分布の時系列と、測点 SB の海底上 1m における水温の時系列を図2に示す。 7 月中旬と8 月中旬に 30~80m において比較的強い北向きの流れがみられるが、底層においては底入り潮と 思われる北向きの流れは観測されなかった。また、水温の時系列を見ても、底入り潮と思われる急激な水温低 下は見られていない。この係留系の結果と豊後水道東岸に設置されている多層水温計のデータから、2020 年 は底入り潮が全く発生しなかったことが分かった。豊後水道底層の水温観測は 1995 年以来継続されているが、 底入り潮が発生しなかった年はこれまでなかった。底入り潮の発生メカニズムはわかっていないものの、底入り 潮の強度と豊後水道への黒潮の離接岸には高い相関があることが知られている。そこで、2020 年の黒潮流軸 位置を調べた。2020 年の春から秋まで、黒潮は足摺岬から南へ約 120 kmの位置を流れ、これまでになく長期 間離岸流路をとっていた。また、愛媛県が毎月行っている CTD 観測結果を解析したところ、2020 年の豊後水道 全域の水温は 4 月~9 月まで全層において約 2℃平年値より低い状態であったことが分かった。豊後水道の 1 年間の海面熱収支は負になることが既往の研究で示されていることから、黒潮の長期的な離岸に伴い、黒潮からの水平的な熱輸送量が減少したことにより2020年の水温が低く推移したと考えられる。

2020年は1995年以降で初めて底入り潮が非発生の年となった。底入り潮は黒潮の接岸に伴う海底境界層 でのエクマン輸送による低水温水塊の豊後水道の輸送や、足摺岬沖のバンプでの湧昇による擾乱が地形性ロ スビー波として西進することで発生すると示唆されている。つまり、底入り潮の発生に黒潮が関わっていることが 示唆されてきたが、黒潮の変動と底入り潮の発生を明確に示したデータは今のところない。しかし、今回の観測 結果は、底入り潮の発生において黒潮の豊後水道への接岸が必要条件であることを示していると考えられる。 実際、研究協力者の前谷が行った数値モデルの出力の解析結果からは、黒潮が高知県の柏島沖で陸棚斜面 を横切ることによって供給された低温水塊が、豊後水道沖の反時計回りの循環流により移流され、黒潮系暖水 の豊後水道表層への貫入による南北の圧力勾配力の減少によって冷水が豊後水道へ進入し底入り潮が発生 することが示されている。このことからも底入り潮の発生において、黒潮がある程度豊後水道に接岸することが必 要条件となっていることが分かる。

本研究では、底入り潮発生時の流速や密度構造の変化を観測により捉え、そのデータから運動方程式の各項 の時間変化を調べることで底入り潮の発生メカニズムを明らかにすることを目指した。しかしながら、新型コロナ の影響により予定の係留観測ができなかったことと、底入り潮そのものが発生しなかったため目的を達成するこ とができなかった。しかしながら、数値モデル解析をかなり進めることができ、数値モデル内での発生メカニズム について調べることができた。今後は、今回と同様な観測を実施することで実際の底入り潮の発生メカニズムを 明らかにしていく予定である。



図 2. 測点 SB における(a)南北流速鉛直分布の時系列と(b)海底上 1m における水温の時系列

4. 研究組織

愛媛大学沿岸環境科学研究センター	森本昭彦	(研究代表者)
愛媛大学大学院理工学研究科	前谷佳奈	(研究協力者)
九州大学応用力学研究所	市川香	(所内世話人)

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、河川海洋相互作用を検証することが可能な、河口域周辺の流れ場と物質循環を忠実に再 現できる数値モデルの構築を目指す。豪雨に伴う河川流出は、陸域環境の変化を引き起こす洪水・濁流 増加に加えて、沿岸域の海洋環境を激変させる。山岳地域や平地を伴う陸域から干潮水域を経て海洋に 至る領域では、水の流れのレジームが劇的に変化するため、これまでの数値モデルでは、それぞれの流 況に特化したモデルが別々に適用されてきた。そのため、特に河口付近のような河川海洋接合部は、モ デルにおける擾乱の伝搬方向の解析可能範囲の違いにより、十分な解析ができない領域となっていた。 この問題に対して、これまで等密度面モデルを提案し(Kida & Yamashiki, 2015)、河川と海洋をシーム レスに接続した九州地方を中心とした河川・海洋モデリングへの応用を進めてきた。さらにモデルに土 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導 入し、水文モデルへの発展的構築を行った。

豪雨時は懸濁物質が陸面からが河川・沿岸域を通じて海洋に流出するのに伴い、栄養塩そして農薬や 汚染物質などが流出し、海洋環境が大きく変化することが知られている。このような複合現象を再現す るため、流況モデルに懸濁物質流出モジュールを融合し、海底堆積物や低次生態系の応答を検証できる モデルを開発する必要性がある。そこで粒子追跡モデルを用いた沿岸域の海洋循環と懸濁粒子の結合モ デル開発するため、河川海洋一体型モデルと沿岸域における粒子追跡手法の導入方法に関する議論を進 め、両モデルの特徴を組み込んだ数値モデルのプロトタイプモデルの構築を目指す。

2. 解析手法

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。

(1)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比較を基に、陸面課程が異なる数値モ デルを構築することで、集中豪雨・台風時に起きた洪水イベントの再現性の依存性を検証する。灌漑水 路・ダム等の影響も検証するため、豪雨時に観測されている一級河川の流量データの収集を行う。

(2)懸濁粒子流出過程の再現に向け、2020年夏季の屋久島で起きた豪雨に着目する。急斜面をもつ島から流出する河川水の空間分布と、現地にて実施した観測データとを比較する。

3. 解析結果

(1) 2015 年 9 月 4 日~8 日に起きた豪雨による流出イベントを再現し、陸面課程の効果を検証した。 まず感度実験の数を増やすため、モデル領域を九州北部に絞った数値モデルを再構築した。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の嘉瀬川・六角川・筑後川にて、主にピーク流量・ピー ク時間を検証した。

陸面課程において降雨は土壌に到達する前に樹木等によって遮断される。そこで降雨が起きていた領 域が主に森林であったことから、一律 60%の雨水が土壌へと到達すると仮定して数値実験を行った。そ の結果、嘉瀬川・六角川ではピーク流量は観測の 50-150%の値が再現できたが、ピーク時間は半日ほど 遅れていた。遅れの要因を検証したところ、数値モデルで考慮にされていた灌漑水路に河川水の多くが 蓄えられているためだと明らかになった。そこで(現実的にはとても細い)灌漑水路は無視した地形を 用いたところ、ピーク時間の遅れは改善された。筑後川では、観測にある降雨直後の流量ピークが再現 されず、降雨から1.5日後に観測と比べて2倍ほどの流量ピークが再現された。降雨直後のピークは強 い雨が降った支流の一つの川幅が広すぎたために流れが遅くなっていたためであることが明らかにな

り、また 1.5 日後の流量ピークは上流域の土壌浸透 の効果を強めることで改善された。陸面課程のさら なる改善が必要なことが明らかになった。

(2)2020 年夏季に発生した屋久島の河川水流出イ ベントを再現し、沿岸域での拡散過程を検証した(図1)。放射状に存在する河川群を通じて河川水の 流出が起きていることが確認でき、特に島の南東部 の河川から勢いよく流出し、より沖合まで拡散して いた。これはおそらく斜面が急なことで流れが急に なり、海水との混合が活発化し、河川水としての流 量が大きくなったためだと推測される。現地で観測 した豪雨後の塩分の低下も、定性的には似た傾向を 示している。今後、より詳細な比較検証が必要であ る。



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確認されたが、河川の流路幅・最大水深を改善することによって 現実的に近いかたちで再現できるようになった。また 100m ほどの解像度では灌漑水路などの現実には より細い流路を含めるとピーク時間が遅れる効果があるため、自然河川部分のみを考慮することで河川 海洋一体型モデルは山地から海域までをシームレスに再現することができることがわかった。実装した 陸面過程を用いた感度実験からは、ピーク流量に加えて初期の流量が増加する際の時系列が土壌過程の パラメタリゼーションに感度が高いことを示していた。今後、屋久島において行った観測も活用した比 較検証が必要である。

5. 研究成果

学会発表

日本地球惑星科学連合大会(オンライン),2019,「九州の領域河川海洋一体型モデルの開発」,木田 新 一郎、堤 隆浩、山敷 庸亮、黒木 龍介

6. 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

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. はじめに

2018年9月4日14時ごろに台風21号(T1821,Jebi)が神戸市西部に上陸し、第二室戸台風(1961年9月16日)を越える過去最高潮位をもたらした。図1(a)に示す大阪湾奥に位置する神戸大学深江 キャンパス内にある図1(b)の港(以降、深江港)でも防潮堤外の建物が浸水した。14時16分に最 高潮位305 cmを記録し、天文潮位からの偏差は258 cmだった。この水位は防潮堤よりも低く、越流 はしなかったが、高波と防波堤への打ち上げにより越波した。まあ、キャンパス横の高橋川を海水 が遡上、氾濫し、図1(c)に示す赤枠の域が浸水した。深江港入口である高橋川河口の海底上50 cm には総合水質計が設置されている。



(c) Seawall, survey points and so on around Fukae harbor.

(b) Area of inundation of Takahashi River basin and Fukae Harbor, and level measurement positions.

Area of (



2. ハザードマップとの比較

高潮以前に、神戸市は高潮ハザードマップを公表していなかった。図 1(c)の色は津波ハザードマ

ップ(最大級の津波による浸水想定区域)を示している。また、黒の 点線は河川洪水による浸水想定区域、青の点線は内水氾濫による浸 水想定区域で、今回の高潮による浸水域の南部は内水氾濫や津波に よる浸水域に、南部は河川洪水の浸水域と一致している。災害ごと に予測が異なるものの浸水源は全て高橋川なので、特定の災害のハ ザードマップだけでなく、類似災害も参照し、リスク管理する事が 望ましい。

今回の高潮は、南海トラフ地震による津波の予測値を下回ってい る。一方で、神戸市が高潮後の2019年9月に公表した高潮による浸 水域の範囲は、図2(c)の赤の点線より南側である。「想定される最 大の高潮は、防潮堤などの施設では防げない」と説明している。2018 年の年間最大予測潮位は9月11日で、高潮時よりも54 cm高い。今 回の高潮時の深江港の防潮堤の余剰高さは46 cmであったため、年間 最大潮位時に高潮が発生した場合、越流した可能性がある。天文潮 位が大きくなる時期は夏季で、温暖化に伴い台風は強化される。台 風による高潮は、現在の津波対策では防げない可能性がある。

3. 高潮発生時の水質変化

図2は上から、水位、水温、塩分、密度、pH、濁度、酸化還元電位、 酸素飽和度、懸濁物質濃度、溶存物質濃度の高潮発生日の時間変動で ある。14時前から急激に水位が上昇しており、これと共に濁度と懸濁 物濃度の変動が大きくなったが、顕著な濃度変化は見られない。他の 項目は、最高潮位からの潮位低下時に変動が見られた。16時ごろに、 水温が極大となり、塩分と密度が極小となると共に、溶存物質濃度が 極小となり、pHと酸素飽和度が極大となった。酸化還元電位は、還元 的な状態から、極めて酸化的な環境に変化した。これらの事から、水 位上昇に伴い海水が流入して海底付近の高濁度層が擾乱を受け、その 後の水位低下に伴って河川水が流入し、酸素が供給されて酸化的な環 境に変化したと推定される。一方で、pH が海水寄りのアルカリ性に変 化したことは説明できないため、検討が必要である。

5. 成果公表

• M. HAYASHI *et al.*, Storm Surge Disaster Caused by Typhoon Jebi, T1821, at Fukae Harbor in Japan, Transactions of Navigation Vol.6 No. 1, 2021(in press)

 ・林美鶴、他、神戸大学で発生した台風 Jebi(T1821)による高潮の実測 値に基づく解析」JpgU-AGU Joint Meeting 2020

・林美鶴、他、阪神港神戸区深江における台風 Jebi(T1821)による高 潮の実測、2020 年度日仏海洋学会学術研究発表会

6. 研究組織

林 美鶴	神戸大学	准教授
作野裕司	広島大学	准教授
磯辺篤彦	九州大学	教授



図2 高潮発生日の水質データ

雲粒子ゾンデを用いた過冷却の水雲の解消過程の解明

防衛大学校 地球海洋学科 岩崎杉紀

目的

本研究の目的は、雲粒の半径が 50 μ m 以上で個数密度が 10⁻⁴ m⁻³以下の薄い絹雲が過冷却の水雲を解 消している過程を、雲粒子ゾンデ CPS、ライダ、気象レーダを用いた観測で解明することである。本報 告書では、この絹雲を Large-and-Sparse particle Clouds (LSC) と呼ぶ。LSC は、衛星搭載ライダ CALIOP では観測しづらく、衛星搭載雲レーダ CloudSat では有意に観測できるため、ライダとレーダは観測に あった方が良い。なお、地上ライダの方が衛星ライダより感度は 1 桁以上良いため、地上ライダでは LSC は観測可能と思われる。

2021 年 3 月 1 日から 13 日、10 分毎に三次元ボリュームスキャンをしている紋別市のドップラレー ダ、mss 社製の可搬型ライダ CL-1 と明星電気社製の雲ゾンデ CPS を用いた LSC 同時観測を北海道の湧別 町で行う予定である。2018 年 3 月の観測までは北海道陸別町の名古屋大学太陽地球環境研究所で CPS 観 測を行った。しかし、陸別町では常時稼働しているライダもあり観測施設は充実しているものの、比較 的内陸のため CPS の落下予想地域が陸地に予想されることが多い、三次元ボリュームスキャンをしてい る気象レーダが付近にない、といった問題点があった。一方、湧別町はドップラレーダから南東に 35km 離れており、ボリュームスキャンで湧別町の上空の降水や降雪の観測に適している。また、過去の風速 データから推測すると、湧別町はオホーツク海に隣接しているため、ゾンデが陸地に落下する可能性は 低かった。2020 年 3 月 9 日から 14 日、湧別町で初めて CPS とシーロメータ (出力の弱いライダ) 試験 観測を行い、観測場の問題点を洗い出した。また、ゾンデの放球に初めて水素ガスを用いたので、その 使用方法の確認も行った。



図1 観測場所の位置関係。ライダ CL-1 観測と CPS 放球場所(湧別町)、紋別 市のレーダはオホーツク沿岸にある。 2018 年 3 月まで CPS 観測を行ってい た陸別町は内陸にある。紋別市の北西 30-40km にあるオホーツク海沿岸の雄 武町でも紋別市のレーダのボリュー ムスキャンで対流圏の測定に適して いる。しかし、そこでゾンデを放球す ると、稚内の北にあるサハリンに落下 する可能性が高くなった。 Google Earth Pro利用。

試験観測の結果

3月11日に通常のゾンデである明星電気社製のRS11Gを放球し、電波が周囲の建物に遮蔽されること

がなく受信できることを確認した。これは、ゾンデの受信アンテナの設置場所は地上しかなく、背の高 い2階建ての建物越しにゾンデから出される電波を受信するため行った。電源はその建物からとり、50 m コードリールで建物から可能な限り離した場所にゾンデ受信機を置き、さらに信号ロスが目立たない 15 mのアンテナケーブルを使用し、建物から65m離した。ゾンデの上昇速度はおおむね3 m/s で、上空 20 km で放球場所から北東に距離170km でゾンデの信号が途絶えた。用いたブラウンアンテナは、カタ ログ値では距離100km まで受信ができるとなっていたので、予想以上に信号が取得できたといえる。

風船の充填ガスは水素を用いた。通常、研究用のゾンデで用いられるガスはヘリウムであり、水素は 静電気の除去が確実にできる施設の整った気象台でしか放球に使わない。しかし、この数年はヘリウム の需要と供給のバランスが崩れ、産業や医療用に優先的に販売されるため、ヘリウムは手に入れにくい。 ガスを気球に入れている間、水素検出器(テストー社製 316-2)を用いて水素の漏れ具合を調べ結果、 ガスをどのように入れても水素が継続的に漏れることが分かった。漏れる箇所は、風船の口管付近と思 われたが特定はできなかった。水素は4%以上で爆発する可能性があるが、最も濃度が高くなっていた気 球の下半分のごく近傍でも2%程度だった。ただし、水素ガスをためないため上に屋根がない野外でガス 充填をすること、静電気対策を行うことが必要であることが分かった。静電気対策は、静電靴を履き、 静電気除去バンドを手首に巻いて行った。また、サンハトヤ社製の静電気探知機 EG-1 で周囲に静電気 が帯電していないことを確認しながらガスの充填を行った。なお、CPS も含め各種ゾンデを制作する明 星電気の水素ガス利用の手引きも静電シートをガスボンベの下に敷く(今回行ったガスボンベを地面に 直置きすることと同じ)以外はほぼ同じである。

3月12日の夜に CPS ゾンデを放球した(図2)。高度5.8kmと8.7km 付近に未飽和ではあるが周囲より高い相対湿度の層があり、それに対応して雲粒が計測されていた。ただし、CPSの測器の特性上、低速で上昇させた方が感度が良いのだが、上昇速度が1.3m/sと遅かったため、二項検定によるノイズ処

理を行えなかった。CPS の感度・風向風速と CPS 上昇速度・ アンテナゲインを考慮してガスを充てんする必要がある。

成果報告

Iwasaki and Yamaguchi, Morphology and microphysics of cloud particle of Jumping Cirrus clouds measured by Himawari-8, American Geophysical Union Fall meeting, December 12, Online.

謝辞

本研究の一部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。湧別町レイクパレスの安孫子 氏には観測全般のサポートをして頂きました。湧別町役 場・商工観光課の藪係長には地元の方や漁業関係者に観測 の説明をして頂きました。サロマ湖養殖漁業協同組合の阪 ロ耕一研究指導部長には観測場所の相談や各漁協の方々 に観測の説明をして頂きました。紋別市役所・観光交流 推進室の岩本勉之博士には紋別市が運用するドップラ レーダの説明やデータ提供をして頂きました。



図 2 3月12日に放球した CPS データの 雲粒の個数密度、水に対する相対湿度、気 温の鉛直分布。

高度な氷晶モデルに基づくライダ/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、散乱計算手法などについて打 合せ等で検討し、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

昨年度に引き続き,氷晶モデルによるライダ単散乱特性について,六角柱や六角板・ドロクスタル形 状の氷晶に加えて,[4]によるボロノイ型不規則形状粒子モデルの大規模散乱計算を実施した。ボロノ イ形状粒子による 3 次元ランダム配向後方散乱特性を開発した改良型幾何光学近似法 (Geometrical Optics-Integral Equation: GOIE) [2,3]を用いて計算しデータベース化した。また,新たに 2 次元配向 を考慮したボロノイ型粒子の散乱特性を加えることによりデータベースの拡張を行った。得られた結果 から粒子形状と観測量との関係を解析し,ライダ比と偏光解消度の情報が粒子形状と配向の抽出に有益 である事などを新たに示し,国際学会誌で発表した[1]。

これら得られた成果は、日欧共同衛星 EarthCARE に搭載予定の高分解スペクトルライダや地上設置型 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研究に資することが期待できる。



図. ボロノイ型不規則形状粒子の2次元配向の様子。長軸が水平方向になるような安定姿勢から、 確率分布に従ってQだけ傾ける。

Ζ

・成果報告

査読付き論文

 Okamoto, H., K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova, 2020: Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for space-borne polarization lidar applications. Optics Express, 28, 29178.

学会発表(主著) 発表なし

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

浅海域用水中グライダーの動作試験と運用に関する研究

長崎大学·水産学部 森井 康宏

1. はじめに

す。

環境変化の予測、環境保全に関する研究のため には、深い海域だけでなく沿岸の水深 50m 以浅の 超浅海域の海洋データも必要である。従来の手法 としては係留ブイや観測船による観測が考えられ るが多点観測に時間がかかりコストも非常に高い。 そこで、浅海域で使用可能な水中グライダーを開 発し、観測コストの低減を図りたい。水中ビーク ルの開発には模型による水槽試験のみならず実機 を使用した水槽試験や実海域試験が不可欠であり、 開発を行うビークルの運動性能や制御性能に関す る試験を共同で実施する。

本年度は、ラダー付き垂直尾翼やスラスターが 取り付けられた円盤型水中グライダー実機を使用 して深海機器力学実験水槽において滑空中の針路 保持試験、浮上中の船首方位変更制御試験、実海 域における動作試験を実施した。

2. 円盤型水中グライダー実機の概要

円盤型水中グライダー実機の外観・構造を Fig.1 に示



Fig.1 円盤型水中グライダー実機の外観・構造

3. 円盤型水中グライダー実機の水槽における滑空 中方位維持制御試験

Fig.2 に水槽中を滑空するビークルを示す。Fig.3 は外 乱を与えて針路保持制御を行った場合の水槽試験 結果である。滑空中は縦方向の運動と横方向の運動 の連成が強いため、多入力多出力系の制御方法が有 利であり、LQ 制御が採用されている。外乱として は、水深が2mを超えた後にパルス状の力でビーク ルに取り付けられた安全索を引き、パルス状の回頭 モーメントを加えている。LQ コントローラは外乱 を抑制し、ビークルは制御を開始した時の針路を維 持していることがわかる。計算結果は実験結果によ く一致し、シミュレータは実験結果をよく再現でき ることが確認された。







4. 浮上中の円盤型水中グライダー実機の水槽にお ける船首方位制御試験

船首方位制御試験結果を Fig.4 に示す。水面浮上 時の船首方位制御はビークルの回転とそれ以外の 運動の連成が小さいため、簡易な PID 制御が採用さ れている。回転を始めた直後に推力が飽和している が、制限いっぱいの推力を使用して 90 度・180 度 の回転に成功している。オーバーシュートが若干大 きいのは、波浪に対するスラスターの応答を小さく するために微分ゲインを小さく設定しているため である。計算結果は実験結果とよく一致している。



Fig.4 円盤型水中グライダー実機の船首方位制御

5. 実海域における動作試験

実海域試験が2020年12月21日、長崎新漁港沖 (Fig. 5) において実施された。



Fig.5 動作試験実施海域

本試験において、船尾に吊り下げられたケージ内 に安全索と滑車を使用してビークルを取り込み回 収する方法が考案され、うまくビークルを回収でき ることが実証された(Fig. 6)。

Fig.7に実海面上でビークルを90度回転させた時 の試験結果を示す。ビークルは設定最大推力で回頭 しようとしたが、90度に達していない。安全索の 影響が大きかったと考えられる。今後の課題とした い。なお、ビークル管制プログラムのバグのため、 潜航滑空中の方位維持制御試験は実施することが

できなかった。



ビークルに取り付けられた安全索

Fig.6 考案されたビークル回収方法



Fig.7 実海域における船首方位制御試験結果

6. 研究組織

- ·研究代表者
- 森井康宏(長崎大学水産学部) ·研究協力者 山脇信博(長崎大学水産学部) 清水健一(長崎大学水産学部) 木下宰 (長崎大学水産学部) 内田淳(長崎大学水産学部) 八木光晴 (長崎大学水産学部) 青島隆 (長崎大学水産学部) 合澤格(長崎大学水産学部) 眞角聡(長崎大学水産学部)
 - 保科草太 (長崎大学水産学部)
 - 中村昌彦 {所内世話人}、野田 穣士朗 (九州大学応用力学研究所)

海洋モデルを用いた、河川流量の変化が富山湾の海洋構造に 及ぼす影響のシミュレーション

富山県農林水産総合技術センター水産研究所 小塚 晃

1. 目的

富山湾では、定置網漁業を主体とした沿岸漁業が盛んである。漁獲物は秋から冬にかけて日本海を南下する際に富山湾に来遊する魚種が多く、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、能登半島が南下経路を物理的に遮断するだけでなく、避寒目的で南下する生物にとっては水温等の海洋環境も影響すると考えている。

富山県農林水産総合技術センター水産研究所では富山湾とその周辺海域の海洋観測を毎月実施し、冬季の湾奥部では、湾口部に比べて約 0.5℃程度温かい暖水域が形成されることがわかった。この原因として湾奥部は河川水の影響で海面冷却が遅れるためと考え、海洋同化モデル DREAMS_M において河川の有無のモデル実験を行い、湾口部と湾奥部において水温差が再現されることを示した。本研究では、富山湾奥の暖水域の出現に河川水以外の要因として、風の有無が影響することを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 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)とし詳細に計算した。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(小矢部川、 庄川、神通川、常願寺川、黒部川)に対して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 km程度掘り込み、実際の河口での水の混合を再現した。風は今回の 実験では、図1の領域においてのみ変化させた。

2017 年 9 月1日~12 月 31 日の期間に対して、河川水の有無、風の有無を組み合わせ、4 パターンの設定 で計算を行い、湾奥部の1地点(北緯 36.867 度、東経 137.083 度)における水温鉛直分布の時間変化を 調べた。

3. 結果および考察

能登半島沖の石川県舳倉島と富山湾奥部に位置する伏木における平均風速をみると、年間を通して舳 倉島は伏木よりも風が強く、冬季では平均風速が 8m/s を超え、夏季に 5m/s 前後となった(図 2)。伏 木では、年間を通して平均風速が 5m/s 以下であった。舳倉島の風速にみられる顕著な季節変動は、冬 季に卓越する北西季節風の影響を表している。一方、伏木において明確な季節変動が見られないのは、 能登半島や富山県西部の山脈により冬季の北西季節風が遮られ、風が弱まることが考えられる。これら のことから、DREAMS_K の計算領域である富山湾内の海上において、能登半島沖に比べて弱い風が吹 くと推測される。

河川がある場合における、風がないモデルとあるモデルの湾奥部における鉛直水温の差をみると、水 深 80m より浅い表層部において、水温差が大きかった(図 3)。10月の水深 20m 付近において、2℃以

84

上の正偏差がみられた。これは 2017 年 10 月に上陸した台風 21 号による風の影響を示していると考え られる。11 月の水深 10m 以浅の表層付近にみられる大きな負偏差は、風がないために温度の低い河川 水が混合せずに成層している影響と考えられる。10 月から 12 月の期間を通して、60m 以浅では偏差が 0℃以上であることが多く、富山湾内の比較的弱い風によっても海洋が冷却されていることがわかった。

次に、河川がないとした場合における、風がないモデルとあるモデルの湾奥部における鉛直水温の差 をみると、100m以浅において正偏差と負偏差が同程度みられ、12月後半には負偏差であった。(図4)。 図3と図4を比べると、図4では水温差0℃の等値部分が縦縞上に同日に現れている。これは、表層に 河川水がないことにより、風による海面冷却と鉛直混合が直ちに数十 m の水深まで影響するためと考 えられる。

冬季の富山湾奥部に暖水域が形成される過程において、河川の有無だけでなく、風により鉛直混合が 進行することで、暖水域の水温が変化することが明らかとなった。今後、富山湾奥部における水温に与 える影響について、河川水量と富山湾内の風の強さとの関係も検討したい。



図1. 計算領域と河川等の位置図



図 3. 河川がある場合における風の有無による水温差

4. 発表等実績.

なし

5. 研究組織

研究代表者	富山県農林水産総合技術センター水産研究所
所内世話人	九州大学応用力学研究所
研究協力者	九州大学応用力学研究所



図 4. 河川がない場合における風の有無による水温差

小塚	晃	主任研究員
広瀬	直毅	教授
千手	智晴	准教授

九州北部地方におけるエアロゾルの光学的特性の長期変動

富山大学学術研究部理学系 青木 一真

要旨

時空間変動が大きい特徴をもつ大気エアロゾル粒子は、大気環境の悪化のみならず、喘息疾患 や心疾患をはじめ健康影響など多義にわたり我々の生活に影響を及ぼしている。九州北部地方は、 大陸から越境する汚染物質、黄砂粒子、森林火災などの影響を受けやすい場所と知られている。 2003年から九州大学応用力学研究所の屋上にて、大気中に浮遊するエアロゾル粒子の気候影響を 研究するため、太陽放射観測を行っている。エアロゾルの気候影響解明はもちろん、数値モデル や衛星観測の精度向上など利用している。本研究は、九州北部地方のエアロゾルの光学的特性の 長期変動について研究を進めてきた。しかしながら、2020年度はCOVID-19の影響により、研究遂 行に支障があったこともあり、COVID-19の大気への影響を含め、エアロゾルの光学的特性の変動 について示す。

1. はじめに

九州北部地方の大気中に浮遊するエアロゾル粒子の長期変動は、中国の排出量の変化も影響し、 近年わずかながら減少傾向にある。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、地球の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。本研究の目的は、長期的に観測されてきた観測データをもと に、衛星観測や数値モデルも含め、再解析を行い、九州北部地方の大気中に浮遊するエアロゾル 粒子の光学的特性の長期変動について研究をすすめる。また、気象衛星「ひまわり8号」や201 7年12月に打ち上げられた「しきさい(GCOM-C/JAXA)」から、今まで以上に精度の良い結果が 得られてきているので、時間・空間分解能の高いデータにより、数値モデル(SPRINTARSなど)な どの精度向上につなげ、地球の気候影響の解明につながればと考える。2020年度は、COVID-19の 影響により、私たちの生活様式も激変し、大気にどのような影響が見られたかも調査する。

2. 観測·解析概要

エアロゾルの光学的特性の観測は、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、今まで通り継続して行う。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2020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。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、2019年と同じよ うな季節傾向が見られた。COVID-19の影響による中国国内の経済活動の停止により、特に、2020

86

年2~3月のエアロゾルの光学的厚さの減少が確認され、前年と比べて月平均値で3割程度低いかったことが確認された。他の月でも低い値を示しているが、大陸からの越境汚染の減少のみならず、日本国内の経済活動などの影響によるものも含まれていると考えられる。また、前年に比べて7月のエアロゾルの光学的厚さが低かった。「令和2年7月豪雨」の影響で観測出来なかった日が多かったこともあるが、日本全体で日照時間がかなり低かった点もあげられ、日射量が少なかったことから二次生成粒子にも影響を及ぼしていたと考えられる。他の日本の観測地点では月平均値でも増加の影響が見られていた8月の西之島の噴煙の影響であるが、本観測の月平均値の結果を見る限り、大きな影響が見られず、短期的な影響であったと考えられる。本年度は、COVID-19の影響による移動制限により、観測機器のメンテナンスや研究に大きな支障が出たが、今までと変わらずの精度保証のある結果を示していきたい。今後も観測を継続し、モデルや数値モデルとの相違点を検証しながら、さらに気候影響の解明につなげていきたい。



Fig. 1 2019年1月から2020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

4. 研究成果

Nakajima, T., Aoki, K., et. al., https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020. Momoi, M., Aoki, K., et al., https://doi.org/10.5194/amt-13-2635-2020, 2020.

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)

洋上や海中を航走するビークルに働く流体力解析および運動制御に関する研究

国立研究開発法人海洋研究開発機構

研究プラットフォーム運用開発部門

技術開発部

百留 忠洋

研究目的:

自律型無人潜水機の普及や多種多様化にともない、さまざまな観測・行動形態が求めら れるようになってきた。本件では、水中光無線通信を用いることで水中ロボットによる他 装置との無線大容量通信が可能となる。このため、高輝度半導体レーザーを用いた全周囲 型の光送信モジュールを実現することを目標としている。

※新型コロナウィルス感染拡大を受けて

本年度も引き続き、2020年11月に行った実海域での試験結果を踏まえ、装置の改良等 を施し2021年1月に水中通信試験を行うように準備を進めていたが、2020年11月頃よ り新型コロナウィルスの全国的な感染の再拡大および、それに伴う1都3県の緊急事態宣 言を受け、当機構の緊急事態宣言下の出張中止/延期の指示により、試験を中止せざるを得 なくなった。

代わりに実験データ等を各研究者で共有および分散解析に振り替え、ストレージ等を拡 充し情報記録後に配布し、各自作業を実施した。



図1 実験を予定していた光通信装置

2020 AO-21

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)となって市街に運ばれ、同市の大気質を著しく低下させるという悪循環が生 じている(図1)。ホワイトダストには様々な重金属が「有害産業廃棄物」と同等レベルの高濃度で含ま れていると考えられ、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。



図1. ホワイトダスト発生時の尾鉱沈殿池の様子 (2020年11月11日撮影)

【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)を設置し、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 号の画像解析からは、すでに幾つかのダストイベントの発生を捉えることに成功した(図 2)。これまでにも、ダストの広域拡散を監視する目的で衛星コンポジット画像(Dust RGB)が応用され てきたが、従来は主に黄砂現象のように小さくても数 10km スケールかそれ以上の大規模な砂塵嵐を検 出した事例に限られてきた。一方、本研究が対象としたのはより局所的なポイント発生源であり、そのよ うなホットスポットの検出に同手法が適用された事例は我々の把握している限り未だない。特に、2020

2020 AO-21

年11月11日のケースでは、DustRGBによる人為的なスポットダストの発生のタイミングなども地上の 直接観測データと一致しており、今後さらにイベントの抽出の事例を増やすことで、その輸送の全体像 (下流への影響)の系統的な把握が可能になるものと期待される。



図2. 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)から南東方向に帯状に広が るダスト・プリュームの発生が確認できる(時間は UTC).



図3. エルデネト市内に設置した粉塵センサ (PS2) による粗大粒子の濃度時間変化 (2020 年 10 月~11 月). 図2の衛星によるダスト・プリューム検出時と地上における濃度の顕著な上昇に時間的な対応が見 られる。

【研究組織】

研究代表者 松木 篤

研究協力者 鵜野 伊津志、Chultem Batbold (D1)、Sonomdagva Ch. (NMU)、兼保直樹 (産総研) 所内世話人 弓本 桂也

衛星データを用いたダストエアロゾル量と雲相の関係の地理分布

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 河本和明 九州大学 応用力学研究所 岡本創

[要旨]

雲物理の視点で、ダスト粒子は永く有効な氷晶核として認識されてきた。これまでエアロゾルタイプとして ダストに注目し、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3年間のダスト消 散係数と雲相データを用いて、北半球中高緯度においてダスト消散係数と雲相の関係を調査してきた。そ の結果、雲相は温度のみでなくダスト消散係数にも依存すること、特に250K 前後ではダスト消散係数の影 響がより低い温度やより高い温度の場合に比べて大きいことが確認された。さらに地理分布を比較したとこ ろ、ダスト消散係数が高い領域では概ね氷晶割合も高いという傾向が見られた。

[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。特に雲の熱力学的相(以後は雲相と呼ぶ)は、例えば光学的厚さや 単一散乱アルベド、射出率などの放射特性に寄与することが知られている。エアロゾルは雲粒形成時の核 となるが、中でもダストは有効な氷晶核とみなされている。これまでの研究で、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。本研究はその知見を踏まえ、消散係数をダスト量の指標と考え、氷相割合との地理的分布の 対応を調べることを目的とする。

[方法]

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と雲相のデータ を用いて地理的な比較を行った。このダスト消散係数と雲相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 が運営している 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は248K 近傍でのダスト消散係数の地理分布、図2は248K 近傍での氷晶割合の地理分布を示している。ダスト消散係数の高い領域では氷晶割合が高く、また逆も成立しており、地理的な一致が概ね得られた。他方、233K 近傍の温度が低い場合や269K 近傍の温度が高い場合は、ほぼ温度によって雲相が決まるため地理的な整合性は認められないことを確認した(本稿には掲載していない)。前年度までに得られた結果の通り、250K 程度の中程度の温度では、ダスト消散係数の氷晶割合への影響が大きい(ダスト消散係数が大きいほど、凍結確率が高い)ことが地理的にも示された。

今後は氷晶数濃度や氷晶粒径などの微物理特性との関連性に興味が持たれる。



Dust extinction coefficient

100

90

80

70

60

50

40

30

図1 248K 近傍でのダスト消散係数の地理分布

図2 248K 近傍での氷晶割合の地理分布

·成果報告 論文リスト

Kawamoto, K., Yamauchi, A., Suzuki, K., Okamoto, H., & Li, J. (2020) Effect of dust load on the cloud top ice-water partitioning over northern middle to high latitudes with CALIPSO products

Geophysical Research Letters, 46, e2020GL088030. https://doi.org/ 10.1029/2020GL088030

渡利晃久、河本和明

能動型衛星プロダクトを用いた北半球中高緯度におけるダストエアロゾル量と雲の熱力学的相の関係 日本リモートセンシング学会誌、Vol.40 No.3(2020)

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 relate to global warming

We organized the international WESTPAC meeting and a joint cruise in 2020, and discussed how to explore the direction of future international collaborative research.

1. The 4th workshop of WESTPAC WG06

Due to the COVID-19 pandemic the 4th workshop of WESTPAC WG06, which had been planned to be held in Vladivostok in summer, had to be changed to an on-line workshop in autumn. The workshop was held with thirty experts from eight countries (Pic.1), on 6 and 7 October, hosted by Jing Zhang, PI of WG06 "A framework for cooperative studies in the Western Pacific Marginal Seas: Energy and materials exchange between land and open ocean". In subgroup meetings, reports with viewpoints of international cooperative research were given on activities since the previous workshop in June 2019, along with reports of some major results of the joint cruises. Moreover, activities of other active programs/organizations in the region, such as PICES/AP-CREAMS and CSK-2, were presented. And so was information of UN-DOS. In the latter part of the workshop, participants had a discussion to propose a new project in WESTPAC as an extension of this working group, related to the UN-DECADE for Ocean Sciences (UNDOS). Jing Zhang explained the importance of contributing to the UNDOS, detailing goals at the end of the decade. Finally, a proposal was made for a new scientific project, "Health of AMS (Asian Marginal Seas) - linking ocean and land" (tentative)' a succession of WG06, and it was decided to officially submit it.

After various discussions and three months preparation, a new WESTPAC program entailed "Healthy, Productive and Sustainable Asian Marginal Seas: Understanding changes in the marine environment in response to global climate change" was submitted to WESPACT office on 15 February.



Photo 1: Participants of the online workshop held on 6 and 7 October, 2020

2. Nagasaki maru NN55 joint cruise

Nagasaki-maru NN55 Cruise was conducted in July, 2020 for researching the anoxic water masses in the East China Sea (ECS). The continental shelf margin in the ECS plays an important role in supplying biological resources to the sea around Japan

via the Kuroshio. Considering the deterioration of the marine environment and accompanying changes in the related 32° ecosystems, it is urgent to clarify the dynamics and formation mechanisms of hypoxic water. Based on this research background, samples of seawater, sediment, pore water, and isotope were collected from the shelf edge of the ECS in order to achieve the tasks of the ongoing Grant-in-Aid for Scientific Research (B) "Assessment of the effects of global warming and stratification on undernutrition, hypoxia, and ecosystems in the outer continental shelf of the East China Sea".



Figure 1: Cruise track on the NN55 cruise

3. Observations on the stratification in the East China Sea

During the NN55 cruise, the same level of low dissolved oxygen was observed near the seabed as that observed on the cruise in 2019 (NN33 cruise). High turbidity was observed over all the vicinity of the seafloor (Fig.2). By combining the results of the chemical analyses and physical observation data, it is expected that we will be able to clarify the origins of water masses and to quantitatively evaluate the changes in vertical transport of oxygen and various nutrients associated with changes in stratification structure.



Figure 2. Section views of dissolved oxygen and transmission at the M-line

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、熱や河川水、物質の輸送を通じて海洋環境の形成・維持に深 く関わる。特に密度躍層周辺において乱流が鉛直混合を生じる点は、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海洋環境に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、応用力学研究所の海洋乱流計測グループが東シナ海と有明海において過去 10 年以上にわたって実施してき た乱流微細構造計測データを用いた解析を行う。

研究内容

有明海中央部の定点において 2011 年 5 月 24–26 日 (小潮期)の約 48 時間と6 月 7–9 日 (大潮期)の約 38 時間 の間に乱流計 TurboMAP-5 (JFE Advantech)による計測から得られた約 700 キャストの微細構造プロファイルデータ を用い、乱流運動エネルギーの生成率に対する乱流浮力フラックスの割合を示す混合効率について調べた。 TurboMAP 搭載の乱流シアセンサーで得られた乱流速度勾配から乱流運動エネルギー散逸率(ε)を計算するととも に、高速応答水温センサー (FP07)で計測された乱流水温勾配から温度分散の散逸率(χ_T)を求め、Osborn (1980) による散逸法と Osborn and Cox (1972) による水温拡散係数モデルから導かれる Mixing efficiency Γ に関する式、 $\Gamma \equiv R_f / (1-R_f) = (1/2) (\chi_T / \varepsilon) N^2 / (\partial T / \partial z)^2$ に基づいて Γ とフラックスリチャードソン数 R_f を見積った。ここでNと

 $\partial \overline{T}/\partial z$ はそれぞれ背景の浮力振動数と水温鉛直勾配であり、TurboMAP 搭載の CTD センサー計測データから求 めることができる。よく知られているように FP07 は高周波数域の分解能が十分でなく、有明海のような強い乱流が生じ る環境では水温スペクトルの粘性対流-粘性拡散領域を解像することができない。このため、この高周波数域のセンサ ーの周波数応答の補正と理論スペクトルのフィッティングが行われてきたが、近年では水温スペクトルの慣性対流領 域を利用して χ_T を見積る方法が提案されている(Bluteau et al. 2017)。具体的には、水温勾配の理論スペクトル $\psi(k) = C_T \chi_T \varepsilon^{-1/3} k^{1/3}$ (*k* は鉛直波数)に Obukhov-Corrsin 定数 C_T (= 0.4) とシアセンサーから見積られた ε を与え、 計測された水温勾配スペクトルの慣性対流領域に理論スペクトルをフィッティングすることで χ_T が見積られる。本研究 では、1024 点(~1.2 m)毎に 2048 点を取り、Welch 法によって水温勾配スペクトル密度を計算し、Single-pole 型の伝 達関数で補正したものに対し、慣性対流領域の上限波数をk = 0.04 (εv^3)^{1/4} (vは分子動粘性係数)として波数領域 で理論スペクトルのフィッティングを行い、 χ_T を見積った。その結果から $\Gamma \geq R_f$ を計算し、乱流のアクティビティの指標で ある浮力レイノルズ数 $Re_b = \varepsilon/(vN^2)$ との比較を行った。

結果と考察

図 1a-h に乱流の定点観測結果を示す。観測時の成層構造は水温・塩分ともに安定で、両者は線形的な関係であった。有明海では強い潮流のために海底境界層内で強い乱流が準定常的に生じる($Re_b \ge 100, \varepsilon \ge 10^7$ W kg⁻¹)。 このような高 Re_b 数の流れでは、温度勾配スペクトルに $k^{1/3}$ の傾きを持つ慣性対流領域が存在することが明確に認められる(図 2)。一方密度躍層では、シア不安定や内部波の砕波によって間欠的に強い乱流が生じ、温度分散の散逸率の高い値が見られるが、 Re_b は概して小さい。 Re_b が O(1-10)であるような極めて弱い乱流の層では、慣性対流領域の解像が限定的であるため、粘性対流~粘性拡散領域の理論スペクトルの1つである Kraichnan スペクトルを使用したフィッティングも併用した(図 2)。その結果、観測と Kraichnan スペクトル間の一致が見られたものの、見積られる χ_T の値はスペクトル補正法に大きく依存しており、低 Re_b 流れにおける χ_T の見積もりのには課題が残った。 Re_b が 100を超えるような流れでは、スペクトル補正法にほとんど依存しない慣性対流領域によって χ_T が求められ、図 1i.j に示すような Re_b に対する $\Gamma > R_f$ の関係性が得られた。これによると $\Gamma > R_f$ は大きなばらつきを持つものの、10² < Re_b < 10⁴では OSborn (1980)が示した $\Gamma > R_f$ の観測に基づく上限値 0.2 \geq 0.17 に平均的には近い値を取った。 Re_b > 10⁴では両者は減少する傾向を示した。このような Re_b 依存性は Monismith et al. (2018)でも示されており、エスチュアリーのシア不安定乱流を対象とした乱流フラックスの直接観測から導かれた関係性と一致する点で興味深い結果である。ただし R_f の Re_b 依存性は海域や条件によって異なることが言われており、より普遍的な関係の解明のために、今後他の時期・場所における観測結果に解析を広げる予定である。

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 2011 年 5 月 24–26 日と6 月 7–9 日における水温(a,b)、浮力レイノルズ数 Re_b (c,d)、乱流エネルギー散逸率(e,f)、温度 勾配分散の散逸率(g,h)。青線は海面、黒線は海水密度(σ_t)を示す。(i) Flux Richardson 数と(j) Mixing efficiency の浮力レイノ ルズ数 Re_b 依存性。灰点は個々のデータ、青点と青線は $\log_{10} 0.2$ 間隔の Re_b のビンで求めた 10–90 %区間と平均値を示す。



図2 6月8日 0:03 のキャストにおける温度勾配スペクトルの計算例。青線と赤線はそれぞれ水温センサー周波数応答補正前と後のスペクトル、黒実線は慣性小領域における理論スペクトルのフィット、破線は~ k^1 の勾配、緑線は Kraichnan スペクトルフィット、灰色の縦線は慣性小領域の上限を与える波数 $k = 0.04 (\epsilon v^{-3})^{1/4}$ を示す。また各図の上部に海面からの深度と Re_b の値を示す。

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。そこで、本研究 では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す る事を目的とする

- 2 実験方法
 - 2.1 漂流浮体の製作

GNSS による位置測位を行うセンサは小型で、手のひらにおさまるサイズの機器が一般向けに販売 されている。小型のマイコンボード等を用いたデータロガーも同程度のサイズに収まる。この様な機 器を格納するに適したドリフターの漂流浮体は、風の影響を最小化するために没水部分がなるべく 大きくなる構造を持つべきである。また、防水性も重要である。そこで、円筒形で下部が VPC パイプ (内径 13mm,外径 18mm)に適合し、上部がポリタンク キャップ に適合する漂流浮体 MZ を FDM 方 式(熱溶解積層方式)の 3D プリンタを用いて製作した(Fig.1)。なお、FDM 方式の 3D プリンタでは構 造上浸水することが知られているため、表面にラッカースプレー、防水塗料を塗布することで、防水 性を保つこととした。



Fig. 1 製作した漂流浮体 MZ(左)と浮体内に梱包する GPS ロガーの選択肢(右)

2.2 相模湾江ノ島沖における実験

多点観測の最も単純な例として、上述した漂流浮体 MZ を 100m 毎、40 点、総計 4km に渡り一直線に展開して計測を実施した(Fig.2)。比較のために、展開後に付近を曳航型 ADCP(1200kHz)により測定し比較のためのデータを得た。なお、曳航観測には九州大学所有の ADCP(RDI 1200kHz) を利用した。



Fig. 2 漂流浮体 MZ の 100m 毎 4km,にわたる多点展開と比較に利用した曳航型 ADCP(1200kHz)

3 実験結果

2.2 相模湾江ノ島沖における実験により得られた結果を Fig.3 に示す。流速、流向共に漂流浮体 MZ と ADCP により取得したデータは 0m 地点から 4000m 地点に向かって流速は小さくなり、流行は-45 度から 0 度付近へと変化する傾向が確認できた。



Fig. 3 測線上の漂流浮体 MZ と曳航型 ADCP(1200kHz)に基づく表層流速

4 考察

実験結果では ADCP の測定結果がドリフター観測の結果に比べて小さなスケールでの変動が確認でき たが、これは計測ノイズあるいは計測時間が GPS ドリフターに比べて短いために高周波の成分が除去でき ていないことを示している。しかしながら、浮体の軌跡を確認したところ、ドリフターの軌跡はほぼ直線であ り、後者の可能性は低いことが示された。そのため、高周波成分は物理的に意味のある信号ではなく、除 去すれば漂流浮体に基づく推測と良好な一致となると考えられる。

一方、漂流浮体としての機能としては、形状が棒であるために、特定深度の流速を測っていない。これに ついては、抵抗が大きくなる板等を特定深さに付与し、計測対象を限定する様な試みも今後必要と考えら れる。

5 成果報告

論文発表等は実施していない。
非線形表面波・内部波の地形上における伝播並びに相互干渉の数値解析

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、大振幅波を含む表面波、または、内部波 が伝播する場合を対象として、地形が非線形波の伝播及び相互干渉に与える影響を数値解析に 基づき調べた.

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、次の各事項を目的として 研究を進めた.

- (1) 変分法に基づき導出された波動方程式系を基礎方程式系とする数値モデルの計算精度の検 討を行ない,数値解析手法の改良を行なった.
- (2) 様々な地形上を伝播する表面波,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.
- (3) 内部波の伝播・相互干渉に対する critical level の影響を調べた.

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、表面孤立波と内部孤立波の共存場の数値解を得た.ここで、定常波に対する非線形方程式系を Newton-Raphson 法により解いた. その結果、表面波モードの孤立波の相対位相速度は、表面孤立波と内部孤立波の共存場において、内部波が共存しない場合よりも低減することがわかった.また、内部波モードの孤立波の相対位相速度も、表面孤立波と内部孤立波の共存場では、表面波がない場合よりも低減した. 一方、表面孤立波と内部孤立波の共存場における内部波モードの内部孤立波の界面位置は、表面波が共存しない場合の critical level を超える可能性のあることがわかった.更に、内部波モードの表面孤立波と内部孤立波の波高比は、線形浅水波解より低く、内部波モードの内部孤立波の相対波高が増加するにつれて、その差が大きくなった.

また,実地形に対して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.

研究成果報告

- Kakinuma, T. and Ochi, N.: Tsunami-height reduction using a very large floating structure, Mathematics for Industry, Vol. 34, pp. 193-202, 2020 年 8 月.
- Kakinuma, T. and Yamashita, K.: A numerical solution for the coexisting field of surface and internal solitary waves, Global J. Res. Eng. E, Vol. 20, Issue 3, pp. 1-11, 2020 年 9 月.
- 辻 英一・広瀬直毅:東シナ海の内部波エネルギーのモデリング解析,九州大学応用力学研究所 共同利用研究会「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」, 2020年12月.
- 辻 英一・広瀬直毅:数値モデリングによる東シナ海の内部波エネルギーの解析,2020年度九州 沖縄地区合同シンポジウム「南西諸島近海における大気・海洋・生態系」,2020年12月.

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) 研究協力者 中山恵介(北見工業大学工学部 社会環境工学科) 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)

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:東京大学生産技術研究所 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., submitted to JMSJ)。

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た。APHRODITE(Yatagai et al., 2012)より長い期間のデータとなり、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い、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。しかし、今年度は 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全く進まなかった。そのた め、既に収集してあるバングラデシュの長期データを用いた解析を推進した。

近年の人口増加と経済発展が著しいバングラデシュは、モンスーン変動による影響が顕著であり、脆弱性も高い。Endo et al. (2015)は、1950~2008年のバングラデシュにおける日降水量を用いて降水強度や降水継続期間の変化についても解析し、降水強度の弱い雨の増加や降水日数の増加を示した。しかし、気候変動の影響を議論するには、さらに解析期間を延ばす必要がある。そこで、デジタル化されていないバングラデシュを含む旧英領インドの日降水量のデータレスキューを実施し、1891~2016年のデータを用いた降水特性の変化を明らかにした。

2. データと手法

対象領域は、現在のバングラデシュの領土とし、 現在の観測地点と連結可能な23地点のデータを用 いた。1950~1970年代は独立戦争等で欠測が見ら れるので、データの均質性を 4 つの統計テスト (Wijingaar et al., 2003) を実施し、最終的に 15 地 点(図2の△印の地点)を以降の解析に用いた。Endo et al. (2015) に倣い、年降水量(PRCPTOT)、日降 水強度(SDII)、年間最大日降水量(RX1day)、年間最 大5日間降水量(RX5day)、日降水量 95 パーセン タイル値(R95%)、日降水量 99 パーセンタイル値 (R99%)、連続無降水日数(CDD)、連続降水日数 (CWD)、日降水量 10mm 以上の日数(R10mm)、日 降水量 20 mm以上の日数(R20mm)、日降水量 50 mm 以上の日数(R50mm)、日降水量 1~3 mmの日数 (R03mm)、年間降水日数(WDAY)の13 個の指標に ついて計算した。トレンド解析では Mann-Kendall テストを用いて評価した。(図1)



図1:バングラデシュにおける126年間の降水特 性に関する13指標の結果。縦軸は地点数、寒色 系が増加、暖色系が減少を示す。

3. 結果

Endo et al. (2015)と比較すると、弱雨の日数の増加等は本研究でも見られるが、それ以外の指標においては必ずしも一致していない。また強雨は有意なトレンドは見られなかったが、空間分布(図 2)をみると中央部で増加し、北部と南部で減少傾向が見られることから、モンスーントラフの位置に関連する可能性がある。また、季節ごとにトレンドが異なり(図 3)、特に総降水量(PRCRTOT)がプレモンスーン(ポストモンスーン)期に減少(増加)する一方、プレモンスーン期と夏季モンスーン期に弱い雨が増加している。今後は総観場や季節水位の変化を詳細に解析する必要がある。

4. まとめ

本研究ではデータレスキュー活動を通じた 126 年間のバングラデシュにおける降水特性を解析した。 今後は、20 世紀再解析データを用いてその要因について明らかにしつつ、論文投稿の予定である。



大きいマークは有意水準5%で有意差があり、小さいマークは有意差がない。



図3:主要な指標(PRCRTOT、R10mm、R20mm、R50mm、R03mm、WDAY)の(a) プレモンスーン(3~5月)、(b) 夏季モンスーン(6~9月)、(c) ポストモンスーン(10~11月)におけるトレンド。縦軸 は地点数、寒色系が増加、暖色系が減少を示す。

5. 研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学生産技術研究所 特任准教授
研究協力者	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、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)によって実施された。

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

国立環境研究所環境計測研究センター 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。今年度は、改 良型ライダーの運用に向けて、波長 532 nm に対する HSRL システムの開発を進めた。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。これまで国立環境研究所で開発されてきた HSRL では、ノンストップで発振する送信レーザー光 の一部を使って波長をモニターし、フィードバックして制御するシステムであった。しかし、応力研 ライダーを始めとする東アジアにおけるライダー観測ネットワークでは、レーザーフラッシュランプ の消耗を抑えるため、5 分観測・10 分停止の観測スケジュールで運用している。そのため、上記 HSRL システムのままでは、10分間の停止期間中はレーザー波長の制御ができない。そこで本研究 では、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。図1に示すように、シーダーレーザー(波長 1064 nm)光の一部から第二高調波を発生さ せ、音響光学素子で波長を±0.25 pm だけシフトさせてからヨウ素フィルターを通し、透過光強度をモ ニターする。この時、0次回折光(波長シフト無し)と±1 次回折光(波長シフトあり)の光強度を測 定する。レーザー波長をスキャンすることでヨウ素の吸収スペクトルを測定し、0 次回折光強度から吸 収線の中心波長を決定する。また、吸収線の中心波長における+1 次回折光と–1 次回折光の強度比をリ ファレンスとして、強度比が一定になるようにレーザー波長を制御する。

【結果】

図2に波長制御の例を示す。図2(a)は事前に測定した吸収スペクトル信号(実線)と当時の信号値 (点)を示している。横軸はシーダーレーザーのヒーター温度で、レーザー波長に相当する。吸収ス ペクトル信号から、吸収線の中心におけるヒーター温度(ここでは中心温度とする)はこの時 65.76°Cで あった。周囲の気温が変化することでレーザー波長が変化し、吸収スペクトル信号が横軸方向にシフ トするが、ヒーター温度を制御することで、常に吸収線の中心にレーザー波長が来るようにした。具 体的には、信号 P+(+0.25 pm シフト光)と P-(-0.25 pm シフト光)の比を用いる(図2(b))。吸収 線の中心波長(縦点線)における P+/P-比をリファレンス(横点線)として、P+/P-比が一定の閾値 の範囲内に収まるようにヒーター温度を制御した。図2の例では、1日のうちで約0.25 pmの波長分 だけヒーターの中心温度が変化しているが(図2(c))、レーザー波長は吸収線の中心から約±10 MHz (±0.01 pm)の範囲内で制御出来ていることがわかった(図2(d))。これは、ヨウ素吸収線のスペクト ル幅(約2 GHz)と比べて極めて小さい変動幅である。

【今後の展望】

今年度末から来年度にかけて上記システムを応力研ライダーに導入し、532 nm HSRL によるエアロ ゾルの連続データを取得する。また、波長 355 nm HSRL についても試験的な測定を実施し、その結果 を論文として発表している(Jin et al., 2020)が、装置の改良や信号処理の高速化など、改善の余地が ある。来年度以降の応力研での運用に向けて開発を進める。



図1:シーダーレーザーを用いた波長制御システムのブロック図(左)と写真(右)



【研究成果】

Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, K. Sato and H. Okamoto, Opt. Express, 28(16), pp. 23209–23222, doi:10.1364/OE.390987, 2020. (その他論文1件、学会発表1件)

EXPERIMENT ON SELF-EXCITED VIBRATION OF A FREE-HANGING PIPE FOR OTEC COLD WATER PIPE APPLICATION

Ristiyanto Adiputra, Kyushu University

I. ABSTRACT

The experiment is intended to validate the developed analytical model for free hanging riser conveying fluid for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Experiment was conducted on 14th-25th December 2020. The results of the experiments are in a video data capturing the motion of the bottom-end of the pipe while aspirating water. The data is analyzed using Open CV. The data is corrected by Hi-passing method and anti-aliasing so that a clearer power spectrum can be obtained. Comparing with the experimental results, some values predicted by analytical equation are close to the analysis results, but there are also some values which are far from the prediction. This is because the amplitude of vibration is as small as about 1 mm, so accurate frequency of vibration cannot be easily determined. For more accurate and reliable comparison, the experiment environment will be upgraded in the future.

II. INTRODUCTION

Demand for renewable energy has been increasing along with environmental problems in recent years, and the momentum for utilizing OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion), which is one of them, is also increasing. Currently, Adiputra et al. were considering the construction of a 100 MW OTEC plant. Here, a ship-shaped power plant with a conversion oil tanker ship was adopted. It was calculated that a flow rate of 225 m³/s is required for stable power plant operation. From this, it was obtained that the deep sea water intake pipe has an optimum intake speed of 3 m/s at an inner diameter of 12 m. The deep sea water intake pipe has possibility of self-excited vibration affected by the internal flow due to water intake. The possibility that self-excited vibration occurs when fluid is sucked in a free hanging pipe has been studied so far, but vibration experiments targeting OTEC deep sea water intake pipes have not been actually conducted. Thus, it is necessary to confirm whether the theory occurs as an actual phenomenon. The purpose of this study is to confirm the actual phenomenon of self-excited vibration by experimenting with the intake pipe and compare it with the analysis result.

III. EXPERIMENTAL INVERSIGATION

A medium-scale experiments were conducted using deep water tanks at Kyushu University facility. The tank is equipped with a tow train, and a pipe can be lowered from the hole in the center. To pump the water, two pumps are used. One is a submersible pump for fresh water Pondy (SM-625) with pump diameter of 25 mm and max head of 10 m. The maximum discharge rate is 100 L/min. Second pump is submersible pump (SL-102) with discharge rate: 40L/min, 70L/min. The total heads are 5.5m and 2.6m respectively. Two types of pipes with different thicknesses for sucking up water are prepared.

The experiment was carried out on pipe 1 and pipe 2 at three flow velocities. In each experiment, the behavior of the lower end of the pipe was measured with two sets of cameras. The original videos are taken by GoPro hero5(camera1), and GoPro hero8(camera2) with 30Hz frame rate and 4K resolution. Yellow marker that has 22x22mm is attached at bottom of the pipe. The measurement was performed by extracting the behavior of a yellow vinyl tape.

The data is analyzed as data with Open CV and capturing the movement of the position of the center of gravity of that area. In addition, since the vibration is basically small and only coarse data can be obtained with the normal power spectrum, it is corrected so that a clearer power spectrum can be obtained. The details of the analysis procedure are as follow

Step 1: OpenCV motion tracking. The OpenCV library captures a time history of image coordinate system of center of a yellow region from the video during steady state of the pumping system.

