

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「数学と諸分野の協働による
ブレークスルーの探索」
研究課題「現代数学解析による
流体工学の未解決問題への挑戦」

研究終了報告書

研究期間 平成21年10月～平成27年 3月

研究代表者：柴田良弘
(早稲田大学理工学術院、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究では、現代数学解析を専門とする数学者と第一線の流体力学者との協働により、流体工学の未解決問題に対して厳密な定式化と解の挙動の解析手法を開発し、それを社会的に重要な課題に適用し精密な実験により検証することによってその有効性を実証することを目指した。具体的には、現状では正確な取り扱いが難しい異なるスケールが入り混じった複雑な現象を表すための多重スケール解析に注目し、キャビテーション現象の解明、物体後流の安定性の解明および流れの大域構造の解明の研究を行った。

キャビテーション現象の解明では、気泡雲全体の挙動に着目するマクロな視点と個々の気泡の挙動に着目するメゾの視点の両面からキャビテーション現象を解明することを試みた。気泡雲全体のマクロな視点からは、高速度カメラを用いた高速ウォータージェットの実験により気泡雲の崩壊過程を詳細に観測した。特に、気泡雲は2～3回縮小・拡大を繰り返して消滅するが、その体積が最小になる直前において圧力波が放出されることを見出した。これらの気泡雲の挙動はパルスウォータージェットの実験においてより詳細に観測され、衝撃波の明瞭な可視化も行われた。また、これらの実験観測に基づき均質気液二相流に微細気泡の膨張収縮運動を組み込んだ球対称気泡雲モデルを構築し数値解析を行った。気泡雲のリバウンドと気泡雲が最小になる直前に圧力波が放出される挙動は再現されたが、リバウンド周期は実験観測とオーダーが異なる結果が得られた。これについては今後更なる検討が必要である。個々の気泡に着目するメゾの視点からは、単一気泡のリバウンド挙動の実験結果に基づき、気泡半径に現れる揺らぎがブラウン運動としてモデル化できることをデータ解析から明らかにし、揺らぎを考慮したレイリー・プレセット方程式を定式化した。またその数値解析を行い、観測結果と良く一致した結果を得た。さらに、レイリー・プレセット・ケラー方程式に基づき単一気泡から発する圧力波の評価を行い、実験で観測される圧力とほぼ同程度のオーダーの結果が得られた。

物体後流の安定性の解明では、スペクトル解析の大域的な視点と、波動伝播解析の局所的な視点の両面から物体後流の安定性メカニズムを解明することを試みた。スペクトル解析の大域的な視点からは、剛体周りの流れの安定性に関して幾つか数学的な成果が得られた。そこで得られた知見によると、Navier-Stokes 方程式の定常解周りで線形化して得られる一般ストークス方程式の解析が問題の本質的な部分である。そこで、局所的な視点に基づく解析として、まず境界の影響を無視して擬微分作用素による解析を試みた。また気象学で用いられる波活動度および波活動度フラックスなどの概念に基づいた解析を行い、亜臨界と超臨界のレイノルズ数における流れの違いを解析した。実験研究では、対流不安定が絶対不安定にモードが切り替わる臨界点近傍までレイノルズ数を下げた実験によって絶対不安定点の特定に成功したことと、翼後流渦列と針金後流の渦列干渉によって翼後流の渦列形成の抑制に成功したことが成果として挙げられる。

流れの大域構造の解明では、分岐解析というマクロの視点とダイナミクスの抽出というメゾの視点の両面から流れの大域構造を解明することを試みた。分岐解析については新しい解のクラスについて解析手法を確立し、二種混合流体の熱対流という具体的な問題で重要な役割を果たす構造をその解として得ることに成功した。またそこで得られた知見を生物対流の問題へ適用し、ミドリムシ生物対流のパターン形成問題の解析およびその数理構造の抽出とモデル方程式の提案を行った。さらには軌道解析への道筋をつけることを目指し、共変リアプノフ解析を応用した軌道解析アルゴリズムの構築を行い、反応拡散系への応用を試みた。ダイナミクスの抽出については、自由表面を伴う回転流体の実験データから元の系の動力学の主要な特徴を抜き出し、残りの自由度をランダム項とすることで複雑な動力学の理解に資する結果を得た。また複雑実験データからのモデル構築アルゴリズムとして、決定論性の検出と時空間データのみからの CA 構築アルゴリズムを開発した。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 2種混合流体のベナール対流が引き起こす大域構造の解析

概要: 2種混合流体のベナール対流において重要な役割を果たす空間局在対流セルが、実は時間周期進行解として数学的に特徴づけられることを具体的な数値解を求めることで初めて示した。更にその他の解も含んだ大域的分岐図を求めることで、この系の大域構造の形成過程の詳細な解析を行った。

2. ミドリムシ生物対流のパターン形成問題の解析

概要: ミドリムシが多数含まれる懸濁液に下部から光を当てることにより巨視的なパターンが発現することを観測した。特に、周期境界を模擬した2重円筒容器における実験により、2種混合流体のベナール対流で見られた局在化した時間周期進行解と同様の構造が現れることを明らかにした。

3. 揺らぎを考慮したレイリー・プレセット方程式の定式化

概要: 単一気泡のリバウンド挙動の実験結果に基づき、気泡半径に現れる揺らぎがブラウン運動としてモデル化できることをデータ解析から明らかにし、揺らぎを考慮したレイリー・プレセット方程式を定式化した。またその数値解析を行い、観測結果と良く一致した結果を得た。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. キャビテーションジェットにおいて発生する圧力波と気泡雲の挙動との関係の解明

概要: 内径 0.15[mm] のオリフィスノズルを用い、噴射圧 50-200MPa で大気圧下の静止水中に噴出するキャビテーションジェットの挙動を撮影速度 46.5×10^4 fps の高速ビデオカメラで観察した。その結果、圧力パルスが気泡雲の大きさが最小となる数 μs 前に発生することを初めて見出した。

2. 翼後流の渦列形成の抑制

概要: 迎角を持たせた対称薄翼 NACA0006 の翼後縁近傍で絶対不安定から形成された渦列に対して NACA0006 の翼後縁から流れと直角方向に翼弦長離れた位置に直径 1mm の針金を翼軸方向に設置すると、渦列の成長が抑制されることが見出された。針金による翼後流の渦列抑制効果は、逆に翼による針金後流の渦列形成にも大きな影響を及ぼしていることも明らかとなった。

3. プラズマアクチュエータによる翼のトレーリングエッジノイズの抑制

概要: 数十万の Reynolds 数での NACA0012 翼から出るトレーリングエッジノイズを対象に、プラズマアクチュエータを用いて境界層の安定性を制御することにより騒音抑制を試みた。適当な位置にプラズマアクチュエータを装着することにより、翼の後縁から出る騒音の抑制が実現された。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

本研究は流体数学の分野で実績をもつ数学者のグループと第一線の流体力学者のグループとの協働で、その複雑さ故に数学的な性質が未だ完全に解明されていない流体工学の未解決問題に挑戦することを目指したものである。具体的には、下記の項目について研究を行うものとした。

- ①非平行流れの安定性理論の基礎づけと確立
- ②混相流素過程に対する数学モデルの開発
- ③空力騒音発生メカニズムの解明
- ④境界層乱流遷移メカニズムの解明
- ⑤混相流素過程における現象解明
- ⑥流れの大域構造に関する現象の解明

これらは平成24年度より下記の通りに整理された。

- ①物体後流の安定性理論の基礎づけと確立
- ②混相流素過程に対する数学モデルの開発
- ③混相流素過程における現象の解明
- ④空力騒音発生メカニズムの解明
- ⑤流れの大域構造に関する現象の解明

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

① 中間評価で受けた指摘や助言、それを踏まえて対応した結果について

中間評価において、相互作用を有するマクロ集団として気泡群の挙動をモデル化する可能性について助言を受けた。それを踏まえ、レイリー・プレセット・ケラー方程式に基づいてそれぞれの気泡から放出される圧力波を評価し、それによって相互作用する気泡群のモデルを開発した。予備的な数値計算では同期現象が現れることを確認しているが、本格的な解析は今後の課題である。

② 中間報告書の「§ 7. 今後の研究の進め方、および研究成果の見通し」に記載した事項に沿って、研究を進めた結果について

物体後流の安定性理論の基礎づけと確立において、気象学の分野で開発されてきた波活動度や波活動度フラックスなどの概念を実際に物体後流の安定性の問題に導入し、亜臨界と超臨界のレイノルズ数における流れの違いを解析した。そのメカニズムを解明するために有限要素法による固有値解析に基づき検討を行なっているが、本格的な解明は将来の課題である。また流れの大域構造に関する現象の解明では、2種混合流体のベナール対流の解析で得られた知見の応用として、ミドリムシ生物対流のパターン形成問題の解析を行い、時間周期進行解と同様の局在構造が現れることを明らかにした。またその数理構造の抽出と局在構造を再現できるモデル方程式の提案を行った。

§ 3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「理論研究」グループ

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	柴田 良弘	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H21.10～H27.3
	西田 孝明	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H21.10～H27.3
	山崎 昌男	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H21.10～H27.3
	田端 正久	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H22.10～H27.3
	伊藤 公久	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H22.10～H27.3
	吉村 浩明	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H21.10～H27.3
	柳尾 朋洋	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	専任講師	H21.10～H27.3
	山本 勝弘	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	名誉研究員	H25.4～H27.3
*	鈴木 幸人	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	主任研究員	H21.10～H27.3
	清水 扇丈	静岡大学理学部数学科	教授	H22.10～H27.3
	菱田 俊明	名古屋大学多元数理科学 科学研究科	教授	H23.4～H27.3
	内藤 由香	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	助手	H22.4～H27.3
	榎本 裕子	芝浦工業大学システム理 工学部数理科学科	助教	H22.4～H27.3
	久保 隆徹	筑波大学大学院数理物 質科学研究科	助教	H22.4～H27.3
	山口 範和	富山大学人間発達科学 部人間環境システム学科	准教授	H22.4～H27.3
	上田 好寛	神戸大学大学院海事科学 科学研究科	講師	H24.4～H27.3
	鈴木 政尋	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	研究助手	H22.10～H23.3
*	大縄 将史	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	研究助手	H23.4～H27.3
	及川 一誠	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	研究助手	H23.10～H27.3
	斎藤平和	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	D2	H25.7～H27.3
	村田美帆	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	D2	H25.7～H27.3

	Sri Mariani	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	D1	H25.7～H27.3
*	Peng, Linyu	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	次席研究員	H25.10～H27.3
*	池崎 那津子	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	研究補助員	H22.4～H27.3

研究項目

- ・擬微分作用素を用いた解の表示に基づく非平行流れの安定性解析手法の検討
- ・有限要素法、境界要素法による物体後流の安定性評価手法の検討
- ・キャビテーション現象のモデル化と数値解析手法の検討

②「理論研究サブ」グループ

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	水島 二郎	同志社大学工学研究科 機械システム, エネルギー 機械工学科	教授	H21.10～H24.3
*	村上 真也	同志社大学理工学部エネ ルギー変換センター	特別研究員	H21.10～H24.3

研究項目

- ・非平行流れの安定性解析手法の開発, 空力騒音発生メカニズムの解明, および境界層乱流遷移メカニズムの解明

③「混相流研究」グループ

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	吉村 浩明	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H21.10～H27.3
	山本 勝弘	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H21.10～H27.3
	内藤 健	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	教授	H21.10～H24.3
	手塚 亜聖	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	准教授	H21.10～H27.3
	柳尾 朋洋	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	准教授	H21.10～H27.3
*	Peng, Linyu	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部	次席研究員	H25.10～H27.3
	木村 翔	早稲田大学基幹理工学 研究科	M2	H21.10～H22.3
	四宮 大夢	早稲田大学基幹理工学 研究科	M2	H21.10～H22.3
	野田 明宏	早稲田大学基幹理工学 研究科	M2	H21.10～H22.3
	中村 和史	早稲田大学基幹理工学 研究科	M2	H21.10～H23.3

	本田 亮	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H23.3
	前口 紘樹	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H23.3
	田中 新一	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H22.4～H24.3
	劉 黄墨	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H22.4～H24.3
	祖家 健児	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H22.3
	本城 一樹	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H22.3
	野口 高志	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H23.3
	松本 史哉	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H22.4～H24.3
	吉田 亜積	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H22.4～H24.3
	鹿田 翔平	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H23.4～H24.3
	北嶋 大遵	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H23.3
	笹田 裕貴	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H23.3
	長澤 惟	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H21.10～H23.3
	橋本 健司	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H22.4～H24.3
	堀 雄喜	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H22.4～H24.3
	吉田 篤	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H22.4～H24.3
	仲原慎一郎	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H24.4～H25.3
	中島敬典	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H24.4～H25.3
	菅原拓也	早稲田大学基幹理工学研究科	M1	H24.4～H26.3
	宮本卓哉	早稲田大学基幹理工学研究科	M1	H24.4～H26.3
	飯田浩貴	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H24.4～H25.3
	吉田崇	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H24.4～H25.3
	長井善之	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H24.4～H25.3
	丸山喜幸	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H24.4～H25.3

	小野崎香織	早稲田大学基幹理工学研究科	D1	H25.4～H27.3
	塙智史	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H25.4～H26.3
	宮本卓哉	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H25.4～H27.3
	星野光	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H25.4～H27.3
	宮原翔吾	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H25.4～H27.3
	鷺野翔一	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H26.4～H27.3
	水内皓規	早稲田大学基幹理工学研究科	M2	H26.4～H27.3
	宮崎太郎	早稲田大学基幹理工学研究科	M1	H26.4～H27.3
	関根俊輔	早稲田大学基幹理工学研究科	M1	H24.4～H27.3

研究項目

- ・気泡に関する確率微分方程式モデルの検証
- ・マクロな気泡雲モデルの解析と新たな数学モデルの提案

④「流れの安定性実験研究」グループ

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	浅井 雅人	首都大学東京	教授	H21.10～H24.3 H26.4～H27.3
*	高木 正平	首都大学東京	教授	H21.10～H27.3
	稲澤 歩	首都大学東京	准教授	H21.10～H24.3 H26.4～H27.3
	手塚 亜聖	早稲田大学・理工学術院 基幹理工学部	准教授	H21.10～H27.3
	松本 大樹	室蘭工業大学機械システム工学科	講師	H23.4～H26.3
	酒井 貴志	室蘭工業大学航空宇宙システム工学専攻	M2	H21.10～H23.3
	加藤 大貴	室蘭工業大学航空宇宙システム工学専攻	M1	H22.10～H24.3
	大立目 浩幸	室蘭工業大学航空宇宙システム工学専攻	M2	H24.4～H26.3
	宮森康臣	室蘭工業大学航空宇宙システム工学専攻	M2	H25.4～H26.3

研究項目

- ・物体近傍の非定常流体现象に着目した風洞実験の実施の実験
- ・物体近傍流れの人工制御手法の検討

⑤「流れの大域構造研究」グループ

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	飯間 信	広島大学大学院理学研究科	准教授	H22.4～H27.3
*	渡辺 毅	広島大学大学院理学研究科	研究員	H22.4～H25.3
*	川原田 茜	広島大学大学院理学研究科	研究員	H25.4～H27.3
	田坂 裕司	北海道大学大学院工学研究院エネルギー環境システム部門	准教授	H22.4～H27.3
	日川 岳	広島大学大学院理学研究科	M2	H24.4～H27.3
	庄司 江梨花	広島大学大学院理学研究科	M2	H25.4～H27.3
	大山 達之	広島大学大学院理学研究科	M2	H25.4～H27.3

研究項目

- ・対流系における流れの大域構造メカニズムの解明
- ・回転流体の自由表面変形に関する流れの大域的な層流・乱流遷移メカニズムの探求
- ・流れの大域構造を記述する離散力学系の構築の手法の開発

§ 4 研究実施内容及び成果

4. 1 物体後流の安定性理論の基礎づけと確立(早稲田大学 柴田グループ)

(1)研究実施内容及び成果

まず平成21年度から平成22年度にかけて、数学者と流体力学者との協働で流体力学における安定性解析の数学的基礎を検討した。その結果の概要は以下の通りである。

層流は Reynolds 数が増加すると不安定になることが知られているが、せん断流れの不安定には二つのタイプがあることが実験的に確認されている。一つは不安定性から生じる渦が外乱に影響される場合で”Noise Amplifier”と形容されるタイプ、もう一つはその渦が外乱に影響されない固有の振動数をもつ場合で”Flow Oscillator”と形容されるタイプである。翼の後流に発生する不安定において、この二つのメカニズムが存在することが当チームの高木教授の実験によって示唆された(図1)。実際、翼の後流から発生する音はそこで生成されている渦と関連があるが、薄い翼の場合(図1右)は発生する音の周波数は広い帯域にわたっており、そのスペクトルは外部の微小攪乱によって容易に変化することが確かめられた。一方、翼の厚さを厚くすると発生する音のスペクトルに鋭いピークが現れるようになり(図1左)、このピークは外部の微小攪乱には影響されないことが確かめられた。したがって前者は”Noise Amplifier”、後者は”Flow Oscillator”の状態にあることが考えられ、この二つのメカニズムを数学的に解明することにより空力騒音の効率的な制御が可能になると考えられる。Ecole Polytechnique 流体力学研究所のグループは、この二つのメカニズムを平行流近似に基づく対流不安定・絶対不安定の概念をもとに説明することを試みている。当チームの浅井教授の軸対称物体後流の実験によると、その理論により渦の振動数がある程度予測可能であることが示唆された(図2)。一方、当チームの水島教授の円柱後流の数値計算においては、その理論では説明できない現象が確認された(図3)。本研究では、この物体後流の安定性メカニズムを数学的に解析することにより、このような議論に明確な回答を与えることを試みる。

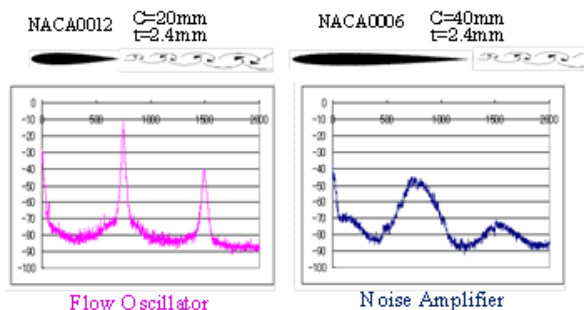
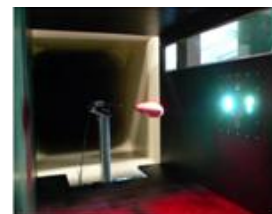


図1 二つの翼型の後流から生じる空力音



渦の振動数の実験と理論の比較：
 $\omega_s = \omega_0(x_s) \Rightarrow f = 115\text{Hz}$
 $\omega_s = \omega_0(x_{CA}) \Rightarrow f = 117\text{Hz}$
 Experiment: $f = 117.5\text{Hz}$

図2 軸対称物体後流渦の振動数

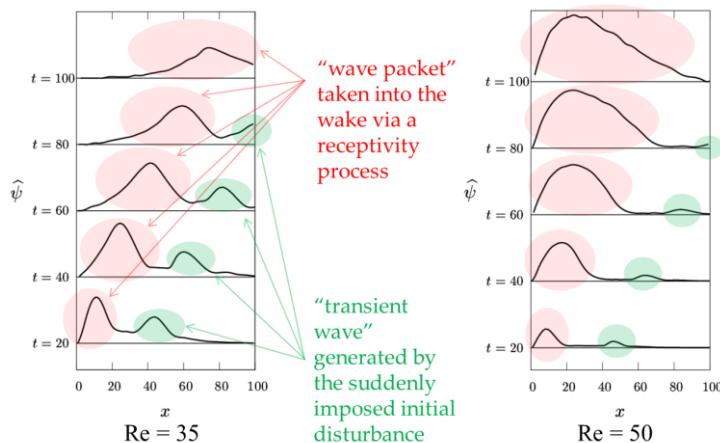


図3 円柱後流の不安定性の数値計算

平成23年度は、物体後流に導入した攪乱の時間発展を記述する変数係数線型偏微分方程式

$$\left[\partial_t + (U\partial_x + V\partial_y) - \frac{1}{\text{Re}} \Delta \right] \Delta \psi + \Omega_y \partial_x \psi - \Omega_x \partial_y \psi = 0,$$

$$\psi(x, y, 0) = \psi_0(x, y)$$

の近似解について検討した。ここで ψ は攪乱の流れ関数で ψ_0 はその初期値、 (U, V) と (Ω_x, Ω_y) はそれぞれ基本流の速度と渦度勾配である。具体的には、この方程式の偏微分作用素に対して parametrix を形式的に構成し、近似解の積分表示

$$\psi(x, y, t) \sim \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{\mathbb{R}^2} e^{i(x\xi + y\eta) + \Lambda(\xi, \eta; x, y)t} \hat{\psi}_0(\xi, \eta) d\xi d\eta$$

