

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「渦・境界相互作用が創出する  
パラダイムシフト」

## 研究終了報告書

研究期間 平成22年10月～平成28年3月

研究代表者：坂上貴之  
(京都大学大学院理学研究科、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

《**坂上 CREST の研究実施体制**》 流体中におかれた物体の境界付近から、粘性の効果によって生成する剥離渦は、従来の航空工学においては物体の飛翔効率を低減させる厄介者とされてきた。坂上 CREST ではこうした剥離渦をうまく境界近傍に閉じ込められることを精緻な数理モデルやその大規模数値計算、実証流体実験を連携させて明らかにし、これまでにない空力特性を実現できることを広く示すことで、従来の流体力学的な発想パラダイムの転換を目指す数学主導の「シーズ型研究」を展開した。その目的の達成のため、数理流体モデルを手がける坂上グループ、数値流体シミュレーションを手がける石原グループ、そして位相幾何学による新しい流体運動の数学的特徴づけの提案を目指す荒井グループからなる研究体制を構築し、3 グループがそれぞれに連携する活動を行った。全期間を通じた研究活動を「基礎研究」「協働研究」「国際研究」の 3 つのカテゴリーに分類して、各研究の内容や経過、その成果の概要を以下に示す。

《**基礎研究の経緯と成果**》 最初の 2 年は各グループのそれぞれの基礎研究を重点的に推進した。特に、坂上グループと荒井グループは北海道大学内に共通のプロジェクトスペースを確保し、そこで日常の研究活動を行うことで、グループ間連携が進むよう配慮した。また 3 グループ全体の研究活動の情報共有は定期的に CREST ミーティングを開催することで実現した。その結果、2 年経過時から 3 グループによる共同研究が開始され、期間最後の 2 年においては、本 CREST が提案するパラダイムの中心的成果となる成果、「渦閉じ込めを実現する Kasper 翼モデルの構成とその検証」、および数学的にも新しくかつ流体運動の新たな位相的特徴付けを与えることとなった「二次元多重連結ハミルトンベクトル場の分類理論」として結実した。研究成果は全て論文として公表すると同時に講演などを通じて広く発表を行った。また、分類理論に関する成果は特許として国内外に出願を行った。(公表論文 49 本、招待講演 62 件、出願特許 7 件)

《**共同研究の経緯と成果**》 全期間を通じて「連携セミナー」を北海道大学、名古屋大学、京都大学などで随時開催し、関連分野の最先端の研究の話題の提供を受けた。さらに能動的連携探索型プログラムである「ラボ・ステイ」を企画することで、本 CREST 参加者全員が諸分野の研究室に滞在して問題の発掘を行い、その解決について集中して議論を重ねる機会を設けた。その結果、沖縄科学技術大学院大学から流体実験装置による実験装置作成に関するノウハウの提供を受け、それに基づいてアイシン AW が作成した実験装置の寄贈を受け、本成果の根幹をなす成果に大きく貢献した。加えて、本 CREST 終了後にアイシン AW や鉄道総合研究所などとの共同研究の開始が予定されている他、気象学研究者との連携によりあらたな「数理=気象連携研究グループ」が発足するなど、数学研究シーズをコアに据えた能動的諸分野連携研究は大きな拡がりを獲得することとなった。

《**国際研究の経緯と成果**》 本 CREST 活動を基点として、世界的な研究者グループの中心となるべく、海外からの研究者の招聘を行うと同時に多くの国際研究集会の主催・共催を行い研究成果の展開も積極的に行った。その結果、海外研究者との共著論文など国際的な研究活動が活発になっただけでなく、イギリスとの Applied Computational and Complex Analysis (ACCA) 活動の開始、そのアメリカ・ブラジル・オーストラリアへの展開も図られるなど、本 CREST 活動を基点に将来にわたる国際的研究者ネットワークを形成することができた。

《**CREST 間の連携活動・若手支援**》 数学の持つ水平展開力を領域目標達成のため十分に活かすことができるよう、CREST 間連携や若手支援を積極的に行った。まず、柴田 CREST や 國府 CREST との共同セミナーの開催を行った。次に、國府・水藤・長山・坂上 4 CREST 合同での「応用数学チュートリアル」の開催や「CREST 横断若手合宿」の開催支援などを行った。その結果として博士研究員や博士学生のほとんどすべてが研究職や一般企業へ就職を果たした。

## (2) 顕著な成果

### < 優れた基礎研究としての成果 >

#### 1. 二次元多重連結領域における流体理論の数学解析・数値解析

概要: 二次元多重連結領域における非圧縮・非粘性流体の数学理論および数値計算手法を確立した. 本理論は標準円領域における流体理論と任意形状を持った流れ領域から標準円領域への数値等角写像の組み合わせからなっている. ここで構築された理論は, 二次元流に限定を受けるものの, 広い流体の問題に対して適用が可能であり. 流体工学や生命流体, 環境流体といった多くの現代的な問題の基礎流体モデル構築に資する成果である.

R. Nelson (Kyoto Univ.), T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Trapped vortices in multiply connected domains”, *Fluid Dynamics Research*, vol.46, no. 6 (2014) 061402

#### 2. 構造安定な二次元非圧縮流の流線パターンのトポロジーの分類理論と遷移理論

概要: 二次元領上のハミルトンベクトル場で構造安定なものの流線のトポロジーを完全に分類することに成功した. 加えて, これらのすべてのパターンに固有の語表現やグラフ(正規)表現が割り当てられることも数学的に示した. これにより語表現やグラフ表現の比較だけで, どんなに複雑であっても構造安定な流れパターンの遷移を一意に同定することが可能になった. 本理論は二次元ベクトル場のホッジ分解によるハミルトン成分に関する分類でもあり数学的にも意義のある成果となった. また, 成果はすべて基礎特許として国内外出願(7件)を済ませた.

T. Sakajo (Kyoto Univ.), T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Transitions between streamline topologies of structurally stable Hamiltonian flows in multiply connected domains”, *Physica D*, vol. 307, pp. 22—41 (2015) doi:10.1016/j.physd2015.05.013

#### 3. 壁乱流の計算機科学による基礎研究

概要: 乱流境界層の大規模直接数値計算を行い, 非線形性の強さの異なるデータを解析した. その結果, 乱流境界層の乱流・非乱流界面はテイラー長でスケールする乱流・非乱流の遷移層とコルモゴロフ長でスケールする表層(渦あり・渦なしの遷移層)の二重構造を持つことを示した. これは従来曖昧だった乱流・非乱流界面とスーパーレイヤーの関係を明確にするものである. また, 乱流・非乱流界面において速度変動の二点相関が急激に減少することを数値的に示した.

Takashi Ishihara, Hiroki Ogasawara, J.C.R. Hunt, “Analysis of conditional statistics obtained near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers”, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 53, pp.50–57

### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

#### 1. 渦閉じ込めを可能にする Kasper 翼モデルの構成とその制御法の確立

概要: 本 CREST では「渦閉じ込め」という, 従来の流体工学の発想にはない新しいパラダイムの提案, その実用化に向けた基礎研究として Kasper 翼の渦閉じ込め制御機構の構築を行った. 数学的に精密な非粘性数値流体モデルを用いた粘性流体における渦制御機構の構成手法は, 多くの流体工学の問題に対する処方箋として汎用性が高く, 具体的な問題に対しても効果を発揮するものである.

