# 共同利用研究成果報告 第21号

# 平成 29 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 21 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。この報告書 に示しますように,2017 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,2018 年 6 月 7 日-8 日に開催される「RIAM フォーラム 2018」 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 (http://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 2017 年度は 13 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、22 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 2 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。研究所は、大学を特徴づ け個性化する存在でもあります。

応用力学研究所は、2010年度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ー問題の解決に向けた研究に、理学と工学の両面から取り組ん でいます。

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。

> 2018年3月 九州大学応用力学研究所 所長 花田 和明

## 平成29年度 共同研究一覧(目次)

地球環境力学分野					
No.		研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究1					
_	日	本近海予報モデリングの改新	統括責任者 広瀬 直毅		
29特1-1		沿岸海洋環境予測モデルにおける精度向上にむけ た相互比較	海洋研究開発機構 石川 洋一	広瀬 直毅 3名	1
29特1-2		海洋循環モデルを用いた人工衛星海上風ベクトル データセットの有用性の検証	鹿児島大学 加古 真一郎	広瀬 直毅 3名	3
29特1-3	サブ	超高解像度湾モデルの精度向上にむけたモデル間 相互比較	東京大学 川崎 高雄	広瀬 直毅 3名	5
29特1-4	テーフ	日本沿岸の海峡通過流に与える潮汐の影響	気象庁気象研究所 坂本 圭	広瀬 直毅 3名	7
29特1-5	Ý	日本海南部の定置網漁場における急潮予測に関する研究	石川県水産総合センター 辻 俊宏	広瀬 直毅 5名	9
29特1-6		対馬海峡から日本海南西海域にかけての海洋環境 モニタリングー数値モデルとの比較データの収集 -	長崎大学 滝川 哲太郎	千手 智晴 6名	11
一般研究					
29A0- 1	海吹	洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した 送距離延長法の確立	兵庫県立大学 高垣 直尚	磯辺 篤彦 2名	13
29A0- 2	衛 ダ	星搭載ライダと雲レーダ、ひまわり8号、地上レー によるジャンピングシーラスの同期観測	防衛大学校 岩崎 杉紀	岡本 創 1名	15
29A0- 3	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 2名	17
29A0- 4	ブ 路	リの電子タグデータを用いた日本海における回遊経 の推定	富山県農林水産総合 技術センター 小塚 晃	広瀬 直毅 2名	19
29A0- 5	内	部波特有の共鳴現象に関する解析	神戸大学 中山 恵介	<ul><li>辻 英一</li><li>2名</li></ul>	21
29A0- 6	全 ル	球雲解像・エアロゾル輸送モデルによる雲エアロゾ 相互作用の不確定性低減	名古屋大学 佐藤 陽祐	竹村 俊彦 1名	23
29A0- 7	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 原田 浩太朗	千手 智晴 3名	25
29A0- 8	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 3名	27
29A0- 9	水	中ビークル運用のための装備に関する研究	長崎大学 森井 康宏	中村 昌彦 10名	29
29A0- 10	日	向灘における流況変動特性の解明	宮崎県水産試験場 渡慶次 力	広瀬 直毅 5名	31
29A0- 11	洋制	上を航走するビークルに働く流体力解析および運動 御に関する研究	海洋研究開発機構 百留 忠洋	中村 昌彦 6名	33
29A0- 12	海ボ	洋環境生態系モニタリングのための自律型海中ロ ットの研究開発	大阪府立大学 有馬 正和	中村 昌彦 3名	34
29A0- 13	全	球気候モデルを用いたエアロゾルの気候影響の解析	東京大学 鈴木 健太郎	竹村 俊彦 2名	36
29A0- 14	海	洋大循環の力学ーエクマン層から中深層循環まで	北海道大学 水田 元太	磯辺 篤彦 16名	38
29A0- 15	衛風	星搭載ドップラー風ライダーによって観測された ・エアロゾルに関する研究	情報通信研究機構 石井 昌憲	岡本 創 5名	40

29AO- 16	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	千手 智晴 2名	42
29AO- 17	陸奥湾における海洋循環の数値モデル実験による解析	弘前大学 本田 明弘	磯辺 篤彦 5名	44
29A0- 18	沿岸波浪と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	46
29A0- 19	大阪湾に出現するフロント構造の解析	神戸大学 林 美鶴	磯辺 篤彦 1名	48
29A0- 20	衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲プロ ダクト推定アルゴリズムの高度化と地上検証に資する 観測研究	国立環境研究所 西澤 智明	岡本 創 3名	50
29AO- 21	長期観測におけるエアロゾルの気候影響に関する研究	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 2名	52
29A0- 22	富山湾沿岸域における対馬暖流水の流入に関する研究	富山高等専門学校 福留 研一	千手 智晴 1名	54
29A0- 23	マルチコプターを用いた海上気象の観測	名古屋大学 富田 裕之	市川 香 1名	56
29A0- 24	CloudSat/CALIPSO雲特性プロダクトの高度化に向けた 中緯度・極域の雲気候学的解析	長崎大学 河本 和明	岡本 創 2名	58
29A0- 25	東シナ海陸棚-黒潮間混合域における物質輸送過程理 解のための国際共同研究体制の構築	富山大学 張 勁	千手 智晴 3名	60
29A0- 26	GNSS反射波観測用受信機の開発とマルチコプタによる 実証実験	中部大学 海老沼 拓史	市川 香 1名	62
29A0- 27	日本沿岸域における高解像度海表面塩分マッピング手 法の開発	神戸大学 中田 聡史	千手 智晴 2名	64
29A0- 28	波浪境界層中間LESモデルの開発にむけた基礎データ 取得のための風洞水槽実験	名古屋大学 相木 秀則	磯辺 篤彦 1名	67
29A0- 29	インド亜大陸東北部における大気鉛直構造の解明	東京大学 木口 雅司	江口 菜穂 3名	69
29A0- 30	領域海洋モデルによるGNSS-R技術の海洋観測への応用 の高度化	東京大学 小平 翼	市川 香 2名	71

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	
特定研究2						
	極	限プラズマ科学の新研究手法の開発	統括責任者 藤澤 彰英			
29特2- 1		医療用CTにおける画像再構成手法のプラズマ乱流 計測への応用	帝京大学 荒川 弘之	佐々木 真 3名	109	
29特2-2		マイクロ波計測器から得られる大規模データを用 いた乱流プラズマの特性抽出法の開発	核融合科学研究所 徳沢 季彦	稻垣 滋 2名	111	
29特2-3		レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流 計測手法とデータ処理方法の開発	核融合科学研究所 秋山 毅志	稲垣 滋 7名	113	
29特2-4	サ	複雑ネットワークの手法を用いたプラズマ乱流時 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	115	
29特2-5	フテー	極限プラズマ科学研究会	九州大学 稲垣 滋	藤澤 彰英 18名	117	
29特2- 6	7	プラズマ流れ場構造観測に関する統合的研究	核融合科学研究所 居田 克巳	稻垣 滋 2名	119	
29特2-7		直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析	九州大学 山田 琢磨	稻垣 滋 3名	121	
29特2-8		イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメゾス ケール構造の解析手法の開発	核融合科学研究所 大舘 暁	稻垣 滋 3名	123	
29特2-9		デジタル相関ECE計測の開発とプラズマ実験への適用	核融合科学研究所 土屋 隼人	稲垣 滋 1名	126	

29特2-10	バイスペクトル解析による電子温度勾配モードと サ 低周波揺動の非線形結合過渡応答特性解明	東北大学 金子 俊郎	稲垣 滋 3名	128
29特2-11	ブ テ レンプラズマにおける径方向構造のトム リンン散乱計測	九州大学 富田 健太郎	稲垣 滋 2名	130
29特2-12	マ 振幅変調反応性高周波放電中のナノ粒子量のエン ベロープ解析	九州大学 古閑 一憲	稻垣 滋 2名	142
一般研究				
29FP- 1	多層グラフェン膜中に吸収された水素の加熱放出機構	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 1名	144
29FP- 2	軽水炉圧力容器鋼の工学的寿命を律速するLate Blooming Phaseの物性調査	東北大学 松川 義孝	渡辺 英雄 1名	146
29FP- 3	Fe-Mnモデル合金における特異な照射硬化とナノサイ ズのMn析出物形成の相関	京都大学 木村 晃彦	渡辺 英雄 2名	148
29FP- 4	統合輸送コードに導入するための電磁的ジャイロ運動 論解析を用いた輸送係数のモデリング	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷 直宏 4名	150
29FP- 5	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 3名	152
29FP- 6	LIFを用いた直線装置PANTAにおける境界領域の高精度 中性粒子計測	九州大学 寺坂 健一郎	小菅 佑輔 3名	154
29FP- 7	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	156
29FP- 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	京都大学 徐 虬	徳永 和俊 2名	160
29FP- 9	QUEST装置周辺プラズマに対する粒子リサイクリング と衝突輻射モデルの構築	慶應義塾大学 畑山 明聖	花田 和明 3名	162
29FP- 10	ジャイロ流体モデルによる直線装置PANTAにおけるITG モードの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	164
29FP- 11	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	渡辺 英雄 5名	166
29FP- 12	不純物イオン発光線の高波長分解分光によるQUEST周 辺プラズマのトロイダル流れ計測	京都大学 四竈 泰一	花田 和明 6名	168
29FP- 13	プラズマ乱流における非線形時系列データの統計解析	富山大学 成行 泰裕	佐々木 真 2名	170
29FP- 14	機械的合金化と高温等方加圧によるナノ粒子分散強化 銅合金の微細構造における高エネルギーイオン照射の 影響	核融合科学研究所 室賀 健夫	渡辺 英雄 5名	172
29FP- 15	鉄合金の照射劣化挙動に関する基礎的検討	東芝エネルギーシステム ズ (株) 鹿野 文寿	渡辺 英雄 3名	173
29FP- 16	鉄系合金の電磁気特性と照射ナノ組織の関係	岩手大学 鎌田 康寛	渡辺 英雄 4名	176
29FP- 17	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	178
29FP- 18	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	渡辺 英雄 3名	180
29FP- 19	先進ブランケットを指向した酸化物絶縁被覆材の微細 構造における高エネルギーイオン照射の影響	核融合科学研究所 菱沼 良光	渡辺 英雄 3名	182
29FP- 20	磁化プラズマの簡約化MHDシミュレーション	法政大学 西村 征也	糟谷 直宏 1名	184
29FP- 21	計測シミュレータによる運動論的プラズマ・シミュ レーションの定量的なValidation解析	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷 直宏 3名	186
29FP- 22	核融合プラズマ対向壁としてのベリリウムの表面特性	島根大学 宮本 光貴	渡辺 英雄 5名	188
29FP- 23	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 吉田 直亮	渡辺 英雄 7名	190
29FP- 24	構造材料中の水素挙動に及ぼす照射損傷の影響	茨城大学 車田 亮	渡辺 英雄 3名	192

29FP- 25	核融合炉用SiC材料の水素同位体及びヘリウム照射効 果	琉球大学 岩切 宏友	渡辺 英雄 5名	194
29FP- 26	電子ビーム照射による材料表面の高エネルギー密度入 射損耗開始閾値の評価	応用ながれ研究所 糟谷 紘一	徳永 和俊 3名	196
29FP- 27	大規模シミュレーションによるMHD不安定性の3次元構造解析	核融合科学研究所 佐藤 雅彦	糟谷 直宏 1名	198
29FP- 28	タングステン中における複合イオン照射下の欠陥形成 と水素同位体滞留ダイナミックス	静岡大学 大矢 恭久	渡辺 英雄 8名	200
29FP- 29	プラズマ乱流現象に関する可視化手法および卓上簡易 再現装置の開発	有明工業高等専門学校 竹内 伯夫	稲垣 滋 3名	203
29FP- 30	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 5名	205
29FP- 31	オーステナイト系SUS及びZr基合金の照射劣化挙動並 びに腐食挙動に及ぼす添加元素影響の評価	(株)日立製作所 丸野 祐策	渡辺 英雄 6名	207
29FP- 32	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	209
29FP- 33	中性粒子風由来のブロッブの発生と輸送特性	中部大学 杉田 暁	小菅 佑輔 1名	212
29FP- 34	複合照射環境下におけるタングステンの水素同位体吸 蔵特性に関する研究	筑波大学 坂本 瑞樹	渡辺 英雄 7名	214
29FP- 35	水素プラズマスパッタ法で形成される多孔質金属膜へ の水素混入とエネルギー付与効果	九州大学 片山 一成	渡辺 英雄 4名	216
29FP- 36	酸化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性	九州大学 安田 和弘	渡辺 英雄 4名	218
29FP- 37	高エネルギーイオン照射法による貴金属フリー新規磁 石材料の開発	東北大学 水口 将輝	渡辺 英雄 1名	220
29FP- 38	タングステンの熱負荷特性に及ぼす再結晶の影響	茨城大学 車田 亮	徳永 和俊 4名	222

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3						
	再	生可能エネルギーの大規模導入技術に関する研究	統括責任者 吉田 茂雄			
29特3-1		小形風力発電の出力変動の解析	東京理科大学 近藤 潤次	吉田 茂雄 1名	231	
29特3-2		三角翼バタフライ風車の開発研究および流体構造 連成解析	鳥取大学 原豊	吉田 茂雄 4名	233	
29特3-3		円筒形OWC型波力発電装置のエネルギー変換性能評価におけるスケールイフェクトに関する研究	九州大学 安澤 幸隆	吉田 茂雄 3名	257	
29特3- 4	サブテ	高空の風力利用についての研究	首都大学東京 藤井 裕矩	新川 和夫 15名	259	
29特3- 5	/   マ	流入風変動を考慮した水平軸風車の荷重低減に関 する研究	三重大学 前田 太佳夫	吉田 茂雄 4名	262	
29特3- 6		水平軸風車に作用する空力荷重の制御に関する研 究	三重大学 鎌田 泰成	吉田 茂雄 4名	264	
29特3-7		大型垂直軸風力発電システムの空力-弾性-制御 連成シミュレーションによる動的荷重解析	大阪府立大学 涌井 徹也	吉田 茂雄 3名	266	
29特3-8		高空風力発電の技術動向の検討	首都大学東京 藤井 裕矩	吉田 茂雄 19名	268	
一般研究						
29ME- 1	OVI 理	PE成長条件下におけるGaN非極性表面構造の第一原 計算	三重大学 河村 貴宏	柿本 浩一 2名	272	
29ME- 2	直續	線状海岸砂丘上における風場特性に関する研究	東北大学 有働 恵子	内田 孝紀 2名	274	

29ME- 3	マルチロータレンズ風車構造体の強度剛性評価	鹿児島工業高等専門学校 小田原 悟	内田 孝紀 3名	276
29ME- 4	レーザドップラ流速計を用いた風車翼近傍流れの計測	三重大学 前田 太佳夫	吉田 茂雄 4名	278
29ME- 5	風車・水車のウェイクに関する実験的研究	弘前大学 本田 明弘	内田 孝紀 5名	280
29ME- 6	波浪中浮体の圧力場の面分布計測技術に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 6名	282
29ME- 7	張架式風力発電装置の開発	福岡大学 江崎 丈巳	内田 孝紀 3名	288
29ME- 8	大島海峡における潮流パワーポテンシャルの季節変動	鹿児島大学 山城 徹	胡 長洪 3名	289
29ME- 9	低コストかつ高効率の潮流発電装置の開発研究	長崎大学 経塚 雄策	胡 長洪 3名	291
29ME- 10	3本のインプラントはリスクか	九州大学 松下 恭之	東藤 貢 2名	293
29ME- 11	CVDダイヤモンドおよびアルファ型酸化ガリウム半導体の結晶欠陥の生成機構の解明とパワー素子特性との 関連に関する研究	佐賀大学 嘉数 誠	柿本 浩一 7名	295
29ME- 12	風レンズ風車用の炭素繊維強化複合材(CFRP)の衝撃圧 縮特性に及ぼす負荷方向と温度の影響	岡山理科大学 中井 賢治	新川 和夫 2名	297
29ME- 13	機器要素に作用する突発的な負荷による損傷の進展に ついて	琉球大学 真壁 朝敏	新川 和夫 2名	301
29ME- 14	風・波併存時の係留浮体に関する模型実験およびシス テム同定	神戸大学 橋本 博公	末吉 誠 4名	303
29ME- 15	多層接結構造を有する多次元カーボン織物複合材料の 開発	信州大学 倪 慶清	汪 文学 1名	305
29ME- 16	集流装置付き潮流発電装置の曳航実験	佐賀大学 村上 天元	胡 長洪 3名	307
29ME- 17	AlN系窒化物半導体の基板作製と結晶成長の熱力学解 析	三重大学 三宅 秀人	寒川 義裕 1名	309
29ME- 18	浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御による 出力変動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	311
29ME- 19	化合物半導体太陽電池の高効率化のための格子欠陥特性	宮崎大学 吉野 賢二	柿本 浩一 3名	313
29ME- 20	モータ駆動用インバータの信頼性向上に資するキャパ シタ評価技術の確立	九州工業大学 長谷川 一徳	西澤 伸一 2名	317
29ME- 21	垂直軸風車の3次元効果の数値解析	鳥取大学 原豊	吉田 茂雄 4名	319
29ME- 23	高効率輸送のための地面効果翼機の翼空力に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	吉田 茂雄 3名	328
29ME- 24	血管内治療用カテーテルにおける耐久性と操作性の検 証	九州大学 古山 正	東藤 貢 2名	334
29ME- 25	CT-FEMを用いた大腿骨に関連するバイオメカニクス問題の解明	横浜市立大学 稲葉 裕	東藤 貢 2名	336
29ME- 26	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	九州大学 中島 康晴	東藤 貢 1名	338
29ME- 27	3Dプリンターを利用した骨再生用多孔質足場材料の開発	大阪大学 名井 陽	東藤 貢 2名	340
29ME- 28	骨粗鬆化脊椎における骨損傷メカニズムに関する研究	順天堂大学 米澤 郁穂	東藤 貢 3名	342
29ME- 30	ラット腰椎前方固定モデルにおけるporous Hydroxyapatite/Collagen とplatelet rich plasmaを 用いた椎体間骨癒合の検討	久留米大学 金澤 知之進	東藤 貢 2名	344

## 平成29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	
29A0- S1	海洋力学理論の研究会	北海道大学 三寺 史夫	木田 新一郎 6件・14名	応用力学研究所	2017. 06. 06	75	
29A0- 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・72名	応用力学研究所	2017. 12. 05- 2017. 12. 06	79	
29A0- S3	日本海及び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	三重大学 万田 敦昌	広瀬 直毅 15件・45名	応用力学研究所	2017. 12. 06- 2017. 12. 07	82	
29A0- S4	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	国立環境研究所 森野 悠	鵜野 伊津志 16件・35名	応用力学研究所	2017. 12. 01- 2017. 12. 02	87	
29A0- S5	海洋・海岸における波動の解析モデル の応用	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一 10件・11名	応用力学研究所	2017. 12. 16- 2017. 12. 17	89	
29A0- S6	海洋乱流の観測およびモデリングに関 する研究集会	京都大学 吉川 裕	和方 吉信 9件・27名	応用力学研究所	2018. 03. 19	93	
29A0- S7	非線形波動研究の新潮流-理論とその 応用-	京都大学 辻本 諭	辻 英一 30件・62名	C-CUBE 筑紫ホール	2017. 11. 09- 2017. 11. 11	97	
29A0- S8	日本海及び日本周辺海域における環境急 変現象(急潮)のモニタリング、モデリ ング及びメカニズム解明に関する研究集 会	日本海区水産 研究所 井桁 庸介	千手 智晴 13件・70名	応用力学研究所	2017. 08. 03- 2017. 08. 04	103	
29A0- S9	東シナ海と日本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 13件・18名	応用力学研究所	2018. 01. 31- 2018. 02. 01	106	

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	
29FP- S1	第15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 18件・26名	応用力学研究所	2017. 11. 29- 2017. 11. 30	224	
29FP- S2	国際プラズマ乱流データ解析ワーク ショップ	九州大学 稲垣 滋	藤澤 彰英 19件・25名	応用力学研究所	2018. 01. 30- 2018. 02. 01 2018. 03. 05- 2018. 03. 09 2018. 03. 14- 2018. 03. 16	229	

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	
29ME- S1	紫外材料の開発に関する国際シンポジ ウム	東北大学 小島 一信	寒川 義裕 5件・129名	九州大学 医学部百年講堂	2017. 11. 14- 2017. 11. 18	346	
29ME- S2	第10回 九大2D物質研究会(改称)	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 9件・9名	オフィス-ワン 四条烏丸201号室	2018. 01. 27	351	

沿岸海洋環境予測モデルにおける精度向上にむけた相互比較

海洋研究開発機構・地球情報基盤センター 石川洋一

#### 研究目的

九州大学応用力学研究所で開発・利用されている海洋大循環モデル RIAMOM と海洋研 究開発機構で開発・利用されている海洋大循環モデル OFES, MRI.COM および COCO の高 度化にむけて、結果を相互比較することによりそれぞれのモデルの特性を明らかにすると ともに、各モデルの改良点を洗い出す。特に九州大学応用力学研究所が得意とする日本海 などの縁辺海や沿岸域を対象とした比較を行うことにより、海洋物理研究における活用に 加え、海洋気象、水産、海上交通などの分野での実利用にむけた海洋モデルの改良を行 う。また、各モデルの特徴については海洋物理学的な観点からの比較に加え、計算性能や 入出力ファイルの形式などモデルの利用の観点からの検討も行う。

#### 結果

日本海などの縁辺海・沿岸域を対象としたモデル比較にむけて、海洋研究開発機構で開 発している東北沖高解像度ダウンスケーリングモデルを観測データと比較し、特に津軽海 峡周辺での海流場の再現性を評価した。

ダウンスケーリングモデルは気象庁気象研究所で開発された海洋大循環モデル MRI.COM を用いて、水平解像度約 1.7km(1/50°x1/50°cos θ)で東北〜北海道南部の領域を カバーするモデルである。水平境界条件として水平解像度 0.1°である「北西太平洋海洋長 期再解析データセット」(FORA-WNP30)を用いることにより、高解像度かつ現実的な沿 岸域、特に津軽海峡周辺の海洋循環場の再現を行った。

津軽海峡には海洋研究開発機構むつ研究所が観測を行なっている海洋短波レーダデータ (http://www.godac.jamstec.go.jp/morsets/)があり、表面流速の比較を行うことができる。 また、太平洋沿岸域においては東北マリンサイエンス拠点形成事業の一環として行われた 時系列観測データが比較可能であり、本年度はこの短波レーダーデータおよび時系列観測 データとダウンスケーリングの結果を比較することにより、モデルの特性を明らかにし た。

比較の結果からレーダーデータとモデル結果の間には時間スケールによる一致・不一致 があることが示された。短いスケールで卓越する変動として代表的な現象は潮汐・潮流で あるが、ダウンスケーリングモデルで再現された潮流はレーダーデータとよく一致をして いる。また比較的長い季節変動についても、津軽暖流の渦モード・沿岸モードの推移に関 連して津軽海峡内の成層構造や流軸変動がみられており、観測・モデル間の良い一致がみ られた。一方で、その中間である数日・数週間程度の変動については、観測データと一致 している期間もあるものの、必ずしも良い一致が見られなかった。この原因として、海洋 内部変動については水平境界条件だけでは制御しきれないこと、大気外力データとして解 像度の粗い JRA55 再解析データを用いているので、沿岸域の風応力場の再現性が必ずし も高くないことなどが原因として考えられる。

数値モデルの活用について海洋物理的な観点に加え、計算性能など利用についての観点 の検討の一環として、MRI.COM モデルの最適化を海洋研究開発機構の地球シミュレータ (NEC SX-ACE)および新しく導入された DA システム(HPE Applo6000/2000)向けに行っ た。どちらの計算機においても最適化で良いスケーラビリティが得られるようになり、 北太平洋全域を解像度 1/12°でカバーした設定で効率良く実行できることが示された。今 後は、さらなる高解像度化をすすめ、沿岸域についても十分解像することができる 1/108° モデルを目標とした開発を進めていく予定である。

#### 成果報告

田中裕介、石川洋一:東北沿岸・津軽海峡における高解像度モデリング. 九州大学応 用力学研究所研究集会「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」 2017 年12 月5日.

田中裕介・石川洋一・五十嵐弘道・蒲地政文・西川史朗:漁業への貢献を目指した津軽 海峡・三陸沿岸 regional の開発.北海道大学低温研究所研究集会 「宗谷暖流を始めとし た対馬暖流系の変動」 2017 年 6 月 29 日

#### 研究組織

石川洋一(代表)	地球情報基盤センター・グループリーダー	研究のとりまとめ
佐々木英治	アプリケーションラボ・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・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	竟変動総合研究センター・ユニットリーダー	モデル計算および解析

#### 海洋循環モデルを用いた人工衛星海上風ベクトルデータセットの有用性の検証

鹿児島大学 理工学域工学系 加古真一郎

#### 1. 目的

近年のリモートセンシングの発達や数値モデル及びデータ同化手法の確立により、全球を対象とした様々な 海面フラックスデータセットをウェブ等から取得することが容易となった。従来、この様なデータセットの精度評価 は、現場観測値を用いて行われてきたが、現場観測値が同化されている再解析データにはこの方法を適用でき ない。そこで本研究は、海洋循環モデルの境界条件として、本研究で作成したデータセットを含む 3 つの海上 風データセットを適用し、その出力結果を比較することで、本研究で構築したデータセットの有用性を検証する ことを目的とした。

#### 2. 人工衛星データ・再解析データセット

本研究では、観測時間の異なる複数の衛星から得られたベクトルデータに最適内挿法(Optimum Interpolation Method; OIM, Kako et al., 2011)を適用することで、空間解像度 0.25 度の全球海上風ベクトル日平均データ セットを構築した。このデータセットの期間は、2008 年から 2013 年の 6 年間である。これ以降、便宜上、本研究 で作成したデータセットを OIM と呼ぶ。比較のために用いたデータセットは、RSS 提供の CCMP および気象庁 GPV から得られた海上風データである。

#### 3. 数値モデル

本研究で使用した数値モデルは、九州大学応用力学研究所で開発された DREAMS (Hirose et al., 2013) である。対象海域は西部北太平洋であり(15.0°N-62.8°N, 105.0°E-179.75°E)、空間解像度は緯度 0.2°× 経度 0.25°である。本研究ではまず、JRA25 を境界条件として、DREAMS を 1981 年 1 月から 2007 年 12 月までの 27 年間、駆動した。その後、2008 年から 2013 年までの 6 年間を 0IM と上述の 2 つの海上風デ ータセットで駆動し、その出力結果を比較した。これ以降、各モデル計算の結果を 0IM-run、CCMP-run 及び GPV-run と便宜上呼ぶ。

#### 4. 結果と考察

本研究では、メソスケール以下の現象である台風通過時の海洋応 答に注目する。ここでは、OIM, CCMP, GPV から得られた海上風デ " ータセットを DREAMS の境界条件として与え、それぞれ 6 年間駆動 し、モデル出力の比較を行った。比較対象とした台風は、2008 年 " の台風 15 号である。図には示さないが、CCMP と GPV の当該日にお ける海上風は OIM と比べて弱く、空間構造も滑らかであった。図1 " に、台風 15 号が沖縄南方を通過した 2008 年 9 月 27 日における、 モデルと人工衛星 (Ensemble Median Sea Surface Temperature; EMSST) から得られた SST (Sea Surface Temperature: 海面水温)の 日平均場を示す。この図から、モデル SST は全体的に過小評価の 傾向にあるものの、OIM-run と GPV-run は、台風の通過に伴う SST の局所的な低下を再現していることがわかる。OIM-run から得られ た SST は、EMSST と比べて台風中心付近での水温勾配が大きいが、 GPV-run は小さく、CCMP-run は SST の低下を再現できていない。また、



図 1. 2008 年 9 月 27 日の SST の日平均値

台風通過後の水温の時間変化に注目すると、OIM-run, GPV-run および EMSST においては冷水の西側への 伝播を確認できるが、CCMP-run では、そのような特徴は得られなかった(図 2)。

#### 5. まとめ

本研究では複数の人工衛星から得られた海上風データを統合することで全球海上風ベクトルデータ セットを構築した。そして、このデータセットと、他の人工衛星プロダクトおよび再解析データを海洋 循環モデルの境界条件としてそれぞれ使用し、その出力結果を比較した。その結果、CCMP-run が台風通 過時の SST 低下を全く再現できないことが示された。これは、海上風に励起されるような海洋応答を調 べる際、CCMP の海上風は弱すぎることを意味している。OIM と CCMP は共に人工衛星データをベースと しているにも関わらず、大きな差が出ることは興味深い。しかしながら、OIM-run と再解析データであ る GPV-run との差は明確ではなく、今後様々な比較を通して、より詳細な有用性の検証が必要である。



図2. 台風通過前後の22.5°NにおけるSSTの経度時間断面図。縦軸は経度、横軸は日付を示す。

#### 6. 研究体制

代表者	鹿児島大学理工学域工学系	助教	加古	真一郎
世話人	九州大学応用力学研究所	教授	広瀬	直毅
協力者	九州大学応用力学研究所	学術研究員	高山	勝巳
協力者	名古屋大学	特任助教	富田	裕之

超高解像度湾モデルの精度向上にむけたモデル間相互比較

#### 東京大学 大気海洋研究所 川崎 高雄

#### ・目的

九州大学応用力学研究所で開発・運用されている海洋大循環モデル RIAMOM は、日本近海の海況予測を実 用レベルでの運用に使用されており、その精度は非常に高いレベルにある。東京大学大気海洋研究所では海 洋大循環モデル COCO および非静力海洋モデル KINACO を用いて、超高解像度の湾スケールモデリング研究を 行っている。さらに多重ネスティング手法によって湾と外洋域をシームレスにつなぐことで、外洋水の湾内 への流入や外洋への湾内の特徴的な海水の流出といった、湾-外洋の相互作用についても研究を行ってい る。本研究では、両研究所で用いられている海洋モデルの精度向上のために、我々が利用している外洋モデ ルと RIAMOM の結果の相互比較を行う。相互比較して高度化された外洋モデルの結果を、現在我々が開発中 の湾モデルに利用し、過去の海流再現や将来予測等に役立つモデル開発を推進する。

#### ・実験方法

海洋大循環モデル COCO を用いて、日本近海の海流や水温・塩分 場等が再現可能なモデル設定を行った。水平格子幅 1/4 度の全球 海洋を最も低解像度の外側のモデル(L0)とし、3 種類の水平格子幅 を持つ緯度経度座標領域モデルを段階的に設定することで、水平約 500m 格子の日本沿岸モデル(L3)を構築した(図1)。まずL0、L1 モ デルで構成される 2 重ネストモデルを水温・塩分の同化データに 緩和して、2000 年 1 月 1 日から 2013 年 9 月 1 日まで積分した。そ の後 L1 モデルの結果を L2 モデルに補間し、L0~L2 で構成される 40N 3 重ネストモデルを 9 月 1 日から 9 月 2 日まで駆動した。最後に、 L2 モデルの結果を L3 モデルに補間し、L0~L3 で構成される 4 重 ネストモデルを 9 月 1 日から 9 月 2 日まで駆動した。今後の湾モ デルとの接続も視野に入れ、4 重ネストモデルでは潮汐も考慮した。

一方、非静力海洋モデル KINACO を用いた水平格子幅 100m の超高解 像度の湾モデルの構築を行った。最終的には上記の外洋モデルの結果

図 1: ネスティング手法を用いた 外洋モデルの水平格子設定

を境界条件としたモデル駆動を目指すが、今年度は湾モデル単体による予備実験を行った。若狭湾の西端で ある丹後海全域をモデル領域として設定し、2013年9月の大雨時の由良川の河川水大量流出イベントについ てシミュレーションを行った。河川水として淡水に加えて、泥・砂など陸起源の懸濁物質の循環に対する影 響を調べるために、懸濁物質をラグランジュ粒子としてモデルに組み込んだ。

#### ・実験結果

外洋モデルは、黒潮・親潮・対馬海流など日本周辺海域での主要な海洋循環を良く再現した。懸念された 双方向の多重ネスティングによるネスト境界での流れの不連続はほぼ見られなかった。水平格子幅を500mに 設定したことで、黒潮など流量の大きい海流の一部が小さい島や海底地形を通過する際に形成される渦など 細かい構造が表現された。潮流をモデルに取り入れたことで、日本沿岸に多く分布する検潮所での海面高度 変動が概ね再現された。さらに潮流が地形に作用することで、島の周辺に継続的に渦が生成されるなど興味 深い物理プロセスも確認された。

湾モデルでは、河川水の大量流出に伴ってエスチュアリー循環が形成され、これは従来の理論および観測 と整合的であった。河川水に含まれる懸濁物質によって、表層水と亜表層水の鉛直混合強度が大きくなるか どうかは、仮定する懸濁粒子の大きさ・沈降速度に大きく依存することが明らかになった。

#### ・考察

外洋モデルの高解像度化によって表現された渦などの小スケール海流の挙動について、衛星観測との比較 によって検証を進めている。例えば、モデルで表現された黒潮の主要流路であるトカラ海峡で島の下流側に みられる渦について、気象衛星観測「ひまわり」の海面水温データからもその存在が確認され、大きさや生 成頻度等についても概ね良く再現されていることが明らかになった。九州大学応用力学研究所で開発・運用 されている RIAMOM との比較によって、外洋モデルは対馬海流の対馬海峡付近の流路をよく再現したが、対馬 海峡西水道における北東向き流量はやや過小評価であるなど、定量的比較においては課題が残った。

湾モデルにおいては、河川水大量流出によって形成されるエスチュアリー循環の強度が、懸濁物質の有無 および仮定する粒子の大きさ・沈降速度・総量に対してどのように変化するかを今後明らかする必要がある。

#### ·研究成果報告

- 論文(査読有)
- (1) 藤井 陽介、蒲地 政文、広瀬 直毅、望月 崇、瀬藤 聡、美山 透、広瀬 成章、長船 哲史、韓 修妍、五 十嵐 弘道、宮澤 泰正、豊田 隆寛、干場 康博、増田 周平、石川 洋一、碓氷 典久、黒田 寛、高山 勝 巳:日本の海洋データ同化研究―20 年間の功績と今後の展望―、海の研究、26(2),15-43,2017.
- 学会発表
- "Effects of suspended sediment matters induced by high riverine discharge on coastal mixing: a model simulation", Hoshiba Y., Y. Matsumura, H. Hasumil, S. Itoh, Y. Yamashita, JpGU-AGU joint meeting, May 22nd 2017, Chiba, oral.
- (2) "A particle-in-cell modeling framework for simulating riverine and oceanic suspended sediment transport", Y. Matsumura, JpGU-AGU joint meeting, May 22nd 2017, Chiba, oral.
- (3) "Simulation on the Effects of Suspended Sediment Matters Induced by High Riverine Discharge on Coastal Mixing", Hoshiba, Y., Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Itoh, Y. Yamashita, Asia Oceaniea Geosciences Society 14th Annual Meeting, Aug 8th, Suntec City (Singapore), oral.

#### ・研究組織

氏 名	所属	職名	役 割
川崎高雄	大気海洋研究所	特任助教	研究代表者
松村 義正	大気海洋研究所	助教	研究協力者
干場 康博	大気海洋研究所	特任研究員	研究協力者
羽角 博康	大気海洋研究所	教授	研究協力者

## 日本沿岸の海峡通過流に与える潮汐の影響

気象研究所 海洋·地球化学研究部 坂本圭

要旨

海峡通過流に対して潮汐が与える影響を調べるために、高解像度日本沿岸モデルを用いて潮汐ありなし の比較実験を行った。潮汐なし実験では西から東へと流れる通過流が瀬戸内海中に形成されるが、潮汐 あり実験では豊後水道で流れが逆転するなど通過流の形成はほぼ抑制された。同様に、対馬海峡、津軽 海峡、宗谷海峡でも通過流は潮汐によって抑制され、流量ではそれぞれ6%、1%、20%だけ低下した。 この力学的要因や海況に与えるインパクトはこれから調べる必要があるが、本実験結果は、日本周辺の 沿岸モデリングにとって潮汐の効果の考慮は不可欠であることを示唆する。

序論

気象研究所ではこれまで日本近海を対象とした海洋モデル・データ同化システムを開発してきた。シス テムの高度化により海況の再現性は年々向上しており、例えば、広く水温分布等に影響する対馬海峡、 津軽海峡、宗谷海峡の通過流は、季節変動も含めて良く再現している(Han et al. 2016, Ocean Dyn.)。し かし一方で、豊後水道や紀伊水道では非現実的に大きい東向き通過流が発生するという未解決の問題も ある(Sakamoto et al. 2016, Ocean Dyn.)。このような状況のもと、沿岸モデルの更なる高度化に向けて 潮汐(潮流)の導入に取り組んでいる。潮流は地形との相互作用により、豊後水道を北上する流れ(暖水波 及)を阻害すると報告されており(Nagai and Hibiya 2013, J. Oceanogr.)、瀬戸内海中の流れ場の改善が 期待される。また、このようなメカニズムは他の海域でも作用すると考えられるが、その役割は未だ明 らかでない。周辺海況に対する通過流の影響を考慮すると、各海峡の通過流に対する潮汐の役割を明ら かにすることは重要である。

#### モデルと実験方法

用いるモデルは、我々が現業目的に開発している日本沿岸モデルである。このモデルは日本沿岸全域を 約2kmという高い水平解像度で覆い、潮汐をはじめ主な沿岸物理過程を現実的に再現する。実験の大気強 制にJRA-55較正データ(辻野博之が開発)を、沿岸海況に重要な河川流入に気象庁流域雨量指数にもとづ くデータ(浦川昇吾が開発)を使用した。側面境界には双方向結合された北太平洋モデル(主に中野英之が 開発)の結果を用いた。本モデルで潮汐を与えるケース(CTL)と与えないケース(NOTIDE)の実験を行 い、両者の海峡通過流量の差から潮汐の影響を定量的に評価する。

実験結果

2つのケースでは瀬戸内海中の流れの様相は大きく異なる(図)。NOTIDEでは関門海峡から流入した流れ が岸沿いに東進し、豊後水道からの流入と合流したあと、蛇行しつつ瀬戸内海内部へ進む様子が見られ る。一方CTLは、潮汐によって強い残差循環が形成されるが、NOTIDEで見られた平均流は形成 されない。実際、関門海峡からの流入量は NOTIDE で  $2.0 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/s に対し CTL では  $6.7 \times 10^2$  m<sup>3</sup>/s と 1/3 に減少し、さらに豊後水道では NOTIDE では北向き  $4.3 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/s なのに対し CTL では南向 き  $1.6 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/s と逆転した。この結果は、序論で述べた Nagai and Hibiya (2013) と定性的に一致し、 瀬戸内海中の平均流に対し潮汐の影響が大きいことを意味する。



図:(a)実験 NOTIDE と(b)CTL における瀬戸内海西部の海面流速場(2009 年平均)。色は流速絶対値を示す。

同様に、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡についても通過流に対する潮汐のインパクトを調べた。詳細は 省略するが、どの海峡でも NOTIDE に対し CTL で通過流量は減少し、その減少率は対馬 6%、津軽 1%、宗谷 20%であった。瀬戸内海ほどではないが、その他の海峡でも潮汐が通過流に対し無視できな い抑制効果を及ぼすことが明らかになった。

考察

実験では日本周辺の主要な海峡において潮汐の影響が示されたが、その要因については、海底摩擦の強 化、成層の変化、小スケール渦による水平混合などいくつか考えられ、各海峡の影響の度合いとの関係 も含めて更なる研究が必要である。また、通過流の変化が周辺の海況に与えるインパクトについても、 今回行った実験の解析を続ける必要がある。

成果報告(論文なし、学会発表のみ)

- 1. 坂本圭, 辻野博之, 中野英之, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 山中吾郎, 解像度 2km 日本沿岸モデルを用いた 沿岸滞留時間の推定, 日本海洋学会秋季大会, 17F09-P01, 2017/10/13-16, 仙台国際センター
- 2. 坂本圭, 辻野博之, 中野英之, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 山中吾郎, 解像度 2km 日本沿岸モデルを用いた 沿岸滞留時間の推定, 日本海及び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, 2017/12/7, 九州大学応用力学研究所
- 3. Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. L. Urakawa, G. Yamanaka, and T. Toyoda, Simulation of the coastal seas around Japan using a nested 2-km resolution model, Ocean Sciences Meeting, OM24A-2077, 2018/02/12-16, オレゴン会議場

#### 日本海南部の定置網漁場における急潮予測に関する研究

石川県水産総合センター 辻 俊宏

#### 1. 目的

丹後半島から能登半島の沿岸海域は全国有数の定置網漁場であり、定置網漁業は地域の重要産業の一つと なっている。一方、沿岸の流れが突然速くなる「急潮現象」により、定置網が流出するなどの被害がしばし ば発生してきた。近年の研究により、急潮の発生メカニズムの解明が進むとともに、急潮予測モデルの構築 により、事前の発生予測が可能となり、被害を大きく軽減させてきた。しかしながら、この予測は、沿岸海 域全体を見た時には評価が高いものの、沿岸各地に設置された個々の定置網漁場での予測精度は未だ不十分 な点が多い。そこで本研究では、定置網漁場における流況観測データを用いて、急潮の発生状況を整理する とともにモデルとの整合性を検証することにより、急潮予測精度の向上に資するともに、現行予測モデルの 高精度化および汎用化を探ることを目的とする。

#### 2. 資料と方法

2006~2016年に日本海南部海域の定置網漁場8ケ所(図1)の深度10mに設置した電磁流向流速計の観 測データを解析に用いた。突発的に発生し、急激に流向・流速を変化させるという急潮現象の特性と定置網 への被害を与えるかどうかという観点から1日における最大流速が50 cm/s以上であることを急潮発生の指標 とした。なお、能登半島を時計回りに流れる北向き〜東向きの流れを順流、逆の南向き〜東向きの流れを逆 流と呼び、流向別に発生頻度を解析した。それぞれの急潮の発生要因を明らかにするため、海上保安庁の保 有する舳倉島灯台の風向・風速観測データとの関連性を調べた。3日以内に発生した急潮を同一事例として 集約し、それぞれの事例ごとに急潮発生日を含め2日前までの風向と風速に基づき以下の4つに分類した。

[①南西の強風]:南から西寄りの11 m/s以上の強風が1時間以上連吹した。

[②北東の強風]:北から東寄りの11 m/s以上の強風が1時間以上連吹した。

[③その他の強風]: ①、②以外で11m/s 以上の強風が1時間以上連吹した。

[④強風なし]:上記以外で11m/s以上の強風が1時間以上連吹しなかった。

最後に、急潮発生日前後における流速(流軸方向の成分値)を観測地と現行予測モデル(DREAMS\_C)の計算値とで比較し、予測モデルの精度を検証した。

#### 3. 結果および考察

延べ 418 日の急潮が発生し、そのうち 大部分が最大流速 50~60 cm/s の急潮で あり、最大流速 70 cm/s 以上の急潮は 17 日、100 cm/s 以上の急潮は 1 日と少なか った。流向別に見ると外浦海域(能登半 島の西岸側、以下同じ。)では、順流の割 合が多く、内浦海域(能登半島の東岸側、 以下同じ。)は逆流の割合が多かった(図 1)。1 漁場あたりの 1 シーズンの急潮発生 日数は 1.1~15.1(平均 5.8)日で、月別 平均では 8 月が 1.2,日と最も多く、9 月の 1.1 日が次いで多かった。



図1. 観測漁場位置とそれぞれの最大流速別急潮発生日

延べ 418 日の急潮発生日は、208 事例にまとめられた。舳倉島灯台の風向・風速の分類別にみると、[①南 西の強風] が最も多く 85 事例で全体の 41%を占めた。以下、[④強風なし] が 79 事例 (38%)、[③その他 の強風] が 24 事例 (14%)、[②北東の強風] が 16 事例 (8%) と続いた。漁場別に見ると、内浦海域では、 [①南西の強風] が 50%以上を占めたが、外浦海域では [④強風なし] も多く、特に西海では 50%以上を

占めた。これまで当該海域による急潮は、気象擾乱に起因するものが多く報告されていたため、急潮の予測 は気象擾乱を主因に検討されてきた。しかしながら、

気象擾乱が直接要因とならない急潮も多く発生して いたことが明らかとなった。今後、これらの発生要 因について解明していくことが必要となろう。

2016年に発生した気象擾乱を伴う急潮5事例についてモデルの再現性を検証した。全般的には、良好な再現性が得られたが、事例や、漁場により十分さ 再現性が得られなかったところも見られた(図3)。 今後、検証事例を増やし、再現性の精度に関与する 要因を明らかにしていくことで、予測モデルの精度 向上につなげていきたい。



図 2. 風向・風速タイプ別急潮の発生割合



図 3. 2016 年に発生した急潮時における流速(流軸方向成分値 cm/s)の観測値とモデル計算値との比較例

#### 4. 発表等実績.

なし

#### 5. 研究組織

研究代表者	石川県水産総合センター	辻	俊宏	主任研究員
所内世話人	九州大学応用力学研究所	広瀬	直毅	教授
研究協力者	福井県立大学	兼田	淳史	准教授
研究協力者	富山高等専門学校	福留	研一	講師
研究協力者	京都府農林水産技術センター	舩越	裕紀	技師

### 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

### -数値モデルとの比較データの収集-

長崎大学大学院水産·環境科学総合研究科 滝川哲太郎

#### 1. 目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ唯一の水路であり,対馬暖流は,東シナ海から対馬海峡を経て 日本海に流入する。夏季には,対馬暖流は中国大陸の長江起源の淡水を多量に輸送する。対馬海峡は対 馬によって韓国側の西水道と日本側の東水道に分かれる。海洋データ同化の手法を用いた数値モデル研 究では,東水道通過流は,山口県萩市沖の見島によって分岐している(広瀬ら,2009,海と空)。

本研究では、当海域の数値モデルと比較しうる観測データの収集を目指す。東シナ海から移流されて くる大陸起源の低塩分水を捉えることを念頭に、対馬海峡東水道の離島等における水温・塩分の連続測 定を実施した。また、見島での対馬暖流分枝流の変動を捉えるために、見島とその南側対岸の青海島に 水位計を設置し、両島間の水位差を測定した。さらに、萩-見島間のフェリー「おにようず」(萩海運) を用い、見島から沿岸寄りのフェリー航路上の表層水温を測定した。

#### 2. 観測

対馬海峡東水道から山陰沿岸の4観測点(美津島,小呂島,蓋井島,青海島通)に水温・塩分計(または水温計)を設置し,表層の水温と塩分を測定した。また,萩市浜崎(図1)と見島の間を2または 3 往復/1 日する定期フェリーに,水温収録装置を取付け,航路上の表層水温モニタリングを実施した。

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)。水位計設置時に DGPS を用い,東京湾平均海面(TP)を測量した。水位計のセンサードリフトを調べるために,半年または1年に1回程度の水位データ収集時に大気圧を測定している。本報告では,主に,水位計のセンサードリフトの補正について報告する。

#### 3. 結果

前年度の報告(28A0-15)から,両島の水位計はセンサードリフトの影響を受けている。このため, 近年,青海島-見島間の水位差が上昇傾向にある。データ収集時ごとに見積もったセンサードリフトの 時系列を図2に示す。2015年以降,両島のセンサードリフトは異なる変化を示し,その差は最大 6.2 hPa となった(2015年10月)。

水位観測中,このセンサードリフトは線形に変化したと仮定し,水位データを補正した。ドリフト補 正後,48時間のタイドキラーフィルター(花輪・三寺,1985,沿岸海洋研究ノート)を施した青海島と 見島の水位と両島間の水位差を図3に示す。センサードリフトを補正すると,2014年から2017年まで の平均水位差は15 cm 程度となり,近年の水位差の上昇トレンドは現れなかった。

2013年と2015年の両年で,水位差が夏に増加,秋に減少していた。Takikawa et al. (2017, CSR) によると,猛暑の2013年には,小笠原高気圧に伴う南東卓越風によって,水位差が上昇したと報告している。2015年の水位差変動の振幅は,2013年に比べ小さいものの,同様の現象であったかどうか,今後,検討する必要である。



## 4. 研究組織

研究代表者	長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科	滝川	哲太郎
所内世話人	九州大学応用力学研究所	千手	智晴
研究統括者	九州大学応用力学研究所	広瀬	直毅
研究協力者	福岡県水産海洋技術センター	松井	繁明
	山口県水産研究センター	渡辺	俊輝
	島根県水産技術センター	金元	保之
	愛媛大学沿岸環境科学研究センター	森本	昭彦

## 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、共同利用施設である九州大学応用力学研究所の風波 水槽を使用して、(1)風波の発達区間を延長するループ法確立に関する事前準備、(2)大規模二次流れ の測定、を行った.その結果、(1)の事前準備を予定通り実施することが出来た.また、(2)の大規模 二次流れ構造の一部の観察に成功した.

・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100m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(30km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.また、やや趣旨の異なるサブテーマとして、大気 境界層内に生成される大規模な二次流れが水面上でも生成されるかを検証することも目的とする.今年 度は、ループ法確立のために海洋シミュレータ水槽および造波装置のチェックを行った.また、大規模二 次流れの測定を行った.そこで、以下では大規模二次流れの実験方法・結果について報告する.

・実験方法

本実験では、九州大学・応用力学研究所・海洋環境シミュレーション実験棟に備え付けてある風洞付き 内部波水槽を使用した.遠心型ファンを使用して水がためられた水槽上部に気流を生成した.測定座標系 は、テストセクション入口部の先端の中心を原点として、主流方向距離を*x、スパン*方向距離を*y、*鉛直 上向き方向距離を*z*とした.測定のために、自作の熱線流速計を使用し、*x* = 3 mの地点において風速測 定を行った.ファン回転数を*N* = 100 rpm とした.この風速では、水面に風シアがかかっているものの、 波立ってはいない環境を作り出すことが出来る.熱線流速計のサンプリング周波数は 48 kHz、サンプリ ング時間は 30 s で行った.

· 実験結果

図 1(a)に 10 連熱線流速計で測定された気流スペクトルの図を示す.スペクトルは図中の-5/3 乗を示 すの直線に従うことから,100 Hz 程度まで慣性小領域が存在することを確認した.図 1(b)に大規模二次 流れ構造の可視化結果を示す.図 1(b)では横軸は主流方向の無次元数x / δ,縦軸はスパン方向の無次元数  $y / \delta$ である. 無次元化には境界層厚さ $\delta$ を用いた. ここでのxはテーラーの凍結乱流の仮定より推定した 値である. 図 1(b)中のコンタは(u - U) /  $u^*$ の値, つまり, 瞬間の変動風速の無次元値であり,  $(u - U) / u^* = -4$ のときに黒,  $(u - U) / u^* = 0$ のときに白とした. 図 1(b)より主流方向に黒色の帯が存在す るように見える. これは, 大規模二次流れ構造を示しているものと考えられる.



Fig. 1 (a, left) Wind spectrum obtained by hot wire velocimetry, (b, right) Secondary flow structure.

・成果報告(論文、学会発表リスト等)

- 1. N. Takagaki, S. Komori, M. Ishida, K. Iwano, R. Kurose, N. Suzuki, Loop-type wave-generation method for generating wind waves under long-fetch conditions, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 34, pp2129-2139, (2017).
- N. Takagaki, S. Komori, K. Iwano, N. Suzuki, H. Kumamaru, *IUTAM Symposium wind waves*, University of Cambridge London, London, England, 4-8 Sep 2017.
- 3. 高垣直尚, 招待講演, 風波実験水槽設計にみる工学系と理学系の視点の違いとその応用例, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*,幕張メッセ(千葉), 2017 年 5 月 24 日.
- 高垣直尚,高風速下かつ長吹送距離における風波気液界面を通しての運動量および熱輸送量の評価, 日本伝熱学会関西支部講演討論会,神戸大学梅田インテリジェントラボラトリ(大阪),2017年7月.
- 5. 高垣直尚, 招待講演, 海表面を通しての物質輸送-高ウィンドシア・吹送距離・雨滴衝突の影響-, 海洋地球科学における乱流拡散制御ワークショップ, JAMSTEC(東京), 2017 年 10 月 19 日.
- 6. 高垣直尚,高風速下かつ長吹送距離における風波気液界面を通しての熱輸送機構,波浪研究集会,名 古屋大学(名古屋),2018年3月5日.
- ·研究組織
- 研究代表者:高垣直尚
- 研究協力者:高根慧太
- 研究協力者:高畑俊作

#### 衛星搭載ライダと雲レーダ、ひまわり8号、地上レーダによるジャンピングシーラスの同期観測

防衛大学校 地球海洋学科 岩崎杉紀

#### 且的

本研究は、ジャンピングシーラス(JC)と呼ばれる発達した積乱雲(オーバーシュート)の雲 頂から上に向かって1-2kmジャンプすると推測されている現象が気候に及ぼす影響を、地上・衛 星観測を行うことで解明することを目的としている。

JCは、非断熱過程で起きるため、対流圏の物質を成層圏に効率的に物質を輸送できると考えら れている。しかし、これは数値実験の推測でしかない。衛星観測でかなとこ雲の上にJCらしきも のは報告されているが、JCを上から見ているので本当にジャンプしているか分からない。航空機 観測からJCの報告は数例あるが、それも見た目の形状について指摘しただけのものである。いま まで、JCの観測的研究は、「JCを見た」という報告しかなく、どの程度ジャンプしているかなど、 どんな条件の時にJCが発達するか、JCの定量的な性質は一切報告されていない。そこでJCのカ メラによる地上観測と静止気象衛星ひまわり8号や他の衛星観測によりJCの定量的な性質を明ら かにする。

#### 方法

富士山特別地域気象観測所(旧富士山測候所、標高3776m)にカメラ6台設置し、JC撮影を2017年の夏の1ヶ月間行った。また、7から9月にかけて防衛大学校の屋上(標高100m)に3台のカメラを設置しJC撮影を行った。富士山でのJCのカメラ撮影はこれで2年目である。ただし、富士山に設置したカメラはネットワークの不調でデータを多くの保存することができず、観測にほぼ失敗した。そこで2016年の夏に行った富士山に設置したカメラと防衛大に設置したカメラの写真を見直した。2016年の観測も応用力学研究所の共同利用を利用した観測である。

当初 JC は 10 件程度撮影できていたと思われていたが、19 件撮影できていたことが分かった。 以前のデータ解析で、防衛大学校のそばに発生した仰角の高い雲(近くの低層雲は仰角が高い) の下に写っていた仰角の低い積乱雲(200km程度遠くに離れているので仰角が低い)を見落として いたためである。うち1つは熱帯の積乱雲のように高度 18.7 km まで発達している積乱雲であった。

雲の高さをカメラから求めるため、夜間に撮影した星と星図を比較した。まず、比較によって、 積乱雲の仰角と方位角を求める。その方位角方向にある積乱雲の最も発達した位置(ひまわり8 号の10.4 μmの視差補正した輝度温度が最低である場所)と観測点との距離からJCの高度を求め た。ただし、高度導出において、今までは大気差を考慮していなかったので、これを考慮した。 大気差とは、光が大気によって屈折するため、星が真の仰角に比べ高い方向に見える現象である。 見えている星の角度はそのままでは仰角を求める基準にはならない。大気差は低仰角であるほど 顕著となる。解析の結果、本観測では、JCの高度を星図から見積ると100から200mずれることが 分かった。



影。左が西方向である。動画で見るとジャンプしてい るさまが分かりやすい。 大気差の補正は出来ない。大気差は対流圏のみでなく大気圏の気温や圧力の鉛直分布に依存するが、気温などの測定はせいぜい高度30kmまでしかないためである。このため、写真から導出された高度は100から200mの誤差を持つことが分かった。ただし、この誤差は絶対値でありJCが何kmジャンプしたといった相対値ではない。JCの解析では大きな誤差ではないことが分かった。

その他の誤差要因は、JCが視線上のどの位置で発生したか不明なことである。解析ではカメラ とJCを結ぶ直線上の最も低い輝度温度の位置でJCが発生したと仮定した。事例にもよるが、JC が撮影できた多くの convective cloud cluster の直径は 30km ほどであった。JC の高さを導出す るのに仰角と、観測者とJC の距離が必要になる。JC がこの 30km の上のどこかしらで発生すると 仮定した場合、この誤差で最大 500m ほど高度に差が出る。

#### 結果

図1は2016年8月4日の18:20ころに栃木県鹿沼市付近に発生したJCである。防衛大カメラで 撮影した。防衛大と鹿沼市は140kmほど離れている。低高度から撮影しているので、下層のエア ロゾルの影響を受け、ぼやけた写真となっている。富士山山頂に設置してあったカメラは、富士 山周辺の雲に阻まれ防大カメラと同時にJC撮影することは出来なかった。

JC は幅 1.4km の雲が 3 分ほどで 1.3km ジャンプ(上昇速度 7m/s)し、その最大到達高度は 16.8km であった。その後、JC は西方向に向かって移流した。ひまわり 8 号の可視画像(水平分解 能 500m)で西に移動している雲が写っていた。ひまわり 7 号に比べ空間分解能が向上したが、こ の規模の JC でも JC はすぐには見つからない。今後このひまわりで撮影された雲が JC であるか判 定を行う予定である。なお、1 地点からの撮影なので JC の正確な移動量や移動方向は分からない。

10 分ごとのレーダ雨量を見ると、JC 付近は 100m/hr を超えている場所もあった。かなり発達した積乱雲であったことが分かる。レーダエコーはわずかにゆっくり北上しているので、ひまわりで撮影された西に移流している雲は積乱雲本体ではない。ひまわりの赤外画像で見ると、最低の輝度温度は 210K、6.2µmと 10.4µmの輝度温度の差は-3℃であった。濃い水蒸気が雲の上にある場合にこの輝度温度の差が正となる。JC で発生した雲は昇華した量が少なく水蒸気をそれほど供給しなかったか、ジャンプした距離が小さく雲頂より暖かい高度まで到達できなかったかのどちらかが考えられる。

全19件のJCの平均した雲頂高度は14.6kmでかなとこ雲から1.2kmジャンプしていた。このうち、3件が圏界面に達していた。これらのCAPEは782から1384J/kgであり、対流が立ちやすい状態にあった。最も高いJCは18.7kmまで達しており、最もジャンプした高さは2.2kmであった。

対流が弱く、JCが圏界面に達していない事例のうち15件が風速が急に弱くなった高さでJCが 発生していた。重力波の砕波が起きやすい状況にあった。

#### <u>まとめ</u>

2016年と2017年の夏季に発達した積乱雲のかなとこ雲から上方に1-2kmジャンプするJCの撮影を富士山特別地域気象観測所と防衛大学校で行った。2017年夏季の富士山特別地域気象観測所のJC撮影はデータを適切に保存することが出来ずに失敗した。また、2016年に行った富士山と防衛大から同一のJCを撮影は、片方でJCが撮影できてももう一方で雲がかかっており出来なかった。しかし、それ以外ではJC撮影に成功している。JCの定量的な観測はまだ世界で初めてである。現在、これらの特徴を統計的にまとめている段階である。

#### 成果報告

**岩崎杉紀**、瀬口貴文、鴨川仁、久保田尚之、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲の雲頂から飛び上がる雲の撮影、日本気象学会春季大会、東京、2017年5月。

**瀬口貴文**、浅井俊太、岩崎杉紀、鴨川仁、久保田尚之、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲の 雲頂から飛び上がる雲; Jumping Cirrus の観測、日本気象学会秋季大会、札幌、2017年10月。 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】

近年、福井県沿岸では急潮の観測体制と数値モデルを利用 した急潮予報システムの構築が進められ、いまでは定置網近 傍での流れや水温の観測や、同予報システムを利用した1週 間先までの流況予測が行われている。一方で、若狭湾東部海 域は急潮の発生頻度が周辺海域と比べて少なく年に数回程度 であるため、急潮発生時のデータを蓄積し、今後の急潮対策 や予測に役立てることが課題として残っている。

本研究は新たな急潮の知見を見いだすことを目的とし、 2017年の観測体制によって取得したデータを分析した。

#### 【観測および解析】

福井県立大学、福井県水産試験場は2017年5-10月に若狭 湾および越前海岸の定置網近傍で流れや水温を計測した(図 1参照)。それぞれの測点では電磁流速計や ADCP を用いて海

図1 若狭湾および測点図.2017年 に福井県水産試験場、福井県立大学 が流速計を設置していた観測地点を 示している.

面下 10m または海面から海底付近までの多層の流れを計測するとともに、複数個の水温センサーも設置 して海面から海底まで 10m おきで水温を計測した。本研究では流速が 50cm/s を超える突発的な流れを 急潮とすることと定め、急潮の発生状況やその特徴について調べた。

#### 【結果および考察】

小樟の流れの時系列(図2上段)から、通常は北-北西方向に向かう 20cm/s 以下の穏やかな流れが 発生していたことがわかる。また、6月25日、8月7日頃には台風や低気圧の通過に伴う一時的な流向・ 流速の変化が発生したが、最大流速は 30-40cm/s 程度であった。50cm/s を超える一時的な強流、つま り急潮の発生についてデータから調べると、7月24-26日(図中の矢印)に南東方向へ向かう急潮が発 生していたことが確認できたため、本研究ではこの急潮に注目して更に分析を進めた。



図 2 2017 年 6-8 月の小樟と鷹巣の流れの時系列. 小樟では 7 月 25 日頃に 50cm/s を超える強い流 れが発生した。 急潮時の周辺海域の流れおよび水温の変化を把握するために、図2下段には湾口東部の鷹巣の時系列を示し、図3 には小樟、鷹巣の6-8月の水温時系列を示した。

鷹巣では急潮発生直前にあたる7月23日頃から流れが次 第に強くなっていたことから(図2下段)、急潮発生時は若 狭湾沖の対馬暖流が次第に強くなった時期であったことが うかがえる。また対馬暖流の強化と小樟で発生した急潮の タイミングが一致していたことから、急潮の発生には若狭 湾沖の海況変動が関わっていたと推察された。

水温の時系列をみると、急潮の発生時期に急激な水温低 下現象が発生していたことがわかった(図3)。特に底層で の水温低下量は大きく、小樟の40m、50m層の水温は4-5℃ 以上の急激な水温低下が発生し、鷹巣でも流れが強くなっ たときに底層で水温が急低下していたことがわかる。この 時期に台風などの低気圧は通過していなかったため一時的 な沿岸湧昇によって水温低下が発生したとは考え難く、水 温データからも急潮発生時に若狭湾沖で海況変動が発生し ていたことがうかがえた。

若狭湾沖の海況情報として、日本海区水産研究所が毎月 発行する「日本海漁場海況速報」に記載されている水温分 布図を参考にした。海面下 50m の水温分布をみると、若狭 湾沖には冷水塊が存在しており、越前岬近くで冷水塊と沿 岸水の境界に水温フロントが形成されていた。過去の研究 よりフロント付近では強い流れが発生することが報告され ていることから、今回の急潮は冷水域の越前岬への接近に伴 い、岸近くで流れの強化、すなわち急潮が発生したと推察さ れた。冷水域の接近に伴う急潮の発生は他の年でも発生して いる可能性が高く、若狭湾の急潮の予測をするうえで重要な 視点になりそうである。今後は若狭湾沖の冷水域と急潮発生 の関連性についてさらに調査する必要がある。

#### 【関連の成果発表】

Monitoring for fisheries in coastal waters of Wakasa Bay and the Echizen-Coast, Japan, The 19th Pacific Asian Marginal Seas (PAMS) Meeting, (2017年5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 【研究協力者】福井県水試漁場環境研究グループ 鮎川航太 【所内世話人】九州大学応用力学研究所 千手智晴



と鷹巣(下段)における水温の時間 変化.急潮が発生した時期に、急激 な水温低下が発生していた。





#### ブリの電子タグデータを用いた日本海における回遊経路の推定

富山県農林水産総合技術センター水産研究所 小塚 晃

#### 1. 目的

日本海で冬期に漁獲される大型のブリは、寒ぶりとしてよく知られており、漁獲の豊凶は水 産業や観光業に大きな影響を及ぼす。ブリは日本海を南下する際に、水温や海流によって経路を 変えていると考えられており、これまでの共同研究で、富山湾でのブリの漁獲量と海洋同化モデ ル DREAMS\_Mの海洋環境を比較し、日本海の水温分布によって漁獲量変動の予測を行ったが、直 接的に回遊経路を推定し漁獲量変動要因について考察はできていない。

水産関係研究機関では過去に、ブリの回遊経路を直接的に推定するために、アーカイバルタグ という電子タグを用いた標識放流調査を行い、回収された電子タグから、放流個体の泳いだ海域 の水温、水深等のデータが得られている。これまで10日ごとの水温分布図と照合して遊泳海域 の特定が行われたが、本研究では時空間的に途切れのない海洋同化モデル DREAMS\_M とデータを 照合し、改めて遊泳した位置を詳細に推定し、ブリの漁獲量予報の精度向上のための情報を得る ことを目的とした。

#### 2. 方法

電子タグは、放流個体の泳いだ海域の水温(0.1℃間隔)、水深(0.5m間隔)、照度データ(0~569の指標値)を2分間隔で記録しており、それらのデータを用いて、1日ごとの位置推定を行った。得られた深度データは、10m刻みの階層に変換して使用し(例、0~4mは0m、5~14mは10m)、遊泳中に記録した水温データを、日別に階層ごとに平均化したデータセットを作成した。 水温データと整合的な遊泳海域(海域A)は、データセットの10、30、50、100mの4層のうち 個体が1日で最も滞在頻度が高かった階層における水温データの平均値を、海洋同化モデル DREAMS\_Mと照合し、水温の差が0.5℃以内となるように探索した。水温情報のみでは、位置が決 められないため、さらに2つの位置の絞り込み方法を考え、過去に照度データをもとに推定され た経度の5日間移動平均値を用いる方法(方法①)と、海域Aの最東端から西に経度1度まで遊 泳していたと仮定する方法(方法②)を検討した。

#### 結果および考察

解析に用いた個体は 2004 年 5 月 27 日に石川県で放流し、同年 12 月 9 日に福井県若狭湾沖 で水揚げされたものである。尾又長は、放流時の 85 cm、再捕時は 92 cmであった。位置推定対 象期間は、南下行動に着目するため、9 月以降とした。

電子タグデータを整理して作成された遊泳環境のデータセットの概要は、表 1,2 のとおりであ る。月によって変化するものの、水温は 20℃前後の海域を遊泳し、水深は夏季には 10m前後で あったが、9月以降徐々に深くなり、12月には 50m前後を遊泳していたことがわかった。

19

推定された位置の中心を図1,2に示した。方法①では、過去に推定された経度が、11月以降、 ブリの遊泳水深が深くなることなどの影響で不安定となり、海域Aと重ならなくなり、11月13 日以降、収束しなくなった(図 1)。一方、方法②では、おおむねブリの南下の様子を再現する ことができた(図2)。しかし、12月9日に再捕された若狭湾沖に到達しないことや、11月中 下旬には佐渡の南側まで南下した後に再び青森県沖まで北上するなど、推定結果に不自然な点が 残った。前者は海域Aの東端を遊泳するという仮定によるものであり、後者は 11 月には滞在水 深が日々変化し、位置推定に用いる水深が変わることにより、推定位置も大きく影響されること によると考えられる。海洋同化モデルは表層ほど精度が高いことが指摘されており、今後は、ブ リの滞在頻度の高い水深を用いるだけでなく、表層のデータを重視するような位置推定方法の検 討が必要である。

表1. 月別の遊泳水温

5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	8%	73%	1%	0%	0%	0%
0%	21%	65%	24%	64%	0%	0%	0%
0%	53%	23%	2%	30%	76%	69%	80%
90%	16%	2%	0%	2%	20%	29%	119
9%	7%	1%	0%	0%	3%	1%	19
1%	2%	1%	1%	1%	1%	0%	8%
0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	5月 0% 0% 0% 9% 9% 1% 0%	5月      6月        0%      0%        0%      0%        0%      21%        0%      53%        90%      16%        9%      7%        1%      2%        0%      1%	5月      6月      7月        0%      0%      0%        0%      0%      8%        0%      21% <b>65%</b> 0% <b>53%</b> 23% <b>90%</b> 16%      2%        9%      7%      1%        0%      2%      1%        0%      1%      2%	5月      6月      7月      8月        0%      0%      0%      0%        0%      0%      8%      73%        0%      21%      65%      24%        0%      53%      23%      2%        90%      16%      2%      0%        9%      7%      1%      0%        9%      7%      1%      0%        0%      1%      2%      1%        0%      1%      0%      0%	5月      6月      7月      8月      9月        0%      0%      0%      0%      0%        0%      0%      0%      0%      0%        0%      0%      8%      73%      1%        0%      21%      65%      24%      64%        0%      53%      23%      2%      30%        90%      16%      2%      0%      2%        9%      7%      1%      0%      0%        1%      2%      1%      1%      0%        0%      1%      0%      0%      0%	5月      6月      7月      8月      9月      10月        0%      0%      0%      0%      0%      0%        0%      0%      0%      0%      0%      0%        0%      0%      8%      73%      1%      0%        0%      21%      65%      24%      64%      0%        0%      53%      23%      2%      30%      76%        90%      16%      2%      0%      2%      20%        9%      7%      1%      0%      0%      3%        1%      2%      1%      1%      1%      1%        0%      1%      0%      0%      0%      0%      0%	5月      6月      7月      8月      9月      10月      11月        0%      0%      0%      0%      0%      0%      0%        0%      0%      0%      0%      0%      0%      0%      0%        0%      0%      8%      73%      1%      0%      0%      0%        0%      21%      65%      24%      64%      0%      0%      0%        0%      53%      23%      2%      30%      76%      69%        90%      16%      2%      0%      2%      20%      20%      20%        9%      7%      1%      0%      0%      3%      1%      1%        1%      2%      1%      1%      1%      0%      0%      0%        0%      1%      0%      0%      0%      0%      0%      0%



階層(m)	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
0	42%	22%	26%	9%	4%	3%	3%	10%
10	45%	36%	42%	51%	19%	11%	12%	2%
20	5%	16%	18%	28%	31%	31%	12%	9%
30	3%	8%	9%	9%	15%	24%	8%	10%
40	2%	6%	3%	2%	14%	17%	17%	13%
50	0%	3%	1%	1%	9%	8%	25%	14%
60	0%	2%	1%	0%	5%	3%	8%	9%
70	0%	1%	1%	0%	1%	1%	4%	6%
80	0%	1%	0%	0%	1%	1%	4%	8%
90	0%	1%	0%	0%	0%	0%	2%	7%
100m以下	2%	3%	0%	0%	1%	1%	5%	11%

11/24



図 1. 方法①を用いて推定した位置の中心

#### 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	小塚	晃	研究員
所内世話人	九州大学応用力学研究所	広瀬	直毅	教授
研究協力者	九州大学応用力学研究所	千手	智晴	准教授



136 137 138 139 140 141 135

図 2. 方法② を用いて推定した位置の中心

#### 内部波特有の共鳴現象に関する解析

研究代表者 神戸大学大学院工学研究科 中山恵介

#### 研究の目的

過去の研究において, 辻・及川らにより KP 方程式を利用し2層流体において2波が干 渉する場合, Miles の解で示されるような入射波に対して4倍にもおよぶ大振幅内部ソリト ン波の発生可能性が示されている.しかしその後,同著者らにより2層流体では critical level により内部ソリトン波の振幅が抑制されることで,増幅率が3倍程度に抑えられる可 能性が示されている.さらに,これまでの申請者らによる共同研究の成果として,強非線形 強分散内部波方程式を利用することにより,critical level による抑制効果は過去の研究で示 されているよりも大きいことが示唆された.しかし,初期に大きな振幅を与えた1ケース のみでの検討であり,増幅率の抑制に関しては強非線形干渉による増幅率の抑制効果も指 摘されている.そこで本研究では,成層状態および初期振幅を数ケース変化させた強非線形 強分散内部波方程式による解析を行い,critical level を中心とした増幅率の抑制効果を解明 することを目的とする.

#### 研究の方法

干渉する 2 つの内部ソリトン波を対象とし, critical level が共鳴による振幅増幅に与え る影響を検討するため,以下の研究項目を実施する.

- 1. 過去の研究において増幅率が 4 倍程度に達したケースを参考にし、初期に与える振幅 を小さくし、密度界面と critical level までの距離を変化させることで、critical level に よる増幅率の抑制効果に関する検討を実施する.
- 大振幅による干渉が増幅率を抑制する可能性があることから、大振幅内部ソリトン波 同士による干渉に関する検討を実施する.
- 3. 上述の 2 項目を検討することにより、内部ソリトン波の増幅率の抑制に関する主要因の抽出、もしくはどのような条件下において主要因が変化するかを検討する.

#### 主要な成果

本研究の主要な結論は、以下のとおりである.

- (1) 内部ソリトン波の干渉に関して、2 層近似が成り立つ場合には、critical depth の影響 により増幅率が3程度にとどまることが示された.
- (2) Andaman Sea のような実際の連続成層場においてコリオリ力まで考慮すると、3 倍を

超える振幅が発生することが示された.しかし, critical depth までには余裕があり, より詳細な検討が必要であると考えられる.

(3) 実際の場において振幅が増幅する場合,水深が変化する効果も考慮すべきであること が示唆された. 今後の検討課題であると考えられる.

#### 研究成果報告

- K. Nakayama, T. Kakinuma, H. Tsuji, Oblique reflection of large internal solitary wave, European Journal of Mechanics (B), in revison, (2018)
- K. Shimizu, K. Nakayama, Effects of topography and earth's rotation on the oblique interaction of internal solitary-like waves in the Andaman Sea, Journal of Geophysical Research, Vol.122, pp.7449-7465 (2017) DOI: 10.1002/2017JC012888
- 中山恵介,清水健司,3 層系における内部波列による質量輸送速度,土木学会論文集 B2(海 岸工学), Vol.73, No.2, pp. I\_55- I\_60 (2017)

#### 組織

- 中山恵介 国立大学法人神戸大学大学院 工学研究科・教授
- 柿沼太郎 国立大学法人鹿児島大学学術研究院 理工学域・准教授
- 辻 英一 国立大学法人九州大学 応用力学研究所・助教

#### 全球雲解像・エアロゾル輸送モデルによる雲エアロゾル相互作用の不確定性低減

名古屋大学工学研究科•理化学研究所計算科学研究機構 佐藤陽祐

#### 1、目的

本研究ではエアロゾル輸送モデル(SPRINTARS[1])と全球雲解像モデル(NICAM[2])を結合した NICAM-SPRINTARSの全球実験とその結果の解析によって、気候予測の最大の不確定性要素であるエア ロゾル・雲相互作用の理解の深度化を目指した。従来気候予測に用いられてきた大循環モデル(GCM)はその 解像度の粗さから雲を直接計算することができず、エアロゾルが雲に及ぼす影響も直接できないため、エアロゾ ル・雲相互作用の見積もりには大きな不確実性が伴っている[3]。この不確実性低減に向けて、雲を全球スケー ルで直接解像することができる全球雲解像モデル NICAM-SPRINTARSの計算を行い、従来の GCM との 比較を通してエアロゾル・雲相互作用の理解の深度化を目指した。

#### 2、数値モデルと解析方法

実験に用いた数値モデルは NICAM-SPRINTARS[4]と MIROC-SPRINTARS[5]である。NICAM-SPRINTARS は全球 14km 解像度で1年間の積分を行い、MIROC-SPRINTARS は T42L20 の解像度で 5年間の積分を行った。本研究ではエアロゾル・雲相互作用の指標の一つとして、エアロゾル数濃度( $N_a$ )の変 化量に対する雲水量(LWP)の変化量で表現される $\lambda$ [6]を用いた。 $\lambda$ は

## $\lambda = \frac{d[log_{10}LWP]}{d[log_{10}N_{q}]},$

で与えられる。このλを雲頂温度が273Kよりも高い暖かい雲を対象としてNICAM、MIROCの両モデルから 見積もった。NICAMとMIROCの解像度の違いを考慮して、NICAMの結果を2度ごとに平均して解析を行った。λは各格子で計算されるLWPとNaの散布図から最小二乗法によって直線近似によって求めた。同時に A-train 衛星群による観測から得られるλ[7]を用い、観測とモデルの比較を行った。

#### 3、実験結果

図1は A-train、NICAM、MIROC から算出されたλの全球分布である。MIROC は全球でλがとなっているのに対し、NICAM はカリフォルニア沖やペルー沖といった大陸西岸の一部の領域がわずかに正または0付近を示し、空間分布を持っている。一方衛星によって観測されたλはNICAM と同様に大陸西岸は正の値、その他は負の値を持っており、NICAM から見積もられたんと似通った分布を持っている。

このようなλの全球分布が GCM と観測で大きく異なっていることは先行研究[7]から指摘されており、このこと がエアロゾル・雲相互作用の見積もりに大きな不確実性を生んでいることが近年知られていた。

本研究では全球雲解像モデルを用いることで、観測で得られるλの全球分布を数値モデルで再現することに 初めて成功した。



図1:(a)A-train 衛星群、(b)NICAM-SPRINTARS、(c)MIROC-SPRINTARS から計算された

λの全球分布(Nature Communication 誌に受理された論文誌[8]より抜粋したに修正を加えた)

#### <u>4、考察</u>

本研究では GCM で見積もられるλが観測と大きく異なる原因を調べるために、エアロゾルの増加が起こった際の雲微物理量の変化を調べた。NICAM と MIROC 双方で、エアロゾルが変化した時の蒸発・凝結の量を 調べると、MIROC に比べ NICAM はエアロゾルの変化に対して蒸発・凝結量が大きく変化し、それにより、エ アロゾルが増加した際に雲水量を減少させることにつながっていた。これは NICAM が雲を解像するため、エア ロゾルが雲微物理過程(特に蒸発・凝結過程)に及ぼす影響を陽に計算できることによって、エアロゾルが増加 した時の雲水量の減少(すなわち負のλ)が再現できたと言える。

このことは、従来の GCM はエアロゾルが増加した際の雲微物理過程の変化を再現しておらず、エアロゾル・ 雲相互作用を過大に評価していることを示唆している。今後はこれらの結果を用いて、実際に放射強制力など の気候への影響を表す物理量を計算し、定量的な議論をしていく必要がある。

#### 5、研究成果報告

本研究で得られた成果は複数の国際ワークショップ、国際学会で発表されただけでなく、投稿論文として投稿 され、平成 30 年 2 月、Nature Communication 誌に受理された。2018 年中に発表される見込みである。

#### 参考文献

- 1. Takemura T et al., J Geophys Res. 2005;110: D02202. doi:10.1029/2004JD005029
- 2. Satoh M et al. Prog Earth Planet Sci. 2014;1: 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1
- Stocker TF et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC.
  Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2013.
- 4. Suzuki K et al. Geophys Res Lett. 2008;35: L19817. doi:10.1029/2008GL035449
- 5. Watanabe M et al. J Clim. 2010;23: 6312–6335. doi:10.1175/2010JCLI3679.1
- 6. Ghan S et al. Proc Natl Acad Sci. 2016; 201514036. doi:10.1073/pnas.1514036113
- 7. Michibata T et al. Atmos Chem Phys. 2016;16. doi:10.5194/acp-16-15413-2016
- 8. Sato Y et al., Nature Comm. 2018 accepted

24

#### 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 原田浩太朗

#### 目的

能登半島周辺海域,特に富山湾沿岸はブリをはじめとする多くの回遊性魚種が来遊することから,全 国有数の定置網漁場となっている.これら水産資源の漁況を判断するためには,本海域の海況変動機構 の理解が重要である.本研究では,能登半島沿岸の対馬暖流沿岸分枝流(以下沿岸分枝流)の変動と沿 岸域の定置網周辺における流況変動について調べ,能登半島周辺海域の流動構造および漁場形成メカニ ズムを明らかにすることを目的とした.特に今年度は,航走 ADCP および沿岸定点観測のデータを主に 解析し,漁況との関係性を明らかにするうえで基本となる本海域の流動構造に注目して研究を行った.

#### 方法

沿岸分枝流の変動 前年度(原田 2017,共同利用研究成果 38<sup>℃</sup>
 報告第 20 号)に引き続き沿岸分枝流量の詳細な変動につい
 て考察するため,図1の通り観測線(Line 1)をA・B・C
 の3 区間に分割した.石川県水産総合センターの調査船白
 山丸による ADCP 観測データから,それぞれの区間の流量 37.5<sup>℃</sup>
 を計算した.また,A・B・C 各区間の流量の季節変動を調べ,
 観測線全体の流量との比較を行った.

沿岸定点観測 図1中St.1に2008年1月30日から2009 年2月26日まで設置した,海底設置型ADCPにより観測し たデータを解析した.設置地点の水深は121m,ADCPによ る観測深度は19-115mであったため,19-51mを表層, 51-83mを中層,83-115mを底層として,深度帯ごとの流況 の季節変動について調べた.



#### 結果と考察

沿岸分枝流の変動 A・B・C の各区および観測線全体の流量の計算結果を図2に示した.B 区では常に 流量が小さく,季節変動も小さかった.A 区および C 区では夏期(6~8月頃)および冬期(12~2月頃) の二回の極大がみられた.両区の変動は観測線全体の変動パターンと類似しており,沿岸分枝流流量の 年二回の極大は,いずれも観測線内の陸側および沖合側の両方で発生していることが分かった.また, 流量の標準偏差は A 区の方が大きく,特に流量の増大する夏期にばらつきが大きかった.夏場の流量は 年による差が大きいが,これは主に A 区の流量の差を反映しており,沿岸分枝流の夏場の勢力は主に岸 近くでの流量変動に左右されていることが明らかになった.

沿岸定点観測 各深度帯の平均北方流速を図 3 に示した.表層では 4~8 月に南向きの流れが卓越し, 12~2 月に北向きの流れが卓越していた.中層では変動が比較的小さく,基本的に南向きの流れが生じ ていた.底層では 5~10 月には南北方向の流れはほとんどなく,11~4 月に南向きの流れが生じていた. 今回の結果で観測された表層における流向の季節変動は,大慶(2015,共同利用研究成果報告第18号) 等で報告されている,富山湾奥における環流の向きの季節的な逆転現象を反映していると考えられる. 一方で,中層および底層では,いずれも表層と異なった季節変動パターンを示していた.特に,鉛直混 合により成層の弱まる冬期に表層と中底層との間で逆向きの流れが卓越していたことは,深度帯によっ て流動場の形成メカニズムに違いがあることを示唆していると考えられる.また,定置網の漁獲対象と なる魚類には表層遊泳性のもののほか,中層以深を遊泳するものも存在するため,海況と定置網の漁況 との関係性を調べる上で,今回の知見は重要であると考えられる.

今後は、今回の結果を踏まえ、沿岸分枝流や沿岸域の海洋観測データに対しての解析を深め、漁況との関係を論じる上で基盤となる基本的な流況構造を明らかにするほか、定置網等による漁況データとの 比較も行い、漁業へ貢献できる知見の獲得を目指して研究を継続していく。



研究組織

石川県水産総合センター	原田	浩太朗	:研究代表者
	大慶	則之	:研究協力者
九州大学応用力学研究所	千手	智晴	: 所内世話人
	広瀬	直毅	:研究協力者

#### 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。本研究では,OBEM (Ocean Bottom Electromagnetometer)を用いた調査 方法に注目し,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,船舶による投入・回収・移動を繰り返さす必要がなく なるため,OBEM による広範囲,長時間の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、特に滑空時の過度状態に着目し、安定かつ効率の良い自律観測を実現することを目指した。すなわち、着水直後の「初期滑空状態」、定常滑空に至るまでの「遷移状態」、着底に移行する「着底動作」における機体運動の制御に取り組み、九州大学応用力学研究所における水 槽試験等を実施した。水槽試験の様子をFig.1に示す。



Fig.1 Tank experiment

#### 2. グライダー型海中ビークルの概要

機体の主要目を Table.1 に,構成図を Fig.2 に示す。ビークルは滑空することで対象の海底計測点に移動し,着底後調査を行い,その後適当な高度まで浮上し,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,本機体は十字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に, アームを覆うように翼面を形成した。翼面下には,前後に2つの耐圧容器を有する。前方容器には水中 重量調節装置を搭載し,後方容器には運動制御装置(重心移動装置)やセンサー,コンピュータを搭載 した。

Length	1.9 m	Weight	39.16 kg-f				
Breadth	1.9 m	Weight in	$2.0 \ln f$				
Depth	0.38 m	water	2.0 kg-1				

Table, 1 Principal particulars



Fig. 2 Construction of the underwater glider

#### 3. 実験結果に基づく運動制御系の開発

実海域試験では機体着水直後に機体のロール,ピッチ運動が大きく変動し,機体投入作業の安全性に 問題が見られた。そこで水槽試験により機体の滑空運動を調査し,その結果に基づき設計した制御系を 実装した結果,初期滑空状態の安定性が改善された。すなわち,波浪の影響を受けにくい水深 1.5m ま で潜航するために要する時間は 71%短縮され,同水深で得られる速度は 0.26m/s から 1.0m/s に増加する

#### ことができた。

続いて遷移状態の制御系設計のために, 尾翼角を固定した自由滑空とP制御を用いた滑空における機体運動を水槽実験で計測し, 機体の滑空特性と尾翼の効果を確認した。尾翼角を固定した実験において, 尾翼角度-30度~-45度に対し約-5度のトリム角が得られた。次にP制御を用いて機体トリムに-5度と-10度の目標値を設定し, パラメータを Kp=1,1.5,2,4,6 と変化させて運動制御性能を調査した。その結果, 目標値-5度の場合には Kp=4 と 6 において良好な結果を確認できた。また, 目標値-10度でも同様な結果が得られた。

設計した PID 制御系による滑空の実験結果の一例を Fig.4 に示す。ピッチ角が目標角付近に漸近し、 制御により良好な滑空角が得られることが確認できる。尾翼角の振動は、姿勢を検知するセンサの計測 値の取り扱いに基づくものであると考えられる。すなわち、センサーで計測された加速度の値にローパ スフィルターを適用した後、角速度の計測値と統合して機体姿勢を検出しているため、フィルター等の 設定によっては尾翼角が振動する場合が生じると考えられる。



Fig.4 Gliding controlled by a PID controller

次に、同様の PID 制御系を用いて着底動作試験を行った。水槽試験結果を Fig.5 に示す。実験では着 底動作における機体トリムを 5 度に制御出来ていることが確認できる。また機体速度も着底制御開始前 と比較して 95%減速されており、開発された制御系により機体の安全な着底が実施可能となる。一方で、 ピッチ角の応答においてシミュレーション結果と実験値の間に差異が見られたが、これは重心移動装置 の応答に起因するものと考えられる。



Fig.5 Landing controlled by a PID controller

#### 4. まとめ

海底資源探査用グライダー型水中ビークルの機体開発と運動制御系の設計を行った。運動シミュレー ションの精度と制御性能の確認のため各種の水槽および実海域試験を行った。実験結果に基づく機体運 動システムの同定により,機体運動の数学モデルの精度が改善された。さらに,得られた運動モデルに 基づくシミュレーションを利用し,各種の機体動作に関する運動御系の開発を行い,重心移動装置と尾 翼を用いて機体運動を制御した結果,開発した制御系の有効性が確認された。
## 水中ビークル運用のための装備に関する研究

長崎大学·水産学部 森井 康宏

#### 1. はじめに

近年、海洋観測・調査用の海中ビークルは、専 用の母船を必要とする大型の物から、専用の母船 を必要としない小型のものまで数多く作られ、実 用的な段階へと入りつつある。特に、技術者の支 援を必要とせず、海洋物理の研究者が比較的容易 に海洋観測に使用できる、中、小型のビークルは、 専用母船、すなわち専用の母船に装備された投 入・回収装置を持たないため、作業がいっそう困 難なものとなる。長崎大学水産学部附属練習船長 崎丸は応用力学研究所と共同で長年海洋観測を行 っており、応用力学研究所所有の海中ビークル運 用の実績を持つ。そこで本研究では、ビークルを 損傷することなく、波浪中で、安全にビークルを 運用するために必要な装備について調査・研究を 行う。

本年度は、円盤型水中グライダーによる針路保 持制御実験、CFRP 製可変ピッチプロペラに関する 情報収集、建造中の長崎大学水産学部付属練習船 長崎丸及びその装備に関する情報収集について報 告する。

#### 2. 円盤型水中グライダーの針路保持制御実験

バーチャルモアリング性能を向上させるための 針路保持制御実験が 2017 年 11 月に長崎新漁港沖 の水深 30m海域(Fig. 1) で実施された。



Fig.1 実験実施海域

コントローラはビークルの非線形運動方程式を滑 空平衡状態のまわりで線形化して得られる状態空 間表現をもとに設計される LQI コントローラが採 用された。残念ながら、浮力調整装置の減速機部分 の焼きばめに不具合を生じ (Fig. 2)、浮力調整がで きず良好なデータを得ることができなかった。次年 度共同利用が採択されれば再度挑戦する予定であ る。



Fig. 2 浮力調整装置の不具合

次年度の実海域試験に向け模型による水槽試験 も実施されている(Fig. 3)。



Fig. 3 模型試験



Fig. 4 船首方位誤差のみをフィードバックする針 路保持 PID 制御結果

前年度に実施した船首方位誤差のみをフィードバックする針路保持 PID 制御結果 (Fig. 4) は性能が 芳しくなかったので、今年度は船首方位誤差とロー ル角誤差をフィードバックする針路保持 PID 制御 を実装したところ、Fig. 5 に示すように LQI 制御 に匹敵する制御性能を得ることができた。



 Fig. 5
 船首方位誤差とロール角誤差をフィードバックする針路保持

 アレクする針路保持
 PID

## 3. CFRP 製可変ピッチプロペラに関する情報収集

CFRP 製可変ピッチプロペラに関する情報を収 集するために2018年3月に岡山のナカシマプロペ ラを訪問した。一般の金属製プロペラと CFRP 製 プロペラの製造工程を見学し、CFRP 製プロペラの 利点について下記の情報を得ることができた。

・CFRP を使用した可変ピッチプロペラでは質量が 小さいためボスを小型化できる。

・CFRP 製プロペラは質量が小さいため回転時の慣 性モーメントも小さくプロペラ軸径を小さくでき、 駆動系全体の計量化を行うことができる。

・CFRP 製プロペラは質量が小さいため回転時の慣 性モーメントも小さいため振動が発生しにくく船 室のノイズレベルを低減することが可能である。 ・一般の金属製プロペラに比べ現時点では高価であ るが、燃費の低減を図ることが可能である。



Fig. 6 CFRP 製可変ピッチプロペラブレード

## 4. 建造中の長崎丸の艤装に関する情報収集

長崎大学水産学部の付属練習船長崎丸が三井造 船玉野において建造中であるので造船所を訪問し、 艤装中の長崎丸(Fig.7)の艤装について情報収集 を行った。



Fig.7 偽装中の長崎丸

・船尾クレーンとして A フレームが採用されており、水中ビークルの投入・回収に便利である。

・CTD 計測が効率よく迅速に行えるように、特別 格納室が設置されており(Fig.8)、小型水中ビーク ルの格納・運用場所としても利用できそうである。

・研究室の面積が十分に確保されている

・船尾甲板が広く小型水中ビークルの整備・ハンド リングに便利である。

・漁労実習のみならずさまざまな海洋観測が効率的 に行えるようにクレーンが配置されている。



Fig. 8 CTD 用特別格納室と専用クレーン

## 5. 研究組織

·研究代表者

森井康宏 (長崎大学水産学部教授)

·研究協力者

山脇信博、木下宰、内田淳、楠本成美、清水健一、 八木光晴、青島隆(長崎大学水産学部) 中村昌彦 {所内世話人}、野田 穰士朗 (九州大学応用力学研究所)

#### 海洋レーダを用いた日向灘表層流の試験観測

宮崎県水産試験場 渡慶次 力

## 1. 研究の目的

日向灘の流況は、黒潮流軸や黒潮系暖水の接岸に伴って不規則に変動し、流速値 1m/s 以上の速い流 れが頻繁にあるため(岡田, 2003)、漁業者の操業成否や水産資源の卵仔稚魚の輸送・成魚の移動に大 きな影響を与えているが、その変動特性に関する知見は極端に不足している。そこで、日向灘広域にお ける数時間スケールでの表層流況変動の把握を目的に、2015 年に海洋レーダを宮崎県の宮崎局と清武 局に設置した(渡慶次ら, 2017)。その結果、各局の視線方向流速の現場流速との相関関係は強かった が(大城ら, 2016)、両局のビーム交差角が小さい事で生じる合成流速ベクトルの誤差が課題であった。 そこで、2017 年 3 月から誤差低減に向けて、「清武局」から「野島局」へ移設して、2017 年度は宮崎 局と野島局の体制で流況観測を実施した。本報は、今後の日向灘における流況変動特性の基盤データと なる野島局移局後の海洋レーダ流速値の精度を検証した。

## 2. 使用したデータ

短波海洋レーダは、琉球大学工学部所有の24.5MHz帯フェーズドアレイアンテナ型で、2015年11 月に宮崎港(以下「宮崎局」)に、2017年3月に野島漁港(以下「野島局」)に設置した(図1)。この うち、2017年3月~2018年1月末までのデータを使用した。短波海洋レーダのシステム構成やレーダ 局は既報に準じた(藤井、2001)。レーダ局では、発射された電波の1/2波長を持つ海面波浪による強 い後方散乱波が受信・信号処理されて記録される。データを手動取得した後、一次散乱のドップラース ペクトルのピークの正負の周波数の違いを読み取ってビーム視線方向の表層(約0.5m)流速(以下「視 線方向流速」)を得た。両局のレーダで計測された視線方向流速は、時刻補正してベクトル合成するこ とで、2時間毎の二次元格子点の表層流とした(図2)。

現場流速は、約 30km 沖合にある表層型浮魚礁うみさち 4 号に設置された日本無線社製 ADCP





図2 海洋レーダで計測した流速ベクトル(2017/10/5 18:00)。

★は表層型浮魚礁うみさち4号の位置を示す。

(NJC-30C-10, 240kHz)による 10m 深の流速値を使用した(以下「4号 流速」)。両流速の比較では,うみさ ち4号に最も近い観測セルのレーダ 流速と,レーダ照射方向の4号流速 成分を用いた。

## 3. 結果

4 号流速と比較すると、視線方向 流速(図3)は、宮崎局において期間 を通して相関がなく,特に6~7月の 海洋レーダの流速はバラツキが大き かった。一方,野島局では,期間を通し て相関が良いが、9~10月において4号 流速では見られた 100cm/s 以上の流速 に相当する値は得られなかった。このた め,図4で示す両局ビーム合成の流速 ベクトルは,各局の視線方向流速の特徴 が反映されたものとなった。現在,4号 流速と対応が悪い期間におけるドップ ラースペクトルを分析し,低精度となっ た原因を明らかにしたいと考えている。 加えて,海洋レーダによる長期間の流況 データを蓄積及び解析することで,日向 灘の表層流動場の時空間変動特性を明 らかにしていきたい。





#### 4. 論文等

渡慶次力,西口政治, 桟敷孝治(2017):宮崎県海況情報の漁業者への経済効果, 水産海洋研究, 81巻 1号, 43-49.

渡慶次力,西口政治,瀬藤 聡,黒田 寛(2017):,水産海洋研究,81巻3号,259-263.

## 5. 研究組織

代表者	宮崎県水産試験場	主任技師	渡慶ど	文 力
世話人	九州大学応用力学研究所	教授	広瀬	直毅
協力者	九州大学応用力学研究所	准教授	千手	智晴
協力者	九州大学応用力学研究所	研究員	高山	勝巳
協力者	琉球大学工学部	教授	藤井	智史
協力者	琉球大学工学部	学部4年生	池原	日向

## 洋上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 海洋工学センター

海洋技術開発部

百留 忠洋

研究目的:

自律型無人潜水機(AUV)の普及や多種多様化にともない、複数機を同時に運用する要求が高まっている。AUVの運用に際して、海中を別海域で航走する無人機を同時に管制することは音響通信の通信距離・範囲の観点から困難である。この問題を解消するためには洋上から AUV を自動で追尾する洋上無人ビークル(ASV)を用意し、これに海中と空中の通信の中継をさせることで遠隔地にある無人機を同時に管制することができるようになる。本件では機構で開発した ASV 実証機の模型を用い水槽試験により流体力計測し、それを解析することで波浪中での挙動を検討する。

方法:

実験の模様を図1に示す。ASV 実証機模型の寸法は全長1.75m×全幅0.78m、空中重量は120kgである。海中のAUV と音響による通信を行うために機体底部にペイロード部を有する。これは実機の1/2.5のスケールモデルであり、本件では機体に及ぼす流体力を計測するための実験を実施した。模型による試験では、実機で想定している巡航速力(3/ ット)において、進行方向に対して、機首を斜行させて機首角変化による抵抗の変化よる抵抗の程度を計測し、解析した。



図1 斜行試験時のASV 実証機模型

## 海洋環境生態系モニタリングのための自律型海中ロボットの研究開発

#### □研究目的

本研究の目的は,現在,新たに研究開発 を進めている海洋環境生態系のモニタ リングを行うための自律型海中ロボット の性能を明らかにすることである。研究 代表者らは, 広範囲に亘る海洋生態系の モニタリングや海洋調査に資するための 水中グライダーの実用化を目指し,高い 運動性能を発揮することのできる主翼 独立制御型水中グライダーSOARER (Fig.1) や長期間・広範囲の運用を目指す実海域用 ソーラー水中グライダーTonai60 (Fig.2) を開発している。実海域では高度な自律性 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× 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

大阪府立大学・大学院工学研究科 有馬 正和



 Fig.1 主翼独立制御型ソーラー水中グライダー

 SOARER



Fig.2 ソーラー水中グライダー Tonai60

×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。

□研究の成果

本研究では、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)の潜航性能を明らかに することができた。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 しての機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,鉛直姿勢での潜入と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。

現段階では、遠隔操縦によって浮力調整装置および重心移動装置を制御して機体の姿勢 変化を実現できるかどうかを確認した。また、今回が機体製作後の初めての水槽試験で、 水密確認試験も併せて実施した。実験の結果、本機体が所期の目的を果たすことのできる 性能を備えていることを確認することができた。本水槽試験を経て、12月中旬に鹿児島湾 において実海域試験を実施することができたことを附記する。



Fig.3 ハイブリッド式自律型海中ロボット



Fig.4 HAUVの潜航試験

□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,システム計画
太田 稔宏	永光産業(株) 大阪府立大学大学院	代表取締役社長 社会人ドクター	実験の解析・評価
村山 豊	永光産業(株)	技術部	実験補助
山下 清司	神戸市産業振興財団	顧問	水槽試験の助言
宮田 慎一	川崎重工業(株)	水中機器係	実験補助
葛谷 健	川崎重工業(株)	水中機器係	実験補助
中村 昌彦	九州大学・応用力学研 究所	准教授	所内世話人

## 全球気候モデルを用いたエアロゾルの気候影響の解析

東京大学大気海洋研究所 鈴木健太郎

要旨

エアロゾル変化がもたらす気候への影響を、全球エアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS を用いた数値実験によって調べた。その結果、散乱性エ アロゾルと吸収性エアロゾルでは気温や降水量といった気候変数への影響が顕 著に異なることがわかった。特に、吸収性エアロゾルの代表格である黒色炭素 の気温への影響は小さい可能性が強く示唆された。このことは、黒色炭素の排 出削減の温暖化対策としての有効性に疑問を投げかける。

## 序論

エアロゾルが直接的に放射エネルギーと相互作用して地球を加熱・冷却する効 果(エアロゾル直接効果)と雲核となって雲を変質させる効果(エアロゾル間 接効果)は現在の気候予測において最大の不確実要因のひとつである。これを 低減するためには、数値気候モデルにおいてエアロゾル排出量を系統的に変化 させた実験を行い、それに対する大気や気候の応答を詳細に調べることが有効 である。この中で特に重要なのが水蒸気や雲などの湿潤プロセスがエアロゾル にどのように応答するかを調べることだが、研究代表者の鈴木健太郎は衛星観 測と気候モデルを複合的に組み合わせることで、このようなエアロゾルの気候 影響を調べる研究を長年行ってきた。また、受入研究者の竹村俊彦は全球エア ロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARSを開発し、エアロゾル輸送過程やその 気候影響のモデリング研究を展開してきた。本研究課題は、これらを組み合わ せて、性質の異なるエアロゾルの排出量変化がもたらす気候への影響を定量化 することを目的として行われた。

方法

全球エアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS を用いて、散乱性エアロゾル である硫酸塩エアロゾルと吸収性エアロゾルである黒色炭素の排出量をそれぞ れ系統的に変化させる数値実験を行なった。その結果を全球エネルギー収支の 変化の観点から解析した。

36

## 結果と考察

MIROC-SPRINTARS モデルを用いた数値実験では、硫酸塩エアロゾルの変化 に対する全球平均地上気温の変化は顕著であったのに対して、黒色炭素エアロ ゾルの変化に対する気温変化は小さく、変化傾向も曖昧であることがわかった。 この違いは、これら二種類のエアロゾルの放射強制力の鉛直分布の違いにその 原因が求められる。光散乱性のエアロゾルである硫酸塩エアロゾルの放射強制 は大気には大きく影響せずに地表面を直接強制(冷却)するはたらきを持つた めに、長期的な気候変化を駆動する有効放射強制力として比較的効率良くはた らくのに対して、光吸収性のエアロゾルである黒色炭素エアロゾルは太陽光を 吸収して大気を直接加熱するため、時間スケールの短い大気の応答を励起し、 それがエネルギー収支変化のかなりの部分を相殺するために、有効放射強制力 が小さくなるためであることがわかった。特に、このような黒色炭素の大気加 熱に対する大気の応答は、水蒸気・雲・降水といった湿潤プロセスの応答によ ってその大部分が賄われているが、これらの物理プロセスの気候モデルによる 表現には大きな不確実性が伴っていることが、黒色炭素の気候影響評価を難し いものにしている。今後は全球雲解像モデルなど、これらの湿潤大気プロセス をより詳細に表現するモデルを併用して、エアロゾルの気候影響を調べていく ことが重要である。このような方向性での研究の足がかりとして、全球雲解像 モデル NICAM-SPRINTARS を用いた数値実験結果を解析し、エアロゾルの雲 水への影響が従来型の気候モデルでは衛星観測に比べて定性的に過大評価され ていること、それが全球雲解像モデルでは衛星観測の地域分布パターンを詳細 に再現できることがわかった。

## 成果報告

Sato, Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima, 2018: Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model. *Nature Communications*, **9:985**, DOI:10.1038/s41467-018-03379-6.

#### 海洋大循環の力学 ---エクマン層から中深層循環まで

北海道大学大学院 地球環境科学研究院 水田元太

#### 1. 目的

海洋大循環は中規模擾乱や地形、鉛直混合など様々な要因の影響を受けており、そのしくみは十分には理 解されていない。本研究では数値モデル、観測、理論それぞれの専門家が最新の知見を持ち寄ることで海洋 大循環のしくみに対する大局的な展望を得ることを目的とする。

#### 2. 手法

2017 年 10 月に研究会を開き、以下の話題が提供された。各話題について十分な時間をかけて発表を行い、 研究者間で活発に議論を行うことによって有効に研究を進めた。

(1) 熱フラックスの日周変動が海面加熱期の混合層深度と海面水温に与える影響に関する研究:牛島悠介・吉川裕(京大理)

(2)水面波と風成流との双方向相互作用のシミュレーション:藤原泰・吉川裕(京大理)・松村義正(東大)(3)波動フラックスの一般解析アルゴリズム:大貫陽平(九大応力研)

(4) 北西太平洋海盆における深層流の中規模変動: 宮本雅俊・岡英太郎・柳本大吾・藤尾伸三(東大大気海洋

研)·水田元太(北大)·今脇資郎(九大)·黒木聖夫(JAMSTEC)·羽角博康·長澤真樹(東大大気海洋研)

(5) 海面高度計を用いた北西太平洋の前線変動の同定:中野英之(気象研)

- (6) LGM 以降の親潮流入に起因する日本海の鉛直混合に関する海洋力学モデル:磯辺篤彦(九大応力研)
- (7) 黒潮と対馬暖流の高分解能モデリングから分かったこと:広瀬直毅・韓修妍・劉天然(九大応力研)

(8) Upper ocean response to typhoon focusing on rightward bias using an ideal 3D model: Chul-hoon Hong (Pukyong National University), Akira Masuda, and Naoki Hirose (Kyushu University)

(9) 黒潮大蛇行と四国沖暖水渦: 蓮沼啓一(海洋総合研究所)

(10) 東向ジェットの終端と中規模擾乱:水田元太(北大地球環境)

(11)波による働力・運動量輸送と分散関係 -- 地球流体波動を中心に: 増田章(九大名誉教授)

## 3. 結果と議論

(1)海面熱フラックスの日変化が加熱期の混合層深度に与える影響を調べるために Large Eddy Simulation (LES)モデルを用いて数値実験を行った。その結果、低緯度域では日変化がある方がないよりも混合層が深く なるのに対し、高緯度域では日変化がある方が混合層が浅くなることが示された。加熱期の混合層深度は流 れの鉛直シアーと熱フラックスによる成層化作用に依存するが、鉛直シアーが形成される時間スケールは各 緯度での慣性周期で決まる。このため混合層深度は慣性周期が一日を超えるか否かに影響されることが分か った。また現実海洋で海面熱フラックスの日変化が混合層深度や海面水温に与える影響についても評価した。

(2) Langmuir 循環が形成されるしくみを調べるために非静力学自由表面モデルを用いたシミュレーションを 行った。その結果、水面波による Stokes drift とそれに起因する Reynolds 応力によって Langmuir 循環が形 成されることが示された。この形成メカニズムは古典的な Craik-Leivovich 理論と整合しており、今後は大 振幅の水面波や平均流が水面波に影響を与える場合など Craik-Leivovich 理論が適用できない状況でも実験 を行うことで、Langmuir 循環形成のしくみについてより一般的な知見が得られると期待される。 (3) 慣性重力波や地形性ロスビー波など地球流体力学で扱われる様々な波動現象を Wigner 変換を用いて一般的に扱う方法を提唱した。Wigner 変換を用いることで浅水方程式系などの方程式系の固有関数すなわち波動解を求める一般的な方法が存在することが示された。さらに Wigner 分布関数を用いることにより、一般には困難な波動によるエネルギーフラックスを評価すること出来ることが示された。このことは海洋大循環モデルで見られる地形性ロスビー波や、風波、シアー流中の慣性重力波の解析に応用できると期待される。

(4)強い流れや顕著な海底地形が存在しない北緯 30度付近における深層流の擾乱を高密度に展開した係留 系によって観測した。その結果、半年程度の周期帯で北西方向へ伝播する平面波が存在することが分かった。 波の波数は地形性ロスビー波の分散関係を満たし、ray tracing による解析からシャツキー海膨にエネルギ 一源があることが示唆された。また波によって生じる流れは背景渦位の等値線に平行となる傾向があった。

(5) 黒潮続流から亜寒帯循環域にかけては様々なフロントが存在するといわれているが観測データが限られ ていることからその実態は十分には把握されていない。そこで衛星海面高度計データを用いてこの海域のフ ロント構造を詳細に調べた。その結果、Subarctic Front, Subarctic Boundary, Kuroshio Extension Branch, Kuroshio Extensionの4つのフロントが同定され、後者2つは緩やかに南下する傾向があることが分かった。

(6) 最終氷期では現在よりも海面が低かったため、日本海は太平洋から隔絶されていた。古海洋学的な知見 では最終氷期中は日本海では深層水は形成されず、また氷期終盤に津軽海峡から太平洋水の流入が始まった ときには強い鉛直混合が短期間起きたとされている。このことを鉛直1次元海洋モデルによって確かめた。 その結果、最終氷期中は強い塩分成層のため鉛直対流が深くまで及ばないこと、氷期終盤に強い鉛直対流が 起きるのは津軽海峡からの流入によって一時的に塩分成層が弱まるためであることが示された。

(7)日本海と太平洋をつなぐ海峡の通過流量を数値シミュレーションによって求める場合、従来の研究では 津軽海峡の流量が過大評価される傾向があったが、海底地形を正確に表現することで過大評価が解消される ことが分かった。これは津軽海峡の複雑な海底地形による形状抵抗が原因している。またシミュレーション に観測データを同化する際に使われるグリーン関数法を効率的に行う方法についても詳細な解析を行った。

(8) 台風通過に伴う湧昇のしくみを理想化した数値実験によって調べた。湧昇は台風の進行方向右側で強く、 その度合いは台風の通過速度に依存することが分かった。湧昇が強まるのは台風通過による風応力の変動が 慣性振動と同方向に回転する成分を持ち、時間スケールが慣性周期に近いときであること示された。

(9) 歴史的観測データと気象庁による MOVE. MRI. COM モデルの結果から四国沖暖水塊の性質を議論した。暖水 塊は海面よりも 200 から 400 m深で顕著に見られ、それによって黒潮流量は局所的に 2 倍程度に増える。ま た四国沖暖水塊の強弱と黒潮大蛇行との関連性についても議論した。

(10)黒潮続流の様な東向ジェットからロスビー波が発生するしくみを知るために理想化した数値実験の結果 を解析した。傾圧不安定擾乱の非線形発展、平均流の構造の東西変化が擾乱に及ぼす影響などについて考察 を行った。またロスビー波の位相速度とジェットの再循環の速度に対応関係があることも分かった。

(11) ロスビー波のエネルギーフラックスは群速度にエネルギーを掛け合わせたものと一致しないという変わった性質を持つが、東西方向の水路中で南北積分した場合にはその様な不一致は見られない。またこのときエネルギーフラックスと位相速度の間に一定の関係がある。これらのことが浅水波方程式の性質で説明でき、波の運動量に関係することが示された。同様な関係は慣性重力波や水面波、電磁波でも成り立つ。

## 衛星搭載ドップラー風ライダーによって観測された風・エアロゾルに関する研究

(国研)情報通信研究機構電磁波研究所 石井昌憲

要旨

欧州宇宙機関によって2018年度下半期に打上げが予定されている衛星搭載ドップラー風ライダーAeolus によって観測されたデータと地上設置型観測機器によって観測されたデータとの比較方法検討を実施するた めに、情報通信研究機構で開発されたコヒーレントドップラー風ライダーによる風観測データ構築を目的とし て、風観測アルゴリズムの開発、及び、背景場と下降粒子の速度の抽出アルゴリズム開発を実施した。具体 的には、(1)風速・風向の高度分布が得られるアルゴリムズ開発を行った、(2)下降粒子を伴う大気場におい て、背景場の風速と下降粒子の速度を分離する手法のアルゴリズム開発を行った。

序論

現在の衛星観測は、風観測を行う衛星に比べると 2/3 の衛星が大気物質量観測をしており偏重状態 にある。全球規模で風の高度分布を得ることを出来るセンサーの開発が望まれている。現在の衛星風 観測は、時間分解能が高く、広域観測ができるものの高度推定に難があるため、十分な高度分解能と は言いがたい。欧州宇宙機関は 2018 年度に衛星搭載ドップラー風ライダーAeolus を打上げ、全球規 模で風、エアロゾル・雲の高度分布の取得を目指している。Aeolus によって観測される風、雲・エア ロゾルの科学的な有用性を示すためには、観測データの十分な検証を行う必要がある。本研究課題は、 Aeolus による衛星観測データと地上観測データとの比較方法について検討するためのアルゴリズム 開発を行うことを目的とする。

方法

- 1. コヒーレントドップラー風ライダーによって計測されたデータを用いて風速・風向の高度分布が得られるように Velocity Azimuth Display(VAD) 法によるアルゴリズム開発を行う。
- 2. 下降粒子を伴う大気場において、背景場の風速と下降粒子の速度を分離する手法のアルゴリズム開発 を行う。

結果と考察

- コヒーレントドップラー風ライダーによって計測されたデータから VAD 法を用いた風速・風向の高度分布 を導出できるアルゴリズムを開発した。情報通信研究機構本部(東京都小金井市)において試験観測を 行い、風速・風向の高度分布を導出した。得られた結果は、同機構に設置されたウィンドプロファイラー によって観測された風データや館野から飛揚された高層気象ゾンデによって観測された風データとの比 較を行った。大気境界層内における風データはウィンドプロファイラーの結果とよく一致していた。一方、 自由対流圏における風データは、高層気象ゾンデの比較的良く一致した。高層気象ゾンデの飛揚場所 とは 100km程度離れていることから、大気境界層内の風データとは違いが見られた。これらの結果か ら、Aeolus の風データを地上データと比較する場合、気象条件や地表面付近の状況にもよるが、大気 下層風データに対しては両者の観測点(Co-location)が 20kmの範囲内で一致することが望ましい、ま た、大気上層風データに対しては両者の観測点が 50-100kmの範囲内で一致することが望ましい、と推 定される。大気上層になればなるほど風は一様と考えられるため、比較高度によって、Co-locationの範 囲を拡げることが可能と考える。
- 2. コヒーレントドップラー風ライダーによる風観測は、エアロゾルや雲粒子からの散乱信号を光ヘテロダイン 検波し、その周波数スペクトルからドップラー周波数を決定し、速度を決定する。背景場の鉛直風は 0. 数 m/s であるのに対し、雲粒や下降粒子の速度は 1-10 数 m/s である。背景風に加え、雲粒や下降粒 子が存在する場合、周波数スペクトルでは両者それぞれに対応する周波数スペクトルが検出され、ダブ ルピークとなる(図1)。ダブルピークを検出し、背景場の風速と下降粒子の速度を分離する手法のアル ゴリズム開発を実施した。開発したアルゴリズムを用いて、下降粒子が存在する大気場に適用し、背景場

の風と下降粒子速度の周波数スペクトルの分離および速度推定ができることを確認した。周波数スペクトルの分離において、下降粒子の速度が背景風の速度と同程度な場合や乱流のため下降粒子の周波数スペクトルが拡がった場合など、ダブルピークを検出出来ない事例もあった。今後、アルゴリズムを高度化することにより、ダブルピーク検出の精度をあげる。



図1 エアロゾルの周波数スペクトル(背景場)と下降粒子のスペクトル。マルチモーダル周波数スペクトル仮定し、エアロゾル(背景場)と下降粒子それぞれのスペクトルを決定。

## 成果報告

S. Ishii, A. Sato, M. Aoki, K. Akahane, S. Nagano, K. Mizutani, H. Iwai, K. Okamoto, P. Baron, S. Ochia, and M. Kubota, "Recent activities of coherent Doppler Wind Lidar at NICT", Working Group on Space-based Lidar Winds, NOAA (Boulder, CO, USA), 2018 年 2 月 7-8 日.