ただし

$$\Lambda(\xi, \eta; x, y) := -\frac{1}{\text{Re}} (\xi^2 + \eta^2) - i \left(U\xi + V\eta - \frac{\Omega_y \xi - \Omega_x \eta}{\xi^2 + \eta^2} \right)$$

を求めた。さらに、それを微小パラメータについて鞍部点法を用いて漸近展開し、その第一項を評価することによって攪乱の局所的な増幅率の計算式

$$\psi(x, y, t) \sim e^{-\rho(\xi^*, \eta^*; x, y, t)} \frac{2\pi}{[\det H(\xi^*, \eta^*; x, y)]^{1/2} t} g(\xi^*, \eta^*; x, y)$$

ただし

$$\rho(\xi, \eta; x, y, t) = -[i(x\xi + y\eta) + \Lambda(\xi, \eta; x, y)t],$$

$$g(\xi, \eta; x, y) = \frac{\hat{\psi}_0(\xi, \eta)}{(2\pi)^2}$$

および

$$H := \begin{pmatrix} \partial_\xi^2 \rho & \partial_\xi \partial_\eta \rho \\ \partial_\eta \partial_\xi \rho & \partial_\eta^2 \rho \end{pmatrix}$$

を導出した。ここで ξ^* と η^* は停留点

$$\partial_\xi \rho(\xi^*, \eta^*; x, y, t) = 0, \quad \partial_\eta \rho(\xi^*, \eta^*; x, y, t) = 0$$

における値である。この計算式を円柱後流に適用し、実際の数値データを用いて Newton 法により数値計算した結果、攪乱の局所的な増幅率は Reynolds 数に大きく依存せず、臨界 Reynolds 数を超えても円柱半径の数倍以上後方の領域ではすべて減衰することが判明した。したがって、以上に示した解析では臨界 Reynolds 数を超えると Karman 渦列のような系に固有の振動数をもつ流れが発生するという観測結果を説明することはできないと考えられる。

この原因を探るため、円柱後流に導入した攪乱の時間発展を記述する変数係数線型偏微分方程式の数値解析を行った。特に、境界の影響を考慮しない解析で攪乱の時間発展がどのように変化するかを見るため、円柱境界を考慮する計算と考慮しない計算を比較した。

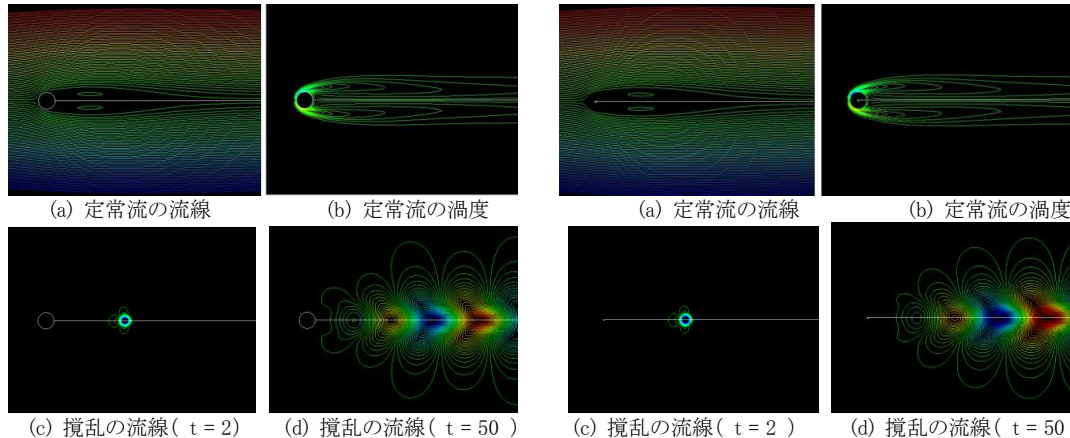


図4 円柱後流に導入した攪乱の数値解析(円柱境界あり)

図5 円柱後流に導入した攪乱の数値解析(円柱境界あり)

その結果、臨界 Reynolds 数を超えると、どちらも同じように増幅することが判明した(図4および図

5)。したがって、境界の有無は攪乱の時間発展には影響を与えず、上記の数学解析による局所的な増幅率が減衰する結果は、それ以外の要因が影響している可能性が考えられる。

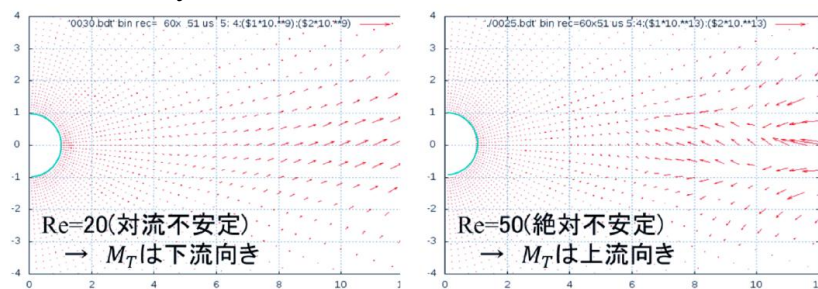
上記の”Noise Amplifier”と”Flow Oscillator”の状態の差は、流れの中の波動伝播特性の差によって説明することができると考えられている。上に述べた結果は、全空間における Fourier-Laplace 解析に基づく分散波動伝播理論を非平行流れに拡張することによって、それを行おうとするものであった。一方、定常流が渦を交互に放出するモードへ切り替わるに際しては、擾乱のエネルギーの上流への伝播が重要であると指摘されている。その物理的なメカニズムは明らかにされてこなかったが、定常流の渦度勾配に伴う波動がそのエネルギー伝播の役割を担っているのではないかと考えられる。上述の数値計算の時間発展の結果はこれに矛盾しないものであった。気象学の分野ではこの種の波動はロスビー波と呼ばれ、地球スケールの複雑な流れの中でその波群(高低気圧波)のふるまいを理解しさらには予測することが気象学における主要課題であり続けてきた。その中でエネルギーとエンストロフィーを合わせた波活動度およびそれを運ぶ波活動度フラックスなどの概念が開発され、波群の時間発展を記述する試みが精力的になされてきた。そこで平成24年度より、気象学の分野で発達してきたこれらの概念を物体後流の安定性の問題に導入し、攪乱の局所的な伝播を記述する試みを行った。具体的には、定常解の周りで線型化した系の初期値問題を数値計算し、気象学で知られるエンストロフィーの近似保存則：

$$\partial_t A + \text{div} M_T \approx 0,$$

$$A := \frac{|\text{rot} \vec{u}|^2}{2|\nabla \text{rot} \vec{U}|}, \quad M_T := \begin{pmatrix} AU - (\overline{u^2 - v^2})U/2 - \overline{uv}V, \\ AV + (\overline{u^2 - v^2})V/2 - \overline{uv}U \end{pmatrix}.$$

($\vec{U} = (U, V)$: 定常解, $\vec{u} = (u, v)$: 定常解からの摂動, $\overline{\dots}$ は移動時間平均)

を適用した。円柱後流の Reynolds 数が20と50の場合の結果を下図に示す。



このような差が生じるメカニズムを解明するために、定常解周りで線型化した方程式の第一固有値を有限要素法により計算し、固有ベクトル場の構造とエネルギーの流れの関係を調べた。

4. 2 混相流素過程に対する数学モデルの開発(早稲田大学 吉村グループ)

(1)研究実施内容及び成果

キャビテーションは、液体が高速で動くことによって局所的に飽和蒸気圧以下になり、そのときに発生する多数の気泡の成長、圧壊に伴う非定常現象である。ポンプなどの流体機械では、キャビテーションが振動や騒音が羽車への損傷や壊蝕などを引き起こすことから大きな問題となっている[1]。一方、最近では、脳外科で用いるジェットメスなど医療への応用も考えられている。

本研究では、キャビテーションのもととなる、単一のマイクロ気泡に関する非定常挙動を高速ビデオカメラによって撮影を行い、その観測データから気泡半径にマイクロな揺らぎが生じていることを明らかにし、従来から知られているレイリー・プレセット方程式を拡張して、確率項を含むレイリー・プレセット方程式の提案を行った。さらに、キャビテーション気泡クラウドに関して、多数の気泡からなる気泡クラウドの集団的なリバウンド現象によって非常に強い圧力波を生み出すメカニズムを明らかにした。具体的な研究成果を以下に示す。

●気泡のダイナミクス

- ・単一気泡のリバウンド挙動と実験

球状の単一気泡のダイナミクスは、いわゆるレイリー・プレセット方程式と呼ばれる、2階の非線形常微分方程式によって支配されている。

$$\frac{p_B - p_\infty}{\rho_L} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_L R}$$

この方程式は、無限遠圧力を $p_\infty = p_0 \{1 + A \sin(2\pi f)\}$ として周期的な変動を加えることで、カオス的な挙動へと分岐することが知られている[6,8]。また、本研究におけるこれまでの成果で、非常に高い周波数で振動を加えることにより、ナノオーダーの気泡核レベルでの気泡が安定して存在することを数値解析によって明らかにした[9]。実験では、脱気した水を入れた容器を超音波モータで周波数 28.9[kHz]で加振し、容器に定在波を作った。さらに、その腹の部分にマイクロ気泡を生成し、図1に示すように、単一気泡のリバウンド現象を高速度カメラによって、撮影速度 775000[fps]で観測した。図から明らかなように、リバウンドの様子が見てとれる。

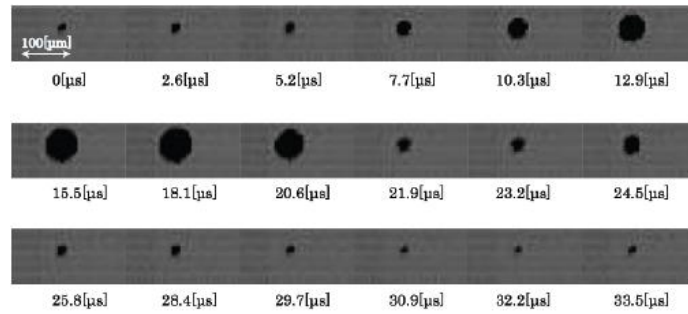


図1. 単一気泡のリバウンド現象

・気泡半径の揺らぎとウィナー過程

撮影したデータをもとにリバウンドの様子を再構成したものを図2に示す(3 周期:データ点数 80). リバウンドはマイクロ秒オーダーの非常に高速な現象であり、高速度カメラでもリバウンドの細かい動きを十分に再現することは困難である。しかし、これまでの研究で単一気泡のリバウンド周期は、ほぼ周辺圧力の加振周期と同じであることが知られており、この周期性に注目して、3 周期のデータを10 回重ねることでリバウンド現象を再現した様子を図3に示す(データ点数 804). これにより、リバウンド現象は非常によく再現されていることが分かる。図4 に、さらに 140 周期(データ点数 3755)を1周期に重ねたものを示す。これからも明らかなように、気泡半径に揺らぎが生じている。この揺らぎがどのような性質を持つものを明らかにするために、各時刻 t_k での気泡半径 $R(t_k)$ のアンサンブル平均をとったものを図5に示す。 $\bar{R}(t_k)$ を平均気泡半径とし、気泡半径との差 $W_k = R(t_k) - \bar{R}(t_k)$ を揺らぎとして定義した。パワースペクトルを離散フーリエ変換で求め、パワースペクトルが全ての周波数域に一樣に広がっていることからホワイトノイズとなっていること、さらに、 $\Delta W_k = W_{k+1} - W_k$ について図6に示すようにヒストグラムを作り、それが正規分布となることから、

$$W(t_n) = \sum_{k=0}^{n-1} \Delta W_k, \quad n = 1, \dots, N$$

がウィナー過程、すなわち、図4に示された、気泡半径に現れる揺らぎがブラウン運動としてモデル化できることをデータ解析から明らかにした[2,10,11,12]。なお、図5の平均化された気泡のリバウンド挙動は、通常の決定論的なレイリー・プレセット方程式によって再現できることは言うまでもない。

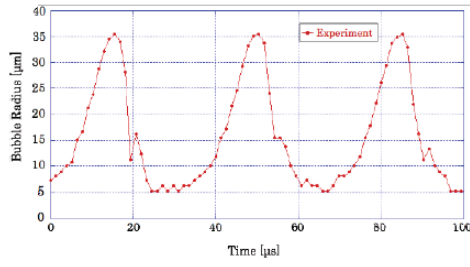


図2. 気泡半径のリバウンド挙動 (3 周期)

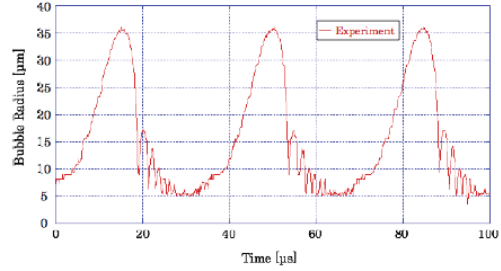


図3. 気泡半径のリバウンド挙動 (30 周期)

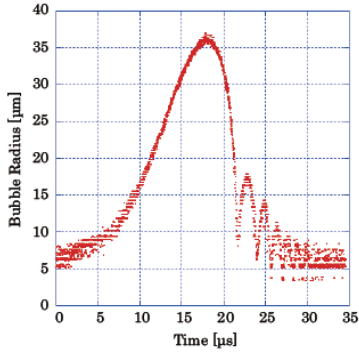


図4. 気泡半径における揺らぎ

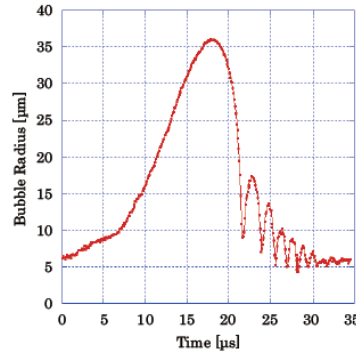


図5. 平均化された気泡半径

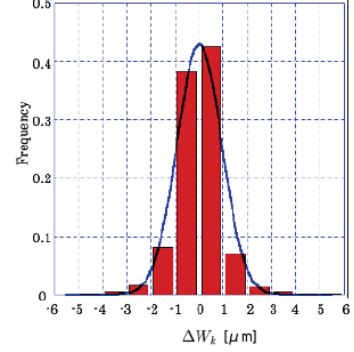


図6. ヒストグラム

・変分法と確率的レイリー・プレセット方程式の定式化

実験により気泡半径方向にウィナー過程として揺らぎが生じていることが分かったが、次に、この揺らぎを考慮したレイリー・プレセット方程式の定式化を示す。そのために、まず、揺らぎの項として滑らかな関数 $f(t)$ を考え、気泡半径速度が $u = \dot{R} + f(t)$ で与えられると仮定する。すなわち、気泡速度の揺らぎは形式的にウィナー過程の時間微分として $f(t) = g\dot{W}$ のように与えられるとする。ここに $\dot{W}$ は数学的に正しく定義されたものではないが、ここでは、確率微分方程式を導出するために形式的に導入する。ラグランジアンを $L(R, u) = L(R, \dot{R}, t)$ 、気泡表面における粘性力を $F(R, u) = F(R, \dot{R}, t)$ とすると、ラグランジュ・ダランベール原理に対して、伊藤の公式を用いて、伊藤型の確率的なレイリー・プレセット方程式

$$\begin{cases} dV = \frac{3g}{R} V dW_t + \left(\frac{3g^2}{R^2} V - \frac{3}{2R} V^2 - \frac{4\nu V}{R^2} - \frac{2S}{\rho_L R^2} + \frac{p_V - p_\infty}{\rho_L R} + \frac{p_{G_0} R_0^3}{\rho_L R^4} \right) dt \\ dR = V dt - g dW_t \end{cases}$$

を導くことができる。これに基づいて、数値解析を行った結果を図7と8に示す。

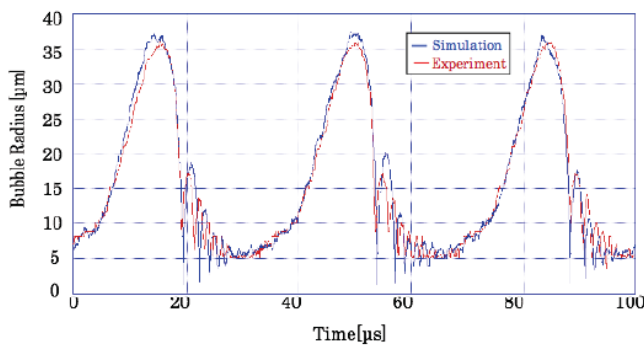


図7. 3周期分のリバウンドと数値解析

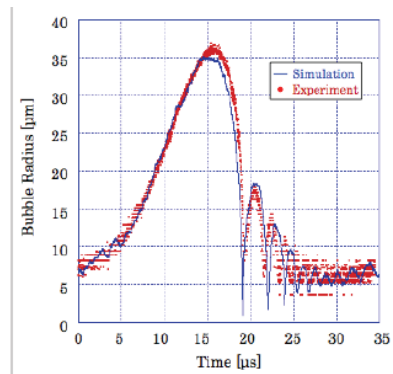


図8. 揺らぎと数値解析

・衝撃圧の検出

気泡の位置から 1.75[mm]の距離にある点で、ハイドロフォンによる音圧の変化を測定した所、図9に示すように、超音波振動子による音圧 $p_{\infty} = p_0\{1+A \sin(2\pi f)\}$ に加えて、第一リバウンドで気泡の圧壊時刻 21.94[μs]の直後に、約 2[MPa]のスパイク圧が発生していることが見てとれる。これは、気泡の圧壊に伴い、圧力波が発生し、それが周囲に伝播したものと考えられる。スパイク圧を検出した時刻は 21.91[μs]で、水温 27.8 度のときの音速は 1504.1 [m/s]とすると、圧力波が発生してからハイドロフォンに到達する時間は 1.16[μs]である。したがって、圧力波の発生時刻は 20.75[μs]となり、気泡の圧壊の約 1.19[μs]前に圧力波が発生していると推測できる。

圧力波の伝播は流体の圧縮性によることは言うまでもないが、このような圧縮性を考慮した数学モデルとして、以下のレイリー・プレセット・ケラー方程式が知られている。

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c}\right) \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_L} \left(1 + \frac{\dot{R}}{c} + \frac{R}{c} \frac{d}{dt}\right) \left(p_V + p_G - p_{\infty} - \frac{2S}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R}\right)$$

ここに、 c は流体の音速である。図 10 に示すように、この方程式からハイドロフォンの測定位置において伝播した圧力波の値を計算することができる。数値解析では、第一圧壊の直後の衝撃圧は 4.5[MPa]と実験よりもやや大きく出ているが、ほぼ同程度のオーダーになっている。

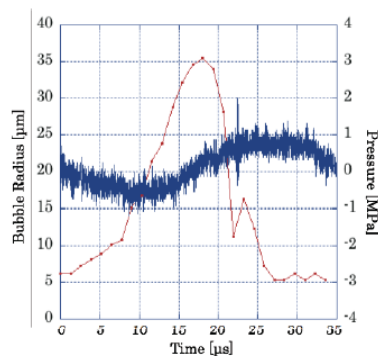


図 9 衝撃圧の発生

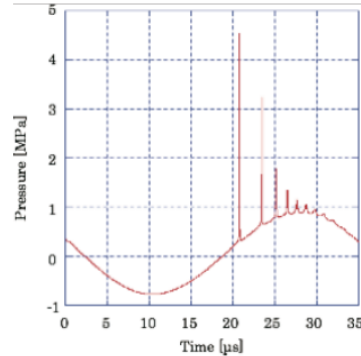


図 10 衝撃圧（数値解析）

●気泡クラウドと衝撃波

・気泡クラウドに関する実験

気泡の塊からなる、いわゆる気泡クラウドにも単一気泡と良く似たリバウンド挙動が発現することが知られている。このような気泡クラウドの非定常挙動は、ミクロな単一気泡が集まって構成されるクラスターのマクロな集団運動として理解されると考えられるが、これまで、Brennen や松本のグループによって、クラウド内部の気泡流から衝撃波によって引き起こされるという仮説が提案されている[4,5]。本研究では、脳外科手術への実用化が進められている Ho:YAG レーザー発信装置（スパークリングフoton社製）によって水を誘起し、静止流体（水）中にノズルから高速で水を噴射するパルスウォータージェット実験装置を開発した[11]。