#### 2. 二次元流線パターンのトポロジーの分類理論と遷移理論を用いた流体の新しい記述

概要: 流体现象を扱う多くの周辺諸分野の協働を進める上での「共通言語」として語表現や正規表現による流線トポロジーの分類理論の開発を行った. その適用範囲は極めて広く, 流体実験や流体装置設計において, この語表現や正規表現により流れの長時間発展というビッグデータを少数の文字列に圧縮できる. また, この分類理論をベースにした「流線パターンの

最適化アルゴリズム」を構築することにより、流れの形状を制御するという新しい工学技術への展開も可能となる。

### 3. 流体構造の分類の様々なソフトウェアの提供

概要:位相幾何学やグラフ理論を用いて流れの構造を解析するプログラムを開発し公開した。流れの相空間を力学系的な振舞いの違いにより分割するアルゴリズムをグラフクラスタリングの応用により開発し、これを実装した。またグラフの離散ホッジ分解を応用して勾配的な構造を抜き出す手法や流線の絡み数を厳密に計算するアルゴリズムも開発した。これらは数値計算により得られたデータのみならず、時系列にも適用可能であり、従来の手法よりも広い応用の可能性がある。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 坂上貴之グループ

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
坂上 貴之	京都大学大学院理学研究科	教授	H22.10～H28.3
齊木 吉隆	一橋大学大学院商学研究科	准教授	H22.10～H28.3
米田 剛	東京工業大学大学院理工学研究科	准教授	H23.6～H28.3
Rhodri Nelson	京都大学大学院理学研究科	特定研究員	H23.10～H28.1
松本 剛	京都大学大学院理学研究科	助教	H25.4～H28.3
中野 直人	科学技術振興機構	さきがけ研究者	H25.4～H26.9
高木 由紀	北海道大学大学院理学研究院	技術補助員	H23.4～H24.11
目黒 美香	北海道大学大学院理学研究院	技術補助員	H24.10～H25.2
青山 直樹	北海道大学大学院理学院	技術補助員	H23.5～H24.3
田中 英裕	北海道大学大学院理学院	技術補助員	H23.5～H24.3
中川 義之	北海道大学大学院理学院	技術補助員	H24.4～H25.3
宇田 智紀	京都大学大学院理学研究科	技術補助員	H26.1～H28.3
湯本 英二	京都大学大学院理学研究科	技術補助員	H26.1～H26.3
筒井 良行	京都大学大学院理学研究科	技術補助員	H26.1～H26.3
後藤田 剛	京都大学大学院理学研究科	技術補助員	H26.4～H28.3

##### 研究項目

- ・ 二次元多重連結円領域非粘性・非圧縮流体の基礎理論の整備と数値計算法の確立
  - (1) 回転および折り返し対称性のある多重連結領域の点渦定常配置の理論を構築
  - (2) 多重連結外部スリット領域における、吸い込み・湧き出し対の時間発展の数値解析
  - (3) 数値的基礎となる Schottky-Klein Prime 関数の数値計算ライブラリの整備・公開
- ・ 二次元多重連結円領域における非粘性・非圧縮流体の理論の応用
  - (1) 一様流にある平行平板流まわりの定常点渦の存在のその効果についての研究
  - (2) 渦による環境浄化を目指す Vortex Flushing の研究
- ・ 渦閉じ込めにより効率的な飛翔を実現する Kasper 翼の研究
  - (1) 非粘性モデルの構築と定常点渦解の存在を示し、点渦による揚力増加を確認
  - (2) 上記定常点渦の線型安定性と非定常流れ中の堅牢性に関する研究
  - (3) 上記定常点渦の長期閉じ込めを実現する線型フィードバック制御機構の開発とその二次元粘性流シミュレーションモデルへの実装
  - (4) 石鹼膜実験装置による二次元流体の可視化研究と Kasper 翼による渦閉じ込め実現可能性の実証実験
- ・ 多重連結領域における数値等角写像の理論と応用
  - (1) 代用電荷法を用いた標準円領域から任意配置を持つ多重連結スリット領域への数値等角写像の構成とポテンシャル流の構成
  - (2) ノイマン核を用いた標準円領域から任意の境界形状を持つ多重連結領域沿岸領域への等角写像の構成とポテンシャル流の構成
- ・ 多重連結領域における二次元非圧縮流れ場(二次元コンパクト向き付け可能多様体の上のハミルトンベクトル場)の位相的分類理論
  - (1) 位相構造に固有の文字列を割り当てる語表現理論と割り当てアルゴリズムの開発(荒井 G との共同研究)
  - (2) 上記語表現理論を用いて、構造不安定流線パターンを介した遷移過程の同定理論とそ

- のアルゴリズムの開発(荒井 G との共同研究)
- (3) 上記理論の流体シミュレーション結果への応用による遷移記述(石原 G との共同研究)
- (4) 流線位相構造のグラフ表現とその正規表現の研究(荒井 G との共同研究)
- ・ 流体運動の渦・境界相互作用の数学理論
  - (1) 流体基礎方程式を用いた剥離現象の数学解析
  - (2) 二次元多様体(特に球面)上の no-slip 境界条件つき Navier-Stokes 方程式の定常流問題の数学解析
- ・ 生命微生物の運動を記述する粘性流体モデルの研究
  - (1) Micro-treadmilling swimmer モデルの構築による微生物多体問題の研究

## ②荒井迅グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
荒井 迅	北海道大学大学院理学研究院	准教授	H22.10～H28.3
横山 知郎	京都教育大学教育学部	准教授	H25.9～H28.3
横山 知郎	北海道大学大学院理学研究院	博士研究員	H23.4～H25.8
川原田 茜	北海道大学大学院理学研究院	技術補佐員	H23.4～H25.3
千野 由喜	北海道大学大学院理学研究院	技術補佐員	H25.4～H28.3
草野 元紀	九州大学理学部	技術補佐員	H26.1～H26.3
Escolar Emerson Gaw	九州大学数理学府	技術補佐員	H26.1～H26.3
竹内 博志	九州大学理学部	技術補佐員	H26.1～H26.3
西 慧	北海道大学大学院理学研究院	博士研究員	H26.6～H28.3

研究項目

- ・ 流れ構造の分解アルゴリズムの開発
  - (1) グラフクラスタリングを用いた相空間の分解アルゴリズムの開発
  - (2) 流体の計算データから有向グラフを生成する手法の比較と改良
  - (3) ライブラリの開発と公開
- ・ 絡み数の厳密計算アルゴリズムの開発
  - (1) 精度保証付き数値計算を用いて高速に絡み数を計算するアルゴリズムの開発
  - (2) 流体における絡み目数の性質の位相幾何学的な側面からの研究
- ・ 流れの勾配的な構造の位相幾何学的表現の研究
  - (1) コンレイ・モース理論を用いて石原グループの計算データを解析する研究
  - (2) グラフの離散ホッジ分解を応用した擬リアプノフ関数の構築

## ③石原卓グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
石原 卓	名古屋大学工学研究科	准教授	H22.10～H28.3
岡本 直也	名古屋大学工学研究科	助教	H22.10～H28.3
森下 浩二	名古屋大学工学研究科	学術研究員	H23 . 4 ～24 . 3
Pradeep Kumar Jha	名古屋大学工学研究科	学術研究員	H24 . 12 ～26 . 4
澤村 陽一	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H23 . 4 ～27 . 3
小笠原 浩樹	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H23 . 4 ～25 . 3
櫻井 照夫	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H25 . 4 ～28 . 3
田中 志津子	名古屋大学工学研究科	技術補佐員	H22 . 11 ～28 . 3
浅田 宗志	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H26 . 4 ～27 . 3
平田 亮介	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H26 . 4 ～27 . 3

江野 畑圭	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H26 .4 ~28 .3
末吉 史弥	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H26 .4 ~28 .3
大平 航也	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H27 .4 ~28 .3
加藤 正人	名古屋大学工学研究科	技術補助員	H27 .4 ~28 .3

#### 研究項目

- ・ 平行平板間乱流および乱流境界層の大規模直接数値計算(DNS)
  - (1) 平行平板間乱流の大規模 DNS (格子点数 2048x1536x2048) の実施, および, 壁 乱流データベース ( $R_{\tau}=2560,5120$ ) の構築
  - (2) 高レイノルズ数壁乱流 DNS データベースを用いた壁近傍の乱流の渦構造と統計的性質の解析
  - (3) 乱流境界層の大規模 DNS を用いた乱流・非乱流界面近傍の条件付き統計解析
  - (4) 平行平板間乱流に対し, ウェーブレット変換を用いたコヒーレント渦の抽出
- ・ 高レイノルズ数乱流中の渦構造とその力学の解明
  - (1) 乱流の大規模数値計算結果を用いた解析による, 高レイノルズ数乱流中の強渦度領域の渦構造とその動力学の解析
- ・ 数値モデルの検証のための数値計算
  - (1) Volume Penalization(VP)法を用いたスペクトル法に基づく数値計算法の開発と結果の検証
  - (2) Volume Penalization(VP)法を用いた二次元流れの数値計算の実施
- ・ 流れ場のトポロジー解析ツールの活用
  - (1) 乱流燃焼(n ヘプタンの自己着火過程)の直接数値計算における温度場の散逸要素解
  - (2) 乱流中の渦度場や乱流燃焼中の温度場のパーシステント・ホモロジーを用いた解析

#### (2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・ 連携セミナーの実施
 

本CREST計画を推進するにあたり, 必要と思われる専門知識の提供や関連研究の現在の最先端の話題について研究者を招聘して行った. 活動実績は平成27年度9月時点で平成23年度6回, 平成24年度3回, 平成25年8回, 平成26年6回, 平成27年度3回(9月時点)である.
- ・ ラボ・ステイの実施
 

「渦・境界相互作用」をキーコンセプトに諸分野協働を能動的に行い, 一定期間諸分野研究者の研究室に滞在して専門知識を習得すると同時に, 問題の発掘・数学的展開について活発に議論を行った. 本CRESTの諸分野協働の核心をなす企画であり, 本CREST計画実施中, また終了後の多くの共同研究の萌芽となった.