Step 2: FFT analysis. Firstly, a FFT analysis with Numpy library for Python is carried out for the captured time history data without a pre-processing. The time history is a digital signal, thus it includes noises and a slow-drift motion is remarkable.

Step 3: improved FFT analysis. The around 0.05-0.1Hz is considered vibration due to internal flow, however 0.01Hz slow-drift phenomena is not clarified. In this experiment, we firstly aim to take 0.1Hz, thus 0.01Hz signal is filtering at first. Then, an antialiasing is also carried out to smoothen the signal. This improved signal is re-analyzed with corrected FFT. The vibration frequency



Fig. 1 OpenCV motion tracking. A) Original video; B) OpenCV python data.

is picked at the maximum point of the spectrum. By repeating this procedure, the motion frequency of the pipe vibration can be obtained for all of experiment cases.

IV. ANALYTICAL INVERSIGATION

The motion equation of the pipe is analytically predicted as equation 1 and solved via Galerkin method to find the eigenfrequencies

$$EI\left[1 + \left(\bar{\alpha} + \frac{\bar{\mu}^*}{\Omega}\right)\frac{\partial}{\partial t}\right]\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (M + m - M_a)g\frac{\partial w}{\partial x} - 2MU\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial t} + \left\{\left[1 - (3/2 - \alpha)(1 + \bar{\gamma})\right]MU - (M + m - M_a)g(L - x)\right\}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + c\frac{\partial w}{\partial t} + (M + m + M_a)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + MU\left(\frac{\partial w}{\partial t} - \alpha U(1 - \psi)\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta(x - L) = 0$$
(1)

The result is shown in an Argand diagram plotting the real part and imaginary part of the natural frequencies perpendicularly. The obtained critical velocity for pipe 1 is about 7 m/s and for pipe 2 is about 6 m/s.

V. RESULT COMPARISON

Due to limitation of head loss and pump capacity, the obtained intake velocity of the experiment is less than the predicted critical velocity. Thus instead of comparing the critical velocity, the comparison will be focused on the motion frequency of the pipe. The results show that the frequencies tend to decrease by increasing the seawater intake. It is important to be noted that Hi-pass filtering and anti-aliasing are not suitable to analyze the real motion amplitude of the pipe as it will eliminate the extremely low-frequency amplitude. However, as the comparison here only focuses on the motion frequency, this developed method is acceptable. The pipe motion frequencies is plotted at the real frequency component vs intake velocity graph for pipe 1 and 2 at $\alpha = 0.8$ and $\gamma = 0.95$ as shown in Fig. 2 respectively





VI. CONCLUSION AND FUTURE WORK

To investigate the effect of the seawater intake on the OTEC CWP, an analytical solution has been developed and solved semi-analytically using a Galerkin method. For comparison, an experiment has been conducted to validate the analytically predicted pipe motion frequency. As shown in Fig. 2, the developed analytical equation can be concluded to be sufficient to predict the pipe behavior with some extends.

Compared with the experimental results, some values are close to the analysis results, but there are also some values which are far from the prediction. This is because the amplitude of vibration is as small as about 1 mm, so accurate frequency of vibration cannot be easily determined. Additionally, the 4m pipe used here is a self-joint pipe from 2 pieces of 2m pipes which make the 4m pipe is not fully in straight condition.

For more accurate and reliable comparison, the experiment environment will be upgraded in the future to reach the predicted critical velocity. Intake velocity fluctuation is supposed to be more controlled. The 4m pipes are suggested to be made by a manufacturer to ensure the straightness of the pipe.

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

磁場閉じ込めプラズマにおける輸送現象の物理的理解と定量的な予測は、炉性能の最適化のみならず、実際 のプラズマ実験に対する物理の正確な理解に直結した、核融合研究における重要課題の一つである。一方で、 位相空間上の分布関数の時間発展を解く運動論的シミュレーションは、第一原理的にプラズマ輸送現象を扱 える強力な解析手法として広く用いられており、上述の輸送現象に対する理解の大きな助けになっている。特 に、スーパーコンピュータを利用した研究が進展し、輸送フラックスや乱流スペクトルなどの実験結果を再現 する結果も得られている。その中において、シミュレーション結果に対する定量的な議論を行うには、実際の 実験観測とできる限り同じ条件下でデータ解析を行うこと、即ち、これまでに我々が実施してきた PCI 数値 計測などの実験観測環境に即したデータ解析が重要となる。本研究では、数値計測手法[1]を応用し、近年の輸 送研究で重要性を指摘されている電場やポテンシャル分布の輸送現象への影響について、精密な第一原理シ ミュレーションと数値計測による相互的な解析によって明らかにすることを目的としている。特に、多粒子種 プラズマの輸送現象において、局所的なジャイロ運動論的乱流シミュレーションと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を実験に即して、より正確に実行し、そこから得られる計算結果に対する数値 計測を実施する。

研究方法

本研究課題では具体的な対象として、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、 ジャイロ運動論に基づく局所的な乱流輸送コード GKV と、ドリフト運動論に基づく大域的な新古典輸送コー ド FORTEC-3D を用いた第一原理シミュレーションを実行し、その結果と実際の実験結果との比較解析を進 める。当該の不純物ホールプラズマは、不純物炭素イオンの密度分布がコア領域で極端にホローになる現象を 有したものであり、核融合炉の炉心性能を向上させ得るものとして、ここ十年余りの間、多くの研究がなされ てきた。最近の大規模シミュレーション研究によってようやく、第一原理の観点からその特徴的な分布の形成 機構に対する説明がなされるようになり、乱流輸送による径方向内向きの粒子輸送と、正の両極性径電場を伴 う新古典輸送による外向きの粒子輸送により、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 [2]。そこでここでは、シミュレーションで得られた新古典「熱輸送」フラックスと、実験観測における熱輸送 フラックスから、乱流寄与分を見積もり、フラックスマッチングの手法を用いた詳細なジャイロ運動論シミュ レーションを実行する。同時に計算される粒子輸送フラックスが、先に得られていた新古典計算での粒子輸送 フラックスと定量的にバランスし得るかを確認し、さらに、乱流スペクトルや静電ポテンシャル分布のより詳 細な計測に向けて、数値計測モジュールへと繋げて、定量的な知見を得る。

今年度の成果

FORTEC-3D コードによる新古典シミュレーションでは、磁気面平均量としてのポテンシャルと、磁気面平 均からの変動量 (Φ1 分布)を考慮した精密な計算が、4 粒子種 (電子、水素、ヘリウム、炭素)のプラズマに 対して実行され、不純物ホールが形成される空間領域では、両極性条件を見たし得る径電場は、符号が正 (電 子ルート)の電場のみが存在していることが分かった[3]。その際の不純物炭素イオンの新古典粒子輸送は、径 方向に向かって外向きとなっている。そこで、この新古典シミュレーションで同時に決定される熱輸送フラッ クスおよび実験観測における熱輸送フラックスを用いて推定された乱流寄与分に対して、定量的に整合する プラズマ温度分布を求め、その分布の下で、ジャイロ運動論シミュレーションを実行した。その結果、熱輸送 フラックスだけに整合条件を課しているにも関わらず、同時に計算される粒子輸送フラックスが、新古典計算 のものとよくバランスすることが確かめられた(図 1)。この結果は、正の径電場と内向き乱流粒子輸送、およ び、外向き新古典粒子輸送によって不純物ホール分布が形成されるという第一原理計算に基づいた上述の説 明を支持する重要な結果である。

一方、このような説明をより確固としたものにする上でも、数値計測手法によるポテンシャル計測は重要と なる。数値計測手法は3次元オイラー座標系で適用される。昨年度は磁気座標系上で表された FORTEC-3D コードシミュレーションデータをオイラー座標系上へ変換するルーチンを作成した。このデータマッピング (図2)を効率的に行うことで、時系列データに対しても高速な計算が可能となる。また、シミュレーションデ ータには実空間だけではなく、波数空間にスペクトル展開された形式のものもある。本年度はそれら複数のデ ータ形式に対応できるように汎用的なルーチンの設計を行った。



図 1 第一原理シミュレーションによる各粒子種の粒子輸送フラックス。負符号を乗じた新古典フラックス (右) において、大域的新古典計算の結果 (□印) と乱流フラックス (左) がよくバランスし得ることが分かる。



図 2 大域的新古典シミュレーションで得られたポテンシ ャル分布の3次元マッピング。

まとめ

本研究課題では、多粒子種プラズマにおけるポテンシャル形成と輸送現象の理解に向けて、第一原理に基づ く大規模シミュレーションにより、特に不純物ホール LHD プラズマでの粒子輸送に着目して解析を進めた。 当該プラズマでは、新古典および乱流による粒子輸送がホール分布構造の形成に大きく寄与し、その中で、径 電場形成、即ち、ポテンシャル分布が重要な役割を担っていることが分かった。この結果に対して、定量的か つ直接的にデータ解析を行うため、HIBP 数値計測への適用を進めた。今後、実際の実験計測データとの比較 も合わせ、多粒子種プラズマのポテンシャル分布の形成機構のさらなる解析を進める。

参考文献

- [1] N. Kasuya, et al., Plasma Sci. Technol. 13, 326 (2011).
- [2] M. Nunami, et al., Phys. Plasmas 27, 052501 (2020).
- [3] K. Fujita, et al., Journal of Plasma Physics 86, 905860319 (2020).

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)などの二次元層状物質は次 世代のエレクトロニクスやスピントロニクス材料として注目されている [1]。さらに、欠陥導入やヘテロ原子のドーピングなどのナノ構造制御に より、電子状態・物理的性質の制御が可能になると有望視されている。 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 [2,3]。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 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、グラフェンの表面に気体分子を



吸着させ、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することを 目的とした。具体的には、窒素ガスおよび水をグラフェン表面上に吸着させ高エネルギーイオンを照射すること で、それぞれ窒化グラフェンおよび酸化グラフェンの創製を試みた。本報告書では酸化グラフェンの研究成果 について報告する。

2. 実験方法

多結晶 Cu 基板上にメタン,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 [4]。同グラフェン/Cu を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水分 子を 200 Langmuir (1 Langmuir = 10⁴ Torr·sec)真 空槽中に曝露することでグラフェン上に水分子を 吸着した。試料を液体窒素温度に保持したまま高 エネルギーイオン(2.4 MeV⁶³Cu²⁺)を照射すること でグラフェンへの水分子のドーピングを行った(図

2)。照射量はグラフェンの原子数密 度の10-1%に相当する10¹⁴から10¹³ ions/cm²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。照射後の未 反応の水分子は試料を真空中で 100℃まで昇温することにより除去し た。イオン照射後のグラフェンの電子 状態や原子構造は X 線光電子分光 (XPS)や X 線吸収端微細構造 (NEXAFS),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 3 にイオン照射によるグラフェン



図 2 本研究で開発・製作したイオン照射槽



図 3 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 /Cu(黒), 10¹³(赤), 5×10¹³(緑), 10¹⁴ ions/cm²(青)イ オン照射 H₂O/グラフェン/Cu, 酸化グラフェン(灰)。

のラマンスペクトルの変化を示す。イオン照射の増 大に伴いグラフェンの欠陥生成に起因するDバンド (1355 cm⁻¹)が増大することが分かった。さらに従来 のグラフェンや酸化グラフェンでは報告されていな いシャープな構造(D1:1283, D2:1457 cm⁻¹)が観察 された。2871 cm⁻¹および 3078 cm⁻¹にそれぞれみら れる構造が D1 + G および D2 + D'由来と考えられ ることから、D1 および D2 はイオン照射によってグラ フェン内に形成された構造に由来することが示唆さ れる。これらの構造は照射量の増大にしたがってブ ロードな構造へと変化した。C 1s XPS スペクトル(図 4)において、H2O/グラフェンへのイオン照射により、 酸化グラフェンにおいて顕著にみられるカルボキシ ル基やカルボニル基に由来する構造は観察され ず,ヒドロキシ基由来の構造のみが現れることが分 かった[5]。このため、高エネルギーイオンの照射量 を制御することにより1原子層で連続したグラフェン のシートに特定の酸素官能基を任意に付与できる 可能性を示すことができた。



図 4 未照射グラフェン/Cu(黒), 5×10¹³(赤), 10¹⁴ ions/cm²(青) イオン照射 H₂O/グラフェン/Cu, および酸化グラフェン(灰)のC 1s XPS スペクトル。

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 では得られないヒドロキシ基などの特定の酸素官能基を有する1原子層の連続した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。

参考文献

[1] K. S. Novoselov, Nobel Lecture, 106 (2010).

- [2] S. Entani, et al., RSC. Adv. 6, 68525 (2016).
- [3] S. Entani, et al., Nanotech. 31, 125705 (2020).
- [4] S. Entani, et al., Appl. Surf. Sci. 475, 6 (2019).
- [5] S. Entani, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 04FP04 (2018).

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:名古屋大学大学院工学研究科 所内世話人: 渡邊 英雄 所属:九州大学応用力学研究所

成果報告

- 1) 圓谷志郎,水口将輝,渡邉英雄,山﨑雄一,針井一哉,大島武,「高エネルギーイオン照射による酸化グラフェンの官能基制御」,2021 年第68 回応用物理学会春季学術講演会 2021 年 3 月.
- 2) Shiro Entani, Masaru Takizawa, Masaki Mizuguchi, Hideo Watanabe, Songtian Li, Hiroshi Naramoto, Seiji Sakai, Kazuya Harii, Yuichi Yamazaki, Takeshi Ohshima, "Heteroatom doping into two-dimensional materials by high-energy ion irradiation", 4th QST International Symposium 2020 年 11 月.

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として用いられており、耐食性や機械的性質の向上を目的として Zr に Sn、Fe、Cr 等の元素が合計 2 wt.%未満添加されている。被覆管使用温度において Fe 及び Cr は Zr 中での固溶限が極めて低く、主 として Zr(Fe, Cr)2系の析出物中に存在している。原子炉運転中には中性子により Zr 合金の構成原子が弾き出され、析出 物においては Fe 原子の優先的な消失が生じ Zr 合金の耐食性等に影響を与える可能性がある。そこで、加圧水型及び沸 騰水型の軽水炉で使用されているジルカロイ 4 (Zry-4) 及びジルカロイ 2 (Zry-2) 中に存在する Zr(Fe, Cr)2系析出物の 重イオン照射下での原子の弾き出し損傷に伴う挙動について、析出物の化学組成の変化の観点から調査した。

2. 実験方法

2 種類の Zr 合金は、試料厚 100 µm の板材を直径 3 mm の円盤形に打ち抜き、真空中において 630℃で 2h の熱処理し た材料である。重イオン照射実験には九州大学応用力学研究所に設置されたタンデム型加速器を用い、試料温度 400℃、 最大 30 dpa の弾き出し量まで 3.2 MeV の Ni イオンを照射した。照射後の試料は集束イオンビーム (Focused Ion Beam; FIB) 装置を用いて、重イオンの入射方向に垂直な方向から TEM 観察可能な断面薄膜試料に加工した。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・エネルギー分散型 X 線分光法 (Scanning Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy; STEM-EDS 法) により元素分布像を取得した。電子の加速電圧は 300 kV である。

3. 結果および考察

図 1(a)は Zr 原子の弾き出し闕エネルギーを 40 eV として SRIM コードを用いて計算した、3.2 MeV の Ni イオンが Zr に入射した際に誘起される弾き出し量 の表面からの深さ依存性である。最大の弾き出しが生 じる深さ領域での損傷量は 30 dpa である。図 1(b)は 同一の条件で重イオン照射後の Zry-4 の断面微細組織 の元素分布像であり、構成元素である Fe の分布を緑、 Cr の分布を赤、Zr の分布を青に指定しそれらを重ね 合わせた。重イオンは左方向から試料表面に垂直に入 射している。明るい黄色で観察される楕円形状のコン トラストは Zr(Fe, Cr)2系の析出物に対応している。両 矢印で示した試料表面から深さ 2000 nm の領域にお



図 1 Zr に 3.2 MeV の Ni イオンが入射した場合に生じる 弾き出し量の表面からの深さ分布(a)及び重イオン照射後の Zry-4 試料断面の元素分布像(b)。

いて赤みがかった析出物が観察されるが、これらは弾き出しにより化学組成が変化したこと、具体的には Cr 原子の Fe 原子に対する割合が増加したことを反映している。

図2は12 dpaの弾き出しを受けた Zry-4 及び17 dpaの弾き出しを受けた Zry-2 中の Zr(Fe, Cr)2系析出物の Fe 及び Cr の空間分布を示す元素分布像である。析出物は白矢印で指し示し、Fe の分布を緑、Cr の分布を赤で表示した。今回 の重イオン照射条件において析出物中の Cr の分布は大きく変化しないため、Cr の分布像において測定した長軸の値を 析出物の粒径として表示した。析出物中の Fe と Cr の分布及びコントラストを比較すると Fe の存在領域は小さく、コントラストは低い。弾き出し前の Fe 及び Cr の空間分布はほぼ同一または若干 Fe の分布の方が大きいことから、両合金と

もに弾き出しに伴い個々の析出物から Fe が消失したことが分かる。

図 3 は Zry-4 及び Zry-2 中の Zr(Fe, Cr)2 系析出物の Fe の原子比 (Fe/(Fe+Cr))の弾き出し量依存性を示したもので、Fe の原子比及び弾 き出し量ともに 5 dpa 刻みでグループ化して評価し、標準偏差を付して表 示した。Fe の原子比の導出には、エネルギー分散型 X 線分光法により求 めた個々の析出物中の Fe 及び Cr の原子濃度を用いた。Zry-4 及び Zry-2 の析出物中の Fe の原子比は、ともに弾き出し量の増加に対して一次関数 的に減少している。Zry-2 と比較して Zry-4 中の析出物の Fe の原子比は、 初期値が高く、さらにその減少率が低いことから 30 dpa の照射量まで高 い値を維持した。すなわち、Zr(Fe, Cr)2 系析出物の組成安定性は Zry-4 中の方が Zry-2 中よりも高いと考えられる。

弾き出し損傷に伴う Zr(Fe, Cr)2系析出物からの Fe 原子の消失は析出 物の表面から進行するため、その表面積の総原子数(体積)に対する割 合が高いほど消失速度が高いと考えられる。一般的に立体の表面積の体 積に対する割合は粒径に反比例する。図4は Zry-4及び Zry-2中の未照射 時における Zr(Fe, Cr)2系析出物の粒径分布で、その平均粒径は121 nm 及び82 nm と評価された。よって Zry-2 中よりも Zry-4 中の析出物の平 均粒径が大きな値をもつことは、析出物から Fe 原子が弾き出され母相中 に移動する割合が Zry-2 中と比較して Zry-4 中では低下することに繋がり、 弾き出し損傷下での高い組成安定性に寄与していると考えられる。

4. まとめ

Zry-4及び Zry-2中の Zr(Fe, Cr)2系析出物の弾き出し損傷に伴う化学組成の変化について調査した。両合金中の析出物ともに弾き出し量が増加すると Fe の原子比が一次関数的に減少した。Fe の原子比の減少率は Zry-4中の析出物の方が Zry-2中のそれよりも低く、Zry-4中の Zr(Fe, Cr)2系析出物は弾き出し損傷下で化学組成の安定性が高いことが判明した。

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 未照射時の Zry-4 及び Zry-2 中に存在する Zr(Fe, Cr)2 系析出物の粒径分布。



図 2 重イオン照射された Zry-4 及び Zry-2中の Zr(Fe, Cr)2系析出物の Fe 及び Cr の元素分布。



図 3 Zry-4 及び Zry-2 中の Zr(Fe, Cr)₂ 系析出物の Fe の原子比の弾き出し量依 存性。

セラミックス材料の照射欠陥形成およびその安定性

九大工 吉岡聰,安田和弘,鶴田幸之介(院),山本知一,松村晶

1. 目的

酸化物セラミックスであるスピネル型構造 AB₂O₄ (A:2 価元素, B:3 価元素) は, A および B 元 素の多様な組み合わせによって例えば電気伝導性,磁性等の機能を発現する重要な材料群である. スピネル型構造では,カチオンが 4 配位の A サイトおよび 6 配位の B サイトを有し,アニオンで ある酸素が面心立方構造 (FCC) の副格子を形成している.スピネル型構造化合物のうち MgAl₂O₄ は,低温域では Mg が 4 配位の A サイト, Al が 6 配位の B サイトを占める正スピネル構造である が,高温域では,一部の Mg と Al がサイト交換をするカチオンの不規則配列を生じることが知ら れている. このようなカチオン不規則化は,高速重イオン等の放射線照射誘起によっても生じる ことが報告されている.カチオンの不規則化は,スピネル化合物の機能性にも密接に関係するた め,その制御が重要である.材料の構造解析に重要な手法の一つに X 線吸収分光 (XAFS) 法があ り,配位環境や電子構造に関する情報を与えてくれる.XAFS 法では,特に元素選択性に優れるた め,スピネル型酸化物のようにカチオンを複数含む系では詳細な構造観察可能にする有効な手段 である.そこで本研究では,高速重イオン照射による MgAl₂O₄ スピネル中のナノ構造変化につい て, XAFS 法の XANES 領域とその理論計算により解析した¹⁾.

2. 実験方法

出発試料は、多結晶体 MgAl₂O₄(住友電工)を用いた. 高速重イオン照射実験は、原子力機構東海センター、タンデム加速器内ビームライン H1 で行った. サイズ 10 mm² のイオンビームを真空、室温下で試料表面に一方向から照射した. 照射するエネルギー及びイオン種を 100 MeV Xe として、照射量による構造変化を観察するために、2種の照射 3×10^{11} , 5×10^{11} , 1×10^{12} , 5×10^{12} , 1×10^{13} cm⁻² をそれぞれ施した. MgAl₂O₄ 試料中へのイオンの侵入長は、固体物質への原子衝突シミュレーションプログラム(SRIM コード)により 15 µm 程度と見積もられている.

XAFS 測定は、高エネルギー加速器研究機構,フォトンファクトリーのビームライン BL-11A で 行い,Mg K-edge (1280 eV) 及び Al K-edge XANES (1550 eV) を蛍光法により測定した. 試料の X 線透過率は,厚さ 10 µm で 0.001 程度まで減衰するため,XANES スペクトル信号は,イオン照 射された領域から選択的に得られている.

結果および考察

図1(a) にイオン照射した MgAl₂O₄ 試料及び非照射試料の Mg K-edge XANES スペクトルを示 す.照射量が比較的低い 3×10¹¹,5×10¹¹ cm⁻² 試料のスペクトルでは,非照射試料から大きな変化が 見られない.一方,高照射試料の 1×10¹³ cm⁻² では,特徴的なピーク A, B, C の強度比が大きく変 化し,さらにスペクトル全体が高エネルギー側にシフトしている.このような照射量に伴った変 化を詳細に観察するために,照射試料と非照射試料との間で差分し,その結果を図1(b)に示し ている.低照射試料の差分スペクトルは,変化の強度は小さく,Signal/Noise 比も低いものの,そ の形状は高照射試料のスペクトル形状と良く一致している.すなわち,イオン照射量が低い場合 から高い場合にわたって,局所構造変化は系 統的であることを示している.

このような XANES スペクトル変化から局 所構造変化を解釈を計算スペクトルにより 行った.密度汎関数理論に基づく計算には, スピネル型構造 (Fd-3m)の primitive cell を 2 ×2×2 に拡張した 96 原子のスーパーセルを 用いた.スペクトル変化の起源となる局所構 造について, カチオン Mg および Al の規則配 列および不規則配列を想定した.計算では, 初めに Projector-Augmented Wave (PAW) 法 により原子配置の最適化を行い、得られた安 定構造のもと full-potential linearized Augmented Plane Wave (APW) 法により Mg Kedge の理論 XANES を得た. 図2に計算スペ クトルの結果を示す.まず,規則モデルの Mg K-edge スペクトルが実験スペクトルでの非 照射試料のスペクトルを非常によく再現し ている.次に、不規則化を想定したモデルか らの Mg K-edges 計算スペクトルでは規則状 態のスペクトルに比べピークCの強度が著し く増加している. このような規則モデルのス ペクトルから不規則化モデルのスペクトルへ の変化は、実験スペクトルでの照射量に伴う 変化の傾向と一致している. すなわち, 実験 スペクトルでのイオン照射量に依存した変化 は、カチオンの不規則化に起因していること を示唆している. さらに図2(b) に示す不規 則モデルと規則状態である正スピネルモデル のスペクトルの差分では、実験スペクトルで の照射試料、非照射試料の差分スペクトルを よく再現している. このような理論 XANES スペクトルによる解析によって、イオン照射 を起源としてカチオン Mg および Al が不規



図 1 100 MeV Xe を照射した MgAl₂O₄の(a) Mg K-edge XANES および(b) 非照射試料との差分スペクトル



則化し、さらに照射量の増加に伴って、不規則度が増加していることが示された.

(1) S. Yoshioka et al., J. Am. Ceram. Soc., 103:4654-4663 (2020)

降着円盤と乱流輸送

国立天文台 町田真美

目的

原始星やブラックホールに対して質量が流れ込む降着円盤では、角運動量の輸送や磁場がダイナモ効果により非線形発展する過程が重要な問題として認識されている。これらの問題にアプローチする際に重要となるパラメータの一つとして、乱流や流れ場が有するヘリシティがある。本研究では、乱流プラズマのヘリシティの非線形発展や、対称性の破れに関する研究が進められている応用力学研究所のグループと協力することで、降着円盤における乱流輸送という難問に挑戦する。Magneto-Rotational Instability (MRI) 不安定性やその他の非理想 MHD 効果を含む不安定性を実験観測するために必要となるパラメーターの同定し、PANTA 等の装置を用いた実験観測的研究へと発展させることを目的とする。

結果

本年度は、原子惑星円盤を念 頭に置き、プラズマと中性ガ スが共存する系における乱 流、運動量輸送、流れ構造形 成の研究を進めた[1]。運動量 を介して磁化プラズマと中性 粒子ガスが結合する場合、磁 化プラズマが有していた準2 次元的性質が保存されること がわかった。そのような場合 に形成される特徴的な渦構造 として、最小エンストロフィ ー状態における構造について 解析を進め、プラズマ中の流れ構 造や電場構造が中性粒子分布を変 化させることで制御できる可能性



図1:最小エンストロフィー状態における 電場構造と中性粒子分への依存性

を見出した(図1)。

次に、降着円盤における MRI 乱流の持つダイナモ効果に関する考察を進めた [2]。通常平均場理論によると磁場が乱流起電力、特にアルファ効果によって増幅される。これらの磁場は異常抵抗によって散逸され、これらの釣り合いから最終的な磁場の強度が決まる。現状の数値実験では異常抵抗について簡約化されたモデルを用いている。このモデルについて、MRI 乱流から生じる異常抵抗を自己無撞着に取り入れること、または局所的に増幅された電流が駆動する微視的なプラズマ不安定性に起因する異常抵抗へと拡張できること、などを見出した。

原子惑星円盤やブラックホール周りの降着円盤など多様な円盤系が存在する。 円盤系における乱流や輸送を包括的に理解するためには、MHD による MRI 乱流の 他にさまざまな非 MHD 効果が重要となる。今回の研究では、中性粒子が存在す る場合の流れ構造の形成に関する解析を進めた他、電子の微視的ダイナミクス に起因する異常抵抗について考察を深めることができた。多様な円盤系への応 用の礎を構築することができた。

成果

- 1. Y. Kosuga, D. Aoki: 'Minimum enstrophy flows in drift wave turbulence with neutral particles' Plasma Phys. Control. Fusion **62** (2020) 105002
- 町田真美、ブラックホール周辺のプラズマのダイナミクス プラズマ核融 合学会第24回支部大会 2020.12.20 INV03

研究組織

町田真美(国立天文台)、小菅佑輔(九大応研)

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

大阪府立大学工学研究科 堀史説

はじめに

材料中での水素原子は様々な構造材料で問題になり得る。特に核融合炉でのプラズマ相 互作用では重要な問題の一つである。これは、水素による脆化やボイドスエリングなどの 機械的強度において重大な劣化を引き起こすためである。加えて、熱伝導などの材料特性 とも密接な関係を有しており、これらの相互作用について様々な研究が進められている。 このような材料中の水素状態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来た。また、水素原子は結晶 欠陥との相互作用や合金種に敏感に依存するなどその挙動は単純でない。このような格子 欠陥に対しては、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。これまでの研究で、空孔を含む合金に水素を注入した際に 空孔内の電子状態の変化が陽電子消滅法によって観測されている。特に、近年体心立方格 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。我々のこれまでの研究において 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。中でも bcc 構造を基本とする規則構造の Fe-Al 合金では第一原理計 算において単一空孔あたりに複数の水素原子を捕獲安定化する結果を得ており、これに対 応する実験として、電子線照射によって空孔を導入した Fe-Al 合金の空孔が電気化学的手 法による水素注入によって状態変化する挙動を陽電子で捉えている。しかし、同じ bcc 型 の規則構造構造を有する Fe-Rh 合金においては必ずしも Fe-Al 合金と同様の大きな変化は 観測されず、これは第一原理計算で空孔と水素の相互作用が Fe-Al 合金に比べて小さいと いう結果と良く対応していた。そこで、今回は特に Fe-Al 合金に焦点を絞り、電子線照射 の有無による注入水素の挙動を調べるために、照射前後にそれぞれ電気化学的手法である 電界水素注入法で水素を取り込んだ後の加熱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の Fe-48at.%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 600℃、120 時間の焼鈍を行均一化熱処理した後にエックス線回折により B2 単相の 試料を作成した。この合金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 1×10¹⁸ e⁻/cm²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/cm² で 10 時間行った。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 で行い、四重極質量 分析計を用いた水素量測定を行った。

実験結果

図1は未照射試料に水素チャージした Fe-Al 合金 の TDA 水素放出スペクトルである。これは縦軸の スケールからも分かるように殆んど明確な放出ピ ークも見られないので、実際には水素は試料内部 に残留していないと考えられる。一方、図2には 2MeV で電子線照射した試料の水素放出挙動を、 図1のデータと一緒にプロットしている。この図 を見ると、未照射試料に比べて明らかに放出され る水素が大量に存在していることがわかる。約 350℃付近と 520℃付近に 2 つの水素放出ピークが 確認される。この試料のX線回折データからは照 射前との変化は見られず、水素化物の形成は起こ っていないことが示されている[1]。そのため、こ の試料内の水素は化合物を形成せずに、室温では 放出されない程度の安定な位置に捕獲されている と考えられる。図3は同じく 8MeV の電子線照射 した試料の水素放出挙動である。2MeV 照射と放出 温度に違いが見られるが、水素を内部に捕獲して いることがわかる。これまでの陽電子消滅測定の 結果と比較して考えると、照射電子線のエネルギ ーが異なることで照射導入空孔が鉄空孔とアルミ ニウム空孔の比率が異なる結果が示されており、 注入された水素を捕獲した空孔種が異なっている ためであると考えられていた。実際の放出挙動に このような違いが確認されたことで、空孔種に依 存した水素原子の空孔への捕獲状態が異なること が示された。

謝辞:本研究は九州大学応力研の共同利用の助成 を受けたもので、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ます。実験、議論頂き有り難 うございました。

研究組織: 堀史説(大阪府大工学研究科)、Xu Qiu (京大複合原子力研)、大澤一人(九大応力研)

参考文献

[1] 平成 28 年九大応力研共同利用報告書 vol.20 p.158



図3 8MeV電子照射したFe-Al合金への 水素チャージ後のTDAスペクトル

300

Temperature (℃)

200

400

500

т

5 10⁻⁸

Ω

100

高温プラズマ曝露炉内機器の表面変質と損傷に関する総合的研究

九州大学応用力学研究所 吉田直亮

1. 研究目的

高温プラズマ閉じ込め装置におけるプラズマ対向壁表面は、飛来するプラズマ粒子による照射損傷や壁表 面から弾き出された原子の再堆積や侵入によって激しく変質する。この現象(プラズマ・壁相互作用、PWI)によ って壁面の剥離や表面特性の劣化が起こりプラズマの性能にも悪い影響を及ぼすことが判って来た。

PWIによるプラズマ対向面劣化現象のメカニズムを明らかにし、それを抑制するための対応策を見出すことは、 核融合炉実現に向けて現段階で取り組むべき重要な研究課題であり、本研究では昨年度に引き続き、当初の 計画通り下記3課題を中心に研究を進めた。

課題1 QUEST 及び LHD における多様な PWI 現象の解明

課題2 QUEST 高温プラズマ対向W壁用ライナー材料の開発と評価

課題3 W再堆積層の微細組織形成に及ぼすHeプラズマ同時照射の影響

本報告では、各課題において得られた成果について述べる。

2. 課題1の成果

2.1 QUEST において壁から再放出される水素が長時間プラズマ放電に及ぼす影響とその抑制対策

QUEST における今期のキャンペーン(2020S/S-2)では放電持続時間が6時間(計画停止)の放電など数時間を超える超長時間放電実験が1ヶ月にわたり行われた。本研究では、各種のプラズマ曝露用試験片を壁面に固定し、それらが受けた PWIの影響(表面組織・組成、水素の吸蔵・放出特性、等の変化)を詳細に調べた。

プラズマとの相互作用が強い上部壁(T),下部壁(B)に取り付けた試験片への不純物の堆積は、放電時間が 非常に長かったにも関わらず精々 8nm 程度でありプラズマによる照射損傷も軽微なこと(TEM 観察結果)からこ れまでに無くPWI が抑制された優れた放電が行われたことが判る。図1のGD-OES データが示すように再堆積 層においてはプラズマ対向材の構成原子である金属原子(Fe, Cr, Ni, W)の濃度が再び 50at%を超え、長時間 放電が頻繁に行われた 2016A/W に匹敵する金属原子の割合に戻った。2016A/W での経験からこの様な金属 成分の多い堆積層で覆われた Wを 200°C でHイオンに曝した場合、水素は殆ど保持されることなく素早く放出 されることが判っており、粒子バランスの制御が容易になり安定な超長時間放電が達成できたものと思われる。 2.2 真空容器保護壁面への不純物堆積挙動から見た LHD 内の水素同位体残留機構

本研究では、LHD プラズマ対向壁の、どのような場所に、どのようなメカニズムによって、どれだけの水素同 位体(T 等)が捕捉されるか、を明らかにすることを目的として、多数の試験片をプラズマ対向壁面上に固定し T が発生する D-D 放電が行われた C-19, C-20 及び C-21 のプラズマ放電に曝した。各キャンペーン終了後、試 験片を取り出し、表面及び内部の変化、特に微視的な組織・組成変化、について TEM、SEM を用いて詳細に 調べた。更にこれらの領域に滞留する T を IP 法により測定し、表面状態との関係を調べた。

ダイバータ材として等方性黒鉛を用いている LHD ではプラズマ対向面(SUS)に飛来し堆積する主たる不純物は炭素(C)であるが、堆積層の厚さは場所によって大きく異なる。主プラズマに近接する内側壁面はプラズマによって激しくスパッタされるため損耗ドミナントとなり、堆積層の厚さは数 nm 程度にとどまる。一方、主プラズマから遠い外側壁面でダイバータに近い領域ではダイバータ表面から直接飛来する C 原子や C-H 分子が多い上にプラズマによるスパッタリング損耗が期待できないため堆積ドミナントとなり、場所によっては図2に示すような桁違いに厚い堆積層で覆われる。IP 測定によりT は炭素を主成分とする厚い堆積層に覆われた堆積ドミナント領域(壁面の約 50%)に局在することが判った。C と強く結合する水素同位体は一旦堆積層内に取り込まれると容易に分離・放出されることはなく安定に蓄積されるため除去は容易ではない。LHD では真空容器内に滞留

119

している T を除去するために H や He を用いたグロー放電洗浄(GDC)が頻繁に行われているが、C が殆ど堆 積していない損耗ドミナント領域では効果が有るものの、図2に示した様な堆積ドミナント領域では効果は限定 的である。その上 GDC により主プラズマに近い領域で剥離・放出された SUS 微粒子が飛来し表面を覆うためむ しろ T を DGC から"守る"結果になっている。ダイバータに炭素材を使用する限り大量の T の真空容器内滞留 を抑えることは難しく安全管理上課題が残る。金属ダイバータであれば当然ながら T の容器内滞留量は桁違い に減少する。壁の温度を 200-300°C 程度に加熱できれば残留 T は更に減少するであろう

3. 課題2の成果

QUEST ではこれまでプラズマ対向壁ライナーの温度を 100-200°C 前後に保ち放電実験が行われてきたが、 今後は温度を更に上げ核融合炉で想定される 500-600°C に保った状態での高温プラズマ定常放電実験が計 画され、準備が始まっている。現在の QUEST では壁ライナーとして APS-W 被覆 SUS 板材が用いられているが、 残念ながら APS-W は多くの空隙や亀裂を内包するため 500-600°C 温度領域で激しい水素の吸蔵・放出が起 こり粒子バランスの制御が難しくなることが予想される。従って今後更に壁温度を上げて定常放電を実現するた めには水素の吸蔵・放出量が十分少ない新たな W 接合 SUS ライナーに置き換え、粒子バランスの制御を容易 にする必要がある。昨年度からメーカー、研究機関等の協力を得て目的に叶う W ライナー材の開発を進めてお り、本年度は提供された試作材の特性評価試験を行った。詳細は割愛するが、500-600°C 領域での水素吸蔵 量や再放出量が目指すレベルにあるかどうかを調べた結果、接合方法によっては 600°C 領域での吸蔵・放出 現象が顕著になった試作材も有ったが接合過程や表面仕上げ過程で発生する表面近傍の強変形層を除去す ることによって改善できることも明らかになって来た。今後も引き続き開発を進める。

4. 課題3の成果

長く続けて来た W における He プラズマ照射効果に関する共同研究をベースに、プラズマ・核融合学会年会 において下記のシンポジウム(WEB 会議)を行った。多くの参加者を得て活発な議論が行われた。

<u>プラズマ・核融合学会 第37回年会シンポジウム(2020.12.2 15:30-17:30)</u>

「核融合炉においてヘリウムプラズマー壁相互作用がもたらす問題点の整理と課題克服への対応」

1. 趣旨説明 吉田直亮(九大)

2. ヘリウムプラズマ照射による表面損傷構造形成と材料損耗 坂本隆一(NIFS)

3. ヘリウムータングステン共堆積層による構造・物性変化と核融合炉への影響 梶田 信(名大)

4. シミュレーションで見られるファズ成長のスパッタリング・再堆積過程の重要性 伊藤篤史(NIFS)

5. 表面/バルクに存在するヘリウムが水素同位体滞留に及ぼす影響 大矢恭久(静岡大)

6. 核融合炉におけるヘリウムリサイクリングの影響とQUEST 実験 花田和明(九大)

7. 総合討論



図1 QUEST における不純物堆積の変遷



図2 LHD の炭素を主成分とする厚い堆積層(C21)

タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響

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 徳永和俊

1. 目的

一般的に、タングステンは低温脆化、再結晶脆化及び照射脆化などの弱点で核融合炉プラズマ対向材 として問題がある。近年、W-Y₂O₃ 合金が良い力学特性を示したため、注目されている。本研究では、 W-Y₂O₃ 合金の高温プラズマ耐照射性を調べるため、イオン加速器—透過型電子顕微鏡システムを用い て、ヘリウムイオン照射中に組織変化のその場の観察を行った。

2. 実験方法

液相ドーピング法及び放電プラズマ焼結する方法(SPS)でタングステン合金 W-Y₂O₃ を作製した。 作製途中に50%の冷間加工の工程を入れた。この合金から厚み0.1mm、直径3mmの試料を切り出した。 その後、2%の NaOH 溶液を電解研磨液として使って、透過型電子顕微鏡で観察ができる薄膜試料を作 製した。電解研磨の電圧は約10Vであった。ヘリウムイオン照射は島根大学に設置されたイオン加速器 一透過型電子顕微鏡システムで実施された。ヘリウムイオンのエネルギーは5keV で、ヘリウムフラッ クスは約1.5×10¹⁸ He/m² であった。照射温度は773K、973K と1173K であった。

3. 実験結果と考察

図1に773K、973K及び1193Kでヘリウム照射下での損傷組織を示す。図の上から下までの照射温 度はそれぞれ773K、973Kと1193Kであった。図に4.5×10²⁰ He/m²より低高いヘリウム照射量の組 織写真だけを示した。いずれの照射温度においても4.5×10²⁰ He/m²まで照射すると、ヘリウムバブル の密度が最大になった。その後、ヘリウム照射量の増加と共に、ヘリウムバブルの密度が減少し、バブ ルのサイズが増加した。また、図に示したように、同じ照射量においては、照射温度の増加とともに、 ヘリウムバブルの密度が減少し、サイズが増加した。照射による材料の体積の変化、即ちスエリングは バブルの密度とサイズの乗算である。照射温度の増加と共に、ヘリウムバブル形成によるエスリングは 増加した。また、1173K でヘリウム照射された純タグステンにおけるヘリウムバブルの形成に比べ、 W-Y₂O₃合金の方がスエリングは低かった。これはナノ粒子Y₂O₃がヘリウムバブル成長を抑えたことを 示唆している。

図に、黒い粒子が Y_2O_3 ナノ粒子である。しかし、高温においては、照射量の増加と共に、試料が変形したため、全く同じ場所でも組織観察が不可能であった。実際、図に示した Y_2O_3 ナノ粒子が違った場所にあったものであった。高温度でヘリウム照射中に Y_2O_3 ナノ粒子の成長、または縮小が観察されなかった。 Y_2O_3 ナノ粒子の熱安定性がいいと考えられる。

4. まとめ

液相ドーピング法及び放電プラズマ焼結する方法を用いて、W-Y₂O₃合金を作製した。この合金に対して、5keVのヘリウムイオン照射し、ヘリウムバブルの形成とスエリングの温度依存性を調べた。ヘリウムの照射温度が高くなると、ヘリウム照射によって形成されたバブルの密度が減少し、サイズが増加した。その結果、スエリングが増加した。純タングステンに比べ、W-Y₂O₃合金の方がスエリングは抑制された。これは添加したY₂O₃ナノ粒子がヘリウムバブルをトラップし、バブルの成長を抑えたと考えられる。



図1 各温度でヘリウムイオン照射した W-Y₂O₃合金におけるヘリウムバブルの形成の照射量依存性 (上部:773K、中部:973K、下部:1173K)

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

ステンレス鋼は一般工業製品の材料であるばかりでなく核融合炉真空容器の候補材である。真空容 器はダイバータ材やブランケット材のように、高エネルギー、高フラックスの水素同位体の照射は受け ないと考えられるが、周辺のプラズマによる水素同位体の照射を受け、水素同位体の溶解、透過、リサ イクリングなどは重要となると考えられる。本年度の研究では、一般ステンレス鋼として SUS304 を試 料とし、水素同位体(重水素、D2)をACグロー放電プラズマにより注入し、照射した試料からの重水 素の高温放出挙動を昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて調べた。さらに、拡散解析ソフトである TMAP-4 を用いて、SUS304 試料からの水素の放出挙動をシミュレートし、実験結果と比較した。 2. 実験

円板状の SUS304(約6mm⁺, 193 μm^t) を試料とし、#2000 の耐水研 磨紙で研磨、洗浄後、10⁻⁵Pa以下の 圧力で真空焼鈍(1000℃、0.5h)し た。これらの試料を図1に示すグロ 一放電装置にセットし、低圧力(0.5 Torr)の重水素を AC グロー放電 (60Hz, 1800V[1]) により室温で注 入した。放電条件を表1に掲載する。 注入時間は今回、1時間と100時間 の2種類とした。重水素注入を行っ た試料について TDS 装置(図2、 QMS: Inficon H200M)にて、昇温速 度 0.5 ℃/s で 1000℃まで試料を加 熱し、D2のスペクトルを測定した。

表1 D₂交流グロー放電条件

D2 圧力	0.5 Torr
放電電圧	1800 V
放電注入時間	1 h、100 h
試料温度	室温

AC グロー放電注入装置



図2 TDS 装置

3. TMAP-4 による TDS の水素放出シミュレーション

TMAP4 (Tritium Migration Analysis Program ver.4) を用いて、D₂の放出挙動を計算した。試料厚さを 193 µm、水素が均一に金属に溶解している場合と表面付近のみに溶解しているという2種類の初期条件(総 水素量は同じ)で、また、境界条件として表面水素濃度をゼロとして拡散律速で水素放出が起こるもの とした。SUS304 鋼中の水素の拡散係数 $(D(m^2/s) = 8.25 \times 10^{-7} \exp(-E/RT), E = 49.7 \text{ kJ/mol})$ [2] を 使い、初期温度を 27℃(300 K)、昇温速度 0.5℃/s として、水素の放出スペクトルを算出した。 <u>4.</u>結果と考察

図 1

図3に、重水素注入前の試料と1時間、100時間放電照射後の試料の写真を示す。研磨試料表面には 一様な研磨傷が観察されるが、真空焼鈍後には、研磨傷は浅く、また、結晶粒が見られるようになり、 1hの放電注入後もこの状態は維持された。一方、100hの長時間放電後は、放電領域の試料表面は金属 光沢が消え、SEM像では、放電による表面のスパッタエッチィングを示唆する表面状態であった。図4 に 1h と 100h 重水素注入の両試料からの D₂の TDS 放出スペクトルを示す。1h 注入試料では、240℃付 近に最大ピークがあり、300℃程度に小さなピーク、さらに 500-600℃にブロードなピークが見られる。

100h 注入試料では、250℃と350℃付近に小さなピーク、500-600℃にブロードなピークが見られる。両 試料ともピークの高さは異なるものの、ほぼ同じ温度で D₂の放出が見られる。一方、放出した総重水素 量は、1h 注入試料の方が大きく、100h 注入試料では多量の水素を含む試料表面がエッチィングによ って除去された影響があると思われる。



図3 SUS304 試料表面(左:研磨表面、中:1h注入、右:100h注入)



図4 TDS 結果(D2 放出 左:1h 注入、右:100h 注入) 図5 TMAP-4 による水素放出解析

図5に、TMAP-4による水素放出の解析結果を示す。試料中の水素が表面に集中している場合の放出ピークは約150℃に、試料に均一に分布している場合は300℃程度にピークが生じ、これらのピークで全ての水素が放出される結果となった。TDSで得られた250℃付近のピークは、TMAP-4で試料表面に集中している時(特に1h試料)に予測されるピークに相当すると考えられる。ピーク温度の解析結果は、TDSの結果よりも低めであるが、これはTDSの前に試料を大気に晒したため、試料表面に生じた酸化皮膜の影響があると思われる。また、TDSで得られた350℃付近のピークは、試料内部に溶解した重水素のピークと考えられる。一方、TDSの5000℃のブロードなピークは、解析では得られていないことから、試料内あるいは試料表面に水素のトラップサイトが存在することを示唆している。

SUS304 鋼に低 D2 圧力下で AC グロー放電を行って重水素を注入し、TDS 分析を行った。D2 放出温度 は両試料とも3つのピークが現れた。TMAP-4 のシミュレーション結果との比較から、定温側の2つの ピークは拡散律速で試料から放出されたもので、500-600℃の高温側のピークは水素のトラップサイト の存在を示唆するものであった。

5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一 大学院生:Hossain Md Khalid、江副樹蘭、千野純敬、吉田淳一郎 九大工:門繁樹、池田亘輝、森永健太 九大応力研:渡辺英雄

<u>参考文献</u> [1] K. Hashizume et al., J. Nucl Sci. Technol., 31 (1994) 1294.

[2] T. Tanabe et al., JNM, 122&123 (1984) 1568.

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における 熱処理による回復挙動

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り、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いる。酸化物被覆層における中性子照射効果は、先進ブランケットを設計する 上で、大変重要な因子である。しかしながら、酸化物被覆層の中性子照射効果の研究については、国内 的に原子炉が停止している事情も然ることながら、大変手間がかかる上に長期間の照射時間を要する。

一方で、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とともに、実際 の中性子照射における加速試験に相当するものである。酸化物被覆材の中性子照射効果を検討する上で、 イオン照射実験からの知見は先進ブランケット設計に重要であると言える。これまで、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が可能な高エネルギーイオン発生装置にて照射された酸化物 被覆層の非晶質化とそれに伴う剥離強度の低下を明らかにした[1]。本研究ではイオン照射後の酸化物被 覆層の微細組織における熱処理による回復挙動を検討する。

2. 実験方法

SUS316 基板(基板温度 500℃)に Y₂O₃ 層を成膜した後、核融合研の MOCVD 装置にて Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二 重被覆膜を成膜した。MOCVD 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。成膜された Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆膜における Er₂O₃ 及び Y₂O₃ 被覆の膜厚はお

よそ 800nm 及び 500nm であった。また、SUS 基板と Y₂O₃ 中間層の界面には Fe と Y から構成される金属間 化合物相(Fe-Y-O)の生成が確認された。製作した Er₂O₃/Y₂O₃/SUS316 二重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 Cu²⁺イオンとした。

イオンビーム照射前に Transport of Ions in Matter (TRIM)コードにて Er₂O₃/Y₂O₃/SUS における照射損傷速 度を計算した。図 1 に TRIM 計算コードによる Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆膜における Cu²⁺イオン照射損 傷速度の深さ依存性を示す。本研究における照射損傷 速度は Er₂O₃ 層の中心付近である 1.44×10⁻⁵ dpa/sec と



図 1 TRIM コードにて算出された Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆層の Cu²⁺イオン照射損 傷速度の深さ依存性

し、室温にて 1.5 dpa 相当の Cu²⁺イオン照射を実施した。照射損傷領域の微細組織の回復を目的として、 Ar 雰囲気中にて 300℃及び 500℃の 10 時間熱処理(ポストアニール)を実施した。

Cu²⁺イオン照射前後の Er₂O₃/Y2O3/SUS 二重被覆材の膜質変化の1つとして、酸化物被覆(Er₂O₃+Y₂O₃) と SUS 基板との間の剥離強度に注目したスクラッチ試験を実施した。スクラッチ試験は、日本工業規格 (JIS)に認定されている被膜の機械試験法の1つである。一方、酸化物被覆層及び被覆層と SUS 基板界 面の微細組織における Cu²⁺イオン照射前後の変化については、集束イオンビーム加工機(FIB:日立製 NB-5000)にてサンプリング及び薄片化加工を行い、走査型透過電子顕微鏡(STEM:日本電子製 JEM-2800) にて検討した。

3. 結果と考察

室温での Cu²⁺イオン照射後の酸化物層の剥離強度は照射前と比較して約70%まで低下することが明らかになっている[1]。酸化物被覆層の長寿命化に向けて、Cu²⁺イオン照射後の酸化物被覆層の剥離強度の

回復を狙い、300℃及び 500℃の後熱処理を実施した結 果、約 10%の剥離強度の回復が確認された。しかしな がら、後熱処理温度の違いによる剥離強度の大きな差 異は確認されなかった。

図 2 に 300℃及び 500℃後熱処理後の Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆試料のおける Y₂O₃/SUS 界面の断面 STEM 像を 示す。過去の共同研究を通して、1.5dpa 相当の Cu²⁺イ オン照射後において、Y₂O₃/SUS 基板界面に約 70nm 程 度のアモルファス相が生成したことはすでに報告して いる[1]。照射によって生成したアモルファス相の層厚 に注目すると、後熱処理によって減少する傾向が見ら れた。また、後熱処理温度が 300℃であると約 54nm に 対して、500℃の後熱処理であると 32nm と見積もられ、 後熱処理温度が高くなるほどアモルファス相の層厚が 減少していた。照射後の後熱処理による若干の剥離強 度回復の要因の1つとして、Cu²⁺イオン照射にて生成し たアモルファス相の一部が後熱処理によって結晶化さ れたためであると考えられる。現在、300℃及び 500℃ にて後熱処理後の Y₂O₃/SUS 界面の元素分布解析を含め た詳細な微細構造変化について調査している。



図 2 後熱処理後の Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重 被覆膜における酸化物/SUS 基板界面の断面 STEM 像。a) 300℃及び b) 500℃である。

参考文献

[1] Y. Hishinuma et al. "Microstructure and peeling behavior of MOCVD processed oxide insulator coating before and after ion beam irradiation", Nuclear Materials and Energy, vol.16, (2018), p.123-127

トカマクプラズマにおけるジャイロ運動論解析による乱流輸送の定量化研究

核融合科学研究所 登田慎一郎

高温トカマクプラズマにおいて、乱流輸送を定量化するのが目的である。電磁的ジャイロ運動 論解析により、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, 乱流輸送の絶対値を求める。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 究所でプラズマ実験が始まっている PLATO 装置 [1] で想定されるものである。

統合コード TASK を使って、PLATO 装置でのプラズマ分布や磁場配位が、予測されている [2]。 昨年度は、このプラズマ分布や磁場配位を、プラトー装置で想定される一例として、線形ジャ イロ運動論解析を行った。ここでは、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。この時、角周波数の実数部分が正であり、モードは電子の反磁性方向に回転 している。そして、密度勾配が大きいところで不安定性が起こっている。従って、径方向にお ける大部分の領域で捕捉電子不安定性が励起していると考えられる。

今年度は、昨年度から行っていた非線形ジャイロ運動論解析を、さらに多くの径方向の点や、 解析の際の入力の密度、温度勾配を変化させて、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、 $\nu_{*e} = 0.21 \ge \nu_{*i} = 8.7$ 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 $\rho_e^* = 10^{-4} \ge \rho_i^* = 10^{-2}$ 程度である。静 電ボ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 $0.0 < k_x \rho_i < 2.0$ の領域で とってある。一方ポロイダル波数は $0.0 < k_y \rho_i < 1.0$ 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 [4] を考察した。エ ントロピーバランス方程式の時間微分項は、ある時刻後は、非常に小さくなり、統計的に定常 状態になる。 $\rho = 0.65$ で、定常状態においては、イオンの自由エネルギーの項は、イオンの衝 突散逸項と 20%の誤差でバランスする。一方、電子の自由エネルギーの項は、電子の衝突散逸 項と 25%の誤差でバランスする。しかしながら、図1で示しているように、径方向の多くの点 で、静電ポテンシャル揺動の時間発展をみると、間欠的に振動している場合があり、明白な非 線形飽和を見ることができない。ここで、 $\mathcal{T} = \sum_{k_x, \bar{k}_y \neq 0} \left< \left| \tilde{\phi}_{\bar{k}_x, \bar{k}_y = 0} \right|^2 \right> / 2$ であり、 $\tilde{\phi}_{\bar{k}_x, \bar{k}_y}$ は静電ポテンシャル揺動を表す。

今後、明白な非線形飽和を得るために、波数モードをこれまでよりも多くとる。また、衝突項

127



図 1: 静電ポテンシャル揺動の時間発展

モデルの改善を行う。プラトー装置で想定される不安定性が励起しているときに、ジャイロ運 動論解析結果に基づいた粒子、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 [5, 6, 7]。線形計算結果によって、非線形計算結果を再現するモデルであり、計算コスト を大幅に削減できる。また準線形モデルは、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輸送に対する影響について、詳 細に調べる予定である。

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] A. Ishizawa et al., Nucl. Fusion 55, 043024 (2015)
- [5] S. Toda et al., Phys. Plasmas 26, 012510 (2019)
- [6] S. Toda et al., Plasma and Fusion Research 14, 3403061 (2019)
- [7] S. Toda et al., J. Plasma Phys. 26, 815860304 (2020)

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

要旨:プラズマに暴露された対向材料中の水素リテンションを評価するため、重水素の再結合 定数をイオン銃と加速器分析を組み合わせて測定した。注入イオンのエネルギーが高い方が再 結合定数の見かけの活性化エネルギーは低くなる傾向があることが分かった。

1. 目的

プラズマ対向壁からの水素放出は、プラズマの長時間放電に大きな影響を及ぼす因子であり、その速 度は再結合定数によって表される。本研究では、タングステンにおける重水素の再結合定数を、温度と イオン注入エネルギーを変えることによって系統的に調べ、機構を考察した。

 D_2

2. 実験方法

再結合定数 kr と放出量 R との間には

 $F = R = k_r C_s^2$ (1) の関係がある。ここに C_sは固体表面近傍の水素濃度であ る。固体が厚かったり固体中の水素の拡散が十分遅かっ たりして固体を透過する水素の量が無視できる場合は、 (1)式の左辺と中辺のように入射量 F と R が等しいと見 なせる。イオン注入では電流量から F の値が測定できる ので、加速器分析の一つである核反応法を用いて C_sを測 定すると、(1)式から直接 k_rを求めることができる。

図1は本研究に用いた実験装置である。試料はニラコ から購入した純度 99.5%、厚さ 0.1mm のタングステン 板である。この試料をホルダーに装着して裏面か ら加熱し、表面に対して 45°方向から重水素イオ ンを注入した。エネルギー範囲は 100eV~2000eV であった。イオン化断面積から推定されたイオン 種は D₂+であり、典型的な入射量 Fは 1.0×10¹⁹ m⁻² であった。次に注入している状態で、表面に 対して垂直に 1.3MeV の³He+イオンビームを入 射し、核反応 D(³He,p)⁴He によって放出される陽 子(p)のエネルギースペクトルから試料表面近傍 の重水素の深さ方向分布を得た。最大分析深さは 1.0 µm であった。



³He⁺ビーム

図1 核反応法とイオン銃を組み合わせ た実験装置



核反応による測定は非破壊的であるので、同一 の試料で温度を何点か変え、それぞれの温度では十分な時間をおいてから測定するか、同じ温度で2回 測定することによって系が定常であることを確認した。また、温度を変える際は一旦 673 K に加熱し て試料中の重水素を放出させた。

129

3. 実験結果

典型的な重水素の深さ方向分布を図2に示す。 深さ0に見られるピークは表面に重水素が吸着し ているためであり、測定系の分解能に応じて広が って見えている。また、0.5μmまでは加工等に起 因すると思われるトラップのために濃度が高くな っている。そこでこれらの影響が無い 0.5 μm か ら 1.0 μm の濃度の平均値を *C*₈ とし、(1)式から *k*₇ を求めた。その結果を図3に示す。

低温で再結合定数が直線から外れるのは、吸着 している重水素の密度が高くなって、 **k**が単純な アレニウスの式で表せられなくなるためと考えら



図3 再結合定数の温度依存性

れる。直線で表すことができる領域では、注入エネルギーによって & の値が大きく異なっているが、真 空排気系にトラブルがあった試料 W-05 を除いては、無限大の温度でほぼ同じ値(4×10⁻²⁵ m⁴/s)を示 すように見える。従って、注入エネルギーは、表面からの放出過程における活性化エネルギーに影響を 及ぼしていると考えられる。この理由としては、物理スパッタや化学スパッタによる表面の清浄化、弾 き出しによる構造の変化などが考えられるが、注入エネルギーが高い方が傾きが小さい、つまり障壁が 低いことと、タングステンは水素を発熱的に放出する性質があることを考え合わせると、化学的な相互 作用よりも物理的(力学的)な相互作用の方が表面からの水素放出に影響を及ぼしている可能性が高い。

4. まとめ

プラズマから飛来する水素粒子のエネルギーは幅が広い。本研究におけるエネルギーは 100eV から 2000eV であったので、今後は 100eV 以下のエネルギーでの再結合定数についての知見が必要である。 前述の仮定が正しければ、エネルギーを低くしても再結合定数はあまり変わらないことが予想されるが、 実験によって確認することが必要であろう。

学会発表

なし

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	鈴木順也	京都大学大学院工学研究科	修士2年
研究協力者	内海宏一	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1年

参考文献

[1] Y. Furuta, et al., Nucl. Instr. Meth. B315 (2013) 121.

[2] I. Takagi, et al., J. Nucl. Mater. 417 (2011) 564.