氏 名	所属	役割
石井昌憲	情報通信研究機構	研究代表者
大野裕一	情報通信研究機構	研究協力者
岩井宏徳	情報通信研究機構	研究協力者
青木 誠	情報通信研究機構	研究協力者
岡本 創	九州大学	所内世話人
佐藤可織	九州大学	研究協力者

研究組織

## 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

豊後水道の底層に黒潮域亜表層から冷水が侵入する現象は底入り潮として知られている. 底入り潮は水道 部を通過して瀬戸内海へと冷水と栄養塩を供給することから,豊後水道と瀬戸内海の物質循環と生態系に大き な影響を与えていると考えられている. この底入り潮の発生について,潮汐の大潮・小潮周期との関連が指摘さ れており,潮流が生じる鉛直混合が関わることが示唆されているが,その詳細な物理過程は未だ明らかでない. 豊後水道における鉛直混合過程に関しては,島影に形成される水平渦によって顕著な混合が生じることが数値 実験により明らかにされている [Nagai and Hibiya 2013]. この他に豊後水道の沿岸において,内部潮汐が鉛直 混合に寄与する可能性が観測により指摘されている [Kawamura et al. 2006]. 豊後水道における内部潮汐に伴 う乱流混合に関しては、申請者らが平成 28 年度応力研共同利用研究として実施した現場観測によって、豊後 水道南部の陸棚斜面が発生域の 1 つである可能性が示された. 一方で瀬戸内海と豊後水道の間の豊予海峡 周辺部も、強い潮流と急峻な海底地形によって内部潮汐が生成され得る海域だと考えられるが、そこでの流れ や乱流については観測例が極めて少なく実態が明らかでない.本研究では、豊予海峡周辺部において流れと 微細構造の現場観測を行い、内部潮汐とそれに伴う乱流の実体を明らかにすることを目的とする. 研究内容

2017 年 8 月 27日に愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用いて豊後水道における海洋観測を実施した. 図 1 に示す 10 点(Stn.2-5 を Line-1, Stn.A-E を Line-2 とする)において、応用力学研究所所有の微細構造プロファイラ TurboMAP-5 と「いさな」搭載の音響ドップラー流速計 ADCP を用いて、乱流強度の指標である乱流運動エネルギー散逸率  $\varepsilon$  と流れを計測した.

## <u>結果</u>

図2に観測された流速の東西成分 u,南北成分 v,鉛直シア2乗和 Sh =  $(\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2$ および $\varepsilon$ を示す. 観測時には表層に密度躍層が形成されるとともに、南部の測点(Stn.4-5)や東部の測点(Stn.C-E)の底部に底入 り潮が起源だと考えられる冷水が存在しており、その上部に躍層が形成されていた.この底部の躍層に沿うよう にして強い鉛直シアを伴う流れが存在されていた.底部躍層周辺では水深が深くなるとともに流速ベクトルが反 時計回りに回転していることから、この流れが内部波によるものだとすれば、鉛直上向きにエネルギーが伝播す ることになり、豊予海峡付近の海底斜面上で内部波が生成されていると考えられる.この強いシアに対応するよ うに大きな乱流散逸率 ( $\varepsilon > 10^6 W kg^{-1}$ )が底部躍層付近で計測されており、海峡部の海底躍層上で内部波の 砕波によって活発な乱流混合が生じていると考えられる.内部波エネルギーの起源としては、海峡部で卓越す る半日周期の潮汐が考えられるため、この内部波は内部潮汐波であると推察される.

本研究によって豊予海峡周辺部の内部潮汐波と乱流混合の空間構造が捉えられた.今回観測された底部 冷水上の躍層における強い乱流は、密度流としての底入り潮の北上過程に強く影響すると同時に、冷水中の 豊富な栄養塩を表層に持ち上げる働きを担っていると考えられる.

42



図1 宇和島における潮位変動(上図)と豊後水道における乱流観測点 Stn.2-6 および A-E(下図). 各 測点におけるベクトルは鉛直平均流速を示す.



図 2 Line-1 (Stn.2-5: 左列) と Line-2 (Stn.A-E: 右列) における断面観測結果. 上から, 東西流速成分 u (東向きが正), 南北成分 v (北向きが正), 鉛直シア 2 乗和  $Sh = (\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2$ , 乱流運動エネルギー散 逸率  $\varepsilon$ . 鉛直シアと $\varepsilon$  図中の等値線は 0.2 間隔で示した海水密度( $\sigma$ ).

## 陸奥湾における海洋循環の数値モデル実験による解析

弘前大学 北日本新エネルギー研究所 本田明弘

## 目的

陸奥湾での養殖ホタテ貝の大量死やイワシの大量死など,青 森県の水産業に打撃を与える出来事が幾度となく起こってい るが,未だに海洋生物死滅防止策は見つかっていない。理由の 一つとして,陸奥湾の湾内水の流出・流入・循環に関する解析 がなされていないため,大量死の原因を特定できないことにあ る。津軽海峡から流入する外海水が湾内水の水温や塩分,湾内 循環にどの程度影響を及ぼすか,湾内水の解析を行い,外海水 との関係性を示すことができれば,海洋生物への影響を予測す ることができる。

青森県水産総合研究センターの陸奥湾定線観測データや, 観 測ブイのデータを解析し, 津軽暖流との関係性を調べた。また, 吹送流など局所的な強制に対する湾内の物理応答, 湾内水の特 性や湾内循環の変動過程を調べた。



## 観測と解析方法

青森県水産総合研究センターでは陸奥湾内で観測ブイを 使用し、平舘・青森・東湾(図1)の3地点で水温・塩分等 の観測を実施している。各地点、水深1m,15m,30m,底層 で1時間おきに水温と塩分を自動観測し、センサにより適切 にデータの補正処理を行っている。本研究では、青森県水産 総合研究センター提供の2013 - 2015年の平舘水温データと、 気象庁の浅虫潮位データを用い、夏季の湾口の水温変動を分 析した。

## 結果と考察

図2は平舘観測地点の2013 - 2015 年6月1日 - 9月30日 の水深1m, 15m, 30m, 45mの水温の変化を示している。水 温が変化する時の上層1mの水温差は約3℃であるが,底層 45mでは約8℃もの水温差がある。各年の水温変動に差はな いことから,湾口の底層では夏季に大きな水温変動が起こっ ていることがわかる。底層45mの水温変動周期は主に日周潮 と半日周潮であるが,潮汐以外の長周期も見られた。潮汐を 除去し,再度スペクトル解析を行ったところ,5日 - 14日周 期のシグナルが検出された(図3)。この5日 - 14日周期の



図 2 平舘観測地点における 2013 年 6 月 1 日 - 9 月 30 日 (上段), 2014 年 6 月 1 日 - 9 月 1 日 (中段), 2015 年 6 月 1 日 - 9 月 30 日 (下段)の水温変化 底層水温の変動は,津軽海峡からの 津軽暖流系水の流入を反映している と考えられる。

大規模な水温変動は水位に影響を 及ぼすので,津軽暖流系水の流入時 は湾内の潮位も高くなる。図4は平 舘の底層水温と浅虫の潮位の48時間 -14日バンドパス時系列である。平 舘の水温が高くなると浅虫の潮位も 高くなっており,水温変動と潮位変 動に高い相関が示された。津軽暖流 系水の流入による水温変動は,潮位 データでも検出できるほど湾奥に入 り込む,層厚の強いシグナルと示唆 される。

5日-14日の時間スケールから, この現象の駆動源が低気圧の通過に 伴う風の変化であることが考えられ る。東北地方では6月-9月にやませ (冷たく湿った北東の風)が発生す



図4 平 品観 (回 地 点 の 広 層 小 価 と 浅 虫 の 潮 位 の 48 時 間 - 14 日 バンドパス 時系列

るため、やませの影響も考えられる。この現象を解明するには、6月-9月の津軽暖流系水の水温・塩分 や陸奥湾への流入経路、風との相関関係を分析する必要がある。今後は陸奥湾と津軽海峡全域の水温・ 塩分、陸奥湾近郊の風速・風向を解析し、現象の検討を行っていく。

## 研究組織

代表者	本田 明弘	弘前大学 北日本新エネルギー研究所・教授
協力者	磯辺 篤彦	九州大学 応用力学研究所・教授
	桐原 慎二	弘前大学 北日本新エネルギー研究所・教授
	久保田 健	弘前大学 北日本新エネルギー研究所・准教授
	大阪 将史	弘前大学 理工学研究科・大学院生
	藤嵜 里美	弘前大学 理工学研究科・技術職員

## 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、和歌山県田辺湾にあ る京都大学防災研究所白浜海象観測所が管理する高潮観測塔や(独)水資源機構琵琶湖開発総合管理所 が管理する安曇川沖ブイを利用して、GNSS レシーバによる長期連続観測を行った.今年度は、そのデ ータ利用のための試験観測を行い、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、既存の波浪観測データを用いて、2 次元スペクトルや波浪スペクトルの高 次モーメント量などから風波とうねりの分離と風波発達に対するうねりの影響評価を行う.

## 研究の実施体制

本研究は以下の体制で実施した. 研究代表者:根田昌典:京都大学大学院理学研究科 助教 研究協力者:花房秀哉:京都大学大学院理学研究科 修士2年 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

本研究では、波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための継続的なデータを取得するために、京都 大学防災研究所流域災害研究センター白浜海象観測所の田辺中島高潮観測塔(2017年9月まで)と水 資源機構琵琶湖開発総合管理所が所轄する安曇川沖総合自動観測所(2017年3月まで)に GNSS レシ ーバーを設置した連続観測を行ってきた.今年度は、2017年1月7日に琵琶湖北西岸の安曇川河口に おいて実施した試験観測の結果を用いて GNSS 反射波を用いて海面高度を算出することを試みるとと もに、GNSS 反射波による波浪の観測に向けた基礎的な研究を実施板.試験観測では地上の GNSS 固 定アンテナを参照点として、マルチコプターの上下に設置した GNSS アンテナで受信した信号の到達時

間差から海面での反射波の経路差を求めた.その結果,経路 差の平均は 0.1m 以下の誤差の範囲で湖面とマルチコプター の距離を推定可能であることが示された.また,経路差に見 られた摂動は,その周期や大きさから湖面の波浪の波形勾配 が影響していることが示唆された.

次いで、うねりと風浪の分離手法の高度化を図り、うねり 成分と風浪成分の発達の関係について調査を進めた.主に用 いたデータは 2014 年 2 月から 3 月にかけて北西太平洋にお いて実施された白鳳丸研究航海(KH-14-1)で行われた波浪観 測データである.波浪観測にはこれまで本研究で利用してき たゼニライトブイ(株)社製の GPS 波浪ブイを用いた.本研 究では、磯部ら(1988)に従って 2 次元波浪スペクトルを求め た.ここでは、風浪は海面変異の周波数スペクトルから分離 することとし、Tracy et al. 2007 に倣い、発達した風波の位 相速度と海上風速の比率の経験値に基づいて分離境界周波数 (cut-off frequency)を以下の式で定めた.

$$f_c = 0.588 \frac{g}{2\pi u \cos \theta}$$

図1は2次元波浪スペクトルの例と同データの1次元スペク





トルを示している.1次元波浪スペクトルのみからでは区別しにくか ったうねりと風浪の境界は方向を加味することでより得やすくなる ことが期待される.風波の強さを標準化するために Kalma and Calkoen (1992)が提唱した擬無次元波浪エネルギーを利用して,うね りの存在下での風浪の発達度について調査した.うねり成分を抽出し て得られた有義波の波形勾配との関係が最も顕著であった(図2).こ こでうねり成分は波浪スペクトルから風波を抽出した残りの成分か ら得られた比較的長周期な波浪成分で,昨年度までの解析により,う ねり成分の波形勾配は MSS ととても良い相関関係にあることが確認 されている.うねり成分の有義波の波形勾配は小さければ小さいほど 疑似無次元風波エネルギーは大きい傾向が顕著であった.うねりと海 上風向のなす相対角度に対するエネルギーの依存性も見られたが,波 形勾配との関係に比べるとばらつきが大きい傾向にあった.一方,



Donelan et al. (1985)で外洋域での波浪において指摘されているように、無次元化された風波エネルギーとインバース波齢はよく一致した.

これらの関係からうねりの波形勾配が風波の発達にどのように影響するのかを調べるために,さらに 摩擦速度との関係についても調べた.摩擦速度は通常海上風からバルク法で推定することが多いが,バ ルク式は一般的に波浪,海面流速,境界層安定度など様々な不確定要素が十分に反映されていないこと が分かっており,本研究での波浪の影響評価に利用することは必ずしも適当ではない.そこで,Toba (1972)によって提唱された風波有義波の 3/2 乗則を利用することで,観測された風波を駆動している風 応力に相当する摩擦速度を以下の式によって計算した.

## $u_* = H_{1/3}^2/gB^2T_{1/3}^3$

H<sub>1/3</sub>と**T**<sub>1/3</sub>はそれぞれ風波成分の有義波高と有義は周期であり,**B**は経験的に**0.062**とした.このよう にして得た摩擦速度と海上風の風波方向成分の関係を検討した.図3は摩擦速度と海上風速(風波方向 成分)に加え,上記のうねりの波形勾配の影響を加味した関係式を用いた両社の対応関係と,単に摩擦 速度と海上風速(風波方向成分)の対応関係を示す.ただし,両関係において標準偏差が座標軸上でほ ぼ同じ長さになるようにx軸の長さを調整してある.この図から明らかにうねりの影響を加えた方のば らつきが小さくなっていることがわかる.この結果はうねりの波形勾配に応じて海面風応力が変化する ことによって風波の発達に影響しうることを示している.うねりと海上風のなす角度と風波の疑似無次 元エネルギーとの関係も見られたが,うねりと海上風が順方向の際には風波からうねりへのエネルギー 輸送が起こることによってうねりが発達し,逆方向の時にはうねりが抑制される傾向があるというこれ までの知見を参考にすると,この関係はうねりと海上風の角度関係とうねりの波形勾配との見かけ上の 関係を反映したものであり,直接的な因果関係を示しているものではない可能性が高い.

これらの結果をさらに検討するために,新青丸航海 KS-17-10(代表:小松幸生博士)に根田と花房 が乗船し,海面乱流フラックスの直接観測と波浪観測を同時に実行し,データの収集を行った.詳細な 解析は現在進行中である.

#### 本研究の成果を含む成果

GNSS 反射信号によるマルチコプターからの海面高度 算出,市川香・海老沼拓史・李 梓原・根田昌典・堤 英輔・Growth Team,日本海洋学会 2017 年度秋季大 会,17F05-05,10月15日

KH-14-1 航海で観測された風波の発達過程に対する うねりの影響の評価,根田昌典・柴田篤吉・轡田邦 夫・鈴木直弥・市川香,大気海洋相互作用研究会山 中湖シンポジウム,東海大学セミナーハウス,6月 25日



図3:(左)摩擦速度と海上風速の関係にうねりの 波形勾配を加えた関係と(右)摩擦速度と海上風 速の単純比較

#### 大阪湾に出現するフロント構造の解析

神戸大学内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

風や淡水流入の空間偏差はないと仮定する時、瀬戸内海では成層・混合指標=2.5~3.0 に潮汐フ ロントが形成されると言われている。Yanagi and Oniwa(1986)は潮汐フロントの検出基準を、「4マ イルを隔て水温が2℃以上、塩分差が0.2以上あり、水温と塩分が同調して変動するとき、その変化 の中心」と定義した。林ら(2013)は、2003~2010年に神戸大学大学院海事科学研究科付属練習船「深 江丸」で計測したシーチェスト入口海水温度(海面下約3m)の0.5'グリッド平均水温をこの定義に 当てはめて解析し同様の傾向を得たが、ここでは塩分は考慮されず、また、定義は淡水流入を直接 受けない豊後水道での観測結果によるものである。一方大阪湾では、西宮環流と沖ノ瀬環流の境界 に潮汐フロントが形成されるが(藤原ら、1994、中辻・藤原、1995)、河川影響がなければ潮汐フロ ントは成層・混合指標=3.0~3.5 に形成され (Yanagi and Takahashi, 1998)、大潮時にはフロント位置 は海峡から離れ且つ変動が大きい(湯浅ら、1996)、などが言われている。これらは、大阪湾に形成 されるフロントは明石海峡での鉛直混合により形成されるだけでなく、淀川からの淡水流入による 成層も寄与することを意味している。つまり、大阪湾に出現するフロントは、"潮汐フロント"と"河 ロフロント"の区別が曖昧なままで議論されており、また、塩分を考慮して検出することが不可欠で あると言える。フロントは視認しやすい海面での現象で、研究においても主として海面を対象にし てきた。しかし実際には海水の収束発散場として立体構造を持ち、その機能が沿岸海域の生物生産、 水質汚染や漂流ゴミなど、各種の環境テーマに大きな影響を与えている。潮汐フロントと河口フロ ントは構造や形成要因を異にするため、海洋環境との関係性は、表層に現れているフロントがいず れのフロントであるかを判別した上で解析する必要がある

本研究では、2014 年 1 月に深江丸に搭載された水質モニター及び ADCP のデータと、HF レーダ ーや人工衛星のデータを用いて、大阪湾に出現するフロントの判別を試みた。

2. 方法

2014年1月~2016年9月に深江丸で計測された水深約3mの水温と塩分のデータを使用し、Yanagi and Oniwa(1986)の潮汐フロントの検出基準を、深江丸の航海速力約12knotから4マイルを20分に 変換し、「20分を隔て水温が2℃以上、塩分差が0.2以上あり、水温と塩分が同調して変動すると き、その変化の中心」と読み替えてフロントを検出した。検出結果に対し、

・水温と塩分の空間変化が淀川河口から明石海峡に向けて塩分が上昇、水温が低下しているか

・ADCP データから、フロントよりも明石海峡側に強い水平流に伴う鉛直混合が発生しているか を確認し、また同時刻の人工衛星や HF レーダー画像が得られた場合は、

・この様な水温と塩分の空間分布が広がりを持っているか

・表層の流動がフロントを境に変化しているか

も確認して、フロントか否か、フロントの場合、潮汐フロント、河口フロント、複合、いずれでも ない、の4種類に分類した。

3. 結果

解析した 184 データから、33 個のフロントが検出され、5~7 月に多く検出された。場所は成層・ 混合指標=2.5~3.0 に限らず、より海峡側や河口側にも分布した。衛星画像が取得できた 2016 年 5 月 20 日(中潮)には、2 つのフロントが検出された。水温と塩分は理論的な変化を見せ、海峡側での 水平流や鉛直混合も見受けられ、検出されたフロントのうちより海峡側が潮汐フロント、河口側が 河口フロントであると判断した。衛星画像でも、明石海峡から低温水が広がる様子、淡路島寄りに 高塩水、河口側に低塩水が、広域に分布する様子が捉えられた。一方、2014年7月31日(中潮)には、 播磨灘に1つ、大阪湾に2つのフロントが検出された。水温と塩分の変化傾向から、大阪湾に検出 されたより海峡側のフロントが潮汐フロントだと考えた。より河口側については、衛星画像から、 高塩分パッチによるフロントと考えらえる。この日は、大阪湾全体に高塩又は低塩パッチが広く分 布していた。この様なパッチ構造は、湯浅ら(1996)の観測でも示唆され、パッチが多く分布する場 合、海洋の物理構造はより複雑になると考えられる。

#### 4. 考察

検証の結果、図に示す通り潮汐フロント(+)は13個、河口フロント(×)は5個、その他のフロント(・) が15個だった。潮汐フロントの数は少なく、20m等深線よりも明石海峡寄りに分布する。出現は5 ~7月に限定され、これは理論と一致する。上げ潮流時に3個、下げ潮流時に10個が検出されたが、 大阪湾の潮汐フロントは下げ潮時に強化されるとの先行研究(中工研,1991、中辻ら,1994)とは異なっ た。



- 5. 成果公表
- ・林美鶴:海事・商船系練習船での海洋観測、東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「海洋物理 船舶観測フェスタ 2017」、2017.5.
- ・林美鶴ら:練習船での自然環境計測と船舶観測気象・海象ビッグデータ、日本航海学会第137回講 演会、2017.10.
- ・林美鶴「海事・商船系練習船での海洋研究・教育の現状とその展望」北海道大学低温科学研究所共 同利用「寒冷圏海洋科学推進に向けた共同利用研究船・練習船の現状把握と問題抽出のためのワ ークショップ」、2017.10.
- ・林美鶴、大阪湾に出現するフロントに関する考察、第2回海洋環境研究集会、2016.12.
- 6. 研究組織

林 美鶴 神戸大学 准教授 磯辺篤彦 九州大学 教授

# 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲プロダクト推定アルゴリズムの高度化と 地上検証に資する観測研究(29A0-20)

(独)国立環境研究所環境計測研究センター 西澤智明

## 要旨

衛星搭載ライダーデータを用いた大気粒子プロダクトを生成する解析アルゴリズムの高度化やそれらプロダクトの地上検証に資するデータ解析技術や観測技術の開発・改良を主眼とし、多視野角・多重散乱ライダーの改良技術の考案及び試験を行った。偏光信号を独立した受信望遠鏡で個別測定する現行のシステムを改良し、それらを一体化して測定する受信システムを考案した。試験測定により良好な結果を得ている。また、本考案の受信システムは波長 532nm だけではなく波長 355nm においても同様な測定が可能であり、多波長測定化が可能である。

## 序論

温暖化をはじめとする地球気候への大気粒子(エアロゾルや雲)の影響評価を主目的の一つとし て、大気粒子の時間・水平分布と共にその鉛直構造も測定可能な能動型センサー「ライダー」を 搭載した衛星観測が進行している。2006年打ち上げ後、現在も運用中の CALIPSO 衛星搭載の2波 長偏光ミー散乱ライダーCALIOP(NASA)による全球大気粒子観測の後継として、欧共同地球観測 プロジェクト EarthCARE では高スペクトル分解ライダーATLIDによる全球観測が 2019年から開始 される。光学的に厚い粒子層(雲や発生域近傍での鉱物ダスト層など)からのライダー信号には、 粒子からの一次散乱成分と共に多重散乱成分が多く含まれる。多重散乱成分の取り扱いは今尚難 しい。よって、雲・エアロゾルパラメータの推定アルゴリズムにおいて多重散乱成分をどう考慮 するべきかは重要な研究課題となっている。特に、衛星搭載ライダー信号に対する多重散乱の影 響は地上ライダー計測に比して大きいため、衛星搭載ライダーデータの解析ではより重要となる。 この問題に対し、科研費課題(H25-H28,課題代表:岡本教授)にて、CALIOPのレーザー波長であ る 532nm での単波長レーザーを用いて多重散乱成分を独立測定するライダー(多視野角・多重散 乱ライダー)を九大・環境研で共同開発し、地上観測研究を実施した。CALIOPでは更に波長1064nm での近赤外測定も実施されており、また、ATLIDでは波長355nmでの紫外レーザーが用いられる。

上記背景を踏まえ、本研究では、衛星搭載ライダーデータを用いた大気粒子プロダクトを生成す る解析アルゴリズムの高度化やそれらプロダクトの地上検証に資するデータ解析技術や観測技術 の開発・改良を行う。具体的には、より詳細な多重散乱成分の影響評価を企図し、上記の多視野 角・多重散乱ライダーの多波長化技術の実現可能性を検討し、その検討結果に基づいて試作・試 験測定を実施する。

## <u>実施方法</u>

1) 現状の波長 532nm での多視野角・多重散乱ライダーシステムの課題を検討し、より優れたシ ステム(安定性の向上、不確実性の低減等)を考案する

2)考案したシステムを波長 532nm だけではなく、波長 355nm 等での測定が可能であるかの検討 を行い、試作・試験測定を行う。

## <u>結果と考察</u>

1)現状の多視野角・多重散乱ライダーシステムでは、直線偏光したレーザー(波長 532nm)を鉛 直上方に送信し、大気粒子による散乱光を小型望遠鏡(直径~50mm,鏡筒長~400mm)で集光し、 集光した光を直接検出器に入れて光強度を測定するシステムとなっている。小形望遠鏡と検出器 は一体化され(以下、受信望遠鏡)、10本の受信望遠鏡を用いる(全10ch 測定)。内5つは 送信レーザー(直線偏光)の偏光に対して水平な成分(copol 成分)、残りは垂直な成分(crosspol 成分)を測定する。Copol チャンネルと crosspol チャンネルを1 セットとし、1 セットずつ受信 望遠鏡を鉛直上向き方向から5つの角度( $\theta$ )で傾けて測定する( $\theta$ =0,0.6,1.2,1.8,2.4度)。 本システムでは θ=0 では多重散乱光に加え、一次散乱光も測定するチャンネルとなる。各受信望 遠鏡にはバンドパスフィルターと偏光シートが小形望遠鏡上端部に取り付けられ、これにより波 長及び偏光選択がなされている。上記システムは非常にシンプルで汎用性の高い構成であり、多 波長化や測定角度の増加も容易である。一方で、個々受信望遠鏡は独立して設置されるため、個々 受信望遠鏡の傾斜や偏光(偏光シートの回転角)の精緻な調整と保持が必須となる。特に偏光チ ャンネル間(copol/crosspol)での傾斜角や偏光のズレは致命的な測定誤差を生む。そこで、こ の問題を低減化するために、独立測定している偏光チャンネルを一体化し、一つの受信望遠鏡で 測定できるシステムを考案した。ここでは、偏光シートを廃し、偏光ビームスプリッターキュー ブ(以下、偏光キューブ)を使用する。これにより偏光キューブの透過光と反射光を測定するこ とで copol/crosspol 成分を同時に測定できる。鏡筒長や重量の増長はあるが、これらを固定する マウントシステムの増強により対応できる。

2)考案した受信望遠鏡システムを試作し、試験測定を行った。偏光調整は格段に容易となり、 測定信号の性状も理論と整合するものであった。(現状のシステムと同様に)考案した受信望遠 鏡システムの波長 355nm での測定の実現可能性について検討した。光学部品、検出器、信号処理 系を精査し、実現可能であることが判明した。一方、波長 1064nm での測定の実現可能性に関する 検討は出来なかったため、これは今後の課題となる。

## 成果報告

1)藤川雅大、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、西澤智明、杉本伸夫、神慶孝、工藤玲、鷹野敏明、 多視野角・多重散乱偏光ライダによる雲・降水・エアロゾル識別手法、第35回レーザセンシングシン ポジウム、2017.9.1、東京都小金井市

2)藤川雅大、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、西澤智明、杉本伸夫、神慶孝、工藤玲、鷹野敏明、 多視野角・多重散乱ライダによる雲域・降水域の識別手法の開発と検証、日本気象学会 2017 年度秋季 大会、2017.11.1、北海道札幌市

氏名		所属	職名	役割・担当
西澤	智明	国立環境研究所	室長	代表者
岡本	創	九州大学応用力 学研究所	教授	データ解析 (雲)
佐藤	可織	九州大学応用力 学研究所	助教	データ解析 (雲)
藤川	雄大	九州大学応用力 学研究所	博士課程1年	データ解析 (エアロゾル)

研究組織

## 長期観測におけるエアロゾルの気候影響に関する研究

富山大学大学院理工学研究部(理学) 青木 一真

## 要旨

大気中に浮遊するエアロゾルの気候影響を研究するため、2003年から九州大学応用力学研 究所において、太陽放射観測を行っている。これらのデータをもとに、エアロゾルの気候影 響解明はもちろん、数値モデルの精度向上など利用している。エアロゾルの光学的厚さの季 節変化は、3年間(2015年から2017年)同じような傾向にあったが、他の日本での季節変化 とは違った傾向であった。

#### 1. はじめに

地球温暖化問題の中で、大気中に浮游する微粒子(エアロゾル)の気候影響について、様々 な角度から研究が進められている。特に、本研究の観測対象領域である九州大学応用力学研 究所がある福岡県や長崎大学がある長崎県などの九州北部地方は、中国大陸から越境する大 気汚染物質、黄砂粒子、森林火災などの影響を受けやすい地域である。これらは、大陸の風 下側に位置する日本に影響するが、日本国内から排出される大気汚染物質も影響しており、 それらが複合しているため、それらの影響を評価することは難しい。また、それらによる健 康被害や気象障害など、私たちの生活にも影響していおり、無視できるものではない。本研 究は、1996年から長崎大学おいて、2003 年から九州大学応用力学研究所おいて、太陽光と周 辺光の放射輝度を用いたスカイラジオメーターを使って長期観測を行い、「PM2.5」を含んだ 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により、エアロゾルや それが核となって形成する雲の気候影響を評価することを目的とする。エアロゾル粒子の輸 送過程を知ることは、越境大気汚染として、次世代の大気化学・気象結合モデルの開発や応 用を行うためにも、定量的で精度の良い地上観測データの蓄積が重要となる。エアロゾル気 候影響を評価する際は、応用力学研究所気候変動科学分野で開発・改良されているエアロゾ ル気候モデルSPRINTARS を用いて、地上観測や衛星観測の結果を基にモデルの検証を行う。 また、主として九州・沖縄地域の観測地点(福岡、長崎、福江島、沖縄等)を利用して、大 陸から日本へ輸送されてくるエアロゾルをいち早くモニタリングし、それらを同化データと して組み入れ、モデルの精度向上につなげる。

#### 2. 観測·解析概要

太陽直達光と周辺光の角度分布の放射輝度を晴天時日中に自動測定出来るスカイラジオメ ーター(プリード社製、http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/)を利用している。九大応力研 をはじめ、様々な場所において連続観測を行っている。この観測データから解析されたエア 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)を用いて、気候変動の指標である放射強制力を求める。また、これら のデータを地上検証として用いてSPRINTARSを改良し、放射強制力のさらなる精度向上を目指 している。一時期、測器の故障があったが、概ね良好な観測を継続出来ている。

#### 3. 結果及び、考察

Fig.1は、2015年1月から2017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

52

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、3 年間(2015年から2017年)で概ね同じような傾向が見られた。エアロゾルの光学的厚さの季 節変化の特徴は、他の日本各地での観測結果と違う部分もあることがわかった。オングスト ローム指数の季節変化を見てみると夏に高い傾向があり、長距離輸送とローカルな大気汚染 物質、すなわち微小粒子の影響ではないかと考え、他地点との違いなどをみながら、さらに 研究を進める予定である。今後も継続した観測を行うことにより、SPRINTARSや2017年度後半 に打ち上げられた気候変動衛星「しきさい」等と比較し、越境大気汚染やローカルな影響評 価を行い気候影響の解明につなげていきたい。



Fig. 1 2015年1月から2017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

- Kudo., R, T. Nishizawa, T. Aoyagi, Y. Fujiyoshi, Y. Higuchi, M. Hayashi, A. Shimizu, and K. Aoki, (2017): Remote sensing of aerosol optical properties and solar heating rate by the combination of sky radiometer and lidar measurements, AIP Conference Proceedings 1810, 060002 (2017); doi: 10.1063/1.4975518.
- Aoki, K.,: Validation of satellite aerosol optical properties over land and ocean measured by sky radiometer (3rd International A-Train Sympozium 2017: Pasadena, CA, USA, 2017.04.20)

#### 5. 研究組織

代表者	青木 一真	(富山大学大学院理工学研究部(理学))
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)

#### 富山湾沿岸域における対馬暖流水の流入に関する研究

富山高等専門学校 商船学部 福留研一

目的

筆者らは、平成28年度の春季から秋季にかけての富山湾沿岸における CTD 観測および ADCP 観測 によって、春季の終わり頃の2週間程の間に対馬暖流が湾奥に流入して水塊構造が大きく変化する様 子、夏季に能登半島の後ろに形成された数十 km スケールの時計回りの渦が数日間の内に強化された結 果、沿岸の流れ場に大きく影響を与える様子、秋季の相対的に安定して鉛直に一様な流れ場などの観測 に成功した.一方でこういった変動の沖合方向の空間スケールや変動の時間スケールについては不明な 点が多く、現在の観測体制ではそれらを明らかにすることは難しい事もわかった.そこで本研究では、 限られたシップタイムや悪天候時にも観測が可能な XBT を用いて岸沖方向に設けた観測ラインにおけ る水温鉛直断面観測を新たに実施することで、富山湾沿岸部に流入する対馬暖流水の時空間的な変動と その影響について、特に流れ場と水塊構造の季節変動に注目し、明らかにすることを目的とする. 観測・データ

富山高等専門学校では実習船「若潮丸」を用いて海洋観測も実施しており,富山湾のやや湾奥の水深 約700mの地点に設定した CTD 観測点(36.53N, 137.10E)では,10年超に渡っておおよそ毎月の CTD 観測および観測点までの往復 ADCP 観測を行なっている.この観測に加えて、岸沖方向と湾口を 横断する方向に新たに観測ラインを設け,対馬暖流の流入や流路変化が予想される5月と8月には、集 中して XBT 観測を行った.その他に気象庁発表の表層水温図,河川水由来の栄養塩を多く含む表層水 の衛星 chl-a 濃度を用いた追跡等により,対馬暖流水の流入・強化の過程について解析した.

結果・考察

図1に、5月24日に行った湾中央から東部にかけての ADCP 観測結果を示した。表層16m における 航路に沿った流速ベクトル分布からは、富山湾南部の沿岸域では,岸に沿って東向きの強い流れがあっ たことがわかる。この東向き流の一部はその後、神通川河口から北方に伸びる海脚にそって北方に向き を変えている様子が見られた。図2に示した気象庁 HP で公開されている表層(50m)の水温分布図か らは、対馬暖流と思われる高温の水塊が湾奥に流入し始めているのがわかる.また、図3に示した表層 Chl.a 濃度分布画像からは、低栄養の対馬暖流水が湾西部に侵入する様子や、河川水由来と思われる沿 岸の高 Chl.a 水の一部が沖合に運ばれる様子が見て取れる. これらのことから, 昨年度と同様に今年度 も、この時期に対馬暖流水が湾奥へと流入して水塊構造が大きく変化したと考えられる.次に、8 月 28 日-29 日の湾全域での ADCP 観測結果を図4 に示した. 湾西部には数十 km スケールの時計回りの渦構 造が観測され、湾南部の沿岸ではこの渦の影響を受けて、春季とは逆の西向きの流れが卓越していた. 能登半島東岸から侵入して反時計回りに富山湾沿岸を流れると考えられている対馬暖流であるが、この 時期には岸から離れて富山湾の中央部へと流入し、一部が渦を形成し、残りが湾口を横切って佐渡海峡 方面へと流出しているように見える.こういった流動場の変化は,XBT/CTD 観測から得られた海洋内 部の構造からも確認できる.図5には左から、5月24日の湾東部岸沖ライン,8月28日-29日の湾西 部岸沖ライン,湾口横断ラインの(a)測点・測線図,(b)XBT/CTD による水温断面図をそれぞれ示して いる.水温断面図から温度風の関係を仮定すると、春季には沿岸で東向きの流れが顕著な一方,夏季の

54

湾西部では、沿岸で西向き、沖合で東向きの流れ場であったとわかる.夏季の湾口横断ラインからは, 湾西部の沿岸で北向き,湾中央部で南向きの流れとなっており,ADCP 観測で捉えたのと同様の渦構造 が確認された.一方,夏季の湾東部では顕著な水平方向の温度変化は見られなかった.図は示していな いが,10月末の湾西部の ADCP 観測においても若干スケールが小さい渦構造が確認され,11月末には 渦構造は解消されて,湾南部の沿岸では東向きの流れが支配的になっていた.湾西部の渦構造の生成と 解消によって,沿岸の流動場が大きく変化したことが示唆する結果が得られたが,その時間スケールや 経年変化に関しては,引き続き調査が必要と考えられる.



図1. 春季表層流速ベクトル図 図2. 春季表層水温図 図3. 春季表層 Chl.a 濃度分布 図4. 夏季表層流速ベクトル図



図 5. (左) 5 月 24 日, (中) 8 月 28 日-29 日の湾西部岸沖ライン, (右) 8 月 28 日-29 日の湾ロ横断ラインにおける (a) 測点図と(b) XBT/CTD による水温断面図,水温断面図中の太い破線は 10℃の等温線を示している.

## 成果報告

福留研一,千葉元「2016-2017 年に観測された富山湾の流動変動」,日本海及び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,2017.12.06

#### 研究組織

研究代表者:富山高等専門学校 商船学科 福留研一 所内世話人:九州大学応用力学研究所 千手智晴 マルチコプター/GNSS-R/小型衛星を用いた海上気象の観測

富田裕之(名古屋大学·宇宙地球環境研究所)

## はじめに

海上気温,湿度,風速などの海上気象要素の観測は、大気の状態を把握するた めのみならず、地球システムのエネルギー収支や大気海洋相互作用の実態を把 握するために重要な海面フラックスの推定にも必要不可欠である。係留ブイ,船 舶などの歴史的な観測プラットフォームで観測が継続されているが十分でない。 したがって、人工衛星を利用した全球をカバーするような地球観測が有効であ り現在では多くの地球観測衛星が海面フラックスの推定に用いられている。一 方で、地球観測に用いられるような高精度のセンサーを搭載した大型の人工衛 星の開発や打ち上げには莫大な費用がかかるため、近い将来において大型衛星 による地球観測が現在と同じ水準で維持されるかは不透明な状況である。そこ で近年技術的な発展と普及が急速に進むマルチコプターや小型衛星をはじめと する新たな観測プラットフォームを用いた海上気象要素の観測が期待される。 この様な背景から、本研究ではマルチコプターや小型衛星などの新たな観測プ ラットフォームや観測技術を用いた海上気象の観測について研究を行う。昨年 度はマルチコプターを利用して海上気象要素(特に気温と湿度)の観測を実施 し、海洋学, 気象学においての利用可能性を検討した。本年度も、引き続きマル チコプターを利用したデータ取得方法の検討を行ったほか、小型衛星プラット フォームによる観測データの利用検討を開始した。

## 成果の概要

昨年度に実施したマルチコプターでの観測試験の結果を受けて新たに温湿 度・加速度計データ(ホバリング時)、およびマルチコプター飛行情報を取得可 能なシステムを構築した。日射と機体の影響を可能な限り小さくするような検 討を行った。また、同時に地上リファレンスのデータとして気象要素(気温,相 対湿度,気圧)海上風の観測システムを利用したデータ取得も行った。今後、地 上のデータ取得試験を繰り返し、さらに海上でのデータ取得試験も実施する。ま た後述する GNSS の反射波の観測データの同時取得についても検討を行う。

2017 年に NASA が打ち上げた小型衛星群 CYGNSS の海上風観測データの利 用検討を行った。CYGNSS は 8 機の小型衛星群プラットフォームで観測を行う 点、さらに GPS に代表される GNSS の海面反射波(GNSS-R)を利用する点で これまでの大型衛星に搭載されたマイクロ波放射計や散乱計の観測とは本質的 に異なる。まず既存の衛星観測データと比較することで観測の頻度や時空間の

56

パターンの特徴を把握することを試みた。例として大型衛星である JAXA GCOM-W に搭載されたマイクロ波放射計 AMSR2 と、CYGNSS 衛星群による 海上風の日本付近での観測分布を図1に示す。この図より CYGNSS 衛星群によ る観測は AMSR2 と比べるとサンプリングの特性が大きく異なることが分かる。 AMSR2 は広い観測パスで広範囲をほぼ同じ時刻で観測する。ただし降水がある 場合に欠測が目立つ。一方で CYGNSS は、個々の観測パスの幅は狭いが、比較 的高頻度に多数の観測を行っている。また AMSR2 とは異なる観測時刻で観測 を行っている。また降雨の影響をそれほど受けていない。今後、より長期間のデ ータを用いて精度を含めた観測特性の違いについて調査を行い、さらに海面フ ラックス推定に対するインパクトについて検討を行う。



図 1. 衛星による日本付近の海上風の観測の例(2017 年 3 月 18 日) 上段: (a) マイクロ波放射計 GCOM-W/AMSR2, (b) CYGNSS。 下段: それぞれの衛星観測パスの観測時刻

## 関連発表など

富田裕之,海面フラックス推定と高頻度観測,超小型衛星「群」 プラットフォーム による高頻度即時観測とその将来,2017年7月

Tomita H. and K. Ichikawa, An impact of CYGNSS surface wind speed observation on air-sea flux estimate, JpGU 2018 Annual meeting, Abstract, 2018 年 2 月

# CloudSat/CALIPSO 雲特性プロダクトの高度化に向けた 中緯度・極域の雲気候学的解析

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

## ・要旨

九州大学で作成された CloudSat/CALIPSO 併用データを使用し,夏季 (JJA) と冬季(DJF)の東シベリ ア海周辺(70-80N°,120-180E°)とバレンツ海周辺(70-80N°,0-40E°)の雲特性の違いについて明らか にした。北極圏の全天雲量は冬季に比べて夏季で大きくなっている,冬季の雲頂温度-40℃以上の雲内 部の雲温度-25~0℃域における雲の氷相割合に違いがあり,東シベリア海周辺ではバレンツ海周辺に比 ベ,氷相割合が多く,水相割合は少ないことを明らかにした。また温度毎の氷相割合は東シベリア海の -25 から-10℃帯で約 20%大きくなっており,高度毎では下層 2km 以下において領域間の差が大きいこと を示した。このことは、冬季ではバレンツ海周辺に比べて,東シベリア海周辺の下層で氷相の形成が促 進している可能性を示唆している。

#### ・序論

雲や降水は、地球のエネルギー収支や水循環を通して、気候の変動・維持に大きな影響を与えている。 広域的な雲の分布を観測する手段として人工衛星のデータが広く利用されてきたが、2006年に能動型セ ンサーを搭載した CloudSat や CALIPSO が打ち上げられたことによって、雲内部の鉛直方向の情報が得 られるようになった。しかしながら、氷雲の形成過程や成長過程についてはまだ詳しくわかっていない。 本研究では、-40℃以上の雲層内の氷粒子の形成過程に着目し、北半球夏季と冬季の2つの領域(バレン ツ海周辺・東シベリア海周辺)について比較を行った。

#### ・実験方法

雲粒子相判別(KU-type)は Yoshida et al. (2010)が開発した CALIPSO 衛星に搭載されている能動型センサーCALIOP から得られる、後方散乱係数と偏光解消度を使用した相判別手法が用いられている。また、 氷相は雲粒子判別が水平状氷粒子(2D-plate)、三次元ランダム配向氷粒子(3D-ice)、3D と 2D の混合層 (mixture of 2D-plate and 3D-ice)の場合と定義し、水相は 0℃以上の水粒子(warm water)、過冷却水 粒子(supercooled water)の場合と定義した。 雲量は Hagihara et al. (2010)が開発した CloudSat/CALIPSO 併用雲マスク(KU-mask)を使用した。雲内部の鉛直気温データは CloudSat の ECMWF-AUX プロダクト(Partain 2007)を使用し、地表面風速,海面気圧等は再解析格子点気象データセ ットである NCEP/NCAR 再解析データ(解像度: 2.5×2.5°)を使用した。

雲層内の氷相割合(F<sub>ice</sub>)と水相割合(F<sub>water</sub>)は以下のように定義し、

 $F_{ice} = N_{ice} / (N_{ice} + N_{water})$ (1)  $F_{water} = N_{water} / (N_{ice} + N_{water})$ (2)

ここで、N<sub>ice</sub>は雲層内で検出した氷相雲層数を示し、N<sub>wate</sub>水相雲層数を示す。ただし、光学的厚い雲が発生している場合、雲層内でライダーシグナルが減衰して検出できなくなってしまうため、雲頂から光 学的厚さが7程度までの雲を対象としている。

## ・結果と考察

図1は東シベリア海周辺(灰色)とバレンツ海周辺(黒色)での温度毎氷相(図1. a, c)・水相(図 1. b, d)割合を示している。冬季における-40℃以上の雲層内の氷相割合は東シベリア海周辺で高くなっている。夏季(図1. a, c)では領域間における差はほとんど生じていないが、冬季(図1. b, d)では 大きく異なっている。冬季であっても-35℃以下の温度域ではあまり違いは生じないが、-25℃から-10℃ 域では明らかに東シベリア海周辺での氷相割合が増加している(約20%)ことがわかる。室内実験によ り、この温度域で氷晶は不均質核形成の中でも内部凍結や接触凍結によって生成されることがわかって おり(*Hoose and Möhler*, 2012), 東シベリア海周辺で内部凍結・接触凍結が促進している可能性を示唆 している。

本研究の結果は、数値モデル出力結果の検証に有用であり、数値モデル内で扱われている雲層内氷相 割合の見直しに貢献することができると考える。



図1.北半球夏季(a,b,c)と冬季(d,e,f)の東シベリア海周辺(灰色)、バレンツ海周辺(黒色) における温度毎の(a),(d)氷相割合,(b),(d)水相割合,(c),(d)氷粒子タイプ毎 (2D-plate, 3D-ice)発生割合。

#### ・成果報告

#### 査読付き論文

- ①山内晃,河本和明,岡本創,佐藤可織; CALIPSO 衛星データから得られたバレンツ海周辺と東シベリア海 周辺の雲特性の違いについて,日本リモートセンシング学会誌,37巻5号(2017.11)
- <sup>(2)</sup>Akira Yamauchi, Kazuaki Kawamoto, Hajime Okamoto ; Differences in the fractions of ice clouds between eastern and western parts of Eurasian Continent using CALIPSO in January 2007, Atmospheric Science Letters ,doi:10.1002/asl.807, 2018, in press.

## 学会発表リスト

- ①Akira Yamauchi, Kazuaki Kawamoto, Hajime Okamoto, Multilayer Cloud Characteristics over the North Pacific Ocean Obtained from CloudSat/CALIPSO Combined Data」, 『JpGU-AGU Joint Meeting 2017』, AAS08-P10, Chiba, Japan, May, 2017.
- ②山内晃,河本和明,岡本創,「CloudSat-CALIPSO併用データを用いたユーラシア大陸広域の雲層内氷 相割合の変化について」,『日本気象学会 2017年度春季大会』, P303, 東京, 2017年5月。

# 東シナ海陸棚ー黒潮間混合域における物質輸送過程理解のための国際共同研究体制の構築: --Nd 同位体による東シナ海陸棚ー黒潮間の物質輸送--

富山大学 大学院理工学研究部 張勁

# Establishment of international cooperative research group to understand the material transport between the boundary area of the East China Sea shelf region and Kuroshio

## - Material transport between the East China Sea and Kuroshio using Nd isotope -

## 1 Introduction.

Marginal seas in the western North Pacific and western boundary current area are constantly or intermittently exchanging energy and materials between land and open ocean. In the East China Sea, lack of evidence from field work, such as origin identification, parameterization and process explanation, limits the improvement of numerical experiments and modeling. An urgent task is to build up a framework to arrange the interdisciplinary and regional joint studies on the environment of the marginal seas, e.g. East China Sea. In this report, a new paper (Che and Zhang, 2018) was introduced. Nd concentration and isotopic compositions were analyzed in seawater samples collected from joint Japanese and Chinese cruises. A mixing model was constructed using Nd concentration, Nd isotopic compositions, salinity, and temperature to estimate the contribution of the ECS to the Sea of Japan and to quantify the interaction between the ECS and the Northwestern Pacific.

2 Observations and Data

In the Changjiang River Estuary, dissolved Nd and its isotopic ratios were obtained in August 2015 by Zhedaiyuyun (represented by black circles in Figure 1 A). In the middle of the ECS, two depth profiles of Nd were obtained in October 2015 by the R/V Hakuho-Maru (No. KH-15-3, Japan) (represented by triangles in Figure 1 A). Four stations were sampled in July 2016 to investigate the variations in Nd concentration and in Nd isotopic composition (R/V, Nagasaki-Maru (No.441), Japan), which included two depth profiles in the eastern region of the ECS (represented by squares in Figure 1 A). Temperature and salinity data were collected using the Sea-Bird 911 instruments (Figure 1 B).



Figure 1. Sampling stations (A) and Potential temperature-salinity diagram (B) (from paper 1.)

#### 3 Results

Chemical tracers e.g. rare earth elements and Nd isotope ( $\varepsilon_{Nd}$ ) are suitable and conservative as water mass indicators, and are excellent tools for classification and analysis of water masses while coupling with salinity and temperature. These physico-chemical tracers can be applied to characterizing and quantifying multiple water masses (>3), particularly where there is complex water structure. Three end-member models indicate that approximately 10% of the CDW (Changjiang Diluted Water), 28% of the YSW (Yellow Sea Water), and 62% of the Kuroshio Water enter the Sea of Japan while approximately 6% of the MSW (Mixing Shelf Water) discharges into the adjacent areas of the Northwestern Pacific.



Figure 2 Mixing proportions of the three water masses in the surface waters (A) and water column (B) at each sampling station. (quoted from paper 1.)

4 Scientific papers and meetings

1. H. Che and J. Zhnag, Water mass analysis and end-member mixing contribution using coupled radiogenic Nd isotopes and Nd concentrations: interaction between marginal seas and the Northwestern Pacific. DOI: 10.1002/2017GL076978, Geophy. Res. Lett. 2018.

2. Zhang, J., Material transport and interaction between the East China Sea and the northwestern Pacific: joint regional GEOTRACES study in East Asia, 2017 Joint IAPSO-IAMAS-IAGA Assembly, Aug., Cape Town, South Africa.

3. Zhang, J., GEOTRACES and biogeochemical studies in the Western Pacific and its marginal seas, WESTPAC Workshop on "A framework for cooperative studies in the Western Pacific Marginal Seas: Energy and materials exchange between land and open ocean". Oct. Fukuoka, Japan.

## GNSS 反射波観測用受信機の開発とマルチコプタによる実証実験

中部大学工学部 海老沼拓史

1. 目的

本研究では、海面で反射した測位衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)の信号を利用した新しい海洋リモートセンシングの実現を目標としている. これは、GNSS 衛星を信号源としたパッシブなレーダー観測であるため、小型化・省電力化が可能である. また、一度に複数の GNSS 信号を観測できるため、広範囲な海洋観測が可能となる. このようなセンサを複数の小型衛星や無人飛行機などに搭載することで、時間分解能の高い海洋リモートセンシングが期待できる.

九州大学応用力学研究所との平成 29 年度共同利用研究では、平成 28 年度に実証実験を 行った GNSS 反射波観測用受信機のさらなる小型化,軽量化を実施する.さらに、GNSS 反射波観測の基準点となるマルチコプタの高精度測位を試みる.

2. 小型 GNSS 反射波観測用受信機

平成 28 年度に開発した GNSS 反射波観測用受信機は、モバイルバッテリで動作する小型 PC をベースとし、そこに USB による通信・給電が可能な GNSS 受信機を接続していたた め、サイズも重量も大きく、小型のマルチコプタに搭載するのは困難であった.(図 1)



図1 GNSS 反射波観測用受信機



図2 ちょっとすごいロガー

そこで、平成 29 年度の共同利用研究では、PC の代わりに組み込み用マイコンを利用した SD カードロガーを採用することで、観測装置の小型化・軽量化を実施した. 観測装置の ベースとして、オープンソースの GPS 受信機ロガーである「ちょっとすごいロガー

(NinjaScan-Light)」を採用した(図2).ちょっとすごいロガーは、ジャイロセンサや加 速度センサの情報に加えて、GPS 受信機による測位結果をリアルタイムでSDカードに書 き込むことのできる小型ロガーである.本研究では、このGPS 受信機部を、RAWデータ の観測が可能なGNSS 受信機である u-blox M8T に置き換えることで、GNSS 反射波観測 に必要な疑似距離や搬送波位相,信号強度などの観測値の記録を可能にした.

3. マルチコプタの高精度測位実験

本研究で開発した GNSS 反射波観測用受信機の機能確認のために,GNSS 受信機ロガー を市販の小型マルチコプタに搭載し,GNSS 反射波観測の基準点となるマルチコプタの高 精度測位を実施した.GNSS 受信機ロガーを搭載したマルチコプタの外観を図3に示す.



図3 ロガーを搭載した小型マルチコプタ

高精度測位のために、マルチコプタから数十メートルほどの場所に、同じく u-blox M8T を用いた基準局を設置した.基線長が十分に短いため、ほぼ理想的な状態で高精度測位の 評価を実施することができる.



図4に高精度測位結果の例としてフライト中の高度方向の測位結果を示す.マルチコプ タの高度変化は追尾できているものの,測位結果は搬送波位相の波数不確定性が確定しな いFloat 解しか得ることができなかった.モータを停止させ,地上に静止している状態で精 密測位を実施した際には Fix 解が得られることから,モータから発生する電磁的なノイズ が,GNSS 信号と干渉していると予想される.アンテナの設置位置の工夫や,GNSS 受信 機ロガーの電磁シールドなど,電磁的な干渉の軽減が実用に向けた今後の課題である.

# 日本沿岸域における高解像度塩分動的マップの作成手法の開発

中田聡史 神戸大学大学院海事科学研究科

#### 1. 目的

近年、海表面塩分測定センサーが搭載された SAC-D 衛星(Aquarius)等の導入・運用により、海表面塩分(SSS)が面的に得られるようになった。ただし、衛星 SSS データの水平分解能は約 50 km であり、まだまだ観測エラーも大きく、河川プリューム(低塩分水)が発達する沿岸域で使用するには極めて困難である。河川から沿岸海域における海洋生態系や漁場環境への栄養塩パスとして機能する河川プリュームは沿岸漁業者や養殖業者からも関心が高く、したがってプリュームを把握するための SSS マップの需要は高い。

河川から出水するプリュームには有色溶存有機物(CDOM)を大量に含んでおり、海表面塩分 (SSS)と高い相関関係にある。本研究では、この関係を利用して海色衛星観測によりプロダク トから得られた CDOM データから海表面塩分(SSS)を推定する手法の開発を進めている。静 止海色衛星によって日本沿岸域全域をカバーできる高空間分解能の衛星 SSS データセットを 整備するのが最終目的である。現段階では、対馬海峡沿岸域や大阪湾・紀伊水道等の比較的 現場塩分データが多く得られている海域において SSS マップを整備できている。そして、応 用力学研究所の千手智晴准教授が長期にわたって観測・収集されている日本海沿岸域各地の 時系列塩分データは、衛星 SSS マップを検証し、衛星 SSS 精度向上を可能とするための非常 に貴重なデータとなっている。

本報告では、解析期間をさらに延長し 2011 年から 2017 年までの収集できる観測データを 用いて検証・修正した SSS マップの一例として、解析対象としている対馬暖流沿岸域の中で も特に河川出水の影響が大きい沿岸海域である富山湾の解析を紹介する。当該海域において、 現場 CDOM と現場 SSS を収集し、SSS マップの推定精度向上を試みた。そして、SSS マップ を用いて、形成される河川プリュームの動態を解析した。

#### 2. 方法

使用した衛星データは、2011 年 3 月より得られている静止衛星「千里眼」GOCI-COMS プロダクト(水平解像度約 500 m)である。本プロダクトから CDOM データ(以降、衛星 CDOM)を抽出して解析に使用した。解析期間における衛星 CDOM マップから、昨年度より開発している SSS-CDOM 推定式を用いて日本海沿岸域における SSS マップを作成・整備し、河川プリュームの動態解析に用いた。

応用力学研究所が保有する 2011 年~2017 年までの日本海沿岸域において収集された現場 塩分データを用いて、GOCI プロダクトの CDOM データから作成できる SSS マップを検証・ 修正した。河川出水の影響が大きい富山湾において SSS マップを作成して、富山湾沿岸海域 において形成される河川プリュームの動態解析した。

64
## 3. 結果と考察

石川県水産総合センターのご協力により、2017 年度は現場 CDOM と現場 SSS データの収 集を目的とした能登半島周辺海域における採水が実施できた(図1a)。本研究プロジェクト では、以前より大阪湾や紀伊水道において現場 CDOM や SSS を収集してきており、両者には 良好な負の相関関係があることが確認されている(図1bの青点)。能登半島周辺海域におい て得られたデータ(図1bの赤点)を同時に散布図に描くと、大阪湾・紀伊水道で得られた データと調和的であることがわかった。したがって、両者のデータを用いて CDOM から SSS の推定式を作成し、衛星 SSS マップを作成した。また整備された衛星 SSS マップは岸端(図 1a)において得られている海表面塩分時系列データとの比較後、SSS マップを修正した。

SSS マップを用いた富山湾および能登半島周辺海域における河川プリュームの解析結果の 一例として、図2に海色衛星プロダクトが比較的多く得られた 2015 年4月から9月の各月に おける月平均海表面塩分(SSS)マップを示す。いずれのマップにおいても、富山湾南岸におい て塩分が31から23程度まで低下する低塩分水がみられ、河川出水によるプリュームを示 している。富山湾には5つの一級河川(小矢部川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川)が流 入しており、大量の融雪出水により4月にプリュームが発達する。塩分31以下の低塩分水 が富山湾沖合に広範囲に分布している様子が捉えられている。4月は対馬暖流の湾内流入と ちょうど重なる時期であり、対馬暖流によってプリュームの一部が沖合へ輸送されているこ とを示唆している。今後は低塩分域の現場 SSS と現場 CDOM データを収集できるような観 測・採水を実施し、推定精度を向上させる計画である。



図1(a)現場 CDOM および現場 SSS データの収集サイト。(b)現場 CDOM と現場 SSS の散布図 (赤:能登半島周辺海域、青:大阪湾および紀伊水道)



図2 2015年4月から9月までの月平均海表面塩分(SSS)マップ。

研究体制

中田聡史(神戸大学) 代表者 千手智晴(九州大学) 所内世話人 広瀬直毅(九州大学) 研究協力者 原田浩太朗(石川県水産総合センター)共同研究者 波浪境界層中間 LES モデルの開発にむけた基礎データ取得のための風洞水槽実験 相木秀則 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

応用力学研究所・風洞水槽施設・利用日

2018年1月23日:計1日間 (担当:油布)

# はじめに

水深 10m から海上 100m までの領域(波浪境界層:図1)の素過程(波動力学・乱流 混合・物質輸送・大気海洋間フラックス)の考察を発展させるには、1 つの LES 数値モデ ルで気側と水側の流体運動を連続的に再現し、統合解析する事が重要である。しかし、従 来の土木・機械工学分野の LES では時空間スケールが小さすぎる。また従来の大気・海洋 分野の LES では水面波の位相変化を陽に解く事ができないという問題がある。そこで本研 究では、鉛直ストレッチ格子と水平 1m 程度の格子を使って、グリッドスケールの水面波 は位相変化も含めて陽に解き、サブグリッドスケールの水面波は従来型のエネルギースペ クトルモデルを使って統計的に解くという「波浪境界層についての新しい中間スケール解 法」を開拓する事を目指している。WAVEWATCH のようなエネルギースペクトルモデル には砕波によるエネルギー消散のバルク式が入っているが、何らかの方法で砕波の位相情 報を付加して中間 LES モデルを組み上げる必要がある(図2)。





-r'



図2:本研究で構築を目指している中間 LES モデルの目標スケールと構成要素

# 風洞水槽実験

前年度には、応力研・風洞付内部波水槽(全長17m)を用いて風速5~15m/sの範囲 において、100Hzの波高測定とビデオ撮影を行った。この結果を基礎データセットとして、 位相関係を詳細に解析できるようにアルゴリズム開発をおこなった。また本年度は海洋環 境シミュレーション水槽において実現可能な気中乱流測定の最新の手法について、兵庫県 立大学・高垣直尚助教の実験作業を見学した。

波浪境界層における物質輸送の動態を明らかにする研究の一環として、代表者は気中の シースプレーの粒径別個数の時系列を計測できるような測器の実用化を並行して目指して いる。この新しい測器の3軸加速度センサーに関する基礎データを取得するために、応力 研・海洋環境シミュレーション水槽(全長54m)を用いてプランジャー造波による不規則 波測定実験を前年度に行った。水面に浮かべた加速度センサー筐体を係留する実験と漂流 させる実験について、そのデータ比較を本年度行った。特にシースプレー測器の加速度セ ンサーが 10Hz であることをふまえて、測器を取り付けた浮体の軌道運動を再現するため のアルゴリズム開発を行った。

#### まとめと展望

巨視的な立場では代表者は、大気・海洋・波浪結合モデルの開発と応用研究を進め、台風のような顕著現象における海洋の役割の解明を目指している(相木他, 2015)。今後は 大気モデル側においてエアロゾル過程を本格的に導入し、雲物理の再現性との関係を調べ る研究が活発になることが予想される。そのために海洋性エアロゾルの生成と海面波浪環 境に関するバルク式を精微化する必要があり、風洞水槽実験は、現状の LES モデルでは再 現できない一連の素過程を理解する為に重要である。

本共同利用研究では、微視的な立場から、波浪境界層における渦・波・物質輸送の動態 のメカニズムの考察を発展させるための準備を行った。今後の展望としては、大気海洋間 フラックスのバルク式を高度化に関して、「風洞水槽実験」、「海上波浪観測」、「気液 連続 LES 数値実験」のような基礎研究の相互関係について、時代の変化に即した学際連携・ 分野開拓を目指す。風洞水槽実験を通じて、波浪境界層に関する実験教育・社会還元につ ながる応用研究のための基礎研究(例えば台風数値シミュレーションのための基礎データ 取得)を推進し、分野横断的な基盤整備・啓蒙活動にも貢献していきたい(相木、2018)。

#### 本共同利用研究に関する発表

相木秀則(名大)・根田昌典(京大)・田中潔(東大)・久島萌人(名大)・油布 圭(九 大),シースプレー測器による海上観測計画:海面砕波と海洋性エアロゾル生成の時空間 構造を捉える,JpGU-AGU 合同大会,M-IS15,2017 年 5 月 24 日

#### 参考文献

相木秀則ほか:大気海洋波浪結合モデルの開発と台風実験への応用,沿岸海洋研究,52, 139-148,2015

相木秀則, 海の波と渦と平均流-相互作用理論の背景と展望-, 日本気象学会・気象研究ノート, 235 号, 単著全 12 章, 全 175 頁, 2018 年 3 月 25 日発行

# インド亜大陸東北部における大気鉛直構造の解明

東京大学生産技術研究所 木口 雅司

#### 1. 研究の目的

アジアモンスーン域の一角であるインド亜大陸東北部は、世界最多降水量の記録を持つインド・メガ ラヤ州チェラプンジがあるシロン高地や、その世界最多降水量がもたらされるシロン高地からの雨が一 気に流下するメグナ川流域、チベット高原から下るガンジス川、ブラマプトラ川という巨大河川の河口 域に当たるバングラデシュ、そしてチベット高原から流下するブラマプトラ川の中流域にあたりアジア モンスーン域で最も早くから降水現象のあるインド・アッサム州を含み、多量の降水、世界的大河川の 集まる、地球水循環を考える上で重要な地域である。また、対流活動が活発であり、竜巻を引き起こす 小規模な積雲対流活動などの擾乱が成層圏に流入する水蒸気量に影響を与えている。そのため、研究対 象地域における大気鉛直構造の解明は重要である。

本研究では、高層ゾンデ観測や高高度の水蒸気測定が精度よく観測できる Snow White、全球雷デー タなどの観測データと総観気象場とを組み合わせた解析を実施し、研究対象地域における大気鉛直構造 の解明を目指す。

#### 2. 研究の手法

バングラデシュ気象局の高層気象観測やインド亜大陸北東部に展開されている官署の雨量観測デー タ、レーダ観測データなど地上観測データを用いて、プレモンスーン期とモンスーン期における擾乱現 象を捉え、積乱雲の存在の有無が分かる全球雷データ(WWLL、http://webflash.ess.washington.edu/)を 用いて、その要因が積乱雲によるものかどうかを判定する。2007年に集中高層気象観測で取得された 6 時間データや通常用いられているゾンデより上層の湿度測定が可能である Snow White を用いて取得さ れた水蒸気データ、衛星データ(EOS MLS, AIRS 等)を用いて、プレモンスーン期とモンスーン期の擾 乱現象が発現しているときとそうでないときの詳細な大気鉛直構造を明らかにする。さらに、擾乱現象 が発現しているときとそうでないときの総観気象場を、NCEP/NCAR や ERA40、JRA55を用いて示 し、その大気鉛直構造がどのように形成されるのかを解明する。

昨年度は研究目的に必要な観測データの収集・整理を行い、主に全球雷データ等を用いた解析を進め 月平均スケールの大気場の描像を明らかにしたので、今年度は収集・整理したデータを用いてより詳細 な大気場の時空間変動に着目し、小規模な積雲対流活動に関連する現象の解明を進めた。

# 3. 結果

今年度新たに入手した 2007 年の全球雷データを用いて、本研究対象領域を含む南アジア域の雷発生数と対流活動(OLR)の分布をプレモンスーン期(3~5月)とモンスーン期(6~9月)において調べた(図1)。 昨年度報告した結果(2008~2013年)と同様に、プレモンスーン期では落雷数が多く見られ、対流活動 (OLR)が活発であるモンスーン期では落雷数が少ない。

次に、2007年に実施したプレモンスーン期とモンスーン期の集中観測データ等を用いた解析結果を 示す。プレモンスーン期では(図2)、対流活発期(4月20~27日、5月6~14日)と対流不活発期(4月28日~5月5日)に分けられ、対流活発期には下層で南西風、上層でトラフ前面による西~南西風が卓越し ている。一方、対流不活発期には上層で北西風が卓越し、下層では南風が弱まる。これは、上層のトラ フが西から東へ通過していることを示しており、中緯度偏西風帯の影響を強く受けていることが分かっ た。高度1km付近の相当温位が対流活発期に高くなっており、水蒸気量、相対湿度とも上昇している。 また南西風が卓越しており、ベンガル湾から湿った空気が流入している。この結果、潜在(対流)不安定 が強化されている。このことは、既存文献の統計的解析と一致する。以上の結果から、対流圏上層のト ラフの接近によってトラフ前面での上昇流の強化と対流圏下層での南西風の強化によって、擾乱が発達 したと考えられる。

一方モンスーン期のバングラデシュ北東部で、降水量の季節内変動が見られ、可降水量と落雷数と良い相関がみられた。プレモンスーン期と同様に、ブレーク期(7月1~15日)に落雷数が多くアクティブ期(7月16~31日)に少なかった。アクティブ期の中でもさらに強い降水帯の周期(約1週間)が見られ、 落雷数も多い(図3)。

#### 4. まとめ

今年度は、収集・整理したデータを用いてより詳細な大気場の時空間変動に着目し、小規模な積雲対 流活動に関連する現象を明らかにした。2007年における月データでの解析でプレモンスーン期とモン スーン期の違いを示し、さらにプレモンスーン期の対流活発期と対流不活発期における落雷数と被害を もたらす激しい擾乱の関係を明らかにした。また、モンスーン期の季節内変動やアクティブ期の中での 雨量の強弱との関係も明らかにした。

今後の課題として、他の年における対流不安定性と物質輸送の観点にたった解析が望まれる。

# 5. 研究組織

研究代表者	木口 雅司
研究協力者	江口 菜穂
研究協力者	村田 文絵
研究協力者	林 泰一

東京大学生産技術研究所 特任准教授 九州大学応用力学研究所 助教 高知大学理工学部 講師 京都大学東南アジア地域研究研究所 連携教授









図1:2007年の(上)5月と(下)7

Jun Ju Month

1000

Jul Aug Sep Oct

1500

2000

lightning count#, lon:85-95E: 2007

30

27

25 Latitude

22

20

17

15

Mar Apr May

500

月における(左)雷発生数、(真ん 中)OLR 分布、(右)雷発生数の 緯度時間断面図。







図 3:2007 年 7 月のバングラデシュ北東部 (24.9~25.4N、91.6~92.1E)の領域平均雨量 (左上)、2 観測地点での可降水量(右上)。領域 内の落雷数の時系列(左下、赤×はシレット周 辺。数が少ないので100倍している)。

# 領域海洋モデルによる GNSS-R 技術の海洋観測への応用の高度化

東京大学 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻 小平翼

# 要旨

相模湾は漁業、海洋レジャー等の人間活動の活発な海域であり、平塚海洋観測棟を用いた会 場観測が可能という特徴を持つ。平塚海洋観測棟では GNSS-R 技術を用いた海面高度、海上 風速等の物理量の観測の試みが行われており(GROWTH プロジェクト)、GNSS-R 技術は常 時全球モニタリングシステムへと発展する可能性を秘めている。そこで、観測条件の詳細な把 握に貢献するために相模湾における流況特性を解析した。用いたデータは主に海上保安庁が保 守・運営する海洋短波レーダーであり、係留ブイとの比較を通じて同短波レーダーの利用手法 を精査した。現在、観測結果を踏まえて、領域海洋モデルを構築中である。

1. 序論

相模湾は南北方向に約 60km、東西方向に約 55km の大きさを持地、南部の湾口から北太平洋に 面している。その為、湾の流況は黒潮からの影響を強く受けると考えられる。また、既存研究では 高潮に関する研究が行われており、その予測は定置網被害の低減に重要である。相模湾内には平塚 海洋観測棟が存在し、GNSS-R 技術に着目する GROWTH プロジェクトを始めとして、科学研究 に活用されている。本研究では、相模湾の中でも平塚海洋観測棟の位置する比較的沿岸に近い海域 を対象として、短波レーダーと係留部位の観測結果から、その流況特性を考察し、GNSS-R 技術の 海洋観測への応用に貢献することを目標とする。

短波レーダーを用いた既存研究には日向ら(2003)の研究があるが、対象領域は平塚・江ノ島等の 沿岸部から離れているため、平塚海洋観測棟付近の流動場の特性については明らかになっていない。 一方、2017 年 11 月 1 日から 12 月 18 日にかけて、江ノ島付近、水深 45m 地点において係留ブイ による ADCP 観測が実施された。現在、海上保安庁が保守・運営する短波レーダーは日向ら(2003) の研究で用いた短波レーダーとは異なるものであり、平塚・江ノ島付近の沿岸部も含まれている。 そこで、本研究では短波レーダーのデータを ADCP 観測結果と比較することで、その利用可能性 と活用手法について考察する。

2. 手法

伊豆大島と三浦半島荒埼には海上保安庁が設置した海洋短波レーダー(24MHz)が存在している。観測は1時間毎に行われ、取得したデータは空間分解能1.5kmの格子点に内挿され、インター ネットを通じて公開されている。



Fig 1 欠損率 10%以下の HF レーダのデータ点(左)と 係留された ADCP 観測ブイ(右、手前) HF レーダーは海面付近の流速に限定されるが、面的に流速データを取得できる貴重な海洋観測 手法であり、活用できれば相模湾内の流れの理解に大きく貢献する。しかしながら、データの品質 管理は行われていない。そこで、別途観測されていた係留 ADCP ブイによるデータと比較するこ とで HF レーダーの精度についての検討を行った。

# 3. 結果

レーダーの流速データの分布を正規分布と仮定して、2σ区間外のデータを除去した。さらに25時間の移動平均をかけたところ、東西流速の時系列に関してレーダとブイデータとの間に高い相関 (0.83)が得られた。そのため、日変動よりも短い変動の情報は失われるが、25時間移動平均を行 うことによって相模湾における短波レーダーは湾内の流動場を把握するのに有用なデータセット であることが確認できた。



Fig 2 品質管理前(上)と品質管理後(下)のレーダとブイの東西流速観測時系列の比較

4. 考察と今後の研究

レーダは品質管理を施せば有用なデータセットであることは確認できたが、観測された数日周期 変動の原因は未解明のままである。今後、平塚観測棟等で観測された風データなどを通じて大気の 変動との関係性を考察する。また、現状の品質管理の方法に添えば、特徴的な現象として知られる 急潮などをノイズとして認識してしまう。そのため、2σ区間外のデータ以外に異常値が発言する 際の一貫したデータの特徴を把握することなどで突発的な大きな流速も解析できるようにするこ とが考えられる。

最後に、領域モデルの構築であるが、既に海洋モデルを駆動するのに必要な大気強制(気象庁 MSM)、潮汐強制(TPXO8)、海洋の初期値・境界値(JCOPE2)は準備されている。利用するモ デルは MITgcm あるいは NEMO を検討しているが、HF レーダーの同化に関して先行研究が散見 される ROMS の利用も視野に入れ、総合的に相模湾の海況を把握することで、GNSS-R 技術の海 洋観測への応用の高度化に貢献したいと考えている。

# 共同利用研究集会

# 海洋力学理論の研究会

# Workshop on theoretical physical oceanography

研究代表者 北海道大学低温科学研究所 三寺史夫

# 研究集会の目的

海洋力学はこれまで地球流体力学を中心に発展してきた。しかし海盆スケールの海洋循環場の理論が整 理・理解が進んでいくに連れ、近年の海洋力学はより沿岸スケールとの相互作用、高解像で起きている 乱流・波との相互作用、大気との相互作用、そして生態系・土砂との相互作用、と一つの理論体系では 閉じることの出来ない現象への発展が急速に進みつつある。これまでとは違う研究手法・理論展開が必 要となっている一方、個々人で多岐にわたる理論体系の発展の動向・新展開を全て把握することは困難 であり、その理論体系の汎用性・特異性に対する議論が不足している。そこで当研究集会では、様々な 分野との相互作用を理論的に進めている研究者が集まり、それぞれの研究者が進めている理論体系や高 解像度モデル・大気海洋結合モデル・観測データを用いた解析手法を幅広く議論し、新しい海洋力学の 理論体系の構築を目指す。

# 研究集会の概要

研究集会名:海洋力学理論の研究会 日時:平成29年6月6日(火)9:00-17:00 場所:九州大学応用力学研究所W501

これまでの歴史的変遷とともに未解決なまま宿題となっている海洋力学の課題についての考察を、参加 者の一人に具体例を示してもらい全体で討論しながら議論を進めていくという形で研究集会を開催し た。研究成果そのものに焦点をしぼらず、研究テーマの発展軸、位置づけを俯瞰的な視点から議論した。 今回は、海盆スケールで起きる海洋の循環メカニズムに関する数値モデル・観測・理論の発展について、 北太平洋を中心に大気と海洋間の力学過程についての考察、そして海洋の素過程を検証する数値・観測・ 理論的ツールについて、と3つのテーマを中心にプログラムを構成した。それぞれの具体例として、ま ず東岸流・10年規模変動・熱塩循環が選ばれた。その後、海洋波・渦へと話題を移し、議論が進んだ。 多岐にわたるテーマが対象となったものの、1トピックにつき1時間近く時間をかけたことにより参加 者間で疑問点を共有することができ、有意義な研究集会となった。

# 出席者

14名(参加者名簿参照)

## 議論テーマとその概要

9:00-9:30 趣旨説明

三寺史夫(北海道大学)·木田新一郎(九州大学)

学会発表とは異なり一つのテーマを十分な時間をかけて議論することで、今後の研究テーマの芽を作 り出すことを目的として海洋力学理論の研究会を本年度より開始したことを確認した。お互いの専門 を持ち寄り、成果としてまだ結実していない研究テーマを紹介しながら議論を進めていくこととし た。

9:30-10:20 Leeuwin Current と海底地形の役割・鉛直構造についての考察

話題提供:古恵亮 (JAMSTEC)

Discussion のリード:勝又勝郎 (JAMSTEC)

東岸はロスビー波の出発点として役割があり海洋内部循環にとっても重要である一方、その形成要因 として大陸棚と JEBAR の役割が未解決である。オーストラリア西岸の Leeuwin Current に着目し、そ の Barotropic・Baroclinic 構造を決める主要なメカニズムを議論した。Adiabatic な過程の役割が提 示されるなか、Bottom Boundary・数値モデルから想定される過程の役割も指摘された。

10:20-10:30 休憩

10:30-12:00 海洋循環におけるエネルギーバランスについての考察

話題のリード:浦川昇吾(気象研)

Discussion のリード: 三寺史夫(北海道大学)

熱塩循環を理解する一つの側面としてエネルギーバランスがあり、海洋大循環モデルを用いて検証が 進んでいる。一方、Available Potential Energyの定義の不明瞭な点があることが指摘され、その解 決手法について議論が進んだ。また Gravitational Potential Energy を用いる有効性が提示され、 Cabbelingのエネルギーとしての側面も討論した。

12:00-13:00 休憩

13:00-13:50 海洋力学の理論ツールについて

話題のリード:大貫陽平(九州大学)

Discussion のリード: 古恵亮 (JAMSTEC)

海洋分野において時空間的にゆるやかに変動する場における波動現象を見通しよく扱うツールとして 物理学分野で使用されている Wigner 変換を用いた手法が提案された。線形 Shallow water equation をベースに、慣性重力波とロスビー波、とその群速度が導出されることを示し、その有効性が示唆さ れた。海洋分野において用いられてきた手法との違いや新手法ならではの有効性が議論され、他分野 における動向も紹介された。

13:50-14:00 休憩
14:00:14:50 北太平洋を中心に大気と海洋間の力学過程についての考察
話題提供:田口文明(東京大学)
Discussionのリード:木田新一郎(九州大学)

Pacific Decadal Oscillationのメカニズムについて過去の研究をレビューしながら、Kuroshio Oyashio Extention(KOE)が果たす役割について幾つかの仮説が示された。また KOE の変動場がどの ように海盆内部へと伝わるのか、Spiciness を用いた議論手法も紹介があり、これまでの亜熱帯域の大 気海洋相互作用に加え亜寒帯域で考えうる相互作用について議論が進んだ。

14:50-15:00 休憩

15:00-15:50 海洋波についての考察・大気との比較

話題提供:相木秀則(名古屋大学)

Discussion のリード: 松村義正 (東京大学)

地球流体力学についての歴史的役割についての議論、そして大気・惑星・海洋における力学屋の視点の 違いなどが紹介された。これまでの海洋波に関する知見を整理しつつ、大気分野で用いられているよう に、近い将来海洋分野においても活用できる波・エネルギーの解析手法について提案があった。

15:50-16:00 休憩

16:00-16:50 渦度方程式の3次元的考察

話題提供:浮田甚郎(新潟大学)

Discussion のリード: 大貫陽平 (九州大学)

竜巻の発生やLangmuir 循環といった大気海洋の比較的小スケールの現象には、渦管の tilting process が重要な役割を演じている。大気科学の立場から、渦度方程式に含まれる3次元速度勾配テンソルの分 解とその幾何学的考察を通じて tilting メカニズムの物理解釈について提案がなされ、海洋現象におけ る同種の問題への適用可能性が議論された。

16:50-17:00 閉会挨拶

木田新一郎(九州大学)

時空間スケールが多岐にわたるテーマを扱った結果、テーマ毎に発展が進んだ検証方法・視点も様々な ものを扱うこととなった。それぞれを理解するためには十分な時間の確保が必要となったが、ディスカ ッションを進めたことで議論を深めることができた。これまで蓄積された地球流体力学を中心とした理 論体系に若手から出てくる新しい発想・視点を組み込みつつ海洋力学全体の活性化に繋げていきたい。 来年度も、新たなトピックを議論する場として九大・応力研の研究集会を申請することとなった。

# 発表論文および学会発表

無し

# 研究組織

研究代表者

三寺 史夫(北海道大学・低温科学研究所・教授)

# 研究協力者

浮田 甚郎 (新潟大学・自然科学系・教授)

- 田口 文明(東京大学・先端科学技術研究センター・特任准教授)
- 古恵 亮(海洋研究開発機構·主任研究員)
- 勝又 勝郎(海洋研究開発機構・主任研究員)
- 相木 秀則(名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授)
- 吉川 裕(京都大学・理学部・准教授)
- 長井 健容(東京海洋大学・学術研究院海洋環境学部門)
- 松村 義正 (東京大学・大気海洋研究所・助教)
- 浦川 昇吾 (気象庁気象研究所・海洋・地球化学研究部・研究官)

所内世話人

木田 新一郎 (九州大学・応用力学研究所)

# 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。

# 2. 開催概要

開催日時:	2017年12月5日(火) 午後(14:30~17:30)
	6日(水) 午前(10:00~12:15)
開催場所:	九州大学 応用力学研究所西棟6階 多目的研究交流室(W601号室)
参加者:	5日34名
	6日 38名

# 3. 発表概要

研究集会では8件の研究発表が行われた。

1日目の挨拶と趣旨説明の後4講演あり、NICT沖縄センターの杉谷から、愛媛大沿岸環境セン ターの森本を中心に進めてきた対馬および山口県相島に設置した遠距離海洋レーダ観測において、 海上の船舶からのビーコン電波を用いてアレイアンテナ特性を計測した結果が報告された。本来、 各チャネルについては、方位によって位相・振幅が変動することはないはずであるが、方位に応じ て変化していることが分かり、地物からのマルチパスの影響が示唆されアレイアンテナでの素子ア ンテナ校正に対して注意が必要なことを示した。次に、琉球大学の渡久地らが、国交省中部地方整 備局が伊勢湾に設置した CODAR/SeaSonde レーダの受信データと津波シミュレーションの結果と の比較を行った。その結果、海洋レーダの視線方向流速と、津波により励起された湾内副振動のう ち 60~90 分のモードについては良い一致を示したのに対し、短周期の 30~40 分のモードは再現 できなかった。今後シミュレーションのパラメータの調整に加え伊勢湾内の他のレーダや三河湾の レーダとの比較も有用であろう。宮崎県水産試験場の渡慶次らは、日向灘観測のためのレーダ配備 計画について、その目的と必要性を述べ、導入スケジュールを解説した。この整備に先立って実施 されている琉球大学のレーダを用いた試験観測についても触れ、ブイとの比較、流速解析などから その有用性を示した。JAMSTEC むつ研究所の渡邊らは、昨年に引き続き、津軽海峡東部海域観測 用に設置した海洋レーダの運用状況について報告した。係留した電磁流速計との比較から、南北成 分、東西成分共に海洋レーダの流速が小さいことを示し、大畑局の観測流速の相関が低いという前 回の結果に符合することを示した。

1日目の最後に情報交換の時間を持ち、琉球大学の藤井が、海洋レーダに関する最近の話題として、プロジェクトや免許更新の時期を迎え国内の設置台数がやや減少方向であることを報告するとともに、無線局免許の課題として各地方総合通信局での対応に関する情報を参加者と共有した。また、第4回 ORCA(Ocean Radar Conference for Asia-Pacific)を2018年6月2~4日に沖縄県那覇市での開催が決定したことを紹介し、海洋レーダ関係者の参加と協力を促した。

2日目は4件の研究発表があった。琉球大学の久木は、海洋レーダのスペクトルの一次散乱から 得られる風向を用いて海上風速の補正方法について述べ、風向によって吹走距離が変化する沿岸域 での波浪推算に有効であることを示した。東京理科大の片岡は、浅海域での面的な波浪計測のため に海洋レーダを用いることを提唱し、伊勢湾に設置の国交省緒の海洋レーダを対象にシミュレーシ ョン実験を行った。2台のレーダのビーム交差角の影響を定量的に示したことから、今後実データ への適用が期待される。電力中央研究所の坪野は、若狭湾東部海域についての数値モデル構築に際 して、その結果とVHF海洋レーダで観測された流速データとを比較した。互いの流速値は高い相 関を持ち、EOF 第一成分は良い一致を見た。今後、湾内流動場と対馬海流との関係を明らかする ツールとして有用であろう。JAMSTECの田中らは、東北沿岸から津軽海峡にかけての数値モデル の構築にあたり、津軽海峡の海洋レーダで観測された流速パターンと比較するとともに、海洋レー ダのデータ同化への期待を述べ、その課題について言及した。

最後に、総合討論の時間を持ち、今回の研究集会での議論を総括し、来年度も研究集会を開催することとなった。また、昨日の情報交換でも述べられた、第4回ORCAの日本開催に向けて関係者が協力することが表明された。

# 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: 2017年12月5日(火)午後~6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5日(火)

14:30-14:35 あいさつ・趣旨説明 藤井智史(琉球大)

14:35-15:05 9MHz ビーコン局を用いたアンテナ特性の測定結果 雨谷純、杉谷茂夫(NICT)、森本昭彦(愛媛大)、岩井宏徳(NICT)、藤井智史(琉 球大)、滝川哲太郎(長崎大)、市川香(九州大)、久島萌人(名古屋大)

- 15:05-15:35 津波シミュレーションを用いた海洋レーダによる伊勢湾での津波観測の検証 渡久地優、藤井智史(琉球大)、日向博文(愛媛大)
- 15:35-16:05 水産業への活用を想定した宮崎県の海洋レーダ導入計画について 渡慶次力(宮崎水試)、藤井智史、大城弘貴、池原日向(琉球大)
- 16:05-16:35 津軽海峡東部の海洋短波レーダーデータと流向流速計係留データの比較(その2) 佐々木建一、山本秀樹(JAMSTEC むつ)、橋向高幸(マリンワークス)、脇田昌英、 高田信、渡邉修一(JAMSTEC むつ)
- 16:35-17:15 情報交換

12月5日(火)

- 10:00-10:30海洋レーダによる沿岸海上風補正<br/>久木幸治(琉球大)
- 10:30-11:00 伊勢湾における海洋レーダに基づく面的波浪観測と検証片岡智哉(東京理科大)
- 11:00-11:30 若狭湾東部の海洋レーダで得られた流速の数値モデルによる再現性 坪野考樹(電中研)
- 11:30-12:00東北沿岸・津軽海峡における高解像度モデリング<br/>田中祐介、石川洋一 (JAMSTEC)
- 12:00-12:15 総合討論

# 研究成果報告書

日本海及び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

平成 29 年 12 月 6 日 (水) -7 日 (木) 九州大学応用力学研究所 「日本海及び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

研究代表者:万田敦昌(三重大学)

2017年12月6日から7日にかけて、九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所東アジア海洋 大気環境研究センターにおいて、「日本海及び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。今回は、大学および試験研究機関を中心に45名が参加し、合計 15件の講演があった(講演内容は下記プログラム参照)。非常に活発な議論が行われ、時には講 演時間を超過することもあった。

例年に違わず、日本海及び日本周辺海域に関する最新のモニタリング結果と数多くの斬新な研 究成果が発表され、講演者だけでなく参加者全員にとって有意義な会合となった。それに加え今 回は、海況モニタリングに関する講演だけでなく、数値シミュレーションやデータ同化といった、 モニタリング結果を活用する側の講演も行われたことにより、データの相互比較やデータの有効 利用といった観点からも非常に活発な議論が交わされ、参加者の情報交換・交流といった観点か らも実り多い会合となった。

今後とも、観測データに基づいたモニタリングやモニタリング結果を活用した様々な手法によ り、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になることを 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 るにあたりお世話いただいた東アジア海洋大気環境研究センターの広瀬直毅教授をはじめとす る関係各位に深甚なる謝意を表する。 日本海及び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

# [日 時]

2016年12月6日(水) ~ 12月7日(木)

[場 所]

九州大学応用力学研究所 6 階多目的交流室(W601)

[研究代表者]

万田 敦昌 (三重大学)

[所内世話人]

広瀬 直毅(九州大学)

# プログラム

12月6日(水) 13:20~13:30 趣旨説明

**13:30** ~ **13:50** 宮崎県における漁海況調査の現状と今後 渡慶次力(宮崎県水産試験場)

13:50~ 14:10 沿岸漁業のスマート化に関する福岡県の取り組み 池浦繁・秋本恒基(福岡県水産海洋技術センター)・広瀬直毅(九大応力研)

14:10~14:30 対馬海峡に達する栄養塩の起源

高山勝巳・広瀬直毅(九大応力研)

休憩

14:45~15:05 山陰沖における動物プランクトン分布とカタクチイワシ卵・仔魚の輸送経路-海況同化モデルの流動場を用いた粒子追跡実験-

宮城みき(長崎大水産),滝川哲太郎(長崎大院水産・環境),小針統(鹿大水産),渡辺俊 輝(山口水研セ),広瀬直毅(九大応力研),鎌野忠,秦一浩(水研機構水大校),山田東也 (水研機構西水研)

15:05~15:25 山口県山陰沿岸定線 ADCP 往復観測データを用いた潮流調和定数の推定 都倉雄太(長崎大水産),滝川哲太郎(長崎大院水産・環境),森本昭彦(愛媛大沿岸セ), 鎌野忠,秦一浩(水研機構水大校)

**15:25~15:45** 2016-2017 年に観測された富山湾の流動変動 福留研一(富山高専)・千葉元(富山高専)

休憩

16:00~16:20 解像度 2km 日本沿岸モデルを用いた沿岸滞留時間の推定 坂本圭、辻野博之、中野英之、浦川昇吾、豊田隆寛、山中吾郎(気象研究所 海洋・地球化 学研究部)

16:20~16:40 潮流が励起する不安定による河川プリュームの制御機構 岩中祐一・磯辺篤彦(九大応力研)

16:40~17:00 日本海盆北東部から大和海盆における日本海固有水の溶存酸素量の近年の 顕著な減少

中野俊也・笹野大輔・北川隆洋・永井直樹・北村佳照(気象庁)・青山道夫(RCGC/JAMSTEC, IER/福島大)

懇親会

12月7日(木)

9:40~10:00 台風による対馬海峡での高潮位イベントに起因する日本海の数日周期変動 伊藤雅・井桁庸介 (水研機構日水研) **10:00~10:20** Estimation of ocean thermal energy potential in the Aguni Basin 劉天然(九州大学 応用力学研究所),広瀬直毅(九州大学応用力学研究所)

10:20~10:40 風洞水槽における1次と2次循環流の規則波に対する応答-(a) 順風と(b) 逆風のケースにおける流速の応答-水野 信二郎(応力研元教員)

休憩

10:50~11:10 冬季の日本海と温帯低気圧間における sub-weekly scale の相互作用 趙寧・磯辺篤彦(九大応力研)

11:10~11:30 日本周辺海域を含む北太平洋の波浪推算とブイデータ比較 久木幸治(琉球大学理学部)

11:30~11:50 LGM 以降の津軽海峡からの親潮流入に起因する日本海混合期の形成について 磯辺篤彦(九大・応力研)

11:50~12:20 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

国立環境研究所 森野悠

## 1. 目的

応用力学研究所の大気環境モデリング研究グループは、世界的に見てもアクテイブに研究を進める 研究グループの一つであり、モデル研究と平行して、3波長のレーザーレーダーを導入して黄砂と大 気汚染粒子の同時計測を開始している。福岡は特にアジア起源の黄砂・大気汚染の影響が深刻な地域 であり、応力研グループによる数値モデルと観測データを統合した解析や、多波長データ同化による 黄砂の粒径分布の推定は、未だ十分に明らかにされていない大気中黄砂やエアロゾルの物理特性に関 する科学的ブレークスルーをもたらすとして、国内外から大きく期待されている.応力研以外の研究 グループにより推し進められている最前線の知見を、アジア域の化学輸送モデル研究のコミュニティ で共有すると共に、各分野がリンクし新たなブレークスルーを生む機会を設けることは、アジア域の 化学輸送モデル研究の推進やモデルの精緻化にとって非常に重要である.

#### 2. 研究集会の概要

場所 九州大学応用力学研究所 W601多目的研究交流室 日時 平成29年12月1日 13:30-18:00、 2日9:00-12:00

#### 3. 研究成果

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、16題の講演発表があった。関係者を含めると35名の参加があった。2日間の研究集会の 内容としては、「モデル研究と連携する野外観測」、「大気汚染質の排出量の推計とソースリセプター解 析」、「領域化学輸送モデルを用いた越境大気汚染の現状と問題点」、「データ同化モデルを用いた PM2.5 と AOD の研究の進展」、「今後の大気観測とモデリングの展望」などの最新の成果の報告され、本研究 会が化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングのコミュニテイにおいて大きな貢献を果たしていく ことが確認された

以下に研究集会のプログラムを掲載する。

#### 資料1

「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」 場所 九州大学応用力学研究所 W601多目的研究交流室 日時 平成29年12月1日 13:30-18:00、 2日9:00-12:00

# プログラム

#### 12月1日

- 13:40 茶谷 聡(国立環境研究所) 2013 年夏のオゾン濃度再現性と感度解析
- 14:05 永島 達也(国立環境研究所) 東アジアの地表オゾン濃度再現性に関するモデル間相互比較: MICS Asia IIIの初期結果
- 14:30 山地 一代(神戸大学) モデル間相互比較研究(J-stream)における粒子状物質の再現性について
- 14:55 櫻井 達也(明星大学)二次粒子生成に対する NH<sub>3</sub>排出構造の不確実性評価
- 15:10 堀江 洋佑(公財 ひょうご環境創造協会)兵庫県における大気質予報モデルの取組について +II型モデルGの紹介

15:35-15:50 休憩

- 15:50 浦西 克維(大阪大学/奈良県くらし創造部景観・環境局)大気質モデルを用いた 2010 年度の 日本における硝酸塩濃度に対する発生源寄与解析
- 16:15 森川 多津子(日本自動車研究所) 2015 年の PM2.5 濃度の低下と気象要因の影響について
- 16:40 鵜野 伊津志(九州大学応用力学研究所) 速報「PM2.5 越境問題は終焉に向かっているのか?」 は本当にそうなるか?
- 17:05 森野 悠(国立環境研究所) 大気シミュレーションによる凝縮性ダストの寄与評価 17:30 猪股弥生(金沢大学)北東アジアにおける 1-ニトロピレン二次生成量評価

#### 2 日午前

- 9:00 原 正之(埼玉県環環境科学国際センター) 総観規模気象場の分類の自動化について
- 9:25 早崎 将光(日本自動車研究所) 数値モデル比較用の格子点化 PM2.5 測定値
- 9:50 王 哲(九州大学応用力学研究所) Importance of dust and sea salt heterogeneous reactions on nitrate deposition over East Asia

10:15-10:30 休憩

- 10:30 北山 響、森野 悠(国立環境研究所) 福島原発からの放射性セシウム輸送沈着過程における モデル相互比較
- 10:55 弓本桂也(九州大学応用力学研究所) 「エアロゾル版再解析プロダクト The Japanese Reanalysis for Aerosol (JRAero)」
- 11:20 常松 展充(東京都環境科学研究所) WRF-CMAQ による気候変化シミュレーション等について

11:45-12:00 議論

# 海洋・海岸における波動の解析モデルの応用

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

申請者らは、平成20年度より、九州大学応用力学研究所の共同利用研究として、内部波を含 む海洋波動の非線形問題に関して継続して研究を行なってきた.この成果を踏まえ、様々な視 点から海洋・海岸における波動問題に関する研究を行なっている研究者らとともに、平成27 年度及び平成28年度に、応用力学研究所共同利用研究集会を開催した.その際、質疑応答が大 変活発に行なわれ、本研究集会の重要性が、参加者によって強く認識された.そこで、波動モ デルに関する最新の研究成果を踏まえ、それぞれの波動現象に対して個別に開発されてきたモ デルが有する、利点や問題点といった情報を改めて共有することを目的として、平成29年度に、 応用力学研究所共同利用研究集会を開催した.本研究集会による成果は、申請者らの今後の応 用力学研究所の共同利用研究に活かされるのみならず、海洋学並びに海岸工学の両者の分野に おいて、様々な波動問題に活用されるモデル開発のための重要な基礎資料になると考えられる.

本研究組織は、本研究集会を経て有機的に連携し、それぞれのモデルが持つ利点や問題点を 整理し、一つの統合的なモデルの開発を目指している.そのために、本研究集会では、海洋波 動及び海岸波動の研究者のみならず、多相流体を含む様々な流体を対象とした数値モデルの開 発者や、実験的に研究を進める研究者、そして、応用物理学者並びに数学者をその参加者に迎 え入れ、多様な角度から流体の波動問題に関して議論した.また、懇親会のみならず、宿泊形 式も取り入れ、忌憚のない詳細な議論も行なうことができた.

本研究集会は、海洋・海岸における波動をとりまく多彩な分野の研究者が、互いの情報を交換し、個々の研究の最前線やその拡がりを理解することで問題意識を共有するとともに、従来のモデルを俯瞰し、更なる発展や展開のためのアイディアを生み出す場となっている.

#### 研究集会の内容

本研究集会は、2017年12月16日(土)午後~17日(日)午前に、九州大学応用力学研究所 の多目的交流室(W601)において開催された.なお、研究集会参加者の主メンバが土木学会海 岸工学委員会波動モデル研究小委員会委員であったため、主催を土木学会海岸工学委員会とし た.ただし、本委員のメンバは、九州大学応用力学研究所、大阪市立大学及び慶應義塾大学の、 物理学、応用数学、並びに、数学の研究者を含んでおり、九州大学応用力学研究所で開催する に相応しい研究集会となった.すべての発表に対して、質疑応答が活発になされた.座長は、 研究代表者が務めた.

まず,第1日の第1セッションにおいて,波動のシミュレーションに関する2件の口頭発表 及び質疑応答が行なわれた.すなわち,波動モデルによる航走波の造波手法の検討に関する発 表,そして,非構造デカルト格子シミュレータを用いた都市沿岸域への津波伝播解析に関する 発表がなされた.

次に,第2セッションでは,波動の解析法に焦点が当てられ,2件の口頭発表及び質疑応答 が行なわれた.すなわち,SWE-SPH法による海洋波と沿岸構造物の相互作用と,カオスの決定 論的描像のためのストレンジアトラクタの解析的表現に関して発表された.

第3セッションは、波動をとりまく沿岸環境を話題とする2件のロ頭発表及び質疑応答が行 なわれた.すなわち、萩市菊が浜における気候変動の影響を考慮した汀線変化と、内湾浅海域 における懸濁物質濃度の応答特性に関する発表が行なわれた. 第1日には,懇親会が開催され,水の波や,流体運動に関する様々な対象をとりあげてきた 理学・工学分野の研究者間で,忌憚のない議論が行なわれ,宿泊先において,更に詳細な議論 が展開された.

そして, 第2日の第4セッションでは, 非線形長波の解析に関して議論された. まず, 有明 海の共振潮汐の非線形性に関する発表があり, これは, 諫早湾潮受け堤防の水門問題とも関連 するテーマであり, 長周期波のみならず, 社会的問題に関する質疑応答も活発に行なわれた. 次に, KdV-Burgers 方程式の格子ボルツマン法による数値計算に関する口頭発表及び質疑応答が 行なわれた.

更に,第5セッションでは,多層と波動と銘打って,2件の口頭発表及び質疑応答があった. すなわち,地形上を伝播する内部波の数値解析と,多層波動方程式の固有モードによるグリー ン関数と散乱問題への適用に関する研究成果が論じられた.

以上の発表内容の概要を含む、本研究集会のプログラムを以下に示す.

# 九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会

# 「海洋・海岸における波動の解析モデルの応用」

- 日 時 2017年12月16日(土)~17日(日)
- 場 所 九州大学応用力学研究所 多目的交流室(W601)
- 主 催 土木学会海岸工学委員会

# 2017年12月16日(土)

開会挨拶(13:00~13:10)

柿沼太郎(土木学会海岸工学委員会波動モデル研究小委員会委員長)

# 第1セッション -波動のシミュレーション-

「波動モデルによる航走波の造波手法に関する検討」(13:10~13:45)

平山克也(港湾空港技術研究所・海洋研究領域)

高度に利用された港湾の静穏度をより的確に把握するために,海岸工学分野で提案された従 来の造波モデルを参考としてより汎用性の高い航走波造波手法を開発し,港内波浪変形計算に 多用されるブシネスクモデルへ導入した.本発表では,この概要と計算精度について議論する とともに,独自に実施した造波実験の様子を紹介する.

「非構造デカルト格子シミュレーターを用いた都市沿岸域への津波伝播解析」(13:45~14:20)

新谷哲也(首都大学東京·都市環境学部)

埋立地や運河等で複雑な地形を有する都市沿岸域において津波の伝播解析を効率良く実行す るために,非構造デカルト格子に基づく数値シミュレーターを津波解析に適用した.都市沿岸 域の複雑地形は,計算格子を局所的に高解像度化することで再現した.過去の津波を再現した 計算結果は,既往の研究と良好な一致を示した.

## 第2セッション -波動の解析法-

「SWE-SPH 法による海洋波と沿岸構造物の相互作用に関する研究」(14:30~15:05)

陸田秀実(広島大学大学院·工学研究院)

本研究では、SWE-SPH 法を用いて,浅水波方程式を粒子法で離散化し,海洋波の伝播,複雑 地形における波の遡上,海洋構造物との相互作用問題に適用した.まず始めに,甚大な被害が あったアチェ域の津波氾濫シミュレーションを行い調査結果と概ね良い一致を示した.次いで, 複数の洋上風力発電ファームと不規則波の相互作用に適用した.

「ストレンジアトラクターの解析的表現-カオスの決定論的描像-」(15:05~15:40)

松岡千博(大阪市立大学大学院・工学研究科)

ナヴィエ・ストークス方程式から空間変化を取り去って力学系とし、さらにそれを離散化し た式にエノン写像と呼ばれるものがあり、乱流の解析に用いられてきた.この写像の解集合は エノンアトラクターと呼ばれるストレンジ(カオス)アトラクターを持つことで知られている. このストレンジアトラクターは微分できないフラクタル集合だが、本研究でこれを記述できる ような整関数を見出した.この関数を用いると、エノンアトラクターが精密に復元でき、カオ スが関数として記述できることを示す.

#### 第3セッション 一沿岸環境の解析-

「萩市菊が浜における気候変動の影響を考慮した汀線変化」(15:50~16:25)

白水 元・朝位孝二(山口大学大学院・創成科学研究科)

萩市菊ヶ浜海岸の気候変動への適応策の検討のために,波浪観測データを整理して各年の確 率密度分布の変化を求め,有義波高の発生確率の推移を予想した.また,平山の拡張ブシネス ク方程式,渡辺らの漂砂量公式を組み合わせたプロセスベースドモデルを構築し,将来予想さ れる暴浪イベント後の汀線変化を予測した.

「内湾浅海域における懸濁物質濃度の応答特性に関する研究」(16:25~17:00)

押川英夫(佐賀大学大学院・工学系研究科)

有明海諌早湾内の浅海域を対象に,懸濁物質濃度の代表値と考えられる濁度の応答特性について,現地観測に基づく検討を行った.その結果,底面付近の濁度には風波が著しく影響していることが示されるとともに,砕波とそれに伴う乱れの増加も寄与している可能性が示唆された.

#### 懇親会

ナイトセッション ーディスカッションー

2017年12月17日(日)

#### 第4セッション -非線形長波の解析-

「有明海の共振潮汐の非線形性について」(10:00~10:35)

田井 明(九州大学工学研究院・環境社会部門)

有明海は日本最大の潮汐振幅が生じるため、その非線形性も大きい.そのことが諫早湾干拓 事業の影響に関する学術面の議論を複雑にしてきたとも言える.長周期波動である潮汐の非線 形性について有明海を例に論じる.

「KdV-Burgers 方程式の格子ボルツマン法による数値計算」(10:35~11:10)

辻 英一(九州大学・応用力学研究所)

KdV-Burgers 方程式の格子ボルツマン法による数値スキームを提案した.KdV-Burgers 方程式 は、非線形性、粘性、そして分散性を同時に含む非線形モデル方程式である.分散性はより高 次の微分項を含むので、数値スキームとしてはより複雑になるが、従来からのモーメントによ る方法を取り入れることにより、汎用的なスキームになる.

# 第5セッション -多層と波動-

「地形上を伝播する内部波の数値解析」(11:20~11:55)

柿沼太郎(鹿児島大学学術研究院·理工学域)

外洋を伝播していた内部波が,陸棚上に到達する場合のあることが知られている.ところが, 摂動法に基づく鉛直積分型波動方程式系は,水域の条件によって適用性が異なる.そこで,本 研究では,変分原理に基づく非線形波動方程式系を基礎方程式系とする数値モデルを適用し, 深水域と浅水域の両者を含む水域を伝播する内部孤立波の挙動を調べた.

「多層波動方程式の固有モードによるグリーン関数と散乱問題への適用」(11:55~12:30)

金山 進(日本大学・工学部)

準3次元の線形波動場に対する多層波動方程式の精度確認の一環として、その分散関係式か ら得られる固有ベクトル系の特性を検討してきたが、そこから派生した解析方法の一つとして 固有ベクトル系によるグリーン関数の構成とステップ地形による鉛直2次元波動散乱問題への 適用例を紹介する.