  - (1) 株式会社アイシンAW(平成24年2月, 3月・三河安城市)
    - 二次元石鹼膜実験装置の寄贈や本CREST研究活動への常時参加
    - 本CREST研究計画終了後の共同研究活動への展開
  - (2) 九州大学応用力学研究室 大屋裕二研究室(平成24年6月・福岡市)
  - (3) 京都大学大学院工学研究科航空工学専攻 風洞実験室(平成24年11月・宇治市)
  - (4) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 風洞技術センター(平成24年11月・米原市)
  - (5) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所(平成25年7月・国立市)
    - 鉄道総研とは来年度からの共同研究契約に繋がった.
  - (6) 沖縄科学技術大学院大学 流体力学ユニット(平成26年2月・恩納村)
  - (7) 沖縄科学技術大学院大学 流体力学ユニット(平成26年5月・恩納村)
    - 二次元石鹼膜実験装置の設計に関する技術提供を受けた.
    - Joint Workshopの開催につながった.

- (8) デルフト工科大学 航空・流体力学研究室(平成26年10月・オランダデルフト)→乱流境界層についての国際共同研究につながった。
- (9) ラトガース大学数学科 Mischaikow研究室(平成26年11月・アメリカニュージャージー州)  
→パーシステント・ホモロジーを用いた流れ場解析の国際共同研究につながった。
- (10)アーヘン工科大学 Heinz Pitsch 研究室(平成27年8月・ドイツアーヘン)  
→散逸要素を用いたデータ解析, および, 燃焼の大規模計算についての連携につながった。
- ・ 数学領域のCREST間連携活動  
本領域に参加するCREST間の連携を深めるための様々な企画を行った。数学のもつ分野を超えた水平展開力を活かす場, 若手研究者の交流の場として機能した。
    - (1) 國府CREST・柴田クレストチームとの合同研究集会の実施(平成23年)
    - (2) JST「数学」領域横断若手合宿の実施  
第1回:平成26年1月・鹿児島県指宿市, 第2回:平成27年3月・福岡市
    - (3) 応用数学チュートリアル2014の主催(平成26年2月・那覇市)
  - ・ 国際研究集会の主催・共催  
本CRESTの支援の元で以下の多くの国際研究集会の主催・共催を行った。坂上CRESTの研究活動の世界展開に大きな成果があった。
    - (1) National Institute for Mathematical Scienceにおいて, 国際研究集会「Hot Topic Workshop on Fluid Dynamics: Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields」を主催した。(平成23年12月・韓国大田市)
    - (2) 名古屋大学において計算科学セミナーを実施(平成23年10月・名古屋市)
    - (3) 名古屋大学において, 国際シンポジウム「CCS Symposium Autumn 2011」を主催(平成23年11月・名古屋市)
    - (4) IUTAM Symposium on Vortex dynamics: formation, structure and functionを共催(平成25年3月・福岡市)
    - (5) IMA Special Workshop Joint US-Japan Conference for Young Researchers on Interactions among Localized Patterns in Dissipative Systemsを共催(平成25年6月・アメリカミネアポリス市)
    - (6) The 6<sup>th</sup> Pacific RIM Conference on Mathematics 2013(第5回CREST-SBM国際シリーズ)において“Topological problems in fluid dynamics”を主催(平成25年7月・札幌市)
    - (7) OISTワークショップ“Joint Seminar between OIST and JST mathematics program on vortex-boundary interactions and wall-bounded turbulent flows”をOISTのPinaki Chakraborty准教授と共催した(平成26年5月・恩納村)
    - (8) The 1<sup>st</sup> ACCA-UK/JP WorkshopをインペリアルカレッジロンドンのDarren Crowdy教授と共催した(平成27年3月・英国ロンドン)
    - (9) 国際応用数学会議(ICIAM2015)において, ミニシンポジウムを2つ企画した(平成27年8月・中華人民共和国北京市)
    - (10) The 2<sup>nd</sup> ACCA-UK/JP WorkshopをインペリアルカレッジロンドンのDarren Crowdy教授と共催(平成28年1月・京都市)
  - ・ 国際的な研究活動  
世界の多くの研究者との共同研究や日本の研究者が中心として活躍する研究コミュニティーの形成に大きな成果があった。
    - (1) Issac Newton Institute for Mathematical Sciencesにおける長期研究プログラム“Topological Dynamics in the Physical and Biological Sciences”に参加(ケンブリッジ大)
    - (2) 研究集会CEMRACS2012に参加して, VP法に関する国際共同研究を実施
    - (3) M. Fargek教授(パリ大, エコールノルマル大)とK. Schneider教授(マルセイユ大)を招



聘し, 壁乱流およびVP法に関する国際研究を推進した.

(4) J.C.R. Hunt教授(University College London)と乱流境界層の乱流・非乱流境界面について国際共同研究を推進した.

(5) K. Mischaikow教授(ラトガース大学)とパーシステントホモロジーを用いた大規模データ解析に関する国際共同研究を推進した.

(6) D. Crowdy教授(インペリアルカレッジロンドン)と日英米カナダ四カ国の研究者が参加する研究者コミュニティACCA(Applied and Computational Complex Analysis)を立ち上げて国際的な研究を推進した. 今後はブラジルなどの国も参加を予定しており, 本CRESTが深くその形成に寄与した.

(7) B. Protas准教授(McMaster大学)と流体運動における線型フィードバックモデルに関する国際共同研究を推進した.

(8) M. Nasser准教授(King Khalid大学)と数値等角写像に関する国際共同研究を推進した.

### § 3 研究実施内容及び成果

#### 3.1 渦/境界相互作用の数理流体モデルの研究(京都大学 坂上グループ)

##### (1)研究実施内容及び成果

坂上グループでは、渦・境界相互作用の数理流体モデルの数理科学的研究を推進した。大きく分けて 4 つの研究内容とその成果がある。[1] 二次元多重連結領域内の非粘性・非圧縮流体の数学理論の整備と数値計算法の確立とその応用;[2] 渦閉じ込めにより効率的な飛翔を実現する Kasper 翼の数学研究とその実証実験;[3] 多重連結領域における二次元非圧縮流れ場(二次元コンパクト向き付け可能多様体上のハミルトンベクトル場)の位相分類理論とその応用;[4] 流体・境界相互作用の数学解析である。各成果の内容と成果は以下の通りである。

##### [1] 二次元多重連結領域内の非粘性・非圧縮流体の数学・数値計算法とその応用

《概要》本 CREST で利用する多重連結領域における非粘性・非圧縮流体モデルの構築においては、2 つの要素が必要である。1 つは標準的な円領域としての標準円領域における渦や一様流、吸い込み湧き出し対などの流れ要素の解析表現の構築、もう 1 つは与えられた多重連結領域から標準円領域への等角写像の構成である。