フッ化物溶融塩中での金属腐食制御に関する研究

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。溶融塩利用の課題の一つは、金属材料の腐食である。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。そこで実効的な水素溶解度を低減するために、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 FLiNaBe 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、トリチウム放出挙動を観測した。得られた結果から、トリチウム物質移動現象を考 察し、フッ化トリチウムによる金属腐食について議論した。

【実験方法】

はじめに、フッ化物溶融塩 FLiNaBe 試料を作製した。アルゴン雰囲気グローボックス中において、FLiNaBe の 原材料である LiF、BeF2、NaF 粉末を混合調整し、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供えられたフランジで密封した。ポットを覆うようにフレ キシブルヒーターを巻き付けアルゴン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。 そして自然放熱し、常温に戻した。この過程を数回繰り返すことで溶融塩を撹拌混合した。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 455℃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。フッ化物溶融塩は、水蒸気 を取り込む性質があるため、このアルゴンガスバブリングを繰り返すことで、水蒸気を除去した。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%でチタン粉末を添加した。

次に中性子照射の準備を行った。作製した FLiNaBe 試料を Ni 製坩堝から取り出し、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。なお、一部の試料はポリ袋に Ar 雰囲気で封入した。石英管に 封入した試料の写真を図1に示す。

試料が封入されたポリ袋あるいは石英管を京都大学複合原子力科学研究所に移送し、中性子照射を行った。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て、圧気輸送管を通じて炉心内部に送り、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5.5×10¹² n/s/cm²、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 2 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 SUS316 製の配 管継手を組み合わせた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。温度は 600℃、650℃、700℃に段階的に昇温した。放出されるトリチ ウムは TF、HT、HTO の 3 つの形態であると考えられる[3]。



図1 石英管に真空封入された試料

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。これにより、TF 及び HT の 放出量の時間変化が観測された。HTO については、 コールドトラップへの貯め込み捕集であるため、試 料の加熱を終了後に、室温まで昇温し、アルゴンパ ージによって、蒸発した HTO を新たに設置した水 バブラーで捕集した。配管に付着したトリチウムを 同位体交換を利用して回収するため、1%H2/Ar ガス を酸化銅に流通させて、1%H2O/Arに転換し、コール ドトラップに導入した。

【結果及び考察】

図3にチタンを含むFLiNaBeからのトリチウム放 出曲線、図4にチタンを含まないFLiNaBeからのト リチウム放出曲線をそれぞれ示す。トリチウムの多 くはHTとして放出され、一部がTFとして放出さ れることがわかった。なお、HTのみならずT2とし て放出されている可能性もあるが、トリチウム濃度 が低いため、不純物水素と結合することで多くはHT として存在していると考えている。FLiNaBe中では、 トリチウムは主にTFとして存在していると考えら れることから、FLiNaBe自由界面から脱離したTFが 金属を腐食し、表面にフッ化物層を形成するととも に、トリチウムをHTに変換したと考えられる。坩 堝の材料であるMoはフッ化されにくい材料である ことから、ステンレス鋼反応管のCrやFeがフッ化





されたものと考えられる。600℃でのHTの上昇速度は、Tiを含む方が小さいことがわかった。これは、チタンに よってトリチウムが吸収されることで、脱離速度が低下したと考えられる。200分付近での急峻な上昇は、650℃ に昇温したことによりTiに捕捉されていたトリチウムが速やか脱離したものと考えている。

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.

確率項を含むプラズマ乱流モデルの解析

Analysis of plasma turbulence model including stochastic terms

富山大学・教育学系 成行 泰裕

研究目的:

プラズマ乱流の性質を理解する場合、その乱流を形成している擾乱間の非線形相互 作用の解明が重要になる。一方で、プラズマ中には速度分布に起因する微視的不安定性 や熱的ノイズなどが存在するため、コヒーレントな波動間相互作用が卓越するとは限らない。

本年度も、昨年度と同様に粗視化スケールの揺動を確率項として含むドリフト波の捕捉 モデル(M. Sasaki et al, 2017; 2018)を用いて、実空間・波数空間のエネルギー輸送の関係を 議論する。

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的・数値的に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:

本年度もドリフト波の捕捉モデル(M. Sasaki et al, 2017; 2018)[1,2]として用いられた wave-kinetic equation[3]を用いて議論を行った。昨年度と同様に、実空間(x)・波数空間(k_x) における波の作用の移流を表す項を除くと、波数空間の拡散項のみが有効な状況を考える。 これは、拡散極限(diffusion limit)で近似できる擾乱と捕捉(trapping)をもたらす擾乱が共存 している状況に相当する。数値計算には、wave-kinetic equation に対応する x_x の確率微 分方程式を Eular-丸山法[4]を用いて解いている。測地線音波揺動は先行研究[1]と同様に 単色で与えており、位相速度も先行研究[1]と同じ値にしている。初期値はすべての擬似粒 子に対し $x=k_x=0$ とし、擬似粒子の数は 1000 個、 $\Delta t = 10^{-5}$ である。本年度は主に、測地線 音波揺動の振幅と波数(周波数)に対する依存性について議論を行った。

Figure 1(a)(b)は x,kx それぞれの分散の時間発展を示している。まず、測地線音波揺動 が存在していない場合(灰太線)、kxはブラウン運動(Wiener 過程)になる一方で、ドリフト波の 分散性によって x にも拡散が生じていることが分かる。時間発展の初期に下に凸の曲線に なるのは、kxの絶対値が小さい時は dx が kxに比例するためである(Richardson 拡散)[5]。有 限の測地線音波揺動振幅を与えた場合(黒破線)では、振幅が大きくなるにつれて kxの分散 の時間発展に長周期の振動が現れる。この振動は、有限の測地線音波揺動によって位相 空間上に捕捉領域が生成されるため生じる。一方で、x の拡散は振幅が大きくなるにつれ抑 制されて、ある程度振幅が大きくなると捕捉の方が優位になる。また、灰点線は黒破線・灰 太線よりも大きな波数・周波数を用いた場合を表している。kx の分散は同じ振幅の値を用い た黒破線の場合(図中の*印)と同じようなトレンドであることが分かるが、x の拡散には明らか な差があることが分かる。ただし、振幅の値を大きくしていくと、kxの分散の時間発展は波数・ 周波数に大きく依存するようになる。ノイズ強度への依存性について調べた昨年度の計算 結果でも見られていたが、波数空間の分散は捕捉領域の生成に影響を受けて増減を繰り 返すのに対し、実空間(x)の分散は比較的単調な時間変化の傾向を保っている。



Figure 1 (a) $x \ge (b) k_x$ の分散の時間発展。灰太線が測地線音波揺動が存在していない場合である。xの拡散は揺動の振幅が大きくなるにつれて弱くなっている。*がついている黒破線は、灰破線と同じ大きさの振幅の場合である。

参考文献: [1] M. Sasaki et al, Sci. Rep., 7, 16767 (2017). [2] M. Sasaki et al, Phys. Plasmas 25, 012316 (2018). [3] P. H. Diamond et al, Plasma Phys. Control. Fusion, 47, R35–R161, (2005). [4] D. J. Higham, SIAM REVIEW, 43(3), 525–546 (2001). [5]e.g., 北原和夫, 非平衡系の統計力学, 岩波書店 (1997).

公表状況:なし

研究組織:

成行泰裕(富大・人間発達)、佐々木真(九大・応力研)、羽田亨(九大・総理工)
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

<u>1.</u> はじめに 過酷な条件下で使用する材料の諸特性を明らかにし、それらを生かした諸応 用を提案し、これらの課題に関連する、最近の共同研究結果について、その概要を述べる。

<u>2.</u>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。

3. 研究成果

3-1 非接触温度計の選定 産業用非接触温度計については、種々のものが広く販売をされている が、数多くの候補中から、今回は、オプテックス・エフエー社(OA社)の製品が、我々の目的 には最適であると考えた。そこで、3台のデモ機を、順次送っていただき、性能調査を行った。 東工大フロンティア材料研究所の真空蒸着装置の蒸着部には、透明ガラスのベルジャーが用い られている。この外部より、内部のタングステン加熱板の温度を加熱中に測定するためには、 温度計の測定に使用する波長の最適な選定と、空間及び時間的にマッチした光学(レンズ)系を 構成する必要がある。

デモ機温度計は OA 社の設置型非接触温度計(金属・セラミック測定用)の3機種で、 (1)GTL-1MH-SF, (2)GTL-1ML-CF2, (3)GTL-2MH-SF の各1台であった。それぞれの測定温度範 囲と測定波長は+650から+1800℃と1.0ミクロン、+485から+1050℃と1.0ミクロン、+385 から+1600℃と1.6ミクロンであった。各機種の最後のアルファベット文字は、温度計の焦点距 離や視野を示す文字である。

3-2 非接触温度計による計測結果 蒸着装置にタングステンボートを装荷して、上記の(3) により温度測定をした時の実験装置配置写真を図1に示す。同写真中央右上のガラス容器の中に、 細長いタングステンボートがあり、真空状態で加熱ができるようになっている。非接触温度計は 容器のすぐ左側の茶色の台枠の上に置いてあり、ステンレスの筒状の物がそのヘッドである。左 下小テーブルの上には、デジタル温度表示部があり、細いケーブルで温度計ヘッドに接続されて いる。温度計の制御と計測データ記録は、小テーブル上のPCで行う。温度測定結果の1例を図 2に示す。横軸はタングステンの加熱電流値(最大値が 50A)で、縦軸はタングステンの表面温 度(最大値が 1542℃)である。他の2機種の温度計による測定結果も、ほぼ同じ値の対応温度を 示した。デモ機により温度測定ができることが分かったので、予算的に購入可能な1機種として、 GTL-2MH-CF4を発注した。納期は 2021年2月末で、この報告書の提出締切日とほぼ同じにな っているので、用意ができ次第、温度測定に使用する予定である。

<u>3-3</u>別の材料サンプル加熱法の提案と初期テスト小サンプルの加熱法として、これまでに 提案した方法とは異なる次の新しい方法がある。車のシガレットライターと車載用バッテリー をボタンスイッチ経由で接続し、短時間ライターを加熱する方法である。短時間の通電時間の 選択により、シガレットライターを必要な温度にまで加熱することができる。この方法により加 熱部の温度を、試しに測定してみたが、真空蒸着装置を使う場合と同様に、問題なく温度測定 ができた。加熱するサンプルや実験条件にもよるが、このような方法でもサンプルの必要な温度 加熱ができることが分かった。 3-4 分光計測法の準備 白色光源とファイバープローブ反射法で、サンプル表面からの反射 光の分光測定ができるようになった。市販のファイバー結合型小型分光装置を用意した。分光器、 3分岐入・反射ファイバー光プローブ、ハロゲン光源、分光器制御用パソコンを接続使用した。 一例として、3-5節(次節)のような、テストサンプル表面からの反射光を分光器により観測・ 解析した。

<u>3-5</u> モスアイ石英板の反射測定 上記の測定方法により、モスアイ石英板の反射光測定を実施 した結果を、以下に述べる。(1)正反射(垂直入射)の場合、かなり低い反射率が得られている。 (2)斜入射(45度入射)の場合、反射光はほとんど観測されなかった。(3)サンプルとプローブへ ッド配置設定方法の改良を現在進めており、垂直入射の場合にも、より低い反射率が得られるこ とが、期待される。

<u>4. 検討</u>加熱電流値 50A で加熱中のタングステンは赤熱状態であるが、加熱電源スイッチを 遮断した直後の過渡的温度変化を計測した。小さい階段状の(ギザギザの)過渡的温度変化(図 3)が観測できたが、メーカーの技術者とも話し合ったが、今までのところその原因は不明であ り、今後の課題である。

<u>5. あとがき</u> 今後、実験データの集積をさらに進め、本報告書では割愛した、レーザー励 起超音波厚さ測定法、レーザー分光干渉法を含む先進計測法の厚さ可能範囲や精度について詳し く検討する。



図1 ベルジャー内加熱タングステン板の 非接触温度測定装置

1404.8 [°C]

1183

1083.5 -983.5 -883.5 -783.5 -683.5 -583.5 -483.5 -383.5 -383.5 -0.0



図3 タングステン板の加熱電流急遮断時の過渡温度測定結果

<u>6.</u> 参考文献 (国際会議報告予定): K. Kasuya et al., Proc. XXIII Int. Symposium on High-Power Laser Systems and Applications, 20-24 September, Praha-Czech, 2 papers-submitted (2021).

2021/02/28 報告

直線プラズマ装置 PANTA における音速分子ビーム入射装置を用いた密度プロファイル制御

核融合科学研究所 小林達哉

1. 研究目的

九州大学応用力学研究所の直線プラズマ装置 PANTA には、主に計測ビームと して SMBI (Super Molecular Beam Injection, 超音速分子ビーム入射) 装置が 導入されている. アルゴンプラズマ中に電離エネルギーの高いヘリウムの SMBI を入射することで、電子密度分布を維持したまま中性ガス圧のみを変化させる ことが可能となった. SMBI 入射後のプラズマ乱流の変化を観測し、その非線形 過程を解明することが本研究の目的である.

2. 実験結果

PANTA は軸長 4m, 半径 5cm の円筒型磁場閉じ込めプラズマである.円筒の真空 容器の片側底面で RF により生成されたプラズマを軸方向磁場で閉じ込める.64channel 周方向プローブアレイと 5-channel 径方向プローブアレイ (tip 間隔 1cm)を用いて乱流を計測する.プラズマ生成部から 1375mm 離れた位置に SMBI 装置が取り付けられている.1回の入射で,装置内に満たされている中性ガスと 同程度の粒子数が供給される.

図1に SMBI 前後の, イオン飽和電流揺動の(a, b)時空間スペクトル, および (c, d)時空間バイスペクトルを示す. ここでイオン飽和電流は電子密度に比例す ると考える. SMBI 前後で, 揺動の時空間構造が変化していることが示されてい る. 特にモード数2, f=10kHz を中心に広がっていた乱流構造が減少し, モード 数1, f=4kHz の単ーモードに揺動エネルギーが集中することがわかった. この 原因を考察するため, 乱流の非線形発展を促進する m=-1, f=1-3kHz のモード(メ ディエーターモード) と各揺動成分のバイコヒーレンスを計算した(図1 c, d). その結果, SMBI 入射後は非線形結合度が顕著に弱まることが示された. SMBI 入 射前は非線形発展に消費されていた揺動の自由エネルギーが SMBI 入射後は行き



図 1. イオン飽和電流揺動の(a, b)時空間スペクトル,および(c, d)時空間バ イスペクトル. 左が SMBI 入射前,右が SMBI 入射後 [1].

場を失い, m=1の揺動に 集中したのだと考えられる.

3. まとめ

直線プラズマ装置 PANTA において中性ガスパフ装置を開発した. 密度分布を一定に保ったまま中性ガス圧を変化させることにより, 揺動の線形減衰機構がモードの非線形発展に与える影響を議論した. 高周波数揺動の非線型結合が弱められ, 低周波揺動にエネルギーが集中する様子が示された [1].

研究組織

稲垣滋(九大応力研),佐々木真(九大応力研)

参考文献

[1] T. Kobayashi et al., Phys. Plasmas 27, 062309 (2020)

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 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.

2. 実験方法

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(以下,Fと記載する)及びほぼ等軸状組織 を有する再結晶材の純タングステン(以下,EAと記載する)、銅を約10%含有する銅タングステン(以下, C10B2と記載する)、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(以下,CeWと記載する)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、一部は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電極はスウェージ加 工後に、約2,000℃の水素雰囲気中で熱処理されている.また、タングステン材料は、日本タングステン(株) が独自に開発した NDB 法⁽¹⁾によって、銅製の支持部に接合されている.そのタングステン材料の先端部と銅 製の支持部に埋まっている後端部について、それぞれ直径 φ 5mm、厚さ 1mm の円板状試験片を TDS 試験の 試料とした.

TDS 試験では,超高真空中にて試料表面の水分を飛ばすために,予備加熱として 10℃/min の昇温速度で加熱して 100℃で 30 分間保持した後,100℃/h の昇温速度で 450℃まで加熱し,試料から放出される水素ガスを 測定した.TDS 試験後,室温まで冷却して再度同じ昇温速度で加熱し,放出される水素ガスを測定してバッ クグラウンドとし,放出総量から差引いた.

3. 実験結果及び考察

EAとFのTDS 試験の結果を図1に, C10B2とCeWのTDS 試験の結果を図2示す. 各タングステン材料の先端部の試料のピーク温度を表1に示す. また,各試料の総水素放出量を図3に示す.

EA-topでは246℃付近と284℃付近にピークがみられた.246℃付近のピークは粒界にトラップされた水素であると考えられる.284℃付近のピークは粒内の転位や点欠陥にトラップされた水素が粒界に移動し、粒界に沿って放出されたものと考えられる.F-topでは244℃付近と285℃付近にピークが見られた.この2つのピークの温度はEA-topのピークの温度とほぼ一致しており、トラップサイトが同じであることを示している.水素の全放出量を比較すると、F-topの放出量は、EA-topの放出量の約3倍である.EAは水素ガス中で熱処理されているが、その熱処理中の水素は材料中に侵入せず、再結晶により加工時の転位や欠陥が消滅し、水素のトラップサイトが少なくなったものと考えられる.一方でFは製造時のスウェージ加工により材料中に多数の転位や欠陥が存在し、それがトラップサイトとなり多量の残留水素が存在したと考えられる.

C10B2-top では 235℃付近と 265℃付近にピークが見られた. これらのピークは EA-top や F-top と比較し て約 15℃程度低い. C10B2 は約 10%の銅が添加されている. 銅はタングステンに固溶せず, タングステン の粒界に銅の層として存在する. この銅層の影響で熱処理中に残留水素がより低温で放出されやすいと考え られる. また, C10B2-top の水素放出量は F-top と比較して小さい. これはタングステンの粒界に存在した

残留水素が熱処理中に銅層を通り自然放出され残留水素が少なくなったものと考えられる. CeW-top では 271℃付近と301℃付近にピークが見られた.これらのピークはEA-topやF-topと比較して約20℃程度高い. CeW は約1%の酸化セリウムが添加されている. タングステンの粒界に析出物や微細な空孔が多数存在し, それにトラップされた水素がより高温で放出されていると考えられる. CeW-top の水素放出量はF-top と同様に大きい. これは粒界析出物や空孔に多量の水素がトラップされていたためと考えられる.

さらに,4 種類のタングステン材料のいずれに関しても,電極先端部(top)と比較して電極後端部(bottom) の水素の放出がごくわずかである.電極の後端部は NDB 法⁽¹⁾によって銅製の支持部に接合されており,銅と密着しているため,熱処理中にその銅材を通して残留水素が自然放出されたものと考えられる.



Fig. 1 TDS results of EA and F.

Table 1Peak temperatures in TDS test.

Fig. 2 TDS results of C10B2 and CeW.

					_ 1.20
Frap site	Peak temperature, T _m /°C			S 1.00	
	EA	F	C10B2	CeW	U.80
Peak 1	246	244	235	271	control (
Peak 2	284	285	265	301	de so

EA F C1082 CeW

Fig. 3 Total quantity of hydrogen desorption.

top bottom

4. まとめ

4種類のタングステン電極について TDS 試験を行い,電極中の残留水素を測定した.その結果,タングス テン材料の製造時(焼結や成形など)及び各種熱処理(再結晶化や接合など)等の影響で,再結晶材の純タ ングステン(EA)とセリウム入りタングステン(CeW)が残留水素量が多く,未再結晶材の純タングステン (F)と銅タングステン(C10B2)が残留水素量が少ないことが明らかとなった.今後,タングステン材料の き裂発生や進展(破壊特性)を繰り返し溶接試験で調査し,タングステン材料の破壊特性に及ぼす内在水素 の影響を究明する予定である.

参考文献

- (1) 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.
- (2) 近松宏洋,車田亮,伊藤吾朗,藤田貴弘,"タングステン電極の耐久性に及ぼす残留水素の影響",日本機械学 会関東支部,第28回茨城講演会講演論文集,(2020.8.21), CD-OS4-(1)-No.402.

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】原型炉等のプラズマ閉じ込め装置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、プラズマ閉じ込め装置のダイバータ板の表面材料にお いては、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発生による破壊が生じることが懸念 されている。従って、脆性を克服した高靭性のタングステンを開発することが急務となっている。現状 のWや今後開発される脆性を改善したW材がダイバータとして使用可能か否かを判断するためには、そ れぞれの材料固有の破壊に対する抵抗能力を評価する必要がある。その抵抗能力は破壊靭性とよばれ、 疲労予き裂が導入され所定の形状を持つ試験片(破壊靱性試験片)に荷重を負荷していき、試験片が破壊 せずに(すなわち、予き裂が進展開始せずに)耐え得る限界の応力拡大係数(試験片と予き裂の幾何学的形 状が決まれば、公称応力の関数として与えられる)の値として実験的に求めることができる。 延性を持つ 金属では、引張疲労の負荷により容易に疲労予き裂を導入することが可能である。しかし、W等の脆性 金属では、引張疲労で一旦き裂が発生すると、き裂は急速に進展して破壊に至るため、破壊靭性試験に 不可欠な疲労予き裂を導入することができない。最近、九州大学応用力学研究所の材料グループなどに おいて、圧縮疲労と3点曲げ(3PB)疲労の2段階負荷方式による予き裂導入法が開発され、各種のW材に 対して破壊靱性評価を行うと共に、材料組織学的な評価が進められている。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。

【実験及び解析】破壊靭性試験として成立するためには、導入する疲労予き裂の長さ、予き裂先端での 塑性域の大きさ、試験片厚さ方向の予き裂長さの分布などが ASTM (American Society for Testing and Materials) により定められた測定規格をクリアする必要がある。特に、現在進められてる圧縮疲労によ る疲労予き裂導入の方法では、予き裂前方の残留応力が破壊靭性の測定値に影響を与えることが予想さ れている。本研究では、破壊靭性試験片の形状、ノッチ(切り欠)の大きさや深さ、予き裂先端部分での 塑性域の大きさを固体力学的に評価する。また、予き裂前方の残留応力の評価、及び測定に及ぼす影響 を評価すると共に、残留応力の影響を無くすための予き裂伸延や試験が成立する小規模降伏条件の達成 のための3点曲げ(3PB)疲労時の応力の振り幅などの検討を行い、試験結果との比較を行う。また、電子 ビームを熱源としたW材の熱負荷実験を行い、機械的性質と高熱負荷特性の関係を調べる。

本年度は、純Wの圧延材(ITERダイバータ仕様、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T-L(試験片長手方向:圧延方向に垂直、切り欠き:圧延方向に配向)の方 位に切り出し、表面を機械研磨した。この試験片に対して、真空中で1800℃、1時間の再結晶熱処理を 行った後、まず、試験片長手方向に2000N/100Nの1軸圧縮疲労を負荷してノッチ底から予き裂を導入 し、電子線後方散乱解析(EBSD)を用いてミクロ組織観察を行なうことにより、き裂近傍の歪みについて 調べると共に、固体力学的な評価・解析を行った。

141

【結果】図1、及び図2に再結晶処理Wの未負荷材、及び圧縮疲労負荷材のノッチ底近傍のEBSD観察結果を示した。応力負荷材には、ノッチ先端から60µm付近までの結晶粒にひずみと考えられ表面不整 (たとえば、滑り変形跡)が観察される。また、繰り返し塑性域(*d*_c)は、下記で評価することができる。

$$dc \cong \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2$$

ここで、 ΔK は、応力拡大係数の振り幅、 σ_y は、降伏応力である。本実験の圧縮疲労条件では、 d_c は 50 μ m 程度で、EBSD で観察された長さとほぼ一致している。さらに、SEM 観察の結果からき裂は、ノッ チ底から 253 μ m まで形成されていることがわかった。単調塑性域(d_m)は、

$d_m \cong 4d_c$

で表せることから、*d* のほぼ4倍の程度までき裂が伝搬している。き裂は、弱いところ(この場合粒界) を伝播するため、また、Wの再結晶粒界は非常に弱いためこのようなき裂が形成されたものと考えられ る。

【まとめ】再結晶W材について、圧縮疲労によるノッチ底におけるき裂形成、及び伝搬に関して検討した。圧縮疲労により導入された予き裂は、単調塑性域(*d_m*)より長く、き裂先端は残留応力の域外と考えられ、そのため、小規模降伏条件を満足しているものと考えられる。今後、き裂長さと破壊靭性値との関係を明らかにする予定である。



図1 未負荷材のノッチ底近傍の EBSD 観察 結果、(a)IPF map (ND 方向)、(b)IQ map、 (c)KAM map、(d)逆極点図



図 2 圧縮応力負荷材のノッチ底近傍の EBSD 観察結果、(a)IPF map (ND 方向)、(b)IQ map、(c)KAM map、(d)逆極点図

核融合力学分野 一般研究

^{2020FP-19}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 Li2ZrO3 は多量の水(H2O)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Li2ZrO3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、Li2ZrO3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、Li2ZrO3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(Li2CO3)および酸化ジルコニウム(ZrO2)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8mm、厚さ1mmのディスク状のLi2ZrO3試料を作製 した。Li₂ZrO₃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/cm³であった。この試料を約 1×10⁵ 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 keV の重水素(D2+)イオン(即ち、5 keV の D+イオン)を約 5×10¹⁷ ions/cm²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1×105 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 Li2ZrO3

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 keV の D+イオンが約 5×10¹⁷ ions/cm²まで照射された Li₂ZrO₃試 料表面の SEM 像をそれぞれ図 1(a).(c)および(b).(d)に示す。 粒径は約5μm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る。また、図 1(b),(d)より、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 と予測される。

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測定された ERD スペクトルをそれぞれ図 2(a)および(b)に示す。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



図1 (a),(c)真空加熱、(b),(d)約5×10¹⁷ ions /cm²まで 10 keVD₂+イオン照射された Li₂ZrO₃ 試料表面 の SEM 像。



図 2 (a) 試料作製および 350℃の真空加熱、(b) 5 keV D+イオン照射および約 290 hrs の空気暴露後 に測定された Li₂ZrO₃試料表面の H および D 濃度分布(ERD スペクトル)。

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、Li₂ZrO₃試料中のある深さに対する H および D 濃度を表す。図 2(a)より、多量の H が 1100[°]C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[°]C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 5×10¹⁷ ions/cm² 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図 2(b)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 Li₂ZrO₃ 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 H₂O 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+7オン照射 Li_2ZrO_3 試料の重量を測定した。 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+7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+7オンスパッタリングにより酸素欠損(即ち、酸素

(O) 空孔)を有する Li₂ZrO_{3□}(□:酸素不定比料)層等のラジカル形成が生じ、H₂O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。

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。H2O だけでなく H2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 H2O 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 H2放出量を増加させることが 明らかになった。さらに、CH4、CO および CO2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。

<u>まとめ</u> 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 H₂O 分解および H 透過能力を向上させ、Li₂ZrO₃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 Li₂ZrO₃ 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、Li₂ZrO₃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

鉄-クロム-ニッケルを主成分とする鉄基 3d 遷移金属合金のオーステナイト系ステンレス鋼(ASSs) は、耐食性に優れており様々な機器構造物で使用されている。その性質の理解にはナノスケールでの組 織観察が不可欠となる。特定箇所の TEM 観察を行う場合の試料作製で集束イオンビーム(FIB)装置の 利用が有効であるが、その際の Ga イオン照射による損傷や組織変化に注意が必要である。代表的な ASS である SUS304 鋼は室温で準安定な fcc 構造をとるため、照射により構造相変態が生じる可能性がある。 本研究では、SUS304 鋼に Ga イオン照射した際に生じる相変態の機構を調べるため、照射領域の表面お よび断面観察を実施し、変態量や Ga 濃度分布を調べた。母相と変態相の結晶方位関係を詳しく解析し たところ、照射方向によりバリアント選択が生じていることを見出した。それらの実験結果を踏まえて、 照射による相変態の機構を考察した。

実験方法

材料は SUS304 鋼(Fe-18Cr-10Ni)を用い、固溶化熱処理を行った後に機械研磨と電解研磨をしたもの を用いた。FIB 装置を用いて 30 kV で 20×20 µm²の範囲に Ga イオンを照射した。照射量を 0.8~8.0×10¹⁶ ions/cm² で系統的に変化させ、照射方向を(001)fcc と(111)fcc の結晶粒に選んだ。従って 7 照射量、2 照射 方向の組合せの 14 条件で実験を行った。Ga イオンの注入深さ分布を SRIM コードで計算したところ、 表面から約 10 nm の地点に最も多く Ga が分布していた。表面組織観察は SEM-EBSD および EDS 分析 を実施した。断面組織観察では、照射量 8.0×10¹⁶ ions/cm² の照射-非照射の境界部分について、表面保護 のために Pt と Os を堆積した後に、マイクロサンプリング法で薄片試料を切り出した。薄片試料の観察 部の厚さは約 140 nm とした。透過 EBSD 法による組織評価と、九大応力研の球面収差補正機能付き走 査型透過電子顕微鏡(日本電子(株)製 JEM-ARM200F)を用いた STEM-EDS 分析を実施した。

結果及び考察

Fig. 1 には、照射面の上面から組織観察した結果の例として照射量が 4.0×10¹⁶ ions/cm²以上の(001)fcc および(111)fcc 照射領域の SEM 画像と EBSD 法により求めた相マップ、結晶方位マップを示す。相マップから、照射領域で bcc への相変態が生じており、その変態量は照射量の増加に伴い増えている。同一 照射量で比較すると、(111)fcc 照射の方が変態量が多い傾向が見られる。

Fig. 2 に(001)fcc 照射領域の表面近傍の、透過 EBSD 法による断面観察の結果を示す。相マップから、 一部の Ga 照射領域の表面直下に帯状の bcc 相が見られ、その結晶方位は Fig. 1 の結果と一致しているこ とからこの帯状組織が照射による変態相と推定される。この変態相の厚さは約 96 nm であった。Fig. 3 に、(001)fcc 照射領域の変態相近傍の Ga 濃度マップと線分析の STEM-EDS 分析結果を示す。Ga 濃度は 試料表面から 10 nm 程度をピークに急激に減少し、70 nm より深い領域で 1 mass%未満となる。Fig. 2 と 3 から、変態相は高 Ga 濃度の領域より深くまで広がっていることがわかった。

次に、EBSD 法による角度データから fcc と bcc の方位を解析し、最密面と最密方向の角度差に着目 して結晶方位関係について整理した。その結果、bcc 相の方位関係は単一でなく分布 (NW~KS の方位 関係)を持っており、さらにその分布が照射方向により異なることを見出した。NW の関係 ({111}fcc//{110}bcc、<211>fcc//<110>bcc)の場合、12 種類の等価な方位関係が存在し、それらをバリアントと呼ぶ。{100}bccの極点図を調べたところ、NWの関係の観点から考えると、全 12 種のうち、(001)fcc 照射では4 種類、(111)fcc 照射では3 種類のバリアントが生じていることが確認された。

以上の実験結果に基づいて変態機構を考察する。注入された Ga の化学的効果を考えると、SUS304L 鋼に Ga を添加すると bcc の形成が促進される報告があり[1]、Ga は鉄系合金の bcc 相を安定化すると考 えられる。しかし、断面観察から変態相が高 Ga 濃度でない領域まで広がっていることから、他の要因 も考慮する必要がある。その要因として応力効果が挙げられる。断面観察で確認された Ga 濃度は最大 で約 16 mass% (Fig. 3) であった。Ga が置換しているとすると、格子定数を 1%以上増加させる効果が 見込まれる[1]。この応力効果が高 Ga 濃度領域の外側にも影響を与え、相変態を促進させた可能性があ る。以上 2 つの効果で観察された変態挙動は概ね説明できるが、(001)fcc と(111)fcc の照射方向による変態 量の違いが説明できない。結晶方位関係解析の結果より、照射方向により異なるバリアントの bcc が選 択的に形成していた。そのことから、(111)fcc 照射では特定の整合性の良い fcc-bcc 界面が広がりやすく、 相変態に伴う界面エネルギーの上昇が抑制されたために変態が促進された可能性が考えられる。

まとめ

SUS304 鋼に系統的に照射量を変えた Ga イオンを照射して生じる変態挙動を詳しく調べた。母相-変 態相の結晶方位関係とバリアント選択則の照射方向による違いを見出した。照射による相変態の挙動を Ga の化学的効果、応力効果およびバリアント選択の観点から説明した。

成果報告(学会発表):

・鶴田華子, 鎌田康寛, 渡邉英雄, "Ga イオン照射したオーステナイト系ステンレス鋼における微細組織の断面観察", 日本鉄鋼協会 2020 年第 180 回秋季講演大会学生ポスターセッション, 2020.9.16, オンライン

・及川涼一,中川一沙,清水一行,鎌田康寛,渡邉英雄,"Fe-Cr-Ni エピタキシャル合金薄膜の作製とその磁性 に及ぼすイオン照射効果",日本金属学会 2020 年秋期講演大会(第 167 回), 2020.9.15, オンライン

研究組織:鎌田康寛,清水一行,村上武,鶴田華子,中川一紗:岩手大・理工、渡辺英雄: 九大・応力研 参考文献 [1] D.G. Kolman, J.F. Bingert and R.D. Field, *Metall. Mater. Trans. A*, **35A**, 3445-3454 (2004),



Fig. 1. 照射した SUS304 鋼の組織観察結果





Fig. 2. 断面の組織観察結果

Fig. 3. STEM-EDS による 断面の Ga 分析結果 (a) Ga マップと(b) 線分析 プラズマ乱流における非線形伝搬と、局地集中豪雨の統計解析への応用の研究

(Nonlinear Propagation Phenomena in Plasma Turbulence

and Its Application to Statistical Analysis of Localized Torrential Rainfall)

杉田 暁¹、佐々木 真²、荒川弘之³

¹中部大学 中部高等学術研究所 国際GISセンター、²九州大学 応用力学研究所、³島根大学

序論

近年、乱流プラズマに外部から擾乱を印加することにより、プラズマの強い応答が非線形・非局 所的に伝搬することが、実験[1]、及び非線形シミュレーション[2]で明らかにされた。この応 答の非局所的かつ弾道的な伝搬過程は、広く自然科学、社会科学の分野において重要となる現象で ある。大気・海洋・土壌汚染に代表される環境問題や、伝染病の感染、各種災害時の正誤入り混じっ た情報など、リスクが相互に関連した事象や情報は、非線形的に、時空間的に波及・伝搬する特徴を 有しているが、既存の古典的な拡散モデルでは記述できない現象であり、このような事象を理解し、 共存し、持続可能な社会を構築することは、人類社会に課せられた大きな課題である。特に、平成2 6年8月に広島市を襲った豪雨に代表される、突発的な局地的大雨や集中豪雨、及びそれに伴う洪 水・内水氾濫や、地すべり・土石流などの災害に、急激な状況変化への対応ができず、被害が生じる 事例が増加している。近年整備されてきた、時空間に高分解能かつ国土全域を覆う気象データを利 用して、局地的大雨や集中豪雨に関する知見を得、そのダイナミクスを理解することにより、減災 に寄与することは重要である。

著者は、これまで核融合プラズマ乱流中で、乱流の塊(クランプ、ブロッブ)が非線形的に伝搬 し、非拡散的な輸送を駆動する現象について非線形シミュレーションと統計的解析手法を用いて研 究を行ってきた[3]。また、地理情報システム/デジタルアースを利用した防災に関する研究を行 い、気象と自然災害の重要性に着目している[4]。これらの経緯から、気象、特に局所的な集中豪 雨に関しての実証的な統計的定量化、及び非線形ダイナミクスの統計的手法による定式化の可能性 があるため、今回の研究対象の情報として選択した。

方法

本研究では、局地集中豪雨ハザードがもたらすリスクを評価するプラットフォームとして用いる ための、ウェブGIS(Geographic Information System:地理情報システム)プラットフォームを 中部大学国際GISセンターの所有するデジタルアースサーバ上に構築し、多様な空間情報と重畳 して可視化するために、関連する各種データを登録した。今回の開発で登録したデータはリスト(表 1)の通りである。

	データ名	入手元	
	国勢調査(2015年)	e-Stat	
1	その1 人口等基本集計に関する事項	地図で見る統計(統計GIS)	
	5 次メッシュ(2 5 0 mメッシュ)	https://www.e-stat.go.jp/gis	
2	局地数値予報モデルGPV(LFM)	与角業政士揺らいね	
2	積算降水量	メ家未防又版セン クー	
2	国土数值情報	国土数值情報	
3	浸水想定区域	http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A31.html	
4	冰存业员	地理院タイル	
4	次巴地因	https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html	
5	数值地図25000	同上	
6	土地条件図 (初期整備版)	同上	
7	色別標高図	同上	
8	陰影起伏図	同上	
9	治水地形分類図 更新版(2007~2014年)	同上	
10	治水地形分類図 初版(1976~1678年)	同上	
11	明治期の低湿地	同上	
12	令和元年10月の低気圧に伴う大雨 浸水推定段彩図		
12	速報版 千葉県佐倉市周辺		
12	令和元年10月の低気圧に伴う大雨 浸水推定段彩図		
15	速報版 千葉県茂原市・大網白里市周辺		
14	令和元年10月の低気圧に伴う大雨 浸水推定段彩図		
14	空中写真判読版 一宮川水系 (一宮川・豊田川・阿久川) 茂原駅周辺		
15	令和元年台風第19号 浸水推定段彩図		
10	鳴瀨川水系(吉田川)		
16	令和元年台風第19号 浸水推定段彩図	同上	
	阿武隈川水系(阿武隈川)		
17	令和元年台風第19号 浸水推定段彩図	同上	
	信濃川水系(千曲川)		
18	令和元年台風第19号 浸水推定段彩図	同上	
	久慈川水系(久慈川)		
19	令和元年台風第19号 浸水推定段彩図	同上	
	那珂川水系(那珂川)		
20	令和元年台風第19号 浸水推定段彩図	同上	
	川水系(入間川・越辺川・都幾川)		
21	令和元年8月の前線に伴う大雨 浸水推定段彩図	同上	
22	平成30年7月豪雨 浸水推定段彩図(空中写真判読版)	同上	
	高梁川(岡山県倉敷市など)		
23	平成30年7月豪雨 浸水推定段彩図(空中写真判読版)	同上	
	広川(愛媛県大洲市など)		
24	平成30年7月豪雨 浸水推定段彩図(速報版)	同上	
	岡山県倉敷市(2018年7月7日時点)		
25	平成30年7月豪雨 浸水推定段彩図(速報版)	同上	
	<u> 愛媛県大洲市(2018年7月7日時点)</u>		

表 1 ウェブGISプラットフォームに登録したデーター覧

結果

構築したウェブGISプラットフォームは、以下のURLでユーザを限定して公開している (http://de19.digitalasia.chubu.ac.jp/map/map/?cid=1&gid=0&mid=46)。ウェブGISプラッ トフォームは、オプションとして、OGC (Open Geospatial Consortium)標準のWMS (Web Map Service)プロトコルで配信されているGISデータを、URL (Uniform Resource Identifier)を 指定して取り込むことができる機能、スクロールや拡大・縮小を連動して行える2画面表示の機能、 局地数値予報モデルの降水予測を時刻に応じて表示するタイムスライダ機能を備える。図1、2に 表示の例を示す。



図 1 愛知県春日井市の中部大学近くの人口分布と航空写真を2画面表示した表示例



図 2 中部大学近くの浸水想定区域図と人口集中地区を色別標高図・陰影起伏図に重ねた表示例

展望

本研究で構築したウェブGISプラットフォームと、降水の前線や局地集中豪雨の伝搬の性質(伝 搬方向・伝搬速度)を、統合して解析することにより、具体的な応用を検討する。例えば、当該地域 住民へのゲリラ豪雨対応のリードタイムを評価し、アラートに役立てることや、アメダス観測点等 をモニタリングポイントとして、そこで大雨が観測された場合のその後の時間発展の予測を考慮し たハザードマップ策定などに貢献することが考えられる。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所2020年度共同利用・共同研究2020FP-21、中部大学問題 複合体を対象とする共同利用・共同研究IDEAS201931、及び文部科学省私立大学戦略的研究基盤形 成支援事業(S1201030)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Inagaki, et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 113006.
- [2] N. Kasuya, et al., Plasma Phys. Contrl. Fusion 57 (2015) 044010.
- [3] S. Sugita, et al., Plasma Fusion Res. 9 (2014) 1203044.
- [4] S. Sugita, et al., 5th Digital Earth Summit (2014) and 6th Digital Earth Summit (2016).

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。

序論: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 (Atmospheric Pressure Spray)と VPS (Vacuum Plasma Spray)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]。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: Temperature Desorption Spectroscopy)装置が活用されている [4-6]。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 アを更新したので、その内容について報告する。

更新内容: TDS 装置のハードウェアでは、DOSV パソコンを Windows10 パソコンに更新し、PC カードバスおよび入出力カードを USB および入出力ユニットに更新した。また、入出力ユニット〜中継器間の接続ケーブル、中継器も更新した。リレーボックスおよび加熱制御電源は更新していない。



図1. TDS コントローラのテストフォーム.

TDS 装置のソフトウェアでは、Visual Basic 6.0 から Visual Basic.NET に更新した。統合開発環境 IDE としては Visual Studio Community 2019 をインストールした。Visual Basic という意味で、フォ ーム上のボタンコントロール、ラベルコントロール、テキストボックスコントロールに関して変更はな い(図1)。しかし、実行環境が.NET Framework に変わるため、フォーム上のコントロールは新しく 配置した。オブジェクト指向という意味では、グラフ描画およびデータ保存に関するクラス、オブジェ クト、メソッド等の記述に注意した(図2)。

(1)初期化:初期化の前に全画面表示とし、ファイル名、テスト条件を入力し、時間変化表示マス組合せ、初期電流感度、サンプリング時間などを選択する。入出力ユニットの初期設定をする。

(2) 測定開始: 170 周期に亘って QMA 電流、真空度、試料温度を測定して表示する。

・QMA 電流はマス M を M-0.5~M+0.5 と 0.1 ステップで変化させて最大値を採用している。

・QMA 電流の仮数部が 9.6 以上または 0.96 以下のとき、次周期における電流感度の桁が切替る。

- ・前周期のマススペクトルは白色ペンで上書き描画することによりクリアして毎周期描画している。
- ・真空度の時間変化はグラフ表示しているが、試料温度はテキストボックスへの表示のみである。

(3) 測定中断: 170 周期に至る前に測定およびグラフ表示を中断する。

(4) データ保存:170周期または測定中断までの測定データをテキストファイルに保存する。

・Print 関数では行の末尾に改行が含まれないので、PrintLine 関数を採用している。

(5)終了処理:入出力ユニットの終了処理をする。

以上はすべてデバッグモードで試験しており、実行モードでの試験は次年度の課題である。

- 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.



図2. TDS 装置のソフトウェア.

- [4] Gang Yao, Hong Yu Chen, Ming Qi Fu, Lai Ma Luo, Xiang Zan, Qiu Xu, Kazutoshi Tokunaga, Xiao Yong Zhu, Yu Cheng Wu, Deuterium irradiation resistance and relevant mechanism in W-ZrC/Sc2O3 composites prepared by spark plasma sintering, Progress in Nuclear Energy, 120, 103215, 2020.02.
- [5] Gang Yao, Xiao Yue Tan, Lai Ma Luo, Xiang Zan, Yue Xu, Qiu Xu, Xiao Yong Zhu, Kazutoshi Tokunaga, Yu Cheng Wu, Influence of helium ion irradiation damage behavior after laser thermal shock of W-2%vol Y2O3 composites, Progress in Nuclear Energy, 121, 103241, 2020.03.

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、トーラス装置 PLATO における MHD 安定性解析ツールの整備を進めている。本解析ツー ルでは、平衡モジュールである TASK/EQU モジュールと非線形 MHD シミュレションコードである MIPS コードを用いている。昨年度においては、自由境界 MHD 平衡コードである TASK/EQU モジュールで PLATO トカマクプラズマの平衡を求め、その平衡を参照して固定境界平衡コードである TASK/EQ モジュール を用いて MIPS コードの入力ファイルの作成を行なってきた[1]。本年度においては、TASK/EQU から直

接 MIPS コードの入力ファイルを作成でき るように、インターフェースの整備を行な った[2]。図1に TASK/EQU を用いて求めた 磁場配位と計算で使用したコイル電流を 示す。使用したパラメータは PLATO で想定 されている大半径 R = 0.7 m、小半径 a = 0.2 m、プラズマ体積 $V_P = 0.9$ m³、中心磁 場 $B_{\rm f} = 0.3$ T、電子温度 $T_{\rm e} = 0.2$ keV、 密度 n = 1.0×10^{19} m⁻³ を用いた。平衡計 算の結果、プラズマ電流 40 kA、三角度 0.42、 楕円度 1.7 の平衡磁場配位が得ら れた。



Coil name	Current (kA turn)
ОН	-134
OHC	-100
D	-17
Q	50
Н	-14
С	0
F1	-9
F2	-9

図 1. (左) PLATO 装置における MHD 平衡の磁場配 位と(右)使用したコイルと電流値。

得られた平衡に対し、非線形 MHD シミュレーションコード MIPS を用いて、MHD 不安定性の 3 次元シ ミュレーションを実施した。MIPS コードは、一流体モデルを初期値問題として数値的に計算するコー ドである。空間方向には(r, ϕ , z)の円柱座標系を用い、4 次精度の有限差分法を用いて離散化され ている。また、時間積分は 4 次精度のルンゲクッタ法を用いて行っている。本解析では、異なるベー タ値を持つ 3 つの MHD 平衡に対して解析を行なった。ここで、それぞれの中心ベータ値 β_0 は、1.5%, 1.6%, 1.8%である。本計算では(128,64,128)のメッシュ数を用い、粘性係数、抵抗係数、熱拡散係数 はそれぞれ $v = 10^{-5}v_a R_0, \eta = 10^{-5}v_a R_0, \chi = 10^{-7}v_a R_0$ を仮定した。ここで v_a はアルフヴェン速度であ る。

図2では、3つの平衡に対する MHD シミュレーション から得られた全運動エネルギーの時間発展を示してい る。中心ベータ値 β_0 が大きいほど全運動エネルギーの 線形成長率が大きくなっている。 $\beta_0=1.5\%$ と $\beta_0=1.8\%$ に 対して、代表的なモードである n=1 モード(キンクモ ード)と n=13 モード(バルーニングモード)の摂動圧 力成分の時間発展を図3に示す。ここでnはトロイダ ルモード数である。 $\beta_0=1.5\%$ では、n=1モードと n=13モ ードはほぼ同じ線形成長率であるが、 $\beta_0=1.8\%$ では n=13 モードと比較して、n=1モードの線形成長率は小 さくなっている。t = 250 τ_a からn = 1モードの成長 率が増加しているが、これは、n=13モードを中心とし た不安定なバルーニングモード間のモードカップリン



図 2 運動エネルギーの時間発展の中心 ベータ値 β_0 に対する依存性。





図 4 (a) β_0 =1.5% (t=370 τ_a)、及び、(b) β_0 =1.8% (t=300 τ_a)における(m,n)=(1,1)モード と n=13 モードの摂動圧力の径方向分布。



図 3 (a) β_0 =1.5%、及び、(b) β_0 =1.8%の場合の n=1、及び、n=13 モードの摂動圧力 の時間発展。

グにより、n=1 モードの成分が非線形的に生成されたためと考えられる。t>300 τ a では再び n=1 モー ドの成長率は、t<300 て。で見られた線形成長率と同程度の成長率になる。この時、n=13のバルーニン グモー で長では 2.5 1 なく、 及び、 -m=1 n=1 -m=1 n=1 (a) (b) m=15 n=13 m=15 n=13 $\beta_0=1$ 3₀=1.5% 0.8 2 -m=16 n=13 m=16 n=13 mode amplitude 9.0 m=17 n=13 m=17 n=13 :構造を m=18 n=13 -m=18 n=13 m=19 n=13 :きい。 m=19 n=13 7向に幅 0.5 0.2 本结)解析と 同様に t, PLATO 0 0 装置の 0.2 0.4 normalized radius 0 0.4. 0.6. normalized radius 0.8 1 0 0.2 0.8 1



超臨界流体プラズマを用いた非平衡ナノ材料の合成方法の創製

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分することができない超臨界流体では、これまでに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、近年多大な関心と研究が行われている。さらに、非平衡反応場である超 臨界流体プラズマ反応場を利用した場合、プラズマ中で形成される活性種が、高密度・高拡散性を持つ 超臨界流体中に供給されることで、平衡論から逸脱した物質合成や高速反応プロセスが行える。しかし ながら、超臨界流体環境中におけるプラズマの生成、物性診断などに関してはまだ不足な点が多い。反 応場のより精密な分析と制御は新規ナノ材料の創成に深く繋がる。そこで、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結果を通じ、超臨界流体プラズマプロセスの新しい可能性を開拓して いく。

2. 実験方法

超臨界流体プラズマ反応場を研究するのに適切な反応系、物質を探索する。プラズマはイオン性ガス であり、様々な活性種を多く発生するため、これらが活躍できる金属の還元反応場に注目した。超臨界 水の中での金属還元反応は、金属カチオンの還元ポテンシャルによって決定されるので、金属一金属酸 化物の相平衡に注目した[1,2]。

本実験では、まず、無プラズマ状態での研究を進めた。酢酸コバルト水溶液(0.05-0.1 M)とギ酸を 用いて金属コバルトの合成を行った。超臨界水中でのギ酸は、迅速な反応速度で分解され、水素を発生 する還元剤の役割をする。金属の還元ポテンシャルは温度によって激しく変化するので、温度別の水素 の還元力の変化を調べた[3,4]。また、水素の還元力に直接的に影響を与えるパラメターを調べるため、 反応器タイプ、反応時間、表面修飾材、pH条件などについても検討を行った。

3. 実験成果

金属の還元反応で必要な還元剤の量を推定した。Ellingham 図から金属と金属酸化物との間の酸化還 元反応の方向を決定する平行係数は次のように得られる。

$$MeO(s) + A \xrightarrow{\Lambda_{eq}} Me(s) + A'$$
(1)

ここで、MeO は、金属酸化物、A は H₂ (g)、C (s) または CO (g) のような還元剤、Me は金属で、A 'は H₂O (g)、CO (g) または CO₂ (g) のような酸化物を表す。 Keq は反応の平衡定数。

式(1) で Keq の値を求めれば、順方向の反応に必要な還元剤の量を推定できる。しかし Ellingham 図は、一般的に、各構成要素の溶媒効果は考慮されない。したがって、修正された HKF EOS (Helgeson、 Kirkham および Flowers 状態方程式) モデル[3]を適用して超臨界水熱条件下で、各成分の溶媒効果を計算した。修正された HKF EOS は電解質、イオンと中性物質を含む各水溶性種の標準部分モル Gibbs 自由 形成エネルギー($\Delta \bar{G}_{f}^{\circ}$)の正確な値を提供する。各種の Gibbs 生成自由エネルギーを加算することにより 反応の標準部分モル Gibbs 自由エネルギー($\Delta_{r}\bar{G}^{\circ}$)を計算し、各温度別 K_{eq} の値を、次の式で求めた:

変更された HKF EOS を使用すると、超臨界条件でも 反応平衡定数の正確な値を得ることができる。しかし、 反応プロセスの多相効果 (multi-phase) などは考慮さ れなかった。ギ酸分解で得られた水素を使用するとき は、ほとんどの水素ガスが加熱過程で分解されて、す ぐに気象に移動するので、水溶液に溶解される水素の 実質的な量、あるいは化学ポテンシャルは低い。した がって、この反応系での多相効果を適応するために PSRK EOS (Predictive Soave Redlich Kwong EOS) [4] を利用し水素対水の化学ポテンシャル(fugacity)から 必要な水素の量を計算した。その結果を図1に示す。

0.030 0.025 H2 mole fraction [-] 0.020 Λ 0.015 0.010 п 0.005 0.000 600 620 640 660 680 700 Temperature (K)

図1 コバルト合成に必要な水素のポテンシャル。 □,完全 Co 相; △,Co が見えた条件;-,pH 調整結 果; ×,流通式反応器;黒線,Ideal gas raw;黄 線,PSRK(22.1 MPa);赤線,PSRK (30 MPa).

水素のポテンシャルが十分にありコバルトが形成さ れ始まる条件である、△の実験結果を基準にすると理

想気体で計算した結果(黒)は全く合わなかった。ここで、圧力の2条件に対し PSRK で計算した結果 を黄線(22.1MPa)と赤線(30 MPa)で示す。実験値は22.1 MPa の条件で得られたので黄色の線とほぼ一 致する結果を得られた。これは、超臨界水中での水素の還元ポテンシャルを PSRK でよく表現できたこ とになる。また、流通式反応器での合成結果、低量の水素でも反応が完了した結果が得られているので 今後、細かい分析や関連研究が必要になると思う。

4. 結論

プラズマ存在有無の超臨界水熱反応場を調べるため、金属コバルトの合成系を用いて水素の還元ポテ ンシャルを計算した。プラズマがない状態では HKF EOS と PSRK EOS を用いて表現ができた。今後、プ ラズマの効果に関して調べていく。また、反応器のタイプで大きな違いがあったので平衡論だけではな く速度論的な解析を伴う計画である。

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 (2020 FP-24).

参考文献

[1] Seong et al., J. Supercritical fluid, 60 (2011) 113–120.

- [2] Seong et al. Dalton Transactions, 43 (2014) 10778.
- [3] Tanger IV et al., Am. J. Sci., 288 (1988) 19–98.
- [4] Holderbaum et al., Fluid Phase Equilib., 70 (1991) 251–265.

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発達に対する運動論的効果の役割 を明らかにすることを目的とするものである。

【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線形安定性解析を行った。また、前年度までの研 究において、初期値問題としてフィードバック不安定性の線形シミュレーションを行うコードの開 発を進めた。

ジャイロ流体モデルは、運動論的効果を含んでおり、かつ、ジャイロ運動論的モデルよりも速度 空間の自由度がないため、数値計算負荷が比較的小さい。従って、比較的少ない数値計算資源でフ ィードバック不安定性の非線形発達に対する運動論的効果を調べることができる。ただし、モデル に含まれるランダウクロージャには線形理論から導かれたものを使用するため、非線形ランダウ減 衰などの効果を加味することはできない。それでも、電子ランダウ減衰の果たす役割についてある 程度の物理的な特性を抽出することができることが期待される。

【研究結果】

本年度実施した研究について、以下の内容を報告する。

1. 非線形シミュレーションコードの開発

磁気圏のジャイロ流体モデルは、電子の連続の式、一般化されたオームの法則、ランダウクロー ジャモデル、アンペールの法則、ジャイロ運動論的準中性条件から構成される。磁気圏における磁 束チューブを考え、磁力線に垂直な面内は周期境界、磁力線に沿っては電離圏との接続面と磁気赤 道が境界となる状況を考えた。ただし、磁気圏における磁場はスラブ磁場によって近似し、平衡量 の磁力線方向依存性やミラー力などは無視した。磁力線に垂直な方向の各波数に対する方程式を連 立して4次のルンゲクッタ法で解き、非線形項の計算は擬スペクトル法を用いた。磁力線方向の座標のメッシュに対して MPI を用いた並列化を行い、シミュレーションを実施した。ランダウクロージャモデルには、フィードバック不安定性の線形安定性解析によって求められた結果を使用した。

2. フィードバック不安定性の非線形シミュレーション

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。

図1に電離圏における渦度揺動の等高線図を示す。図1の左図は線形成長段階であり、筋状の構造が発生していることが分かる。図2の右図は非線形飽和段階であり、モード間結合によって筋状の構造が壊され、ひだを持つ複雑な構造が形成されていることが分かる。この複雑な構造は時々刻々と形状を変えるものであり、オーロラのひらひらと揺らめく現象に類似した性質を持つことが観察された。



図1 渦度揺動の等高線図(左:線形成長段階、右:非線形飽和段階)

3. フィードバック不安定性の非線形飽和機構の特定

フィードバック不安定性の非線形飽和機構を 調べるために、ジャイロ流体モデルに対するエネ ルギー保存則を導出した。その結果、磁気圏にお けるエネルギーを変化させるのは、電離圏から磁 気圏に向かって放出されるエネルギー流束 S_{ϕ} + S_{n_e} (S_{ϕ} はジュール加熱、 S_{n_e} は圧縮加熱)および 電子ランダウ減衰によるエネルギー散逸 $S_{\rm L}$ であ ることが示された。

図 2 に非線形シミュレーションにおける S_{ϕ} + S_{n_e} 、 S_L 、およびそれらの和の時間発展を示す。 図 2 から、非線形飽和段階においては、電離圏から磁気圏に向かって放出されるエネルギー流束 と電子ランダウ減衰によるエネルギー散逸が概



図2 エネルギー流束の時間発展

ね相殺していることが分かる。従って、非線形飽和機構は、電子ランダウ減衰によるエネルギー散 逸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うための コードの開発を行った。開発されたコードを用いて、フィードバック不安定性の非線形シミュレー ションを実施し、線形成長の後に非線形飽和へと至ることが観察された。詳細な解析の結果、非線 形飽和機構は電子ランダウ減衰によるエネルギー散逸であることが明らかになった。

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今後の課題である。

研究者情報: 西村征也

直線装置 PANTA における ITG 乱流輸送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

九大応力研付属の直線装置 PANTA ではイオン温度勾配モード(ITG モード)の励起実験が検討されてい る。前年度の共同研究においては、ジャイロ流体モデルを非線形モデルへと拡張するため、離散ハンケル 変換(DHT)を用いた定式化を検討した。検討の結果、DHT では、高速な変換が数値的に可能になる反面、 空間点が非均質になるため、補間を導入する必要があり、その部分で、計算速度が律速されることが明ら かになった。本年度は、この問題を回避するため、フーリエベッセル変換を用いた手法を再検討し、擬スペ クトル法を用いた非線形モデルの定式化を行う。この定式化をこれまでに開発してきた線形コードに実装 することで非線形シミュレーションが可能となる。コード開発を進め、直線装置における ITG 乱流輸送のシ ミュレーション研究を行い、実験比較を行うことを最終目標に設定した。

研究成果

離散ハンケル変換(DHT)を用いた擬スペクトル法の定式化では[1]

м

$$\left(\frac{1}{\hat{r}}\frac{\partial\phi}{\partial\theta}\right)_{i,j} = \sum_{m=-M/2}^{\frac{12}{2}-1} e^{im\theta_j} \frac{1}{\hat{a}^2} \sum_{l=1}^{L-1} \bar{\phi}(\frac{j_{m,l}}{\hat{a}}) \frac{im}{r_{*m,l}\hat{a}} \frac{2J_m(j_{m,l}r_{*m,l})}{J_{m+1}^2(j_{m,l})}$$

ここで、 $\hat{r} \equiv \frac{r}{\rho_s}, r_* \equiv \frac{r}{a} \in [0,1], \hat{r} = \hat{a}r_*, \hat{a} = a/\rho_s \equiv 1/\rho_*$ である。また、 $r_{*m,i} \equiv j_{m,l}/j_{m,L}$ で与えられる。

動径方向のメッシュr_{*m,i}がフーリエモード数mに依存してしまい、非均質になるため、分解能が十分担保されるかどうかはパラメータごとに確認する必要があり、汎用性が担保できない可能性がある。このため、フーリエベッセル変換を用いた擬スペクトル法の定式化を再検討した。

$$\phi(r,\theta) = \sum_{m=-M/2}^{\frac{M}{2}-1} e^{im\theta} \sum_{l=1}^{L-1} \frac{2}{J_{m+1}^2(j_{m,l})} \phi_m(j_{m,l}) J_m(j_{m,l}r)$$

とおくと逆変換は

$$\phi_m(j_{m,l}) = \int_0^1 r dr J_m(j_{m,l}r)\phi_m(r)$$

で与えられる。ここで

$$\phi_m(r) \equiv \sum_{l=1}^{L-1} \frac{2}{J_{m+1}^2(j_{m,l})} \phi_m(j_{m,l}) J_m(j_{m,l}r)$$

と定義した。 $r = n\Delta r, \Delta r = 1/L$ とすれば、以下で定義される関数を用いて

$$f_*(n) \equiv \begin{cases} \phi_m(n\Delta r), & n = 0, \dots L - 1\\ 0, & n = L, \dots, 2L - 1 \end{cases}$$
$$\hat{\phi}(l) \equiv \sum_{n=0}^{2L-1} f_*(n) n e^{i\frac{2\pi n l}{2L}}$$

が得られる。ここで、 $\hat{\phi}(l) \equiv \phi(l)/(\Delta r)^2$ とおいた。

$$\hat{\phi}_m(j_{m,l}) = \frac{1}{2L} \sum_{k=0}^{2L-1} \hat{\phi}(l\Delta r \sin\theta_k) e^{-im\theta_k} = \frac{1}{2L} \sum_{k=0}^{2L-1} \hat{\phi}(m_c(k,l)) e^{-i\frac{2\pi mk}{2L}}$$

ここで、l = 0, ..., L - 1であり、 $\theta_k \equiv \pi k / L$ である。 最近傍補間を用い、 $m_c(k, l)$ を評価する[2,3]。

(1) $l\Delta rsin \theta_k \ge 0$ の時、 $0 \le k \le L$ となる。 $m_c(k, l)$ が $l\Delta rsin \theta_k$ のよい近似となるような整数 $m_c(k, l)$ を探す。

$$d(k,l) = l\left(\frac{M}{N}\right) \sin\theta_k, \ m_c(k,l) = INT(d(k,l) + \frac{1}{2})$$

(2) $l\Delta rsin\theta_k < 0$ の時、 $L + 1 \le k \le 2L - 1$ となる。関係式 $sin\theta_k = -sin\theta_{2L-k}$ に注意すると $m_c(k, l) = M - m_c(2L - k, l)$

上記の数値アルゴリズムを用い、フーリエベッセル展開の変換プログラムを作成し、その動作確認を行った。 関数 $f(\zeta)$ を与え、 $\hat{F}_k(l) = \frac{1}{s} \sum_{j=0}^{s-1} \hat{\phi}(m_c(j,l)) e^{-2\pi i k j/S} c$ 数値的に評価する。 $\hat{f} = \frac{\sin(n/Q)}{n/Q} c$ すると

$$\hat{F}_{k}(l) = \frac{\frac{Q^{2}\cos\pi k/2}{(1-W_{l}^{2})^{1/2}} \frac{W_{l}^{k}}{[1+(1-W_{l}^{2})^{1/2}]^{k}} \quad 0 \le W_{l} \le 1}{\left(\frac{Q^{2}}{(W_{l}^{2}-1)^{1/2}} sin\left(ksin^{-1}(1/W_{l})\right)} \quad 1 \le W_{l}$$

で与えられる。ここで $W_l = 2\pi l Q/N_{\circ} Q = 5$ に対する \hat{f} を図1に示す。図2にk = 0に対する \hat{F}_0 を示す(N = M = 512)。







現在、フーリエベッセル変換モジュールをシミュレーションコードに実装中であるが、擬スペクトル法の動作 検証は今後の課題として残された。

参考文献

[1] 矢木雅敏、共同利用研究成果報告書第23号、令和元年度九州大学応用力学研究所、P138-139。

[2] S. M. Candel, Computer Physics Comm. 23 (1981) 343.