# 閉会挨拶(12:30~12:40)

辻 英一(九州大学応用力学研究所共同利用研究集会世話人)

# 共同利用研究集会

# 「海洋乱流の観測およびモデリング研究」

"Workshop for observational and modeling studies of ocean turbulence"

研究代表者 吉川 裕 (京都大学大学院 理学研究科)

目的と経緯

地球温暖化や海洋酸性化など、緩やかではあるが持続的な環境変化に果たす海洋の役割は 大きい。海洋の役割を正しく評価し、気候を精度よく予測するために、海洋モデルや大気海 洋結合モデルの高精度化が取り組まれているが、十分な予測信頼性を得るには至っていない。 海面境界過程や混合過程にかかわる海洋乱流現象の理解が不十分であり、その影響をモデル にうまく組み込めていないことが、その原因の一つである。

本研究集会では、上記の問題解決を見据え、海洋乱流の観測やモデリングなどに携わる研 究者が集い研究成果を発表することで、互いの知識や疑問点を共有し、海洋乱流現象の理解 を深めるとともに、今後の研究の展開を模索することを主眼としている。2010 年度より共 同研究として開始したが、研究集会のスタイルが定着してきたことを踏まえ、2016 年度よ り研究集会の枠で実施してきた。今年度は8度目の研究会となった。

2. 研究集会の概要

今年度は 2018 年 3 月 19 日に応用力学研究所で開催された。出席者数は記帳に基づくと 27 名(九大 14、京大 5、海洋大 2、JFEアドバンテック 2、東大、海洋研究開発機構、水 産工学研究所、東北水産研究所それぞれ 1)であった。プログラムの詳細は末尾に記す。講 演の概要は以下のとおりである。

最初の講演では、水産工学研究所の古市博士が、海底付近の懸濁粒子濃度(体積%)と海 底乱流の関係性に関する報告がなされた。LISSTと呼ばれる測器で計測した懸濁粒子濃度の 分布と、乱流混合を反映する密度成層の分布と比較すると、懸濁粒子濃度分布と密度分布の 関係はいくつかのパターンに分類されること、さらに対応する数値実験を行うことで、いく つかのパターンに分類される要因の一つとして、潮汐流の時間変化が挙げられることを報告 した。次に海洋研究開発機構の古島博士は、沖縄トラフにおける熱水噴出孔周辺で計測され た乱流に関する報告を行った。海底に設置された ADCP は、散乱体が潮汐に起因した乱流に より周期的に巻き上げられている様子を示唆していた。そこで乱流微細構造プロファイラー を用いて同海域の乱流を直接計測したところ、熱水噴出に起因すると思われる乱流も計測さ

93

れた。これらの結果は、同海域での乱流が潮汐による乱流混合、(潮汐周期で影響を受けた) 熱水噴出による乱流混合、熱水噴出による乱流混合の潮汐による移流、などの現象が卓越し ていることを示唆し、同海域の海底資源開発には、これらの現象のより詳細な解明とそれに 基づく環境影響評価が必要であるとの報告がなされた。次に九州大学の遠藤博士は、東シナ 海陸棚で計測された周期 10 分程度の内部波列に関する報告を行った。このような内部波が 同海域に存在することは過去の観測により知られていたが、今回の観測により、内部波は振 幅が最大10m程度にも及ぶこと、約1日周期で観測海域(東シナ海陸棚域)に到来すること、 到来方向は北東から南東に変化すること、位相速度は 1.1-1.4m/s であること、内部波の間 隔は不規則であったことなど、従来の観測では捉えられなかった詳細な様子を明らかにする ことに成功した。続いて九州大学の堤博士は、黒潮のような強流がトカラ海峡における海山 群を通過する際に形成する強い乱れに関する研究成果を紹介した。観測では10<sup>-6</sup>kgm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>を超 える強い乱流散逸率と反流が海山の背後の亜表層で捉えられた。この強い混合により、水質 が変質していく様子も捉えられており、同海域の混合が北西亜熱帯域での水質分布にも影響 を与えていることを示す成果であった。また、海山で生成された内部波が下流に伝播してい る様子も捉えられ、これを MITgcm を用いた理想化数値実験で再現したところ、観測結果と 整合的な結果が得られ、その内部波が乱流混合に果たす役割の詳細な解明が今後に期待され るものであった。午前中最後の講演では、東京海洋大学の山崎博士から乱流と低次生態系に 関する話題が提供された。これまでの観測により海水中のクロロフィル濃度分布は変動が大 きいことが明らかになっており、その変動の効果を加味した低次生態系モデル(NPZD モデ ル)を構築したとの報告であった。そのモデルでは grazing 関数に対する依存性が大きく、 その関数形によっては現実的な定常解が得られないが、適切な関数形を採用すれば現実的な 解が得られること、この関数を用いればこれまでの観測から明らかになってきた外洋域の生 態系の多様性をも再現できること、などの報告がなされた。

昼食を挟んで午後は、東京海洋大学の吉田博士に二重拡散対流に関する基調講演をして頂 いた。Perpetual Salt Fountain (熱伝導性の良いパイプを深層にまで通せば深層水がパイ プ中を自励的、永続的に湧昇しうる現象、Stommel et al. 1956)を契機として始まった二 重拡散対流 (熱と塩分の拡散率の違いに起因する対流、Stern 1960)の、特性(密度フラ ックスやエネルギー収支など)、もたらされる混合の強さ(拡散係数)、それを決めるパラメ ター、そしてその効果をパラメタライズする方法などに関する、理論的・実験的研究の歴史 が体系的かつ丁寧に紹介され、今後の研究の発展の礎となる内容を講義していただいた。続 いて九州大学の大貫博士は、内部波同士の弱い相互作用(弱非線形乱流)に関する理論につ いての講演を行った。海洋中の深層混合をもたらす機構の一つとして着目されているPSI は、内部波同士の共鳴によりエネルギーが小スケールにカスケードする機構であるが、その 共鳴によるエネルギーカスケードを記述する方程式 (kinetic equation) は単色波では破綻 するという問題があった。そこで、力学的に相似な(簡単な)強制振動の問題を取り上げて、 その統計的記述を行うことで上述の問題の原因を明らかにするとともに、PSIに関しては スペクトルのヒステリシスを考慮することでこの問題を解決できること、その結果これまで 存在していたPSIに関する二種類の理論を統一できることを報告した。次に京都大学の小 田氏は、中規模渦と深層流の関係性に関する数値実験結果の紹介を行った。傾圧不安定によ り生成された中規模渦は、海洋深層の海水を水平に混合する結果、等渦位線上を渦位の小さ い方を(北半球では)右に見る流れを生成することが知られている。このような渦に伴う深 層流が太平洋のような広い海域でどの程度生じうるのかを、数値実験を行って調べたところ、 地形が赤道をまたぐような渦位の等値線が閉じない場合には、中規模渦が同程度でも深層の 流れはほとんど形成されないことを紹介した。最後に京都大学の藤原氏は、ラングミュア循 環と呼ばれる吹送流と深水波の相互作用により生じる循環に関する数値実験結果の報告を 行った。全格子を可変長とする新たな数値模型を構築し、深水波の振幅を従来の模型より大 きくした実験を行った結果、これまで良く調べられていた波が流れに影響を及ぼすだけでな く、流れが波にも影響を与え得ること、そのため従来は無視されてきたラングミュア循環の 生成機構(CLI機構)も重要となる可能性があることを示した。

3. おわりに。

以上の話題は、海底から深層そして表層まで、また対象も海洋中での窒素やリンなどの物 質循環から海洋熱塩大循環まで、多岐にわたるものであるが、いずれも海洋中の乱流現象に 起因するという点で共通である。海洋乱流は異なる文脈で議論されることが多いが、乱流を キーワードとして集まることで、より力学に踏み込んだ議論ができる。今年度の研究会にお いても、上述の話題提供とその後に行われた活発な質疑応答や議論により、研究会の趣旨は 十分に果たすことができた。また、これまでの断片的な知識の整理や、今後の研究の方向性 を考える上で非常に有意義なものであった。今回も、研究を始めたばかりの院生からその道 のトップランナーである年長者まで幅広い年代の参加者による忌憚のない議論を可能とす るこのような研究会が、海洋乱流のコミュニティーを形成・維持にも非常に有効であること も確認できた。なお、この研究会は来年度も継続してゆくが、新たな研究者・学生の参加を 促すために定期的に開催会場を変更すること、そのため来年度は他大学(東京大学大気海洋 研究所)の共同利用研究に申し込むことも確認された。九州大学応用力学研究所のこれまで の支援に感謝するとともに、海洋乱流研究の基幹的研究所の一つである応用力学研究所で再 び開催する際にはこれまでと同様のご支援をお願いする次第である。 ----- プログラム ------

2018年3月19日

08:55 - 09:00 趣旨説明

吉川裕 (京大理)

- 09:00 09:40 海底混合層近傍の懸濁粒子の動態に関する現場観測
  - 古市 尚基 (水産工学研究所), 東博 紀, 杉松 宏一, 牧 秀明, 越川 海, 宇田川 徹, 遠藤 次, 大村 智宏
- 09:40 10:20 VMP-X(投下式乱流微細構造プロファイラー)を用いた沖縄トラフに おける乱流計測

10:20 - 11:00 東シナ海陸棚縁辺部で観測された短周期内部波列

遠藤 貴洋 (九大応力研), 堤 英輔, 松野 健, Chang-Su Hong, Gyu-Nam Baek

- 11:00 11:10 休憩
- 11:10 11:50 黒潮と海山の相互作用から生じる流れと乱流の観測と数値実験

堤 英輔 (九大応力研), 松野 健, 長谷川 大介, 千手 智晴, 中村 啓彦, 郭 新宇

11:50 - 12:30 Application of planktonic closure models to 1D and 3D hydrodynamics models

山崎 秀勝(東京海洋大)

- 12:30 13:20 昼食
- 13:20 14:20 【基調講演】二重拡散対流と乱流混合吉田 次郎(東京海洋大)
- 14:20 15:00 弱非線形乱流の理論的基礎と PSI への応用

大貫 陽平(九大応力研)

- 15:10 15:50 大洋規模の深層循環に海底地形と中規模渦が与える影響に関する数値実験 小田 悠介 (京大理), 吉川 裕
- 15:50 16:30 波浪・乱流相互作用の研究のための鉛直可変格子自由表面モデルの開発 藤原 泰 (京大理), 吉川 裕, 松村 正義
- 16:30 17:30 総合討論

古島 靖夫(海洋研究開発機構),東 博紀,福原 達雄,松田 健也,古市 尚基, 山本 啓之,福島 朋彦

(研究集会)

# 非線形波動研究の新潮流 - 理論とその応用-

研究代表者 京都大学情報学研究科 辻本 諭

#### 研究集会の目的

非線形波動の研究は、その源流ともいえる流体現象の理解にともない、幅広い分野を取り込みながら、 現在の社会基盤を支える重要な分野へと展開してきた。その研究対象は、海洋や大気の流れなどの物理 現象にとどまらず、生命動態、渋滞等の社会現象、情報学におけるアルゴリズムやネットワークなど幅 広い分野に広がっている。特に、理論研究と実験研究が密接に連携をとり、新しい分野との関連性を見 いだすことで、より豊かで多彩な非線形波動研究へと進展してきた。

本研究集会では、物理、数学、工学、情報などの多彩な分野から、現象論や数理的研究に関する研究 発表を幅広く募り、最先端の研究に現れる種々の現象とその背後にある普遍的原理について様々な分野 の立場から議論することで、非線形波動研究の深化とその新たな展開を目指す.2016年度に応用力学研 究所で開催された研究集会「非線形波動研究の現状-課題と展望を探る-」に引き続き、研究集会が「非 線形波動」をとりまく様々な分野の研究者が互いの情報を交換し、個々の研究の最前線を理解すること で問題意識を共有するとともに、更なる発展や新しい展開を生み出す場となるようにしたい.本研究集 会の趣旨である、異分野の相互作用による研究の促進のためには、共同利用研究拠点である応用力学研 究所での研究会開催がふさわしいものと考えられる.

なお、本研究集会は日本応用数理学会応用可積分系研究部会との共催であった。

#### 成果の概要

本研究集会は、平成 29 年 11 月 9 日から 11 月 11 日までの 3 日間にわたり九州大学筑紫地区筑紫ホール (C-Cube 1 階) にて開催され、特別講演 3 件と一般講演 2 7 件(口頭発表 1 3 件およびポスター発表 1 4 件)が行われた。

特別講演では3名の講演者を選定して依頼を行った。まず、数理に関する話題として、

• Quasi-Hermite polynomials, Quadrature formulas, Hausdorff-type Diophantine equations

という講演が行われ、準古典エルミート多項式、数値解析学を中心として古くから研究されてきたガウスの矩形求積公式 (quadrature formula) および Hausdorff の不定方程式系との関係について、最新の研究動向も交えて概説がなされた。また、数理物理と物質・材料への最近の海洋波の非線形相互作用に 関する話題として、

製造プロセスにおける数理的研究の現状と数学と物質・材料の連携、更なる数学連携の展開について

という講演が行われ、製鉄プロセスにおける数学連携について、物質・材料科学系分野の未解決問題で ある「結晶群から対称性の数値指標を取り出す」、「材料のマクロな特性を決定する重要因子である結晶 格子の乱れを記述する」、「ミクロ (離散) とマクロ (連続) を合理的・明示的に繋ぐための階層構造の仕 組みを記述する」ための取り組みを、交通流等の材料以外の事例も交え解説があり、多角的な議論が加 えられた。さらに、流体力学に関する話題として、

• 3次元津波シミュレーションと可視化技術

という講演が行われ、3次元数値流体力学ツールが海岸・海洋工学分野において利用されつつあり、3次 元津波シミュレーションに関する研究事例と計算結果の可視化技術について報告がなされた。

これら特別講演の内容は、非線形現象の数理的手法の発展が従来の分野にとどまらず,数学の古典的 な問題・製鉄プロセス・津波対策への啓蒙活動など幅広い分野に応用できることを示すものであり、非 線形波動研究の最新の動向に関する興味深い内容であった。

ポスターセッションを含む一般講演においては、特異点閉じ込めと代数的エントロピーとの関係,古 典直交多項式に関する報告および,箱玉系を含めた超離散系からパンルヴェ方程式,数え上げ数学に関 する話題まで、非線形波動研究の新潮流といえる多彩な内容の報告が行われた。また,講演後において も分野の垣根を越えた活発な議論が交わされ、さらなる研究の進展が期待される。

本研究集会は、物理・数学の話題から工学・情報の応用に至る幅広いテーマを扱うこと、3件の招待 講演を除き、講演は公募によるもので自由に発表できることが大きな特色である。全体を通して、幅広 い分野での最先端の研究について、多角的な視点から議論することで、非線形波動研究の新しい動向を 見いだすという当初の目的は達成できたものと思われる。「非線形波動」研究のような、様々なテーマが 密接に関連しあう分野では、本研究集会のような場の存在が極めて重要である。本共同利用研究集会を 実現させていただいた九州大学応用力学研究所に対して、参加者を代表して深く感謝申し上げたい。

#### 講演概要

# 11月9日(木)

○間瀬崇史 (東京大), ウィロックス・ラルフ (東京大), ラマニ・アルフレッド (IMNC, University of Paris VII & XI), グラマティコス・バジル (IMNC, University of Paris VII &XI)

#### 特異点閉じ込めと代数的エントロピー I

平面上の写像の特異点のパターンに基づいて、写像の代数的エントロピーが容易に計算できるような手 法を特異点閉じ込めを通過する写像の場合に紹介する。

○ Ralph WILLOX (東京大), 間瀬崇史 (東京大), ラマニ・アルフレッド (IMNC, University of Paris VII & XI), グラマティコス・バジル (IMNC, University of Paris VII &XI)

## 特異点閉じ込めと代数的エントロピー II

「特異点閉じ込めと代数的エントロピー I」の続きで、平面上の写像の特異点のパターンに基づいて、写像の代数的エントロピーが容易に計算できるような手法を特異点閉じ込めを通過しない写像の場合に紹介する。

# 澤正憲(神戸大)

# [特別講演] Quasi-Hermite polynomials, Quadrature formulas, Hausdorff-type Diophantine equations

一変数多項式の積分を数直線上の有限個の点での関数値の重み付き和で表す公式を,矩形求積公式 (quadrature formula) といいます. Gauss の名を冠する公式があるように,QFの存在性および分類の問題は, 準直交多項式 (quasi-orthogonal polynomial) の零点の解析と並行して,数値解析学を中心として古く から研究されてきました.一方,代数的組合せ論などの分野では,ある種の極値性を有するQFの点配 置をデザイン (design) と称し,その幾何的特性の研究が盛況です.本講演では,特にガウス積分に的を 絞り,準エルミート多項式の零点と矩形求積公式,さらには Hausdorff (1909) に因んだ不定方程式系と の関係について概説します.そのうえで,Hausdorff の不定方程式系と準エルミート多項式の判別式の 関係について,講演者の最新の研究成果にも触れたいと思います.

#### 西岡斉治 (山形大)

#### q-Airy 方程式の解の超超越性

差分リッカチ方程式の解が代数的微分方程式をみたすかどうかを調べた Tietze の研究手法を代数化し、 q差分リッカチ方程式にも通用する定理を得た。これを用いた、qエアリー方程式の解が代数的微分方 程式をみたさないこと(解の超超越性)の証明を紹介する。

### 中屋敷厚 (津田塾大)・岡田聡一 (名古屋大)・〇執行洋子 (津田塾大)

#### KP 階層のタウ関数の展開係数について

ソリトン方程式と呼ばれる一連の微分方程式中でも最上位に位置するような、KP 階層と呼ばれる微分 方程式系を扱う。 本講演では KP 階層の解の性質に関する定理について発表する。

#### 新澤信彦 (西日本工大)

#### 一般的双線形差分方程式と Backlund 変換方程式のソリトン解

一般化双線形差分方程式は離散 BKP 方程式の係数を一般化した方程式である。Backlund 変換を使って ソリトン解を求め、これがもとの方程式や Backlund 変換式の解になる事を示す。

# 11月10日(金)

○羅宇 (京都大)・辻本諭 (京都大)

#### Bannai-Ito 多項式の例外型拡張とその古典性について

古典直交多項式の拡張として、例外型直交多項式が知られている. 従来,Jacobi,Laguerre,Hermite 多 項式を代表とする古典直交多項式について、関連する2階微分作用素にダルブー変換を施すことにより 例外型直交多項式が導出される. 近年,新たに古典直交多項式として認識されるに至った Bannai-Ito 多 項式は,鏡像変換を含む Dunkl 型作用素の固有関数となるなど他の古典直交多項式にはない性質を有し ている.本研究では,Dunkl 型作用素についてダルブー変換を行うことで、例外型 Bannai-Ito 多項式を 導出し,その直交性を示した.また、これにより Dunkl 型作用素に付随する代数を明らかにすることも 期待できる。

#### 辻本諭 (京都大)

#### Askey-Wilson 多項式に付随する代数について

古典直交多項式の頂点に位置している Askey-Wilson 多項式に対して,様々な代数的アプローチが知られている.本講演では,q-Oscillator 代数および Double Affine Hecke 代数のそれぞれに対して,Askey-Wilson 多項式との関係について議論する.(Luc Vinet 氏, Alexei Zhedanov 氏との共同研究:arXiv:1612.04038, arXiv:1709.07226)

#### 中川淳一 (新日鐵住金)

#### [特別講演] 製造プロセスにおける数理的研究の現状と数学と物質・材料の連携、更なる数学連携の展開 について

製鉄プロセスは大型装置で高温物質を扱うとともに相変化を伴う現象が多数存在し、大規模・複雑系の 典型事例です。さらに、鉄鋼材料ではナノスケールの結晶格子、メソスケールの多結晶組織、マクロス ケールの製品をマルチスケールの視点で制御することが求められています。製鉄プロセスと鉄鋼材料に は、数理モデリング、逆問題、最適化、制御、ビッグデータ解析等、多くの数学・数理科学の問題を包 含しています。本講演では、製鉄プロセスにおける数学の適用事例を使って、数学連携に関する講演者 の考え方を紹介した後、いろいろな専門分野の数学者との学術連携を通じて 物質・材料科学系分野の 未解決問題である「結晶群から対称性の数値指標を取り出す」、「材料のマクロな特性を決定する重要因 子である結晶格子の乱れを記述する」、「ミクロ(離散)とマクロ(連続)を合理的・明示的に繋ぐため の階層構造の仕組みを記述する」、ための取り組みを、交通流等の材料以外の事例も交え紹介します。

#### 川崎浩司 (ハイドロソフト技術研究所)

## [特別講演] 3次元津波シミュレーションと可視化技術

近年,3次元数値流体力学ツール OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation)が 海岸・海洋工学分野において利用されつつある。OpenFOAM は、多相流や燃焼、磁場などの用途に応 じた各種ソルバを有しており、前処理や後処理のためのアプリケーションも充実している。本稿では、 OpenFOAM を用いた3次元津波シミュレーションに関する研究事例と計算結果の可視化技術について 紹介する。

竹村 剛一 (中央大)

#### 符号付き超離散パンルヴェ第二方程式とその解について

符号付き超離散パンルヴェ第二方程式を連立方程式として再定式化し、より平易な形の式を提示する。 これの2パラメーター解をいくつか導出し、qパンルヴェ第二方程式の行列式型の解の超離散極限との 関係を論じる。本講演は五十嵐光(中大理工修士修了)との共同研究に基づく。

# ○渡邉靖之 (早稲田大)・田中悠太 (早稲田大)・城戸真弥 (早稲田大)・筧三郎 (立教大)・丸野健一 (早稲田大)

#### DKP 方程式のソリトン解のロンスキ型パフィアン表示とネットワーク

KP 方程式のソリトン相互作用の数理構造は、ネットワークを用いてより深く理解できることが知られている。それに対して DKP 方程式のソリトン相互作用の数理構造はまだ十分に理解できていない。DKP 方程式のソリトン解はロンスキ型パフィアン表示を持ち、それは反対称パラメータ行列 B を含む形に一般化される。本講演では、反対称行列 B のある種の標準化とパフィアンの和公式を用いることで、DKP 方程式のソリトン解に対応するネットワークが簡単に構成できることを示す。

11月11日(土)

## ○金泉大介 (早稲田大)・丸野健一 (早稲田大)

#### Jackson の第2種 q-Bessel 関数の精度保証付き数値計算法

これまで様々な特殊関数の精度保証付き数値計算法が開発されてきたが,可積分系などの数理物理で現 れる q-特殊関数の精度保証付き数値計算法はまだない. q-特殊関数の精度保証付き数値計算法を確立す るため,可積分系で現れる Jackson の第2種 q-Bessel 関数の精度保証付き数値計算法の研究を行なった. 本講演では我々が以前提案した交代級数の性質を用いる方法と積分を用いる方法を振り返ると共に,新 たに二重指数関数型積分公式(DE 公式)を用いる方法と漸近展開を用いる方法を提案する.

上岡修平 (京都大)

#### 対称な逆平面分割と離散 2 次元戸田分子

逆平面分割はヤング盤の一種であり、顕著な性質として積表示可能な母関数を持つ。本講演では主対角 線に関して対称な逆平面分割を考え、その重み付き母関数(分配関数)と離散2次元戸田分子の間の関 係を示す。

○井ノロ 順一 (筑波大)・梶原 健司 (九州大)・三浦 憲二郎 (静岡大)・朴 炯基 (九州大)・Schief Wolfgang (University of New South Wales)

## 相似幾何における弾性曲線とその離散化・CAGD との関連について

CAGD で用いられる対数型美的曲線と呼ばれるクラスの曲線を取り扱う.対数型美的曲線はその相似曲率が定常 Burgers 方程式の解として特徴付けられることを示し,また,相似幾何の下で弾性曲線と類似のエネルギー汎函数に対する平面曲線の変分問題の解として特徴付けられることを示す.さらに離散化について報告する。

# 野邊厚 (千葉大)

# ランク2ミューテーションの不変曲線について

ランク2のクラスター代数の非自明なミューテーション列を2次元離散力学系の時間発展とみることが できる。とくに有限型もしくはアフィン型の場合、このような離散力学系の不変曲線は、円錐曲線、楕 円曲線もしくはそれらをブローダウンした特異4次曲線になることを示す。

#### ○大久保直人 (青山学院大)・鈴木貴雄 (近畿大)

#### クラスター代数と q-パンルヴェ方程式の退化構造

Fomin と Zelevinsky によって導入されたクラスター代数は、クラスター変数と係数によって定義される 可換環であり、その生成系は quiver の変異(mutation)という操作によって定義される.本講演では、 q-パンルヴェVI 方程式とその退化で得られる q-パンルヴェ方程式が mutation によって記述されること、 quiver の頂点の合流操作が q-パンルヴェ方程式の退化と対応することを紹介する.

# ポスターセッション (11月10日16:00-17:30)

# ○佐々木幹子(山形大)・○本郷史也(山形大)・西岡斉治(山形大)・村田実貴生(東京農工大) FitzHugh-Nagumo **方程式の超離散化**

2成分の反応拡散方程式である FitzHugh-Nagumo 方程式に対して、「トロピカル離散化」を適用し、超 離散方程式を導出する。FitzHugh-Nagumo 方程式の特徴的現象と類似した現象が、導出した超離散方 程式において確認できる。

○坂田 幸太郎 (早稲田大)・延東 和茂 (早稲田大)・高橋 大輔 (早稲田大) グローバルセルオートマトンの諸性質の解析

大域的情報に基づいて時間発展をする,ある2次元の離散力学系をグローバルセルオートマトン (GCA) と名付けている。この GCA のソリトン的振る舞いをする解に着目し,その基本構成や相互作用につい て詳しく説明する。

○ 時枝佑次 (早稲田大)・高橋大輔 (早稲田大)
 max 方程式の単調性と保存量について
 1次保存量を持つ,ある4近傍2値セルオートマトンを max 方程式によって実数値に拡張する.元の2
値の系には流束の単調性,高次保存量などの性質が存在し,それら性質を保ったまま拡張するためにどのような max 方程式を選んだか,そしてそれら性質がどのような形で実現したかについて詳しく述べる.

## ○赤岩香苗(京都産業大)・谷口雄大(同志社大)・近藤弘一(同志社大)

## 離散戸田方程式を用いた要素および固有値が指定された逆固有値問題の解法

逆固有値問題の1つとして、指定した要素と固有値をもつ行列を構成する問題が知られている。本講演 では、特に3重対角行列に対して、離散戸田方程式を用いた解法を提案する。指定する固有値が重複固 有値の場合についても触れる。

#### ○小俣亮 (早稲田大)・高橋 大輔 (早稲田大)

解の複雑度による 4 近傍 max 方程式およびセルオートマトンのクラス判定

初期値問題における解の複雑度という視点で4近傍 max 方程式およびそれに付随する CA の分類を議 論する. 同様の研究が3近傍の max 方程式に対してなされたが,今回はある形式に従う単純な形の4近 傍の方程式に対して解析を試みる.

#### ○鈴木 大庸 (法政大)・礒島 伸 (法政大)

#### 双線形化法による離散時間 Newell-Whitham モデルの特殊解の構成

交通流モデルの1つである離散時間 Newell-Whitham モデルの,2つの従属変数を持つ双線形形式を導き,その特殊解を構成する.従属変数1つの双線形形式から得られる既知の特殊解との比較も行う.

#### ○佐々木裕文 (早稲田大)・佐々木文夫 (東京理科大)・山田道夫 (京都大)

#### ブラインド再構成と逆問題

観測データから元データ復元を目的としたブラインド再構成について,基礎的なモデルを用いて紹介する.ブラインド再構成はいわゆる逆問題に対する1種のアプローチであり,データ解析で知られるブラ インド信号源分離をベースとしている.

#### 三木啓司 (気象大学校)

#### Symplectic 行列束と歪直交多項式

ランダム行列の理論で現れる, 歪直交多項式と呼ばれる多項式列にある対称性を課すと, ある Symplectic 行列束が対応する. その関係に注目すると, ある種の固有値問題の解法が構成できることを述べる.

○城戸 真弥 (早稲田大)・○田中 悠太 (早稲田大)・渡邉 靖之 (早稲田大)・筧 三郎 (立教大)・ 丸野 健一 (早稲田大)

#### ソリトンとネットワーク

KP 方程式のソリトン解はネットワークと密接に関係し、ネットワーク表示を用いてソリトン相互作用 の詳細を解析できることが知られている.本講演では、DKP 方程式のソリトン解に対するネットワー ク表示を用いることで、KP 方程式のネットワーク表示が従来の手法に比べて簡単に得られることを示 す.

#### ○単山 大地 (早稲田大)・永原 新 (早稲田大)・丸野 健一 (早稲田大) Davey-Stewartson II 方程式のダーク型線ソリトン相互作用と三角形分割

水面波の弱非線形モデルの1つである Davey-Stewartson (DS) 方程式は多様な厳密解を持つ. 特に DS2 方程式と呼ばれる場合にはダーク型線ソリトン解が存在し,それらは複雑な相互作用を示す. しかし, DS ダークソリトンの複雑な相互作用の背後にある数理構造については,未だ十分な理解ができていな い.本講演では三角形分割を用いて, DS ダークソリトンのパターンからタウ関数が決定できることを 示す.

#### 久保田千尋(津田塾大)

#### ランダムソーティングネットワークに関連する数値実験

ー様ランダムに生成された対称群の最長元の披約語(ランダムソーティングネットワーク)の挙動に関 する数値実験の結果が広く知られている。同様の実験を符号付き置換群 (signed permutation) について 行った結果について報告する。 前田一貴 (関西学院大)

#### 箱玉系の番号・運搬車ルールの拡張について

箱玉系の玉の番号付きルールと運搬車付きルールを合わせた場合について,既知のものとは異なる拡張 系を考える.これは非自励離散 KP 格子,および非自励離散 2 次元戸田格子から簡約操作により自然に 現れるものである.この系の性質と解について議論する.

○金丸真理子 (立教大)・筧三郎 (立教大)

#### Misanthrope model の流量-密度関係式の導出について

交通流の CA モデルの一つである misanthrope model に関して,金井は2レーンの場合の流量-密度関係式を導出した。本研究では,金井が用いた超幾何関数の2次変換を用いない導出法を示し,3レーンへの拡張を試みる。

Tomoaki Hirakawa (九州大)

#### Ocean wave characteristics around Kyushu

Hourly-wave characteristics, such as the significant wave height and wave period around Kyushu over a period of 10 years (2007-2016) are calculated and analyzed using SWAN (Simulating Waves NearShore).

**開催の期間** 平成 29 年 11 月 9 日 ~ 平成 29 年 11 月 11 日

参加者 62 名

「日本海及び日本周辺海域における環境急変現象(急潮)のモニタリング、モ デリング及びメカニズム解明に関する研究集会」報告 研究代表者:井桁 庸介(水研機構日水研)

本研究集会は、2017 年8 月3 日から4日にかけて、九州大学筑紫キャンパ ス応用力学研究所大気海洋環境研究センターにおいて開催された。この会合は 今回が3回目の開催であり、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と、海洋物理学的な研究を継続してきた研究者とが議論 することを目指したものである。

大学および試験研究機関を中心に、両日とも 35 名が参加し、合計 13 件の講 演があった(講演内容はプログラム参照)。一題あたり、質疑応答含む 25 分と いう十分な時間を割いたため、非常に活発な議論が行われた。

今回は、日本海に関する発表が8題、太平洋沿岸~東シナ海沿岸に関する発 表が5題と、日本全国で実施されているモニタリング・モデリングに関する発 表がなされた。沿岸で起きる短期的な環境変動に関わる、海洋物理・水産的な 応答に関する数多くの講演がなされ、活発な議論が交わされた。気象擾乱に対 する近慣性周期変動の湾・沿岸域における応答の理論的考察、水産資源・一次 生産の応答を把握する試み、沿岸捕捉波に伴う流れの岸からの逸脱と急潮発生 との関係、津波が引き起こす湾水振動の予測等、海洋物理学的な知見を基盤に した応用的な研究発表があった。加えて、漁業現場でのニーズのとりまとめや、 現業で実施されている急潮予測システムの、漁業現場への応用システム等の発 表がなされ、今後の発展が期待された。

また、水産試験研究機関におけるモニタリング体制の紹介や、観測計画等の 紹介、それから得られたデータの紹介等もあり、各府県におけるモニタリング の現状、取り組み等について共通認識を形成することが出来た。そのような情 報共有に基づき、参加者同士の懇親を深めた結果、データを通した共同研究へ 発展した事例もあった。今後も、このような議論を引き続き継続することで、 新たな研究シーズの創出が見込まれると感じられた。

沿岸・短周期変動をキーワードに参加者の募集を行い、研究者の交流の場を 作ることは重要である。今後も、生物、水産系にも積極的に間口を広げ、研究 集会を出来るだけ継続することで、研究シーズの創出につながることを期待す る。 プログラム

-----8月3日(木)------13:30~13:40 趣旨説明 13:40~14:05 敦賀沖の急潮 兼田淳史·高野澪(福井県立大) 14:05~14:30 DREAMS 活用法の検討(仮題) 舩越裕紀・上野陽一郎(京都府水技センター) 14:30~14:55 島根県定置網漁業における急潮予測システムの要望聞取りについて 金元保之・佐藤勇介(島根県水産技術センター漁業生産部海洋資源科) 14:55~15:10 休憩 15:10~15:35 駿河湾の環境急変現象 勝間田高明 (東海大 清水教養教育センター)・仁木 将人 (東海大海洋)・田中 昭彦 (東 海大 清水教養教育センター)・萩原 直樹 (東海大 海洋) 15:35~16:00 室戸岬周辺における 2017 年の急潮発生状況(事例紹介) 猪原亮(高知水試) 16:00~16:25 紀伊水道南方の沿岸水位変動 寄高博行(高知大学黒潮圏科学部門/農林海洋科学部) 16:25~16:50 High-resolution modeling of the Kuroshio variability south of Japan Tianran Liu · Bin Wang · Naoki Hirose · Toru Yamashiro · Hiroshi Yamada (九州大学 応用力学研究所) -----8月4日(金)------9:00~9:25

石川県の定置網漁場ごとにおける急潮の特性-10年間の観測結果から-

辻 俊宏(石川県水産総合センター)

9:25~9:50

2017 年 6 月に発生した佐渡沿岸での急潮被害とその発生機構について(仮題) 早瀬賢司(新潟水海研)・井桁庸介(水研機構日水研)・池田怜(新潟水海研)

9:50~10:15

富山湾周辺海域における近慣性内部波による定在波的な振動系の形成機構 賀みづき(水研機構日水研)・井桁庸介(水研機構日水研)・広瀬直毅(九大応力研)

10:15~10:30

休憩

10:30~10:55

丹後半島沿岸における近慣性周期変動の増幅過程に関する考察 山崎恵市(水研機構中央水研),北出裕二郎(海洋大),井桁庸介(水研機構日水研),熊木 豊(京都府海洋セ),渡邊達郎(水研機構日水研),清水勇吾(水研機構中央水研)

10:55~11:20

富山湾東部の流れと海洋構造 小塚晃(富山県農林水産総合技術センター 水産研究所)

11:20~11:45

Quality factor を用いた津波来襲時における湾水振動の予測 遠藤 貴洋 (九大応力研)・稲津 大祐 (東京海洋大)・早稲田 卓爾 (東大院新領域)・日比 谷 紀之 (東大院理)

11:45~12:00 総合討論

## 共同利用研究集会

## 「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」

"Water Circulation and Chemical-Biological Processes in East China Sea and Japan Sea"

研究代表者 石坂丞二(名大宇宙地球環境研究所)

1. 目的と開催経過

東シナ海・日本海の生物生産には、それらの海域の流動や混合による栄養塩の流入や供給が欠かせな い。特に東シナ海からの日本海への海水・淡水・物質の流入は、日本海の生態系に大きな影響を与えて いると考えられる。応用力学研究所では、東シナ海の陸棚域および黒潮域と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で進めている生物環境との関連も深く、様々な研究プロジェクトを通し て、多くの分野を包含した研究者コミュニティも形成されてきている。研究成果の共通理解を更に深め るため、継続的に開催できる研究集会の場を持つことが今後の共同研究の進展に大きく寄与すると思わ れる。これまでこの数年は東シナ海に焦点を当てた研究集会を行ってきたが、平成 29 年度から東シナ 海と日本海の両海域を含め、流動や混合などの物理環境と、生物化学過程との関係を明らかにする研究 集会を開催していくこととした。

出席者は、名古屋大学2名、長崎大学3名、愛媛大学2名、京都大学1名、富山大学1名、国際水産 資源研究所1名、石川県水産総合センター1名、環日本海環境協力センター1名、および九州大学6名 であった。本研究集会では、遠藤貴洋(九州大学)、森本昭彦(愛媛大学)、滝川哲太郎(長崎大学)、 石坂丞二(名古屋大学)、森永健司(国際水研)、武田重信(長崎大学)、近藤能子(長崎大学)、張勁(富 山大学)、郭新宇(愛媛大学)、吉川裕(京都大学)、原田浩太郎(石川県水産総合センター)、千手智晴 (九州大学)から話題提供があり、それぞれについて議論を行った。

2. 研究集会の概要

研究集会は、2018年1月31日(水) 13:30から2月1日(木)12:30にかけて、九州大学応用力学研究所3F301 で行った。

遠藤は、2017年7月に長崎丸を用いて東シナ海陸棚縁辺部で観測した、短周期の内部波列に関して説明した。波高5-10m程度の内部波が何度も観測されたが、北西伝搬だけが見られた2016年とは異なり、南西や西北西への伝搬も見られたことを報告した。また吉川は、海洋混合層中の乱流が生物起源の粒子状物質の沈降過程に与える影響について、LESによる粒子追跡で考察した。その結果、表層粒子の沈降速度は変化しないのに対して、中層粒子の沈降速度は減速し、ラングミュア渦のある時にはさらに減速することを明らかにした。張は、複数の化学トレーサーを用いて、東シナ海東部の海峡の通過流に関して水塊の動態解析結果を報告した。例えば、トカラ海峡では、等密度面での混合過程だけでは不十分であり、鉛直混合を考慮する必要があることが明らかとなった。

森本は、低次生態系モデルによって日本海の生産に重要な対馬海峡栄養塩の起源に関して推定した結果 について述べ、太平洋黒潮下層水起源がほとんどであり、長江起源の栄養塩は2%程度にしかならないことを

106

指摘した。一方、郭も起源の異なる栄養塩の東シナ海の基礎生産への寄与に関する見積もりを行った。 その結果、夏には雨が多く、大気経由は北部の割合が多い。河川と黒潮、台湾海峡からの流入は、 水深別にその寄与が異なっていることを示した。

東シナ海の生物過程では、武田は、2017年の長崎丸航海での東シナ海東部海域の表層栄養塩類の 分布について、低塩分の長江希釈水でも窒素が欠乏し、リンが残っていたことと、窒素固定を行う RecheliaやTrichodesmiumが存在していたことを報告した。近藤は、東シナ海およびその周辺海域の ビタミン B12について報告し、その分布は環境要因との関係ははっきりしないが、全体的に要求量 を上回る量存在したことを報告した。さらに森永は、太平洋クロマグロの幼魚であるヨコワの加入と北薩海 域での黒潮流動変動との関連を調べ、潮位を利用して、数日スケールで予測できる可能性があることを報告した。

一方、日本海の研究として、原田が能登半島周辺海域の流況ついて ADCP 観測結果を考察した。 その結果、富山湾の流動は水深によって大きく異なり、風の影響は特に表層で強いが、深い層でも 影響があることが明らかとなった。一方、千手は、1999 年以降能登半島北西の日本海大和海盆南縁 で行った係留観測で、東進する渦によって、北で半時計回り、南で時計回りに流向が変化すること から、地形性ロスビー波がある可能性を明らかにした。さらに、石坂は日本海の渦と春季ブルーム に関して、衛星と現場観測を利用して、混合層の浅い低気圧性渦では、高気圧性渦と比較して春季 ブルームが早期に置きること。またそのメカニズムも、低気圧性渦ではまだ冷却が起きている中で 日射量が増加によって発生するのに対して、高気圧性渦では冷却が止まることによって、水温で推 定できる混合層は深いにもかかわらず、乱流が収まったと考えられる浅い層で発生することを示し た。また、鉛直一次元モデルによって、これを再現しようしていることを報告した。

また、今年度の特別なトピックとして、滝川は新長崎丸の紹介を行った。新長崎丸は、2017年10月19日に進 水式を行い、2018年3月に竣工予定であり、総トン数が1139トンと大きくなり、乗員数は70名、巡航速度は 13.5knotの予定である。左舷にCTDAフレームがある他、船尾にもAフレーム、船首に曳航用ブーム観測ウィ ンチが予定されている。さらに、石坂は、2018年1月6日に東シナ海で事故を起こしたタンカーが、14日に黒潮 に近い大陸棚で沈んだ事故に関して、これまでの状況をまとめた。積み荷がコンデンセートと呼ばれるこれまで あまり大規模流失の報告のない、毒性が強く、揮発性の軽質油であることから、Greenpeaceや Nature などは警 告を発して、中国は調査をしている。しかし、日本ではJAXAがSARセンサーのALOS-2画像を発表しているも のの、全体的には報道や調査がほとんど行われておらず、日本海洋学会幹事会としても情報を収集しているこ とを報告した。

すべての発表ののちに、総合討論を行った。遠藤を中心に、名古屋大学宇宙地球環境研究所の共同利 用・共同研究での研究集会に応募し、7月に予定している新長崎丸での航海の計画を詰めることとなっ た。

107

応用力学研究所共同利用研究集会

東シナ海と日本海の循環と生物化学過程に関する研究

日時:2018年1月31日(水)13:30~2月1日(木)12:30 場所:九州大学応用力学研究所301 (3階)

1月31日 (水)

13:00-15:00

趣旨説明 石坂丞二(名古屋大 ISEE)

遠藤 貴洋・堤 英輔・松野 健・Chang-Su Hong・Gyu-Nam Baek (九大応力研) 2017 年 7 月に 東シナ海陸棚縁辺部で観測された短周期内部波列

森本昭彦(愛媛大 CMES)低次生態系モデルによる対馬海峡栄養塩起源の推定

滝川哲太郎(長崎大環境水産)新長崎丸の紹介

石坂丞二(名古屋大 ISEE)東シナ海の長江希釈水・タンカー事故について

15:15-17:15

森永健司(国際水研)ヨコワ(太平洋クロマグロの幼魚)の加入と北薩海域での黒潮流動変動との 関連

湯浅大輔・太田景将・武田重信(長崎大院水産・環境/水産学部)東シナ海東部海域の表層におけ る栄養塩類の分布と変動要因

近藤能子・高橋成美・戸倉大揮・武田重信(長崎大学)東シナ海およびその周辺海域のビタミン B 群の測定

張勁・趙尊豪(富山大学大学院)東シナ海東部の海峡通過流に関わる水塊の動態解析~マルチプル トレーサーによるアプローチ

2月1日(木)10:00-12:30

郭 新宇(愛媛大 CMES)起源の異なる栄養塩の東シナ海の基礎生産への寄与に関する見積もり
 吉川 裕(京大理)海洋混合層中の乱流が生物起源の粒子状物質の沈降過程に与える影響について
 石坂丞二(名大 ISEE)日本海の渦と春季ブルーム

原田浩太郎(石川県水産総合センター) ADCP 観測からみた能登半島周辺海域の流況 千手智晴(九大応力研)日本海大和海盆南縁の地形性ロスビー波について 総合討論

# 医療用 CT における画像再構成手法のプラズマ乱流計測への応用

帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科 荒川弘之

・背景と研究目標

九州大学応用力学研究所における直線磁化プラズマ発生装置 PANTA では,近年コンピ ュータ断層撮影(CT)技術を応用し、多チャンネル光ファイバーを用いたプラズマ乱流揺 動計測の開発が進められている。開発においては、光検出器による線積分されたプラズ マの発光情報からプラズマ乱流揺動の情報を画像再構成手法により再構築する必要が ある。一方で、CT 技術は当初医療分野において開発され、長年の実績により、その画 質やノイズの評価を含めた画像再構成の手法が多く開発されている。しかし、医療分野 における CT 画像再構成手法やその評価の膨大な成果・知識量に対して、プラズマ乱流 揺動計測への最適な手法の取り入れができていないのが現状である。この為、本研究で は、医療分野で現在導入されている、または導入が検討されている画像再構成手法をプ ラズマ乱流計測に応用を行うための基礎的な検討を行う。

• 検討結果

本年度は、医療用 CT 技術を用いたプラズマ乱流計測を行う為の手法の検討を行った。 検討においては、レーザー吸収分光によるプラズマの2次元流れの測定への適用を考案した。 プラズマ測定における、レーザー吸収分光は、温度や流れの空間的な線積分データを得るた めの手法が一般的であるが、医療用 CT 技術と組み合わせることで、線積分データからプラズ マ乱流揺動の局所情報を再構成する事が可能であると考えられる。特に、(i)レーザー吸収分 光法により、高速なレーザー波長掃引を行うことで、イオン流れの速度分布関数が得られる。 加えて、(ii)線積分データからの再構成に、医療分野で開発された圧縮センシング MRI・CT の 知見を用いることで、Filtered back projection 法等の古典的な手法よりも、より少ない測定点で、 より高画質の再構成が可能になると考えられる。これら(i)(ii)により、2次元空間上の個々の点 における速度分布関数の再構成が可能になると考えられる。

しかし、医療用のMRIやCT技術をそのまま適用する場合、レーザーを様々な方向から照射 する必要がある。このため、本研究では、ラングミュアプローブを用いて開発されたプラズマニ 次元揺動再構成手法(H.Arakawa Sci.Rep.2016)を応用して、一方向のみのレーザー照射で可 能とする。

具体的な適用としては、直線磁化プラズマ発生装置PANTAで開発が進められているレーザ 一誘起蛍光法システムの機器を利用して、効率的に開発を行うこととした。既にあるレーザー は波長掃引可能な半導体レーザーで、アルゴンイオンの3d<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>準位から4p<sup>4</sup>D<sub>5/2</sub>準位への励起の際の、レーザー光の吸収を利用する。イオンの流れと温度から吸収されるレー ザー波長のドップラーシフトと広がりが起こる為、668.6138nmを中心波長として 10GHz程度の掃引を行う。

これまで開発しているレーザー誘起蛍光法では、4p<sup>4</sup>D<sub>5/2</sub>への励起後に、4s<sup>4</sup>P<sub>3/2</sub>への準位 へ遷移する際に発光する442.6nmの蛍光を測定するための集光光学系を別途設置して いる。この際、プラズマ密度が低い為に蛍光は非常に弱く、集光光学系に大口径(直径 10cm程度)のレンズを利用しているものの、プラズマ発生装置の真空容器が大きいため に立体角が大きくとれないことから、S/Nの改善が困難であるという問題があった。加 えて、開発しているレーザー誘起蛍光法を用いた手法は、局所測定の為、測定点を変更 する場合は、その都度集光光学系を移動させる必要があり、非常に時間と労力のかかる 手法であった。しかし、今回のレーザー吸収分光法を用いた手法では、レーザー光の吸 収量を測定するための光検出器を新たに設置するだけで大掛かりな集光光学系は必要 なく、強度のあるレーザー光の測定の為、集光光学系の位置調整も容易である。S/Nも 線積分した吸収量を測定するため、局所的な蛍光を測定する場合と比べて大幅な改善が 見込まれる。

得られた実験結果は、(a)現在 PANTA で開発が別途進められている、多チャンネル光ファイ バーを用いたプラズマ乱流 CT 計測手法との比較に加え、(b)医療用圧縮センシング MRI や CT におけるその画質やノイズの評価手法を適用することで、得られた結果の評価を行うことが 可能であると考えられる。

・成果報告:

(1) Plasma conference 2017(平成 29 年 11 月 21 日、姫路商工会議所)にてポスター発表を 行い、プラズマ・核融合学会 若手学会発表賞受賞を受賞した。(演題番号: 21P-33、題 名「直線磁化プラズマにおける孤立渦の生成・消滅機構の観測」)

(2) Plasma and Fusion Research 个投稿中

著者: Hiroyuki ARAKAWA, Shigeru INAGAKI, Yusuke KOSUGA, Makoto SASAKI, Fumiyoshi KIN,, Kazunobu HASAMADA, Kotaro YAMASAKI, Shunsuke KIMURA, Tatsuya KOBAYASHI, Yoshihiko NAGASHIMA, Takuma YAMADA, Akihide FUJISAWA, Naohiro KASUYA, Kimitaka ITOH6; , Sanae.-I. ITOH 題名: Ion Temperature Measurement by Laser Induced Fluorescence Spectroscopy

起行: Ion Temperature Measurement by Laser Induced Fluorescence Spectroscopy in PANTA

## マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた

## 乱流プラズマの特性抽出法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

## 1. 目的

乱流プラズマは太陽をはじめとした宇宙プラズマにおいても普遍的に観測されているが、核融合プラズマ 研究においても種々の乱流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、高温プラズマ実験においては、その計測手段・状況がこれまで非常に限られ ていた。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。これまでに周波数コムを用いたドップラー反射法を開発し、応用力学 研究所の PANTA 装置や核融合研の大型ヘリカル装置 LHD などに適用し乱流構造に関する大規模なデータ を得られるようになってきた。今回、大型ヘリカル装置で開始された重水素実験において、従来より高い空 間分解能をもった計測手法を開発した結果について、以下に報告する。

# 2. 高速広帯域オシロスコープを用いた全 IF 信号取得による周波数コムドップラー反射計の高時空間分解能 化

プラズマ中の密度揺動による後方散乱波を計測することで、プラズマ密度揺動強度とそのフロー速度を調べることができるドップラー反射計であるが、空間分解能を高めるためには、プラズマ中へ入射する電磁波の周波数の数を増やす必要がある。そのため、マイクロ波帯の周波数コムを用いたドップラー反射計を開発し、PANTA 装置および LHD 装置に適用しているが、これまでその生成した周波数コムの成分の全てを受信回路で処理することができていなかった。(LHD では、入射周波数 26~60 GHz の間で、約 40~60 個の周

波数成分を生成しているが、その内 16 個の周波数し か常時観測ができていない。)それは受信信号を周 波数毎に弁別する際に信号強度の劣化の問題がある ことと、多チャンネルのフィルタバンクシステムを 構成するためコストの問題があったためである。そ のため、今回 LHD では、全周波数成分をまとめて、 広帯域のオシロスコープで収集するシステムを構築 した。LHD のプラズマ放電は3分毎に行うので、デ ータ収集はその時間以内に完了する必要がある。図1 に示すように、ネットワークを介して収集の設定が 可能なデータ収集系を構築した。これにより、LHD の全プラズマ放電において、データを自動的に収集 し、どこからでもデータ解析ができるようになった。

<ul><li>イル(F) 編</li><li>(気に入り)</li></ul>	集(E) 表示(V) ま ◎ LHD デジタイザ	S気に入り(/ 19字	A) ツール(T) ヘルプ(H)	× Google		
	00000000	ax AL				
Diagnosti	cs		Diag	Module S	hotNum	ber
dcece		-	dcece	dcece01		
Modules	✓ Diagnostics ON	ç	Parameters	Module ON		shot#-subshot#
dcece01	≺WM820ZiB≻		TRGsource	FPGA-DTS		
		-	TRGhostID	133.75.183.42		- Hold shot#
			TRGmoduleID	DMODSS0		
			TRGchannel	TRG4	-	SHOT RECALL
			CLKsource	(SameAsTRG)	-	SHOTHEOREE
			CLKhostID	133.75.183.42		SET ALL
			CLKmoduleID	DMODSS0		
			CLKchannel	CLK4	-	
			UserDefinedClock	0 10	0 16	
			DeviceNumber	1		
			IPaddress	127.0.0.1		
			CommunicationPort	1861		
		-	ClockSorce	Internal		
			ReferenceClock	Internal	-	
			SamplingMode	RealTime		
			CombineC1C2	40GS_C1_C2	-	
			CombineC3C4	40GS_C3_C4	-	
			Fixed SampleRate	40GS/8	-	
			AcquisitionDuration(ms)	6.400000		
			TriggerDelay(ms)	0.000000		
			DigitizerMode	on	-	
			TriggerType	Edge	-	
			TriggerSource	Ext/10	-	

図1:LABCOM-X システムによるオシロスコー プの Web 設定画面

## 3. 高い時空間分解能を持ったドップラー反射計によるフロー速度振動の観測

広帯域のオシロスコープを用いることで、多 くの計測点の情報を得ることができた例を、図2 に示す。プラズマに小径のポリスチレン球(<1m m  $\phi$ )を入射した直後、プラズマの周辺部におい てフロー速度の振動現象が発生することを発見 した。この振動は約2kHzの周波数で、短時間 (2~3ms)で減衰する。発生する位置は半径方 向の一部の領域に限定されており、この例では、 r/a~0.98 に境界がある。すなわち半径方向に構 造を持っている。トーラス反対側でも同時に同 じ振動が観測されていることから、長距離相関 のある振動現象であることなど、新計測システ ムの導入により、新たな知見が得られるように なった。



図2:ペレット入射(t=4.7524s)に伴うフロー速 度の振動を観測した例。フロー速度の時間-空間変 化をコンター図で表している。

## 4. 論文と学会発表

T. Tokuzawa, Y. Takemura, K.Y. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Narushima, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Tanaka, Y. Suzuki, I. Yamada, and the LHD Experiment Group;
 *"Distorted magnetic island formation during slowing down to mode locking in helical plasmas"*

Nuclear Fusion, 57 (2017) pp.076003-1-6.

また、次の学会にて発表を行った。

 T. Tokuzawa, K.Y. Watanabe, S. Inagaki, A. Ejiri, R. Imazawa, N. Oyama, K. Tanaka, K. Ida, H. Tsuchiya, and I. Yamada; "Progress of Frequency Comb Doppler Reflectometer System in LHD and Feasibility Study of Doppler Reflectometer for JT-60SA" 13th International Reflectometry Workshop (IRW13), May 10 - 12, 2017, NFRI HQ, Daejeon, Korea.
 T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K.Y. Watanabe, K. Tanaka, T. Akiyama, and I. Yamada;

"Observation of poloidal flow structure" --Oscillation near the transition threshold -- Propagation of flow structure"

7th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference, June 5 – 8, 2017, Nagoya Univ., Nagoya, Japan. [D-O2]

- T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada<sup>*a.c.*</sup>, K.Y. Watanabe, T. Akiyama, K. Tanaka, H. Nakanishi and I. Yamada;
   "Microwave comb reflectometry for micro turbulence measurements" (General Lecture) 18th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (LAPD18), Sep. 24 – 28, 2017, Prague, Czech Republic.
- T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K.Y. Watanabe, K. Tanaka, T. Akiyama, and I. Yamada;
   *"Fast Radial Propagation of Momentum Associated with the TESPEL Injection"*, 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2017), October 2~6, 2017, Kyoto, Japan. [P1-46]
- T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, A. Ejiri, H. Yamada, K. Y. Watanabe, I. Yamada, and LHD Experiment Group; *"Rapid momentum propagation associated with the TESPEL injection"*, Plasma Conference 2017, Nov.20-24, 2017, Himeji, Japan. [24P-05]

## レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

目的

プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには、乱流の物理機構を理解することが重要である。その計 測には様々な手法があるが、本研究ではレーザー光の波面の乱れからプラズマ乱流の情報を引き出す手 法を提案し、実証することを目的とする。本手法は非接触で、かつ干渉や変調などの作用を用いずに、直 接的に乱流を計測できる特徴がある。

#### 経緯と実験方法

大型望遠鏡では、大気の揺らぎによって天体からの光の波面が乱され、解像度が向上しない問題がある。これに対し、すばる望遠鏡では波面形状を計測し、乱れを可変形鏡で補正する補償光学により、解像度の大幅な改善に成功している。プラズマにレーザー光を入射した場合、乱流揺動に対応するのが望遠鏡での大気揺らぎであり、レーザー光の波面を測定することで、乱流揺動の情報が得られると考えられる。

この波面計測による電子密度揺動計測は、平成27年度より本格的にPANTAにて計測を開始した。当 初利用した市販のシャックハルトマン波面センサーでは有意な波面の変化は観測できなかったことから、プ ラズマ計測に最適化したシャックハルトマン波面センサーを自作した。撮像素子の画素数、シャックハルト マンセンサーを構成するマイクロレンズアレイのレンズアレイ数・焦点距離などを最適化した結果、プラズマ の揺動によると考えられる波面変動を捉えることができた。

一方、課題として明らかになったのは、波面としては比較的平面成分に近い非揺動成分(ゼロ次光成分)が揺動成分よりも極めて大きいため、それらが僅かにでも変動すると揺動成分がマスクされることである。平面成分の変動は、機械振動やレーザー光直径より構造が大きい空気の揺らぎが原因となっている。 そのため、振動や空気の揺らぎを抑えるため、光学架台の補強や覆いによる気流の抑制を行った。

上記の課題解決へのもう1つのアプローチは、平面成分そのものの寄与を抑制することである。天体観 測での手法として、ナイフエッジによるゼロ次光成分の除去があり、これを揺動計測に取り入れてゼロ次成 分強度を減らし、ある程度の効果を確認した。更にゼロ次成分を抑制する手法が太陽観測でも知られてい るコロナグラフである。系外惑星探査では、圧倒的に明るい恒星光を除去してその近傍の暗い惑星からの 光を捉える観測が続けられている。コロナグラフはその鍵の技術として改良が進められており、手法も従来 の恒星光成分を物理的なマスクで隠す方法から、光渦を使って恒星光を消す手法など数多く発展型が提 案されている。光渦によるゼロ次光成分のマスクをプラズマ計測に導入した概念図を図1に示す。プラズマ 透過後、円形アパーチャで瞳関数を与えてレンズで集光した後、周方向に4πの位相差を持つ光渦マスク に入射させる。その後、瞳再結像面に同じ円形アパーチャで周縁光を除去した後、適当なビーム径にした 後に撮像する。この光渦コロナグラフは、コロナグラフ演算子をCとすると、入射光 Einが平面波 Eoに対し て、その出射光  $E_{out}$ が  $E_{out} = C[E_{in}] = 0$ と記述できる。一方、入射光が乱れた波面  $E_{in} = E_{in} e^{i\phi} = E_0 + iE_0 \phi$ に対しては、平面波強度成分は前述のとおり除去される一方、乱れた波面成分は消去できず、 Eout = C  $[E_{in}] = C[E_0] + iC[E_0\phi] = 0 + iC[E_0\phi] = iC[E_0\phi] と変動成分のみが残留スペックル像として観測されること$ になる。天体観測では、ミラーやレンズの表面粗さ等がスペックル像を生じさせ、高感度観測の妨げになる が、本研究はこのスペックル像からプラズマの電子密度揺動を捕らえようという発想である。 開発·実験結果

図 2(a) に PANTA に設置した受光光学系を示す。写真上部の真空窓の対向面にも同じ真空窓があり、 その外側に Nd: YAG レーザー及びレーザー径拡大光学系の架台を別途設置している。



図1 光渦マスクを用いた平面波成分除去した電子密度揺動計測の概念図



図2 (a) 光渦マスク揺動計測の受光光学系。写真上部の PANTA 装置をはさみ、光源レーザー光学系と写真の受光光学系 の二つの光学系から構成される。(b) 観測されたスペックル像。赤点線部分にプラズマ揺動によるものと考えられるスペックル輝 点が見られる

図 2(b) が今回得られたスペックル像である。真空窓での多重反射等による静的な収差や、レーザー光 口径より小さいサイズの気流などの影響を受けていると思われる動的や波面変動を抑制する必要があると 考えられるが、赤点線で囲んだ部分に、プラズマによると思われる輝点が見られた。 まとめと今後の予定

平成28年までのシャックハルトマン波面センサーと比較し、ゼロ次光を大幅に抑制し、プラズマによる変動成分のみを計測する目的で、光渦マスクを波面センサーに導入した。これは天体観測で利用される光渦マスクが、平面波成分のみ消去して変動成分が残ることを、プラズマ計測上はメリットとして利用した試みである。初期的な計測ではプラズマの寄与と解釈できる信号が得られた。今後は、レーザー光口径より小さいスケールの気流の影響などを抑え、より高精度な計測を実施してプラズマの電子密度揺動手法としての性能を評価する予定である。

## 研究組織

研究代表者:秋山毅志(核融合研)、早野裕(国立天文台)、服部雅之(国立天文台)、村上尚史(北海道 大学)、玉田洋介(基生研)

研究協力者:居田克巳(核融合研)、稲垣滋(応力研)

# 複雑ネットワークの手法を用いた 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中に形成されるドリフト波乱流の物理的性質を詳 細に理解することが必要であり、そのためには、プラズマ流体の圧力・密度・温度・電位等の物理諸量が生み 出す膨大な時系列データを詳しく解析しなければならない。近年、本研究課題代表者(谷澤俊弘)および研究 協力者(中村知道・兵庫県立大学)によって、時系列データを統計モデル化した後、ネットワークとして視覚 化することによって直観的に理解する新しい手法が開発された。本研究は、この手法を磁場閉じ込めプラズマ 中のドリフト波乱流の大容量時系列データの解析に応用し、そこから物理的情報を抽出する全く新しい手法を 開発することを目的とする。

## 2 現在までの研究結果

本研究は 2012 年に谷澤と中村によって得られた時系列データのネットワーク化手法 [1] を円筒形直線型プラ ズマ内ドリフト波乱流の観測およびシミュレーションから得られる時系列データに適用するものである。この 手法では,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データ x(t-1), x(t-2), ... とラ ンダムノイズ  $\varepsilon(t)$  を用いて

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

と線形モデル化する。ここで、パラメータ  $a_0, a_1, \ldots, a_w$  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、いくつかの時間遅れ項  $x(t - l_1), x(t - l_2), \ldots, x(t - l_w)$  から最適な部分集合を選び 出すものとして決められる。この手法は Reduced Auto-Regressive Model (RAR) と呼ばれている。RAR モ デルは時系列データが持つ周期をその時間遅れ項の中に必ず含むことがわかっている。

昨年度は、直線円筒型プラズマ内のドリフト波乱流の測定から得られた全 64 チャンネルの時系列データの うちの、いくつかを抜き出し、それぞれを単一の時系列データと見て RAR モデル化し、そのモデルにあらわ れる非自明な時間遅れ項は、周波数に直して、0.897[kHz]、0.962[kHz]、2.00[kHz]、3.22[kHz] に対応する周期 の振動に対応することを見出した。

lag	period $[\mu s]$	frequency [kHz]
31	310	3.22
50	500	2.00
104	1040	0.962
111.5	1115	0.897

RAR モデリングは多変数の時系列データにも用いることができ,このネットワークを用いた可視化法は多 次元の時系列データ解析にも有効であることがわかっている [2]。本年度は、プラズマ乱流の各チャンネル間 の関係性を明らかにするために,RAR モデルの手法を多変数時系列データに拡張するための基礎考察を行った。多変数に拡張された RAR モデルは,

$$x_i(t) = a_{i,0} + \sum_{j=1}^N \left( \sum_{k=1}^{w_j} a_{i,j,k} \; x_j(t-l_k) \right) + \varepsilon_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$
(2)

で表わされる。ここで, *j* = 1,2,...,*N* はチャンネル数である。本年度は,我々の手法が,相互相関関数による方法等を含むいくつかの既存手法に比べ,どのような利点があるのかについての基本的考察を行ってきた。 また,RAR モデルの時間遅れから得られる「周期」が離散フーリエ解析のパワースペクトル等から得られる 「特徴的な周波数」とどのような関係にあるのかを理解するため,RAR モデルが生み出す時系列データと 1/f ノイズに代表されるブロードなスペクトル分布との関係についても解析を行っている。これらの内容について は、単なる既存手法の適用ではなく、手法の基本原理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、今後も手法開発を着実に進めていきたい。

## 3 今後の研究の方向について

現在,多変数 RAR モデリングの方法を 64 チャンネルのプラズマデータに適用すべく,数値計算の準備を 行っている。多チャンネルであることで最適モデルを選び出すために多くの計算時間が必要となるため,高速 な計算機の使用やアルゴリズムの最適化等が必要となる。現在,多変数 RAR モデリングを用いた予備計算に より,カオスを生み出すモデルであってもチャンネル間の関係性がうまく抽出できる例があることは確認して いるが,この手法をさらに確実なものとし,その適用範囲を広げていくために,チャンネル数,ノイズレベル, 非線形性等に対する頑強性の考察も重要となると考えられる。

## 4 研究成果発表

- Toshihiro Tanizawa, Tomomichi Nakamura, and Michael Small, "Constructing networks from multivariate time series data", First International Summer Institute on Network Physiology (ISINP), Lake Como School of Advanced Studies, Como, Italy, July 24-29, 2017
- Toshihiro Tanizawa, Tomomichi Nakamura, and Michael Small, "Constructing directed networks from multivariate time series via linear modeling technique", International School and Conference on Network Science (NetSci2017), JW Marriott Indianapolis, Indianapolis, IN, USA, June, 21-23, 2017

## 参考文献

- Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: "Networks with time structure from time series," Physica A, Vol. 391, pp.4704-4710 (2012).
- [2] David M. Walker, Antoinette Tordesillas, Tomomichi Nakamura, and Toshihiro Tanizawa: "Directed network topologies of smart grain sensors," Physical Review E, Vol. 87, 032203 (2013).

## 極限プラズマ科学研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2:極限プラズマ科学の新研究手法の開発」における個別課題の成果の 統合を議論する。

目的と背景

現在、極限プラズマは、半導体プロセス、医療応用、宇宙開発(特に人工衛星)、核融合 等、様々な分野で発展しており、それらを包括する学術基盤の形成は近未来の技術革新に とって非常に重要である。極限プラズマ科学はプラズマの非平衡性、極限的な性質の理解 を通し、流れの駆動など様々な産業に応用する為の基盤を与える。本研究では、研究集会 を開催し、特定研究2のサブテーマリーダーが一堂に会して、それぞれの領域で発展して きたプラズマ科学の中から共通な機構や課題を抽出するための議論を行う場を提供する事 を目的とする。プラズマ科学の多方面からの研究者が一堂に会して議論し、個別のアプロ ーチを統合することで、極限プラズマの研究手法そのものに新展がもたらされることが期 待できる。本研究で取り組む課題はプラズマ乱流に限らず、医療やナノ粒子生成等多くの 先端科学における共通の課題であり、応用力学研究所の共同研究として遂行し先導する事 が必要である。

## 研究集会の開催

2018 年 2 月 27 日に応用力学研究所 2F 会議室において研究集会を開催した。研究会のプロ グラムを添付する。

## 予算の執行

予算は研究集会参加の旅費に執行した。

研究集会のまとめ

基礎プラズマにおける乱流の絶対計測技術の進展、基礎プラズマ/トロイダルプラズマにお ける乱流イメージング法の開発、ソーシャルネットワーク科学に用いられるビックデータ 解析手法に関してその成果を発表し情報交換及び討論を行った。以下に主な成果を記す。 ソーシャルネットワーク科学の時系列データ解析手法が紹介された。自己回帰モデルでは 全てのタイムラグに対し結合係数が決められるが、そこにスパース性を導入し結合係数 0 を許す解析(縮小自己回帰モデル)を行うことで、影響のあるなしを明確にすることができ る。更にこのモデルを多変数系に拡張した。興味深い点は、ある因果関係を持つテストモ デルから生成した多変数時系列データでた影響が無いはずの二つの時系列に相関が現れる ことがある事である。相関解析からは元のモデルを推定することができないが、縮小自己 回帰モデルでは因果関係を特定できる。これらから縮小自己回帰モデルは疑似相関に対し て強い手法と期待できる。本手法より、これまで明確でなかった因果関係が議論できる。 新たなプラズマ研究法としての期待が高まった。

LHD ではディジタル相関 ECE がルーティン的に稼働し始めており、重水素実験において 大量にデータを取得できた。ディジタル ECE 計測により従来の数 cm の空間分解能が電子 ラーマ半径と同程度の 3mm まで増加した。これにより数 kHz の MHD 揺動の固有関数がよ り高い解像度で得る事ができる。100 kHz 程度の乱流揺動を計測するには相関解析するた め長い時間幅が必要になる。そこで ECE の中間周波数帯域信号の帯域を 5 GHz 程度に狭め サンプリング周波数を落とし長時間のデータ取得を行うというアイデアが議論された。実 験条件を調整することで捕捉電子不安定性観測が期待できる。

レーザーによる揺動計測に関して多くの議論がなされた。トリプルグレーティング分光器 を用いてトムソン散乱により PANTA プラズマの温度、密度の径方向勾配が得られた。併せ て PANTA プラズマの 10 kHz の揺動振動の位相情報を相関関数により抽出した。トムソン散 乱用の YAG レーザーは 10 Hz で繰り返すが、多くの放電(200 回)でレーザー入射タイミン グと 10 kHz 揺動の位相を同時に計測することで密度と温度の揺動位相依存性が得られる。 ここから密度揺動成分は温度揺動成分に比べてかなり大きい、温度揺動振幅の統計誤差が 大きく精度を高めるには更なる放電が必要である、事が分かった。新たなレーザー計測と してベクトルトモグラフィーが提案された。これは線積分吸収分光からイオン分布関数の 構造を推定しようとするものである。イオンに巨視的な流れがある場合、同じ地点におい てもイオン分布関数はドップラーシフトにより視線によって異なる。このようなベクトル 場を再構成する手法がエンジンの炎の計測等で開発されており、これをプラズマ流れ場の 計測に応用する。この手法はプラズマ内の様々な乱流ベクトル場(電流、磁場、電場)のト モグラフィー計測にも応用可能と期待できる。特に本特定研究のサブテーマで開発中のレ ーザー光渦計測と組み合わせた乱流速度場計測のアイデアが議論された。

## プラズマ流れ場構造観測に関する統合的研究

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 居田克巳

## <u>目的</u>

プラズマの流れ構造は周辺プラズマの制御やコアプラズマの閉じ込めに重要な役割を演 じている。近年、プラズマ平行流は磁気面の統計化により予想よりもはるかに強く減衰す る事が明らかになったように、プラズマの流れ構造を決めている物理機構は多様である。 このためプラズマ流れ構造形成機構を理解する為には流れ場の観測に加え、平衡圧力分布、 乱流揺動、磁場揺動等、同時かつ多点(多次元)で行う事が必須である。応用力学研究所の 直線装置 PANTA ではプラズマ平行流の計測を行っている。同時に静電揺動も観測してお り、流れ構造に関する統合的計測が可能な実験装置である。そこで本研究では様々な信号 の中からイオン流速に相関のある物理量を抽出する手法を開発する事を目的とする。本手 法の進展により、プラズマ流れ場構造観測に関する統合的研究が可能となる事が期待され る。

本研究では昨年度に、流れ場計測に重要なイオン分布関数の計測でプラズマ小崩壊現象 に伴うイオン分布関数の歪みを発見するという成果をあげ、核融合科学研究所において記 者発表を行っている。このため応用力学研究所の共同研究として継続し、更に成果を上げ る事は必須である。

## PANTA における流れ形成

九州大学直線磁化プラズマ装置ではマッハプローブにて磁力線に平行方向の流を計測し ている。図は中性密度を変化させた際に PANTA で形成される密度分布(左)と平行流分布 (右)を示す。中心部に密度分布の急峻化を伴う大きな平行流と平行流シアの形成が観測さ れた。特に中性ガス圧を高くした際に密度分布の急峻化が顕著に現れる。またこの時、平 行流はプラズマ周辺部では逆転流(エンド部からソース部へ向かう流れ)になる。プラズマ 乱流によるレイノルズ応力を評価すると、中心部の流れシアは乱流が駆動している事が明 らかになった。しかし周辺部では乱流は逆転流からエネルギーを受け取っていると考えら れる。この逆転流の駆動源の同定は今後の課題である。



図 PANTA において観測された密度及び平行流(マッハ数)の径方向分布

プラズマの突発性

今年度は、昨年度観測した核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置 LHD における小崩 壊現象について、その前兆現象を捉える事に成功した。崩壊現象ではイオンの分布関数が 歪み緩和する。分布関数の1次モーメントである巨視的流れも影響を受けるため、プラズ マ流れ構造形成機構を理解する為にはこの崩壊現象の理解も重要である。

LHD プラズマでは、崩壊現象が起こるかなり前からプラズマの変形が現れる。この変形 は共鳴モード(外部から与えられる力がある周波数で共振する事で起こる振動現象)と呼ば れ、プラズマ全体に広がる。この共鳴モードは崩壊現象に結びつくことはなく、むしろ崩 壊現象に至るほどエネルギーがプラズマ中に蓄積されるのを防ぐ役割を担っている。そし て、この共鳴モードが一瞬停止してしまうと、その次の瞬間に、非共鳴モード(共振周波 数を持たず振動することもなく、一気に成長する現象。破断など。)による変形が成長し て、一気にプラズマの一部が失われるという崩壊現象が突発的に起こることを発見した。 非共鳴モードによるプラズマの歪みは一ヶ所に集中する。この非共鳴モードによるプラズ マの歪みを観測することで、突発現象の発生を直前に予測する事ができる。このように、 突発現象の直前に起こる「トリガー」(引き金)をうまく捉えることで、現象の直前予測 が可能であるということが明らかになった。

自然や社会では、「いつ起こっても不思議はないが、いつ起こるかを予測することが難 しい」現象が数多く観測されている。火山噴火、集中豪雨、太陽フレア、経済危機などが その例で、これらは突発的に発生する。このような突発現象の予測は物理学における大問 題の一つであり、様々な突発現象に関わる物理過程を、様々な分野の研究者が集まって比 較することで、突発現象を普遍的に理解し、その予測に結びつけようという新しい研究が 始まろうとしている。

## 成果の評価

プラズマの突発現象の前兆を捉えた事は、突発現象の理解・予測という点で、大きな成 果と考えられる。これらの成果をまとめた論文が Scientific Reports 8 (2018) 2804 に掲載さ れた。論文発表に合わせて、核融合科学研究所でプレスリリースを行った。本成果は国内 の新聞のみならず、海外のインターネットメディアにも取り上げられるなど、国際的にも 高い評価を受けた。自然現象や社会に見られる多くの突発現象の研究に、重要な指針を与 えると考えられ、3 月 22 日から東京理科大学で開催される日本物理学会の「突発現象の科 学」シンポジウムでも発表された。

#### 論文

https://www.nature.com/articles/s41598-018-21128-z

核融合科学研究所プレスリリース http://www.nifs.ac.jp/press/180213.html

#### 研究組織

居田克巳	核融合科学研究所
小林達也	核融合科学研究所
稻垣滋	九州大学応用力学研究所

## 直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析

九州大学 基幹教育院 山田 琢磨

## 1. 目的

プラズマ乱流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 ール構造のストリーマーやゾーナルフローは径方向輸送に大きな影響を与えるため、その発生機構を研 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。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。九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 LMD-U では、ストリーマーと、その構造 形成に重要な役割を果たす媒介波が世界で初めて発見された。計測は周方向静電プローブアレーと径方 向駆動プローブによって行われ、相関解析により直線プラズマの2次元円断面内においてストリーマー 構造は周方向に自己収束し、径方向に伸びた構造を持つことが分かり、また媒介波は径方向に節を持つ 構造であることが分かった。ところがストリーマー構造・媒介波・ストリーマーを形作る搬送波の軸方 向構造と三者の関係については詳しい解析は行われていなかった。そこで本研究では軸方向に並んだプ ローブを用い、相関解析をすることでストリーマー構造・媒介波・搬送波の軸方向構造について解析を 行った。さらにストリーマー構造の包絡線を調べることによって、結果の妥当性を確認した。

#### 2. 実験方法

直線プラズマ実験装置 LMD-U を用いてストリーマー実験を行い、多数の静電プローブでイオン飽和 電流(電子密度揺動)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)についての3次元的空間構造を明らかにした。LMD-U は軸方向の長さが z = 3740 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、ドリフト波乱流が非線形結合を通してストリーマ ー構造を形成する。このとき中心部の密度は10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>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 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詳細で精度の良い乱流の 2次元フーリエスペクトルを観測し、プラズマ内に発生す る揺動の周方向モード数を特定した。また、軸空間構造を解析するために軸方向 z = 1625 mm と 1375 mm、 半径 r = 40 mm の位置でも同時に計測を行った。ストリーマーの搬送波となるドリフト波や、構造形成 に関わる媒介波は個々がある周方向モード数と周波数を持つ単一の揺動であるため、これらの構造解析 には相互相関解析を用いた。2 つの揺動のクロススペクトルの位相情報はこれらの位相差を表すので、 ある参照波を基準として用いれば揺動の位相構造が特定できる。ストリーマー自体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。つまり搬送波が形作る包絡線 構造は媒介波と同じ周方向モード数と周波数を持つことになる。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えばよい。 この場合、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。

また、バイスペクトル解析で得られた結果(ストリーマー構造の軸方向モード数など)の妥当性を確認するために、自己収束した構造体であるストリーマー構造の包絡線を求め、同時刻での各測定点での ストリーマー構造の包絡線を直接比較した。包絡線の抽出には、長時間平均を引くことであらかじめ低 周波数成分を除去した後に、ヒルベルト変換を用いた。

#### 実験結果と考察

LMD-U にストリーマーが発生している状 態(磁場 0.09 T、圧力 1.5 mTorr)でz=1885 mm, r=40 mmの周方向64 チャンネルプロー ブと、z=1625/1375 mm, r=40 mm, 周方向角 度0の合計3つのプローブを用い、ストリー マーの包絡線構造、媒介波、搬送波の軸方向 位相構造を観測した。媒介波は周方向モード 数  $m_1 = 1$ ,  $f_1 = -1.2$  kHz で、径方向 r = 30 mm に節構造を持つ波であった。搬送波には、ド リフト波の中から代表として振幅が強く媒 介波との結合が強い m<sub>2</sub> = 2, f<sub>2</sub> = 7.8 kHz の波 と $m_3 = 3$ ,  $f_3 = 6.6$  kHzの波を選んだ。ストリ ーマーの包絡線の位相構造を求めるために、 周方向 64 チャンネルプローブで媒介波を測 定し、残りの軸方向に並ぶプローブで搬送波 を測定した。結果として、媒介波とストリー マーの包絡線構造はともに位相差が軸方向 にほぼ 0 で、軸方向モード数 n がともに 0 であることが示された。一方、搬送波につい ても相互相関解析により軸方向構造を求め ると、結果は軸方向モード数がともに n=-1



図 1. (a) *z* = 1885mm, (b) *z* = 1625mm, (c) *z* = 1375mm に おけるストリーマー構造の時間発展(低周波成分除去 後)とその包絡線。(d) (a)–(c)の包絡線を重ねたもの。 軸方向に位相が、搬送波は変化しているが、ストリー マー構造(包絡線)は変化していないことが分かる。

と求まった。ここで負のモード数は、装置のエンド側からソース側へ向かう伝播方向である。これらの 結果は、媒介波と搬送波が軸方向モード数についての3波結合条件(*n*:0-1=-1)を満たすことからも、 妥当と言える。佐々木(研究協力者)の数値研究によると、搬送波の軸方向モード数が*n*=-1であるこ とは軸方向シアフローの影響であると示唆されており、これについての検証が今後の課題である。

さらに結果の妥当性を確認するために、軸方向に並んだ各測定点でのストリーマー構造の包絡線を同時刻で直接比較した。図1に示すように、搬送波の位相は軸方向で変化するが、ストリーマー構造の包絡線の位相は軸方向で正確に一致した。以上のことから、ストリーマーの包絡線構造と媒介波は軸方向モード数 *n* = 0を持つのに対し、搬送波は広い周方向モード数・周波数領域で軸方向モード数 *n* = -1を持つことが明らかになった。

## 4. 研究成果報告

- T. Yamada, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Nagashima, F. Kin, H. Arakawa, T. Kobayashi, K. Yamasaki, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, K. Itoh and S.-I. Itoh, "Three-Dimensional Structure of the Streamer in Linear Plasmas", Phys. Plasmas 87, 034501 (2018).
- [2] 山田琢磨, 稲垣滋, 佐々木真, 永島芳彦, 金史良, 挾間田一誠, 荒川弘之, 小林達哉, 山崎広太郎, 糟谷 直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英, 伊藤公孝, 伊藤早苗, "PANTA におけるストリーマーと媒介波の三次元構造", 日本物理学会 第73回年次大会, 東京理科大学, 23aK608-8, (Mar 22-26, 2018).

## 5. 研究組織

研究代表者:山田 琢磨(九州大学基幹教育院) 研究協力者:稲垣 滋、佐々木 真(九州大学応用力学研究所)、小林 達哉(核融合科学研究所)

## イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメゾスケール構造の解析手法の開発

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 大舘暁

#### 目的

プラズマの揺動の情報を含んだ可視光の放射イメージの解析からプラズマの揺動の性質を調べるの が本共同研究の目的であり、PANTA 装置のプラズマからの可視光の放射を高速度カメラで計測したデ ータを解析対象とする。

## はじめに

直線型のプラズマ閉じ込め装置 PANTA で観測される乱流揺動の周波数スペクトルには、多数の小さなピークが見られる。ドリフト波の分散関係から予想される周波数と波数を持つ波と他の波との相互作用からこのような複雑な構造を持つスペクトルが生み出されると考えられている。画像計測でモード分解して時間変化を追跡すると、図1に示すように、コア部と周辺部の回転速度・方向の違いが複雑性を大きく助長しているように見える。



図1 m=3のモード数を持つ揺動のパターンの例

このような内側と外側の回転速度の違いは径方向のモードの広がりを抑制している可能性 があり、この観点で揺動データの解析を行った。

#### 解析

今回解析したデータセットは、図2に示すような周波数スペクトルを持っていて、 1.1kHz の m=1,2 のモードの振幅が最も大きい。周辺部と、ややコアに近い領域での揺 動の回転角の差(m=1,2,3 の3成分)と、各モードの振幅(m=1,2,3 の周辺部、コア部)を 使って主成分分析を行った(表 1)。最も相関の大きかった成分1の時間変化を図2に示す。 これは全モードの振幅に強い相関がある成分であり、1.1kHz のモードの回転角と比べる と、モードの振幅が最低次のモードの回転で変調されているように見える。2番目に大き な成分は、モードの振幅情報と位相に弱い相関があることを示している。特に、m=2の内 外の位相と相関がある。

モードの内部と外側の位相差は、m=1,では顕著ではないが m=3のモードは頻繁に位相

差が変化している。位相差がπを超えるような大きな変化が頻繁におきていて、画像デー タに観測される回転方向の反転に対応しているものと思われる。m=2のモードの位相差の 変化はそれほど大きくはないが、全モードの振幅と同様に、最低次のモードの回転に応じ て変化しているようであり、モードの振幅の変化に弱い相関があるようである。モード間 の非線形のカップリング情報と、このシアーの情報の相関も調べたが、ほとんど相関は見 られなかった。

画像解析によって、内外の回転の位相差と、モードの振幅との関係を定量的に調べるこ とができた。シアーの影響はそれほど大きくないが、m=2の内外での回転速度の差と全体 の揺動の振幅には弱い相関があることが分かった。



図3:主成分分析の最大成分(成分1)の振幅と、1.1kHzの回転モードの位相。



図4 m=2, m=3 のコア部と周辺部の回転の位相差。1.1kHzの回転モードの位相情報も 赤線で示した。

		m=1 phase	m=2 phase	m=3 phase	m=1 core amp	m=2 core amp	m=3 core amp	m = 1 edge amp	m=2 edge amp	m=3 edge amp	W
	1 m=1 phase	0.0938587	-0.120758	-0.0205173	0.402022	0.410164	0.397644	0.408948	0.420742	0.379404	2.09978
	2 m=2 phase	0.565351	0.587264	-0.35283	-0.269779	0.0387288	0.100615	-0.215171	0.134247	0.24957	1.07605
	3 m=3 phase	0.14897	-0.476936	-0.831043	0.073417	-0.0557637	-0.118488	0.0737002	-0.0273464	-0.176033	1.00076
	4 m=1 core amp	0.786715	-0.414901	0.422432	0.0256751	-0.107865	-0.0913007	0.0200818	-0.0531917	-0.0813975	0.9451
	5 m=2 core amp	0.14461	0.465471	-0.0123864	0.431906	0.0874204	-0.394908	0.403099	0.0337735	-0.498502	0.8071
	6 m=3 core amp	0.0513814	0.152169	-0.068321	0.261353	-0.582788	0.38997	0.322637	-0.515195	0.199982	0.7646
	7 m=1 edge amp	0.0598188	0.0258639	0.00151034	-0.0950785	0.267765	0.687685	-0.114283	-0.137359	-0.640449	0.4038
	8 m=2 edge amp	-0.0534788	-0.00950332	0.0341037	-0.465039	-0.465614	0.114342	0.439899	0.559914	-0.206737	0.271055
	9 m=3 edge amp	0.0216012	-0.018686	-0.00461182	-0.528581	0.42396	-0.123967	0.554503	-0.449932	0.121419	0.26208

表1 主成分分析の結果

# デジタル相関 ECE 計測の開発とプラズマ実験への適用

核融合科学研究所 土屋 隼人

## 1. 要旨

開発中のデジタル相関 ECE 計測を LHD 実験に応用するべく、高速デジタイザーのシ ーケンシャルモードを開発した。開発中の同計測はデータ量が大きく、また LHD で使われて いるデジタイザーと異なるため、データ収集系の独自開発が必要であったが、およそ3分周 期の実験シーケンスの間にデータの収集と代表的な電子温度揺動スペクトラムが提供できる ようになった。

#### 2. 序論

様々な実験研究の計測にとって、高空間分解能かつ高時間分解能で現象を観測する ことは一つの夢である。大抵の場合、空間分解能や時間分解能は測定器のハードウェアの性 能で決まり、実験準備の段階でそれらは決められてしまう。実験後に解析を進めていくうち に、時間分解能を高めたいことや空間分解能を高めたいことがあるが、実験準備で見積もっ た分解能以上は実現できない。プラズマ研究においても同様で、乱流のようなスケールが小 さく現象の時間スケールも小さい現象を観測する計測器が望まれている。

## 3. デジタルコリレーションECE原理と解析手順

LHD のような大型のプラズマ実験装置では、磁場強度と電子温度領域の関係から、電子サイクロトロン放射(ECE)計測が利用できる。ECE の周波数帯は装置の磁場強度に比例するが、LHD の場合 50GHz 以上である。ECE を検波するためにヘテロダイン検波を行うと、その中間周波数帯(IF: Intermidiate Frequency)は通常ギガヘルツ帯であるので、従来はアナログ周波数フィルター(BPF)を使って周波数分離を行い、分離した各周波数のパワー検波し

ていた。本提案手法では、IF を直接 デジタイジングし、IF 波形をデータ として保存する。これにより、離散 化された IF 波形をフーリエ変換する ことで、IF の分光スペクトルを得る ことができる (デジタル分光)。デジ タル分光は動きがすくない現象に対 して使われることがあるが、プラズ マ実験ではヘルツ(Hz)からメガへ ルツ(MHz)の揺動を観測することが 目的であるので、IF スペクトルの時 間変化が意味を持つ。IF スペクトル



図1. フィルターバンク型とデジタル相関 ECE の 分解能の比較

に分割し、そのタイムウィンドウ内の波形をフーリエ解析する。タイムウィンドウの幅(長 さ)が温度揺動計測の時間分解能に相当する。しかし、IFスペクトルは離散化ノイズが含ま れているので、適当な平滑化する必要がある。平滑化には時間領域(time domain)の平均化と 周波数領域(frequency domain)の2種類が考えられる。時間領域で平滑化するということは 複数の IF スペクトラムを解析に使うので、時間分解能を犠牲にすることになる。また、周波 数領域で平滑化することは、IF 周波数の分解能(プラズマ計測的に言えば径方向空間分解能) を荒くすることに当たる。なお、周波数領域の平滑化の時の周波数の幅は、従来のアナログ の BPF の使う方法の帯域幅に相当する。これが、解析の際に時空間分解能を調整できる原理 であるが、時空間分解能をよくすればその周波数帯のパワーを減らすことになりいくらでも よくできるわけではない。これはカメラのレンズのf 値と光量の関係に似ている(今回の計

測ではレンズ径は一定)。空間分解能について は電子ラーマー半径程度にすることが妥当で あると考えられる。このように帯域幅を決め、 複数のその周波数帯のパワーの時間変化が電 子温度の時系列データになる。図1にフィル ターバンク型と本計測の分解能の比較を示す。 フィルターバンク型では分解能が20mm で固 定であるが、本計測手法では一例として 3mm を示した。

さらに、多チャンネルの時系列データから さらにノイズ成分を落とす相関 ECE が適応で きる。とくに空間分解の良さから空間相関の 手法が適している。以上の処理は比較的単純 であるが、データ量の多さから時間を要する。 実験シーケンスの放電間に行い、効率的な実 験ができるよう解析プログラムの並列化と最 適化を行なった。図2に模擬データを用いた



図 1.並列化処理による解析速度の上昇. 縦軸:解析処理時間,横軸:データ量, omp(Open MP)による処理の並列化

解析処理時間とそのデータ量の関係を示す。使用した CPU は Intel Xeon processor ×2 (2.4GHz 6core, 12core, 24 thread),メモリーは 8Gbyte×8 である。データ量が少ない場合、 データの分割と CPU 間の通信と同期に時間がかかるため逐次処理の方が早いが、データ量が 大きくなると並列化の効果が大きくなり、実際に実験で使うデータ量では、処理時間が10 分の1に程度になり、放電間の解析に目処を立てることができた。

## 参考文献

\*1. Hayato TSUCHIYA, Sigeru INAGAKI<sup>1,2)</sup>, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA and Yoshio NAGAYAMA, Plasma and Fusion Research Volume 9, 3402021 (2014)

\*2 Hayato TSUCHIYA, Shigeru INAGAKI, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA, Yoshio NAGAYAMA, LHD Experiment Group, Plasma and Fusion Research Volume11, 2402072 (2016)

# バイスペクトル解析による電子温度勾配モードと低周波揺動 の非線形結合過渡応答特性解明

東北大学 大学院工学研究科 金子 俊郎

## 1. 目的

電子温度空間勾配(ETG)を自在に制御できる新たな装置を開発し,核融合プラズマ閉じ込め装置での異常輸送の新たな要因として注目を集めている「電子温度勾配不安定性(ETG モード)駆動乱流」の発生メカニズムとそれに伴う輸送現象を解明することを目的とする.特に,電子密度勾配,空間電位勾配等を重畳することによって励起される低周波揺動との非線形相互作用によって, ETG モードのエネルギーが移送されるメカニズムを明らかにすることを目指す.本研究では,MHz 領域の高周波揺動と kHz 領域の低周波揺動との非線形相互作用を調べるために,大容量のデータを 取得する必要があるとともに,その解析手法もバイスペクトル解析をはじめとして多岐にわたるた め,応用力学研究所との共同研究として遂行する.

## 2. 実験方法

本実験は東北大学 QT-Upgrade 装置を用いて行う.アルゴン(Ar)を作動ガスとした電子サイク ロトロン共鳴(ECR)放電によって磁気ミラー領域(共鳴磁場強度 2.14 kG)で高電子温度(3-4eV) のプラズマを生成し,グリッドを通して実験領域に流入させる.一方,装置右端に配置したタング ステン電極を 2000 以上に加熱することによって低温の熱電子(約0.2 eV)を生成し,半径方向 位置に対応してこれらの重畳割合を制御することによって,径方向の電子温度勾配を形成する.電 子温度のみの空間勾配を制御し,周波数が数 kHz から数 MHz の範囲で,電子温度勾配が存在する 領域と存在しない領域で,発生する不安定揺動(ETG モード)の違いがあるかどうかに注目する. また,イオンスケール揺動(f~7 kHz)に伴う径方向粒子輸送計測を行い,ETG モードとの非線形 相互作用を調べる.このとき,取得した大容量のデータを応用力学研究所に持ち込み,径方向粒子 輸送解析,バイスペクトル解析を行う.

## 3. 実験結果及び考察

上記の装置を用いて,電子温度勾配の大きさ( $T_e$ )を制御 し,プラズマパラメータ,揺動特性,径方向粒子束の半径方 向分布の計測を行った.これまでの実験結果から, $r \sim 1.5$  cm で電子温度勾配, $r \sim 2.5$  cm で電子圧力勾配が大きいことが 分かっている.図1に(a)空間電位  $\phi_s$ ,(b)低周波揺動( $f \sim 7$ kHz)強度の半径方向分布を示す. $T_e$ の値に関わらず, $r \sim 2.0$  cmでE×Bドリフトフロー速度シアが大きいことがわか った.低周波揺動に関しては,電子温度勾配が小さい $T_e = 0.53$  eV/cmのときと比較して, $T_e = 1.23$  eV/cmの場合に は,r = 1.5 cm での揺動強度が増大した一方,r = 2.0 cm で は揺動強度が減少することが観測された.電子密度揺動と電 位揺動の位相差計測をすると $T_e = 1.23$  eV/cmの場合のr = 1.23 eV/cmの



図 1: (a)空間電位  $\phi_s$ , (b)低周波揺動 強度の半径方向分布.



相差の半径方向分布。



2.0 cm の位置でのみ 90 度よりも大きくなり, r = 1.5 cm で励起された揺動とは異なるモードであることが示唆される結果を得た(図 2).また,図3にr = 2.0 cm におけるバイコヒーレンス解析の結果を示す.  $T_e = 1.23$  eV/cm のとき,ETG モードと  $f \sim 7$  kHz の低周波揺動が非線形結合していることが観測された.

これらの結果から,  $T_e$ がある閾値を超えたとき,r = 1.5 cm ではドリフト波モードが ETG モードからのエネルギー移送によって成長し,r = 2.0 cm ではフロー速度シアに起因するフルートモ

ードが ETG モードからのエネルギー移送によって成長す ることで,ドリフト波モードが減衰した可能性が高いこ とが分かった.図4 に低周波揺動に起因する径方向粒子 束の半径方向分布を示す. Te=0.53 eV/cm のときは r= 0.0~2.0 cm では強い粒子輸送現象は観測されなかったが,

 $T_{e}$ = 1.23 eV/cm のとき r= 1.5 cm では外向き, r= 2.0 cm では内向きの粒子輸送現象が観測された.これらの結果から,ドリフト波モードとフルートモードのように異なるモードが共存する場合に,ドリフト波モードによる外向き粒子輸送に対抗して,フルートモードが内向き粒子輸送を起こすことが明らかとなった.



図 4: 低周波揺動に起因する径方向 粒子束の半径方向分布.

## 4. 研究組織

金子 俊郎, 児玉 佳季, 畠山 力三(東北大学), 稲垣 滋(九州大学)

## 5. 研究成果報告

- 1) 児玉佳季,酒井優,金子俊郎,"電子温度勾配駆動プラズマ不安定揺動に起因する径方向粒子 輸送と構造形成",日本物理学会第72回年次大会、大阪大学(大阪府豊中市),2017年3月17 ~20日.
- 2) 児玉佳季,金子俊郎,"電子温度勾配駆動不安定性に起因する径方向粒子輸送の方向反転機構 解明",Plasma Conference 2017,姫路商工会議所(兵庫県姫路市),2017年11月21~24日.
- 3) 児玉佳季,稲垣滋,金子俊郎,"直線プラズマ装置における不安定揺動誘起径方向輸送に対する電子温度勾配の効果",日本物理学会第73回年次大会,東京理科大学〔千葉県野田市),2018年3月22~25日.

平成 29 年度 応用力学研究所 特定研究(2) 申請 報告書

# 研究課題名

# 直線ヘリコンプラズマにおける 径方向構造のトムソン散乱計測 Thomson scattering measurements of radial structures in a linear helicon plasma

平成30年2月28日

富田健太郎(九大総理工)、内野喜一郎(九大総理工)、稲垣滋(九大応力研)

## 要旨

直線ヘリコンプラズマ装置 PANTA では、運転条件により、通常では見られないイオン飽 和電流揺らぎの周波数特性を示す。本研究では昨年度までにレーザートムソン散乱法によ り、PANTA プラズマの電子密度 (*n*<sub>e</sub>)・電子温度 (*T*<sub>e</sub>) 径方向分布が広範囲 (50mm) かつ高 分解 (0.1mm) で取得可能であることを示した。今年度は PANTA で見られる特異なイオン 法電流の周波数特性と、*n*<sub>e</sub>, *T*<sub>e</sub>の周波数特性の関連を、トムソン散乱を位相分解計測するこ とで調査した。計測の結果、*n*<sub>e</sub> はイオン飽和電流と同期して増減することが明らかとなっ た。

#### 序論

プラズマの応用研究は、核融合を目指した磁場閉じ込めや半導体プロセス、高出力光源や 農業・バイオ応用など、広範に渡っている。ヘリコンプラズマは比較的容易に生成する事が 可能であり、磁化プラズマ乱流やプロセスプラズマの基礎過程の研究に利用されてきた。応 用力学研究所の直線プラズマ乱流装置 PANTA においてヘリコンプラズマ中に乱流を励起 し、乱流が輸送に与える影響を観察している。PANTA ではプラズマの計測にはプローブ法 や分光法が用いられてきたが、乱流駆動輸送のより定量的な評価を行うためにはプラズマ の温度と密度の径方向分布を高精度に計測し、勾配と流束を評価する事が必須である。さら に PANTA では運転条件により、特定の周波数でのプラズマ揺らぎが増大することが観測さ れており、その場合の *n*<sub>e</sub>, *T*<sub>e</sub>を得ることも求められている。

トムソン散乱計測はプラズマに与える擾乱が小さく、かつ高精度に温度と密度が計測可 能である。すでに行われているプローブ計測の結果から、電子密度・電子温度の範囲はそれ ぞれ10<sup>19</sup>m<sup>-3</sup>、数 eV と予想された。このようなプラズマに対しては、0.1 J クラスの小規模 な可視光レーザーをプローブとした、比較的簡易なシステムでトムソン散乱計測が可能で あると予想された。これまでに PANTA プラズマに可視プローブを用いたトムソン散乱計測 システムを構築し、プラズマ中心位置における電子密度・電子温度計測の実証を行った<sup>[1]</sup>。 さらにプラズマ径方向分布の計測が、広範囲(~50mm)かつ高分解(0.1mm)で可能である ことも示した。本年度はさらにプラズマ揺らぎに対応した *n*e, *T*e 計測まで拡張することを試 みた。

## 実験方法(レーザートムソン散乱法)

トムソン散乱計測は、核融合を目的とした磁場閉じ込めプラズマや、低圧半導体プロセス プラズマ、さらには高気圧中で生成される大気圧非平衡プラズマなど、様々な電子密度・電 子温度領域にあるプラズマに対して、すでに適用されている。PANTA プラズマで予想され る電子密度・電子温度からのトムソン散乱信号は微弱であることが予想される。また、数 eV 程度の電子温度であるため、可視波長(波長 532 nm を想定)プローブの場合、トムソン散 乱スペクトル広がりは、レーザー波長を中心に、2,3 nm 程度であると予想される。このと き、計測レーザーの一部がチャンバー窓表面などで乱反射し、迷光として分光器内に侵入し て微弱なトムソン散乱スペクトルを覆い隠す恐れがある。まず、微弱な散乱信号に対しては、 多くのレーザーショットからの散乱信号を、検出器側で積算計測することで対処した。また、 迷光の除去に関しては、高い迷光除去性能が確認されている差分散型三回折格子分光器(以 下トリプル分光器と呼ぶ)を構築・使用することで対処した。

## 実験装置

トムソン散乱計測に向けて、次のような実験装置を構築した。全体の装置配置を図1に示 す。



図 1. PANTA 用可視トムソン散乱計測システムの配置図(図中スケールはすべて mm)

計測に必要な主な装置は、レーザー(Qスイッチ Nd:YAG レーザー)、分光器である。分 光器は実験用光学台の上に、各種光学部品を組み込んで自作した。分光器内の概要を図2に 示す。図2には併せて、散乱光の受光光学系の概略を示した。1st レンズはできる限り大き な受光立体角が望ましいが、チャンバー外に配置せざるを得ないことや、保有するレンズ種 類の制限から、焦点距離 400 mm で、有効直径 46 mm のアクロマートレンズを使用した。 このレンズで一度平行光にした散乱光の一部を、f = 220 mm のレンズで入口スリットに集 光し、分光器内に導いた。分光器内の回折格子は、トムソン散乱で使用する偏向方向に高い 回折効率を持つ、サインカーブ形状の反射型回折格子(刻線本数 2400 本/mm)を用いた。 スリット幅、焦点距離、回折格子条件などで決まる波長分解能は、0.2 nm程度であった。検 出器には ICCD カメラ(米国 Princeton Instruments 社製 PIMAX4, 波長 532 nm における量 子効率は 45%程度)を用いた。使用したプローブレーザーは移設が容易な小型のレーザー (米国 Continuums 社製 Surelite)を用いた。今回使用した第2高調波(波長532 nm)の出力は130 mJ程度であり、レーザーの繰り返し周波数は10 Hzであった。



図 2. トムソン散乱用トリプル分光器の概要図(図中スケールは mm)

図3に計測システム導入後の装置周辺の写真を示す。計測時、分光器やレーザー光軸は、 背景光を除去するために完全に遮光した。図4には自作したトリプル分光器の写真を示す。 分光器および受光系の光軸調整は、PANTA チャンバー側面の反対側の窓から、波長532 nm の半導体レーザーを入射し、行った。



図 3. トムソン散乱システム導入後の PANTA 装置周辺写真。プローブレーザーのレーザー ヘッドは写真下。レーザーは暗箱を通り、PANTA 装置した側に設置されたミラーおよび集 光レンズを通り、チャンバー中心軸上で集光され、その後チャンバー上側のビームダンパ ーに導かれる。トムソン散乱光の一部は、PANTA チャンバー横の窓からレンズで受光さ れ、分光器内に導かれた。



図4. 自作したトリプル分光器の内部写真。

本年度の計測では、プラズマが自発的に誘起する揺らぎと同期して行う必要があった。しか し揺らぎの位相とレーザー入射タイミングは事前に同期できない。そこで以下のような同 期系統を用いて、揺らぎの位相情報と、レーザー入射タイミング(計測タイミング)を照合 可能とした。この場合、カメラはレーザー1ショットごとの計測結果を読みだすため、トム ソン散乱信号は極めて微弱である上に、読み出しノイズが重畳される。十分な散乱信号が得 られないときは、同位相のデータのみを積算することで、S/Nの改善を行うこととした。径 方向における計測位置は、プラズマ中心(r=0)と、プローブ計測で大きなイオン飽和電流の大 きな揺らぎが観測された r=35mm の 2 か所である。各位置でトムソン散乱計測が可能な散 乱長範囲は、およそ 10mm であった。



図 5. 電子密度・温度の位相データ取得のための同期系統図

## 実験結果と考察

レーリー散乱およびラマン散乱より、構築したシステムが正常に動作していることを確認したのち、トムソン散乱計測を行った。プラズマ生成条件は以下のとおりである。

- プラズマ生成時の Ar ガス圧は 3mTorr, 磁場強度 1500 Gauss とした。
- ヘリコン波電力は主に 6kW (7MHz) とした。比較データとして、4kW, 5kW での計 測も行った。

図5で示したように、プラズマ生成直後から0.5秒間を計測時間幅とした。計測レーザーの 繰り返し周波数は10Hz なので、一度のプラズマ生成でレーザー5shot 分の計測が可能とな る。ただし生成直後のプラズマは不安定な場合があった。そこで、3-5shot に対応するトム ソン散乱信号のみをデータとして用いた。計測データの例を図6に示す。横軸はICCDカメ ラのピクセル(1ピクセル=13 µm)である。分光器の仕様で決まる逆線分散は1.35nm/mmで あり、1ピクセルあたり0.0176nmの波長幅となる。装置関数は0.27nmであった。420-490 ピクセルは、迷光除去のために差分散型分光器に設置したレーザー波長ストップ(逆スリッ ト)によりカットされており、正しい計測値ではない。グラフ縦軸は信号強度であり、単位 は Analog-to-digital unit である。使用した ICCD カメラのカタログ上では、光電面で検知さ れた1光電子信号は、およそ 300ADU 程度として処理される。スペクトル上のノイズは、 ショットノイズが主成分と考えられる。



図 6. トムソン散乱スペクトル例 (data no. 20170808-21-3)。計測レーザー1 ショットで得ら れた信号は光子数が少なく、ノイズの主成分はショットノイズである。

図7に、r=32mmで静電プローブにより計測されたイオン飽和電流の位相変化と、それと同 期して行ったトムソン散乱計測から得られた ne, Te を示す。トムソン散乱のショット数は限 られているため、位相1周期を20区分して、各位相区分で得られたトムソン散乱信号を積 算し、プロットした。各位相区分でのトムソン散乱ショット数は表1のとおりである。


図 7. r=32 mm におけるイオン飽和電流。1 周期を 20 区分し、phase number として整理した。



図 8. r=30-35 mm の電子密度。1 周期を 20 区分し、phase number として整理した。



図 9. r=30-35 mm の電子温度。1 周期を 20 区分し、phase number として整理した。

Phase number	LTS ショット数	Phase number	LTS ショット数	
1	3	11	4	
2	5	12	3	
3	0	13	5	
4	5	14	5	
5	6	15	6	
6	5	16	4	
7	3	17	6	
8	3	18	4	
9	3	19	3	
10	0	20	4	

表 1. Phase number ごとのトムソン散乱計測ショット数 (r=30-35mm での計測)

次に、r=0(正確には-6 mm < r < 6 mm) における ne, Te の位相依存グラフをそれぞれ図 10,

11 に示す。各位相区分でのトムソン散乱ショット数は表2のとおりである。



図 10. r=0 mm の電子密度。1 周期を 20 区分し、phase number として整理した。



図 11. r=0 mm の電子温度。1 周期を 20 区分し、phase number として整理した。

Phase number	LTS ショット数	Phase number	LTS ショット数
1	1	11	2
2	0	12	3
3	2	13	4
4	1	14	4
5	0	15	1
6	1	16	1
7	3	17	2
8	3	18	1
9	5	19	1
10	4	20	1

表 2. Phase number ごとのトムソン散乱計測ショット数 (r=0 での計測)

図8より、r=30-35mmにおいては、電子密度はイオン飽和電流の位相変化と同期して、増減 している。それに対して、図10に示すように、r=0では、電子密度の位相変化は見受けら れない。電子温度に関しては、両地点とも明確な位相変化は観測されなかった。そもそもの 電子温度範囲が1-2eVと小さく、今回の計測では十分な差異が確認できなかった可能性も ある。

# まとめと今後の展望

本共同研究の本年度の成果を以下に示す。

- ・ PANTA 装置における特異なイオン飽和電流揺らぎ周波数(~10kHz)に同期したトム ソン散乱計測を実施した。計測は空間 2 か所(r=0, 32.5mm)で行った。
- イオン飽和電流と同期した電子密度の明確な変化が、r=32.5mm で確認された。一方、 r=0では、位相による密度変化は見られなかった。r=0,32.5mm における電子密度範囲 はそれぞれ、3×1019m-3,(1-2)×1019m-3 であった。
- ・ 電子温度の明確な位相変化は両計測地点で確認されなかった。r=0, 32.5mm における 電子温度はそれぞれ、1.5-2.0 eV, 1.5eV 程度であった。

# 論文発表

Kentaro TOMITA, Yuta SATO, Nima BOLOUKI, Tatsuro SHIRAISHI, Kiichiro UCHINO, Yudai MIWA, Tatsuya KOBAYASHI and Shigeru INAGAKI, Measurements of Electron Density and Electron Temperature Using Laser Thomson Scattering in PANTA, Plasma and Fusion Research: Regular Article, Vol. **12**, 1401018 (5pages) (2017).