前者については、以下のような成果があった。

- 回転および折り返し対称性のある多重連結領域の点渦定常配置の理論  
多重連結円領域における定常解の構造と一般の多重連結領域の定常解の関係を対称性の高い領域において調べた。対称性がうまく等角写像の情報に組み込まれる場合に定常解は一対一に対応することがわかった。
- 多重連結外部スリット領域における、吸い込み・湧き出し対の時間発展の数値解析  
渦や一様流といった基本的な流れ構造は既に知られていたが、吸い込み湧き出し対については研究がなかったため、本流れ要素を含める形での数学的研究を行った。
- 数値的基礎となる Schottky-Klein Prime 関数の数値計算ライブラリの整備・公開  
本研究内容の数値研究の中心的ツールとなるのは、Schottky-Klein Prime 関数とよばれる超越関数の高速・高精度評価である。これに対して、本関数の  $N$  トーラスをリーマン面にもつ正則関数としての微分幾何学的特徴づけとそのローラン展開をベースとした高精度・高速数値計算法の実装およびそのライブラリの整備・公開を行った。本ライブラリは海外における Matlab のプログラム開発グループと合流することとなった。

後者については、以下のような成果があった。

- 代用電荷法を用いた標準円領域から任意配置を持つ多重連結スリット領域への数値等角写像の構成とポテンシャル流の構成  
様々な問題の数理モデルを構築する際には、まずは境界形状を単純化して線分からなるスリット領域とすることが考えられる。その場合にはスリットの配置や距離を自由に換えられるようにしなければならないが、従来の手法ではそれが困難であった。それを拡張してサイズや配置を自由に調整できるような数値等角写像の技法を開発した。(図 1)
- ノイマン核を用いた標準円領域から任意の境界形状を持つ多重連結領域沿岸領域への等角写像の構成とポテンシャル流の構成  
海洋の流れなどでは、複雑な形状をした海岸線を取り扱う必要がある。そこで、与えられた形状を持つ多重連結領域への数値等角写像の構成を、リーマンヒルベルト問題のノイマン核を持つ積分方程式に帰着させる解法により解決した。これは複雑な海岸線を含む流れ領域における環境工学の数理モデルとして利用できる。(図 2)

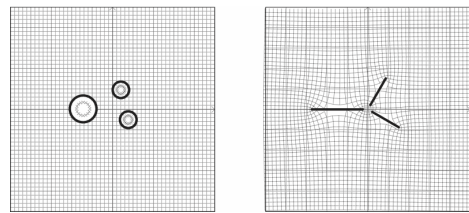


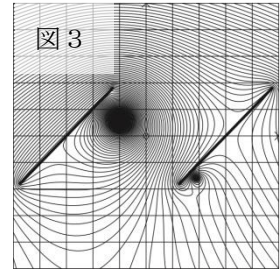
図 1 数値等角写像の計算例



図 2

数理モデル研究としては以下を行った。

- 一様流にある平行平板流まわりの定常点渦の存在のその効果についての研究  
これはブレード縦置き型の風力発電装置における閉じ込め渦による回転の加速の可能性を研究したものである。定常渦の存在により反時計回りの回転が加速されることがわかった。(図 3: 右図)
- 渦による環境浄化を目指す **Vortex Flushing** の研究  
渦を海岸線付近で発生させ、その運動によって海岸付近にある物質を取り除く技術を **Vortex flushing** と呼ぶ。さまざまな地形に対する **Vortex flushing** モデルを構築し、その物質除去能力について数値的に検討を行った。
- 生命流体への応用は当初の想定よりも困難な点があることがわかってきたが、国際研究を通じて、生命微生物の運動を記述する粘性流体モデル(**Micro-treadmilling swimmer** モデル)の構築による微生物多体問題の研究が有望であることが分かってきたため、本モデルの構築およびその応用の研究を推進中である。



[2] 渦閉じ込めにより効率的な飛翔を実現する **Kasper** 翼の数学研究とその実証実験

《概要》本 CREST が提案する「渦・境界相互作用」コンセプトのコア的研究として、渦閉じ込め実現可能性を「**Kasper** 翼」モデルを用いて数学的に詳細に検討し、石鹼膜実験装置による実証実験を行った。研究内容とその成果は以下の通りである。

- 非粘性モデルの構築による揚力を増加させる定常点渦解の存在と線型安定性

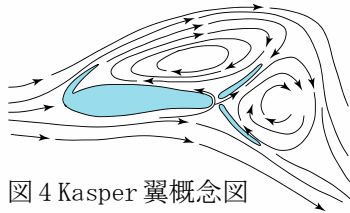
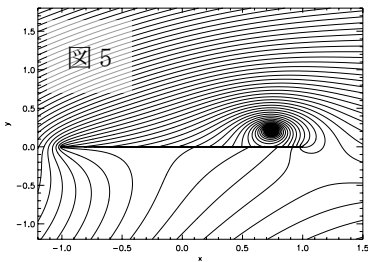


図 4 **Kasper** 翼概念図

**Kasper** 翼は主翼の背後に二枚の小さな複翼をつけて、その複翼の配置をうまく変えることで効率的な渦閉じ込めの実現する機構(図 4)であり、1970 年度に Witold **Kasper** が提案したものである。しかし、その基礎的な理論研究が難しかったことに加え風洞実験から否定的なものが多く示されたため、現在のところこのアイデアに基づく翼のデザインは商業ベースで実用化されていない。二次元数理モデルの難しさは、流れ領域が三枚の翼

からなる三重連結領域で表現されることにあるが、これは本 CREST 研究によりその理論的取り扱いが可能になった。そこで、主翼の背後に二枚の複翼を取り付けた三枚翼を一様流中においた流れの問題としてモデル化し、その中で定常点渦が翼まわりに存在できるか、またその定常点渦があることで翼全体に加わる揚力がどのように変動するかについて調べた。また、補助翼がこれらの解構造にもたらす影響を明らかにするために、**Saffman**と**Sheffield**が70年代後半に提案した単翼モデル(図 5: 単翼の定常点渦(右図))との比較を合わせて行った。



その結果、揚力増加を図る定常解の存在は **Kasper** 翼および単翼の両モデルとも数値的に確認された。線型安定性については、多くの配置に対して

複翼を持つ **Kasper** 翼に対する定常点渦の方が単翼に対する定常点渦よりも線型安定(中立安定)になる傾向が強いことが確認され、複翼により定常に点渦が存在できることを示唆した。(図 6 に計算例)

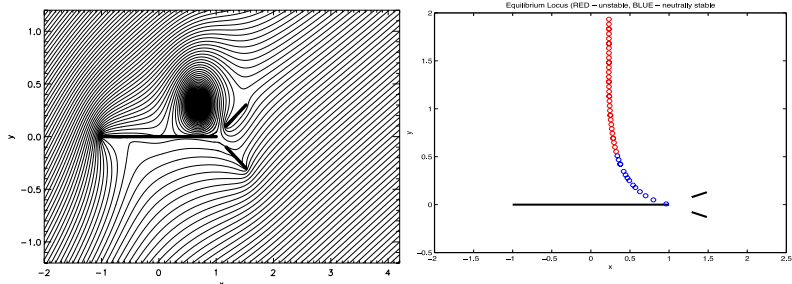


図 6 (右)**Kasper** 翼の定常点渦 (左)定常点渦列の安定性：青は中立安定、赤は不安定な定常解

- 揚力増加定常点渦の非定常流れ中の堅牢性に関する研究

上記における線型安定性解析の結果は力学系理論としては正しいが、流体力学的には不十分なものである。というのも翼を表現するスリットの端点に現れる流れの特異性を避けるために定常点渦モデルに課されている Kutta 条件が、微小摂動によって満たされなくなるために流体力学的意味ではモデルの要請を満たさなくなるからである。この問題を解決すべく、摂動後の毎時刻において Kutta 条件が満たされるよう翼端から点渦を放出するよう Kasper 翼モデルを改良して、点渦が継続的に生成され流れ場中に射出されるような非定常流れ場の中でも揚力増加定常点渦が安定にとどまりつづけられるか(これを堅牢性と呼ぶ)を調べた。その結果、単翼モデルではほぼすべての場合において定常点渦は短時間で翼から離れていくのに対して、Kasper 翼モデルでは複翼のおかげで非常に長い時間において翼の周辺にとどまり続けられることが数値的に確認された。これは複翼によって渦の閉じ込めが効果的に行えることを示唆する結果となった。