まず、マクロな気泡クラスターのリバウンド現象をシャドウグラフ法によって、高速度ビデオカメラを用いて撮影した(10)。図 12 に、レーザー出力 1.56[J]、ノズル内径 0.68[mm]の場合で出現した気泡クラウドの非定常挙動を示す。黒くなっている部分が気泡の塊（クラスター）である。ノズル先端部から噴射された流体（水）は次第に膨張し、314.3[μs]で極大になり、その後、収縮して、471.4[μs]の時点で圧壊している。さらに、再度、膨張して、647.6[μs]付近で再び極大になり、収縮しながら、やがて崩壊していく様子が見てとれる。実際に、各時刻で気泡クラウドの最大半径を計測し、さらに、ノズル先端部から 4.26[mm]の所にハイドロフォンを設置して計測し、それぞれ計測値をプロットしたものを図 13 に示す。図から明らかなように、気泡の塊が単一気泡で観察されたものと同様に、2回のリバウンド挙動を呈していること、第1リバウンドの最大半径は約 4[mm]、第2リバウンドの最大半径は約 1.25[mm]である。第1リバウンドが極小になるまでの時間は約 419[μs]であり、クラウドのリバウンドが消滅するまでの時間は約 810[μs]である。また、気泡クラウドの圧壊時に 23.4[MPa]及び 7.18[MPa]もの衝撃圧が発生していることが分かった[3]。

・衝撃波の可視化

実験では、シャドウグラフ法による撮影に加えて、さらに、直交方向に高速度ビデオカメラを設置し、シュリーレン法による同期撮影を行い、気泡クラウドのリバウンド現象とともに、密度勾配から圧力波の可視化を行った。図 14 に示すように、気泡クラウドの圧壊とともに、圧力波（衝撃波）が発生していることが見てとれる。実験データより、圧力波の速度は約 $1421.5[\text{m/s}]$ であることが分かった。これにより、波動現象の時間スケールは気泡クラウドのリバウンドの応答に関する時間スケールと比べても約 200 倍以上も速い現象であり、気泡クラウドの非定常挙動がマルチスケール現象であることが分かる。

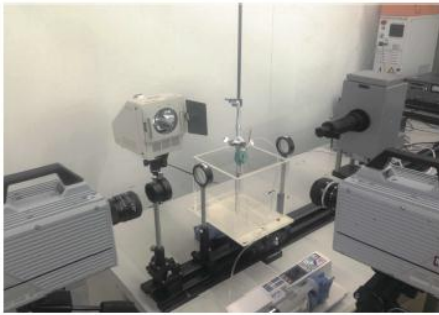


図 11 実験装置

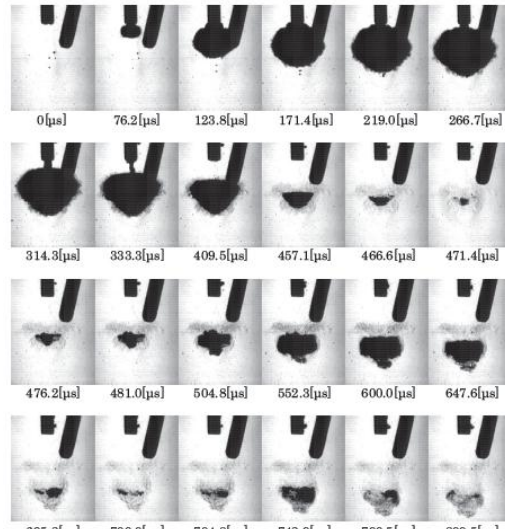


図 12 気泡クラウドのリバウンド挙動

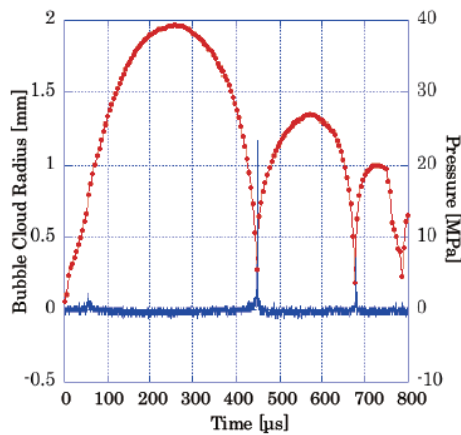


図 13 クラウドのリバウンド

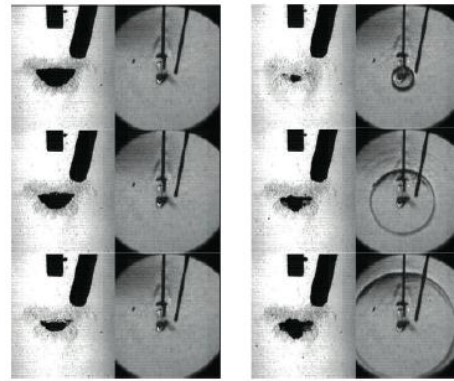


図 14 圧力波（衝撃波）の伝播

以上に示したように、本研究では、単一気泡のリバウンド現象、及び気泡の塊からなる気泡クラウドの非定常挙動について、実際に実験装置を開発して現象を観察した上で、数学モデルによる数値実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 単一気泡については、リバウンドに現れる気泡半径の揺らぎがウィナー過程としてモデル化できることを示した。
- (2) さらに、変分法を用いた確率化のアプローチにより、新たな数学モデルとして、確率的なレイリー・プレセット方程式の定式化を行った。
- (3) 気泡の圧壊時における気泡界面近傍での衝撃圧を測定し、圧縮性を考慮したレイリー・プレセット・ケラー方程式による圧力波の推定値とほぼ同程度の値となっていることを確認した。
- (4) 気泡クラウドが単一気泡と同様の集団的なリバウンド挙動を呈することを明らかにした。特に、気泡クラウドの圧壊の直前に圧力波（衝撃波）が生成され、周辺に非常に高い衝撃圧で圧力

波が伝播されることを明らかにした。

参考文献

- (1) C. E. Brennen, Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, New York, 1995.
- (2) 吉村浩明, 星野光, 宮崎太郎, 単一気泡のダイナミクスと確率的レイリー・プレセット方程式による解析, 日本応用数理学会 2014 年度年会講演予稿集 JSIAM2014 No.1154, Pages 1-2.
- (3) 星野光, 宮崎太郎, 吉村浩明, 気泡のリバウンド挙動とレイリー・プレセット・ケラー方程式に基づく衝撃圧の解析, 日本応用数理学会 2014 年度年会ポスター講演.
- (4) Y-C. Wang and C. E. Brennen, Numerical Computation of Shock Waves in a Spherical Cloud of Cavitation Bubbles, J. Fluids Eng. 121(4), 872-880, 1999.
- (5) 吉澤晋, 池田貞一郎, 高木周, 松本洋一郎, 球形気泡クラウドの非線形崩壊挙動, 日本機械学会論文集 B 編, 72 巻 715 号, pp620-627, 2006.
- (6) 吉村浩明, 鹿田翔平, 仲原慎一郎, レイリー・プレセット方程式による単一気泡の非線形挙動と分岐, 日本機械学会第 3 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, pp.119-120, 2011.
- (7) 鷺頭亮介, 吉村浩明, 分子動力学法による単一気泡の生成と崩壊挙動の解析, 日本機械学会第 3 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, pp.47-48, 2011.
- (8) 鹿田翔平, 吉村浩明, レイリー・プリセット方程式に見られる単一気泡の非線形現象, 第 60 回理論応用力学講演会, OS12-11, pp.1-3, 2011.
- (9) Shohei Shikada and Hiroaki Yoshimura, Nonlinear Phenomena in Rayleigh-Plesset Equation for Single Bubble Dynamics, NEW TRENDS IN FLUID MECHANICS RESEARCH, Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Mechanics American Institute of Physics Conf.Proc. Vol.1376, pp.552-554, 2011.
- (10) 宮本卓哉, キャビテーション気泡雲の非定常挙動に関する研究, 早稲田大学大学院基幹理工学研究科機械科学専攻応用数学研究室. 2013 年度修士論文.
- (11) 仲原慎一郎, 単泡性ソノルミネッセンスとレーザー誘起キャビテーション・クラウド: キャビテーション・クラウドの非定常挙動に関する実験, 早稲田大学大学院基幹理工学研究科機械科学専攻応用数学研究室. 2012 年度修士論文.
- (12) 鹿田翔平, 単泡性ソノルミネッセンスと気泡ダイナミクスの非線形現象に関する研究, 早稲田大学大学院基幹理工学研究科機械科学専攻応用数学研究室. 2011 年度修士論文.

4. 3 混相流素過程における現象の解明(早稲田大学 山本グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

● 背景と目的

応用上重要で学術的にも未解決な混相流の中心課題の1つにキャビテーションの問題がある。キャビテーションとは液体の静圧が飽和蒸気圧近くまで低下すると、気化により液体中に多数の気泡が発生する現象のことである。キャビテーションが物体まわりの流れに生じると、流れのパターンが大きく変化し、物体の振動や騒音、さらには物体表面に壊食が生じるため、流体機械の性能が著しく低下する。キャビテーションは船舶や流体機械の高速化と共に問題となり、その研究は約100年の歴史がある。しかしキャビテーションの流体力学的プロセスについては多くのデータが蓄積されてきたにもかかわらず、今なお十分な理解が得られているとはいえない。

キャビテーションの理論的なモデルとして、まず水中の単一球形気泡の膨張収縮運動が考えられ、その動特性や崩壊時の圧力が計算された。しかし、その圧力レベルは金属の降伏応力を大きく下回っており、壊食の要因としては不十分と考えられている。その後球形気泡は壁付近で崩壊する時、流れの対称性が崩れマイクロジェットを発生することが実験と数値解析により明らかにされ、固体壊食の有力な因子とみなされるようになった。さらに最近は水力機械の技術者の間でクラウドキャビテーションの高い壊食性が知られるようになり、そのメカニズムの解明に注目が集まっている。

船舶や水力機械で生じるキャビテーションは防止あるいは抑制することが課題となるが、逆にそ

の破壊作用を有効に利用する技術としてウォータージェット技術が知られている。中でも水中の高速ウォータージェットは多数のキャビテーションクラウドを生じるので壊食作用が大きくなる。そこで本研究では高速水中ウォータージェット中のクラウドキャビテーションに着目し、キャビテーション壊食の流体力学的なメカニズムを実験(EFD)と数値計算(CFD)により解明することを目的としている。

●実験解析

本研究では、まず実験により高速ウォータージェット発生装置から静止水中に噴出するキャビテーションジェットについて、その非定常な流動特性を調査するため、ノズル径 0.15 mm、噴射圧力 10-200 MPa の条件下で PIV 法による流線計測、噴流の瞬間写真撮影、毎秒 50 万コマの高速ビデオによる動画撮影などの流れの可視化とハイドロフォンによるジェット近傍の圧力パルスの測定を行った。またキャビテーションジェットの固体壊食特性から噴流構造を探るため、アルミ試験片(A1050)に噴流を垂直に 1200 秒間照射し、その前後の質量欠損を測定して、ノズル・試験片間の距離による変化すなわち壊食曲線を求めた。実験で得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 高速の静止画像と動画撮影によると、キャビテーションジェットの主流は間欠的で非対称な3次元流れで、非定常性の強い流れである。
- (2) 高速ビデオのシャドウグラフとシュリーレン写真によると、ノズル噴出後、連続したキャビテーションジェットはやや下流で数個の気泡雲に分裂し、各気泡雲は 2, 3 回縮小・拡大を繰り返して消滅する。気泡雲の初期半径は約 1~3mm で、リバウンド周期は 100~150 μ s 程度である。気泡雲の縮小時に、パルス状の強い圧力波が発生する。圧力波の発生時期は気泡雲の体積が最小になる直前の 1~6 μ s である。最初の崩壊後の気泡雲周囲の圧力波伝播速度は 1000~1300m/s であるが 2 回目以降急速に低下する。
- (3) ハイドロフォンの圧力測定によると、キャビテーションジェットから放出される圧力パルスの発生頻度は可聴域の 1~10kHz の範囲にある。
- (4) アルミ試験片の壊食試験によると、壊食曲線には2つのピークが存在する。第1ピークの発生位置はノズル出口直後で噴射圧にほとんど依らないが、その壊食量は噴射圧の増加と共に増加する。逆に第2ピークの位置はノズル出口からやや離れ、噴射圧の増加と共に後方へ移動するが、その壊食量は噴射圧にほとんど依らない。さらに試験片表面の壊食面積が最大(壊食量最大ではない)となる位置は壊食曲線の第1ピークと第2ピークの間にある。壊食曲線にこのような第2ピークが生じるのは主にキャビテーションクラウドの強い壊食作用によるものと考えられる。

●数値解析

以上のような高速キャビテーションジェットから放出される気泡雲の崩壊現象は物体の騒音振動ばかりでなく、壊食に関わる重要な因子と考えられる。それを理解するため本研究ではキャビテーションジェットの流れを2つのモデルを用いて数値解析した。第1はキャビテーションジェットの巨視的な流れを把握するため、連続体近似による3次元均質気液二相流モデル、第2はキャビテーション気泡雲中の衝撃圧の発生メカニズムを明らかにするため、均質気液二相流に微細気泡の膨張収縮運動を組み込んだ球対称気泡雲モデルである。両モデルに共通な均質気液二相流は圧縮性が強く、音速が大きく変化する。そのため流れ場には容易に不連続変化が発生するので、数値解析では CFL 条件のもとで安定かつ高精度の差分スキームが必要となる。そこで本研究では時間分割法の一つである CIP 法を採用した。計算結果と前述の実験結果との比較から、両モデルの有効性と問題点が次のように明らかになった。

- (1) 3次元均質気液二相流モデルはキャビテーションジェットの間歇的な流れを定性的に表すことはできるが、気泡雲の崩壊による衝撃圧の発生などの高速現象を表すことはできない。
- (2) 微細気泡を考慮した球対称気泡雲モデルによると、初期ボイド率 (0.1%)、気泡雲の初期半径 = 3 mm の気泡雲の場合、大気圧下で崩壊する気泡雲の中心部における衝撃圧の最大値は約 176 MPa に達する。この値は、微細気泡内の最大圧力とほぼ等しいが、水単相()の最大

圧力よりはるかに高い(約 18 倍). これは微細気泡の存在が場の圧力上昇を増大させることを意味している.

- (3) 気泡雲中心部のボイド率が最小すなわち気泡雲が崩壊する時刻は衝撃圧の発生時刻より約 $1.5 \mu\text{s}$ 遅くなり, 実験値に近い値が得られる. このような時間遅れは微細気泡の付加質量効果によるものと考えられる.
- (4) 気泡雲のリバウンド周期は約 $12\mu\text{s}$ で気泡雲を構成する微細気泡の最小周期と同じオーダーである. しかしそれは, 観測されるリバウンド周期より1桁短い.
- (5) 気泡雲外で衝撃圧の外向き伝播速度は約 1100 m/s と水の音速に近く, 実験値とほぼ一致している. これより気泡雲の外部は水単相に近いことが確認される.
- (6) 気泡雲中心部で発生する衝撃圧の最大値は気泡雲の大きさが大きいほど, また下流の噴流周囲圧が高いほど大きくなる傾向がある. この傾向は過去の実験結果とほぼ適合している.

● 結論と今後の課題

以上, 本研究の実験と数値解析からキャビテーション気泡雲は単一気泡よりもはるかに大きく高頻度な衝撃圧力を発生し, 固体に激しい損傷を与える可能性が示された. しかし, 本研究で用いた計算モデルの初期条件, 境界条件には多くの推定値が含まれているので, まずはシミュレーション結果と実験値との差を埋めるよう不確定なパラメータを調整し, モデルの予測精度を向上させることが課題である. また重要な気泡雲の発生メカニズムについてはほとんど未着手である. 精度の高い実験値との比較に耐えるよう今後は新たな着想によるキャビテーション気泡雲のモデル化が望まれる.

4. 4 空力騒音発生メカニズムの解明(室蘭工業大学 高木グループ)

(1)研究実施内容及び成果

一様な流れの中に置かれた柱状の頓頭物体後流には, 規則的な Karman 渦列が形成される. この渦列周波数の決定機構に流れの絶対・全体不安定(AGI: Absolute-Global Instability)が関与していることは周知で, この渦放出に伴って離散的な周波数を持つ空力騒音が放射される. 風車のブレード騒音や航空機の脚・slat(前縁補助翼)騒音はその代表的な例である.

この周波数決定機構の解明に向けた理論構築の取組は Huerre & Monkewitz らのグループを中心として 1980 年代半ばから精力的に進められているが, 流れ場は強い非平行性と成長攪乱の非線形特性のため理論的な取り扱いが難しく, 渦列周波数は物体後流のどの位置で決定されているかまだ十分に理解されていないのが現状である. 従って, 実験的な見地から課題解決に向けた新しいアイデアに基づいて取組を行ない, 新しい理論構築に貢献できる実験的知見を提供するのが本研究の目標である.

柱状の頓頭物体後流は大規模な逆流を伴い, 模型直後から急激に変動が成長するために, 局所絶対不安定(absolute instability: AI)が起こる特異点の特定は甚だ難しいことから, 逆流の強さを可能な限り小規模に抑えることで特異点を模型から離れた位置に移動させることができることが示唆される. そこで, 比較的厚い二次元翼の後流にも柱状の頓頭物体のそれと同様な渦列が成長し, 後縁から空力騒音が発せられることに着目した. また, 空力騒音と流れ場との音響的なフィードバックループが形成されると不安定性がさらに複雑化することから, 騒音が発生しないよう可能な限り実験レイノルズ数を下げ空力騒音の発生を抑制することである.

理想的な実験条件を作り出すために断面形状は広く知られた上下対称の4桁の NACA 翼模型を数種用意し, それらの後流構造を実験的に詳細に調べた(図 1 参照).これまでに次のことが明らかとなった.