[3] S. M. Candel, J. Comp. Phys. 44 (1981) 243.

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(九大応力研)、稲垣滋(九大応力研)、糟谷和 賀子(応用流れ研究所)

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 Preparation of low-cost hydrogen embrittlement resistance thin films by plasma process 佐世保高専,川崎仁晴、中野堅太、須本航輝 National Institute of Technology, Sasebo College

H. Kawasaki, K. Nakano, K. Sumoto

1 概要

米国 Battele 研究所によれば、材料の破壊事故 による損失は GDP の 4%にも上る[1]。なかでも、 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。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、 コスト高による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[2-5]。炭素鋼な どの安価な材料で水素利用機器をつくり、表面の みに上述のアルミニウムなどでコーティングす る研究が増えてきている。本研究では、プラズマ プロセスを用いた薄膜作製とその効果について 検討する。

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 S25C、SUS および分析用の Si 基板の3種類を用い、ターゲットとしてバルクア ルミニウム、粉体アルミニウム、および粉体 NiO₂ と粉体 SUS の混合ターゲットとして成膜した [6,7]。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)により解析した。水素量の測定は水素浸漬 チャージ法を用いた。



3 実験結果

3.1 水素脆化防止薄膜の作製

図2に、バルクアルミニウムターゲットを用い て S25C 上に作製した薄膜の断面を走査型電子顕 微鏡 (SEM:エリオニクス ERA) で観測した結果 を示す。結果から、約40µmの均一な薄膜が作製 されていることがわかる。また、水素浸漬チャー ジ法で水素を浸漬チャージさせた後、加熱によっ て素材から脱離した水素量を観測した結果、Al 薄 膜中に水素がトラップされ、素材そのものには吸 収されないことが分かる(図2赤線)。分析した結 果 91%の水素がトラップされていることが分か った。粉体アルミニウムをターゲットとして用い て水素脆化防止効果を図2と同様な方法で調べた 結果を図3に示す。図中の表面と断面の結果から 分かるように、薄膜は詳細には鋳造構造をして色 粉とが分かる。この構造の上面から見た微粒子サ イズ d と、柱の高さ(=膜厚) T の比(T/d)と 水素脆化防止効果との関係を同図に示している。 結果から、水素脆化防止効果は T/d にほぼ比例し て向上する事がわかる。

3.2 傾斜機能性薄膜の作製

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



図3 水素脆化防止効果とT/dの関係

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、 NiO₂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。この とき、数種類の混合比のターゲットを用いて薄膜 中の組成比の制御を試みた。XPS で調べた膜中の Ni/Fe の比と、ターゲット中の NiO₂/SUS の比 を図 4 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。これを用いれば、複数のターゲ ットを利用することで、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。

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。今後は Ni と SUS の混合比を変化さ せた傾斜機能性薄膜を作製し、作製と防止効果が 最適となる成膜条件の探求を行う予定である。



ット中の NiO₂/SUS の比の関係

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

参考文献

 T. Matsuo, J. Yamabe, and S. Matsuoka, Int. J. Hydrogen Energy **39**, 3542 (2014).
K. Takai and R. Watanuki, ISIJ Int. 43, 520

(2003).

[3] H. Nishiguchi, R. Kondo, and T. Fukuda, Proc. Int. Hydrogen Conf. 199 (2012).

[4] S. Matsuoka, O. Takakuwa, S. Okazaki, M.

Yoshikawa, J. Yamabe, H. Matsunaga, Scripta Materialis 154, 101 (2006).

[5] Y. Ogawa, O. Takakuwa, S. Okazaki, K. Okita, Y. Funakoshi, H. Matsunaga, S. Matsuoka, Corrosion Science 161, (2019).

[6] H. Kawasaki, Y. Suda, T. Ohshima, Y. Yagyu, M. Shinohara, and T. Ihara, Jpn. J. Appl. Phys 58, SAAD04 (2019).

[7] H. Kawasaki, Y. Suda, T. Ohshima, Y. Yagyu, M. Shinohara, and T. Ihara, Jpn. J. Appl. Phys 59, SAAC01, (2019).

次世代パワーエレクトロニクス信頼性向上技術

1. まえがき

近年,従来の交流配電システムに替わり,直流による配電システムが推進されている [1]。直流配電システ ムは,直流でエネルギーを送電する方式で,太陽光発電システムといった再生可能エネルギーや大容量バッテ リーを搭載する電気自動車の普及によりその必要性が増している。また,送電される電力量は近年急激に増加 しており,直流給電系統の高信頼性を達成するために直流遮断器の設置は必要不可欠である。しかし,広く用 いられている機械式遮断器は,大型のアーク消弧機構が必要であり,直流系統の高電圧化に伴う短絡事故時に おける高速動作が要求されている。さらに,繰り返し使用に際しては接点劣化が生じるために遮断回数に制限 がある [2,3]。これらの課題は,機械接点をパワー半導体デバイスに置き換えた半導体直流遮断器で解決でき る可能性がある [4-6]。本研究で提案する半導体直流遮断器は,ハイブリッド遮断器 [5] や限流機能を付した 半導体遮断器 [6] とは異なり,パワーデバイスのアバランシェ耐量を積極的に利用し,デバイス自体にエネル ギーを消費させることで電流遮断を達成する [4]。そのため,追加の機械接点や消弧機構,スナバ回路を持た ず,小型化が容易に実現可能である。

ー般に、パワーデバイスのオン抵抗は機械式遮断器の接点と比べて大きいために、直流遮断器として適用す るためには定常損失に影響を与える。近年では、オン抵抗が既存の Si パワーデバイスよりも小さい炭化ケイ 素 (SiC) を用いたパワー半導体デバイスが提案・実用化されている。その中でも、SiC-接合型電界効果トラン ジスタ (JFET) はゲート酸化膜を持たないノーマリオンの半導体デバイスであり、繰り返し使用による劣化特 性に優れ、半導体直流遮断器用途に適している [7]。

しかしながら,実用的な定常損失を低減させるためには、オン抵抗を低減させるために、パワーデバイスを 多数並列接続することが必要不可欠となる。しかし、電流遮断が行われる期間は、パワーデバイスに過電圧が 伴うアバランシェ降伏動作となり、この期間における素子間の電流分担の達成には、降伏電圧を揃える必要が あることが報告されている [8]。

本研究では、SiC-JFET を適用した直流遮断器の大容量化を可能とする並列接続されたデバイスの電流分担 を達成可能なゲート駆動回路を提案する。

まず,単一の 1.2 kV 定格 SiC-JFET を適用した直流 400 V 半導体遮断器の実機検証を行い,電流遮断動作の期間においてドレイン電流がゲート側に流入することが明らかとなった。また,ゲート駆動回路におけるゲート抵抗において,ゲート電流の電圧降下が発生することを明らかとした。

続いて,降伏電圧差が 2.0 V を有する,2 つの 1.2 kV 定格 SiC-JFET を並列接続した半導体直流遮断器の実 機実験を行い,ドレイン電流がゲート側に流入することによって,デバイスのしきい値電圧付近で電圧降下が 発生し,デバイスの動作に影響を与えることを明らかとした。さらに,しきい値電圧付近における電圧降下の 問題を解決するため,ゲート抵抗を通常よりも低い 0 Ω ,ゲート電圧を通常よりも高い –30 V のゲート駆動 回路を製作し,SiC-JFET を並列接続した半導体直流遮断器に適用した。この結果,電流分担は従来手法より も改善したことが確認された。

次に,降伏電圧差が2.0 V,11 V,及び30 V を有する,3 組のSiC-JFET のペアを選定し,前述に示したゲート駆動回路を適用した半導体直流遮断器において実機実験を行った。この結果,パワーデバイスの特性差が電

流分担に大きく影響を与えることを実験により明らかにした。この時,降伏電圧差が小さいほど電流分担割合 が均等になることが確認され,素子の電流分担を達成するには降伏電圧差は概ね 10 V 程度に抑える必要があ ることを示した。さらに,直流 400 V,電流 5.7 A,回路時定数 *R/L* が 6.0 msの実験装置により,提案する ゲート駆動回路を適用した半導体直流遮断器の 5,000 回の繰り返し電流遮断実験を行い,その前後のドレイ ン電流-ゲート-ソース間電圧特性,及びドレイン電流-ドレイン-ソース間電圧特性の評価を行った。その結果, 素子の特性変動が認められなかったため,繰り返し使用による長期信頼性に優れていることが確認された。

2. 試験回路構成

SiC-JFET の電流遮断時における特性評価を行うために,非クランプ誘導性スイッチング (UIS: Unclamped Inductive Switching) 試験回路によるデバイス特性評価を行った。図 2.1(a) に実験回路構成,図 2.1(b) に理想 波形を示す。UIS 試験回路は直流電圧源,インダクタンス,DUT で構成されている。半導体直流遮断器の評価 にあたって,直流系統に存在する配線インダクタンスに蓄積されたエネルギーに起因して生じるパワーデバイ スの過電圧を考慮する必要がある。そこで,本研究では,この過電圧を模擬するために Unclamped Inductive Switching (UIS) 試験回路によるデバイス評価を行う。

UIS 試験回路の被試験素子 (DUT) がオン状態となり,再びオフ状態となる期間 t_0 - t_1 において負荷インダク タンス *L* に蓄えられたエネルギーは,期間 t_1 - t_2 において素子にアバランシェエネルギーとして印加される。 この時のアバランシェエネルギー E_{AS} は,ドレイン-ソース間電圧 v_{ds} ,ドレイン電流 i_d を用いて

$$E_{\rm AS} = \int_{t_1}^{t_2} v_{\rm ds}(t) \cdot i_{\rm d}(t) \,\mathrm{d}t \tag{2.1}$$

となる。ここで、素子が遮断動作し、アバランシェ降伏状態において過電圧が印加されている期間 t_1 - t_2 の時間 T_{AV} は、素子の降伏電圧 V_{BR} , UIS 試験回路の電源電圧 V_{DD} を用いて

$$T_{\rm AV} = \sqrt{\frac{2LE_{\rm AS}}{V_{\rm BR} \left(V_{\rm BR} - V_{\rm DD}\right)}} \tag{2.2}$$

である。また,UIS 試験における遮断時のアバランシェ電流 I_{AS} は,素子が導通しているオン時間 T_{ON} とすると

$$I_{\rm AS} = \frac{V_{\rm DD} \cdot T_{\rm ON}}{L} \tag{2.3}$$

と算出される。

本研究においては、直流電圧及び配線インダクタンスを考慮し、電源電圧 $V_{DD} = 400$ V、負荷インダクタン ス L = 1.4 mH において実験を行った。これは、車載用 EV リレーが想定している回路時定数 $\tau=1.0$ ms [3] よ りも厳しい $\tau(= R/L) = 6.0$ ms の条件である。



図 2.1. (a) 半導体直流遮断器の評価回路, (b) 理想波形

3. SiC-JFET のアバランシェ降伏時における動作

SiC-JFET のアバランシェ降伏時における動作を明確化するため、前述の試験回路及びゲート駆動回路を用いて単体の SiC-JFET 素子を用いた UIS 試験を行った。ゲート駆動回路におけるゲート電圧 $v_g = 0/-15$ V とし、外部ゲート抵抗 $R_{g(ext)} = 47 \Omega$ とした。また (2.3) 式より、UIS 試験のオン時間 $T_{ON} = 20 \mu s$ に設定し遮断時のアバランシェ電流 $I_{AS} = 5.7$ A とした。

図 3.1 に実験波形を示す。ゲート信号 v_{sig} が立ち上がると同時に,素子のドレイン-ソース間電圧 v_{ds} には素子の降伏電圧を上回る 1.4 kV の過電圧が発生する。また,遮断時のドレイン電流 $i_d = 5.7$ A であり, 10 μ s 後に遮断動作が完了することが確認できる。これは式 (2.2) 及び式 (2.3) による算出結果と一致する。

次に、ゲート-ソース間電圧 v_{gs} に注目すると、アバランシェ降伏動作の期間において、設定したゲート電圧 v_g を上回る約 –10 V となり、この状態は素子がアバランシェ降伏状態である 10 μ s 後まで確認できる。この ゲート-ソース間電圧 v_{gs} において発生する電圧降下をバイアス電圧 $V_{gs,bias}$ と表記する。この間、ゲート電流 i_g は 120 mA 程度を維持することが確認できる。これは SiC-JFET の通常動作時のゲート電流と比べて大き く、素子のドレイン側から電流の一部が流入している。

以上の結果から、SiC-JFET がアバランシェ降伏動作時において、遮断電流の一部がゲート電流 i_g として流入する。これは、ゲート電流 i_g がゲート抵抗 R_g において電圧降下を起こし、ゲート-ソース間電圧 v_{gs} のバイアス電圧 $V_{gs,bias}$ が発生する要因となる。



図 3.1. 単体の SiC-JFET による電流遮断実験結果

4. パワーデバイスの電気的特性のばらつき

パワーデバイスの特性のばらつきを特定するため、1.2 kV 耐圧の SiC-JFET [9] 23 個を半導体カーブトレー サー(岩通 CS-3200) で測定を行った。図 4.1 にデバイスの電気的特性差異の測定結果を示す。測定の結果、 降伏電圧が最大 41.7 V の特性差異が確認された。そこで本研究では、表 4.1 に示すような素子 A を基準とし、 降伏電圧差 ΔV_{BD} が異なる素子 B、素子 C、及び素子 D を選定し、電流分担への影響の検討を行った。





表 4.1 SiC-JFET の電気的特性の測定結果

No.	$V_{\rm BD}$ [kV]	$\Delta V_{\rm BD} [\rm kV]$	$V_{\rm TH}$ [V]	$R_{\rm ON} \ [m\Omega]$
А	1.447	-	-9.10	31.11
В	1.449	0.002	-9.12	31.71
С	1.458	0.011	-9.12	31.86
D	1.477	0.030	-8.84	32.79

5. 並列接続 SiC-JFET の電流分担

5.1. 実験回路構成

図 5.1(a) に SiC-JFET を並列接続した直流遮断器の回路構成,図 5.1(b) にゲート駆動回路構成を示す。並列 接続 SiC-JFET 直流遮断器の試験回路は、直流電圧源 V_{DD} ,系統インダクタンスに相当する L,2 並列された SiC-JFET から構成される。また、ゲート駆動回路は一般的にゲート駆動に使用されるフォトカプラを使用し ており、パルス電圧源 v_g とそれぞれにゲート抵抗 R_{g1} , R_{g2} を挿入している。



図 5.1. (a)SiC-JFET を並列接続した直流遮断器の回路構成, (b) ゲート駆動回路構成

5.2. 従来手法を適用した場合の電流分担

本実験では、並列接続する SiC-JFET を素子 A、及び素子 A との降伏電圧差 $\Delta V_{BD} = 0.002 \text{ kV}$ の素子 B を 使用した。以下、各素子における測定値の説明は適用した素子名を下付き文字に添えて表記する。ゲート駆動 回路におけるゲート電圧 $v_g = 0/-15 \text{ V}$ とし、外部ゲート抵抗 $R_{g(ext)} = 47 \Omega$ とした。また、遮断時のアバラン シェ電流 I_{AS} は単体の素子を使用した実験と同様に 5.7 A とした。

図 5.2(a) に実験結果を示す。ドレイン電流 i_d に注目すると、素子がアバランシェ降伏状態の期間において 素子 A と B に流れるドレイン電流 i_{dA} , i_{dB} の素子 A 側への偏りが確認できる。また、ゲート-ソース間電圧 v_{gs} に注目すると、素子 A の $v_{gsA} = -10$ V を維持している一方、素子 B の $v_{gsB} = -15$ V となる期間があるこ とから、双方の素子に異なるバイアス電圧 $V_{gs,bias}$ が生じることが確認できる。同時に、ゲート電流 i_g に注目 すると、素子 A と B に異なるゲート-ソース間電圧 v_{gs} が生じる期間、素子 A を流れるゲート電流 $i_{gA} = 120$ mA が確認できるが、素子 B を流れるゲート電流 $i_{gB} = 0$ A である。

以上から,素子 A と B に流入するゲート電流 *i*g が異なるため,ゲート-ソース間電圧 *v*gs におけるバイアス 電圧 *V*gs.bias の発生の有無に影響している。同時に,バイアス電圧 *V*gs.bias が素子の閾値電圧付近において発生 しているため,ドレイン電流 *i*d のアバランシェ降伏動作時における電流分担に影響を与える。すなわち,従 来手法のゲート駆動回路を適用した SiC-JFET を並列接続した半導体直流遮断器では,電流及びエネルギー分 担が達成できない。

5.3. 提案手法

前述の通り、ゲート電流 ig が起因して生じるゲート抵抗 Rg でのバイアス電圧 Vgs.bias が電流分担に影響を 与えることが確認された。これらの問題点から、バイアス電圧 Vgs.bias の閾値電圧付近での影響を低減するた めのゲート駆動回路の手法を適用する。

ゲート電流 i_g の流入により,ゲート抵抗 R_g において発生していたバイアス電圧 $V_{gs,bias}$ を低減するため,外部ゲート抵抗 $R_{g(ext)} = 0 \Omega$ に設定した。また,素子の閾値電圧は -9 V前後であり,内部ゲート抵抗 $R_{g(in)}$ においてバイアス電圧が発生してもドレイン電流に影響を与えない電圧レベルに引き下げるため,ゲート電圧 $v_g = 0/-30 V$ に設定した。

図 5.2(b) に本手法のゲート駆動回路を適用した遮断器の実験結果を示す。外部ゲート抵抗 $R_{g(ext)} = 0 \Omega$ とし、ゲート電圧 $v_g = 0/-30$ V とした。また、使用した素子は前述の実験と同様の素子 A と B である。ドレイン電流 i_d に注目すると、アバランシェ降伏動作時における電流分担が改善されていることが確認できる。また、ゲート-ソース間電圧 v_{gs} に注目すると、アバランシェ降伏動作時において常に閾値電圧以下で推移することが確認できる。

さらに、ゲート電流 i_g に注目すると、ゲート抵抗 $R_{g(ext)} = 47 \Omega$ に設定時よりも電流量が増加することが 確認できる。すなわち、SiC-JFET がアバランシェ降伏動作時において電流遮断を行う際、ゲート駆動回路の ゲート抵抗値が低い場合、大部分の遮断電流がゲート側に流入する。ここまでの議論によって得られた従来手 法との比較を表 5.1 に示す。



図 5.2. SiC-JFET 並列接続時の実験結果 (a) 従来手法, (b) 提案手法

表 5.1 ゲート駆動回路の比較

	Conventional	Proposed
Gate voltage $v_{\rm g}$	0/ – 15 V	0/ - 30 V
Gate resistance $R_{g(ext)1}$, $R_{g(ext)2}$	47 Ω	0Ω
Maximum gate current i_{g1} , i_{g2}	301 mA	2.71 A

6. 本手法を適用した直流遮断器の有効性検証

6.1. 降伏電圧差を有する素子の使用による電流分担

前述において、ゲート電流に起因する電流不平衡について議論を行い、それを解決するゲート駆動手法について論じた。一方、素子の降伏電圧差 $\Delta V_{\rm BD}$ を起因とする電流分担への影響についても報告されている [8]。そのため、本手法を適用した場合における降伏電圧差を持つ素子の組み合わせによる電流分担の議論を行う。

素子の降伏電圧差による電流分担への影響を検証するため、素子 A と B に加え、素子 A との降伏電圧差 ΔV_{BD} がそれぞれ 0.011 kV, 0.030 kV の素子 C, D を用いて実験を行った。

図 6.1 に実験結果を示す。実験結果より,降伏電圧が低い素子に分担電流の偏りが生じることがわかる。また,分担エネルギーの分担割合についても降伏電圧差が大きい素子の組み合わせのほうが片方の素子に集中することが確認できる。
2021 年 2 月 16 日 東京都立大学 和田圭二



図 6.1. 本手法を適用した実験結果 (a) 降伏電圧差 ΔV_{BD} = 11 V, (b) 降伏電圧差 ΔV_{BD} = 30 V

6.2. 繰り返し遮断による特性変動

先行研究において SiC-JFET を用いた繰り返し電流遮断による劣化特性の優位性が示されている [7] が,本 手法のようにゲート側に大きな電流が流入するような使用条件下では検証されていない。そこで,本手法を 適用した場合における素子の長期信頼性を検証するため,5,000 回の繰り返し電流遮断による特性劣化評価を 行った。使用した素子は素子 A と B である。なお,素子発熱の影響による特性変化を防ぐため,強制空冷に より室温 25 ℃ の一定温度下において 5 s 間隔で行った。

図 6.2 及び図 6.3 に繰り返し遮断前後の静特性測定結果を示す。ここで、 I_D - V_{GS} 特性はゲート-ソース間電 $E V_{GS} = -20 \text{ V}, I_D$ - V_{DS} 特性はゲート-ソース間電圧を $-2 \text{ V} \leq V_{GS} \leq 2 \text{ V}$ として測定を行った。静特性測定結 果より、繰り返し遮断後の素子の静特性はほぼ変化がないことが確認できる。この結果から、適用した電流分 担手法は繰り返し電流遮断による素子劣化に影響することなく、繰り返し使用による長期信頼性に優れている ことが確認できた。

2021 年 2 月 16 日 東京都立大学 和田圭二



図 6.3. 静特性測定結果 (素子 B) (a) I_D-V_{GS} 特性, (b) I_D-V_{DS} 特性

研究実績

学術論文(査読付き)

• <u>**T. Takamori**</u>, K. Wada, W. Saito, and S. Nishizawa, "Gate drive circuit for current balancing of parallelconnected SiC-JFETs under avalanche mode," Microelectronics Reliability, vol. 114, 113776, Nov. 2020.

国際会議(査読付き)

<u>O T. Takamori</u>, K. Wada, W. Saito, and S. Nishizawa, "Gate drive circuit for current balancing of parallel-connected SiC-JFETs under avalanche mode," *31st European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF 2020)*, F3-134, Athens, Greece (Online), Oct. 2020. (ポス ター発表)

国内会議(査読なし)

● ○高森太郎,和田圭二,齋藤渉,西澤伸一,"直流 400-V 系統への適用を目的とした SiC-JFET を並列接続した半導体遮断器の電流分担",電気学会 半導体電力変換/家電・民生/自動車合同研究会, SPC-20-

235/HCA-20-085/VT-20-090, pp.41-46, 神戸 (Online), 2020 年 12 月.(口頭発表)

参考文献

- A. Werth, N. Kitamura, and K. Tanaka: "Conceptual study for open energy systems: distributed energy network using interconnected DC nanogrids", in *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1621-1630 (2015)
- [2] M. Naidu, T. J. Schoepf, and S. Gopalakrishnan: "Arc fault detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt", in *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 633-639 (2006)
- [3] Panasonic, EV Relays datasheet, [Online]. Available: https://www3.panasonic.biz/ac/e/index.jsp
- [4] Y. Sato, Y. Tanaka, A. Fukui, M. Yamasaki, and H. Ohashi: "SiC-SIT circuit breakers with controllable interruption voltage for 400-V DC distribution systems", in *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 5, pp. 2597-2605 (2014)
- [5] A. Suzuki and H. Akagi: "HVDC circuit breakers combining mechanical switches and a multilevel PWM converter: verification by downscaled models", in *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4259-4269 (2019)
- [6] K. Watanabe, Y. Yokomizu, Y. Ogura, and T. Ogawa: "Evaluation of junction temperature and transient voltage during large direct current interrupting process with SiC-MOSFET –power supply voltage 380 V-", the 2020 Annual Meeting of IEEJ, 6-061 (2020) (in Japanese). 渡邉幹太・横水康伸・小椋陽介・小川拓真: 「SiC-MOSFET を用いた直流電流の遮断過程における接合 部温度と過渡電圧の評価 –電源電圧 380 V-」令和 2 年電気学会全国大会, 6-061 (2020)
- [7] M. Sagara, K. Wada, and S. Nishizawa: "Degradation characteristics of SiC power devices for DC circuit breaker by repetitive unclamped inductive switching test", Microelectronics Reliability, vol. 100-101, 113417 (2019)
- [8] A. Fayyaz, B. Asllani, A. Castellazzi, M. Riccio, and A. Irace: "Avalanche ruggedness of parallel SiC power MOSFETs", Microelectronics Reliability, vol. 88-90, pp. 666-670 (2018)
- [9] United Silicon Carbide Inc., SiC-JFET UJ3N120035K3S Datasheet, [Online]. Available: https://unitedsic.com

デジタルゲートドライブ回路を用いた 次世代パワーエレクトロニクス用パワーモジュールに関する研究

横浜国立大学 工学研究院 小原 秀嶺

1. 研究の背景と目的

小容量の用途で広く用いられているパワーデバイスである Si-MOSFET は、その物理的な制約から、オン抵 抗が耐圧の 2.5 乗で増加するため、高耐圧の素子を1つ用いるよりも低耐圧素子を直列接続する方が導通損失 を低減できる場合がある。また、スイッチング時間も一般に低耐圧素子の方が短いため、直列接続することに よりスイッチング損失も低減することが可能である。そのため、Si-MOSFET を多直列接続することによって、 高耐圧の SiC-MOSFET 単体よりも性能やコストの面で優れたパワーモジュールを実現できる可能性がある。

しかしながら、パワーデバイスの多直列化を行う場合、全ての素子のスイッチングの過渡的なタイミングを 一致させ、各素子の印加電圧をバランスさせる必要があり、従来のゲートドライブ回路ではこの点が困難であ った。本研究では、デジタルゲートドライブ回路技術を用いた Si-MOSFET 直列接続時の電圧バランス制御に ついて検討し、電圧バランスの実現に必要なゲート駆動パターンの決定方法を明らかにすることで、次世代パ ワーモジュールの実現可能性を示すことを目的とする。

2. デジタルゲートドライブを用いたパワーモジュール

本研究で想定するパワーモジュールの構成を図1に示す^[1]。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、内部は所要耐圧に合わせた数のSi-MOSFET が直列に 接続され、全ての MOSFET が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。

3. 実験回路

提案するパワーモジュール内部において各 MOSFET の電圧バランス制御を実現するため、まずは図 2 の最 も簡単な回路構成を用いて実験を行った。2 直列の MOSFET (IRFB5620)において、一方は通常の 23Ωのゲ

ート抵抗を用いた2値的な電圧形ゲートドライブで駆動し,もう一 方はデジタルアクティブゲートドライブを用いて,スイッチング遷 移時に2つの MOSFET のドレイン-ソース間電圧の偏りが生じない ように制御を行う。実験は,装置簡素化のためダブルパルス試験で 行った。実験回路の外観を図3に示す。デジタルアクティブゲート 制御には,パラレル12ビット入力のアクティブゲートドライバIC を用い,FPGAによりゲート駆動パターンの制御を行った。

4. 実験結果

実験で用いたデジタルゲートドライバ IC は 63 並列の CMOS ド ライバを有しており、クロック周期毎に駆動力を変えられるため、 電圧バランスを実現可能なゲート駆動パターンが無数に存在する と予想される。自由度を制限し、探索を容易にするため、始めにゲ ート駆動レベルを始めの 320ns の間固定し、等価的に従来ゲートド



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

ライバにおけるゲート抵抗を変更する場合と等価の動作 をデジタル制御で行った。図4および図5は、ゲート駆 動レベルを15および14に固定した際の実験波形である。 ゲート駆動レベルを15にした際には、2つの MOSFET の ドレイン-ソース電圧がバランス状態に近くなったが、ま だ偏りが残っていることが分かる。ゲート駆動レベルを 16に増やすと、駆動力が強くなりすぎ、アンバランスに なっていることが分かる。これより、ゲート駆動レベルを 固定した場合には、本実験条件ではレベル15が最も電圧 バランスを実現するのに近い駆動レベルということが分 かった。これは、等価的なゲート抵抗と MOSFET の入力 容量との積が一定になるような一般的なデバイス直列接 続におけるゲート駆動と同様に考えられることが分かっ た。この結果を元にアクティブゲート制御を実装し、パラ メータを調整して実験した結果が図6である。アクティ ブゲートにより, 電圧バランス制御が実現できているこ とが確認できる。検証を重ねた結果、スイッチング遷移時 の始めのゲート駆動レベルが電圧バランスに顕著に影響 することが分かり、図4の実験で得たレベル15にするこ とで、電圧バランスを実現するゲート駆動パターンを見 つけやすくなることが分かった。

5. まとめ

本研究では、複数の低耐圧 Si-MOSFET を用いた次世代 パワーモジュール実現に向けて、デジタルゲート制御に よる直列 MOSFET の電圧バランス制御について検討を行 った。実験の結果、ゲート駆動の基本的な方針として、等 価的なゲート抵抗と MOSFET の入力容量との積が一定に なるように設定した上で、寄生成分やばらつきを考慮し た微調整をアクティブゲート制御により行うことで電圧 バランスを実現できることを示した。以上より、デジタル ゲートドライブを用いることで性能やコストの面で優れ た次世代パワーモジュールが実現可能であることを示し た。

参考文献

 [1] 蔵野雅尚・和田圭二:「アクティブゲート駆動回路を 用いた MOSFET 多直列接続の電圧バランス制御」, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ研究会, SPC-21-059/MD-21-059, 2021-1



図2 回路図



図3 実験回路の外観



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. パワーモジュール V-I 特性の測定

パワーモジュール内で発生する損失の演算にあたっては,導通損失とスイッチング損失特性の取 得が必要である。導通損失の測定のため,半導体カ

ーブトレーサを用いてコレクタエミッタ電圧-コレ クタ電流特性(V-I 特性)を測定した。図1に試験 対象のパワーモジュール(Infineon 1200 V 75 A 定格, 6 in 1 の IGBT)の内部の写真を示す。インバータ連 続運転下で試験を行うため、6 素子すべての V-I 特 性を測定する。

図2にモジュール内6素子の室温(25℃)における V-I 特性測定結果を示す。また,図3に1素子の V-I 特性の温度依存性を示す。以上を含め,3モジュ



ール×6素子×温度4点(25,75,125,175℃)の特性を取得しており、今後のモニタリングに活用する。紙面では割愛しているが、ゲート電圧変化時のV-I特性も測定している。

4. 試験用インバータ回路の設計

図4に連続運転試験用の三相インバータの回路構成を示す。パワーモジュールの電圧・電流定格 に対応するため、直流電源電圧700V、出力ピーク電流170Aとしている。パワーモジュールの損 失は1kW以上に達するとため、図5に示すとおり水冷ヒートシンクを導入しモジュールのケース 温度を十分に下げられるようにしている。これに合わせインバータ出力、直流電源入力、ゲートド ライブ回路接続用の実装基板を製作している。

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、モジュールの導通損失演算のための V-I特性の測定と、試験用三相インバータ回路の設計を行った。今度の課題は以下の通りである。

- ダブルパルス試験によるスイッチング損失の見積り
- ゲートドライブ回路の設計・製作
- コレクタエミッタ飽和電圧(V_{CE(sat)})検出回路の作製と素子温度の推定
- インバータ連続運転時のモニタリング試験



図2 6 in 1 モジュール内各素子の V-I 特性



図4 連続運転試験三相インバータ回路構成



図3 1素子の V-I 特性温度依存性



図5 三相インバータ用ヒートシンク・実装基板

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

A Study on Gate Drive Circuit Using Wireless Power Transfer for Power Semiconductors

Kyungmin SUNG

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 contactless 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 very long. When the turn-on and turn-off times are long, a lot of losses are generated during the switching of power semiconductors, which hinders 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 modulation, and the operation is inverted ASK modulation. In the gate driver circuit, the signal detection and the power supply are separated, and the gate driver is used to drive the power device to increase the drive capability. Furthermore, experiments were conducted to check the switching of the power semiconductors using the proposed modulation method and the designed gate drive circuit, and compared with the conventional method.

Keywords: Wireless Power Transfer, Gate Drive Circuit, Power Semiconductors, Modulation Method

1. はじめに

マトリックスコンバータ等をはじめとする多数のパワー半導体を使用する電力変換器では, ゲート回路が巨大化し,配線も複雑化してしまう問題点があった.一方,非接触電力伝送(WPT) の高周波化が進み,高効率での電力伝送が実現されたおかげで,小電力のものから大電力の電気製品の充電まで幅広く応用が行われるようになった.WPT は,電源供給側と負荷側の電気的絶縁を 保ちながらも負荷側に電力を供給できる事が特長である.

先行研究では、WPT により MOSFET(Metal-Oxide – Semiconductor Field – Effect Transistor)や IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)をはじめと するパワー半導体を駆動するための電力とスイ ッチングの信号を同時に伝送するゲート駆動回 路を提案し、小型化や高い絶縁性能など様々な 利点があることを示した.しかしながらドライ ブ能力が少なく、立ち上がりの時に多くの時間 がかかってしまうことなどが問題となっていた. またコンデンサによって信号の遅延時間も発生 するため、遅延時間を短くすることも課題とな っていた.

本研究では, 先行研究で用いていた ASK(Amplitude Shift Keying)を改良し, 新たな変 調方式を提案するとともに, ゲート駆動回路を 設計する. 先行研究で提案されたゲート駆動回路は, 基本的にアナログ素子だけで構成されていた. 一方で, 本提案ゲート駆動回路(Proposed Gate Drive Circuit; PGDC)は, コンパレータやゲートドライバを用いた回路構成のため, ゲートドライブ能力がより高いことが予想される.本提案ゲート駆動回路がパワー半導体の駆動に必要な性能を満たすことを, スイッチング実験を通して検証する.

2. 非接触電力伝送法を用いたゲート駆動

2.1 提案ゲート駆動方法

本研究で用いた PGDC を Fig. 1 に示す. この 回路では,送信側の回路はハーフブリッジのイ ンバータによって構成されている. ハーフブリ ッジインバータは 2 つの GaN MOSFET で構成 されているためスイッチング周波数の高周波化 にも対応することができる. スイッチング周 波数はfsw は LC 共振周波数で決定される.

$$fsw = \frac{1}{2\pi\sqrt{LrC1}} \tag{1}$$



Fig. 1. Circuit diagram of PGDC

送信側と受信側の電力のやり取りは、PCB(Printed Circuit Board)上で平面的に巻かれた直径 2 cm サ イズのコイルで行われる.LC 共振を利用した磁 界共振方式の WPT によってコイルの中心に鉄心 などがなくても高い電力伝送の効率を保つこと ができる.そのため,従来の鉄心コアが必要なパ ルストランスなどを使ったゲート駆動方式より も小型化や軽量化が実現できる.

受信側の回路は、主に2つの回路で構成され ている.ひとつは, Fig.1 上部に示すコンパレー タ等で構成される信号検出部である. もう一方 は, 電圧レギュレータ等で構成される電源供給 部である. コンパレータの入力に接続される C₃ は、電源供給部の C_2 や C_4 よりも、静電容量が小 さく、Fig.2に示すターンオン、ターンオフのタ イミングで放電しきるように設計されている.た だし, スイッチング周波数fswなどの MH z帯の 信号では放電しきらないようにしている.一方, $C_2 や C_4 は, ゲートドライバやコンパレータの電$ 源電圧を生成する必要がある.そのため、一定の 電圧をためておく必要があるため, ターンオン, ターンオフのタイミングで放電しきらないよう にできるだけ高い静電容量の値で設計されてい る.

信号の変調方式は, Fig. 2 に示すような方式を提 案する. この方式は, ASK 変調を反転させた方式 となっている.FPGA の信号は,送信側の MOSFET のスイッチング周波数である.本研究 では,式(1)から 0.934 MHz と 1.93 MHz の 2つの 周波数を算出し,実験に使用した.周波数の変更 に伴い, LC の共振周波数も変わるため C_{r1} と C_{r2} の静電容量を変更した.ダイオード D_2 で整流し, C_3 にチャージした電圧波形をコンパレータで検 出し,ゲートドライバの入力信号を生成する.一 方,電源供給部では,コンパレータで集成し, C_2 と C_4 のコンデンサにゲートドライバの供給電圧を蓄 えている.

Table.1	Circuit	parameters	of P	GD	C
---------	---------	------------	------	----	---

Circuit parameters	Value	
f_{sw}	0.934 MHz/1.93 MHz	
C_{r1}/C_{r2}	20 nF/4.7 nF	
C_2/C_6	10 µF	
C_3	10 nF/4.7 nF	
$C_4 / C_5 / C_7$	0.1 µF	
R_1	30 Ω	
R_2	180 Ω	
R_3	300 Ω	
R_4/R_5	1.2 kΩ	
R_{6}	5.1 kΩ	
R_G	4.7 Ω	
L_{r1}/L_{r2}	1.45 µH	
V_{in}	15 V	
MHz MHz		
	Signal from FPGA	
Th	reshold Voltage of Comparator	





Fig. 3. Waveform of PGDC $(20\mu S/div)$

2.2 提案ゲート駆動回路動作確認

実際に PGDC を動作させた時の出力波形が Fig. 3である. Voigsは、送信側回路の MOSFET のゲー トソース電圧である. Vc3は、コンパレータの反転 入力電圧である. コンパレータの閾値電圧は, 2.5V で設定している. V には電源供給部のコンデ ンサに蓄えられている電圧である.Vcc は約 15 V 出力しており、パワーMOSFET を飽和領域で使 用するのに十分な値を達成している. V_{cc}を供給 電圧とし, コンパレータの出力信号を入力信号 としてゲートドライバが動作している. このゲ ートドライバによって駆動したパワー MOSFETO3 のゲートソース間の電圧が, Vo3GS で ある.ゲートドライバは, スイッチング素子2つ 使ったプッシュプル出力となっている. ゲート ドライバを用いることで従来の方式よりも多く の電流を流すことができるため、ドライブ能力 が高いことがわかる.実際に、ゲートソース電圧 VosGS の立ち上がり時間と立下り時間が従来の方 式より短くなっている.そのため,スイッチング損 失が少なくなることが予想される.Fig.3の結果か ら PGDC が動作し、パワーMOSFET O₃のスイッ チングのタイミングを伝える信号とゲート駆動 のための電力を同時に送ることができているこ とを確認した.

しかしながら, コンパレータを用いて信号電 圧を検出するときに, コンパレータ反転入力部 に接続されるコンデンサ C_3 とツェナーダイオー ドの電流制限用抵抗 R_2 と R_3 による RC 回路で遅 延時間が発生してしまうことが考えられる.



Fig. 4. Circuit diagram of switching experiment

Table 2. Experimental conditions and rat	ing
--	-----

V_{I}	150 V / 200 V	
Switching Frequency of Q3	20 kHz	
Rated Voltage and Current <i>Q1,Q2</i> ; LMG5200	80V, 10A	
Rated Voltage and Current Q3 ; SCT3120	650V, 21A	

3. 提案ゲート駆動法を用いたスイッチング実験 3.1 スイッチング実験回路

スイッチング実験の回路図をFig.4 に示す.パ ワー回路側の基本的な構成はチョッパ回路と同 様である.Q₃がオンの時は, RL 負荷に電流が流れ る.Q₃がオフの時は, 負荷の電流が帰還ダイオー ドに転流される.

実験条件と使用する素子の定格電圧,電流を, Table 2 に示す. パワー回路の電源電圧 V_1 は 150 V と 200 V の二つの条件で実験を行った. Q_3 のス イッチング周波数は 20 kHz である. Q_3 には SiC(Silicon Carbide) MOSFET を使用した. また, ダイオードには,駆動するパワーMOSFET をも う一つ使って,そのボディーダイオードを使用 する.

3.2 スイッチング実験結果

スイッチング実験の出力波形を Fig. 6 に示す. 駆動するパワーMOSFET Q_3 のゲートソース電 圧波形が V_{Q3GS} である., V_{Q3GS} は,約 18 V 出力し ている.パワーMOSFET の飽和領域の電圧であ る 15V 以上を出力することができている.パワ ー回路電源電圧 V_1 は,200 V である.また,ドレ イン電流 I_D は,最大値で 8 A 程度流れていること がわかる.

以上のことから,提案ゲート駆動方法を用い てパワーMOSFET を駆動し,パワー半導体のゲ ート駆動回路として十分な有用性があることを 示した.



Fig. 5. Photograph of PGDC used in experiment



Fig. 6. Waveform of switching experiment (20µS/div)



Fig. 7. Comparison with conventional Circuit

3.3 従来方式と提案ゲート駆動方法の比較

従来のゲート駆動方法と PGDC を用いた駆動 方法の立ち上がりと立下りの電圧波形の比較を Fig. 7 に示す. (a)と(b)は,立ち上がり電圧波形 である. PGDC によってパワーMOSFET のゲー ト駆動を行うことで,立ち上がりの遅れ時間は, 1.1 μ S となっている.従来の回路でのゲート駆動 より立ち上がりの遅れ時間を短縮することがで きた.

(b) と(d) の波形は,立下り電圧波形である. PGDC によるパワーMOSFET のゲート駆動を行った場合,立下りの遅れ時間は従来の方式より も長くなってしまっている.原因としては,コン デンサ C_3 と抵抗 R_2 と R_3 による放電によって発 生している遅延時間であると考えられる.また, (c)に示すように,従来方式の電圧立ち下がり時間は,0.5 μ S 程度かかっている.一方,(d)に示す ように,PGDC を用いた駆動の場合,電圧立下り 時間をより短縮することができている.これは, ゲートドライバを用いたことにより,ドライブ 電流を多く流せることで,ゲートの入力容量を 早くチャージできるようになったからである. また,立下りの時間が短いため,スイッチング損 失の低下を実現できるだろう.

4 まとめ

本研究では、WPT を用いたゲート駆動方法と して、ゲート駆動回路と変調方式を提案した.先 行研究で提案されたゲート駆動方法の小型化や 高い絶縁性能という利点は残しつつ、問題点で あった、立下り時間等の短縮をすることが実現 できた.また.スイッチング実験を通して、パワ ー半導体のゲート駆動方法として有用なもので あることを示した.

文献

- 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)
- (2) 大内洋佑, 成慶珉:「非接触多重伝送を用いた ゲート駆動方式に関する研究」, 平成 31 年電気 学会全国大会, 4-032.

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。標準的な電極接合技術としてワイヤボンディングが多用されるが、次世代パワーエレ クトロニクスで想定される 200°C 以上の高温環境下での寿命の定量予測には至っていない。金属の熱疲労にお ける寿命 $N_{\rm f}$ は非弾性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{in}$ を用いて $\Delta \epsilon_{in}$ ($N_{\rm f}$)^w = C のような Coffin- Manson 則で表されることが知 られている。ここで、w と C は材料定数である。材料の非弾性変形量が寿命を決定する指標であることから、そ の寿命予測には、材料の変形を正しく評価する必要があることを意味する。さらに、200°C 以上の熱サイクル試 験においてワイヤボンド接合の寿命が飽和し、それ以上では低下しないとする報告もある。これは現状の最高温 度 175°C 許容設計よりもさらなる高温化も想定されるパワーモジュール実装においてアルミワイヤの適用可能性 を判断する上で重要な実験事実である。アルミニウムの融点が 930K 程度であるため、200°C 以上(> 0.5Tm)の 温度域では低温ではあまり問題とされなかったクリープが変形の支配的機構となることが予想される。したがって、 このような飽和現象の理解をはじめとする高温域での寿命の予測、設計には対応する温度範囲で正しく非弾性 変形量を見積もることがより一層重要となる。ただし、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 蓄積が乏しく、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。

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る疲労予測・設計を目的として、まずは基本となる材料の非線形変形特性を実測により評価した。これにより、次世代パワーエレクトロニクスにおいて 求められている超高パワー密度モジュールを実現するための、接合形態・材料の探索、抜熱技術の定量的予 測評価を可能とし、次世代パワーエレクトロニクスの開発・普及を加速することを狙う。

実験方法

引張り試験 パワーモジュール用アルミワイヤとして一般的な、直径 400 µmのアルミ太線ワイヤ(田中電子工 業社製 TANW)を供試材とし、温度制御槽付き万能試験機(INSTRON 社製)を使用した。このとき、ひずみ速 度がそれぞれ 0.025%/sec、0.25%/sec、2.5%/sec となるようにクロスヘッド速度を制御することで 3 つの異なる速 度で引張り試験を実施した。引張り試験によって得られた応力-ひずみを図1に示す。



実験結果

室温近傍ではその速度依存性が小さい一方、250℃ では速度依存性が大きく、顕著な応力緩和が発生する など時間依存型の変形であるクリープが支配的であることがわかる。

考察

引張試験より得られたクリープ特性を Bailey-Norton 型の遷移クリープモデルに従うと仮定した場合、クリープ ひずみ ε_c は応力 σ 、時間 t に依存し、

 $\varepsilon_c = A \sigma^n t^m$

として表すことができる。このとき、A, n, m はクリープ変形に関わる材料定数であり、その温度依存性を記述する 温度補間関数として次式を仮定した。

$$A(T) = 5.223 \times 10^{-4} \exp(\frac{-1.607 \times 10^3}{T + 273.15})$$

n = 2.103

 $m(T) = 1.046 \times 10^{-5}T^2 - 2.203 \times 10^{-3}T + 0.4139$

得られた非弾性特性を用いて 20°C、250°C の引張り試験を有限要素解析によって再現した。実験より求まる 真応力-真ひずみ線図と得られた有限要素解析結果を図2に示す。いずれの温度条件においても、各速度に対 して試験片毎のばらつきの範囲に収まる程度で応力ひずみ線図が再現できていることがわかる。ただし、250°C の最も遅い速度条件(0.025%/sec)においては全ひずみが 10%以上の範囲で実験結果と解析結果の傾向が一 致していない。これはクリープひずみが支配的な状況で、変形初期の遷移/定常クリープ領域ではなく、加速クリ ープに近い領域までクリープ変形が進行しているためと考えられる。一方、純アルミは他の金属材料に比べて 遷移域が卓越していることが知られており、このような加速クリープ領域と考えられる以前の応力ひずみ関係は 得られた式によってかなり的確に表現できていることがわかる。

まとめ

パワーモジュール用の太線アルミワイヤ材料を対象として、等温条件で引張り試験を実施し、20℃から250℃ までの温度範囲においてクリープ特性を評価した。さらに得られた非弾性特性を任意の温度条件を対象とした 有限要素解析に反映させるため、その温度依存性を仮定した温度補間関数についても検証したところ、実験事 実とよい一致なテした。



高品質多元系熱電材料の単結晶成長と特性評価

宮崎大学 工学部 環境・エネルギー工学研究センター

永岡 章

宮崎大学 工学部 電子物理工学科

上水樽 昂樹、吉野 賢二

世話人 九州大学応用力学研究所 柿本 浩一 教授

1. はじめに

連続鋳造や熱間圧延などの製鉄工程では、膨大な量の熱が発生する。これらは工業的に得やすい「熱 エネルギー」ではあるが、近年このエネルギーを有効に利用することが求められている。現在実用化さ れている熱電材料は Bi 系や Pb 系の化合物で効率は 10%程度であり環境負荷が大きいため「低コスト・ 安全性」と「熱電特性の向上」が求められる。元素の組合せによる物性制御の観点から 3 元系以上の多 元系材料探索が行われており大きなポテンシャルを持っていると期待されている。熱電材料の指標の一 っとして低い熱伝導率があるが、多元系化合物は大きなユニットセルで構成され、組合せによって重元 素も導入出来るため、熱電材料の条件に適している。しかしながら、3 元以上の多元系熱電材料はまだ まだ未知な部分が多い現状がある。本研究では、熱電材料として期待されている I2-II-IV-VI4 化合物 Ag2ZnSnS4 (AZTS)とチムニーラダ一型化合物 Sr9Ti8S24 (STS)の結晶成長過程を調査した。STS サンプル については、熱電特性としてゼーベック係数と熱伝導率評価を行った。

2. 実験方法

AZTS バルク結晶は融液成長、STS バルク結晶は固相成長であるホットプレス法から作製した。両サンプルとも化学量論組成となるように原料を調整した。AZTS 結晶成長については示差熱分析(DTA)測定から状態図を作製し、結晶成長過程を調査した。X線回折(XRD)法、エネルギー分散型 X線分析(EDX)、ホール効果測定から基礎物性を評価した。電気伝導度、熱伝導度、ゼーベック係数から熱電特性を評価した。

3. 結果と考察

図 1 に Ag₂SnS₃-ZnS 擬二元系状態図を示す。AZTS 相は、液相(L)+ZnS による包晶反応によって形成 され、包晶点は、ZnS:20 mol%と 700 ℃ である事を明らかにした。この状態図を基に、包晶温度 700 ℃ から室温まで 30 ℃/h の冷却速度で包晶反応を完了させ単相 AZTS バルク結晶が得られた。STS バルク 結晶は、650 ℃ において 7.7 MPa で 1 時間ホットプレス後、石英管に真空封入し 900 ℃ で 24 時間アニ ールする事で単相が得られた。図 2 に(a) AZTS 結晶インゴットと(b) STS ウエハーを示す。

図 3 に単相 AZTS と STS サンプルの XRD 測定から得られた結晶構造を示す。(a) AZTS はケステライ ト構造 (a 軸 = 5.78 Å、 c 軸 = 10.87 Å)、(b) STS はチムニーラダー構造(a 軸 = 12.12 Å、 c 軸 = 42.30 Å)





図2(a)AZTS インゴットと(b)STS ウエハー



を持ち、両構造とも大きなユニットセルのため低い熱伝導率達成のためにアドバンテージがある。特に、 STS は、*c* 軸方向に 42.30 Å と大きな格子定数を示すため、高い熱電特性を達成するために必要な低い熱 伝導率<1 W/mK が期待できる [1]。

ホール効果測定から室温における AZTS と STS のキャリア濃度と伝導率を評価した。両化合物とも負のホール係数を示したことから n 型半導体であった。両化合物ともに 3%程度 S-poor 組成であったため、 支配的な n 型欠陥は S 空孔であると考えられる [2]。AZTS は、キャリア濃度 (3.0–6.3)×10¹⁵ cm⁻³、伝導率 (5.6–9.2)×10⁴ S/cm を示した。STS は、キャリア濃度 (7.5–9.2)×10¹⁵ cm⁻³、伝導率 (1.1–4.6)×10⁻² S/cm を示した。両化合物は、キャリア濃度が 10¹⁵ cm⁻³ オーダーであったため、熱電材料として必要な 10¹⁸-10¹⁹ cm⁻³ まで向上させることが今後の課題である。今後は、カチオン組成変化やドーピングを適用 してキャリア濃度向上へアプローチする。図 4 に 323-673 K における STS 熱伝導率温度変化を示す。関連化合物である TiS₂ と比較して、測定温度域において 75%程度低い熱伝導率を実現した [3]。これは、ユニットセルの大きなチムニーラダー構造が影響していると考えられる。さらに、測定温度域において 低熱伝導率 0.58-0.94 W/mk を有するため、STS の熱電材料としてポテンシャルを示した。

4. まとめ

新規多元系 AZTS と STS 材料の熱電材料としてのポテンシャルに注目した。結晶成長過程を調査し、 得られたサンプルから熱電特性を評価した。両材料ともにキャリア濃度と伝導率の電気特性は、今後改 善が必要であるが、大きなユニットセルを持つことから低い熱伝導率は達成可能である。特に、STS は 323-673 K において熱伝導率 0.58-0.94 W/mk と低い値を実現した。

参考文献

[1] J. He et al., Science **357** (2017) eaak9997.

- [2] Z. -K. Yuan et al., Adv. Funct. Mater. 25 (2015 6733.
- [3] D. R. Clarke et al., materialstoday 8 (2005) 22.

形状可変円弧翼の形状制御による垂直軸風車の出力評価

弘前大学·地域戦略研究所 久保田 健

目的

8 枚翼の垂直軸風車の翼材に帆布を採用し、長期使用による経年劣化で伸びた場合に翼は弛むが、受風時にカテナリ 一様の円弧を形成するため、順回転力と反回転力はそれぞれ増大すると予想される。そのため、風車の回転性能は直線 翼の場合と比して、複数の複雑な事象をも考慮する必要が生じるが、システムとして利用するに際してはそれら事象の 統合結果としてのトルク係数 G・やパワー係数 Coの増大もしくは低減の抑制を図りつつ、制御可能な回転速度とするこ とが必要になる。本実験では、翼材の弛み量を意図的に調節し、その際の風車の空力性能を計測・評価すること、なら びにその際の負荷を回転角度依存性のない電磁ブレーキおよび脈動のある回転ベーンポンプとしたときの結果の差異 を解析することを目的とした。

実験方法

本研究は、応用力学研究所の地球大気動態シ ミュレーション装置(大型境界層風洞)で令和 元年度に実施したデータに加え、本年度の弘前 大学での追加実験とそれらの解析によって構 成されている。

図1に垂直軸ローテーション・フロー風車の 基本仕様(鉛直断面)と、前述する風洞実験時 の風車仕様の一例として外観図を示す。タービ ンは直径1000mm、周均等8枚の帆布製直線 翼で構成され、各翼外端と回転中心のなす角は 35°である。帆布のz方向(縦)長さは740mm であって、軸方向に縮めることで弛み量を調整 した。また、弛みを有する翼に対しては、完全



図 1 実験に用いたローテーション・フロー風車の基本形状の断面 図 (左),ならびに実験時の風車仕様の一例 (右).

にフリー、くの字型の支柱を翼幅中央(1/2)や外端から1/4および3/4位置に入れた矯正形状の4条件を、各軸長ごと 設定した。なお、図1(右)に見える上下面の天板の有無についても仕様ごとに変更した。設定風速については、帆布 が確実に張る(自重で上下非対称とならない)ように7m/s 固定を基本とし、ポンプ実験のみ4~10m/s と変化させた。

風車の空力性能の確認には小倉クラッチ社製の直流電流制御式電磁ブレーキ AMB-80 を負荷として用い、風車の周 速比を制御した。また、揚水システムを想定した実験に用いたポンプはアクアシステム社製 HRP-25Z で、仕切り板 2 枚 をバネで容器内壁に押し付ける回転ベーン式であって、摺動抵抗および汲み上げ水の吸込みと押上げのため回転中にト ルクの脈動がある。またこれらの他、ユニパルス社製トルクメータ UTMG-10Nm でトルク計測を、同 UTMII-0.1NmR で 2000pulse/cycle の回転信号をそれぞれ 1000C/sec で 30sec 計測し、弘前大学における実験では仮想風車としてオリエ ンタルモータ社製の AC サーボモータ(ギアード)NXM940A をトルク制御モードで使用した。

結果と考察

図2には、風速7m/sにて電磁ブレーキ負荷制御で得られた各翼仕様のパワー曲線を示す。ここで、L740は基本形状 となる直線翼で、L730とL700はそれぞれ翼の軸長を意味しており、L730は軸方向に僅かに、L700はさらに弛みを有 しており、Fix-1/2は翼幅中央位置に支柱を入れて弛んだ翼のバタつきに抑制を加えた仕様、Freeは支柱を入れずに受風 時は自由に帆布が動ける仕様である。なお、いずれも上下面の天板はない。ここから、僅かに弛みを持たせることで、 パワー係数な増加すること、極大点は低周速比にシフトすること、弛み量が過剰になると回転可能な周速比が低下する ことが見て取れる。また、支柱の効果を考えると、パワー係 数極大値は低下すること、ならびに低周速比側で値の低下 傾向が減少するように見られ、トルク曲線からは低周速比 でのトルク増大が確認された。

よって同風車を、変動する自然風下において揚水システ ムに組み込んで使用する際、帆布翼に僅かな弛み量を設定 することは始動性の向上と運転効率の漸増に、ならびに明 瞭ではないものの、支柱を中央部に設置することは始動性 の向上に、それぞれ寄与すると考えられる。

図3は帆布軸長700mmとし、やや弛み量の多い(サグ率 18%) て支柱の有無および支柱設定位置を調整してパワー 力線を計測した結果であって、1/4、1/2、3/4 は支柱設置位 置の外端からの翼幅比を意味する。ここから、内側(3/4) に設置した場合と比べ、中央(1/2) や外側(1/4) に設置し た方がパワー曲線の値は大きいこと、ならびに高周速側で も風を捉えて回転することがわかる。

支柱位置から判断するに、受風によって反回転力が生ま れる角度領域では、支柱により帆布は傘型となって風を受 け流して抗力を減じるとみられるが、風を風車の外に受け 流すよりも内側に取り込んだ方が正回転力は増大したと 考えられる。この点については風車内部や交流の流れ場可 視化実験や CFD による気流解析と照合することでメカニ ズムの解明が必要である。

図4には、帆布翼直線仕様での風車上下天板の有無を確認した結果を示す。図から明らかなように、天板の設置は風車の空力性能の顕著な向上をもたらす。本風車はサボニウス風車とクロスフロー風車の中間的性質を有すると考えられている¹⁾が、上流から風車内部に流れ込んだ風が流



図4 翼直線状態での風車天板のパワー曲線に及ぼす影響.



図2 帆布翼の弛み量と支柱設置(中央)のパワー曲 線に及ぼす影響.



図3 帆布翼軸長 700mm 時の支柱の設定位置別パ ワー曲線.