- 定常点渦の長期閉じ込めを実現する線型フィードバック制御機構の開発

Kasper 翼まわりの定常点渦の堅牢性が確認できたものの、十分な時間がたつとこれらの定常点渦の多くはやはり不安定になって翼から離れるものが多いこともわかったので、より積極的にこれらの点渦の安定化を図るため、Kasper 翼モデルをベースとした線型フィードバック制御機構の数値モデルの構成を行った。具体的には、主翼の上側と下側の圧力差を計測し、それに応じて主翼にとりつけられたアクチュエータから流体を流入・吸引することで定常点渦を安定化させるという制御モデルである。

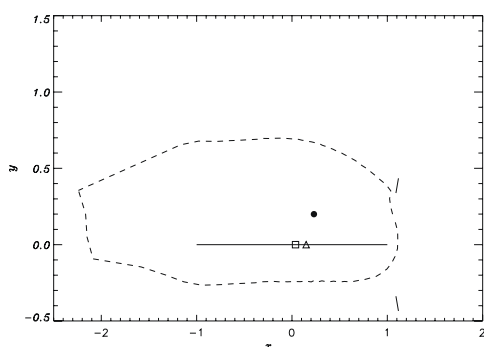


図 7 線型フィードバック制御機構による安定化可能範囲 (Basin of attractions)

このモデルの構成を Kasper 翼および単翼モデルの双方において成功した。その結果、単翼に比べて Kasper 翼ではかなりおおきな摂動(一様流の迎角の変化や翼端からの生成渦の射出といったかなり激しい変化を含む)に対しても点渦が安定化させられることがわかった。図 7 に安定化可能領域の計算例を示す。このことは本モデルをベースにした流体制御の可能性を強く示唆するものである。

- 二次元粘性流シミュレーションモデルへの実装

開発した Kasper 翼モデルは非粘性モデルであり現実の流れに比べて極めて理想的な状況を考えている。実際の流れの問題を扱うためには「粘性流体」および「三次元流れ」を扱う必要がある。そこで、まずは「粘性流体への対応を行うため、本非粘性モデルを仮想的な制御機構として、二次元粘性流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式のシミュレーションモデルに石原グループと共同して組み込むことで、渦閉じ込め制御システムとして機能するかどうかを調べている。

- 石鹸膜実験装置による Kasper 翼実証実験の実施

中間評価での指摘をうけて、非粘性 Kasper 翼の渦閉じ込めモデルとの妥当性の検討や粘性流体との比較を行うために、二次元石鹸膜実験装置の設計・開発を行った。設計にあたっては沖縄科学技術大学院大学から設計上の技術供与を、アイシン AW からは本装置の開発と寄贈を受けた。装置は京都大学内に設置し、定期的に二次元石鹸膜に物体を挿入して、そこに流れる流れの可視化を行った。その結果、Kasper 翼モデルと同様の翼配置を持つ物体を挿入すると、主翼まわりはかなり大きな渦構造が閉じ込められることを実証的に確認した。右(図 8)は渦閉じ込めの実験写真である。本実証実験は非粘性モデルとその粘性シミュレーションモデルの融合による渦閉じ込め機構の



図 8



実現の可能性が強く示唆するものである。

《本研究の位置づけ》上記の研究成果は、これまでに実現が難しいとされてきた、動的な渦閉じ込め制御の可能性を示す世界でも数少ないモデル研究の成果である。また石鹸膜実験装置との比較による研究は類がないものである。さらに、現代数学の研究成果である多重連結領域における流れの理論が可能にする、諸分野協働のための新しいブレイクスルー的研究として位置づけられる。

### [3] 多重連結領域における二次元非圧縮流れ場の位相分類理論とその応用

《概要》二次元の非圧縮流れ場は、流れ関数をハミルトニアンとするハミルトンベクトル場になっているという事実に着目して、そのハミルトニアンの等高線(流線)が作るパターンのうち微小摂動によってもその位相構造を変えない「構造安定な」流線パターンの位相構造を数学的に完全に分類した。これにより、generic な構造不安定な流線構造を通して構造安定な流れ場の位相構造の遷移も完全に記述することも可能になる。また、これらの分類がすべて位相構造に一意に割り当てられる簡便な文字列(語表現・グラフの正規表現)を通して行われるため、計算機の上にも実装可能なものとなっている。本成果は、単に数学的な新規性のみならず、諸分野へのブレイクスルーを創出する数学と諸分野研究者間の「共通言語」としての利用が可能である。その新規性や将来の市場性を考慮して本成果はすべて特許として出願を済ませている。なお、本研究は坂上グループ、荒井グループ、石原グループの共同研究として推進されたものである。詳細な研究成果は以下の通りである。

- 構造安定な流線の位相構造の分類理論と語表現理論と割り当てアルゴリズムの開発

二次元多重連結領域のハミルトンベクトル場のハミルトニアンの等高線パターンの位相構造を分類する研究である。特に、流体の問題への応用を意識して、一様流を表現できるように dipole の特異点を許す形で研究対象の拡張を行った。また、実験や数値計算で得られる流れのパターンには観測誤差や丸め誤差などが入ることを念頭に、微小摂動によってその位相パターンを変えない構造安定なものを取り上げて分類を行った。その結果、流線の位相構造は三種類の基本パターンに 5 種類の流線追加操作を帰納的に行うことで構成され、その操作列を並べることで文字列と対応させられることがわかった。このような対応を語表現(Word representations)とよび、数学的にパターンと語表現はパターンの集合のある同値類と一対一に対応することがわかった。図 9 は数値計算によって得られた流れのスナップショット、それに対応する流線パターンとそれに対して割り当てられた語表現である。複雑な流れパターンが簡単な数文字の文字列になることは情報圧縮の観点からも重要な意味を持つものである。

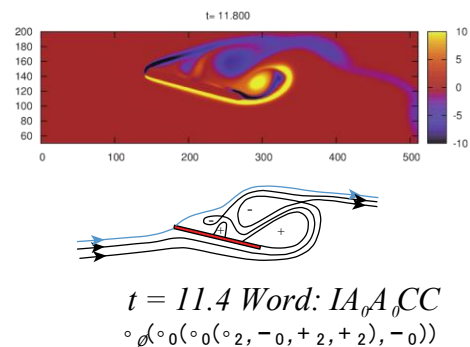


図 9 平板まわりの流れの渦度のスナップショットと流線トポロジー。その語表現 (IA<sub>0</sub>A<sub>0</sub>CC) とグラフの正規表現

- 構造不安定流線パターンを介した遷移過程の同定理論とそのアルゴリズムの開発

流体運動は時間発展を通じてそのパターンを刻一刻と変化させている。ある時間のスナップショットを取れば、それぞれは構造安定なパターンであるが、時間発展を通じてどのようにパターンが変化していくか記述することが重要である。いま、語表現理論により構造安定な流れパターンに対して固有の文字列が与えられることがわかったので、流体の時間発展は語表現の変化として記述されるはずである。そこで、この文字列の変化の情報だけから、どのような遷移が起こったのかを同定することは応用上も理論上も非常に重要である。本研究は、文字列の変化から 2 つの構造安定なパターンの遷移の間におこる中間パターンの数学的分類を行うものである。その結果、構造不安定なベクトル場集合全体で稠密な構造不安定ベクトル場の集合 (h-unstable vector fields, p-unstable vector fields) を通して遷移の generic な記述が可能

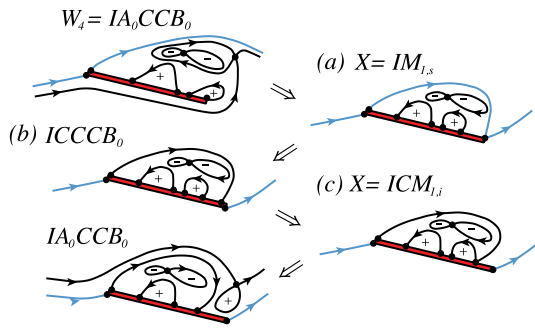


図 10 流線パターン遷移の記述例

となり、語表現文字列の変化から遷移のごく少数の可能性にまで絞り込めることが明らかになった。このような中間パターンは構造不安定であるため、構造安定性の観点からみたベクトル場全体の集合の位相構造を明確にすることとなり数学的には非自明なものである。また応用上はパターンマッチングではなく、文字列の比較だけで遷移の候補が同定できるという点できわめて高速かつ高性能な同定手法が提供されたことになる。図 10 は、ある流体の数値シミュレーションから得られる流れの時間発展とその割り当て文字列およ