- (1)逆流領域が極めて小規模な NACA0006 後流には周波数帯域が広く成長率が低い変動が観察され, 空間発展型の対流不安定(Convective instability: CI)に起因していることが分かった.
- (2)一方, NACA0006 後流の逆流領域に比べてより大きい NACA0012 後流には狭帯域の変動が

成長し、AGI が支配的な不安定場が実現されていることが明らかとなった。

- (3)NACA0006 の後縁上下面に極めて薄いテープ(厚さ 0.035mm、幅 0.5mm)を貼ると、不安定モードは対流不安定から絶対不安定にスイッチし、逆流の存在と AGI との相関が確認できた。
- (4)また、NACA0012 後流の逆流領域を取り囲むように、変動振幅が飛ぶU字型をした領域(曲線)が見だされた。
- (5)さらに、U字領域に沿って速度変動の周波数も変化していることが分かった。

逆流は周波数の選択機構に絡み、この逆流領域を取り囲むU字型した変動の飛び領域は特異点と何らかの因果関係が推測される。過去に同様の報告がないか文献調査を実施している。これまでのところ、流れに熱線プローブを挿入すると変動の周波数は低周波数側へシフトするだけでなく流れ場全体に影響を及ぼすことなど 11-13)の報告があることが明らかとなった。本計測結果も同様な傾向を示していることから(図2を参照)、次の2種類の実験を行った。できるだけセンサーの影響を抑えたプローブの製作とこれを用いた再計測と、プローブの影響を逆手にとってプローブを二次元の細線に見立てた渦列の抑制の可能性を調べることである。

次に、図3に示すように改良したプローブでも、可視化映像によると渦形成に及ぼす影響は皆無にできなかったことから、さらに次の新しい実験方法を考案した。僅かな段差で逆流領域を導入すると不安定は CI から AI にモード変化する訳であるから、段差の代わりに NACA0006 の迎角を持たせることで CI から AI にモード変化する角度が存在するはずである。そうすることで、CI あるいは AI 支配的な流れ場に対して相対的にセンサーの影響を最小限に留めることができるはずである。この推測に基づいて NACA0006 の迎角に対して、熱線プローブを模型後縁から $X=8\text{mm}(X/C=0.2)$ に固定し、速度変動の振幅(成長する変動の周波数は約 280Hz)を計測した結果が図4と5である。この結果から明らかなように、迎角が 2.4 度から 2.5 度の間で不安定モードの切り換えが見事に捉えられている。すなわち、 $X=8\text{mm}$ 近傍で変動が急激に成長していることから、この近傍で周波数の選択機構点が存在しているものと推測される。実際、熱線の代わりに煙を導入して流れを可視化すると確かに渦列の形成が観察された(図6)。なお、迎角2度以下でも渦構造が観察されるが、熱線計測によると CI に起因したものである。本可視化撮影はアマチュア用の高速カメラ(1000fps)で撮影したため、解像度(224×64pixel)が極めて乏しいが渦列の認識はできることから、熱線計測の裏付けとして有効である。(高速度ビデオカメラ(1000fps, 1280×1024)を発注中で9月中旬には入手予定)

もう1つの実験とその重要な成果は、プローブを模擬した細線を用いた渦列の制御である。迎角 3.3 度で NACA0006 模型後流において、AGI による規則的な渦列は観察されるが(図7の左側スペクトル図で 280Hz 成分)、直径 1mm の細線を 50mm($x/c=1.25$)から 40mm($x/c=1.0$)に近づけると、渦列構造は消滅することが分かった(図7の右側スペクトル図で 280Hz 成分は暗騒音レベル)。

確認のために主流速度と直径に基づいたレイノルズ数が 100 前後でも、円柱あるいは三角柱の背後のある特定の領域に細線を配置すると、翼模型と同様に渦構造は消滅することが分かった(結果省略)。細線の無い場合とある場合で基本流を比較することで、CI と AGI の分岐条件を明確にできるはずである。

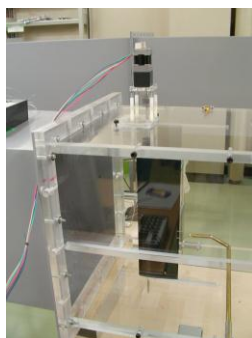


図 1. NACA0004 の後流を熱線で計測中の様子(室蘭工業大学)

速度変動計測するために挿入した熱線プローブの浸襲で変動の周波数が低減した領域がU字形をなす。プローブが模型に近い領域で変化が大きい訳ではない

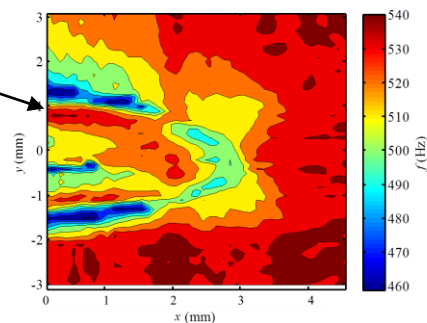


図 2. NACA0018(Chord 30mm)の後流を熱線計測し、各位置で最も際立った速度変動の周波数の等高線図。主流速度は約 5m/s

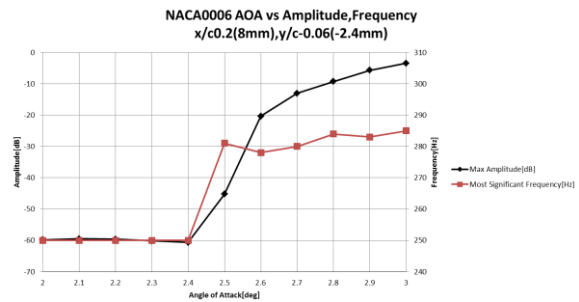
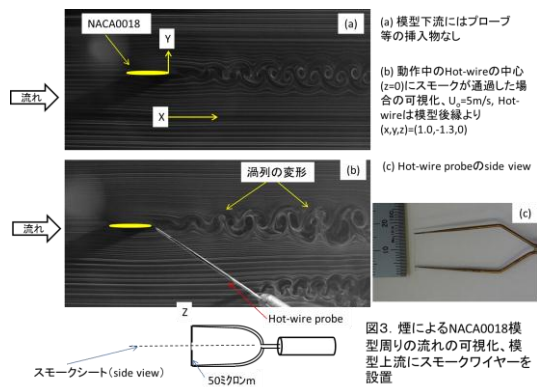


図4 熱線位置をNACA0006(Chord 40mm)の $X/C=0.2$, $Y/C=-0.06$ に固定し、迎角に対する後流を熱線計測し、各位置で最も際立った変動の周波数の等高線図。主流速度は4.3m/s

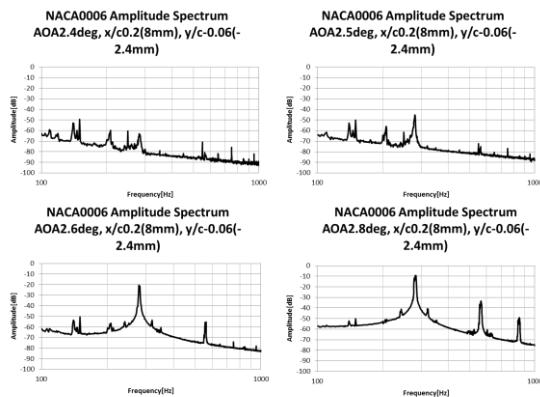


図5 図4のバックデータ

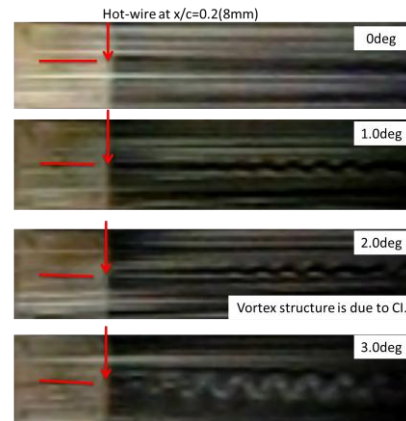


図6 図4の条件(NACA0006の迎角を变化)における模型下流における渦列の高速ビデオ映像よりワンカット

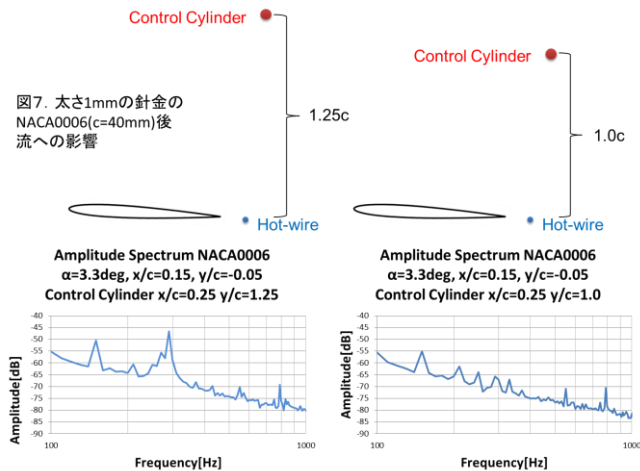


図7 太さ1mmの針金のNACA0006(c=40mm)後流への影響

次に、絶対不安定点の位置を実験的観察から特定することを試みた。またレイノルズ数を大きくすると模型と渦列との干渉から音波が放射されることから、音波受容過程を明確にすること、さらには音波を抑制する技術を提案することを試みた。前者の目的達成には音波が発生しない可能な限り単純な流れ場を実現することが肝要である。そこで対流不安定が絶対不安定にモードが切り替わる臨界点近傍までレイノルズ数を下げた実験を行い**絶対不安定点の特定に成功した**。翼の後流を対流不安定から絶対不安定にスイッチさせるには後者の不安定の必要条件として逆流の存在と前述した臨界レイノルズ数との存在を考慮すると2通りの方法が可能である。1つ目の方法は迎角を持たない比較的厚い翼に対して主流の速度を徐々に高める方法と、もう1つは主流速度を一定として薄翼の迎角を徐々に大きくする方法とがある。後者の場合には微細な角度設定ができることから、後者の方法で不安定変動の観察を行った。図8は薄翼模型として最大厚み $t=2.4\text{mm}$ で翼弦長 $c=40\text{mm}$ の NACA0006 模型の下流 $X/t=2.1$ において速度変動が最大とな

る位置で捕えた速度変動のスペクトルを様々な迎角に対して図示したものである。迎角を 3.3 度から僅か 0.1 度増しただけで約 280Hz 近傍には極めて選択的な変動が突発的に成長している様子が見て取れる。図9は様々な X 位置で同様な手法で離散的成分のピーク値を X 方向の振幅分布の変化を比較したものである。

迎角 3.3 度以下では 280Hz 近傍の速度変動は指数的に増加し流れ場は対流不安定が支配的であると言えよう。しかし、3.4 度より大きい迎角にすると、 $X/t=1.3$ 近傍で指数成長よりはるかに急激に速度変動が成長し、迎角を大きくしてもその成長開始位置の変化は見られない。風洞の主流に残留する速度変動に埋もれて突発的に成長する変動の成長開始点を正確に同定することは難しいが、以上の結果より、本実験レイノルズ数においては、翼後縁の $X/t=1.3$ より僅かに上流に絶対不安定点が存在していると断定してもよさそうである。

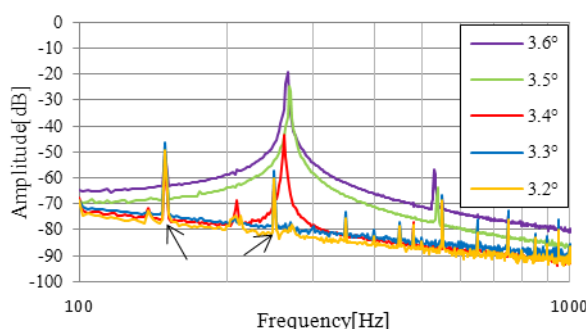


Fig.8 Power spectra of velocity fluctuation observed at $X/t=2.1$ with various AOAs of an NACA0006.

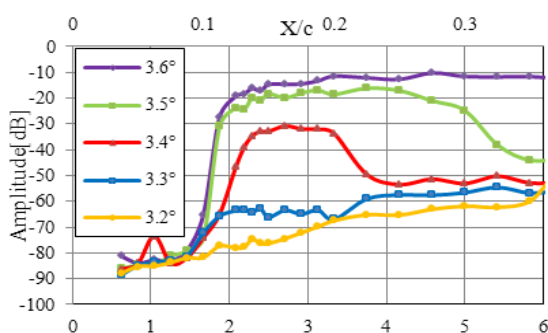


Fig.9 Amplitude distributions of most amplified velocity fluctuation at each X station against X/t behind an NACA0006.

また音波を抑制する技術提案の基本的なアイデアとして翼後渦列と針金後流の渦列干渉を提案し、翼後流の渦列形成の抑制に成功した。迎角を持たせた対称薄翼 NACA0006 の翼後縁近傍で絶対不安定から形成された渦列に対して NACA0006 の翼後縁から流れと直角方向に翼弦長離れた位置に直径 1mm の針金を翼軸方向に設置すると、渦列の成長が抑制されることが見出された(図10と11を参照のこと)。針金による翼後流の渦列抑制効果は、逆に翼による針金後流の渦列形成にも大きな影響を及ぼしていることも明らかとなった。このような相互干渉による渦列抑制の原因を究明するために循環式風洞の下流から煙を流し、レーザースシート光と高速度カメラで流れ場を可視化した。その結果明らかになったことは翼単独ではその後流には規則的な周期変動と翼後縁には逆流領域の存在が観察された。しかしひとたび細い針金を挿入すると翼後流には渦列の消滅と同時に後縁領域の逆流も消滅することが明らかとなった。針金の挿入で針金の周りの流れは加速されるが、針金直径の 40 倍位置における流れの加速はポテンシャル理論から主流の 0.1% 以下と見積もれるが、通常無視できる程度に小さい針金は何故このような渦列抑止効果の流体力学的な追及は今後の課題である。

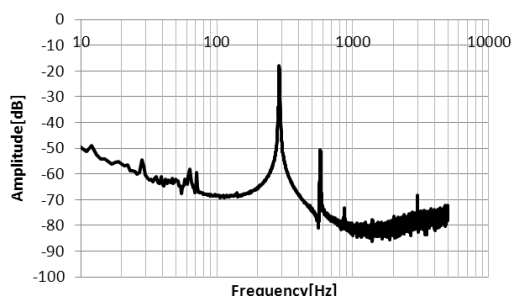


Fig.10 Power spectrum of streamwise velocity fluctuation in the presence of periodical Karman vortices formed in the wake behind an NACA0006.

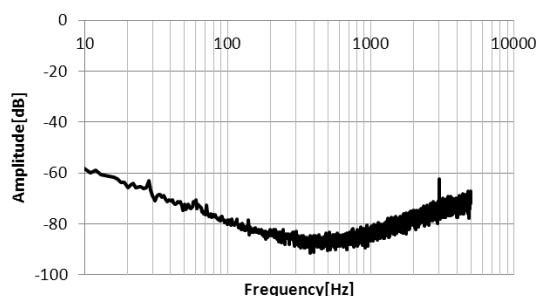


Fig.11 Power spectrum of streamwise velocity fluctuation showing no periodical Karman vortex formation in the wake behind an NACA0006.

4. 5 境界層乱流遷移メカニズムの解明(首都大学東京 浅井グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究では、流れの層流から乱流への遷移現象を流れの不安定メカニズムによって説明することを目標とする。その第一歩として、“Noise Amplifier”と形容されるタイプと“Flow Oscillator”と形容されるタイプの二つの不安定メカニズムを実験的に調べた。前者は外乱が空間的に増幅して渦に発達する場合で、その渦の振動数は外乱に影響される。後者は不安定性によって生じた渦が外乱に影響されない固有の振動数をもつ場合である。物体後流では、**Reynolds** 数が大きくなるにつれて前者のタイプから後者のタイプに移行することが知られているが、その状況を詳しく調べるため、柱状物体よりも **Reynolds** 数依存性が穏やかな軸対称物体について実験を行った。また、従来乱流摩擦抵抗の視点から定義されている流体力学的滑面の概念を層流の安定性の視点から見直すことを目的として、境界層安定性に対する粗面の影響を検討した。さらに流れの安定性の工学的応用の一例として、プラズマアクチュエータによる翼のトレーリングエッジノイズの抑制の実験を行った。

●軸対称物体後流の安定性

本研究では、磁力支持装置(図1)によって空中に浮かせた軸対称物体の後流に生じる乱れを計測した(図2)。この実験ではバックグラウンドの攪乱の影響が少ない高い精度の増幅攪乱の計測を行うことが可能である。軸対称物体の太さを幾つか変更し、それによる後流の安定性メカニズムの違いを調べた。



図1 磁力支持装置

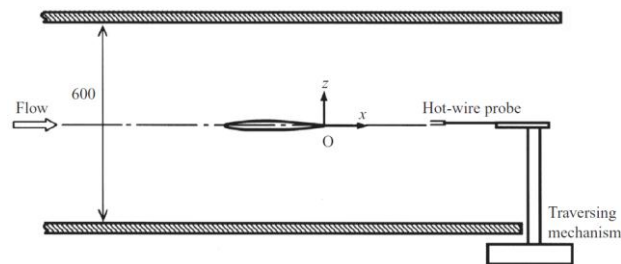


図2 実験体系

NACA0015 の形状をもつ軸対称物体に対する結果を図3～図5に示す。図3は流れ方向の乱れのパワースペクトルを示したものである。風速は 16m/s と比較的速いケースで、その場合でも乱れはある程度幅をもった周波数を示しており、Noise Amplifier のタイプであると推測できる。図4は乱れの振幅をx方向(流れ方向)にプロットしたもので、縦軸は log スケール表示であるから、乱れの振幅は空間的に指数関数増幅を示している。また図5は固定位置で振動数毎の空間増幅率を示したもので、丸印が実験結果、破線がその位置での平均速度分布を用いた線型安定性理論による結果を示している。両者は良く一致しており、この場合には局所的な線型安定性理論で乱れの空間的成長過程がある程度説明できることを示している。以上を総合すると、この流れは Noise Amplifier のタイプであると判定することができる。

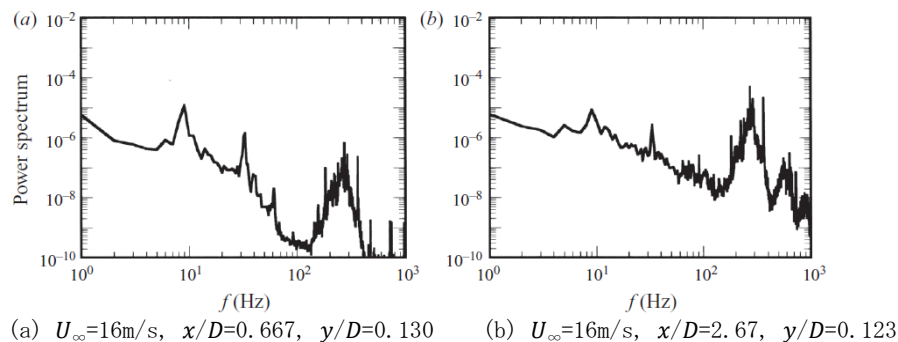


図3 流れ方向の攪乱のパワースペクトル

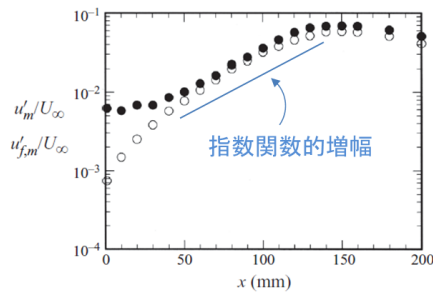


図4 流れ方向の擾乱の振幅
(●:全体, ○:増幅擾乱)

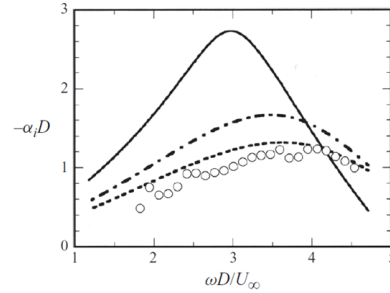
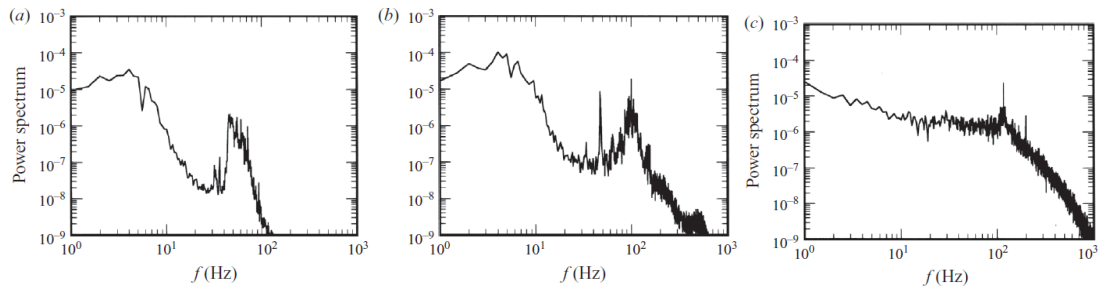


図5 擾乱の空間増幅率($X/D=1.33$)
(○:実験, 破線:線型安定性理論)

図6と図7は NACA0018 の結果で、上記の NACA0015 よりも太い物体を用いた結果である。流れ方向の乱れのパワースペクトルは、風速が 6m/s と遅い場合は、上記のものと同じような幅をもった周波数分布を示しているが、風速を上げて 10m/s に達すると、鋭いピークをもった周波数分布になることが分かる。図7は乱れの振幅を流れ方向にプロットしたもので、風速が 6m/s と遅い場合は指数関数的増幅を示しているが、風速 10m/s にしたときには流れ方向に一定となって、風速が遅いときと全く違う傾向を示している。局所的な線型安定性理論に基づく数値計算でも風速 10m/s になると絶対不安定の領域が現れることが確認された。これらを総合すると、比較的太い物体では、風速を上げると Noise amplifier から Flow oscillator へ遷移するということが結論される。



(a) $U_{\infty}=6$ m/s, $x/D=3.89$, $y/D=0.161$ (b) $U_{\infty}=8$ m/s, $x/D=2.78$, $y/D=0.161$ (c) $U_{\infty}=10$ m/s, $x/D=0.556$, $y/D=0.139$

図6 流れ方向の擾乱のパワースペクトル

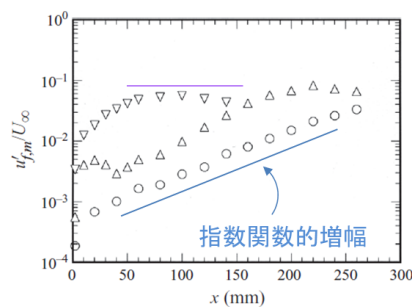


図7 流れ方向の増幅擾乱の振幅(○: $U_{\infty}=6$ m/s, △: $U_{\infty}=8$ m/s, ▽: $U_{\infty}=10$ m/s)

以上をまとめると、本実験により

- 物体の太さが細い場合は Reynolds 数を大きくしても常に Noise Amplifier の状態に留まる。
- 物体の太さがある程度になると、Reynolds 数を大きくするに従って Noise Amplifier の状態から Flow Oscillator の状態に遷移する。