れ出る際、上下に天板が無い場合は流入風の出口とし て機能し、逆に天板がある場合は下方の翼を正回転方 向に押しながら流出すると考えられる。

風車をエネルギー変換デバイスとして捉えると、本 研究の風車に天板を設置することは空力性能に劇的な 性能向上をもたらすが、その一方でシステムとして組 み込んだ折には高速回転化は接続する機械部品への負 荷や安全上の懸念が生じる。

図5は、最大効率を示す帆布力線翼(天板付き)、ならびに一例として軸長700mmの弛み翼(支柱位置:外1/4、天板なし)の結果に、風車直動式ポンプによる揚水実験の結果を合わせて示したものである。まず、電磁ブレーキによる実験と揚水実験の結果で引いた近似線は良い一致を示し、手法の違いによる差はほとんどな

いと認識できる。揚水実験では揚程高1.4m、全揚程1.8m と設定しており(逆止弁あり)、風速5m/s以上でゆっく りではあるが吸上げ揚水は可能であった。風速を最大 10m/sまで増加させるに伴い、徐々に周速比が大きい方 向へと計測値は移動して搬送流量も増加したが、今回 の実験条件内ではパワー係数の極大点近傍までは到達 しなかった。

実験では動力を固定容量式の回転ポンプに直接接続 した。実質的なポンプの負荷要素は摺動抵抗と流体搬 送に伴う量と速度であるため、パワー曲線の極大点を 超える高速回転化は起こりえない。本風車のパワー係 数の極大点は周速比で 0.2~0.35 付近であることを踏ま えれば、天板を付けたとしても決して天板無し風車の



図5 風車2仕様における揚水実験を含めたパワー曲線.

無負荷回転よりも遅く、高速回転と言えるものではない。よって、高速回転化がもたらす機能保守上、安全上の懸念を 思慮するよりは、性能追及を優先することが得策と考えられる。また、パワー係数のより高い領域で運転を可能とする ことはシステムの機能効率の向上に必要であることは異論の余地はない。風力直動式揚水に限れば、翼型制御によって パワー係数の極大点をさらに低周速比側へ、なおかつ極力低下させずに設計することも興味深いと考える。

まとめ

今年度実施した形状可変な帆布翼の翼型制御による風車出力の調査を通じて、以下の知見を得た。

- ・弛み帆布翼 8 枚で構成する抗力式垂直軸風車における帆布弛み量と形状が風車の空力性能に及ぼす影響の調査から、弛み量と帆布形状のいずれもに基本姿勢となる直線翼の場合よりも性能を向上させる最適点が存在する。
- ・風車天板の影響調査から、天板を設置することで風車の性能は顕著に向上することから、天板の設置は上流から内 部に流入した風が下方の翼を正回転方向に押す役割を担う。

いずれの知見についても、トルクと回転数を計測した実験とその解析結果からの予想であって、今後は流れ場の可視 化実験や数値流体解析と合わせてメカニズムを解明し、更なる研究を通じて、学術的な観点からは風車の更なる性能向 上、工業的な観点からは意図的な仕様制御法の確立を目指したい。

謝辞

本実験の遂行に際し、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、風洞実験においては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 賜りました。この場を借りて三氏に感謝申し上げます。

研究組織

- 代表者 久保田 健 弘前大学地域戦略研究所・准教授
- 協力者 本田 明弘 弘前大学地域戦略研究所・教授
 - 桐原 慎二 弘前大学地域戦略研究所·教授
 - 志田 崇 弘前大学大学院理工学研究科・博士後期課程3年

参考文献

1. 南條 宏肇, "抗力型風力発電の力学的モデルと発電出力の最適化評価", Journal of JWEA, Vol. 32, pp. 102-108 (2008).

大気乱流による気圧変動の直接測定のための多孔ピトー型プローブの性能評価

海上保安大学校基礎教育講座 近藤文義

1. 実験目的

大気境界層内において乱流により生じる気圧変動を計測する際に問題となる、風が生む動圧について、 その影響を取り除くために用いられているプローブの性能評価を行うことを目的とした実験を行った。 一昨年度の円盤型、昨年度の注射針型に続き、これらの利点を生かした多孔ピトー型のプローブを作成 して、任意の風速値に設定することのできる大型境界層風洞を利用し、風速と風向を変えることにより プローブが動圧の影響をどの程度除去できているのか定量的に把握した。

2. 実験方法

本実験に用いた多孔ピトー型のプローブは外径 8.0 mm のシームレスパイプに直径 25mm の球を接着 した全長 80 mm のアルミ製のプローブである(図1)。球には直径 0.3 mm の静圧孔が正面からみると 中心から 15 度間隔で設けられた任意の半径の円を形成し、また、その円が多重となっておりシャワー ヘッドのような形状にみえる。これらの静圧孔は球の内部とパイプ内の空洞部で繋がっており、内部の 圧力を計測することで場の静圧値を得ることができる。実験では、外径 6.0 mm のシームレスパイプと 直径 20mm の球に同様の形状で直径 0.3 mm の静圧孔を設けたプローブも用い、これらの比較も行った。

多孔ピトー型プローブは水平固定時に高さが 1.20 m となるよう、また風洞の中央と左右に固定設置 したピトー管に挟まれるよう設置した。風洞外には Vaisala 社の微差圧計(PDT101)を設置、差圧計 の片方の計測部に多孔ピトー型プローブ、もう片方にはピトー管の静圧孔をブレードホースで接続した。 実験ではピトー管の静圧孔内を風洞内の静圧(基準圧)とし、風洞内で風を起こすことで生じる動圧を 除去した多孔ピトー型プローブ内の圧力値との差を差圧計で計測し、多孔ピトー型プローブによる動圧 の除去程度を把握した。実験の手順は昨年度と同様、またピトー管の器差、また設置位置を変えること よって実験結果に影響が出ないことも確認している。





図1 多孔ピトー型プローブの外観(左)と球に設けられた静圧孔の様子(右)



図2 多孔ピトー型とピトー型の両プローブの風洞内での設置の様子

3. 実験結果

図3は球の直径が25mm(図左)および20mm(図右)の多孔ピトー型プローブを水平風向に対して 正対させた時のプローブの姿勢を0度とし、鉛直上向きに+45度(図上)もしくは鉛直下向きに-45度 (図下)まで5度間隔で変えながら、角度毎に風速を0m/sから25m/sまで5m/s間隔で変えた時の ピトー管(Pref)に対する多孔ピトー型プローブ(Pmes)の静圧孔内の圧力値の差を風速の関数として 示したものである。本実験においても一昨年度の円盤型と同様に、球の直径に関わらず多孔ピトー型も 鉛直姿勢に対し風速を変数とする2次関数的な依存性を示した。また直径25mmと20mmのプローブ ともに30度程度まではピトー管の測定値より大きな圧力値を示す結果となり、さらに25度程度までは 風速が25m/sにおいても計測差は10Pa以内に一致した。注射針型については15度までが一致したの に対し、多孔ピトー型はより広範囲の鉛直姿勢に対して一致する結果となった。また鉛直姿勢が25度 を超えてから注射針型と同じく角度毎に異なる風速依存性を示したものの、注射針型とは異なり風速を 関数とする2次関数的な依存性を示し、この結果は円盤型と同様であった。一方で、円盤型プローブは 水平方向の姿勢に関して、角度が大きくなるにつれ風速依存性が収束していたが、多孔ピトー型は鉛直 方向の姿勢に同じ風速依存性を示し、多孔ピトー型は風を受ける面に対して静圧孔の位置が水平・鉛直 に姿勢角を変えても角度に対して一致するためであると考えられる。



図3 球の直径が25mm(左)と20mm(右)の多孔ピトー型プローブの風速と風向に対する依存性

4. 研究成果報告

杣谷啓,近藤文義,内田孝紀:大気圧観測プローブの計測確度に対する風速・風向の影響,日本設計工学会東海支部令和2年度研究発表講演会,2021年3月

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)

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 研究背景

持続可能な社会の実現・地方創生という観点から,洋上風力発電や波力発電が期待されており,波-構造物相互作用や波-浮体相互作用の数値解析の要請が増えている. 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.

境界要素法の支配方程式は境界積分方程式であり、ポテンシャル理論の場合、3次元の計算領域は、計 算領域の表面2次元の問題になる. 解くべき連立1次方程式の数を格段に減り効率的だが、一方で、境 界積分方程式の離散化に膨大な計算時間を要することがボトルネックであった. しかし、最近では並列 計算 (Dombre et al., 2019) や高速多重極展開法 (Fochesato and Dias, 2006) によって離散化を高速化で きるようになり、BEM の有用性が高まっている. また、計算機演算速度が向上し、さらに海洋構造物 が複雑化したことに伴い、構造格子よりも三角非構造格子が広く使われるようになってきている (Feng and Bai, 2017).

2 研究目的

三角非構造格子と BEM と MEL を使って,構造物上の自由表面が,次の時刻にどこに移動するかを 計算するプログラムを作成することは困難である.仮に,次の時刻における水粒子(格子点)の位置が 構造物上のある位置に決まったとしても,格子点同士を結ぶ線(水面と構造物の交線)を引く困難が次 に生じてしまう.そのため,複雑形状を有する構造物が水面を貫くような計算対象は,BEM において 扱われてこなかった.

本研究の目的は、任意形状の浮体の動揺解析が可能な境界要素解析プログラムを開発することである. その前段階として、まず上に挙げた問題を解決し、波-構造物相互作用解析が可能な境界要素解析プログ ラムを開発する.計算ステップ毎に拡張した水面と構造物の交線を計算し、格子を生成する境界要素解 析プログラムを開発する.高次の補間では非構造格子間の交線を計算することが難しいため、線形要素 を採用する.従って境界積分方程式は線形補間によって離散化する.しかし、パラメトリックな線形補間 の微分を使っては、速度ポテンシャルから流速を正確に計算できないので、流速の計算においては、ノ ンパラメトリックな放射関数基底補間を採用することにする.

3 計算方法

3.1 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,速度ポテンシャル ϕ に関するラプラス方程式とベルヌーイの式を解く:

$$\Delta \phi = 0,$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + gz + \frac{p - p_a}{\rho} = 0.$$
(1)

ただし、ラプラス方程式は、グリーンの定理 $\iiint_V (\phi \Delta G - G \Delta \phi) dV = \iint_S (\phi \nabla G - G \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} dS$ と合わせ、 $G = 1/||\mathbf{x} - \mathbf{a}||$ として、次の境界積分方程式で置き換える.

$$c\phi\left(\mathbf{a}\right) = \iint_{S} \left(\phi\nabla G - G\nabla\phi\right) \cdot \mathbf{n}dS.$$
(2)

滑らかな境界面では定数 *c* は *c* = −2π となる.境界面 *S* を,ディリクレ,ノイマンの境界条件別に分割 した後,それら各境界面をさらに細かく要素で分割する.要素とは,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で,(2)の境界積分方程式は,この補間を適用することで離散化できる(選 点法).

3.2 混合オイラー・ラグランジュ法

時間発展に関する常微分方程式は、流体粒子の位置と速度ポテンシャルに関するものである:

$$\frac{DX}{Dt} = \nabla\phi. \tag{3}$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla\phi \cdot \nabla\phi = \frac{1}{2} \left(\nabla\phi \cdot \nabla\phi\right) - g\zeta \quad \text{on surface} \tag{4}$$

ステップ毎に計算格子を生成すると,角点付近は歪な三角形が発生し得る.速度ポテンシャルのパラメ トリックな線形補間の微分を流速とすると,歪な三角形の悪影響が著しく現れる.一方,放射関数基底 補間はノンパラメトリック補間であるため,歪な三角格子の悪影響を抑えることができる.本計算にお いて放射関数基底には多重二乗を選んだ:

$$\phi(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i f(\|\mathbf{x} - \mathbf{a}_i\|), \quad f(r) = \left((\varepsilon r)^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}.$$
(5)

流速は多重二乗を使って次のように表される.

$$\nabla\phi\left(\mathbf{x}\right) = \varepsilon^{2} \sum_{i=0}^{N-1} w_{i} \frac{\mathbf{x} - \mathbf{a}_{i}}{f\left(r_{i}\right)}$$

$$\tag{6}$$

ここで*ε*は,スケールパラメタでサンプル点間隔の平均の逆数とした.パラメトリック補間と比べて,ノンパラメトリック補間は計算コストが高くなる可能性があり,補間に用いるサンプル点数を少なく抑える必要がある.三角非構造格子のデータ構造を利用すれば,補間したい位置の周辺にあるサンプル点を効率的に取得することができるため,計算コストは抑えることができる.

3.3 計算格子生成方法

従来の方法では,以下の理由から,水面を直線的に貫かない物体と波との相互作用を計算することは 困難である.

- 物体表面上を這うように角点を時間発展させることが困難
- うまく這わせることができたとしても、角点同士を繋ぐ線を適切に決定することが困難

解決策として考えられる方法は、水面を実際よりも広く設定し、構造物との交点及び交線を時間ステッ プ毎に計算する方法である.ステップ毎に角点(交点)の位置を計算し計算格子を生成するので、角点 はディリクレ境界上にあるにも関わらず時間発展させることができない.しかし、角点はノイマン境界 条件でもあるので、φ_n は既知であり、角点は時間発展させる必要はないのである.

計算格子は複雑な形状となるため、三角非構造格子を採用した.三角非構造格子には、構成要素であ る点・辺・面が互いに参照できるようなデータ構造を持たせた.このデータ構造を利用することで、境 界面間の交点及び交線が計算できれば、計算格子を生成できる(図1).

4 結果

4.1 円筒水槽中の波の伝播シミュレーション例

シンプルな境界条件として円筒水槽中の波の伝播シミュレーションを行なった.中央の波は sech²型 の波形で,振幅 0.5 に対し水深は 1.5 である.この境界条件は,従来の BEM と MEL でも計算が可能で ある.要素数が少ない場合,線形補間の微分を使って流速を計算すると時間発展とともに波形が不自然 に崩れてしまう.しかし,図 2 に示すように,本研究では,ノンパラメトリックな放射基底関数補間を 使うことで,少ない要素数でも波形は崩れることなく計算されている.



図 1: 三角非構造格子のデータ構造を利用した計算面の取得経路



図 2: 円筒水槽中の波の伝播シミュレーション

4.2 複雑形状水槽中の波の伝播シミュレーション例

次に、図3に示す複雑形状水槽中の波の伝播シミュレーションを図4に示す.



図 4: 複雑形状水槽中の波の伝播シミュレーション物

5 まとめ

従来の BEM と MEL では対象とできなかった,球体構造物を対象とした波-構造物相互作用解析を行うことに成功した.計算が長時間に及ぶと,計算格子間隔の均一性が徐々に崩れ,それに伴い水面が不自然な形状となってしまう問題が未だ残っているものの,これは従来の BEM と MEL においても生じる問題であり,計算格子の再配置を時間ステップ毎に行うことで解消できると考えられる.次の段階として,本解析手法を浮体動揺解析へと拡張する予定である.

6 成果報告

なし

参考文献

Dombre, E., J. C. Harris, M. Benoit, D. Violeau, and C. Peyrard, 2019: A 3D parallel boundary element method on unstructured triangular grids for fully nonlinear wave-body interactions. *Ocean Engineering*, **171**(September 2018), 505–518.

Feng, X. and W. Bai, 2017: Hydrodynamic analysis of marine multibody systems by a nonlinear coupled model. *Journal of Fluids and Structures*, **70**, 72–101.

Fochesato, C. and F. Dias, 2006: A fast method for nonlinear three-dimensional free-surface waves. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **462**(2073), 2715–2735.

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

<u>1. 序論</u>

β型酸化ガリウム(β-Ga₂O₃)は 4.8 eV のワイドバン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、実用化に向け研究が進んでいる。しかし同一ウエファー上でもデバイス が逆方向でリーク電流や低い破壊電圧を示し、その起因となる結晶欠陥、いわゆるキラー欠陥を 明らかにする必要がある。我々は超高感度エミッション顕微鏡で逆方向リーク電流に関与したシ ョットキーバリアダイオード(SBD)からのエミッション発光を捉え、走査型電子顕微鏡により その起因となる欠陥構造を同定した。

<u>2. 実験方法</u>

用いたのは EFG 成長 (001) β -Ga₂O₃基板上に直接作製した n 型 β -Ga₂O₃縦型 SBD と基板上に HVPE 成長したエピ層(膜厚約 10µm)に作製した n 型 β -Ga₂O₃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エファー中央部のみ 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。

エミッション顕微鏡観察後は SB 電極のみをエッチングし、β型 Ga₂O₃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。用いたのは EFG 成長 n 型(001) β型 Ga₂O₃基板の縦型 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 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動作中の SBD を観察した。エミッション顕微鏡観察後は SB 電極のみをエッチングし(基板結晶をエッチングせ ずに)、β型 Ga₂O₃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)基板に作製された SBD では、図1に示すように、逆バイアス-60 V、リーク電流 -2.06mA で動作時にリーク電流による発光がエミッション顕微鏡により観察された。図から7つ のエミッションパターンが観察されるが、#2~7 では[010]方向に延びるパターンが観察された。つ ぎに#7 のエミッションパターンの箇所を AFM 観察したところ、図2のような幅 300nm、深さ 83nm、 角度 75°の断面形状をもった[010]方向に延びる溝形状のピットが観察された。この SBD の#7 付近 の電界強度分布をシミュレーション計算したところ、9MV/cm の電界が溝の底で集中していること がわかった。これは完全に平坦な表面の場合の3倍に相当することがわかった。

つぎに HVPE 成長(001) β-Ga₂O₃ SBD について調べた。図3(a)の SBD #D0505 (500µm 径)の逆方 向電流電圧特性が示すように-150V で 10µAcm⁻²のリーク電流が観察された。またその SBD のシン クロトロン X 線トポグラフィー像 [図3(b)] から、約 2.5x10⁵ cm⁻²の密度で微粒子の歪によると思 われるコントラストが観察された。さらにその断面 TEM 観察を行ったところ(図3(c))に示すよう にエピ層中で表面まで続く積層欠陥が観察された。リーク電流はこの積層欠陥を介して流れていた ことがわかった。

<u>4. 結論</u>

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、EFG 基板結晶のボイド欠陥 および HVPE エピ膜中の積層欠陥とわかった。

<u>発表、論文リスト</u>

- [1] S. Sdoeung , K. Sasaki , K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata , T. Oishi , and M. Kasu, Appl. Phys. Lett. 117, 022106 (2020).
- [2] S. Sdoeung, K. Sasaki, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata, and M. Kasu, Applied Physics Express 14, 036502 (2021).

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)



Fig. 3. HVPE 成長(001)β-Ga₂O₃SBD の(a)逆方向 I-V 特性、(b) X線トポ像, (c) 断面 TEM 像。HVPE

風車後流の可視化に係る基礎研究(2020 ME-6)

弘前大学 本田明弘

<u>要旨</u>昨年度は風洞内における風車後流の流れを PIV を用いて流速分布を得る事が出来、実機での計測にも適用できる目途を得た。本年度は、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 PIV で評価が可能な風車後流の可視化方法を模索する事。

実験方法

昨年度の実験方法と下表に比較して示す。

区分	項目	2019 年度	2020 年度		2014-2018 年 (ミネソタ大)
風		大型風洞	温度成層風洞	屋外	屋外
	風速	1m/s	1m/s	ほぼ無風	5-13m/s
	ロータ直径	500mm	442mm		96m
風車	回転数	140rpm	184rpm		
	備考				2.5MWClipper
トレーサ		スモークワイヤ (ロータ下流)	スモークワイヤ (ロータ上流)	中国	市
光源		スライト・プ ロシ・ェクター にスリット板	レーザ -ライトシート カトウ光研社製 G4000-NB	LED サーチライト	サーチライト
	カメラ	フォトロン社製 Nova-S12	7ォトロン社製 FASTCAM Mini WX100	iphone-x	Sony-A7RII camera coupled with a 50 mm f/1.2 lens
	速度	250fps (0.004 秒)	125fps (0.008 秒)	30fps (0.033 秒)	30-120fps
	画素数		117万	1,200 万	約 4,240 万
撮影画像	画像				

表1 実験条件の比較

実験結果

(1) 温度成層風洞における可視化実験

今回は、ロータの上流側に設置したスモー クワイヤから発生したトレーサに、レーザー ライトシートを用いた面状の光源を照射する 形での可視化を実施した。

その結果得られる流跡線は図1に示すよう にトレーサのない領域では情報が得られず、 PIV の対象領域からは除外した。

さらにナセル及びタワーの部分に関しても 解析領域からはマスキングして除外した。

なおこの時の画像解像度は 1,080×1,080 ピ クセルである。

PIV は PIVlab 2.38 を用いて画像のプレ処理 は CLAHE(Contrast-limited adaptive histogram equalization)を、アルゴリズムは FFT を選択し、相関範囲を 64 ピクセルとして 得られた流速ベクトルを図 2 に示す。

可視化された流跡線ではトレーサが拡散して 識別しにくい風車後流の下流側においても、比 較的明確なベクトルが得られていることが判 る。

さらに解析領域における瞬間の軸流速および 渦度の分布を表したものが図3である。



図1.瞬間の可視化された流跡線



図2.瞬間流速ベクトル

これにより、ロータの外縁部で軸流速が増加し、ロータ内側さらにナセルの後流では軸流速が減少し ており、下流側になるに従い流速が回復している様子が判る。さらに渦度分布ではナセル上面および ロータ上端からは負の渦、ナセル下面およびロータ下端からは負の渦が放出されている。



図3.瞬間の軸流速分布(左)および渦度分布(右)



この結果から、流れ方向に1.8、2.9D位置における流れの鉛直プロファイルをを図4,5に示す。





図5. X=2.9D における流れの鉛直プロファイル(左:軸流速、右:軸流および鉛直方向標準偏差) (2)屋外での降雪を用いた PIV

トレーサとして実際の雪を用いたときの課題を把握するために、降雪時における屋外で上空にサーチライ トを照射して映像を保存、PIVlab にて評価を試みた。 ほぼ無風であり、建屋の軒下から撮影したため に、トレーサの方向は不規則に変動していたが、時間平均の速度ベクトルおよび風速の分布を下図に 示す。これより、光源が届く範囲においては雪による可視化結果から PIV 処理して流速分布を求める ことは可能であり、その際のカメラとしては必ずしも高速度は必要なく、30fps 程度で評価可能と考え られる。



図 6. 時間平均ベクトル(左)と風速の分布(右)

(3) 風車の後流における降雪を用いた PIV

ミネソタ大において撮影された 2.5MW 風車の後流に地上からサーチライトを照射して風車近傍の流 れを可視化した結果¹¹から、PIVlab を用いて時間平均の流速ベクトルと風速分布を求めたものが図5 である。この時の流速はロータ下端と地面との間で黄色の 4m/s 以上を示していることが判る。



図7 時間平均ベクトル(左)と風速の分布(右)

考察

本年度得られた結果を、図6に示す昨年度の結果を比較した場合、以下の特徴が認められる。

- シードを発生させるスモークワイヤをロータの上流側に設置し、発生点も疎であるためにロータ 後流よりもナセル後流に多くのシードが拡散した。そのために PIV 処理できる高さ方向の範囲 が狭くなった。しかしながら、降雪による可視化を考えれば問題はない。
- ② 光源としてレーザーライトシートを用いたことによりシードの輝度は安定した特性を示し、ロー タ下流での流速分布も安定した。



図8 2019年度実験の時間平均 PIV 処理結果(左:流速ベクトル、右:流速絶対値)

更に、実機風車への適用を想定すると、実機の回転数は 10rpm 程度であり、30fps 程度の通常のカ メラ撮影で可能と考えられる。ただし、撮影範囲が広くなるために複数台のカメラや広角レンズ及び PIV 処理での歪み補正は必要となると考えられる。

参考文献

1] Jiarong Hong, et.al., 'Natural snowfall reveals large-scale flow structures in the wake of a 2.5-MW wind turbine', NATURE COMMUNICATIONS, DOI: 10.1038, 2014

成果報告

今後発表予定(現時点では未)

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に関する研究を行っている.発 電適地を選定するために開発した高分解能潮流数値モデル を用いて,海水密度を一定とした場合,長島海峡では鳴瀬鼻 沖地点で最大潮流パワーポテンシャル 2.0 kW/m²,黒之瀬戸 では梶折鼻沖地点で最大潮流パワーポテンシャル 6.0 kW/m²が発生していることを明らかにした(堀田他, 2016 年).2017年度の共同研究からは,密度成層を考慮した数値 モデルの開発を行い,長島海峡の鳴瀬鼻沖地点では潮流パワ

ーポテンシャルが2月に2.3 kW/m²,7月に1.8 kW/m²,黒之瀬戸の梶折 鼻沖地点では2月に6.7 kW/m²,7月に5.9 kW/m²になることを示し,長 島海峡,黒之瀬戸ともに潮流パワーポテンシャルは成層期7月の方が混合 期2月より小さく,およそ1~2割減少することを明らかにした(濱添他, 2019年).本研究では,長島海峡/鳴瀬鼻沖地点,黒之瀬戸/梶折鼻沖地 点に潮流発電装置を設置した場合に抽出できるエネルギー量を算定した.

2. 数值計算

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5km,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,JAMSTECと気象庁が共同提供 する FORA-WNP30の水温,塩分の計算値を入手し,これを数値計算の境界条件,初期条件として与えた. 八代海と有明海の内湾については,熊本県水産研究センターの浅海定線調査,内湾調査で得られた水温,塩 分実測値を初期条件として与えた.海面熱収支は東海大学のJ-OFURO3を利用することにした.

3. 長島海峡周辺海域において抽出可能なエネルギーポテンシャルの算定

2019 年度の共同研究により、潮流発電の適地は長島海峡で鳴瀬鼻沖 St.1,黒之瀬戸で梶折鼻沖 St.2 にあることが分かった(図・3).そこで、これらの地点に直径 18m のブレードを有する発電装置を1台設置した場合に抽出可能なエネルギー(E)を下式から求めた.

$$E = \frac{1}{2}\rho c_e A_b u^3$$



図-1 長島周辺海域



図-2 計算領域

ここで, ρ は海水密度,u は絶対流速である. c_e はタービン効率係数で,0.33 とした. A_b は 直径 18m のブレードの面積(254 m²)である.

抽出可能な月別の日平均潮流エネルギーを 表-1 に示す.長島海峡の鳴瀬鼻沖 St.1 では, 日平均潮流エネルギーが 3.7~4.6 MWh の範 囲を変動し,2月に最大値,7月に最小値が出 現している.7月のエネルギー減少は,海水の 密度成層を弱めるために,潮汐エネルギーの一 部が消費されたと推察される.しかし,8~10 月のエネルギーが 6~7月程に減少しない理由 はよく分かっていない.黒之瀬戸の梶折鼻沖 St.2 では,日平均潮流エネルギーが 11.9~13.5 MWh の範囲を変動し,2月に最大値,7月に 最小値が出現することは長島海峡の鳴瀬鼻沖 St.1 と共通した特徴である.また,8~10月の エネルギーが 6~7月程に減少しないことも同 じである.

日平均潮流エネルギーの変動幅については 黒之瀬戸の方が長島海峡よりも大きいが、2月 のエネルギーに対する 7 月の減少率について は、長島海峡が 19.6%、黒之瀬戸が 11.9%であ り、長島海峡の方が黒之瀬戸よりも大きい.こ の理由として、長島海峡は黒之瀬戸と比べて、 海峡の幅が広く、水深が深いために、成層構造 の緩和に消耗するエネルギーを多く必要とす ることが挙げられるかもしれない.



図-3 海面に年間平均絶対流速の水平分布 (濱添他(2019年)から)

表-1	長島海峡 St.1,	黒之瀬戸 St	.2 における
	抽出可能な月平均	タエネルギー	(MWh)

月	St.1	St.2
1	4.0 (306)	12.3 (994)
2	4.6 (354)	13.5 (1041)
3	4.4 (339)	13.0 (1001)
4	4.4 (339)	13.0 (1004)
5	4.0 (304)	13.0 (998)
6	3.9 (301)	12.8 (986)
7	3.7 (287)	11.9 (918)
8	4.2 (321)	13.4 (1028)
9	4.3 (334)	13.2 (1016)
10	4.1 (314)	13.2 (1015)
11	3.8 (290)	12.0 (920)
12	3.8 (294)	12.0 (922)
平均	4.1 (314)	12.8 (984)

*括弧内の数字は、一般家庭の1日の消費電力を13kWh とした場合に電力を賄える世帯数を示している.

St.1, St.2 ともに抽出可能なエネルギーは冬の方が夏より大きい傾向にある. 年平均すると,抽出可能な エネルギーは長島海峡の発電適地で 4.1 MWh (314 世帯分),黒之瀬戸で 12.8 MWh (984 世帯分) である.

4. まとめ

長島海峡,黒之瀬戸において密度成層を考慮した潮流の数値計算を実施し,潮流発電の適地において 抽出可能なエネルギーポテンシャルを算定した.年平均すると,抽出可能なエネルギーは長島海峡で4.1 MWh (314 世帯分),黒之瀬戸で12.8 MWh (984 世帯分)あることが分かった.

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、ナカボーテック(株)/濱添洸也

九州大学/胡 長洪

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. Introduction

Traditional diagnosis criterion of osteoporosis is mainly based on Bone Mineral Density (BMD). Generally, there are two approaches to indicate one's BMD: areal BMD (aBMD) measured by DEXA and volumetric BMD (vBMD) calculated from QCT. The aBMD is a readily available indicator of global bone mass (total bone mineral content) of a specific site. Further, a percentage of one's aBMD of five lumbers divided by average of young lumbers aBMD derives a value called Young Adult Mean (YAM). YAM quantify the osteoporosis as YAM < 70% [1]. However, single YAM method ignores the strength of vertebra itself, another dimension of osteoporosis. So far, assessment of vertebral strength can be achieved by CT-image based FEA well [2]. However, the assessment of vertebral strength via FEA is a very time-consuming processing, and requires good understanding on mechanics. This research aims to (1) develop a two-dimensional criterion to diagnose osteoporosis combining YAM and BS, and (2) discover factors of vBMD inhomogeneities that correlate with BS strongly.

2. Method

Department of neurosurgery, Inazawa Community Hospital supplied CT images of 88 patients (23 males, 65 females), aged from 42 to 96. YAM ranged from 32 to 142. After eliminating vertebrae with surgical treatment or fractures, total 247 vertebrae was analyzed, including 19 vertebrae of T11, 47 of T12, 51 of L1, 71 of L2 and 59 of L3. Then, a generic CT-based FEA software, Mechanical Finder Clinic (MFC, RCCM), was used to

extract Region of Interest (ROI) of vertebral bodies without pedicle and generate mesh. The vBMD of elements was transferred from grey degree of voxels. Material properties was determined automatically by vBMD [3]. The load of axial compression was applied by MFC automatically, see Fig. 1. The vertebral BS was defined as the load when any element of vertebral body started to generate damage.

Mechanical Finder (RCCM) was used to study the further vBMD distribution. MFC is a simplified version of MF. It cannot obtain vBMD distribution and specification of vertebral body. There were 26 vertebrae selected to create a more complex three-dimensional finite element model of vertebral body in MF. Mesh size and shape was determined as 1 mm and



Fig. 1 load and constraint conditions



Fig. 2 The definition of Trabecular area for vertebrae.

tetrahedron. The methodology of material property arrangement was same as MFC. Then, the capture tools in MF helped to calculate the average vBMD of cross-sections in transverse plane of vertebrae 1 mm by 1mm from upper to bottom surface along axial direction. Then, an axial vBMD distribution curve obtained. The trabecular area was considered by an area between local maximum values nearest to central position for upper limit and the lowest value in the curve for lower limit, as showed in Fig. 2. Trabecular vBMD (Tr.vBMD) was calculated by the average vBMD value in this trabecular area.

The critical YAM is 70% for diagnosing osteoporosis [1], and the critical BS was assumed as 2500 N. Therefore, two osteoporosis indicators such as the strength based OPI_{BS} and the YAM based OPI_{YAM} are defined by Equations 1 and 2, respectively.

$$OPI_{BS} = \frac{BS}{2500} \qquad OPI_{YAM} = \frac{YAM}{70}$$
(1)

Furthermore, the Tr.vBMD based indicator OPI_{Tr.vBMD} is also defined by:

$$OPI_{Tr.vBMD} = \frac{Tr.vBM}{0.12} \tag{3}$$

where 0.12 is an osteoporotic Tr.vBMD value suggested by American College of Radiology [6].

3. Result and Discussion

To study the effect of vBMD inhomogeneities on BS, the relationship between OPI_{BS} and OPI_{YAM} (see Fig.3 in the 2019 report) can be divided into 4 groups: Group A (Both OPI_{YAM} and $OPI_{BS} >1$), B ($OPI_{YAM} >1$, $OPI_{BS} <1$), C ($OPI_{YAM} <1$, $OPI_{BS} >1$) and D (both OPI_{YAM} and $OPI_{BS} <1$). The 26 vertebrae selected for the vBMD measurement in MF were evenly distributed in 4 groups, see Fig.3(a). Then, $OPI_{BS}-OPI_{YAM}$ relations corresponding to the 4 groups were redrawn in Figure 3 (a). The $OPI_{BS}-OPI_{Tr.vBMD}$ relations for the 4 groups are also shown in Fig.3(b). Based on



OPI_{Tr.vBMD} and OPI_{BS}, the new two-dimensional diagnosis method revealed a considerable reduction on the ratio of vertebra in orange zone from 23% to 7.7%, see in Fig.3(b). The yellow area in Fig.3(b) cover more vertebrae with low strength than Fig.3(a). Tr.vBMD is more appropriate as a single indicator to diagnose osteoporosis.

On the other hand, the strength may change considerably due to the irregular geometry. The most common abnormality arises from Ligament Ossification (LO) and Spondylosis Deformans (SD), see in Fig.4(a) and (b). The existence of these abnormalities may introduce too variables for strength estimation from vBMD indicators. The orange points in Fig.4(c) displayed such deviation. Therefore, excluding abnormal vertebral bodies help to

understand the correlation between BS and vBMD inhomogeneities. The results that a significantly revealed linear correlation between BS and log scale of volume ratio of EL elements in vertebrae without LO and SD. Compared with FEA, the vBMD measurement in CT images could be more operative and accessible clinically. Hence, the logarithmic volume ratio of vertebral EL element show a great potential to estimate BS.



4. Conclusion

Fig. 4(a) vertebral body with LO and (b) SD. (c) The correlation between BS and log scale of volume ratio of vertebral ELD elements.

This research first developed a two-dimensional osteoporosis based on YAM and FEA-predicted BS. It helped to reduce the misdiagnosis rate that simply using YAM value failed to detect fracture risk. Then, the study revealed that Tr.vBMD is more mechanically correlated with BS than YAM. Tr.vBMD can diagnose osteoporosis better than YAM, if as a single indicator. The indicator to estimate BS directly also been studied. Logarithmic volume ratio of vertebral EL element shows a great potential. The further vBMD-related factors, such as spatial distribution, will be considered next. Following, the investigation will focus on quantifying the effect of geometric features on BS. If so, the strength of abnormal vertebrae with LO or SD can also be estimated accurately. The vertebral cases should also increase to verify the effectiveness further.

5. REFERENCES

- [1] Orimo H, Nakamura T, Hosoi T, Iki M, Uenishi K, Endo N, Ohta H, Shiraki M, Sugimoto T, Suzuki T. Japanese 2011 guidelines for prevention and treatment of osteoporosis—executive summary. Arch. Osteoporos. 7(2012)3-20.
- [2] Crawford RP, Cann CE, Keaveny TM. Finite element models predict in vitro vertebral body compressive strength better than quantitative computed tomography. Bone. 33(2003)744-750.
- [3] Keyak JH, Rossi SA, Jones KA, Skinner HB. Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling. J Biomech. 31(1998)125-33.
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.したがって、骨折危険性を評 価することが重要であり、臨床的には骨密度を測定し「低骨密度は低骨強度に対応する」という仮 定のもとで診断を行うが、骨強度は骨の形状や構造が強く影響するために、単純に骨密度のみで正 確な評価を行うことは難しい.また、高齢女性者の場合、骨粗鬆症に加えて変形性股関節症 (OA) を発症している場合もあるため、OA による大腿骨の変形も骨強度に影響を及ぼすことが十分考え られる.そこで本研究では、産業医科大学病院より OA 患者の下肢 CT データを提供してもらい、 正常な大腿骨と OA 大腿骨の 3D モデルを作成し、大腿骨の骨折解析を試みた.また、骨頭と頚部 を含む大腿骨近位部の平均的骨密度を求め、骨密度と強度の関係を調査した.

2. モデル作成と解析方法

産業医科大学病院から CT 画像データとして提供を受けた大腿骨は,男性正常2股,OA1股,女性正常16股,OA17股である.CT 画像から骨解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて3次元 大腿骨モデルを作成した.作成した3D 大腿骨モデルを図1に示す.大腿骨の骨密度はHU 値から 推定し,ヤング率と圧縮降伏応力はKeyak[1]の予測式を用いて算出した.ヤング率の分布状態の例 を図2に示す.要素分割には四面体要素を用い,メッシュサイズは最小1mm,最大2mmとし,シ ェルの厚さは0.3mmとした.境界条件は図2に示すように大腿骨遠位端から小転子頂点下25mm までの範囲を完全拘束,骨頭の負荷範囲は,骨頭中心を頂点とする頂角90度の円錐の範囲に含ま れる骨頭表面の節点約500点に最大10kNの圧縮荷重を加えた.骨の力学特性としては,引張状態 では線形弾性,圧縮状態では弾塑性を仮定した.さらに,引張応力下での破壊条件として最大主応 力を用い,圧縮下では,塑性変形開始後,最小主ひずみ-10000µcを破壊条件として用いた.本研究 ではシェル要素の圧縮破壊か引張破壊どちらかの個数が15個に達すると大腿骨が骨折したと定義 した.このときの荷重をその大腿骨の骨折強度と定めこれを求めた.また壊死による変形と骨密度 が強度に及ぼす影響を調べるため,骨頭と頚部の平均骨密度も求めた.

3. 結果と考察

解析によって得られた骨折強度と骨密度(BMD)の関係を図3に示す.平均骨密度の増加ととも に強度は増加する傾向にあり,両者には正の相関があることが理解できる.しかし,データには大 きなばらつきが存在し,BMD のみでは骨折危険性を正確には判定できないことが分かる.臨床で は骨密度に基づく YAM 等の指標を用いて診察が行われるが,必ずしも高骨密度であれば骨折の危 険性が低いということではないことが示唆される.図3では青いマークが正常大腿骨,赤いマーク がOA 大腿骨をそれぞれ示しており,正常大腿骨の強度とBMDの相関係数は0.73であり,比較的 強い正の相関が存在した.一方,OA 大腿骨の場合は,強度とBMD の間の相関係数は0.42であり, 正の相関は存在するが正常大腿骨ほどは強くはない.このことは変形性股関節症が大腿骨強度に大 きな影響を及ぼしていることを示唆している.

ひとつの正常モデルにおける破壊要素の分布状態を図4に示す.破壊要素は頚部に集中しており, 頚部骨折の発生を示す結果となった.

4. まとめ

本研究では、変形性股関節症を有する大腿骨と正常大腿骨の比較検討を行った.正常大腿骨の強度は骨密度と強い正の相関を示したが、OA 大腿骨と骨密度の相関は弱い正の相関であった.このように OA 大腿骨では、変形した骨頭や頚部が強度に大きな影響を及ぼすと考えられる.



文 献

(1) Keyak. J.H., Stephen A. Rossi., Kimberly A. Jones., Harry B. Skinner., "Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling", *Journal of Biomechanics*, Vol. 31 (1998), pp. 125-133.

患者 CT データを用いた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植立角度ならびに矯正力の強さと応力分布の関係

九州大学大学院歯学研究院 高橋一郎

【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 るより、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 機械的パラメータを検索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 30 本(成功 26 本、脱落 4 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。

【結果および考察】

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。2 群間の相当応力には顕著な 差異は認められなかった。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)。



【今後の展望】

スクリューの一次安定性と埋入部位の 皮質骨の厚さとの間には正の関連がある

図 3

ものの、臨床試験数が不足している状況であり、実際の臨床現場で起こるスクリューの成功また は失敗を決める要因は未だ明確ではない。したがって、今後も症例数の増加が必要である。また 、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。そこで、主ひずみの増加に関与する臨床的リスク要因を特定する ことを考えた。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】

下顎骨に植立されたスクリュー表面から 0.5~1.0 mm の範囲の主ひずみの増加に関与する臨 床的リスク要因の特定を目的とする。また、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。

【今後の研究方法・研究内容】

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 クリュー表面から 0.5~1.0 mm の範囲の主ひずみの増加に関与する臨床的リスク要因の検索を 行う。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。

骨密度分布を利用した骨の力学特性予測法の構築

千葉大学大学院医学研究院 松浦 佑介

1. 緒 言

CT 画像を利用して患者ごとに骨の3次元数値モデルを作成し、有限要素法(FEM)を用いて応 力解析を行うことで骨の力学的特性を評価する CT-FEM が整形外科を中心に広く用いられるよう になってきている。また以前は実際の複雑な骨の力学的特性分布に反して、単純化されたモデル化 (たとえば皮質骨と海綿骨の2層構造体)が行われていたが、CT 値から骨密度値を予測し、さら に骨密度から弾性率を推定する方法が確立され、患者ごとの骨密度分布を考慮した数値解析が行わ れている。しかし、最近、千葉大学整形外科の研究グループにより、主に欧米諸国で確立された骨 密度と弾性率および降伏強度を関係づける実験式が、日本人の骨には適合しないことが明らかにな った。そこで本研究では、より日本人の骨に適合した力学特性予測式を提案することを目的とした。 千葉大学で実施されたご検体から摘出した大腿骨の力学試験結果(荷重-変位曲線)を、我々が提案 した新しい弾性率予測式を用いた CT-FEM による解析結果と比較し、その有効性について検討を 行った。

2. 献体実験の結果と従来法との比較

4名のご検体から大腿骨を摘出し、下部を固定し骨頭部の上方から負荷をかけて力学試験を行い 荷重一変位関係を記録した。図1に示した緑色の曲線が実験から得られた荷重一変位曲線である。 力学試験前に各大腿骨のCT画像を撮影し、Mechanical Finder を用いてCT画像から3D数値モデ ルを作成した。この時、各画像のCT値の分布状態(画像上はグレースケールとして表わされる) から骨密度分布を推定した。また、1990年代にKeyakやKellerにより骨片を用いた実験から導き 出された弾性率や降伏応力等の材料定数を骨密度から予測する式を用いて弾性率分布を求めた。次 いで、強度試験を模擬した境界条件を設定し、強制変位を与ええて数値実験を行い、荷重一変位関 係を取得した。得られた結果を図1に示す。一般的に広く利用されているKeyakの式では剛性(荷 重-変位曲線の傾き)が非常に高くなり、実験とは大きく異なった結果になっていることがわかる。 一方、椎体に対して提案されたKellerの式の方が、より実験値に近い剛性を示しているが、しかし 実験値よりも高い値を示している。また、強度(最大荷重)については、Kellerの方がKeyakより 高い値を示す結果となった。

3. 弾性率予測式の提案と解析結果

献体実験で用いた二つの大腿骨の有限要素モデルにおける骨密度分布を比較したところ、明らか に異なる骨密度分布を示していた。低骨密度の要素数で比較すると、要素数が少ないモデルの方が 高剛性を示し、強度においては低骨密度の要素数が多い方のモデルの3倍以上の高い強度を示して いた。また、共通の内容としては、低骨密度(特に 0.5 g/cm³以下)の要素数が多いことが明らか になった。以上の結果より、低骨密度領域が大腿骨の力学的特性に強い影響を及ぼすことが示唆さ れた。さらに、Keyak や Keller の式が剛性と強度の両方に対して実験値よりも高い解析結果を与え ることから、特に低骨密度領域の予測に対して過大評価の可能性があることが示唆された。

そこで、まずは剛性のみについて、より実験値に近づけることを検討した。骨密度範囲として 0.23g/cm³以下が特に強い影響を及ぼしていると仮定して、この部分に対して低下係数 K をかける ことで弾性率を低下させ、0.23g/cm³以上については、直線的に弾性率は変化し 0.4g/cm³以上では keller のオリジナルの式の結果に一致するように設定した。図2に K=0.25 とした Keller の修正式 を用いて解析した結果を示す。4つの結果ともに剛性は実験結果と良い一致を示している。

今回の研究成果より、大腿骨の剛性に関しては、我々が提案した Keller 修正式を用いることで 解析結果が実験結果に近づくことが明らかになった。しかし、強度(最大荷重)については未検 討であり、今後、強度を一致させるような解析条件を検討していく予定である。



図1実験結果と既存の実験式(Keyak & Keller)との比較



図2 実験結果と修正 Keller 式との比較

CT 画像を用いた有限要素法による大腿骨頚部骨折メカニズムの解明

九州大学・大学院医学研究院 中島康晴

1. はじめに

変形性股関節症(OA)は、股関節軟骨の変性・摩耗によって、大腿骨頭の変形や破壊、関節滑膜の炎症が生じ、疼痛や運動障害から ADL 障害をきたす股関節疾患である. OA は女性に多く 40 代、50 代で発症し、加齢にともない進行していく. 高齢の特に女性患者の場合、骨粗鬆症を併発する恐れがあり、骨粗鬆症による骨折の危険性が増大する. 正常な大腿骨と OA に罹患した大腿骨では、骨折のメカニズムが異なることが予想されるが、生体力学的観点での研究はほとんど行われていないのが現状である. そこで本研究では、九州大学病院と佐賀大学病院から提供して頂いた複数の OA 患者の CT データより大腿骨の数値モデルを作成し、損傷モデルを導入した有限要素法により骨折解析を試みた. 得られた結果を正常大腿骨の骨折形態と比較検討することで、大腿骨骨折に及ぼす OA の影響について調べることを目的とした.

2. モデル作成と解析方法

大腿骨の CT 画像から骨解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて 3 次元大腿骨モデルを作成 した. 九大病院の患者モデルを KU, 佐賀大学病院の患者モデルを SU と表記する. また, 正常大 腿骨を normal,変形性股関節症大腿骨を OA で示した. 正常モデルと OA モデルの例を図1に示す. 大腿骨の骨密度は HU 値から推定し,ヤング率と圧縮降伏応力は Keyak[1]の予測式を用いて算出し た. 要素は四面体要素を用い,メッシュサイズは最小 1mm,最大 2mm とし,シェルの厚さは 0.3mm とした. 境界条件は図2に示すように大腿骨遠位端から小転子頂点下 25mm までの範囲を完全拘 束,骨頭の負荷範囲は,骨頭中心を頂点とする頂角 90 度の円錐の範囲に含まれる骨頭表面の節点 約 500 点に最大 10kN の圧縮荷重を加えた. 骨の力学特性としては,引張状態では線形弾性,圧縮 状態では弾塑性を仮定した. さらに,引張応力下での破壊条件として最大主応力を用い,圧縮下で は,塑性変形開始後,最小主ひずみ-10000με を破壊条件として用いた.本研究ではシェル要素の圧 縮破壊か引張破壊どちらかの個数が 15 個に達すると大腿骨が骨折したと定義した. このときの荷 重をその大腿骨の骨折強度と定めこれを求めた.また壊死による変形と骨密度が強度に及ぼす影響 を調べるため,骨頭と頚部の平均骨密度も求めた.

3. 結果と考察

解析によって得られた骨折強度と骨密度(BMD)の関係を図3に示す.平均骨密度の増加ととも に強度は増加する傾向にあり、両者には正の相関があることが理解できる.しかし、データには大 きなばらつきが存在し、BMD のみでは骨折危険性を正確には判定できないことが分かる.臨床で は骨密度に基づく YAM 等の指標を用いて診察が行われるが、必ずしも高骨密度であれば骨折の危 険性が低いということではないことが示唆される.次に図3よりほぼ同等の BMD を有するが骨強 度が大きくことなる2つのモデル SUH12 (OA) と SUH16 (正常)について比較検討する.

SUH12 と SUH16 における破壊要素の累積状態を図4に示す.両大腿骨ともに荷重が増加すると 破壊要素は増加するが,その挙動は大きく異なる.強度が低い SUH12 では荷重が 1000N 程度で急 激に増大し,2000N に到達する前に大腿骨骨折が生じている.一方,SUH16 の方は,8000N 付近か ら徐々に破壊要素は増加し,最終的には 10000N 程度まで達している.骨折時の大腿骨表面におけ る破壊要素の分布状態を図5に示す.SUH12 では頚部に多くの破壊要素が分布しているが,SUH16 では頚部にわずかに分布しているのみである.要素の降伏強度は骨密度で決まり,破壊を規定する 最小主ひずみ(降伏変形後)は一定値で定義されるため,要素の破壊も骨密度に依存する.このこ とは SUH12 の頚部に多くの低骨密度領域が存在する,あるいは構造的に頚部に応力が集中しやす いことが示唆される.現時点ではその詳細なメカニズムは明らかになっていないが,骨頭と頚部の 平均的骨密度は SUH12 と SUH16 ではほぼ同じなため,その分布状態すなわち皮質骨と海綿骨で形 成された骨頭の構造に大きな差異があることが考えられる.

4. まとめ

本研究では、変形性股関節症を有する大腿骨と正常大腿骨の比較検討を行った.大腿骨強度は骨 密度と正の相関があるが、必ずしも強い相関ではなく大きなばらつきを示していた.同程度の平均 骨密度を有する OA モデルと正常モデルを比較したところ、OA モデルでは低荷重で急激に破壊要 素が増大し、結果として低強度を示した.この結果は、OA 大腿骨の強度は大きく低下する可能性 があることが示唆している.



図5 大腿骨頚部に生じた破壊要素分布状態

文 献

(1) Keyak. J.H., Stephen A. Rossi., Kimberly A. Jones., Harry B. Skinner., "Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling", *Journal of Biomechanics*, Vol. 31 (1998), pp. 125-133.

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.緒 言

特発性大腿骨頭壊死症は、大腿骨頭の組織の一部が血流の低下等により壊死する難病指定の病気である.壊死 部の存在は骨頭の形状と組織の力学的特性を変化させるため、大腿骨全体の力学的特性にも影響を及ぼすことが 懸念される[1].しかし、その詳細なメカニズムは明らかになっていない.そこで本研究では、複数の大腿骨頭壊 死症患者の CT データより大腿骨の数値モデルを作成し、損傷モデルを導入した有限要素法により骨折解析を試 みた.得られた結果を正常大腿骨の骨折形態と比較検討することで、大腿骨頭壊死症を有する大腿骨の骨折メカ ニズムについて明らかにすることを目的とした.

2. 3D モデル作成と解析方法

2・1 3D 解析モデルの作成と解析条件

献体4名の左右の大腿骨のCT 画像から骨解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて3次元大腿骨モデルを 作成した.以下7種類のモデルを、モデルA,B,C,D(左,右)と略記する.モデルDは左大腿骨のみである. モデルB(右)が正常大腿骨で,他は大腿骨骨頭壊死症を有している.大腿骨の骨密度はHU値から推定し,ヤ ング率と圧縮降伏応力はKeyak[2]の予測式を用いて算出した.要素は四面体要素を用い、メッシュサイズは最小 Imm,最大 2mmとし、シェルの厚さは0.3mmとした.骨軸は小転子を指定することで自動計算される、大腿骨 指定法を用いた.境界条件は、図1に示すように大腿骨遠位端から小転子頂点下 25mm までの範囲を完全拘束, 骨頭の負荷範囲は,骨頭中心を頂点とする頂角 90 度の円錐の範囲に含まれる骨頭表面の節点約 500 点に最大 10000Nの圧縮荷重を加えた.荷重方向は骨幹軸を骨頭中心に向けて20 度傾けたベクトルである.このときステ ップ数は10,サブステップ数は4とした.これにより1ステップあたり 250N の荷重が負荷される.骨の力学特 性としては,引張状態では線形弾性,圧縮状態では弾塑性を仮定した.さらに,引張応力下での破壊条件として 最大主応力を用い,圧縮下では,塑性変形開始後,最小主ひずみ-10000µcを破壊条件として用いた.本研究では シェル要素の圧縮破壊か引張破壊どちらかの個数が 15 個に達すると大腿骨が骨折したと定義した.このときの 荷重をその大腿骨の骨折強度と定めこれを求めた.また壊死による変形と骨密度が強度に及ぼす影響を調べるた め,骨頭と頚部の平均骨密度も求めた.

3. 結果と考察

解析によって得られた骨折強度,骨頭と頚部の平均骨密度,シェルとソリッドの破壊形態,ソリッド要素の破壊数を表1に示す.強度は正常大腿骨であるモデルB(右)の4875Nが最大,モデルC(左)が最小の1025Nとなった.しかし図2に示すように,モデルB(右)の骨頭と頚部の平均骨密度は高くなく,大腿骨において骨折強度と骨密度は必ずしも比例するものではないと思われる.

表1よりシェルの破壊形態は7つのモデルのうち5つが圧縮破壊を示しており、シェルにおいては圧縮破壊が 支配的であるといえる.正常大腿骨と壊死症の大腿骨を比較すると、特にソリッドの破壊形態、破壊箇所、破壊 個数で大きな違いが見られた.正常大腿骨ではソリッドの破壊形態は圧縮破壊のみであり、その破壊要素数が壊 死モデルに比べ多い.これは骨頭の形状が均一であるため引張破壊が生じにくく圧縮破壊が支配的であり、壊死 モデルより骨密度が小さいためソリッドの圧縮破壊要素数が多くなったと考えられる.

図3は壊死モデルの断面のヤング率分布である.シェルのヤング率が高くなっており,骨頭のヤング率に偏り があることがわかる.図4は正常大腿骨,図5は壊死大腿骨の荷重が5500Nのソリッド要素の破壊箇所を示し ている.正常大腿骨では骨頭に圧縮破壊が集中するのに対し,壊死モデルでは圧縮破壊と引張破壊が骨頭だけで なく頚部,転子部,転子下にも破壊が見られた.



図1 3D 解析モデル





図3 壊死モデルでの弾性率分布



図4 正常モデルにおける損傷要素分布状態



図5 壊死モデルにおける損傷要素分布状態

Model		Strength	Average bone density	Solid number of	Solid number of	Shell
		(N)	(g/cm ³)	compression fracture	tensile fracture	fracture
A	Left	2175	0.43	0	27	Tensile
	Right	2900	0.31	6	28	Compression
В	Left	3325	0.41	0	12	Compression
	Right	4875	0.29	55	0	Compression
С	Left	2575	0.34	0	30	Tensile
	Right	1025	0.30	13	12	Compression
D	Left	2575	0.28	0	17	Compression

4. まとめ

本研究では、大腿骨頭壊死症を有する大腿骨と正常大腿骨の比較検討を行い、正常大腿骨は骨折強度が非常に 高くなったことから、壊死症により骨頭が変形することで骨折強度が低下することが示された.骨折メカニズム は正常大腿骨ではソリッドの破壊箇所は骨頭に集中し圧縮破壊が支配的であるが、壊死大腿骨では骨頭だけでな く頚部等の部分も圧縮と引張破壊で破壊することが分かった.

参考文献

- Volokh K.Y, et al.: Prediction of Femoral Head Collapse in Osteonecrosis. Journal of Biomechanical Engineering 126:467-470, 2006.
- (2) Keyak. J.H., et al., "Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling", *Journal of Biomechanics*, Vol. 31 (1998), pp. 125-133.

変形性股関節症患者の大腿骨強度に関する研究

佐賀大学大学院医学研究科 馬渡 正明

1. はじめに

変形性股関節症(OA)は、股関節軟骨の変性・摩耗によって、大腿骨頭の変形や破壊、関節滑膜の炎症が生じ、疼痛や運動障害から ADL 障害をきたす股関節疾患である. OA は女性に多く 40 代、50 代で発症し、加齢にともない進行していく.高齢の特に女性患者の場合、骨粗鬆症を併発する恐れがあり、骨粗鬆症による骨折の危険性が増大する. OA の存在が大腿骨強度に影響を及ぼすことが考えられるが、骨の強度評価は高度に材料力学的および構造力学的な問題であり、OA と骨強度との関係についてはほとんど行われていないのが現状である.そこで本研究では、佐賀大学附属病院から提供して頂いた OA 患者の CT データより大腿骨の数値モデルを作成し、損傷モデルを導入した有限要素法により骨折解析を試みた.得られた結果を正常大腿骨の骨折形態と比較検討することで、大腿骨骨折に及ぼす OA の影響について調べることを目的とした.

2. モデル作成と解析方法

佐賀大学附属病院から CT 画像データとして提供を受けた大腿骨は,男性正常2股,女性正常9 股,OA22 股である. CT 画像から骨解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて3次元大腿骨モ デルを作成した.大腿骨の骨密度は HU 値から推定し,ヤング率と圧縮降伏応力は Keyak[1]の予測 式を用いて算出した.要素分割には四面体要素を用い,メッシュサイズは最小1mm,最大2mmと し,シェルの厚さは0.3mmとした. 境界条件として,大腿骨遠位端から小転子頂点下25mmまで の範囲を完全拘束,骨頭の負荷範囲は,骨頭中心を頂点とする頂角90度の円錐の範囲に含まれる 骨頭表面の節点約500点に最大10kNの圧縮荷重を加えた.骨の力学特性としては,引張状態では 線形弾性,圧縮状態では弾塑性を仮定した.さらに,引張応力下での破壊条件として最大主応力を 用い,圧縮下では,塑性変形開始後,最小主ひずみ-10000µεを破壊条件として用いた.本研究では シェル要素の圧縮破壊か引張破壊どちらかの個数が15個に達すると大腿骨が骨折したと定義した. このときの荷重をその大腿骨の骨折強度と定めこれを求めた.また壊死による変形と骨密度が強度 に及ぼす影響を調べるため,骨頭と頚部の平均骨密度も求めた.

3. 結果と考察

解析によって得られた正常大腿骨における相当応力分布とひずみエネルギー密度(SED)分布を 図1と図2にそれぞれ示す.皮質骨の内側に高い応力集中とSED集中が確認できる.また,この皮 質骨における応力・SED集中は,骨頭内部の応力・SED集中と大腿骨頚部のところで連結してお り,このような力学的集中部の存在が大腿骨頚部骨折と関係しているものと思われる.図3に頚部 における塑性変形した要素の分布状態を示す.この塑性要素の発生個所は,前述の応力・SED集中 の連結部と一致していることが分かる.

大腿骨強度と平均骨密度(BMD)との関係を示す.青いマークが正常大腿骨,赤いマークがOA 大腿骨を示しており,ともにBMDの増加とともに強度は増加する傾向にあり,両者には正の相関 があることが確認できる.正常大腿骨における強度とBMDの相関係数は0.9,OA 大腿骨における 相関係数は0.82であり,両者とも強い正の相関を示している.しかし,OA 大腿骨ではデータのば らつきが大きく広範囲な分布を示しており,必ずしもBMDの値で骨強度を評価できるとは言い難 い.これらの結果は,BMDのみでは骨折危険性を正確には判定できないことを示している.臨床 では骨密度に基づく YAM 等の指標を用いて診察が行われるが,必ずしも高骨密度であれば骨折の 危険性が低いということではないことが示唆される.

4. まとめ

本研究では、変形性股関節症を有する大腿骨と正常大腿骨の強度について比較検討を行った.正 常大腿骨の強度と骨密度,OA 大腿骨の強度と骨密度はともに強い正の相関を示したが、OA 大腿 骨のデータはばらつきが大きく、骨密度のみでは骨折危険性を評価することができないことを示す 結果となった.



Avg BMD (mg/mm³) 図4 大腿骨強度と骨密度の関係

文 献

(1) Keyak. J.H., Stephen A. Rossi., Kimberly A. Jones., Harry B. Skinner., "Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling", *Journal of Biomechanics*, Vol. 31 (1998), pp. 125-133.

1. Introduction

In the present work, therefore, beam shape specimens of porous HA/ biopolymer composite scaffolds were fabricated by using two different kinds of medical grade bioresorbable polymer, namely, poly(Lactide-co- ϵ -caprolactone) (PLCL) and poly(L-lactide) (PLLA) as the secondary polymer phase. The fundamental mechanical properties such as load-displacement and stress-strain relations, elastic modulus, stress at crack initiation, and fracture absorbed energy were evaluated under a three-bending condition. The porous microstructures and fracture micromechanisms were also examined by using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM).