びそこから同定された構造不安定な中間状態を表したものである。

本研究の結果、すべての構造安定なベクトル場が文字列となり、文字列からそれらの間の遷移が同定できるようになったため、与えられた境界の数に対してとりうるすべての構造安定な流線パターンとその遷移が書き下せる。個々のパターンをノード、その遷移をエッジとしてつなぐことでベクトル場全体の遷移構造を複雑グラフ（遷移グラフ）として表現することが可能になった。図 11 は境界の数が 3 とした場合の遷移グラフである。これはベクトル場の遷移の離散構造を明らかにするものである。

- 語表現理論の流体シミュレーション結果への応用による遷移の語表現記述

上記語表現理論の流体問題への応用として、一樣流中の平板まわりの流れのシミュレーションに語表現を割り当て、その流線パターンの遷移と平板に加わる揚抗比との対応関係を調べた。その結果、平板上の渦閉じ込め状態を表すものとして文字列  $B_0CC$  がその語表現の中に含まれているとき揚抗比は最大になっていることがわかり、本 CREST の基本コンセプトである渦閉じ込めによる効果的な流体デザインを表現している。

- 構造安定な流線の位相構造に一対一に対応するグラフ表現とその正規表現の研究

上記語表現理論による遷移の同定において、語表現の比較による少数の遷移の候補が与えられるが、それを一意に決定するためにはパターンマッチング的手法に頼らざるを得なかった。その問題は流線パターンの語表現がパターンの同値類としか一対一に対応しないという事実由来する。その問題を解決するために、構造安定な流線パターンと一対一に対応する別の表現を検討した。語表現理論では流線の位相パターンを決定する特徴的な流線構造に着目して分類を行ったが、逆にこうした特徴的な流線による平面の分割問題と双対的な側面で問題を捉え直すことで、平面の分割が 1 つの平面ツリーに一対一に対応することが明らかになった。また、一般のグラフ理論によれば、こうした平面ツリーには正規表現という文字列表現が存在することが知られていることから、それをを用いると構造安定な流線の位相構造には正規表現が一対一に対応することが示された。図 12 は  $IA_0C$  で表現される流線パターンの同値類に対応するグラフ表現とその正規表現である。このように同じ語表現を持つパターンは異なるグラフ表現によって分類可能である。流線パターンの語表現と

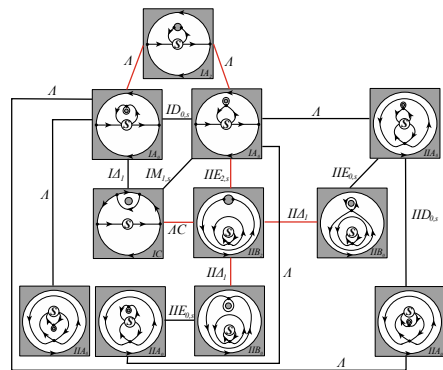


図 11 境界の数が 3 の時の全てのパターンとそれらの間の遷移グラフ

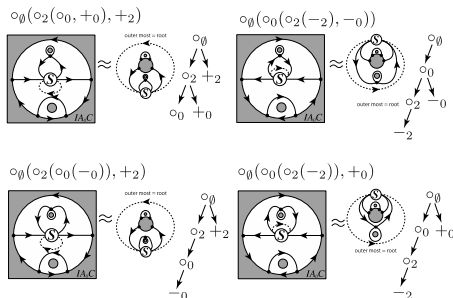


図 12 語表現  $IA_0C$  をもつパターンのグラフ表現とその正規表現

正規表現を合わせることで高速にパターンの遷移がパターンマッチングによることなく語表現と正規表現の比較のみで、一意に決定できることとなった。

- 特許展開と今後の展望

本研究課題の成果は、その新規性や計算機への実装の親和性を考慮して、国内出願(4件)と国際 PCT 出願(3件)をすませ、年度末までにあと1件の国際 PCT 出願を予定している。流線位相構造の最適化という問題は、これまでにその可能性が検討されていなかったものであるが、本技術をベースにしてそれが可能になるため、本特許を基礎特許とする今後の展開が可能であると考えている。その数学的な斬新さもあって、本技術の流体機械への具体的な特許の適用例はないが、本 CREST 研究で行ったラボ・ステイなどを通じて情報交換をした企業との今後の共同研究などを通じて具体的な展開を行う予定にしている。

《本成果の位置づけ》本研究成果は、本 CREST によりもたらされた新しい数学的成果である。数学的には二次元向き付け可能多様体上のベクトル場のホッジ分解におけるハミルトニアン成分の位相的特徴付けを与えるものであり、勾配成分の位相分類理論であるモース理論の数学的対応物を与えるので、今後の数学的研究の展開が期待される。また、計算科学的には、本流線位相の特徴づけは流体運動の長時間にわたる計測やシミュレーションの結果えられる巨大な時系列データを流線トポロジーの視点から非常にわずかな文字列の遷移として記述できることを示唆しており、流れのビッグデータの圧縮のみならず離散構造のグラフ理論的把握を可能にするものである。これは、近年の離散数学や統計科学の発展とつながることによって、大きな展開が期待できる。また、語表現やグラフ表現に基づいた流れの位相構造を制御するというこれまでにない「流線位相パターンの最適制御」が可能になることを示唆しており、従来の流れ場中の翼などの形状の最適化ではなく、流れ場そのものを動的制御しようという、新しい最適制御理論に繋がる可能性がある。これは思いがけない制御のあり方であり、産業における具体的な問題に適用し、それを実現することができれば、新しい流体制御手法の確立に繋がると考えられる。

#### [4] 流体運動の渦・境界相互作用の数学理論

- 流体基礎方程式を用いた剥離現象の数学解析

多様体上の no-slip 境界付き Navier-Stokes 定常流、特に球面上において流線と境界が赤道と平行になる場合の定常流について考え、ユークリッド空間と異なり定常のプロファイルが或る複雑な ODE を満たす必要があることを示した。多様体上の境界層剥離を考える際に有用な結果である。

- 二次元多様体上の no-slip 境界条件付き Navier-Stokes 方程式の定常の数学解析

流体と壁の相互作用の数学的基礎となる境界層理論の数学解析を推進した。Ghil, Ma, Wang らが Navier-Stokes 方程式より導出した「剥離方程式」に対して、Chan 氏, Czubak 氏と共同研究(B-3)で、外微分や orthonormal moving frame といった微分幾何学概念を使って再構築し、球面などの多様体上の流体運動における剥離現象を考えることが可能とした。また、境界形状が流体運動にどのような影響を与えるかという問題意識のもと、「90度の角が非粘性流に与える影響に関する数学結果」に関する成果を得た。

### 3.2 渦・境界相互作用の力学系理論と流れ場位相解析ツールの開発(北海道大学 荒井グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

荒井グループでは、位相幾何学およびグラフ理論を用いた流れの解析手法について研究を進めた。主に [1] グラフクラスタリングアルゴリズムを用いた流れ構造の分解アルゴリズム; [2] 精度保証付き数値計算を用いた絡み数計算アルゴリズム; [3] コンレイ・モース理論や離散ホッジ理論を用いた流れの勾配的な構造の表現手法などの開発と改良を進めた。それぞれについての詳細は以下の通りである。

## [1] グラフクラスタリングアルゴリズムを用いた流れ構造の分解アルゴリズム

《概要》流れの相空間を漸近挙動などの力学系としての振舞いによって分解したいという要請は、理論的にも実用的にも重要なものであり、様々な研究が進められている。特に広く研究されている手法に **Lagrangian Coherent Structure** があるが、微分構造を用いた分解を行なうため、ノイズの乗った時系列の解析など、精密なデータが得られない場合には有効ではない。そこで本研究では、流れの有向グラフ表現のみを用いて相空間を分解する、よりロバストな手法を研究する。同様にグラフ表現を用いる研究としては、スペクトル分解の近似を用いるものや、マルコフクラスタリングを用いるものがあるが、これらは計算時間が頂点数の 3 乗に比例するという弱点があり、大規模な問題に用いるのは難しかった。本研究ではこの問題を解決すべく、より高速なアルゴリズムを、グラフクラスタリングアルゴリズムを応用して開発した。