ことが判明した。

●境界層安定性に対する粗面の影響

微小高さの表面分布粗さを幾何学的に単純な正弦波状の凹凸(Surface corrugation)を考えて、粗さ高さ(Corrugation amplitudeで表現)とTollmien波動(線形不安定波)の増幅率との関係を調べた。従来の定義では、粗さReynolds数 $Rc=5$ が臨界値として流体力学の教科書に掲載されているが、安定性からの基準では、その半分の $Rc=2.5$ 以下にまで下がるという重要な成果が得られた。

●プラズマアクチュエータによる翼のトレーリングエッジノイズの抑制

数十万のReynolds数でのNACA0012翼から出るトレーリングエッジノイズを対象に、プラズマアクチュエータを用いて境界層の安定性を制御することにより騒音抑制を試みた。適当な位置にプラズマアクチュエータを装着することにより、翼の後縁から出る騒音の抑制が実現された。

4. 6 流れの大域構造に関する現象の解明(広島大学 飯間グループ)

(1)研究実施内容及び成果

流れの大域構造解析グループでは、流れの階層構造形成をメゾ・マクロという視点から捉えることを目指す。様々な数理解析的手法を活用することで困難を打破するブレイクスルーを得ることを目指している。具体的には、分岐解析というマクロの視点、ダイナミクスの抽出というメソの視点を通じたアプローチを行った。分岐解析については新しい解のクラスについて解析手法を確立し、二種混合流体の熱対流という具体的な問題で重要な役割を果たす構造をその解として得ることに成功した。またダイナミクスの抽出については自由表面を伴う回転流体系の実験データから元の系の動力学の主要な特徴を抜き出し、残りの自由度をランダム項とすることで複雑な動力学の理解に資する結果を得た。前者は基礎方程式に基づいて数理構造を解析している意味でボトムアップ、後者は実験データに基づいて数理構造を再構成しているという意味でトップダウンという分類も可能であり、この視点から見ると対照的な手法といえる。これらの結果は摂動論的解析や実験計測のデータと補完しあうものであり、既存の手法で得られた結果の価値を高めたり、より詳細な解析の足がかりとなる結果を与えるという意義がある。

●ボトムアップ・アプローチ

ボトムアップ・アプローチでは「局在対流構造の普遍性と数理構造」と「遷移ダイナミクスの数理解析」に着目し、まず2種混合流体のベナール対流の分岐構造の解析および局在対流の衝突問題などにおいて数値計算を用いて新しいクラスの解を発見した。そこで得られた知見を生物対流の問題へ適用し、ミドリムシ生物対流のパターン形成問題の解析およびその数理構造の抽出とモデル方程式の提案を行った。さらには軌道解析への道筋をつけることを目指し、共変リアプノフ解析を応用した軌道解析アルゴリズムの構築を行い、反応拡散系への応用を試みた。

・2種混合流体のベナール対流が引き起こす大域構造の解析

2種混合流体におけるベナール対流は空間局在構造を含む多様な構造を持ち、流れの大域構造の一例として重要である。我々はまず多様な基本構造を定常解、時間周期解、空間進行解、時間周期進行解という4つのクラスに分類し、これらを基礎方程式の解として数値的に求める技術を開発した。特に4番目のクラス(とその亜種)については数学的に特徴づけられた2種混合流体のベナール対流の解としては本研究課題の成果として初めて計算された(図1)。さらに、得られた解から大域的な分岐図を求めることに成功した(図2)。

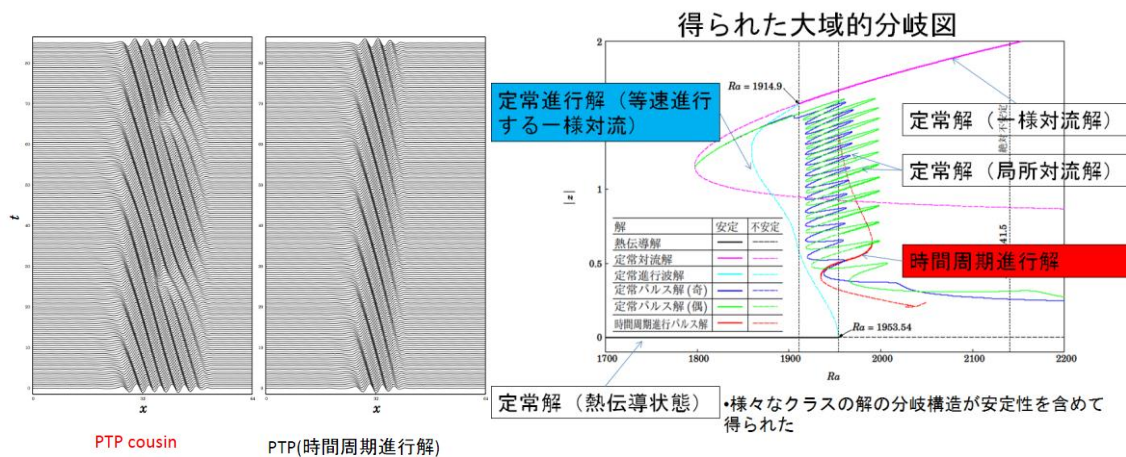


図1 時間周期進行解とその cousin

図2 2種混合流体におけるベナール対流の大域的分岐図

次に大域構造の形成機構の解明を試みた。まず2体相互作用に着目し、時間周期進行解間、また時間周期進行解と定常解の強い相互作用を調べた。本成果である高精度の数値解を活用して初めて詳細な相互作用プロセスが解析できたものである。結果として2体相互作用ではほとんどの場合は一つの時間周期進行解に収束することがわかった。このことは時間周期進行解が実験的によく観測されることと整合的である。

この結果を踏まえて、流れの大域構造形成過程を調べた。図2の分岐構造からも分かるように、この系ではバックグラウンド(熱伝導状態)が不安定であっても安定空間局在解が存在することが知られている。空間局在解では構造がない空間は不安定な熱伝導状態に近いと思われるので、このような状態が安定に存在することは一見奇妙である。我々は周期境界条件の下で領域を大きくした場合の時間周期進行解の挙動を調べた。その結果この解は領域を大きくすると消失することを示唆する結果を得た。より詳細な解析によれば、大領域でも解の消失はサドル・ノード型分岐によるが、臨界点が計算領域に依存し、計算領域が大きいと臨界レイリー数が小さくなることが示唆されている。以上を踏まえて構造形成のダイナミクスを解析するために、非常に大きい計算領域(対流セルスケールの 500 倍)において一般の初期値から非常に長い時間発展計算を行った。すると、空間局在した時間周期進行解に近い状態が多数存在する状態を経て、最終的には同方向に進む複数の時間周期進行解になることがわかった(図3)。この結果は構造間相互作用後に時間周期進行解が選択される傾向が非常に強いことと整合的である。

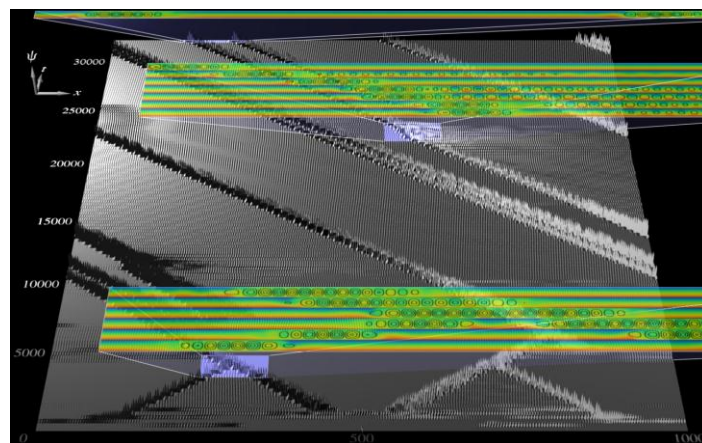


図3 2種混合流体におけるベナール対流における流れの大域構造形成過程

また、それぞれの解の安定性を調べることによって、図2の大域分岐図における解同士のネットワーク構造が明らかになった(図4)。

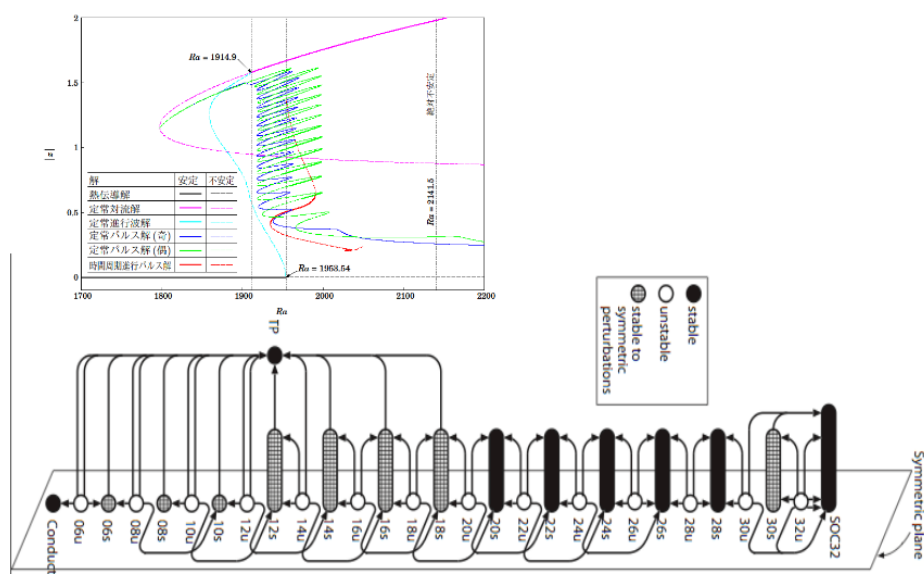


図4 解同士のネットワーク構造

・ミドリムシ生物対流のパターン形成問題

ミドリムシが多数含まれる懸濁液は、下部から当てられた光により巨視的なパターンを形成することが知られている(図5)。周期境界を模擬した2重円筒容器における実験により、2種混合流体のベナール対流で見られた局在化した時間周期進行解と同様の構造が現れることが明らかになった(図6)。

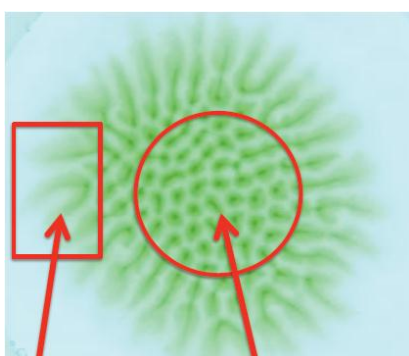


図5 ミドリムシの生物対流

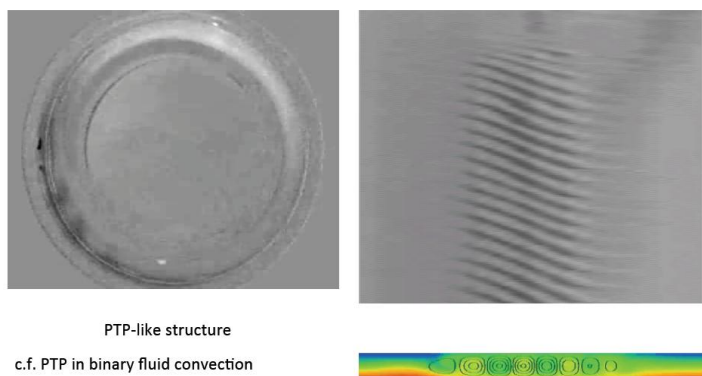


図6 生物対流における時間周期進行波

光強度に応じた走光性の強さを表す関数を導入し、懸濁液が十分希薄であるとの仮定に基づく近似を施すことによって次のモデル方程式を導出した。

$$\begin{aligned}
 S_c \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) &= -\nabla p - \beta n \mathbf{e}_z + \nabla^2 \mathbf{u}, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \\
 \frac{\partial n}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) n &= -\kappa^2 C_1 \frac{\partial}{\partial x} \left\{ N g(n) \frac{\partial N}{\partial x} \right\} - T \frac{\partial n}{\partial z} + \nabla^2 n, \\
 N(x, y, z) &= \int_{-1}^z n(x, y, z') dz', \\
 J_z(\pm 1) &= \frac{\partial n}{\partial z} - T n = 0, \\
 g(n) &= n \left(-\tanh\left(\frac{n - n_c}{n_d}\right) \right).
 \end{aligned}$$

計算領域を $[0, 2\Gamma] \times [-1, 1]$ として上記のモデル方程式を数値計算した結果を図7と図8に示す。

図7は $\Gamma=2$ のときの結果であり図8は $\Gamma=8$ のときの結果である。横軸は数密度であり、縦軸は対流セルの強さを表すパラメータで、この図は対流セル発生時の分岐構造を表している。この結果によると、アスペクト比が小さい $\Gamma=2$ の場合は超臨界分岐であり、アスペクト比が大きい $\Gamma=8$ の場合は亜臨界分岐で双安定領域をもつことが示唆される。特に $\Gamma=8$ のときには実験で観測された局在構造が再現されている。

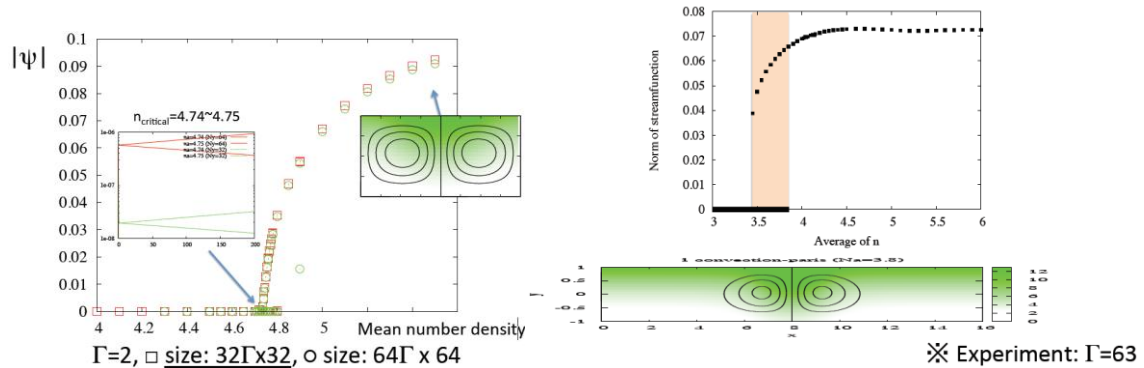


図7 $\Gamma=2$ のときの計算結果(定常解)

図8 $\Gamma=8$ のときの計算結果(局所化された対流セル)

・共変リアプノフ解析を応用した軌道解析アルゴリズムの構築

Gray-Scott モデルにおける自己複製パターン(図9)に対して有限時間共変リアプノフ指数を計算した(図10)。その結果、複素固有値を持つような場合では有限時間リアプノフ指数は振動すること、複素固有値に対応する方向では定常解の近傍にある軌道は楕円状に回転しながら定常解に近づくかあるいは離れていくこと、またそのため有限時間リアプノフ指数は周期に比べて十分大きい時間間隔に対しては複素固有値の絶対値に一致するが小さい場合には振動することが明らかになった。

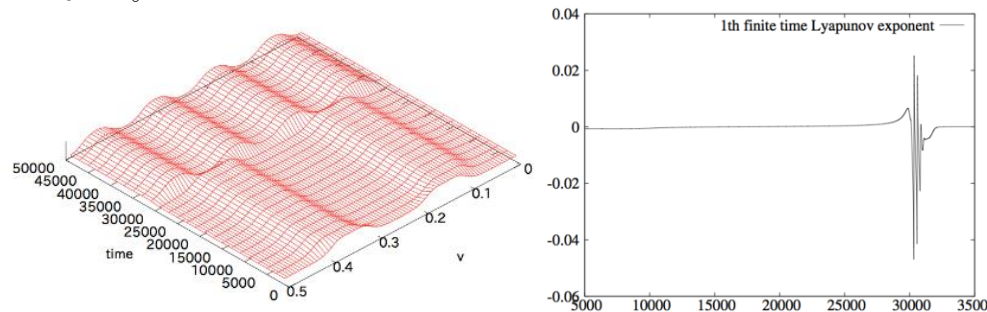


図9 Gray-Scott モデルにおける自己複製パターン

図10 有限時間共変リアプノフ指数

●トップダウン・アプローチ

トップダウン・アプローチでは、回転流体の実験において流れの大域構造の遷移過程の実験的抽出と UVP データからの associated flow の構築を行い、円盤端部ノイズと遷移確率の関係を調べた。また複雑実験データからのモデル構築アルゴリズムとして、決定論性の検出と時空間データのみからの CA 構築アルゴリズムを開発した。

・混相流における流れの大域構造

混相流における流れの大域構造の実験的解析として円柱容器内の回転流れにおける自由表面変形の動力学的解析を行った。この系は自由表面の形状は流れの大域構造と密接に関係している。この系において surface switching と呼ばれる現象が知られている。この現象では軸対称な流れ構造と $n=2$ の対称性を持つ流れ構造の間を不規則に遷移し、水面の大きな鉛直変動を伴うが詳細はまだ解明されていない。その遷移プロセスを流体力学的観点から解析するとともに、数理的観点からの記述を試みることで流れの大域構造の解明手法を確立することを目指した。本研究によって得られた大域分岐図を図11に示す。

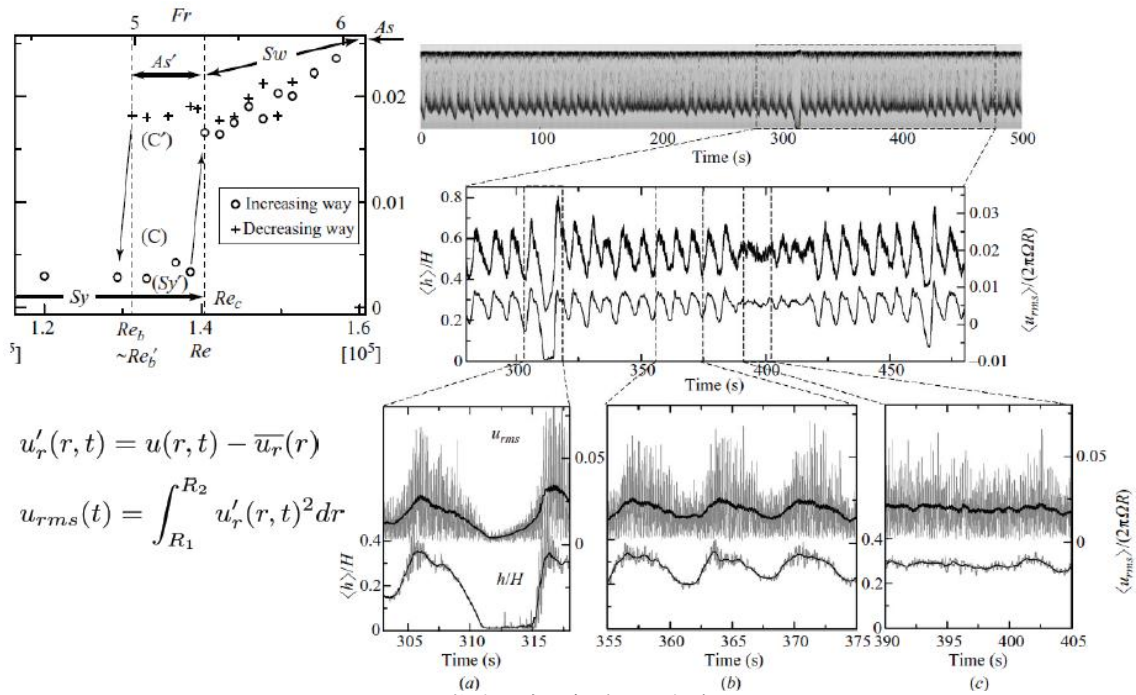


図11 円柱容器内回転流れの大域分岐図

実験的アプローチからは、超音波速度分布計を用いて流れの分布と自由表面の形状を同時に計測するとともに、得られたデータから流れの2次元構造を再構成する技術を開発した(図12)。