## 振幅変調反応性高周波放電中のナノ粒子量のエンベロープ解析

古閑一憲、白谷正治、稲垣滋

IoT の普及などを背景に近年の半導体デバイスの高性能化のために、従来の微細化の進展 が鈍化する一方で、3次元スケーリングと呼ばれる積層化が進められている。いずれの場合 においても、半導体製造前工程の 70%を占めるプラズマプロセスにおけるプラズマとナノ 界面の相互作用ゆらぎの抑制が重要課題となっている。ナノメートルサイズでのプラズマ プロセスゆらぎの制御には、プラズマとナノ界面の相互作用ゆらぎを解明する必要がある。 本研究では、プラズマとナノ界面の相互作用を解明するため反応性プラズマ中のナノ粒子 成長をナノ界面のモデルとして、プラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎをプラズマ乱流物 理の視点から解析することを目指している.これまでに振幅変調放電におけるナノ粒子量 のゆらぎにプラズマ乱流解析を適用し、以下の成果を得ている。

- 1) 高周波放電 CVD プラズマ中で形成されるナノ粒子に関して、放電電圧の振幅変調がサ イズ・サイズ分散の減少をもたらす [1]。
- 2) 結果 1)において、ナノ粒子とラジカルのカップリングが重要な役割を果たしている[2]。
- 3) 振幅変調放電におけるナノ粒子量のゆらぎにバイスペクトル解析を適用し、ラジカル とナノ粒子の非線形結合を確認した。
- 4) プラズマ乱流解析で用いられているエンベロープ解析を適用してプラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎの抽出と相互作用ゆらぎの伝播を評価することに成功した[3,4]。

ここでは、エンベロープ解析を適用して得られたプラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎ の空間構造から、2つのゆらぎの結合の時空間構造について検討した。

実験には、図 1 に示す容量結合型プラズマ CVD 装置を用いた[2]。反応容器中心に直径 60mm(r = -30 ~ +30 mm)の 2 枚の電極を 20mm(z = 0 ~ 20mm)の間隔で設置した。Ar と DM-DMOS(Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)を、それぞれガス流量 40sccm、2sccm で容器内に導入し、圧力を 166.3Pa とした。周波数 60MHz、電圧 120V の高周波電圧を電極間に印加し、プラズマを生 成した。このとき、放電電圧に変調周波数 100Hz、変調度 30%の正弦波で振幅変調を加え、 プラズマ密度に意図的に摂動を与えることにより、プラズマ密度の揺動がナノ粒子成長に

与える影響について調べた。気相中ナノ粒子量の時空間変化は 2 次元レーザー散乱法で計

測した。シート状 YAG レーザー光(厚さ 16mm、 幅 1mm、入射パワー2.0W、波長 532nm)を、接 地電極と放電電極間(電極間距離 20mm)に平行 に入射し、ナノ粒子からの 90 度レーリー散乱 光を、干渉フィルタを装着した高速度カメラ (1000fps)で撮影した[5,6]。

レーザー散乱光(LLS)強度にエンベロープ解 析を適用して、ナノ粒子とプラズマの相互作用



図1. 実験装置図。

ゆらぎを抽出した。例えば 100Hz を抜き出す場合、LLS 強度に 94-106Hz でバンドパスフィ ルタをかけることで、LLS 強度ゆらぎの 100Hz 成分を抜き出し、100Hz 振幅のエンベロー プを得た。

放電開始後 t=3s における ナノ粒子量の 100Hz と 60Hz 成分の振幅ゆらぎを図 2 に 示す。100Hz エンロープは、 プラズマポテンシャル振動 によるナノ粒子密度揺動に 対応するものと考えられ、 100Hz エンベロープの振動 成分は、プラズマポテンシャ ルとナノ粒子の相互作用ゆ らぎを示唆している[5, 6]。 60Hz のものはラジカルとナ ノ粒子の相互作用[2]に関連 して発生していると考えら れる。



2つの結合の時空間分布 の比較として、相互作用ゆら

ぎの類似率を導出した。2つの空間分布の中でゆらぎ強度が閾値以上である点が一致する面積の評価領域全体に対する割合を類似率とした[7]。閾値を0以上とした場合、2つの相互作用ゆらぎは50%一致していることが明らかになった。この評価法を用いることで、各相互作用に対して一致度を評価することで相互作用ゆらぎ間の結合ネットワークを定量できると考えられる。

今後は、LLSのみならず OES へ解析を界ロ調し、電極間全体における相互作用ゆらぎの 結合状態の解明へと繋げたい。

参考文献

[1] K. Kamataki, et al., J. Instrum. 7 (2012) C04017.

[2] M. Shiratani, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 010201.

[3] T. Yamada, et al., Nature Phys. 4 (2008) 721.

[4] T. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 063009.

[5] M. Shiratani, et al., Faraday Discussions., 137 (2008) 127.

[6] S. Nunomura, et al., J. Appl. Phys., 99 (2006) 083202.

投稿論文:1件、学会発表:国際会議2件、国内会議4件

# 多層グラフェン膜中に吸収された水素の加熱放出機構

Mechanism on thermal release of hydrogen absorbed in multilayer graphene 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。一般に、水素酸素燃料電池は燃料(水素)、電解質および酸化剤(酸素)から構成されている。最近、水素 燃料供給源(水素電極)に水素吸蔵合金(チタン水素化物)、電解質に水素イオンだけが電気伝導に関与するプロトン導電 性固体高分子膜(フッ素樹脂系イオン交換高分子膜)を用いた小型化可能な高効率・高出力のマイクロ燃料電池の開発 が進められている。水素電極に水素吸蔵合金を用いる理由は、ガス電極のように水素分子の解離過程を経ずに、水素 原子を直接電解質中に固溶およびイオン化させて電流密度の増加を図るためである。面心立方晶を有するチタン水素 化物を水素電極に用いた場合、水素電極から電解質への水素輸送温度は473 K以上と高い値を示す。より低温で稼動 するマイクロ燃料電池の開発を目指すためには、より低い水素の解離温度を有する水素電極を作製する必要がある。 本研究では、ミスト化学蒸着法を用いて、窒素(N)を添加(ドープ)した多層グラフェン膜を作製し、低い水素解離温度 を有する水素電極の開発を目指した。さらに、核反応(NRA: Nuclear Reaction Analysis)法、反跳粒子検出(ERD: Elastic Recoil Detection)法および昇温ガス脱離(TDS)法を用いて、加熱された N ドープ多層グラフェン薄膜中の水素 濃度および放出ガス種の解離温度を測定し、薄膜中の水素の加熱挙動について調べた。

実験方法 ミスト化学蒸着法を用いて、1.3x10<sup>-3</sup> Pa の真空排気および 1198 K に加熱された石英管内にミスト状のメ ラミンを含んだメタノールおよび 2%H<sub>2</sub>を含有する Ar 混合ガスを流した後、Cu 板を 2 分間導入して多層グラフェン 薄膜試料を作製した。N ドープ量を変えるために、メラミンを加熱する温度を 423 および 473 K にした。ラザフォー ド後方散乱(RBS: Rutherford Backscattering Spectrometry)法および光吸収法により、作製された多層グラフェン膜 の厚さは約 8±3 nm (約 24±9.層程度)であると評価した。次に、多層グラフェン薄膜試料を恒湿恒温器内に導入し、約 297~303 K の室温および約 30-40%R.H.の相対湿度の雰囲気中に放置した。空気中の水蒸気が多層グラフェン薄膜 内に飽和するまで吸収された後、量子科学技術研究開発機構に既存のタンデム型加速器からの 6.38–6.50 MeV N<sup>+</sup>イ オンをプローブビームとした NRA 法を用いて、H および N 間の核反応(H(<sup>15</sup>N, αy)<sup>12</sup>C)により生成された 4.44 MeV

のガンマ線を NaI (Tl) シンチレーション検出器により 検出し、深さに対する H 濃度分布を数 nm の深さ分解能 で測定した。次に、東北大学金属材料研究所に既存のタ ンデム型加速器からの 2.8 MeV He<sup>2+</sup>イオンをプローブ ビームとした ERD 法を用いて、作製した多層グラフェ ン薄膜試料を真空雰囲気で室温から約573 Kまでの各温 度において 10 分間の等時加熱(isochronal annealing)を 行い、各温度における捕捉 H 濃度の変化について調べた。 また、飽和注入後、九州大学応用力学研究所に設置され た TDS 法により、放出ガス種の判別および各ガス種の 解離温度を調べた。

**実験結果および考察** 423 および 473 K の温度で Cu 板 上に形成された N ドープ多層グラフェン薄膜表面の FE-SEM 像を図1に示す。基盤の Cu 板の形状に影響す るが、グラフェンは平坦になっておらず、歪んだ形状を



図1 423 および 473 K の温度で Cu 板上に形
成された N ドープ多層グラフェン薄膜表
面の FE-SEM 像。

帯びていることを確認した。図1から、加熱温度が高いほど結晶粒径が大きくなっており、結晶粒の成長が観測された。また、粒内の結晶粒径も423および473Kと温度が高いほど約1.0および0.5μm以下と小さくなることがわかった。

次に、約297~303 Kの室温および約30-40%R.H.の相対湿度の雰囲気の条件で、長時間空気暴露された多層グラフェン膜およびNドープ多層グラフェン膜について測定されたNRAスペクトルから、どちらの多層グラフェン膜に対しても1個のC原子に対するH原子数比(H/C)は約0.88 であり、H濃度が極めて高いことがわかった。また、約24層中の多層グラフェン膜中のH/Cは約0.03と評価された。これらの結果より、僅かな原子状Hがグラフェン層間(インターカレーション)を占有し、多量の水(H<sub>2</sub>O)が歪んだ多層グラフェン膜表面に吸着していることが考えられる。

室温から 573 Kの温度までの各温度で 10 分間の等時加熱後、ERD 法を用いて測定された N ドープ多層グラフェン膜の ERD スペクトルを図 2 に示す。ERD スペクトルから求めた作製後の N ドープ多層グラフェン膜中の水素濃度は、多層グラフェン膜中の水素濃度とほぼ同様で H/C=0.74 であり、NRA 法により求めた結果と一致することがわかった。しかしながら、ERD 法では約 100 nm 以上と深さ分解能が低いため、膜表面上の H<sub>2</sub>O とインターカレーション中の H を分けることができない。従って、縦軸のピーク強度は、N ドープ多層グラフェン膜表面および層間の合計の H 濃度を表す。図 2 から、ERD スペクトルの強度は、加熱温度の増加とともに減少することがわかった。加熱温度に対する N ドープ多層グラフェン膜中の捕捉 H 濃度の変化を図 3 に示す。図 3 より、N ドープ多層グラフェン 膜中の捕捉 H 濃度は、グラファイト中の H 濃度が 673 K まで全く減少しないことに対して約 373 K 以下の低温で除々に減少し、573 K で約 3 割程度まで減少することがわかった。この結果は、多層グラフェン膜中の水素濃度の変化とほぼ同様であった。グラファイトの場合、捕捉 H は 673 K 以上で CH4 の形状で放出されることが報告されているが、多層グラフェン膜中の捕捉 H は、H<sub>2</sub>O あるいは H<sub>2</sub>の形状で放出されていることが推測された。

TDS 法を用いて、N ドープ多層グラフェン膜を室温から 773 K まで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、N ドープ 多層グラフェン膜から放出されるガス種の判別を行ったときの TDS スペクトルを図 4 に示す。H<sub>2</sub>O が約 373 K 以下 の低温から放出し、続いて H<sub>2</sub>が約 773 K 付近で放出された。H<sub>2</sub>O および H<sub>2</sub>の放出は、N ドープ多層グラフェン膜 表面から脱離および層間を占有した H 原子同士の再結合により生じたと考えられる。従って、ERD 法によって得ら れた 573 K 以下における捕捉 H 濃度の減少は、歪んだ形状の表面に吸着された H<sub>2</sub>O の脱離によると考えられる。

**まとめ** NRA 法、ERD 法および TDS 法を用いて、真空内で約 573~773 K まで加熱された N ドープ多層グラフェン膜中の水素濃度変化について調べた。大気に放置された多層グラフェン膜において、多量の H<sub>2</sub>O が表面に吸着され、微量の H が層間に占有されていることがわかった。また、これらの捕捉 H 濃度は約 373 K 以下の低温から除々に H<sub>2</sub>O の形状で放出され、573 K で約 3 割程度まで減少することがわかった。



図 2 573 K までの各温度において、10 分間の
等時加熱後の N ドープ多層グラフェン膜
中の水素濃度分布(ERD スペクトル)。



図3 ERD スペクトルから求めた、各温度において10分間の等時加熱後の多層グラフェン膜、Nドープ多層グラフェン膜および グラファイト中の水素濃度変化。

### 軽水炉圧力容器鋼の工学的寿命を律速する Late Blooming Phase の物性調査

東北大金研 松川義孝 九大応力研 渡辺英雄

#### 1. 背景

Late blooming phase (LB 相) とは、軽水炉を 30 年以上運転した際に、圧力容器(低合金鋼 A533B) に生じる析出物の総称であり、その照射脆化の主要因であると考えられている。圧力容器を交換するこ とは実質的に不可能であるため、軽水炉の寿命は即ち圧力容器の寿命であると、原子力材料の研究コミ ュニティーでは認識されている。 圧力容器の寿命は、LB 相の析出に律速される。 そのような観点から、 軽水炉の経年劣化の指標のガイドラインとして使用されている、電力中央研究所が提案した脆化寿命予 測式では、LB 相が析出する過程を(照射によって導入された点欠陥を媒介とした拡散に着目して)反 応速度論的に解析する内容が、式の内訳となっている。但し、材料学的な観点から見ると、LB 相が析 出することによって鋼が脆化するメカニズムそれものが未だ明らかでないことが問題であり、そのこと が脆化寿命予測式を高精度化することの妨げになっている。メカニズムが明らかでない理由の一つは、 析出物がナノサイズであるため、最新の電子顕微鏡を駆使しても分析が困難であり、それ故に、LB 相 それ自体がどのような組成・構造・物性を有する化合物なのか、或いは化合物になる以前の溶質元素の クラスターなのかといった基本事項が未だ明らかでないためである。 最近、 LB 相は Ni と Si と Mn で構 成される金属間化合物 G 相であると指摘した研究が散見されるようになった。G は grain boundary の略 称であり、これはこの化合物が(圧力容器鋼とは異なる鋼で)最初に発見された当初、粒界に析出する ことがこの化合物の特徴であると考えられていたために付けられた名称である。G 相の化学量論組成は Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>であり、結晶構造は立方晶の cF116 であることは知られているが、その組成範囲や物性につ いてはこれまで検討された例がない。申請者は最近、別の鋼に関する研究で、G相が長時間熱時効によ って析出する過程において、エンブリオ(Ni-Si-Mn クラスター)の組成と構造がどのように変化するの かを、電子顕微鏡とアトムプローブを組み合わせて詳細に検討した[1]。その結果、(1) Ni-Si-Mn クラス ターが自発的成長を開始する段階では、組成と構造がG相とは異なること、(2)時効に伴い、クラスタ 一内部の溶質元素が濃化し、臨界組成に達したときに構造が cF116 に変化すること、(3) 臨界組成は必 ずしも Ni:Si;Mn=16:7:6 ではなく、Si の半分が Fe に置換した組成でも cF116 構造になること、等を明ら かにした。この研究成果を踏まえ、本研究では、G 相の組成範囲と物性を明らかにすることを試みる。 鋼に析出する G 相を調べるのではなく、金属地金をアーク溶解で合金化し、作成したインゴットの金相 を調査し、単相が得られた場合には物性を評価するという計画である。化学量論組成の G 相 (Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>) を起点とした Ni-Si-Mn-Fe 疑四元系状態図を作成することが、本研究の目標である。

### 2. 実験結果

化学量論組成の G 相については、単相のインゴットをアーク溶解で作成することに成功した。インゴ ットは非常に脆く、素手で割ることも可能であった(図1)。申請者はこの他にも、鋼に析出する化合物 (例えば炭化物 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>など)をアーク溶解で作成した経験があるが、ここまで極端に脆い化合物は記憶 にない。G 相は加熱した際に、別の構造に変化することなく、そのまま融解に至ることが明らかとなっ た。融点は約 1,050℃であった。その他の物性の測定に関しては、これまでに複数回試みたが、現時点 では成功していない。これはアーク溶解で作成したインゴットの内部にクラックが残留してしまうため である。この問題を回避するために、インゴットを一旦粉砕してから、放電プラズマ焼結(SPS)で固 めることを現在試みている。緻密な焼結体が得られれば、弾性定数、比熱、デバイ温度、自由エネルギーを定量評価できる見込みである。この他にも、熱膨張係数や破壊靭性値の導出も現在試みている。

それ以外の組成のインゴットに関しては、時効しても単相にならなかった。本研究で行ったアーク溶 解でインゴットを作成する実験は、状態図を作成するための手法としては標準的なものであるが、この 手法では、実際に鋼中に析出した非化学量論組成のG相(Siを半分にFeに置換した組成)を再現でき ないことがわかった。平衡状態図に出現しない原因は、この非化学量論組成のG相が準安定相であるた めであると推測される。つまり、平衡状態図を作成しても、それは鋼中の析出物がG相であるか否かの 判定条件としては不十分であるということになる。この研究成果を踏まえ、平衡状態図よりも直接的に、 G相の相安定性の本質に迫る研究を新たに開始した。具体的には、化学量論組成のG相インゴットの表 面にFeを蒸着し、Feと共存した時のG相の相安定性について検討している。G相単相のインゴットの表 面に Feを蒸着し、Feと共存した時のG相の相安定性について検討している。G相単相のインゴットは 融点(~1,050℃)まで安定であったが、鋼中に析出したG相は500℃で時効すると30分もかからずにマ トリックスに再固溶する。蒸着したFe 膜に固溶しかけたG相を、一旦冷却してから再加熱すれば、鋼 中に析出した非化学量論組成のG相を再現できるかもしれない。この実験手法でも、結果的に、"化学 量論組成のG相を起点とした Ni-Si-Mn-Fe 疑四元系状態図"を作成することが可能である。但しこれは、 通常の平衡状態図と初期状態が異なり、相変態の非可逆性に着目した準安定の非平衡状態図である。

### 参考文献

[1] Y. Matsukawa, T. Takeuchi, Y. Kakubo, T. Suzudo, H. Watanabe, H. Abe, T. Toyama, Y. Nagai, "The two-step nucleation of G-phase in ferrite", Acta Materialia, Vol. 116, 104–113, 2016

### 3. 本年度 発表リスト

#### [口頭発表リスト]

1) Y. Matsukawa, "The theory of precipitation hardening revisited: the effect of crystal structure on the obstacle strength", CIMTEC2018 (14th International Ceramics Congress & 8th Forum on New Materials), 2018.6.4–15, Perugia (Italy), [Invited]

2) 松川義孝, "鋼に析出した G 相及び Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>の析出物/マトリックス界面を模擬したモデル試料の作成", 日本鉄鋼協会 2018 年春の大会, 2017.9.7–9, 千葉.

3) 松川義孝, "析出物の核形成における臨界サイズと臨界組成の関係について--核形成理論の新展開--", 京都大学 ゼロエミッションエネルギー拠点研究会(ZE研究会), 2018.1.10–12, 京都.

 Y. Matsukawa, "Recent progress on the theory of precipitation hardening in nuclear materials research", SIPS2017 (Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition 2017), 2017.10.22–26, Cancun (Mexico). [Invited]

5) 松川義孝, 大熊一平, 佐藤裕樹, 牟田弘明, 阿部弘亨, "オロワン機構に及ぼす析出物の結晶構造の影響について", 日本金属学会 2017 年秋の年会, 2017.9.7–9, 札幌.

6) 鈴江瞭平, 松川義孝, 佐藤裕樹, 叶野翔, 阿部弘亨, 谷川博康, 安田和弘, "Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>の電子照射誘起アモルファス化の臨界温度と結晶化温度", 日本金属学会 2017 年秋の年会, 2017.9.7–9, 札幌.

7) 松川義孝, "原子力材料の実機材における拡散誘起アモルファス化", 日本材料学会 金属ガラス部門 委員会 研究会, 2017.6.30–30, 大阪. [Invited]

# Fe-Mn モデル合金における特異な照射硬化とナノサイズの Mn 析出物形成の相関

京都大学エネルギー理工学研究所 藪内 聖皓、木村 晃彦

## 1. 目的

鉄鋼材料における Mn および Ni は、オーステナイト形成元素としての役割が良く知られている。核融合炉の 構造材料として使用が期待されている鉄鋼材料においては、低放射化対応として、Ni を Mn に置き換えて合金 設計されている。一方、Fe-Mn 合金は、他の2元系鉄基合金に比べ、照射硬化量が極めて大きく、照射脆化が 促進される傾向を示すため、Mn 添加が及ぼす照射硬化への影響については国際的に高い関心がもたれてい る。

Mn による照射硬化促進の機構としては、Mn が空孔あるいは格子間原子と結合し、それが核となって、Mn 析 出物を形成することが考えられるが、その詳細は不明である。我々は、ナノサイズの Mn 析出物が格子間原子型 の転位ループ上に析出すると仮定し、イオン照射した Fe-Mn 合金を透過電子顕微鏡により観察してきたが、Mn 析出物のサイズが1nm と極めて小さいため、Mn 析出物と転位ループの相対位置関係についてはいまだ確認さ れていない。

そこで本研究では、九大応力研に導入された高分解能分析電子顕微鏡(管理区域内設置)を用い、原子炉 照射した Fe-Mn 合金の微細組織観察をおこない、格子間型転位ループとナノサイズの Mn 析出物の相対位置 関係を明らかにすることを目的とする。

### 2. 研究成果の概要

### 1)経過

圧力容器鋼の照射影響評価のための基礎研究として、鉄基モデル合金における照射脆化挙動に及ぼす 中性子照射の影響を高照射量(高経年対応)まで調査した結果、Fe-Mn 合金では、高照射領域において のみ、照射硬化量が顕著に増大することが判った。高経年化に伴う照射脆化の促進が懸念されることか ら、この現象を「Mn 影響」と名付け、その発現機構に関する研究を実施している。この Mn 影響は、鉄 格子の中に均一に固溶している Mn 原子と照射によって形成された Vacancy (V:空孔)や Interstitial

(I:格子間原子)との強い相互作用に起因す ると考えられるが、その詳細は明らかではな い。特に、V-Mn 相互作用と I-Mn 相互作用の どちらが重要になるかについては、照射脆化 予測に大きな影響を及ぼすことから、早期の 解決が望まれている。

#### 2) 照射実験

中性子照射(290℃、5x10<sup>20</sup>n/cm<sup>2</sup>)により、 Fe-1Mn および Fe-1Ni 合金は、顕著な照射硬 化を示し、透過型電子顕微鏡による微細組織 観察から、いずれも黒点状の微細な照射損傷 組織が形成されていることが判明している

(図1)。これらの損傷組織を TEM 内で焼鈍し ながら直接観察すると、500℃まではほとんど



図1 純 Fe と Fe-1.5Mn における中性子照射損傷 組織

変化しないが、550℃になるとそのサイズが大きくなることを既に報告している。純鉄に比べると、粗大 化開始の温度が高温側にシフトしており、Fe-1Mn 合金では、格子間原子の易動度が純鉄に比べ低下して いると考えられる。なお、平成 29 年度は新規導入の TEM の性能評価ならびに今後の中性子照射試料の 観察に向けて RI 輸送に関する手続等の確認を行うとともに、「Mn 影響」メカニズムについて検討した。 3.「Mn 影響」のメカニズム

Fe-Mn 合金と Fe の照射損傷組織を比較すると、Fe-Mn 合金において転位ループの微細化が顕著に生じ ていることが判明している。転位ループは、格子間型であることが判明しており、微細化の理由として は、格子間原子あるいは微細な転位ループの移動度が Mn 原子による捕獲効果により、低下しているこ とがあげられる。すなわち、ここでは Mn 原子と Fe 格子間原子あるいは微細な格子間型転位ループとの 相互作用により、それらの移動が Mn 原子により、抑制されたために、核生成サイト数が増加し、成長が 遅れたと考えることが可能である。溶質原子クラスターの形成の素過程に関しては、クラスターの核生 成サイトが空孔型欠陥なのか格子間原子型欠陥なのかについては、不明であり、この様子をモデル化し て示すと図 2 の様になる。

一方、最近の高分解能分析電顕による TEM 観察によれば、イオン照射した Fe-Mn 合金において、板状の Mn 集合体の形成が認められている。Mn 原子の集合には、Mn-V 対や Mn-I ダンベルなどの移動が必要になる。また、Mn 原子単独の効果の他にも、酸素原子の関わりを示唆するデータも存在する。今後は、不純物酸素量の影響についても調査する。

## 4. まとめ

今後 JMTR や BR-2 炉を用いた中性子照射実験により、Mn 添加効果を低合金鋼の中性子照射影響評価に 取り込んでいくための基礎的知見が得られると期待される。平成 29 年度は平成 28 年度に PIE が可能に なった合金試料を九州大学に搬送し、高分解能 TEM を用いて観察する。

# 5. 成果発表

特になし。



図2 格子間原子型転位ループの構成原子と溶質原子のクラスタリング

# 統合輸送コードに導入するための電磁的ジャイロ運動論解析を用いた輸送係数のモデリング

#### 核融合科学研究所 登田慎一郎

核融合装置において、乱流輸送はプラズマ閉じ込めのためには最も重要な研究課題の一つである。 ヘリカルプラズマにおけるジャイロ運動論的解析は、トカマクと比べてより大きなコンピューター 資源を使用する。非線形ジャイロ運動論解析結果を再現する簡約化モデルが、ヘリカルプラズマ における輸送シミュレーションを実行する際に必要である。大型ヘリカル装置 (LHD) におけるイ オン温度勾配 (ITG) モードと帯状流を研究するのに GKV コードが使われる。LHD での高イオン 温度放電についての、電子運動に断熱近似をしたジャイロ運動論的シミュレーションが行われた。 ITG モードによるイオンエネルギー流束の値は実験結果と矛盾しない。電子運動に断熱近似を用 いたシミュレーションにより、イオン熱拡散係数についての簡約化モデルが提唱されている。この 簡約化モデルは、ITG モードの線形成長率と帯状流の崩壊時間の関数である。ヘリカルプラズマ において、断熱近似によるジャイロ運動論的シミュレーションによる簡約化モデルを輸送コード に取り入れる手法が示されている [1]。高イオン温度プラズマでは、実験観測よりも大きいイオン 流束の値が、運動論的電子によるシミュレーションで示されている。また、低イオン温度プラズマ では、実験観測と同程度の電子、イオン流束が、運動論的電子によるシミュレーションで示されて いる。乱流電子、イオン熱拡散係数の簡約化輸送モデルを示すには、プラズマ不安定性に対して の運動論的電子の影響を取り入れる必要がある。波長モードを少数とった場合に、イオンの熱拡 散係数についての簡約化モデルが提唱されている [2]。非常に低ベータプラズマであるにかかわら ず、全体の電子熱流束の中で、電磁成分は30%になり、非常に大きくなってしまう。本研究では、 ITG モードの時の電子、イオン熱拡散係数についての簡約化モデルを、電子についてもジャイロ 運動論解析を行うことにより求める。イオン熱拡散係数を評価した研究 [2] よりも多数の波数モー ドを取る時に、電子とイオンの熱拡散係数を評価するために、非線形ジャイロ運動論シミュレー ションを行う。線形ジャイロ運動論解析も、非線形解析結果による熱拡散係数の値を再現する簡約 化モデルを導くために実行する。

LHD において微視的不安定性による乱流を、ジャイロ運動論的局所流束チューブコード GKV を 用いて研究する [3]。時刻 t = 2.2s での高イオン温度プラズマと時刻 t = 1.8s、t = 1.9s での低イオ ン温度プラズマの実験結果である温度分布、密度分布と磁場配位に基づいて、電子、イオン温度勾 配、 $R/L_{T_e}$ 、 $R/L_{T_i}$ と、密度勾配  $R/L_n$ と安全係数 q が径方向に変化する。高  $T_i$  プラズマにおいて、  $\rho = 0.65$  での  $\beta$  値は 0.3% 程度である。電子エネルギー流束の電磁成分を減らすために、研究 [2] よりも、フーリエモードを多数とり、平行方向のグリット点を多く取る。k<sub>x</sub>とk<sub>u</sub>方向の全フーリ エモード数は、41 と 12 である。ここで、 $k_x$  と  $k_y$  は、径方向とポロイダル方向の波数である。平行 方向、平行速度方向と垂直速度方向での全グリッド数は、512,64と16である。高T<sub>i</sub>プラズマで は、 $\rho = 0.46$  と $\rho = 0.80$  の間での、10 個の径方向の点で、非線形シミュレーションを行った。低  $T_i$ プラズマでも、 $\rho = 0.65$ と $\rho = 0.80$ の間での、10 個の径方向の点で、非線形シミュレーション を行った。高 $T_i$ プラズマでの $\rho = 0.68$ で、電子、イオンエネルギー流束と粒子流束の時間発展を 調べた。電子、イオンエネルギー流束と粒子流束の時間発展で、非線形飽和が見られた。Qem/Qe,  $Q_i^{em}/Q_i$ と $\Gamma^{em}/\Gamma$ の時間平均の値は、低 $\beta$ プラズマ ( $\simeq 0.3\%$ )の場合で、6.3%, -0.76%と8.1%で ある。多数のモードを取り入れることにより、電子エネルギー流束における電磁成分の割合は、シ ミュレーション結果 [2] よりも顕著に小さくなった。高 $T_i$ プラズマでの、 $\rho = 0.65$ における電子、 イオン流束の時間平均値は、0.036 MW/m<sup>2</sup> と 0.11 MW/m<sup>2</sup> である。本研究では、粒子流束の平均 値は、 $-1.0 \times 10^{19}/(\mathrm{m}^{2}\mathrm{s})$ 程度である。乱流ポテンシャル揺動の2乗 $\mathcal{T}\left(=\sum_{\tilde{k}_{x},\tilde{k}_{y}\neq0}\left\langle \left|\tilde{\phi}_{\tilde{k}_{x},\tilde{k}_{y}}\right|^{2}\right\rangle/2\right)$ と帯状流ポテンシャルの2乗 $\mathcal{Z}\left(=\sum_{\tilde{k}_{x}}\left\langle \left|\tilde{\phi}_{\tilde{k}_{x},\tilde{k}_{y}=0}\right|^{2}\right\rangle/2\right)$ の時間発展について研究した。 $\mathcal{T}$ と $\mathcal{Z}$ の 時間発展に非線形飽和が見られる。

高*T<sub>i</sub>* プラズマと低*T<sub>i</sub>* プラズマのLHD 実験結果をシミュレーションで用いる。非線形シミュレーション結果による電子、イオンエネルギー流束と粒子流束の径方向分布を調べた。本研究では、粒子拡散

係数の簡約化モデルを示さない。非線形シミュレーションによる輸送係数  $\bar{\chi}_e/\chi_i^{GB} \ge \bar{\chi}_i/\chi_i^{GB}$ は、 $\bar{T} \ge \bar{Z}$ のモデル関数と比較される。電子熱拡散係数のフィッティング関数は、 $\bar{\chi}_e/\chi_i^{GB} = \mathcal{F}_e(\bar{T},\bar{Z}) \equiv C_{1e}\bar{T}^{\alpha_e}/\left(C_{2e} + \bar{Z}^{\xi}/\bar{T}\right)$ で示される。ここで、 $\alpha_e = 0.19, C_{1e} = 6.8 \times 10^{-2}, C_{2e} = 2.1 \times 10^{-2} \ge \xi = 0.10$ である。 $\mathcal{F}_e$ による  $\bar{\chi}_e/\chi_i^{GB}$ を近似する相関誤差は、0.079である。イオン熱拡散係数のフィッティング関数も、 $\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB} = \mathcal{F}_i(\bar{T},\bar{Z}) \equiv C_{1i}\bar{T}^{\alpha_i}/\left(C_{2i} + \bar{Z}^{\frac{1}{2}}/\bar{T}\right)$ で定義される。ここで、 $\alpha_i = 0.41, C_{1i} = 0.13 \ge C_{2i} = 4.9 \times 10^{-2}$ である。 $\mathcal{F}_i$ による  $\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB}$ を近似する相関誤差は、0.15である。 $\mathcal{F}_i$ におけることがわかった。従って、 $\chi_i$ における帯状流の影響は、 $\chi_e$ におけるものよりも強い。電子、イオン熱拡散係数の値はモデル関数により、よく再現できる。線形ジャイロ運動論的解析によって、乱流レベ

限制シャイロ運動調防操制にようて、配加レベルへの乱流揺動と帯状流揺動の寄与を調べるために、運動論的電子近似をしてシミュレーションを行った。領域 0.05  $\leq \tilde{k}_y \leq 0.1$  で積分した混合長概算  $\mathcal{L} \left(\equiv \int (\tilde{\gamma}_{\bar{k}_y}/\tilde{k}_y^2)d\tilde{k}_y\right)$ の径方向分布を研究した。乱流揺動 $\bar{T}$  は $\bar{T} = C_T \mathcal{L}^a$  で近似される。ここで、 $C_T = 6.6 \times 10$  とa = 1.6である。乱流レベルは、乱流と帯状流の相関により決まる。線形帯状流応答関数は、 $\mathcal{R}_{\bar{k}_x}(t) \equiv \tilde{\phi}_{\bar{k}_x,\bar{k}_y=0}(t) / \langle \tilde{\phi}_{\bar{k}_x,\bar{k}_y=0}(t=0) \rangle$ で定義される。線形帯状流応答関数は、高、低 $T_i$ プラズマでの磁場配位を用いて研究する。ここでは、 $\tilde{k}_x$ の値を 0.25 とする。なぜなら  $\tilde{k}_x = 0.25$  付近





で、波数スペクトルのピークがあるからである。帯状流崩壊時間は、 $\tau_{ZF} \equiv \int_{0}^{\tau_{f}} dt \mathcal{R}_{\bar{k}x}(t)$ で定義 される。ここで、 $\tau_{f} = 30R/v_{ti}$ とする。なぜなら $\tau_{f} > 30R/v_{ti}$ では帯状流崩壊時間は大きく変 化しないからである。乱流の相関時間は $30R/v_{ti}$ より短い。従って、 $\tau_{f} > 30R/v_{ti}$ の $\mathcal{R}_{\bar{k}x}(t)$ は 帯状流レベルに影響を与えない。帯状流揺動 $\bar{z}$ は近似式 $\bar{z}^{b}/\bar{T}^{c} = C_{z}\bar{\tau}_{ZF}$ で示される。ここで、  $C_{z} = 0.91, b = 0.16 \& c = 0.27$ である。線形パラメータによる電子、イオン熱拡散係数の簡約化 モデルは、 $\chi_{e}^{RM}/\chi_{i}^{GB} = A_{1e}\mathcal{L}^{B_{1e}}/(A_{2e} + \tilde{\tau}_{ZF}^{B_{2e}}/\mathcal{L}^{B_{3e}}) \& \chi_{i}^{RM}/\chi_{i}^{GB} = A_{1i}\mathcal{L}^{B_{1i}}/(A_{2i} + \tilde{\tau}_{ZF}^{B_{2i}}/\mathcal{L}^{B_{3i}}$ で 示される。ここで、 $A_{1e} = C_{1e}C_{T}^{\alpha_{e}+1-c\xi/b}C_{z}^{-\xi/b} = 1.3 \times 10, A_{2e} = C_{2e}C_{T}^{1-c\xi/b}C_{z}^{-\xi/b} = 2.0, A_{1i} = C_{1i}C_{T}^{\alpha_{i}+1-c/(2b)}C_{z}^{-1/(2b)} = 2.6 \times 10^{2} \& A_{2i} = C_{2i}C_{T}^{1-c/(2b)}C_{z}^{-1/(2b)} = 1.8 \times 10$ である。べき数は $B_{1e} = \alpha_{e}a = 0.30, B_{2e} = \xi/b = 0.62, B_{3e} = a(1 - c\xi/b) = 0.63, B_{1i} = \alpha_{i}a = 0.66, B_{2i} = 1/(2b) = 3.1 \& B_{3i} = a(1 - c/(2b)) = 0.26$ で示される。線形ジャイロ運動論的解析で、 $\chi_{e}^{RM} \& \chi_{i}^{RM}$ の値が得られ る。電子熱拡散係数  $\chi_{e}^{RM} \succeq \bar{\chi}_{e}$ の値が Fig. 1(a) で、電子熱拡散係数  $\chi_{i}^{RM} \succeq \bar{\chi}_{i}$ の値が Fig. 1(b) で 比較される。円と四角は高、低  $T_{i}$ プラズマに対応する。簡約化モデルは、 $\bar{\chi}_{e}$ の非線形計算結果を 相関誤差 0.21、 $\bar{\chi}_{e}$ のそれを相関誤差 0.20 で再現する。

この研究は、NIFS 共同研究(プラズマシミュレータ)NIFS16KNST093, NIFS16KNTT035 と RIAM 共同研究 29FP-4 の補助を受けている。

- [1] S. Toda et al., Journal of Physics: Conference Series 561, 012020 (2014)
- [2] S. Toda et al., Plasma and Fusion Research 12, 1303035 (2017)
- [3] T. -H. Watanabe and H. Sugama Nucl. Fusion 46, 24 (2006)

# 金属間化合物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】

材料中の不純物水素原子と格子欠陥との相互作用は、材料の水素脆化や水素貯蔵などの 観点から重要な課題の一つである。特に核融合炉などの特殊な環境下では、その挙動がプ ラズマの安定化に密接な関係を有しており、照射欠陥である空孔型の欠陥と水素の相互作 用について様々な材料での研究が進められている。しかしながら、空孔型欠陥中の水素挙 動は材料の構造や組成に強く依存するため、個々の材料中での挙動について解明されてい ない点が非常に多い。また、材料中の水素の状態評価も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。 中でも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、近年では陽電子消滅時の 対消滅相手となる電子の密度分布を簡便に詳細な評価が可能になってきた。

一方、核融合炉のプラズマ対向材料の候補として考えられているタングステン合金などでは水素同位体の貯留が大きな問題になっている。タングステンに照射によって空孔型欠陥が導入されると、多量の水素が捕獲されるという報告がある。タングステンは体心立方格子(bcc)型の構造を有しているが、他のbcc金属では必ずしも同様の水素捕獲が起こる訳ではない。しかし、同じ結晶系である一部の金属間化合物ではタングステンと同様に空孔当りに複数の水素原子が捕獲安定化するという計算結果が得られている。中でもB2型規則構造を有するFe-Al 合金でこのような空孔による多量水素捕獲と考えられる空孔の挙動を我々は陽電子で捉えており、現在も計算と実験の両側面からの実証を試みている。今回はこのような多量水素 捕獲が結晶構造に由来するものか実証するために、同じB2型構造を有するFe-Rh 合金において電子線照射を行い、欠陥の挙動について陽電子消滅測定と陽電子による欠陥形態の計算シミュレーションのFe-Al 以外の合金への適用を行った。

【実験方法】

Fe-Rh 合金はアーク溶解にて作成した等比組成(化学量論組成)のインゴット試料をおよそ 10 mm×10 mm×1 mm の板状に切出し、表面を鏡面研磨した。この試料を 3×10<sup>-4</sup> Pa

の真空中で 600℃、120 時間の焼鈍を行均一化 熱処理したものを用いた。X 線回折では、均 ーな B2 構造が得られており、これを電子線照 射に供した。電子線照射は京都大学原子炉実 験所(KURRI)にて電子線型加速器を用いて 8MeV の電子線を照射温度 35~40℃で、照射 量 1×10<sup>18</sup> e/cm<sup>2</sup>の照射を行った。一方、照射 試料に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 0.3A/cm<sup>2</sup> で 10 時間行った。また比較のため に、未照射材に対しても同様の水素チャージ を行った。これらの試料に対して、X 線回折、 陽電子消滅寿命測定、同時計数ドップラー広 がり測定(CDB)定を行った。



図1 照射前後および水素注入した Fe-Rh 合金での X 線回折パターン



図2 電子線照射後に水素チャージした Fe-Rh合金の陽電子寿命の経時変化



### 実験結果

図1に各試料のXRDの結果を示す。未照射材でほぼ均質なB2構造を示しており、照射お よび水素チャージによる新たな結晶相の生成は見られない。一方、陽電子寿命は未照射で 173ps という長寿命成分が僅かに残っており、空孔が残留していた。この試料に電子線照 射を行うと、陽電子寿命は長寿命成分が13psec長くなり数密度に対応する相対強度も増加 した。陽電子寿命計算を行うと、単一空孔の寿命はロジウム原子が不在のロジウム空孔 VRh の方が逆の鉄空孔 VFe に比べ 17psec 程度高いことから、照射によって VRh の割合が増加し たことが示唆される。すなわち、残留空孔は構造欠陥として VFe が多く含まれており、8MeV 照射では VRh も多く生成していると言える。このため、この照射では両タイプの空孔を導 入していることになる。この照射試料に水素を注入すると陽電子寿命は144psecまで低下 した。この値は単一空孔よりも低く、バルクによる自由消滅よりも高い値であることから、 空孔内に水素が捕獲されたことを示している。図2に示す様に陽電子寿命はこの後大気中 で7日間放置すると僅かに 4psec ほど増加したが、空孔の値にもバルクの値にもならない ことから、空孔への水素捕獲が安定であることがわかった。図3は未照射状態の供資材を 基準として電子線照射、水素注入および照射後水素注入した試料の CDB スペクトルの比 率曲線を示す。電子線照射では電子運動量の低い 0~0.005 付近が高くなっており明らかに 空孔が導入されたことを示している。一方、水素チャージ試料はチャージ前に比べ同様の 低運動量領域が減少していることから、残留空孔にも水素が捕獲された事を示している。 さらに電子線照射後に水素チャージすると、低運動量領域で照射後試料よりも低く、未照 射の基準試料との中間に位置した。これは照射で導入された空孔に水素が捕獲された事を 示している。しかし、今回の実験では照射電子のエネルギーが高く優先的な欠陥種の制御 ができなかったため、どちらのタイプの空孔への捕獲が優位に起こっているか判断できな かった。そのため、今後は低エネルギーでの照射による水素捕獲と計算との比較から水素 捕獲の優勢な空孔タイプの同定を行う。

研究組織: 堀史説(大阪府大工学研究科)、岩瀬彰宏(大阪府立大学)、角倉優雅(大阪府 大院生)、Xu Qiu(京大原子炉)、大澤一人(九大応力研)

**謝辞**:本研究を実施するにあたり、共同研究により議論いただきました大澤先生に感謝致 します。また、実験を実施するにあたり、電子線照射にご協力頂いた京大原子炉の徐准教 授、量研機構の斎藤勇一博士、石川法人博士に感謝致します。

# LIF を用いた直線装置 PANTA における境界領域の高精度中性粒子計測

### 九州大学総理工学府 寺坂健一郎

# 目的

本研究の目的は、直線装置 PANTA における中性粒子密度や速度を計測し、流れ 場の構造形成における役割を検討することである。近年の研究から、種々のプラ ズマにおいて流れ場の構造形成が報告されている。乱流による駆動力が指摘さ れている一方で、最終的な流れ場の分布を決めるためには、減衰力や境界条件が 重要な情報となる。こうした効果をもたらす重要な自由度として中性粒子があ る。その理由は中性粒子とイオンの荷電交換がプラズマ流に対する減衰力を及 ぼしたり、壁付近における中性粒子の流れが境界条件を定めたりするためであ る。本研究では、PANTA における中性粒子密度や速度を計測し、プラズマ流形 成に対する中性粒子効果 (すなわち減衰力や境界条件)を実験定量的に調査する ことを目的とする。

# 結果

本年度の研究では、レーザー誘 起 蛍 光 法 (LIF) を 直 線 装 置 PATNA に実装し、イオン温度の 計測に成功した。はじめに、代表 例として、入射ガス圧 0.8mTorr, 磁場 900G、入力パワー (ヘリコ ン) 3kW の PANTA における標 準的な放電を対象とした。この ときの LIF 計測結果、蛍光スペ クトルを図1に示す。マクスウ ェル分布との比較からイオン温



図1PANTA における蛍光スペクトル

度を評価し、 $T_i \sim 0.31 \pm 0.04 \text{ eV}$  という結果を得た。過去のイオンセンシティブ プローブ計測では $T_i \sim 0.24 \pm 0.08 \text{ eV}$  という結果が報告されており、誤差の範囲 内で一致する結果が得られている。



図2 PANTAにおけるイオン温度の入力ガス圧依存性

次に、上記の計測を異なる入射ガス圧力 (0.8,2,3 mTorr) に対して繰り返した。 その時の結果を図2に示す。このとき同時に計測されていたトムソン散乱によ る電子温度(その1/10の値)の計測値を青色で示している。これから PANTA で は  $T_i \ll T_e$  という関係が成り立っていることが示唆される。様々な解析を進め る際に冷たいイオンという近似を用いており、これらの結果により従来のモデ ル解析の妥当性が担保される。より強固な研究基盤を与える結果となっている。

PANTA における LIF 計測が実装され、イオン温度の計測に成功した。また、 中性粒子計測用レーザーを本システムに組み込み、光路の切り替えによってイ オンおよび中性粒子計測が可能な入射系を構築した。今後は中性粒子計測を順 次進める予定である。

# 成果報告

[1]木村俊介、荒川弘之、稲垣滋、他 10 名、「レーザー誘起蛍光法を用いたイオン温度計測のための高速波長スキャン」、プラズマ・核融合学会第21回位九州 支部大会、佐賀大学 2008.12.16

# 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 (帝京大学)

# 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

核融合炉における水素のリテンションを模擬するため、タングステン基板上に蒸着したタ ングステン膜中の重水素の濃度をその場観察した。RF プラズマに曝した蒸着膜中の重水素 濃度は、タングステンバルク材よりも1桁程度低く、373K~600Kの温度範囲では、温度に ほとんど依存しなかった。

1. 序論

プラズマに対向した固体表面における水素リテンション(保持量)は、プラズマの長時間 維持に大きな影響を及ぼし得る因子である。リテンションは入射水素数と放出水素数を定 量的に把握すれば予測できるが、後者の量を決定する再結合定数は理論的な取扱が難しい ため、実際に用いられている材料での値を評価する必要がある。

本研究は、実際の核融合炉を想定し、タングステン基板上に蒸着したタングステン膜を試 料とし、小型のプラズマ装置と加速器分析を組み合わせたその場観察法でリテンションを 調べた。

2. 方法

試料はタングステンをターゲットとし て水素プラズマでタングステン基板上に スパッタ蒸着したタングステン膜であり、 基板の厚みは1mm、大きさは12x12mm<sup>2</sup> である。膜の厚みは試料によって異なる が、17W-Bが970nm、17W-aが1060nm、 17W-dが740nmである。

リテンションを測定した実験装置の概 要を図1に示す。試料を真空槽に取り付 け、膜のある側を重水素プラズマに曝し続 ける。この状態で45度方向から1.5MeV の<sup>3</sup>He イオンビームを試料に照射し、D



図1 実験装置の概念図

(<sup>3</sup>He, p) <sup>4</sup>He による核反応を利用して、試料中の重水素濃度の深さ方向分布を、時間の経過 と共に断続的に測定した。1回の測定に必要な時間は15分程度であり、プラズマを停止し た後も測定を続けた。プラズマはRFによる弱電離によって生成した。水素粒子の典型的な エネルギーは1eV 程度である。

### 3. 結果

図2に重水素の深 さ方向分布の一例を 示す。横軸は表面から の深さ、縦軸は重水素 濃度である。深さ0に 濃度のピークがある のは、表面に吸着して いる重水素によるも のであり、バルク(正 の深さ方向)の重水素 は溶解または捕捉さ れている重水素であ る。表面の重水素は、 系の分解能(半値幅) が 100nm 程度である ため、バルク領域や負 の深さに拡がってい るように見えている。 この影響は 200nm よ り深い領域までは及 んでいないと考え、 200~800nm の平均 濃度を重水素の濃度 C とした。また、-200~ +200nmにおける重水









素濃度の積分値から、0-200nmのバルクに存在すると考えられる重水素の量を差し引いた 値を、重水素の表面密度 S とした。

試料 17W-Bを 373K でプラズマに曝し、続いて停止したときの重水素濃度 C の時間変化 を図3に示す。濃度は比較的速やかに増加して 2×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>に達した。次にプラズマを停止 すると濃度は速やかに減少したが、ゼロにはならず、1.0×10<sup>19</sup> cm<sup>-2</sup>が残った。この残量は 重水素が捕捉サイトに捕捉されている量であり、プラズマ曝露中の量と停止後の残量との 差 2×10<sup>19</sup> cm<sup>-2</sup>が動的リテンションであると考えられる。

4. 考察

プラズマに曝露して充分時間が経過したときの重水素濃度*C*の温度依存性を図4に示す。 塗りつぶした印は当研究室で過去に測定したタングステン材における測定結果であり、プ

ラズマ条件は同じである。◆と ●はニラコ製で熱処理を施して いない。■と▲はアライドマテ リアル製で1173Kで焼鈍し、ダ イヤモンドペーストで研磨して いる。研磨していないニラコの 方がやや濃度が低い傾向が見ら れるものの、両者に大きな差は 見られず、500K以上で減少する 傾向を示した。これに対し本研 究で用いたタングステン蒸着膜 では、濃度が1桁低く、600K以 下では温度に依存しなかった。 図5は重水素表面密度Sの温度 依存性であるが、最も高温の1 点を除いては、温度依存性がほ とんど見られず、また、値もタン グステン材に較べて低い。これ らの結果は、タングステン蒸着 膜への重水素の侵入が少ないこ とを示唆している。実際、動的リ テンションは溶解している重水 素の濃度であり、捕捉されてい る重水素を平衡が成り立ってい ることと、表面からの重水素の





放出は濃度 C の2乗と再結合定数の積であることを仮定して、重水素濃度の時間変化を図 3の曲線で示したようにシミュレーションしたところ、重水素の侵入確率が1より充分小 さいという結果が得られた。一般に、直接内部に注入されるほどのエネルギーを持たない水 素の侵入確率は不純物の存在によって小さくなることが知られており、この試料でも同じ 理由と考えられる。

図3に示したプラズマ曝露中の測定値は、統計誤差を超えてばらついている。他の試料や 温度では、プラズマ曝露中もプラズマ停止中も測定値に大きなばらつきが見られた。このた めか、上記のシミュレーションによって得られた再結合定数の値や、図5に示したデータか ら得た表面再結合の速度定数の値は、ばらつきが大きく、アレニウスプロットしてもデータ は直線上に並んでいるようには見えなかった。このばらつきの原因は不明であるが、表面の 不純物がプラズマ中や内部から表面に移動してきた重水素と化合し、放出されることによ って減少する一方で、残留ガスなどによって増加する過程が競合し、時間に対して一定にな らないのではないかと考えている。

このような大きなばらつきのために、溶解している重水素と捕捉されている重水素の平 衡定数も正確に求めることはできなかったが、今回の実験では、図3に示したように、溶解 している重水素の濃度と捕捉されている重水素の濃度は同じオーダーであり、溶解してい る重水素(動的リテンション)が、全重水素量に較べて著しく低いということはなかった。

5. まとめ

タングステン基板上にタングステンを蒸着した膜に重水素プラズマを曝した場合の、膜 中の重水素の挙動を核反応法を用いて調べた。その結果、(1) プラズマ停止後速やかに膜か ら放出される動的リテンションが観察された、(2) 動的リテンションの量は全体のリテンシ ョンの量(重水素濃度)と同じオーダーであった、(3) 重水素濃度はタングステン材よりも 1桁程度低く、600K以下の温度範囲では、温度にほとんど依存しなかった、(4) 測定され た重水素濃度に統計誤差を超えるばらつきがあった、ことがわかった。(3)と(4)の共通の原 因として、表面に不純物が存在していることが考えられる。

論文・学会発表リスト

学会発表

村上貴俊、平田貴大、高木郁二、花田和明、吉田直亮、「QUEST で生成した堆積層における重水素の吸蔵および放出」、日本原子力学会秋の大会 3009、2017/9/13-15、北海道札幌.

T. Murakami, T. Hirata, I. Takagi, K. Hanada, N. Yoshida, T. Kobayashi, T. Sasaki, "Hydrogen potential energy in a plasma-induced deposited layer of QUEST", ICFRM18, 8PT37, 2017/11/5-10, Aomori, Japan.

### 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

京都大学原子炉実験所	徐	虬
九州大学応用力学研究所	徳永利	□俊

1. 目的

タングステンは融点が高い、スパッタ率が低い、水素蓄積が少ない利点があるため、プラズマ対向材料として注目されている。一方、低温脆化、再結晶脆化及び照射脆化がタングステンの使用の問題点となっている。TiC、La2O3、Y2O3などの第2相粒子は、タングステンの低温脆化、再結晶脆化及び照射脆化の問題を解決することが期待されている。例えば、純タングステンよりW-La2O3合金の方がもっと良い機械性質を有し、再結晶温度も高い。従って、W-La2O3合金が有望なプラズマ対向材である。本研究では、放電プラズマ焼結法(SPS)を用いて、W-La2O3合金を開発した。開発したW-La2O3合金の熱特性を評価する前に、重水素保持特性とヘリウム照射特性を調べた。

2. 実験方法

市販のパラタングステン酸アンモニウム(NH4) $_{10}$ H2W $_{12}O_{42}$ ・XH2O(APT)と硝酸ランタン水合物に よりLaドープされたパラタングステン酸アンモニウムを合成した。この前駆体を粉砕し、高純度水素 を流した管状炉内に5K/分の速度で1073Kまで加熱した。その後、W/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末を直径50mmのグラ ファイトダイスに詰め、圧力をかけながら高温で固め、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加したタングステン合金を得た。こ の合金から厚み0.3mm、直径3mmまたは5mmの試料を切り出した。試料の表面を粗研磨から鏡面研 磨まで実施した。前者は透過型電子顕微鏡(TEM)による微細構造の観察に使用され、後者は重水素の 熱脱離試験に使用された。比較のため、1773Kでよく焼鈍した市販の純タングステン及びSPSで作ら れたタングステンも使われた。マグネットセパレータ付重水素イオン銃(オメガトロン社製)を用いて 5keV で重水素を注入した。重水素の照射量は $1.0\times10^{20}$ から $1.0\times10^{22}$ D+/m<sup>2</sup>であった。注入後、1073K まで昇温脱離ガス分析法(TDS)により重水素の放出を調べた。昇温速度は1K/s であった。透過型電 子顕微鏡その場観察用イオン照射装置を用いて、773K、973K及び1173Kで予め薄膜化したW-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と純Wにヘリウムイオン照射を行った。ヘリウムイオンエネルギーは5keVであった。最大照射量は $1.8\times10^{21}$ He+/m<sup>2</sup>であった。

3. 実験結果と考察

図1に重水素を照射したW-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金における重水素放出の温度依存性を示す。比較のため、1773K でよく焼鈍した市販の純タングステンとSPSで作られたタングステンの重水素放出の特性も示す。図 1(a)、(b)と(c)はそれぞれ市販の純タングステン、SPSの純タングステン及びW-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金の重水素脱 離スペクトルである。すべての試料においては、放出された重水素の量が照射量の増加と共に増加した。 SPSのタングステンの重水素放出量が最も多かった。このことからドープされたLa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子がタングス テン中の重水素の蓄積を抑制したことが分かった。市販の純タングステンにおいては、1.0×10<sup>22</sup>D<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> まで照射しても重水素放出ピークは1つしかなかった。その放出ピークの温度は430Kであった。一方、 SPSの純タングステンは照射量の増加につれて、600Kで新たに放出ピークが現れた。W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金に おいては、SPSの純タングステンと同様に700Kで新たに放出ピークが現れた。この放出ピークは試料 中に既存の欠陥によるものだと思われる。また、400Kで現れたピークが照射量の増加と共に高温側に シフトした。

W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金においては、773K、973K及び 1173K でヘリウム照射によって形成されたバルブが観察された。図2に各温度で形成されたバルブの密度とボイドスエリングの照射量を示す。比較のため、1173K で市販の純タングステンの照射データも示す。いずれの温度においては、W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金における ヘリウムバルブの密度が照射量の増加と共に増加し、その後減少した。密度の減少はヘリウムバブルの 成長によるものであった。一方、W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金におけるボイドスエリングがヘリウムの照射量の増加と 共に増加した。1173K で、純タングステンのボイドスエリングに比べ、W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金の方が低かった。これは La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の第2相粒子がヘリウムバルブの成長に抑制することを示唆している。

4. まとめ

放電プラズマ焼結法でW-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金の開発を成功した。ドープされたLa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子がタングステン中の 重水素の蓄積を抑えた。また、ヘリウムバルブの成長も抑制した。



# Modeling of Plasmas and Neutrals Including Plasma-Wall Interaction for Long Term Tokamak Operation

Akiyoshi Hatayama<sup>1</sup>, Kousuke Okamoto<sup>1</sup>, Ryoko Tatsumi<sup>1</sup>, Kazuhiro. Abe<sup>1</sup>, <sup>1</sup> and Kazuaki Hanada<sup>2</sup> <u>畑山明聖</u><sup>1</sup>, 岡本浩輔<sup>1</sup>, 巽瞭子<sup>1</sup>, 阿部和広<sup>1</sup>, 花田和明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of science and Technology, Keio Univ., Japan <sup>2</sup>Advanced Fusion Research Center, RIAM, Kyushu Univ., Japan. <sup>1</sup>慶應義塾大学大学院理工学研究科,<sup>2</sup>九州大学応用力学研究所高温プラズマ理工学研究センター

The purpose of this study is to develop a plasma-neutral model including a long time scale interaction with metal PFMs. As a first step, we have developed a simple zero dimensional (0D) model which consists of the particle balance equations for the following three different particle species: i) hydrogen plasma, ii) neutral atoms (H) and molecules(H<sub>2</sub>) in the gas phase and iii) the wall-stored H atoms. The model has been applied to simulate a long term operation with the limiter configuration of the QUEST tokamak. Modeling results of the long time evolution of the plasma and neutrals reasonably reproduce experimental tendency. Although the present model is relatively simple, it is useful to understand the basic characteristics of overall plasma particle balance, the density control of the main plasma and also H atom wall-inventory for the long term operation.

#### 1. Introduction

Metal plasma facing materials (PFMs) are expected to be one of the promising candidates for future fusion power plants. One main reason is its favorable property of the tritium wall retention in comparison with carbon based plasma facing materials. In such future power plants, a long term steady-state operation will be expected. The density control of the core/main plasma is one of the critical issues. However, the effect of the wall retention of fuel hydrogen on the main plasma density control has not been completely understood yet. Recently, experimental studies on the effects of such a long time scale plasma-wall interaction on the main plasma density and its control have been done in the QUEST tokamak [1,2,3].

The purpose of this study is to develop a plasma and neutral model which includes the long term plasma-wall interaction, especially the interaction between the plasma and metal PFMs in order to understand basic characteristics of the long term behavior of the plasma and neutral particle balance. The model is a very simple zero-dimensional (0D) model. It may be, however, useful to understand the basic characteristics of the overall particle balance of the fusion devices and the control of the main plasma density for the long term operation expected in the future fusion reactors, because the present 2D/3D multi-dimensional models of SOL and divertor plasmas [4,5] for such long time scale phenomena seem to be too massive to simulate with reasonable computational costs.

In the present paper, the initial comparison of the modeling results has been made with those of long term (~ over 100 seconds) limiter discharge



operation in the QUEST tokamak for the model validation and for making clear the points to be improved in the next step.

#### 2. Model equations for the particle balance

**2.1 Plasma Particle Balance** Time evolution of the volume averaged densities of the main and SOL plasmas are modeled respectively by

$$\frac{d\bar{n}_{M}}{dt} = -\frac{\bar{n}_{M}}{\tau_{M}} + \bar{S}_{M},\tag{1}$$

$$\frac{d\overline{n}_{SOL}}{dt} = (1 - f_{wall}) \frac{\overline{n}_M}{\tau_M} - \frac{\overline{n}_{SOL}}{\tau_{ll}} + \overline{S}_{SOL}, \qquad (2)$$

where  $\tau_{M}$  and  $\tau_{//}$  are the confinement time of the main and the SOL plasmas, respectively. The fraction of the particle source which contributes to the wall is denoted by  $f_{wall}$ . The symbols  $\overline{S}_{M}$  and  $\overline{S}_{SOL}$  are the ionization and recycling source term. **2.2 Neutral Particle Balance** The volume averaged density of H<sub>2</sub> molecules and H atoms are given,

$$\frac{d\bar{n}_{H_2}}{dt} = \bar{S}_{H_2}^{Gas-Puff} + \bar{S}_{H_2}^{Wall/Lim} + \bar{S}_{H_2}^{gain} - \bar{S}_{H_2}^{loss} - \bar{S}_{H_2}^{Pump} - \frac{\bar{n}_{H_2}}{\tau_{H_2}} (3)$$
$$\frac{d\bar{n}_H}{dt} = \bar{S}_H^{gain} - \bar{S}_H^{loss} - \bar{S}_H^{CX} - \frac{\bar{n}_{H_2}}{\tau_H} .$$
(4)

In Eq.(3),  $\bar{S}_{H2}^{Gas-Puff}$  and  $\bar{S}_{H2}^{Pump}$  are the molecular source and sink by the external gas puffing and pumping. The symbol  $\bar{S}_{H2}^{Wall/Lim}$  is the molecular source by the out-flux from the wall and limiter/divertor. These terms are calculated by the wall and limiter/divertor surface model below. In addition,  $\bar{S}_{H2}^{gain}$ ,  $\bar{S}_{H2}^{loss}$ ,  $\bar{S}_{H}^{gain}$  and  $\bar{S}_{H}^{loss}$  are the source and sink due to molecular and atomic processes in the gas phase. Finally, the last term of Eqs. (3) and (4) is the transport loss term. In order to compare the H $\alpha$  intensity from the excited H atom with the experiments, the Collisional-Radiative (CR) model developed in Ref. [6.7] has been used.

**2.3 Surface Model** The average density  $\overline{n}_{wall}$  of the wall-stored H atom in the surface re-deposition layer with the width  $d_{wall}$  is given by [1, 2]

$$\frac{d\overline{n}_{Wall}}{dt} = \frac{\Gamma_{Wall}}{d_{Wall}} - \frac{2k_{Wall}}{d_{Wall}} \overline{n}_{Wall}^2 , \qquad (5)$$

where  $k_{Wall}$  is the recombination coefficient. The particle flux density  $\Gamma_{Wall}$  at the wall is calculated from the transport loss term in Eq.(1) and CX neutral flux in Eq. (4). In the same manner, the H atom density in the limiter or divertor plates is calculated by

$$\frac{d\bar{n}_{Lim/Div}}{dt} = \frac{\Gamma_{Lim/Div}}{d_{Lim/Div}} - \frac{2k_{Lim/Div}}{d_{Lim/Div}} \bar{n}_{Lim/Div}^2 .$$
(6)

#### **3. Numerical Results**

The main assumptions/conditions are as follows. The volume and surface area of the vacuum vessel are  $V_v=12.8 \text{ m}^3$  and  $A_v=26.5 \text{ m}^2$ . Major and minor radius of the main plasma are R=0.68 m, a=0.4 m. Temperatures of each species are  $T_e=10\text{eV}$ ,  $T_i=1\text{eV}$   $T_{H2}=0.01\text{eV}$  and  $T_H=0.1\text{eV}$ , respectively. The confinement time for each species is estimated by the device dimension, thermal velocity for the neutral, while by diffusion coefficient  $D=0.3 \text{ m}^2/\text{s}$  for the main plasma. Due to relatively low density operation of the main plasma, the sheath limited low recycling state has been assumed. Also, the wall and limiter recombination coefficients are the same  $k_{Wall} = k_{Lim} = 1.0 \times 10^{-38} \text{ m}^4/\text{s}$  for simplicity.

The density feedback control has been done by diagnosing the H $\alpha$  signal as in the experiments. If the H $\alpha$  intensity becomes below a certain preset level, then the external gas puffing (with  $3x10^{18}$  molecules for 10 ms) has been done.

Figure 2 shows the time evolution of the plasma density and H $\alpha$  intensity calculated from the present model. Figure 3 shows the time evolution of the H atom wall-inventory. From Fig.2 and Fig.3, the characteristic features are summarized as follows:

1) During early phase  $(0 \le t \le 30 \text{ s})$  before the saturation of the H atom wall-inventory, the frequency of gas puffing (corresponding to the rapid increase in H $\alpha$  signal) is relatively large.



Fig.2 Time evolution of the plasma density and H $\alpha$  intensity



Fig.3 Time evolution of the wall H atom wall-inventory

- The frequency is gradually getting smaller as time goes on. In other words, the time period between Hα peak is gradually getting larger.
- 3) After the wall saturation (t>70s), H $\alpha$  signal is almost constant and the plasma density is mainly sustained by the gas feed from the wall.

These tendencies have been observed also in the experiments [2,3], The plasma density in the experiments, however, is about two or three times larger than that obtained by the present model.

#### 4. Summary and future study

We are developing the model which includes the long term plasma-wall interaction. To validate the model, the initial application to a long term operation in the QUEST tokamak has been done.

Although the present model is relatively simple, it is useful to understand the basic characteristics of the overall plasma/neutral particle balance and H atom wall-inventory. However, it will be necessary to improve the model in the future by the sensitivity study of the modeling results on assumptions, simplifications and input parameters in the wide range of the parameter space, and their comparisons with the experimental results.

#### References

- [1] K. Hanada, et al., Nucl. Fusion 57(2017)126061.
- [2] K. Hanada, et al., Plasma Science and Technology 18(2016) 1069.
- [3] T. Honda, Department of Advanced Energy Engineering Science, Kyushu University, Master's thesis (2014).
- [4] R. Schneider et al: Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 3.
- [5] Y. Feng et al: Comp. Phys. Communications **184**(2013) 1555.
- [6] T. Shibata, et al., J. App. Phys. **114**(2013)143301.
- [7] T. Shibata, et al., Plasma Fusion and Research 9(2014) 1401011.

ジャイロ流体モデルによる直線装置 PANTA における ITG モードの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。このため、理論・シミュレーションの観点から ITG モードが線形的に不安定にな るパラメータ領域を調べ、実験にフィードバックすることを研究目的とする。

#### 研究成果

磁場閉じ込めプラズマにおける異常輸送の原因の1つにイオン温度勾配による微視的不安定 性(ITG 不安定性)が挙げられる。ITG 不安定性の励起条件や、それらモード間の非線形結合の 研究は、直線型磁化プラズマを用いた基礎実験において行われており[1]、直線装置 PANTA にお いても、イオン温度計測が進められ流体モデルを用いた ITG 不安定性の解析が行われている[2]。 ITG 不安定性はイオンの温度勾配  $L_{r}$ -d(ln7)/dr と密度勾配  $L_{n}$ -d(ln*n*)/dr の比  $\eta_{i}$ = $L_{n}/L_{r}$ が閾値 を超えることにより励起されるがイオン温度が数[ev]と低くても  $k_{\perp}\rho_{s}$ ~1のモードが不安定と なり得ることが確認されている[2]。そのため、有限ラーマ半径(FLR)効果を考慮したモデルに よる解析が必要となる。これまでに、ジャイロ運動論方程式のモーメントをとることにより導 出されるジャイロ流体方程式を用いた局所解析を行い、研究成果として ITG 不安定性の線形成 長率のパラメータ依存性を取得している[3]。本研究では、ジャイロ流体モデルについて、ITG 不安定性の径方向分布を含む固有関数を解くためにグローバルコードを開発した[4]。今回は、 そのグローバルコードを用いて得られた PANTA における ITG 不安定性の線形成長率のモード構 造とパラメータ依存性を報告する[5、6]。

プラズマの幾何学的形状は単純な円筒形状であり、磁場は均一な軸方向成分のみを有する。 シミュレーションでは、以下の PANTA のアルゴン放電実験パラメータを使用する;  $L_z = 4.0$ m、a = 0.07m、 $L_n = 0.07$ m、密度  $n = 1.0 \times 10^{19}$ m<sup>-3</sup>、 $T_{10} = 0.3$ eV、 $T_{e0} = 3$ eV、磁場 B = 0.1T、 $v_{11} = 350$ s<sup>-1</sup>。開発したジャイロ流体コードを用いて数値解析を行った。 グローバルコードでは、成長率 および固有周波数に加えて、 $T_{\perp}$ 、 $T_{//}$ 、n、 $u_{//}$ 、 $\phi$  およびΨの径方向分布を得ることができる。 図 1 は、m = 2、 $\eta_{//} = \eta_{\perp} = 2$ 、 $\tau = 1$ の場合の  $T_{\perp} \ge T_{//}$ の径方向分布を示している。m = 2の モードが最も不安定であり、 $\omega_r = 1.3 \times 10^{-2}$ 、 $\omega_i = 1.6 \times 10^{-2}$ となる。 ここで導出される  $k_r$ を 導入した局所モデル解析と同様の結果が得られた。ITG 不安定性の傾向を理解するため ITG 不安 定性にとって最も重要なイオン温度に関する依存性をみる。 ここでは、イオン温度の大きさお よび勾配長に対する依存性を評価する。図 2 に、 $\eta_{//} = \eta_{\perp} = \eta$  と仮定して、 $\tau = \eta$  空間に おける成長率の等高線プロットを示す。ITG 不安定性の閾値  $\eta_c$ は、 $\tau$  の大きさに依存して変化 する。最小値  $\eta_c = 0.8$  より、 $\eta_c$ は  $\tau$  が増加するにつれて増加する( $\tau = 1.0$  のとき  $\eta_c = 1.7$ )。 これは局所解析の結果と同じ傾向を示している。図 2 の×字は、PANTA における実験条件の 1 例 を示している(アルゴン放電,  $\tau = 0.1$ 、 $\eta = 0.2$ )。この結果は PANTA で ITG モードを励起さ せるためには、より高い温度勾配が必要であることを示している。他の実験パラメータについ ても評価した。イオン質量はガスの種類によって異なり、ラーマ半径も異なる。空間長はラー マ半径により規格化されるため、実効的なプラズマ半径が変化する。ヘリウム、ネオン、アル ゴンの場合を評価した結果、ヘリウムの $\eta_o$ の最小値は、アルゴンの $\eta_o$ よりも約 20%小さいこ とが明らかになった。



以上まとめると、直線装置 PANTA における ITG モードの励起条件を調べるために、線形成長 率を計算した。解析には、グローバルな固有関数を解く FLR 効果を含むジャイロ流体モデルを 使用した。グローバルモデル解析の結果は局所モデルの結果を再現し、不安定性励起の閾値に 対する依存性を示した。PANTA の実験パラメータは安定領域に存在し、ITG 不安定性の励起には 4 倍以上大きい n が必要であることが判明した。一方、直線装置 CLM では、密度勾配と温度勾 配の急峻な位置が径方向で異なる場合に、ITG 不安定性が観測されている[1]。したがって、温 度および密度の分布制御によって不安定性の励起条件を探る必要があることが明らかとなった。 今後は直線装置における ITG 乱流輸送のシミュレーション研究へと展開する予定である。

## 参考文献

- [1] A.K.Sen, et al., Phys. Rev. Lett. 66, 429 (1991)
- [2] Y Miwa, et al., Plasma Fusion Res. 8, 2403133(2013)
- [3] G. Hattori, et al., Plasma Fusion Res. 10, 3401060 (2015)
- [4] 応用力学研究所共同利用研究平成27年度成果報告28FP-6
- [5] 大野友嗣、"Global Mode Analysis of Ion-Temperature-Gradient Instabilities in Magnetized Cylindrical Plasmas"、九州大学 総合理工学府、修士論文 2018
- [6] T. Ohno et al., "Global mode analysis of ion-temperature-gradient instabilities using the gyro-fluid

model in linear devices", submitted to PFR.

## 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)

# 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 エネルギー理工学部門 橋爪 健一

<u>1. 目的</u>

液体リチウム(Li)を冷却材兼増殖材として利用する核融合炉システムでは、生成したトリチウムを Liよりも活性な金属を使って回収することが考えられている。表1の水素溶解熱[1]に示すようにLiと 水素の結合は強く、Liよりも水素との結合力の高い金属としてはイットリウム(Y)が最も有力である。 しかし、金属Yは非常に活性で室温でも大気中で表面酸化し易く化学的安定性に欠ける。ジルコニウム (Zr)は、Yには及ばないが水素との結合力が強く、また、Liとの共存性も良いことから、Liからのト

リチウム回収の可能性のある金属であると考えられる。また、Zr は Y に比べ大気中でも安定で、取り扱いが容易である。本研究では、Zr からのトリチウム回収を前提に、Zr に溶解した水素を高温での放出 挙動を明らかにすることを目的とした。また、Zr には多量に酸素が

溶解して Zr-O 系固溶体を形成することが知られているので、酸素が 溶解した Zr からの水素の高温放出挙動についても応用力学研究所お よび当研究室の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、Zr 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。

表1 金属への	の水素の溶解熱[1]
Metal	$\Delta H_{\rm s}({\rm eV})$
Li	-0.54
Y	-0.85
Zr	-0.67

#### 2. 実験

板状の金属 Zr (7x14x0.15 mm<sup>3</sup>)を用い、酸素濃度の異なる3種類の試料を準備した。まず、Zr 受入 材を 10<sup>-5</sup>Pa 以下の圧力で真空焼鈍(800℃、1h)し、これを純 Zr 試料とした。酸素溶解 Zr 試料として は、700℃で 1h、大気中で酸化したもの、および、同様に 750℃で酸化した試料の2種類を準備した。 これらの酸化試料は、10<sup>-5</sup>Pa 以下の圧力で真空焼鈍(800℃、24h)し、酸素を試料中に均一溶解させた。 酸素濃度は、酸化時の重量増加から、酸素濃度を均一溶解したとしてそれぞれ、ZrO<sub>0.09</sub>、ZrO<sub>0.14</sub>であっ た。これら3種類の Zr 試料に、重水素を 500℃でガス吸収法で溶解させ、さらにそのまま拡散焼鈍(1h) し、TDS 用の試料とした。TDS 装置にて昇温速度 1℃/sec で 1000℃まで試料を加熱し、H<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>のスペク トルを測定した。

## 3. TMAP-4

INEL (Idaho National Engineering Laboratory) で開発された TMAP4 (Tritium Migration Analysis Program ver.4) を用いて、Zr からの重水素の放出挙動を計算した。Zr の厚さは実験に用いた試料と同じ 0.15mm とし、 水素が 1%均一に Zr に溶解しているという初期条件で計算した。Zr 中の水素の拡散係数としては、

$$D(m^2/s) = 6.9 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{44.5 \, kJ/mol}{RT}\right) \tag{1}$$

を用いた。[2] 境界条件としては、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場合を基準 として水素の放出スペクトルを計算した。さらに、実験結果を再現できるように、拡散係数の活性化エ ネルギーを変化させた計算を実施した。加えて、表面での境界条件を変更し、水素の再結合速度を考慮 した計算も行った。具体的には再結合速度が水素の表面濃度 $C_{surf}$ の二乗に比例し(= $kC_{surf}^2$ )、その再 結合係数 k が下記の式で表せるものとして、その活性化エネルギー $E_{rec}$ を変化させた計算を行った。

$$k = 10^{-20} \exp\left(-\frac{E_{rec}}{RT}\right)$$
 (2)

#### <u>4. 結果と考察</u>

真空焼鈍後1%重水素溶解させた Zr、ZrO<sub>0.09</sub>、ZrO<sub>0.14</sub>からのD<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>のTDS スペクトル(イオン電流 値)を図1~3に示す。検出された水素はほぼD<sub>2</sub>であり、H<sub>2</sub>は少量であった。また、水蒸気の放出はほ とんど見られなかった。D<sub>2</sub>の放出スペクトルには、ピーク形状、温度および放出量に酸素量に対する変 化が見られた。図4に酸素濃度に対する放出ピークの最高温度を示す。酸素濃度の上昇とともにピーク 温度は上昇傾向にある。これは水素の拡散が酸素濃度増加とともに遅くなっていることを示唆している。 ただ、D<sub>2</sub>の放出量が酸素濃度に対して減少している原因については現状明確になっておらず、さらに追 加実験、検討を要する。図5~7にTDS 結果をシミュレートした TMAP-4の計算結果を示す。図5 は水 素の単純な拡散律速での放出である。実験結果と比較すると、100℃程度から放出が始まり、ピーク温 度も380℃でいずれも実験より低く実験を再現していない。図6は拡散係数の活性化エネルギーを高め た結果で、水素のZr中のトラップを、また、図7は、水素の表面再結合の変化を模擬している。放出 のピーク温度の上昇とピークの形状の変化を定性的には説明できるが、まだ完全に再現できてはいない。 今後、さらにパラメータ等を検討し、Zr からの水素の放出挙動の描像を明らかにしたい。



図5Zrからの拡散律速での放出

図6拡散の活性化エネルギーの影響



4. まとめ

本年度行った TDS 実験の結果は、Zr 中に溶解した重水素の放出挙動は、単純な拡散律速によるものではなく、水素の表面での再結合、および、拡散係数の低下が支配していることを示唆した。

5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一 大学院生:城戸佑介、城慎之介、森玉貴也、岩佐匡浩 学部生:川口要人、 江副樹蘭、桑原孝輔、重松和磨、長崎青波、面谷紘奎

九大応力研:渡辺英雄、牟田口崇史

# 参考文献

[1] Y. Fukai, "The metal-hydrogen system", Springer-Verlag (1993).

[2] K. Hashizume et al., J. Nucl Sci. Technol., 31 (1994) 1294.

# 不純物イオン発光線の高波長分解分光による QUEST 周辺プラズマのトロイダル流れ計測

京都大学大学院工学研究科 四竈 泰一

#### 目的

最外殻磁気面近傍からスクレイプオフ層に至るトカマク周辺部のイオン流れは、プラズ マ不安定性の抑制、ブロッブ輸送、ダイバータでの中性粒子圧縮等の事象の制御因子であ ることが明らかになっている.このためイオン流れの空間分布診断にもとづく流れの駆動 および散逸機構の解明に向けた研究が進められている.

このような状況の中で、申請者等は高波長分解の可視分光を用いて QUEST 周辺部にお ける不純物イオン発光線のドップラーシフトを計測し、イオンのトロイダル速度を推定す ることを試みている.本研究では2種類の不純物イオン C<sup>2+</sup>、O<sup>+</sup>の温度およびトロイダル 速度を計測し、両者の比較から水素、不純物イオン間での速度分布の緩和を検証した.

### 方法

QUEST において, 中心ソレノイドコ イルによる電磁誘導を重畳した 8.2 GHz 電子サイクロトロン共鳴加熱放電 を用いて実験を行った. 波長 465 nm 付近に存在する C<sup>2+</sup>, O<sup>+</sup>イオン発光線 を計測対象とした.

観測は中央平面の MH16 ポートに設置した合成石英窓を通して行った.弱磁場側周辺部に放射状の 14 視線を配置し,定常状態のプラズマからの発光を集光した(図 1).集光した光はバンドル型光ファイバ(三菱電線工業ST230D;コア径 230 µm,クラッド径250 µm,開口数 0.2)を用いて伝送し,



ツェルニ=ターナ型分光器(Acton Research AM-510; 焦点距離 1 m, 回折格子 1800 本/mm)
および CCD (Andor DU440-BU2) を用いてスペクトルを計測した. 波長分解能は約 50 pm
以下であった. 放電間に波長リファレンス光源を計測することで波長誤差を 0.5 pm 以下
(速度換算で約 0.3 km/s 以下)に低減した.

### 結果

視線7で計測したスペクトルを図2に示す. C<sup>2+</sup>,O<sup>+</sup>イオンの微細構造遷移による複数の発光 線が観測された.図中に矢印で示した2本の発 光線を解析した.

計測スペクトルは視線上に存在する局所的な 発光線を視線に沿って積分したものとなる.イ オンの放射率,温度,トロイダル速度の局所値 を求めるために,トロイダル断面内のプラズマ の軸対称性を仮定した逆変換を行った.中央平 面をリング状の領域(シェル)に分割し,各領 域に視線が1本ずつ含まれるようにシェルの境 界を配置した.トーラス外側から内側に向かっ て,各視線で計測される発光線形状の計算値を 実験値に対して最小2乗フィッティングし、シ



図 2. 視線 7 で計測したスペクトル

ェル内のイオンのパラメータを決定した.逆変換の範囲は,有意なフィッティング結果を 得るのに必要な S/N のスペクトルが得られた視線から最も内側の視線までとした.得られ た C<sup>2+</sup>, O<sup>+</sup>イオンの温度, トロイダル速度を図 3 に示す.

不純物イオントロイダル流れの駆動・散逸機 構は不明であるため、各イオン種がどのような 速度を持つかは予測できない.しかし、一般に 不純物イオン速度はイオンの質量及び電荷に依 存すると考えられる.これに対して、本実験で 得られたトロイダル速度は、C<sup>2+</sup>、O<sup>+</sup>イオンで 同程度となったことから、水素及び不純物イオ ン間の衝突による速度緩和が強く作用している 可能性が考えられる.

この仮説を検証するために、イオンが電離に より失われるまでの平均自由時間と、速度緩和 時間を比較した.前者の計算には, IAEA デー タベースに収録されている基底状態からの電離 断面積を使用し,電子温度・密度は代表値とし て 800 eV, 1×10<sup>17</sup> m<sup>-3</sup>を用いた. 一方, 後者 の計算にはブラジンスキーの式を用い、イオン 温度はイオン種によらず 4 eV, 水素イオン密度 は上記の代表値を用いた.得られた電離の平均 自由時間は C<sup>2+</sup>, O<sup>+</sup>イオンでそれぞれ 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-4</sup> s のオーダーとなり, 速度緩和時間は両イオン 共に 10<sup>-4</sup> s のオーダーとなった. また, イオン 温度についても両イオンで同程度の計測値とな っており、温度緩和時間を計算すると 10<sup>-4</sup> s の オーダーとなる.これらの結果から,上記仮説 が妥当であると考えられる.



## 成果報告

- [1] <u>T. Shikama</u>, K. Hanada, A. Fujikawa, *et al.*, "Development of a visible spectroscopy system to study intrinsic toroidal rotation in QUES", 3rd UNIST- Kyoto Univ. workshop on "Physics validation and control of turbulent transport and MHD in fusion plasmas" 2017/5 (口頭).
- [2] 藤川 祥亘, <u>四竈 泰一</u>, 花田 和明, 他, 「QUEST おける ECH 球状トカマクプラズマ 中の水素原子分子密度計測」Plasma2017 22Ca-06 2017/11(ロ頭).
- [3] N. Yoneda, <u>T. Shikama</u>, H. Zushi, *et al.*, "Spectroscopic measurements of impurity ion toroidal and poloidal flow velocities and their dependence on vertical magnetic field in QUEST toroidal ECR plasmas" ITC26 P2-34, 2017/12 (ポスター).
- [4] <u>T. Shikama</u>, "Spectroscopic measurements of intrinsic toroidal rotation in QUEST" 6<sup>th</sup> QUEST Workshop 2018/2(口頭).
- [5] 米田 奈生、四竈 泰一,花田 和明,他、「多視線発光分光を用いた QUEST ECH プラ ズマ中不純物イオンのトロイダル流れ計測」日本物理学会 第 73 回年次大会 22aK609-6 2018/3(口頭).

# プラズマ乱流における非線形時系列データの統計解析

Statistical analysis of nonlinear time series in plasma turbulence

富山大学·人間発達科学部 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。 また、線形の分散関係がほぼ満たされている弱乱流と非線形性が卓越する発達した乱流と ではスペクトルのべき指数等性質そのものが異なることも知られている。

本研究課題では、統計解析法の改良およびその手法の数値計算データや観測データ への適用を目指す。本年度は、(1)前年度から引き続き行っている機械学習を用いた解析、 (2)ソリトン理論を用いた解析、の2つを用いた議論を行った。

# 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、定期的に筑紫キャンパスに参集して議論を行うことを基本としている。

# 研究成果:

# (1)機械学習を用いた実験データ解析

本年度は、前年度から用いている九州大学応用力学研究所の PANTA 実験装置で生成されたプラズマ乱流(静電ポテンシャル)の時系列データに対し、ランダムフォレスト[1]を用いて特定のプローブで観測されたデータに対する回帰モデルを作成した。前年度はあるプローブで観測された時系列データを別プローブで観測したデータを用いて補間し、プローブ間隔に対する依存性を議論した。本年度は、KdV 方程式などの 2 次の非線形項を持つ物理モデルを想定し、静電ポテンシャル $\varphi$ にサブグリッドスケールフィルタをかけた量 $\bar{\varphi}$ の発展方程式上に現れるサブグリッドスケール項( $F = \overline{\varphi^2} - \bar{\varphi}^2$ )を、 $\bar{\varphi}$ を用いて回帰する。乱流の数値計算では、機械学習を用いた同様の試みが行われている[e.g., 2]。

前年度と同様に、32 本配置されている PANTA のプローブの中のある一つのプローブ の観測データを目的変数、他のプローブ(6 本)が観測したデータを説明変数として、統計ソ フトR(3.1.3)[3]の randomForest パッケージ[4]を用いて計算を行った。計算ではサブグリッド スケールフィルタのサイズをプローブ 2 本分にとり、回帰の際は昨年度の解析と同様に目的 のプローブの両側 4 本のデータ(各時系列1万点)を用いて回帰モデルを作成した。Figure 1(a)は回帰モデルを用いた予測結果である。昨年度同様、学習に用いた時間帯とは別の時 間帯のデータを検証用に用いている。相関係数は 0.84 であり、*φ*を直接用いた場合の値 (0.81)よりも僅かに良くなっている。randomForest パッケージ内で学習の際に Out-of-bag で 評価される精度は 99%以上である。実際に KdV 方程式を用いたモデル化を行う場合は物 理的要因からくるずれが大きくなるが、同様の手法を用いて補正項を含んだ改良モデルを 構築することは可能である。

## (2)ソリトン理論を用いた解析

ドリフト波乱流中のストリーマの生成過程に重要な役割を果たす媒介波のモデルとして、 Hasegawa-Mima 方程式から漸近展開で得られるソリトン解が知られている[5]。近年では、ソ リトン解の関数形を用いた波形の直接フィッティングも行われている[6]。本研究では、逆散 乱法を数値的に行いソリトン解の固有値を逆算する方法(数値逆散乱法[7]、または非線形 スペクトラム分解[8])を行うコードを作成し、テストデータを用いて解析を行った。ここでは、 KdV 方程式の逆散乱法の数値化を行った。Figure 1(b)は与えた固有値に対し計算した固 有値を書いたもので、波形から固有値が正確に計算できていることが分かる。今後は、(1)の 議論と連結させて、実験データから非線形波動の性質を抽出する手法の検討を行う。



Fig.1 (a)観測データ(横軸)と予測データ(縦軸)の散布図。(b)数値逆散乱法で評価した 元データの固有値(横軸)に対する計算した固有値(縦軸)

引用文献: [1] L. Breiman, Machine Learning, 45, 5–32 (2001); 平井有三, はじめてのパターン認識, 森 北出版(2012). [2] Wu et al, Flow Turbulence Combust., 2017. [3] R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL http://www.R-project.org/. [4] A. Liaw and M. Wiener (2002). Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), 18-22. [5] T. Yamada et al, Phys. Rev. Lett., 105, 225002 (2010). [6]金他, Plasma Conference 2017, 21P-34, オンライン予稿集(2017). [7]T. Hada, Geophys. Res. Lett., 20(9), 779-782 (1994). [8]川原琢治, ソリトンからカオスへ―非線形発展方程式の世界, 朝倉書店(1993).

# **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)

# 機械的合金化と高温等方加圧によるナノ粒子分散強化銅合金の微細構造における 高エネルギーイオン照射の影響

核融合科学研究所 室賀健夫

### 1. 目的

ヘリカル型核融合炉(FFHR)の設計において、ダイバータの配置変更による中性子負荷の低減の可能 性が明らかにされている。この中性子負荷の低減によってダイバータを構成する部材に適用する候補材 料として銅合金が再び注目されている。過去に、高温強度、耐照射性に優れた合金として、アルミナ分 散強化銅合金(Glidcop)が、ダイバータ構成部材として検討され、数多くの試験結果が報告されてい る。核融合科学研究所では、Glidcopの製法や微細構造を改良することによる分散強化銅合金の大幅な 特性改善を目的に、機械的合金化(MA)と高温等方加圧焼結(HIP)を組み合わせた新たな分散強化銅 合金の製法(MA-HIP法)の研究を開始した。本研究ではこれらの合金特性の改善と同時に微細構造におけ る照射損傷現象及びその強度特性への効果の理解のため、応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装 置を用いて、イオンビーム照射した分散強化銅合金の微視組織と強度を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

MA-HIP 法による種々の分散強化銅合金製作は次のように行った。基材となる純銅は 99.8 %の粒子を 使用した。また添加粒子は、Gridcop®との比較のため、純度 99.98 %のアルミニウム(AI)を用いた。 試料は、高純度不活性ガスグローブボックス内において、純銅に添加材を1Wt.%となるようAIを添加し、 遊星型ボールミル装置により 250 rpm、1<sup>~</sup>32 時間 MA 処理を行った。その後、粉末試料を、500 ℃の高 温脱気処理に供した後、大気に曝すことなく軟鋼カプセルへ真空封入した。HIP 処理では、950 ℃、150 MPa の環境で1時間保持することにより焼結を行った。得られた焼結材について、カプセル開封後、光 学顕微鏡(OM)および走査型電子顕微鏡(SEM)により組織観察を行い、ビッカース硬さ試験機を用い て機械的特性を評価した。また X 線回折装置を用いた MA 及び HIP 処理による格子定数の変化測定、電 気伝導度の測定、透過型電子顕微鏡(TEM)による内部組織観察により材料学的評価を行った。続いて、 九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置(タンデム型加速器)で重イオン照射を行い、 照射量及び照射温度をパラメータとした照射試料の準備を進めた。

### 3. 照射試験

製作試料を 0.1mm 厚さ、3mm 径のディスクに打ち抜き、表面を電解研磨した。重イオン照射は、 2.4MeV の Cu<sup>2+</sup>イオンを用い、2 × 10<sup>-4</sup>dpa/s の照射強度で 0.1, 1, 5, 10, 20, 30 dpa 照射を進めている。 また比較のため無酸素銅を 600°C 2 時間焼鈍した材料も同様に照射を進めている。現在は、照射試料の 製作が終了し、マイクロビッカース硬度、TEM 観察の準備を進めている。(図1. 図2参照)

	【試料作製】	【重イオン照り	討】	
	-		照射装置	タンデム型加速器
	【試料研磨】		照射イオン	Cu <sup>2+</sup> (2.4MeV)
	-		照射速度	2.0×10⁻⁴dpa/s
	【重イオン照射】		照射温度	400℃一定
HA-HIP (G-IwtAI)	+		照射量	30dpa(5dpa毎) (同一試料同一箇所)
HA-32hr.	【硬度測定】		試料サイズ	直径3mmΦ
HP: 950c×15011		【硬度測定】		
	【TEM 組織観察】		測定装置	超微小押込み硬さ試験機
	-		試料台温度	28±0.2°C
	【照射効果評価】		荷重	1000mgf
	※TEM:透過型電子顕微鏡		ステップ インターバル	20msec

図 1 イオン照射用サンプルと評価手順

図 2 イオン照射条件と硬さ評価(パラメータ)

4. 研究組織

室賀健夫、菱沼良光、能登裕之(以上核融合科学研究所)、渡辺英雄(九大応力研).
#### 鉄合金の劣化挙動に関する基礎的検討

#### 東芝エネルギーシステムズ 鹿野文寿

1. はじめに

原子炉の高経年化対策では、交換が困難である原子炉圧力容器の照射脆化への対応が必要である。照射脆化 による材料劣化について、運転年数の短い低照射領域では理解が進んでいるが、40年以上の高照射領域での振 る舞いやメカニズムは、まだ十分に理解されていない。これまで、照射脆化は、Cu等のクラスタ(析出物)とマトリクス 欠陥(主に照射による転位ループ)に起因すると考えられており、特にクラスタの寄与が大きいと考えられてきた。一方 で高照射領域では Cu クラスタが飽和傾向にあり、その他の脆化因子の寄与が顕在化するという指摘がある。

本研究は、中性子照射により Cu クラスタ密度が飽和した高照射領域での照射挙動を知るため、模擬的に Cu クラ スタを作り、分布の妥当性をミクロ組織から検証し、その追加照射によって、高照射領域での照射挙動を知るための一 助とすることを目的とする。本報告は、その第一ステップとして、 Cu クラスタ模擬材のミクロ組織評価を行ったものである。

2. 試験方法

Fe中のCuは、析出強化元素として知られており、熱処理を活用することで、自動車をはじめとして、一般的に産業利用されている。このような知見を活用し、熱処理で、模擬脆化材を作ることを試みた。これまでの検討で、実用材程度のCu量(0.1%以下)では、熱処理でCu析出物を作るのが容易でないため、規格上限である0.4%のCuを含む低合金鋼で、熱処理を行った。これはCu濃度が高いため、熱処理条件によっては、Cu析出物の粗大化や、数密度が過剰になる可能性がある。

これまでにも熱処理による脆化模擬の報告はされているが、Fe-Cu、Fe-Cu-Mnなど鉄系2元および3元系合金が 主体であった。これは、試験目的の違いもあるが、低合金鋼でのCu析出条件の決定が難しいことがある。本試験は、 低合金鋼規格で実施した貴重な試験となる。

なお、中性子照射されたCu析出物は、照射誘起によるCuクラスタと区別されている。Cuクラスタは、その中心部に 原子空孔集合体(Vクラスタ)や母材であるFeが存在し、その周辺にCu原子が偏析した構造であり、Cuの構成率 は30~50%程度とされている。一方Cu析出は、熱活性化プロセスであり、Cu主体で構成され、析出初期にはBCC 構造を持つフェライト相に整合なBCCクラスタが生成するが、時効の進行に伴い稠密積層構造である9RからFCCへと 構造が変化する。BCCでは母材であるFeと格子定数が近いため、電子回折現象を活用したコントラストを得る明視 野像で認識することは容易ではなく、回折斑点も重なるため、暗視野像の取得も難しいという特徴を有する。

熱時効処理は、450℃で約 100 時間から 200 時間まで、段階的に時間で区切った。熱処理終了後、硬さ測定 を実施し、硬さ上昇が見られたものを選定し、電解ジェット研磨で、試験材を薄膜化した。その後、電解エッチング中に 溶解した析出物(金属間化合物)が、観察分析対象となる薄膜に再付着することによる析出物分布測定時の誤 差を回避するため、低角度で短時間のArイオン研磨を行った。

TEM 観察・分析は、応用力学研究所(馬出アイソトープ実験センター内実験室)の 200kV 原子分解能顕微 鏡を用い、併せて EDS 分析を実施した。組成分析(マッピング)は電子線プローブ径 0.2nm で、1 ドットのビーム滞 在時間 20m 秒、画素数 256×256 ドットで実施した。

3. 結果と考察

典型的な明視野(BF)像とCu、Ni、Mo、Mn組成マップ像の重ね合せ像を図1と2に示す。注目箇所には図中に赤円を追記した。

熱時効前では、製造時の粗大な析出物はあるが、Cuを含め、他の元素分布に偏在は見られない。図1の熱時効時間132時間では、Cu分布が、転位の周辺に集積することが観察された。明視野像(BF)ではCuの集積は確認できない。Cu以外の元素については集積が確認できなかった。Cu析出物の平均サイズは2.8nm、数密度は1.9×10<sup>23</sup>/m<sup>3</sup>であり、これは、30~40年相当の照射材に類似している。図2の熱時効時間167時間は、最も硬さが大きかった。Cuが明瞭な析出物となり、転位の周辺で確認された。132時間時効材に比べ、サイズは大きく、数密度は低い。Cu以外の元素についてはCu析出物周辺で、Ni、Mo、Mnの集積が確認できた。Cuの集積は、明瞭であり、Ni,Mnはそれより大きく、明瞭ではない。これは、Cuの周囲にこれら元素が薄く集積していることを示唆している。Moの 集積は明瞭であり、Cu析出と隣接している。このような転位近傍での特徴的な分布は、すべての転位に対して見られているわけではない。



図1 450℃、132時間熱時効材のミクロ組織像と元素の組成マップ像の重ね合せ BF Cu Ni Mn



図2 450℃、167時間熱時効材のミクロ組織像と元素の組成マップ像の重ね合せ

4. まとめ

熱時効処理によって、照射脆化した照射材に類似したCu析出物分布を450℃、132時間時効で再現できた。

# 5. 今後の予定

熱処理材は過飽和なCuを含んでおり、熱時効材と照射材では、原子空孔を含めたマトリクス欠陥濃度は異なっている。上記熱時効材に追加照射して、中性子照射材と比較することで、Cu析出物やマトリクス欠陥の寄与度を明らかにするとともに、高照射時の挙動予測の検討を進めていきたい。

# 6. 研究成果報告

無し

研究代表者 東芝エネルギーシステムズ:鹿野文寿

研究協力者 東芝エネルギーシステムズ:藤田敏之、片山義紀、 応研:渡邊英雄、島袋瞬

# 鉄系合金の電磁気特性と照射ナノ組織の関係

#### 岩手大学理工学部 物理・材料理工学科 鎌田康寛

## 目的

Fe-Cr 系合金は耐食性・高温強度に優れており、原子力プラントでの機器構造材として利用されている。しかし、高温や照射環境下で脆化するため、安全利用のために非破壊評価法の開発が必要である。これまでの研究で熱脆化評価については磁気特性やゼーベック係数の計測が有望と報告されている。ところで、熱脆化の主因は Fe と Cr の相分離であり、その機構として①核生成・成長と②スピノーダル分解がある。合金組成や時効条件により相分離機構が変わり、物理特性の変化挙動や機械特性との相関も変わると予想されるが、詳しい研究報告は無い。さらに、熱と照射が脆化に与える相乗効果に関して、十分に解明されていない。本年度は、(1)組成の異なるFe-Cr 二元合金を等温時効して硬さと種々の物理特性の変化挙動を詳しく調べ、相分離機構の違いが与える影響を検討した。また、軽水炉圧力容器の非破壊評価法の研究として、(2) ステンレス鋼を肉盛溶接した原子炉圧力容器(RPV)の溶接ミクロ組織と硬さおよび電磁気特性との関係を調査した。(3) Fe-Ni 合金薄膜のイオン照射実験も行ったが、ここでは報告を省略する。

#### 研究成果1(Fe-Cr モデル合金の熱時効による二相分離と硬さ・磁気特性変化)

Fe-x at%Cr (x = 20, 30, 45) 二元合金の板状試験片(15×3×1mm<sup>3</sup>)を作製した。1000℃で1h 均質化処理後, 500℃で所定の時間(10~960h)時効した。3 つの試料の相分離機構については、20%合金は①核生成・成長、30%及び45%合金は②スピノーダル分解と言われている(図1 [1])。 マイクロビッカース硬さおよび、物理特性として磁気特性(*B-H* 曲線)、ゼーベック係数、電気抵抗 率を測定し、時効時間依存性を調べた。さらに FIB 加工により TEM 用試料を切り出し、ARM (JEOL 原子分解能分析電顕、九大)を用いて時効による元素分布の変化を調べた。

図2に960h時効した3つの合金のSTEM像とEDS元素マップを示す。いずれの試料も FeとCrの分離が確認できたが、組成による違いははっきりしなかった。その理由として、 これらの時効材では相分離が十分に進んだことが考えられ、相分離機構の違いを確認する 上で、短時間側の時効組織を調べる必要がある。図3と4に、硬さの増加量と透磁率(保 磁力の磁場でのB-H曲線の傾き)の熱時効時間依存性をそれぞれ示す。硬さはいずれの合 金も時効時間とともに増加した。20%に比べて30%、45%合金で増加量が大きく、後者の2 つは変化挙動が似ていた(図3)。透磁率は20%ではあまり変化しないが、30%、45%合金で は大きく減少した(図4)。後者の合金では、硬さと透磁率の間に良い相関が見られ(図5)、 硬化型脆化の非破壊評価の指標として透磁率が有望と考えられる。一方、保磁力は特に45% 合金で大きく増加し、高Cr濃度では指標としての利用が難しいことがわかった。

#### 研究成果2(クラッド付圧力容器鋼の溶接熱影響組織と硬さ・磁気特性の関係)

圧力容器鋼の溶接熱影響部の組織、硬さ、保磁力の関係を調べた。硬さと保磁力の間に 良い相関が見られ、ARMによる炭化物の詳しい観察結果をもとに相関機構を説明した。

## まとめ

Fe-x at%Cr 二元合金の熱時効材の組織評価と、硬さおよび磁気測定を実施し、30%, 45%合金 では、硬さと透磁率の間に良い相関があることを見出した。これまでの研究で、20%合金 では保磁力の測定が有効であることがわかっており、複数の磁気特性量を組み合わせるこ とで、相分離機構の異なる Fe-Cr 合金の硬さを推定できる可能性があることがわかった。

参考文献: [1] W. Xiong et al., CALPHAD 35 (2011) 355-366

#### 成果報告:

相原雄太, 鎌田康寛, 村上武, 小林悟, 渡辺英雄, "クラッド付圧力容器鋼の磁気ヒステリシス特性とビッカ ース硬さの相関",日本金属学会誌, Vol.81 (2017) 475 (査読あり)

生内幸亜, 貝沼携, 鎌田康寛, 村上武, 小林悟, 渡辺英雄, "等温時効による Fe-x%Cr(x=20,30,45)合金の硬さ 物理特性の変化挙動",日本金属学会 2017 年秋期講演大会(第 161 回),講演概要集 P85,北大,札幌,2017.9.6 Y. Kamada, T. Oyake, T. Takahashi, T. Murakami, S. Kobayashi, H. Watanabe, "Magnetic properties of ion-irradiated Fe-Ni alloys", ICFRM18, 9PT64, November 9 (5-10), 2017, Link Station Hall Aomori, Aomori ほか

研究組織 : 鎌田康寛, 小林悟, 村上武, 小宅智樹 : 岩手大・理工、渡辺英雄 : 九大・応力研



と EDS マップ(a)20%Cr, (b)30%Cr, (c)45%Cr

# 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

# 研究目的

直線プラズマ装置 PANTA では磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波不安定性 の非線形乱流構造の選択則を明らかにするため、実験パラメータを変えた放電 を行い、様々な非線形乱流構造を再現する実験が行われている.変化させるパ ラメータは主に閉じ込め磁場強度と中性ガス圧の2つである.中性ガス圧を変 化させると、イオンー中性粒子衝突周波数と電子密度勾配が同時に変化してしま う.これらの量はそれぞれドリフト波の線形減衰率と線形成長率を変化させる. このためこれまでのパラメータスキャン実験では非線形乱流構造発展の際に、 線形不安定性が及ぼす影響の切り分けが困難であった.新たなコントロールノ ブを導入し、イオンー中性粒子衝突周波数を変化させずにプロファイルをコント ロールする方法(若しくはその逆)の開発が望まれている.

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. SMBI を入射 し、密度揺動パターンの応答を観測することを本研究の目的とする.本年度は これまで行われた磁場-中性ガス圧パラメータスキャン実験のデータを解析し、 現状の実験フレームワーク下での非線形乱流構造選択則をまとめた[1].また初 期実験として、ヘリウム SMBI を入射した際の密度揺動の変化を観測した.

# 研究結果

直線装置 PANTA では、磁場が低い場合に単一線形ドリフト波が観測され、磁 場を上げるとドリフト波が非線形化する.中性ガス圧が低い際にはストリーマ と呼ばれる、Azimuthal 方向に局在化し、半径方向に伸びた非線形構造が、中性 ガス圧が高い際には孤立波と呼ばれる、鋸歯状の波形をした大振幅の非線形波 形がそれぞれ観測される.両者はそれぞれ時空間発展及び周波数・波数スペク トルに異なる特徴を持つ.この特徴を利用して各放電に於けるストリーマ・孤 立波の強度を定義して2次元パラメータ空間での選択則を定量化した[1].

次に, SMBI入射実験の結果について説明する. PANTA に設置されている SMBI

装置のシステム改良を行い, SMBI 入射のルーチン化を行った. これによりプラ ズマ揺動の応答を計測することに成功した. 図1は SMBI 入射前と入射後の密度 揺動スペクトルである. 入射前は強度の異なるコヒーレントなスペクトルピー クが複数見られていたのに対し,入射後は揺動パワーが周方向モード数1, 周波 数~3.5kHz の単ーピークに集中していることがわかる. 当初の予測と異なり, ド リフト波の線形成長率や固有関数に影響を与える密度プロファイルに大きな変 化はなかった. この揺動パターンの変化の原因を明らかにするため, 来年度は プラズマパラメータスキャンや, ガス種の変更を行う.



図1. 周波数-周方向モード数スペクトル. 左が SMBI 入射前, 右が入射後

# 参考文献

[1] <u>Tatsuya KOBAYASHI</u>, Sigeru INAGAKI, Makoto SASAKI, Yusuke KOSUGA, Hiroyuki ARAKAWA, Fumiyoshi KIN, Takuma YAMADA, Yoshihiko NAGASHIMA, Naohiro KASUYA, Akihide FUJISAWA, Sanae-I. ITOH and Kimitaka ITOH, "Phenomenological Classification of Turbulence States in Linear Magnetized Plasma PANTA" Plasma and Fusion Research 12, 1401019 (2017)

# 研究組織

稲垣滋(九大応力研),佐々木真(九大応力研)

#### 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

ジルカロイ2は沸騰水型の軽水炉(BWR)の燃料被覆管材料として用いられている。この材料は母相のZrに、機械 的特性、耐酸化性、耐食性の改善を目的として様々な元素(Fe、Cr、Ni、Sn)が添加されており、添加元素の一部は金 属間化合物として母相に析出している。ジルカロイ2は高燃焼度において脆化することが知られており、金属間化合物、 水素化物、照射欠陥の存在が複雑に絡まり合った現象と考えられている。

昨年度は、ジルカロイ 2 中の添加金属元素が析出した金属間化合物の構成元素の重イオン照射による変化について調 査した。その結果、金属間化合物中の Fe の含有率の減少の程度から、重イオン照射下での相安定性は Zr<sub>2</sub>(Fe, Ni)の方が Zr(Fe, Cr)<sub>2</sub>よりも高いことが明らかとなった。本年度は、ジルカロイ 2 の製造時において存在する水素化物(不純物と して含まれる H に由来)の重イオン照射による影響について調査した結果を報告する。

#### 2. 実験方法

試料はジルカロイ2で、その成分元素(上段)及び不純物元素(下段)の分析値を表1に示す。焼鈍したジルカロイ2 試料は、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て重イオンを照射した。重イオンの照射条件は、 イオンエネルギー及びイオン種は3.2 MeVのNi<sup>3+</sup>、試料温度は400℃、ピーク照射量は30 dpa である。重イオン照射さ れた試料は、断面方向から観察するために集束イオンビーム装置(Focused Ion Beam; FIB、FB-2100、HITACHI)を 用いて薄膜化した。試料の微細組織の観察には透過型電子顕微鏡(TEM、JEM-3000F、JEOL)を用い、STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy)明視野像を取得した。電子の加速電圧は300 kV である。

#### 3. 結果および考察

図1は、重イオン照射されたジルカロイ2を断面方向から観察したSTEM明視野像である。Niイオンの入射方向は図 面左から右である。筋状の黒いコントラストを呈する水素化物が存在しており、一例としてある水素化物を点線の楕円で 囲んで示した。水素化物の分布には縦破線の左右で顕著な違いが認められ、破線より左の領域では右の領域と比較して密 度が低い。破線は試料表面から2µmの深さである。この深さは弾き出し損傷により析出物の組成に顕著な変化が確認さ れた領域の表面からの深さに対応している(平成28年度)。試料表面から2µmの領域において水素化物の密度が低いこ とは、析出物の組成変化と同様に弾き出し損傷に起因していると考えられる。そこで以下では、破線の左右の領域を損傷 領域及び非損傷領域とよぶことにする。

次に、弾き出し損傷が水素化物の密度やサイズにどの程度の影響を与えているのかについて定量的に示す。水素化物の 体積密度は、非損傷領域において 1.9x10<sup>20</sup>/m<sup>3</sup>、損傷領域において 9.2x10<sup>19</sup>/m<sup>3</sup>と評価された。損傷領域における体積密 度は、非損傷領域の 48±8%である。図 2 は水素化物のサイズとそのカウント数を非損傷領域(a) および損傷領域(b) について計測した結果である。ここで、横軸は水素化物のサイズ (長軸長さ)、縦軸はそのカウント数である。非損傷領 域と損傷領域のサイズ分布を比較すると、顕著な違いが 150 nm 未満のサイズの水素化物に確認された。この領域は図 2 中に破線及び矢印で明示している。150 nm 未満のサイズの水素化物の全体積密度に占める割合は、非損傷領域では 63 ±10%、損傷領域では 24±8%である。

表2は、サイズが150nm未満及びそれ以上に分布する水素化物の体積密度を損傷領域及び非損傷領域で比較した結果 である。サイズが150nm以上では、損傷領域及び非損傷領域において水素化物の体積密度に変化はみられない。一方、 サイズが150nm未満では、損傷領域における水素化物の体積密度は非損傷領域の18±6%に過ぎない。これらの結果か ら、損傷領域での水素化物の体積密度の減少は、弾き出し損傷により150nm未満のサイズの水素化物が顕著に消滅した

180

ことに起因すると考えられる。この機構として、弾き出しにより生ずる空孔と H の反応による母相の Zr への H の再固 溶等が考えられる。Zr 中での水素化物(長軸長さ約 100 nm)の存在は、製造時に不純物として含まれていた 50 wt. ppm の H に起因するとの報告<sup>(1)</sup>がある。本研究で用いたジルカロイ 2 にも同様に製造時に H が不純物として 25 wt. ppm 含 まれており(表1)、水素化物として存在していた可能性が高い。すなわち、今回の結果は一定量の H を含有するジルカ ロイ 2 中での水素化物の照射下安定性に関するものである。炉の運転中、母相である Zr 中の H 濃度は、被覆管表面と高 温水との反応等により増加するため、サイズのより小さな水素化物でも安定な可能性が指摘される。

#### 4. まとめ

重イオン照射によるジルカロイ 2 試料中の損傷及び非損傷領域の微細組織を比較することにより、製造時からの存在 と考えられる水素化物の弾き出し環境下での挙動を調査した。その結果、弾き出し損傷により 150 nm 未満のサイズの水 素化物の密度が低下する現象が確認され、空孔と H の反応により母相の Zr 中へ H が再固溶した可能性が考えられる。

参考文献 (1) 電力中央研究所報告書 Q06020, 2007.