2. Experimental

The fabrication method combining the template and freeze-drying methods was employed to construct twophase porous beams of HA/PLCL and HA/PLLA. Firstly, HA slurry was prepared by mixing 5g micro-HA powder (Sangi Co., Ltd) with 5wt% PVA (Wako Chemical Industries Ltd). Then, PU sponges (HR-30, Bridgestone Co., Ltd.) of 10mm x 10mm x 70mm dimension were immersed into the HA slurry and the excess slurry was removed by appying pressure. The HA coated PU sponges were dried for 48 hours at room temperature, and then sintered at 400°C for 6 hours and 1100°C for 4 hours in an electric oven to fabricate porous HA beam specimens. PLCL pellets (BMG Co., Ltd.) and PLLA pellets were separately dissolved into 1-4-dioxane solution to prepare 3wt% solutions. Both polymer solutions were stirred overnight at 80°C, with 320 rpm speed. The HA porous beams were then dipped into two different solutions separately and then vacuumed for 1 hour to remove air bubbles. After the prefrozen process at -80°C overnight in a freezer, the frozen beams underwent the freeze-drying process at -50°C for 24 hours in order to create the secondary porous polymer structure inside the continuous pores of the HA porous beams. The porous microstructures of the composite beams were observed and characterized using FE-SEM. Porosity and average pore sizes were also calculated using the FE-SEM micrographs with ImageJ Software.

Three-point bending tests of the composite beams were performed at a crosshead speed of 1mm/min using a compact testing machine with 10N load cell, and the time histrories of both load and cross-head displacement were recored to obtain the load-displacement curves. Two different kinds of fracture absorbed energy, G_{crack} and G_{tot} , were calculated from the area under the load-displacement curve. G_{crack} was defined to be the mechanical energy absorbed by the specimen up to the crack initiation point, while G_{tot} was defined as the total fracture absorbed energy up to the complete fracture. Linear stress-strain relations up to the fracture initiation were also calculated from the load-displacement relations using the classical beam theory. The elastic modulus of each specimen, E, was then obtained as the slope of the stress-strain curve. The critical stress at crack initiation, σ_{crit} , can also be estimated at the point of crack initiation.

3. Results and discussion

SEM micrographs of the surface regions are shown in Fig.1. It is clearly observed that those composite beams had two-phase porous structures; the HA porous structures formed through the sintering process (larger pores) and the honeycomb-like polymer porous structures created by the freeze-drying process (smaller pores). It was found that for both the beams, the porosity and average HA pore size were more than 80% and 400 μ m, which are thought to be sufficient for nutrients transport, tissue formation and vascularization. On the contrary, the average pore sizes of both the polymeric phases were smaller than 100 μ m, and the PLLA pores are smaller than the PLCL pores due to the higher molecular weight of PLLA. The size of HA pore is mainly owing to the pore size of PU sponge, while the pore sizes of polymer phases are related to the solid-liquid phase separation process during the freezing process of polymer solution.

All the mechanical properties are shown in Table 1. It is clearly seen that both *E* and σ_{crit} of HA/PLLA were much higher than those of HA/PLCL. This originated in the higher mechanical properties of PLLA phase than those of PLCL phase. It is noted here that PLCL is recognized as a copolymer of lactide and ε -caprolactone, and caprolactone molecular chains provide ductility to the copolymer, while PLLA molecular chains are brittle in nature [34]. On the contrary, *G_{crack}* and *G_{tot}* of HA/PLCL were much greater than those of HA/PLLA as a result of ductility of PLCL phase introduced by the caprolactone molecular chains.

The microscopic damage mechanism initiating the macroscopic cracking was characterized by the microcracking of HA struts as clearly shown in Fig.4(a). FE-SEM micrographs of fracture surfaces of the composite beams are also shown in Figs.4(b) and (c). HA/PLCL beam exhibited rougher surface with ductile deformation of PLCL phase than HA/PLLA in which PLLA phase showed relatively brittle fracture pattern. On the HA/PLCL fracture surface, pores of PLCL phase were almost disappeared due to ductile elongation and rupture of cell-wall structures of PLCL; on the contrary, many pores were still clearly seen on the HA/PLLA surface because of brittle fracture of PLLA cell-walls. It is thus characterized that during the crack growth process main microdamage mechanisms are the microcracking of HA struts and the deformation and rupture of polymer cell-walls. It is noted that the ductile deformation and rupture of PLCL cell-wall structures are likely to absorb greater energy than the brittle fracture of PLLA cell-wall structures, resulting in the higher fracture energy of HA/PLCL.

4. Conclusions

Two kinds of porous composite beams, namely HA/PLCL and HA/PLLA, were successfully fabricated, and their bending mechanical properties and fracture mechanisms were characterized. Both composite beams exhibited the linear elastic deformation at the beginning of load-displacement curve until the crack initiation took place under three-point loading condition. The load-displacement curves showed nonlinear behaviour with progressive change of stiffness due to crack propagation as the load increased after the crack initiation. HA/PLLA possessed higher bending modulus and critical stress than HA/PLCL, due to the higher mechanical properties of PLLA secondary phase. However, the fracture energy of HA/PLCL was higher by about 38 % than that of HA/PLLA, owing to the ductility of PLCL phase. It was confirmed that the spongy polymer phase played an important role in supporting the entire beam structure from the catastrophic bending fracture of the composite beam.



Mechanical properties	Pure HA	HA / PLCL	HA / PLLA
E (MPa)	1.59 ± 0.17	1.97 ± 0.23	6.73 ± 0.16
σ_{crit} (kPa)	$3.0\!\times\!10^{3}\pm0.8\!\times\!10^{3}$	91.6 ± 6.7	163.4 ± 8.1
G_{crack} (J/m ²)	$2.0\!\times\!10^{3}\pm0.5\!\times\!10^{3}$	5.41 ± 0.17	3.49 ± 0.07
G_{tot} (J/m ²)	$0.01 \pm 0.1 imes 10^{-3}$	217.5 ± 6.4	44.6 ± 2.1



(b) Fracture surface of HA/PLCL

/PLCL (c) Fracture surface of HA/PLLA Fig.2 FE-SEM micrographs of fracture surface morpholoy

波浪中の浮体・船舶に関する革新的 EFD 技術に関する研究

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

近年の数値流体力学の発展により、航空機や車両などの空力による物体表面圧力分布を、模型への加 工を必要とせずに計測する技術として PIV や PSP などが用いられているが、船舶においては船体表面 圧力分布を計測するためには船体模型への加工が必要であったり、静水中でのみ計測が可能などの制約 があった。しかし FBG 圧力センサーを用いることで船体模型へ加工を行うことなく比較的容易に波浪 中の船体表面圧力分布を計測することが可能であることが分かってきた。今年度からはこれまでの研究 より得られた知見を用い、新型の FBG 圧力センサーを用いて計測精度の更なる向上を目的とする研究 を展開する。

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
柏木 正	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	教授	実験指導
若原正人	株式会社シミウス		実験指導
神原 達哉	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
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	修士2年	実験補助
八木敬佑	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
三浦一樹	大阪大学大学工学部地球総合工学科	学部4年	実験補助
福光竜晟	広島大学工学部第四類輸送機器環境工学プログラム専攻	学部4年	実験補助
安藤悠輔	広島大学工学部第四類輸送機器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

船型を昨年の船速の遅いバルクキャリア船型 ($F_n = 0.18$) から船速の速い RIOS コンテナ船型 ($F_n = 0.25$) へ変更し船側波形計測、運動計測を行い、同時に従来の FBG 圧力センサー (ver. 6) から改良を施 した新型 FBG 圧力センサー (ver. 7) を使用し ver. 6 と ver. 7 の温度干渉影響の比較実験を行った。また、 ver. 7 の改良点のうち温度干渉影響に寄与している改良点を明らかにするための実験も行った。さらに サンモジュール製の RIOS コンテナ船供試模型に ver. 6 を 343 点貼りつけ、ウレタン製模型を用いて計 測した船側波形の結果を用いて圧力データの水面処理を行い、船体表面圧力分布を求めた。

3.1. 供試模型について

実験で使用したウレタン製 RIOS コンテナ船型を Fig. 1、サンモジュール製 RIOS コンテナ船型を Fig. 2、主要目を Table 1 に示す。



Fig. 1: RIOS container model(ウレタン製, 船側波形計測用)



Fig. 2: RIOS container model(サンモジュール製, 圧力分布計測用)

	1 I		
$L_{pp}[m]$	2.500	$x_B(=x_G)[m]$	-0.056
B[m]	0.385	KB[m]	0.078
d[m]	0.140	$BM_T[m]$	0.100
$\nabla[m^3]$	0.081	$BM_L[m]$	3.468
C_b	0.604	KG[m]	0.158
$A_w[\mathrm{m}^2]$	0.767	κ_{yy}/L	0.250

Table 1: Principal particulars of RIOS conteainer model

3.2. 圧力計について

FBG センサーの原理を Fig. 3 に示す。FBG とは光ファイ バーの中に回折格子を刻み込んだものであり、外力による歪や 温度によりセンシング部分の光ファイバーの変形が生じると、 入射光が光ファイバー内を通過する際に回折格子の間隔が変化 し、それによりブラッグ波長と呼ばれる反射光の波長の変化が 生じる。このブラッグ波長の計測を行うことで圧力の測定を行 う。FBG 圧力センサーは船体表面へ貼りつけることにより容易 に圧力計測ができ、かつ多点同時計測が可能である。温度補償 用の FBG も刻まれているため光ファイバーの温度による伸縮 の圧力計測値への影響を取り除くことができる。



Fig. 3: 圧力計測原理

3.3. Ver.6 から ver.7 への改良点

Ver.6からver.7への改良点は主に3点あり、ver.7の改良点に関する実験において、それぞれの改良 点を一つずつ施した3種類のセンサーを用意し、それぞれをE01、E02、E03と呼ぶことにした。以下に その3種類の改善点をまとめる。また、Fig. 4にはver.6とver.7のFBG 圧力センサーの写真を示す。

• フレームの剛性の向上 (E01)

センサー全体のサイズを変更することなくフレームの剛性を40%程度高めることで、船体表面に 両面テープで接着した際にセンサーの変形を防ぐことが可能となり安定した計測が可能になる。

• ステンレスシートの追加 (E02)

感圧部に厚さ10μmのステンレスシートを追加することで感温部と感圧部の温度による変形量を 近づけることができ、また感圧部をフラットに近づけることができるため水面近傍での水切りが 改善される。

• ガラスソルダリングの追加適用 (E03)

光ファイバーはセンサーのフレームに一定のプリテンションをかけた状態で固定されており、その 固定方法として従来では感温部のみに用いられていたガラスソルダリングという強固な固定手法 を感圧部にも用いることで、長時間の没水による固定部分の劣化を防ぐことが可能になる.



Fig. 4: Ver. 7 の改善点

Ver.6とver.7の比較実験においてはFig. 5のように、それぞれのセンサーを左舷のord. 8.5に7点 貼りつけ、比較用として歪式圧力センサーも取り付けた。Fig. 6には比較実験におけるFBG 圧力セン サーの貼り付け位置を示す。

次に ver.6を用いた船体表面圧力分布の計測実験においては、ver.6を左舷側に 343 点貼りつけ比較用 として歪式圧力センサーも埋め込んだ。Fig. 7 には圧力分布の計測実験における FBG 圧力センサーの 貼り付け位置を示す。

最後に ver.7の改良点に関する実験では、3 点ある改良点をそれぞれ一つずつ施した3種類のセンサー E01、E02、E03と ver.7を用意し、右舷の ord. 8.5 に E01と E03 をそれぞれ3 点、左舷の ord. 8.5 に E02 を3 点、ver.7を7 点 Fig. 5 と同様に貼りつけて実験を行った。



Fig. 5: センサーの貼り付け状態



Fig. 6: FBG センサーの位置

Fig. 7: Ver.6の位置

3.4. 船側波高計について

容量線を用いて自作した波高計を計測断面のガースに沿って設置する。Fig. 8 に示した船体側面全域 と船首部の合計 29 断面に波高計を設置し計測を行う。計測位置の断面形状によっては波高と出力電圧は 非線形の関係となる場合がある。キャリブレーションを行い波高に対する出力電圧を算出しておき、曳 航試験の計測値の解析に使用する。



Fig. 8: 船側波高計の設置位置

4. 実験方法

本年度は ver.6 と ver.7 の比較実験、ver.6 を用いた船体表面圧力分布の計測、ver.7 の改良点に関す る実験の3種類の実験を行った。以降ではそれぞれの実験を実験1、実験2、実験3と呼ぶことにする。

4.1. 実験1[:] Ver. 6 と ver. 7 の比較実験

異なる ΔT (気温と水温の温度差)において、昇降装置を用いて船体を基準点から沈下、上昇させキャ リブレーションを行った。その後に微小振幅規則波の正面向い波で波条件 $\lambda/L = 0.3 \sim 2.0$ の範囲で曳航 試験を行い圧力計測、船側波形計測、運動計測を行った。実験1の曳航試験による圧力計測、船側波形 計測時の計測システムをそれぞれ Fig. 9、Fig. 10 に示す。



Fig. 10: 実験1の船側波形計測システム図

4.2. 実験 2: Ver.6 を用いた船体表面圧力分布の計測

Ver.6を左舷に343点貼りつけたサンモジュール製模型を用いて、 $|\Delta T| \leq 1.0$ の条件下でキャリブレーションを行い、その後微小振幅規則波の波条件 $\lambda/L = 0.3 \sim 2.0$ (正面向い波)の範囲で曳航試験を行い圧力計測、運動計測を行った。また、解析の際にはウレタン製模型を用いた実験より得られた船側波形データを用いて水面を出入りする圧力センサーの補正処理を行った。実験2の曳航試験による圧力計測時の計測システムを Fig. 11 に示す。



Fig. 11: 実験2の圧力計測システム図

4.3. 実験 3: Ver. 7 の改良点に関する実験

実験1の際に用いたウレタン製模型を再利用し、左舷の ord. 8.5 に ver.7 と E02、右舷の ord. 8.5 に E03 と E01 を貼りつけて、様々な ΔT において船体を基準点から沈下、上昇させ、キャリブレーション を行った後に微小振幅規則波の波条件 $\lambda/L = 0.9$ (正面向い波)で曳航試験を行い圧力計測、運動計測を 行った。実験3の曳航試験による圧力計測時の計測システムを Fig. 12 に示す。



Fig. 12: 実験3の圧力計測システム図

5. 試験結果と考察

5.1. 実験1[:] Ver.6 と ver.7 を用いた比較実験

以下に実験1で得られた結果を示す。これまでの研究より ver.6 は $\Delta T \leq 1.0^{\circ}$ C の時にはキャリブレーション、曳航試験ともに良好な計測精度で計測できること、 $|\Delta T| > 1.0^{\circ}$ C の時はキャリブレーションについては加圧、減圧段階においてヒステリシスな曲線になり、曳航試験については歪式圧力センサーでの計測値から外れた計測値となることが分かっている。

Fig. 13、Fig. 14 にそれぞれ $\Delta T = -0.5^{\circ}$ C、 $\Delta T = 4.6^{\circ}$ C の時の ver. 6 と ver. 7 のキャリブレーショ ンの比較結果、Fig. 15、Fig. 16 に ver. 6 と ver. 7 の $\Delta T = -0.5^{\circ}$ C、 $\Delta T = 4.6^{\circ}$ C の時の曳航試験の結 果を示す。波条件はともに $\lambda/L = 0.9$ である。キャリブレーションのグラフは横軸に基準点からの沈下 量、縦軸に圧力値の変化量をとっており青線は理論値 $-\rho gh$ を示している。曳航試験のグラフは横軸は Ord. 8.5 におけるセンサー位置の船底からの角度、縦軸には非定常圧力を ρgA (A は入射振幅) で無次元 化した値をとっている。

Fig. 13、Fig. 14 よりキャリブレーションについては、 $\Delta T = -0.5^{\circ}$ Cの時は ver. 6、ver. 7 ともにグ ラフに線形性があり良好な結果が得られている。しかし、 $\Delta T = 4.6^{\circ}$ Cの時は ver. 6 はグラフの線形性

が失われているが、ver. 7 は線形性のある良好な結果が得られている。Fig. 15、Fig. 16 の曳航試験結 果については、 $\Delta T = -0.5^{\circ}$ Cの時はver.6、ver.7ともに歪式圧力センサーでの計測値とよく一致して いることがわかる。 $\Delta T = 4.6^{\circ}$ Cの時、ver.6は歪式センサーの計測値から大きく外れているのに対し、 ver.7はよく一致している。これらの結果よりver.7はver.6と比較してキャリブレーション、曳航試 験ともに温度干渉影響が大幅に改善されていることが分かった。

5.2. 実験 2: Ver. 6 を用いた船体表面圧力分布の計測

実験2の結果を Fig. 17、Fig. 18 に示す。船側波形の計測結果を用いて周期的正弦パルス波的な圧力の時系列データに補正処理を施してある。Ord. 8.5、ord. 5.0 には歪式圧力センサーによる計測結果も示している。歪式圧力センサーとの比較から RIOS コンテナ船型においても、FBG 圧力センサーが $|\Delta T| \leq 1.0^{\circ}$ C の条件下で十分な計測精度を有していることがわかる。

5.3. 実験 3: Ver. 7 の改良点に関する実験

Fig. 19 に E01、E02、E03 の 3 種類のセンサーの ΔT と非定常圧力の関係を示す。グラフは横軸に ΔT 、縦軸に非定常圧力の無次元値をとっている. プロット点は ver.7 の ord. 8.5 断面のセンサーの貼 り付け角度における計測値であり、直線は 3 種類のセンサーの ord. 8.5 断面の各センサーの貼り付け角 度における計測値である。

Fig. 19よりセンサーのフレームの剛性を上げた E01 が ver.7 における計測値と対応している。この 結果より、ver.7 の温度干渉影響の大幅な改善にはセンサーフレームの剛性の向上が寄与していること が分かった。センサーフレームの剛性の向上によって感圧部における温度による変形量が減少し、感温 部における温度による変形量に近づいたことで温度干渉影響が改善したと推察される。

5.4. 船体運動

Fig. 20 に運動計測試験で得られた船体運動の結果と 2013 年の実験で得られた船体運動を示す。縦軸 は左から surge、heave、pitch のそれぞれの運動の無次元値と位相を示している。横軸は波長船長比 λ/L である。ssw は船側波形計測実験、pre は ver.6 での圧力計測実験、FBG-comp は ver.7 の改良点に関す る実験時の計測結果であることを示している。Surge、heave、pitch のいずれも過去の実験結果との合 致が確認できる。Heave 運動では $\lambda/L = 1.2$ 付近に同調点が見られる。一方、Pitch 運動では $\lambda/L = 1.5$ 付近に同調点が見られる。

5.5. 抵抗增加

計測結果より得られた抵抗増加を Fig. 21 に示す。縦軸は抵抗増加の計測値を無次元化したものであり、横軸は波長船長比 λ/L である。データの分類は船体運動の時と同様である。過去の結果と比較して 抵抗増加の無次元値は概ね合致していることが確認できる。

6. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 船速の速いコンテナ船においても FBG 圧力センサー (ver. 6) を用いて精度の高い船体表面圧力分 布を得られることが分かった。
- (2) Ver.7は ver.6と比較して温度干渉影響が大幅に改善されていることが分かった。
- (3) Ver.6から ver.7への改良点において ver.7の温度干渉影響の改善に寄与しているのはセンサーフ レームの剛性の向上であることが分かった。

参考文献

- 1) 柏木正, 岩下英嗣:船体運動 耐航性能編,船舶海洋工学シリーズ,成山堂書店,2012.
- 2) 若原正人,谷上明彦,新郷将司,中島円,深沢塔一,金井健,FBGを用いた表面貼付型多点圧力 センサの開発,日本船舶海洋工学会論文集第7号,2007.



Fig. 13: $\Delta T = -0.5^{\circ}$ C でのキャリブレーション結果



Fig. 14: $\Delta T = 4.6^{\circ}$ Cでのキャリブレーション結果



Fig. 15: $\Delta T = -0.5$ °C での曳航試験結果における ver.6 と ver.7 の比較



Fig. 16: $\Delta T = 4.6^{\circ}$ C での曳航試験結果における ver.6 と ver.7 の比較



Fig. 17: 船体断面上の圧力分布 ($F_n = 0.25, \lambda/L = 1.4, \beta = 180$ degs.)



Fig. 18: 船体断面上の圧力分布 ($F_n = 0.25, \lambda/L = 1.0, \beta = 180$ degs.)



Fig. 19: E01、E02、E03 と ΔT の関係 ($F_n = 0.25, \lambda/L = 0.9, \beta = 180$ degs., ord. 8.5)



Fig. 20: 船体運動 ($F_n = 0.25, \beta = 180$ degs.)



Fig. 21: 抵抗增加 ($F_n = 0.25, \beta = 180$ degs.)

浮沈式潮流発電装置の係留システムに関する開発研究

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

潮流発電は世界的には着実な発展を遂げている.特に, スコットランドで実施中の MeyGen Project の Phase 1a においては,1.5MWの潮流発電装置4機が設備利用率30% 以上の実績を上げており,商業発電も可能なレベルに到 達していると伝えられている.潮流発電の大きな魅力は 予測可能であるということであり,我国においても電力 会社を含めて潮流発電への関心は高い.

一方, 我国は島嶼国であり, 多くの離島においては主と してディーゼル発電によって電力を確保している現状が あるが, 離島は当然海に囲まれており場所を選べば一定 以上の流速の潮流が存在する. そこではメガワット級の 潮流発電は難しいが, 離島のニーズに合わせた規模の潮 流発電は可能であると考えられる.

本研究では低流速潮流中においても使用可能な高効率 な大型ディフューザー付きの潮流発電装置と低コストを 実現するために設置工事費およびメンテナンス費を最少 化する浮沈式潮流発電システムの開発を実施している. このシステムの成立性を検証するために行った長崎県五 島市の奈留瀬戸において実験結果と発電量を上げるため の係留システムの改良案について報告する.

2. 五島の奈留瀬戸における実海域実験

五島市の奈留瀬戸は、五島の久賀島と奈留島の間の海 峡であり、2014年に内閣府海洋総合政策本部によって潮 流発電の実証サイトに認定された強潮流の場所である. 我々が実験場所として選んだのは奈留島の篝火崎灯台か ら約85mの水深約12mの地点である.この設置点の付近 の水深20m地点において2017年5月18日から11月12日ま での潮流と波浪観測を実施した.

図1は水面下10m位置での潮流速の最大値を流向ごと に示したものである.これらの結果から,この地点では 大潮時には流速が約6ノット(3m/s)であること,上潮と 下潮の流向が一直線にはないこと,下潮時の流速の方が 上潮時よりも大きいことなどが分かる.このような観測 と並行して,全長1.9m,全幅1.05m,空中重量370kg, タービン直径0.64m,ディフューザー直径1.05mの実海 域実験用の潮流発電装置を製作した.タービンブレード はアルミを切削して作ったが,スパン長は切削機の長さ 制限によって決まった.ディフューザーは内側をステン レスの薄板を用いて曲線を出し,外側はウレタンフォー ムとFRPで製作した.全長は当初にはもっと短くする予 定であったが製作途中で浮力が足りないことが判明した ので長くなった.発電機は定格出力5kW,定格回転数 600rpmの多極発電機(重量45kg)を用いた.

図1のような潮流の特性を考慮して、実海域における アンカーを図2のように配置した.すなわち、上潮時の 平均流向は北西方向312°であり、下潮時は南方向



図1 奈留瀬戸における流速観測場所と水面下10mでの 最大流速の流向



図2 アンカー設置位置と電力線敷設



186°であるので、2組のアンカーをそれらの角度に合わせて配置した.

本潮流発電システムは浮沈式で,憩流時には水面に浮 上する計画であったが,地元の漁協からの要請で憩流時 にも水面下3m以下に留めるようにした.ロープ係留の 具体案は,最終的には図3のように,中間ブイを用いる こととなった.

3. 実海域実験結果と新係留システムの提案

実海域実験を開始したのは2019年3月からであるが, 当初は浮力材がトラブルの元であった. 潜水士による設 置工事に作業においては装置を一旦海底(約12m)まで沈 める必要があるが,ディフューザーで用いたウレタンフ ォームが圧縮強度不足だったり,設置後に発泡スチロー ルが水圧によって縮小し浮力不足になったりした. 幸 い,ウレタンフォームには圧縮強度の大きなものがある のでそれに変えた.

図4は第9回目(2020年8月)の実験期間中の1日当たり の発電量(Wh/day)および最高発電量(Max W)である. この期間中に2回の大潮があり、それにより発電量が大 きくなっていることが分かる.最大の発電量は8月6日の 663Wであったが、日当たり発電量の最高値は8月20日の 919Wh/dayであった.

図5は、8月20日の流速(推定値),発電量,潮位とナ セルの没水深度,ナセルのピッチ角とロール角の変化を 示したものである.流速は設置したAWACが不調だったた め、2019年5月~7月までの同じポイントの観測値から推 定したものである.この地点の潮流の特徴は図1でも分 かるように上潮(8時と20時頃)は下潮(1時と13時頃) に比較して弱い.その下の図は,発電量の記録である が、上記の潮流の特徴を反映して下潮時の発電量が大き い.データのサンプリングは1ヘルツで行ったが、デー タが激しく変動していることが分かる.この変動の原因 が全て潮流の乱れによるものかどうかは現時点では不明 であるが、今後、乱流観測なども行って明確にしたい. この発電量と潮流の記録を比較すると、本装置のカット イン流速は0.5m/s程度であることが分かる.

次に、その下の図は潮位と装置の水圧(ヘッド換算)の比較であり、両者の差は装置の海底からの高さを与えている.これによれば、発電量が最も大きかった13時頃の装置高さは海底から1~2mのところであり、その高さでは海底境界層により流速も小さくなっている.最後の図は、ナセルのロールとピッチ観測値である.発電量に大きく影響するのはピッチであるが、11:00~14:00頃のピッチは-12°程度であり、これは頭下げとなって流れに正対していないと言える.

以上を総括すると、2020年8月の実験においては1か月 間の安定した潮流発電には成功したが、発電量について は不十分であったと言える。発電量が上がらなかった理 由は、装置の深度が深すぎたこと、流れに対するピッチ 角が大きすぎたことである。係留系システムの改良案と しては、4点係留から図6のように2点係留システムに変 更する。これによって発電装置は常に潮流に正対可能と なる。

4. まとめ

2020年8月に五島の奈留瀬戸で行った浮沈式潮流発電 システムの実験の結果,発電量が目標値に達しなかった おもな原因は,潮流最強時の装置の深度と姿勢が不十分 であった.これを解決するために新2点係留方式を考案 し,1/10模型によって係留システムの設計を行った.

発表論文リスト

Y. Kyozuka, D. Sakaguchi, M. Sueyoshi and C. Hu : A floating/submersible shrouded tidal current turbine system applicable in low speed tidal flow, 13th European Wave and Tidal Energy Conference, Napoli, 1st-6th September 2019.



図 5 2020 年 8 月 20 日の流速(推定値),発電量,潮 位とナセルの没水深度,ナセルのピッチ角とロール角



図6 新2点係留システム詳細

研究組織

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	坂口大作、渡真利 大(M2)
所内世話人	胡長洪

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

風車などの流体機器は,風などのもつ流体エネルギーがブレードと呼ばれる翼を回転させ,そこから電力を生み出す.このブレード性能は翼型と 3 次元断面の形状に依存し,特に後者は翼端より大きな空力抵抗(特に,誘導抵抗)や空力騒音を生み出す.これらの原因は翼端から生じる渦の影響が大きく,この渦を減衰させる方法が必要となる.

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 のある形状が重要であり, この隙間によって翼端からの翼端渦を弱めていると言われている. このよう な自然界の形態や機能を模倣したものバイオミティクス技術と呼ばれ, 様々な分野で注目を集めている. 本研究ではこのバイオミティクス技術の中で, 上述した翼端部が複数分岐した隙間のある形状の wing_grid と呼ばれる翼端デバイスに注目し, 効率の良い形状の探索を目指し, 空力特性及びその流れ場 の関係を考察することを目的とする.

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 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) 6.0×10⁶,迎角 0° ~ 6°(1°刻み)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

迎角(AoA)に対する揚力係数(C_L),抗力係数(C_D),及び誘導抗力係数(C_D)の関係を算出した結果を図 2 に示す.図 2(c)の C_D は $C_L=0$ 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.なお,各 空力係数に対する代表面積は wing_grid と矩形翼それぞれの翼面積を用いた.

図 2(a)よりマッハ数 0.2 での wing_grid の C.及びその傾斜は矩形翼より大きな値を示した.一方で,マ ッハ数 0.74 の wing_grid のではこの傾向が逆転し,悪化している.この結果より wing_grid は自然界で飛 翔している鳥類のように非圧縮流れで有効デバイスであり,巡航時よりむしろ離着陸時の高迎角飛行の 際に適してデバイスであることが言える. また,図 2(b)では wing_grid の C_bはマッハ数 0.20 及び 0.74 の いずれでも大きな値を示した.加えて,図 2(c)では wing_grid の C_bは両翼で差が小さい.つまり, wing_grid の主要な抗力は誘導抗力ではなく,形状抗力の起因する.

次に,図 2(a)で示したマッハ数 0.2 での wing_grid がもつ揚力特性(高 C.及び大きな揚力傾斜)と流れ 場の関係を調べた.図 3(a),(b)にマッハ数 0.2 での翼上面及び翼弦方向に対する翼断面で圧力分布を示す. なお,図 3(b)の断面は図 3(a)の赤線で示す位置である.図 3(a)より wing_grid の翼端は,矩形翼のそれよ り低圧領域となる.特にこの低圧領域については,wing_grid の前縁側で顕著であり,それが後縁側にな ると目立たなくなる.この結果を図 3(b)より wing_grid の前縁側の翼端部での圧力低下は矩形翼のそれよ りで非常大きくなっている.以上,これらの結果は上述した揚力特性を示した一因になっていると考え られる.今後は,現在の揚力特性を維持しつつ,形状抗力の低減方法を模索することが課題となる.



図 2 wing_grid と矩形翼の空力特性の結果



図 3 wing_grid と矩形翼の翼上面,及び断面での圧力分布(マッハ数 0.2, 迎角 6°)

5. 研究成果報告

なし

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) 空中風力発電に用いる自立離着陸可能な可変カイトの研究 一可変カイトの操縦性向上-

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. 昨年度より機体を大型化して翼面荷 重を低減し機体の安定化ができた. 逆にロッドの摺動距離が十分でないために飛行姿勢を操作性は悪くなった. 自立浮上用の機器を搭載すると重心位置の関係で飛行が困難になり,幾何学的な設計を変更する必要が生じ てきた. 今後はデルタ型以外の機体構造の空中風力発電用のカイトを検討する.

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 度は可変カイトの試作と飛行試験およびローターによる離着 陸実験を行ったが,機体の操縦性が十分でなく,翼面荷重 が大きくなってしまったために十分な飛行性能が得られなか った.本年度は,機体の操縦機構の改良と大型化による翼 面荷重の低減により,飛行性能を向上させて安定な自立飛 行を目指すことを目的とする.

2. 実験方法

2-1 機体の製作

カイトは、CFRP ロッドのフレームをサーボモータにより摺動 可動に結合され開閉等の変形が可能な構造とする.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.本年度は,大型 化と軽量化により翼面荷重を半分以下に低減した機体を設計・製作する.

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.

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,浮上機器(FCとローター)の搭載の前後での 機体の重量と翼面荷重について昨年度の試作1



図1 カイトによる空中風力発電の概念図





図3 可変カイトの試作2号機

号機と比較を表1に示す.機体の 大型化に伴って接続部品の強化 が必要だったので素材を PLA か らカーボン PLA に変更し、内部充 填率を上げて再設計,3Dプリンタ により出力させた. 翼面積を増加 したことにより翼面荷重は翼面積

表1 機体の翼面荷重の比較

		浮上機器無し		浮上村	幾器有り
機体	翼面積	重量	翼面荷重	重量	翼面荷重
試作1号機	$0.4 \mathrm{m}^2$	0.2kg	0.5kg/m ²	0.38kg	0.95kg/ m ²
試作2号機	$1.0 \mathrm{m}^2$	0.3kg	$0.3 \mathrm{kg/m^2}$	0.52kg	0.52kg/m^2

を増加したことにより低減できた. 浮上機器搭載後も, 翼面荷重は低減できていることがわかる. 翼面積 1m²程 度までの一般のカイトの翼面荷重は 0.1-0.3kg/m², 軽量模型飛行機で 10-50kg/m² 程度である. 試作2号機の 浮上機器無しの場合で一般のカイト程度にまで低減できたが、浮上機器有りの場合はカイトとしては翼面荷重 が大きくなっている.

カイトの摺動機構について図 4 に示す. 試作1 号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2号機では軽量化 とロッドの摺動範囲を最大限にとるためにプーリ ーによりラインの巻取りで摺動を行うようにした.

試作2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. 通常状態では 試作1号機より安定に飛行できるようになったが 機体の寸法に対する摺動距離が十分でなかった ため操作性は逆に悪くなってしまった. 浮上機器 はスプレッダー(横方向のロッド)に搭載した.これ らを搭載後は重量の増加とともに重心位置が空 力中心より上部に移動して静安定性を失ってしま い飛行が困難になってしまった.現状ではバッテ リーの搭載位置をカイトの下端にして重心を調整 しているが、重心位置を下げるためには必要以上 に過大な容量(重量)のバッテリーを搭載しなけれ ばならなくなる.

この問題を解決するためには、可変カイトの幾 何学的構造からスプレッダーを現状より下部に変 更し, 摺動距離を更に長くしなければならない.



(a) 試作1号機 図4 可変カイトの摺動機構

(b) 試作2号機



図5 カイトの飛行試験飛行(浮上機器無し)

サーボモータによる摺動では難しく,別の直動機構を検討する必要がある.カイトの幾何学的寸法や構造も検 討の余地がある. 例えば空力中心と重心の関係で有利な逆デルタ翼型のカイトや,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も可能だと考えられる.

4. まとめ

提案している可変カイトの大型化により翼面荷重を低減し機体の安定化ができた. 逆にロッドの摺動距離が十 分でないために飛行姿勢を操作性は悪くなってしまった. 自立浮上用の FC,ローターを搭載すると重心位置の 関係で飛行が困難になり,幾何学的な設計を変更する必要が生じてきた. 今後は,デルタ型以外の機体構造の 空中風力発電用のカイトを検討していく.

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, Tomohiro Kudou, Hiroki Irie, "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

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、これまで垂直軸風車の主翼を傾斜させて空気ブレーキとする過回転抑制機構を研究して きたが、耐久性向上とコスト低減のため、可動部分の少ない機械式過回転抑制機構を新たに考案した.この新機 構を備えた直径 14 m バタフライ風車の社会実装を早期に実現するため、垂直軸風車用の空力弾性解析(Aeroelastic Analysis)システムの開発に取り組んだ.今年度は完全なシステム開発には至っていないが、空力解析部分とマル チボディ解析の各々の基礎構築まで進んでいるので、現状の成果を報告する.

2. 解析対象風車と空力弾性解析システムの概要

図1に企業と協同して現在開発中の新規バタフライ風車の外形を示す.特徴の1つは、補強材として設置する 水平アームの一部を補助翼付きの可動アームとしてあることであり、回転数が増加した場合に遠心力で可動アー ムが受動的に動き,空力ブレーキとして働いて過回転を抑制できる.本風車を対象として、本研究では、 MATLAB-Simulink-Simscapeを用いて、図2に示す空力弾性解析システムを構築した.Wind ブロックは乱流を含 む入力風を生成可能である.空力解析部分(BEM および FlowField ブロック)は、2重ロータ構造を持つバタフラ イ風車を解析するために、四重多流管流れ場モデル (Quadruple-Multiple Streamtube model: QMS)を採用し、翼素運 動量複合理論(Blade Element Momentum theory: BEM)に基づき構築した.風車の構成部材の変形解析は Multibody Dynamics ブロックで行い、片持ち梁の理論値にモデルの挙動が一致するように、構成要素間のばね定数と減衰係 数を調整した.Multibody Dynamics ブロックで算出される構成要素の変位 r_iや相対変形速度 v_{bi}およびトルク Q_i は、BEM ブロックと運動方程式ブロックにフィードバックされる.ただし、現状では、運動方程式ブロックの代 わりに固定回転数を与えて計算を行うテスト用システムとしており、また、相対変形速度 v_{bi}のフィードバックは 行っていない.さらに、脚部も含めた風車全体のマルチボディモデルの構築を行っているが、BEM ブロックを導 入しているのは1翼のみであり、導入をしていない翼には、重力と遠心力のみが作用する計算条件となっている.

BEM ブロックに入力する翼の空力データは既存の NACA 0018 のデータを用いている. 流れ場モデルとして, 風車ロータ部は高さ方向に 21 分割(W=1~21)してあり,水平方向には,アジマス1度毎に相当する 180 本の流管 に分割されている.四重多流管モデルにより,流れ場は上流側(180 流管)と下流側(180 流管)に区別されるほかに, 外翼(鉛直部)と内翼(斜翼)を通過する流速(Vout, Vm)として区別され,それらを関連付ける通過後の流速(Vfout, Vfm)と ともに, FlowField ブロックで処理され記録される.



図1 新規14mバタフライ風車



3. 主な結果

図3に赤道面とロータ頂部のほぼ中間位置(W=6)に相当する高さにおける外翼ロータを通過する流速分布を示す.赤色シンボルは入力風を7m/sの一定風とした場合であり,青色シンボルは同一の風速で20%の乱れを入力した場合の結果である.上流側(0°~180°)ではアジマス90°の最上流点で流速が低くなる分布となっており,下流側(0°~-180°)では,中央部に内翼ロータによる速度欠損部があり,妥当な速度分布がシミュレートできている.

図4は1つの外翼(鉛直翼部)に作用する回転トルクQのアジマス依存である. 黄色はマルチボディモデルを含まない空力解析部分(BEM)による計算結果であり,入力風は7 m/sの一定風条件である. 赤色は同じ一定風入力の条件下で,空力弾性解析した結果である. 上流部でトルクが減少しているのは,遠心力で半径方向に翼が膨らむことで,翼素に対する迎角が減少するためだと推測される. 図4の青色のシンボルは20%の乱流入力風における空力弾性解析の場合であるが,最上流点近傍でトルクが大きく変動する結果となっている.

今年度のシステムでは構築したシステムの要素数がやや多く計算に時間を要することが判明したので、今後、 要素数を減少して、すべての翼に空力解析ブロックを組み込んだ空力弾性解析を行えるシステムに改良していく 予定である.また、疲労解析や可動アームの挙動解析にも取り組むつもりである.



図3 外翼ロータ(鉛直部)を通過する流速分布(W=6)



図4 1つの鉛直翼のトルクのアジマス依存

【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

【成果報告】

- (1) 長谷川裕紀, 原豊, 三浦卓也, 安道緋呂, 吉田茂雄, 14m バタフライ風車の空力弾性解析のためのマルチボディモデルの構築, 日本機械学会中国四国学生会第51回学生員卒業研究発表講演会, 08b3, 2021.3.4, オンライン 開催(岡山理科大学)
- (2) 中西智哉, 原 豊, 宮下礼人, 吉田茂雄, 住隆博, 秋元博路, 2枚翼バタフライ風車の後流回復に関する数値的 研究, 日本機械学会中国四国学生会第51回学生員卒業研究発表講演会, 08b5, 2021.3.4, オンライン開催(岡山 理科大学)
- (3) 三浦卓也, 原 豊, 長谷川裕樹, 安道緋呂, 吉田茂雄, 14m バタフライ風車の空力弾性解析, 日本機械学会中国 四国支部第59期総会・講演会, 07a3, 2021.3.5, オンライン開催 (岡山理科大学)

ME-21 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].しかし,このような専門性の高い技術 や思考を要する作業をコンピュータ上で再現させるには,AI 技術だけでなく,専門性 の高い技術を持つ人の協力が必要不可欠である.

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 経験を積んだ歯科医師では、いろんなインプラントの形状を頼り にインプラントを鑑別することが可能であるが、その歯科医師数は少なく、今後より多 くのベテラン歯科医師の鑑別眼が必要とされる.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

インプラント識別の基礎的検討として、インプラントの形状に似た工業用ネジを用いて 画像識別を行った.使用したネジは、M4×15mm、M6×15mm、M5×19mmの3種類とし た.これらのネジを様々な角度から撮影を行った.撮影した枚数は403枚、写真のサイズ は縦が4032、横が3024、奥が3となっている.また画像の形式はJPEGである.この403 枚の写真データをそれぞれ学習用データと検証用データに分類する必要があるため、364枚 を学習用、39枚を検証用に分けた.

次に,データの前処理を行う.本実験では計算量が少なくなるように 4032×3024×3 の画 像サイズを 500×500×3 にトリミングを施した.本研究では Python というプログラミング 言語を使用して深層学習を記述した.

3. 結果と考察

図1に学習結果および損失関数のグラフを示す.364 枚の学習データをもとに学習させた データで識別をさせたところ,正答率は96.8%,損失関数の値は0.12 となった.しかし学 習させたモデルで未知のデータを識別させたところ,正答率は30.7%,損失関数の値は1.51 になった.未知のデータに対しての正答率は既知のデータの正答率と大幅な乖離があるた め,今回準備した学習データに問題があると考えられる.学習データにする際の画像は,統 一化されたデータである方が望ましく,また特長を捉えることができる画像であることが 望ましい.また図1のグラフから4エポックと9 エポックで過学習を起こしていたことが 確認できた.このことから,過学習を起こす要因として考えられるデータ量の不足が影響し たのではないかと考えられる.また,学習データを正則化する等の対処で過学習は抑制でき るので,今後,学習データとなる画像の見直しやデータ数の検証を行い,より精度よく未知 のデータの識別が行えるように検討をしていく.

今後は、本実験を実際の歯科用インプラントに適用させていき、歯科医師のインプラント 治療をサポートすることのできるシステムを開発していく.



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、その基礎的検討としてインプラントの形状に似た工業用ネジを用いて画像識別 を行った.学習データに対する未知データの識別精度を向上させるために、今後は、学習デ ータとなる画像の見直しやデータ数の検証を行い、より精度よく未知のデータの識別が行 えるように検討をしていく.

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
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 髙田 稜一

同志社大学 理工学部 浜口 慶一郎

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. 緒言

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 の二次元構造及び三次元構造について、水槽を用いた可視化実験を行い、得られた画像から PIV 解析によって、速度ベクトルと渦度分布について計算結果と比較することで、両者の整合性の確 認を行う.

2. 実験方法

実験装置は、水槽とモデル、曳航式台車、照明装置、撮影装置で構成されている(図1).水槽の寸法は、長さ5m、幅0.4m、高さ0.4mである。台車に設置したモデルを一定速度で曳航する. モデルまわりの流れを可視化するために、流体に混ぜたトレーサー粒子を用いた.トレーサー粒 子には、流体として用いた水に比重が近いナイロンパウダー(比重1.03,直径50µm)を用いた. 測定面は、モデルの主流直角方向面である(図1).光源からの光をスリットによりシート状に して、シート面における粒子の動きを撮影する.撮影した動画を PIV 法によって解析し、速度ベ クトルと渦度を求めた.



Fig.1 Experimental apparatus

結果および考察

図 2, 図 3 は平板における $Re = 8.0 \times 10^{\circ}$ の水槽実験と数値計算の結果を示す. これらの図は 翼後縁から 2 翼弦長後流の面での主流方向渦度 ω_x の主流直角かつスパン直角方向平均と時間 の関係を示す. 図 2 と図 3 を比較すると,両者とも迎角の増加に伴い,3次元構造の発達が見ら れる. また,これらの結果は,定性的にみて良い一致を示している. しかし,水槽実験のほうが, 数値計算に比べ,低い迎角で長波長の不安定性が確認できた.この要因として,数値実験で与えた援乱条件よりも,実際の実験での擾乱成分が大きかったことなどが考えられる.



Fig.2 Mainstream vorticity on the plane perpendicular to towing direction for FP at $Re = 8.0 \times 10^2$ by water-tank experiment: ω_r



Fig.3 Mainstream vorticity on the plane perpendicular to towing direction for FP at $Re = 8.0 \times 10^2$ by computation: ω_x

4. 結言

極低レイノルズ数での平板翼の流れの可視化に関する実験と計算を実施した.三次元構造に ついては確認が予想された条件に関して,計算と実験で定性的に良い一致が確認できた.しかし, 水槽実験のほうが,数値計算に比べ,低い迎角で長波長の不安定性が確認できた.この要因とし て,数値実験で与えた擾乱条件よりも,実際の実験での擾乱成分が大きかったことなどが考えら れる.今後,さらに定量的な比較を行うことで空力特性などに関する数値計算の結果についても 整合性の検討が期待できる.

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。

九州大学 令和2年度 応用力学研究所 共同利用研究成果報告書 IR-FZ法による単結晶育成における集中加熱条件の最適化 山梨大学大学院 総合研究部 綿打敏司

緒言 Prを添加したLu₃A1₅0₁₂単結晶(以下Pr:LuAG)は、医療用の撮像装置に用いられるシン チレータ結晶である.現在,Irを坩堝としたCZ法で量産されている.しかし、Prが均一に固 溶しない、いわゆるPrの偏析が著しい.そのため、結晶育成の過程で、固化率を3割程度に 抑制している.いわば、結晶育成過程の歩留まりが低い状況にある.そのため、Pr:LuAGは 高コストでこれが撮像装置そのものやこの装置を用いた検査費用の高価格化を招いている. Prの偏析を制御することが可能な方法によりPr:LuAGを育成することができれば、低コスト 化につながると期待される.本研究で用いた赤外線加熱浮遊帯溶融(Infrared convergent floating zone:以下IR-FZ)法は坩堝不要の偏析制御が可能な帯溶融法の一つである。本研究 では、IR-FZ法によりPr:LuAGの育成を試みた.育成中に凹型の融液-結晶界面が確認された ことに加えて、育成結晶断面の中心部にリング状のクラックがみられた.そのことから、集 中加熱に用いる回転楕円面鏡を下方に傾斜させる効果を調べた結果をここに報告する. 実験 純度が4N以上のPr₆0₁₁粉末,Lu₃0₃粉末, α-Al₂0₃粉末を出発原料として用い,組成式

が(Pr001Lu099)3A15012となるように秤量・混合した.その後,空気中で12時間の仮焼を1200℃ で行い,粉砕・混合の後,空気中で12時間の焼成を1450℃で行った.単相であることを確認 し、ラバープレス法により棒状に成形した.

成形した多結晶棒には、空気中で5時間の焼結 を1500℃で施した. 焼結後の原料棒は, 直径 が9-11 mmで長さが50-70 mmであった. 結晶育 成には、赤外線集中加熱炉(型式FZ-10000-H-TY-1: (株)クリスタルシステム製)を使用し た. この加熱炉には、定格出力が2.5 kWのハ ロゲンランプと回転楕円面鏡が4つずつ装着 Fig. 1. Schematic illustration of the experimental setup されており,図1に示したように回転楕円面鏡 for the downward (minus) tilting of the M-L systems. を水平配置から下方に10°まで傾斜さ せることが可能である.本研究では,傾 斜角度0°と-10°の二通りでPr:LuAGの 育成を行って比較した. 育成後, 育成結 晶を育成方向に垂直な面で切断し、

断 面の観察を行った. 傾斜角度を含めて 主な育成条件を表Iにまとめた.



Ta	ble	17	Гурісаl	growth	n conditions	for	Pr:Lu/	AG crystals
----	-----	----	---------	--------	--------------	-----	--------	-------------

Tilting angle θ (°)	0, -10
Feed diameter (mm)	9–11
Rotation rate (upper/lower) (rpm)	3/40
Moving rate (upper/lower) (mm/h)	7.5/5.0
Growth atmosphere	Ar, 200 mL/min

結果と考察結果と考察 図2に回転楕円面鏡を水平に配置した従来の集中加熱条件での Pr:LuAGの育成中の集中加熱領域近傍の様子と育成結晶,育成結晶断面の写真を示した.図 2(a)に示した育成中の集中加熱領域近傍の様子から溶融帯と育成結晶との界面位置が溶融



Fig. 2. IR-FZ Growth of Pr doped Lu₃Al₅O₁₂ crystal in non-tilted condition ($\theta = 0^{\circ}$). (a) Snap shot of the convergent area during the crystal growth, (b) Photo of the grown crystal of Pr doped Lu₃Al₅O₁₂, (c) Photo of the cross section of Pr doped Lu₃Al₅O₁₂.

帯表面と溶融帯内部で異なることがわかる.溶融帯表面における原料棒との界面を起点に育成結晶との界面までの長さをそれぞれL,L'とするとL'の方が大きい.このことは,溶融帯と育成結晶との界面が凹型となっていることを示している.図2(b)に示した育成結晶を見ると多数のクラックがみられ,本来透明のPr:LuAGが不透明である.図2(c)に育成結晶の断面を示したが,中心部にリング状のクラックが確認され,周辺部には放射状のクラックが複数確認されている.育成界面が凹型であることから結晶断面で考えると育成結晶の外周部から結晶化され,育成結晶中心部が最後に固化されることになる.そうすると育成結晶中心部



Fig. 3. IR-FZ Growth of Pr doped Lu₃Al₅O₁₂ crystal in tilted condition ($\theta = -10^{\circ}$). (a) Snap shot of the convergent area during the crystal growth, (b) Photo of the grown crystal of Pr doped Lu₃Al₅O₁₂, (c) Photo of the cross section of Pr doped Lu₃Al₅O₁₂.

図3には回転楕円面鏡を10°下方に傾斜させた条件(*θ*=-10°)でのPr:LuAGの育成中の集中加 熱領域近傍の様子と育成結晶,育成結晶断面の写真を示した.図3(a)に示した育成中の集中 加熱領域近傍の様子からL'はLに比べて大きいものの図2(a)に示した従来の集中加熱条件 に比べてその差は小さくなっている.これは,この集中加熱条件における固液界面形状が片 単に近づいたことを示している.図3(b)に示した育成結晶の写真では,クラックが各印され るものの数は減少し,育成結晶の透明性が改善された.図3(c)に示した断面写真からこの条 件では,リング状のクラックが抑制されたことに加えて,放射状のクラックも減少した.以 上より,Pr:LuAGのIR-FZ育成において溶融帯と育成結晶との凹状の固液界面が確認されたも のの回転楕円面鏡を下方に傾斜させることで界面形状を平坦に近づけることができ,それに 伴って育成結晶の欠陥を低減できることが分かった.

スピナーマウント圧力センサーによる風車流入風計測

研究代表者 (独)三重大学大学院工学研究科 鎌田泰成

要旨

風車性能計測において流入風観測技術は重要である.本研究は,流入風観測マストに代わる簡易な流 入風観測技術の構築を目指すものである.本年度,フィールド風車へ試験装置を設置し,観測結果から 可能性を検討した.スピナーマウント圧力センサーは,風速変動に対する十分な応答速度を示し,流入 風観測に使用できる可能性を示した.

目的

本研究は、風力発電の風速計測に関する新技術を構築する.風車性能の計測は、平坦な地形を用い発 電量と参照風速計の計測風速で評価される.しかし、実際の風車設置場所は、平坦でなく、風車への流 入風は観測困難であった.本研究では風車スピナーに設置した圧力センサーにより、流入風計測を行 う.風車スピナーに設置するため風車ロータによる気流変化に影響されず、正確な流入風観測が期待で きる.起伏の大きな地形に設置された風車の流入風を正確に把握することで、より風車の安全運用に資 するものである.本技術は、ピトー管の流速測定原理をスピナーに取り付けた圧力センサーに適用して 風速観測を行うものである.このため、よどみ点圧力をとらえることで、観測マストなしに流入風を把 握するものである.

実験方法

三重大学の 30kW フィールド研究用風車に設置し, フィールド実 験による精度検証を行う.スピナーマウント圧力センサーは,圧力 センサーおよび記録用の小型 PC から構成され (図1), ハブに設置 された複数の圧力測定孔の圧力を取得する.計測圧力は、無線 LAN システム経由で,計測 PC に取り込まれリアルタイムで処理される. 図2にフィールド研究用風車を示す.風車はハブ高さ13.4m,ロー タ直径 10mの水平軸風車である.スピナーマウント圧力センサー は、ハブの先端部分に設置した. 圧力センサーは、ロータ回転中心 およびその周囲に2か所、合計3か所で圧力計測を行う.また、大 気の静圧は同形式の圧力センサーを地上に設置し計測する. 圧力セ ンサーの最大サンプリング周波数は 75Hz であるが、検証用の流入 風センサーのサンプリング速度 50Hz であるので 50Hz に合わせ計 測した.フィールド実験の流入風は、ロータ上流 10m に設置され た超音波風速計の3次元風速成分を用いる.フィールドの観測で は、風向風速ともに変化する.このため、正対流入時の観測データ を用いて評価する.なお、により、観測風速とセンサー検出風速は スピナーと超音波風速計との距離 10m に相当する時間差を持つ.



図1 スピナーマウント圧力センサー



図2 フィールド研究用風車

このため、流入風が10m流れるに要する時間分を時刻補正した.

実験結果

図3に超音波風速とスピナーマウント圧力センサーによる風速の時系列変化を示す.計測期間におい て平均風向は+5°未満である.図は横軸に時間[s],縦軸に風速[m/s]をとる.無線LANシステムの伝 送速度の制限により,圧力センサーのサンプリング周波数は10Hzに設定し60秒間計測を行った.図 よりセンサー風速(*U*_{sensor})は超音波風速(*U*_{SAT})とおおむね一致していることがわかる.これより, スピナーマウント圧力センサーは風速を捉えるができると考えられる.風車に正対している風向につい て評価を行ったが,ヨー流れ状態では風速の不一致が観測された.

考察

観測結果からスピナーマウント圧力センサーが風速を把握できることを示した.また,検証用の風速 データを秒単位で合わせることは,困難であることが分かった.今後,長期連続計測を実施し,10分平 均による観測精度検証を行う.なお,観測時,圧力センサーのゼロ点移動もあり,また気象条件(降 雨,降雪),温度,気圧による精度も未解明であるので,今後の計測でこれらの影響を明らかにし,実 用化につなげる予定である.また,ヨー流れ状態の場合,圧力センサー位置で流れの動圧を捉えられて いないこと,および,超音波風速の時間補正および斜め流入に伴う風速の空間的不均一,などの理由に より風速の不一致を示した.この斜め流入時の風速観測についても観測データを蓄積し,斜め流入角お よび流入風の計測精度の向上を目指す.

成果報告

本研究は、2020年6月に採択され、初めて観測データを得たので研究発表はまだ行っていない。 2021年度に、風力エネルギー学会主催、風力エネルギー利用シンポジウムで発表予定である.



図3 超音波風速とスピナーマウント圧力センサーによる風速の時系列変化

固定ハブ小形風車における可変ピッチローターの開発・研究

福岡大学名誉教授 江﨑丈巳

供試風車は、運転風速域を広げるため、固定ピッチハブを可変化したもので、複数ハブを 軸固定と遊動ハブに分け、トルク変動で遊動ハブ与圧が解除される際に差動でピッチ軸を 回すようにした。この回転は、軸前後の異相間欠歯により、トルク変動に応じ正・逆回転を 起し、起動・定格・停止運転を可能にする(cf. Fig. 1、Fig. 2)。

実験結果については、装置完成が2021年3月となるため次年度の報告としたい。



Figure 1 組立図





可変ピッチ状態

海ワシ類による海岸での飛翔と風況の関係の解明

研究代表者:徳島大学 河口洋一

1. はじめに

オジロワシが風車に衝突する事故、バードストライクは北海道で問題となっており、これま での調査から、オジロワシのバードストライクは冬期、日本海側の海岸線に設置されている 風車で多いことが報告されている。猛禽類は斜面を駆け上がる風を利用し飛翔するため、海 食崖上に建てられた一部の風車で衝突事故が多く起きることが示唆されている。しかし、複 雑に変化する海岸地形と、そこに発生する風況がオジロワシの飛翔行動に与える影響につ いては不明な点も多い。さらに、風車とのバードストライクを考えていく上で、オジロワシ の飛翔高度とブレードが回転する M ゾーンに関する知見は重要である。本研究では海岸地 形と風況がオジロワシの飛翔高度に与える影響について調査解析を行った。

2. 方法

調査では、Vectronix 社の測距双眼鏡「VECTOR 21 AERO」を使用して、オジロワシの飛 翔位置を測定した。調査は、オジロワシの風車事故が多く確認されている北海道の日本海側 に位置する羽幌町から苫前町にかけて、平坦地2ヵ所と海食崖4ヵ所の計6ヵ所で実施し た。調査期間は平成31年と令和2年の1月中旬から2月上旬にかけて合計1か月の調査を 行った。また、海岸地形で発生する風況を詳細に再現するために、RIAM-COMPACTによ る風況シミュレーションを行った。調査期間における風況情報を苫前町が管理する風車3基 で計算された風向・風速の情報を用いた。調査期間中の主要な風向は約283.5度(西風)で、 この結果に基づき、崖地形と平坦地形の両地形で風況シミュレーションを行い、風向方向の 風速(U方向)と鉛直方向の風速(W方向)について可視化を行った。

3. 結果・考察

本調査で得られた各飛翔における地上高度の中央値を、崖地形と平坦地形に分類し作成 した箱髭図を図1に示す。この時、地上高度は観測された高度(海抜高度)から地上高を差 し引いて求められた。ウィルコクソンの順位和検定の結果、崖地形の方が平坦地形よりも飛 翔高度が高いことが示された。赤い網掛け部分は海岸線に建設されている風車のブレード が回転している M ゾーンの範囲を示している。さらに、図内にその範囲内を飛翔した割合 を表示した。崖地形で55%、平坦地形で35%が風車のブレードが回転する範囲を飛翔して いた。これまでは海岸部の崖地形におけるオジロワシの風車事故に注目が集まっていたが、 今回の結果から、平坦地におけるオジロワシの飛翔と、最近海岸地形で建設が進む小型風車 との関係も詳しく見ていく必要があると思われる。

図 2 に、RIAM-COMPACT で再現した、地上高 38mでの風向方向の風速(U 方向)を 可視化したものを示す(左が崖地形、右が平坦地形)。図内に表示されているポイントは、 崖地形に 2019 年まで設置されていた大型風車を表している。崖地形では、地形による上方 向の圧縮が懸かることにより、U 方向の風速が 大きくなることが確認された。

図3に、鉛直方向の風速(W方向)を可視化 したものを示す(左が崖地形、右が平坦地形)。 図内に表示されているポイントは、平坦地形に 建設されている小型風車を表している。崖地形 では、斜面を駆け上がる風が発生していること が確認された。

オジロワシは崖地形で発生する風況を利用し て飛翔高度を維持しながら海岸線に沿って飛翔 している。崖地形では水平方向、鉛直方向の風速 が大きく、オジロワシの飛翔高度が高いことが



図1 崖地形と平坦地形での飛翔高度

示された。しかし、平坦地形では利用できる風速に制限があるため、徐々に飛翔高度が下が ってくる。このような地形と風況の関係から、オジロワシの飛翔高度は平坦地形で低くなる と考えられる。オジロワシの飛翔高度は海岸線で発生する地形に応じた風況が関係してい ると考えられる。



図 2 RIAM-COMPACT で再現した地上高 38m での U 方向の風速 (左: 崖地形 右: 平坦地形)







図 3 RIAM-COMPACT で再現したW方向の風速 (左: 崖地形 右: 平坦地形)

4. 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。

洋上風力発電の無線電力伝送に向けた基礎検討―データ解析と検証試験

京都大学大学院情報学研究科 教授 梅野 健

洋上風力発電の無線電力伝送の鍵となるのは、伝送パワーの<u>大容量化</u>と伝送距離の長距離 化である。このうち、大容量化については、単位周波数当たりの伝送パワーが電波法など により限られてくることから、伝送パワーの大容量化につながる抜本的な解決策が望まれ ていた。今年度は、実際に行おうとしていた洋上風力発電との接続試験ができなかったた め、この抜本的な解決策となる、一電力の多重化(<u>無線電力カラーリング</u>)ーの基本検証を 行った。ここでいう、<u>無線電力カラーリング</u>とは以下の様なものである。

無線電力カラーリング(オリジナルコンセプト)

A:マイクロ波無線電力伝送→ 周波数や符号による変調によって複数種類の無線電力信号を(区別可能な状態で)同時に送る。変調方式としてはパワー一定カオス拡散符号(オリジナル発明)を用いる。一まだ未実施

B:磁界共鳴型無線電力伝送→ 複数の共振周波数を送電側に割り当てて同時に送る。 受電側では共振周波数がマッチした送電電力のみ 受け取るという、無線電力伝送の識別が可能となる。 更に、受電側も送電側と同じ共振周波数のものを N 個 用意しておけば、結局、N 対 N の無線電力伝送(N 多重) が可能となる。→<u>今年度 2 対 1 で実施(オリジナルコンセ</u> プト、世界初成功)。図 1 参照

この成功の鍵となったのは、実は日本の技術がまだ残っている<u>アナログフィルタ</u>にある。 通常の無線電力伝送(磁界共鳴)の周波数特性はローレンツ型でブロードな周波数特性を持 つが、これを Cubic 型に裾野の厚さを抑えられる様にしたことから、他の共振周波数 からの電力の抑え込みに成功した。これは無線通信の多重化における干渉雑音の抑え込み の話と等価であり、フィルタで余分な電力を切り落とすことが必要である。(図2)。 つまり無線電力伝送の多重化を行うためには、一つ一つはよりシャープな無線電力伝送 の周波数特性(図2)を持たねばならず、そのためには、余分な電力を削ぎ落とす必要があ るのである。今年度は、無線電力カラーリングの最初の実証というだけではなく、こうい った基本特性が検証でき、今後の本格的大容量化につなげる基礎となるものと考える。



図1:無線電力カラーリング2対1のコンセプト実証実験(世界初)

(Motoyama and Umeno, IEICE Electronics Express (2021))



 図2:無線電力伝送(2対1)の受電側の周波数特性。図1と同じく、Motoyama-Umeno, IEICE Electronics Express (2021)より転載。
 通常のブロードな Lorentzian(点線,通常)ではなく、Cubic 則(青色)で裾野を落とせたことが無線電力カラーリングを可能にした真の技術的なポイントである。

確率モデル予測制御による浮体式洋上風力発電システムの 発電出力と浮体動揺の安定化

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.本研究では、外乱入力である風速およ び波高の予見に基づいて制御挙動を最適化するモデル予測制御に着目した.これまでに、空力-水力-弾 性-制御連成シミュレーションを通して、予測区間の流入風速場と波高変化を既知とした条件下での動 特性を推定する内部モデルを同定し、これを適用したモデル予測制御をスパー型浮体式洋上風力発電シ ステムに導入した場合に、出力変動と浮体動揺を共に抑制できることを明らかにした.しかし、予測区 間の流入風速と波高には予見誤差を伴うことから、これらの誤差に対する高いロバスト性を有する制御 方策の構築が必要となる.本研究はその前段階として、風速や波高の予見誤差がモデル予測制御を用い た場合の制御性能に与える影響を、空力-弾性-水力-制御連成シミュレーションを通して分析した.