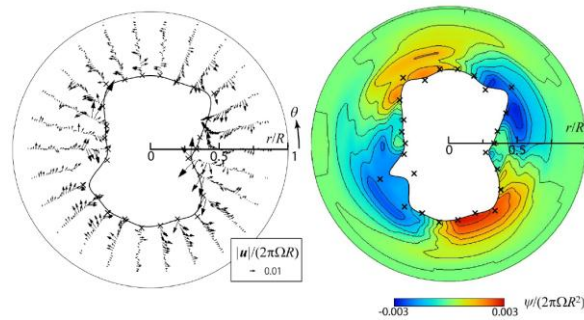


図12 円柱容器内の回転流体の水平断面における流れ場の再構成例

この現象では、乱流状態では流れの軸対称性が大域的に破れ、 $n=2$ の対称性を持つ構造が一定速度で回転するように見えるが、周囲の流れを再構成した結果、この構造は単に剛体回転しているわけではなく、周方向の流れを伴う四重極流れにより維持されていることがわかった(図12右)。

数理構造の観点からは、水面の鉛直変動データを解析した。変動データからこの現象には複数の時間スケールがあり、流れが乱流状態を含むので系本来の自由度は非常に大きい。一方、遷移プロセスはある程度物理的な因果関係で説明可能なようである。このためこの系の実質的な自由度についての指標が必要である。そこで Wayland の方法を用いて系の自由度を推定した。その結果、この系は少数自由度では記述できないが完全な確率過程ではないことがわかった。この結果はこの系を少数自由度の力学系と確率過程を取り入れたメゾの視点から記述することの妥当性を示唆している。

・時空間データのみからの CA 構築アルゴリズム

セル・オートマトン(CA)はシンプルな規則から多様な複雑現象を記述できる数理モデルである。

本研究では、これまでの現象研究の結果としての CA モデルではなく、現象理解のための CA モデル構成法を与えることを試みる。具体的には「観測データ」から局所的情報を抜き出して CA を構成する。CA モデル構成の手順としては次のものを考える。

- ①データの離散化(時間、空間、各セルの状態)
- ②データのノイズ除去
- ③CA 規則の近傍範囲の決定
- ④データを再現する CA の特定(必要に応じて確率 CA の導入)
- ⑤CA の簡約化

※最後に構成された CA の妥当性の検証を行う。

拡散方程式と Burgers 方程式に適用した例を図13と図14に示す。

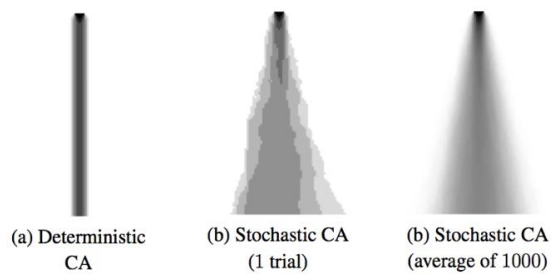


図13 CA による拡散方程式の計算

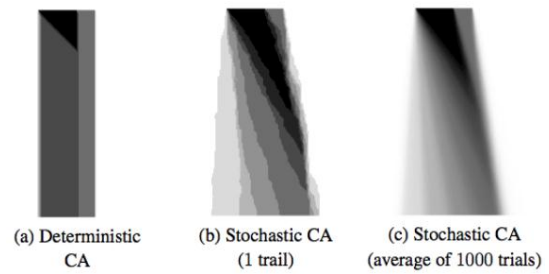


図14 CA による Burgers 方程式の計算

§ 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 6件、国際(欧文)誌 51件)

1. 吉村浩明, “力学の幾何学的理論と方法 – マルチボディダイナミクスが提起した問題 –”, シミュレーション学会誌, 第29巻第2号 (2010), pp.1-12.
2. 吉村浩明, マルチボディダイナミクスのモデリングと定式化 — 陰的なラグランジュ形式へ向けて, 日本シミュレーション学会誌, pp.5-12, 第 29 巻第 2 号 (2010).
3. Hiroaki Yoshimura and Azumi Yoshida, Discrete Constrained Lagrangian Systems and Geometric Constraint Stabilization, Proceedings of the 8th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, pp.1292-1295, 2010.
4. Henry Jacobs, Hiroaki Yoshimura and Jerrold E. Marsden, Interconnection of Lagrange-Dirac Dynamical Systems, Proceedings of the 8th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, pp.566-569, 2010.
5. Joris Vankerschaver, Hiroaki Yoshimura, Melvin Leok, Jerrold E. Marsden, Stokes-Dirac Structures through Reduction of Infinite-Dimensional Dirac Structures, Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control, pages 1-6, 2010.
6. F. Matsumoto and H. Yoshimura, Dynamics and Trajectory Planning of a Space Robot with Control of the Base Attitude, Proceeding of Symposium on Dynamics Modeling and Interaction Control in Virtual and Real Environments, IUTAM, pp. 1-8, June 7-11, Budapest, 2010.
7. Hiroaki Yoshimura, Henry Jacobs and Jerrold E. Marsden, Interconnection of Dirac Structures and Lagrange-Dirac Dynamical Systems, Proc. 19th Int. Symp. on Mathematical Theory of Networks and Systems, MTNS 2010 • 5–9 July, 2010 • Budapest, Hungary, pp. 247-252.
8. Takashi Noguchi and Hiroaki Yoshimura, A Graph-Theoretic Approach to Large Scale, Proc. 5th Asian Conference on Multibody Dynamics, pp.1-8, 2010.
9. Yukio Takemoto, Keiji Kawanishi, Jiro Mizushima, “Heat transfer in the flow through a bundle of tubes and transition of the flow”, International Journal of Heat and Mass Transfer (Elsevier) vol. 53, pp. 5411-5419 (2010) (DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.015).
10. Yukio Takemoto, Jiro Mizushima, “Mechanism of sustained oscillations in a fluid flowing past a circular cylinder obstacle”, Physical Review E (American Physical Society) vol. 82, pp. 056316-1-6 (2010) (DOI: 10.1103/PhysRevE.82.056316).
11. Takagi, S. and Konishi, Y., “Suppression of Trailing-Edge Noise Emitted by Two-Dimensional Airfoils”, Transactions of Japan Society of Aeronautical and Space Sciences, Vol.53, No.179 (2010)
12. Takagi, S. and Konishi, Y., “On the Frequency Selection Mechanism of Airfoil Trailing-Edge Noise”, J. of Aircraft, Vol 47, No. 4 (2010) pp.1111-1116.
13. Takagi, S. and Konishi, Y., “Suppression of Trailing-Edge Noise Emitted by Two-Dimensional Airfoils”, Transactions of Japan Society of Aeronautical and Space Sciences, Vol.53, No.179 (2010) pp.19-23.
14. Shibata, Y. and Shimizu, S., “Report on a local in time solvability of free surface problems for the Navier-Stokes equations with surface tension”, Applicable Analysis, Vol.90 (2011), pp.373-419.
15. Akihiro Wada, Keizo Ishikawa, Jiro Mizushima and Takeshi Akinaga, “Deflection of jets discharged into a reservoir with a free surface”, Fluid Dynamics Research (IOP Publishing) vol. 43, pp. 025503-1-17 (2011) (DOI: 10.1088/0169-5983/43/2/025503).
16. Shibata, Yoshihiro; Shimizu, Senjo, “Maximal L-regularity for the two-phase Stokes equations; model problems”, J. Differential Equations 251 (2011), no. 2, 373-419 (DOI:10.1016/j.jde.2011.04.005).

17. Shibata, Yoshihiro; Shimizu, Senjo, "Report on a local in time solvability of free surface problems for the NavierStokes equations with surface tension", Appl. Anal. 90 (2011), no. 1, 201–214 (DOI:10.1080/00036811003735899).
18. 山本勝弘、吉田崇、飯田浩貴、吉田篤史、"キャビテーションジェットによるアルミニウム材料の壊食特性と気泡雲の崩壊現象について"、日本機械学会論文集(B1)、Vol.77, No.784(2011.12 混相流特集号), pp.2295-2305 (doi:10.1299/kikaib.77.2295).
19. Joris Vankerschaver, Hiroaki Yoshimura and Melvin Leok, "On the Geometry of Multi-Dirac Structures and Gerstenhaber Algebras", Journal of Geometry and Physics 61(2011), pp. 1415-1425, 2011 (doi:10.1016/j.geomphys.2011.03.005).
20. Shohei Shikada and Hiroaki Yoshimura, "Nonlinear Phenomena in Rayleigh-Plesset Equation for Single Bubble Dynamics", NEW TRENDS IN FLUID MECHANICS RESEARCH, Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Mechanics American Institute of Physics Conf. Proc. Vol.1376, pp.552-554, 2011 (DOI: 10.1063/1.3651974).
21. Francois Gay-Balmaz and Hiroaki Yoshimura, "Hamilton-Pontryagin Principle for Incompressible Ideal Fluids", NEW TRENDS IN FLUID MECHANICS RESEARCH, Proceeding of the Sixth International Conference on Fluid Mechanics, Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Mechanics American Institute of Physics Conf. Proc. Vol.1376, pp.552-554, 2011 (DOI: 10.1063/1.3652002).
22. Henry Jacobs and Hiroaki Yoshimura, "Interconnection and Composition of Dirac Structures for Lagrange-Dirac Systems", Proc. 50th IEEE Conference on Decision and Control, pp.1--6, 2011 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3498539>).
23. Asai, M., Inasawa, A., Konishi, Y., Hoshino, S., and Takagi, S., "Experimental investigation of the instability of wakes of axisymmetric streamline body", Journal of Fluid Mechanics, 675(2011), pp. 574-595 (DOI:10.1017/jfm.2011.37).
24. T. Ikeda, T. Atobe and S. Takagi, "Direct simulations of trailing-edge noise generation from two-dimensional airfoils at low-Reynolds numbers", Journal of Sound and Vibration, 331 (2011) pp. 556–574 (DOI:10.1016/J.jsv.2011.09.19).
25. A. Wada, K. Ishikawa, J. Mizushima and T. Akinaga, "Deflection of jets discharged into a reservoir with a free surface", 2011, Fluid Dynamics Research (IOP Science [England]) , vol. 43, no. 2, pp. 025503-1-17 (DOI:10.1088/0169-5983/43/2/025503).
26. M. Iima, Y. Iijima, Y. Sato and Y. Tasaka, "A time-series analysis of the free-surface motion of rotational flow", Appl. Mech. 59 (2011), pp.187-193.
27. T. Watanabe, K. Toyabe, M. Iima and Y. Nishiura, "Time-periodic traveling solutions of localized convection cells in binary fluid mixture", Theor. Appl. Mech. 59 (2011), pp.211-219.
28. M. Iima, Y. Tasaka and T. Watanabe, "Analysis of Global Flow Structure", GAKUTO International Series, Mathematical Sciences and Applications, vol.34 (2011) pp.25—38,
29. 堀雄貴, 内田優悟, 中井秀聡, 山本勝弘, "水平管路内の水柱分離・再結合時に生じるスパイク状圧力について", ターボ機械, (掲載予定、2012.10).
30. M. Iima and T. Nakagaki, "Peristaltic transport and mixing of cytosol through the whole body of Physarum plasmodium", Mathematical Medicine and Biology, Vol.29 (2012) 263-281.
31. Takeshi Watanabe, Makoto Iima and Yasumasa Nishiura, "Spontaneous formation of travelling localized structures and their asymptotic behaviour in binary fluid convection", Journal of Fluid Mechanics Vol. 712 (2012) pp 219-243.
32. Matthias Hieber, Yuka Naito and Yoshihiro Shibata, "On the Non-newtonian fluid in an exterior domain in three dimensions", J. Differential Equations 252 巻 3 号 (2012) 2617-2629.

33. Yoshihiro Shibata and Senjo Shimizu, "On the maximal $L_p - L_q$ regularity of the Stokes problem with first order boundary condition; model problems", J. Math. Soc. Japan, 64 巻 2 号 (2012) 561—626
34. Yuko Enomoto and Yoshihiro Shibata, "On some decay properties of Stokes semigroup of compressible viscous fluid flow in a 2-dimensional exterior domain", J. Differential Equations, 252 巻 (2012) 12 号, 6214—6249
35. Yuko Enomoto and Yoshihiro Shibata, "About compressible viscous fluid flow in a 2-dimensional exterior domain", Spectral theory, mathematical system theory, evolution equations, differential and difference equations, 305-321, Oper. Theory Adv. Appl., 221 巻 Birkhauser/Springer Basel Ag, Basel, 2012
36. Yoshihiro Shibata, "On a generalized resolvent estimates of the Stokes equations with first order boundary condition in a general domain", J. MathFluid Mech. 15 (2013) 1-40.
37. 堀雄貴, 内田優悟, 中井秀聡, 山本勝弘, "水平管路内の水柱分離・再結合時に生じるスパイク状圧力について", ターボ機械, Vol.40, No.10(2012),pp.620-629
38. Joris Vankerschaver, Hiroaki Yoshimura and Melvin Leok, The Hamilton-Pontryagin Principle and Multi-Dirac Structures for Classical Field Theories, Journal of Mathematical Physics, 53, 072903, 2012.
39. Itoh, N., Takagi, S. and Ikeda T., "Instability and frequency selection of the wake behind a flat plate", Transactions of the Japan Society for Aeronautics and Space Science, Vol.55, No.6(2012)356-363.
40. Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Dirac Reduction of binary asteroid systems with symmetry and stability of relative equilibria, Theoretical & Applied Mechanics Letters, 3, 130111-130118, 2013.
41. 高木正平、山谷直広、伊藤信毅: 人工音響ループによる二次元噴流不安定波周波数の制御, 日本航空宇宙学会論文集, 61 (2013) 57-63.
42. Yoshihiro Shibata, "Generalized Resolvent estimates of the Stokes Equations with first Order Boundary Condition in a General domain", J. Math. Fluid Mech. 15 (2013), 1-40.
43. Yuko Enomoto and Yoshihiro Shibata, "On the R-sectoriality and the initial boundary value problem for the viscous compressible fluid flow", Funkcialaj Ekvacioj 56 (2013), 441-505.
44. Hiroaki Yoshimura, A graph-theoretic approach to sparse matrix inversion for implicit differential algebraic equations, Mech. Sci., 4, 243—250, 2013.
45. Yuko Enomoto, Lorenz von Below and Yoshihiro Shibata, "On some free boundary problem for a compressible barotropic viscous fluid flow.", Annali dell'Universita di Ferrara, 60 (2014) 55-89.
46. Yoshihiro Shibata, "On the R-boundedness of solution operators for the Stokes equations with free boundary condition", Differential and Integral Equations 27 (2014), 201-399.
47. Takagi, S., Yamaya, N. and N. Itoh: Frequency control of unstable disturbances in two-dimensional jet by artificial acoustic loop, Transactions of Japan Society of Aeronautical and Space Sciences. Vol.57, No.4, 2014.
48. Erika Shoji, Hiraku Nishimori, Akinori Awazu, Shunsuke Izumi, Makoto Iima, "Localized Bioconvection Patterns and Their Initial State Dependency in Euglena gracilis Suspensions in an Annular Container", J. Phys. Soc. Jpn., Vol.83, 043001, 2014.
49. Henry Jacobs and Hiroaki Yoshimura, Tensor Products of Dirac Structures and Interconnection in Lagrangian Mechanics, Journal of Geometric Mechanics 6 (2014), 67-98.
50. Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Invariant Manifolds and Lagrangian Coherent Structures in the Planar Circular Restricted Three-Body Problem,

Proceeding of NCTAM, Vol. No. Page -- Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 62, pp.119-128, 2014.

51. T. Funaki, M. Ohnawa, Y. Suzuki, S. Yokoyama, "Existence and Uniqueness of solutions to Stochastic Rayleigh-Plesset equation", J. Math. Anal. Appl., 425 (2015), 20-32.

[proceedings]

52. Takashi YOSHIDA, Hirotaka IIDA, Atsushi YOSHIDA and Katsuhiro YAMAMOTO, "High speed observation of unsteady behavior of bubble clouds split from cavitating jet", Proc.of Water jetting, BHR Group (September,19-21, 2012, Ottawa,Canada) p.307-317
53. Hiroaki Yoshimura and Henry Jacobs, Tensor Products of Dirac Structures and Interconnection of Implicit Lagrangian Systems, Proc. of 20th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems 2012, University of Melbourne.
54. Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Dirac Reduction of Binary Asteroid Systems with Symmetry and Stability of Relative Equilibria, The 6th Asian Conference on Multibody Dynamics, Vol.6, No.12300, pp.1-8, 2012.
55. Akane Kawaharada and Makoto Iima, "Constructing cellular automaton models from observation data", Proceedings of First International Symposium on Computing and Networking 2013, 559-562, 2013.
56. Hiroaki Yoshimura (joint work with Fernando Jimenez), Dirac Structures in Vakonomic Mechanics, IRES Meeting on Differential Geometry and Mechanics, Ghent University, January 16, 2013.
57. Hiroaki Yoshimura and Francois Gay-Balmaz, The Hamilton-Pontryagin Principle and Lie-Dirac Reduction with Advective Parameters, SIAM Conference on Dynamical Systems. Snowbird, May 18-24,2013.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 武本幸生・水島二郎, "柱状物体を過ぎる流れ場中の波動の伝播と振動の発生源", 数理解析研究所講究録(数理解析研究所) no.1701, pp.1-15 (2010).
2. 田坂裕司, 飯間 信, 佐藤譲, 「回転流体自由界面の不規則スイッチングにおける底面・側壁ギャップの影響」, 日本流体力学会年会 2010 拡張要旨集 (2010)
3. 渡辺毅, 鳥谷部和孝, 飯間 信, 西浦廉政, 「二成分混合流体対流における漸近挙動:局在構造の自発的発現と集団運動」, 日本流体力学会年会 2010 拡張要旨集(2010)
4. 飯間 信, 飯島悠宇, 佐藤譲, 田坂裕司, 「回転流体における自由表面の遷移動力学の解析」, 第 59 回理論応用力学講演会講演論文集(2010)143-144
5. 佐藤譲, 飯間 信, 田坂裕司, 「回転流体系実験時系列からのランダム力学系の抽出」, 第 59 回理論応用力学講演会講演論文集 (2010)169-170
6. 渡辺毅, 鳥谷部和孝, 飯間 信, 西浦廉政, 「二成分混合流体対流に表れる様々な流れとその性質」, 第 59 回理論応用力学講演会講演論文集 (2010)167-168
7. 吉村浩明, ハミルトン・ポントリヤーギン原理とリー・ディラック簡約 — 非圧縮性理想流体への応用, 京都大学数理解析研究所講究録 1692, pp.145-164, 2010-06.
8. 鹿田翔平, 吉村浩明, レイリー・プリセット方程式に見られる単一気泡の非線形現象, 第 60 回理論応用力学講演会, OS12-11, pp.1-3, 2011.
9. 吉村浩明, 鹿田翔平, 仲原慎一郎, レイリー・プリセット方程式による単一気泡の非線形挙動と分岐, 日本機械学会第 3 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, pp.119-120, 2011.
10. 鷲頭亮介, 吉村浩明, 分子動力学法による単一気泡の生成と崩壊挙動の解析, 日本機械学会第 3 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, pp.47-48, 2011.
11. 武本幸生・赤嶺博史・水島二郎, "カルマン渦列の振動源とその生成・消滅・再配列", 2011,

数理解析研究所講究録 (数理解析研究所), no. 1761, pp. 151-162 .