#### 研究組織

研究代表者:安永和史(公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター主任研究員)

- 研究世話人:渡辺英雄(九州大学応用力学研究所准教授)
- 研究協力者:牟田口嵩史(九州大学応用力学研究所技術職員)
- 研究協力者:島袋瞬(九州大学応用力学研究所技術職員)
  - 表1 ジルカロイ2の成分元素及び不純物元素の分析値

	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
wt.%	1.38	0.15	0.09	0.05	Bal.
	Н	С	Ν		
wt. ppm	25	270	80		



図1 重イオン照射されたジルカロイ2を断面方向から観察したSTEM明視野像。水素化物を楕円で囲んで示した。



おける水素化物のサイズ分布の比較。

表 2 サイズ 150 nm 未満及び以上の水素化物 の体積密度の損傷及び非損傷領域での比較。

	体積密度 (m⁻³)						
サイズ	損傷領域	非損傷領域					
150 nm未満	2.2x10 <sup>19</sup>	1.2x10 <sup>20</sup>					
150 nm以上	7.0x10 <sup>19</sup>	7.0x10 <sup>19</sup>					

# 先進ブランケットを指向した酸化物絶縁被覆材の微細構造における 高エネルギーイオン照射の影響

核融合科学研究所 菱沼 良光

#### 1. 研究目的

液体金属や溶融塩を用いた核融合先進ブランケットの要素技術開発において、MHD による液体金属 の圧損や透過によるトリチウム漏洩の抑制は大きな課題である。その対策としてブランケット部材への 酸化物被覆が検討されている。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、中性子照射効果については国内的に原子炉が停止してい る事情も申ことながら、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る。イオン照射は、中性子照射の加速試験に 相当するものであり、酸化物被覆材の中性子照射効果を検討する上で重要な知見を与えるものである。 そこで、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 にて照射損傷された酸化物被覆層の微視的構造及び膜質の変化を明らかにすることを目的とする。

#### 2. 実験方法

SUS316 基板(基板温度 500°C)に Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層を成膜した後、核融合研の MOCVD 装置にて Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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 °Cの 3 時間とした。MOCVD 成膜後の Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及び Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆の膜厚はおよそ 800nm 及び 500nm であっ た。製作した Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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 Cu<sup>2+</sup>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 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS における照射損傷速度を計算 した。TRIM 計算結果を基に室温にて 0.01 から 1.5 dpa 相当の Cu<sup>2+</sup>イオン照射を実施した。

一方、Cu<sup>2+</sup>イオン照射前後の Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆材の膜質変化の1つとして、酸化物被覆層と SUS 基板との間の剥離強度に注目したスクラッチ試験も同時に実施した。スクラッチ試験は、自動車の多重 塗膜や DLC 等の硬質被膜の剥離を数値化する目的で頻繁に用いられており、すでに日本工業規格(JIS) にも認定されている試験法である。

#### 3. 結果と考察

3-1. Cu<sup>2+</sup>イオン照射による Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆層の照射損傷速度

図1に MOCVD 成膜された Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆層における Cu<sup>2+</sup>イオン照射損傷速度を示す。試料 表面から試料深さ方向に照射損傷速度が違う傾向が見られた。これは材質の違いによるものと考えられ、 MOCVD 酸化物被覆層の方が少ない照射損傷であることが示唆された。一方、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆層と Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆層 で比較すると、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の高い照射損傷が示唆された。本研究における照射損傷速度は Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の中心付 3-2. スクラッチ試験による Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 層界 面における剥離強度評価

スクラッチ試験は、ダイアモンド圧子の荷重を増 加させながら被覆膜に押し付けるために、摩擦力も 増加する。被覆膜の表面を滑っている状態では、摩 擦係数に比例して摩擦力は単調に増加する。しかし ながら、膜の剥離が発生すると顕著な摩擦係数の変 化が現れる。この摩擦力に変化が生じる荷重を剥離 する臨界荷重とし、剥離強度として評価している。 図 2 に Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆における代表的なス クラッチデータを示す。圧子荷重に増加に伴って、



図 1 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆層の Cu<sup>2+</sup>イオン 照射損傷速度の深さ依存性

被覆膜表面の摩擦係数が増加していることが分かる。特徴的に摩擦係数の急激な上昇が見られる圧子荷 重があるが、スクラッチ装置に装備されている CCD カメラ像でも明確な酸化物層の剥離が観察された。 つまり、その荷重にて剥離が起こっていると考えられ、本研究ではその荷重を臨界密着強度(critical adhesion strength)と定義した。Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆の密着強度における照射損傷量依存性を図 3 に 示す。照射損傷量の増加に伴って密着強度は単調に低下する傾向が観測された。そして、1.5 dpa の照射 損傷では、未照射と比較して約 70%の強度まで低下した。Cu<sup>2+</sup>イオン照射による密着強度の低下要因に ついては、各層界面での微細構造変化が重要であり、透過電子顕微鏡等を用いたイオン照射前後の組織 変化を検討する予定である。



図 2 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆層における Cu<sup>2+</sup>イオン照射前のスクラッチデータ





# 磁化プラズマの簡約化 MHD シミュレーション

法政大学 理工学部 電気電子工学科 西村征也

【研究目的】

磁場閉じ込め方式の核融合装置や天体近傍の宇宙空間においては、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、磁気再結合や圧力駆動型モードなどの 電磁流体力学的(MHD)不安定性が発生する。

磁場閉じ込め核融合装置においては、トロイダルコイルの設置誤差や外部コイルによって磁場摂動が発生するが、有理面と共鳴するようなものを共鳴磁場摂動(RMP)と呼ぶ。RMP は強制的に磁気再結合を起こして磁気島やストキャスティック層を形成するが、この過程を RMP のしみ込みと呼ぶ。プラズマ流が存在する場合には、プラズマ流による遮蔽効果が存在するため必ずしも RMP のしみ込みが起きるとは限らない。

磁場閉じ込め核融合装置の一つであるトカマクにおいては、新古典テアリングモード(NTM)の 不安定化によって磁気島が発生する。装置に内在する誤差磁場による RMP がある場合には、RMP と磁気島の結合による電磁トルクが発生し、磁気島の回転のロッキングが起きる。しかし、安定な NTM と RMP の共存状態については十分に調べられていない。本年度は、安定な NTM に対する RMP の作用について調べることを目的とした。

【研究方法】

磁化プラズマを記述する簡約化 MHD 方程式をモデルとして用いる。モデルは、渦度方程式、一般化されたオームの法則、圧力の発展方程式によって構成される。ポロイダル断面をスラブ近似し、 小半径方向とポロイダル方向の2次元空間において、簡約化 MHD 方程式の初期値境界値問題を数 値的に解くコードを開発する。コードにおいては、空間微分を2次精度の有限差分で近似し、時間 積分を4次精度のルンゲクッタ法で求めるアルゴリズムを用いる。渦度から流れ関数(静電ポテン シャル)を求めるためのポアソン方程式を数値に解くルーチンにおいては、FFT を用いる高速解法 を用いている。

【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. シミュレーションモデルの拡張

NTM を扱うために、ブートストラップ電流摂動の効果を現象論的に含む項を、一般化されたオームの法則に導入した。また、RMP のしみ込みに対する反磁性ドリフトの効果を加味するために、 電子反磁性ドリフトとイオン反磁性ドリフトを含む Hazeltine (1984)の簡約化 MHD モデルを導入した。以上の拡張モデルを前年度までに開発したシミュレーションコードに実装した。

#### 2. 安定な NTM に対する RMP のしみ込みの効果

図1にプラズマフローの径分布、図2に磁束の等値面を示す。図1の x=0.5 付近においてプラズ マフローが比較的平坦な場合は、図2(a)のように磁気島は小さなサイズである。図1の x=0.5 付近 においてプラズマフローが凹型になっている場合は、図2(b)のように磁気島は大きなサイズまで成 長する。図1においては、凹型のプラズマフローの値が x=0.5 において0とならないのは、電子反



磁性ドリフトの正の方向の回転に起因する。図3に、プラズマフロー速度u<sub>0</sub>を変化させた場合の磁 気島幅wの時間発展を示す。フローが強い場合には RMP はしみ込まず、磁気島幅は真空磁気島よ りはるかに小さい(黒線、青線)。一方、フローが弱い場合には RMP がしみ込むと同時に、真空磁 気島幅を上回る大きさまで磁気島が成長する(赤線)。我々のパラメータにおいては、NTM はあら ゆる磁気島の初期幅に対して安定である。従って、図3の結果は、RMP によって NTM が誘発され る機構が存在することを示している。RMP のしみ込みは、種磁気島の形成だけではなく、テアリ ング不安定性そのものに影響を与えていると考えられる。

【まとめと今後の課題】

ミュレーションモデルを拡張し、安定な NTM に対する RMP の作用について調べた。RMP がし み込んだ場合、NTM が不安定化して磁気島が拡大する機構が存在することが、新たに明らかにな った。結果として形成される磁気島は、形成された段階で回転周波数を持たないロックトモードで ある。これは、回転する磁気島が RMP によってロッキングされて発生するロックトモードとは異 なる過程によって発生するロックトモードである。実験観測においては、このようなモードのこと を「生まれつきのロックトモード(born-locked mode)」と現象論的に呼んでいる。今後は、シミュ レーション結果の解析とパラメータサーベイを進める予定である。

【学会発表リスト】

[1] 西村征也,外部印可磁気島と圧力駆動型モードの非線形相互作用, Plasma Conference 2017, 22P-44, 2017.11.22

[2] 西村征也, 共鳴磁場摂動のしみ込みによって誘発される新古典テアリングモード, 第 73 回日本 物理学会年次大会, 23aK601-5, 2018.3.23

研究者情報: 西村征也

# 計測シミュレータによる運動論的プラズマ・シミュレーションの 定量的なValidation 解析

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の粒子や熱の輸送機構の解明、および輸送レベルの定量的な予測は磁場 閉じ込め核融合研究における最重要課題の一つに位置づけられている。ドリフト運動論やジャイロ 運動論といったプラズマの位相空間分布関数の時間発展を扱うことが出来る運動論的な数値解析 手法は、このプラズマ輸送を第一原理的に評価し得る強力な解析手法として広く用いられている。 特に、近年のシミュレーション・プログラムの精力的な研究開発や、大型計算機の性能向上が、こ の運動論的手法によるシミュレーション研究の可能性を大きく広げている。しかし、詳細な計算 結果を与えるようになってきたシミュレーション研究に対しては、より定量的な解析や輸送予測、 そして、結果の妥当性確認といった計算の信頼性に関する課題と要望が、強くなってきている。こ のような状況にあって、本研究課題の目的は、ジャイロ運動論的乱流シミュレーションに対して 代表者らがこれまでに実施した乱流計測シミュレータ[1]を用いた実験計測模擬の手法と応用を基 礎にして、新古典輸送シミュレーションへも対象を広げながら、運動論的プラズマ・シミュレー ションのより高い信頼性の獲得を目指し、定量的な Validation を推進することである。これまで の共同研究では、乱流揺動分布の解析に威力を発揮する位相コントラスト・イメージング(PCI) による数値計測を実行し、乱流揺動のスペクトル構造や空間分布を解析することが可能になって きた。本研究課題では、重イオンビームプローブ (HIBP) によるプラズマ中の電場測定なども研 究対象に新たに含め、運動論的シミュレーションを系統的かつ定量的な乱流解析手法に発展させ ることを目指す。

研究方法

本研究課題では、フラックス・チューブ近似の下でのジャイロ運動論的コード GKV[2] による乱流 シミュレーションと、新古典輸送を解析する大域的粒子シミュレーション・コード FORTEC-3D[3] を基礎にして進める。これらのコードを用いたシミュレーション結果から、ジャイロ運動論的シ ミュレーションでの乱流揺動データは PCI 計測モジュールでの揺動計測模擬を実施し、ドリフト 運動論的シミュレーションでの密度分布データは HIBP 計測モジュールによる電場計測模擬を実 施する。同時に、シミュレーションと数値計測が系統的かつ効率的に実施できるような手法開発 を進める。

- 乱流揺動計測模擬による乱流輸送特性の解析
  - これまでに実施したジャイロ運動論的乱流シミュレーション・データを利用し、プラズマの 温度・密度プロファイルや磁場配位における乱流揺動スペクトルの計測結果への影響を詳し く解析し、実験との Validation 解析を通じて、より正確で定量的な輸送解析を進める。例と して、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD)の配位におけるイオン温度勾配 (ITG) 乱流シミュレーションから得た密度揺動の3次元空間分布のデータを対象にして、実際の LHD 実験で用いられている PCI での計測視線を考慮して計測模擬を行う。特に、計測模擬 の分解能の向上を目指し、観測点数と分解能の関係についての評価も行う。
- 電場計測模擬による新古典輸送特性の解析
   ドリフト運動論に基づく新古典粒子シミュレーションから得られる密度分布データを利用し、 重イオン・ビーム・プローブを模擬できるモジュールを用いて、電場の計測模擬を行う。実 験計測における電場測定結果との比較を通じて、シミュレーションの妥当性確認はもとより、 実験計測データにおける高精度解析にもつなげる。

#### 今年度の成果

今年度の乱流計測模擬 (PCI 計測模擬) 研究においては、乱流シミュレーションデータからの数 値計測における空間解像度の向上、特に、シミュレーション上の座標系と実験観測での座標系の 差異を小さくするために、観測点数やその範囲と分解能の関係の明確化、また、磁気シア法の適 用による波数スペクトルの推定を進めた。また、GKV による複数のフラックスチューブのシミュ レーション結果を組み合わせたデータを用いた解析により単一のフラックスチューブ・データか らでは得られなかった複数のピークを持つ視線方向の揺動分布を得ることができた [4]。

一方、ドリフト運動論的粒子シミュレーションによる新古典輸送解析で得られる密度分布データの、計測シミュレータ内 HIBP モジュールへの適用について、初期調査を進めた。HIBP モジュールでは、図の示すように、グラフィカルインターフェイス (GUI) により、与えられたポテンシャル分布に対して、HIBP で入射されるビームを条件毎に解析することが可能であり、最終的に検出される粒子分布とポテンシャル分布データとの対応で、プラズマ内のポテンシャル推定を行う。この模擬計測結果を、LHD 実験データとの比較を行えるよう、データ整合等の初期研究を進めた。



図 1: 数値計測シミュレータによる重イオンビームプローブ (HIBP) 計測模擬の例。

まとめ

数値計測シミュレータは、プラズマの計算機シミュレーションと実際の実験計測結果を、直接 的に比較するという意味で、シミュレーション研究の最終的な妥当性確認手法と言える。本共同 研究では、近年、実験との定量的な比較や再現が求められている運動論的シミュレーション研究、 特に乱流輸送、新古典輸送シミュレーションから得られた計算データを対象にして、乱流構造の 理解に強力な手法の一つとなる PCI 計測や、プラズマ中の電場の計測手法である HIBP 計測の数 値模擬を目指し、計測シミュレータにおける各モジュールをこれまで実施したシミュレーション・ データに適用した。PCI 計測モジュールによる乱流シミュレーションの乱流密度揺動データの解 析では、模擬計測の解像度や計測位置等の相関を調べながら、より分解能の高い模擬計測手法の 開発を進めた。一方、PCI 計測模擬のみならず、プラズマ中の電場計測に威力を発揮する HIBP 計測のモジュールを新古典シミュレーションで得られる電位分布データに適用する手法開発にも 着手した。今後は、LHD 等の実際の実験条件で実施した新古典的粒子シミュレーションでの密度 分布データを HIBP 計測模擬に適用し、電場計測についても、実験観測との定量的な比較および 妥当性確認を進めていきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] N. Kasuya, et al., Plasma Sci. Technol. 13, 326 (2011).
- [2] M. Nunami, et al., Plasma Fusion Res. 5, 016 (2010).
- [3] S. Satake, et al., Plasma Fusion Res. 3, S1062 (2008).
- [4] N. Kasuya, et al., 21st ISHW, P2-20 (2017).

# 核融合プラズマ対向壁としてのベリリウムの表面特性

#### 島根大学大学院総合理工学研究科 宮本光貴

#### 1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)では、プラズマ対向壁面の大部分にベリリウムタイルの使用が予定されているが、取り扱い上の問題もあり、プラズマ表面相互作用(PSI; Plasma-Surface Interaction)に関する知見は乏しい.本研究では、ベリリウムの取り扱いを十分な安全対策を行った島根大学内に限り、PSIで問題となる水素同位体およびヘリウム挙動を定量的に評価するとともに、原子レベルでの組織観察を行い、微視的観点から現象のメカニズムを解明する事を目指した.一方、九州大学応用力学研究所では、各種イオン照射装置や多様な表面分析機器を用いて模擬試料や比較試料の評価を行うとともに、ベリリウム試料に関する豊富な研究実績に基づいた議論を通して、本研究課題の評価を行った。

## 2. 実験方法

本研究では、取り扱いに注意を要するベリリウムを主要な研究対象としている. ベリリウムに関して は既に使用実績があり、島根大学ではグローブボックス内での試料準備、加工が十分安全に行える設備 を整えている. 試料調整後、イオン照射装置と昇温脱離ガス分析装置を用いて、室温で 3keV-D<sub>2</sub>+、お よび 3keV-He+照射した後、昇温脱離実験を行った. さらに、薄膜化加工したベリリウム試料に、島根 大学のイオン照射装置直結型電子顕微鏡を用いて、照射下、および照射後昇温下における微細組織変化 をその場観察した.

#### 3. 結果および考察

図1には室温で 3keV-D<sub>2</sub>+を照射したベリリウム試料の昇温脱離スペクトル(a)と同様に照射した薄膜 試料における照射後昇温下における微細組織変化のその場観察の結果(b)をあわせて示す.



図1 室温で重水素(3keV-D<sub>2</sub>+)を照射後の昇温脱離スペクトル(a)と昇温下における微細組織変化(b).

重水素の昇温脱離スペクトルには大まかに低温側(500-600 K)と高温側(700-800 K)の2つのピークが確認できる. 微細組織観察では、これらの温度域で、微細なバブルの成長と、大きなバブルの消失が見ら

れることから,これらの脱離ピークは,それぞれ,微細なバブルの移動やバブル間の破断,および大き なバブルからの放出に起因するものだと考えられる.

また,図2には室温で3keV-He+を照射したベリリウム試料の昇温脱離スペクトル(a)と照射後昇温下 における微細組織変化のその場観察の結果(b)を同様に示す.



図2 室温でヘリウム(3keV-He+)を照射後の昇温脱離スペクトル(a)と昇温下における微細組織変化(b).

ヘリウム照射においては,照射量の増加に伴い3 つの脱離ピークが見られ,重水素の場合と異なり 高温までヘリウムが保持されていることが分か る.微細組織においても1000Kを超える高温ま で安定にヘリウムバブルが存在していることが 確認できる.また,ヘリウム照射した試料におい ても,大きな重水素バブルからの放出に起因する 脱離ピーク(950-1050 K)が確認できたが,バブル の消失挙動に大きな相違が観察された.図3には, (a)重水素バブル(~773K),および(b)へリウムバブ ル(~1073K)の消失過程を観察した際の連続写真



図3 ベリリウム中の重水素バブル,およびヘリ ウムバブルの焼鈍下での消失過程の比較.

を示す.重水素バブルは約773 K で徐々にバブルが収縮していくのに対し、ヘリウムバブルは比較的高 温まで試料中に保持され、約1073 K でバブル同士の合体と瞬間的に消滅する様子が観察された.この 結果は、重水素バブルとヘリウムバブルの熱的安定性が明確に異なることを示しており、今後、バブル の移動度や、温度依存性等についてより詳細に評価していく予定である.

#### ● 研究組織

研究代表者: 宮本光貴(島根大学大学院総合理工学研究科准教授) 所内世話人: 渡辺英雄(九州大学応用力学研究所准教授) 研究協力者: 東 勇太,杉本有隆,松田伊久磨(島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程) 吉田直亮(九州大学応用力学研究所名誉教授) 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

第一壁やダイバータ、計測機器など高温プラズマ閉じ込め装置内部に設置された各種機器のプラズマ 対向表面はプラズマとの強い相互作用によって様々に変質し、その性能や寿命のみならずプラズマの特 性や制御にも少なからぬ影響を及ぼすことが知られている。近年の研究により、この現象は特に長時間 放電下で顕在化し、放電の持続を妨げる重大な原因の一つであることが明らかになってきた。この現象 を司るメカニズムを明らかにし、定常放電実現への対応策を見出すことは、核融合炉開発の基礎研究と して重要な課題である。

本研究組織では長年にわたり長時間放電が頻繁に行われている QUEST および LHD におけるプラズ マ・壁相互作用を調べるために多くのプローブ試料を真空容器内に設置し、実機における高温プラズマ によるプラズマ対向壁表面の変質について調べてきた。本年度も応用力学研究設置の多様なプラズマ・ 壁相互作用研究用実験装置等を用いて引き続き研究を実施した。本稿では QUEST における高温プラズ マ曝露プローブ試料の表面変質と損傷に関する研究成果に絞り報告する。

2. 実験方法・結果と考察

QUEST における 2016A/W、2017S/S、2017A/W の各実験キャンペーンにおいてプラズマに曝した プローブ試料(W、Mo、SUS316L等)について透過型電子顕微鏡(TEM)、走査型電子顕微鏡(SEM) およびグロー放電発光分析装置(GD-OES、富山大学)等を用いてプラズマ曝露による表面変質と内部 組織・組成変化を調べた。

2.1 2016A/W 放電による表面変質と内部組織・組成変化

2016A/W キャンペーンの大きな特徴は、キャンペーンの途中から運転開始以降初めてトロイダル磁場を反転させ、プラズマの挙動を上下逆転させた放電が行われたことである。従来の放電では粒子バランスの崩壊により最長放電時間は2時間弱程度にとどまっていたが、磁場反転後の放電においては粒子バランスを長時間保つことができ放電持続時間を6時間に延ばすことができた。これまでの研究から長時間放電下での粒子バランスの崩壊は、プラズマ対向壁からの水素の再放出速度が放電途中から異常に増加し排気速度を上回るために起こることがわかっており、反転磁場条件では何らかの原因で異常再放出が長時間にわたり抑制されたことが推察される。

従来用いてきたトロイダル磁場配位(標準磁場配位)における PWI の特徴は、①上部壁においては 左方からの強い水素イオン照射によっていわゆる損耗ドミナントな現象が起こり、飛来した Fe, W, C, O 等の不純物原子は深さ数 nm までの最表面にミキシング層となって僅かに残るものの、一旦付着した 不純物原子の殆どはその後プラズマ粒子によってスパッターされ再びプラズマ中に戻って行く。一方、 ②下部壁では上部壁と大差無い量の不純物が飛来するものの、水素イオン束が低いためその多くが表面 に留まり Fe, W, C, O を主成分とする堆積層を形成する。

長時間放電の初期段階(壁による水素の吸蔵>壁からの再放出)ではHαの発光は壁上下で大差無い が、放電時間が長くなると上部壁領域での発光が顕著になり、水素供給無しの状態で放電が持続する。 放電時間が更に伸びると、上部壁での発光が不安定になり放電が停止する。このことは水素イオン束が 大きく Wの表面がほぼむき出しになっている上部壁での水素の挙動が長時間放電の鍵を握っているこ とを示唆している。従って、本研究では壁からの異常再放出に密接に関係していると思われるプラズマ 対向面の状態に注目し詳細に調べた。 図1は2016A/Wにおいてキャンペーンを通してプラズマ曝露された Mo 試料における表面変質の深 さ分布を示す断面 TEM 写真(明視野像)である。下部壁に設置した試料の表面は、キャンペーン前半 に行われた標準磁場配位での放電により不純物が柱状に積み重なった厚さ 12nm 程度のポーラスな不 純物堆積層で覆われている。一方、上部壁に設置した試料は厚さ 4nm 程度のコントラストの異なる層 で覆われている。この層は損耗ドミナント領域で見られるミキシング層ではなく、W, Fe 等の不純物原 子が深さ方向に一様に分布する堆積層であることが GD-OES 測定から確認された。これらの結果は 6 時間放電が行われたキャンペーン後半では磁場反転によって上部壁が堆積ドミナント表面に転じてい ること、下部壁側は強い水素イオン束に曝される損耗ドミナントな条件になったにも関わらず、なお、 表面は堆積層で覆われ、真空容器内のどの場所も W がむき出しになっていないことを示している。こ れらの実験結果は、表面がむき出しになった壁面を通して大量の水素が W 壁に直接侵入することが、 長時間放電での異常再放出に関連している可能性を示唆するものである。

QUEST の上部壁および下部壁は内部に亀裂や空隙が非常に多い APS-W を SUS316L 基板の上に 0.2mm 溶射したもので一般的な W 板材に比べ水素を吸蔵し易く加熱すると広い温度範囲に渡って水素 を放出する。この様な APS-W の水素吸蔵・放出特性が異常再放出の原因とも考えられるが、結論を得 るには実際に QUEST 内で使用され不純物が堆積した APS-W 壁を用いての直接的な検証が必要であ り、来期の課題としたい。

2.2 2017S/S および 2017A/W 放電による表面変質と内部組織・組成変化

これらの実験キャンペーンでは新たに設置された 28GHz-RF 加熱装置の立ち上げと、それを用いた放 電実験が行われた。放電時間は短い(秒オーダー)ため顕著な不純物の再堆積は赤道壁以外では見られ なかった。不純物の大半は C と O であり、2016A/W では 50%以上あった金属不純物(W, Fe, Cr 等) は殆ど見られなかった。しかしながら特筆すべきは試料内に発生した顕著な照射損傷である。図 2 は 2017S/S キャンペーン(28GHz-RF 加熱)と 2016A/W キャンペーン(8.2GHz-RF 加熱)での照射損傷 を比較したものである。プラズマ曝露時間ははるかに短いものの、Mo 試料内には原子弾き出し損傷に よって発生した大量の格子間原子型転位ループが形成されており、28GHz-RF によって 1keV を超える 高いエネルギーの水素プラズマが発生していることを検証することができた。



図1 2016A/W プラズマ曝露試料(Mo)の断面組織を示す TEM 像(明視野像)



図2 プラズマ照射損傷を示す TEM 写 真(暗視野像)。2016A/Wに比べ 2017S/Sではより激しい照射損傷が起 こっていることがわかる。

## 構造材料中の水素挙動に及ぼす照射損傷の影響

茨城大学工学部 車田 亮

#### 1. 研究目的

核融合実験装置等の構造材料は、プラズマ対向材料を透過した中性子損傷を受けるとともに、重 水素やトリチウム等が材料内部に拡散すると考えられる。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(ステンレス鋼やアルミニウム 合金等)中の水素の透過・放出挙動が、照射環境下で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、茨城大学の水素マイクロプリント法(HMPT)や昇温脱離ガス分析装置(TDS) と、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置や SEM・TEM の微細組織観察装置を共 同研究に利用する。その結果、材料に関する豊富な知識と経験を共有しながら、核融合実験装置等 の構造材料中の水素の透過・放出挙動を解明することにより、重水素やトリチウムと構造壁との相 互作用を抑制・制御できる知見を得て、核融合実験装置等の構造材料の健全性および実用寿命の延 長に貢献する。

#### 2. 実験方法

#### 2.1 試料

供試材料は、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304L およびアルミニウム合金の A7075-T6 を採用した。特徴として、SUS304L 材は高強度鋼の欠点である応力腐食割れや粒界腐食等の発生 が抑制され、大型装置の構造材料として広く利用されている。A7075-T6 材はアルミニウム合金中 で最高強度を有し、航空機等の主要な構造材料として利用されている。本実験に使用する試料形状 は、両材料共に  $5 \times 5$ [mm]の正方形で、SUS304L 材は厚み 0.3[mm]、A7075-T6 材では 0.6[mm] とした。それらの材料表面は、湿式研磨(~#2000)とバフ研磨(~#0.3µm)を施し鏡面に仕上げた。そ の後、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液 (pH=2.0, 触媒: 0.1[mass% NH<sub>4</sub>SCN])を用いて、陰極を試験片、陽極を Pt とし、 電圧 10[V]、電流密度 10[mA/cm<sup>2</sup>]、30[min]の電気分解を利用した水素チャージを実施した。また、 SUS304L 材には、構造機器を製作する際の塑性加工を考慮して、加工ひずみ 45[%]と 60[%]をそ れぞれ与えた。さらに、試験片中央( $\phi$ 4 mm)には、鋼イオン(Cu<sup>2+</sup>)を 1dpa 照射した。

#### 2.2 水素マイクロプリント法(HMPT)

水素マイクロプリント法(HMPT)は、試料表面から放出された水素を、写真用乳剤に含まれる 臭化銀の擬似的な感光現象により可視化する手法である。金属材料から放出される水素は、化学的 に原子状態となっているため、放出された水素は、臭化銀中の銀イオンと(1)式に示すような還元反 応を起こして金属銀を生じる。

#### $Ag^++H \rightarrow Ag^+H^+ \cdot \cdot \cdot (1)$

その後、現像処理により金属銀を安定化し、定着処理により未反応の臭化銀粒子を溶解、除去する。 こうして得られた試料表面上のSEM 観察と EDXS 分析を行い、銀粒子の位置と量から水素放出挙 動を解明する<sup>1,2)</sup>。

#### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 は、水素電解チャージを施し、HMPT 試験後の SUS304L 材の SEM 観察画像を示す。図中の赤丸で示した部分や白色の粒子が銀粒子である。また、図中の(a)は SUS304L 材の受入れ材、(b)は SUS304L 材に銅イオンを 1dpa 照射した照射材、(c)は SUS304L 材に加工ひずみ 45%を負荷した 45%ひずみ材、(d)は SUS304L 材に銅イオンを 1dpa 照射かつ加工ひずみ 45%を負荷した 45%ひずみ照射材の SEM 像を示す。受入れ材では、水素放出量が非常に少なく、一部の粒界から 局所的に水素の放出が確認された。また、その放出経路は主に粒界であった。照射材では、粒界や

粒内からも水素放出が確認された。銅イオン照射により、材料表面層の転位密度が増大し、転位ル ープやボイドを形成し、粒界のみだけはなく粒内からも水素の放出が起こったと考えられた。また、 銀粒子の粗大化も確認された。

また、45%ひずみ材は、粒界のみならず、粒内のすべり線上からも銀粒子が観察され、加工ひず みの負荷による生じたすべり線からも水素の放出が起こることが分かった。45%ひずみ照射材は、 加工ひずみの負荷によるすべり線に加えて、照射損傷により生じた材料表面層の転位密度の増大や、 転位ループやボイド等の形成により、粒界や粒内から大きな銀粒子が検出され、多くの水素放出が 起こった。



Fig.1 SEM images after HMPT of SUS304L. (a) as received, (b) 1 dpa irradiated,(c) 45% strained and (d) strained and irradiated.

4. まとめ

本研究は、銅イオン照射損傷を施したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304L 材及びアルミニ ウム合金 A7075-T6 材の2 種類の構造材料について、水素を可視化する手法である水素マイクロプ リント法(HMPT)を用いて、材料表面から侵入及び放出される水素の挙動およびその水素のトラ ップサイトと照射損傷との関連を調査した。以下に得られた結果を要約して示す。

(1) 構造材料(SUS304L 材、A7075-T6 材)の HMPT より、母材では、粒界析出物にトラップされた水素が粒界を通して放出され、照射損傷材では、銅イオン照射により、材料表面層の転位密度が増加し、転位ループやボイドを形成して、多量に水素が導入され、粒界のみならず粒内からも水素放出が確認された。

(2) 加工ひずみ材は、粒界のみならず粒内やすべり線上からも水素放出が確認され、ひずみ照射材は、加工ひずみの負荷によるすべり線に加えて、照射損傷により生じた材料表面層の転位密度の増 大や、転位ループやボイド等の形成により、粒界や粒内から大きな銀粒子が検出され、多くの水素 放出が起こった。

以上の結果から、構造材料が照射損傷と加工変形を同時に受けた場合には、多量の水素が導入お よび放出されることが明らかとなった。この多量の水素侵入は、構造材料の応力腐食割れや活性経 路割れ等を生じさせるため、プラズマグロー放電等による水素除去熱処理が必要であると考えられ た。

参考文献:1-2)和田,車田,他,茨城講演会講演論文集,(2015,2016),133-134, 101-102.

# 核融合炉用 SiC 材料の水素同位体及びヘリウム照射効果

琉球大学教育学部 岩切宏友,野原翔

量子科学技術研究開発機構 渡辺淑之

九州大学応用力学研究所 渡邊英雄, 吉田直亮

## 【研究の目的】

炭化ケイ素(SiC)は核融合炉壁の材料として注目されている。最近の実験的研究により,高エ ネルギーの粒子線照射を受けた SiC において原因不明の体積膨張が生ずることが報告されている。 これは,照射により形成される原子空孔や格子間原子などの点欠陥が集合化した欠陥集合体の周辺 原子が電気的反発などの影響で外向きに大きく歪むことに起因すると考えられているが,現状では 機構論的な解明には至っていない。スエリングは,材料内に局所的な寸法変化や内部応力変化をも たらし,材料に深刻な影響を与える。従って,スエリング挙動の理解を得るためには,欠陥集合体 の形成挙動を解明する必要である。本研究では,第一原理計算と分子動力学計算を相互補完的に用 いたマルチスケールモデリングという手法で,SiC 中の点欠陥構造を明らかにし,微細な点欠陥に よる膨張現象などのメカニズムを解明することを目的とする。

#### 【研究方法】

本研究では、密度汎関数法に基づいた第一原理計算コードである SIESTA を使用した。SIESTA では 各原子に帰属する実在波動関数を基底関数として用いており、格子欠陥周辺などの局所的な電子状態を 知るための効果的手法である。計算条件としては、原子数 64~512 個のスーパーセルを対象とし、 k 点 サンプリングは 2×2×2、4×4×4、擬ポテンシャルのカットオフ半径を 200 Ry とした。

#### 【研究結果および考察】

核融合反応の過程において,高エネルギーのガス原子が炉壁材料内に注入され,内部の格子欠陥等と 相互作用を起こし,劣化を促進する可能性があることから,まず,SiC結晶中での水素同位体の挙動や 電子状態について計算を行ったところ,5つの安定サイトを導出した。エネルギー的に最安定だった Site-1はSiを頂点とする4面体中心のT-site (T:Tetrahedron)。次に安定なSite-2とSite-3は近傍の Cと結合した構造であるがSite-2とSite-3では,水素周囲のSiの配位が異なる。Site-4は水素の両サ イドに炭素が配位しており,水素と2個の炭素が形作る三角形の角度は150度である。Site-5はCを 頂点とする4面体中心のT-siteである。次にこれらのサイトにおける水素の固溶エネルギー(真空中の H<sub>2</sub>分子と比較したもの)を以下の式で求めた。

$$E_H^f = E_{tot(Mwith H)} - (E_M + E_H)$$

ここで、「 $E_{H}^{f}$ 」は格子間水素の形成エネルギー、「 $E_{tot(Mwith H)}$ 」は水素を含めた系全体のエネルギー、「 $E_{M}$ 」は完全結晶(SiC)のエネルギー、そして「 $E_{H}$ 」は水素単体のエネルギーを表している。

5 つの固溶エネルギーを比較すると Site-1 は 2.56eV, Site-2 は 2.87eV, Site-3 は 2.89eV, Site-4 は 3.02eV, Site-5 は 3.24eV であり,固溶エネルギーは最低でも 2.56 eV と正の値であるため,SiC が水

素に対して吸熱型の材料であり、水素は SiC 結晶中に固溶しにくいことが明らかになった。一方で、鉄中における水素の固溶エネルギーは 0.25~0.30eV 程度であり、その他既知の金属材料において、もっとも固溶エネルギーの高いタングステンでも 1.10 eV であるため、SiC がかなり水素を固溶しにくい材料であることがわかる。

SiC 中において水素がどのように保持されているかを定性的に評価するために, Mulliken Population 解析法を用いて,それぞれサイト内の原子と水素との電子的な相互関係を調べた。Site-1の解析結果を 見ると,Si が正に帯電しており,Hも正に帯電している。このことから電荷による,Si と H のイオン 結合性は見られない。overlap population を調べ,共有結合の度合いを判別すると,その値は0.076 と 小さく,最安定サイトでありながら,ほとんど共有結合性は見られない。これは,Site-1の固溶エネル ギー 2.56 eV 値が 5 つのサイトのなかでは最低値であったものの,一般の金属と比べると高く,SiC は結晶内に水素が固溶しにくい材料だったためである。SiC の格子の隙間 Tsite の位置に存在し,周囲 の原子と結合性を示さなかったことが不安定な状態であることを示している。したがって,水素がSiC 結晶内に存在するとエネルギー的に損するということが,固溶エネルギーの高さだけでなく,マリケン 解析からも評価できる。

捕獲サイトに水素が捕獲されると周囲の原子が変異したり、電子状態が変化したりするように、隣接 したサイトに水素が複数捕獲された場合は当然そのときのエネルギー状態も変化する。そのため隣接す る格子間サイトに水素が複数存在する場合,近接効果により結合力や反発力が生ずる。これを水素のペ アリング効果という。格子間位置で隣接した2個の水素の組合せを考慮し、ペアリング効果に関する計 算を行った。もっとも安定な状態は, site1+site4 (A)の Tsi サイトと CH ダンベルが近接して存在する 状態であり,結合エネルギーは 2.06 eV~2.10 eV の範囲である。分子化していないにも関わらず強い結 合力が作用しており、このペアリングの形で結晶中の水素が凝集していく可能性がある。また、 site2+site4 (A)等の結果より、SiC 中の  $T_{Si}$  サイト中において  $H_2$ 分子の形成が生ずることが明らかとな った。マリケン解析で詳細を調査したところ, H の電荷が+0.168 であり, Si の電荷は+0.510 であった。 Overlap population の値は, Si-H 間では 0.057, H-H 間では 0.433 となっており, 水素同士の値は, 真空中の水素分子の 0.428 と非常に近く、距離もペアリングでは、0.788~0.801 Åであり、水素分子 は 0.741 Å と近い値となっている。この結果から Tsite 内で分子化したと判断できる。このときの H 同 士の結合エネルギーは最安定状態の Tsite・CH ダンベルよりも僅かに低く, 1.97 eV~2.04 eV である。 この程度のエネルギー差であれば、双方のペアリング状態は共存すると考えられる。本研究では2個の 水素の相互作用の計算にとどまっているが、今後は、さらに多くの(3 個以上の)水素同士の相互作用 についても計算を実施する必要がある。もし、水素の数が増えてもこれらの結合エネルギーの値が大き ければ、水素は材料内で水素の集合体として蓄積していき、水素ガスの気泡を形成する可能性もある。 その場合、マクロ的欠陥へと成長して材料を膨張させる可能性がある。

(成果発表)

野原翔,「物理教育高度化のための計算機シミュレーション ~固体材料中におけるガス原
 子の存在状態~」,2018 年 琉球大学大学院教育学研究科,修士論文

# 電子ビーム照射による材料表面の高エネルギー密度入射損耗開始閾値の評価(第5報) 極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指して

応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所

糟谷 紘一

#### 概要

表記の課題に関連する、最近の共同研究結果について、下記の諸項目についてその概要を述べる。(1) 複合材料と厚さ計による損耗破壊監視計測法の設計 と検討、(2)関連分光分析のための計測器の整備と 初期テスト、(3)放射のアップコンバージョン法を利 用する新しい計測法の予備試験、(4)関連調査項目。

目的 応用力学研究所の電子ビーム熱負荷発生 装置を用いて、諸材料表面を照射し、各種計測装置 により、表面損耗量(喪失総質量)等を測定する。 同時に、レーザー変位計等を用いて、3次元表面損 耗状態を観測する。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 れらが本共同研究の最終目標である。本研究では、 近く再開する電子ビーム照射のために、関連計測装 置の準備と新規な方法の調査・提案を行った。

複合材料と厚さ計による損耗破壊監視計測法の設 計と検討 極限状態に対向するタングステン箔と 透明 SiC 薄板の組み合わせヘッド背後から、SiC 板 の厚さを監視する方法については、厚さ計を新規に 購入すれば実現可能であることが確認できた。但し、 高低いずれの厚さ計を用意する場合にも、経費の工 面ができるまで待つ必要があることが判った。

**放射のアップコンバージョンと関連分光分析を含** む、新しい計測法開発のための計測器の整備と予 備実験結果 前項とは少々異なるアイデアとして、 高温核融合炉壁等からの熱放射を測る方法として、 アップコンバージョン法を利用する新規な方法を提 案しているが、ここでは、複雑な放射やノイズの影 響を除いた、目的とする放射スペクトル領域に限定 した有用な計測法開発のための準備結果を示す。

計測用検出ヘッド先端薄板の高温化で発生する近 赤外光を、アップコンバージョンにより可視光に変 換し、これを透明SiC越しに観測し、薄板そのもの の温度を測りたい。もちろん、貫通と同時に外方向 に出てくる内部からの電磁波そのものも検出できる から、アップコンバージョンしなくとも、これらを 検出すれば、破壊の瞬間を検知できるから、一応 は、大型装置の破壊に至る危険な状態は十分にモニ ターできる。これとは別に、破壊前後の検出ヘッド 薄板の温度変化の・その場測定が、アップコンバー ジョン光の計測によりできることになれば、新しい 方法論的成果が得られることになる。

まず初めに、東京工業大学・ファインセラミック ス研究所の小型真空蒸着装置(日本真空アルバック 社)により、タングステン箔やアルミナ薄板を加熱 し、応用ながれ研究所の既有溶融石英ファイバー と、九州大学・応用力学研究所の小型分光器(Ocean Optics 社・HR2000CG 高速ブロードバンド分光器) により、発光スペクトルを測定した。結果の1例を 第1図に示す。図中の4本の縦線は、Sunstone Nanocrystals UCP 538, (Sigma-Aldrich社・



第1図 加熱タングステン表面からの放射スペク トル測定結果(旧・光ファイバーを使用)

No. 66698)の対応波長箇所で、右から左に向かっ て、976nm(近赤外励起光)、誘起可視光(642nm-赤、538nm-緑、483nm-紫)の位置を示す。

つぎに、同じ分光器による測定をより確実なもの にするため、追加できる小物部品を整備した。関連 購入品は、(1)反射/後方散乱測定用プローブファイ バーバンドル、(2)バンドパスフィルター、(3)ロ ングパスフィルター である。また、アップコンバ ージョン光の強度分布を比較測定するために、 Diode Module、5V Linear Supply、Laser Viewing Cardも購入した。これらを併用して、蒸着装置のタ ングステンボート上の加熱タングステン箔からの放 射・分光測定した結果を第2図に示す。



# 第2図 加熱タングステン表面からの放射スペク トル測定結果(新規購入部品併用装置を使用)

容易に入手できる市販のアップコンバージョン光 発生用蛍光剤として、米国より、上記のUCP 538を 用意しておいたが、サンプルの保存期間や保存状態 の不適切さから、今回の光照射時には、カプセル内 の溶媒が皆無になっていた。そこで、蒸留水を混ぜ て超音波懸濁した後に、この薄層をタングステンと アルミナ薄板上に作成し、上記の蒸着装置タングス テンボート上で加熱した。先と同様の発光・分光測 定を試みたが、ノイズレベルを上回る強度の変換光 は観測できなかった。蛍光剤の性能ダウンの可能性 もあり、現在、その詳細理由を検討中である。

上記の蛍光剤は、主に生体内注入等を目的として 販売されているものであり、本研究の目的に最も適 しているかどうかは疑問である。以前から変換効率 の高い蛍光剤を探しており、中国産の製品に、粉体 の蛍光剤があるのは知っていたが、購入可能な最少 量が多過ぎ、かつその購入価格がかなり高いものし かなかった。ところが、ごく最近に、より少量で安 価に入手できそうな製品が見つかったので、近くこ れを試験してみる予定である。

元々、眼に見えない近赤外光を可視域に変換する のが目的であるから、サンプル照射箇所の特定や、 本当に光変換できているかどうかをチェックする必 要がある。そこで、先に用意したCPS980レーザーの 980nm光をレーザー検出カードVRC4(プラスチック 基板使用)に当てて、アップコンバージョン光を、 分光分析した。この場合は、かなり明るい可視光群 を観測することができた。したがって、この検出カ ードと同類の蛍光剤を、タングステンやアルミナ薄 板上に塗布すれば、目的とする光変換が可能となり そうなので、上記のVRC4特注品製作依頼の可能性検 討と、中国産蛍光剤による試みを早急に実施する予 定である。

**関連調査項目** 関連する興味深い研究項目を列挙す ると、大阪工業大学・田原研究室と群馬大学・舩津 研究室の訪問などによるプラズマジェット装置利用 に関する調査、蛾の眼の構造に習った光反射率低下・ 無反射コート層の本研究への応用、光増幅器等によ る微弱光の増幅応用等 である。

**謝辞** この研究は、九州大学応用力学研究所との国 内共同研究費(分類番号29FP-26)の援助を受けて 実施した。本研究を進めるにあたり、九州大学応用 力学研究所(徳永和俊准教授、糟谷直宏准教授)、 東京工業大学フロンティア材料研究所・川路均教 授)、応用ながれ研究所(糟谷惠子副代表)、核融合 科学研究所の各位 などの方々にお世話になった。

参考資料 糟谷紘一ほか、九州大学応用力学研究所 共同利用研究成果報告書、平成 28 年度(第20 号)pp. 91-92, 2018.

2018/02/28 報告

## 大規模シミュレーションによる MHD 不安定性の3次元構造解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 佐藤雅彦

|大型ヘリカル装置(LHD)の MHD 特性及び輸送特性は、磁気軸のシフトに依存している。理論的に は真空磁気軸をトーラス内側に寄せる (内寄せ配位) では、輸送特性は良いものの MHD 特性は悪い。 しかしながら、近年の LHD 実験で達成されている、体積平均ベータ値が約 5%の高ベータプラズマ は、内寄せ配位において実現されている。このような内寄せ LHD 配位では、プラズマ周辺部が常に 磁気丘であり、理想 MHD モードが線形不安定である。しかしながら、MHD 不安定性はプラズマ周 辺部にて局所的な圧力分布の平坦化を引き起こすものの、閉じ込め性能を大きく劣化させないため、 高ベータプラズマが得られている。MHD モデルに基づいた非線形シミュレーション研究では、周辺 部にて抵抗性バルーニングモードが最も不安定であり、異なるトロイダル数を持つ抵抗性バルーニン グモード間のモードカップリングにより、巨視的な構造を持つ低次のトロイダルモードが励起され、 この低次のトロイダルモード自身のモードカップリングにより、コア領域の圧力が著しく減少するこ とを示してきた[1]。このように、これまでのところ、シミュレーションにより、LHD 実験結果を再現 するに至っていない。このシミュレーションと実験の不一致の原因の一つとして、これまでのシミュ レーション研究では、等方的な散逸モデルを用いてきたことが挙げられる。実際のプラズマでは磁力 線に平行方向の散逸係数は、磁力線に垂直方向の散逸係数よりも非常に大きい。特に、バルーニング モードは図1に示すように、トーラス外側に局在化した構造をもつため、磁力線に平行方向の早い輸 送により抑制される可能性がある。そこで本研究においては、高ベータ LHD プラズマでの抵抗性バ ルーニングモードに対する磁力線に平行方向の早い輸送の効果の影響について調べた[2]。

本研究では MIPS コードを用いた。MIPS コードは、MHD 方程式を円柱座標系のもとで、4次精度 の中心差分法を用いて離散化し、4次精度のルンゲ・クッタ法を用いて時間積分を行なっている。こ れまでの研究においては等方的な散逸係数を仮定してきたが、ここでは、粘性係数及び熱伝導係数の 異方性を考慮し、下記に示す方程式を用いた。

$$\begin{split} \frac{\partial \rho_{m}}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\rho_{m} \mathbf{u}), \\ \rho_{m} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} &= -\rho_{m} (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \frac{4}{3} \nabla [\nu \rho_{m} (\nabla \cdot \mathbf{u})] - \nabla \times (\nu \rho_{m} \nabla \times \mathbf{u}) \\ &+ \nu_{\parallel} \nabla \cdot [3\rho (\mathbf{b} \mathbf{b} - \frac{1}{3} \mathbf{I}) (\mathbf{b} \mathbf{b} - \frac{1}{3} \mathbf{I}) : \nabla \mathbf{v}], \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\nabla \cdot (p \mathbf{u}) - (\gamma - 1) p \nabla \cdot \mathbf{u} \\ &+ (\gamma - 1) \bigg[ \nu \rho_{m} \mid \nabla \times \mathbf{u} \mid^{2} + \frac{4}{3} \nu \rho_{m} (\nabla \cdot \mathbf{u})^{2} + \eta \mathbf{j} \cdot (\mathbf{j} - \mathbf{j}_{eq}) \bigg] + \chi_{\perp} \nabla^{2} (p - p_{eq}) \\ &+ (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}) \nabla \cdot [(\mathbf{b} \cdot \nabla p) \mathbf{b}] \\ \mathbf{E} &= -\mathbf{u} \times \mathbf{B} + \eta (\mathbf{j} - \mathbf{j}_{eq}), \\ \mathbf{j} &= \frac{1}{\mu_{0}} \nabla \times \mathbf{B} \end{split}$$

ここで、 $\rho_m$ , **v**, **B**, **E**, **p**, **j** は、それぞれ密度、速度、磁場、電場、圧力、電流であり、下付きの eq は 平衡量を表す。 $\mu_0$  は真空の透磁率を表す。散逸係数である  $\nu$ ,  $\chi$ ,  $\eta$  は、それぞれ、粘性係数、熱 伝導係数、抵抗であり、散逸は摂動成分のみに対して働く。粘性係数及び熱伝導係数に対しては異方 性を考慮し、下付き||及び⊥は、磁力線に平行方向、垂直方向を表している。ヘリカル磁場に対する新 古典輸送理論に基づいて磁力線方向の粘性係数及び熱伝導係数を評価すると、本研究が対象とするプ ラズマはプラトー領域に対応し、 $\nu_{||}=0.5v_aR_0$ ,  $\chi_{||}=20v_aR_0$ と評価することができる。ここで、 $v_a$ ,  $R_0$ はアルフヴェン速度、プラズマ大半径である。本研究においては、数値計算の負荷の問題から、実験 値に対応した値よりもやや小さい値である、 $\nu_{||}=0.1v_aR_0$ ,  $\chi_{||}=10v_aR_0$ を用いて計算を行なった。磁力 線に垂直方向の粘性係数及び熱伝導係数はそれぞれ $\nu_{\perp}=\chi_{\perp}=10^7$ を仮定した。MHD 平衡は磁気面を 仮定しない平衡コードである HINT コードにより構築し、中心ベータ値は 7.5%を仮定した。MIPS コ ードでは有限差分法を用いているため、個々の固有モードの成長率、固有関数を評価するためには、 磁気座標系上でフーリエモード展開し、固有モードの分離を行う必要がある。本論文では、Boozer 座 標系を用いてモード展開を行っている。

図2では、n=10の抵抗性バルーンングモードの線形成長率の散逸係数依存性を示している。ここでnはトロイダルモード数である。磁気レイノルズ数SがS=10<sup>5</sup>の時、 $\nu_{||}$ ,  $\chi_{||}$ が大きくなると線形成長率が減少していることから、磁力線に平行方向の早い輸送がバルーニングモードに対して安定化効果があることがわかる。 $\nu_{||}$ ,  $\chi_{||}$ の効果をそれぞれ比較すると、 $\chi_{||}$ の効果の方が強く、( $\nu_{||}/\nu_{\perp}$ ,  $\chi_{||}/\chi_{\perp}$ )=(1,10<sup>8</sup>)と( $\nu_{||}/\nu_{\perp}$ ,  $\chi_{||}/\chi_{\perp}$ )=(10<sup>6</sup>,10<sup>8</sup>)の結果に大きな差はない。抵抗性バルーニングモードであるため、散逸係数が等方的な場合、Sが大きくなると線形成長率はS<sup>-1/3</sup>にしたがって減少する。S=10<sup>5</sup>及びS=10<sup>6</sup>での $\nu_{||}$ による安定化効果を比較すると、S=10<sup>6</sup>の方が安定化効果が大きくなっていることがわかる。ここではS=10<sup>6</sup>に対する $\chi_{||}$ を大きくした計算を行なっていないが、S=10<sup>5</sup>の結果から類推すると、( $\nu_{||}/\nu_{\perp}$ ,  $\chi_{||}/\chi_{\perp}$ )=(10<sup>6</sup>,1)で得られた線形成長率よりもさらに小さな線形成長率が得られるものと考えられる。今後は、熱伝導係数の異方性を考慮した高磁気レイノルズ数領域での線形成長率の評価、及び、非線形発展の様子について調べる予定である。

0.1



図 1. 縦長断面での抵抗性バルーニングモードの 摂動圧力の等高線図。赤は正、青は負の振幅に対 応している。

図 2. 抵抗性バルーニングモードの線形成 長率の散逸係数依存性。

[1] M. Sato et al, Nuclear Fusion 57 (2017) 126023.

[2] M. Sato et al, "21st International Stellarator – Heliotoron Workshop, 2017年10月2日~6日.

タングステンにおける複合イオン照射下の欠陥形成と水素同位体滞留ダイナミックス 静岡大学学術院理学領域 大矢恭久

【目的】

核融合炉プラズマ対向材料であるタングステン(W)には、炉運転中に中性子や水素同位体、 ヘリウム(He)などの高エネルギー粒子に曝され、水素同位体捕捉サイトとなる欠陥が導入され るとともに、Heバブルが形成される。実炉環境下での水素同位体ダイナミクスを理解するため、 照射欠陥およびHeバブル形成過程が水素同位体滞留挙動へ及ぼす影響を明らかにすることが重 要である。さらに、実炉の運転環境下では、W は水素同位体と He に高温で長時間照射される。 そのため、本研究では照射温度を制御して He と水素同位体を同時照射した W に対し、九州大 学応用力学研究所の透過電子顕微鏡(TEM)を用いて照射欠陥および He バブルの挙動の観察を 行った。また、He の滞留挙動を昇温脱離法(TDS)およびグロー放電分析法(GD-OES)によっ て評価することで、実機環境で He 滞留挙動に及ぼす照射欠陥および He バブルの影響を明らか にした。

#### 【実験】

試料としてアライドマテリアル社製歪取加工済多結晶 W (10 mm<sup>9</sup>, 0.5 mm<sup>1</sup>) を用いた。高真空 下 (<10<sup>6</sup> Pa)、1173 K で 30 分間加熱処理することで不純物除去を行った。この試料に対して静 岡大学の 3 種イオン同時照射装置を用いて、3keV He<sup>+</sup>-1 keV H<sub>2</sub><sup>+</sup>同時照射を行った。He フックス 1.0×10<sup>18</sup> He m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、H フラックス 1.0×10<sup>18</sup> Hm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> にて、He フルエンス 1.0×10<sup>22</sup> He m<sup>-2</sup>、H フルエ ンス 1.0×10<sup>22</sup> He m<sup>-2</sup> まで同時照射を行った。照射温度は、室温、573K および 873 K である。そ の後、照射した試料を九州大学応用力学研究所にて TEM 観察を行った。また、室温同時照射し た試料に対して、873K および 1073K にて 30 分アニーリングすることで、照射欠陥、He バブル の成長、および回復挙動を観察する。また、高温同時照射下での He 挙動を理解するために、核 融合科学研究所および富山大学水素同位体科学研究センターにて、HT-TDS および GD-OES 測 定を行った。

【結果・考察】

図1に同時照射したW表面のTEM観察結果を示す。室温照射した試料に多くのHeバブルと 転位ループが見られた。室温照射したWを873Kにて加熱すると、バブルが成長すると共に、 転位ループのサイズも大きくなると共に、転位ループの数が減少した。先行研究[1]の結果によ り、He TDS スペクトからこの温度領域では大きくHe 放出ピークが存在する。このことから、 900KにてHeによる転位ループが集合することが確認できた。また、照射したWを1073Kに 加熱すると、TEM写真に白い円形の構造が見られる。この原因は熱により、試料表面にてブリ スターが形成されているためであると考えられる。一方で大きくなった転位ループがまた観察

200



図1室温He-H同時照射したW表面のTEM観察結果

された。このことから、He により転位ルー プのような欠陥は安定化され、高温でも回 復しないことが確かめられた。

図2に873Kにて高温同時照射したW試料のTEM観察結果を示す。左図に直径40 nm程のHeバブルが見られた。同じ温度に てアニーリングしたWに比べて、Heバブ ルが顕著に成長することが示唆された。右 図の同一試料のほかの箇所を撮影した写 真をからも、ブリスターも形成しているこ とがあきらかとなった。その原因のひとつ



図 2 873 K にて同時照射した W 表面の TEM 観察結果

に高温照射の時間が 1000s とアニーリング時間より長いため、熱により He バブルやブリスター などがよく成長するしたことが挙げられる。



図3にHe単独照射および同時照射したW中のHe深さ分布を示す。左図に室温および873K

図 3 GD-OES 測定による W 中の He 深さ分布



図 4 高温照射および室温 He-H 同時照射した W による He TDS スペクトル にて He 単独照射した W 試料中の He 深さ分 布を示す。He 単独照射の際に W 表面の He が減少していることから、He がバルクに拡 散したと考えられる。右図に示した 573K で の He-H 同時照射の結果に注目すると、水素 による影響がはっきりと見られた。573 K 同 時照射の際に、1 keV 水素により He が W 表 面によく捕捉されたと考えられる。図 4 に 573 K で He 照射した際の He TDS スペクト ルを示した。室温照射と同様に 900 K にて放 出ピークがあり、また 1500 K 付近で He 放出 が始まった。そこで、水素の影響により He は転位ループおよび He バブルとして滞留し

た。図3の873Kにて高温同時照射を行ったW試料のGD-OES測定結果から、室温照射よりW 表面のHeは多い。以上のことから、将来の核融合炉環境(ダイバーに温度が873K以上で長時 間放電)を考えると、水素によるHe滞留への影響を考慮しなくてはならないと結論づけられる。

参考文献

[1] Q.Zhou, et al., J. Nucl. Mater.502(2018)289.

# プラズマ乱流現象に関する可視化手法および卓上簡易再現装置の開発

# 【研究目的】

ライトフィールドカメラを用いてプラズマの 乱流現象を容易に可視化し、卓上装置で再現する ことを最終目的とし、本年度はまずは画像からプ ラズマの位置を特定するプログラムを作成する。

#### 【ライトフィールドカメラの原理】

ライトフィールドカメラの特徴は、通常のカメ ラと異なり、写真を撮影した後にピントを合わせ なおすことができることである。同一の写真に対 してピント位置を変えた画像2枚を図1に示す。



図1 ピント位置を変えた写真(a) ピントが奥の場合(b) ピントが手前の場合

ライトフィールドカメラの構造は、通常のカメ ラのセンサーが存在する場所にマイクロレンズ が取り付けられており、さらにマイクロレンズの 後方にセンサーが配置されている。つまり、マイ クロレンズの一部分に集まった光が、複数のセン

# 有明工業高等専門学校・一般教育科 竹内伯夫

サーに入る仕組みとなっている<sup>[1]</sup>。また、ライ トフィールドカメラの解像度は、マイクロレン ズの数とセンサーの数で算出される。例えば1 つのマイクロレンズの後のセンサーの数を1 マイクロレンズあたり100個とすると、2000 万画素のカメラのセンサーを使った場合、 1/100の20万画素となる。1回の撮影で多大な 処理を行うため現状では連続撮影が難しい性 質がある。ただし、近い将来解像度の問題を何 らかの方法で解消することが可能となれば、ラ イトフィールドカメラはさまざまな分野で重 宝されることが期待できる。

## 【解析手法】

プラズマの位置を特定するために、画像の最も 明るい点の座標を読み取るプログラムを制作す る。その際、初心者が簡単にプログラムを書きや すい点、画像処理が容易で、グラフィックに特化 している点から JAVA 系の言語(ソフトウェア) 「Processing」を用いた。

本プログラムにおいて、プラズマを認識するた めに画像をグレースケールに変換した後、画像の 明るい点を座標で見つるアルゴリズムを採用し た。図2にプログラムの流れ、図3にプログラム を示した。

① 画像全体を調べる
② 画素から色情報を入手する
③ 色情報をグレースケールに変換する
④ 最も明るい色情報を記憶する
⑤ ①~③を再び実行する
⑥ 最も明るい点の座標を出力する
図2 プログラムの流れ



図3 プログラム

# 【実行結果】

サンプルとして煙の画像を用いてプログラ ムを実行した。実行結果を図4に示す。赤い点 が最も明るい点を示している。黒い画面(コン ソール)に最も明るい点の座標と明るさの最大 値を表示している。



図4 実行結果

# 【まとめと今後の予定】

今回のプログラムにおいて1枚の画像をグレ ースケール変換し、最も明度の高い値を探し出し その座標を全て抽出するプログラムの制作に成 功した。まだ写真1枚のみしか判定できない段階 であり、現在はプラズマ乱流装置のプラズマ写真 (図5)を複数用いてそれぞれ色情報を抽出して 3次元表示するプログラムを作成している。



図5 プラズマ乱流装置のプラズマ画像

今後は、ライトフィールドカメラのピント調整 機能を用いることで、プラズマの集団運動を立体 的に表現できるように、また、ライトフィールド カメラによって連続撮影されたプラズマの画像 をリアルタイムで画像処理および識別できるプ ログラムに改良していく。平行して今年度実現で きなかったプラズマの卓上簡易再現装置の開発 を継続する。

## 【研究体制】

- ·代表者 有明高専 一般教育科 竹内 伯夫
- 協力者 有明高専 一般教育科 鮫島 朋子
   有明高専 教育研究技術支援センター
   森田 恵一

・世話人 九州大学 応用力学研究所 稲垣 滋

# 【謝辞】

ー緒に研究を実施した有明高専電気工学科3 年の宇都隆史氏、鳴海裕太氏、西村勇輝氏、電子 情報工学科3年の田尻和樹氏に感謝申し上げる。

# 【参考文献】

[1] 「ライトフィールドカメラの原理」 https://www.photosepia.co.jp/light\_field\_camera.html

#### 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、H<sub>α</sub>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]。熱解析のため の有限要素法を用いた ANSYS に習熟するため、熱シールド ではなく磁気シールドの解析を実施したので、その方法と結 果について報告する。

計算方法:熱シールドと同様に磁気シールドについても偏微 分方程式で記述されるので、有限要素法を用いて解析可能で ある。磁気シールドに関する偏微分方程式はマクスウェル方 程式であるが、定常磁気シールドの場合は、磁気ポテンシャ ルに関するラプラス方程式となる。そのスカラーポテンシャ ルは解析関数となる。円形断面磁気シールドの磁気ポテンシ ャルは解析的に解くことができるので、その等角写像により 楕円断面磁気シールドの磁気ポテンシャルを解析的に求める ことが可能である。

図1に示す2重円筒に垂直磁場を印加した場合の磁気ポテン シャルは次の複素関数の実部となる。

$$\phi_{v}(z_{1}) = jH_{0} \left[ z_{1} - \begin{cases} \mu_{r}(\mu_{r}+1)b^{2}(b^{2}-a^{2}) - (\mu_{r}-1)c^{2}(b^{2}+a^{2}) \\ -\mu_{r}(\mu_{r}-1)c^{2}(b^{2}-a^{2}) - (\mu_{r}+1)b^{2}(b^{2}+a^{2}) \end{cases} c^{2}/D/z_{1} \right]$$

$$\phi_{o}(z_{1}) = jH_{0} \left[ 2 \left\{ \mu_{r}(b^{2}-a^{2}) + (b^{2}+a^{2}) \right\}/D * z_{1} \\ + 2b^{2} \left\{ -\mu_{r}(b^{2}-a^{2}) + (b^{2}+a^{2}) \right\}/D/z_{1} \right] c^{2}$$

$$\phi_i(z_1) = jH_0 \left[ 4\mu_r b^2 \left\{ z_1 + a^2 / z_1 \right\} / D \right] c^2$$

 $D = -\mu_r(\mu_r - 1)b^2(b^2 - a^2) + (\mu_r + 1)c^2(b^2 + a^2) + \mu_r(\mu_r + 1)c^2(b^2 - a^2) + (\mu_r - 1)b^2(b^2 + a^2)$ 但し、中心側から順に円の半径は*a.b.c* であり、比透磁率は



図1. 水平磁場中における磁気面 (磁力線)および等磁気ポテンシ ャル面



 $\infty, 1, \mu_r, 1$ である。 $z_1$ 平面からz平面へ次の等角写像を行う[3]。

$$z = \frac{f}{2} \left( \frac{z_1}{a} + \frac{a}{z_1} \right)$$

この写像により、中心の円柱は x 軸上の線分に写像され、2重 円筒は1 重横長楕円筒に写像される(図2)。垂直磁場中におけ る横長楕円筒の磁気シールド係数は次式となる。

 $\frac{B_{y}(\infty,\theta)}{B_{y}(r,\theta)} = \frac{2D}{8\mu_{r}b^{2}c^{2}} = \begin{cases}
-\mu_{r}(\mu_{r}-1)(m+n)^{3}n + (\mu_{r}+1)(m_{o}+n_{o})^{2}(m+n)m \\
+\mu_{r}(\mu_{r}+1)(m_{o}+n_{o})^{2}(m+n)n + (\mu_{r}-1)(m+n)^{3}m \end{cases}
/\left\{2\mu_{r}(m+n)^{2}(m_{o}+n_{o})^{2}\right\}$ 



図3.解析的に求めた磁気シールド 係数の内側縦横比依存性(内側、外 側楕円の短半径は固定、µ<sub>r</sub>=5)青 実線:垂直磁場、赤破線:水平磁場

但し、*m*,*n*は楕円の内側長半径、短半径であり、*m*<sub>o</sub>,*n*<sub>o</sub>は外側 長半径、短半径である。同様に、水平磁場中における横長楕円筒の磁気シールド係数は次式となる。

$$\frac{B_x(\infty,\theta)}{B_x(r,\theta)} = \frac{2D}{8\mu_r b^2 c^2} = \begin{cases} \mu_r (\mu_r - 1)(m+n)^3 n - (\mu_r + 1)(m_o + n_o)^2 (m+n)m \\ -\mu_r (\mu_r + 1)(m_o + n_o)^2 (m+n)n - (\mu_r - 1)(m+n)^3m \end{cases} / \left\{ 2\mu_r (m+n)^2 (m_o + n_o)^2 \right\}$$

計算結果:解析的に求めた磁気シールド係数の楕円度(縦横比)依存性を図3に示す。ANSYS を用いて計算した磁気シールド係数のアスペクト比(縦横比)依存性を図4に示す。図3における青実線は図4における"Aspect ratio<1"に相当する。

考察:ANSYS を用いて計算する場合は、楕円筒の軸方向の並進対称性を考慮して、ベクトルポテン

シャルA<sub>2</sub>を用い、外部磁場は電 流源を用いて印加したため、理 想的な一様磁場にはならず、解 析解と数値解の間に誤差が生じ た。図4に示すように矩形筒に ついても磁気シールド係数の数 値解を求めたが、解析解が存在 しないため誤差の評価が困難で ある[4]。

 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 &



図4. ANSYS を用いて計算した垂直磁場中における磁気シール
 ド係数のアスペクト比依存性(µ<sub>r</sub> = 100)

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] William R. Smythe: Static and Dynamic Electricity, McGraw-Hill Book Co. Inc. (1950).
- [4] Y. Tanabe, K. Yamamoto: Shielding Factor for Magnetic Shield Tube with Rectangular Cross Section, T. IEE Japan, vol. 119-A, no. 11 (1999) 1368-1373.

#### オーステナイト系ステンレス鋼の照射特性評価

日立製作所 研究開発グループ 王昀

## 1. 目的

沸騰水型原子炉(BWR)の炉内構造材を適用対象として,耐食性,耐応力腐食割れ(SCC)性並びに 耐照射性を向上した材料の開発に取り組んでいる.溶接熱影響部(HAZ)は,照射誘起応力腐食割れ (IASCC)の感受性が高いため,本材料開発の一環として,HAZの照射特性に及ぼす合金添加元素影響 を明らかにすることを目的とし,オーステナイト系ステンレス鋼の基材に安定化元素を添加した開発材 のHAZを対象に,ランダム粒界における照射誘起偏析(RIS)の定量評価を行った.

#### 2. 開発材の化学成分

耐照射性への添加元素影響を明確化することを目的として,不純物安定化元素種及び安定化元素濃度 を変化させた開発材を試作した.また,比較のため,現行材 SUS316L と市販の冷間圧延材 SUS310S を 用意した.表1にこれらの開発材と比較材の目標化学組成を示す.

表1 開発材の化学成分 (mass%)

照射試験	開発材	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ta	A1	Ν	0	Base material
×	H23-1	0.014	0.49	0.93	0.025	0.002	0.27	19.09	25.20	<0.01	0.08	0.10	<0.01	0.041	0.019	0.003	SUS310S
0	H23-2	0.013	0.48	0.93	0.022	0.002	0.28	18.89	25.15	< 0.01	0.08	0.15	<0.01	0.033	0.018	0.004	SUS310S
0	H23-3	0.013	0.52	0.93	0.025	0.001	0.29	14.30	17.57	2.2	0.07	< 0.002	0.43	0.039	0.020	0.003	SUS316L
0	H23-4	0.013	0.49	0.93	0.022	0.002	0.28	18.94	25.03	< 0.01	0.08	<0.002	0.21	0.047	0.021	0.004	SUS310S
0	H23-5	0.013	0.50	0.92	0.023	0.002	0.29	19.36	25.03	< 0.01	0.08	<0.002	0.40	0.030	0.020	0.007	SUS310S
0	H23-6	0.013	0.51	0.93	0.024	0.001	0.28	21.52	20.94	2.2	0.08	0.00	0.41	0.047	0.019	0.004	γ相安定化
0	SUS310S	0.050	0.58	0.74	0.020	< 0.001		19.22	25.41								
0	SUS316L	0.009	0.60	0.89	0.018	0.005		12.26	16.31	2.1							

#### 3. 継ぎ手溶接試験片

溶接金属は,現行 SUS316L 製シュラウドの実機溶接部に適用した YS308L を用いた.BWR シュラウド溶接施工条件を参考して,TIG 溶接で継ぎ手溶接試験片を作製した.図1に継ぎ手溶接試験片の外観 写真を示す.さらに,HAZ から¢3mm×0.2mm<sup>T</sup>の円盤試験片を作製して,照射試験に供した.

#### 4. HAZの照射誘起粒界偏析分析

照射量 3dpa の Fe<sup>2+</sup>イオンで照射した HAZ 試験片のランダム粒界を対象に, RIS 分析を実施した. RIS 分析は, 収差補正走査・透過電子顕微鏡 (STEM) JEM-ARM200F に搭載されたネルギー分散型 X 線 (EDX) 分析ユニットを用いて行った.分析位置は,最大照射損傷深さ 800 nm 近傍とした.分析の代表例として,試験片 H23-3 における粒界近傍の STEM の明視野と RIS 分析位置を図 2 に示す.

各試験片の HAZ における照射誘起粒界偏析の分析結果を図 3 にまとめた. SUS310S, H23-4 と H23-5 の結果からは,同じ Cr と Ni 量の試験片の場合, Ta 添加による RIS の低減効果が確認された.また, Nb を添加した H23-2 では RIS が発生した結果から, RIS 低減の観点からは 0.15% Nb より 0.4% Ta を添加した方が好ましい. 一方,高 Cr 高 Ni に 0.4% Ta を添加した H23-6 は RIS が生じず,優れた照射特性 が得られた.

#### 5. まとめ

開発材のHAZを対象に実施した照射誘起粒界偏析評価の結果,Ta添加によるRISの低減効果が確認され,高Cr高Niステンレス鋼にTaを添加することにより,優れた照射特性を得ることが実証された.

#### 6. 今後の課題と対応

今後は開発材の母材と HAZ の照射特性の違いを理解するため、転位ループサイズや密度分布と照射 硬化との相関を検討する.また、添加した安定化元素 Ta や Nb などの分布を考察し、安定化元素による 照射誘起粒界偏析の低減効果のメカニズムを明らかにする予定である.



図1 継ぎ手溶接試験片の外観および照射試験片の作製位置



図2 試験片 H23-3の HAZ における粒界付近の STEM の明視野



図3 HAZにおける照射誘起粒界偏析の定量評価結果 (3dpa)
### 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<sup>1</sup>、佐々木 真<sup>2</sup>、荒川弘之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中部大学 中部高等学術研究所 国際GISセンター、<sup>2</sup>九州大学 応用力学研究所、<sup>3</sup>帝京大学

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

本研究で取り扱う気象データとして、気象庁・一般財団法人気象業務支援センターの配信する「高 解像度降水ナウキャスト」を用いた。高解像度降水ナウキャストは、2014 年 8 月 7 日から配信の始 まった新しいデータで、5 分間隔で配信される全国 250m メッシュの格子データであり、そのサイ ズは、圧縮状態で1 日あたり 46GB にもなる大規模データである。全国 20 ヵ所のドップラーレー ダー、気象庁・国交省・地方自治体の保有する全国 10,000 ヵ所の雨量計の観測データ、国交省X R A I N等を活用することで実現されている。本年は、この大規模データを用いて直近の降水状況に ついて WebGIS での可視化を行うとともに、過去の降水データについて、任意の時期・時間帯の降

209

水データを初等的な解析を行った上でハンドリングのよい形式で出力できるシステム構築を行った。

結果

まず、高解像度ナウキャストについて、大規模 データの取扱い、局所的集中豪雨についての統計 的定量化の基盤を構築するため、Web GIS 上で の可視化を行った (図1)。過去のデータについて は、閲覧、検索、解析を目的に 2015 年11月初 頭より上記のデータ配信を受け、中部大学中部高 等学術研究所国際GISセンターのデジタルア ース・サーバに蓄積を行っており、一部をウェブ・ サービスとして公開している[5]。

高解像度ナウキャストの大規模データについ て、従来のシステムでは気象業務支援センターか ら配信を受けたデータの直近のものを可視化し



図 1 高解像度降水ナウキャストの Web GIS 上 での可視化

ていたが、過去のデータについては別のストレージに圧縮効率のよい GRIB2 形式で蓄積しているた め、データのハンドリングが困難であった。そこで、任意の時期・時間帯のデータをハンドリングの よい GeoTIFF 形式に変換し出力するシステムを構築し、デジタルアース・サーバに実装した(図 2)。



図 2 実装したシステムの模式図

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所平成28年度共同利用・共同研究29FP-32、中部大学問題複 合体を対象とする共同利用・共同研究 IDEAS201732、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).
- [5] http://de08.digitalasia.chubu.ac.jp/map/index.jsp (要ログイン)

中性粒子風由来のブロッブの発生と輸送特性

中部大学中部高等学術研究所 杉田暁

九州大学応用力学研究所 小菅佑輔

# 目的

本研究の目的は、中性粒子風に由来する荷電分離およびブロッブの生成・伝搬が発 生する条件を数値実験により明らかにし、直線装置 PANTA による核融合周辺領域 (SoL 領域)の模擬実験の可能性を探ることにある。トロイダルプラズマを対象とした研 究から、不均一磁場に由来する荷電分離とその結果生じるブロッブの輸送特性が研 究されている[1,2]。これはトロイダルプラズマに特有の磁場不均一性や曲率に由来 する遠心力から生じる効果であるが、同様の効果が中性粒子流の効果を考慮するこ とで得られることが報告されている[3]。本研究では、トロイダルプラズマを対象として 申請者が開発したコードをベースに、中性粒子流を取り入れたモデルとの対応を明ら かにし、直線装置でブロッブの発生を許す中性粒子の密度や流速のパラメータサー ベイを行うことを目的とする。

# 結果

今年度の研究では、中性粒子風由来ブロッブモデルの導出を行い、数値コード が解いているトロイダルプラズマにおけるモデルとの比較をし、重要となる物 理過程とパラメータを明らかにすることを目的とした。従来報告されている中 性粒子風由来モデルに対して、磁場方向の電流、境界条件を精査し、ボームポ テンシャルを導入することでより正確なモデルを導出した。

$$\frac{d}{dt}\rho_s^2 \nabla_{\perp}^2 \frac{e\varphi}{T_e} + \eta_n c_s \partial_x \ln n = \frac{c_s}{L_{\parallel}} \frac{e\varphi}{T_e}$$
$$\frac{d}{dt}n = \left(-1 + \frac{e\varphi}{T_e}\right) \frac{c_s}{L_{\parallel}}n$$

ここで、e は電荷、 $T_e$  は電子温度、 $\rho_s$  は電子温度で評価したイオンラーマー半径、 $c_s$  はイオン音速、 $L_{\parallel}$  は平行方向の連結長、n は電子密度、d/dt は ExB 速度に沿った微分である。中性粒子に由来するパラメータ  $\eta_n$  は

$$\eta_n = \left| \frac{\nu_{in}}{\omega_{ci}} \frac{V_n}{c_s} \right| + \left| \frac{\nu_{en}}{\omega_{ce}} \frac{V_n}{c_s} \right|$$

で与えられる。ここで  $\omega_{ci,e}$ はイオン・電子サイクロトロン周波数、 $\nu_{in,en}$ はイオ ン/電子と中性粒子との衝突周波数、Vnは中性粒子速度である。従来のモデル[1,2] では、ブロッブのダイナミクスは簡約化された流体モデルに基づいており、2次 元渦度と圧力場を含めた方程式系となっている。ブロブの駆動項は磁場曲率に 由来する遠心力と圧力勾配の積からなる。その一方で、本モデルでは、時間発 展を考える物理量は2次元渦度と密度であり本質的な違いはないが、駆動項が 中性粒子パラメータ η<sub>n</sub> に置き換わっている。この項は一方向に吹く中性粒子 風からくる摩擦力に由来し、トロイダルプラズマにおける遠心力に変わる役割 を果たす。中性粒子の効果を取り入れることで、直線プラズマにおいてもブッ ロブのダイナミクスを同一の方程式系で考察することがわかった。また、従来 の中性粒子風由来ブロッブモデル[3]に対して、このモデルでは平行方向のシー ス電流、境界条件、ボームポテンシャルを取り入れており、トロイダルモデル [1,2]との対応がより明らかとなっている。これらの結果から、従来のトロイダ ルプラズマを対象として開発されたコードを、中性粒子が重要となる直線プラ ズマにおけるブロブの解析に適用できることが示唆される。ブロブが発生する ための具体的なパラメータなどについては現在精査中である。磁力線方向波数 がゼロに近い揺動も PANTA で観測されており[4]、交換型不安定性との比較が 今後ますます重要となる。数値コードを整備することにより、直線装置 PANTA 実験との比較などをより迅速に進めることが可能となる。

# 参考文献:

- [1] D.A. D'Ippolito, et al., Phys. Plasmas 9 222 (2002)
- [2] S. Sugita, et al., J. Phys. Soc. Japan 79 044502 (2010)
- [3] S. I. Krasheninnikov and A.I. Smolyakov, Phys. Plasmas 10 3020 (2003)

### 成果論文:

[4] 福田郁未、他7名、「直線磁化プラズマにおける軸方向不均一性の観測」プ ラズマカンファレンス、23p-20、2017.11.20-24 姫路

# 研究組織

代表者:杉田暁(中部大学) 所内世話人:小菅佑輔

# 複合照射環境下におけるタングステンの水素同位体吸蔵特性に関する研究

筑波大学数理物質系 坂本瑞樹

### 1. はじめに

高温のプラズマに晒される極限環境下における材料の表面状態は、照射損傷、スパッタ リング、再堆積、バブル形成等の様々なプラズマ・壁相互作用(PWI)現象に起因して変化 する。さらに核融合炉におけるプラズマ対向材料は、中性子、水素同位体、ヘリウムの複 合照射環境下に置かれることになる。このような複合照射環境下における材料の水素吸蔵 特性に関するデータは数少なく、今後データベースを構築していく必要がある。本研究で は、低損耗、高融点、低水素吸蔵率という特長から核融合炉のプラズマ対向材料の最有力 候補であるタングステン材料に注目した。中性子を模擬した重イオンによる表面改質及び 重イオンとヘリウムや水素同位体の複合照射による材料の表面改質が水素吸蔵特性へ与え る影響を明らかにすることを目指している。

## 2. 実験結果及び考察

本年度は加速器を用いた重イオンと軽イオンの複合照射のための予備実験として、銅イオン照射とヘリウムイオン照射の各々が重水素吸蔵特性に与える影響について調査した。 銅イオン照射効果に関しては、再結晶タングステン試料に 2.4MeV の Cu<sup>2+</sup>イオンを照射し た後、その試料に小型プラズマ生成装置 APSEDAS(筑波大学)を用いて低エネルギー・高 フラックスの重水素プラズマを照射し、昇温脱離ガス測定から水素同位体吸蔵特性を評価 した。本研究で用いた試料は、2000℃で1時間焼鈍した再結晶タングステン(10mm × 10mm × 1mm)である。結晶粒径は 10~50µm 程度であり、表面は鏡面研磨されている。 再結晶タングステンを用いる理由は、材料中の潜在的な欠陥の影響を極力減らし、重イオ ン照射の影響を見やすくするためである。

小型プラズマ生成装置 APSEDAS における重水素プラズマの電子温度と電子密度はそれ ぞれ約 10 eV と約2.8×10<sup>17</sup> m<sup>-3</sup>である。フラックスは約3.7×10<sup>21</sup> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>であり、フル エンスが2.0×10<sup>25</sup> m<sup>-2</sup>までプラズマ照射した。プラズマの空間電位は約 30V であり、接 地電位の試料に入射する重水素イオンのエネルギーは 30eV と考えられる。放射温度計で 測定した照射中の試料表面温度は約 480K であった。プラズマ照射後に試料を昇温脱離装 置に移し、十分に真空排気を行った後に、1K/s の昇温速度で 1173K まで加熱して重水素 の昇温脱離特性を調べた。銅イオン照射された再結晶タングステン試料からの重水素の昇 温脱離スペクトルには、銅イオン未照射試料にはない高温側の脱離ピークが新たに出現す ることが分かった。これまでの研究から、高温側の新しい脱離ピークは、銅イオン照射に よって形成された nano-void と vacancy cluster の重水素捕捉によるものであると考えられ る。また、銅イオン照射による損傷レベル(dpa)が重水素吸蔵量に与える影響は、銅イオ ンのフラックスにより異なる結果が得られた。銅イオンフラックスが5×10<sup>15</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>の照 射では、重水素吸蔵量は0.4dpa 程度までは損傷レベルとともに増加するが、損傷レベルが 0.4dpa 以上では重水素吸蔵量が飽和することが分かった。一方、銅イオンフラックスが1 ×10<sup>15</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>の低フラックス照射では、重水素吸蔵量は2dpa まで単調に増加した。これ は、高エネルギー銅イオンのフラックスにより欠陥生成プロセスが異なることを示唆して いる。この原因究明は今後の課題である。

ヘリウム照射がタングステンの重水素吸蔵特性に与える影響については、APSEDASにおいて低エネルギーのヘリウムプラズマ照射を行った後に重水素プラズマ照射を行うことで評価した。昇温脱離ガスの測定には四重極分析器を用いるため、重水素とヘリウムを区別することができない。このため、ヘリウムプラズマ照射を行った後に昇温脱離測定を行い、ヘリウムが脱離しなくなったことを確認してから重水素プラズマ照射を行った。ヘリウムプラズマ照射を行うことで、重水素の昇温脱離スペクトルがヘリウムプラズマ照射を行っていない試料に比べて低温側にシフトすることが分かった。

今後、タングステン試料に対して重イオンと軽イオンの同時照射を行い、同時照射(複 合照射)が水素同位体特性に与える影響を調査する必要がある。今回は準備段階として個 別の照射の影響を調査した。次のステップとしては、水素またはヘリウムのプラズマを照 射した試料に対して銅イオン照射を行い、タングステン中に水素またはヘリウムが存在し ている時に銅イオン照射による欠陥生成がどのように影響を受けるかについて調査する。

氏名	所属	職名等	役割分担
坂本 瑞樹	筑波大学·数理物質系	教授	代表者
坂本 隆一	核融合科学研究所	教授	微細組織解析
時谷 政行	核融合科学研究所	助教	微細組織解析
寺門 明紘	筑波大学·数理物質科学研究科	大学院生(D2)	表面計測
野尻 訓平	筑波大学·数理物質科学研究科	大学院生(D2)	プラズマ計測
伊能 俊太朗	筑波大学·数理物質科学研究科	大学院生(M2)	水素吸蔵解析
鈴木 佑	筑波大学·数理物質科学研究科	大学院生(M2)	材料表面解析
渡邉 英雄	九州大学・応力研	准教授	所内世話人

### 3. 研究組織

# 4. 成果報告

(1) S. Ino, M. Sakamoto, Y. Suzuki, H. Watanabe, N. Ashikawa, M Tokitani, et al., "Properties of hydrogen isotope retention in tungsten deposited layer", Plasma Conference 2017(姬路商 工会議所、平成 29 年 11 月) 23P-96.

# 水素プラズマスパッタ法で形成される多孔質金属膜への水素混入とエネルギー付与効果

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

### 【緒言】

水素は利用時に環境負荷が小さいことからクリーンな二次エネルギーとして注目されており、水素の製造・貯 蔵・輸送に関連する技術開発が進められている。水素の安全取扱の観点や高機能材料開発の観点から、種々の材料 における水素挙動の理解が求められている。ジルコニウムやパラジウム等が高い水素吸蔵特性を有するのに対し て、白金やタングステン(W)等はほとんど水素を吸蔵しないことが知られている。しかし報告者らの研究により、 水素プラズマスパッタリングを利用してこれらの金属から形成される薄膜は、膜形成過程で多量の水素を捕捉す ることが明らかとなっている。また、形成後に重水素プラズマを照射すると、比較的高濃度に重水素が保持される ことも観測されている。応用力学研究所とのこれまでの共同研究により、重水素プラズマスパッタリングにより形 成される W 膜は、数 nm の微結晶粒から構成され多くの空隙を有することがわかっている。このことから捕捉さ れた水素の多くはナノスケールの微結晶粒の粒界や空隙に捕捉されていると推定される。このような知見は、将来 水素貯蔵用機能性材料の開発に進展をもたらす可能性がある。しかしながら、成膜過程での水素挙動については十 分には理解されておらず、微細構造と水素吸蔵・放出挙動との関係性や水素取込に寄与する放電中の水素形態につ いて詳しく調べる必要がある。

スパッタ・成膜過程では、膜成長表面はワーキングガスである水素ガス、プラズマからの水素イオン、スパッタ ターゲットからの反跳水素等にさらされる。しかしながら、それぞれの水素がW膜形成過程での水素捕捉にどの ように寄与しているかについては明らかとなっていなかった。一昨年度の応用力学研究所との共同研究において、 プラズマスパッタ装置内に基板設置ステージを取り付け、異なる環境下におけるW膜と水素捕捉量を調査した。 その結果、スパッタターゲットからの反跳水素の影響が支配的であることが示唆された。反跳水素が膜表面に衝突 した後、プラズマ中に反射するもの、表面層に蓄積するもの、内部へ浸透するものが想定されるが、未だ明らかに されていない。本研究では、成膜過程での水素挙動の理解を深め

るため、成膜過程で膜を透過する水素挙動の把握を目的とした。 堆積層形成基板の背面を真空排気し、膜及び基板を透過した水素 挙動を質量分析計を用いて観測した。

### 【実験方法】

これまで用いてきた RF 水素プラズマスパッタリング装置の接 地電極を改造し、膜及び基板を透過した水素を質量分析計で測定 できるようにした。図1に改良した装置概略図を示す。真空チャ ンバー下部フランジから1/2インチステンレス管を挿入し、金属 ジョイントを介して ICF34 フランジが溶接された1/4 ステンレス 管を取り付けた。ターゲットからの距離を変更することができる よう、金属ジョイントに挿入した1/4 ステンレスはOリングによ り固定し、可変かつ気密性が保持される構造とした。ICF34 フラ ンジに、銅ガスケット、ニッケル基板を乗せ、最後に ICF34 穴あ きフランジで挟み込んで締め付けた。ニッケル基板によってスパ ッタリング装置内の空間と接地電極内の空間とが物理的に隔絶 されている。RF 電極には、タングステン板を設置した。ICF フラ ンジ近傍にプローブを設置し流入する電流値を測定した。

ターボ分子ポンプによりプラズマ側及び透過側の真空排気を 十分に行い、プラズマ側の真空ポンプをロータリーポンプに 切り替えた。透過側に設置された四重極質量分析計(QMS) を立ち上げて、信号の安定待ちを行った。その後、プラズマ側に マスフローコントローラーを介して水素ガスを導入しガス圧を 調整した。また、この際供給した水素の透過側へのリークがない ことを確認した。その後 RF 電極に 13.56MHz の高周波電力を印 加して電極間にプラズマを点火し、ニッケル基板上への薄膜の形 成をはじめた。Table1 に標準的な実験条件を示す。透過した水素 QMS により測定した。



Fig.1 RF 水素プラズマスパッタリング装置

Table1 標準的な実験条件

基板材料	Ni
基板厚み [µm]	20
導入ガス	H <sub>2</sub>
ガス圧力 [Pa]	10
RF 電力 [W]	100
実験時間 [h]	124

### 【結果及び考察】

QMSで得られた水素透過フラックスとプローブで 測定された電流値から算出された水素入射フラックス をFig.2 に示す。プラズマ放電開始後およそ 400 秒から 水素の透過が観測された。放電時間につれて透過量が 減少していることから、W 膜の形成が透過量に影響を 与えていることがわかる。今回の実験体系では堆積層 の厚みをその場測定することができないので、これま でに同条件で得られている成膜速度から膜の空隙率を 0.5 と仮定して厚みを 1.28µm と算出した。なお、成膜 量を成膜時間で割ることで厚みの経時変化を算出し た。水素入射フラックスが断続的に低下している部分 では、プラズマが不安定になり、消滅・点火を繰り返し ていた。プラズマが消滅した際には、透過フラックスも 不連続に低下しており、プラズマにより水素透過が駆 動されていることを示している。

ここで、水素入射フラックスの導出過程について示 す。穴あきフランジの厚みにより、膜成長表面はプラズ マには接していない。そのため、主にターゲットで反跳 された高エネルギーの水素が膜に入射することで、水素 透過が生じると考えている。プラズマ中における水素イ オンフラックスはプローブによって測定した。これまで の測定データより、本実験条件ではターゲットの電位は およそ-500V と推定される。そこで、入射エネルギー 500eV での水素イオンの反跳について TRIM コードで 計算を行った。その結果、粒子反射係数は 0.34 と得ら れた。また、得られた反跳エネルギーから膜に入射する 水素の反射係数と飛程を計算した。この際、反跳粒子は プラズマ中の水素に比べて非常に高いエネルギーを持 っているため、衝突によるエネルギー損失を無視し た。その結果、膜表面における粒子反射係数は0.33と いう値が得られた。これらの値を用いて、Fig.2 に示 す水素入射フラックス及びFig.3に示す水素入射飛程 が算出された。表面から 5nm 付近に入射飛程のピー クが現れその後徐々に低下することが示された。

次に得られた膜厚み、入射フラックス、飛程を用い てTMAPコードにより実験体系を模擬したシミュレ ーションを行い再結合係数によるフィッティングを 試みた。なお、拡散係数は本研究グループでこれまで に得られている値を用いた。膜厚は時間に比例して 増加すると仮定した。Fig.4 に実験値とTMAPによる 2つの再結合係数の値を仮定したシミュレーション を比較して示す。シミュレーション結果は、実験結果 と同様の時間変化を示すものの、透過フラックスの 絶対値に一桁程度の差が生じた。原因としては、解析



Fig.4 実験値と TMAP シミュレーションの比較

において実際の厚みより薄く仮定されていること、拡散係数が大きく見積もられていることなどが考えられる。今後、膜厚分布を正確に測定し、改めて拡散係数を求める計画である。

### 【まとめ】

- · RF 水素プラズマスパッタ装置の接地電力を改造し、成膜基板背面への透過水素を観測できる構造とした。
- · 透過水素の観測に成功し、放電時間に伴って水素透過フラックスが低下することがわかった。
- TMAP コードを用いた水素透過シミュレーションを行ったところ、時間変化の傾向は再現できたものの、透過 フラックスの絶対値は一致しなかった。今後透過モデルの改良を進めていく予定である。

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ある。

# 酸化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

# 九大工山口理一郎(院),山口芳昭(院),吉岡聰,安田和弘,松村晶

CEA-Saclay Jean-Marc Costantini

### 1. 目的

蛍石型酸化物は耐放射損傷性に優れ、放射線照射下で使用される材料として重要な役割を果たしている。例えば、二酸化ウランは軽水炉燃料として長期に亘る使用実績があり、立方晶安定化ジルコニアは 長寿命核種を核変換処理するための母相材料の候補である。原子炉燃料には、燃焼度を調節するため に酸化ガドリニウム(Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)などの可燃性毒物がドープされる。3 価の陽イオンをドープすると、蛍石型酸 化物中の4 価の陽イオンとの価数の違いから電気的中性条件を保つために酸素イオン副格子に空孔が 導入される。一方、蛍石型酸化物においては、陽イオンと酸素イオンの質量が大きく異なり、かつはじき 出しエネルギーは陽イオンの方が大きいため、酸素イオンの質量が大きく異なり、かつはじき 出しエネルギーは陽イオンの方が大きいため、酸素イオンのはじき出し損傷速度は金属イオンと比べて 著しく大きくなる。このため、放射線の照射下ではエネルギーや質量に依存して酸素イオンの選択的はじ き出し損傷が誘起される。これまでの研究により、1.3 MeV 以下の電子を照射した蛍石構造の CeO<sub>2</sub> 中に は、酸素イオンのみにより構成される転位ループが形成・成長することが報告されている。3 価陽イオンを ドープした CeO<sub>2</sub> では、導入された酸素空孔は照射によって形成される酸素イオン格子間原子の再結合 サイトとして働くと考えられるが、3 価陽イオンをドープした CeO<sub>2</sub> 中の転位ループ形成・成長に関する報告 は殆どない。本研究では、3 価陽イオン(Gd<sup>3+</sup>および Er<sup>3+</sup>)をドープした二酸化セリウム(CeO<sub>2</sub>)に対して透過 型電子顕微鏡(TEM)内で電子線照射を行いながら照射欠陥の形成・成長過程を「その場」観察し、転位 ループの形成・成長に及ぼす 3 価イオンの効果について明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験方法

CeO2粉末、およびGd2O3あるいはGd2O3粉末(レアメタリック社製、純度99%)を混合し、ボールミルにより24時間攪拌した後、一軸加圧および静水圧加圧によってペレット状に成型した。作製したペレットは非

ドープ CeO<sub>2</sub> 試料、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>あるいは Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を 0.5 mol%ドープした CeO2 試料である。これらの試 料は 1773 K で 24 時間ほど大気中で加熱し、 1473 K で 3 時間ほど保持した後に冷却した。焼 結体はアルキメデス法およびCu-Kα線を用いた X 線回折(XRD)測定により、その密度ならびに 結晶構造を評価した。得られた焼結体から直径 3 mm の円板状試料を成形し、機械研磨、およ び Ar イオン研磨を施すことにより透過電子顕微 鏡(TEM)観察用の薄膜試料を作製した。これを 九州大学超顕微解析研究センターの TEM を 用いて 200 keV(汎用電子顕微鏡)、または 1250 keV(超高圧電子顕微鏡)の電子照射を 行いながら照射欠陥の形成・成長過程を「その 場」観察した。電子線束密度は(1.0-1.8)× 1023 m-2 s-1 であり、照射時間は 30 分とした。 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をドープしたCeO<sub>2</sub>試料につ



図 1 200 MeV Xe イオンを 1×10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup> 照射した同 一視野 YSZ TEM 明視野像。 Δf は、デフォーカス量 の値を示している。

いては、電子照射を行った後でエネルギー分散 X 線分光法(EDS)により添加元素のマッピングおよび点 分析を行った。

### 3. 結果および考察

作製した焼結体の密度をアルキメデス法で測定した結果、非ドープ試料、0.5 mol%のGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をド ープした試料、および0.5 mol%のEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をドープした試料は、それぞれ理論密度の96.0%、87.5% および97.2 %の密度の緻密な焼結体となっていた。XRD測定の結果、非ドープ試料およびGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> もしくはEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をドープしたCeO<sub>2</sub>試料のいずれにも蛍石構造に起因する回折ピークのみが現れて いた。図1に0.5 mol%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ドープCeO<sub>2</sub>試料に1250 keV電子を室温にて照射することにより形成さ れた転位ループの走査透過型電子顕微鏡像を示す。図1は[011]方向から撮影した環状明視野像であ る。図1中の矢印で示される線状のコントラストは{111}面上に存在する転位ループを示している。 転位ループサイズは約20 nmであり、周囲には暗いコントラストを伴う強い歪場が誘起されている。 このコントラストは非ドープCeO<sub>2</sub>試料に形成された転位ループに類似していること、および1250 keV電子照射下では、CeO<sub>2</sub>中には酸素イオンのみにはじき出し損傷が誘起される不定比性転位ルー プであると考えられる。

図2は非ドープCeO2試料、0.5 mol%Gd2O3あるいは0.5 mol%Er2O3をドープしたCeO2試料に200お よび1250 keVの電子照射を行い、転位ループの形成・成長過程を観察した結果をまとめたTEM明 視野像である。図2(a)~(f)に示すように、全ての試料で強い歪コントラストを伴う転位ループが形 成された。これらは、図1に示した転位ループと同じ性状の{111} 面上の格子間型酸素イオン転 位ループであると考えられる。それぞれの試料中に形成された転位ループの大きさを比較すると、 エネルギーの低い200 keV電子照射において大きな転位ループが形成されており、特に非ドープ CeO2試料のサイズが大きくなっている。また、転位ループの密度に注目すると、非ドープ試料、 ドープ試料のいずれにおいても、1250 keVの電子照射の方が転位ループ密度は高くなっている。 転位ループサイズおよび密度の電子エネルギーならびにドープの有無により相違は、3価イオンの ドープによる酸素副格子への空孔の導入、異種原子による点欠陥のトラップ効果、はじき出し損 傷速度の相違などが関与していると考えられる。



図 2 YSZ 中イオントラックの面密度の照射量依存性。CeO<sub>2</sub>のデータはTakakiらによる。 S. Takaki, et al. Nucl. Instr. Meth. B, 326 (2014) 140.

### 高エネルギーイオン照射法による貴金属フリー新規磁石材料の開発

東北大学 金属材料研究所 水口 将輝

### 目的

貴金属などの希少金属を含まない磁石材料の開発が急務となっている。炭素系物質においても高エネ ルギーイオン照射などによって強磁性的な挙動が観察されたという報告がなされている[1]。これらの炭 素系の磁性物質においては、グラファイト構造のエッジやトポロジカルな欠陥が磁性発現に寄与してい ると考えられており[2]、このため、高エネルギーイオン照射によるエッジの局所原子構造や終端原子種 を制御する方法を確立することが炭素系磁石材料を開発するためには不可欠となる。本研究では局所構 造制御の最初の段階として、グラフェンへの新たなヘテロ原子ドーピング法の開発を目的とした。従来 のグラフェンへのヘテロ原子ドーピング法では、化学気相蒸着 (CVD) 法によるグラフェン成長の際に ヘテロ原子を前駆体気体分子に混入させる方法が一般的である。しかしながら同方法ではドープ可能な 原子種が制限されるという問題がある。そこで本研究では、化学的手法が抱える困難を克服して種々の ヘテロ原子ドーピングを可能にする新たなアプローチとして、化学結合エネルギーを遥かに超える高エ ネルギーのイオン照射がもたらす特徴的な非平衡励起反応場に着目したヘテロ原子ドーピング法に取 り組む。具体的には、ドープ原子を含む薄膜とグラフェンとのヘテロ界面を作製し、同界面に高エネル ギーイオンを照射する。同界面へのイオン照射に伴うグラフェンの原子構造や電子状態の変化を明らか する。

### 実験方法

はじめに、単層グラフェン(SLG)を多結晶 Cu 基板上に化学気相蒸着法により成長した(SLG/Cu)。 次に同 SLG 上に 100 nm の厚さの LiF を成膜した(LiF/SLG/Cu)。九州大学応用力学研究所の高エネル ギーイオン発生装置を用いて、真空中において同ヘテロ界面に LiF 層側から高エネルギーイオン(2.4

MeV<sup>63</sup>Cu<sup>2+</sup>)を照射した。イオン照射後の試料は,純 水リンスによって LiF 層を除去した後に電子状態や原 子構造を顕微ラマン分光および X 線吸収端近傍微細構 造(NEXAFS)により評価した。

# 実験結果・考察

図1にイオン照射に伴うグラフェンのラマンスペク トルの変化を示す。1350 cm<sup>-1</sup> 付近に見られる D バン ドの挙動から、イオン照射量の増大に伴いグラフェン 中の欠陥生成が促進されることが分かった。さらに、 LiF/SLG/Cu ヘテロ構造へのイオン照射では、SLG/Cu への照射と比較して欠陥の生成が顕著となることが明 らかになった。D バンドと G バンド(1580 cm<sup>-1</sup>)の強 度比から欠陥間距離を見積もると照射量 10<sup>14</sup> ions/cm<sup>2</sup>



図 1: 高エネルギーイオン照射に伴うグラフ エンのラマンスペクトルの変化。(i) 照射前, (ii) SLG/Cu, 照射量: 10<sup>13</sup> ions/cm<sup>2</sup> (iii) SLG/Cu, 10<sup>14</sup> ions/cm<sup>2</sup> (iv) LiF/SLG/Cu, 10<sup>13</sup> ions/cm<sup>2</sup> (v) LiF/SLG/Cu, 10<sup>14</sup> ions/cm<sup>2</sup>。

の場合で LiF/SLG/Cu が 5 nm, SLG/Cu が 10 nm である ことが分かった。これらの値は 4% および 1% の欠陥密 度に相当する。

そこで欠陥の生成が顕著であった LiF/SLG/Cu につい てイオン照射後の SLG の電子状態を C K 吸収端 NEXAFS によって調べた (図 2)。イオン未照射のグラフ エンと比較して P1 ピークが減少するとともに, **σ\***(C-F) 由来の P2 構造[3]が観察された。さらに X 線が斜入射の 際の P2 構造の強度は垂直入射に比べて明らかに大きい ことから, C-F 結合はグラフェンシートの面に対して垂 直方向に配向していることが分かった。以上の NEXAFS の測定結果から, LiF/SLG/Cu への高エネルギーイオン 照射によって F 原子がグラフェンシート上に化学結合を 形成することが明らかになった。



図 2: LiF/SLG/Cu へのイオン照射 (10<sup>14</sup> ions/cm<sup>2</sup>) 後の C K 吸収端 NEXAFS スペク トル。π\*(C=C) (P1), σ\*(C-F) (P2) およ びσ\*(C-C)(P3) 由来のピークが観察される。

このようなヘテロ原子ドーピングは、電子励起相互作

用が支配的なエネルギー領域(数 MeV)のイオンビームをグラフェンに照射することによって,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(LiF 層中の F 原子)との間で結 合の組換えが生じることに起因していると考えられる。

参考文献

- [1] H. Ohldag, et al., Phys. Rev. Lett. 98, 187204 (2007).
- [2] Carbon Based Magnetism, T. Makarova and F. Palacio (Elsevier B.V, Amsterdam, 2006).
- [3] K.-J. Jeon, et al., ACS Nano 5, 1042 (2011).

### 成果報告

- 1) S. Entani, M. Mizuguchi, H. Watanabe, L. Yu. Antipina, P. B. Sorokin, P. V. Avramov, H. Naramoto, S. Sakai, "Fluorination control of single-layer graphene by high energy ion irradiation", Carbon *submitted*.
- 2) 圓谷志郎,水口将輝,渡辺英雄,楢本洋,境誠司,「高エネルギーイオン照射によるグラフェンへの ヘテロ原子ドーピング」第63回応用物理学会春季学術講演会,20p-S011-14.