2. 風速と波高の予見に基づくモデル予測制御

定格風速以上の高風速域におけるモデル予測制御のブロック線図を図1に示す.予測区間において, 現在のシステム出力(制御量)の計測値とその設定値,制御入力(操作量)とその設定値,さらに予測 区間における外乱入力予見値を与条件として,制御挙動を評価するコスト関数が最小となるように,制 御区間の制御入力を決定する最適制御問題(二次計画問題)を解く.得られた最初の時間ステップの制 御入力のみを適用し,次の制御周期において新たな与条件の下で最適制御問題を解く後退ホライズン手 法を採用する.コスト関数は,予測区間のシステム出力および制御入力の設定値に対する追従誤差と制 御入力の変化量の2-ノルム,および制約条件を緩和するためのスラック変数の2乗値の加重和とする. 予測区間におけるシステムの状態および出力の推定値は状態空間方程式で表す内部モデルを用いて算 出する.また,システム出力および制御入力の変化範囲などを制約条件として考慮する.

モデル予測制御において予測区間の制御挙動を推定するための内部モデルは、線形時不変の離散時間 状態方程式で表現する.学習データとする運転データでは、システムの入力に相当する制御入力と外乱 が持続的励振条件を満たす必要がある.しかし、開ループ下で制御入力を外乱に依存させずに操作する と、浮体式システムの挙動が不安定になりうる.そこで本研究では、閉ループ下での制御入力に M 系列



図1 風速と波高の予見に基づくモデル予測制御

信号(疑似乱数信号)を重畳させた場合の運転データを学習データとする. 閉ループ下での時系列デー タに基づくシステム同定を行うために,部分空間同定法を適用した.

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 FAST を使用した.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.モデル予 測制御において,ローター回転数と浮体ピッチ角速度に設定値(12.1 rpm および 0 deg/s)を与えて制御 量とし,制御入力は同期翼ピッチ操作と発電機トルクとした.ローター受風面空間平均風速と波高が誤 差なく予見できる場合に対して,予見誤差を生じる場合の制御性能への影響分析を行った.風速の予見 誤差については,ローター受風面での予見点数を1点から9点に変化させることでローター受風面空間 平均値に対する標準偏差を評価した.また,波高の予見値には,実際の波高に対して一定(-20~20%) の誤差率を考慮した.予見誤差に対するシステム運転性能値を図2に示す.風速予見点数が減少すると 空間平均値に対する風速予見誤差が大きくなり,いずれの運転性能値も増加する.特に,発電機回転数 の RMS 誤差と翼ピッチの RMS 値の増加が顕著である.一方で,風速予見点数が 5 点以上あれば,ベ ースライン制御に比べて運転性能が優れていることがわかった.波高予見誤差については,実際に流入 する波高を過剰に予見した場合には翼ピッチの RMS 値が増加し,翼ピッチが過剰に操作される.これ により浮体ピッチの RMS 値は予見誤差が無い場合よりも減少するが,風力タービンのスラスト力の変 動量が増えるため,評価している DEL はいずれも増加した.

以上より,風速や波高に予見誤差が生じる場合でも出力変動と浮体動揺に加えて,タワー基部前後曲 げモーメントの疲労等価荷重がベースライン制御に比べて低減できることを明らかにした.

4. 論文と学会発表のリスト

- T. Wakui, A. Nagamura, R. Yokoyama, "Stabilization of power output and platform motion of a floating offshore wind turbinegenerator system using model predictive control based on previewed disturbances", Proceedings of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, pp. 1327–1339.
- (2) 涌井徹也,長村篤,横山良平,風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御(制御性能に対する風況および海況の影響分析),日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集, J05312, pp. 1–5, 2020.09.13-2020.09.16,オンライン開催.
- (3) 涌井徹也,長村篤,横山良平,風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御(荷重を出力とした内部モデルの導入),第42回風力エネルギー利用シンポジウム,pp.21-24,2020.11.26-2020.11.27,オンライン開催.
- (4) 涌井徹也,長村篤,横山良平,風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御(制御性能に対する予見誤差の影響分析),日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会,2021.3.17~2021.3.18, オンライン 開催.



図2 風速と波高の予見誤差が浮体式洋上風力発電システムの運転性能に与える影響

課題番号:2020 AO-S1

研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学 」の報告

研究代表者:伊賀 啓太(東京大学 大気海洋研究所) 開催日時:2021 年 3 月 4 日(木) 13 時 30 分 ~ 16 時 30 分 2021 年 3 月 5 日(金) 10 時 30 分 ~ 16 時 45 分 実施方法:リモート会議(zoom meeting room)

研究集会の目的:近年の計算および観測技術の著しい進歩により、大気や海洋の 小規模渦から大規模循環まで計算機上で再現できるようになり、リモートセン シングやその場観測の蓄積に伴い、様々な時空間スケールの観測データが入手 可能になった。今日では、地球科学は、再現と検証の手段を得て、先端科学のひ とつに変貌している。このような状況に於いて、地球流体力学は、数値モデルや 観測の厖大なデータを整理し統一的な理解を得るのに、重要な役割を担う学問 である。本研究集会の目的は、複数の分野の地球流体力学に関連した研究者が一 堂に集まり、相互に最新の情報を交換し、異なる分野研究の相互理解を深め、新 しい学問の展開を模索するものである。

研究集会の概要:本集会は応用力学研究所と東京大学大気海洋研究所の間で交 互に開催される地球流体力学研究集会であり、今回は22回目にあたる(21 回は新型コロナ肺炎感染拡大のため中止)。開催方式に関しては、対面およびハ イブリッドを想定し準備を進めたが、新型コロナ肺炎感染が収まらず、対面集会 を断念し、リモート会議で行った。

今回は、大別して4つの分野の講演があった:1)地球流体力学に関する回転 成層流体の室内実験や理論的研究、2)海洋の乱流や大循環の力学に関する研究、 3)地球大気波動の数値および統計解析に関する研究、4)金星を中心とした惑 星大気に関する研究。ロ頭発表は14件あり、66名(4日)と60名(5日)の参加登 録者があり、常時30-40名の聴講者がいた。また、リモート会議で外部にもオ ープンにしたので、福岡まで来なくても気軽に参加・聴講できた点は大変良かっ た。

研究集会の内容は以下のように要約される。回転水槽の渦状の流れの室内実 験・理論・数値実験に関する議論、一般化された2次元流体系の2重点渦列の線 形安定性解析に関する講演があった。海洋では、海底地形上の流れの安定性の一 般条件を求めて線形安定性解析と比較した研究、LESを用いた風成乱流と熱対流 による成層海洋中の表層混合層底部におけるエントレインメントフラックスの パラメータ依存性に関する研究、乱流混合が海洋子午面循環を強化するか?否 か?を検討した講演があった。地球大気では、理想化 GCM 実験に基づく縁辺海 域ホットスポットが温帯低気圧に与える影響に関する研究、偏西風帯で持続す る渦における渦の移動に着目した解析、成層圏におけるプラネタリー波束の下 方伝播の統計解析に関する講演あった。惑星大気に関しては、数値拡散が地球型 惑星大気大循環の長周期変動に及ぼす影響を調査した研究、金星大気大循環モ デルの波動の解析やデータ同化システムの紹介、ラプラス潮汐方程式を用いた 金星熱潮汐の理論的考察に関する講演があった。大学院学生から名誉教授の発 表まであり、情報交換や教育の場として貴重な機会であった。自分の専門以外の 研究をじっくり聞く良い機会を提供できたのではないかと思う。

以下にプログラムを添付します。

九州大学応用力学研究所共同利用研究集会地球流体における波動と対流現象の力学

日時: 2021 年 3 月 4 日 (木) 13:30-16:30 3月 5 日 (金) 10:30-16:45 実施方法: オンライン(Zoom) コンビーナー:伊賀 啓太(東京大学大気海洋研究所) 所内世話人:山本 勝(九州大学応用力学研究所)

プログラム

- 3月4日(木)
- 13:30-13:40 趣旨説明(伊賀 啓太)
- 13:40-14:10 *田中 祐希(福井県立大海洋生物資源) 海底地形上の流れの安定性:二層準地衡系における一般的条件と 線形解析
- 14:10-14:40 *牛島 悠介(気象業務支援センター)・吉川 裕(京大理) 風成乱流と熱対流による成層海洋中の表層混合層底部におけるエントレインメントフラックスのパラメータ依存性に関する研究
- 14:40-15:10 *吉川 裕(京大理)・川崎 高雄(東大大気海洋研)・羽角 博康(東 大大気海洋研) 海洋子午面循環と深層乱流混合

休憩

- 15:30-16:00 *伊賀 啓太 (東大大気海洋研) 円筒容器内で回転する円盤上の軸対称流と非軸対称な諸現象
- 16:00-16:30 *山本 勝(九大応力研) 縁辺海域ホットスポットが温帯低気圧に与える影響:理想化実験 によるアプローチ

3月5日(金)

10:30-11:00 *岩山 隆寛(福岡大理)・渡邊 威(名エ大エ) 一般化された2次元流体系における2重点渦列の線形安定性解析

- 11:00-11:30 *山本 晃立(東大大気海洋研)・伊賀 啓太(東大大気海洋研) 北半球の偏西風帯で持続する渦における渦の移動に着目した解析
- 11:30-12:00 *松山 裕矢(九大理)・廣岡 俊彦(九大理) 成層圏におけるプラネタリー波束の下方伝播の統計解析

休憩

- 13:00-13:30 *太田 圭駿(九大総理工)・山本 勝(九大応力研) Smagorinsky モデルが大気大循環の長周期変動に及ぼす影響
- 13:30-14:00 *鈴木 杏那(京産大理)・高木 征弘(京産大理)・安藤 紘基(京産大 理)・杉本 憲彦(慶應大)・松田 佳久(東京学芸大学) 大気安定度に対する金星熱潮汐波の依存性
- 14:00-14:30 *松田 佳久 (東京学芸大) 金星熱潮汐波の水平構造の潮汐理論による解釈

休憩

- 15:00-15:30 *杉本 憲彦(慶應大)・藤澤 由貴子(慶應大)・ALEDAS-V team ALEDAS-V(金星大気データ同化システム)を用いた研究の紹介
- 15:30-16:00 *廣瀨 拓海(九大総理工)・山本 勝(九大応力研)・池田 恒平(国立 環境研)・高橋 正明(国立環境研) 大気大循環モデルを用いた金星大気の短周期擾乱の解析
- 16:00-16:30 *高木 征弘 (京産大理)・安藤 紘基(京産大理)・杉本 憲彦 (慶應 大)・松田 佳久 (東京学芸大)
 金星大気中の4日波・5日波の成因と力学的性質について

16:30-16:45 情報交換/総合討論

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。

本年度は、市中で新型コロナウィルス感染症の感染者が出ている状況であったが、九州大学の行 動指針に従い感染防止に配慮し、事前参加登録による人数把握により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。

2. 開催概要

開催日時:	2020年12月15日(火) 午後(14:30~17:15)
	16日(水) 午前(09:45~12:30)
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:	15 日 15 名
	16日 20名

3. 発表概要

本年度はコロナ禍で行動が制限される中、合計8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 4 件の講演があった。琉球大学の玉城は、送受信機部分に FPGA (Field Programmable Gate Array)を用いた送信信号発生と受信機能の構成法について報 告した。従来のアナログ回路に比較してコストと消費電力の面での効果が期待される。新潟大学の 小泉は、新潟大学工学部屋上に設置した水平垂直偏波の送受信可能なレーダでの海面からの散乱信 号ならびに船舶からの反射波について報告した。水平偏波での波浪散乱は今まで誰も扱っていない 分野であり初期的結果として興味深いものである。琉球大学の永江は、アレイアンテナを用いた海 洋レーダの計測に到来方向推定法である MUSIC を応用した手法を提案し、シミュレーションによ り評価するとともに実観測データへの適用を報告した。中部電力の横洲は、現在中部電力浜岡原子 力発電所に設置稼働している海洋レーダの水産業等への利用を提言しその計画について報告した。 今後、静岡県水産・海洋技術研究所や地元漁協との連携方策が課題となろう。

2日目も4件の講演があった。琉球大学の村上は、短波海洋レーダのドップラスペクトルの2次 散乱に対しベイズ法を応用した波浪スペクトル推定法を適用し、シミュレーションで各パラメータ の影響を評価するとともに、宮崎県設置の 13.5MHz レーダのドップラスペクトルを用いて、沖合 の GPS 波浪計と比較した。過小評価の原因追及が途上であり、今後検討を要する点である。電力 中央研究所の坪野は、国土交通省が伊勢湾に設置運用しているレーダに関して、2008~2013年に 実施したのと同様の方法にて 2016 年以降の流速分布を詳細に検討し、レーダを更新したことに対 応して、2016 年以前と比較し M2 潮の分散共分散での長軸が小さくなりモデルとも一致している こと、視線方向流速での誤差(変動)は約 1cm/s であることを報告した。長期データの収集にかか るデータの傾向の検討は有用であると考えられる。JAMSTEC むつ研究所の金子は、津軽海峡東部 を観測するレーダを用いて 2017 年から 2019 年の気候値から津軽暖流流軸の季節変動を論じた。 津軽海峡で特徴的な 13.7 日周期の変動が上流から下流に伝搬する過程で傾圧不安定により流軸を 南北に揺れることと太平洋に抜けるまでに約10日要することを示した。北海道大学低温科学研究 所の江淵は、稼働開始から18年になる宗谷海峡に設置したレーダの長期連続観測から、季節変動・ 経年変動を概観した。その表面流速と流下方向(稚内-網走間)の水位差比較すると、季節変動を 除いた水位差偏差と南東流偏差は相関係数が 0.5 を切り、夏季は特に異なることを示した、また、 沖合の衛星高度計からの水位データとの比較から、表面流速の指標としては水位差より衛星高度計 との組み合わせの方が良いことを示した。また、長期間での機器劣化に対し観測精度への影響は大 きくないと報告した。

最後の総合討論では、海洋レーダ導入にかかる課題や得られるデータの実応用に向けての連携方 策などについての意見交換が行われた。

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: 2020年12月15日(火)午後~16日(水)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15日	(火)		
14:30-14:35	趣旨説明		
	藤井智史	(琉球大)	

14:35-15:05FPGA よる短波海洋レーダ実現へ向けた検討玉城大地・長名保範・藤井智史(琉球大)

- 15:05-15:35 垂直・水平偏波を用いた偏波海洋レーダによる実験結果報告 小泉達寛・山田寛喜(新潟大)、藤井智史・長名保範(琉球大)、宇野亨(東京農工大)
- 15:35-15:45 休憩
- 15:45-16:15 アレイアンテナの流速計測における到来方向推定法の適用について 永江要・藤井智史(琉球大)

- 16:15-16:45浜岡海洋レーダの水産業への利活用に関する検討
横洲弘武・橋詰正広(中部電力)
- 16:15-17:15 情報交換

12月16日(水)

- 09:45-10:15 実海域における短波海洋レーダを用いた波浪計測手法の検証 村上裕馬・藤井智史(琉球大)
- 10:15-10:45 2016 年以降の伊勢湾海洋レーダで得られる流速の精度 坪野考樹 (電中研)
- 10:45-11:00 休憩
- 11:00-11:30 海洋短波レーダーによって捉えられた津軽海峡東部における前線波動
 金子仁・佐々木建一(JAMSTEC むつ研)、阿部泰人(JAMSTEC むつ研/北大院水産)、
 脇田昌英(JAMSTEC むつ研)、奥西武・長谷川大介・田中雄大(水産機構資源研)
- 11:30-12:00 短波海洋レーダによる宗谷暖流の長期観測 江淵直人・深町康・大島慶一郎・三寺史夫・高塚徹・石川正雄・白澤邦男・若土正曉(北 大低温研)
- 12:00-12:30 総合討論

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

研究集会では、国内の化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングに関わる幅広い専門 家が数多く集まり、最新の成果を発表する予定で令和3年3月5日に予定していたが、新型 コロナウイルス蔓延に関わる緊急事態宣言の発出により中止となった。

予定されていた研究集会の主要トッピクスには、共催していただいた大気環境学会モデ リング分科会のモデル相互比較プロジェクト J-STREAM (Chatani et al., 2020) に関する 情報交換があるが、それに関する計算結果の交換をはかるために大容量の Hard Disk を購 入・参加予定者に回覧して次年度以降に企画されている共同利用研究集会でのモデル相互 比較研究に活用することとした。

開催予定で準備していた研究集会のプログラムは資料の通りである。

参考文献

Chatani et al.: Identifying key factors influencing model performance on groundlevel ozone over urban areas in Japan through model inter-comparisons, Atmosoheric Environment, 223, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117255

第5回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 (予定していたプログラム、緊急事態発出で中止)

日時 2021年3月5日(金)午後~6日(土)午前 予定 場所 九州大学応用力学研究所 多目的研究交流室W601

プログラム

趣旨説明 鵜野 伊津志 (九州大学応用力学研究所)

一般講演 1

櫻井 達也 (明星大学)

夏季の関東におけるゾンデによるオゾン立体観測

嶋寺 光 (大阪大学)

船舶燃料油硫黄分規制強化による瀬戸内海での大気質改善効果のモデル評価

黒川 純一(アジア大気汚染研究センター)

アジア域の長期ヒストリカルインベントリの開発

板橋 秀一 (電力中央研究所)

CODID-19 によるロックダウンの大気環境へのインパクト

特別講演

- 大原 利眞(国立環境研究所) 福島第一原子力発電所の事故と大気環境解析のまとめ
- 鵜野 伊津志(九州大学応用力学研究所) アジアスケールの大気環境モデリングの発展と将来展望

一般講演 2

茶谷 聡(国立環境研究所)

J-STREAM の目的・概要・到達点と今後の課題

山地 一代 (神戸大学)

J-STREAM の参加機関と主な結果

山村由貴(福岡県保健環境研究所)

九州地域の光化学オクシダント削減施策策定のためのモデル解析

弓本桂也(九州大学応用力学研究所)

機械学習を用いた大気環境予測の予備的研究

参加予定者 (所内3名、所外13名)

所内

鵜野伊津志、弓本桂也、王哲

所外

板橋 秀一、櫻井 達也、嶋寺 光、黒川 純一、大原 利真、植松光夫

茶谷 聡、山地 一代、永島 達也、菅田 誠治、森野悠、早崎 将光、山村由貴

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 舩越 裕紀

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2年12月25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の影響を考慮 し,WEB 会場と現地会場を併設し,1日間のみの開催とした.午前の部は都道府 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5つのテーマを 設定し情報交換と議論を実施した.午後は研究発表として,発表15分質疑10分 の1題あたり25分で,5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 32 名が参加した.(参加者の詳細については別添参照)

午前の部では、急潮の予測から被災後の対応まで、防災に関しての情報共有および新 しい技術についての議論が行われ、急潮情報の発信、空中ドローンの運用、リアルタイ ムの海洋観測機器などが未導入の都道府県が、それらを今後活用していく端緒となっ た.また、これまで注目度が低かった冬の急潮災害について、情報共有を活発化しつつ、 今後,研究の発展を目指すことで合意した.最後に,書籍の紹介や都道府県の初任者向 け勉強会を開催することを決定し,海洋物理研究者の知識の底上げを図ることを合意 した.

午後の部では,都道府県地先での観測結果や発生現象について,海洋物理,水産,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,モデルでのシミュレーション結果を現場の結果と比較検証した発表では,海洋 環境の変動や,変動が漁業にもたらす影響を考える上で重要な知見を得ることができ 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」 (代表者:舩越裕紀、九大応力研世話人:千手智晴)

日程:2020年12月25日(金)9:45~15:40

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 3F(301 号室 ※変更の可能性あり)

 1. 開会・挨拶および開催趣旨
 9:45

 2. 自己紹介
 9:50

 3. 都道府県 悩み相談会
 10:00

 (1) 趣旨説明
 10:00

 (2) 悩み相談会
 10:10

< 休 憩 > 12:00

4. 研究発表および話題提供

- (1)京都府の定置網漁場で計測した潮流観測結果
 (現地)13:10
 舩越裕紀(京都府農林水産技術センター海洋センター)
- (2) 丹生定置網における急潮被害について (WEB) 13:35岩崎俊祐(福井県水産試験場)
- (3) 越前岬沖の海況変動と定置網の漁模様の関連性(現地)14:00兼田淳史(福井県立大学海洋生物資源学部)
- (4) 富山県における漁業者参加型の海洋観測(現地) 14:25小塚 晃(富山県農林水産総合技術センター)
- (5) 佐渡島よりも下流域における対馬暖流沿岸分枝の季節変動・経年変動

(WEB) 14:50

井桁庸介(水産研究・教育機構 水産資源研究所)

総合討論
 その他(次年度について)
 別会
 15:15
 15:40

270

2020 年度 九大共同利用研究集会 12/25

「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」議事録

1. 開会・挨拶および開催趣旨

趣旨説明(代表 京都府 舩越)

急潮防災研究集会開催の経緯について、2014 年度に急潮現象解明プロジェクトが終了し たのち、継続して急潮の知識普及や各地先での解明について話し合うため、2015 年に井桁 氏(旧・日水研)が九大の共同利用研究制度を利用して急潮研究集会を発足した。この研 究集会は5年間実施し、一定の成果と役目を終え、昨年終了した。しかし、さらに継続し て急潮について議論する場が必要だと考え、これまでの研究集会の目的に加え、漁具被害 や防災について議論することも目的に含めて、新たに本研究集会を発足した。以上の理由 から、本研究集会には、各府県や大学の研究者に加え、製網会社や観測機器メーカーにも 参加いただいた。

(准代表 富山県 小塚)

沿岸で発生する急潮は地形の影響や潮流の変動等、各地先によって発生要因は様々であ り、特定することは難しい。また、急潮による被害を受けない定置網にするためには、漁 具のリスク管理も予測と同様に重要である。当会では、各地先において発生する急潮の原 因の特定に資することや、急潮に関する知識を普及し、今後も伝えていく場として続けて いきたい。

2. 自己紹介

今回は WEB での参加者や初めての参加者も多く、スムーズな議論が困難であると予想されたことから、活発な議論を促すため、可能な限り顔を画面に映した状態で自己紹介を実施した。

3. 都道府県 悩み相談会

・趣旨説明(富山県 小塚)

急潮は原理の解明や予報モデルの研究は進展し、成熟した。漁具被害の防止という最終 目的を達成するためには、漁業現場と研究をつなぐ県水試の役割が重要である。しかし、 県職員は異動があり、対応レベルが変化しやすいので、県間のつながりを密にし、ノウハ ウを共有し、地域として急潮防災体制の安定化を図る必要があると考え、悩み相談を行い、 全体のレベルアップを狙いたい。

事前アンケート(資料あり)を基に各自1分で最も興味があることを説明した後、5つの トピックについて、話題提供者から話があったあとに、テーマに沿って自由に話した。

① 急潮が起きる前の対応について 京都府 舩越 ※スライドあり

・急潮予測を行う際に参考にする情報は、スライドのとおり。急潮予報は FAX および LINE で情報共有し、後日、急潮対策等に関するアンケートを FAX で行う。

Q:どの急潮予測モデルの急潮指数を参考にしているのか(鳥取・藤岡)。

A: DREAMS(以下 DR と略記)の潮流予測を参考にしている。しかし、DR の予測流速は実際 の潮流よりも過大評価している印象(実際はモデルの急潮予測よりも沿岸寄りに定置網が あるため)があり、定置網付近での実際の流速は少し弱めに(モデルの潮流×0.8 倍程度) 見積もるようにしている(京都・舩越)。

0:日水研の公表している急潮指数は、岸近くは沖の情報を平滑化して沿岸に組み込んで算 出しているため、実態に近いと思う(新潟庁舎・井桁)。

Q:急潮情報は何日前に出しているのか。

A:波浪や潮流の状況にもよる。漁業者の作業を考慮して出すようにしている。また、漁業 者自身でも DR コマンダー、風情報を参考にしている(京都・舩越)。

0:石川県では風に起因する急潮がほとんどで、南西風がどれほど吹くかが重要。DRと気象 協会の予報を見ながら総合的に判断している(石川・奥野)。

② 急潮が起こった後の対応 神奈川県 田村 ※資料あり

・相模湾西部・江之浦ブイの流況、JAMSTECの海流予測、その他の相模湾内のリアルタイム 海況ブイを参考にしながら、相模湾東部の城ケ島東側で2時間以上北向きの流れが出た場 合は注意報を出す。台風は台風安全情報を参考にしており、進路をみながら最低3日前ま でに出すようにしている。

・急潮予報を発出した後に、別紙のアンケートにより情報収集を行っている。アンケート では、定置の模式図をつけて、担当研究員以外の、定置の知識が少ない普及員などでも被 害のあった部位について聞き取りやすいように工夫している。

・台風等のイベント後に、空中ドローン撮影した写真を定置漁業者に提供。

0:城ケ島北上流は、房総半島東岸の沿岸補足波をモニターするのに使う。大島被害水道に 入っていくシグナルを捉えられれば急潮を早く察知できる(新潟庁舎・井桁)。

0:京都府では FAX でアンケートを行い、半分以上から回答が届く。また、3 年前に全国で初めて単県として急潮被害の補償を行った。それ以来、大規模な被害があった場合は、大敷の被害図の提出と、漁協の購買部の資材発注状況を聞き取りにより被害金額を把握している(京都・舩越)。

- 0: 台風19 号により甚大な被害を負った際には、空中ドローンにより被害状況を把握した。 来年度には、70万円程度のドローンを購入し、網なりや被害状況の把握を行うこととし ている(神奈川・田村)。
- 0:水中カメラ、ドローンで被害状況の確認を行っている(ホクモウ株式会社・松平)。
- 0:図面を元に被害状況の確認を行っている。また当社開発の漁具シミュレーション(NARA)
 システムで被害時の状況を再現したり、今後の方策を提供したりしている。ユビキタス 魚探では、実際の流向流速を確認することも可能(日東製網株式会社・細川)。
 0:現在、急潮に強い網づくりを定置会社と検討している。今後、製網会社と相談してい
- き

たい。(長崎県)

③ 未解明の漁具被害現象について 石川県 奥野 ※資料あり

・資料に基づいて、2018年3月および2020年1月の冬の急潮現象について説明。2018年3 月には非成層期にも関わらず、日本海の低気圧で七尾沖(岸端)の定置網のワイヤーロー プが切断するという大きな被害が発生。実測の流速計(10m)と急潮予測モデル DR コマンダ ーでは約30 cm/sの流れで、強い流れがあったデータはなく、中層、沖合についても強い流 れはみられず、原因は不明であった。

※小塚注 同じ低気圧で、新潟の境市振定置も全損の被害があったと聞いている

・2020年1月、低気圧の通過に伴い、現場では強い流れが観測されたが、急潮予測モデル DRコマンダーでは予測できていなかった。

0:非成層期においても強い風が強い沿岸補足波を発生させる。七尾湾の淡水由来の塩分成 層があったのではないか。成層の状況により、急潮の発生が左右される場合がある。(新潟 庁舎・井桁)

Q:京都府でも冬に同様の急潮が発生することがあるが、井桁さんと同じく強風の影響と理 解している。ところで、冬の急潮に関してモデルの精度がかなり低いと感じているが、ご 意見等伺いたい。(京都・舩越)

A: 原因がわからないが精度が悪いことは認識している。(九大・広瀬)

0:冬の躍層の深さが影響している可能性がある(広瀬・舩越)

0:深い部分はモデルの鉛直解像度が低いので躍層が反映しにくい(水研新潟・井桁)

0:冬の低気圧は、移動が早く気象予報が難しいため、急潮モデルに正しい気象条件が反映 されにくい。3時間ごとにデータを更新すれば結果が変わるかもしれない。急潮には密度 躍層の深さが重要で、鉛直解像度が急潮の再現性を左右する。(九大・高山)

0: 京都府の一部や福井県でも(兼田先生)多層で周年観測を行っている。冬の急潮が観測 された際はみなさんに情報共有してメカニズム解明につなげたい(京都・舩越)

④ リアルタイムの潮流ブイについて 高知県 松田 ※スライドあり

・資料に基づいて説明があり、ソーラーパネル式、内臓バッテリーで年 1 回の電池交換が 必要。東西のブイのメンテナンスだけで、月の 1/4 程度の業務時間を割いている。

Q:係留式 ADCP で表層から下層にかけての流れを測っているが、中層、底層のデータが実際と異なると漁業者から指摘されたことがあり、海底付近の 45m の流れが測れず、設置水 深を変更した。高知県ではそのようなことはあるか。(鳥取県・藤岡)

A:黒牧ブイの下層で明らかな異常値がでていることはあるが、リアルタイムブイでは今の ところない(高知・松田)。 A:係留式ADCPで、海面から海底の流れを測った場合、水深に対して海底直上の15%の 測定値は、乱反射のため使えないと分かっている(新潟庁舎・井桁)

(ブイの生物汚濁、メンテナンスについて)

0:石川県は漁業者に謝金を渡して、ブイのメンテナンスを委託することもある(石川・奥野)。

0:係留式流速計では、本体部に船底塗料を塗れば 2~3 か月は生物が付着せず、測定部の 汚濁もある程度防ぐことができる。ロープは半年ごとに交換し、使用したものは干して清 掃している(京都・舩越)。

0:日東電工という会社から、「海洋生物付着抑制フィルム MARINGLIDE[™](マリングライド)」 という商品がでている(日東製網・細川)。

⑤ 海洋物理の勉強について 富山県 小塚 ※スライドあり

・「小川嘉彦,海洋水産資源開発センター,1997.水産技師のための海況学入門」をベース に、ブルーバックスの一般向けの海洋学の本「海流の物理―海の中の風と嵐 永田豊 著」 から勉強し始めた。近年のブルーバックスでは、「保坂直紀,謎解き・海洋と大気の物理」 がある。

 ・流速データについては、京都府熊木さん作成の「急潮観測データ入力フォーム.xls」で 簡単に流れの基礎統計は作れる。水研機構の研修の手厚いRでの解析、作図を勧めた。
 0:より沿岸の海洋物理現象に特化した本として、以下の書籍の紹介があった(九大・千手)。

・「海の科学-海洋学入門」(恒星社厚生閣) 柳哲雄 著 ←最入門

・「潮目の科学」(恒星社厚生閣) 柳哲雄 著

・「内湾の環境科学」(培風館) 西条八束 編 ←第3章「内湾の物理環境」宇野木早苗

・「日本海 その深層で起こっていること」(ブルーバックス) 蒲生俊敬 著 ←日本海の話

・「海洋観測データの処理法」(恒星社厚生閣)柳哲雄 著 ←データ解析の入門

4. 研究発表および話題提供

(1)京都府の定置網漁場で計測した潮流結果

舩越裕紀(京都府農林水産技術センター海洋センター)

・京都府では、これまでの研究成果から急潮の要因がほとんど解明され、リアルタイム急 潮予測システム DR コマンダーを用いた急潮予報も高い精度で的中している。

・急潮の防止は大事だが、漁獲機会の損失になるので、漁具被害が発生する急潮と、そうでない急潮「危険な急潮」を分けて特徴を調べた。

・10,30mの観測を連続して行った結果、30mの流速が速かった時に被害が発生する傾向にあり、この水深の流況を把握する必要がある。

・漁場ごとに急潮発生水深の特徴が見られたことから、今後、海域ごとの特性を踏まえて 複数層の流況予測をチェックすることで急潮情報の更なる高精度化につながる。 ・急潮の情報伝達にLINEグループを活用している。定置網関係者だけでなく、市町村の担当者も入っている。網を再設置するタイミングなども細かに情報提供できている。
 ・急潮後は高速な取締船等で空中ドローンを使った空撮に行く。

0:DJI 社の RTK という空中ドローンは、飛行ルートを登録しておいて自走して戻ってくる 設定ができるため、定置被害の確認に使っている(値段 70 万円)(神奈川県・田村) 0:福井県の観測でも躍層面付近での急潮が多く観測されている。(福井県大・兼田) 0:定置のブイに GPS を付けたら流れがわかるかもしれない。(新潟庁舎・井桁) 0:10m と 30m 深の流速の違いは、なかなかモデルで表現するのは難しい。内部波というも のは水平方向だけでなく、鉛直方向にも伝搬しながら消散している過程なので、鉛直伝搬 まで数値モデルで皆さんが「使える」レベルで再現・予測するのはかなり困難だ。次年度 に DR_C の鉛直分解能を向上させる予定があり、これで少しでも良くなることを期待してい る(九大・広瀬)

(2) 丹生定置網における急潮被害について 岩崎俊祐(福井県水産試験場)

・敦賀半島西部の丹生定置で、2020年9月1日に垣網がずれるなどの漁具被害が発生。直前の風速は北風6mで、特に風は強くなかった。8/30—8/31に現場の観測ブイの通信が途絶 えており、確かに急潮はあったようであるが、発生原因は不明のまま。9月下旬以降エボシ 貝の生物汚濁が多くなった。

0:食用クエン酸で貝殻は取れるが、エボシ貝は難しい。船底塗料とマスキングシールで防 汚する(京都・舩越)。

0:日東製網社の定置網魚探「ユビキタス魚探」の潮流計データについて現在は魚探の画面 にリアルタイムで表視されるだけとなっているが、時系列データの可視化の要望が多いの で、再来月にグラフ表示機能と csv 出力機能の追加を予定している。(日東製網・細川) 0:ホクモウ社の定置網魚探「うおっちブイ」には流速計はつかないが、定置網にピンガー を取り付け、深度をリアルタイムで見られる機能がある。(ホクモウ・松平)

(3) 越前岬沖の海況変動と定置網の漁模様の関連性

兼田淳史(福井県立大学海洋生物資源学部)

・福井水試では ADCP のブイ、福井県大では電磁流速計のブイを運用している。嶺北の鷹巣 定置のハマチ(ブリの若齢魚)の大漁について、水温、流況との関係を考察。2013~2018 年 を対象とした。

・日別漁獲量、水温データの5年移動平均からの偏差を計算し、5日間連続で平均漁獲量を 500 kg上回った場合を大漁、10日間連続で平年漁獲量を下回った場合の漁獲が極小の日を 不漁日と定義した。漁業者の経験則では、低水温の方が好漁と言われていた。 ・水温との関係をみると、ハマチは水温が低いときに漁獲が増え、水温が高いときには不 漁になる傾向。

・豊漁、不漁をそれぞれ7,5日抽出し、AVISOの海面高度の平均場を作成したところ、冷水渦が鷹巣定置沖に接岸すると大漁で、不漁はその逆のパターンとなった。

・好不漁は、冷水域(海面高度低)、暖水域(海面高度高)の離接岸によってハマチの回遊 ルートが変わることが原因で、冷水域が接岸した際には、岸よりに回遊し、暖水が接岸し た際には沖を回遊している可能性があり、ハマチの好適水温が影響していると考えられた。

0:網の広がり具合が漁獲量に影響を与えているかもしれない(京都・舩越)。

0:ブリの越冬と北上などの特性を考慮して調べるとよいと思う。(富山・小塚)。

0:ブリの標識放流の結果では、大きく回遊するのではなく基本的に岸に張り付き、水温が 低いときは瀬に張り付く。4,5月に成層が発達すると、表層まで上がってくる傾向があ った(石川・奥野)。

(4) 富山県における漁業者参加型の海洋観測

小塚 晃(富山県農林水産総合技術センター)

・2 つの漁業者参加型の観測を行った。

・1つ目は定置網に水温深度ロガーを付けた実験。定置網のかえし先端と網底の2か所に深度計を設置した。定置網は順流時、逆流時で非対称に吹かれるため、2箇所の相対的な深度を解析することで、深度データから流れの向き、強さを推測することができる。不漁の原因と言われる逆流の時は、網底が持ち上がることで定置網の容積が小さくなり入網が妨げられていることを可能性がある。定置網漁業者はかえしの先端を重くしていたが、逆流時に網底がかえしよりも吹きあがり魚を押し返している可能性がある。

・2 つ目は、JFE アドバンテック社製の漁業者用小型水温塩分計 smart-act を用いた沿岸の 海洋観測に関する話題。シロエビ漁船に同機械を貸して漁網に取り付けて操業を行っても らい、同じ海底谷内における日別の水深 200m の鉛直データを収集した。取得した観測デー タはドロップボックスへ自動アップロードされ、ネット経由で漁業者に鉛直水温分布をフ ィードバックのシステムを作成。観測結果から、固有水上部の上下動(内部波)が確認さ れた。

Q:クラゲや魚の入網で、流速と網の吹かれの関係は変わるか? (新潟庁舎・井桁)

A:魚は網が吹き上がると出ていくのでわからないが、クラゲはありえるし、漁具被害の要因ともなっている。(小塚)

Q:網の深度から流速を推計して、定量性はあるか?(九大・千手)

A: 事前に同漁場で流速計と網深度のデータを突合しておけば、何 m 吹き上がった時に少な くとも何 cm/s 以上の流れがあったということはできる。ただし、経時的な、網の汚れの影 響も大きいと思っており、今後の課題。(小塚)

0:漁業者はこれまで浮子(台、矢引)の沈み具合を流向、流速の目安としてきたので、そちらに深度ロガーをつけてみてはどうか。(日東製網・細川)

A:確かにそちらの方が直接的でよい。今回は網自体の動きを見ることが主目的であったので、今後検討したい。(小塚)

0: 京都府の上野が網容積と漁獲の関係について報告したものがあるので参考になると思う。 (京都・舩越)

Q:smart-act の固有水の部分のデータについて、モデルと整合性は検証しているか?(福井県大・兼田)

A: 今後の課題だが、あまりモデルとは合わない印象。(※この件について広瀬先生より、 北風と対応する可能性が高いので確認した方がいいとのアドバイス)

(5) 佐渡島よりも下流域における対馬暖流沿岸分枝の季節変動・経年変動

井桁庸介(水産研究・教育機構 水産資源研究所)

・山形沖における暖水渦の形成メカニズムについて調べた。富山トラフ上で暖水渦の成長 が、対馬暖流の沿岸分枝の流路遷移(越佐海峡→佐渡沖合)に関わっていることをこれま で明らかにした。2012、2013年は沖合に遷移したが、2014年は途中で枯れた。流路遷移は 柏崎一小木(佐渡)の潮位差の日変化量を指標として区別することができ、変化量が 7.5mm/dayを上回ると流路遷移が起きている。日本海北部海域の200m水温分布から、暖水 の面積を計算したところ、経年変動は流路遷移の有無と一致。

Q: 寒ブリの北越地方への来遊、配分と関係するテーマ。そもそも流路遷移の発生の有無は 何と関係するのか?流路遷移と、能登沖の冷水塊に関係はあるか?(富山・小塚)

A:遷移しないから能登沖暖水が膨らむということではない。(井桁)

総合討論

・誰もが使える FRA-ROMS での粒子実験は使用できるようになれば情報提供する (新潟庁舎・ 井桁)

・DR-C のサーバーが変更になった。DR-C1 となったので、DR コマンダーを作成、利用している県は対応してほしい。(九大・高山)

・DR-Cでは計算が1日2回行われていたが、DR-C1へのサーバー変更に伴い、スパコンの マシンタイムの都合で計算が1日1回となった。高頻度の計算を求められているところ、 申し訳ないが承知いただきたい。一方、気象モデルGPVの出力がこれまで30時間先までで あったものが、50時間先まで公開された。今後、DR-C1にも反映させたいと思っている。(九 大・高山)

・来年度も今年度と同様に複数県担当で申請する予定である。採択された場合は、今年度 同様 WEB 併設の会議とし、現地会場の場所は九大を考えている。(京都・舩越)

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 Asia

研究代表者 石坂丞二(名大宇宙地球環境研究所)

1. 目的と経過

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。例えば日本海について考えると、東シナ海から対馬 海峡を通して流入する熱や大陸河川起源の淡水、栄養塩やプランクトン等の 様々な物質は、日本海の物質循環や生態系に大きな影響を及ぼしている。また 近年の数値モデル研究によると、日本海のメインストリームである対馬海流の 流量の季節変動は、下流域であるオホーツク海の冬季の風応力と関連している ことが示唆されており、日本海の環境変動を理解するためには、その上流域・ 下流域を含めた東アジア縁辺海全体と、その上空の大気をも含めた一体的な視 点が重要と考えられるようになってきた。九州大学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も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とから、過去数年間にわたり九州大学応用力 学研究所の共同利用研究を利用し、研究集会を開催してきた.

2018年度まで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として、新学術 領域研究「海洋混合学の創設」のA2-4 班と合同で研究集会を開催してきた.今 年度も、新たに鹿児島大学のメンバーを加え、東シナ海・日本海および黒潮に

278
関する研究を主体とした対面での研究集会の開催を2020年9月以降に計画したが, 新型コロナウイルスの感染拡大の影響で中止せざるを得ない状況となった. さら に2021年1月にもwebシステムを利用したリモートでの開催を目指したが,参加 予定者の調整がつかず,実施は見送りとなった. このような状況の中で,2021年 1月20日に研究代表者(石坂)と応用力学研究所のコアメンバー(千手,遠藤) との間でZoomによる遠隔会議を開催し,本年度の研究集会の実施方針と次年度以 降の対応について協議した. その結果,以下のことを確認,決定した.

- 本年度の研究集会は、時間的制約もあり、単独での開催は難しいとして中止する.その代わり、遠藤が中心となって進めている台湾大学との国際化推進共同利用研究(20EA-2, Turbulent mixing in the Kuroshio Current off Taiwan,研究代表者: JAN Sen, National Taiwan University)との遠隔による共同研究集会を1月25~26日に実施する.
- ・本年度の研究経費は、2021年1月に予定していたリモートでの開催を念頭に、遠隔会議用のパーソナルコンピュータ、スピーカーフォン、PC付属用品、発表記録用のSSD等の購入に充てたことを報告した.なお、これらの物品は本年度の共同研究集会、および次年度以降の研究集会で活用する.
- ・本研究集会と連携する形で、遠藤を中心に推進している名古屋大学宇宙地球環 境研究所との共同利用・共同研究の研究集会は、本年度の開催は見送りとする.
- ・来年度も研究代表者を石坂,所内世話人を千手として,東アジア縁辺海・黒潮 周辺での物理・化学・生物過程を対象とした共同利用研究集会を申請する.
 今後の新型コロナウイルスの感染状況にもよるが,本年度の反省を踏まえて,8 月にアナウンスを開始し,10月後半には開催できるよう,早めに準備を進める.
 また,リモートと対面のハイブリッドでの研究集会の開催を目指す.
- 2. 研究集会の概要

前述した通り,研究集会は国際化推進共同利用研究(20EA-2, Turbulent mixing in the Kuroshio Current off Taiwan,研究代表者: JAN Sen, National Taiwan University) と合同で,2021年1月26日(火)から1月27日(水)の2日間にわたり,Zoomを用いたリモート研究集会として行った.末尾に研究集会のプログラムを添付するが,日本と台湾で1時間の時差があるため,このような時間設定となった.

出席者は、国立台湾大学4名、国立成功大学(台湾)1名、海洋研究開発機構(JAMSTEC)1名、東京大学1名、東京海洋大学2名、愛媛大学7名、九州大学3名、名古屋大学1名であった.

研究集会初日は、主に海洋物理に関する研究発表がなされた.遠藤による研 究集会の趣旨説明に引き続き、台湾大学のJan教授から台湾での黒潮研究の経 緯と最新の研究航海の成果、今後の研究計画についての紹介があった.続いて Changは台湾東方のI-Lan Ridgeでの観測結果を紹介し、sill上でのsmall scaleの 物理過程と混合への寄与について議論した.またChenは海山上のシアーにと もなう混合について、モデル計算結果に基づき考察した.堤は過去に行ったI-Lan Ridgeでの観測結果とモデル計算結果との比較を通して、同海域における 海水混合に対するI-Lan Ridgeの重要性を示した.

研究集会2日目は、栄養塩輸送や生物過程に重点を置いた研究発表がなされた.まず長井は、nutrient streamとしての黒潮が、その流程の中のどこで鉛直混合によって栄養塩を獲得するかについて議論した.続いてDuranは、黒潮が日本南岸に接岸したときの栄養塩供給過程についての研究成果を発表した.Gaoは、黒潮が島嶼を通過する際に引き起こす湧昇とそれにともなう植物プランクトンのbloomingについて、数値モデル計算結果に基づき考察した.

すべての研究発表の後で総合討論が行われ,コロナ禍終息後の日本と台湾と の間の共同研究の可能性について議論された.また,次年度以降も研究集会等 を通じた情報交換,成果発表を継続して行くことを確認した.

Online meeting on turbulent mixing in the Kuroshio current over the topography

Time Table in JST

January 26 (Tue.)

14:30 Opening remarks

- 14:35 Sen Jan (IONTU): Update of the result from direct TKE dissipation rate measurements off Taiwan with the data collected in 2020
- 15:05 Ming-Huei Chang (IONTU): Observations of Kuroshio flowing over a sill: small-scale processes and turbulent mixing
- 15:35-45 Break
- 15:45 Jia-Lin Chen (NCKU): Mixing enhancement modulated by unsteady shear flow in the Kuroshio above a system of seamounts
- 16:15 Eisuke Tsutsumi (AORI): An updated analysis on the observation and numerical modeling of turbulent mixing in the I-Lan ridge

January 27 (Wed.)

- 10:30 Takeyoshi Nagai (TUMSAT): The Kuroshio Nutrient Stream, where the diapycnal mixing matters
- 10:35 Silvana Duran (TUMSAT): Elevated nutrient supply caused by an approaching Kuroshio to the southern coast of Japan
- 11:05 Jie Gao (CMES): Occurrence of phytoplankton bloom as the Kuroshio passes an island
- 11:35- Discussion and Closing remarks

「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

2020 年 12 月 16 日から 12 月 17 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.開催にあたっては聴講者も含めて事前登録制とし,参加者の把握と 定員の 50%以内での実施,会場入り口での検温,換気の徹底といった感染症対策を講じた 上で実施した.一部の発表者に関してはリモートでの参加も認めることで、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に も継続してご参加頂き、コロナ禍の下でも継続して開催することが出来た. 全体では21 名の参加者と9題の講演があった.12 月 16 日には,九州西方の五島灘における特徴的な 冷水塊に関しての現場観測とモデルを用いた変動特性の解析や、同海域における複雑な水 塊構造における栄養塩収支の定量的な評価、2019 年秋における剣先イカの不漁と海況との 関係に加え,佐渡北西海域を対象として係留式 ADCP を用いた動物プランクトンの変動の 評価手法の検討といった講演があった.12月17日には、特徴的な海底地形を持つ能登半 島東岸斜面上で観測された近慣性内部波の散乱によって引き起こされる乱流混合、日本海 沖合域への塩・栄養塩の輸送において大きなインパクトを持ち得る東北地方の沿岸水の波 及過程といった日本海における海況モニタリングを用いた講演に加え、富山湾における環 境モニタリング、日本海南部と沖縄周辺における自律型海洋観測装置(AOV)を用いた海 況モニタリングの現状の報告、さらには太平洋側においても、特にうねりの寄与とうねり の起源に着目した大槌湾内の波浪・風モニタリングを総括する講演があった.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.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(12/16-12/17)

*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25~30分でお願いいたします.

-----12/16 (水) -----14:20-

趣旨説明

14:30-

「五島灘江島周辺における冷水域の変動特性」

○福元拓海, 滝川哲太郎, 柄池大輔(長崎大), 広瀬直毅(九大 ・応力研), 青島隆, 内田淳, 眞角聡, 丸山裕豊(長崎大)

15:00-

「五島灘における栄養塩収支」

〇福手悠介,滝川哲太郎(長崎大),森本昭彦,大西秀次郎(愛 媛大),青島隆,内田淳,眞角聡,丸山裕豊(長崎大)

15:30-15:45 休憩

15:45-

「2019年秋のケンサキイカ不漁と海況との関係」 〇山口 忠則(九大総理工), 高山 勝己, 広瀬 直毅(九大応力 研)

16:15-

「佐渡北西海域における係留式ADCPを使用した動物プランクトンの観測」 〇竹内茉莉香,和川拓,井口直樹,井桁庸介(水産機構・資源 研)

16:45-17:00 情報交換

-----12/17(木)------

09:15-

「能登半島東岸斜面上で観測された近慣性内部波による乱流混 合」 〇久賀みづき, 井桁庸介, 和川拓, 竹内茉莉香(水産機構・資源 研) 09:45-

「東北地方の沿岸水の日本海沖合域への波及過程」 〇和川 拓, 井桁庸介(水産機構・資源研), 坂本 圭(気象研究 所)

10:15-10:30 休憩

10:30-

「大槌湾内の波浪・風モニタリングの総括」 〇小松幸生(東大院新領域)・田中潔(東大大気海洋研)

11:00-

「自律型海洋観測装置(AOV)を用いた日本周辺の海況モニタリン グの現状」

〇伊能康平,杉山信二,金敬洋,野澤理香,土屋主税(海上保安 庁・海洋情報部)

11:30-

「富山湾における環境モニタリング」 〇福留研一,金山恵美(富山高専),原田恭行(NPEC)

12:00-12:30 総合討論



























































































































能登半島東岸斜面上で観測された 近慣性内部波による乱流混合

久賀みづき,井桁庸介,和川拓,竹内茉莉香 (水産機構・資源研)

近慣性内部波のエネルギーが本州沿岸域に集まる

背景


近慣性内部波による乱流発生の可能性



背景

日本海の熱塩循環



A simplified vertical cross-section of the Japan Sea with a schematic flow pattern of the abyssal circulation (Gamo et al., 2014. Fig. 8)

近慣性内部波のエネルギーが本州沿岸域に集まる ⇒ 日本海の本州沿岸域は乱流混合のホットスポット?



方法:能登半島東岸斜面上で乱流観測



鉛直混合に寄与するような エネルギー散逸率 ε の大きい乱流が発生しているか 目的

方法



方法

方法:観測が想定される近慣性内部波



背景

(DR_Cの解析)

能登半島東岸の陸棚〜斜面上で近慣性周期鉛直高次モード波が発生 近慣性内部波による乱流混合が沿岸域で起こる可能性

目的

近慣性内部波の散乱による乱流発生を観測する

方法

能登半島東岸で乱流観測

エネルギー散逸率、流速から

鉛直高次モードの近慣性内部波の特徴を洗い出す





乱流の発生

能登半島東岸の斜面上で乱流(最大 ε = O(10⁻⁷)Wkg⁻¹)を観測



能登半島東岸の斜面上で乱流(最大ε=O(10⁻⁷)Wkg⁻¹)を観測



鉛直高次モード近慣性内部波による乱流か

流速の近慣性周期振動



鉛直高次モード近慣性内部波による乱流か

東西流速の鉛直シアとエネルギー散逸率 ε



鉛直高次モード近慣性内部波による乱流か

近慣性内部波のエネルギー伝播方向とエネルギー散逸率 arepsilon



まとめ

能登半島東岸斜面上で近慣性内部波の散乱による乱流発生を実証

 $\varepsilon = O(10^{-7} \sim 10^{-8})$ のエネルギー散逸率 ε 大きな乱流

固有水の上の水温変化の大きい水深での乱流発生 ⇒ 熱塩循環に寄与の可能性



東北地方の沿岸水の日本海沖合域への波及過程

和川 拓(水産研究・教育機構) 井桁庸介(水産研究・教育機構)・坂本 圭(気象研)

沿岸水の沖合波及過程

17 Dec 2020

和川ら

中部-東部日本海におけるメソ規模構造:詳細不明



- ◆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℃
- ◆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)

```
17 Dec 2020
```

2

和川ら

和川ら

グライダー観測の概要



月内で大きく変化するメソ規模構造をグライダー観測



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

沿岸水の沖合波及過程

17 Dec 2020

和川ら

水塊構造も月内で劇的に変化



◆Transects 1 and 2の高気圧性渦 の低塩分水と、4の対馬暖流水の 波及(季節変化)が特徴的

17 Dec 2020

6

水塊分類でも特徴的な上層低塩水とその時間変化



◆T/Sダイアグラムの頻度分布より、水塊分類 – 表層水(SW)、上層低塩水(ULSW)、上層水(UW)、対馬暖流水(TWCW)、 日本海中層水(JSIW)、日本海固有水(JSPW)

17 Dec 2020	7
-------------	---

和川ら

和川ら

上層低塩水の起源:東側上流域や北側ではない

 $(b) \\ (b) \\ (c) \\ (c)$

沿岸水の沖合波及過程

(a) 48

- ◆上層低塩水
 - 塩分 < 34.0、密度 25.5 26.1 kg m⁻³
 - 水平幅30-60 km(15-30マイル)、厚さ > 100 m
- ◆同時期のArgoフロート観測
 - 低塩分水は北にあるが密度が高すぎる
 - 密度26.0 kg m⁻³付近の軽い水は南にあるが、高塩分すぎる
- ◆30年間分の能登半島沖合の石川県CTD (千手・大慶, 2012)
 - 春先に低塩水は観測されない
 - ▷ 長江希釈水を含めた対馬暖流系水塊(角野,1999)の単純な西からの移流ではない
- ◆13年間分の佐渡島周辺の新潟県CTD (投稿中)
 - 観測されない
 - 沖合の領域不足? 解像度不足? 東北地方沿岸起源?