本研究で中心的に用いるのは、ソーシャルネットワークの研究で開発された、**Peer Pressure Clustering** というアルゴリズムを改良したものである。このアルゴリズムはマルコフクラスタリングに比べると安定性では劣るものの、計算時間は頂点数の 2 乗のオーダーと圧倒的に高速であるため、流体の問題のように微細な構造を見るために細かいグリッドを用いなくてはならない問題にも適用が可能である。またこのアルゴリズムには、得られる分解の細かさをパラメータにより調節できるという利点もあり、見たい構造の細かさに応じて結果を調整することができる。

図 13 は格子ボルツマン法により計算した円筒回りの 2 次元流れと、それを本研究のアルゴリズムにより異なる分解の細かさで分解したものである。また、図 14 は石原グループにより計算された平板翼回りの流れに対してクラスタリングを実行した結果を表している。

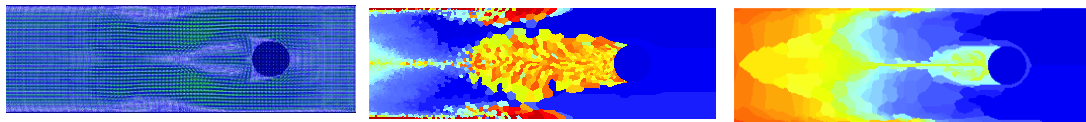


図 13 (左)円筒まわりの流れベクトル場 (中央) 荒い解像度でのグラフクラスタリング分解 (右) 精細な解像度でのグラフクラスタリング分解

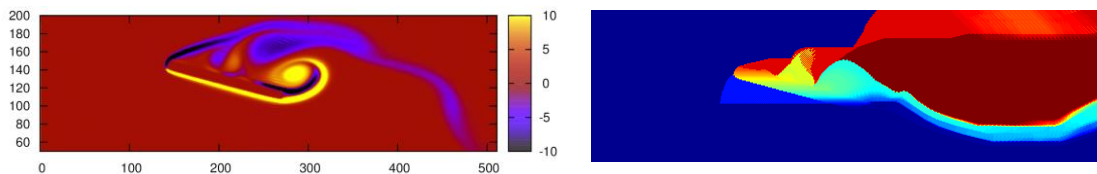


図 14 (左)平板翼まわりの渦度場 (右) そのグラフクラスタリング分解

《本成果の位置づけ》本研究成果で提案されたアルゴリズムは、その簡明さや適用範囲の広さに加えて、実用的な速度も得られていることから、今後より実用的な流体研究へと応用できる基礎的な成果を得られたものと考えられる。また、ソーシャルネットワーク研究という、一見まったく関係のない分野の成果を応用するものであり、異分野間の応用の成功例として、今後のさらなる協働を導く契機となることも期待できる。

## [2] 精度保証付き数値計算を用いた絡み数計算アルゴリズム

《概要》3 次元空間内の 2 つの閉曲線に対して定義される「絡み数」は位相幾何学の基本的な不変量であり、また電磁気学や流体力学でも重要な役割を担っているが、具体的にその計算を実行するのは簡単ではない。特に流線の時系列のような離散的なデータに対して計算を実行するのは難しかった。そこで本研究では、精度保証付き数値計算と立体角を用いたガウス積分の公式を組み合わせることで、離散的に与えられた曲線のデータに対して、その絡み数を厳密に計算するアルゴリズムを構築した。アルゴリズムは **MATLAB** コードとして公開されており、既に複数の研究者からの反響が得られている。また、コードは並列化が容易な設計となっており、大規模計算によりランダム結び目理論や乱流の統計理論への応用も期待される。

《本成果の位置づけ》様々な実験や計測の技術が進歩するとともに、我々は時系列などの大量の



データを手にするようになったが、その多くは 3 次元の点列として表現されている。そのため、3 次元のトポロジーにおいて基本的な役を果たす絡み目数を計算するアルゴリズムの重要性は今後ますます増大すると想定され、本成果で得られたアルゴリズムはそのような状況において今後の進展の基礎となるものであると位置づけられる。

### [3] コンレイ・モース理論や離散ホッジ理論を用いた流れの勾配的な構造の表現手法

《概要》これは [1] の成果と関連するが、流れの構造をより広く力学系としての視点から捉えるものである。任意の力学系が再帰的(カオス的でもあり得る)な不変集合と、それら不変集合の間の勾配的な構造に分解できるというコンレイの基本定理を研究の指針として用いる。この視点からの研究として荒井や國府 CREST らによるコンレイ・モース分解の手法があり、これをまず流れのデータに適用する研究を進めた。しかしながら、特に乱流状態の流体のように全体が攪拌される構造においては、この手法は自明な分解しか与えないという弱点が見られた。[1]で述べたグラフクラスタリングは、このような状況においてもなお有意義な分解を得られるように開発されたものであるが、さらにこれと相補的な手法として、勾配的な構造を記述するリアプノフ関数の類似を構成する研究を進めた。問題としては通常のリアプノフ関数が構成できない系において、なるべくリアプノフ関数に「近い」性質を持つ関数を見つけようというものである。本研究では「近さ」のある種の最適化問題として定式化すると、実はその最適解が離散ホッジ分解により得られることを示し、それにより具体形に関数を構成するアルゴリズムを構築した。

《本成果の位置づけ》本成果においては、得られたアルゴリズムの応用可能性も期待できるが、それ以上に数学的に研究の方向付けが得られたことが重要であると考え。すなわち、流体の分解やクラスタリングの問題をコンレイの基本定理の範囲で捉えることにより、分解の理論的な限界や、力学系の他の手法との関連が明らかになり、今後の研究に指針を与えることが出来た。

## 3. 3 渦・境界相互作用の大規模直接数値計算による研究(名古屋大学 石原グループ)

### (1) 研究実施内容及び成果

石原グループでは、渦・境界相互作用の大規模直接数値計算に基づく研究、および、数学と流体数値計算の協働による研究の推進を実施した。大きく分けて 4 つの研究内容とその成果がある。[1] 平行平板間乱流および乱流境界層の大規模直接数値計算を用いた壁近傍の渦構造の解析; [2] 一様等方性乱流の大規模直接数値計算を用いた高レイノルズ数乱流中の渦構造の解析; [3] Volume Penalization (VP) 法を用いた流れの数値計算による数学モデルの検証; [4] トポロジーの解析ツールを用いた流れ場の解析である。各成果の内容と成果は以下の通り。

#### [1] 平行平板間乱流および乱流境界層の大規模直接数値計算を用いた壁近傍の渦構造と統計の解析

《概要》

##### ① 平行平板間乱流の大規模直接数値計算

平行平板間乱流の大規模 DNS (格子点数 2048 x 1536 x 2048) を実施し、壁乱流データベース ( $R_\tau = 2560, 5120$ ) を構築した。図 15 はデータの可視化例である。

得られたデータを解析し、高レイノルズ数壁乱流の対数領域における、非等方性についての普遍的な統計法則を見出した。また、高レイノルズ数壁乱流における壁近傍の強渦

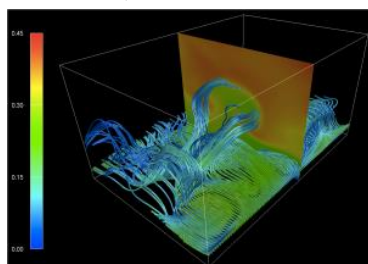


図 16 壁近傍のヘアピン渦

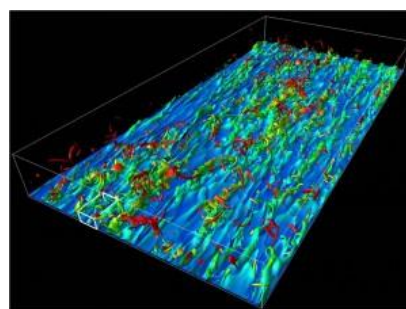


図 15 平行平板間乱流の壁近傍の強渦領域

度領域の渦度ベクトル場の構造と渦度各成分の高次統計量の間

の関係についての解析を実施し、壁近傍の強いヘアピン渦(図 16)が高次統計に寄与していることを明らかにした。

平行平板間乱流に対し、ウェーブレット変換を用いたコヒーレ

ント渦の抽出を行い、少数のウェーブレット係数で壁近傍の渦が再現できることを発見した。

## ② 乱流境界層の大規模直接数値計算

乱流境界層の乱流・非乱流界面近傍の条件付き統計解析を実施し、乱流・非乱流界面がテイラー長でスケールする乱流・非乱流遷移層とコルモゴロフ長でスケールする表層(渦あり・渦なし遷移層)の2重構造であることを解明した。(図17)また、乱流・非乱流界面において速度変動の二点相関が急激に減少することを数値的に示した。