12. 渡辺毅、飯間 信、西浦廉政, “二成分混合流体対流に現れる空間局在解の安定性”, 日本流体力学会 2011 拡張要旨集 (2011)
13. 吉村浩明, ディラック構造のテンソル積と力学への応用, 京都大学数理解析研究所講究録「幾何学的力学系の新展開, Vol.1774, pp.21-34, 2012-01.
14. 中筋真生, 飯間 信, “中レイノルズ数領域における振動物体間同期の数値解析” 第 61 回理論応用力学講演会講演論文集 (2012)
15. 川原田 茜、飯間 信、田坂裕司「自由表面をもつ回転流れのマルコフ連鎖による解析」、2013 年度応用数学合同研究集会報告集、132-135、2013 年 12 月.
16. 庄司江梨花, 泉俊輔, 西森拓, 栗津暁紀, 飯間信, ミドリムシ生物対流の局在構造と走光性, 日本流体力学会年会 2013 講演論文集.
17. 川原田 茜、飯間 信、田坂 裕司、「自由表面をもつ回転流れのマルコフ連鎖による解析」、2013 年度応用数学合同研究集会予稿(龍谷大学).
18. 大山達之, 飯間信, 空気中を自由落下する円錐形物体の非定常運動の解析, 日本機械学会 2013 年度年次大会, No.13-1, 講演番号 No.J027035.
19. 及川 一誠、大縄 将司、鈴木 幸人、川原田 茜、庄司 江梨花、飯間 信、「多重スケール現象の数理解析」、第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿アブストラクト集、23-28、2014 年 1 月.
20. 川原田 茜、「逆超離散化によるセル・オートマトンからの偏微分方程式の構成」、第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿アブストラクト集、47、2014 年 1 月.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 15 件、国際会議 13 件)

1. Takaaki Nishida and Yoshiaki Teramoto, " Pattern formations of Bénard-Maragoni heat convection problems ", Conference on Fluid dynamics, Analysis, and Numerics, In honor of J. Thomas Beale, 2010 June 28-30, Duke University, North Carolina, USA.
2. Takaaki Nishida, Mariarosaria Padula and Yoshiaki Teramoto, " Heat convection problems of compressible fluids ", International Conference on Nonlinear Partial Differential Equations: Mathematical Theory, Computation, and Applications, In honor of 65th birthday of Tai-Ping Liu, 2010 Nov. 29 - Dec. 3, National University of Singapore, Singapore.
3. Masahito Asai, “Effects of roughness on the stability of wall-bounded shear flows.”, Plenary lecture (I. Tani Memorial), 13th Asian Congress of Fluid mechanics, Dhaka, 17-22 Dec. 2010.
4. 飯間 信, “Dynamics and Pattern formation in Binary Fluid Convection (2 種混合流体の熱対流におけるパターン形成と動力学)”, 明治大学 GCOE MAS セミナー, 東京 (2011,2/16)
5. 飯間 信, “流れの大域構造の解析”「柴田クレストー坂上クレスト合同セミナー」, 東京 (2011,3/2—3/2)
6. 飯間 信, “流れの大域構造の時系列解析”, 研究会「非線形現象の解析・モデル化・制御」, 鹿児島(2011,3/4—3/6)
7. 吉村浩明, 非線形システムのモデリング- 内部接続とディラック構造 -, 慶応義塾大学足立研セミナー, 2011 年 6 月 3 日.
8. 飯間信, “流れの大域構造の数理解析”, NLPM コロキウム. 東広島 (2011,6/23)
9. M. Iima, “Strong interaction of localized convection cells and pattern formation in binary fluid mixture”, Localized Multi-Dimensional Patterns in Dissipative Systems, Banff, Canada (2011,7/24-7/29)

10. T. Watanabe, M. Iima and Y. Nishiura, "Collision dynamics of localized convective patterns in binary fluids", The 7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Vancouver, Canada (2011,7/18-7/22)
11. A. Tezuka, "Stability of periodic oscillation around the trailing edge of NACA0012 airfoil", 6th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference, AIAA Paper AIAA-2011-3295
12. Takashi YOSHIDA, Hirotaka IIDA, Atsushi YOSHIDA and Katsuhiro YAMAMOTO, "High speed observation of unsteady behavior of bubble clouds split from cavitating jet", Proc.of Water jetting, BHRG Ottawa, Canada(9/19-21, 2012)
13. 吉村浩明, 陰的なラグランジュ系による拘束力学系の定式化と DAE の数値解析, 計測自動制御学会, 2012 年度 第2回プラントモデリング部会研究会, 2012 年 12 月 3 日.
14. Hiroaki Yoshimura, Dirac Structures in Vakonomic Mechanics, IRES Meeting on Differential Geometry and Mechanics, Ghent University, January 16, 2013.
15. 飯間 信, 「対流における局在構造形成機構の普遍性」, 京都大学理学部談話会, 京都, 2013/12/12-2013/12/12, 12/12 発表.
16. 飯間 信, 「可視化情報と流体力学的力」, 可視化情報シンポジウム 2013, 東京, 2013/7/16-2013/7/17, 6/17 発表.
17. M. Iima, "Dynamics of localized structures in convections", Joint US-Japan Conference for Young Researchers on Interactions among Localized Patterns in Dissipative Systems, Minneapolis, 2013/6/3-2013/6/7, 米国, 6/3 発表.
18. Akane Kawaharada, "Cellular automata and continuous systems", Measurable and Topological Dynamical Systems — Keio 2013, 2013 年 12 月(慶応義塾大学).
19. 高木正平: 二次元物体後流渦の周波数決定機構に絡む2, 3の話題, 平成25年度航空宇宙空力シンポジウム, (登別, 1/24-25, 2014).
20. 川原田 茜, 「実データに基づくセル・オートマトンモデルの構成」, ミニワークショップ「機械学習×力学系」, 2014 年 2 月(東京大学).
21. Y. Shibata, "On some evolution problem for two phase viscous flows: compressible and incompressible case", International Conference on Mathematical Hydrodynamics and Parabolic Equation, 9 月 11 日-14 日、Steklov Institute of Mathematics, St. Petersburg, Russia
22. Y. Shibata, "R-bounded solution operator and some free boundary problem for the compressible viscous fluid flow", Yonsei University 特別講義、10 月 11 日-14 日, ソウル、韓国.
23. Y. Shibata, "R-bounded solution operator and its application in the mathematical study of compressible viscous fluid flow", 第31回九州における偏微分方程式研究集会、2014 年 1 月 27 日-1 月 29 日、福岡大学メディカルホール.
24. Y. Shibata, "R-bounded solution operator and its application in the mathematical study of compressible viscous fluid flow", Recent Advances in PDEs and Applications, Levico Terme (Trento), Italy, 2014 年 2 月 17 日-21 日.
25. Y. Shibata, "R-boundedness of solution operators to linearized problem of two phase problems and its application to local and global in time solvability of the original nonlinear problem", International Workshop entitled: Maxwell-Stephan meets Navier-Stokes – Modeling and Analysis of Reactive Multi-Component Flows, Halle(Saale) Univ. Germany, 2014 年 3 月 31 日-4 月 2 日.
26. Y. Shibata, On a global well-posedness of strong dynamics of Incompressible Nematic Liquid Crystals in RN, Autumn School and Workshop on Mathematical Fluid Dynamics, Bad Boll, Germany, 2014 年 10 月 27--30 日.
27. Hiroaki Yoshimura, Discrete Lagrangian Systems and Variational Integrators for Interconnected Systems, Geometry and Physics XII -- Geometric Mechanics, Sanya in China, March 12, 2014.
28. Hiroaki Yoshimura, Dirac dynamical systems with symmetry and applications to

nonholonomic systems, 10th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications, Madrid, Spain, July 7-11, 2014.

② 口頭発表 (国内会議 73 件、国際会議 33 件)

1. 高木正平(室蘭工業大学), “二次元物体後流の安定性と空力音”, 平成21年度第1回流体工学研究会・懇話会(2009.11.27, 北海道大学).
2. 吉村 浩明(早稲田大学), “リー・ディラック簡約とその応用”, 京都大学数理解析研究所研究集会「幾何学的力学系理論とその周辺」(2009.12.22, 京都大学).
3. Yoshimura, H. (Waseda Univ.), “Dirac Structures and the Hamilton-Pontryagin Principle on Lie Groups”, Workshop on Integrable Systems and Symmetries, University of Manchester, January 10, 2010.
4. Yoshimura, H. (Waseda Univ.), “Hamilton-Pontryagin Principles and Multi-Dirac Structures for Field Theories”, Workshop on Geometry, Mechanics and Control, Ghent University, January 11, 2010.
5. 手塚亜聖(早稲田大学), “NACA0012 翼型の後縁でみられる絶対不安定モードに対する考察”, 平成 21 年度航空宇宙空力班シンポジウム(2010.1.22, 和歌山).
6. 下村啓介, 北嶋大遵, 岡秀典, 山本勝弘(早稲田大学), “CIP 法による高速水中水噴流の3次元数値解析”, 2009 年度日本ウオータージェット学会技術年次報告会(2010.1.30, 八戸), p.43-47.
7. Yoshimura, H. (Waseda Univ.), “Dirac Structures, the Hamilton-Pontryagin Principle on Lie groups and Applications to Incompressible Ideal Fluids”, International Workshop on Mathematical Fluid Dynamics, March 12, 2010.
8. 吉村浩明(早稲田大学), “幾何学的な力学理論とその応用”, 日本機械学会第15回マルチボディダイナミクス研究会(2010.3.15, 上智大学).
9. 吉村浩明(早稲田大学), “変分原理, 対称性を持つラグランジュ・ディラック系, 及び非圧縮性理想流体への応用”, 2009 年度 日本機械学会 機械工学における力学系理論の応用に関する研究会(2010.3.29, 慶応義塾大学).
10. 下村啓介, 北嶋大遵, 岡秀典, 山本勝弘, “CIP 法による高速水中水噴流の3次元数値解析”, 2009 年度日本ウオータージェット学会 技術年次報告会(2010.1.30, 八戸), p.43-47
11. 吉村浩明, 力学系のネットワーク構造の理解へ向けて — ディラック幾何, 内部接続系および変分構造について (Dirac Structures, Lagrange-Dirac Systems and Variational Structures : Interconnection Networks of Dynamical Systems), 京都力学系セミナー, 2010 年 6 月 25 日.
12. 和田章弘, 石川敬三, 水島二郎, “自由表面を有する水槽に流入する噴流の偏向”, 第 59 回理論応用力学講演会(日本学会会議), Tokyo, Japan (2010.6.10)
13. 飯間 信, 飯島 悠宇, 佐藤 譲, 田坂 裕司, “回転流体における自由表面の遷移動力学の解析”, 第 59 回理論応用力学講演会, 東京 (2010-06)
14. 渡辺毅, 鳥谷部 和孝, 飯間 信, 西浦 廉政, “二成分混合流体対流に現れる様々な流れとその性質”, 第 59 回理論応用力学講演会, 東京 (2010-06)
15. Hiroaki Yoshimura, Henry Jacobs and Jerrold E. Marsden, Interconnection of Dirac Structures and Lagrange-Dirac Dynamical Systems, Ratiu Fest: Workshop on Geometry, Mechanics and Dynamics 2010, CIRM, Liminy, France, July 12-16, 2010.
16. 吉田篤史, 北嶋大遵, 下村啓介, 山本勝弘, “高速水中水噴流の流れ場の可視化と金属の壊食特性”, 第 38 回可視化情報シンポジウム講演論文集 Vol.30, Suppl.No.1(2010.7.20-21, 新宿), p.207-208.
17. 堀雄貴, 笹田祐貴, 亀山将広, 山本勝弘, “粘弾性管路における水柱分離を伴う水撃現象”, 日本機械学会 2010 年度年次大会 講演論文集 Vol.2(2010.9.5-8, 名古屋), p.307-308.
18. 浅井雅人, 鈴木広幸, 稲澤歩, “壁面せん断流の安定性に対する矩形状分布壁面粗さの影響”, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋, 2010 年 9 月.

19. 滋田雅洋, 浅井雅人, 稲澤歩, “微小振幅波状壁上に発達する境界層の安定性に関する研究”, 日本流体力学会年会 2010, 札幌, 2010 年 9 月.
20. 中野拓也, 稲澤歩, 浅井雅人, “種々のアスペクト比の角柱から放射される空力音に関する数値実験”, 日本流体力学会年会 2010, 札幌, 2010 年 9 月.
21. 田坂裕司, 飯間 信, 佐藤譲, “回転流体自由界面の不規則スイッチングにおける底面-側壁ギャップの影響”, 日本流体力学会年会 2010, 札幌 (2010-09)
22. 渡辺毅, 鳥谷部和孝, 飯間 信, 西浦廉政, “二成分混合流体対流における漸近挙動: 局在構造の自発的発現と集団運動”, 日本流体力学会年会 2010, 札幌 (2010-09)
23. 伊藤信毅, 高木正平, 池田 友明, “平板後流の不安定と振動数選択機構”, 日本流体力学会年会 2010, 札幌, 2010 年 9 月.
24. 浅井雅人, 稲澤歩, 小西康郁, 星野真一, “軸対称流線形物体後流の不安定性”, 第 47 回乱流遷移の解明と制御研究会, 東京, 2010 年 9 月.
25. 武本幸生, 水島二郎, “円柱後流における振動の発生機構”, 第 47 回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (電気通信大学), Chofu, Japan (2010.9.21)
26. 音羽祐介, 武本幸生, 水島二郎, “複数の急拡大部をもつ管路流れの不安定性と遷移”, 数理解析研究所研究会: 複雑流体の数理解析と数値解析 (数理解析研究所), Kyoto, Japan (2010.9.29)
27. Keizo Ishikawa, Akihiro Wada, Jiro Mizushima and Takeshi Akinaga, “Deflection of the flow discharged into water tank with a free surface.”, The third International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (3rd ICJWSF) (Cincinnati University), Cincinnati, Ohio, USA (2010.9.30)
28. 飯間 信, “円筒容器内の回転流れにおける自由表面の不規則スイッチング現象の動力学解析”, Kagoshima Workshop on Nonlinear & Nonequilibrium Dynamics, 鹿児島 (2010-10)
29. Takashi Sakai and Shohei Takagi, “On the Strouhal number behind a series of symmetrical airfoils at low Reynolds number.”, The Thailand-Japan International Symposium in Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Robotics 2010, Chiang Mai, Thailand (11/22-23, 2010).
30. Takeshi WATANABE, Kazutaka TOYABE, Makoto IIMA, Yasumasa NISHIURA, “Time-periodic traveling solutions of localized convection cells and their collision in binary fluid mixture”, 63th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (APS meeting), Long Beach, USA (2010-11)
31. Yuji Tasaka and Makoto Iima, “Influence of the surface tension and the viscosity on irregular surface switching of rotating fluids”, 63th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (APS meeting), Long Beach, USA (2010-11)
32. Yoshimura, H., Hamilton-Pontryagin Principles, Dirac Structures and Incompressible Ideal Fluids, Invited Talk at Special Workshop on Fluids, Dec.9, 2010, University of Tokyo.
33. 飯島 悠宇, 田坂 裕司, 佐藤 譲, 飯間 信, “回転流体系における自由表面の不規則スイッチング現象の決定論性の推定”, 2010 年度応用数学合同研究集会、瀬田 (2010-12)
34. 渡辺毅, 中筋真生, 飯間 信, “物体後流に与えられた局在攪乱の成長ダイナミクス”, 2010 年度応用数学合同研究集会、瀬田 (2010-12)
35. 手塚亜聖, “低 Re 数における NACA0012 翼型後縁の振動モードに対する安定解析”, 日本航空宇宙学会第 48 回飛行機シンポジウム.
36. 手塚亜聖, “NACA0012 翼型の後縁でみられる振動現象に対する安定解析”, 日本航空宇宙学会第 42 回流体力学講演会.
37. 田坂裕司, 村井 祐一, 飯間 信, “自由界面の変形を伴う回転流れの超音波計測”, 日本機械学会第 88 期流体力学部門講演会
38. 吉田崇, 飯田浩貴, 吉田篤史, 山本勝弘, “キャビテーションジェット of 構造とアルミニウム材料の壊食特性”, 2010 年度日本ウオータージェット学会 技術年次報告会(2011.1.21, 名古屋)

39. Yoshimura, H., Interconnection of Dirac Structures and Lagrange-Dirac Systems, Iberoamerican Meeting on Geometry, Mechanics and Control in honor of Hernán Cendra at Centro Atómico Bariloche. January 13, 2011.
40. 吉村浩明, ディラック構造の結合とその応用, 日本機械学会, 力学系の応用研究集会, 2011 年 3 月 10 日. (口頭発表)
41. 加藤 大貴、高木正平、低レイノルズ数における角柱からの渦放出特性、日本航空宇宙学会第42期年会講演会、東京大学山上会館、2011 年 4 月 14-15 日.
42. T. Watanabe*, M. Iima and Y. Nishiura, “Bifurcation structure and spontaneous pattern formation in binary fluid convection”, The 7th East Asia SIAM Conference & RIMS Workshop on Methods in Industrial and Applied Mathematics, Kita-Kyushu, Japan (6/27-6/29)
43. Y. Suzuki, Y. Takemoto and J. Mizushima, “Exchange of two modes of instability leading to sustained oscillations in the flow past a cylindrical obstacle”, The 7th East Asia SIAM Conference and RIMS Workshop on Methods in Industrial and Applied Mathematics, EASIAM 2011, Kitakyushu, Japan, June 27-29, 2011.
44. Inasawa A., Asai M., Itoh K. and Kamijyo T.: Suppression control of trailing-edge noise using a plasma actuator, Proceedings of the 6th International Conference on Fluid Mechanics: Recent Progresses in Fluid Dynamics Research, Guangzhou, 30 June - 3 July 2011, AIP Conference Proceedings Vol.1376 (2011) 533-535.
45. 手塚亜聖, “低 Re 数における翼型後縁でみられる振動流に対する攪乱の安定解析”, 第 43 回流体力学講演会／航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2011(日本航空宇宙学会), 7 月 7 日(木)東京
46. Y. Tasaka, M Iima, “Global flow transition induced by local disturbances generated by rotor-cylinder gap in rotating flows with free surface”, 17th Intl Couette-Taylor Workshop (2011.7, Leeds, UK)
47. Hiroaki Yoshimura, Interconnection, Dirac Structures and Dirac Systems in Mechanics, Oberwolfach, August 14-20, 2011.
48. M. D. Mamun, M. Shigeta, M. Asai, A. Inasawa: Influences of surface roughness of boundary-layer instability and transition, 日本流体力学会年会 2011, CDROM, 2011 年 9 月, 東京.
49. 高木正平、山谷直広、伊藤信毅:「人工音響ループによる二次元噴流不安定波周波数の選択」、日本流体力学会年会 2011, (9/7-9/2011).
50. 渡辺毅、飯間 信、西浦廉政. “二成分混合流体対流に現れる空間局在解の安定性”, 日本流体力学会 2011 年会, 東京 (9/7-9/9)
51. 田中新一, 内藤 健, 本多 亮, 栗原 光瑛, 丸井 幹也, 衝撃波管を用いた乱流遷移現象の基礎研究. 日本流体力学会年会講演論文集, 2011 年 9 月
52. 高木正平、加藤大貴:「二次元翼後流における時間発展攪乱の観察と周波数選択機構」、第 49 回「乱流遷移の解明と制御」研究会,(9/22-9/23/2011).
53. T. Watanabe, M. Iima and Y. Nishiura, “Bifurcation structure and pattern formation in binary fluid convection”, Continuum Mechanics Focusing on Singularity, Hiroshima (10/8-10/10)
54. 手塚亜聖, “NACA0012 翼型後縁周辺の振動現象に対する攪乱の安定性に関する考察”, 第 49 回飛行機シンポジウム(日本航空宇宙学会), 10 月 28 日(金)金沢
55. 吉村浩明, ディラック構造の相互接続とその応用, 京都大学数理解析研究所研究集会「幾何学的力学系の新展開」, 2011 年 10 月 31 日. (口頭発表)
56. Y. Tasaka*, Y. Murai, H.-J. Park, Y. Tohge, “Improvement on efficiency of frictional drag reduction by repetitive bubble injection”, Bulletin of 64th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, Vol. 56, No. 18, p.267, (2011. 11, Baltimore, USA)
57. Y. Shibata, Maximal L_p - L_q regularity for the equation of compressible viscous fluid flow. 第 4 回日独共同大学院プログラム国際研究集会 2011 年 11 月 28 日~12 月 2 日、