17 Dec 2020

和川ら

上層低塩水の起源:日本沿岸と示唆される



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
- 淡水の供給
 - ▷ 一般的な表層加熱による成層化に対し、低塩化も同じく浮力を供給して成層化を促し、植物プランクトンブルームを引き起こす(Wu et al. 2008)
- -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

沿岸水の沖合波及過程



- ◆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

```
17 Dec 2020
```

和川ら

海洋環境・循環の沿岸--沖合域間相互作用

◆観測的アプローチ

- 船舶

- ▷ 15マイル以下の空間解像度が必要(メソからサブメソスケールのマルチスケール現象)
- ▷ 春先の海況厳しい時期に、沖合の観測が必要
- 人工衛星
 - ▷ 沿岸域の精度が低い
 - ▷ 海面だけでなく、鉛直内部の情報も必要
 - ⇒ グライダー
- ◆実験的アプローチ
 - 沿岸域から沖合域を含む広領域で、高解像度である必要
 - 海洋への河川水流入の高い再現性が必要
 - ⇒ 気象研の2 km格子数値モデル実験(雪融け水を陽に扱っているわけではない)
- ◆これまでは不可能だったが、最先端の観測・実験技術を駆使してはじめて可能
- ◆数値実験と現場観測の結果同士を有機的に比較・実証解析
- ◆物質循環、水産へのインパクト

沿岸水の沖合波及過程

```
17 Dec 2020
```

11





◆塩輸送

 $-Q_{S} = \iint \rho(S - S_{0})v_{NW}dxdz$

▶ 基準塩分S₀=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

```
沿岸水の沖合波及過程
```

17 Dec 2020

沿岸水の沖合波及:前年秋CDW、冬季降水・表層混合



沿岸水の沖合波及過程

190上観							
(180 -							
ipitatio					\checkmark		
ĕ 160							
150	↓ (降雪量含む) 1						
10	11 12	13	14 Yeor	15	16 1	7	
	前年の長江希	釈水	降水・陶	¥雪量	海面冷却	即(〇:弱)	
2010						0	
2011	0						
2012	\bigtriangleup		\bigtriangleup			0	
2013	0						
2014							
2015	\bigtriangleup					\bigtriangleup	
2016						\bigtriangleup	
2017			0				

```
17 Dec 2020
```



まとめ

◆春季の日本海沖合域において、雪融け水が由来と考えられる分厚い低塩水(U をはじめて観測

 ー陸から海への淡水流入は、塩・栄養塩の輸送におけるインパクトが大きく、海盆規模の水 ・ 塊分布や物質循環の変動要因

- ◆これまでは不可能だったが、最先端の観測・実験技術を駆使してはじめて可能
 ◆数値実験と現場観測の結果同士を有機的に比較・実証解析
- 1. まず、春季の沿岸域における低塩水形成のための初期条件が重要 – 前年秋の長江希釈水、直前冬の表層混合、降水・降雪
- 2.次に、男鹿半島沖の高気圧性渦による沖合域への波及が重要
 –好適な流動・波動条件により渦が形成されやすくなるのか(1と独立して、1と2の二段階のシステムとして考えられるのか)

-1(+陸棚上の移動)が渦を形成しやすくしているのか

沿岸水の沖合波及過程

17 Dec 2020















GPS波高計の精度検証(超音波波高計との比較) RMS = 0.061 C.C. = 0.93Significant wave height 2009年7月7日~9日、平塚観測塔 1.5 毎正時20分間の統計値 右義波高 $H_{1/3} [m]$ 1.0 GPS O Ultrasonic 0.5 12 24 36 60 48 Elapsed time from 0:00 7 Jul. 2009 [hour] RMS= 0.189 C.C.= 0.87 Significant wave period 6.0 有義波周期 ທ 5.0 $T_{1/3}$ 4.0 GPS O Ultrasonic 3.0 0 12 36 24 48 60 Elapsed time from 0:00 7 Jul. 2009 [hour]









































本日の発表内容

JCG JAPAN COAST GUARD

1. AOV観測の概要

2. 海象観測の事例

3. 運用上の課題



AOV (Autonomous Ocean Vehicle)とは、自律航行により、長期間海象を観測する機器

- 波の上下動をグライダー部のウイングで推進力に変える
- イリジウム衛星通信を通じて、陸上からインターネット経由で操作



AOVの搭載機器と観測項目



4/17

JCG JAPAN COAST GUARD

AOVのメリット

JCG JAPAN COAST GUARD



5/17

JCG JAPAN COAST GUARD

AOVのメリット



観測の概要

JCG JAPAN COAST GUARD

海上保安庁では2016年からAOVの運用を開始。現時点で20基のAOVを運用

- **目的**1. 長期連続的な海象データの取得、提供
 - 2. 精密な最低水面の決定



海象観測の活用例:リアルタイムデータの公開 🧼 Јаран Сольт Guard





JCG JAPAN COAST GUARD

2018年9月4日、佐渡沖で2基のAOVが同時に台風を観測した事例 台風は2基のAOVの間を通過



観測例:平成30年台風第21号



• ピーク時の有義波高は4~5 m程度

• 波向はおおむね風向きと一致

観測例:海上の状況

JCG JAPAN COAST GUARD

2018年からAOVの船体中央部と船尾マストに装着可能なカメラを導入





- (a) 海上の状況
- (b) 揚収後のレーダーリフレクター
- (c), (d) 波の高い日の前後のレーダーリフレクター
- (e) 波の高さが5~6mの時のAOV







海上の状況やAOVの状況の把握に有効

12/17

観測例:潮位解析

JCG JAPAN COAST GUARD

- ・国連海洋法条約第5条(通常の基線)『通常の基線は、沿岸国が公認する大縮尺海図に記載されている海岸の低潮線とする』(抄)※低潮線:海面が最も低い時の陸地と水面の境界線
- 最低水面を決定するために、潮位の解析が必要
- 精密な最低水面を算出するために、1つの海域につき1年以上AOVを運用




観測機器等の電源のバッテリーは太陽光エネルギーにより充電 曇天がつづくと、AOVは電力不足となる。 特に、日照量の少ない冬季の日本海側で顕著



運用上の課題:電力不足

JCG JAPAN COAST GUARD





調査海域の流速がAOVの航行速度より速い場合、AOVは流される 特に、波が低い場合に流されやすくなる



本日のまとめ

JCG JAPAN COAST GUARD

- 海上保安庁では海象観測と精密な最低水面の決定のために、
 2016年からAOVを運用
- 様々な海象データを長期連続的に取得、公開
- 電力不足等様々な運用上の課題にも対応中
- AOVに関する質問はこちらまで kan00-AOV@jodc.go.jp

























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

海洋現象についての知見は近年飛躍的に増えている。これには観測技術,計算機パフォーマンス,数 値計算技術の発展の貢献が大きい。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する。ここおいては、時間に追われた研究発表ではなく、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を行う。時間が限られる既存学会に 対するアンチテーゼである。

研究集会の概要

2020 年 12 月 3 日~5 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うこととした。これは,対面方式を基本としながら電子会議によるオン ライン参加も可能とするものである。

期間中,後述の11件の講演があり,うち2件はオンライン参加者によるものだった。参加者数は,オ ンライン参加・部分参加の方を含めて19人だった。

プログラムの当初予定は以下のとおりである。時間どおりに進まなかったため,12月4日の1題を12 月5日に変更した。

日時と場所

日程:2020年12月3日(木)~5日(土) 場所:九州大学応用力学研究所(筑紫キャンパス)西棟6F601

プログラム

12月3日

- 14:30 開会
- 14:35-15:45 西野圭佑(京大理)
 表層混合層乱流による粒子の凝集・分裂と物質輸送過程に関する数値実験
 15:55-16:35* 今村春香(京大理)

波解像モデルを用いた波成混合のシミュレーションに向けて

16:45-17:55 大貫陽平(九大応力研)変形領域における二次元乱流の統計力学

12月4日

- 09:30-10:40 吉武珠穂(九大総理工) 浮遊マイクロプラスチックの生物過程に伴う鉛直輸送モデル
- 10:50-12:00 磯辺篤彦(九大応力研) 浮遊マイクロプラスチックの全球輸送モデル ―線形モデルへの帰着と解析―
- 13:30-14:10* 辻英一(九大応力研) 東シナ海の内部波エネルギーのモデリング解析
- 14:20-15:30 蓮沼啓一(海洋総合研究所)四国沖暖水渦の諸特性
- 15:40-16:50 中野英之(気象研) jet ドリフトに関する、傾圧平均流がある場合のロスビー波の考察 17:00-17:40* 西垣肇(大分大)
- 17:00-17:40*
 西垣肇(大分大)

 大槌湾の台風に対する応答についての数値実験

12月5日

- 09:30-10:10* 水田元太(北大地球環境) 深層再循環のしくみの解明へ向けて
- 10:20-11:30 広瀬直毅(九大応力研)
 海洋熱エネルギー評価に向けた数値モデリング
 11:40- 総合討論

・発表時間は質疑を含めて 70 分,*印のものは 40 分です。ただし、当日ずれることがあります。

各講演の概要

各講演の概要を発表順に述べる。

西野は,表層混合層における粒子の挙動の把握と理解を目的に,物質輸送過程の数値実験を行った。 植物プランクトンを念頭に置き,粒子のパケット(集合体)についての位置,速度,粒子数,粒径を変 数とし,粒子の生成,凝集,分裂,移流,沈降を含めた計算を行った。風が粒子の挙動に及ぼす影響な どについて検討がされた。

今村は、海洋表層の鉛直混合の理解を進めるため、海面波による乱流混合の波解像モデルを開発して いる。鉛直座標に海面追随座標(鉛直σ座標)を導入し、海面波を高解像度で表現することに成功した ところである。

大貫は,大気・海洋・惑星のさまざまな現象を二次元乱流の統計力学で理解することを目指し,境界 が変形する領域における二次元乱流モデルを理論的に構築した。エネルギー,エンストロフィー,エン トロピーの検討をもとに,二次元流体が統計力学的に負温度の状態を取り得ることと,そのとき小規模 運動から大規模運動へのエネルギー遷移が起こり得ることを示した。

吉武は、海洋表層におけるマイクロプラスチックの挙動を解明することを目的に、生物過程に伴う鉛 直輸送を数値実験で調べた。これは、マイクロプラスチックを取り込んだ植物プランクトンが凝集して 沈降する過程に注目したものである。数値モデルにおいて、植物プランクトンの凝集に伴うマイクロプ ラスチックの沈降が確認された。

磯辺は,全球海洋の浮遊マイクロプラスチックの分布と挙動を知るため,全球輸送モデルを構築した。 マイクロプラスチックの分布について,観測と整合的な結果が得られた。また,マイクロプラスチック の滞留時間を簡単な線形モデルで表せることを示した。

辻は,東シナ海における内部重力波の生成・伝播・消散過程を解明するため,数値モデル計算を実施 した。内部重力波生成の度合いを示す順圧場から傾圧場へのエネルギー変換が,黒潮の流路によって変 わることが示された。

蓮沼は,黒潮とは何か,黒潮の流量はどのように定義するのか,との問題提起を主題に,各種のデー タ解析を行った。四国沖の暖水渦が移動するため定線での流量観測結果は短期間に大きく変動すること, などが示された。

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、その挙動を理想化数値実験で検討した。 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、南進の速度と上層の平均場 の南北速度が整合的であることが示された。南北遷移のメカニズムの解明は今後の課題である。

西垣は、内湾と大陸棚縁辺との海水交換の一過程を理解するため、台風の通過に伴う海洋の応答を数 値実験で検討した。その結果、大槌湾の海底付近で観測された水温変動の特徴が再現された。メカニズ ムとして、台風に引き起こされた近慣性周期の内部重力波が海底斜面を上って、内部重力波のビームを 作ることが示唆された。

水田は, 亜熱帯西岸境界流の続流ジェットおよびその南北に形成される再循環の形成過程の解明を目 的に, 理想化数値実験を行った。続流域においてロスビー波の生成による渦位輸送があり, その収束発 散が再循環を形成することが, 数値実験によって示された。

広瀬は,海洋の鉛直温度差を利用した海洋熱エネルギー発電の可能性を検討・評価するため,ポテン シャル評価(可能な発電出力の評価)を試行した。下層海水に関わる深層循環時間の見積もりが重要と なるが,その部分が数値モデルによってなされた。

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(西野、今村、吉武)、内部 重力波(辻、西垣)、中規模運動(大貫、蓮沼、中野、水田)、大洋スケールの現象(磯辺、広瀬)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、観測データ解析や解析的理論を 含むものもあった。

開催の形態については,議論を深めることを考えると,宿泊可能な研修施設での合宿方式が有利であ る。今回は諸事情もあって研究所内でのハイブリッド方式で行った。オンライン参加は,議論のしやす さでは対面方式に及ばないが,来場できない人が参加できるとの利点もある。今回はオンラインの参加 者数名を迎えたが,議論の活発化とコミュニティの広がりの観点からよかったと考えている。今後とも の採用を検討したい。

しかし,講演の中には研究として進行中で,研究者コミュニティに広く発表する段階に至っていない ものも少なくない。このような話題に対して,限られたメンバーで十分な議論ができるのもこの研究集 会の利点である。したがって,参加者の適正規模について考慮する必要もあると考えている。

講演者のうち西野,今村,吉武は修士課程の大学院生で,大貫は35歳以下の若手である。本研究会は 彼ら若手研究者に学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。

研究集会全体としては、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が期待できる。

西垣肇

共同利用研究集会

第18回トロイダルプラズマ統合コード研究会

18th 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 18 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 17 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: 2020 年12 月17 日 (木) - 18 日 (金) 開催場所: オンライン 講演数:30 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。海外(韓国、タイ)から の参加者も含めて講演30件(研究成果報告24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り、これまでと異なる形態での開催であったことを考 慮するとまずまずの件数といえる。今回はコロナ禍の影響で研究者の移動が困難な状況で あったため初めてのオンライン開催とした。一方向的な研究発表となることを避けるため に研究成果報告の全件をポスター発表とし、Remoを使用することでオンライン上でも相互 の議論が活性化することを期待した。また4件のポスター発表をピックアップし、2日目 午前にZoomを利用した口頭発表を実施した。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。今回は加熱に関する話題が豊富であった。また 前回に増して統合コードスキームにビックデータ解析などの新たな手法を適応することで

研究の幅を広げる試みが進展している印象がある。学生による講演が13件と前年に比べて 倍増しており、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。

登田はヘリカルプラズマにおいて、これまでに提唱したジャイロ運動論解析によるイオン熱拡散係数の簡約化輸送モデルを直接結合した輸送シミュレーションを行った。輸送シ ミュレーションの時間ステップごとに線形成長率を計算し、簡約化輸送モデルによりイオン熱拡散係数の値を求める手法を LHD におけるイオン温度勾配不安定性が励起している 典型的なプラズマ分布や磁場配位に適用した。

鈴木は近年高速イオンの空間・速度情報を計測する手法として注目されている FIDA 計 測について、GNET コードおよび FIDASIM コードを用いて LHD 実験時の FIDA 計測情報 から高速イオンの分布関数をトモグラフィーにより再構成する手法を開発した。

沼波はジャイロ運動論に基づく大規模シミュレーションでは5次元位相空間の分布関数 がデータとして出力されるが、高次元のデータのため直感的な解析が難しいという問題に ついて議論した。これまでのジャイロ運動論シミュレーションで得られた位相空間上のデ ータに対して、分布関数構造の可視化と OpenCV を用いたグラフ類似性判定による解析手 法を適用した。

成田は核融合プラズマの密度・温度分布の形成機構の理解に資する準線形乱流輸送モデ ル DeKANIS の開発を進め、ニューラルネットワークを用いることで、ジャイロ運動論コ ードが予測する拡散・ピンチ過程の輸送量への寄与を高速に再現できるようになった。統 合コードにおける輸送シミュレーションが可能になり、また、乱流揺動の飽和レベル評価 に汎用性の向上のため混合長理論に基づく手法を導入した。

持永は PLATO トカマクを対象として、統合コード TASK により外部コイル電流条件を含めた輸送解析を行うことでプラズマ性能の予測を行った。また、実験において外部制御可能な粒子供給量と外部コイル電流値をパラメータとして輸送解析を行い、電子・イオンそれぞれの粒子・エネルギーバランスから密度およびプラズマ形状変化に対する電子・イオン温度依存性を明らかにした。

Wisitsorasak は 非対称 SOL 領域における拡張2点モデルの開発について報告した。 SYCOMORE コードは核融合炉全体を対象とするモジュラー型コードで、ダイバータへの 熱負荷評価も重要な対象である。複雑な磁場構造と特有の輸送が熱流束の非対称性を生む ので、拡張2点モデルに基づく SOLDIV コードを用いて解析を行っている。強い温度と密 度の非対称性が得られており、結果は WEST 放電の SolEdge2D-EIRENE を用いた解析でも 確かめられた。

矢本は量研で開発中の統合ダイバータコード SONIC の不純物輸送モデルの非定常化を 行い、ダイバータプラズマ及び不純物輸送過程の過渡解析を可能とした。JT-60SA の高β 定常運転プラズマに適用し、Ar 不純物入射によりダイバータプラズマが接触状態から非接 触状態へと遷移する過程の過渡解析を行った。

梅崎はダイバータ板にかかる熱負荷に関して、弾性散乱では大角度散乱も生じ、粒子の 進行方向が大幅に変わりうるので、流体方程式に弾性散乱による径方向への粒子輸送を導 入し、ダイバータ板上の密度分布等の変化を調査した。

飯尾はトカマク型磁場閉じ込め装置において、数十程度のモード数を持つプラズマ内の

微小な磁場揺動が ECH によるトロイダルトルク発生に与える影響を、数値計算により解析 した。GNET コードを用いて、非ゼロの正味トロイダルトルクが発生すること、トルク発 生量が磁場揺動のモード数に依存することを示した。

山本は3次元的磁場配位をもつヘリカルプラズマにおいてはECHによって衝突トルクよりも大きな j×B トルクが生じ、正味のトルクが発生することが分かってきたので、LHD における ECH トルクの磁場配位依存性ならびに加熱位置依存性を評価した。

Byung Jun Kang は反転磁気シアプラズマにおける電子ドリフトと捕捉高速イオンの反転 歳差運動の共鳴がもたらす新しい不安定性について、ジャイロ運動論コード GKW を用い て解析を行った。線形成長率は高速イオンの温度勾配に比例する。さらに非線形飽和も得 て、非線形モード結合や粒子・エネルギー輸送を評価した。

Yong Jik Kim は size-PDF 法を突発的熱輸送現象の統計解析に適用した。非線形ジャイロ 運動論コード GKNET で得られた非局所・非拡散的輸送現象について入力パワースキャン を行い、突発現象と E×B 階段状構造の関係性の可能性を指摘した。

本多は定常状態のプラズマ予測のために、定常輸送コード GOTRESS を核とする統合モ デル GOTRESS+の開発を行った。ペデスタルも含めたプラズマ分布全域の予測を無矛盾に 行うため、ペデスタル高・幅を予測する EPED1 モデルを開発して組み込み、JT-60SA の運 転シナリオ予測に適用した。

福山はプラズマにおける運動論的効果を取り入れた波動伝播解析について、積分形誘電 率テンソルによる記述を紹介し、吸収パワーの定式化とトカマク配位における2次元解析 (低域混成波,イオンサイクロトロン波)等の最近の進展を報告した。

太田は径方向拡散係数の運動量依存性が熱輸送および高速粒子の輸送に及ぼす影響を調べた。TASK/FP コードを用いて軌道平均 Fokker-Planck 方程式を三次元位相空間上で解くことで運動論的解析を行い、径方向拡散係数を調べた。また、速度空間での拡散による径方向拡散の寄与を含めて軌道平均拡散係数を新たに定式化した。

佐々木は乱流シミュレーションによって得られた数値乱流場に特異値分解(SVD)を適用 し、鍵となる時空間構造の抽出を行った。得られた SVD モードの空間構造を用いて運動エ ネルギーの時間発展を評価し、また、各 SVD モード間のエネルギー伝達を定量化する方法 を考案した。

Taik Soo Hahm はこれまで深く捕捉された粒子に対して定式化されていたバウンス運動 論モデルを捕捉境界近傍の粒子に対して Lambert 関数を用いて拡張し、gKPSP TEM シミュ レーションへ適用した。 それら粒子の反転歳差運動が TEM の安定化に影響する低シア領 域での精度向上が期待される。

糟谷はトカマクプラズマにおける不純物制御のための統合輸送シミュレーションスキー ムの開発に取り組んだ。統合コード TASK でこれまでに開発した輸送計算モジュールを連 成させて、プラズマ主要素および不純物タングステン分布の時間変化を計算可能とした。 主要素イオン分布の変化に応じて不純物分布が応答する様相を示した。

石田は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について円筒形プラズマ 中での乱流コード NLD を用いた数値計算シミュレーションを行った。直線装置 PANTA を 対象として乱流の駆動源である抵抗性ドリフト波不安定性のイオン質量依存性を放電ガス 種がアルゴン、ネオン、ヘリウムの場合について調べた。 石黒はJT-60U、HSX、LHD など多くのトカマクやヘリカル装置において観測されている ECH による自発的なトロイダル回転について、JT-60U 磁場配位において、トロイダル磁場 リップルの振幅を 0.0~1.0%と変化させ ECH によるトロイダルトルクを評価した。振幅が大 きくなると J×トルクが増加し、衝突トルクはほとんど変化しないことが分かった。

柳原は準光学光線追跡コードPARADEのためのECCD計算モジュールの開発に取り組んでいる。PARADEは非一様非等方媒質中を伝搬する任意の波動ビームの発展を屈折、回折、 偏波、散逸の全てを考慮して記述することができる。その波動ビームの位相・強度分布に 基づき、EC駆動電流分布を簡便に評価するコードを作成している。JT-60SAにおける EC 入射条件を再現した系で従来のEC評価コードと比較した結果について報告した。

森下は核融合プラズマの挙動予測の高速かつ高精度化を目指して統合輸送シミュレーションコード TASK3D をベースとするデータ同化システムの開発を行っている。計算コストの高い NBI 加熱分布の計算を簡易モデル化し、モデルパラメータを状態ベクトルに含めることで、データ同化による逐次最適化を行えるようにした。モデルパラメータをデータ同化により調整することで、予測精度を保ったまま、統合輸送シミュレーションの計算コスト削減を実現した。

黒田は PLATO トカマクにおけるバルーニングおよびキンク不安定性の評価を行った。平 衡解析コード TASK /EQU を用いて計算したプラズマ磁場平衡を MHD コード MIPS に導入 して MHD シミュレーションを実行した。バルーニングモードとキンクモードの両者が励 起される条件で計算を行い、圧力勾配によりバルーニングモードの成長率を変化させてキ ンクモードとの相互作用の評価を行った。

庄司は核融合反応由来の中性子から評価できるトリトン燃焼率が高エネルギープラズマ 閉じ込めに関する指標の1つであるので、LHD においてトリトンの発生分布が、重水素イ オンビームの持つ運動量によって非等方的になることのトリトン燃焼率への影響を評価し た。

以上のように今回は現地に集まることができないという状況が逆に、複数の国からも含めて多様な参加者の顔ぶれを実現した。ポスター全部を見る時間がなかった、学生の貴重な口頭発表の場を提供してほしいといった希望も受けて、来年度は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19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

12月17日(木)

(13:00-17:00 ポスター講演 Poster presentation)
13:00-15:00 ポスター講演 1 Poster 1
コアタイム core time 13:00-14:00 Group 1A
14:00-15:00 Group 1B
15:00-17:00 ポスター講演 2 Poster 2
コアタイム core time 15:00-16:00 Group 2A
16:00-17:00 Group 2B
(開室 start 12:30、閉室 end 17:30)

12月18日(金)

- 9:30-9:35 事務連絡 Business announcement
- (9:35-10:55 ポスター紹介 Poster talk)
- (座長:糟谷)
- 9:35-9:55 講演 1-1 糟谷 (九大)

JT-60SA operation scenario

Development of integrated transport simulation scheme for impurity control in tokamak plasmas

9:55 - 10:15 講演 1-2 本多 (量研) Coupling of EPED1 model to the integrated model GOTRESS+ and development of

10:15 – 10:35 講演 1-3 森下 (京大) Data assimilation system based on integrated transport simulation applying a reduced model of neutral beam injection heating

10:35 – 10:55 講演 1-4 登田 (核融合研) Transport simulation directly coupled with gyrokinetic transport models for helical plasmas

- 10:55-11:15 休憩
- (Session Leader: 村上)
- 11:15-12:00 議論 Discussion
- 12:00-13:00 昼休み
- 13:00-14:00 小グループ議論 Free discussion

(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)

- 14:00 14:10 藤田 (名大) サブクラスター関係連絡事項(定常運転・制御サブクラスターの世話人交代につい て)
- 14:10 14:40 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
- 14:40 15:10本多 (量研)ITER に於ける統合モデリング活動関係の報告
- 15:10-15:40 花田 (九大) 日本の球状トカマクにおける EC によるプラズマ立上げ支援の研究(ITPA 統合運 転シナリオグループ活動への貢献)
- 15:40-16:00 休憩
- 16:00 16:30若月(量研)ITPA 統合運転シナリオグループ活動報告

16:30-17:00 林 (量研)

サブクラスター活動に関する報告と今後の予定

17:00 散会

[Poster list]

Group 1A

P1A-1 登田慎一郎 (核融合研) S. Toda

Transport simulation directly coupled with gyrokinetic transport models for helical plasmas P1A-2 鈴木航介 (京大) K. Suzuki

Fast-ion velocity-space reconstruction using FIDA measurements in LHD plasma

P1A-3 沼波政倫 (核融合研) M. Nunami

Visualization and similarity analysis for data of gyrokinetic simulations

P1A-4 成田絵美 (量研) E. Narita

Integrated transport simulations with a neural-network transport model and development of turbulence saturation rules

P1A-5 持永祥汰 (九大) S. Mochinaga

Transport analysis in PLATO tokamak using integrated code TASK

P1A-6 Apiwat Wisitsorasak (Mongkut's Univ. Tech. Thonburi)

Development of extended two-point model for asymmetric scrape-off layer

Group 1B

P1B-1 矢本昌平 (量研) S. Yamoto

Effects of impurity transport on detached divertor plasma transitions by time-dependent analysis of integrated divertor code SONIC

P1B-2 梅崎大介 (九大) D. Umezaki

Effect of large-angle elastic scattering between ions and neutral particles on density profile on divertor plate in divertor plasma

P1B-3 飯尾太那 (京大) D. lio

Effect of magnetic fluctuations on the toroidal torque driven by electron cyclotron heating in tokamak plasmas

P1B-4 山本泰弘 (京大) Y. Yamamoto

Magnetic configuration and heating location dependences of the toroidal torques by ECH in LHD **P1B-5 Byung Jun Kang (SNU)**

Gyrokinetic studies of fast ion precession driven drift instability in reversed shear burning plasmas **P1B-6 Yong Jik Kim (SNU)**

Study of non-local transport events in flux-driven ITG turbulence

Group 2A

P2A-1 本多 充 (量研) M. Honda

Coupling of EPED1 model to the integrated model GOTRESS+ and development of JT-60SA operation scenario

P2A-2 福山 淳 (京大) A. Fukuyama

Progress of kinetic full wave analysis in plasmas

P2A-3 太田佳吾 (京大) K. Ota

Influence of the momentum dependence of radial diffusion on the transport of thermal and energetic particles in tokamak plasmas

P2A-4 佐々木真 (九大) M. Sasaki

Extraction of turbulent structures and quantification of energy transfer among structures by singular value decomposition

P2A-5 Taik Soo Hahm (SNU)

Bounce-kinetic studies on barely trapped particles' effect on trapped electron modes

P2A-6 糟谷直宏 (九大) N. Kasuya

Development of integrated transport simulation scheme for impurity control in tokamak plasmas

Group 2B

P2B-1 石田雅信 (九大) M. Ishida

Ion mass number dependence of resistant drift wave turbulence

P2B-2 石黒裕暉 (京大) Y. Ishiguro

Effects of toroidal field ripple on toroidal torque by electron cyclotron heating in JT-60U plasma

P2B-3 柳原洸太 (量研) K. Yanagihara

Development of ECCD calculation module for quasioptical ray tracing code

P2B-4 森下侑哉 (京大) Y. Morishita

Data assimilation system based on integrated transport simulation applying a reduced model of neutral beam injection heating

P2B-5 黒田 侑 (九大) Y. Kuroda

Evaluation of ballooning and kink instabilities in PLATO tokamak

P2B-6 庄司悠歩 (京大) Y. Shouji

Effects of anisotropic triton birth profile on triton burn-up ratio in LHD plasma

国際プラズマ乱流データ解析ワークショップ

応用力学研究所 稲垣 滋

目的と背景

プラズマ乱流及び乱流輸送に関するデータ解析に関する国際的なワークショップを開催する。 本議論を契機にプラズマ乱流実験および乱流物理の理解の深化に寄与する。本研究集会は高 エネルギーイオン輻射に関して行ってきたワークショップ及び日中プラズマ乱流データ解析ワー クショップという日中の研究者による研究グループが中心となり行われてきた作業会を更に発展 させたものである。本作業会を契機にその後大きく進展した研究が多く、近年の乱流物理の進展 に大きく寄与している。一例として流れと乱流揺動との関連の理解、イオンサイクロトロン放射 (ICE)と高速イオン分布との相関の観測が挙げられる。このようなこれまでの活動において、応用 カ学研究所を中心とした研究グループの存在感は極めて高く、中国の若手研究者らを先導する 立場にあった。本作業会を主催する事で応用力学研究所のリーダーシップが強化され、アジア及 び世界でプラズマ乱流研究を先導する事を目指す。

本研究集会の特徴

本研究集会は実作業を重要視する。招待者らによる話題提供、問題定義の後、各テーマの詳細 講演を行う。その後データ解析作業を行い、参加者全員が一同に会し途中結果の報告及び議論 を行う。最終日には作業結果をレビューし、サマリーを行う、という形式で行われた。

今年度の研究集会

上記に述べたように本研究集会は実作業を重視する。このため全員が一堂に会してデータ解析 作業を行うという従来の形式のワークショップ開催は断念した。なお、今年度前半では英国、ドイ ツ、中国の研究所ではロックダウンがあり、ネットワーク環境が十分に整備されていない自宅か らの接続となるためコミュニケーションは主にメールで行った。(実際 4 月に発送した郵便物を研 究者が研究所で確認したのが 10 月という事例があった)

今年度の予算執行

旅費としての共同研究予算使途を変更し、実験データ解析環境の整備が本ワークショップの趣 旨に最も合致すると考え、実験データ収集装置(PXIe-8135の保守修理)、実験室ストリーミング ウェブカム(C922n)等に使用した。 今年度の個別の活動

1. Data Driven Plasma Science

佐々木助教を中心とした九大データサイエンスチームが Dendy 教授(Warwick 大)と共に "Evaluation of abrupt energy transfer among turbulent plasma structures using singular value decomposition"と題した SVD (singular value decomposition) というデータ解析手法の共著論文 を執筆し、投稿後掲載された。本論文の発展的解析を学生が継続して行った。

2. Ion Cyclotron Emission (ICE)

Dendy 教授, 稲垣, 核融合研究所チームで共著論文 "Density dependence of ion cyclotron emission from deuterium plasmas in Large Helical Device"を執筆し投稿した。また、LHD 実験で は He 入射実験が行われる予定であり、そのデータ解析を九大チームとしてどのように行うか議 論した。 加えて QUEST における ICE 計測について検討を行った。

3. Turbulence Visualization

共同研究者の前山氏(名大)が新たな乱流の可視化のアイデアを PANTA の実データに適用した。その結果を九大チーム、Dendy 教授と共に検討し、" On the triad transfer analysis of plasma turbulence: symmetrization, coarse-graining, and directional representation" と題した共著論文を執筆し、投稿した。前山氏は計算コード等を硬化する予定であるので、それに合わせて用いた PANTA データも後悔することとした。

当初予定していた、on-siteでのデータ解析作業がなかったため成果は例年と比べると少なめで はあるが、着実に論文として結実している。

第13回九大2D物質研究会プログラム&アブストラクト

「界面超結晶の成長と評価」

2021年2月23日(火) 13:00~17:30

オンライン (発表10分+質疑5分=15分)

Zoom: https://zoom.us/j/92355653442?pwd=QjQzV2IIZkUwaWFtcythMXBkSnVkQT09

ミーティングID: 923 5565 3442 パスコード: Gr2zGE 主催:応用力学研究所

0. 13:00-13:10

はじめに

九州大学大学院工学研究院 田中 悟 教授

1. 13:10-13:25

グラフェン/SiC 界面を利用した新機能開拓

名古屋大学大学院工学研究科 乗松 航 准教授

本発表では、TaC 薄膜のグラフェン被覆による超伝導転移温度向上、グラフェン/TaC/SiC に よる高硬度表面、グラフェン/SiC 界面における FeSe の作製などについて、今後の共同研究の ための情報を提供する。

2. 13:25-13:40

三角形グラフェンドットの形成と歪み・擬磁場

九州大学大学院工学研究院 田中 悟 教授

酸素添加 CVD によるグラフェン成長の初期過程において, 三角形状のドットが形成される. ド ットサイズは成長時間により制御可能であり, ドット内部歪み(引っ張り)にもサイズ依存性 がある. 擬磁場のサイズ依存性について議論する.

3. 13:40-13:55

グラフェン結晶成長の熱放射光を用いたその場観察

原子力研究開発機構 寺澤 知潮 研究員

グラフェン結晶成長の熱放射光を用いたその場観察本発表では、原料ガスが存在する環境にお けるグラフェンの結晶成長のその場観察を可能にする熱放射光の光学顕微観察手法を紹介する。 本手法をベースとした高品質試料を用いる超結晶の作製についても議論する。 4. 13:55-14:10

ツイストグラフェンの ARPES による研究と遷移金属窒化物原子層の作製

東京大学物性研究所 小森 文夫 教授

最初に、真空中で作製したツイストグラフェンの ARPES による電子状態研究を報告する。次 に、ヘテロ2原子層を作製する基板として、銅表面上に形成できる安 定な遷移金属窒化物単原 子層の構造と磁性を紹介する。

5. 14:10-14:25

角度分解光電子分光による層状 MAX 相化合物の電子/スピン構造評価

名古屋大学シンクロトロン光研究センター 伊藤孝寛 准教授

角度分解光電子分光法(ARPES)は様々な機能性を担う特異な電子/スピン構造を直接観測する 手法として知られている。講演では、層状 MAX 相化合物において観測されたトポロジカル物 性を示唆するスピン状態などを紹介する予定である。

6. 14:25-14:40

表面顕微鏡を用いた二次元物質のナノスケール分析

関西学院大学理工学部 日比野 浩樹 教授

本発表では、これまで我々が取り組んできた、低エネルギー電子顕微鏡による、二次元物質の 成長過程と積層構造の解析および、チップ増強ラマン分光法による、二次元物質のナノスケー ルでの振動分光に関する研究を紹介する。

7. 14:40-14:55

スピン・軌道分解 STM による原子層〜超薄膜の原子分解能観察

電気通信大学大学院情報理工学研究科 宮町 俊生 准教授

STM は試料表面の電子状態をスピン・軌道分解して原子スケールで観察可能な唯一の手法である。本講演では窒化鉄単原子層や磁性超薄膜ヘテロ構造の STM 観察の結果を例に、原子層~ 超薄膜の電子物性を理解する上で STM が強力な手法となることを示す。

(休憩 14:55-15:10)

8. 15:10-15:25

表面 X 線回折による非接触界面構造解析

東北大学理学研究科 若林 裕助 教授

最近開発したベイズ推定による表面構造解析ソフトを用いて,断面を作るような加工をせず, 非接触な手法で表面・界面の構造観測が可能になった。原理的に,基板格子と整合した構造と, 不整合な構造を分けた解析が可能である。この手法の現状について紹介する。

9. 15:25-15:40

ひずみ超格子によるグラフェンの電気伝導制御

筑波大学数理物質系 友利 ひかり 助教

格子ひずみによるグラフェンの電気伝導制御を実現するためには、グラフェン中のひずみ分布 の制御が不可欠である。そこで我々は、シリコン基板上に微細な凹凸構造を形成し、その上に グラフェンを転写することによって任意のひずみを導入する手法を開発した。周期 60 nm の周 期ひずみを導入したグラフェン試料において電気伝導測定を行ったところ、180 meV のバン ドギャップ形成を示唆する結果が得られた。

10. 15:40-15:55

原子間力顕微鏡による極表面層の機械的特性の評価

新潟大学自然科学系 月山 陽介 准教授

原子間力顕微鏡を用いた摩耗試験によって通常の硬さ試験では評価が困難な極表面層の機械的 特性を評価している.この手法では過去にダイヤモンドライクカーボン膜や高配向 CNT の表 層 10 nm の摩耗特性(=硬さ特性)を明らかにした.その手法について概説する.

11. 15:55-16:10

超伝導原子層物質の特異な超伝導状態の観測と制御

筑波大学数理物質系神田 晶申 教授

NbSe₂等の超伝導原子層物質ではバルクとは異なる超伝導状態が発現することが知られている。 我々は低次元性に伴うゆらぎの増大をうまく利用した、渦糸量子状態の制御を目指している。 発表では渦糸観測の原理と渦糸制御方法について説明する。

12.16:10-16:25

エピタキシャルグラフェンのフェムト秒発光

名古屋大学大学院工学研究科 小山 剛史 准教授

我々は原子層物質の超高速分光、特にフェムト秒発光分光を行っています。本発表では、SiC 上 エピタキシャル単層・二層グラフェンのフェムト秒発光を紹介します。二層の発光が単層のそ れより二倍以上強いことを示します。

13. 16:25-16:40

グラフェン/hBN ヘテロ構造の成長方向選択性の起源

島根大学学術研究院理工学系 影島 博之 教授

CVD 成長で条件を制御すると、面内方向につながったグラフェン/hBN ヘテロ構造 と、縦方向に重なったグラフェン/hBN ヘテロ構造を作り分けることができること が実験的に分かっている。この様な成長方向の選択性の起源について第一原理計 算に基づいて議論する。

14. 16:40-16:55

二次元原子膜物質の電子物性と境界面効果の理論・計算

関西学院大学理工学部 若林 克法 教授

二次元原子膜では結晶構造、積層特性、エッジなど境界面効果によって、系の電子物性が大き な変調を受ける。我々の研究室では、原子膜の電子物性を、トポロジカル特性、光応答、電子輸 送特性を理論・数値計算の観点から解析を行なっている。

15. 16:55-17:10

Investigating of electronic and structural features of mm-sized twisted bilayer graphene experimentally and by simulation.

九州大学工学研究院 Anton V. Visikovskiy 助教

Twisted bilayer graphene (TBG) is the topic which have exploded the field of 2D materials thanks for promising correlated physics and room-temperature superconductivity. However, in spite of massive theoretical background, the experimental results are still difficult to produce. We have developed the method of producing TBG of sub-mm scale with good and clean interface which is accessible for investigation using conventional surface science techniques, such as ARPES and LEED. To interpret the results extensive modelling is required specifically aimed to be comparable with experimental data. Here we present our recent advancements on modelling band structure of TBG in comparison with ARPES and structural relaxation in relation to SPA-LEED observations.

16. 17:10-17:30

総合討論

QUEST 配位における CHI 磁束発展の解明と最適電極形状の評価

九州大学 応用力学研究所 黒田 賢剛

球状トカマク型の核融合炉が可能になれば、炉の建設コストの削減やプラズマの安定化が期待出来、そ のためには球状トカマク装置での堅固な電流駆動手法の確立が必要である。同軸ヘリシティ入射(CHI) 法は米国の球状トカマク装置 HIT-II や NSTX で研究されている有望な電流駆動手法の1つである。両者 の装置では真空容器の上下部に埋め込まれた円環状のセラミックにより容器の内側壁と外側壁が絶縁 されており、これら容器壁による2枚の電極が構成される。CHI では外部磁場コイルによりこの電極間 に連結磁束(入射磁束)を形成して高電圧を印加する。これによりまず電極間においてプラズマが着火し、 プラズマ形成後は入射磁束に沿って入射電流が流れる。この入射電流がプラズマを周回しながら流れる ためトロイダル電流が駆動し、電流と磁場の相互作用によりプラズマは入射磁束と共に真空容器内へと 拡大する。米国の両装置ではこの手法により真空容器内に入射された磁束は電極から切り離されて再接 続し、形成された閉じた磁気面内において安定な電流閉じ込めが達成された。

現在九州大学の球状トカマク装置 QUEST では簡易型の新設計電極を用いた CHI 電流立ち上げ実験を米 国の CHI 研究者と共に実施している。この新設計電極配位においては装置の下部ダイバーター上にセラ ミックを挟んで設置されたバイアス電極に高電圧を真空容器(グラウンド)に対して印加させる。従来の セラミックが真空を維持する容器壁の一部を構成する設計と異なり、本設計では核融合炉への CHI 導入 を容易化出来ると考える。また QUEST においても新しく強力な電流駆動手法である CHI が導入されれ ば形成プラズマの性能は大きく向上し、そして QUEST の電子サイクロトロン加熱(ECH)システムと CHI を組み合わせた新たな立ち上げ手法の評価が可能となる。

QUEST の CHI 実験の大きな課題はポロイダル磁場(PF)コイルと CHI 電極の距離が離れており適切な磁 束発展を生じさせるための制御が難解ということである。本件ではこの課題に対して、入射磁束を発展 させる磁場 B_{evl} と入射電流 j_{inj} が常に $B_{evl} \times j_{inj} \sim 0$ の関係を維持すると推測し、適切な磁束発展形状 を予測することでそのための PF コイル制御配位を見出した。さらに磁束発展予想に基づく CHI のため の装置改造配位において閉じた磁気面形成に至るための明確な改善が観測された。

従来の真空容器自体が大きな2枚の電極を構成する設計と異なり、QUEST 電極設計では入射電流がバ イアス電極面内に制限される。この特徴は磁束の発展をし難くする要因となるが、不確定な要因により 大きく変動する電極上の入射電流分布が狭い範囲に特定されることで磁束発展予想はし易くなる(予想 通りの制御が可能になる)。図1に CHI 初期実験における放電結果と算出された磁束発展予想を示す。 実験当初は入射磁束が比較的形成し易い弱磁場側からの入射方式が試された。入射磁束は主に PF5-2の コイルによりバイアス電極と外側容器壁間に形成され、この弱磁場側において磁束は比較的安定に算出 予想に近い形状に発展した。しかし磁束の繋ぎ替えを経た閉じた磁気面の形成に至るには、2つの電極 (QUEST 電極配位においてはバイアス電極と真空容器壁)に接続される磁束の両脚を狭い領域に維持(狭 い Footprint を維持)した状態で磁束を発展させる必要がある。この入射では磁束を大きく発展させよう とすると真空容器壁に接続される片方の磁束の脚が大きくバイアス電極から離れてしまい狭い Footprint の維持が困難であった。したがって QUEST において CHI 電流駆動を行うためには高磁場側から磁束を 入射する必要があり、その磁束発展条件の評価を行った。図2に高磁場入射による放電結果と算出予想 を示す。高磁場入射の場合、高磁場領域に位置する真空容器壁側の磁束の脚は移動し難くなり、適切な

磁場条件において狭い Footprint を維持した磁束発展 が観測された。更に入射磁束 の磁力線長が長くなることで 不必要に高い入射電流の駆動 が抑えられ、高い増倍率(Itor/ *I_{ini})*でのトロイダル電流の駆 動と放電時間の長パルス化が 達成された。しかし明確な電 流閉じ込めまでには至らず、 高磁場側入射放電のための装 置改造の必要性を示唆する課 題が見受けられた。ひとつは 当初から懸念されていたよう に電極から距離がある OUESTのPF コイルの配置で は形成可能な入射磁束が大き く制限された。また期待する 磁束発展に達するには入射磁 束量をかなり下げなくてはな らなく、十分な入射磁束量に おいて磁束の繋ぎ替えを経た 閉じた磁気面の形成まで達成 させるにはプラズマ着火の容 易化と磁束発展を阻害してし まうアブソーバー領域での放 電の防止が不可欠であった。



図3は装置改造を想定した評価実験の様子である。まずこの実験では真空容器内の電極近傍に簡易試作 コイル(角形のカプトン被膜導体を12巻して製作)を導入し、そしてバイアス電極に高さ20cmの円筒板 を設置した。試作コイルにより近接する入射領域に重点的に磁束を形成出来るようになり、バイアス電 極の円筒板により内側容器壁との間に入射電流の主要経路が形成されると期待された。図4に示す2シ ョットでの放電結果で両者とも初めは円筒板の外側で着火してしまったが、その後円筒板内側にもプラ ズマが誘発すると期待通りの閉じた磁気面形成に適した磁束発展を遂げた。入射磁束量の低い#42640の ショットでプラズマは即座に大きく拡大し、その後入射電流の減少に伴い収縮するが容器中心部におい て容器から切り離されたプラズマが入射電流の駆動が終了しても僅かに持続している様子が観測され た。この結果は閉じた磁気面の形成によりプラズマが閉じ込められていることを示している。数百A程 度のトロイダル電流の閉じ込めも期待されたが、残念ながら同時に発生したアブソーバー領域での放電 の影響でロゴスキーコイルでの正確な電流計測が出来なかった。入射磁束量を増やした#42826のショッ トではこれまでの高磁場側入射での最大駆動電流値を大きく上回るトロイダル電流(18kA => 35kA)が観 測された。この円筒電極内側からの放電発展の様子はNSTXでの初期実験の放電とよく似ており、もし #42826 のショットにおいて 放電が完全に真空容器全体 に広がるまで発展していれ ば高い値のトロイダル電流 が閉じ込められた明確な磁 気面が形成されたと期待さ れる。この評価実験結果よ り、電極近傍コイルを用いた 入射磁束配位において円筒 電極内側でのプラズマ着火 以降はその内側領域に主要 電流経路が形成されて外側 のアブソーバー領域での放 電を生じさせずに閉じた磁 気面形成に至る適切な磁束 発展が可能であることが示 された。

残る課題はプラズマ着火の 容易化である。図5に現在設 計中のガス導入システムの 改造案を示す。これまでは図 3 のように下部ダイバーター の2箇所の穴から上方向に



ガスを噴出させていた。これに対して改造システムでは次の3つの改善点によりプラズマ着火の容易化 が達成されると考える。まず1つ目に真空容器(グラウンド)に設置された噴出口が円筒バイアス電極に 向かってガスを吹き付けるように設計されている。2つ目に噴出口が装置円周方向均等に8箇所設置さ れる。3つ目に円筒バイアス電極に近接して向かい合う円筒グラウンド板に取り付けられたガス配管1、 電極から少し離れた内側容器壁に取り付けられたガス配管2の2系統のガス噴出配管が設置される。8 箇所に噴出口が設置されたグラウンド部と円筒バイアス電極との間の円周領域において電圧印加時に



パッシェンの放電条件を満たすように高圧噴出ガス を充填させ、まずガス配管 1 からの噴出ガスにより 着実に着火を生じさせてガス配管 2 からの噴出ガス によりそれを入射領域全域に誘起させる。2系統の ガス噴出量を調整することで最適なプラズマ着火条 件を得ることが出来ると予想する。今年度末にこの ガス導入システムを用いたプラズマ着火実験を実施 する予定である。確実に円筒電極内側のみにプラズ マ着火を生じさせることが出来れば、入射磁束は的 確に発展してその磁束量に応じた磁気面の形成と電 流閉じ込めが可能になる。 以上の成果は、国際会議 20th International ST Workshop, October 18-31, 2019, Frascati (ポスター発表)、 29th International Toki Conference, October 27-30, 2020, Toki (ポスター発表)、国内学会 第 36 回 プラズ マ・核融合学会 年会 2019.11.29 (口頭発表)、及び論文 Plasma and Fusion Research 16, 2402048 (2021) において発表されている。

Initial Results from High-Field-Side Transient CHI Start-Up on QUEST*)

Kengoh KURODA, Roger RAMAN¹⁾, Makoto HASEGAWA, Takumi ONCHI, Brian A. NELSON¹⁾, John ROGERS¹⁾, Osamu MITARAI²⁾, Kazuaki HANADA, Masayuki ONO³⁾, Thomas JARBOE¹⁾, Masayoshi NAGATA⁴⁾, Hiroshi IDEI, Takeshi IDO, Ryuya IKEZOE, Shoji KAWASAKI, Takahiro NAGATA, Aki HIGASHIJIMA, Shun SHIMABUKURO, Ichiro NIIYA, Shinichiro KOJIMA, Akihiro KIDANI, Takahiro MURAKAMI, Kazuo NAKAMURA, Yuichi TAKASE⁵⁾ and Sadayoshi MURAKAMI⁶⁾

> Kyushu University, Fukuoka 816-8580, Japan ¹⁾University of Washington, Seattle, WA, USA ²⁾Institute for Advanced Fusion and Physics Education, Kumamoto 861-5525, Japan ³⁾Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, NJ, USA ⁴⁾University of Hyogo, Himeji 671-2280, Japan ⁵⁾University of Tokyo, Kashiwa 277-8561, Japan ⁶⁾Kyoto University, Kyoto 615-8540, Japan

> > (Received 16 November 2020 / Accepted 15 February 2021)

Transient coaxial helicity injection (t-CHI) current start-up using a new design simple electrode configuration has been implemented on the QUEST. Discharges injected from the low field side (LFS) and from the high field side (HFS) were examined. Compared to the LFS injection case, the HFS injection has the advantages of providing access to a higher toroidal field and better controlling the location of the injector flux footprint location. Although the present PF coils on QUEST are not well positioned to form the injector flux on the HFS injection has shown flux evolution in a shape that is suitable for the formation of closed flux surfaces. The discharges were improved by installing an in-vessel-coil and adding a new cylindrical electrode to the existing CHI electrode. The results show that the new cylindrical electrode allowed the flux to evolve stably while allowing both the inner and the outer injector flux footprint to remain in the vicinity of the cylindrical electrode. This configuration which inherently generates a narrow injector flux footprint width resulted in discharges that strongly suggested the persistence of the CHI generated plasma after the injector current was reduced to zero. These studies have informed us of the need to improve the CHI gas injection system so that the absorber arcs could be better controlled in the HFS injection configuration.

© 2021 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

Keywords: CHI, non-inductive current drive, spherical tokamak, magnetic reconnection, ECH

DOI: 10.1585/pfr.16.2402048

1. Introduction

Transient coaxial helicity injection (t-CHI) current drive has been developed on HIT-II experiment at the University of Washington [1] and in NSTX at the Princeton Plasma Physics Laboratory [2] as a non-inductive current start-up method for a low aspect ratio spherical (ST) tokamak device. The advantages of lower construction cost and higher plasma beta are expected in future nuclear fusion reactors based on the ST configuration. In a t-CHI discharge, the toroidal current is generated by the injector current flowing along magnetic field lines that connect electrically insulated electrodes. Electromagnetic forces cause these field lines, initially localized to the injector region, to expand into the vessel and then reconnect in the injector region, producing closed flux surfaces. Results on HIT-II and NSTX show that the subsequent inductive current drive efficiency is improved if some current is initially generated by t-CHI [1,2]. We have implemented t-CHI current startup on QUEST [3] using a new design simple electrode configuration [4]. As shown in Fig. 1 (a), in the QUEST electrode configuration, a bias electrode is mounted on top of the lower divertor (endplate), and this is biased as a cathode against the vacuum vessel wall, which acts as an anode. The bias electrode is insulated by a ceramic break sandwiched between the bias electrode and lower divertor. In the conventional electrode configuration used in HIT-II and NSTX, the entire inner and outer vacuum vessel walls

author's e-mail: kuroda@triam.kyushu-u.ac.jp

^{*)} This article is based on the presentation at the 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC29).



Fig. 1 Results of t-CHI discharge injected from LFS and HFS.
(a) Configuration of CHI electrode, (b) (e) injector flux configuration, (c) (f) wave forms of two capacitor voltage, *V_cap 1-2*, electrode voltage at three toroidal locations, *V_el 1-3*, injector current, *I_inj*, toroidal current, *I_tor*, (d) (g) camera image of evolving discharge.

are used as the cathode and the anode; these are insulated by ceramic breaks inserted into the top and bottom parts of the vacuum vessel wall itself. The t-CHI research on QUEST aims to develop a reactor relevant [5] electrode configuration in which the insulator needed to separate the divertor plates electrically need not be part of the external vacuum structure, as on NSTX and HIT-II. Also, QUEST is well-positioned to study the heating and steady-state current drive of a CHI generated plasma using ECH [6,7].

2. Results of t-CHI from LFS and HFS

We examined cases of t-CHI discharges injected from low field side (LFS) and high field side (HFS) to investigate which configuration is more suitable for forming closed flux surfaces on QUEST CHI operation. Figure 1 shows the results of typical t-CHI discharges from the LFS and HFS injection cases.

LFS case: The injector flux, (b) is formed in the LFS case using the injector flux to connect the bias electrode to the outer vessel wall (lower hot wall). The waveform (c) shows the discharge initiation due to the application of high voltage on the bias electrode. As the voltage across the electrode drops (due to the generation of a conducting plasma), about 58 kA of injector current flowing along injector flux field lines is generated. The injector flux evolves due to the injector current, as shown in the camera image, (d), in which the toroidal current is increased up to about 36 kA. HFS case: The injector flux, (e) is formed in the HFS region by connecting the injector flux between the bias electrode and inner vessel wall (center stack). As shown in (a), in this configuration, ceramic tiles cover the outer portion of the bias electrode to prevent discharge initiation between the electrode and the outer wall. In CHI terminology, the region opposite to the injector region is known as the absorber region. The discharge evolution process is similar to that for the LFS case, but as seen in frame (g), the discharge is now much more localized inside the vessel. The results of the discharge from HFS show some advantages and some disadvantages compared to those from LFS. While the current multiplication ratio of the toroidal current to the injector (during the current decay phase) is about 1-2 for the discharge from the LFS, the ratio is improved and close to 5 for the discharge from the HFS, as shown in the waveform, (f). The substantial reduction of the injector current results in about ten times longer pulse duration than the discharge from LFS. The camera image, (g) shows that the flux evolves in a shape that is beneficial for forming closed flux surfaces. One of the weakest points for the discharge initiation from the HFS is the difficulty of forming a suitable injector flux using the existing PF coil set on QUEST. Because the PF5-1 coil is far away from the injector region, a relatively high coil current is required, and the resulting flux footprint is also widespread and beyond the main injector region.

Comparison of the two cases: In comparison, absorber arcs were well controlled for the LFS injection case. The injector flux for the LFS case evolves well, but the outer flux footprint that connects to the outer vessel wall continues to move away from the inner flux footprint location as the



Fig. 2 Modification of t-CHI system. Temporarily installed invessel-coil and cylinder attached to the bias electrode.

injected flux expands into the vessel. This results in the discharge developing a very wide flux footprint width configuration that is not favorable for inducing reconnection in the injector region.

When the injector flux is formed in the HFS region, the inner flux leg connecting to the inner vessel wall will be fixed during the flux evolution because the flux leg is held by the higher density flux on the HFS region. On the other hand, because the outer flux footprint is not well controlled, it is easy for the expanding outer flux to connect to the outer vessel wall, resulting in alternate current paths along the vessel wall, as shown in the camera image (g).

The gas injection location is also different for the two cases, as shown in (a). The initiation of the discharge from LFS was easier than that of the discharge from HFS because the gas injection nozzle installed on the hot wall was designed to initiate the discharge by directing the gas plume onto the electrode surface. Here easier discharge initiation means that when voltage is applied to the electrodes, the injected gas promptly breaks down in the injector region, and current starts to flow along the desired path, which is along the injector flux. For this to be possible, it is necessary to satisfy the Paschen conditions primarily in the injector region. This is described in figure 6 in ref [4], the relevant points we briefly summarize here. For the LFS, as the gas was injected from the ground electrode to the highvoltage electrode, it was easier for sufficient gas molecules to be quickly deposited in the injector region and allow a discharge to occur along the magnetic field lines connecting these electrodes. The discharge in the injector took place before the injected gas had time to spread to other locations.

In comparison, for the HFS, there was no direct gas injection from the ground electrode to the high voltage electrode. The gas was directed up into the vessel (right in Fig. 1 (a) and also Fig. 2 described later) and towards the center stack, which was at the same potential as the gas injection region. Consequently, the gas had to spread around before a sufficient gas pressure developed in the injector region. Simultaneously, the gas had also migrated to other areas outside the injector region, where the presence of much longer magnetic field line length allowed the Paschen condition to be satisfied at much lower gas pressure, which allowed the discharge to start in these undesirable locations also. This system was installed to provide some gas injection capability for HFS cases. Experimental schedules did not permit time for a more suitable system to be installed for this campaign. Consequently, a large amount of gas was injected to attain breakdown, which also resulted in some of the injected gas leaking to the absorber region and resulting in the formation of undesirable absorber arcs as noted above.

3. Improvements of t-CHI Discharge from HFS

To better localize the injector flux footprint locations (to induce reconnection in this region), two improvements were made: First, as shown in Fig. 2 a temporary in-vesselcoil was installed to obtain additional results to help with the design of a more permanent coil. This coil is composed of 12 turns wound Kapton insulated copper rectangular conductor. Second, a steel cylindrical electrode was attached to the bias electrode so that the outer leg of the injector flux is limited to the radius of this cylinder.

Figure 3 shows improved results due to these modifications. The injector flux in CHI discharges is generated by driving current in the poloidal field coil that is positioned near the injector location. Shot #42640 is a discharge when the injector flux magnitude is low, in which about 3 mWb injector flux is formed by 0.5 kA of in-vessel-coil current and 1.0 kA of PF5-1 coil current. The in-vessel coil and the PF 5-1 coils are used to generate the injector flux. At the t = 37.1 ms, the discharge is initiated outside the cylinder, and an absorber arc also arises. This is because some injector flux that extends above the height of the steel cylinder connects to the absorber region, and as previously noted, the unoptimized gas injection system provides the needed gas to initiate these absorber arcs.

However, the discharge then transitions to the inside of the cylinder at t = 37.25 ms, and at t = 37.5 ms the flux evolves above the vessel midplane. After the flux evolution, and after some of this extended flux decays, a detached plasma is seen to persists in the camera image even though the injector current has been reduced to zero at t = 38.75 ms. The camera images are encouraging. They suggest the formation of closed flux plasma because a doughnut-shaped plasma at the vessel mid-plane, apparently not connected to any other part of the vessel, could probably only exist if currents are flowing on closed field lines. But magnetic measurements are also needed to confirm closed flux formation. Unfortunately, the extensive absorber arching, which in some discharges produces a transient negative current signal, does not permit the Rogowski coil to clearly detect the CHI produced toroidal current. The occurrence of the short duration negative toroidal current is not well understood, but it could be due to some of the absorber arc currents flowing on field lines that are not part of the main injector flux and which could have an



Fig. 3 Results of discharges improved by the modification of t-CHI system.

opposite field line pitch.

The results of a discharge (shot #42826) with a higher injector flux, in which about injector flux is formed by 2.0 kA of in-vessel-coil current and 3.0 kA of PF5-1 coil current, also show that the flux evolves from within the cylindrical electrode region at $t = 42.0 \,\mathrm{ms}$ and t =42.25 ms. In this case, the flux evolved only up to the vessel midplane before shrinking without the detachment. However, due to reduced absorber arcing, the toroidal current is better resolved, and it increased to 35 kA, which is the maximum current for discharges from the HFS configuration. The higher injector current at t = 41.8 ms may result from the initial current paths connecting to the outer wall before the main discharge initiation inside the cylinder or it could be due to currents initially flowing on field lines that have a short length, and consequently lower resistance.



Fig. 4 Design of new gas injection system for the discharge from HFS. The gas is injected uniformly from eight spray nozzles on each gas manifold 1 and 2 towards the bias electrode.

These two modifications have clearly helped improve the t-CHI discharges on QUEST. What is particularly important is that both the inner and outer flux footprints are located in the vicinity of the cylinder, thus maintaining a narrow injector flux footprint configuration. Based on studies on NSTX, the 35 kA toroidal current in shot 42826 suggests that if that plasma were to extend into the vessel fully, the toroidal current would rapidly increase to much higher values. That should result in a persisting plasma, such as in discharge 42640, but with a higher toroidal current.

These results suggest that the primary limitation of these new discharges is the generation of the absorber arcs, which both limits the flux evolution fully into the vessel and corrupts the current measurements due to the presence of strong absorber arcing. The HFS discharges can be improved by modifying the gas injection system to direct the injected gas directly on to the new steel electrode like the LFS injection case. The LFS studies have clearly demonstrated absorber arc-free discharge initiation capability by using a correctly designed gas injection system, as described in ref [4]. As previously noted, there was insufficient time to design and install such a gas injection system for the previous campaign. Figure 4 is a cartoon showing the main elements of the new gas injection system for the HFS experiments. In some ways, this should be superior to the gas injection system used for the LFS case as the plenum operating pressure will be doubled, and gas injection is from eight ports that inject gas uniformly around a gas manifold. Also, two separate gas manifolds are planned to be used to more optimally control the gas conditions in the injector region. These improvements to the gas injection system are now in progress.

4. Summary

Transient coaxial helicity injection (t-CHI) current

start-up using a new design simple electrode configuration that is more suitable for reactor implementation, has been tested on QUEST in two different configurations. These are for cases when the CHI electrode is biased with respect to the outer wall (LFS case) or towards the center stack (HFS case). Good plasma evolution and absorber arc control are achieved for the LFS cases. However, as the injected flux expands into the vessel, the injector flux footprint widens, a condition that is not favorable for generating a closed flux plasma configuration.

In the HFS case, the flux evolves while maintaining a narrow injector flux footprint configuration, one that is suitable for the flux in the injector region to reconnect and generate closed flux plasmas. Indeed, one of the discharges shows promising data from a fast camera that indicates the presence of what appears to be a circular plasma in the vessel midplane after the CHI injector current is reduced to zero. However, in the HFS cases, extensive absorber arcing (due to a gas injection system that was not designed for this mode of operation) does not at this time allow us to clearly measure the CHI produced toroidal current. The design of an improved gas injection system is now in progress to better control the absorber arcs in the HFS configurations. It is anticipated that after this hardware improvement, QUEST should be able to generate t-CHI discharges similar to those on NSTX and HIT-II.

Acknowledgments

This work is supported by US DOE grants (DE-SC0019415, and DE-AC02-09CH11466), NIFS Collaboration Research Program (NIFS17KUTR130 and NIFS19KUTR137), the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University (international collaboration frame work 18 NU-1 and 19 NU-1 and early career scientists support work) and a Grant-in-Aid for JSPS Fellows (KAKENHI Grant Number 19K14685). This work was partially supported by a Grant-in-Aid for JSPS Fellows (KAKENHI Grant Number 17H06089), the NIFS Collaboration Research Program (NIFS19KUTR136, NIFS13KUTR085) and Japan / U. S. Cooperation in Fusion Research and Development.

- [1] R. Raman et al., Phys. Plasmas 11, 2565 (2004).
- [2] R. Raman et al., Nucl. Fusion 47, 792 (2007).
- [3] K. Hanada et al., Plasma Fusion Res. 5, S1007 (2010).
- [4] K. Kuroda *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 115001 (2018).
- [5] R. Raman et al., Fusion Sci. Technol. 68, 674 (2015).
- [6] H. Idei et al., Nucl. Fusion 57, 126045 (2017).
- [7] K. Hanada et al., Nucl. Fusion 57, 126061 (2017).