タングステンの熱負荷特性に及ぼす再結晶の影響

茨城大学工学部 車田 亮

【目的】プラズマ閉じ込め装置のダイバータ板の表面材料としてスパッタリング特性や熱特性が良好な タングステン(W)が使用されている。しかし、Wは低温脆化、再結晶脆化、照射性化の問題がある。特 に、高熱負荷を受けるタイバータ板では、再結晶脆化が問題である。このため、再結晶温度が高く、さ らに、高温強度が高い K や La ドープW合金が試作されている。しかし、これらのW合金は、ディスラ プションや ELMs 時のパルス熱負荷より突沸等が発生し損耗量が大きいことが明らかとなっている。こ れに対して、研究代表者らは、熱間等方圧加圧法(HIP)により製作されたW(HIP-W)について研究を進め、 最も普及している粉末焼結Wとは組織が異なるためその特性も大きく異なり、たとえば、溶融接合用の 電極に使用した場合特性が良好なことを明らかにしてきた。また、粉末焼結Wのような圧延組織を持つ Wとは異なり残留歪みも小さいと考えられることから再結晶した際の結晶粒の粗大化の影響も少ない ことが予想される。本研究では、粉末焼結 W と共に、HIP-Wの再結晶挙動やこれらが熱負荷特性に及ぼ す影響を明らかにし、ダイバータ板の表面材料としての性能を評価することを目的とする。

【実験及び解析】粉末焼結Wや HIP-W等のW材について、電子ビーム照射による熱負荷実験を行い、再結晶挙動や熱応力負荷による材料挙動を明らかにする。特に、再結晶温度、再結晶による粒の粗大化、 再結晶前後の熱応力負荷による材料損傷ついて着目し実験を行い、再結晶化の影響を評価する。さらに、 有限要素法を用いて熱応力解析を行い、熱応力を定量的に評価し、熱応力と材料挙動との関係、及び再 結晶化の影響を定量的に明らかにする。この熱負荷実験に加え、高温引張試験を行い、高温時の応力負 荷における材料挙動、応力歪み曲線、強度特性を明らかにする。これらの結果から基本的な強度特性を 求め、第一壁・ダイバータの設計に有用なデータを取得する。特に、Wでは、応力負荷特性、強度特性 に関して、組織、製造方法依存性が大きく、実際使用するWについて、これらを評価することが重要で ある。

【結果】 図1には、粉末焼結w、及び粉末焼結wを 1800℃、1 時間の真空熱処理を行った再結晶w に ついて高温引張試験を行った結果を示した。引張試験の試験片は、Wの板材から、圧延面に平行な面か ら、圧延方向に平行な微小試験片(L-R type)と圧延方向に垂直な微小試験片(T-R type)を切り出した。 再結晶 Wの場合は、未処理材と比較し、引張強さは約半分程度に、また、降伏応力は 30から 40%程度 の低下している。一方、伸びは5倍程度増加していることがわかる。これは、再結晶化されることによ り結晶粒が粗大化すると共に転位等の欠陥が回復することにより軟化したものと考えられる。また、再 結晶化に伴い結晶粒界における脆化が起こるが、これによる粒界における脆性破壊が発生するよりも粒 内での変形が優先されているものと考えられる。さらに、L-R と T-R typeの試験片ではほとんど差がな いことがわかる。図2には、試験温度を800℃から1600℃まで変化させた際の結果を示した。試験温度 が増加するにつれて、降伏応力は低下すると共に、試験温度が低い方が、一様伸びの割合が、局所伸び の割合よりより大きいことがわかる。図3、及び図4には、それぞれ、粉末焼結W、及び再結晶Wにつ いて歪速度を変化させた場合の結果を示した。粉末焼結 Wの場合は、どの場合も降伏応力に達した後、 局所伸びが起こり、その後、破断している。一方、再結晶 W では、歪速度が速い方が、降伏応力に達 した後の一様伸びの割合が大きく、その後最大応力に達し、局所伸びが起こり破断している。また、歪 速度が速い方が、試験温度が低温の場合の応力-歪み曲線の形と同形であることがわかる。図5には、粉 末焼結 W、及び再結晶Wの表面、及び破断後の断面観察結果を示した。粉末焼結 W では多数の小さな

222

くぼみ(ディンプル)と共に縞状の波面が見られる。一方、再結晶 W では、ディンプルが見られ、特 に大きな径のくぼみも観察された。

【まとめ】粉末焼結 W、及び再結晶Wでは、応力-歪み曲線、破面の形態が大きく異なることが分かった。熱負荷を受けた際の変形挙動についても、これに対応し異なることが予想される。熱負荷用の試料としては、粉末焼結 W、再結晶W、及び HIP-Wの 10mm x 10mm x 1mm の試料に対して、特に、繰り返し熱負荷実験を進め、熱疲労特性に関する実験を進めている。



図1 粉末焼結W、及び再結晶Wの応力-歪曲線



図2 再結晶 W の応力-歪曲線の試験温度依存性



図3粉末焼結Wの応力-歪曲線の歪速度依存性



図4 再結晶 W の応力-歪曲線の歪速度依存性



図 5 粉末焼結 W、及び再結晶 W の表面、及び破面観 察(SEM 像)、試験温度:800℃、歪み速度 2×10<sup>-4</sup>s<sup>-1</sup>

# 共同利用研究集会

# 第15回トロイダルプラズマ統合コード研究会

# **15th 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15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14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: 2017 年 11 月 29 日 (水) - 30 日 (木) 開催場所: 九州大学応用力学研究所 2 階大会議室 講演数: 18 件、参加者数: 26 名

### 3. 研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの 進展について議論するため研究集会を2日間にわたって開催した。外国(韓国)からの参加 者も含めて講演18件の申し込みが集まった。件数は例年に比べると少なかった。これは他 の学会も同様な時期に集中しており参加を見合わせた研究者がいたことが影響している。 内容別に分類するとトーラス統合シミュレーション3件、加熱・粒子供給1件、運動論的 効果2件、乱流5件、輸送3件、SOL/ダイバータ3件、材料1件であった。便宜上分類を したが複数の分野にまたがる内容も多い。研究の広がりは例年と変わらず、さらにどれも 質の高い研究成果報告であった。今回のプログラムの特徴は初日午前中に大型へリカル装 置LHDに関するシミュレーションのセッションを構成することができたことである。現在 日本で稼働している最大の核融合実験装置で起きる具体的な事象をシミュレーション対象 として研究が着実に進展している。また、乱流、運動論効果、SOL・ダイバータ、材料特 性などに関して、プラズマ複合現象のシミュレーションの基盤となる基礎研究の発表が数 多くあり、幅広い研究内容を含む研究会とすることができた。このように毎年新たな話題 も随所に加えながら研究会の数を重ねることができている。さらに本年もポスドク・学生 による講演が4件あり、当該分野の若手の底上げができていることも印象的である。以下 に講演内容を抜粋して説明する。

本年度の研究会最初のセッションテーマは LHD に対する統合シミュレーション研究で ある。登田はジャイロ運動論コード GKV を用いて LHD におけるイオンおよび電子熱輸送 をモデル化している。電磁的コードでイオン温度勾配不安定性の評価を行い、乱流強度と 帯状流強度について熱輸送係数の依存性を求めた。山口は複数のイオン熱輸送係数モデル (ジャイロボームVT モデル、簡約ジャイロ運動論モデル、実験データベースモデル)を用い て、LHD 放電でのイオン温度分布を計算し比較した。村上は 2017 年に開始された LHD 重 水素実験の解析に統合シミュレーションを適用した。核融合反応に伴う中性子発生と三重 水素を GNET コードおよび TASK3D コードで計算し、実験との良い一致を見た。前田は TASK3D コードを用いて LHD 重水素実験における熱輸送シミュレーションを行った。イオ ンの有効電荷や有効質量に対する依存性に着目し、導出した乱流モデルを適応した結果の 比較を行った。山本は GNET コードを用いて ECH 加熱のトロイダル流生成効果について 解析した。

続いて行われたのが周辺プラズマのセッションである。滝塚は PARASOL コードを用いた ELM 現象のシミュレーションについて報告した。イオンVB ドリフトが ELM による熱負荷の内外非対称性に寄与することを PIC シミュレーションで明らかにした。東郷は SOL 領域における磁気ミラー効果について、Braginskii モデルと非等方イオン圧力モデルの比較を通じて評価した。伊庭野は固体壁の蒸気シールドについて PIC シミュレーションの結果を報告した。プラズマによる熱が固体壁表面温度を決め、温度に応じて物質が蒸発する。そしてプラズマと蒸気は相互作用し、イオン化、再結合、放射などの原子・分子過程を考慮することで蒸気シールド状態が決まる。シミュレーション結果とアルミニウムをコーティングしたタングステンへのプラズマガン入射実験との比較がなされ、エネルギー散逸について良い一致を見た。イオンー中性粒子衝突とともに放射冷却が重要な過程であることが分かった。

その他にも多くの課題について、様々な観点からの研究が報告された。大澤はタングス テン中の二原子空孔の安定性に関して報告した。第一原理計算により、水素によって空孔 同士の結合が促進されることが分かった。本多は遺伝的アルゴリズムをプラズマモデリン グに応用した。磁気軸やX点の探査、分布形状フィッティング、熱輸送方程式の解の探査 の例を挙げその有効性を示した。Hahm は MHD 安定化のために加えられる摂動磁場が帯状 流に与える位相混合の効果についての理論解析を紹介した。衝突減衰と同等の影響を持つ ことが分かった。小菅は磁力線平行方向流れシアに伴うドリフト波のパターン選択につい ての理論解析を行った。流れシアをパラメータとして、帯状流とストリーマの選択性を評 価し、ストリーマ形成のパラメータ窓が存在することを指摘した。佐々木は高エネルギー 粒子駆動 GAM が輸送障壁を越えて、揺動を輸送するダイナミクスを提示した。大野はジ ャイロ流体モデルを用いて円筒プラズマにおけるグローバルモード構造を計算し、イオン 温度勾配不安定性の不安定性閾値を評価した。福山は統合コードのデータ交換インターフ ェイスに関して、TASK コードにおける BPSD インターフェイス開発の進展を報告した。 各種コード間の共通インターフェイスとして国際的に開発が進められている IMAS につい ても紹介した。糟谷は TASK コードを用いたトカマクプラズマにおける高 Z 不純物輸送解 析コード開発の現状と基礎実験装置における中性粒子分布に起因するポテンシャル分布形 成機構について紹介した。沼波は複数種粒子を含むプラズマ輸送に関する研究成果につい て報告した。ITER における乱流粒子フラックスの重水素三重水素比依存性、LHD におけ る乱流および新古典不純物粒子フラックス等の様々な解析から、輸送現象の理解を進めた。 矢木はジャイロ流体モデルを用いた乱流シミュレーションから内部輸送障壁の形成機構に ついて報告した。イオン温度分布の準線形的な変形効果の導入が、輸送障壁形成を妨げる 方向に働くことを示した。

来年度も第16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、プロジェクト内での共同研究を活性化すること、来年度の研究会形式や日程等を議 論して、閉会した。

## 4. 研究集会プログラム

(18 min talk+7 min discuss or (15 or 10) min talk+5min discuss)

# 11月29日(水)

9:30 -	9:40	はじめに	村上	(京大)
9:40 -	9:45	事務連絡	糟谷	(九大)
(座長	: 糟谷)			

9:45-10:10 講演 1-1 登田 (核融合研)

Reduced models for electron and ion heat diffusivities by gyro-kinetic analysis with kinetic electrons in helical plasmas

10:10-10:35 講演 1-2 山口 (核融合研)

Integrated transport simulation of LHD plasmas with transport models based on GK simulations and experiment database

10:35 - 10:55 休憩

10:55-11:20 講演 1-3 村上 (京大)

Simulation study of fusion reaction rate and comparison with experimental results in LHD

11:20-11:40 講演 1-4 前田 (京大)

Integrated transport simulation of LHD plasma by TASK3D

11:40-11:55 講演 1-5 山本 (京大)

Effects of electron cyclotron heating on the toroidal flow in helical plasmas

- 11:55-13:00 昼休み
- (座長:本多)
- 13:00-13:25 講演 2-1 滝塚 (阪大)

PARASOL simulation of ELM heat flux in tokamak SOL-divertor plasma

13:25 - 13:50講演 2-2東郷 (筑波大)、代理発表 滝塚Effect of parallel viscosity approximation in inhomogeneous magnetic fields on

SOL-divertor plasma profiles 13:50 - 14:15講演 2-3 伊庭野(阪大) Simulation of vapor shielding at a solid wall by a weighted PIC method 講演 2-4 大澤 (九大) 14:15 - 14:40Simulation for stability of di-vacancy in tungsten 14:40 - 15:00休憩 (座長:福山) 15:00 - 15:25本多 (量研機構) 講演 2-5 Application of genetic algorithms to modelings of plasma physics 15:25 - 15:50 講演 2-6 Hahm (Seoul Univ.) Effects of 3D compressional magnetic fields on zonal flows in tokamak plasmas 15:50 - 16:15講演 2-7 小菅 (九大) Pattern selection in drift wave turbulence with parallel flows 佐々木 (九大) 16:15 - 16:40講演 2-8 Suppression and enhancement of turbulence by geodesic acoustic modes 講演 2-9 大野 (九大) 16:40 - 16:55Analysis of parameter dependency of ion-temperature-gradient instability using a gyro-fluid model in linear devices 16:55 散会 18:30 - 21:30懇親会 (博多前炉ばた 一承にて) 11月30日(木) 9:30 - 9:35 事務連絡 (座長:村上) 9:35 - 10:00講演 3-1 福山 (京大) Progress in development of module interface of integrated code 10:00 - 10:25講演 3-2 糟谷 (九大) On effects of impurity and neutral in magnetically confined plasmas 10:25 - 10:45休憩 10:45 - 11:10講演 3-3 沼波 (核融合研) Simulation studies on transport of multi-species plasmas including impurity ion 講演 3-4 矢木 (量研機構) 11:10 - 11:35Simulation study on internal transport barrier formation using gyro fluid model (II) 11:35 - 11:50 まとめと議論 糟谷 (九大) Summary and discussion 11:50 - 13:00 昼休み 核融合エネルギーフォーラムサブクラスター会合 13:00 - 17:00

17:00 散会

# 5. 参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属
林伸彦	量研機構	Taik Soo Hahm	SNU
本多充	量研機構	藤田隆明	名古屋大
矢木雅敏	量研機構	東郷訓	筑波大
登田慎一郎	核融合研	大澤一人	九大応力研
沼波政倫	核融合研	糟谷直宏	九大応力研
山口裕之	核融合研	小菅佑輔	九大応力研
横山雅之	核融合研	佐々木真	九大応力研
伊庭野健造	大阪大	大野友嗣	九大総理工
滝塚知典	大阪大	金史良	九大総理工
福山淳	京大工	河内裕一	九大総理工
村上定義	京大工	岩﨑悠也	九大総理工
前田渉吾	京大工	小島信一郎	九大総理工
山本泰弘	京大工	Minoru Masuda	Centap Ltd.

# 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、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、応用力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。今回は更に 応用力学研究所にとって重要なテーマであるデータ駆動サイエンスのプラズマ研究への導 入、海洋とプラズマの分野融合についても議論した。

研究集会の開催

第一回

開催日時: 2018.1.30-2.1

開催場所:九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長: 稲垣 滋

第二回

開催日時:2018.3.5-9

開催場所:九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長: 稲垣 滋

第三回

開催日時:2018.3.14-16

開催場所:九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長: 稲垣 滋

予算の執行

KAIST からの1名(Y.-C. Ghim),中国西南物理研究所(SWIP)からの2名(D. Jiaqi, Z. Kaijun)、 Oxford 大学からの1名(J. Mak)の招聘旅費に執行した。

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。

研究集会のまとめ

1. データ駆動プラズマ科学の構築

近年、データサイエンスの手法が様々な分野で取り入れられ大きな成果を上げている。こ のため本会議ではデータサイエンスの基盤となっている情報学で重要なベイズ統計の理解 を深めるとともに、プラズマ研究におけるビッグデータ解析や機械学習の適用について議 論を行った。本会議では以下の発表があった。

- Bayesian based analysis and Physics based interpretation of experimental data
- Density and temperature measurements of the negative ions with an experimental evidence of the Boltzmann negative ions in low temperature electronegative plasmas

2. 海洋及びプラズマにおける波・渦・流れ

応用力学研究所では流体を共通キーワードとして、海洋・大気及び電磁流体における波・ 渦・流れの研究が行われている。本会議では様々な流体におけるその力学の異同を明確化 し、異分野融合による新たな学術テーマを見出す事を目的とする。本会議では以下のよう な発表が予定されている。

- Shear instabilities in incompressible magnetohydro dynamics
- Eddy saturation from a geometrically informed, energetically constrained mesoscale eddy parameterisation

3. 日中データ解析ワークショップ

第7回のワークショップを開催する。今回はIAEA国際会議で発表予定のテーマについて議論する。またSWIPから京都大学滞在中のZang氏を招き、

- Study of a low-frequency mode in Heliotron J と題した講演も行った。

## 小形風力発電の出力変動の解析

東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科 近藤 潤次

1. 序論

小形風力発電は、住宅用太陽光発電に比べて出力変動が激しいとさ れ、それに起因する配電系統の電圧変動や電圧フリッカの発生に関する 懸念が指摘されている<sup>[1,2]</sup>。しかし、その変動の激しさについて詳細に 分析した結果は見当たらない。そこで本稿では、5kW級小形風力発電シ ステムの発電出力を10ヶ月以上にわたって計測したデータを用いて、 その出力変動特性を分析した。また、同規模の住宅用太陽光発電システ ムの出力変動特性と比較した。

#### 2. 計測した小形風力発電システムの概要

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委 託業務「小形風力発電部品標準化」において,秋田県男鹿市の日本海に 面した丘に設置されている,水平軸プロペラ式 4.5kW 機(Zephyr9000) の PCS 周りの運転データを 2016年3月から 2017年1月まで計測した <sup>[3]</sup>。この小形風力発電システムの仕様を表1に示す。本システムは,風 車からの交流出力を整流し直流にしてパワーコンディショナ(PCS)へ入 力し,PCS が商用周波数の単相交流 200 Vに変換して系統連系してい る。過回転はピッチ制御と電気式ブレーキで抑制する。PCS 入力側の直 流電圧,電流と,出力側の交流電圧,電流,有効・無効電力,および風 速・風向を計測した。

計測により得られた,月平均風速と設備利用率(最大出力を5.0 kW として計算)を図1に示す。図1より,平均風速と設備利用率に強い相 関があることが分かる。また,季節風の影響で冬季の風速が高い傾向が 現れている。2016年12月においては,月平均風速4.86 m/s,月間設備 利用率22.7%を記録した。ただし,現地には2基の小形風車が設置され ているが,それらの後流の影響で,風向が130度および215度付近の時 (0度が北,90度が東)の風速計測値が実際の値より低くなっているこ とが分かっている。

#### 3. 比較対象の太陽光発電システム

5 章に後述する比較のため、5kW 級太陽光発電の出力変動を分析した。使用したデータは、新エネルギー・産業技術総合開発機構が実施した「集中連系型太陽光発電システム実証研究」で取得されたものである。553 軒の一般住宅における PV システムの PCS 入力電力と出力電力と消費電力の1 秒毎時系列データが公開されている。このうち、定格出力が 5kW と推定される太陽光発電システム No. 177 において 2006 年 8 月1日から 2007 年 7 月 31 日までの1 年間の出力電力を分析した。

2 章で述べた小形風力発電システムとこの PV システムの,出力電力 1 分平均値を用いて描いた持続曲線を図 2 に示す。 図 2 では横軸のT<sub>total</sub>をそれぞれの計測期間内の有効データ取得時間とし,縦軸の最大出力電力P<sub>acrate</sub>を小形風力発電も太陽 光発電も共に 5.0 kW とした。設備利用率は,小形風力発電が 12.9%(平均風速 3.71 m/s),太陽光発電が 14.3%となった。 持続曲線の形状は若干異なるが,特に小形風力発電の方は好風況が期待できる 1 月下旬から 2 月のデータが抜けていること を考えると,発電電力量がほぼ同程度と言える。

#### 4.1 秒間での出力変動

小形風力発電の計測のサンプリング周期を当初は1秒としていたが、急変現象を充分に捉えられないとの判断より、2016

表1 計測した小形風力発電システムの仕様

基準出力 (風速11m/s時)	4.5 kW
定格出力 (連続運転可能最大出力)	4.9 kW
ロータ直径	5.5 m
ブレード数	3 枚
カットイン風速	3.5 m/s
最大出力回転	277 rpm







図2 小形風力発電と太陽光発電の持続曲線

年8月から0.1秒に変更した。そこでまず、1秒間での発電出力 変動を分析した。まず,8月以降の計測データを1秒毎の10デ ータに分割する。そして、それぞれのΔt = 1秒間の 10 データの 中で,発電出力最大値をPmax,発電出力最小値をPminとし,1秒 間での発電出力変化幅 $\Delta P_{1s} \equiv P_{max} - P_{min}$ を, 2016 年 8 月以降の 全計測期間の有効データである約1.4×107秒について求めた。そ の結果, 93%以上の時間でΔP<sub>1s</sub> < 0.25 kW, 99.7%以上の時間で  $\Delta P_{1s} < 1 \text{ kW}$  であった。ただし、稀ではあるものの $\Delta P_{1s} \ge 4$ kW, すなわち定格出力の80%以上の大きな変動が51回生じた。 ΔP<sub>1s</sub> = 5.3 kWの最も大きな変動が生じた 2017 年 1 月 11 日 2:59 の前後1分間の各計測値の時間変化を図3に示す。19m/sの突風 により風車への機械的入力パワーが PCS で処理できるパワーを 超えたため、PCS は発電出力を絞った(瞬時カットアウト)。こ れにより一時的に回転数が上昇し、PCS入力直流電圧が400Vを 超えた。ピッチ制御か電気式ブレーキの作用または風速が落ち着 いたため、PCSは1秒で発電出力を回復した。 $\Delta P_{1s} \ge 4 \text{ kW}$ とな った全 51 回のうち 49 回で PCS 入力直流電圧が 400 V 以上に急 増しており、同様の動作であったと考えられる。

ただし、必ずしも突風時に発電出力の急変が生じるわけではな く、例えば文献[4]の図 5.4.5 に示した 2016 年 8 月 30 日におけ る 25 m/s の突風時は PCS 入力直流電圧の上昇は見られず、発電 出力も安定に推移した。瞬時カットアウトは風速の閾値のみで生 じるのではなく、直前の運転状態や突風の持続時間など様々な条 件によって生じる。

#### 5. 出力電力変動の持続曲線

Δtが 10 秒と 10 分の場合における,小形風力発電システムと太陽光発電システム#177 の発電出力変化幅(それぞれ $\Delta P_{10s}$ と  $\Delta P_{10m}$ )に関する持続曲線を図 4 に示す。図 4 より,まず太陽光発電システムに比べて小形風力発電の方が圧倒的に出力変動が大きいことが分かる。図 4(b)より,小形風力発電では 5%程度の確率で,10 分間で発電出力が 0 から最大出力電力 $P_{acrate}$ まで変化した。また,図 4 の(a)と(b)を比べると,太陽光発電システムの  $\Delta P_{10s}$ の持続曲線と小形風力発電システムの $\Delta P_{10m}$ の持続曲線が似ている。すなわち,太陽光発電システム 1 台での 10 分間での出力電力変動と,小形風力発電1 基での 10 秒間での出力電力変動が,ほぼ同程度であると言える。

#### 参考文献

- [1] 松田勝弘・和田勝・古川俊行・渡辺雅治・高橋玲児:「小型風力発電の系統影響評価のための計測結果について」,平成19年度電気関係 学会東北支部連合大会,2B22, p.82 (2007)
- [2] 柏谷健太・近藤潤次:「小形風力発電による電圧フリッカの分析」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会,1, pp. 1-1-1-7 (2017.9)
- [3] 近藤潤次,岡本悠生,大塚修司,Nguyen Duc Tuyen:「実運用下の小 形風車の発電出力変動計測」,第38回風力エネルギー利用シンポジウム,A21,pp.231-234 (2016.12)
- [4] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構:「風力発電 等技術研究開発/風力発電高度実用化研究開発/風車部品高度実用化 開発(小形風力発電部品標準化)」,平成 26 年度~平成 28 年度成果 報告書, p. 142 (2017.2)



図3 小形風力発電のΔP1s最大時の各計測値の時間変化





### 三角翼バタフライ風車の開発研究および流体構造連成解析

鳥取大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻 原 豊

### 1. はじめに

昨年度に引き続いて、小形風力発電の低コスト化を目標に、過回転抑制機構(OCS: Over-speed Control System)を 備えた直径 7m のバタフライ風車(垂直軸風車)の開発研究を行った.本年度は本風車の特徴である、遠心力の 作用で翼を傾斜(ツイスト)させて空力ブレーキとして作用させる過回転抑制機構における問題(急激なツイス ト動作)の改善と原因の調査に主として力を注いだ.

## 2. 方法

図1は第2回目の強制回転実験(2017.7.27 実施)の様子である. 平均風速約1m/sの微風状態で、3.7 kWの 誘導モータでロータを駆動して回転数を増加し、最大回転数約87 rpm において翼が急激に30°まで傾斜した状態を示している. 図2はロータ中央に設置した過回転抑制機構の内部写真であり、図3は機構ユニットの模式図 である. ブレード軸の両側に突き出たピンが、遠心力の増加に伴ってガイド溝(直線 + 螺旋)に沿って移動す るが、そのガイド溝の螺旋部の傾斜が大きいことと、翼が傾斜した際にブレード軸回りのツイストモーメントの 働きで、遠心力のみを考慮した予測以上の力が働き、急激なツイスト動作になったことが疑われた. そのため、 ガイド溝の形状の変更を重ねて実験を繰り返すことと、強制回転実験の条件における数値流体力学解析(CFD) および翼素運動量理論(BEM)に基づく計算によって、発生するツイストモーメントの予測を行った.





(a) 低速回転状態(b) 高速回転状態図1 バタフライ風車の試作機



図2 過回転抑制機構



図3機構ユニットの模式図

#### 3. 主な結果と考察

図4は1翼のみを対象として CFD 解析した結果である.計算条件は第3回目の強制回転実験(2017.8.31 実施) にほぼ合わせてあり、風速1m/s、ツイスト角10°、回転数は79 rpm である.翼の上下の曲線翼部から放出され る渦の強さに不均衡がみられることから、上部を回転方向に倒すツイストモーメントが作用することが推測され る.図5は1翼ロータについての CFD 解析から求められたツイストモーメントのアジマス依存を、BEM で算 出された値と比較している.なお、BEM では1翼ロータに加えて5翼ロータとしての予測も行い、図5 にその 結果を示してある. CFD と BEM の1翼ロータのツイストモーメントの予測値に多少の傾向の差はあるが、翼の 1回転における平均値ではほぼ等しい値である.また、BEM による1翼ロータと5 翼ロータにおけるツイスト モーメントの予測には、ほとんど差は見られなかった.なお、重要なこととしては、CFD および BEM のいずれ の予測も、強制回転実験から推測される大きな半径方向力(約 5000 N)を説明し得る大きなツイストモーメントを 発生しない(オーダーが2桁小さい)ということである.現時点までの解析では、摩擦力の影響や翼の変形は考 慮できていないため、それらが要因となっている可能性が示唆される.

原因は特定できていないが、第3回目の強制回転実験結果から、ツイスト角に伴う半径方向力(ツイスト力と 本研究では呼ぶ)が導出できたため、これを現象論的に考慮して、回転数増加に伴うツイスト角の変化の予測を 行い実測値と比較した. その結果を示した図6から明白なように、両者は良く一致しており、ガイド溝の設計に



### おいて有用であると考えられる.

ガイド溝の螺旋部の傾斜の改善は、最終的にはバネを予め 10 mm 縮めておく予圧方式をとることによって、 傾斜角を 46.7°程度まで緩やかにすることが出来た.第4回目となる最終の強制回転実験(2017.12.15 実施)では、 最大回転数は 100 rpm を越えることを確認し、今後のさらなる改善で、最大発電電力 3 kW 以上が実現できる目 処がついたと考えている. なお、発電実験については、現在、制御プログラムを徐々に修正・調整しながら実施 中である.

#### 【研究組織】

原 豊	代表者	鳥取大学大学院	准教授
田川公太朗	協力者	鳥取大学・農学部	准教授
住 隆博	協力者	佐賀大学大学院	准教授
秋元博路	協力者	大阪大学大学院	特任教授
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) 原 豊, 斎藤栄徳, 塩谷啓介, 塩崎明, 西小野寛明, 奥谷将裕, 三嶋一生, 川端俊亮, 吉田茂雄, バタフライ垂直 軸風車の過回転抑制機構, 日本風力エネルギー学会 論文集, Vol. 41, No.1 (通巻 121), pp. 9-16, 2017.05. [査読有].
- (2) Yutaka Hara, Kotaro Tagawa, Butterfly Wind Turbines with Mechanical Over-Speed Control System, The 1st International Symposium on Wind and Tidal Power (ISWTP2017), pp.1-8, 2017.5.28-30, Holiday Inn Montreal Centreville Downtown.
- (3) 原豊,奥谷将裕,田川公太朗,吉田茂雄,住隆博,三角翼バタフライ風車の構造と流体力の STAR-CCM+ による解析, (Numerical Analysis by STAR-CCM+ on Structure and Fluid Force of Triangular-Blade Butterfly Wind Turbine), STAR Japanese Conference 2017, Room D, 2017.7.6-7,横浜ロイヤルパークホテル.
- (4) Yutaka Hara, Masahiro Okutani, Kotaro Tagawa, Shigeo Yoshida, Takahiro Sumi, NUMERICAL SIMULATION ON FLUID FORCES AND STRUCTURE OF TRIANGULAR-BLADE BUTTERFLY WIND TURBINE, 6th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF), Abstract #:16, 2017.10.9-12, Tangeman University Center (University of Cincinnati).
- (5) 原 豊, 佐野貴聡, 瀧本翔太, 田川公太朗, 吉田茂雄, 過回転抑制機構を備えた三角翼バタフライ風車の強制 回転実験, 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 442-445, 2017.12.6-7, 科学技術館.
- (6) 原豊,奥谷将裕,田川公太朗,吉田茂雄,住隆博,三角翼バタフライ風車の構造と流体力および相互作用に 関する数値シミュレーション,第1回九州大学応用力学研究所特定共同研究 "再生可能エネルギーの大規模 導入技術に関する研究" 共同集会,2017.12.8,科学技術館



Over-speed Control System for Vertical Axis Butterfly Wind Turbine

塩崎 明\*\* 西小野 寛明\*5 豊\*1 斎藤 栄徳\*2 塩谷 啓介\*3 原 Yutaka HARA Shigenori SAITO Keisuke SHIOYA Akira SHIOZAKI Hiroaki NISHIONO 三嶋 一生\*7 奥谷 将裕\*6 川端 俊亮\*5 吉田 茂雄\*8 Masahiro OKUTANI Kaduki MISHIMA Toshiaki KAWABATA Shigeo YOSHIDA

<sup>\*1</sup> Associate Professor, Tottori Univ., Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering. 4-101 Koyamacho,

Tottorishi, Tottori, 680-8552, Japan. Fax:+81-857-31-5747, E-mail: hara@damp.tottori-u.ac.jp \*2 Director, Technology Division, Nikkeikin Aluminium Core Technology Co., Ltd., NYK Tennoz Building, No.2-20, 2-chome, Higashi-shinagawa, Shinagawaku, Tokyo, 140-0002, Japan

<sup>\*3</sup> Product Development Group, Technology Division, Nikkeikin Aluminium Core Technology Co., Ltd., Kogin Building, 4-1-1, Kouraibashi, Chuouku, Osakashi, 541-0043, Japan

<sup>\*4</sup> Manager of Basic Technology Section, R&D Laboratory, Sinfonia Technology Co., Ltd., 100 Takegahanacho, Iseshi, Mie, 516-8550, Japan

<sup>\*5</sup> R&D Laboratory, Sinfonia Technology Co., Ltd., 100 Takegahanacho, Iseshi, Mie, 516-8550, Japan <sup>\*6</sup> Graduate Student, Tottori Univ., Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, 4-101 Koyamacho, Tottorishi, Tottori, 680-8552, Japan

\*7 Undergraduate Student, Tottori Univ., Dept. of Applied Mathematics and Physics, 4-101 Koyamacho, Tottorishi, Tottori, 680-8552, Japan

\*8 Professor, Kyushu Univ., Research Institute for Applied Mechanics, 6-1 Kasugakoen, Kasugashi, Fukuoka, 816-8580, Japan

### Abstract

A new mechanical and passive over-speed control system (OCS) for vertical axis wind turbine (VAWT) has been proposed aiming at the safety improvement and the cost reduction. The OCS slants the blades to make them work as an air brake by using the centrifugal force when the rotor rotational speed increases. When the speed decreases, the system restores the blades to original state by the force of springs. The OCS has a function to synchronize the movements of blades each other. The performance of an aluminum circular-bladed butterfly wind turbine (ACBBWT), which is equipped with the OCS and whose rotor diameter is 3.16m, is predicted by the blade element momentum (BEM) theory and is compared with the experimental results under the condition of no load. The continuous twist action of the blades was observed in the experiments. As the results, the over-speed control under the high wind speed conditions was verified and the validity of theoretical prediction was shown.

キーワード:過回転抑制,同調機構,バタフライ風車,垂直軸風車,コスト低減 Key Words : Over-speed control, Synchronizing system, Butterfly wind turbine, Vertical axis wind turbine, Cost reduction

#### 1. 緒言

論

文

強風時に、小形風力発電機の過回転を抑制し回転速 度を一定に保つ機械式機構は、風車の安全性を高める

- 鳥取大学大学院工学研究科准教授(〒680-8552 鳥取市湖山町 \*1 南4-101) E-mail:hara@damp.tottori-u.ac.jp
- 日軽金アクト(株)取締役 技術開発統括室室長 \*2 (〒140-0002 東京都品川区東品川 2-2-20 天王洲郵船ビル)
- 日枢金アクト(株)技術開充統括室 製品開発グループ \*3 (〒541-0043 大阪市中央区高艇橋 4-1-1 興銀ビル)
- シンフォニアテクノロジー(株)開発本部研究部 基料技術グループ長 (〒516-8550 伊勢市竹ヶ鼻町100)
- シンフォニアテクノロジー(株)開発本部 研究部 \*5 (〒516-8550 伊勢市竹ヶ原町 100)
- 烏取大学大学院工学研究科大学院生 \*6
- 鳥取大学工学部学生 \*7
- 九州大学応用力学研究所教授 \*8
- (〒816-8580 福岡県存日市存日公園 6-1) (原稿受付:2016年10月19日)

Vol.41, No.1

だけでなく、作動風連城を広げ設備利用率を向上でき るため、発電単価減少にも役立つ重要な技術要素であ る.しかし,垂直軸風車の場合, 翼がアームなどで回 転軸に取り付けられる構造が多く,ピッチ制御を行う 上で困難な場合が多い.また、長所の1つでもある風 向依存性が無い特徴から,水平軸風車に比較して過回 転抑制機構を付加することは容易ではない. Noll ら<sup>の</sup> はカム機構によってピッチ制御を行うサイクロタービ ン(Cycloturbine)を開発している。山田ら<sup>(2)</sup>は四節リン ク機構を使ったピッチ制御により,過回転抑制動作を 実現する方法を提案している。野田ら<sup>33</sup>は翼に作用す る遠心力でピッチ角を変化させて過回転防止を行う方 法を開発している. 永田49は高速回転による遠心力の 作用で巡を傾斜させて回転数を抑制する方法を提案し

日本風力エネルギー学会 論文集

ている、上野<sup>60</sup>は高速回転時に翼に作用する周方向への転倒力で翼を傾斜させる機構を考案し、模型風車で 過回転抑制動作が可能であることを確認している。以 上のほかにも機械的な過回転抑制方法が提案されてい るが、従来方法の多くは機構が複雑で、ヒンジやバネ などの可動部が回転軸から離れた位置に存在し、場合 によっては、それら可動部が外部に露出して設置され ているため、耐久性や信頼性において実用レベルにあ るものは少ない。

本研究では、可動部が回転軸付近に集中して配置さ れメンテナンス上の利便性が高い、遠心力を利用した パッシブな垂直軸風車用の過回転抑制機構(Over-speed Control System : OCS)を提案する. 本機構を構成する主 要な可動部はロータ中央に設置されるハブの内部に格 納されるため、直接、雨や雪などに曝されないため、 従来方法に比べて高い耐久性が期待される。本研究の モチベーションは小形風車の普及のために低コスト化 を図ることであり、研究対象とした風車はアルミ押出 と曲げ加工によって低コスト化が可能なアルミ円形翼 バタフライ垂直軸風車(ACBBWT)回である。図1に対 象風車の概形を示す。本論文では試作した OCS をアル ミ円形翼バタフライ風車に装着し、実験によって過回 転抑制動作を確認する. 翼素運動量理論(BEM)に基づ き,提案するコンパクトな OCS の効果を予測し、実験 結果と比較することで予測の妥当性を検証する.

### 2. 実験風車と過回転抑制機構(OCS)

本研究で製作した OCS を備えた風車ロータの静止 状態の写真を図 2(a)に示す. ロータ直径 D は約 3.16 m であり,高さ II は約 1.1 m である. 翼弦長 e は 0.2285 m, 翼断面形状は NACA 0018 の4 枚翼ロータである. 住



Fig.1 Experimental wind turbine, which is named Aluminum Circular-blade Butterfly Wind Turbine (ACBBWT) and is equipped with an over-speed control system (OCS).

Journal of JWEA

様を表1に示す。本風車ロークの中央部には、図3に 示す OCS を取付けてある。本装置は 2011 年度に試作 した1号機可における問題点を改良した2号機である。 OCS の円形基盤(Base)直径は0.56 m であり、基盤上に 4つの翼が結合される OCS ユニットが4個設置され ている。基盤中央部には4本の水平リンクを結合する 同調機構がある。図4に1つのOCS ユニットの模式図 を示す、回転数の増加に伴い、遠心力によってブレー 下前かロータ半径方向外向きに力を受けて移動する. この時、フレード軸に固定されたピンがガイド溝(直線 部1螺旋部)に沿って移動する構造となっている。図5 にカイド溝の展開図を示す。座標xはブレード軸に平 行な半径方向を表し、座標上はガイド溝が形成されて いる円筒フレームの円周方向を示す。図5において、 toからたまでが直線部であり、点Pから点Qまでの線 分が螺旋部に相当する. 点C.を中心とする半径 aの円 弧部分は、直線部と螺旋部を滑らかに連結するための 接続部分を表す、このガイド溝に沿ってヒンが動くこ とによって、低回転数では翼は平行移動し、高回転数 では還はツイスト(傾斜)し、空力プレーキとして作用 して過回転を抑制する。図2(b)にツイスト状態にある



(a) No twist state



(b) Twist state
Fig. 2 Photographs of two states of the blades of ACBBWT equipped with an OCS.

#### Table 1 Specifications of ACBBWT.

Rotor radius, R	1.58 m	
Rotor height, H	1.1 m	
Chord length, c	0.2285 m	
Number of blade, B	4	
Blade section	NACA 0018	
Swept area, 4	3.23 m <sup>2</sup>	
Solidity, $\sigma(=Be/2\pi R)$	0,0917	
Material	Aluminium	
Weight of a blade	10.7 kg	



Fig. 3 Improved prototype of OCS.







Fig. 5 Schematic expansion plan of a guide groove.

風車ロータの写真を示す.回転数が減少する場合は, 圧縮バネの復元力で元のツイストの無い状態に戻る. 本研究で用いた圧縮バネの定数は k=445 N/mm である.

#### 3. 計測装置と計測方法

本研究ではシンフォニアテクノロジー(附伊勢製作所 の屋外設置の軸流送風桟<sup>(6)</sup> (吹出口直径:3 m)を使用し た. OCS を備えた風車ロータは、定格 1.32 kW の永久 磁石式多極発電機(図 7 参照)に結合し、送風桟吹出口 から約 9.85 m 下流に設置した。風車中心から上流 1D

Vol.41, No.1

(3 m)の位置に三杯式風速計,上流 2D (6 m)の位置に2 次元超音波風速計を設置して風速を計測したが,超音 波風速計が送風機に近く三杯式風速計よりも小さい風 速値を示したため,本研究では三杯式風速計の測定値 を風車上流風速 Fとして参照する.なお,過去に計測 された送風機下流 8.2 m の位置における平均風速の分 布を図6 に示す.計測が実施された 14 箇所の平均風速 の平均値は 12.2 m/s であり,中心から最大で約 1.3 m 離れた計測位置(円直径約 2.6 m)以内において,平 均風速の偏差が 25%以下の風速分布となっている.

#### 3.1発電負荷がある場合

4 章で詳しく述べるが,BEM に基づく理論予測の フィッティングバラメータを求めるため、最初に翼の ツイスト(傾斜)が無い状態の風車特性を計測する。一 定風速条件下において発電コントローラのゲインハラ メータ(Gain: G)を変化させて発電電力P。を記録して特 性カーブを求める<sup>(6)</sup>.ただし、高い風速状態で発電量 が 300 W 以上になる場合には、既報<sup>(6)</sup>と同様に正常な PWM 制御が不可能な状態になることが判明したため、 低い風速状態(9 m/s 以下)において計測を行った。

### 3.2 発電負荷が無い場合

高速回転状態になった場合の風車挙動を求めるため、 本研究では電気的制御が何らかの理由で不可能になっ た場合を想定し、図7に示すように発電機の出力端を 開放して無負荷状態(回転トルク: Q≒0)として、OCS による翼のツイスト動作の計測を行う.実験は送風機 の風速設定値を段階的に増加させ、風速下、回転数 N、 および翼のツイスト角度 η の計測を実施した。ツイス ト角度 η の計測は、図 8 に示すように、ロータに搭載 したデジタルカメラで1 枚の翼の動画を撮影し、その 画像から直接計測する方法 1 と、図 9 のように、同調





日本風力エネルギー学会 論文集

機構部を上から撮影した画像から1つの水平リンクの 位置を読み取り幾何学的に算出する方法2の2つの方 法を用いた。図 10 (は水平リンク(支点間距離: / = 65 mm)が作る中心角 ζ とブレード軸の半径方向変位 Δr (バネ変位と同等)の関係を示す模式図である。回転中 心 C と水平リンクの支点(回転中心から遠い方)との間 の距離x は余弦定理から次式(1)で求まる。

$$x = r\cos\xi + \sqrt{r^2\cos^2\xi + l^2 - r^2}$$
(1)

ここでrは同調用円盤上の水平リンクの支点と回転中 心 C との距離である。距離 x の初期値 x₀は 65 mm で あり、それらの差がバネ変位 Δx=x-x₀に相当する。

本試作機では、バネ変位 Δr が 11.5 mm を超えると、 OCS のビンがガイド溝の直線部と螺旋部の間の接続 部分(図5参照)に至り、ツイストが始まるように設計 されている。さらにバネ変位 Δr が 22.1 mm を超える とビンは螺旋部分に至って大きなツイスト角(6°以上) となる設計になっている(後述の図 12 参照)。

#### 4. 特性予測

本研究では、翼素運動量理論(BEM)に基づいて OCS を備えた風車の特性子測を行った。バタフライ風車は 二重翼構造であるため、流れ場モデルとして四重多流 管モデル(●MS)®を使用した。また、湾曲流線効果® に起因する迎角変化を考慮した. さらに、 翼がツイス トしている状態では翼傾斜で生じる受風面積の減少と 実効的ビッチ角 θ の効果"を計算に組み込んでいる。 平均風速が F=5.4 m/s の状態で Gain: G を変化させて 計測した風車の発電特性に BEM に基づく理論予測を フィッティングした結果を図 日 に示す. このフィッ ティングでは右下がりの曲線部分が妥当な一致を示す ように、BEM 予測に設定する上流風速 Paに因子を乗 じて調整している.本研究で求めたフィッティングパ ラメータ(因子)は、参考文献(8)で示した QMS 流れ場 モデルにおける上流風速の補正に加え、未知数である 発電機損失や本研究では理論的に考慮をしていない翼 端効果および流管の広がりなどの影響を含めた補正と なっている.特定の風速(本研究では 5.4 m/s) でフィッ ティングができたならば、それ以外の風速における翼 傾斜が無い状態の風車特性は、理論予測で使用してい る2次元翼空力データの信頼性の範囲と BEM 理論に 従う妥当性の範囲において、信頼性のある子測ができ ると期待される.図11の実験結果ではG=1.75におい て最大発電電力が得られており、本研究では、この状





Fig. 8 Measurement #1 of twist angle  $\eta$  by recording moving images of a blade.



Fig. 9 <sup>\*</sup> Measurement #2 of twist angle  $\eta$  by recording moving images of a horizontal link connected to the synchronizing disk.



Fig. 10 Schematic illustration showing the relation between the position of a horizontal link and the shift Av of a blade axis.

Journal of JWEA





態を通る回転数 N の 3 乗に比例する発電曲線(図 11 の 右上がりの破線)を理想発電機特性と仮定する. すなわ ち,以下の議論において,理想発電機を想定する際は, 発電コントローラのゲイン設定は G = 1.75 になってい ることを意味する. なお,図 11 に示す程度に実験デー タと理論予測のフィッティングができており,本研究 の主目的が OCS の動作確認であることから実験は妥 当であると言える.

1つのブレードに装着されるブレード軸(Blade axis, 図3または4参照)まで含めた各部品iの質量を $m_i$ とし, ロータの角速度 $\omega$ がゼロの時(この時 $\Delta x = 0$ )のロータ 回転中心から各部品iの重心までの距離を $x_i$ とする. 一定の角速度 $\omega$ でロータが回転している場合の遠心力  $F_c$ は式(2)で与えられる.

$$F_c = \sum m_i (x_i + \Delta x) \omega^2 \tag{2}$$

ここで Δx はバネ変位であり、一定回転数状態では、 式(2)の遠心力と圧縮バネの復元力 F<sub>x</sub>= kΔx の釣り合い から、式(3)を用いて Δx は計算される.ただし、空気 力の半径方向成分(平均値)は、風速 60 m/s でもバネの 復元力の1.2% 程度と予想されるため無視した.また、 空気力による数のツイストモーメントもツイスト角 10°において、遠心力(あるいはバネの復元力)の作 用に基づくモーメントの1.6% 程度であることが3次 元 CFD 解析<sup>(10)</sup>から予想されるので無視した.

$$\Delta x = \frac{\sum_{i} m_{i} x_{i} \omega^{2}}{k - \sum_{i} m_{i} \omega^{2}}$$
(3)

Vol.41, No.1

したがって回転数 N を指定すれば  $\Delta x$  が決まり,ガイ ド溝の形状から  $\eta$  が決まる.図 12 にバネ変位  $\Delta x$  とツ イスト角  $\eta$  の回転数依存性の予測を示す.BEM 予測の 入力条件として N と  $\eta$  を与え、同じ回転数 N における 理想発電機の出力 P<sub>e</sub>を与える風速 V を求めれば、翼が 傾斜している場合の特性カーブが予測できる.一例と して、N=250 rpm の回転数における動作点を通る特性 カーブの求め方を図 13 に例示する.この回転数におけ る理想発電機の発電出力は P<sub>e</sub>=913 W であり、ツイス ト角  $\eta$  は図 12 から 5.2°と決まる.このツイスト角状態 ( $\eta$  = 5.2°)で固定された仮想的な風車を考えると、その 特性は風速によって図 13 に示すように上下に変化す る.そこで BEM 予測計算における入力条件の N と  $\eta$ は固定とし、風速 V を少しずつ変化させて、動作点で ある出力 P<sub>e</sub>=913 W を与える風速を探索する.その結







Fig. 13 An example of finding the performance curve, or wind speed, which gives the operational point at N = 250 rpm  $(\eta = 5.2 \text{ deg})$  and  $P_c = 913$  W.

日本風力エネルギー学会 論文集

果として,図 13 では動作点を通る特性カーブを与える 風速F = 13.1 m/s を得ており、この風速で本試作機は 条件として与えた動作点を実現すると考える。

図 14 の実線はこのようにして求めた OCS が動作し た場合(ツイスト有り)の発電特性であり、点線は OCS が動作しない場合(ツイスト無し)の特性予測である。 図 14 には理想発電特性(G = 1.75)と、低い風速状態に おける実験値(Exp. A : OCS-off. Exp. B : OCS-on)もフ ロットしてある。これより発電負荷がある場合の実験 値は理想発電特性に一致していることが確認できる。 OCS を備えた本試作機は、風速 67.2 m/s において定格 発電電力 1320 W において動作点を持つことが予想さ れ、強風下においても OCS が正常に動作してツイスト 角が 16.1°まで大きくなれば 282 rpm を超えない予想と なっている。

無負荷状態における最大回転数を予測するため、図 14 と同様の手順によって、BEM 予測の入力条件とし てNとnを与え、同じ回転数Nにおいて出力が0、す なわちトルクが0になる風速ドを探し出して求めた無 負荷状態に相当する特性を図 15 に描いた。図 15 の縦 軸はトルク Q である。各風速の特性曲線と横軸の交点 が無負荷時に予想される回転速度を与える。無負荷の 場合,最大回転数となる動作点は図 15 の風速 21.4 m/s の特性が示す N = 285 rpm. n = 17.2°の状態近傍と推測 される. それは、これ以上の風速になった場合に、本 OCS が規定する N と η の関係(図 12)と∂Q/∂N < 0 を満 足する横軸との交点を与える風速は60 m/s以下では存 在しないためである。 例えば、風速が増して一時的に ツイスト角が 17.7° (286.5 rpm)、あるいは 17.9° (287 rpm)になったとしても、この状態の 40 m/s あるい は60 m/s の特性は図 15 に示すように、上記の最大回 転数となる動作点近傍で大きな負のトルク状態回転 抵抗が大)であり、風車には制動力が作用して上記の 最大動作点に直ぐに引き戻されると期待される.

#### 5. 無負荷実験の結果と考察

節3.2で説明した無負荷状態における方法」によっ て計測したツイスト角η、回転数N、および風速Fの 時系列データを図16に示す(無負荷実験1).図17は 無負荷実験1におけるツイスト角と回転数の関係を示 したグラフである.図17の実線で示した曲線は遠心力 とバネの復元力の釣り合いから算出した予測(図12参 照)である。図16より、無負荷実験1では風速は時折 12 m/s を超える状態があるが、ツイスト角は最大でも 3°(222.4 rpm、13.2 m/s)であった。比較的小さい値では あるが、連続したツイスト角変化が観測されており、

Journal of JWEA



Fig. 14 BEM-based predictions of the electric power generated by ACBBWT equipped with 1.32 kW-generator under the condition with or without OCS.



Fig. 15 BEM-based predictions for obtaining the maximum rotational speed of ACBBWT with OCS under the condition of no load.

OCS の基本動作が確認された。ただし図 17 からわか るように、予測では 185 rpm からツイストを開始する が実測値は 203.8 rpm からツイストが始まっており、 回転数増加に対してツイスト角の変化が遅れる傾向が 見られる。これは摩擦が要因と考えられる。一方で予 測以上にツイスト角が大きくなっている傾向も明瞭で ある。これは、後述する自在維手のバックラッシが原 因と推測される。

無負荷状態における方法 2 (無負荷実験 2) によって 得られた時系列データを図 18 に、ツイスト角と回転数 の関係を図 19 に示す。図 18 にはバネ変位 Δr の時間 変化も示した。図 18 に示されるように、0.1° 以上の 実質的なツイスト角の変化は 394 秒時点(183 rpm、8.5 m/s、Δr = 12.8 mm)から始まっている。図 19 を見る



Fig. 16 Time-series data of measurement #1 (no load).



Fig. 17 Twist angle vs rotational speed (measurement #1).

と, 最初に回転数が 180 rpm から 210 rpm まで徐々に 増加していく辺り(1=380~500 s)では、予測曲線にほぼ 沿ってツイスト角は変化している. しかし, 時刻 500 秒以降は急激にツイスト角が増加し,予測曲線から大 きく逸脱している.この原因としては、本試作機のス ペースの問題から同調機構部に用いたし字状の自在継 手のバックラッシが考えられる、水平リンクとブレー ド軸の間において理想的には鉛直状態となるべき自在 継手が多少傾斜する。予測は翼の1回転における平均 値を示すが、個々の翼は1回転の間に半径方向に力の 変動を受けるため、前述の自在継手の傾斜によって複 数週間にアンバランスな挙動を生み出したと推測され る(図 2(b)参照). スペースが確保できる場合には1字 状の自在継手を採用することでバックラッシを減少で き、実際の挙動と理論予測の差は小さくなると考えら れる. なお, 図 17 と図 19 を比べると明らかなよう



Fig. 18 Time-series data of measurement #2 (no load).



Fig. 19 Twist angle vs rotational speed (measurement #2).

に、方法2は水平リンクの動きから翼傾斜に換算した ため、直接計測の方法1に比べて、バックラッシの影 響がより大きく示されたと言える.

図20,21には無負荷実験1,2のそれぞれにおける回 転数Nと風速Vの関係を示す.計測データのプロット は2秒間隔である.また,BEM予測から求めたツイス トのある場合と無い場合の無負荷状態を実線および点 線の曲線で各図に示した.無負荷実験1,2のどちらに おいても,風速7m/s以上の場合に計測された回転数 は、ツイストのある場合のBEM予測曲線よりも小さ い値の範囲に分布している.これは前述の自在継手の バックラッシがあることで,予想よりも大きなツイス ト角となる翼が存在したことにより回転数が低くなっ たと推測される.しかし,無負荷状態で風速12m/s程 度の大きな風速状態になっても,回転数はツイストが 有る無負荷時の予測(実線)を超えていなく,図20に示

Vol.41, No.1

日本風力エネルギー学会 論文集



Fig. 20 Rotational speed vs wind speed (measurement #1).



Fig. 21 Rotational speed vs wind speed (measurement #2).

されるように、各風速で実現される回転数の最大値は 予測(実線)と定性的に一致する傾向を示していること から、本研究で行った BEM 予測は妥当であると言え る.また、もし発電機が断線等の故障により無負荷状 態になったとしても、過回転抑制機構が正常に動作す るならば、強風下において特定の回転数以下に抑制さ れることが示されている。

## 6. 結言

本研究では遠心力作用で翼をツイストナる機械式 の過回転抑制機構(OCS)をアルミ円形翼パタフライ風 車に取付けて実験を行い、OCSの動作によって翼の連 続的ツイスト動作が可能であること、および特定の値 以下に回転数が抑制されることを実証した、翼素運動 量理論(BEM)に基づく OCS 効果の予測と実験値との

Journal of JWEA

比較から理論予測の妥当性を示した。回転数変化に対 してツイスト角変化が遅れる傾向や複数翼間のアンバ ランスが観測されたが、同調機構部のリンク構造の変 更をすれば、改善すると期待される。

### 謝辞

本研究は、鳥取県環境学術研究等振興事業の一部と して、および九州大学応用力学研究所の共同利用研究 として実施された、ここに明記し、謝意を表する。

#### 参考文献

 Noll, R.B., Ham, N.D., Drees, H.M., Nichol, L.B., ASI/PINSON
 Kilowatt High Reliability Wind System Development, Phase 1 – Design and Analysis, *NREL Technical Report*, RFP-3046/2, 1982, p.3 – 30.

 Yamada, T., Kiwata, T., Kita, T., Hirai, M., Komatsu, N., Kono, T., Overspeed Control of a Variable-Pitch Vertical-Axis Wind Turbine by Means of Tail Vanes. *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 7, No. 1, 2012, pp.39-52.

新田. 長尾. 過回転抑制機構を備えた直線緊垂直軸風車の開発, 第31 回風力エネルギー利用シンボジウム, 2009, pp.364-367.

4) 永田、自己安定型垂直軸風車の提案および洋上風力発電 への応用、第32 回風カエネルギー利用シンボジウム、2010、 pp.263-266.

5) 上野, 自動折畳み式垂直軸風車の試作, 第36 回風力エネ ルギー利用シンボジウム, 2014, pp. 397-400.

6)原,塩崎,西小野,斎藤,塩谷,吉郷,高垣,アルミ円
形累ペタフライ風車の実証実験と性能子測,日本風クエネル
ギー学会論で募、Vol. 38, No. 1,通巻 109 号, 2014, pp. 16-21
7)原,斎藤,塩谷、塩崎、西小野、コンハクトな垂面軸風
車用過回転抑制機構の提案,*第 36 回風力エネルギー利用ジンボジウム*, 2014, pp. 389-392.

8) Hara, Y., Kawamura, T., Akimoto, H., Tanaka, K., Nakamura, T., Mizumukai, K., Predicting Double-Blade Vertical Axis Wind Turbine Performance by a Quadruple-Multiple Streamtube Model, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 7, No. 1, 2014, pp. 16-27.

9) Akimoto, H., Hara, Y., Kawamura, T., Nakamura, T. and Lee, Y.-S., A Conformal Mapping Technique to Correlate the Rotating Flow around a Wing Section of Vertical Axis Wind Turbine and an Equivalent Linear Flow around a Static Wing, *Environmental Research Letters*, Vol. 8, 2013, Paper No. 044040.

10) 奥谷、横山、原、住、吉田、円形室バタフライ風車の翼 傾斜時の3次元装値解析、 第37回風クエネルギー利用シン ボジウム 2015, pp. 339-342.

# NUMERICAL SIMULATION ON FLUID FORCES AND STRUCTURE OF TRIANGULAR-BLADE BUTTERFLY WIND TURBINE

\*<sup>1</sup>Yutaka Hara, \*<sup>1</sup>Masahiro Okutani, \*<sup>2</sup>Kotaro Tagawa, \*<sup>3</sup>Shigeo Yoshida and \*<sup>4</sup>Takahiro Sumi

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Tottori University Koyama-cho, Minami, 4-101, Tottori-shi, Tottori 680-8552, Japan hara@damp.tottori-u.ac.jp

 <sup>\*2</sup>Faculty of Agriculture, Tottori University Koyama-cho, Minami, 4-101, Tottori-shi, Tottori 680-8553, Japan
 <sup>\*3</sup>Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University Kasugakoen, 6-1, Kasuga-shi, Fukuoka, 816-8580, Japan
 <sup>\*4</sup>Graduate School of Science and Engineering, Saga University Honjo-machi 1, Saga-shi, Saga 840-8502, Japan

### ABSTRACT

By using the same software, the Computational Fluid Dynamics (CFD) and the Finite Element Analysis (FEA) of structure have been done separately for an one-blade rotor consisting of a triangular blade, which was one of the five blades of a vertical axis butterfly wind turbine (D = 7 m)equipped with a mechanical over-speed control system that utilizes centrifugal force. The torque and power coefficients of the one-blade rotor obtained by CFD were compared with the analytical results based on the Blade Element Momentum (BEM) theory and both results agreed qualitatively. However, there was rather large quantitative difference which might be attributed to coarse calculation mesh. The FEA results showed that the generated stress did not exceed the allowable stress less than the nominal maximum rotational speed except of the blade-root part, the computational model of which had different shape and structure from the practical one.

#### **1. INTRODUCTION**

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) has a possibility to reduce the cost of energy due to the simple rotor structure which is realized from its non-directionality. However, to promote the cost reduction of small VAWT, it is necessary to introduce a mechanical over-speed control system (OCS) like furling or governor [1], which has been utilized in commercial Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT). In the first-stage study about the aluminium circular-blade butterfly wind turbine (ACBBWT) [2] (3m dia.) that was equipped with an OCS utilizing centrifugal force acting on the blades, the availability of airbrake by inclining the blades has been shown experimentally [3]. As the second-stage study, a development project of the triangular-blade butterfly wind turbine (TBBWT) shown in Fig. 1 as a practical small wind turbine (7m dia.) is now in progress [4]. In addition to the OCS, the TBBWT features cost-effective transportability by



Phot

(a)

Photograph of experimental rotor









Fig. 2 Calculation model of a triangular blade (one-blade rotor)



Fig. 3 Computational regions

an elevator of blades and tripod legs in separated condition to the highest floor in the case of rooftop installation. Also countermeasure for rotor breakage using high-strength rope inserted in the blades is another feature. The rated power of the generator planned to be installed is 5 kW. However, according to the prediction, the electric generation will be kept in about 3.2 kW even under the condition of 12 m/s or more by the operation of the OCS. As part of the project, Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis of a triangular blade, which couples the Computational Fluid Dynamics (CFD) with the structure analysis based on the Finite Element Method (FEM), is in progress, in order to predict the performance and safety of the TBBWT. As the preliminary step, in this paper, CFD and FEA (Finite Element Analysis) are separately carried out for an oneblade rotor with a triangular blade to obtain the reference data which can be compared with the future FSI results.

Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2017 October 9-12, 2017, Cincinnati, Ohio USA

# 2. NUMERICAL SIMULATION

### 2.1 Object of computation

As shown in Fig. 1 (a), the experimental wind turbine rotor has 5 triangular blades. The rotor diameter is D = 7 m and the height is H = 2.7 m. The curvature radius of a curve part of the blade is 0.6 m. Therefore, the upright-straight part is 1.5 m length and the slant-straight part is 2.3 m length. In the present numerical simulation, the object of computation has been decided to an one-blade rotor with a triangular blade in order to reduce the calculation cost. Regarding the cross-section of the experimental blade, there is some difference between the straight part and the curve part. However, in this numerical simulation, the cross section of the numerical blade model is assumed to be identical at any part along the blade span. The assumed cross section of the blade model has an airfoil profile of NACA 0018 and the chord length of c = 0.242 m, which are the same as the straight part of the practical blade. In this study, the CFD and FEA computations are separately performed, that is, with no interaction condition. In the CFD, the inside of blade is not the object of computation; therefore, the inside structure of the blade is not considered. On the other hand, in FEA, the outside of blade is not the object of computation. The inside structure of the numerical blade model is almost the same as the straight part of the practical blade.

#### 2.2 Conditions of CFD

As the solver for CFD, STAR-CCM+ ver. 11.02 was used in this study. The CFD simulation was carried out based on three dimensional RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) equation, in which the unsteady incompressible viscous flow was assumed. In this study, the SST  $k-\omega$  as the turbulence model was adopted and the second order accuracy of time-marching was selected. The whole computational domain is the inside of the circular cylinder (static region 1), whose diameter is 48D and the length is 64D, as shown in Fig. 3. The center of the oneblade rotor is located at 24D from the inlet boundary. The rotor model is enclosed by the rotational region of a circular cylinder of 1.6D dia.  $\times$  1.2D height and the region is rotated by sliding mesh method. To adjust the mesh size of the wake of the rotor, the rotational region is enclosed by the static region 2, whose height is about 1.5D and the length is 5D (see Fig. 3). Also, the blade surface is enclosed by an elliptic region (major axis: 1.5c, minor axis: 1.0c) to adjust the mesh size.

Figure 4 shows the computational mesh on the equatorial plane. Non-structural polyhedral mesh was adopted for most of the computational region, except near the blade surface, where structural prism layer mesh was used. The number of prism layer is 15 (see Fig. 4(d)). The minimum distance of the closest grid to the blade surface is  $3.4 \times 10^{-6}$  m ( $y^+ \le 0.3$ ). The total number of computational cells in the whole region is about 12 million. The wind speed
Tuesday, October 10 3:30-4:00 PM TUC 400C

> Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2017 October 9-12, 2017, Cincinnati, Ohio USA

at the inlet boundary is set at a constant value of  $V_{\infty} = 8$  m/s. At the outlet boundary, a constant gauge pressure of P = 0 Pa is assumed. Slip condition is given at the side boundary of the static region 1. Computation was carried out at four rotational speed conditions of 65, 85, 110, and 120 rpm, which correspond to tip speed ratios of 3, 4, 5, and 5.5, respectively. Each computation is performed until the rotor reaches 6 revolutions, at which an averaged physical property almost converges. The torque and power



(a) Static region1 (whole region)



(b) Static region 2 and rotational region



(c) Around blade (elliptic region)



(d) Near blade surface





Fig. 5 Mesh of blade for FEA

coefficients are obtained by averaging the values during the last revolution. The Reynolds number based on the rotor diameter *D* and upstream uniform velocity  $V_{\infty}$  is  $Re = 3.7 \times 10^6$ . The Reynolds number based on the blade chord length and average tip speed  $R\omega$  is  $Re_b = 6.5 \times 10^5$ .

## 2.3 Conditions of FEA

The computational model of the FEA is a hollow triangular blade which consists of 2mm thickness and it has 3 webs perpendicular to the chord line (see Fig. 5). The second moment of area of the blade cross section based on the chord line is  $2.6 \times 10^5$  mm<sup>4</sup>. The rotor hub and the connection parts of the blade are not considered in this study. The material of the blade is aluminium alloy of 6N01-T5 (Young's modulus:  $E = 7.0 \times 10^4$  MPa) and the proof stress is 205 MPa. In this study, the allowable stress is assumed to be  $\sigma_a = 136$  MPa (205/1.5). The linear density of the computational blade model is about 3.0 kg/m. The practical blade is installed into a blade axis by bent fixtures. Each root portion (120 mm from the end surface) of the blade is sandwiched by two adaptors and is connected to a bent fixture. However, to make the present simulation model simple, the blade end surfaces are fully fixed. That is, each three component of both position and angle of each end surface is fixed. The solver (STAR-CCM+ ver. 11.02) for the FEA is the same as that used in CFD. The rotational speed condition for FEA is the same as that (65, 85, 110, and 120 rpm) of CFD. The computational grid is tetra mesh and the base size is 2mm. The total cell number is 9.2 million and the node number is 3 million. In this FEA, the centrifugal force and gravity acting on the blade are considered, but the aerodynamic force is not considered.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

## 3.1 Results of CFD

Tuesday, October 10 3:30-4:00 PM TUC 400C

Examples of the isosurface of Q-criterion value (5 s<sup>-2</sup>) are shown for three different conditions in Fig. 6. The main stream flows toward right side in each figure of Fig. 6. The one-blade rotor rotates counter-clockwise when it is seen from above. The triangular blade is located at azimuth of 150 degrees in the sixth rotation in each figure of Fig. 6. The vortex which corresponds to tip-vortex is generated from each curve part of the blade regardless of rotational speed. In the case of small tip speed ratio ( $\lambda = 3$ ), many discrete vortices are generated from the trailing edge of upright straight blade part. The blade is under the condition of stall at  $\lambda = 3$ . Although being not shown in Fig. 6, the blade, at downwind region, interacts with the tip-vortices shed at upwind region. However, note that in the practical rotor with



(a) N = 65 rpm ( $\lambda = 3$ )



(b) N = 85 rpm ( $\lambda = 4$ )



(c) N = 110 rpm ( $\lambda = 5$ )

Fig. 6 *Q*-criterion isosurface ( $Q = 5 \text{ s}^{-2}$ ,  $\psi = 150^{\circ}$ )

Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2017 October 9-12, 2017, Cincinnati, Ohio USA



Fig. 7 Comparison between CFD and BEM predictions about torque coefficient



Fig. 8 Comparison between CFD and BEM predictions about power coefficient

5 blades, a blade should interact with a lot of vortices that other blades generate.

Torque coefficient  $C_q$  simulated by CFD is plotted against the tip speed ratio of horizontal axis in Fig. 7. The curves in Fig. 7 are the torque characteristics of each rotor which has 1, 2, 3, 4, and 5 blades, respectively. The torque curves were calculated by an in-house code based on the BEM theory [5]-[6], in which the quadruple-multiple streamtube (QMS) [7] model was used as the flow field model. The aerodynamic data of the blade section (NACA 0018) presented by Sheldahl and Klimas [8], a portion of which Tuesday, October 10 3:30-4:00 PM TUC 400C

were replaced with the data presented by Kumar et al. [9] for low Reynolds numbers and small angle of attack, were used as the input data into the BEM code. The BEM code was tuned previously by fitting the prediction output to the experimental results of ACBBWT [3] (3m diameter). In Fig. 7, comparison of the CFD torque results and the BEM torque curve of one-blade rotor teaches us that both agree with each other qualitatively because they take the maximum of torque coefficient at  $\lambda = 4$ . However, regarding the concrete torque coefficient, there is rather difference between them. The maximum of the CFD result (0.045) is 35% smaller than that of the BEM result (0.069).

Similarly, comparison of CFD and BEM results regarding the power coefficient  $C_p$  is shown in Fig. 8. Regarding the one-blade rotor under the condition of  $\lambda = 5$ , the power coefficient obtained by BEM is 0.32 and, on the other hand,  $C_p$  predicted by CFD is 0.18. CFD result is 44% smaller than the BEM result.



Fig. 9 Blade deformation and von Mises stress distribution

Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2017 October 9-12, 2017, Cincinnati, Ohio USA



Fig. 10 Rotation-speed dependence of maximum displacement (Portion D)



Fig. 11 Rotation-speed dependence of von Mises stress at each portion (A, B, C and D) designated in Fig. 9(b)

One of the possible reasons why the CFD results become much smaller than the BEM results may be the use of coarse calculation mesh in spite of high Reynolds number condition. When considering the performance of the personal computer that we have now and the cost of computing, it is not realistic to increase the density of computational mesh at wider region. However, it is necessary to investigate the relation between the density of mesh and the CFD results henceforth.

## 3.2 Results of FEA

The stress distribution and deformation of the blade are shown in Fig. 9 in the cases of rotational speed of 65 and 120 rpm. The semitransparent blade in grey is the original shape before deformation. The blade depicted by color gradation shows the deformed shape. But note that the deformation represents the enlargement result ( $\times$ 10). The color shows the von Mises stress. The blade is deformed by being pulled outward in the radial direction by the centrifugal force.

As shown in Fig. 9 (b) in the case of 120 rpm, large stress is generated at the blade root (A), near the connection portions between the slant-straight and curve parts (upper part: B and lower part: C), and at the equatorial portion (D)

of upright-straight blade part. The maximum displacement occurred at the portion D and the value of displacement becomes 79.5 mm in the case of 120 rpm. The maximum displacement of blade at each rotational speed is shown in Fig. 10. The rotation-speed dependence of von Mises stress at each portion (A, B, C, and D) is plotted in Fig. 11. The estimated von Mises stress at each portion of B, C, and D doesn't exceed the allowable value of 136 MPa when the rotational speed is 120 rpm or less. However, the FEA results show that the stress at the blade root (A) becomes larger than the allowable stress in the case of 120 rpm. As mentioned above, the computational model near the blade root is different from the practical structure and fixing way. Actually, the practical blade root portion was reinforced. So, it is expected that the stress of the blade root portion would not exceed the allowable value if the more detailed model could be used. The analysis using the detailed blade model is one of the future works.

In addition, our future works include analysis by FSI, analysis of inclined triangular blade, and analysis in the case of extreme wind speed ( $V_{e50}$ ). Although there is the problem of computational cost, three dimensional-numerical analysis, which can teach us the detailed data that experiments cannot give, has a major role to play in development of small wind turbine.

## **4. CONCLUSIONS**

Numerical simulations by CFD and FEA regarding an one-blade rotor consisting of a triangular blade, which was one of the five blades of the vertical axis butterfly wind turbine of diameter of 7 m, were carried out separately by using the same software. The torque and power coefficients of the one-blade rotor obtained by the CFD agreed qualitatively with the analytical results based on the BEM theory. However, the results of CFD were much smaller than the BEM predictions. Since the Reynolds number was large  $(3.7 \times 10^6)$ , the difference might be attributed to coarse calculation mesh. The FEA results showed that the stress near the blade root portion may exceed the allowable value at the rated rotational speed of 120 rpm. Since the computational model near the blade root is different from the reinforced practical structure and fixing way, it is necessary to perform analysis with a detailed model close to the practical blade in future. According to the present FEA, the stress at other portions did not exceed the allowable stress at 120 rpm or less.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported in part by the International Platform for Dryland Research and Education (IPDRE) of Tottori University, the Tottori Prefecture Project for Promoting Collaborative Commercialization between Industry and Academia, and the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University. Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2017 October 9-12, 2017, Cincinnati, Ohio USA

## REFERENCES

- [1] Gipe, P., Wind Power for Home & Business, Chelsea Green, p. 139 (1993).
- [2] Hara, Y., Shiozaki, A., Nishiono, H., Saito, S., Shioya, K., Sumi, T., Matsubara, Y., Yasumoto, Y., Takagaki, K., and Kogo, S., Experiment and Numerical Simulation of an Aluminum Circular-blade Butterfly Wind Turbine, Bulletin of the JSME, Journal of Fluid Science and Technology, 11-2, p. JFST0010 (2016).
- [3] Hara, Y., Saito, S., Shioya, K., Shiozaki, A., Nishiono, H., Okutani, M., Mishima, K., Kawabata, T., and Yoshida, S., Over-speed Control System for Vertical Axis Butterfly Wind Turbine, Journal of Wind Energy, JWEA, 41-1 (Serial No.121), pp. 9-16 (2017), (in Japanese).
- [4] Hara, Y. and Tagawa, K., Butterfly Wind Turbines with Mechanical Over-Speed Control System, The 1st International Symposium on Wind and Tidal Power, Montreal, Quebec, Canada, May 28-30, pp.1-8 (2017).
- [5] Paraschivoiu, I., Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept. Canada: Polytechnic International Press, pp. 147-264 (2002).
- [6] Spera, D. A. (ed.), Wind Turbine Technology. ASME Press, pp. 215-282 (1994).
- [7] Hara, Y., Kawamura, T., Akimoto, H., Tanaka, K., Nakamura, T., and Mizumukai, K., Predicting Double-Blade Vertical Axis Wind Turbine Performance by a Quadruple-Multiple Streamtube Model, International Journal of Fluid Machinery and Systems, 7-1, pp. 16-27 (2014).
- [8] Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C., Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines, Sandia Report, SAND-80-2114 (1981).
- [9] Kumar, V., Paraschivoiu, M., and Paraschivoiu, I., Low Reynolds Number Vertical Axis Wind Turbine for Mars, Wind Engineering, Vol. 34, No. 4 (2010), pp.461-476.

## Butterfly Wind Turbines with Mechanical Over-Speed Control System

Yutaka Hara<sup>1</sup>, Kotaro Tagawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tottori University, Koyama-Minami, Tottori, Japan <sup>2</sup>Department of Regional Environment, Tottori University, Koyama-Minami, Tottori, Japan

## ABSTRACT

Vertical axis butterfly wind turbine with a mechanical over-speed control system had been developed to reduce energy cost. The experimental turbine (7m dia.) has five triangular blades that were designed to be inclined when it rotates fast. Forcible rotation-experiments showed good reproducibility of the movement of blade axis and necessity of the design change of a key part of the over-speed control system. In free rotation-experiments without load, greater-than-predictions inclination of the blades stopped the rotor. However, the blades had no damage in spite of the abrupt braking. Therefore, it became a demonstration of validity of the aerodynamic brake.

Keywords: butterfly wind turbine; vertical axis; over-speed control; cost reduction; aluminum blade; triangular blade; guide groove; blade element momentum theory; forcible rotation; free rotation without load

#### INTRODUCTION

The main stream of wind power generation is three-bladed horizontal axis wind turbine (HAWT) and the direction of the development is in the increase of rotor size in order to reduce the cost of energy (Manwell, McGowan & Rogers, 2002, p. 18). However, the conditions at the location to build large-size wind turbines are often limited by the problems such as landscape or environmental preservation. On the other hand, small-size wind turbines can be introduced at a variety of places due to a lower impact on the environment. In addition, there are various shapes of small-size wind turbine; not only horizontal axis wind turbines but also a lot of vertical axis wind turbines (VAWTs) have been also developed (van Bussel & Mertens, 2005, pp.1-8). However, small wind power is in the inverse direction against the direction for cost reduction by the enlargement of turbine rotor. Therefore the high cost of energy is a great problem in small-size wind turbines. In the case of turbine size less than 10kW, the levelized cost of energy (LCOE) in 2015 is about 30-40 cents/kWh (Orrell & Foster, 2016, p.31).

As the measures for cost reduction of small-size wind turbine, a lot of straight-blade VAWTs, which are often called straight-Darrieus rotor or H-rotor, have been studied and developed (Mertens, van Kuik & van Bussel, 2003, p.438) due to the non-directionality and the simplicity of blade shape. However, straight blades generally need arms, or struts, to support the blades, and the aerodynamic resistance, or drag, induced by the arms becomes problems as well as the structural strength of the connection part between a blade and an arm. And the suppression of tip loss should be considered in order to increase the output (Li & Calisal, 2010, pp.2332-2333). Moreover, in the case of small solidity, the self-starting performance of the straight-bladed VAWT may be poor (Eriksson, Bernhoff & Leijon, 2008, p. 1423), and some way to improve the self-starting nature is often necessary.

The first author of this paper started the research on the reduction of the cost of energy in small-size wind turbines in 2009 and devised an armless vertical axis wind turbine that consisted of looped blades. The wind turbine was named "butterfly wind turbine (BWT)" from the blade shape like a butterfly (Hara, et al., 2015, p.2). The original conceptual drawing is shown in Fig. 1 (a). Figure 1 (b) shows the photograph of an experimental model of BWT (rotor diameter: 0.4m), which has three cambered blades made of fiber-reinforced plastic (FRP). The BWT has the possibility of small aerodynamic resistance and small blade tip loss due to armless rotor structure and features the short length rotational axis with a generator installed near the center of the turbine rotor. The blades of BWT were initially made of plastics by the rapid prototyping or the FRP molding method. To reduce the number of constitution parts and to solve the problems caused by the connection parts between a blade and an arm, the arms, which were necessary to straight-bladed VAWT, were eliminated from the BWT. However, since the blade shape became complicated, the cost reduction of manufacture of blades remained as a problem of the BWT. In order to solve that problem, with cooperation from two corporations, the circular blades made of aluminum extruded and bent to shape were adopted for the BWT rotor of 2m diameters (Hara, 2016, pp.2-3).





(a) Concept of BWT

(b) Experimental rotor of BWT (0.4m dia.)

Fig. 1 Original Butterfly Wind Turbine (BWT)



Fig. 2 ACBBWT (3m dia.) with OCS

Over-speed control system (OCS) is very important for wind turbines to increase the safety and to reduce the cost of energy by increasing the electric generation at wide range of wind speed. There are a lot of OCSs for HAWT and some of them, including pitch-control of blades, are used for the commercial wind turbines (Gipe, 1993, pp.139-143). On the other hand, although several ways to prevent the over-speed have been also proposed for VAWT (Gipe, pp.138-139; Yamada, et al., 2012, p.41), almost none of them have been successful for commercial machines. Most of the methods proposed for the OCS of VAWT are complicated mechanism and are not convenient for maintenance because movable parts like spring and hinge are often placed far away from the rotational axis.

A looped blade that configures a BWT rotor is connected to the hub or generator at one portion near the center of the turbine rotor. Therefore, when the blade is held by one axis (hereafter called a blade axis), it is possible to rotate (or to twist) the blade axis in order to operate the blade as an aerodynamic brake like the pitch control of HAWT. As a means for further reduction of the energy cost of the aforementioned aluminum circular-blade butterfly wind turbine (ACBBWT), a mechanical OCS was developed and it was installed to ACBBWT of 3m rotor diameter. The continuous movement of twist (inclination) of circular blades and the suppression of high rotational speed were confirmed by experiments, as shown in Fig. 2 (Hara, et al., 2015, p.343), using an outdoor blower under the condition of almost no load of generator. However, in those experiments, imbalance between movements of the blades was observed because of the large backlash of OCS that utilized L-type universal joints.

At present, 7m-diameter BWT with the OCS, which utilizes I-type universal joints to decrease the backlash, is under development. The new OCS and the turbine rotor with triangular blades have already been completed, although the generator and the controller are not installed to the rotor yet since they are under development now. Both forcible rotation-experiments by using an induction motor and free rotation-experiments without load was carried out to confirm the behavior of OCS and the twist of blades. This study elucidates the problems and the improvements resulting from those two experiments and predicts the expected performance of the practical-size BWT with the new OCS.

## TRIANGULAR-BLADE BUTTERFLY WIND TURBINE Concept and Features

A photograph of the triangular-blade butterfly wind turbine (TBBWT) equipped with the OCS, under development, is shown in Fig. 3 and the specification is in Table 1. The diameter of the rotor (D = 2R) is 7.0 m and it has five triangular blades whose height is H = 2.7 m. The OCS is installed into the central hub of the rotor at the location of 4.3 m from the ground surface. As mentioned after, the TBBWT is planned to be installed on the top of a high-rise building to obtain large wind energy. However, it is now placed at a photovoltaic power plant run by one of the cooperation members of our project (consignment project from Tottori prefecture), mainly for convenience, with an aim of confirming the basic behavior and safety of the prototype. Therefore, note that the site is not appropriate for wind power generation since the circumference is complicated landform.

The concept of the development of TBBWT is "cost reduction by large rotor and small generator", which has three key points. The first one is that construction of a larger rotor with the extruded aluminum blades that can be built affordably and utilization of smaller capacity in the electric devices, such as generator and power conditioner which are



Fig. 3 TBBWT (7m dia.)

able	1	Speci	fications	s of T	BBWI

T

3.5 m
2.7 m
0.242 m
5
NACA 0018
18.6 m <sup>2</sup>
0.055
Aluminum
36.3 kg

often expensive, will lead to the reduction of total cost of wind power system. The second one is the mechanical OCS, which increases the capacity factor of wind power system by keeping the electric generation even when very strong wind blows. The last point means that the TBBWTs are planned to be installed at the rooftops of high-rise buildings in order to utilize the high wind speed, and all the parts of wind turbine, including the blades in knocked-down state, can be carried to the highest floor by the elevators in the buildings. It is one of the features of the TBBWT that a rope made of high tenacity polyarylate fiber ( $\varphi$ 10mm, breaking load: 53.9kN) inserted into the blades prevents the scattering of fragments of the broken blades in case of damage of the turbine rotor.

#### **Over-speed Control System**

Figure 4 is a photograph of the new OCS developed for the 5-bladed TBBWT. The diameter of the base is 0.89m. The movements of 5 blades are synchronized by connecting the coupling rods of 5 units of the OCS to the central disk.

The schematic diagram of an OCS unit is illustrated in Fig. 5. The centrifugal force  $F_c$  acting on a blade moves the blade axis inside the OCS unit into the radial direction (x direction). By this movement, a pin jutting out from the blade axis moves along a pair of guide grooves, each of which consists of straight part and helical part.



Fig. 4 OCS for TBBWT with 5 blades



Fig. 5 Schematic diagram of OCS unit for TBBWT



Fig. 6 Schematic diagram illustrating relation between the displacement  $\Delta x$  and the rotational angle  $\Delta \xi$  of synchronizing disk.

The schematic diagram shown in Fig. 6 illustrates the relation between the displacement  $\Delta x$  of blade axis (same as the shrinkage of spring) and the rotational angle  $\Delta \xi$  of the synchronizing disk. The spring of each OCS unit is under the condition of natural length (115 mm) when the turbine rotor is stationary (then  $F_c = 0$  N). Under this initial condition, the distance between the pivot of an universal joint and the center C of the synchronizing disk is  $x_0=184.5$ mm; the angle between the line segment (r = 40 mm), which connects the center C of the synchronizing disk and one end of the horizontal link (length: l = 175 mm), and the direction of the blade axis (x direction) is  $\zeta_0 = 70.14^\circ$ .

The rotation angle  $\Delta \xi$  of synchronizing disk and the displacement  $\Delta x$  of blade axis are given by the following Eqs. 1 to 3:

$$\xi = \xi_0 - \Delta \xi \tag{1}$$

$$x = r\cos\xi + \sqrt{r^2\cos^2\xi + l^2 - r^2}$$
(2)

$$\Delta x = x - x_0 \tag{3}$$

The measurement data for five springs used in the OCS about each relation between the restoring force  $F_s$  and the displacement (shrinkage)  $\Delta x$  are displayed in Fig. 7. The broken line in Fig. 7 shows the result of linear approximation of the average of 5 measurement data. The approximated equation is given by Eq. 4.

$$F_s = k\Delta x + F_0 = 558.31\Delta x - 1607 \tag{4}$$

From the gradient of the approximation line, the spring constant k is determined to be 558 N/mm.

Considering the displacement  $\Delta x$ , the centrifugal force  $F_c$  acting on a blade when the turbine rotor revolves at angular velocity  $\omega$  is given by the following Eq. 5:

$$F_c = m_b (x_b + \Delta x) \omega^2 \tag{5}$$

where  $m_b$  is the total mass of a triangular blade including the blade axis, connection parts, bolts, nuts, and so forth.  $x_b$  is the x-coordinate of the center of mass of the triangular blade under stationary condition based on the rotational center C.

The restoring force and the centrifugal force are equivalent ( $F_s = F_c$ ) under the condition of constant rotor rotation if the aerodynamic forces are ignored (actually they are predicted as less than 4% of the centrifugal force even at the rated rotational speed of 120 rpm in wind speed of 18m/s). For simplicity, if the force constant  $F_0$  in Eq. 4 is ignored (i.e.,  $F_0 = 0$  N), the displacement  $\Delta x$  is calculated by the following Eq. 6:

$$\Delta x = \frac{m_b \,\omega^2 \,x_b}{k - m_b \,\omega^2} \tag{6}$$

Therefore, when the shape of the guide groove is given, the displacement  $\Delta x$  and also the twist angle  $\eta$  (inclination of a blade) are decided against the rotor rotational speed  $N = 30 \omega/\pi$  rpm. The rotational speed dependence of the displacement and the twist angle is shown in Fig. 8 using the relation of Eq. 6. When the rotational speed of wind turbine increases to about 90 rpm or more, the pin proceeds into the connection portion (curve section) between the straight part and helical part of a guide groove; simultaneously, the triangular blade starts to incline gradually. The design maximum rotational speed of the TBBWT is 120 rpm.

#### Prediction of Performance of TBBWT

In the present study, the performance of the TBBWT was predicted based on the Blade Element Momentum theory or BEM (Hansen, 2000, chap. 8). The TBBWT has a double-blade structure, which means that fluid entering into the swept area of turbine rotor has possibility to intersect the blades four times. Therefore, in the BEM-based calculation, the Quadruple-Multiple Streamtube (QMS) model (Hara, et al., 2014, pp. 17-19), which nested the Double-Multiple Streamtube



Fig. 7 Measurement data of spring constant



Fig. 8 Rotational speed dependence of displacement  $\Delta x$  and twist angle  $\eta$ .

(DMS) model (Paraschivoiu, 2002, chap. 6), was used as the flow field model. Decrease in output power caused by the twist of blade is simulated by considering the effective pitch angle (Hara, Saito, Shioya, Shiozaki & Nishiono, 2014, p. 391). The in-house software used in this study for performance prediction was tuned to the experimental results of electric output power of the previous 3m-diameter ACBBWT (see Fig. 2) equipped with the generator of 1.32 kW (Hara, et al., 2015, p.344). Note that the prediction obtained as the electric power of TBBWT is considered including the generator loss of 20 %.

Figure 9 shows the prediction of the power property of TBBWT of 7m diameter. The dotted lines are the turbine output in the case without the OCS. On the other hand, the solid lines are the turbine output property predicted in the case equipped with the OCS. Although the experimental rotor of the TBBWT has not been equipped with a generator yet, a multipolar core-less permanent-magnet generator (5kW) is planned to be installed together with a speed-increasing gear



Fig. 9 Prediction of the power property of TBBWT with OCS and without OCS. The loss (20%) of generator is included.







Fig. 11 Prediction of Annual Energy Production (AEP) of TBBWT with OCS and without OCS.

(3:1) in near future. The monotonic increasing curve depicted in Fig. 9 is the output power of the generator including the loss of 20% and the rotational speed is converted into the input-side rotation of the gear

(same as the wind turbine speed). The symbols of circle ( $\circ$ ) on the generator property are the operating points in the case equipped with OCS.

The turbine output curve that intersects the generator output curve at a specific operating point is found out with the BEM-based simulation by changing wind speed gradually under the condition of specific constant rotational speed N and specific twist angle  $\eta$  given by the concerned operating point. As shown in Fig. 9, the twist angle of the blades becomes 14.3° when wind speed V is 15.7 m/s; in this case, the electric output power is 3768W. At any wind speed of about 16 m/s or higher, the output power is expected to become constant, since the turbine output curve does not intersect the generator output curve at the specific operating point designated by Fig. 8.

Comparison between the power curves of TBBWT with OCS and without OCS is shown in Fig. 10. The power curves are based on Fig. 9, but the loss (10%) of speed-increasing gear is considered in addition to the loss of generator by multiplying the values of operating points in Fig. 9 by a factor of 0.1. The maximum wind speed of power generation is assumed to be 12 m/s in the case without OCS, in which case the turbine is stopped by some measure at 13 m/s or higher.

The annual energy production (AEP) can be calculated based on the power curves. The predictions shown in Fig. 11 assume the Rayleigh distribution (Burton, Sharpe, Jenkins & Bossanyi, 2001, p. 14) as the wind speed probability density. It turns out from Fig. 11 that there is no difference of the AEP between the turbine without OCS and the turbine with OCS when the annual average wind speed is 6 m/s or lower. From Fig. 10, the case without OCS needs a generator of 7.4 kW or larger in the rated power considering the energy loss ( $0.8 \times 0.9 = 0.72$ ). On the other hand, the case with OCS, in which a generator of 5 kW or smaller is enough, can expect the same AEP as the case without OCS. Therefore, the TBBWT equipped with OCS can expect cost reduction. The prediction of AEP in the case of annual average wind speed of 5 m/s is 5180 kWh from Fig. 11.

#### EXPERIMENTS Forcible Rotation

# **Forcible Rotation**

In order to confirm the movements of the OCS developed in the present study, field experiments, in which the turbine rotor of TBBWT was rotated forcibly by a geared motor controlled by an inverter, were conducted under conditions of moderate wind speed on December of 2016. The rotational speed of the rotor was directly measured by an optical rotation sensor (detector: LG-930, digital tachometer: TM-2130), which was installed under the hub. The twist angle  $\eta$  of a blade and the rotation angle  $\Delta \xi$  of synchronizing disk were monitored by two wireless video cameras installed on the hub. The video cameras were supplied electricity by a storage battery connected to five small solar cell panels on the hub.

An example of the experimental data, which is the time-series data of rotor rotational speed N and displacement  $\Delta x$  obtained by the first try of several forcible rotation experiments of TBBWT by using an induction motor, is shown in Fig. 12. The displacement  $\Delta x$  was calculated with Eqs. 1 to 3 from the value of  $\Delta \xi$  observed by a video camera. As shown in Fig. 12, the rotational speed was not able to be increased over 90rpm due to lack of motor power (1.5kW). Therefore, the inclination of the blades was not observed.

The relations between the displacement of a blade axis and the rotor rotational speed are shown in Fig. 13. The data obtained from three forcible rotation experiments in Fig. 13 are showing almost the same behavior. This demonstrates that, in the new OCS, the reproducibility



Fig. 12 An example of the experimental data (Exp.1) in forcible rotation of TBBWT by using an induction motor.



Fig. 13 Relations between the displacement of a blade axis and the rotor rotational speed in the experiments using an induction motor. The solid curve in black is the prediction based on the spring constant and the shape of guide-groove.

of movement of the blade axes is very good. The data of Fig. 13 also prove that there is hysteresis in the movement of a blade axis and a blade axis does not move until the rotor speed exceeds 40 rpm when the rotor starts the rotation from the stationary condition.

As a matter of fact, the shape of guide grooves of the OCS used in the present experiments was designed based on the measurement results of spring characteristics shown in Fig. 7, or Eq. 4, in which the force constant  $F_0$  was -1607 N. Therefore, the prediction of relation between displacement  $\Delta x$  and rotational speed N corresponds to the solid curve in Fig. 13, which exists 3mm above the experimental data. The quantity of 3mm coincides with the coordinate value of intersection point of the approximation line on the horizontal axis in Fig. 7. That is to say, the force constant  $F_0$  should have been 0 N, not -1607 N. If the shape of guide grooves had been designed assuming  $F_0 = 0$  N, the prediction of relation between the displacement and the rotational speed would have been the dotted-line curve in Fig. 8 leading to the better coincidence between the prediction and the experiments. To put it concretely, the length of straight parts of the grooves used in the experiments was too long by 3mm.



Fig. 14 Prediction of operating points when the TBBWT with no load rotates in natural wind.

## Free Rotation without load

The TBBWT is supposed not to become an over-speed state by the OCS even in case it loses the electrical control by any cause. Figure 14shows the prediction of the operating points obtained by the BEM-based calculations like Fig. 9 when the TBBWT without load rotates in natural wind. The symbols of circle ( $\circ$ ) on the horizontal line showing the loadless condition (torque: Q = 0, or power: P = 0) in Fig. 14 are the operating points. The torque characteristic curve passing through an operating point is obtained by finding out the wind speed which gives zero torque condition at a specific pair of twist angle  $\eta$  and rotational speed N providing the operating point. When the rotational speed is larger than 120 rpm, no operating point giving the wind speed satisfying any specific pair of  $\eta$  and N determined by the OCS is found out. Therefore, it is predicted from Fig. 14 that the TBBWT rotor holds the condition of N = 120 rpm and  $\eta = 16.8^{\circ}$  even when wind speed becomes larger than 16.9 m/s.

To investigate the behavior of the experimental rotor without load and to observe the inclination state of triangular blades, the motor used in the forcible rotation experiments was removed from the TBBWT and the wind turbine rotor in almost non-load condition was left in natural wind as it is. Wind speed and direction were measured by a 2-axis ultrasonic anemometer (CYG-85000), which was placed at the location of 20.3m in the direction of west ( $\theta = 276^{\circ}$ ) from the center of the TBBWT at the height of 4.5 m from the ground surface. The sampling time interval was set at one second. The rotational speed of the rotor was measured by the same sensor system as the forcible rotation experiments.

The measurement results in a continuous 14-hour period (0:00-14:00 on Jan. 14, 2017) are shown in Fig. 15. In that period, wind speed was rather large and wind direction was relatively stable (average wind direction) shown in Fig. 15 is five-minute average. The symbols of circle ( $\circ$ ) in Fig. 15 are the predictions of the operating points of loadless condition in Fig. 14. The measurements and the predictions about the average wind speed dependence of the average rotational speed agree well at wind speed of around 3m/s. However, the difference between them tends to increase gradually with the increasing wind speed. The cause is thought to be attributed to the complicated landform around the turbine rotor as mentioned above.



Fig. 15 An example of the experimental data of free rotation (no load) in natural wind. Each data is averaged in every 5 minutes and the data period is a continuous 14 hours. Prediction of operating points is the same as ones shown in Fig. 14.





(b) Time series data of rotational speed.

Fig. 16 Data showing the abrupt braking by twist of the blades of TBBWT. The time point A in (a) shows the maximum wind speed of 13.32m/s at 191s; the time point B in (b) shows the maximum rotational speed of 108.1rpm at 199s.



Fig. 17 TBBWT inclined the blades and stopped because the straight part of the guide groove was too long (3mm) and the helical part had too steep gradient. However there was no damage to the blades even after the abrupt aerodynamic braking.

Figure 16 shows the time series data obtained by the sampling time of one second of wind speed, wind direction, and rotational speed, which were measured during 300 seconds from 14:00:00 to 14:05:00 on Jan. 14, 2017. The maximum wind speed in Fig. 16 (a) of 13.32 m/s is recorded at 191 s (time point A). In eight seconds after the time point A, at 199 s (time point B) in Fig. 16 (b), the maximum rotational speed of 108.1 rpm is recorded. After the time point B, the rotational speed abruptly decreased, and the wind turbine stopped.

As shown in Fig. 17, which is a photograph of the TBBWT two days after the incident, probably the five triangular blades inclined drastically about 45 degrees after the time point B in Fig. 16 (b); and they were not restored to the former conditions and held the slant state. This incident was caused by the facts that the length of straight parts of the guide grooves was too long by 3mm as mentioned in the previous section and that the gradient of helical parts of the guide grooves was too large. However, in spite of the abrupt movements by the aerodynamic braking, there was no damage to the triangular blades. This unexpected incident proved that the TBBWT can be safely stopped by the inclination of the blades.

## FUTURE WORK

The shape of the guide groove used in the present experiments is depicted in Fig. 18 (a). To solve the problems of the shape of the guide grooves elucidated in this study, now the design of groove will be improved as shown in Fig. 18 (b). That is, the length of straight part will be reduced to 11 mm from 14 mm; the angle between the center line of helical part and the horizontal line will be reduced to 72.52 degrees from 79.78 degrees.

One of the objectives of this project is to measure and obtain the performance of the TBBWT with OCS by field experiments. The experiments at the present site aim at confirmation of the basic operation of the OCS. After confirming the continuous blade-twist movements and the suppression of over-speed states, the measurements of power generation by the TBBWT will be conducted at a flat and opened place. By considering countermeasures comprehensively to reduce the cost of energy of the TBBWT, we aim at the energy cost of 25 JPY/kWh (20 cents/kWh) or less as the final goal in this project.



# Fig. 18 Improvement of the shape of guide grooves built in a cylindrical frame.

In the present project, the wind turbine system is designed for grid connection and the turbine rotor is planned to be placed on the roof top of high-rise building as mentioned in the previous chapter. As the next stage, the authors are considering to apply the TBBWT to the agriculture sector and the drylands of the world. Therefore, to develop the affordable TBBWT equipped with OCS that operates as independent power source on the ground will be one of our future works.

## CONCLUSIONS

A triangular-blade butterfly wind turbine (TBBWT) of 7m rotor-diameter equipped with the over-speed control system (OCS) was developed and the forcible rotation-experiments by using an induction motor and the free rotation-experiments under the condition of no load were carried out. The forcible rotation-experiments proved that the blade axis was able to move with high reproducibility along with the increase and decrease of the rotor rotational speed and that the movement of the blade axis had a hysteresis property. On the other hand, the experiments also proved that the prediction of the movement of blade axes did not agree with the measurement data due to the offset of the force constant  $F_0$ , which could be obtained in the measurements of spring constant. However, by assuming the value of  $F_0$  to be zero, the cut-back of guide-groove straight part probably leads to successful improvements. In the free rotation-experiments without load, the TBBWT rotor stopped unexpectedly by occurrence of the large twist angle of the triangular blades. In spite of the abrupt braking of the rotation of the rotor, there were no damages to the triangular blades made of aluminum. This incident showed the validity of the aerodynamic braking by the OCS of the present TBBWT. To implement the continuous blade-twist movements and the normal suppression of over-speed states, the improvements of guide grooves by reducing the gradient of the helical part in addition to the above-mentioned cut-back of the straight part are now carried out. The prediction of the power generation by the present TBBWT with OCS was conducted on the basis of the blade element momentum method and it showed the possibility of the annual energy production of 5180kWh in the case of annual average wind speed of 5m/s.

### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported in part by the International Platform for Dryland Research and Education (IPDRE), Tottori University, the Tottori Prefecture Project for Collaborative Promoting Commercialization between Industry and Academia, and the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University. The traveling expenses for the first author to attend this symposium (ISWTP2017) were supported by the Yashima Environment Technology Foundation. The authors are profoundly grateful to the cooperation as the project members by Nikkeikin Aluminium Core Technology Co., Ltd., Japan Micro System Co., Ltd., Sky Electronics Co., Ltd., Enatex Co., Ltd., Diamond Electric Mfg. Co., Ltd., and Tottori Institute of Industrial Technology.

#### REFERENCE

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). Wind energy handbook. West Sussex, England: John Wiley & Sons.

Eriksson, S., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1419-1434.

Gipe, P. (1993). Wind power: For home & business. Totners, England: Chelsea Green.

Hansen, O. L. M. (2000). *Aerodynamics of wind turbines*. London, UK: James & James.

Hara, Y., Kawamura, T., Akimoto, H., Tanaka, K., Nakamura, T., & Mizumukai, K. (2014). Predicting double-blade vertical axis wind turbine performance by a quadruple-multiple streamtube model, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 7, 16-27. Retrieved April 18, 2017, from

https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijfms/7/1/7\_16/\_article

Hara, Y., Saito, S., Shioya, K., Shiozaki, A., & Nishiono, H. (2014). A proposal on a compact mechanics of over-speed control for vertical axis wind turbines. *Proceedings of the 36th Symposium of Wind Energy Utilization*, (pp. 389-392). Retrieved April 18, 2017, from http://www.jwea.or.jp/yokou2014/C14\_36.pdf

Hara, Y., Sumi, T., Emi, T., Yokoyama, M., Akimoto, H., Kawamura, T., & Nakamura, T. (2015). Effects of blade section on performance of butterfly wind turbines as double-blade VAWTs. *Journal of Fluid Science and Technology*, 10, 1-19.

Hara, Y., Okutani, M., Mishima, K., Saito, S., Shioya, K., Shiozaki, A., ... Yoshida, S. (2015). Experiments of a mechanics of over-speed control for vertical axis wind turbines by tilting blades. *Proceedings of the 37th Symposium of Wind Energy Utilization*, (pp. 343-346). Retrieved April 18, 2017, from

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/37/0/37\_343/\_pdf

Hara, Y., Shiozaki, A., Nishiono, H., Saito, S., Shioya, K., Sumi, T., ... Kogo, S. (2016). Experiment and numerical simulation of an aluminum circular-blade butterfly wind turbine. *Journal of Fluid Science and Technology, 11*, 1-20. Retrieved April 18, 2017, from https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfst/11/2/11\_2016jfst0010/\_article Li, Y., & Calisal, M. S. (2010). Three-dimensional effects and arm

effects on modeling a vertical axis tidal current turbine. *Renewable Energy*, 35, pp.2325-2334. Retrieved April 18, 2017, from

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110001047 Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2002). *Wind energy explained*. West Sussex, England: John Wiley & Sons.

Mertens, S., van Kuik, G., & van Bussel, G. (2003). Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125, 433-440.

Orrell, A. C., & Foster, N. F. (2016). 2015 Distributed Wind Market Report. Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory. Retrieved May 1, 2017, from

https://energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/2015-Distributed-Wind-Market-Report-08162016\_0.pdf

Paraschivoiu, I. (2002). Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept. Canada: Polytechnic International Press

van Bussel, G. J. W., & Mertens, S. M. (2005). Small wind turbines for the built environment. *Proceedings of the Fourth European & African Conference on Wind Engineering*. Retrieved April 18, 2017, from

http://lr.home.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen \_en\_Leerstoelen/Afdeling\_AEWE/Wind\_Energy/Research/Publication s/Publications\_2005/doc/2005Small\_wind\_turbines\_for\_the\_built\_envi ronment.pdf

Yamada, T., Kiwata, T., Kita, T., Hirai, M., Komatsu, N., & Kono, T. (2012). Overspeed control of a variable-pitch vertical-axis wind turbine by means of tail vanes. *Journal of Environment and Engineering*, 7, 39-52. Retrieved April 18, 2017, from

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jee/7/1/7\_39/\_article

# 円筒形 OWC 型波力発電装置のエネルギー変換性能評価における スケールイフェクトに関する研究

九州大学大学院工学研究院 安澤 幸隆

## 1. 目的

著者らは波力発電の実用化に向けて、仕組みが単純で可動部が水中になく、広範な普及に有利である発 電用振動水柱(以下:OWC)カラムを有するマルチカラム型発電浮体の研究開発を行っている.先行研究に おいて複数 OWC カラムの相互干渉影響を含んだ波浪中応答を計算するプログラムを開発し、水槽サイズ において広い波長域にわたって定性的・定量的にほぼ推定できることが確認された.

本研究では、実機の開発・設計に関連してスケール影響について焦点を当て、装置が大型になるにつれ 性能に大きく影響を与えると考えられる空気の圧縮性を考慮した円筒型 OWC 装置のスケール影響の調査 を目的としている.

## 2. OWC 内空気室の力学モデル

本研究では空気の圧縮性に関する非線形性を考慮している。OWC 内の空気室をノズルを有するシリン ダーと水柱のピストンから成る空気ダンパと考え、非線形の力学モデルを導いている。このときバネとダ ンパを並列に並べた Voigt model を採用している.このとき、空気の状態変化は断熱変化とし、側壁と振 動水柱の摩擦抵抗は無視している.その結果、 得られた等価な空気ダンパの等価ばね定数と等価減衰係 数は周波数依存性が有するとともに、スケール影響があることがわかった.この力学モデルを数値解析プ ログラムに導入して計算し実験との比較考察を行った.



OWC の力学モデルと等価空気ダンパモデル

## 3. 実験方法

実機との縮尺比 1/12 の中型模型を作製し,九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽で試験を行い実験結果と数値解析結果を比較した.中型模型の主要目は直径 D=0.5[m],高さ H=1.0[m],喫水 d=0.375[m]、ノズル比 1/200 である.波振幅 37.5,62.5[mm]の2パターンと波周期 1.0~3.0[s]の 15 点で計測を行った.実験は曳航電車に OWC を固定して 1 方向入射波を入射させ、OWC 内の空気圧および水面の上下変動をそれぞれ圧力センサーおよび超音波水位計で計測した。



円筒型 OWC 模型

#### 4. 水槽試験結果と考察

図\*\*に中型模型と比較のために先行研究で行った小模型(縮尺比 1/12, 直径 0.2[m])の実験値と数値解析 結果のグラフを示す.中型模型の結果は波振幅 a=37.5[mm]の結果を用いている.数値解析の結果を比べる と,縮尺比 1/12 と 1/30 の間にはほとんど差が生じていないことがわかる.しかし,実験結果を比較する と,1/30 のときはピーク付近で値のばらつきが見られたが,1/12 だとピーク付近,波周期 1.8, 1.9s のと きに1 次変換効率が落ちていることがわかる.結果として,縮尺比 1/12 のとき実験値は数値解析値と比較 してわずかに誤差を生じる結果となった



波力エネルギーー次変換効率の計算結果と水槽試験結果

## 5. 研究成果報告

空気の圧縮性の影響を数値解析プログラムに導入しスケール影響の検討を行った.また,中型模型試験 を行い,数値解析結果と比較した.

水槽試験で用いたサイズの OWC (OWC の内径が 0.20m、0.50cm)の場合,空気の圧縮性影響は小さく,影響を無視することができることが、理論的にも実験的にも確認できた. しかし,実機サイズ(OWC 内径 6.00m)になると,空気の圧縮性が大きく影響することが数値解析によりわかった。この影響により、実機サイズの周波数応答は,水槽試験サイズのそれに比べて、1 次変換効率のピークが下がり,その振動数が高い方へシフトする.

また、実験により空気室の圧縮性影響を証明するためには、より大きなサイズの OWC 試験体を用いた 水槽試験か、強制動揺試験を実施する必要があることがわかった。

## 6. 研究組織

安澤 幸隆(九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門 教授)

瀬戸口 隆友(九州大学大学院工学府 海洋システム工学専攻 修士2年)

木下 順次 (九州大学工学部 技術部 )

小柳 嬉見子 (九州大学工学部 技術部 )

## 高空の風力利用についての研究

(株) TMIT・研究開発部・所長、 首都大学東京・システムデザイン学部・客員教授

藤井 裕矩

要旨

風力エネルギー発電方法について、強い恒常的な風力が得られる高空風力発電について基礎研究を行った。世界的にも先進的な高度な技術が要求されるため、その基礎的な部分である軽量風車の開発について本年度はフィールドテストを加え実験的に研究を進めた。

## 序論

風力発電においては風況の 良い場所の選択が主要な要素で ある。風況の良いところとして、 地表部のキャノピーを越えた高 度の位置が一つとしてあげられ る。このような高空における風力 発電技術はいまだ未開発の分野 として残されているが、海外でも 米国、オランダなどで開発されつ つあり実用開発も近いと思われ る。本研究は、代表者の提唱のも と日本で関係する研究者たちが 高空風力を利用した風力発電の 研究を主軸にして結集したもの



Fig.1 妻沼グライダー滑空場におけるフィールドテスト:左端の 車で中央で手に持っている風車を引いて凧で上空に揚げる(2017 年11月12-15日)

である。本研究における高空風力発電でのテザー技術の応用の手法は、断続的な発電がおこなわれる主流に 対して連続的な発電を継続することを目標とした極めて独創的なものである。このために用いられるテザー 技術はエネルギー伝達機構として有望視されているものであり、昨年度は九州大学大型境界層風洞を用いた デモンストレーションによって伝達性能を実験的に調べた。この結果を用いて、テザーによるエネルギー伝 達機構において種々の改良を続けている。本年度は、凧によって風車を浮上させて行うデモンストレーショ ンを計画した(Fig.1)。このためより手軽に実験の可能な小型風車の製作も行った。このため、本研究にお いては風車の更なる改良とともに、凧のように高度や位置が振れる場合の伝達機構を合わせた検討を行うも のである。一方、九州大学応用力学研究所における共同研究の大きな枠組みとして平成22年度より「新 エネルギー力学」の分野が作られ、九州大学でも風力発電技術の研究開発にかかわっており、高空風力 発電手法の先駆けである新川教授においては本研究におけるリーディング・メンバーとして、大きな期 待を背負ってもらっている。このため、九州大学応用力学研究所の共同研究として研究の継続を行った。 実験日程と経過

フェーズ1.5(0.2kW級)に加えてフェーズ1+(ワンプラス:0.1kW級)の垂直軸風車を試作し (Fig.2)、本年度は実験研究フィールドテストを加えて以下のように実施した。

- ▶ 2017 年 10 月 5-6 日 AWEC(Airborne Wind Energy Conference)2017 (Freiburg) (国際会議における研究発表)
- ▶ 2017 年 11 月 12-15 日 P1+&P1.5 フィールドテスト(妻沼グライダー滑空場)
- ▶ 2017 年 12 月 3-10 日風洞実験(工芸大)
- ▶ 2017年12月8日第6回全体会議(科学技術館)

## 技術課題への成果

本年度の研究成果により、以下の2つの技術課題について、3のようにフィールドテストによるデ モンストレーションを行った。

1)高空風車において、軽量であることとともに、ブレードが十分な空力特性を持つこと、さらに、必要な強度を持つことが必要である。昨年度はフェーズ 1.5(0.2 k W 級)の試作と性能の実験を行った。

本年においてはさらにフェーズ1+(ワンプラス: 0.05kW級)の直線翼風車をモーターで回転させて トルク特性を風洞で測定し風車性能の試験を行っ た。

2)昨年度は、第1.5フェーズ(0.187KW級)風車 モデルを試作し、九州大学地球大気動態シミュレー ション装置(境界層風洞)(測定部(4m×2m))に おいて性能実験を行ったが、本年度においてはさらに フェーズ1+(ワンプラス:0.1kW級)の垂直軸風 車を試作し風洞実験とデモンストレーションに供 した。

3)フェーズ1.5ならびにフェーズ1+の垂直軸風車の模型を凧を用いて上空に浮上させこのフィールドテストによって、風車特性とテザー伝達特性を検討する。(Fig.3)

4)これらの成果はいずれも、風力エネルギー利用 シンポジウムなどの学会)・研究集会で研究成果と して公表を行った。

主に以上の3点については結果と考察について、いずれも、「研究成果報告」の節で示したように学会で発表し、議論した。(「研究成果報告」の項参照。)



Fig.2 風車モデル(フェーズ1+とフェーズ1.5)



Fig.3 フィールドテスト (妻沼グライダー滑空場)

研究組織

氏名	所属	役職
藤井 裕矩	ТМІТ	所長
大久保 博志	神奈川工科大学	教授
永尾 陽典	神奈川工科大学	教授
新川 和夫	九州大学	教授
草谷 大郎	都立産業技術高専	准教授
山本 広樹	都立産業技術高専	准教授
髙橋 泰岳	福井大学	准教授
中嶋 智也	大阪府立大学	講師
遠藤 大希	九州大学	博士課程1年
関 和市	東海大学	教授
丸山 勇祐	前田建設	研究員
岩原 誠	(有) ザクシス	代表取締役

## 研究成果報告

1)藤井裕矩、草谷大郎、「テザー型飛翔体の運動に関する基礎研究」、(社) 日本航空宇宙学会第48 期定時 社員総会/年会講演会、1C09、2017年4月13<sup>~</sup>14日、東京大学山上会館。

2) Hironori A. FUJII, Hiroshi OKUBO, Yasutake TAKAHASHI, Yusuke MARUYAMA, Tairo KUSAGAYA, Shigeo YOSHIDA, Kazuo ARAKAWA, Hiroki ENDO,Kenji UCHIYAMA, Kazuichi SEKI, and Takeo WATANABE"**HSWG(High Sky Wind energy Generation) on tethered system**"AIRBORNE WIND ENERGY CONFERENCE 2017, Freiburg, Germany 2017/10/5-6

3)藤井 裕矩,大久保 博志,遠藤 大希,丸山 勇佑,「高空風力発電の実証実験の試み」第39回風力エネ ルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-1、2017年12月6日・7日,科学技術館、千代田区、東京.

4) 形川 雅文、近藤 智行、高橋 泰岳、「カイトとプロペラ式風車を用いた高空風力発電の試み」、第39 回風力エネルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-2、2017年12月6日・7日,科学技術館、千代田区、 東京.

5) 中嶋 智也、岩崎 稜太、植田 芳昭、「高空風車に使用することを想定した風力タービンに関する一 考察」、第39回風力エネルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-3、2017年12月6日・7日,科学技術 館、千代田区、東京.

6) 草谷 大郎、藤井 裕矩、関 和市、大久保 博志、真志取 秀人、髙橋 泰岳、山本 広樹、遠藤 大 希、冨田 匠、渡部 武夫、丸山 勇祐、田中 真里、笹原 雄二郎「高空風力発電用航空プラットホーム に用いる対称翼型カイツーンの検討」、第39回風力エネルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-4、 2017年12月6日・7日,科学技術館、千代田区、東京.

## 謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究(一般研究)の助成を受けたものである。

## 流入風変動を考慮した水平軸風車の荷重低減に関する研究

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 要旨

水平軸風車の前方の風を観測し、ロータ面に流入する風速を予測した.この風速を、風車を運転する ためのフィードフォワード制御に用いることにより、風車に作用する荷重の変動を抑制することが可能 となった.

2. 序論

我が国における風力発電の導入に際して,複雑地形が原因となって流入風速が変動し,それにとも なう風車の荷重変動が故障の原因となっている.風車発電時には,流入風速の変動にともない,ロー タ面に作用する推力は変動し,タワーの根元に大きな変動モーメントが生じる.一般的な風車制御は, 定格風速以下では最大出力,定格風速以上では一定出力となるように制御されているが,これらの従 来制御は風車出力を参照して制御するフィードバック制御であり時間遅れが生じる.

本研究の目的は、風車ブレードのピッチ角制御における空力制御の時間遅れを解消することで、 風速変動に対する荷重変動を抑制することである.そのために、風況観測マストで風車の前方風速 を計測し、それを取り込んだ風車のフィードフォワード制御手法を構築した.

3. 方法

本研究は、将来的なライダによる流入風変動計測を用いたフィードフォワード制御の実現の前段階として、風況観測マストに設置した風速計から得られた流入風データを用いたフィードフォワード制御手法の構築と検証を行う.実験には、三重大学附帯施設農場に設置されているロータ直径 10m、ハブ高さ 13.4m、出力 30kW のアップウィンド式水平軸風車を用いる.流入風速は、風車上流に設置された風況観測マスト上の超音波流速計で測定する.超音波流速計は三次元速度を速い応答性で計測できる.風車に作用する代表的な荷重としてロータ推力を計測した.ロータ推力は、流入風速、風車回転数、ロータ翼のピッチ角に依存するため、様々な運転条件で計測されたロータ推力のデータを蓄積し、制御に用いるためのデータベースを構築した.また、風車上流で計測した変動風速が風車ロータ面に流入するまでには時間差があるため、上流の風況観測マストで計測された風速と、風車ナセル上の風速計で計測された風速の相互相関を計算することで、この時間差について調べた.運転データベースと風速変動流入までの時間差を用いて、ロータ推力変動を低減するようにピッチ角を操作するフィードフォワード制御手法を構築し、制御適用時と非適用時のロータ推力変動を比較することで、その効果について評価、検証を行った.