早稲田大学

58. Ken Naitoh, Quasi-stability: revealing the super-magic numbers common to subatomic, biological, and cosmic systems. 京都大学基礎物理学研究所研究会「物理と情報の階層構造 ―情報を接点とした諸階層の制御と創発―、2012. 1」
59. Ken Naitoh, Hyper-gourd theory. Proc. of 17th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2012.1.
60. 飯田浩貴, 吉田崇, 吉田篤史, 山本勝弘, "高速度カメラによるキャビテーションジェットの非定常挙動の観察", 2011 年度日本ウオータージェット学会 技術年次報告会(2012.2.24,東京), p.1-8.
61. Y. Shibata, On the R-sectoriality for the Stokes operator and its application to the Navier-Stokes equations, Conference on Evolution Equations, Related Topics and Applications, March 20, 2012, Waseda University.
62. Hiroaki Yoshimura, Lie-Dirac Reduction and Applications to Mechanics, Seminar of Poisson Geometry, March 5, 2012, Keio University.
63. Mitsuaki KURIHARA, Shinichi TANAKA, Mikiya MARUI, Kouichi ISHIDA and Ken NAITOH, Transition from laminar flow to turbulence in a shock tube: Influences of up- and down- stream disturbances on the transition point. Proceedings of 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Inchon, Korea, March 19-21, 2012.
64. 柴田良弘, On the sectorial R-boundedness of the Stokes operator for the compressible viscous fluid flow, 日本数学会年会 2012 年 3 月 29 日 東京理科大学
65. 高木正平, 坂上昇史:「室蘭工大における遷移研究の2, 3の話題」、第 50 回「乱流遷移の解明と制御」研究会, (電気通信大、3/29-3/30/2012).
66. 榎本裕子・柴田良弘,"On the sectorial R-boundedness of the Stokes operator for the compressible viscous fluid flow", 日本数学会、関数方程式分科会一般講演, 3月29日
67. 吉田崇, 飯田浩貴, 吉田篤史, 山本勝弘, "キャビテーション気泡雲の崩壊挙動に関する数値解析", 第 16 回キャビテーションに関するシンポジウム(2012.11.23, 金沢),A1-3(USB メモリー).
68. 菅原拓也, 吉村浩明, レイリー・ベナール対流とラグランジュ・コヒーレント構造, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, 論文番号 S052014, pp.1-3, 2012.
69. 菅原拓也, 吉村浩明, レイリー・ベナール対流に現れるラグランジュ・コヒーレント構造とカオス, 日本流体力学会 2012 年度年次大会講演論文集, 論文番号 53, pp.1-3, 2012.
70. 長谷龍一, 田川悟, 吉村浩明, 陰的なラグランジュ系による柔軟多体系のダイナミクスの定式化, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2012 講演論文集, No.12-844, pp.1-8, 2012.
71. 小野崎香織, 吉村浩明, 剛体で構成された小惑星ペアの相対平衡と安定性, 日本機械学会 2012 年度年次大会, No.12-1, No.S192021, pp.1-4, 2012.
72. 塙 智史, 吉村 浩明, ホロノミック拘束を受けるラグランジュ系の幾何学的安定化法, 第 55 回自動制御連合講演会, No.2 G106(pages 1-6).
73. 手塚亜聖(早大理工)、高木正平; 三角柱後流でみられる振動流の各位相に加えられた擾乱の安定解析(Stability analysis for disturbances added at each phase of oscillatory flow observed in the wake of triangular cylinder)、第 50 回飛行機シンポジウム、新潟トキメッセ (11/5-7, 2012)
74. Hiroaki Yoshimura, Lie-Dirac Reduction and Applications to Mechanics, Seminar of Poisson Geometry, March 5, 2012, Keio University.
75. Hiroaki Yoshimura, Dirac Structures, Variational Principles and Reduction in Mechanics –Toward Understanding Interconnection Structures in Physical Systems– Conference on Geometry, Symmetry, Dynamics, and Control: The Legacy of Jerry Marsden, Fields Institute, University of Toronto, July 27, 2012.
76. 山本勝弘, 吉田崇, 吉田篤史, 飯田浩貴, "キャビテーション気泡雲の崩壊現象に関する一考

- 察", 2012 年度日本ウオータージェット学会 技術年次報告会(2013.1.25,仙台), p.17-26.
77. 高木正平、宮森康臣、大立目浩幸: 低レイノルズ数における二次元物体後流の渦構造の可視化、日本航空宇宙学会北部支部 2013 年講演会、仙台(3/14-15, 2013) .
 78. 柴田良弘, "On the sectorial R-boundedness of the Stokes operator for the compressible viscous fluid flow", Workshop on Complex Fluids Darmstadt 工科大学 (ドイツ), 7月10日~13日
 79. 柴田良弘, "On some decay properties of the 2 dim. exterior problem of the Navier-Stokes equations: the compressible viscous fluid flow case", Summer School and Workshop on Non Homogeneous Fluids and Flows, チェコアカデミー プラハ, 8月27日~31日
 80. 柴田良弘, "On some decay properties of the 2 dim. exterior problem of the Navier-Stokes equations: the compressible viscous fluid flow case
 81. 柴田良弘, Dario Goetz(atiesio GmbH), "the R-boundedness of solution operators in the study of the compressible viscous fluid flow with free boundary conditions", 2013 年度日本数学会秋季総合分科会、愛媛大学城北キャンパス、2013 年 9 月 24 日-27 日.
 82. 久保隆徹(筑波大学物質), 柴田良弘, 曾我幸平(CNRS-ENS Lyon),"On the R-boundedness of solution operators for the compressible-incompressible two phase problem", 2013 年度日本数学会秋季総合分科会、愛媛大学城北キャンパス、2013 年 9 月 24 日-27 日.
 83. 川原田 茜、飯間 信、田坂 裕司、「自由表面をもつ回転流れのマルコフ連鎖による解析」、2013 年度応用数学合同研究集会、2013 年 12 月(龍谷大学).
 84. 川原田 茜、「統計的手法によるセル・オートマトンモデルの構成」、流体数学セミナー、2013 年 12 月(早稲田大学).
 85. 川原田 茜、「多次元セル・オートマトンの位相力学系の特性による分類にむけて」、数 学教室談話会、2013 年 6 月(広島大学).
 86. Akane Kawaharada, "Ulam's cellular automaton and Rule 150", NLPM seminar, 2013 年 4 月 (広島大学).
 87. Akane Kawaharada, "Ulam's cellular automaton and Rule 150", 数理情報科学セミナー, 2013 年 4 月(広島大学).
 88. Ohtateme, Y. and Takagi, S.: On frequency-selection mechanism of vortex street behind 2-D airfoil, Joint Symposium on Mechanical - Industrial Engineering, and Robotics 2013(MIER2013), (Chiang Mai, 11/15-16).
 89. M. Iima, E. Shoji, A. Awazu, H. Nishimori, and S. Izumi, "Localized structure of Euglena bioconvection", 66th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics(APS meeting), Pittsburgh, 2013/11/24-2013/11/26, USA, 11 月 24 日.
 90. 高木正平、横山慶輔:後流不安定と超音速縮流胴境界層の再遷移、第 53 回乱流遷移研究会、(東京, 9/24-25, 2013).
 91. 宮森康臣、畠中和明、高木正平:石鹸膜に形成される柱体後流渦列のシュリーレン法による可視化、高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム, 2013 (JCHSIP2013), (室蘭, 10/17-19, 2013).
 92. 庄司江梨花, 栗津暁紀, 西森拓, 泉俊輔, 飯間信,ミドリムシ生物対流の局在パターン形成機構に関する実験的研究 ,第11回日本流体力学会中四国・九州支部総会・講演会,2013 年 6 月 15 日.
 93. 庄司江梨花, 泉俊輔,西森拓,栗津暁紀, 飯間信,ミドリムシ生物対流の局在構造と走光性, 日本流体力学会年会 2013, 2013 年 9 月 15 日.
 94. 庄司江梨花, 西森拓, 栗津暁紀, 泉俊輔, 飯間信、ミドリムシ生物対流構造と走光性、日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 日.
 95. 庄司江梨花, 泉俊輔, 西森拓, 栗津暁紀, 飯間信、ミドリムシ生物対流の局在構造ダイナミクスの解析、研究集会「生物流体における流れ構造の解析と役割」、2013 年 11 月 12 日.
 96. 久保隆徹(筑波大学物質), 柴田良弘, 曾我幸平(CNRS-ENS Lyon), "On the

- R-boundedness of solution operators for the compressible-compressible two phase problem”, 2013 年度日本数学会・2014 年度年会、学習院大学 3 月 15 日-18 日.
97. 柴田良弘, “R-bounded solution operators for the Stokes equations with free boundary condition and its application, Incompressible case”, 2013 年度日本数学会・2014 年度年会、学習院大学 3 月 15 日-18 日.
 98. 柴田良弘, Lorentz von Below (TU Darmstadt), 榎本裕子(芝浦工大システム理工), “R-bounded solution operators for the Stokes equations with free boundary condition and its application, Compressible case”, 2013 年度日本数学会・2014 年度年会、学習院大学 3 月 15 日-18 日.
 99. 柴田良弘, “On a global in time unique existence theorem for some free boundary problem of the Navier-Stokes equations without surface tension”, 2013 年度日本数学会・2014 年度年会、学習院大学 3 月 15 日-18 日.
 100. 村田美帆(早大理工), 柴田良弘, “圧縮性粘性流体に対する時間局所解の一意存在性”, 2013 年度日本数学会・2014 年度年会、学習院大学 3 月 15 日-18 日.
 101. 庄司江梨花, 藤村匠, 栗津暁紀, 西森拓, 泉俊輔, 飯間信、ミドリムシ生物対流における局在構造形成の水平方向走光性を考慮したモデル、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 29 日.
 102. 及川 一誠、大縄 将司、鈴木 幸人、川原田 茜、庄司 江梨花、飯間 信、「多重スケール現象の数理解析」、第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿、2014 年 1 月(鹿児島県).
 103. Akane Kawaharada, ”Constructing cellular automaton models through the statistical method”, 2013 年度冬の力学系研究集会, 2014 年 1 月(広島大学).
 104. Y. Shibata, On the 2phase problem including the phase transition, 第 39 回偏微分方程式札幌シンポジウム, 北海道大学, 2014 年 8 月 25--27 日.
 105. Y. Shibata, On some two phase free boundary problem for compressible viscous fluid flow, The 10th AIMS International Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications, Universidad Complutense de Madrid, 2014 年 7 月 7--11 日.
 106. Y. Shibata, On some two phase problem – incompressible and compressible viscous flows Separated by sharp interface, Conference on Fluid Dynamics and Electromagnetism, Bellavista Relax Motel in Levico Terme(Trento), 2014 年 6 月 3--6 日.

③ ポスター発表 (国内会議 8 件、国際会議 1 件)

1. 宮本 卓哉, 吉村 浩明, 非圧縮性流体の変分原理を用いた定式化と粒子法による流体解析, 日本応用数理学会 2012 年度 年会, 2012 年 8 月 30 日.
2. 飯間 信, "局在対流構造の普遍性", 第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿, 指宿, 2013/1/31-2013/2/2, 日本, 2/1 発表.
3. 飯間 信, 庄司江梨花, 栗津暁紀, 西森拓, 泉俊輔, "生物対流における局在構造ダイナミクスとその形成機構", 第 23 回非線形反応と協同現象, 札幌, 2013/12/7-2013/12/7, 日本, 12/7 発表.
4. Akane Kawaharada and Makoto Iima, “Constructing cellular automaton models from observation data”, CANDAR '13, 2013 年 12 月(愛媛県).
5. 庄司江梨花, 栗津暁紀, 西森拓, 泉俊輔, 飯間信、ミドリムシ生物対流の対流構造と走光性、第1回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿, 2014 年 2 月 1 日.
6. 川原田 茜、「逆超離散化によるセル・オートマトンからの偏微分方程式の構成」、第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿、2014 年 1 月(鹿児島県).
7. 川原田 茜、「実データからのセル・オートマトンモデル構成法の確立にむけて」、JST FIRST & CREST 合同シンポジウム、2014 年 1 月(東京都)

8. 及川一誠、「Rayleigh-Plesset-Keller 方程式の数値解析」、第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿、2014 年 1 月(鹿児島県).
9. 鈴木幸人、「幾何学的数値積分法の流体解析への応用に向けた検討」、第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿、2014 年 1 月(鹿児島県).

(4)知財出願

- ① 国内出願 (0 件)
- ② 海外出願 (0 件)

(5)受賞・報道等

①受賞

1. Student Award, The 6th Asian Conference on Multibody Dynamics, 小野崎香織 (2012 年 8 月 27 日).
2. 流体力学会誌「ながれ」において流体力学会年会における発表が, 注目研究の一つに選定される (庄司江梨花、栗津暁紀、西森 拓、泉 俊輔、飯間 信、"ミドリムシ生物対流の局在構造と走光性",ながれ第32巻(2013)第 6 号,pp473-476).
3. 発表論文が, JPSJ における Papers of Editor's Choice に選定される (Erika Shoji, Hiraku Nishimori, Akinori Awazu, Shunsuke Izumi, Makoto Iima"Localized Bioconvection Patterns and Their Initial State Dependency in *Euglena gracilis* Suspensions in an Annular Container", J. Phys. Soc. Jpn., Vol.83, 043001.)

③ マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 科学新聞の4月25日号に記事「ミドリムシ生物対流の局在構造と相互作用解明(広島大)」が掲載された。

§ 6 研究期間中の活動

6. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
10月2日	第5回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	16	水島二郎教授(同志社大学)による講演
11月13日	第6回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	17	伊藤信毅博士(早稲田大学)による講演
11月20日	「現代数学解析による流体力学の未解決問題への挑戦」立上げ研究集会	早稲田大学 西早稲田キャンパス 63-02	60	早稲田大学理工学術院長、CREST 数学部門研究統括および研究代表者による挨拶と、神部勉教授(南開大学)、木田重雄教授(京都大学)および舟木直久教授(東京大学)による講演
12月4日	流れの安定性理論の集中講義(第1回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	5	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第1回)
12月11日	第7回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	16	渡辺毅助手と飯間信助教(北海道大学)による講演
12月18日	流れの安定性理論の集中講義(第2回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	5	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第2回)
1月8日	流れの安定性理論の集中講義(第3回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	5	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第3回)
1月15日	第8回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	10	宮寄武教授(電気通信大学)による講演
1月29日	流れの安定性理論の集中講義(第4回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第4回)
2月3日	流れの安定性理論の集中講義(第5回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	7	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第5回)

2月26日	流れの安定性理論の集中講義(第6回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第6回)
3月8日～3月16日	流体数学国際研究集会	早稲田大学 西早稲田キャンパス 52-201, 63-03・04	112	流体数学に関する集中講義と国際会議
3月19日	流れの安定性理論の集中講義(第7回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第7回)
4月9日	流れの安定性理論の集中講義(第8回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6	伊藤信毅博士による流れの安定性理論に関する講義(第8回)
H22 年 4 月 16 日	第9回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	17 人	田端正久教授(早稲田大学)による講演
H22 年 4 月 19 日	Whitham"Linear and Nonlinear Waves"研究会(第1回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	8 人	Whitham の"Linear and Nonlinear Waves"第11章を題材にした分散波解析の検討
H22 年 4 月 26 日	Whitham"Linear and Nonlinear Waves"研究会(第2回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	9 人	Whitham の"Linear and Nonlinear Waves"第11章を題材にした分散波解析の検討
H22 年 5 月 10 日	Whitham"Linear and Nonlinear Waves"研究会(第3回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	7 人	Whitham の"Linear and Nonlinear Waves"第11章を題材にした分散波解析の検討
H22 年 5 月 17 日	Whitham"Linear and Nonlinear Waves"研究会(第4回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	8 人	Whitham の"Linear and Nonlinear Waves"第11章を題材にした分散波解析の検討
H22 年 5 月 24 日	Whitham"Linear and Nonlinear Waves"研究会(第5回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	7 人	Whitham の"Linear and Nonlinear Waves"第11章を題材にした分散波解析の検討
H22 年 5 月 28 日	第10回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	13 人	庄子習一教授(早稲田大学)による講演
H22 年 5 月 31 日	Whitham"Linear and Nonlinear Waves"研究会(第6回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	5 人	Whitham の"Linear and Nonlinear Waves"第11章を題材にした分散波解析の検討

H22年6月7日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第7回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討
H22年6月14日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第8回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	7人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討
H22年6月18日	第11回早稲田大学流体力学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	25人	小藺英雄教授(東北大学)による講演
H22年6月21日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第9回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討
H22年6月28日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第10回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	5人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討
H22年7月5日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第11回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	7人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討
H22年7月19日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第12回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討
H22年7月23日	第12回早稲田大学流体力学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	14人	北畑裕之講師(千葉大学)による講演
H22年7月26日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第13回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討
H22年7月30日	第13回早稲田大学流体力学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	17人	笹本智弘准教授(千葉大学)による講演
H22年8月2日	Whitham”Linear and Nonlinear Waves”研究会 (第14回)	早稲田大学 早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	6人	Whitham の”Linear and Nonlinear Waves”第11章を題材にした分散波解析の検討

H22年10月8日	第14回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	14人	藤村薫教授(鳥取大学)による講演
H22年8月30日～31日	北海道流体力学サマースクール2010	北海道大学	18人	西田孝明教授(早稲田大学)による集中講義
H22年10月27日	Huerre”Open Shear Flow Instabilities”研究会(第1回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	5人	Huerre の”Open Shear Flow Instabilities”を題材にした線型安定性解析の検討
H22年11月5日	第15回早稲田大学流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 55S-410	11人	鈴木政尋研究員(早稲田大学)による講演
H22年11月24日	Huerre”Open Shear Flow Instabilities”研究会(第2回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	5人	Huerre の”Open Shear Flow Instabilities”を題材にした線型安定性解析の検討
H22年12月1日	Huerre”Open Shear Flow Instabilities”研究会(第3回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	3人	Huerre の”Open Shear Flow Instabilities”を題材にした線型安定性解析の検討
H22年12月8日	Huerre”Open Shear Flow Instabilities”研究会(第4回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	3人	Huerre の”Open Shear Flow Instabilities”を題材にした線型安定性解析の検討
H22年12月22日	Huerre”Open Shear Flow Instabilities”研究会(第5回)	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	4人	Huerre の”Open Shear Flow Instabilities”を題材にした線型安定性解析の検討
H23年1月31日	第1回数学・産業界連携セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	27人	大木裕史氏(ニコン株式会社)による講演
H23年5月23日	第17回早稲田大学「流体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス55-S-410	13人	大縄将史研究員(早稲田大学)による講演
H23年6月20日	第18回早稲田大学「流体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	12人	國本雅宏氏(早稲田大学)による講演
H23年7月11日	第19回早稲田大学「流体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス 51-17-06	24人	岡本久教授(京都大学)による講演
H23年7月20日	第2回数学・産業界連携セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス	25人	堀江英明氏(日産自動車総合研究所)による講演

		ンパス 51-17-06		
H23年10月 7日	第20回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	21人	松村昭孝教授(大阪大学) による講演
H23年10月 21日	第21回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	23人	北田韶彦教授(早稲田大 学)による講演
H23年11月 4日	第22回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	24人	服部元史教授(神奈川工科 大学)による講演
H23年12月 9日	第23回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	14人	松尾裕一博士(JAXA)によ る講演
H24年1月2 7日	第3回数学・産業界連携 セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	30人	宮本慎一氏(三菱重工業) による講演
H24年2月6 日	第24回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	24人	澤田宙広准教授(岐阜大 学)による講演
H24年3月2 1日 H24年3月2 2日	CREST 流体数学講演 会	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室		杉本充教授(名古屋大学) によるセミナー
H24年5月1 1日	第25回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	15人	國本雅宏氏、松尾伸史氏 (早稲田大学)による講演
H24年7月6 日	第26回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	15人	小藺英雄教授(早稲田大 学)による講演
H24年7月2 7日	第27回早稲田大学「流 体数学セミナー」	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	20人	西原健二氏(早稲田大学) による講演
H24 年10月 5日	第28回流体数学セミナ ー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	28人	中尾充宏教授(佐世保高 専)による講演
H24 年10月 19日	第29回流体数学セミナ ー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	10人	國本雅宏氏(早稲田大学) による講演

		ンパス51-1 7-06室		
H24 年11月 9 日	第30回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	13人	柘植直樹准教授(岐阜大学)による講演
H25 年 1 月 18 日	第31回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	30人	山田義雄氏(早稲田大学)による講演
H25 年 10 月 4 日	第32回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	22 人	佐崎元教授(北海道大学)による講演
H25 年 10 月 18 日	第33回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	28 人	横山聡研究員(東京大学)と 野津裕史講師(早稲田大学)による講演
H25 年 11 月 19 日	第35回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	17 人	柏原崇人氏(東京大学)による講演
H25 年 12 月 6 日	第36回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	20 人	Maria Schonbek 教授 (University of California)による講演
H25 年 12 月 13 日	第34回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	28 人	川原田茜研究員(広島大学)と Linyu Peng 研究員 (早稲田大学)による講演
H26 年 5 月 30 日	第37回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	13人	Jiang Xu 教授(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)による講演
H26 年 7 月 25 日	第38回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	11人	Jian Brezina 氏(東京工業大学)による講演
H26 年 11 月 11 日～14 日	International Conference on Mathematical Fluid Dynamics, Present and Future	早稲田大学 西早稲田キャンパス63-0 4・05会議室	99人	流体数学に関する国際会議
H26 年 11 月 21 日	第39回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-1 7-06室	7人	山口崇幸氏(広島大学)による講演

H27年1月9日	第40回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-17-06室	26人	齋藤平和氏と村田美帆氏 (早稲田大学)による講演
H27年1月16日	第41回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-17-06室	9人	Joanna Renciwowicz 氏 と Wojciech Zajackowski 氏 (Polish Academy of Sciences) の講演
H27年2月4日	第42回流体数学セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス51-17-06室	12人	Ewelina Zatorska 氏 (Polish Academy of Sciences) の講演