- 4.結果と考察
- (1) フィールド実験データの蓄積により、ロータ推力は、一定回転数の運転条件では、流入風速と概ね 線形関係にあることがわかった.この関係に基づき、フィードフォワード制御用の制御関数を構築 した.
- (2)通常運転時とフィードフォワード制御時の実験データから、ほぼ同じ風速域のデータを抽出し、ロータ推力の変動を観察した.その結果、フィードフォワード制御の導入により、通常運転時よりもロータ推力変動を抑制できることが確認された.
- (3) 本研究では風車上流のマストで観測した風速を用いてフィードフォワード制御を構築したが、風車 上流の風計測装置をライダに置き換えた場合にも本研究の成果を用いることが可能であることを

示した.このことにより、ナセルにライダを搭載することができれば、水平軸風車の荷重変動抑制 が可能であることを示した.

5. 学会発表

Kota Morimoto, Takao Maeda, Yasunari Kamada, Yuki Sakurai, Load Control of Wind Turbine Supported by Inflow Measurement, Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, USB, 5p., 2017.

6. 研究組織

研究代表者	前田ナ	、佳夫,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	教授
研究協力者	鎌田	泰成,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	准教授
研究協力者	森本	昂太,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	博士前期課程
研究協力者	櫻井	優輝,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	博士前期課程
所内世話人	吉田	茂雄,	九州大学応用力学研究所,教授	



図1 風速に対するロータ推力の関係



## 水平軸風車に作用する空力荷重の制御に関する研究

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 鎌田 泰成

1. 要旨

風車翼のピッチ角を変化させることで、ロータ面に生じる流体力の制御を試みた. ピッチ角変化手法 は、アジマス角に対しピッチ角を一定とした「定常ピッチ制御」とアジマス角に対しピッチ角を周期的 に変化させる「周期的ピッチ制御」を用いた. 定常ピッチ制御は、ロータ面に垂直に作用する流体力の 大きさを変更できる. 一方、周期的ピッチ制御は、アジマス角位置毎に異なる流体力を生じさせ、ロー タ面に働くモーメントの大きさと軸の方位を変更できる.

2. 序論

ウィンドシアが存在する風環境では、風車が1回転する間にブレードに作用する荷重は変化し、それに よりドライブトレインおよび風車を構成する部材に変動荷重を生じさせる.このような荷重変動を低減す るため、2000年代から独立ピッチ制御を装備した商用風車が市場に現れたが、十分な効果が得られなかっ たため、世界のほとんどの市場から姿を消し、わずかに欧州の市場に残るだけである.しかし、我が国の ような複雑地形が多い地理的環境ではウィンドシアが風車に与える影響が大きいため、ブレードに作用す る周期的荷重の低減は有益である.一方、近年、国内外で注目されている浮体式洋上風車は沖合の好風況 に設置できるため、実用化が望まれるが、風や波などの外力に対する高い安定性が求められるため、浮体 設備を強固に設計する必要があり、発電コストが高くなる.そのため、低コストで浮体の安定性を確保す る手法の構築が重要となる.

本研究では、風車翼のピッチ角を制御することでロータ面に生じる流体力を変化させ、外力による風車の変動荷重を減衰させることを目的とする.

3. 方法

正面および斜め流入風下において、ピッチ角制御機構を搭載した供試風車を用いて風洞実験を 行った.ロータ面に作用する流体力およびモーメントは、6分力天秤により計測した.ブレードの ピッチ角を変化させることで、ロータ面に生じる流体力の制御を試みた.ピッチ角の変化は、ブレ ード断面における迎角の変化を生じさせ、その結果、流体力の変化が生じる.本研究では、アジマ ス角に対しピッチ角を周期的に変化させる周期的ピッチ制御を行った.周期的ピッチ制御におい て、ピッチ角はブレード1回転中に1周期の変化をさせる.これにより、アジマス角ごとに異な る流体力を生じさせ、ロータ面にモーメントを発生させる.周期的ピッチ制御では、ピッチ角変化 の位相およびピッチ角変化振幅を変化させ、ロータ面に生じるモーメントを計測した.また、空力 弾性解析コードである FAST を用いて準静的な数値解析を行い、実験値と比較することで解析の妥 当性の検証を行った.解析では、風車出力性能および周期的ピッチ制御によりロータ面に生じるモ ーメントを評価した.

4. 結果と考察

- (1) ロータ面に作用する推力は、定常ピッチ制御により大きさを制御できる.さらに、最適ピッチ角よりも小さいピッチ角において制御を行うことで、風車の出力変動を抑制できる.出力係数は最適ピッチ角で最大を示し、ピッチ角の過大過小いずれの場合も低下する.
- (2) 周期的ピッチ制御時の出力係数および推力係数は、周期変化の振幅によらずほぼ一定である.周期 的ピッチ制御によってロータ面に生じるモーメントは、ピッチ角の振幅と位相を変化させることで

作用する大きさと方向を制御できる.

(3) 周期的ピッチ制御を模擬する解析コードは、ロータ面に作用するピッチングモーメントおよびヨー モーメントを再現できた.解析結果は、実験値と同様の傾向を示すことから、本解析コードによっ て、様々なピッチ制御に対応するロータ空力荷重を予測できる.

5. 学会発表

Kensei Shimamoto, Yasunari Kamada, Takao Maeda, Yuta Okumura, Shigeo Yoshida, Load Control Acting on Rotor Blades of Two-Bladed Horizontal Axis Wind Turbine using Cyclic Pitch Change, Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, USB, 5p., 2017.

6. 研究組織

研究代表者	鎌田	泰成,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	准教授
研究協力者	前田大	、佳夫,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	教授
研究協力者	島本	健正,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	博士前期課程
研究協力者	佐藤	涼太,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	博士前期課程
所内世話人	吉田	茂雄,	九州大学応用力学研究所,教授	



図1 ピッチ角に対する推力係数の関係 (定常ピッチ制御)



図3 アジマス角に対するピッチ角の関係 (周期的ピッチ制御)

図2 ピッチ角に対する出力係数の関係 (定常ピッチ制御)



図4 ピッチ角に対するモーメント係数の関係 (周期的ピッチ制御)

# 大型垂直軸風力発電システムの空力-弾性-制御連成シミュレーションによる動的荷重解析

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.水平軸型タービンを用い た浮体式洋上風力発電システムの研究・開発は国内外で進められているが,垂直軸型タービンを用いた システムの研究も行われている.垂直軸型タービンは,増速機や発電機などの重量物を低位置に設置で きること,さらにはジャイロ効果による復元効果が期待できるなど浮体式洋上システムに用いた場合の 利点を有している.しかし,タービンの発生トルクや空力荷重が回転中に大きく変動するために,垂直 軸型タービンの空力-弾性振動特性,浮体の動揺特性,発電機トルク操作による回転数や浮体動揺の制御 特性が複雑に干渉することになる.そこで本研究では,浮体式垂直軸型風力発電システムの空力-水力-弾性-制御連成解析モデルの開発の前段階として,陸上用垂直軸型風力発電システムを対象とした空力-弾性-制御連成解析モデルを開発し,3枚翼直線翼垂直軸型風力タービンを用いたシステムの可変速運転 下(低風速域)および定速運転下(高風速域)での連成挙動と疲労荷重特性を解明した.

# 2. 垂直軸型風力発電システムの空力-弾性-制御連成解析モデル

構築した空力-弾性-制御連成解析モデルの概要を図1に示す.連成解析モデルは垂直軸型タービンの 空力サブモデル,弾性振動サブモデル,および制御サブモデルより構成され,非線形連立微分代数方程 式で表せる.垂直軸型タービンの空力特性は流入風速,ローター回転数,アジマス角,弾性要素の変位 などに対する非線形性が強く,その演算負荷が高い.そこで,弾性振動・制御サブモデルから算出した 弾性要素の変位を空力サブモデルに受け渡し,これに基づいて算出した空力特性を弾性振動・制御サブ モデルに引き渡す弱連成手法を採用する.

空力サブモデルでは、流入風速、弾性振動・制御サ ブモデルから得られたローター回転数、アジマス角、 弾性要素の変位に応じた空力特性を流管理論に基づい て算出する.弾性振動サブモデルでは、弾性要素の曲 げ振動およびねじり振動をモデル化する.曲げ振動に 関しては、弾性要素をオイラー・ベルヌーイ梁と見な してモード解析手法を適用する.タービン翼はストラ ット翼との接合部で支持された張り出し梁と見なし、 回転軸は片持ち梁と見なす.ドライブトレインでは、



図1 モデル予測制御のブロック線図

ねじり角を風力タービンと増速機を介した発電機のアジマス角差で表現する.制御サブモデルでは,可 変速運転および定速運転を行うための制御アルゴリズムに基づいて発電機トルクを算出する.

## 3. 連成挙動解析

3 枚翼の直線翼垂直軸型風力タービンを用いた陸上設置式システムを対象とする.構築した連成解析 モデルを浮体式洋上システムに適用することを視野に入れ,直径 86 m,翼長手方向長さ 103 m の大型風 カタービンを想定した.風速 12 m/s においてパワー係数が最大となる周速比は 3.19 であり,対応する 回転数 7.31 rpm を定格回転数とする.弾性振動に関しては、タービン翼のフラップおよびエッジ方向の 曲げ、回転軸の前後および左右方向の曲げ、ならびにドライブトレインのねじりを考慮した.曲げ振動 はいずれも 2 次振動モードまでを対象とした.



図2 乱流変動風況下での連成挙動

乱流変動風況(平均風速18m/s)下での連成挙動の一例を図2に示す.回転軸頂部の前後および左右 変位の正の値は,風下側および風上から見て左側をそれぞれ表す.タービン翼フラップ方向変位の正の 値は遠心方向外側を表す.定速運転下ではパワー係数が最大となる周速比よりも低周速比側に運転動作 点を持つため,ローター回転中の翼の迎え角変動が顕著になる.その結果,連成解析ではタービントル クが回転周波数の翼枚数倍で大きく変動し,ローター回転数にもこの周波数の変動が重畳する.この変 動は弾性変位の影響を受けて,剛体解析(Model-R)よりも弾性解析(Model-E)の方が小さくなる.ま た,回転軸頂部の変位はタービントルクの影響を受けて回転周波数の翼枚数倍で振動する.タービン翼 フラップ方向変位は,翼に作用する空力荷重変動が励振源となるため,回転周波数で振動する.タービ ン翼の上,下端は遠心方向外側に、タービン翼中心部は内側に変位する.さらに、回転軸基部の前後方 向曲げモーメントには回転周波数の翼枚数倍の変動が現れ、弾性解析では振動荷重によってその変動が 大幅に増大することを明らかにした.

# 4. 論文と学会発表のリスト

- T. Wakui, M. Yonesugi, R. Yokoyama, "Aero-elastic-control coupled simulation of a vertical axis wind turbine-generator system", Proceedings of the WindEurope Conference 2017, Paper No. PO286, 10 pages, 2017.11.28–11.30.
- (2) 涌井徹也,西岡拓哉,横山良平,垂直軸型風力発電システムの空力-弾性-制御連成解析(可変速運転下での疲労荷重分析),日本機械学会2017年度年次大会,Paper No. J0540304,5 pages, 2017.9.4–9.6,埼玉大学.
- (3) 涌井徹也, 西岡拓哉, 横山良平, 垂直軸型風力発電システムの空力-弾性-制御連成解析(高風速域での荷重変動解析), 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 468-471, 2017.12.6-12.7, 科学技術館.

## 高空風力発電の技術動向の検討

(株) TMIT・研究開発部・所長 首都大学東京・システムデザイン学部・客員教授

藤井 裕矩

要旨

風力エネルギー発電方法の新しい手法である、高空風力発電について研究集会を開催し、プロジェクトの遂行について議論を行った。本課題は世界的にも先進的な高度なプロジェクトであるため、 多方面からの新技術の開発について研究発表と意見交換を行った。

1. はじめに

本研究グループは、高空風力を利用した 風力発電の研究を主軸にして結集したもの であり、大学・会社・研究所における航空 宇宙技術ならびに風車技術に関して専門的 な学識と経験を持つ研究者たちを核として 構成したフロンティア技術に携わる知的工 学技術のセンターである。近年においては、 テザーを用いて高空の豊かな風力エネルギ ーを用いる技術がオランダやドイツ、米国 において開発され飛躍的に性能が向上して いる。この手法は、周回型のテザー型飛 翔体を用いることによって、メガワット 級の100m級の大型風車に匹敵する出力を



Fig.1 Airborne Wind Energy Conference 2017 発表スライド

持ち大きさ、重量、費用は100分の1程度に簡単化できると考えられている。この技術は台風時の被害を避け ることが出来るなど我が国に極めて適した手法である。オランダでは国家が積極的に支援して、3~4年後 に実用試作型に進めるとしている。本研究においてはこの技術を後追いしているスペインのカルロスIII世大 学と共同して技術情報を得るために1名を派遣し、さらに2017年にドイツで開催される高空風力発電会議 (Airborne Wind Energy Conference 2017 (/news/46-airborne -windenergy- conference-2017.html))にも1名 が参加し我が国での取り組みを報告し情報を収集し、合わせて国内での2回の全体集会において議論を行い、 高空風力発電技術の調査を試みた (Fig. 1)。

一方、九州大学応用力学研究所における共同研究の大きな枠組みとして平成22年度より「新エネルギー 力学」の分野が作られ、九州大学でも風力発電技術の研究開発にかかわっている。いま、共同研究の特定研 究「再生可能エネルギーの大規模導入技術に関する研究」の研究統括者である吉田教授の参加とともに研究 範囲を充実することにした。このため、九州大学応用力学研究所の共同研究として研究集会を開催し、高空 風力発電について議論を深め、我が国における本課題の進め方についてまとめた。 2. 高空風力を用いた発電に関する研究会議について、

研究会議は、今回科学技術館(千代田区、東京)において第6回全体会議を開催したほか、高 空風力の最先端の研究成果が発表される国際会議においても研究状況を公表した。

- 2017 年 10 月 5-6 日 AWEC(Airborne Wind Energy Conference)2017 (Freiburg) (国際会議における 研究発表)
- ▶ 2017年12月8日第6回全体会議(科学技術館)

◎「高空発電研究会」第6回全体会議(2017年12月8日)

「第6回高空風力発電研究会全体会議」&「第1回九州大学応用力学研究所特定共同研究「再生可能 エネルギーの大規模導入技術に関する研究」共同集会 &「第4回東京工芸大学・風工学共同研究 拠点・共同集会」

日時: 2017年12月8日(金) 場所:科学技術館

10時より16時30分まで 6F 第1会議室

議事

- 10:00-10:05 趣旨説明(藤井・吉田)
- 10:05-10:20 「高空風力発電と垂直風車」活動中間報告(藤井),
- \*風車とその周辺技術【司会:吉田】
- 10:20-10:35 近藤潤次(東京理科大)「5kW級小形風力発電と太陽光発電の出力変動の比較」
- 10:35-10:50 河合慶一郎、前田太佳夫,鎌田泰成,粕谷拓司,中井有沙,星野雄平(三重大)「直線 翼垂直軸風車の支持材に加わる荷重の計測」
- 10:50-11:05 涌井徹也,西岡拓哉,横山良平(大阪府立大学)「垂直軸型風力発電システムの空力-弾 性-制御連成解析」
- 11:05-11:20 原豊、奥谷将裕、田川公太朗(鳥取大)、吉田茂雄(九大)、住隆博(佐賀大)「三角翼バ タフライ風車の構造と流体力および相互作用に関する数値シミュレーション」
- 11:20-11:35 Tarek DIEF, 吉田茂雄(九州大), 「カイト風力発電の飛行経路の適応制御」
- 11:35-12:00 パネル「再生エネルギーの大規模導入技術:今後の展開」(座長 吉田)

〈昼食〉

- \*高空風力発電I 【司会:大久保(神奈川工科大)】
- 13:30-14:00 パネル:世界の動向(大久保、遠藤(九大)、Stroeks(オランダ大使館)

遠藤「AWEC2017と高空風力発電欧州事情」を中心に、

- 14:00-14:30 パネル:風車浮揚技術の課題(草谷(都立産技高専)、高橋(福井大))
- 高橋「連凧を用いた高空風力発電基礎実験」,草谷「インフレータブル凧」を中心に 14:30-15:00 パネル:風車技術(丸山(前田建設)、中嶋(大阪府大),藤井(TMIT))

藤井・中嶋「高空風力発電における風車技術」を中心に

<休息>

- \*高空風力発電II 【司会:丸山】
- 15:15-15:45 パネル: テザー方式の技術的課題(大久保、山本(都立産技高専)、大渡(Cosmotecs)、 三輪(三重大)

大久保「フィールドテスト報告」を中心に

15:45-16:15 パネル「高空風力発電:今後の展開」(藤井、中台(ジオスポーツ)、丸山、栗田(トラ イアス)、黒崎(再生可能エネルギー推進機構)

中台「フィールドテストの問題点と今後の進め方」を中心に 16:15-16:30 全体まとめ(関(東海大)、丸山)

# 3. 研究組織

研究組織を、表1に示す。

# 表1

藤井 裕矩	TMIT、首都大学東京	所長
大久保 博志	神奈川工科大学	教授
永尾 陽典	神奈川工科大学	教授
新川 和夫	九州大学	教授
関 和市	逢甲大学大学院	教授
内山 賢治	日本大学	教授
吉田 茂雄	九州大学	教授
草谷 大郎	都立産業技術高専	准教授
真志取 秀人	都立産業技術高専	准教授
山本 広樹	都立産業技術高専	准教授
髙橋 泰岳	福井大学	准教授
中嶋 智也	大阪府立大学	講師
遠藤 大希	九州産業大	助手
丸山 勇祐	前田建設工業	研究員
岩原 誠	(有)ザクシス	代表取締役
中台 章	ジオスポーツ (株)	代表取締役
大渡 賢治	(株) コスモテックス	
笹原雄二郎	(株) スーパー・サイエンス・テクノロジー	
Rob Stroeks	オランダ大使館 科学技術部	シニア・アドバイザー
黒崎 保秀	(社)日本再生可能エネルギー推進機構	
三輪 真吾	ナブテスコ	

4. 研究成果報告

\*学会発表

1)藤井裕矩、草谷大郎、「テザー型飛翔体の運動に関する基礎研究」、(社) 日本航空宇宙学会第48 期定時 社員総会/年会講演会、1C09、2017年4月13<sup>~</sup>14日、東京大学山上会館。

2) Hironori A. FUJII, Hiroshi OKUBO, Yasutake TAKAHASHI, Yusuke MARUYAMA, Tairo KUSAGAYA, Shigeo YOSHIDA, Kazuo ARAKAWA, Hiroki ENDO,Kenji UCHIYAMA, Kazuichi SEKI, and Takeo WATANABE"**HSWG(High Sky Wind energy Generation) on tethered system**"AIRBORNE WIND ENERGY CONFERENCE 2017, Freiburg, Germany 2017/10/5-6

3)藤井 裕矩,大久保 博志,遠藤 大希,丸山 勇佑,「高空風力発電の実証実験の試み」第39回風力エネ ルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-1、2017年12月6日・7日,科学技術館、千代田区、東京.
4)形川 雅文、近藤 智行、高橋 泰岳、「カイトとプロペラ式風車を用いた高空風力発電の試み」、第39

回風力エネルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-2、2017年12月6日・7日,科学技術館、千代田区、 東京.

5) 中嶋 智也、岩崎 稜太、植田 芳昭、「高空風車に使用することを想定した風力タービンに関する一 考察」、第39回風力エネルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-3、2017年12月6日・7日,科学技術 館、千代田区、東京.

6) 草谷 大郎、藤井 裕矩、関 和市、大久保 博志、真志取 秀人、髙橋 泰岳、山本 広樹、遠藤 大 希、冨田 匠、渡部 武夫、丸山 勇祐、田中 真里、笹原 雄二郎「高空風力発電用航空プラットホーム に用いる対称翼型カイツーンの検討」、第39回風力エネルギー利用シンポジウム、B5:高空風力発電B5-4、 2017年12月6日・7日,科学技術館、千代田区、東京.

5. まとめ

再生可能エネルギーにおける風力発電の将来的な手法として、高空の強い恒常的な風力を利用 する手法を含め、新しい風力発電の技術動向の検討を行った。研究について本年は全体集会として1 回、東京の科学技術館で開催し、学際領域における研究として本課題のメンバー間での理解を深め プロジェクトとしての可能性についてのまとめを進行した。さらに、海外においては高空風力発電 の世界的な最新成果が公表される AWEC2017 国際会議において研究成果を発表した。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究(研究集会)の助成を受けたものである。

# OVPE 成長条件下における GaN 非極性表面構造の第一原理計算

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

## 研究背景・目的

Oxide Vapor Phase Epitaxy(OVPE)法は固体副生成物が無く原理的に連続成長が可能 であることからバルク GaN の結晶成長法として期待されている[1]. しかしながら,原料中 に O 原子種を含むため O 不純物濃度が高いことが問題となっている[2]. 我々は OVPE 成 長における GaN 成長プロセスおよび O 不純物の結晶表面への吸着および脱離現象を明らか にすることを目的として第一原理計算による解析を行っている. その一環として本研究で は OVPE 成長条件下における非極性および半極性 GaN 表面構造の解析を行った.

## 計算方法

表面構造の解析には第一原理分子動力学プログラム STATE-Senri [3]を用いた. 理想表面 を基準として、その表面に Ga、N、H、O から成る原子・分子を吸着させた表面構造モデ ルを作成し、それらについて構造最適化計算を行った. その結果得られたエネルギー値を 用いて表面生成エネルギー $E_f = E_{tot} - E_{ref} - n_{Ga}\mu_{Ga} - n_N\mu_{NH_3} - (1/2 \cdot n_H - 3/2 \cdot n_N)\mu_{H_2} - n_0\mu_0$ を求めた. ここで、 $E_{tot} \ge E_{ref}$ は検討した各表面構造モデルと基準(理想)表面の全エ ネルギー、 $n_{(Ga, N, H, O)}$ は吸着原子数、 $\mu_{(Ga, NH3, H2, O)}$ は温度・圧力の影響を含めた原子・分子 のケミカルポテンシャルである[4]. 各表面構造モデルの表面生成エネルギーを比較して、 温度・Ga 圧力と安定な表面構造の関係を表面状態図としてまとめた.

## 結果および考察

図 1 と図 2 にそれぞれ非極性(11-20)表面と半極性(10-11)表面の結果を示す. 図(a)と(b) はそれぞれ O を考慮した場合としない場合の表面状態図を示している. グラフの縦軸は温 度, 横軸は Ga 圧力である. それ以外の条件として, NH<sub>3</sub>と H<sub>2</sub>の圧力はともに 0.1 atm, O 圧力は Ga 圧力の半分とした. 代表的な OVPE 成長条件を温度 1500 K, Ga 圧力  $10^{-2} - 10^{-3}$ atm とすると, 図 1 の結果から O を考慮しない場合は理想表面(図 1(b)中の ideal) が安定 であるが, O を考慮した場合は表面の Ga 原子に OH が吸着した構造(図 1(a)中の Ga 4OH+N 4H) が安定であることが分かった.

次に図 2 の結果より O を考慮しない場合には表面から配位数 2 の N 原子を取り除き(以降 N 欠陥と呼ぶ),表面の N または Ga に H が結合した構造(図 2(b)中の 4Nv+4N·H と 4Nv+Ga·H),または Ga monolayer の構造が安定であることが分かった. O を考慮した場合には N 欠陥の位置に O が結合した構造(図 2(a)中の 4Nv+4N·H+Ga·O)が広い範囲で安定であることが分かった.以前に行った極性面の結果も含めて結晶表面に吸着した O 不純物の脱離エネルギーを評価したところ,OH よりも O 原子の方が脱離エネルギーが大きく,約 7 eV のエネルギーが必要であること,特に半極性面の N 欠陥に取り込まれた O 原子が取り除き難いことが分かった.このように O 不純物の取り除き難さに面異方性があること

が O 不純物濃度の面方位依存性の原因の 1 つと考えられる.したがって,O 不純物が取り 込まれ難い面が表れる成長条件で成長させることで O 不純物濃度の低減が期待される.



図1(a)Oを考慮した場合と(b)Oを考慮しない場合のGaN(11-20)面の表面状態図



図 2(a) O を考慮した場合と(b)O を考慮しない場合の GaN(10-11)面の表面状態図

[1] M. Imade et al., J. Cryst. Growth **312**, 676 (2010).

- [2] Y. Bu et al., J. Cryst. Growth **392**, 1 (2014).
- [3] Y. Morikawa, Phys. Rev. B 51, 14802 (1995).
- [4] Y. Kangawa et al., Surf. Sci. 493, 178 (2001).

## 研究組織

研究代表者 河村貴宏(三重大)

研究協力者 柿本浩一 (九大応力研), 寒川義裕 (九大応力研)

## 研究成果報告

- "第一原理計算を用いた OVPE 成長中の半極性 GaN 表面構造の解析",河村貴宏,北本 啓,今出完,吉村政志,森勇介,森川良忠,寒川義裕,柿本浩一,第46回結晶成長国内 会議,28a-A02,2017.11.27-2017.11.29,ホテルコンコルド浜松
- "OVPE法によるGaN成長における極性および非極性GaN表面構造の解析",河村貴宏, 北本啓,今出完,吉村政志,森勇介,森川良忠,寒川義裕,柿本浩一,第9回ナノ構造・ エピタキシャル成長講演会,Th1-7,2017.7.13-2017.7.14,北海道大学

## 直線状海岸砂丘における風場特性に関する研究

## 東北大学災害科学国際研究所 有働 恵子

・目的

海岸に人工的に造成された直線状の砂丘は, 津波・高潮・飛砂等の災害発生時には自然堤防としての重要な役 割を有するものの, 造成後数十年で長さ100m程度の複数の小砂丘に分裂する例が報告されている(Udo et al., 2003). 分裂が生じれば防災機能が損なわれることから, これまで分裂箇所の修復が繰り返されており, 分裂のメカニズムを明 らかにすることは喫緊の課題である.申請者は, 既に応用力学研究所・内田孝紀准教授が開発した RIAM-COMPACT を用いた数値解析を行い, そのメカニズムの解明に取り組んでいる.予備的な検討を行い, 分裂点にお ける特徴的な風場特性などが得られてきている.本課題への RIAM-COMPACT の適用が有効であることを確認でき たことから, 本研究では共同研究を通して, より詳細な風場特性を明らかにすることを目的とする.

·研究方法

これまでの予備検討で RIAM-COMPACT を用いて得られた風場解析結果をもとに,必要とされる詳細な追加計算 および解析を行う.具体的には,境界条件において一定で与えている風向風速を変動させ,茨城県鹿島海岸の直線 状砂丘周辺の風場への影響を評価すること,また,現地計測により得られた長期的な風向風速データを解析し,その 結果をもとに可能な限り現地の条件に近い境界条件を与えて追加計算を行い,砂丘の分裂形状(図-1 参照)との関 連性について検討する.



図-1(左)茨城県鹿島海岸の砂丘周辺の空中写真および(右)砂丘地形の経時変化 (Udo et al., 2003)

·解析結果

図-2 に, RIAM-COMPACT を用いた,複数の風向風速条件下における直線状砂丘周辺の風場シミュレーション結果を示す.図より,砂丘頂部で風速が増大し砂丘背後で減速するという一般的な特徴に加えて,砂丘に対して斜めに入射する風向の場合には砂丘に沿った流れが発生していた.また,斜めから入射する風向の場合には、直線状砂丘に沿って複数箇所で砂丘背後における風速の増大が認められた.

・考察

現時点で,現地スケールの直線状砂丘周辺の風場データは存在しておらず,再現結果についての検証は困難であるものの,一般に確認されている特徴を再現した.また,風向が東南方向の場合には,Udo et al. (2003) により確認されている直線状砂丘の複数の分裂地点付近で,砂丘背後における風速の増大が認められた.Udo et al. (2003) によれば,直線状砂丘の分裂は砂丘背後から侵食が進行しており,本研究でそのメカニズム解明 の可能性が示されたことの意義は大きい.今後本結果の検証が必要であるが,現地スケールでの検証は困難 であることから,実験により検証を行うことを予定している.



図-2 RIAM-COMPACT を用いた砂丘周辺の風場シミュレーション結果

·研究成果報告

Characteristics of wind field over an artificial straight dune at Kashima coast, Japan, Proc. of Coastal Dynamics 2017 (2017), Kuribayashi, T., K. Udo, and T. Uchida.

LES simulation of wind field over an artificial straight dune (2017), Geophysical Research Abstracts, 19, EGU2017-1983, Udo, K., and T. Kuribayashi.

·研究組織

- 有働恵子 東北大学災害科学国際研究所 准教授 代表者·研究全般
- 栗林 司 東北大学大学院工学研究科 大学院前期課程1年 研究協力者・風場の数値計算
- 内田孝紀 九州大学応用力学研究所 准教授 所内世話人・風場の数値計算

# マルチロータレンズ風車構造体の強度剛性評価

## 鹿児島高専 小田原 悟

レンズ風車はコンパクトなリング構造を周囲に備え 1. 緒言 ている為、これを利用して垂直面内に複数配置の構造システムが 組まれている. それでも尚, 構造系としての耐風強度解析や支持 構造のブレークスルーが要求される. その際に着目される点とし て強度と剛性が挙げられる. この点をクリアー出来ればマルチロ ータレンズ風車の普及に大きく繋がる.アウタロータ発電機は主 軸が回転しない固定軸である.そうすると、レンズ構造体を上流 と下流から支持できる.一方、レンズ風車の構造上の欠点として レンズ構造体が軽すぎると空力フラッタを起こし易いことであ る. マルチレンズ型にすることで片持ち構造を改善出来る. マル チロータ風車では各風車ユニットにヨー機構, ナセルが不要にな りシンプルで軽量化できる.複数風車を垂直面内に組み上げて, 構造強度的に強風時の安定性が保証出来るかが重要な技術課題 である. 従って, レンズの素材として GFRP かアルミを採用し, 各風車の支持部材から検討し、複数配置の支持構造や中央タワー にどのように 3-7 個のレンズ風車を「ぶら下げる」かが重点検討 課題となっている.

そこで、本研究ではマルチロータレンズ風車の構造強度信頼性 確保の為に実際の構造物の強度や剛性が数値解析<sup>11</sup>通りの特性で あるかを計測実験により明らかにする.九州大学応用力学研究所 に建設されているマルチロータレンズ風車を風洞実験設備に固 定し、大きい風速場に曝されたマルチロータレンズ風車がどのよ うに振動し強度低下を起こすかに就いて実験的に調べる.

2.実験装置と実験方法 マルチロータ型レンズ風車の構造体 の複数個所にひずみゲージや加速度ピックアップを貼り付ける. 風洞に風車を固定して風速 10~15m/s の強風を再現する.風に曝 された風車構造体の応答を測定し,振動周波数から剛性を計算し, ひずみ変動波形から強度特性について診断する.構造体を頑強な ものにすると風向変化に対する応答が遅れる.構造体を軽量にす ると強度が低下する.なので,丁度の特性を持つ構造体を模索し 高信頼性のマルチロータレンズ風車を設計製作することを目指 す.また,ブレーキシステムを利用してブレーキによる衝撃で構 造体にかかる衝撃荷重を試験し<sup>20-3</sup>安全性の向上を確認する.

具体的には九州大学大型風洞設備を利用してマルチロータ型 レンズ風車及びモノポール型レンズ風車の加速度振動,ひずみ計 測実験を行った.図1に今回の実験で使用したマルチロータ型レ ンズ風車とモノポール型レンズ風車の画像を示す.画像の手前が 風上である.

2.1 **ひずみ測定** 図2に示すようにマルチロータ型レンズ風車 及びモノポール型レンズ風車にひずみゲージを貼り付けた.マル チロータ型レンズ風車の場合には、メイン支柱、横小型ロータ取 り付け軸、上小型ロータ取り付け軸の風上側に1つずつ、計3ヶ 所に4つの軸が交わるハブとの溶接点から13mmの位置に貼り付 けた.モノポール型レンズ風車の場合には、上部構造物とメイン 支柱の間の風上側に貼り付けた.

風洞内にマルチロータ型レンズ風車またはモノポール型レン ズ風車のどちらか1つを置き,風速を5,7,10m/sと変化させ,ひ ずみの波形をメモリーハイコーダで記録した.メモリーハイコー ダのひずみ計測チャンネルのローパスフィルタを10Hzに設定し, 風洞内の風速が目標値の±5%となってから記録を行った.

2.2 加速度測定 各レンズ風車に作用する加速度を計測する為 に,圧電型加速度検出器を支柱中央部にテープで固定した.固定 する位置は,マルチロータ型レンズ風車の場合は4つの軸が交わ るハブの上部に,モノポール型レンズ風車の場合は風車翼の回転 軸の上部とした.また,加速度検出器から得られた信号はメモリ ーハイコーダに出力され,そのデータを読み取ることにより加速 度を計測した.

実験ではひずみ計測時と同様に、風洞内にマルチロータ型レンズ風車またはモノポール型レンズ風車のどちらか1つを置き、風速を5,7,10m/sと変化させ、加速度変化の状況をメモリーハイコーダで記録した.測定の際は圧電型加速度検出器のレンジをAcceleration: HIGH に設定し、風洞内の風速が目標値の±5%となってから記録を行った.

### 3. 実験結果と考察

3.1 **ひずみ測定** 風洞設備を用いてマルチロータ型レンズ風車 及びモノポール型レンズ風車に加わる荷重を調べる為,風洞内で 各レンズ風車に発生するひずみを測定した.図3に測定により得 られたデータから作成したグラフを示す.風速を5,7,10m/sと変 化させていく毎に各構造物のひずみの値は大きくなり,加わる荷 重が増加した.

ひずみゲージ貼り付け位置は風上側である為,各レンズ風車は 風下側に引っ張られて曲げ荷重が作用し、メモリーハイコーダに 出力されるひずみの値は正の数となることが考えられる.しかし、 出力されたデータを元に作成したグラフを見ると、マルチロータ 型レンズ風車の場合、風速 5m/s において測定場所を問わずひず みが負の値となった.メイン支柱と横小型ロータ取り付け軸に関 しては、正負の値が両方計測されている為、この2か所には引張 応力と圧縮応力の両方が作用している.これは、空気が個々のレ ンズ風車を通過する前後に互いに干渉し、その際に生成された渦 が小型レンズ風車に当たり各支柱、軸の風上側に圧縮荷重が作用 したと考えられる.これに関しては、マルチロータ型レンズ風車 周りの流体の動きを解析する必要がある.風上側に圧縮応力が作 用する原因を特定することは現時点では困難である.

また,今回の実験では実験装置の都合上ひずみゲージを貼り付けた位置の断面積が異なる構造部材であった為,マルチロータ型 レンズ風車とモノポール型レンズ風車のひずみ計測から得られ た荷重を単純に比較することは困難であった.詳細な状況を比較 する為には支柱の構造を統一するなり新たに用意する必要があ る.

3.2 加速度測定 大型風洞設備を用いてマルチロータ型レンズ 風車及びモノポール型レンズ風車の振動特性を調べるため,風洞 内で各レンズ風車に作用する加速度を測定した.マルチロータ型 レンズ風車に関しては,ひずみ測定の都合上同じ風速で3回の記 録を行った.

図4にマルチロータ型レンズ風車の加速度を計測した際に得られたグラフを示す.それぞれの風速での3回の測定を平均した結果,風速 5/m/s の場合はロータ回転数 1970rpm(32.8rps),振動数 53.8Hz,風速7.5m/sの場合はロータ回転数 2927rpm(47.8rps),振動数 48.0Hz,風速10m/sの場合はロータ回転数 3810rpm(63.5rps),振動数 64.9Hz という値が得られた.

ー方,モノポール型レンズ風車の計測では,風速5m/sの場合ロ ータ回転数 1894rpm(31.6rps),振動数 31.7Hz,風速7.5m/sの場合 ロータ回転数 2850rpm(47.5rps),振動数 47.5Hz,風速10m/sの場 合ロータ回転数 3764rpm(62.7rps),振動数 61.3Hz という値が得ら れた.

また,各レンズ風車の固有振動数はハンマリングによって得られたグラフから算出した.マルチロータ型レンズ風車の固有振動数fn1はfn1 =8.79Hz,モノポール型レンズ風車の固有振動数fn2は

f<sub>n2</sub> =10.0Hz であった.表1 に示すように固有振動数と加速度振動数とはほぼ整数比の関係にある.

4. 結論 マルチロータ型レンズ風車にかかる荷重を実際の風洞を用いて計測し、風車の安全性、信頼性の向上を目指して、それらによるデータを分析した.得られた結果を以下に示す.
(1)風速増加に伴い各レンズ風車に生じるひずみは大きくなった.
(2)風速 5m/s において、圧縮ひずみが確認された.

(3) ロータ回転数と各レンズ風車の振動数はほとんどの場合 2.21%以内の割合で一致していたが、風速 5m/s においては一致が 見られず振動数が大きい結果になった.

(4) 風速 5m/s付近でマルチロータ型レンズ風車周辺の空気の流動 状況を解析する必要がある.

#### 参考文献

1) 永井 聡:マルチロータ型風車の基本構造に関する研究」,九州大学大学院修士論文, 2016 年度.

 2) 鶴永 隆太・小田原 悟・汪 文学・烏谷 隆:レンズ風車の短絡ブレーキ による翼への衝撃荷重計測,日本機械学会2016年度年次大会講演論文集, No. 16-1, J0310402, (2016)

3) 鶴永 隆太・小田原 悟・汪 文学・木戸 守:レンズ風車翼のブレーキに よる衝撃ひずみ測定,日本機械学会 九州支部第 69 期総会・講演会講演論 文集 No. 168-1, pp. 97-98, (2016)

4) Satoru ODAHARA : Effect of Variations of Yaw Angle on the Service Strains of Blade of Wind-lens Turbine, Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition, P-Wd-2-29, (2014)

5) Wen-Xue WANG • Terutake MATSUBARA • Junfeng HU • Satoru ODAHARA • Tomoyuki NAGAI • Takashi KARASUDANI and Yuji OHYA : Experimental Investigation into the Influence of the Flanged Diffuser on the Dynamic Behavior of CFRP Blade of a Shrouded Wind Turbine, Renewable Energy 78, pp. 386-397. (2015).

6) Peter Jamieson and Michael Branney : Multi-Rotors: A Solution to 20MW and Beyond?, Energy Procedia, (2012).



図1 マルチロータ型レンズ風車



図2 マルチロータ型レンズ風車へのひずみゲージ取り付け



# **表1**風速と回転数と加速度振動数

(a) ( <i>i</i> ) ( <i>i</i> )	ア主レンハロ	私中()勿口
風速	ロータ回転数	振動数
5m/s	32.83rps	53.82Hz
7.5m/s	47.78rps	48.00Hz
10m/s	63.5rps	64.94Hz

#### (b) モノポール型レンズ風車の場合

風速	ロータ回転数	振動数
5m/s	31.57rps	31.68Hz
7.5m/s	47.50rps	47.54Hz
10m/s	62.73rps	61.32Hz

## レーザドップラ流速計を用いた風車翼近傍流れの計測

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 要旨

風車スケールモデルを風洞内に設置し、レーザドップラ流速計を用いて風車周囲の三次元速度分布の 測定を行った.商用風車の運転状態を想定し、定格風速以下の最適ピッチ角での運転、および定格風速 以上のフェザリング状態での運転を再現した.これらの運転条件のもとに水平軸風車回転翼の翼端周り および風車周囲の速度計測を行い、翼に発生する揚力や翼端渦を解明した.

## 2. 序論

風車全体の流れ場および翼周りの流れ場は風車の空力特性に大きく関与しており、風車の発電効率及び 寿命等の性能を向上させるためには、風車翼周囲の流れの把握が必要である.また、風車の空力特性の把 握は、構造設計上も重要である.従来、様々な研究が風車ロータ翼の性能向上や風車ロータ翼周りの流れ の解明を目的とし行われたが、詳細な速度分布の測定から翼端渦を解析した成果は未だない.とくに、翼 端渦の挙動は後流内の速度欠損領域の広がりや速度回復に影響を与えると考えられ、より多くの知見を必 要とされている.

本研究の目的は,風車翼近傍の速度場,とくに後流の挙動に影響を与える翼端渦に注目し,レー ザドップラ流速計を用いて,三次元速度場を明らかにすることである.

# 3. 方法

本研究ではスケールモデル風車を風洞内で運転し、速度場に外乱を与えないように静止系に設置されたレーザドップラ流速計により三次元速度を計測する.レーザドップラ流速計による測定体積は約0.15mmの球形状であり、翼近傍の速度を高い空間分解能で計測する.静止系に設置されたレーザドップラ流速計の検査体積は空間的に固定されているため、翼回転中のアジマス角ごとの速度データを取得することより、翼に対する相対位置での速度を計測し、得られた速度データから回転速度を差し引くことにより翼に対する相対速度を算出する.また、回転中の翼は振動し、翼面と速度測定点との距離が変化するため、レーザ変位計により翼面に対する相対的な測定位置を正確に計測する.本研究では翼端渦の速度場を回転と同期した計測により明らかにする.

- 4. 結果と考察
- (1) 最適ピッチ角での運転では,翼が測定面を通過する場合,翼端付近の前縁付近で正圧面から負圧面 にまわり込む流れが確認できた.また,翼端付近の後縁が測定面を通過した直後において,渦が形 成された.この渦は翼端渦と考えられ,主流と風車後流の境界で下流に流される様子が確認できた.
- (2) フェザリング状態における翼周りの流れにおいても、最適ピッチ角運転と同様に翼端渦の形成が確認できた. 翼端渦が下流に流される軌跡は、最適ピッチ角運転の状態と同様に主流と後流の境界に位置するが、移動速度は速くなる.
- (3) 速度ベクトルから求めた翼端渦について,翼端から発生した渦は後流の拡大にともない,半径外側へ移動していることが確認できた.また翼端から発生した渦はロータ面から1D(D:風車直径)下流まで形状を維持したまま移動していることが確認できた.同様にフェザリング状態でも翼端渦は翼端から発生しているが,最適ピッチ角の運転状態と比較して渦の大きさは小さく,半径外側へ移動量が減少していることが確認できた.最適ピッチ角での運転状態と同様に翼端から発生した渦はロータ面から1D下流まで形状を維持したまま移動していることが確認できた.

- (4) 任意の半径位置における最適ピッチ角運転の揚力は, 翼全体にわたり測定の平均値と翼素運動量理 論の値は概ね一致するが, 翼端付近になると測定値が理論値を下まわり, 翼端渦の影響が顕著に表 れた.
- 5. 学会発表

Shumpei Ito, Yasunari Kamada, Takao Maeda, Measurement of Velocity Field around Rotor Blade of Horizontal Axis Wind Turbine by Laser Doppler Velocimetry, Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, USB, 5p., 2017.

6. 研究組織

研究代表者	前田オ	大佳夫,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	教授
研究協力者	鎌田	泰成,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	准教授
研究協力者	伊藤	駿平,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	博士前期課程
研究協力者	鶴見	豊,	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,	博士前期課程
所内世話人	吉田	茂雄,	九州大学応用力学研究所,教授	



図1 最適ピッチ角での出力曲線



図2 フェザリング状態での出力曲線



# 図3 最適ピッチ角での翼端渦の挙動

図4 フェザリング状態での翼端渦の挙動

## 風車・水車のウェイクに関する実験的研究

弘前大学北日本新エネルギー研究所 本田 明弘

# 序論

再生可能エネルギーの利用促進が叫ばれる中、大型施設では発電、つまり電力利用を目的とした機器開発と社会実装 が進んでいる。小型の再生可能エネルギー利用機器については、エネルギー製造コストが大型のものに比べて高くなる 傾向にあるため、研究開発の醸成度は大型のものほど高いとは言えない現状にある。その一方、海上や山岳部などの非 電化地帯において、生成したエネルギーをその場で消費する局所完結型のシステムとして利用価値が見込まれる。

我々は小型の垂直軸抗力式タービンを備えた風力ならびに海・潮流エネルギー利用システムの構築を目指している。 本研究では、実証試験に先駆けてシステムに供するタービンの基本性能の把握を目的としている。用いたタービンは、 ローテーションフロー型<sup>1</sup>と命名されたクロスフロー型に類するもので、流れに対してタービン上流側でブレードを順 方向に押す力に加え、内部で旋回流が形成されブレード内側を順方向に押す力によって回転する特徴を有する<sup>1,2</sup>。ター ビンは風車あるいは水車としての利用を考えており、パラメータ・スタディから利用形態の別による作動流体の影響に ついて評価した。

## 実験方法

本実験は、応用力学研究所地球大気動態シミュレーショ ン装置の大型境界層風洞で実施した。図1に垂直軸タービ ンの仕様(断面)と実験時の外観図を示す。タービンは直 径 250 mm、高さ 500 mm で 10 枚の円弧翼と軌道外径 390 mm の固定式直線導風板から構成される。周速比制御には 直流電磁ブレーキを用いた。計測にはあらかじめ校正した トルクメータや回転計、3 分力計を用い、実験風速U(m/s)に対して制御した周速比 $\lambda$ 、トルク値等から計算したパワ 一係数 $C_P$ 、分力計の入力値( $F_X, F_Y$ )から見積った抗力係 数 $C_D$ について評価した。レイノルズ数の見積りについて は、タービン直径を代表長さとした。

## 実験結果

図2は、風速10m/sにおけるパワー係数の測定結果を示 す。今回実験に供したタービンのパワー係数は、周速比 0.35付近を頂点として2次関数的に変化した。最大値(極 大値)は約0.09、曲線の外挿から無負荷時の周速比は0.7 程度であった。なお、無負荷時のタービン起動風速はおよ そ0.7 m/s であって、低風速からでも回転する抗力式ター ビンの特徴を呈している。

図3は抗力係数の周速比影響をまとめたもので、実験風 と順方向( $C_X$ )、ならびに直交方向( $C_Y$ )を示している。 順方向抗力係数は 0.23~0.25 の値を示し周速比に依存しな い一方で、直交方向は回転時に 0.02~0.03 と小さく、風の タービン直行方向へかかる力は小さい。また、周速比 0 で 抗力係数が 0~0.05 の値を示すことについては、停止姿勢



図 1 実験に用いた垂直軸抗力式タービンの断面形 状と実験時の構成機器の外観写真.



図2 風速 10m/s におけるパワー係数曲線.


の差(迎角の違い)による影響であるが、その値は小さい。

#### 考察

ほぼ同一仕様で導風板のないタービンについて風洞試験 を行った先行研究<sup>3</sup>では、最大パワー係数は0.065(周速比: 0.35)であった。パワー係数が1.4倍に増加したのに対し、 占有投影面積で1.6倍、体積で2.4倍となる点については、 導風板の巻き込み防止部材としての役割と合わせ、総合的 に考える必要がある。また抗力の評価から、実証機を固定 設置する際には、順方向の抗力係数から動圧を見積り、設 計指標として用いればよいと考えられる。

今回、風力ならびに潮・海流エネルギー利用システムに 用いることを前提として、風洞試験によってタービンの性

能評価を実施した。風速 10 m/s の風エネルギーは、流速 1.0 m/s の潮・海流エネルギーとおよそ等価である。その一方、 風速 10 m/s における本風車のレイノルズ数は 1.7 x10<sup>5</sup> であるのに対し、流速 1.0 m/s の潮・海流では 2.5 x10<sup>5</sup> (0.67 m/s で 1.7 x10<sup>5</sup>) である。データ量が少なく結果を定性的にも把握しきれていないためここでは示さないが、風速 7.5 m/s (Re: 1.2 x10<sup>5</sup>) ではパワー係数の極大値が 0.075 (周速比: 0.28) に低下することが確認されている。既往研究<sup>4</sup> でも類似する 報告は見られるが、本研究でも垂直軸型のタービンが回転することによりブレードのアジマス角が変化し、レイノル ズ数が一定でないことに起因してパワー係数曲線は変化したと考えられる。前述するレイノルズ数は、いずれもカルマ ン渦の発生する乱流領域であるが、風速変化、換言すればレイノルズ数増減の影響を受けて、パワー係数が正の相関を 示しながら増減することを踏まえれば、風洞試験において風速のみをパラメータとせず無次元量のレイノルズ数と複合 的な考察をもって水車性能の推定評価にフィードバックする必要があると考えられる。

#### 研究組織

代表者	本田明	<b></b> 躬弘	弘前大学北日本新エネルギー研究所・教授	
協力者	桐原 [	真二	弘前大学北日本新エネルギー研究所・教授	
	久保田	健	弘前大学北日本新エネルギー研究所・准教授	
	沈	健	弘前大学理工学研究科・大学院生	
	志田	崇	弘前大学理工学研究科・大学院生	
	大坂*	寽史	弘前大学理工学研究科・大学院生	

#### 謝辞

本研究は、株式会社日本パーツセンターから提供いただいた風車を用いて実施されました。そのご厚意に対して、こ こに感謝の意を表します。また、本研究で議論いただいた九州大学応用力学研究所の内田 孝紀先生、大屋 裕二先 生、渡邉 康一先生、松島 啓二氏、渡邉 公彦氏に感謝いたします.

## 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).
- 2. 大坂 将史, 久保田 健, 志田 崇, 沈 健, 南條 宏肇, 桐原 慎二, 本田 明弘, "OpenFOAM を用いたローテーション フロー・タービンのシミュレーション", 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, Vol. 39, pp. 452-455 (2017).
- 3. 志田 崇, 久保田 健, 本田 明弘, "揚水用ローテーションフロー抗力型垂直風車のシステム開発", 日本風工学会年 次研究発表会講演論文集, S-6-2 (4 頁)(2017).
- M. Takao, T. Maeda, Y. Kamada, M. Oki and H. Kuma, "A Straigh-bladed Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row", Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, pp. 379-386 (2008).

# 波浪中浮体の圧力場の面分布計測技術に関する研究

広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻 教授 岩下 英嗣

# 1. 研究目的

波浪中の浮体や船舶に作用する流体力や動揺の計測技術はある意味完成された技術となっているが,近 年の数値流体力学の進展に伴い,その結果を検証するためのより高精度な実験データが必要になって来 ているのも事実である.そこで切望されるデータとは,浮体や船舶に作用する流体力や,その外力を受け て生じる動揺など,いわゆる積分量としてのデータではなく,浮体や船舶が造波する波や物体表面の圧力 などの局部的な物理量であり,これらを計測・解析する新たな技術の開発が急務となってきている.

こうした背景を受け,本研究では,水槽実験において船舶や浮体の圧力分布の新しい計測技術を確立す ることを目的としている.昨年度,同テーマで研究を実施し,既に世界初となる表面全域での非定常圧力 分布計測に成功しており,今年度はその成果をベースに計測精度の向上を目的とする.

## 2. 研究組織

氏 名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科 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
片野 彬	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士2年	実験補助
大西 宏尚	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士1年	実験補助
原 健	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
谷口 拓也	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
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

# 3. 実験の概要

## 3.1 供試模型について

実験で使用したバルクキャリア船型を Fig. 1, Table 1 に示す.



Fig. 1: Bulker

Table 1: Bulker 主要目						
$L_{pp}[m]$	2.4000	$x_B(=x_G)[m]$	0.0510			
B[m]	0.4000	KB[m]	0.0662			
d[m]	0.1280	$BM_T[m]$	0.1016			
$\nabla[m]$	0.0983	$BM_L[m]$	3.2135			
$C_b$	0.8000	KG[m]	0.1080			
$A_w[m^2]$	0.8354	$\kappa_{yy}/L$	0.2500			

# 3.2 圧力計について

FBG センサーの仕組みを Fig. 2 に示す. FBG(Fiber Bragg Gratings) とは光ファイバーの中に回折格子を刻んだものである.入射光が FBG を通過する際,回折格子 (グレーチング)の間隔によって変化するブラッグ波長と呼ばれるある特定の波長を持った反射光を生じる (それ以外の波長の光は透過する).センサーが圧力や温度変化などによりたわみ変形すると,回折格子の間隔が変化し,ブラッグ波長も変化する.この原理を利用して圧力の測定を行う.

今回の実験で使用した歪みゲージ式圧力計を Fig. 3, FBG センサーを Fig. 4 に示す.船首尾のような曲率の大きな場所では 従来の埋め込み式圧力センサーは取り付け及び,計測が困難で あった.しかし,FBG センサーは小さく薄い上,データの伝達も



Fig. 2: FBG 圧力計計測原理

髪の毛ほどの細さの光ファイバーで行われるため,これまで困難であった場所での計測が可能である.また,1本の光ファイバーに複数のFBGを設置できるため、少ないケーブルで多点同時に計測が行える.本研究では1本の光ファイバーに最大18点のFBGセンサーを直列繋ぎしたものを使用する.昨年度の220点に加え、静水中航走時の水線に合わせて喫水線より上部にFBGセンサーを12点追加し計234点を28断面で設置した.(Fig. 5)比較用として,ひずみゲージ式圧力センサーを19点埋め込み,合計253点で圧力計測を行う.





Fig. 4: FBG 圧力計

Fig. 3: 歪みゲージ式圧力計





#### 3.3 水槽試験

運動計測試験については、速度なしの状態で向かい波、速度あり ( $F_n = 0.18$ )の状態で向かい波と追い波について、それぞれ波条件  $\lambda/L = 0.3 \sim 2.0$ の範囲で 8 パターン計測した.  $\lambda/L = 0.5, 0.8, 1.25$ の 波条件については速度有り,向い波の条件下で反復試験を行い,平均と標準偏差を算出した. 強制動揺試験 (Heave & Pitch) については、速度あり (Fn = 0.18)の向い波状態で  $\lambda/L = 0.50, 0.80, 1.25$  に相当する 動揺周期で 3 パターンをそれぞれ計測した. 波強制力試験についても強制動揺試験と同じ波条件で 3 パターン計測した. 船体運動はポテンショメータ,抵抗増加は歪みゲージを用いて計測している. 解析位置は船体表面圧力が船体中央とし、船体運動,抵抗増加を船体中央から  $x_G$ 離れた重心周りとしている. 運動計測装置設置図を Fig. 6. 強制動揺装置設置図を Fig. 7 に示す.

運動計測試験システム図をFig. 8 に示す.船体表面に取り付けられたFBG センサーは,光ファイバー を通してデータを伝達し,測定器に集約され PC2 で記録される.ひずみゲージ式圧力センサー,船体運 動 (surge, heave, pitch),抵抗,波振幅の計測値はそれぞれアンプ,フィルターを経由して A/D 変換器 へと集約される.水槽の中心付近のトリガーポイントを曳航電車が通過した際に両方の系にトリガーが 入り,データを PC1 に集めた後トリガーを基準に時刻合わせを行い計測値の解析を行う.



Fig. 8: 計測システム図

# 4. 結果·考察

## 4.1 正面向い波

本実験において数値計算の手法は、無限遠条件をパネルシフト法 (PSM) と簡易結合法 (SCM) によ り満足させたランキンパネル法 (RPM(PSM+SCM)) を用いている.速度ありの場合は EUT と Strip 法 の計算結果も示している.速度なしの場合にはグリーン関数法による計算結果を示してある.

#### 4.2 船体運動

Fig. 9 に速度なし, Fig. 10 に速度ありの船体運動を示す. 左から surge, heave, pitch の運動のグラフ で、横軸に $\lambda/L$ をとり、上段は縦軸にそれぞれの運動振幅の無次元値をとり、下段は入射波に対する位 相を取っている. 速度なしの実験結果は計算値と良く一致しているが,速度ありの結果は heave 運動にお いて  $\lambda/L = 1.25$  付近に同調点が見られ、RPM と EUT で値が大きく推定されている.



#### 4.3 船体表面非定常圧力

 $\lambda/L = 1.50$ の速度なし ( $F_n = 0.0$ ),速度あり ( $F_n = 0.18$ )で試験した時の非定常圧力の等高線図を Fig.11 にそれぞれ示す.速度なしと速度ありの両方とも計算結果と計測値の傾向が良く一致しているこ とがわかる.これを細かく見るために Ord. 0.5, 1.0, 5.0, 9.0, 9.5 での断面非定常圧力を Fig.12, Fig.13 に示す.グラフの縦軸は圧力の振幅の無次元値をとり,横軸はセンサーの位置  $\theta$  をとっている.速度な しでは,それぞれの断面で計測値と計算結果がほぼ一致している.一方,速度ありの場合は船尾側では 一致が見られるが,船首側で圧力値に差があることがわかる.また,船首部の水面付近で圧力振幅の1次 成分が小さくなるに従って,2次成分が大きくなっている.この原因として, $\lambda/L = 1.50$ の波条件では船 体運動が大きいため,運動が圧力値に影響を与えているものだと考えられる.



Fig. 11: 非定常圧力分布 ( $\lambda/L=1.50$ ,  $\beta = 180$  degs.)



Fig. 12: 非定常圧力分布 ( $F_n$ =0.00,  $\lambda/L$ =1.50,  $\beta$  = 180 degs.)



Fig. 13: 非定常圧力分布 ( $F_n$ =0.18,  $\lambda/L$ =1.50,  $\beta$  = 180 degs.)

#### 4.4 標準偏差

Fig.14 に向い波条件における λ/L=0.80 の FBG センサーとひずみゲージ式センサーより得られた非 定常圧力の振幅の平均値と標準偏差を示す.

青色,赤色の実線は,それぞれ FBG センサー,ひ ずみゲージ式センサーの平均値,黒色のバーは,標準 偏差を表す.両センサーの平均値の一致度が高く標 準偏差は,0.3以内であった.このことから,FBG セン サーの再現度が高いことが分かる.

# 4.5 波浪中の定常圧力分布 (Added pressure)





 $\lambda/L=1.25$ の向かい波条件における波浪中曳航試験の非定常圧力の定常成分 (In waves), 静水中曳航試験の定常圧力 (Calm), その差分 (Difference) の等高線図を Fig.15 にそれぞれ示す. これらを細かく見る ために特に差分の大きい船首付近の Ord. 9.750, 9.875 での断面分布を Fig. 16 に示す. これらより,船首 付近において水面近傍より上部で差分の発生を確認できる. また, 同調点付近  $\lambda/L=1.25$  では差分が最も 大きくなる. これは, 船体動揺に起因する波や波の撹乱が波浪中抵抗増加に影響していると考えられる.



Fig. 15: 波浪中航走時の定常圧力成分分布図 (*Fn*=0.18, β=180 degs.)



Fig. 16: 波浪中航走時の定常圧力成分 (*Fn*=0.18, β=180 degs.)

## 5. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す.

- 1. 反復試験によって標準偏差を算出することで取得データの再現性を確認した.
- 2. 抵抗増加に関わる圧力として複数計測で得られた平均値を用いて船体表面圧力の定常成分分布を 取得した. 特に水面上部にて, 圧力値が大きくなることが確認された.
- 3. 非定常圧力の1次成分,2次成分の取得により,水面近傍で1次成分が急激に減少し,2次成分が顕 著となることが確認できた.これに対し,線形理論は,水面近傍での圧力を大き目に見積もってい ることが分かった.

# REFERENCE

- 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) 岩下 英嗣,柏木 正,伊藤 悠真,関 裕太;周波数領域ランキンパネル法による低速/低周波数域での耐航性能計算,日本船舶海洋工学会論文集第24号,2016

- 3) 岩下 英嗣;周波数領域ランキンパネル法における無限遠条件の数値処理について,日本船舶海洋 工学会論文集第24号,2016
- 4) 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.

## 張架式風力発電装置の開発

福岡大学名誉教授 江崎 丈巳

• 目的

張架式風力発電装置の効率と安全性の向上のため可変翼ハブ機構の開発を行う。機構は、固定翼マ イクロ・小型風車の運転風域を大型並みに拡張するもので、用途に合わせ2種類を開発、大型風洞によ りその性能確認を行う。

・実験方法

本年度は、実験装置の設計・製作が間に合わないため実験を行えなかった。

・実験結果

なし

・考察

なし

·研究成果報告

なし

• 研究組織

福岡大学

補足;本年度は、張架式風力発電装置の概念展開とその有効性強調および大型風洞実験データの提示 により某企業で1億円の開発枠を設けてもらうことができた。昨年度暮れにはその約25%額で試作1 号機を完成させることができた。現在、装置は、連続運転でのデータを収集中である。 大島海峡における潮流パワーポテンシャルの季節変動

鹿児島大学理工学研究科(工学系) 山城 徹

#### 1. はじめに

九州南方海上にある奄美大島周辺海域(図-1)には潮流の 強い海峡や瀬戸が複数存在し,特に奄美大島と加計呂麻島の間 の大島海峡は九州離島の潮流発電の適地の一つとされている. 國里ら(2015年)によると,大島海峡の潮流パワーポテンシ ャルは海峡東部の待網岬沖で最も大きく,日平均値が170MW に達することが指摘されている.しかし,このポテンシャルは 水温,塩分一様の混合期を対象とした数値計算の結果であり, 成層期は混合期よりも小さくなることが予想される.したがっ て,潮流発電を実施する際は,半日周期や朔望周期の潮流変動 だけでなく,季節変動も把握しておくことが重要である.本研 究の目的は,大島海峡の成層強度による潮流パワーポテンシ ャルの違いを調べることである.

#### 2. 数値計算

潮流の数値計算は,3次元有限体積法数値モデル (FVCOM; Chen et al.,2003)を用いて実施した.計算領域 を図-2に示す.メッシュ幅は開境界で4000m,大島海峡で80m とし,鉛直座標はo座標系で20層に分割した.モデルの境界 条件では,海洋潮汐予測モデル(NAO.99Jb; Matsumoto et al.,2000)の主要8分潮を与えた.初期条件及び開境界条件, 海表面条件として与える水温と塩分は,北太平洋海洋長期再 解析データセット(FORA-WNP30)を利用した.1982年~



図-2 計算領域

2014年の33年間の日別平均値を計算し、冬と夏の代表としてそれぞれ2月と8月を選択した.

大島海峡に近い小湊検潮所(図-2)の2017年2月の実測潮位と比較すると、図示はしないが、計算 結果が観測結果と強い正の相関(相関係数:0.98)を持ち、観測結果を良く再現できていた.長期の定 地観測が奄美大島周辺海域では実施されていないので、FVCOMの水温、塩分の計算結果の妥当性は FORAの計算結果と比較することで検討した.大島海峡南東方地点(図-2の赤丸)の水温、塩分の鉛直 分布について、計算開始1日目と終了28日目の結果をFORAと比較して図-3に示す.2月について、 FORAの計算結果では、1日目、28日目ともに海面から100m深まで水温、塩分がほとんど一定値を示 し、十分な鉛直混合を現わしている.一方、FVCOMの計算結果について、1日目は海面から100m深 まで水温、塩分が一定で、鉛直混合を現わしているが、28日目には水温が50m以深で海面よりも明ら かに低く、FORAの結果ほど完全な鉛直混合を現わしていない.8月について、FORAの計算結果では、 1日目、28日目ともに30m~80m深にかけて水温、塩分躍層が現れている.FVCOMの計算結果につ いて、1日目は30m~80m深にかけて水温、塩分躍層が現れ、FORAの結果と一致している.28日目 ではFORAと比べると海面から100m深まで全体的に低温を示しているが、30m深から80m深の躍層



図-4 大島海峡待網岬沖 St.1 の 2 月(赤線)と 8 月(青線)の絶対流速の時系列

内の水温差は FORA とほぼ同じである.結局,2月の潮流 計算は完全な混合状態で行っていないかもしれないが,8月 の潮流計算は妥当な成層状態で行っていると推察される.

大島海峡 St.1 (図-1) の深さ 4m における 2 月と 8 月の 潮流の絶対流速の時系列を図-4 に示す. ほとんどの期間で 流速は 2 月の方が 8 月よりも大きい. 2 月と 8 月の絶対流速 の 28 日平均値はそれぞれ 0.70m/s, 0.63m/s であり, 平均し て 2 月の方が 8 月よりも約 11%大きいことが示された. 大島 海峡東部海域において 28 昼夜の平均潮流パワーポテンシャ ルを計算すると, 2 月, 8 月ともポテンシャルが最大となる 地点が待網岬沖に存在し, 2 月は 0.59 kW/m<sup>2</sup>, 8 月は 0.47 kW/m<sup>2</sup>をとり,2 月の方が 8 月よりも約 26%大きい(図-5).

#### 3. 結論

大島海峡で最大潮流の発生する待網岬沖では,平均すると, 流速は2月の方が8月より約11%大きく,パワーポテンシ ャルは2月の方が8月より約26%大きいことが示された.



# 4. 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/小牧弘幸,鹿児島大学/濱添洸也,九州大学/胡 長洪

# 低コストかつ高効率の潮流発電装置の開発研究

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

現在、潮流発電の実用化に関して最も大きな障害は潮 流発電のコストが一般の再生可能エネルギーのそれらに 比較して大きいことであるが、発電量が予測可能である ため信頼性は高いことが大きなメリットである。そのた め、スコットランド、ドーバー海峡、ファンディー湾な ど海外においてメガワットクラスの潮流発電装置の設置 が行われており、長崎県五島においても2MWの装置が環 境省事業で実証実験を行うことになっている。しかし、 日本においてはこれらの大型装置は設置可能な海域面積 は限られており、特に離島の多い九州では、五島以外で は使用できないことが潮流エネルギーポテンシャルに関 する最近の研究で分かってきた。

そこで、本研究では、離島の潮流に合わせて利用可能 な高効率な潮流発電装置の開発を行う。そのために大型 ディフューザ付きの水平軸タービンを提案する。これ は、九大応力研の大屋教授ら発明によるレンズ技術を利 用するものであるが、海中では浮力を利用することによ って大型化が可能であることに着目して開発を行う。さ らには、装置の設置コストおよびメンテナンスコストを 低減するために浮遊式装置を採用し、流速がゼロとなる 潮止り時に海面に浮遊してくるときに船で容易に回収可 能とする潮流発電システムである。この装置の開発を行 うために潮流中での装置の静的動的な安定性などを明確 にするために模型実験を行う。

#### 2. 低コスト浮沈式潮流発電システムの提案 2.1 低コスト実現のための浮沈式システム

潮流は6時間ごとに上潮と下潮を繰り返すため、通常4 回の潮止まりあるいは憩流が発生する。そこで、メンテ ナンス等で装置の陸揚げが必要となる場合にはこの憩流 時を利用して行うことを提案する。すなわち、Fig.1の ように装置が水面に浮かんで漂っている時に漁船等に頼 んで係留系から切り離し、装置を港に曳航することにす る。これによって、重力式海底設置型装置では不可欠と なる大掛かりな海上工事が不要となり、低コスト化が実 現できるものと予想される。

#### 2.2 低流速海域における高効率潮流発電装置

大潮時の最大流速が1.5m/s(3ノット)程度の海域にお いて潮流発電を実現するために、風力発電において既に 実用化されている「風レンズ」技術を活用することを考 える。風レンズの原理は、タービンの外側にリング状の ディフューザを配することによってタービンブレード位 置における流速を大きくして発電効率を上げるものであ る。風力発電の場合には地上からできるだけ離して高く し、支柱で装置全体を支えるために大きなディフューザ を用いるには限界があるが、本研究では、海水中の浮遊 システムなので大型のディフューザを用いることができ る。ただし、憩流時には海面に浮かぶ必要があるのでデ ィフューザを厚くして浮力を稼ぐようにする。



Fig.1 浮沈式潮流発電システムの概略





Fig. 2 浮沈式潮流発電装置

Fig. 3 模型の写真

Fig.2は、このようにして設計した「水レンズ」とも呼 ぶべき潮流発電装置の CG である。Fig.3は、今回自作し た模型の写真である。模型は、ディフューザの流入部、係 留ラインとの接続部を含む1対の整流翼、タービンおよ びナセル部などの構造部については3Dプリンターによっ て製作し、ディフューザの本体部については発泡ポリス チレンの板をドーナツ状に張り合わせた後、やすりなど で整形して製作した。

Fig.4 および Table 1 はその模型の主要目などを示す。

# 3. 模型実験による検証

#### 3.1 回流水槽実験結果

本研究では、まず流速と装置の深度との関係を求める ために回流水槽におい



291

Fig. 5は、模型のセットアップの概略図を示す。係留ラ インは市販のひも4本を用い、それぞれに係留点から 1.15mのところに中間シンカーを取り付けた。

実験においては、流速を変化させて模型の深度および 傾斜角を2台のカメラで記録し商用ソフト(DippMotion Pro)を用いて計測した。Fig.6は付加重錘の有無による 流速と模型の深度の結果であり、Fig.7は係留点の違い による流速と深度の結果である。付加重錘を後ろ側に装 着した方が模型のヒール角がゼロに近づき、より安定し た結果となることが分かった。

#### 3.2 曳航水槽(深海水槽)における実験結果

回流水槽実験では、潮流の特徴である上潮・下潮によ る流向変化に伴う模型の安定性などを実験できない。こ れを補完し、転流時の模型の姿勢変化などを観察するた めに曳航水槽における実験を行った。曳航水槽において は、静止した水槽上で曳引台車を往復運動させ、その相 対流速によって潮流を模擬した。そのため、水面下約 1.5mのところに仮底(LxB=5.2mx2m)を設けて潮流 発電を行う海域の海底を模擬した。曳引台車の速度は次 式を近似して行った。

 $U_T(t) = U_0 \sin(2\pi t/T) \tag{1}$ 

ただし、 $U_0 = 0.8 m/s$ 、T = 180 sとした。

曳航水槽における実験は以下の条件で行った。

- 1) 定常流 or 潮流
- 2) 潮流流向と係留系角度 0° or 10°
- 3) 中間シンカーの位置による緩係留 or 緊張係留
- 4) 規則波(Tw=0.9, 1.0, 1.1 s, Hw=5 cm)の有無

模型の深度および姿勢の計測は、水中ビデオによる撮影 と DippMotionPro による二次元画像の解析によった。 Fig.8 はその画像例であり、Fig.9 は周期1秒、波高5cm の規則波中の模型の動揺の記録の一例である。これらの 結果から、潮流が弱い場合には模型は水面に近いところ で浮遊し、波からの影響もある程度受けるが、流速が上が るとともに深度が大きなところに沈み、波浪による影響 はほとんど受けないことが分かる。従って、本潮流発電シ ステムは波浪に強いシステムであることが分かった。

#### 4. まとめ

本研究を通して以下の主な結論を得た。

- 肉厚大型ディフューザとロープ係留による浮沈式潮 流発電システムが潮流中で安定した動作をすること を模型実験によって確かめた。
- 2. 本システムは特に波浪に対する性能が良好である。



Fig. 8 曳航水槽における潮流実験



Fig. 5 回流水槽における模型のセットアップ



Fig. 6 付加重錘の有無による流速と深度の関係







Fig. 9 曳航水槽における潮流実験

研究組織

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	末吉 誠、小原健人(M2)
所内世話人	胡長洪

# 3本のインプラントはリスクか

#### 九州大学病院再生歯科・インプラントセンター 松下恭之

緒言: インプラント3本を上部構造で連結した場合に,中央のインプラント周囲に骨吸収 が起きやすいという症例が散見される.日本補綴歯科学会の診療ガイドラインでは、天然歯 による三点支持の問題に関して、中間支台を増員することが補綴装置の耐久性に問題が生じ るとして、支台歯の増員を避けるよう推奨している。インプラントにおいても3本のインプ ラントを連結することが中央のインプラントの機械的リスクを増加させるのであれば、設計 を再考する必要があろう。

本研究では、3本のインプラントを連結するにあたり、生じた不適合が骨内応力に影響しているのではと仮説をたて、三次元有限要素法を用いて 3本インプラントを連結した場合の影響について検討することを目的とした。

Ⅱ材料および方法:

緻密骨と海綿骨とからなる二層構造の下顎骨(高さ23mm,幅11mm,長さ30mm)に 3本のスレッドタイプインプラント(径4mm,長さ10mm)がインプラント間距離3mmで埋 入された状態を想定した.上部構造はチタン製のブロック(長さ24mm、高さ5mm、幅 8 mm)とし、インプラント上に連結したアバットメントに設置した。各構成部材を連続状態 とした有限要素法モデル(以下,適合モデル)を作成した.節点数170343,要素数974832 である。計算に用いた各材料の機械的性質を表1に示す。数値はTadaらのものを参照した。 荷重条件としては、宮本らの報告を参照に下顎骨底面を完全拘束し、上部構造の上面に100 Nの垂直均等分布荷重を付与した.

次に中央のアバットメントと上部構造の間に 30µm, 60µm, 100µm の間隙を有するモデ ル(以下,不適合モデル)を作成した.スクリュー締結によってアバットメントと上部構造 とが接触した状態を想定し、中央のインプラントと上部構造とが接触するまで強制変位させ、 上部構造の変形が戻るのを待った 上部構造の変形が戻ると、上部構造とインプラントを接 触させていることで、上部構造がインプラントを引っ張り上げる状況となる。その後、適合 モデルと同様に、下顎骨底面を完全拘束し、上部構造の上面に 100Nの垂直均等分布荷重を 付与した.

評価にあたっては、骨内の最大相当応力値を用いた.なお本解析モデルの作成および解析 にはメカニカルファインダーVer.8.0(計算力学研究センター、東京)を用いた.

#### Ⅲ結果

適合モデルでは、3本のインプラント周囲骨内の最大相当応力値に大きな違いは認められ なかった.一方、不適合モデルでは、いずれも中央のインプラント周囲に高い応力分布が認 められ、不適合が大きくなる程、高い応力値となることが認められた.最大応力値について 比較すると、適合良好な場合には、2MPa ギャップが 30,60、100μmの際にはそれぞれ 30MPa 57MPa 98MPaの際にであった。

IV考察

3本のインプラントの中央に骨吸収がみられる症例は多いようにも思われるが、統計的に 確認された報告はない。連結により中央部分は清掃不良となりやすいなどの生物学的状況も 中央インプラント周囲に骨吸収が見られる原因となっていると考えれられるが、力学的にも 原因があるのか?といった疑問が生じる。 この臨床的疑問に関しては、天然歯においても すでに議論がなされている。ガイドラインでは 6 欠損に対し、④⑤6⑦のブリッジとする か、4を単冠とし、⑤6⑦のブリッジとすべきかといった臨床的疑問を取り上げ、三点支持 が二点支持に比べ、力学的に複雑な力が働くことを数値解析や in vitroの模型実験から演 繹し、支台歯の増員が補綴装置の耐久性に問題を生じさせるため、避けることを推奨すると 結論付けている。

岡山らは357を支台としたブリッジで二次元光弾性実験をおこない、中間支台歯相当部の歯槽骨に応力集中を認めることを指摘している。7は二根で、35は単根で、本研究で設定した均質な3本のインプラントが均等距離にあるといった状態とは異なっている。また荷重についても、3直上の荷重はなく、57付近への集中荷重となっているために、5の周囲骨に大きな応力が生じたと考えられる。

宮本らは3本支台のブリッジに繰り返し荷重を加え、支台ごとのセメントの保持力を評価 することで、力学的リスクの評価を行っている。④⑤6⑦では中間支台でのセメント保持力 の低下を認められたことから、中間支台歯のダメージとの関連性を示唆している。しかし本 論文と同様に均等距離、均等荷重とした場合には、3支台歯の保持力に差は見られず、3本 支台で問題なのは各支台間の距離が均等でない場合ではないかと推測された。

しかし、均等距離に埋入されたインプラント連結症例も多くみられる。天然歯とは異なり、 インプラント治療では3本が均等距離になるよう埋入できるのであれば、3本の連結デザイ ンは機械的リスクとはならないことが示唆される。筆者は中央のインプラント周囲の骨吸収 を認めた連結症例で、上部構造を外してみると、中央のインプラントの上部構造の内面とイ ンプラントのフランジ部にプラークと歯石様の石灰化物の沈着を認めた。このことから、上 部構造の不適合が一因ではないかと仮説を立てるに至った。

Jimbo らは、3 次元有限要素法を用いて、内部連結型のインプラントと上部構造間のギャ ップが大きくなると、周囲骨にはより過大な応力が認められたと報告している。Jimbo らの モデルでは単独の上部構造を想定しており、実際の臨床では 200 µm ものギャップは起きに くいと思われるが、3 本を連結する状況では、印象や作業模型作製時の石膏の膨張収縮など の影響により、口腔内では 100 µm程度の誤差は起きうる。0rmianer らは 50MPa が骨吸収に つながる閾値であるとしており、不適合を可及的になくすことで、中央のインプラント周囲 の骨吸収といった問題を減らしうるかもしれない。

結論: 3本のインプラントを上部構造で連結した場合に、適合が得られていれば、中央の インプラントに力学的リスクは認められなかった 中央のインプラントに不適合が存在す ると,ギャップ量に応じて周囲骨内の応力が増大することから,骨吸収が生じることが示唆 された.

# CVD ダイヤモンドおよびアルファ型酸化ガリウム半導体の結晶欠陥の生成機構の 解明とパワー素子特性との関連に関する研究

## 佐賀大学大学院工学研究科 嘉数 誠

1. 緒言

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は、バンドギャップが 4.8 eV で、パワー半導体として期待されている. 近年、Halide Vapor Phase Epitaxy(HVPE)法が進展し、高品質なエピ膜が高速成長できるようになった. 我々は、 Edge-defined film-fed growth(EFG)成長結晶に作製したショットキーバリアダイオード(SBD)の電 気的特性と転位との関連を明らかにしたが[1]、今回、HVPE 成長エピ膜に作製した SBD のリーク 電流と結晶欠陥の関係について調査した

2. 実験

実験では, EFG 成長 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>単結晶(001)基板上に, HVPE 法で 6~11 µm 厚のホモエピタキシャル膜 を成長した結晶を用いた. 裏面に Ti/Au オーミック電極を形成し,表面に 400 µm 径の Pt/Ti/Au 電 極を等間隔に形成した縦型の SBD を作製し,各 SBD の特性を測定した. 測定後,熱リン酸によっ てエッチングし,出現したエッチピットを微分干渉顕微鏡および原子間力顕微鏡(AFM)により観察 した.

3. 結果

Fig. 1(a), (b)に各々,逆方向,順方向電流特性を示す. SBD-A に比べ, SBD-B は逆方向リーク電流が高く,順方向のオン抵抗が高いことがわかる.エッチピットを観察した結果,EFG 成長結晶(001)面と同様に弾丸状ピットが両者の電極位置で見られたが,高リーク電流の SBD-B では Fig. 2 で示すような,500 nm ほど深さ方向に伸びた芯を先端付近に持つ弾丸状ピットが複数見られた.

4. 結論

HVPE エピ膜を用いた SBD において、芯あり弾丸状ピットが見られた。これは SBD のリーク電流との関連があると思われる.

### 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て行われました.本研究で議論 いただいた九州大学応用力学研究所、柿本浩一先生、寒川義裕先生に感謝いたします.

#### 参考文献

[1] M. Kasu, K. Hanada, T. Moribayashi, et al , Jpn. J. Appl. Phys. 55, 1202BB (2016).



Fig. 1. (a) Reverse and (b) forward *I-V* characteristics of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for low-leakage-current SBD-A and high-leakage-current SBD-B.



Fig. 2. AFM image and depth profile of an etch pit on Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) surface observed in high-leakage-current SBD-B.

# 29ME-12 風レンズ風車用の炭素繊維強化複合材(CFRP)の衝撃圧縮特性 に及ぼす負荷方向と温度の影響

岡山理科大学 工学部 中井 賢治

## 1. 緒 言

原子力発電所の事故以降、国内外において再生可能な新エネルギとして風力発電が注目されている。 九州大学では、エネルギ効率を高めた次世代風車「風レンズ風車」を開発し、山間部や海上に設置して、 様々な性能実験を行っている。今後、エネルギ効率を更に高めるためには、軽量でかつ高強度,高剛性 である大型風車を開発する必要がある。このような観点から、風車の大型構造部材に金属材料に代わっ て炭素繊維強化複合材(CFRP)の使用が計画されている。九州大学応用力学研究所のエネルギ変換工 学分野では、真空樹脂含浸製造(Vacuum assisted Resin Transfer Molding: VaRTM)法による CFRP の開発研究が新しいテーマとして開始されている。この手法を用いると、風車や集風体など複雑な大型 部材を製作することが比較的容易になる。風レンズ風車が、台風や大波・高波浪による衝撃を受けた時 の安全性を評価するために、CFRPの衝撃特性データが不可欠である。また、風レンズ風車を設置する 場所によっては、直射日光などの影響により風車の温度が上昇することもあるため、設計する際には温 度の影響も考慮する必要がある。

本研究の目的は、VaRTM 法により成形した直交積層カーボン/エポキシ複合材の主軸 3 方向すなわ ち繊維(1-),面内横(2-),板厚(3-)方向における静的・衝撃圧縮応力-ひずみ特性の温度依存性を、 実験的に評価することである。高ひずみ速度(最大 10<sup>3</sup>/s)での圧縮応力-ひずみ関係の温度依存性(T = 20,40,60,80 °C)を、ホプキンソン棒法<sup>1)</sup>及び電気炉により決定した。また、インストロン試験機 及び恒温槽を用いて、低ひずみ速度(10<sup>-3</sup>/s)における圧縮応力-ひずみ関係の温度依存性を求めた。 これらの結果を比較することにより、ひずみ速度と温度が主軸3方向における圧縮特性(極限圧縮強度, 極限圧縮ひずみ,極限圧縮ひずみ値までの吸収エネルギ)に及ぼす影響について考察した。

#### 2. 積層板と圧縮試験片の形状寸法

供試材として、VaRTM 法により成形された厚さ約 10 mm の直交対称積層([0/90]<sub>88</sub>)カーボン/エ ポキシ複合材を使用した。この積層複合材の強化繊維材、マトリックス樹脂の種類及び繊維体積含有率 を、表1に示す。この積層複合材から、最上・下面での繊維方向(1-d),面内横方向(2-d),板厚方向 (3-d)に対して機械加工により直径 d=8 mm の円柱状の静的および衝撃試験片を採取した。円柱状試 験片の適正な細長比(長さ1/直径 d)の制約上、以下のように形状寸法を決定した。静的圧縮試験片形 状について、ASTM E9-89a<sup>2)</sup>規格で推奨されている細長比  $l/d = 1.5 \sim 2.0$ となるように長さ(l=12 mm)を決定した(3-dについてのみ、板厚の制限によりl=8 mm とした)。一方、衝撃圧縮試験片形状 については、標準型ホプキンソン棒試験における適正な試験片細長比の範囲( $0.5 \leq l/d \leq 1.0$ )<sup>3)</sup>に入 るように、長さ(l=4 mm)を決定した。

表 1	本試験で使用し	た複合材の強化繊維材	マトリッ	ックス樹脂(	の種類及び繊維の	本積含有率
-----	---------	------------	------	--------	----------	-------

	Cross-ply carbon/epoxy laminated composite
Fiber	HTS40 F13 12K (Toho Tenax)
Matrix	Epoxy XNR/H 6815
Fiber volume ratio V <sub>f</sub>	0.56

## 3. 試験方法及び手順

3・1 静的圧縮試験 インストロン試験機 (モデル 5500R) 及び恒温槽を用いて、室温及び高温 (T = 20,40,60,80 °C) 下にて低ひずみ速度で圧縮試験を行なった。静的試験片を試験機の上下圧縮治具間 に挟み、一定クロスヘッド速度 1 mm/min で試験片が破壊するまで圧縮負荷を行なった。繊維 (1-),面 内横 (2-) 方向の圧縮試験 (図 1 参照) では、試験片端面での帚状変形 (end brooming) に引続き縦割 れが生じて非常に低い極限圧縮強度しか得られないので、この破壊モードを阻止するために円形 (d=8 mm) の孔をあけた高強度鋼リング<sup>4)</sup> (直径 30 mm,厚さ 3 mm,インコネル鋼 625 製) を試験片両端 に取り付けている (図 2 参照)。また、試験片温度を正確に計測するため、試験片に直接熱電対 (ST-23E-100-GW2-ASP,安立計器株式会社)を取り付けている。



図1 直交積層複合材の繊維(1-), 面内横(2-) 方向における静的圧縮試験の様子



図2 直交積層複合材の繊維(1-), 面内横(2-) 方向における静的試験に使用した鋼製リング

3・2 ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験 図3に示す標準型ホプキンソン棒装置及び電気炉を 使用して、室温及び高温下にて衝撃圧縮試験を行った。本装置は、主として入出力棒(JIS SUJ2, 直径 16 mm, 長さ1500 mm)と打出し棒(JIS SK5, 直径15.9 mm, 長さ350 mm)から構成されている。 衝撃試験片を入力棒と出力棒の間に挟み込んで取り付ける。棒/試験片間の摩擦の影響を軽減するため に、試験片の両端面には二硫化モリブデンを塗布している。試験手順及び測定理論の詳細については、 著者らの文献<sup>5)</sup>を参照されたい。また、静的試験と同様、試験片に直接熱電対を取り付けている。





#### 4. 試験結果及び考察

面内横(2-),板厚(3-)方向における、室温(T = 20 °C)及び高温(T = 60 °C)での静的・衝撃圧縮応力--ひずみ関係の比較を、図4に示す(繊維(1-)方向については、面内横方向と同じ傾向のため、 省略する)。どの負荷方向,温度においても、ひずみ速度の上昇と共に初期の傾き(初期係数),極限圧縮強度(最大圧縮応力値) $\sigma_{c}$ は増加しているが、極限圧縮ひずみ $\varepsilon_{c}$ は低下していることがわかる。また、ひずみ速度に関係なく、両負荷方向とも温度の上昇と共に $\sigma_{c}$ は低下しているが、 $\varepsilon_{c}$ は負荷方向により傾向が異なっている。静的及び衝撃における $\sigma_{c}$ , $\varepsilon_{c}$ ,圧壊までの吸収エネルギ $U_{c}$ を、温度に対してプロットした結果を図5~7に示す。



どの負荷方向,どの温度においても、 $\sigma_c$ は正のひずみ速度依存性を示している。しかし、 $\varepsilon_c$ と $U_c$ のひずみ速度依存性は負荷方向と温度によって傾向が異なる。また、温度,ひずみ速度に関係なく、板厚方向における圧縮特性値は、他の2方向におけるそれよりも非常に高い。これは、板厚方向では、母材であるエポキシ樹脂の固有の粘弾性特性による影響が大きいためである。さらに、低ひずみ速度

(10<sup>-3</sup>/s) において繊維,面内横方向では、温度 T が 60~80 °C の範囲において $\sigma_c$ の急激な低下が認められる。これは、母材であるエポキシ樹脂(XNR/H 6815)のガラス転移点( $T_g = 90$  °C)に近づいたため、母材が軟化して繊維の座屈が生じたためと考えられる。一方、板厚方向では、同温度範囲において $\sigma_c$ はほとんど変化していないことがわかる。これは、母材が軟化しても、直交している繊維に支えられているためであると考えられる。一方、高ひずみ速度(約 10<sup>3</sup>/s)での $\sigma_c$ は、どの方向でも温度上昇による急激な低下が認められない。これは、衝撃では試験片内を荷重ではなく、応力波が作用するため、繊維の座屈が生じる前に完全に圧壊したと推測される。今後、破壊モードに及ぼすひずみ速度,温度,負荷方向の影響を考察する予定である。

#### 5. 結 言

直交積層カーボン/エポキシ複合材の繊維(1-),面内横(2-),板厚(3-)方向の圧縮応カーひずみ 特性(極限圧縮強度,極限圧縮ひずみ,吸収エネルギ)のひずみ速度・温度依存性を、標準型ホプキン ソン棒法及びインストロン試験機を用いて評価した。その結果、次のような結論を得た。

- (1) どの負荷方向,温度においても、ひずみ速度が上昇するにつれて、極限圧縮強度はわずかに増加 するが、極限圧縮ひずみ及び吸収エネルギは低下する。また、ひずみ速度,温度に関係なく、板厚 方向の圧縮特性値は繊維・面内横方向のそれよりも非常に高い。
- (2) 低ひずみ速度では、繊維及び面内横方向における極限圧縮強度の温度依存性は板厚方向における それよりも非常に高い。しかし、高ひずみ速度では、極限圧縮強度の温度依存性は負荷方向による 影響はあまり認められない。

## 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ある。ここに記して、感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) H. Kolsky: An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, *Proceedings of the Physical Society*, Vol.B62 (1949), 676–700.
- ASTM E9-89a: Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1995), 98–105.
- G. T. Gray III: ASM Handbook, Vol.8, Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, Materials Park, OH (2000), 462–476.
- 4) J. Lankford: Compressive damage and failure at high loading rates in graphite fiber-reinforced polymeric matrix composites, *Advanced Composite Materials*, Vol.19 (1991), 553–563.
- 5) 横山 隆,中井賢治,稲垣智也:一方向強化カーボン/エポキシ積層複合材の衝撃圧縮破壊挙動:直 交異方性材料の主軸3軸における特性,材 料, Vol.58, No.11 (2009), 887–894.

#### 研究組織

- ・研究代表者 中井 賢治(岡山理科大学 工学部 機械システム工学科)
- ・研究協力者 ABUSREA, M. Ramadan(九州大学大学院 総合理工学府 物質理工学専攻)
- ・ 所内世話人 新川 和夫(九州大学 応用力学研究所 新エネルギー力学部門)

29 ME-13 機器要素に作用する突発的な負荷による損傷の進展について

琉球大学工学部 真壁 朝敏

1 緒言 自然エネルギーによる発電手法が確立され、大型の発電設備が設置されることが望まれる.電力安定供給は機器の安全性の問題とも関わっており、本研究室では金属疲労の観点から機器の安全性に関して検討している.本報告では、き裂が発生した部材の安全性に関する検討内容を紹介する.き裂が発生しても機器が即危険な状態に陥るとは限らない.しかしながら、き裂進展が加速すると予期せぬ破壊事故が生じる可能性がある.本研究ではそのような危険な荷重を検知する一手法を検討した. 2 素材および実験方法 用いた材料は炭素鋼 S15C と S45C であるが、両者で同様な結果が得られたので S15C の場合を示す.焼きなました素材を用いて Fig.1 に示す形状の試験片を製作し表面仕上げを行った.その後に 600℃で1時間真空焼きなましを行っている.引張圧縮方式で、応力比 R が・1 の一定応力(振幅 86MPa)でき裂を進展させる実験を行った.試験片は中央き裂タイプのものであり、試験部の板幅と厚さはそれぞれ 20mm と 4mm である.中央にスリットを加工し、その先端からき裂を発生させた.スリット長さを含めた初期き裂長さは 4mm である.本研究では、スリット付近に貼り付けたひずみゲージの信号を利用して、き裂進展の加速をもたらす危険荷重の負荷を検知する方法を検討した.









Fig.2(a)は、疲労試験中にひずみゲージから得た応力σとひずみεの関係を模式的に示したヒステリシスループである(ひずみは Fig.1 の右側の図に示すようにスリットの中央付近と端部付近で測定した). 本研究では、除荷弾性コンプライアンス法 <sup>1</sup>に基づき、ヒステリシスループの除荷段階における勾配 *C* を0.9σ<sub>max</sub>~0.6σ<sub>max</sub>の範囲で測定し、式(1)のようなひずみ関数 *H*を求めた.

$$H_i = \varepsilon_i - C\sigma_i \tag{1}$$

式(1)の下付き文字 i は, Fig.1 右側に示したひずみゲージの貼り付け位置の数字に対応している. この ひずみ関数を用いてヒステリシスループを変換すると, Fig.2(b)のようにヒステリシスループに変化が 現れる.そして,この変化によってき裂の開口点応力*σop*,あるいは閉口点応力*σcl*が測定できる.この き裂開口挙動によってき裂進展の加速をもたらす危険荷重の負荷の有無が判断できる.

き裂進展を加速させる危険荷重として、一定応力でのき裂進展の際にき裂長さ 2*a*(スリットを含む) が 6mm になった時点で過大荷重*σ<sub>ol</sub>*(単一引張過大荷重、引張・圧縮の対の過大荷重)を負荷した.本報 告では、過大荷重を負荷しない基本的なき裂進展データを Base とし、それと比較してき裂進展の加速 をもたらす過大荷重が負荷されたか否かを判定する手法を検討した.

3 実験結果および考察 Fig.3に過大荷重を負荷した試験片のき裂進展挙動を示す.縦軸はき裂半長 a,横軸は応力の繰返し数 Nである. Fig.4 はき裂進展速度 da/dNと応力拡大係数の最大値K<sub>max</sub>との関 係を示している.図中の矢印は過大荷重*σ<sub>ol</sub>を*負荷した地点を指しており,Base は過大荷重を負荷しない基本となる疲労試験結果である.Baseと比べて,過大荷重の大きさが113MPaの場合にはき裂進展は加速せず,185MPaの場合にき裂進展が加速し短命になり,その荷重負荷は危険であると判断される.



Fig. 3 Crack length a vs. Number of cycles N



Fig. 4 da/dN vs. Kmax

ひずみゲージを用いた除荷弾性コンプライアンス法<sup>10</sup>により,き裂進展過程のき裂の開閉口挙動を測 定した.最も短命となった過大荷重条件 185 MPa & -185 MPa で,危険荷重負荷前後において,ひず みゲージから得られたデータを Fig. 5 と Fig.6 に示した(スリット中央付近と端部付近の 2 か所のひずみ の測定結果を示した). Fig. 5 は危険荷重負荷前, Fig.6 は危険荷重負荷後のデータである. 図(a) は $\sigma - H$ ループであり,(b) はひずみ関数 Hの波形と応力波形である. Fig. 5 (a) から,危険荷重負荷前はき裂の 開口点,閉口点応力は除荷された点の繰返し応力 0 MPa 付近を示している(他の試験片においても同 様の傾向が見られた).しかし,危険荷重負荷によりき裂進展が加速する場合は,Fig. 6 (a) のようにき 裂の開口点,閉口点応力が圧縮側に大きく低下していることがわかる.このことは、本実験でき裂進展 が加速した直後は、き裂先端がほぼ繰返し応力の全域で開口していることを示しており、その理由はき 裂先端近傍に引張残留応力場が形成されたためであると考えられる.なお、き裂進展が加速しない場合 は、過大荷重の負荷前後においてき裂開閉口応力はほとんど変化せず、 $\sigma - H$ ループの形状にも変化は 見られなかった.

次に、ひずみ関数 Hを波形で連続的に示した結果を比較する. 危険荷重負荷前の Fig. 5 (b)では、き 裂の開口点、閉口点応力を示す Hの波形の折れ曲がり点と、応力波形の0 MPa となる地点とが対応し ていることがわかる. しかし、危険荷重負荷後は、Fig. 6 (b)のように Hの波形の折れ曲がり点が不明 瞭となり、応力波形に似た波形を示した. この波形の変化は、他の危険荷重負荷後にき裂進展が加速し た試験片においても確認することができた. したがって、き裂進展を加速させる危険荷重負荷の履歴を 検出するための一手法として、ひずみ関数 Hの波形観察の有効性を示すことができたと考えている.



参考文献 1) 菊川, 城野, 田中, 高谷, 材料, 25卷, 276号, pp. 899 - 903 (1976)

# 風・波併存時の係留浮体に関する模型実験およびシステム同定

代表者 神戸大学大学院海事科学研究科 橋本 博公 所内責任者 九州大学応用力学研究所 末吉 誠

#### はじめに

我が国の浮体式洋上風力発電を考える際には、台風や津波来襲時の安全性確保が重要な課題となる。 洋上エネルギー開発の発展には、長期にわたる運用の安全を保障するための安全性評価の確立が欠かせ ない。特に浮体式プラットフォームの位置保持に係る係留索の破断は深刻な漂流事故に繋がりうるため、 アンカーの把駐力や係留索の挙動を踏まえた浮体動揺の推定が重要となる。しかしながら、浮体動揺は 係留系と複雑に連成するため、安全評価のための数値シミュレーションモデルの構築は容易ではない。 こうした背景を踏まえて、本研究では係留浮体模型に対する波・風併存時の水槽実験を実施し、このデ ータを用いたシステム同定を行うことで、複雑な連成影響を取り扱うための数学モデルの確立を目的と している。

今年度は、システム同定に必要となる浮体模型の実験データ取得に向けて、基礎的な検討と簡単な浮 体動揺実験を行った。

## 神戸大学浅水槽の特徴

神戸大学の浅水槽は、完全排水状態から水深 1.5m までの範囲で水深を自由に変更可能であり、模型 寸法に対して比較的水深が浅くなる洋上浮体の実験に適している。また、ピストン式の造波装置にて一 方向の規則波、不規則波の発生が可能である。風力発電用の浮体式プラットフォームの水槽試験を実施 するためには、造波装置に加えて送風装置が必要となるが、対象浮体や水深などの実験条件に応じて送 風装置の設置位置や水面からの高さを変更できるように自由度を持たせてあることが特徴である。また、 水深 1.0m 以下までは人間が直接水槽内に出入りしての作業が可能であり、係留系を有する洋上浮体模 型の実験実施に適した環境となっている。このように、神戸大学の浅水槽は応用力学研究所の深海機器 力学実験水槽との相互補完によって、多種多様な模型実験の実施が可能となる。

## 移動式浮体の動揺計測

縮尺比の大きい浮体模型を使用した水槽実験では波長や波高が小さくなるため、造波機の仕様上の限 界に近い条件での造波となる。後ほど述べる移動式浮体模型の場合は縮尺比が 200 であり、最小の波長 および波高は 0.5m、5mm となる。巨大な垂直板をピストン運動させることにより造波を行うため、そ の精度について事前に検討を行った。その結果、図1のように、造波限界に近い短波長域でも規則的な 正弦波形が得られること、うなりはほとんど見られないこと、5mm という微小波高を十分な時間にわた り造波できることが確認された。

次にステレオカメラによる浮体の6自由度運動計測のため、曳航台車に取り付けられた昇降式副 台車に2台のカメラを取り付け、図2のように直方体フレームを設置することでキャリブレーショ ンを行った。水面近傍にマーカーを配置することができ、設置床に据え付けることから、水平調整 や回転角の絶対ゼロ度を決めることが可能である。また、カメラを設置する副台車は自動昇降式で あるため、高さ方向の仰角を容易に調整可能であることも特徴である。

今年度は浮体動揺計測の一例として、図3のような移動式風力発電浮体の平水中および波浪中の 曳航実験を実施し、曳航浮体の6自由度動揺が問題なく計測可能であることを確認した。



図1 周期 0.6 秒、波高 5mm の波計測データ



図2 キャリブレーション用の直方体フレーム



図3 移動式浮体の波浪中動揺試験

# まとめ

今年度は神戸大学の浅水槽において、浮体動揺計測の基礎的な検討を行った。今後は係留浮体模型を 用いた波・風中の水槽試験を実施し、得られた運動時刻暦を用いてシステム同定を行い、風、波、係留 およびそれらの相互影響を正確に再現できる数学モデルの導出を行っていく。

## 成果報告

なし

# 多層接結構造を有する多次元カーボン織物複合材料の開発

信州大学繊維学部

機械・ロボット学科 倪 慶清 九州大学応用力学研究所

汪 文学

1. 目的

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、比強度および比剛性において金属材料よりも優れており、軽量かつ高強度な材料である.それらの優れた特徴により、自動車、航空機およびスポーツ用品等に広く使用される.また、CFRP は繊維方向に弾性率および強度が高いので、材料設計の際に繊維の配置方法を変えることによって、自由な設計が可能である.従来のCFRP は炭素繊維を一方向に揃えて配置されたものや、一重の炭素繊維織物に樹脂を含浸させ、必要な厚みの分だけ積層して製造される.しかし積層構造であるため、板厚方向の強化が不十分であり、さらに、層間は樹脂の硬化による接着のため、層間じん性が低いという問題がある.

そこで本研究では、接結糸を含む多重織物に着目した. 接結糸とは、織物の組織内に含まれる、層と層 を繋ぐ糸のことである. その織物を利用して CFRP を作製すれば、一層あたりの厚みを増加させることが できる. その結果、設計した CFRP の板厚にするために必要な層数を減らすことができる. また、接結構 造を有する CFRP の層間じん性は、単純な多重織物を用いた CFRP より大幅に向上されることが予想され ており、新しい高じん性の積層板の開発が期待される.

#### 2. 実験手法

◆多重織物 多重織物は特注の高強度繊維対応型小幅織機を用いて製織した。今回は接結点と接結構造を 最適化するため、4種類の多重織物を作製した。炭素繊維はT300 3000-40Bを用いた.製織した構造の一例 はFig.1に示す.Fig.1は組織の緯糸方向に二つの基本組織を結合させたものを単位組織としており、従来の 組織と比較して接結糸の本数は同じであるが、その接結糸が層間を繋いでいる点である接結点の数のみが 二分の一となっている.この組織は25mmの織物中8本の接結糸を持つ.



Fig.1. Modified structure with half of connecting density.

◆CFRP作製 作製した多重織物を用いてVaRTM 成形によりCFRPを作製した.本研究では成形型を使わず に、2枚の離型フィルムの間に積層させた織物を配置し作製した.エポキシ樹脂および硬化剤はナガセケム テックス株式会社製のDENATITE XNR 6815およびDENATITE XNH 6815を用いた.作製した四重織物を中 央に配置し、その上下に東レ株式会社製トレカクロスC06343を4枚ずつ積層し計12層とした.作製した四重 織物の中央がき裂進展面となる.初期き裂導入のため、6層目と7層目の間にフロン工業株式会社製のテフ ロンPFAフィルム(厚さ25µm)を50mm挿入した.

◆破壊じん性評価 JIS K 7086に基づきDCB(Double Cantilever Beam)試験を株式会社島津製作所製の万能材料試験機オートグラフAG-20kNDを行った. DCB試験により各試験片のき裂進展過程のモードI層間破壊じん性値GRはJIS K 7086に基づく式(1)を用いて得た.

$$G_{IR} = \frac{3}{2(2H)} \left(\frac{P}{B}\right)^2 \frac{(B\lambda)^{2/3}}{\alpha_1}$$

ここで、P(N)はき裂進展過程の荷重、 $\lambda(mm/N)$ はき裂進展過程のCODコンプライアンス、B(mm)、2H(mm)は試験片幅および厚さ、 $\alpha_1(N^{1/3}/mm^{2/3})$ は近似直線の傾きである.

#### 3. 結果および考察

3.1 モード I 層間破壊じん性値 Table 1 に試験片 A から試験片 D の層間破壊じん性値を示す.表より, 層間破壊じん性値は試験片 D, 試験片 B, 試験片 C, 試験片 A の順に低くなっていることが分かった.接 結糸を持たない試験片 A と比較して接結糸を持つ試験片はどれも高い値を示し,またそれぞれの値も大き く差のあるものとなっている.

	Interlaminar fracture toughness (kJ/m^2)
Test piece A	1.5
Test piece B	6.7
Test piece C	2.1
Test piece D	10.2

Table 1 Interlaminar fracture toughness of for different modified structures.

#### 4. まとめ

本研究では、層間じん性を向上させる方法として多重織物に着目し、複数の層を連続的な接続糸を介して 層間を接合した織り方で一体化した多層構造の開発を行った.また、接結組織と接結点密度を変えた多重 織CFRPを作製した.その結果、多重織技術を用い、層間の接合効果のある接結糸を入れた多重織物を創製 することができた.また、き裂進展面に入れた接結糸は、CFRPのモードI層間破壊じん性値に対して非常 に効果的であり、き裂進展量を抑制することが出来た.一方、単純に接結糸の数が多くて接結されている 箇所も多い織物から作製されたCFRPの最大荷重や層間破壊じん性値が最大となるという訳ではないという ことが分かった.その原因として接結糸のどこに応力が集中す安いことが明らかにした.これらのことを 配慮した接結構造の最適化設計が必要であることが期待される.

#### 5. 研究組織

研究組織	1.	信州大学繊維学部機械·	ロボッ	ト学科	倪	慶清	(研究代表者)

2. 九州大学応用力学研究所 汪 文学

## 集流装置付き潮流発電装置の曳航実験

佐賀大学 海洋エネルギー研究センター 村上 天元

【要旨】

往復流型衝動タービンを装備した潮流発電装置模型による曳航実験を行い,流速の比,タービン効率 および実機出力等の性能評価パラメータに及ぼす集流装置形状の影響を検証した.その結果,ブリム付 き集流装置の場合に高い集流効果および高出力が得られることが明らかとなった.

【序論】

本研究の潮流発電装置は、風力発電で導入例がある集流装置をタービンの上流・下流の両側に有し、 左右対称形状をなすことで潮流の往復流において発電を行うものであり、タービンの回転面を水流方向 に向けるヨー制御のための可動部がなく壊れにくい特徴を有する.また、往復流型タービンには振動水 柱型波力発電用に開発された固定案内羽根付き衝動タービンを導入した.ここでは、集流装置3形状の 性能比較のために行った曳航実験の結果について報告する.

【実験方法】

実験は、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽で行った。潮流タービン試験装置(図 1) は、水槽の曳航装置に設置し、曳航速度を 0.8 m/s に保ち、タービン(ケーシング内径 *D* = 170 mm)の 回転速度を 15 rpm~80 rpm の範囲で段階的に変更して実験を行った。潮流タービン装置入口の軸流速度 vは、別途用意したピトー管を用いて、ロータ回転中心面から 1 m 上流側、水面から 0.35 m 下の位置で 計測した。タービン案内羽根入口の軸流速度 v<sub>a</sub> はロータ回転中心面から 95 mm 上流側のスパン中央で 測定し、タービン前後の壁面静圧差はロータ回転中心面から 60 mm 上流側および 60 mm 下流側で計測 した。また、タービンに加わる軸方向の力 *F*<sub>a</sub>、出力トルク *T* およびタービン角速度*w*を測定した。所定 のタービン回転速度毎の計測時間は 20 秒間で、サンプリング周波数は 20 Hz である。なお、軸方向の力 *F*<sub>a</sub>の計測に際して、タービン軸と AC 同期モータ軸のカップリングにはスラスト方向に前後できる可動 部を設けて、軸方向の力 *F*<sub>a</sub>がタービン部以外に働かないようにしてある。



衝動ロータは, 翼先端直径 169.4 mm, 翼先端隙間 0.3 mm, 入口(出口)角γ=50 deg., 翼枚数 Z<sub>r</sub>=23

図1 潮流タービン試験装置

枚である. また, ロータ前後 には設定角 $\theta$  = 37.5 deg., 厚 さ 1.5 mm, 羽根枚数  $Z_g$  = 24 枚の固定案内羽根を配置し てある. ハブ比はv=0.6 であ る.

集流装置(図 2)は、円錐 形状で開き角 31 deg.の Collector A, Collector A に半 円状のブリムを付けた Collector B,および円錐形状 で開き角 45 deg.の Collector Cの3種類である.

#### 【実験結果】

図3は実験結果であり、(a)は流速の比  $v_a/v$ 、(b)はタービン部のみの効率 $\eta$ 、(c)はタービンケーシング 内径 D = 10 m、周囲の軸流速度 v = 1.7 m/s(佐賀県唐津市加部島沖で観測された最大流速)とした場合 の実機の予想出力  $P_{FS}$ を示す.横軸は流量係数 $\phi$  (= $v_a/U^*$ ,  $U^*$ :翼先端における周速度)である.なお、 図3の Without collector は上流・下流側の集流装置が無い場合を表している.図3(b)に示すように、タ ービン効率のピーク値を示す流量係数に多少の差異が見られるものの、集流装置形状および集流装置の 有無によらず、いずれの場合も概ね $\eta = 0.42$ の効率の最大値が得られた.一方、図3(a)の流速の比にお いては、Collector B の場合に最も高い値を示し、最大タービン効率を示す流量係数 $\phi = 1.34$ で、 $v_a/v =$ 0.72 であった.図3(c)の実機の予想出力においても、Collector B の場合に最も高い値を示し、最大値は  $P_{FS} = 97 \text{ kW}$ であった.さらに、Collector C の場合と比べて、Collector B の場合はタービンに加わる軸方 向の力  $F_a$ が小さかったことからも、Collector B が最適と判断された.



Collector A

 Collector B

 図 2 集流装置付き潮流タービン模型





図3 集流装置付き潮流タービン模型の曳航実験結果

【成果報告】

# なし

#### 【研究組織】

研究代表者	村上 天元	佐賀大学 海洋エネルギー研究センター
研究協力者	永田 修一	佐賀大学 海洋エネルギー研究センター
研究協力者	今井 康貴	佐賀大学 海洋エネルギー研究センター

## AIN 系窒化物半導体の基板作製と結晶成長の熱力学解析

Study on Thermodynamics of Crystal Growth and Fabrication of AlN Nitride Substrates

代表: 三宅秀人(三重大学大学院 地域イノベーション学研究科) 所内世話人: 寒川義裕(九州大学 応用力学研究所)

# <u>背景</u>

窒化物アルミニウム(AIN)厚膜(テンプレート)の開発を目的とする。AIN 基板および関連材料(AlGaInN薄膜)を用いたデバイスの応用例として、電子線励起およびLED(Light Emitting Diode) による深紫外光源が挙げられる。この光源ではAlGaInN 混晶の組成を制御することで、単色発光の みでなく、スペクトル幅の調整も可能な発光特性が期待できる。また、端成分のAIN、GaN は次世 代パワーデバイス用材料としても応用可能であり、電力の高効率利用、変換効率の低減に資する材 料である。本研究は継続課題であり、昨年度は AlGaN/AIN の成長条件について熱力学解析を基に した理論解析手法により検討した。今年度は同手法を AlInN/AIN および AlInN/GaN 成長条件の解析 に展開した。

#### 研究方法

本研究では、AlInN/AlN 薄膜の高品質化・組成制御を目的として熱力学解析による成長条件の検 討を行った。AlInN 薄膜は一般に有機金属気相成長(Metalorganic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE)法 により作製される。ここで、AlInN のエンドメンバーである AlN と InN の分解温度を比較すると後 者の方が低く、この材料特性に起因して成長温度の上昇とともに In 取込み効率が低下することが 知られている。また、Al-N 結合長よりも In-N 結合長の方が長いため、AlN 基板上にコヒーレン ト成長した AlInN は基板面に平行な 2 次元の圧縮応力を受けている。ここで「コヒーレント成長」 とは、下地基板の格子定数を引き継いで成長することである。GaN 基板を用いた場合、基板に格子 整合する Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N (*x* = 0.17) よりも高 In 組成では圧縮応力を、低 In 組成では引張応力を受けるこ とになる。本研究では、(1) 2 次元の圧縮(引張)応力を受けた AlInN の有効混合エンタルピー を原子間ポテンシャル計算により求め、(2) その物性値を用いて熱力学解析を行うことにより基 板の格子拘束を考慮した気相一固相関係の相図を作成した。

## 研究結果および進捗状況

図1に流入 III 族原料比 $p_{In}^{0}$ :  $p_{Al}^{0}$  = 2:1としたときの成長温度に対する AlInN 薄膜中の InN 組成比 x の変化を示す。基板条件として GaN または AlN 基板上に成長する場合と、格子緩和を起こして成 長している場合(Bulk)を仮定した。on GaN の InN 組成比の成長温度依存性の計算値は Chichibu らの 実験値 <sup>1)</sup>と定量的に一致している。どの基板条件においても成長温度が上昇するにつれて InN 組成

309

比が減少しているのは、In の平衡蒸気圧が高く高温では In が蒸発しやすいことを反映している。x > 0.17 の領域では on GaN は bulk よりも低い InN 組成比となっている。これは GaN 基板上の AlInN 薄膜は基板から圧縮応力を受けるため、原子半径の大きな In 原子が優先的に排出されることを意味している。一般的な成長温度 650℃では on GaN で  $x \sim 0.30$ 、bulk では  $x \sim 0.67$  と計算されており、 Chichibu らの実験で見いだされた組成変調をよく再現している。成長温度 680 ℃ ~ 830 ℃の bulk 条件では一つの成長温度に対して 2 つの InN 組成比が存在し、組成不安定となることが示唆されているが、Chichibu らの実験でも格子緩和を起こした領域で組成が揺らぐことが確認されている。<sup>2)</sup>



図1 成長温度と AlInN 薄膜中の InN 組成比の相関。

本研究では、基板からの格子拘束を考慮した熱力学解析を行い実験条件の変化に対する InN 混晶 組成の変化を計算した。InN 組成の成長温度依存性、格子拘束による組成変調、格子緩和時に起こ る組成不安定などの解析結果は Chichibu らの実験結果と一致していた。ここで得られた知見は AlInN 薄膜成長条件の最適化を行う上で有用である。

参考文献

- 1) S. F. Chichibu et al., J. Appl. Phys. 116 213501 (2014).
- 2) S. F. Chichibu et al., *E-MRS 2017 Fall Meeting*, P10.2.

# 浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御による出力変動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

風力発電の世界的な普及を推進するためには洋上風力発電の導入が不可欠である.特に、大水深海域 の広大な日本では浮体式洋上風力発電への期待が高まっている.浮体式洋上風力発電システムでは高風 速域において定格出力を保持するために翼ピッチ操作を行うと、風力タービンによる負性減衰効果の影 響を受けて浮体動揺が増大する.これまでにも、トレードオフ関係にある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いる.しかし、風速や波高変化が浮体式洋上風力発電 システムに対して外乱として作用するため、システムの出力に応じたフィードバック制御のみでは、出 力変動と浮体動揺の抑制が十分に行えない場合がある.そこで本研究では、有限時間先の制御対象シス テムの推定挙動に基づいた多変数制御挙動を最適化するモデル予測制御手法を開発した.特に、予測区 間の挙動を推定するために用いる内部モデルの特性が線形化を行う動作点(風速)によって変化するこ とに着目し、コスト関数における操作量に対する重み係数を流入風速に応じて可変とするスケジューリ ング手法の導入効果を空力-水力-弾性連成解析を通して明らかにした.

# 2. モデル予測制御手法

浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御手法のブロック線図を図1に示す.現在のシステム出 カ(制御量)の計測値とその設定値,現在の制御入力(操作量),さらには予測区間における外乱入力予 測値を与条件に,予測区間の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入力を決定する最 適化問題を解く.内部モデルによるシステムの状態および出力の推定挙動,システム出力および制御入 カの変化範囲などを制約条件として考慮する.得られた最初の時間ステップの制御入力のみを実際に適 用し,次の制御周期に新たな与条件の下で最適化問題を解く後退ホライズン手法を採用する.

予測区間におけるシステム出力は状態空間方程式で表す内部モデルを用いて推定する.状態空間方程 式は平衡点でシステムの挙動を線形化することで導出する.内部モデルにおける状態変数は,システム 出力計測値,制御入力,外乱入力計測値よりカルマンフィルタを用いて推定する.システム出力に対し てはその上・下限値制約を,制御入力には上・下限値制約に加えて一制御周期経過後の変化量の上・下 限値制約を考慮する.さらに,現在のシステム出力の測定値および制御入力を初期条件とする.また, ライダによる風速場の計測より算出した予測区間における外乱入力予測値も初期条件として入力する.

最小化すべきコスト関数は,予測区間における 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ノルム,および スラック変数の2乗値の重み付け和とし,重み 係数は外乱入力(流入風速)に基づくスケジュ ーリング係数に応じて可変とする.

定式化した最適化問題は二次計画問題に帰着 し, MATLAB Model Predictive Control Toolbox を 用いてコード化して解く.



図1 モデル予測制御のブロック線図

# 3. 空力弾性解析による動特性評価

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.状態空間方程式の線形化は流入風速 18 m/s,ローター回転数 12.1 rpm (定格値),および静水下で行った.コスト関数におけるスケジューリング係数はタービン流入風速の 空間平均値とし,システム性能に対する感度の高い翼ピッチ変化量の重み係数を変化させた.



図2 乱流変動風況および不規則波高変化時の浮体式洋上風力発電システムの挙動

乱流変動風況および不規則波高変化に対する浮体式洋上風力発電システムの挙動解析例を図 2 に示 す.スケジューリング手法を用いることで,翼ピッチが大きく操作され,発電機トルクの変動量が減少 する.その結果,重み係数を固定したモデル予測制御およびローター回転数のフィードバック制御のみ を行った場合に比べて,ローター回転数と浮体ピッチの変動を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, D. Miyanaga, R. Yokoyama, "Sensitivity analysis of weight coefficients of model predictive control in a floating offshore wind turbine-generator system", Proceedings of the WindEurope Conference 2017, Paper No. PO285, 10 pages, 2017.11.28–11.30.
- (2) 涌井徹也,宮長大輔,横山良平,モデル予測制御による浮体式洋上風力発電システムの出力変動および動揺抑制(コスト関数における重み係数の感度分析),日本機械学会2017年度年次大会,Paper No. J0540202, 5 pages, 2017.9.4–9.6,埼玉大学.
- (3) 涌井徹也,宮長大輔,横山良平,モデル予測制御による浮体式洋上風力発電システムの出力変動および動揺抑制(運転条件に応じた可変制御パラメータの導入),第39回風力エネルギー利用シンポジウム,pp.319-322,2017.12.6-12.7, 科学技術館.
- (4) 宮長大輔, 涌井徹也, 横山良平, モデル予測制御による浮体式洋上風力発電システムの出力変動および動揺抑制(流入風速に応じたゲインスケジューリングの導入), 日本機械学会関西支部第 93 期定時総会講演会, pp. 461-462, 2018.3.12-3.13, 摂南大学.

# ケステライト型化合物半導体太陽電池基板の作製と電気物性評価

宮崎大学 工学部 電子物理工学科 永岡章、富永姫香、今井正人、吉野賢二

# 1. はじめに

多元系化合物 Cu<sub>2</sub>ZnSn(S, Se)<sub>4</sub> (=CZTS, CZTSe, CZTSSe)は、In や Ga 等のレアメタ ルを含まず、且つ構成元素が地球上に豊富にあり、S/Se 比をコントロールする事で バンドギャップも 0.9~1.5 eV と制御可能であり、光吸収係数も Si の 10 倍程度大きい という観点から低毒素低コスト材料として注目を浴びている。現在 CZTS 系太陽電 池は、CZTS:8.8%<sup>1)</sup>、CZTSe:11.6%<sup>2)</sup>、混晶である CZTSSe:12.6%<sup>3)</sup>という変換効率が達 成されている。しかしながら、実用化に向けて更なる変換効率向上のため応用研究 が活発に報告される一方で、正確なバンドギャップや光級数係数の値など基礎物性 に関する報告は非常に少ない現状がある。工業分野において技術的な問題は、時代 経過とともに解決されることが多く、対象とする物質の本質を理解し更なる発展の ために基礎研究から議論することは必要不可欠である。我々は、これまでに基礎研 究である CZTSSe 単結晶技術を確立し、単結晶を用いて電気伝導メカニズムや再結 合メカニズムを中心とした報告を行ってきた<sup>47)</sup>。

現在 CZTS 系太陽電池の変換効率向上の制限要因となっているのは、開放端電圧 Voc が理論値(バンドギャップ値)の半分程度(Voc 達成率 42-50%)しか得られていない 事である。他の化合物太陽電池のワールドレコードと比較すると、変換効率 22.3% を達成している Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS)において Voc 達成率 60-65%、21.5%を達成して いる CdTe 太陽電池において Voc 達成率 55-60%であり、CZTS 系は 10%程度低い値 となっているが同じ課題を抱えている<sup>8</sup>。Voc の制限要因としてキャリアの再結合に よるもので、主に①吸収層バルク内、②空乏層内、③PN 接合界面、④裏面電極近傍 の 4 つが挙げられる。特に材料自体の物性に依存する①から③の再結合を改善する 必要があり、キャリア濃度をコントロールする事が重要である。キャリア濃度をコ ントロールするためにドーピング技術は有効的であり、特に CIGS 太陽電池において Na は高効率を達成するために必要な不純物である。そこで本研究では、Na-doped CZTS 単結晶を作製し、キャリア濃度を含む電気物性を改善する事で単結晶太陽電池 デバイス作製の応用研究面から Voc 向上へアプローチを行った。

## 2. 実験方法

Na<sub>2</sub>S をドーパントとして高純度原料と一緒に石英管に真空封入後、1100°C で溶融させ Feed となる CZTS 多結晶 ヘドーピングし、CZTS-Sn 擬二元系状態図から成長 温度 900°C、80 mol% CZTS-20 mol% Sn 溶液、成長速度 4 mm/day の条件で移動ヒー ター法(THM)を用いて Na-doped CZTS 単結晶を成長させた。結晶構造は、粉末 X 線回折(XRD)と Raman 分光法を用いて解析を行った。組成分析は、高周波誘導結合プラズマ発光分光法(ICP-AES)を用いて行った。電気的特性はホール効果測定を用いて 測定 温度 20~300 K、磁場 0.55T の条件下で行った。サンプルサイズは、5 mm×5mm×0.5 mm とし、表面は粗さ 0.01  $\mu$ m の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末で研磨した。直径 1 mm、厚さ 300 nm の Au 電極をサンプルの四角に真空蒸着法を用いて形成した。Au 電極は オーミック特性を示し、各電極間の抵抗値は磁場と電流を反転させ均一であることを確認している。





Fig. 1 THM 炉内温度プロファイル

Fig. 2 Na-doped CZTS 単結晶サンプル

P型 Na-doped CZTS 単結晶/N型 CdS バッファ層の PN 接合形成のために溶液成長 である Chemical bath deposition(CBD 法)を用いた。金属塩 CdCl<sub>2</sub> (0.015M)、硫化物チ オウレア(1.5M)、錯化剤としてアンモニアを用いて成長温度 80 ℃、成長時間 11 分で 単結晶上に CdS を 50 nm 程度成膜した。CBD 後、i-ZnO 層(50nm)、透明電極 AZO(Al-doped ZnO 100nm)層、Al 電極(500 nm)の各層をスパッタリング法で製膜した。 IV(電流-電圧)測定から太陽電池特性を調査した。

# 3. 結果と考察

Figure 1に3ゾーンからなる THM 炉内の温度プロファイルを示す。中心ヒーター 温度は 900℃ で液相温度より 50℃ 程度高く設定して液相を形成している。中心 - 下 部ヒーター間(過飽和領域)の温度勾配は 45℃/cm に設定することで溶液ゾーンの長さ を 1 cm 程度にコントロールしている。Figure 2 に Na-doped CZTS 単結晶を示す。イ ンゴットサイズは直径 10 mm、長さ 40 mm 程度で 5 mm 以上の単結晶が得られた。

ICP-AES から得られた Na-doped CZTS 単結晶サンプルの組成分析結果は、全ての サンプルにおいて金属組成比[Cu]/([Zn]+[Sn]) = 0.92–0.98、[Cu]/[Zn] = 1.73–1.86、 [Zn]/[Sn] = 1.06–1.15 であり Cu-poor、Zn-rich 組成を示した。Na 濃度は、0.04–0.13 at%を示した。

各組成の Na-doped CZTS サンプルの粉末 XRD パターンを Fig. 3 に示す。結晶構造 は、kesterite タイプの正方晶を示し、全ての主要な回折ピークは ICDD データ(#01-075-4122 kesterite CZTS)と一致した。Kesterite 相は、Cu/Zn の配置が違う disordered kesterite 相を形成する場合もあるが、disordered 相では観察されない 2 $\theta$  = 18.3 のピー クが観察されたため kesterite 相と判断した<sup>9</sup>。Figure 4 に各サンプルのラマン分光測 定結果を示す。A<sub>1</sub>モードの対称性に起因する 338 cm<sup>-1</sup> と 288、371 cm<sup>-1</sup>に CZTS 固有 のピークを観察した。ZnS や Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> に起因するピークは観察されなかった<sup>10,11</sup>。 これらの結果から高品質の単結晶サンプルが得られたと判断した。Table 1 に室温の ホール効果測定結果を示す。得られたキャリア濃度、伝導率、移動度は Na 濃度が増 加するにつれて向上した。第一原理計算によると Cu サイトの Zn(Zncu)が CZTS 中の 支配的なドナー性欠陥である<sup>12</sup>。Na ドープによってこの支配的なドナーが置換され (=Nacu)、ドナーによるキャリア補償の減少によってキャリア濃度が向上したと考え



Fig. 3 Na-doped CZTS 粉末 XRD

Fig. 4 Na-doped CZTS ラマン分光測定

Table 1 室温ホール効果測定結果

Na [at%]	Carrier concentration [cm-3]	Conductivity [Q <sup>-1</sup> cm <sup>−1</sup> ]	Mobility [cm <sup>2</sup> V <sup>.1</sup> s <sup>.1</sup> ]
0	8.80×1016	2.22×10-2	8.35
0.04	2.03×1017	1.46×10-2	13.9
0.13	7.42×1017	1.07×10 <sup>-1</sup>	15.4





Fig. 6 Na-doped CZTS 単結晶セル JV カーブ

る。さらに XRD 測定結果から Na 濃度増加とともにユニットセル体積が増加するので Na の置換の影響は確認できる。

Figure 5 に CdS 薄膜と CZTS 単結晶/CdS 薄膜サンプルの Ramann 分光測定を示す。 308 cm<sup>-1</sup> に CdS に起因するピークを観察した<sup>13)</sup>。CZTS/CdS サンプルにおいてそれぞ れのピークを観察し、CZTS 単結晶上に CdS 薄膜が製膜できていることを確認した。 Figure 6 に Na-doped CZTS 単結晶太陽電池 IV カーブを示す。CZTS 単結晶上に Chemical bath deposition (CBD)法で N型 CdS を製膜し PN 接合形成後にスパッタリン グ法で透明電極と電極を形成した。変換効率 2.65 %、フィルファクター30.1%、開放 端電圧  $V_{OC}$  0.6 V、短絡電流 J<sub>SC</sub> 14.9 mA/cm<sup>2</sup>の結果が得られた。効率は報告されてい るものよりも小さいが初めて CZTS 薄膜太陽電池が 6%を超えたセル <sup>14)</sup>と比較すると Voc の値が大きいことが分かる。これは結晶性の良い単結晶の特性が反映している からだと考える。

# 4. まとめ

本研究は、CZTS 系太陽電池の変換効率向上のために開放端電圧 Voc 改善に注目し Na-doped CZTS 単結晶を作製し、Na ドーピング量とキャリア濃度を含む電気物性の 相関性の基礎研究面と良質な Na-doped CZTS 単結晶を用いた単結晶太陽電池デバイ ス作製の応用研究面からアプローチを行った。①Na ドーピング量増加とともに変換 効率向上に関わるキャリア濃度や移動度の向上が確認された。②CZTS 単結晶セルに おいて開放端電圧 Voc=0.6 V が得られた。

# 5. 謝辞

This work was supported in part by the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

引用文献

1) S. Tajima et al., Appl. Phys. Express. 8 (2015) 082302.

2) Y. S. Lee et al., Adv. Energy Mater. 5 (2015) 1401372.

3) W. Wang *et al.*, Adv. Energy Mater. **4** (2014) 1301465.

4) A. Nagaoka et al., J. Crystal Growth **453** (2016) 119.

5) A. Nagaoka et al., J. Crystal Growth **423** (2015) 9.

6) A. Nagaoka et al., Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 112107.

7) L. Q. Phuong *et al.*, Phys. Rev. B **92** (2015) 115204.

8) M. A. Green et al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 24 (2016) 3.

9) A. Ritscher et al., J. Solid State Chem. 238 (2016) 68.

10) Y. C. Cheng et al., J. Appl. Phys. 106 (2009) 123505.

11) P. A. Fernandes et al., Thin Solid Films 517 (200) 2519.

12) S. Chen et al., Adv. Mater. 25 (2013) 1522.

13) J. P. Teixeira et al., Appl. Phys. Lett. 105 (2014) 163901.

14) H. Katagiri et al., Appl. Phys. Express 1 (2008) 041201.
モータ駆動用インバータの信頼性向上に資するキャパシタ評価技術の確立

九州工業大学 大学院生命体工学研究科 長谷川 一徳

要旨

交流モータの省エネルギーに必要不可欠であるインバータ回路の構成要素であるキャパシタは 他の部品に比べ低寿命であり、キャパシタの寿命がモータ駆動用インバータ回路自身の寿命を決定 している。モータ駆動用インバータにおいて使用される代表的なキャパシタである電解コンデンサ に着目し、その劣化傾向の直流バイアス電圧依存性を加速試験により確認した。その結果、劣化の 指標である ESR (Equivalent Series Resistance) とキャパシタンスは直流バイアス電圧に対し異なる 依存性を示し、劣化診断には ESR とキャパシタンス双方のモニタリングが必要不可欠であること を明らかにした。

1. 序論

交流モータの省エネルギーに必要不可欠であるインバータ回路の構成要素であるキャパシタは, パワー半導体デバイスとインダクタに比べ熱による劣化が大きく低寿命であり,キャパシタの寿命 がモータ駆動用インバータ回路自身の寿命を決定している。キャパシタの高精度な評価を実現する には実際の機器が発生する電圧・電流波形を再現することが必須条件である。本研究の目的は,モ ータ駆動用インバータ回路の信頼性向上に資するキャパシタ評価技術の確立である。モータ駆動用 インバータにおいて使用される代表的なキャパシタである電解コンデンサに着目し,その劣化傾向 の直流バイアス電圧依存性について実験的に検討した。

### 2. 実験方法

図1に電解コンデンサ劣化試験で用いる回路構成を 示す。抵抗で構成された分圧回路(Voltage Divider)を用 いて8組の被測定コンデンサにそれぞれ異なる直流バ イアス電圧(0~30 V)を与えている。個体差の影響を確 認するため、1組のコンデンサは4つの個体の並列接 続で構成している。コンデンサの仕様は25 V,470 µF であり、耐久性試験を想定し定格以上の電圧も印加し ている。

図2にオイルバスを用いた加速試験環境の外観を示 す。オイルバスはコンデンサの定格温度85℃一定に保 ち,被測定コンデンサを浸している。試験は1250時間 実施し,その間のESRとキャパシタンスを測定する。 コンデンサのESRとキャパシタンス測定にはLCRメ



図1 被測定コンデンサ電圧印加回路



Capacitors under Test

ータを用いている。なお、測定時はコンデンサをオイ 図2 オイルバスを用いた加速試験

ルバスから取り出し室温環境における ESR とキャパ シタンスを測定している。

# 3. 実験結果と考察

図3に試験終了後(1250時間経過後)のESRの変化量 を示す。エラーバーは個体間の標準偏差を表してい る。ESR の初期値は415 mΩであった。定格電圧以下 の領域ではESR 増加量は直流バイアス電圧に対して 緩やかな増加傾向を示している一方,定格電圧以上の 領域では急激な増加傾向を呈している。ただし直流バ 図3 イアス電圧に対して単調増加の傾向は全領域で成立 し,ESR の観点からはより高いバイアス電圧がコンデ ンサ劣化を引き起こすことが確認できる。

図 4 に試験終了後のキャパシタンスの変化量を示 す。定格電圧以下の領域では直流バイアス電圧の増加 がキャパシタン低下を抑えている。換言すれば、より 高い直流バイアス電圧がコンデンサ劣化を抑える方向 に働いている。一方で定格電圧以上の領域では急激な 減少傾向を示し、直流バイアス電圧の増加がキャパシ タ劣化を加速している。したがって、定格電圧以下の 領域では、劣化の直流バイアス依存性は ESR とキャパ シタの観点で反対の傾向を示している。

図5にESR変化量とキャパシタンス変化量から推定 したキャパシタ寿命を示す。ESR・キャパシタンスとも 時間変化率が一定であると仮定し,ESRは2倍,キャパ シタンスは20%低下するまでに時間を見積もっている。 この結果から,ESRまたはキャパシタンスの一方だけで はコンデンサ寿命を見積もることができず,双方のモニ タリングが寿命診断に必要不可欠であることが言える。

研究代表者: 長谷川 一徳 研究協力者: 嘉藤 徹 所内世話人: 西澤 伸一



3 ESR 変化量の直流バイアス電圧依存性



図 4 キャパシタンス変化量の直流バイアス 電圧依存性



図5 コンデンサ寿命の推定値

#### 成果報告

K. Hasegawa, K. Tsuzaki, and S. Nishizawa, "DC-bias-voltage dependence of degradation of aluminum electrolytic capacitors," *Microelectronics Reliability.*, vol. 83, pp. 115-118, 2018.

#### 垂直軸風車の3次元効果の数値解析

鳥取大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻 原 豊

1. はじめに

揚力型の垂直軸風車は、垂直軸タイプの中では比較的効率が高く、最近多くの研究が行われている.これまでの風車特性計算の多くは翼素運動量理論を用いた2次元モデル計算であったり、数値流体力学解析(CFD)においても計算コストの低い2次元計算が多く、3次元のCFD計算の場合でもアーム(ストラット)やエンド・プレートまで含めた計算はごくわずかである.直線翼垂直軸風車等の場合は翼を回転軸に結合する上でアーム(ストラット)は必需部品であるが、断面形状によっては大きな損失が発生することが予想される.本年度の研究では、アームの存在が翼に及ぼす影響について3次元 CFD 解析で詳しく調べた.

#### 2. 方法

図1に計算対象としたデルフト工科大学の2枚翼H型ダリウス風車DU-H2-5075(直径:D=0.75 m,高さ:2H=0.5 m)と同じ形状の風車モデルを示す. 直線翼の翼型はNACA 0018 であり,翼弦長はc=80 mm である. この風車モデルに、図2に示す3種類の断面形状のアームを備えた風車モデルに対して CFD 解析を行った. 翼型アームの断面はNACA 0018 であり、アーム弦長はb=40 mm とした. この場合,翼型アームの最大厚みはa=72 mm である. これに合わせて矩形アームの断面は縦をa=72 mm,横をb=40 mm の長方形とし、円形アームの直径はd=72 mm とした. 各アーム断面の抗力係数は、翼型が $C_d=0.01$ 、矩形が $C_d=0.9$ 、円形が $C_d=1.2$ である. 各アーム長はL=0.355 m とした. ただし、ハブや回転軸は考慮していない.

計算ソルバーとしては STAR-CCM+を使用した. 基礎方程式は 3 次元非定常非圧縮を仮定した RANS 方程式で あり, 乱流モデルには SST k- $\omega$  を採用した. 総セル数はアームの有無やアームの断面形状で異なるが,約662~1150 万セルの範囲である. 時間刻みは  $\Delta t = 1.558 \times 10^4$  s に設定し,これにより風車ロータは 1 ステップで 0.5°回転する. ロータは 7 回転まで回転させた. 主流風速  $U_{\alpha}$ は 7 m/s とし,先端周速比( $\lambda = R\omega/U_{\alpha}$ )は最大出力状態( $\lambda = 2.9$ )に ほぼ相当する  $\lambda = 3$  とした(N = 535 pm). 直線翼の翼弦長 c に基づく レイノルズ数は  $Re_b = 1.1 \times 10^5$  である.

本研究では、CFD で計算した物体表面の圧力(ゲージ圧: Δ*p*)の分布から,翼やアームの局所に作用する圧力に 基づく力を求める(本研究では表面せん断応力分布は考慮していない).図3に力の計算に用いた相対座標系(記 載はないが *x* 軸は翼およびアームの弦方向を向いており, *y* 軸は *r* 軸と同じ方向を向く),および圧力分布を算出 した断面位置を示す.アームは半径方向(*r* 方向)に15 mm 間隔の23箇所で計算した.翼は赤道面(*z* = 0)を基準と して,翼スパンの半分(長さ: *H*)について15 mm 間隔で17箇所の断面を選んで表面圧力分布を計算した.



#### 3. 主な結果と考察

図4にアジマス0°にあるアーム無しモデルの翼の赤道面における圧力分布を示す.赤色は正圧,青色は負圧を



示す.図4のような圧力分布から式(1)によってx方向の圧力に基づく力  $F_{\mu\nu}$ が求まる.本研究では、式(2)によっ て力  $F_{\mu\nu}$ を無次元化した.式(2)において、分母の基準風速は上流風速  $U_{a\nu}$ と回転による相対風速  $R\omega$  の和  $U_{a\nu} + R\omega$ とした.また c は翼の弦長であり、アームに作用する力の無次元化においても翼弦長 c を用いた.本研究では 10° ごとのアジマスで無次元の力係数(式(2)の  $C_{\mu\nu}$ など)を求め、風車ロータの 1 回転にわたる平均値( $C_{\mu\nu}$  are など)を式 (3)によって算出した.アームについても式(1)~(3)と同様な計算を行い、各断面における力係数とロータ 1 回転の 平均を求めた.

 $F_{px} = -\oint \Delta p \, dy \quad \dots \quad (1) \qquad C_{px} \equiv \frac{F_{px}}{\frac{1}{2}\rho(U_{\infty} + R\omega)^2 c} \quad \dots \quad (2) \qquad C_{px\_ave} = \frac{\sum_i C_{px}^{(i=10,20,30,\dots,360)}}{36} \quad \dots \quad (3)$ 

図5にアームに作用するx方向(弦方向)の力の力係数分布を示す.アーム断面形状に依らず,翼との接合部(r/R =1)に近づくにつれて力係数は大きくなる.これは相対速度が増加するためである.平均的には円形アームに作 用する力係数(抗力)が最も大きく,次に矩形アーム,翼型アームとなる.図6に示したアーム無しの場合の1/2 翼の力係数分布からわかるように,翼のx方向の力係数は負の値であり,局所の翼要素は平均的に一x方向の推 進力を発生する.また,翼端(z/H=1)に近づくに伴って翼の推進力は小さくなり,翼端損失の影響が現れている. アームが存在する場合は,いずれもアームとの接合部(z/H=0.5)付近において推進力の減少が見られる.この減 少量は翼の抗力に相当し,翼の抗力は矩形アームが最大であり,翼型アーム,円形アームの順に減少する.図6 から明らかなように,翼へのアームの影響が接合部近傍だけでなく,広い範囲に及ぶことは注目すべきである.

### 【研究組織】

原豊	代表者	鳥取大学大学院	准教授
堀田直希	協力者	鳥取大学大学院	修士1年
住 隆博	協力者	佐賀大学大学院	准教授
秋元博路	協力者	大阪大学大学院	特任教授
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】

- 原豊,堀田直希,秋元博路,住隆博,吉田茂雄,垂直軸風車のアーム抵抗に関する数値解析,日本機械学会2017年度年次大会,J0540302,2017.9.3-6,埼玉大学.
- (2) 堀田直希, 原 豊, 原田千朝, 吉田茂雄, 秋元博路, 住 隆博, 直線翼垂直軸風車のブレードとアームの圧力 分布に関する数値解析, 日本機械学会 中国四国支部第 56 期総会・講演会, K716, 2018.3.7, 徳島大学 (発表予 定).

716

# 直線翼垂直軸風車のブレードとアームの圧力分布に関する数値解析

# Numerical Analysis on Pressure Distribution over Blades and Arms of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine

 ○学 堀田 直希(鳥取大院), 正 原 豊(鳥取大), 原田 千朝(鳥取大・学), 正 吉田 茂雄(九大), 秋元 博路(阪大), 住 隆博(佐賀大)
 Naoki HORITA, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori 680-8552 Japan Yutaka HARA, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori 680-8552 Japan Chiasa HARADA, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori 680-8552 Japan Shigeo YOSHIDA, Kyushu University, 6-1 Kasugakoen, Kasuga, Fukuoka 816-8580 Japan Hiromichi AKIMOTO, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565-0871 Japan Takahiro SUMI, Saga University, 1 Honjo, Saga 840-8502 Japan

Key Words: Vertical Axis Wind Turbine, Computational Fluid Dynamics, Pressure Distribution, Drag Coefficient

#### 1. 緒言

垂直軸風車においては、多くの場合、抵抗要素となるアーム(ストラット)を必要とする. 既報<sup>(1)</sup>では、2 枚翼の直線翼垂 直軸風車(図 1)を対象として、3 種類の断面形状(図 2)を持つア ームが風車性能に及ぼす影響を数値流体力学解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)で調べた. その結果、アームの 抵抗だけでなく、アームが翼まわりの流れに影響を与え、翼 の損失が大きくなっている可能性が示された. 本研究では、 アームと翼の圧力分布を詳細に解析し、アームが翼に及ぼす 影響を明らかにする.

#### 2. 計算対象と計算条件

本研究では既報<sup>(1)</sup>と同様の 2 枚翼の H 型ダリウス風車 (DU-H2-5075)<sup>(2)</sup>を計算対象とした(図 1 参照). 直線翼の翼型は NACA 0018 であり, 翼弦長は c = 0.08 m である. ロータ直径 は D = 0.75 m (半径: R = 0.375 m), 翼スパンは 2H = 0.5 m で ある. 本研究では断面一様な 3 種類の水平アーム(翼型, 矩形 柱, 円柱)を備えた風力タービンを計算対象とする. 翼型アー ムの断面は NACA 0018 であり, アーム弦長は b = 0.04 m とす る. この場合, 翼型アームの最大厚みは a = 0.0072 m である. これに合わせて矩形柱アームの断面は縦を a = 0.0072 m、横を b = 0.04 m の長方形と設定し, 円柱アームの直径は d = 0.0072m とした. 各アームの抗力係数<sup>(3)</sup>は翼型が  $C_D = 0.01$ , 矩形柱 が  $C_D = 0.9$ , 円柱アームが  $C_D = 1.2$  である(図 2). 各アーム長 は L = 0.355 m とした. ただし, ハブや回転軸は考慮しない.



Fig.1 Computation model of straight-bladed vertical axis wind turbine with four arms



主流風速  $U_{\infty}$ は 7 m/s とし, 先端周速比( $\lambda = R\omega/U_{\infty}$ )は最大出力 状態( $\lambda = 2.9$ )にほぼ相当する  $\lambda = 3$  とした(N = 535 pm). 直線 翼の翼弦長 c に基づくレイノルズ数は  $Re_b = 1.1 \times 10^5$  である. アジマス角  $\psi$ は主流と垂直方向を原点( $\psi = 0^\circ$ )とし, 回転軸上 部から見て反時計回りにロータは回転する.

#### 3. 計算方法

本研究では STAR-CCM+ ver.11.02.010 をソルパーとして使 用した. 基礎方程式は 3 次元非定常非圧縮を仮定した Navier-Stokes 方程式であり, 乱流モデルには SST k-ω を採用 した. 総セル数はアームの有無やアームの形状で異なるが, 約 662~1150 万セルの範囲である.時間刻みは Δt = 1.558×10<sup>4</sup> s に設定し, これにより風車ロータは 1 ステップで 0.5° 回転す る. ロータは 7 回転まで回転させた. CFD 解析の詳細は既報 <sup>(1)</sup>を参照してほしい.

本研究では、CFD で計算した物体表面の圧力(ゲージ圧: Δp) の分布から、翼やアームの局所に作用する圧力に基づく力を 求める.図3に力の計算に用いた相対座標系および断面周り の圧力分布を算出した位置を示している.アームは半径方向 (rまたは y<sub>2</sub>)に15 mm 間隔の23箇所で計算した.翼は赤道 面(z=0 mm)を基準として、翼スパンの半分(H, 1/2翼)につ いて、15 mm 間隔で17箇所の断面を選んで表面圧力分布を計 算した.

図4にアジマス0°にあるアーム無しモデルの翼の赤道面における圧力分布を示す。赤色は正圧, 青色は負圧を示す。 図4のような圧力分布から式(1)によってx方向の圧力に基づ く力 $F_{\mu\nu}$ が求まる<sup>(4)</sup>。本研究では、式(2)によって力 $F_{\mu\nu}$ を無次 元化した。式(2)において、分母の基準風速は上流風速 $U_{\alpha}$ と回転による相対風速 $R\omega$ の和 $U_{\alpha}$  +  $R\omega$ とした。またcは翼の弦 長であり、アームに作用する力の無次元化においてもcを用いた。本研究では10°ごとのアジマスで無次元の力係数(式(2) の $C_{\mu\nu}$ など)を求め、風車ロータの1回転にわたる平均値( $C_{\mu\nu}$ の など)を式(3)によって算出した。アームについても式(1)~(3) と同様な計算を行い、各断面における力係数とロータ1回転 の平均を求めた。

$$F_{px} = -\oint \Delta p dy \tag{1}$$

$$C_{px} \equiv \frac{F_{px}}{\frac{1}{2}\rho(U_{\infty} + R\omega)^2 c}$$
(2)

$$C_{px_ave} = \frac{\sum_{i} C_{px}^{(i=10,20,30,\dots,360)}}{36}$$
(3)

#### 4. 計算結果及び考察

図5に7回転目の平均をとった各アームに作用するx方向 (弦方向)の力の力係数分布を示す.アーム断面形状に依らず, 翼との接合部(r/R=1)に近づくにつれて力係数は大きくなっ ている.これは相対速度が大きくなることが原因である. 表 1に図5のグラフのr方向にわたる平均値を示す.アームの力 係数(抗力)は,0.0153となる円柱アームが最も大きい.

図 6 に示したアーム無しの場合の 1/2 翼の力係数分布から わかるように、翼の x 方向の力係数は負値であり、局所の翼 要素は平均的に x 方向の推進力を発生している. また, 翼端 (z/H=1)に近づくに伴い、翼の推進力は小さくなっており、 翼端損失の影響が示されている。アームが存在する場合は、 いずれも,アームとの接合部(z/H = 0.5)付近において推進力 の減少が見られる。特に矩形柱アームの場合、減少部分が広 範囲に及んでいる. 表 2 に図 6 のグラフの 1/2 翼のスパン方 向(z 方向)にわたる平均値を示す. 翼の推進力は, -0.019の値 を示す矩形柱アームを持つ場合が最も小さい. 雪い換えると, 矩形柱アームが翼の推進力(掛力)を最も多く減少させている. 既報(1)で示したように風車特性はアーム無し,翼型アーム, 円柱アーム、矩形柱アームの順で出力が大きい、アームだけ の損失を考えると、図 5・表 1 で示したように抗力係数が大 きい円柱アームの抵抗が最大であるが、アームの翼への影響 を考えると,図6・表2で示されたように矩形柱アームのも たらす損失が大きく風車の特性が最も大きく減少する結果に なることが理解できる.



Fig.5 Distribution of force coefficient ( $C_{\mu x}$  and  $\alpha$ ) of each arm ( $\lambda$ =3)

	Table.1	Averaged force coefficient of each arm $(\lambda=3)$
-		

Arm Type	Airfoil	Rectangular	Cylinder
C <sub>px_ave</sub>	0.0027	0.0043	0.0153



Fig.6 Distribution of force coefficient ( $C_{\mu\nu}$  and  $\sigma$ ) of blade ( $\lambda$ =3)

Table.2 Averaged force coefficient of blade ( $\lambda = 3$ )				
Arm Type	Armless	Airfoil	Rectangular	Cylinder
Connecto	-0.030	-0.025	-0.019	-0.026

#### 5. 結言

本研究では,直線翼垂直軸風車におけるアームの影響を調 べるために3次元 CFD 解析を行い,翼およびアームの圧力分 布を調べた.以下に本研究で得られた知見を示す.

- アームの力係数(抗力)は断面積が1番小さくても抗力係数 が大きい円柱アームが最も大きくなった.
- 2) 矩形柱アーム,翼型アーム,円柱アームの順で翼の推進力 を減少させる割合が大きい.
- 3) 翼へのアームの影響は接合部近傍だけでなく広い範囲に 及ぶ。

#### 謝辞

本研究は鳥取大学国際乾燥地研究教育機構(IPDRE)の研究 プロジェクトの一部,九州大学応用力学研究所の共同利用研 究,JSPS 科研費 16H04599 により実施された.ここに明記し て謝意を表す.

#### 文献

- (1) 原豊, 堀田直希, 秋元博路, 住隆博, 吉田茂雄, "垂直 軸風車のアーム抵抗に関する数値解析", 日本機械学会 2017 年度年次大会購演論文集, 2017, J0540302.
- (2) van Bussel, G., Mertens, S., Polinder, H., Sidler, H., "TURBY@:Concept and Realisation of a Small VAWT for the Built Environment", Proc. EAWE/EWEA Special Topic Conference "The Science of Making Torque from Wind," Delft, Netherlands, 2004, pp.509-516.
- (3) White, F.M., "Fluid Mechanics", Forth Edition, McGraw-Hill, 1999, p.458.
- (4) 西山哲男, "翼型流れ学", 日刊工業新聞社, 1998.

# J0540302

# 垂直軸風車のアーム抵抗に関する数値解析

# Numerical Analysis on Arm Drag of Vertical Axis Wind Turbine

○正 原 豊<sup>\*1</sup>, 堀田 直希<sup>\*1</sup>
 秋元 博路<sup>\*2</sup>, 住 隆博<sup>\*3</sup>, 正 吉田 茂雄<sup>\*4</sup>
 Yutaka HARA<sup>\*1</sup>, Naoki HORITA<sup>\*1</sup>,
 Hiromichi AKIMOTO<sup>\*2</sup>, Takahiro SUMI<sup>\*3</sup> and Shigeo YOSHIDA<sup>\*4</sup>
 <sup>\*1</sup> 鳥取大学 Tottori University
 <sup>\*2</sup> 大阪大学 Osaka University
 <sup>\*3</sup> 佐賀大学 Saga University
 <sup>\*4</sup> 九州大学 Kyushu University

To investigate the effects of horizontal arms on the performance of vertical axis turbine, three dimensional CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis was carried out for straight-bladed vertical axis wind turbines, which have different arm cross-sections like airfoil, circular, and rectangular shapes. CFD result on the resistance torque generated by circular cylinder arms agreed well with the theoretical value used with the drag coefficient of two-dimensional body. However, CFD results on the airfoil and rectangular cylinder arms were larger than theoretical values. The difference was probably caused by the connection part of a blade and an arm. Comparing the power coefficient of rotors at the tip speed ratio of 3, the power coefficient of virtual rotor without arms was larger than that of experimental value and the power coefficient of rotors with airfoil arms agreed with the experimental value. The power coefficients of rotors with circular and rectangular cylinder arms had minus values.

Key Words : Vertical axis wind turbine, Computational fluid dynamics, Wind power, Arm drag, Drag coefficient

#### 1. 結 言

揚力駆動型の垂直軸タイプの風力タービンあるいは水力タービンの研究が最近盛んに行われているが、数値計 算による研究<sup>(1)</sup>では、タービンの主翼の特性に主眼が置かれることが多く、実際のタービンで損失となるアーム (ストラット)に関する研究<sup>(2)</sup>はあまり多くはない、理由としては、アーム部の抵抗を小さくするためには、抗 力係数の小さい翼型断面を持った部材を用いることが最適になるであろうことは理論的そして直感的にも明らか なことが挙げられるかもしれない、しかし、実際の垂直軸タービンでは、強度や製造コストの点から、簡易な断 面構造のアームが使用される場合<sup>(3)</sup>もある.そこで、本研究では簡単形状である直線翼垂直軸風車を対象として、 その水平アームが回転抵抗として風車特性に及ぼす影響を定量的に示すことを目的とする.研究方法としては、 実験データのある小形風力タービン<sup>(4)</sup>を対象として、数値流体力学解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)によっ て、種々の断面形状のアームを備えた垂直軸型タービンの回転トルクを算出する.そして、アームの存在しない 仮想タービンの回転トルクとの差を求め、アームの発生する抵抗トルクのアーム断面(すなわち断面形状に依存 する抗力係数)に対する依存性を示す.

#### 2. 計算対象と計算条件

本研究では、デルフト工科大学の実験機である2枚翼のH型ダリウス風車(DU-H2-5075)<sup>(4)</sup>を計算対象とした(図 1参照). 直線翼の翼型は NACA 0018 であり、翼弦長は c=0.08 m である. ロータ直径は D=0.75 m (半径:R=0.375 m)、翼スパンは H=0.5 m である. アームは全部で4本存在するが、その断面形状は不明である. 本研究では図2 に示すような断面一様な3種類の水平アーム(翼型, 円柱, 矩形柱)を備えた風力タービンを計算対象とする. 翼







(a) Airfoil arm
 (b) Circular cylinder arm
 (c) Rectangular cylinder arm
 Fig.2 Definition of size parameters for the arm models investigated in this study

型アームの断面は NACA 0018 であり、翼弦長は c = 0.04 m とする. この場合、翼型アームの最大厚みは e = 0.0072 m である. これに合わせて円柱アームの直径は d = 0.0072 m とした. 矩形柱アームの断面は縦を a = 0.0072 m, 横 を b = 0.04 m の長方形と設定した. 各アーム長は L = 0.355 m とした. ただし、ハブや回転軸は考慮しない. 主流 風速 U は実験データに合わせ 7 m/s とし、先端周速比( $\lambda = R\omega/U$ )は実験風車の最大出力状態( $\lambda = 2.9$ )にほぼ相当する  $\lambda = 3$  とした. この場合の回転速度は N = 535 rpm であり、直線翼の翼弦長に基づくレイノルズ数は  $Re_b = 1.1 \times 10^5$  である. アジマス角  $\psi$  は主流と垂直方向を原点( $\psi = 0^\circ$ )とし、回転軸上部から見て反時計回りにロータは回転する.

#### 3. 計算方法

本研究では STAR-CCM+ ver.11.02.010 をソルバーとして使用した. 基礎方程式は 3 次元非定常非圧縮を仮定した Navier-Stokes 方程式であり、乱流モデルには SST k-ω を採用した. 図 3 に示すように、直径 48D、長さ 64D の 円柱体積内(静止領域 1)を計算領域とし、流入面より 24D の位置に風車モデルの中心を置いた. 風車モデルは直径 1.6D の球状領域(回転領域)の中にあり、この回転領域の周りは直径 1.7D で長さ 3D の円柱と半球(半径 0.85D) からなる静止領域 2 で囲み、格子サイズの調整に用いた. 静止領域 1 の上流側境界を速度入口とし一定速度(7 m/s) を与え、下流側境界は圧力出口として一定圧力(P=0)を与えた. 側面はスリップ条件とした. 計算領域のほぼ全



Fig.3 Computational region and boundary condition

(4)

体においてポリヘドラルメッシュを採用した.ただし,壁面近傍ではプリズムレイヤーメッシュを適用し,層数 は15層とした.壁面における最小格子幅は5.8×10<sup>6</sup>m 程度であり,これに相当する最大の壁変数y<sup>+</sup>は0.44 であっ た.アーム無しモデルにおける総セル数は約662万セル,翼型アームモデルの場合は約1,112万セル,円柱アー ムの場合は約887万セル,矩形柱アームでは約1,150万セルであった.なお,全てのモデルにおいて,静止領域 のセル数は約58万セルで同一である.時間刻みはΔt=1.558×10<sup>4</sup>sに設定し,これにより風車ロータは1ステッ プで0.5°回転する.ロータを6回転まで回転させ,トルク係数などは最後の1回転の平均値から算出した.

#### 4. 理論アームトルク

垂直軸風車における水平アーム(ストラット)が発生する抵抗トルクは、アーム部の抗力係数が与えられれば概 算が可能である<sup>(5)</sup>. 一般に、翼型の抗力係数  $C_D$ は翼弦長 cに基づいて定義されるため、単位スパン長に作用する 抗力を  $F^{(2)}$ とおくと式(1)で表せる.一方、円柱や矩形柱の抗力係数は前面投影面積に基づいて定義される<sup>(6)</sup>. 例 えば、図 2(c)に示す厚み a の矩形柱の場合、単位スパン長の抗力は式(2)となる. 直径 d の円柱の場合は式(2)の aを d で置き換えれば良い.なお、式(1)、(2)の V は物体に対する流体の相対流速、 $\rho$  は流体の密度である.

$$F_D^{(U)} = \frac{1}{2} \rho V^2 c C_D \quad [\text{Airfoil arm}] \tag{1}$$
  

$$F_D^{(U)} = \frac{1}{2} \rho V^2 a C_D \quad [\text{Rectangular cylinder arm}] \tag{2}$$

文献<sup>(5)</sup>に従えば, 翼数が n 枚で1 つの翼を支持するアーム数(ストラット数)を n<sub>s</sub>とした場合の直線翼垂直軸タ ービンの全アームが発生する平均抵抗トルク Q<sup>TA</sup> は式(3)で計算される.ここで r は, 幅 dr を持つアーム微小要素 の回転軸からの距離であり, r<sub>0</sub> は回転軸側のアーム端部の回転軸からの距離を示す(本研究では r<sub>0</sub>=0.02 m).

$$Q^{TA} = \frac{nn_s}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{R} r F_D^{(U)} dr d\psi$$
(3)

本研究の場合,図1のようにアジマスψの原点を定義したので,回転軸から局所半径rの距離における相対流 速 *V*,は式(4)で定義される.ただし,式(4)ではローダ内部における誘導速度成分は考慮していない.

 $V_r = U \cos \psi + r \omega$ 

式(4)を式(1)あるいは(2)に代入し、その結果を式(3)に用いて計算すると、タービン全体の理論的アームトルク が式(5)のように求まる.式(5)の導出過程において ω = λU/R の関係を用いた.式(5)は矩形柱アームの場合であり、 翼型アームの場合は α をアーム弦長 c に置き換え、円柱アームではアーム直径 d で置き換えることに注意する.

$$Q^{TA} = \frac{n n_s}{8} \rho a C_D U^2 \left\{ \left( R^2 - r_0^2 \right) + \frac{\lambda^2}{R^2} \left( R^4 - r_0^4 \right) \right\}$$
(5)

上式(5)をロータ受風面積A=HD=2HRを通過する上流流速Uの動圧を基準として無次元化すると次式(6)となる.

$$C_{Q}^{\mathcal{I}A} = \frac{Q^{\mathcal{I}A}}{0.5\rho U^{2}AR} = \frac{nn_{s}}{8} \frac{a}{H} C_{D} \left[ \left\{ 1 - \left(\frac{r_{0}}{R}\right)^{2} \right\} + \lambda^{2} \left\{ 1 - \left(\frac{r_{0}}{R}\right)^{4} \right\} \right] \approx \frac{nn_{s}}{8} \frac{a}{H} C_{D} \lambda^{2}$$
(6)



(a) Rotor without arms

(b) Rotor with arms of aifoil cross section Fig. 4 Isosurface of Q-value (200 s<sup>-2</sup>) and volticity distribution on the surface

抗力係数はレイノルズ数に依存するが,前述の翼のレイノルズ数 Reb を参考にすると,アーム部でのレイノ ルズ数は104~105と想定できる.また、物体(アーム)のスパン長にも依存するが、本研究では簡単のために、 アームに沿って抗力係数は一定とみなし、かつ無弦長(2次元物体)における抗力係数を採用した.具体的には、 翼型アームでは  $C_D = 0.01$ , 円柱アームでは  $C_D = 1.2$ , 矩形柱アームでは  $C_D = 0.9$  をそれぞれ仮定した<sup>(6)</sup>.

#### 計算結果及び考察 5.

6回転後の状態における O 値の等値面(O=200 s<sup>-2</sup>)を図4に示す. 色は等値面上における渦度の大きさを示す. 図4(a)はアーム無しの場合であり、(b)は翼型アームの場合である.アーム無しでは翼スパンの中央付近の後縁か ら均一的な渦放出が見られるが、翼型アームでは複雑な渦放出となっている、ここに図は示さないが、円柱・矩 形柱アームの場合も、翼スパン中央付近の渦放出は複雑であり、特に矩形柱アームではアームの取り付け位置近 傍から縦渦状のペアになった渦放出がみられる、翼型アームに比べると、円柱・矩形柱アームは、アーム後流に も複雑な渦放出が観測されている.

CFD で得られたアーム無し・アーム有りの各ロータの平均トルク差から算出される全アームのトルク係数C と式(6)から計算される理論値を図5に示す.アーム厚みが0.0072mの3種類のアームについての理論値(●)はCD に比例するが、CFD 解析値(◆)は、Cpの増加に対して Co の増加はみられるが、理論のような線形性はない、円 柱アームでは、CFDと理論がほぼ一致しているが、翼型アームと矩形柱アームでは、CFDと理論の差が大きく、



Drag coefficient dependence of total arm torque Fig. 5 coefficient ( $\lambda = 3$ )



Fig. 6 Comparison of power coefficient of rotors with different cross-section arm

特に矩形柱アームで大きな差がある.前述のように,理論計算では無限長物体の抗力係数を使用しているが,実際のアームは有限である.特にアームと翼の接合部分の面積が大きい矩形柱・翼型アームにおいて,接合部からの渦放出が多くなり,抵抗トルクが増加したと推測される.

図 5 には、厚みを 1/2 にした矩形柱アーム(*a*=0.0036 m)の CFD(■)と理論(▲)の値も示した.理論と同様に厚み に比例して、CFD の解析結果も約 1/2 に減少している. CFD と理論との差は多少減少しているが、同程度の差を 保っているのは、上述の接合部の影響によるものと考えられる.

図6に出力係数 C<sub>p</sub>の比較を示す. 黒丸シンボルはデルフト工科大学における実験値<sup>(4)</sup>であり, アーム無しロー タと翼型アームロータの CFD 解析値については,  $\lambda=3$  前後の回転状態の結果も示している. アーム無しの C<sub>p</sub>は 実験値よりも大きく  $\lambda=3$  で最大値をとっている. 偶然であるかもしれないが, 翼型アームロータの C<sub>p</sub>は実験値 と良く一致している. 厚みが 0.0072 m の円柱・矩形柱アームを持つロータの C<sub>p</sub>は  $\lambda=3$  においてマイナスであり, 風車として機能しない結果となった. 厚みを 1/2 にした矩形柱アームでは, かろうじて C<sub>p</sub>はプラスとなっている.

#### 6. 結 言

垂直軸風車における水平アームの影響を調べるために、3 種類(翼型,円形,矩形)の各断面形状のアーム を持った2枚翼の直線翼垂直軸風車を対象として3次元 CFD 解析を行った.以下に本研究で得られた知見 を示す.

- (1) 円柱アームのトルクの CFD 解析結果は、無限長物体の抗力係数を仮定した理論と良い一致を得たが、 翼型・矩形柱アームの CFD 解析値は、理論値よりも大きくなった. 翼とアームの接続部分の影響が原因と推測される.
- (2) 先端周速比が λ=3 の回転状態で、風車ロータの出力係数 Cpを比較した結果、アーム無しの仮想ロータ は実験値よりも大きな CFD 解析値を与え、翼型アーム(弦長:0.04 m、厚み:0.0072 m)を持つロータは 実験値と良い一致をした。同一の厚みを持つ円柱・矩形柱アームを持つロータでは、出力係数はマイナ スとなり、風車として機能しない結果となった。

#### 前 辞

本研究は鳥取大学国際乾燥地研究教育機構(IPDRE)の研究プロジェクトの一部,九州大学応用力学研究所の共同利用研究,JSPS 科研費 16H04599 により実施された.ここに明記して謝意を表す.

#### 凉 文

- (1) Ghasemian, M., Ashrafi, Z. N., and Sedaghat, A., "A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines", *Energy Conversion and Management*, Vol. 149 (2017), pp. 87-100.
- (2) Li. Y., Calisal, S.M., "Three-Dimensional Effects and Arm Effects on Modeling a Vertical Axis Tidal Current Turbine", *Renewable Energy*, Vol. 35 (2010), pp. 2325-2334.
- (3) Islam, M., Fartaj, A., Carriveau, R., "Analysis of the Design Parameters related to a Fixed-pitch Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine", Wind Engineering, Vol. 32, No.5 (2008), pp. 491-507.
- (4) van Bussel, G., Mertens, S., Polinder, H., Sidler, H., "TURBY®:Concept and Realisation of a Small VAWT for the Built Environment", Proc. EAWE/EWEA Special Topic Conference "The Science of Making Torque from Wind," Delft, Netherlands, (2004), pp.509-516.
- (5) 関和市, 牛山泉, "さらなる風を求めて 垂直軸風車 [基礎・設計から応用まで]", パワー社, (2008), p. 210.
- (6) White, F. M., "Fluid Mechanics", WCB/McGraw-Hill, (1999), pp. 453-458.

# 高効率輸送のための地面効果翼機の翼空力に関する研究

広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻 教授 岩下 英嗣

# 1. 研究目的

現在、世界の物流の99%は低速大量輸送機器の船舶であり、高速少量輸送機器の航空機は旅客や高付 加価値物の輸送に限られて利用されている。昨今、航空機を用いた高速かつ大量輸送を高効率で実現す るための次世代の特殊航空機の研究開発が各国で進められている。それは地面効果を利用した地面効果 翼機(WIG)と称される特殊航空機であり、韓国では実用機を開発建造して将来、国際線として黄海上を 飛ぶ計画であり、国際法の整備も含めた開発計画が進行中である。地球温暖化問題を抱えた将来におい て有望な輸送機器であると期待されている。本研究では、これまで当方で進めてきた前翼式の新形式地 面効果翼機に関して、その主翼の風洞試験を行い、地面効果内圧力分布や空力性能について検討するこ とを目的としている。

# 2. 研究組織

氏 名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科 輸送環境システム専攻	教授	代表者
片野 彬	広島大学大学院工学研究科 輸送環境システム専攻	修士2年	実験補助
大西 宏尚	広島大学大学院工学研究科 輸送環境システム専攻	修士1年	実験補助
吉田 茂雄	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

# 3. 理論計算

非圧縮,非粘性,非回転の理想流体と仮定し,空気場 を一定速度U (m/s) で進む翼を考える. Fig.4 に物体固 定座標系を示す.  $S_H$  は物体表面,  $S_W$  は後流面,  $S_F$  は 自由表面を表している. 法線ベクトルn は流体内向きと し,自由表面は剛体壁,後流面は主流に沿って平行に流 れると仮定する.空気の速度ポテンシャルを $\Phi(x,y,z) =$  $U[-x+\phi(x,y,z)]$ と表し,空気の攪乱速度ポテンシャル  $\phi$  は次の境界条件を満足する.



Fig. 1: Body-fixed coordinate system.

$$[L] \quad \nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

$$[H] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial n} = n_x \qquad \text{on } S_H \tag{2}$$

$$[F] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial n} = 0 \qquad \text{on } S_F \tag{3}$$

$$p^+ - p^- = 0 \qquad \text{on } S_W \tag{4}$$

流体領域にGreenの第2定理を適用すると、次の積分方程式が得られる.

[K]

$$\frac{\phi(P)}{2} - \iint_{S_H} \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \phi(Q) dS - \iint_{S_W} \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} [\phi(Q_T^+) - \phi(Q_T^-)] dS$$
$$= -\iint_{S_H} \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} G(P,Q) dS \tag{5}$$

ただし,

$$G(P,Q) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right), \quad \frac{r}{r'} = \sqrt{(x-x') + (y-y') + (z \neq z')}$$
(6)

ここで、 $\phi(Q_T^+)$ と $\phi(Q_T^-)$ は後縁上下面での速度ポテンシャルを表している。一定要素の仮定に基づき離散化した後、境界条件 (2)、(4) 式の下で数値的に解くことができる。このとき、 $S_H$ 上の圧力は、

$$\frac{p(\boldsymbol{x}) - p_0}{\rho U^2/2} = 2\frac{\partial \phi(\boldsymbol{x})}{\partial x} - \nabla \phi(\boldsymbol{x}) \cdot \nabla \phi(\boldsymbol{x})$$
(7)

により求めることができる。ここで、*p*<sub>0</sub> は大気圧、*ρ* は空気密度である。(7) 式中の速度ポテンシャル*φ* の偏微分は、翼表面上の速度ポテンシャル分布を2次元のスプライン関数で表して数値微分により求め ている。こうして得られた圧力を*S<sub>H</sub>*上で積分することにより、*i*方向に作用する力とモーメントが

$$F_i = -\iint_{S_H} \{p(\boldsymbol{x}) - p_0\} \, n_i \, dS \quad (i = 1 \sim 6) \tag{8}$$

により得られる。ただし、 $(n_1, n_2, n_3) = \mathbf{n}, (n_4, n_5, n_6) = \mathbf{x} \times \mathbf{n}$ である。

### 4. 実験の概要

# 4.1 供試模型について

本実験に用いた模型を Fig.2 に示す. ノーズ部,前翼部,尾翼部及び主翼部の圧力計測部は紫外線硬化型のアクリル系樹脂を用いて九州大学応用力学研究所所有の 3D プリンター (Project 3500 HDMax) で製作した.主翼は,翼中央部から左翼端への長さを y とし,無次元値 y/b/2 を定義し,y/b/2 = 0.300, 0.600, 0.900 の 3 断面,翼端板高さ  $h_E$  の 1/3 の間隔で 2 断面の圧力計測部を有している.計測孔の数はそれぞれ,SectionA(32 点),Secti on B(32 点),Section C(29 点),Section D(16 点),Section E(16 点),の合計 125 点ある.計測孔の位置は翼後縁からコード長を除した値 (x/c)は、Fig.2 中の表のように設定している.表面には直径 0.8mm の圧力計測孔が設けられており,圧力は計測孔から樹脂ピース内部に直径 1.5mm のポリウレタンチューブが差し込まれており,翼内部を通って微差圧式圧力センサーへと接続される.圧力計測部以外の部品はケミカルウッド材(サンモジュール)であり,大きめに製作された樹脂をケミカルウッド材で接着後,切削加工により表面を滑らかにしている.



Fig. 2: Experimental model.

#### 4.2 風洞試験

Fig. 3に実験システムを示す.3軸トラバーサーに3分力計(日計電測製 Y113M1型)とストラット を取り付け,その下部に供試模型を取り付ける.ストラット前方に取り付けられたピトー管は、全圧と 静圧により、流速を計測するとともに、静圧計測用チューブを途中で分岐させ、微差圧式圧力センサー (Cell Instruments 製 µ DAQ 32DTC)の基準静圧入力ポートに接続する.計測静圧入力ポートには、供 試模型の表面圧力計測用ポリウレタンチューブををストラット後方を通して接続する.

実験システムを Fig.??に示す. 発信機 (NF 製 DF1906) に信号を送り,外部トリガーを発信させ,μDAQ 32DTC と 3 分力計の計測を同サンプリング周波数 (500Hz),同時刻で行う. 3 分力計で得られた歪みは ストレインメーター (日章電機製 DSA-100A) により電圧に変換され,ユニバーサルレコーダー (共和電 業製 EDX-200A-4H) を経由して LAN ケーブルで計測用パソコンに出力される.μDAQ 32DTC に関し ても同様にデータを LAN ケーブルで出力させ,3分力と風速,圧力を合わせて 36 チャンネルの計測を 行っている.

地面効果内での計測を行うに際し,境界層を低減させる手法として,地面板を設けている.発達した 境界層を板前縁で再スタートさせることで境界層を低減させた結果,計測位置において,約20mmの厚 さまで境界層を低減できている.

飛行高度は、翼前縁から地面板までの高さhを主翼のコード長cで除した値であるh/cを定義し、 主翼単独と全機で飛行高度h/cを変化させて実験を行っている。風洞の流速はU = 20m/s に設定し、  $Re = 4.0 \times 10^5$ の領域で実験を行っている。



Fig. 3: Experimental system for measuring aerodynamic forces and moments and pressuredistribution simultaneously.

### 実験結果と考察

### 5.1 飛行高度変化時の全機空力特性

まず,機体迎角 0.0degs. に固定し,前翼迎角 α<sub>F</sub>,飛行高度 h/c を変化させた時の全機空力特性の計算 結果と風洞試験の実験結果を Fig.4 に示す.実線が計算結果,プロットが実験結果である.

各前翼迎角において, 揚力及びピッチングモーメントが実験結果は計算結果よりも高くなっている. ピッチングモーメントが高いことにより, 圧力中心も後ろに移動している. ここで考えられるのは, 尾 翼に揚力が発生していないためではないかと考えられる. ここで, 同時に計測した尾翼の翼断面 section G, Hにおける表面圧力分布を Fig.5 に示す.本来,水平尾翼には,主翼による吹き降ろしの影響によ り,相対迎角が負となる流速が作用することで,下向きの揚力が発生している. しかし, Fig.5 の翼表面 圧力を見ると翼上面と下面の圧力差がほとんど生じていないことが分かる. これは,実験システム上尾 翼部の風上側にあるストラットが影響しているものと考えられます. これらのことより,尾翼に働くは ずであった負の揚力が発生せず,結果として,全体の揚力が上昇し,ピッチングモーメントは機首下げ 方向のモーメントが増えたものと思われる.



Fig. 4: Aerodynamic properties of the Canard-Configuration WIG with different angle of attack of front wing at  $\alpha_B = 0.0 \text{ deg.}$  ( $\alpha_T = 0.0 \text{ degs.}$ ,  $\alpha_M = 3.0 \text{ degs.}$ ).



Fig. 5: Pressure distribution of horizontal tail wing ( $\alpha_T = 0.0 \text{ deg.}, \alpha_F = 9.0 \text{ deg.}, h/c = 0.35, \alpha_B = 0.0 \text{ deg.}$ ).

### 5.2 前翼の有無における全機での翼表面圧力分布の比較

主翼の風上側には、前翼が存在している。そのため、主翼の翼表面圧力に対しての干渉影響は存在する と思われる。そこで、主翼の翼表面圧力分布における、前翼ありとなしの結果を比較することによって、 前翼と主翼の干渉影響を見ていく。飛行高度h/c = 0.35における前翼あり(前翼迎角 $\alpha_F = 9.0$  degs.)と 前翼なしの結果をFig6に示す。Section A から E にかけて、前翼ありとなしの結果にほとんど相違が見 られないことが分かる。したがって、前翼が主翼の風上にあることによって主翼の翼表面圧力に対して の干渉影響はほとんど無いということが分かる。



Fig. 6: Sectional pressure distribution on the main wing with end-plates of the Canard-Configuration WIG at h/c = 0.35 (,  $\alpha_F = 9.0$  degs.).

# 5.3 前翼迎角変化における全機での翼表面圧力分布の比較

続いて、前翼の迎角を変化させることによって、前翼の後流面が主翼の翼表面圧力に与える干渉影響 を見ていく、機体迎角  $\alpha_B = 0.0 \degs.$ , h/c = 0.35 における前翼迎角  $\alpha_F$  を 3.0, 6.0, 9.0 degs. と変化 させた時の主翼の翼表面圧力分布について考察する、Fig.7 に、その計算結果と実験結果を示す. これら より、前翼の迎角を変化させたとしても、その変化によって主翼の翼表面圧力分布に変化はほとんど見 られないことが分かる. したがって、前翼の迎角変化に伴った後流面の変化による、主翼の翼表面圧力 分布への影響はほとんど無いということが分かる.



Fig. 7: Sectional pressure distribution on the main wing with end-plates of the Canard-Configuration WIG with different angle of attack of front wing at h/c = 0.35,  $\alpha_B = 0.0 \text{ deg.}$ 

6. おわりに

本研究で得られた成果を示すと以下のようになる.

- (1) 全機模型を 3D プリンターで製作した部品を組み込み,設計,製作し,精度の高い主翼の翼表面圧 力及び空力特性のデータ取得を行った.
- (2) 全機という複雑なモデルにおいても、境界要素法を用いた理論計算により、機体全体に働く空力 及び主翼の翼表面圧力分布の推定が可能であることが確認された.
- (3) 主翼単独時に比べ,全機では主翼下面における正圧が減少し地面効果が損なわれていることが理 論計算及び実験結果に見られており、その原因として胴体との干渉影響が大きいことが明らかに なった、地面効果の損失を小さくする機体形状の検討が必要である。

# REFERENCE

- 1) 伊藤 悠真;地面効果内を飛行する3次元翼の空力に関する研究,卒業論文,2011
- 2) 伊藤 悠真:地面効果内を飛行する3次元翼の空力に関する後流影響と自由表面干渉影響について, 修士論文,2013
- Jaspa PORANANONT : Asymmetric Aerodynamics of a Wing Flying in the Ground Effect, Master's Thesis, 2015
- 4) 小頭 康孝;地面効果翼の水中曳航試験における自由表面影響に関する研究, 2013
- 5) 田端 貴明,村上真貴;広島大学新型風洞の性能評価に関する研究,2015
- 6) Ahmed, M.R., Takasaki, T. and Kohama Y. ; Aerodynamics of a NACA4412 Airfoil inGround Effect, AIAA JOURNAL, Vol. 45, No. 1, 2007

# 血管内治療用カテーテルにおける耐久性と操作性の検証

# 九州大学附属病院 血管外科 古山 正

# 1. 緒言

バルーンカテーテルとは、カテーテルの先端部のバルーンを膨張させることで、狭くなった動脈の 内腔を押し広げ、動脈硬化性の疾患を軽減する治療に使用するカテーテルの一種である。しかし、そ の治療の安全性と成功率は著しく向上しているものの、血管挿入時のバルーンの破裂例やシャフト の破損例が報告されている。したがって、カテーテルの力学的特性を定量的に把握しておく必要があ るが、そのような力学特性を詳細に評価した研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、実 際に臨床で使用されている二種類のカテーテルの引張試験を行い、接合部とシャフト部の荷重一変 位挙動を評価した。さらに、バルーンカテーテルは2層構造を形成するが、その外筒と内筒について それぞれ引張試験を行い、応カーひずみ挙動を求めるとともに、塑性の全ひずみ理論に基づいて力学 挙動のモデリングを試みた。また、導出された力学モデルから内筒および外筒の荷重一変位挙動を予 測し、これらを組み合わせることで接合部およびシャフト部の変形挙動を予測できるか試みた。

#### 2. 実験方法

臨床で世界的に広く利用されている PTA バルーンカテーテルのうち二種類を試験体として使用し

た。そのうちの一本は実際に事故が報告されてい るカテーテルを用意した。事故が報告されている カテーテルを sampleA、もう一方のカテーテルを sampleB とする。なお、バルーンカテーテルは二 層構造を形成しており、内部をガイドワイヤーが 通る内筒と空気を注入しバルーンを膨張させる 外筒から構成されている。強度的に弱いとされる のはバルーンの根元の部分の接合部であるため、 本研究では、接合部を含む部分(接合部と呼ぶ)



Fig.1 SEM images of the cross-sections of inner and outer tubes.

とそれ以外の部分(シャフト部と呼ぶ)に二分割し、それぞれ引張試験を行った。また、内筒と外筒 それぞれの基本的な応力 - ひずみ線図を得るために、カテーテルを内筒と外筒に分解し試験を行っ た。引張試験には小型卓上試験機を使用し、引張部分の長さ 30mm、負荷速度 600mm/min で試験を 実施し荷重と変位の時間変化を記録した。試験の様子はビデオで記録し、破断までの様子を確認し た。さらに、内筒と外筒の断面を SEM 観察し、断面形状の観察と断面積の計測を行うことで真応力 -真ひずみ関係を算出した。これにより、導かれた内筒と外筒の応力 - ひずみモデルから、カテーテ ルの荷重 - 変位を予測できるモデルを構築した。

#### 結果および考察

引張試験より得られたカテーテルの接合部とシャフト部の荷重 - 変位曲線をそれぞれ図2の点線に 示す。図(a)より、接合部では種類に関係なく、先に外筒が破断して荷重が大きく減少し、その後内筒 のみの変形により再び荷重は増加した。この挙動を内筒と外筒の弾塑性荷重 – 変位挙動をそれぞれ 二段階に分けて直線近似し、カテーテル全体の荷重 – 変位挙動をそれらの組み合わせることによっ て表現を試みた。その結果を実線で示す。接合部において実測値と力学モデルがよく一致することが 確認された。一方のシャフト部においては外筒が先に破断するものと内筒が先に破断するものに分 かれた。外筒が先に破断するものについては、前に示す単純な力学モデルが一致した。しかし、内筒 が先に破断するものについては、内筒破断後、外筒の塑性変形により荷重がほとんど増加することな く変形し、その後再び荷重が増加した。この現象は、内筒の破断後も外筒が変形を続けることにより内筒に作用する圧縮力が増加し強く拘束されるため、外筒と内筒が一本化して変形を開始することに対応していると考えられる。これを考慮し、外筒が先に破断するものと同じように内筒と外筒の荷重 - 変位挙動を組み合わせたモデルと比較したところ図(b)からも分かるように一致することが分かった。

また、二種のカテーテルの内 筒と外筒についても同様に引 張試験を行った。これによっ て、得られた応力ひずみ曲線を 全ひずみ理論で表した結果を 図3に示す。これにより、内筒・ 外筒共に種類に関係なく一致 することが分かった。

最後に、全ひずみ理論を用い ることによって得られた応力 -ひずみモデルを荷重 - 変位モデ ルに変換し組み合わせたものを 実測値と比較したところ、こち らも実測値と同じような挙動を 描くことが分かった。この導か れた内筒および外筒の力学モデ ルを組み合わせることで、接合 部・シャフト部それぞれの挙動 を予測できるか試みた。その結 果を図 4 に示す。接合部におい



(a) joint, (b) shaft.

ては、外筒にバルーン部が含まれることを考慮しパラメータを掛け合わせることで実測値に近い挙動を示すことができた。一方、シャフト部では、内筒および外筒の力学モデルをそのまま組み合わせることで実測値に近い挙動を示すことができた。

#### 研究組織

九州大学附属病院 血管外科:古山 正、吉屋圭史 国際医療福祉大学 血管外科:松本 拓也 九州大学応用力学研究所:東藤 貢 九州大学大学院総合理工学府:鎌田祥平

# CT-FEM を用いた大腿骨に関連するバイオメカニクス問題の解明

横浜市立大学医学部整形外科 稲葉 裕

### 1. Introduction

The purpose of this study was to predict the changes of stress variation and bone remodeling in the lower limbs after THA using computational analysis. Inhomogeneous 3D-model of lower limbs was developed using computer tomography (CT) images to consider hip osteoarthritis (OA) and THA cases. A load case of quiet standing position was considered to evaluate the stress distribution in both limbs.

#### 2. Finite Element Model

3D computational model of a pair of lower limbs was constructed from CT images of a 79-year old female patient with hip osteoarthritis (OA). The images were collected from Kyushu University Hospital, Japan. A finite element model was then developed from the 3D-model. Distribution of bone mineral density (BMD) was estimated using the gray values of Hounsfield unit (HU) in the image [8]. Distribution patterns of young modulus and yield strength were then calculated by correlating the mechanical proeprties with the BMD. It was assumed that each of finite elements was homogeneous with one modulus. This modeling was processed using commercial biomedical software, Mechanical Finder v6.1. Higher values of young modulus at the outer part of the femoral bone indicated cortical bone with high stiffness, while the inner part was known as cancellous bone with porous structures. Hip cartilages were considered on both the left and right joints with a low elastic modulus. The bonds between cartilage, acetabulum and femoral head, sacrum and ilium were assumed to be rigidly connected.

In developing a 3D model of the lower limbs with hip prosthesis, the femoral head of the left femur was cut and inserted with a prosthesis stem. Meanwhile, the acetabular cup and bearing were aligned properly to the acetabulum to demonstrate a ball and socket joint. A ceramic-on-ceramic type of implant was used in this analysis. The material properties of hip cartilage and prosthesis are described in Table 1. The matrials were assumed to be linear elastic and homogeneous. Interfacial connection between implant and bone was considered as perfectly bonded.

A load case of quiet standing was considered in this analysis. The posture in the foot side-by-side position is known to contribute to the structural and functional equivalent of the lower limbs [9,10]. A distributed load of a 60kg patients' body weight was applied in the cross section of the lumbar vertebrae and fixed at the distal end of the femoral shafts.

#### 3. Results & Discussion

Projection of bone remodeling in lower limbs after several years was discussed on the resulting bone mineral density (BMD). The process of bone remodeling was predicted by the adaptive changes in bone density life equations. The remodeling analysis was computationally conducted using the implemented sub - program in commercial biomedical software, Mechanical Finder v6.1. Alteration of bone mineral density in the lower limb with THA over 5 years is illustrated in Fig. 5. The cross sectional view of the femoral shafts suggested that the bone density was reduced at the proximal and middle region throughout the years at both limbs. While, the distal region of the shafts indicated an increment of BMD. This finding correlates to the gain in the principal stress after THA. The changes were predicted to be high between year 0 and year 1, especially at the hip joint where the load was transferred from the pelvic to the femoral shafts. From year 1 onwards, the changes were mostly dominant at the femoral shafts and minimal elsewhere. Similar clinical findings were reported by Venesmaa et al. [17] where the bone loss, acute at the initial phase while further losses was minimal in relation to the normal ageing bone. The operated limb indicated more changes as compared to the non-operated limb. Prediction of early bone loss was principally a consequence of stress shielding and bone disuse atrophy [17,18]. The findings recommended that the remodeling process of bone resorption and thickening problems may become worse after a period of time. Besides, the possibility of changes in bone mass and architecture was also projected as the bone will modify itself to adapt the new biomechanical environment. All of these possibilities are believed to contribute to the instability and imbalance gait to of the THA patients.

Critical adaptation was expected to occur in the operated limb. Fig. 6 shows the percentage of BMD change around the prosthesis stem. Several points were selected at the lateral and medial aspects to calculate the percentage of bone density changes over 5 years and to further estimate the bone loss. Although the bone loss is not favorable to adaptive bone remodeling, consideration of changes in BMD values was sufficient to be taken as a baseline to assess bone loss after surgery. In medial aspects, bone loss was predicted to be high in point 1, 2 and 7 (up to 80%). The result was expected as a high stress was concentrated in the respective region due to the bending effects of the prosthesis stem. The higher bone loss was also reported in Gruen zone 7 by Venesmaa et al. which was presented as point 1 and 2 in this study. The respective areas were potentially becoming the weakest part and most probable location for failure to start. The bone loss was minimum in the middle and distal region of the femoral shaft. Different patterns was predicted in

lateral aspects. No bone loss was predicted to occur in point 1 and 2 which are referring to the greater trochanter region of femur. An average of 19% of bone loss was estimated along the prosthesis stem, but it increases exponentially from the distal tip of the stem. The highest value predicted in the region was parallel to that reported by Herrera et al. The bending effects from the prosthesis shaft were assumed to influence the higher percentage.

Computational prediction conducted in this study showed overestimate difference (percentage of change) as compared to clinical findings. However, the findings are sufficient to predict the bone remodeling behavior and regions in femoral shaft after arthroplasty. The weakness was contributed by the limitations in the present study. Contribution of associated muscles was not considered in the analysis. Gait stability was primarily supported by muscles in hip joints for proper balancing and adjustment. Different physiological loading can be considered to demonstrate the correlations between the computational findings and gait performance.



**Fig. 5.** Changes of bone mineral density (BMD) distribution in the lower limbs with THA after 5 years at the cross-sectional anterior view



**Fig. 6.** Prediction of the possibility of bone loss in operated limb after 5 years at the medial (left) and lateral (right) aspects.

研究組織 横浜市立大学医学部整形外科: 稲葉 裕 Universiti Teknologi MARA: Abdul Halim Abdullah 九州大学応用力学研究所: 東藤 貢

# CT-FEM を用いた骨粗鬆症に起因する骨折メカニズムの研究

### 九州大学大学院医学研究院 中島 康晴

#### 1. 緒言

変形性股関節症や関節リウマチにより関節部に疾患が生じた際,最終的な治療法としては人工股関節 置換術(THA)が広く行われている.患部を摘出し,金属やセラミックなどでできた人工関節に置換す ることで痛みがなくなり,歩行能力の改善に繋がっている.しかし,金属製のステムを大腿骨に挿入する ことで力学的環境に変化が起こるため,手術後に長い年月が経過した患者の中にはストレスシールディ ングによる骨密度の低下が起こることがあり,骨折などの新たな疾患へと繋がるため,問題となってい る.そして,このストレスシールディングの影響を3次元的にまた定量的に評価した研究は少ないのが 現状である.そこで本研究は,THA後8年又は12年が経過した2名の成人女性のCT画像から3次元 大腿骨モデルを作成し,骨密度とヤング率分布に及ぼすTHAの影響を検討し,力学解析を行うことで THAが大腿骨に及ぼす影響について検討した.

#### 2. 解析方法

片方の股関節に対して THA を行った後 8 年又は 12 年が経過した成人女性 2 名の大腿骨の CT 画像を Mechanical Finder ver.9.0 で読み込み,画像処理後に積層させモデル化を行うことで健側と THA 側双 方の 3 次元大腿骨モデルを作成した.4 節点 4 面体要素によりメッシュ分割を行い,材料特性として大 腿骨の骨密度を HU 値から推定した.さらに,ヤング率と降伏応力を Keyak の式を用いて骨密度から算 出した.健側と THA 側の骨密度分布とヤング率分布を比較することで THA が大腿骨の材料特性に及ぼ す影響について検討した.次に,作成した大腿骨モデルを用いて力学解析を行った.歩行時に生じる負荷 を想定し,骨頭部に頚部軸と平行に 1850N の圧縮荷重を付加し,大転子部に頚部軸と平行に 967N の引 張荷重を付加した.そして,遠位の大腿骨末端を完全拘束している.力学解析により得られた健側と THA 側のひずみエネルギー密度分布などを評価することで THA が骨に及ぼす影響について検討した.

#### 3. 結果と考察

THA 後 8 年が経過した患者の健側と THA 側双方の骨密度分布を図 1(骨軸における断面)と図 2(小転 子における断面)に示す.健側と THA 側の骨密度分布を比較したところ,ステムの挿入により,明らか に内側と外側で骨密度が低下していた.THA 後 12 年が経過した患者でも同様に骨密度の低下が生じて おり,特に,2名の患者とも小転子より近位部において骨密度の低下が顕著であった.骨密度の低下は大 腿骨よりもかなり高弾性な金属製ステムを挿入することで骨へ加わる力学的刺激が減少し,骨吸収が促 進されてしまったのではないかと考えられる.一方,ステムの挿入によりステムの前方と後方は骨密度が 高くなる傾向にあることが示された(図 2).皮質骨の高密度が維持されていることから,ステムの前後方 向では骨リモデリングにより新たな骨形成が生じているのではないかと考えられる.2名の患者の健側と THA 側双方におけるヤング率分布を評価したところ,骨密度と同様にステムの内側と外側においてヤン グ率は低下しており,ステムの前後方向では高い値を示していた.

THA 後8年が経過した患者の健側とTHA 側双方のひずみエネルギー密度の分布を図3(骨軸における 断面)と図4(小転子における断面)に示す.健側とTHA側のひずみエネルギー密度を比較したところ, THA側ではステム周辺においてひずみエネルギー密度が低いことが確認された.ステムの先端から近位 へといくにつれてひずみエネルギー密度が低い傾向にあり,特に小転子付近では健側よりもかなり低い ひずみエネルギー密度が分布していた.THA後12年が経過した患者でも同様にステム周辺においてひ ずみエネルギー密度が低くなっており,ステムの挿入により骨のリモデリングが抑制される可能性が示 唆されている.

### 4. 結言

本研究では、THA後8年又は12年が経過した2名の成人女性のCT画像から3次元大腿骨モデルを 作成し、THAが骨に及ぼす影響について3次元的に評価した.その結果、2名の患者共にステムの内外 側方向において骨密度とヤング率が低下しており、ステムの挿入により骨吸収が促進されたのではない かと考えられる.次に、作成した3次元モデルを用いて力学解析を行ったところ、2名の患者共に健側よ りもTHA側においてステム周辺のひずみエネルギー密度が低くなっており、骨のリモデリングが抑制さ れたのではないかと考えられる.以上の結果より、骨モデルを用いた3次元的評価は、ストレスシール ディングによる骨構造の経年変化を評価するのに有効であることが示唆された.



(a) Healthy side. (b) THA side. Fig.1 Bone density distribution of bone axis.



(a) Healthy side.



(b) THA side. Fig.2 Bone density distribution of lesser trochanter.



(a) Healthy side.(b) THA side.Fig.3 Strain energy density distribution of bone axis.



(a) Healthy side.



(b) THA side. Fig.4 Strain energy density distribution of lesser trochanter.

# 3D プリンターを利用した骨再生用多孔質足場材料の開発

# 大阪大学医学系研究科 名井 陽

# 1. 緒言

整形外科分野では、生体骨から人工骨まで様々な種類の補填材を欠 A 損部に移植する骨再生治療が行われている.最近では、細胞と足場材 料を組み合わせた組織工学的方法も検討されており、細胞増殖能や組 織形成能に優れる足場材料の開発が重要となっている.構造的には多 孔質構造が基本となるが、その一方で骨に匹敵する力学特性を有する ことが望ましい.本研究では CT-FEM と 3D プリンティング技術を組 み合わせた新しい試みとして、力学特性を担保するフレーム構造を 3D プリンティング技術で作製し、その内部に細胞の足場となる多孔質構 C 造を別途導入したハイブリッド構造の開発を目的とした.

#### 2. 実験方法

フレーム構造の基本構造として,A. 単純格子構造,B. トラス構造, C. ハニカム構造の3種類を採用し,3D-CADで設計を行った.次に,紫

外線硬化型の 3D プリンターを用いて,設計した構造体の実構造モデルを作製した(図 1).原料は骨セメントとしても使用されるアクリル系樹脂である.小型卓上試験機を用いて,作製した 3 つの実構造体の圧縮特性を評価した.また,FE-SEM で破壊部の観察を行った.

次に, 骨再建を検討している部位の力学的機能を 考慮した骨再生用インプラント(力学的適合性を 有する人工骨)の作製方法について検討した. 再建 対象例として中指基節骨を選択し, 手指の CT 画像 を用いて骨密度分布を考慮した数値モデルを構築 した(図 2). 次に中指基節骨の中腹の骨再生を仮定 し, CT-FEM で用いた指のモデルを参考にして 3D-CAD で骨再建用インプラントを設計した. 内部構 造には単純格子構造を導入した. 3D-プリンターで 実構造の作製を試み, 図 4 に示す荷重条件で 1600 N の分布荷重を 8 分割して与え, インプラント置換 時の力学挙動を評価した.

さらに、フレーム構造にコラーゲンを充填したハ イブリッド構造の細胞増殖能を評価するためにヒト 間葉系幹細胞(human mesenchymal stem cell; hMSC)を播種し、7日間培養することで細胞生物学 的観点から骨再生用インプラントとしての有効性を 検討した.



Fig. 1 Three different designs of porous structures.



Fig. 2 Modeling process of CT-FEM



# 3. 結果および考察

表1に3種類の構造体の最大荷重,剛性,吸収 エネルギーを示す.最大荷重に関してはトラス構

造を用いた構造体 B が最も大きな値を示した が、最大荷重点を過ぎてから構造は完全に崩壊し た.構造体 A は部材の一段のみが座屈によって 破壊する点で最大荷重を示し、他の構造体は単 純格子構造を保つ.構造体 C は、最小の最大荷 重を示すが、部材の一部に破壊が生じても、全体 の構造は崩れにくく、最大荷重点後も最大荷重 に近い荷重を支持することが可能であった. 高 強度である構造体 B,構造の維持機能を有する構 造体 C,それぞれトラス構造とハニカム構造の特 徴を示していると考えられる. 図5に各構造体 の破断部の FE-SEM 画像を示す.全てに共通し て、脆性的な破壊形態が観察された.

図 6 に骨インプラントの有無による相当応力 分布の比較結果を示す.骨インプラントを置換 することによって応力集中が端部に移行し,破 壊の原因になることが予想できる.このような 応力集中を軽減するためには,バイオセラミッ クス等の高弾性材料の導入が必要であると考え られる.さらに,骨全置換用ハイブリッド構造体 についても試作を試みた(図 7).患者の CT 画 像から骨形状を再現し,内部には格子構造を導 入し骨芽細胞の定着と骨組織の進入を促進する ことができる.

図8に細胞増殖挙動の測定結果を示す。培養3 日目に若干の細胞減少が見られるも7日目には 増殖傾向を示し、骨インプラント内は細胞の生 存できる環境であることが示された.図9に骨 インプラント内部に充填したコラーゲンに定着 するhMSCのSEM写真を示す.

Table 1 Compressive properties.

Structures	А	В	С
Maximum load [N]	532	855	156
Stiffness [kN/m]	726	892	156
Absorbed energy [mJ]	211.8	448.3	239.5



Fig. 5 FE-SEM microphotographs of fracture regions.



Fig. 6 Distribution of equivalent stress at 800 N



Fig. 7 Morphology of bone implant





Fig. 9 Surface morphology

# 骨粗鬆症化脊椎における骨損傷メカニズムに関する研究

# 順天堂大学医学部 米澤郁穂

# 1. 緒言

バルーン椎体形成術(BKP: Balloon kyphoplasty)は骨折部をバルーンで拡張後骨セメントを注入 する比較的新しい椎体圧迫骨折の手術方法として行われている.しかし,この BKP 後の脊椎におい ても続発性圧迫骨折が生じることが問題となっているが,このような現象をバイオメカニクス的に 解析した研究はほとんど見受けられない.そこで本研究では、椎体圧迫骨折が生じ,BKP を行った 患者の手術前後の CT 画像から、骨折が生じた椎体及びその上下 2 個の椎体の計 5 つの椎体からな る 3D-FE モデル及び骨折が生じた椎体の上下の椎体単体の 3D-FE モデルを作成し、損傷モデルを 導入した FEA をおこなった.BKP 前後の応力分布状態と隣接する椎体での損傷の発生状態を比較 することで、BKP が及ぼす力学的影響及び椎体単体と 5 椎体モデルによる損傷の発生状態を比較検 討した.

# 2. モデル作成と解析方法

74歳,78歳の高齢女性の脊椎 CT 画像から,脊椎モデルを作成した.骨部の材料特性は Keyak の計算式を用いて骨密度より算出した.BKP 後のモデルの中央椎体の内部には骨セメントの存在を仮定している.骨損傷を再現するために,要素単位で破壊が進行する損傷モデルを導入した.引張破壊は最大主応力,圧縮降伏は相当応力,圧縮破壊は最小主ひずみで制御される損傷モデルを用いている.Fig.1 に示すように境界条件として,椎間板と椎間間節に合計 6000N および 10000N の分布荷重を 20 分割にして加えた.また,モデル底部は完全拘束とした.一方,椎体単体モデルはプレートで挟み,強制変位 5mmを 20 分割にして加え,モデル底部を完全拘束とした.

### 結果および考察

74 歳,78 歳における椎体単体での解析の結果よ り,椎体ごとに強度が異なることが分かった.ま た、各椎体の強度順位は、74歳の方が78歳の椎体 よりも強度が高く、年齢別では、74歳は腰椎(L2)の 方が胸椎(T12)よりも強度が高く、78歳では、胸椎 (T11)の方が腰椎(L1)よりも強度が高いことが分か った。また,この時の荷重ピーク値に骨折が生じる と仮定した場合に,荷重ピーク値の変位は、 0.175mmとなった。Fig.2 に椎体単体の損傷要素数 を示す。発生した損傷要素数に達すると骨折が生 じると仮定した場合に、Fig.2 に荷重ピーク値の 0.175mmを当てはめると、それぞれの椎体の損傷 要素数は、74歳の胸椎(T12)、腰椎(L2)は損傷要素 数が 7000 程度に達した時、78歳の胸椎(T11)は





Fig.2 Variation of number of damaged elements in single models

8300、腰椎(L1)は 8000 に損傷要素数が達した時にそれぞれ骨折が生じると仮定できる。Fig.4、Fig.5 にそれぞれ 74 歳、78 歳の 5 椎体モデルに 6000N を 20 分割で加えたときの骨折が生じた椎体の上下の椎体の破壊要素分布を示す. Fig.3、Fig.4 にそれぞれに椎体単体モデルで骨折が生じると仮定し

た損傷要素数を当てはめると、74歳では、BKPの前 後とも胸椎(T12)が先に 4200N 程度で骨折が生じる と仮定できる。78歳では、BKP前では、胸椎(T11) が 2800N 程度で、BKP 後は腰椎(L1)が 3500N 程度 で骨折が生じると仮定できる。74 歳では、BKP に よる力学的改善は見られなかったが、78歳では、胸 椎(T11)において、大幅な力学的改善が見られた。こ の2つの違いは、圧迫骨折を起こした椎体の損傷形 状による違いではないかと思われる。74歳では、 BKP 前後の椎体の形状に大きな変化は見られない が、78 歳では、BKP による椎体の復元が目視でき る。このことより、手術前は圧潰していた椎体が BKP を行うことによって形状がある程度復元され、応力 が BKP 前よりも均等に分散されるようになったこ とが考えられる.また、内部に充填した骨セメント の影響により圧潰していた椎体の剛性が上昇した ことも要因の一つであると思われる. 椎体単体モデ ルとの強度順位は、74歳は対応していたが、78歳は 対応していなかった。しかし、74歳、78歳で比べた 場合は対応していた。78歳が先に胸椎(T11)が骨 折すると仮定したが、74歳も先に胸椎(T12)が先に 骨折することから5椎体モデルにした場合、胸椎の 方が力学的に厳しい条件下にあり、それゆえ、78歳 の強度順位が逆転したのではないかと考えられる。 今回の結果から、単独椎体による強度評価と、5 椎体 モデルを組み合わせることで、続発性圧迫骨折の危険 性を推測できる可能性があることが示唆される. Fig.5 にモデルごとの損傷発生分布を示す。それぞれのモデ ルの損傷の始まり方として、5 椎体モデルは椎体後部 から損傷が始まるが単独椎体モデルは椎体の外側から 損傷が始まった.この理由として、単独椎体はプレー トにより荷重が前方まで均一に加わるが、5 椎体モデ ルは曲がっているため, 椎体後部により負荷が加わ っているためではないかと考えられる. 損傷の累積 状態が異なるので、両者が一致するようにモデルの 修正が必要である



Fig.5 Damaged element comparison of single model and 5 vertebrae

# 研究組織

順天堂大学医学部整形外科:米澤郁穂、高野弘充、佐藤達哉 九州大学応用力学研究所:東藤 貢 九州大学大学院総合理工学府: 小屋祐希

# CT-FEM を用いたラット椎体のバイオメカニクス解析

久留米大学医学部解剖学講座 金澤知之進 九州大学大学院総合理工学府 John Duckworth 九州大学応用力学研究所 東藤 貢

# 1. Introduction

Computed tomography (CT) images of an object have been used to construct its three-dimensional structure by layering the CT images. For example, medical CT images have been used to construct 3D bone and joint structures and such computational models have been utilized to analyze the fracture strength with use of finite element method (FEM). This kind of CT-FEM technique for bone fracture analysis has already been used to estimate bone strength of osteoporotic patients clinically in some hospital with permission of Ministry of Health, Labour and Welfare, Japan. However, application of CT-FEM for animal models used *in vivo* experiments is very limited.

In the present study, CT-FEM method was applied to analyze the fracture behaviour of vertebrae of Wistar rat models quantitatively by using micro-CT images. Fracture behavior of 4 different rats were analyzed and the distribution of strain energy density and the variation of fracture elements were compared.

### 2. Methods

The program Mechanical Finder v7.0 was used to transform the many hundreds of two-dimensional  $\mu$ -CT scan images into four solid, three dimensional finite element models. Each element in the mesh has its own mechanical properties, such as Young's modulus and yield stress, determined by the bone density in that region of the  $\mu$ -CT scan, a method which uses the well-established Keyak formula and known constants. Poisson's ratio was set to be the same constant value, 0.3. For this finite element analysis, a mesh size of 0.05mm was used, providing a network of around one million discrete nodes for each approximately 4x2x2mm specimen. Once a model is created, a load can be applied to it in many different ways, to see how the bone stands up to different kinds of bending and compression. Compression, extension, flexion, lateral bending left and lateral bending right tests were performed at 1000N intervals between 0-8000N. The fracture rate was measured for each of the four samples as well as the strain energy density under each load.

#### 3. Results and Discussion

As can be seen in Figure 1, the bone density variation across each of the four specimens is quite large, however there are similarities which can be drawn as well. In each vertebrae the area of densest bone is found along the transverse centre of the posterior surface (the red regions). The areas of least dense bone are again in the transverse centre, but in the core of the bone tending towards the anterior surface (the blue regions). This indicates that the vertebrae might be designed for bending outward under stress, as the dense bone should be better at resisting compressive forces, whilst the sparse bone is often more flexible and able to stretch.



Figure 1 Bone density variations in the z/y plane (sagittal plane) of each specimen at its midsection.

A striking difference between the four vertebrae is their shape. These are all taken from the same spot in the lumbar section of the rat's spine, from rats that are genetically very similar and bred to be standard. Yet the great variation in vertebrae shape and density here is a clear warning to researchers not to assume that rats sold as standard, are entirely so.

Figures 2 show the total failure elements under compression and flexion as examples. The location of failures was also analysed, and it was found that they strongly followed the strain energy distributions of each bone under each mode of loading. Other loading modes showed similar results.

Figure 3 shows the strain energy density distribution of each specimen along the z/y axis (the sagittal plane) after an 8000N compression, as well as an external view to show the strain energy density distribution along the vertebrae surface. Whilst the implications of this data in relation to the previous two analyses is covered in the Discussion section, it can be noted here that there is a very large difference in strain energy density which is immediately obvious. The specimen RFT45 for example, seems to have transferred its entire load without undergoing much bone remodeling at all. This indicates a much stronger and more inflexible bone structure than any of the other vertebrae.

Consider the worst performing sample, RFT46. The bone density analysis shows two things about the specimen; it contains a vertebra which is abnormally narrow and this narrow region has a thick layer of dense bone at the top, and a region of much less dense bone below. For this vertebrae then, we would expect firstly, a lot of stress concentrated on this narrow region of the bone and secondly, a mismatch in the strain between the two distinct regions. Where there are mismatches in strain there are build ups of stress and often this can cause severe fractures. Looking at the fracture analysis data we can see that specimen RFT46 does indeed have much higher fracture rates than the other bones under three of the five modes of loading. Of the remaining two, RFT46 places second. We then see that RFT46 underwent measurably more strain than any of the other vertebrae and that it was concentrated along the stiff back portion of the narrow vertebra, as well as at both tips of the front of both vertebrae.

By integrating all this information, we can build a picture of RFT46, which indicates that this vertebra was susceptible to bending at the narrow point and therefore fractured more easily than any of the other specimens. Secondly, consider the most stable specimen; RFT45. The internal sections of the vertebrae of all specimens except for RFT45 show middling to high strain in certain areas, indicating that these regions are moving more when under stress and perhaps fracturing. To see whether that might be true a comparison can be made to the fracture analysis results, and it can be seen that RFT45 had the fewest fractures in almost every loading mode. By looking at the bone density variations, it can be seen that the cortical bone in the vertebrae in sample RFT45 is thick and dense, and continues almost unbroken around the full perimeter. In the other samples this is not the case, so perhaps the cortical bone is transferring the stress in RFT45 and not allowing the weaker, cancellous bone inside to be damaged.



Figure 2 variation of number of failed elements.

Figure 3 Strain energy density across all four samples after an 8000N compression test.

# 紫外材料の開発に関する国際シンポジウム

# International Symposium on UV materials

東北大学 多元物質科学研究所 小島一信

目的

本国際シンポジウムは医療・バイオ・工業分野で今後飛躍的な発展が見込める紫外材料とその 応用に関する国際シンポジウムである。本国際シンポジウムは、International Workshop on UV materials and Devices 2017 (IWUMD 2017)の中の1つのスペシャルセッションとして開催する。 IWUMD は、平成28年8月に中国・北京・北京大学で第1回が開催され、本会が2回目となる。 本会議でのスコープは窒化物半導体や酸化物をはじめとした様々な紫外材料を取り扱い世界的 な研究の方向性を議論、さらには必要な連携体制を構築することを目的とし、我が国のこの分野 の発展に結び付けることを目的としている。本国際シンポジウムは、その中の窒化物半導体に焦 点を当てて、その開発を加速させることを目的とした深い議論を行う場を提供するものとする。

応用力学研究所の寒川義裕准教授は、長年にわたり窒化物半導体材料の開発に携わっており、IWUMD2017 では現地実行委員長を担当している。応用力学研究所の共同利用研究集会として開催することで、同研究分野においてその知名度・認知度を向上させることができると考える。

# 研究集会の内容

IWUMD2017 では、内容を絞ったトピックについて集中的に深い議論を行うため,各トピックを 代表する講演者によるチュートリアルセッションと、招待講演および一般講演からなるパラレルセッ ション、さらには時間をかけた議論を行うためのポスターセッションの3 部構成で行う。本国際シン ポジウムはその中の1つのチュートリアルセッションとして位置付けられる。

開催日時:2017年11月14日(火)~18日(土)

開催場所:九州大学 医学部百年講堂

主催:日本結晶成長学会

共催:応用力学研究所、日本学術振興会 第161、162委員会ほか

・チュートリアルプログラム:

- ✓ Recent progress of AlGaN-based deep-UV LED (Hideki Hirayama, RIKEN, Japan)
- ✓ Challenges in device physics of deep-UV LEDs and lasers (Debdeep Jena, Cornell University, USA)
- ✓ AlGaN-based deep-UV emitters from materials research to real-world applications -(Michael Kneissl, TU-Berlin, Germany)
- ✓ Preparation of bulk AlN substrates by hydride vapor phase epitaxy

(Yoshinao Kumagai, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan)

 Electronic structures and optical properties of AlGaN materials and their quantum-well systems

(Atsushi Yamaguchi, Kanazawa Institute of Technology, Japan)

# 詳細

以下、各講師の講義内容の概略を示す。

# Recent progress of AlGaN-based deep-UV LED (Hideki Hirayama, RIKEN, Japan)

高効率な深紫外発光ダイオードの開発状況の解説があった。特に、外部量子効率が 20%を超 える素子の開発に成功した研究グループならではの、高度な結晶育成技術、電流注入効率の改 善技術、さらには光取り出し効率の改善技術に関する議論が行われた。

Challenges in device physics of deep-UV LEDs and lasers (Debdeep Jena, Cornell University, USA)

分子線エピタキシを基軸とした、深紫外発光デバイスの開発状況の解説が行われた。窒化ガリウム量子ドットを高 AIN モル分率の窒化アルミニウムガリウム薄膜内に埋め込むことで深紫外光を発生させる試みや、窒化アルミニウムガリウムを活性層とするレーザダイオード構造の試作に関しても報告があった。

AlGaN-based deep-UV emitters - from materials research to real-world applications - (Michael Kneissl, TU-Berlin, Germany)

半導体の基本から始まり、窒化物半導体の研究現状、さらには、ドイツ国における商用を目指し た深紫外発光ダイオードの開発に関する、網羅的な講義が行われた。深紫外波長領域における 発光層として、窒化アルミニウムガリウムの結晶育成に当たって具体的な条件探索法やその結果 に関して議論がなされた。

Preparation of bulk AlN substrates by hydride vapor phase epitaxy (Yoshinao Kumagai, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan)

ハライド気相成長法をベースとした、窒化アルミニウム自立結晶の育成に関する講義が行われた。 窒化ガリウムよりもさらに高温領域における結晶育成が求められる窒化アルミニウムの自立結晶を いかに高品質化するかという点について、熱力学的な観点からの理論的予測法の説明も交えた 解説が行われた。

Electronic structures and optical properties of AlGaN materials and their quantum-well systems (Atsushi Yamaguchi, Kanazawa Institute of Technology, Japan)

バンド構造計算に基づく窒化アルミニウムガリウムの光学的特性の理論予測法に関する講義が 行われた。従来用いられる c 面だけでなく、他の結晶方位を含めた包括的な理論に基づき、組成 や歪み・偏光・発光波長など、様々な物性値の相関をいかに明確に記述するかという観点から、 具体例を交えた解説が行われた。

# 講義風景

以下、講義中の風景をいくつか示す。



# シンポジウムの導入を行う天野教授。



シンポジウムの解説を行う寒川義裕准教授。



シンポジウムの全景。

# 研究組織

丘 夕	所属機関·部局	職名	役割•
以 名	(院生は所属大学・研究科)		担当分野
小島一信	東北大学·多元研	准教授	代表者
秩父重英	東北大学·多元研	教授	プログラム 委員長
寒川義裕	九州大学·応研	准教授	所内世話人
Michael Kneissl	ベルリン工科大学	教授	講演者
Debdeep Jena	コーネル大学	教授	講演者
平山秀樹	理化学研究所	主任研究員	講演者
熊谷義直	東京農工大·工学部	教授	講演者
山口敦史	金沢工業大学·工学研究科	教授	講演者

# TUTORIALS

A set of tutorial lectures for young researchers and students will be held on the afternoon of November 14, 2017, the first day of IWUMD 2017, at Main Hall. The speakers of tutorials are listed below.

13:30-13:40	Opening Address	Hiroshi Fujioka (The Univ. of Tokyo, Japan)
		Kazunobu Kojima (Tohoku Univ., Japan)
13:40-14:25	AlGaN-based deep-UV emitters -from materials research to real-world applications -	Michael Kneissl (TU-Berlin, Germany)
14:25-15:10	Preparation of bulk AIN substrates by hydride vapor phase epitaxy	Yoshinao Kumagai (Tokyo Univ. of Agriculture and Technol., Japan)
15:10-15:55	Electronic structures and optical properties of AlGaN materials and their quantum-well systems	Atsushi Yamaguchi (Kanazawa Inst. of Technol., Japan)
15:55-16:10	Coffee Break	
16:10-16:55	Recent progress of AlGaN-based deep-UV LED	Hideki Hirayama (RIKEN, Japan)
16:55-17:40	Challenges in device physics of deep-UV LEDs and lasers	Debdeep Jena (Cornell Univ., USA)

**第10回 九大2D物質研究会**(主催:応用力学研究所(29ME-S2)) 「2D物質の形成と物性 II」

日時:平成30年1月27日(土) 13:00~18:00 場所:オフィス-ワン四条烏丸201号室(京都市)

1. 13:00~13:05

はじめに 九大院工 田中 悟 教授

2. 13:05~13:30

関西学院大理工 日比野 浩樹 教授

「チップ増強ラマン分光による2次元物質のナノイメージング」

超高真空,低温で動作するチップ増強ラマン分光装置を用い,10 nm以下の高い空間分解能で, Ag(111)基板上のシリセンと自己形成グラフェンナノリボンをラマンイメージングした結果を報告 する.

3. 13:30~13:55

名古屋大院工 乗松 航 助教

「SiC 上グラフェンの移動度について」

グラフェンの移動度は、グラフェンの質,基板の種類、キャリア濃度、温度などに依存する.SiC(0001) 面上グラフェンの場合、室温では1x1013cm-2 で約1000cm2/Vs である.この値は、グラフェンの理 論的な限界より一桁低い.その原因を明らかにするため、SiC 上グラフェンの他基板への転写、CVD グラフェンのSiC 上への転写、水素インターカレーションなどを行って移動度とその温度依存性を 調べている.本研究会では、現在までに得られている結果について紹介する.

4. 13:55~14:20

京大院工 船戸 充 准教授

「窒化物半導体による極薄膜構造の最近の展開」

光および電子デバイス用材料としてすでに応用が進んでいる窒化物半導体において、極薄膜を用い る研究が最近しばしば報告されるようになっている. 材料の安定相である sp3 混成軌道をベースと したウルツァイト構造を用いた、分子層程度の薄い量子井戸の作製と構造・光物性などが検討され ている. また、いわゆる 2D 材料としての理論的および(初期的な)実験的検討もなされている. 本発表では、これらのレヴューと、前者(ウルツァイト系極薄膜量子井戸)に関連してわれわれの研 究結果を紹介する. 5. 14:40~15:05

福井大院工 橋本 明弘 教授

「エピタキシャル・グラフェン上 III-V 窒化物薄膜成長における a 軸配向制御」

一部の GaN 自立基板上の成長を除くと、III-V 族窒化物薄膜成長には様々な異種基板上への格子不整合へテロエピタキシーが用いられることが多い.この場合問題となるのは主に格子不整合と熱膨張係数不整合に起因する界面応力及び高密度転位の発生である.そこでこれらの不整合を緩和し高品質なエピタキシャル薄膜を得る手法として各種グラフェン上への成長が試みられている.しかしながら、成長薄膜の c-軸配向制御に関してはある程度研究の進展があるものの、a-軸配向制御に関しては未解決のままであるように思われる.本講演では、エピタキシャル・グラフェン上 III-V 窒化物薄膜成長における a 軸配向制御に関する最近の幾つかの試みについて、特に成長初期過程と2D 窒化物との関連も含めて報告する.

6. 15:05~15:30

筑波大院数理物質 神田 晶申 教授

「劈開法で得た層状超伝導薄膜に関する最近の研究」

グラフェンの研究で培われた原子層膜のデバイス作製技術は、層状超伝導体にも応用することがで きる.本発表では、原子層超伝導薄膜で期待される現象の理論と実験の現状、我々が取り組もうと している渦糸量子デバイスについて簡単に紹介させていただきます.

7. 15:30~15:55

JST さきがけ・筑波大院数理物質 友利 ひかり 氏

「ひずみ誘起ゲージ場を用いたグラフェンへの伝導ギャップ誘起の現状と今後の見通し」

グラフェンには、格子ひずみがあると実効的なゲージ場(ベクトルポテンシャル)が生じるという 特殊な性質がある.我々はこれまで、ひずみ誘起ベクトルポテンシャルを利用したグラフェンへの バンド(伝導)ギャップ生成に取り組んできた.本発表では、3年間にわたる研究のまとめと今後 の展開についてお話させていただきたいと思います.

8. 15:55~16:20

### 島根大院工 影島 博之 教授

「MoS2の原子空孔の安定性に対する積層効果の理論検討」

単原子層 MoS2 の原子空孔は自立していると負に帯電した場合に生じやすいが, 複層 MoS2 では生じ にくくなることが今回の計算で明らかになった. また同様の効果は, 下地を MoSe2 単原子層膜とし た場合も現れた. これらの現象は, 幾何学的機構に基づいて生じているものと考えられる.
9. 16:20~16:45

九大院工 田中 悟 教授

「CVD 法による SiC 上エピタキシャルグラフェンの成長および剥離・転写」

極微量 C2H4 ガスを用いた CVD 法により SiC 上にはグラフェンがエピタキシャル成長する. この時 バッファー層はいわゆる 6√3 層ではなく, (3x3)構造を有している. この構造のグラフェンはフリ ースタンディング状態に近く剥離が容易である. このことを利用し, 大面積なグラフェンを様々な 表面へ転写することが可能である. 例として SiC ナノ表面上へ転写することにより作製したグラフ ェンナノ構造について述べる.

10. 16:45~17:10

東大物性研 小森 文夫 教授

「SiC 基板とグラフェンの間に形成された Sn 原子層のスピン分解 ARPES」

SiC (0001) 面に形成されたバッファ層にスズを蒸着することにより, SiC 基板とグラフェンの間に Sn 原子層を作製することができる. この原子層は SiC(0001)面の1x1構造をもつ. そのスピン分 解 ARPES 測定を行った結果,スズ原子層が作る2次元バンドの一部にスピン分裂が観測された.K 点 付近には, ラシュバ型に面内スピン分裂するバンドとゼーマン型に面垂直方向にスピン分裂するバ ンドの2種類がある. 電子状態計算との比較により,K 点でのスピン分裂が電子状態の空間分布の 対称性に依存して変化することがわかった.

11.17:10~18:00
総合討論

353