《本成果の位置づけ》

本研究成果は平行平板間乱流の大規模な直接数値計算(DNS)を実施することにより初めて得られたものである。特に、高レイノルズ数の壁乱流では対数速度領域において慣性領域(粘性に対して慣性が卓越するスケール領域)のエネルギースペクトルが観察されることを初めて実証した結果、および、高レイノルズ数壁乱流の対数速度領域における非等方スペクトルが高レイノルズ数の単純シア乱流で観察されるものと共通の性質を有する普遍的なものであることを示唆する結果は、高レイノルズ数壁乱流の性質を理解する上で重要なものである。

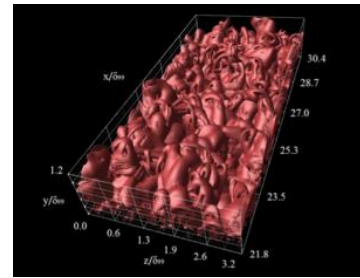


図17 乱流境界層の乱流・非乱流界面

## [2] 一様等方性乱流の大規模直接数値計算を用いた高レイノルズ数乱流中の渦構造の解析

《概要》一様等方性乱流の大規模直接数値計算結果を解析して、高レイノルズ数(Re)乱流中の強い渦構造が低レイノルズ数乱流中の渦構造と質的に異なることを明らかにした。高レイノルズ数乱流中では強い管状渦が密に集まり層状の組織構造(薄い剪断層)を形成することを明らかにした。(図18)

薄い剪断層は大きさが積分長程度、厚さがテイラー長のオーダーであり、剪断層内では正味のエネルギー散逸および大スケールから小スケールへのエネルギー輸送が平均の約10倍あり、エネルギー輸送の揺らぎが大きいこと、剪断層の厚さ以上のスケールにおいてエネルギーが剪断層の外部から流入していることを明らかにした。また、高レイノルズ数乱流中の剪断層には剪断層外部の速度変動をブロックする働きがあることを明らかにした。(図19)

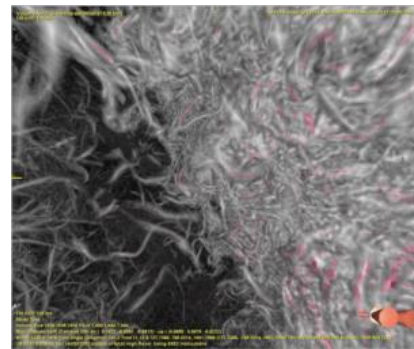


図18 高Re乱流中の強い渦の組織構造

《本成果の位置づけ》

本研究成果は、乱流・非乱流の遷移層の表層に渦あり・渦なしの境界としてのスーパーレイヤーが存在することをレイノルズ数の異なる複数の壁乱流DNSのデータを用いて明確に示したものである。従来、乱流・非乱流の遷移層とスーパーレイヤーの違いが曖昧で合ったが、本研究によりその違いが初めて明確になった。また、本研究により、乱流境界層の乱流・非乱流界面に、渦なし領域の流体の速度変動をブロックする働きがあることが数値的に初めて実証された。

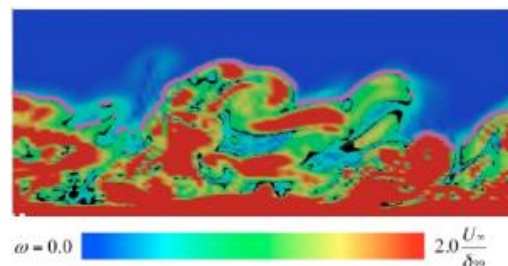


図19 乱流境界層中の渦度構造と乱流・非乱流界面

## [3] Volume Penalization (VP) 法を用いた流れの数値計算による数学モデルの検証

《概要》Volume Penalization (VP) 法を用いたスペクトル法に基づく数値計算法に渦を消滅させるプリンジ領域を導入し、任意形状を過ぎる二次元的流れの準定常状態の数値解析が可能であることを確認した。開発した数値計算法を用いて、坂上グループおよび荒井グループの流れ場の語表現開発を促進できた。

《本成果の位置づけ》

本研究は、レイノルズ数の増加とともに、乱流中の特徴的な強い渦構造が、低レイノルズ数における“孤立した管状渦”から高レイノルズ数における“管状渦が密集した薄い剪断層”に遷移することを解析及び可視化により示したものであり、今後、よりレイノルズ数の高い乱流の渦構造および間欠性を理解するための鍵となる知見を提供するものである。薄い剪断層の界面は速度変動をブロックするなど、壁乱流の乱流・非乱流界面と共通の性質を有しており、非一様な高レイノルズ数乱流の性質を理解する上でも重要な知見を与えている。

[4] トポロジーの解析ツールを用いた流れ場の解析

《概要》乱流燃焼の直接数値計算結果 ( $n$  ヘプタンの自己着火過程の直接数値計算結果) に対して、散逸要素解析を実施し、乱流による自己着火の遅れと温度場のトポロジーの変化 (散逸要素の数の変化) に強い相関があることを明らかにした。

(図 20)

また、温度場に対して、パーシステント・ホモロジーを用いた解析を実施し、異なる条件下で時間発展する温度場の特徴づけにパーシステント図およびパーシステント図間に導入される距離による特徴付けが有効であることを確認した。

《本成果の位置づけ》

本研究では、数学と流体数値計算の協働により、数学 (トポロジー) の解析ツールが流体運動や流体中のスカラー場の時間変化の特徴付けに有効であることを明らかにした。今後、解析ツールを活用することにより、複雑流動場の類似点と相違点が定量的に明らかにされていくことが期待され、データサイエンスの新しい分野に発展する可能性がある。

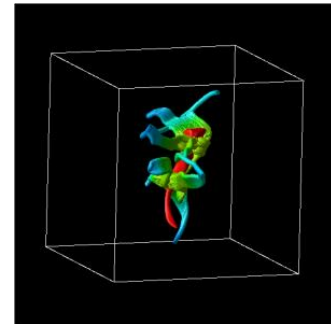


図 20 乱流燃焼の数値計算で得られた温度の散逸要素の例

## § 4 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 2件、国際(欧文)誌 50件)

1. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), Y. Amaya (Hokkaido Univ.), “Numerical construction of potential flows in multiply connected channel domains”, *Computational Methods and Function Theory*, vol. 11, no.2, pp.415-438, (2011)
2. Z. Arai (Hokkaido Univ.), K. Hayashi (Kyoto Univ.), Y. Hiraoka (Hiroshima Univ.), “Mayer-Vietoris sequences and coverage problems in sensor networks”, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, vol.28, no. 2, pp.237—250 (2011) doi: 10.1007/s13160-011-0039-8
3. K. Morishita (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “Small-scale statistics in direct numerical simulation of turbulent channel flow at high-Reynolds number”, *Journal of Physics: Conference series*, vol. 318, 022016 (2011) doi:10.1088/1742-6596/318/2/022016
4. T. Ishihara (Nagoya Univ.), J. C. R. Hunt (University College London), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “Conditional analysis near strong shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number,” *Journal of Physics: Conference series*, vol. 318, 042004 (2011) doi:10.1088/1742-6596/318/4/042004
5. N. Okamoto (Nagoya Univ.), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d’Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “Coherent Vorticity Simulation of Three-Dimensional Forced Homogeneous Isotropic Turbulence,” *Multiscale Modeling & Simulation*, Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 9, no. 3, pp.1144—1161 (2011) doi: 10.1137/10079598X
6. N. Okamoto (Nagoya Univ.), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d’Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), “Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint,” *Journal of Physics: Conference series*, vol. 318, 072035 (2011) doi:10.1088/1742-6596/318/7/072035
7. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Force-enhancing vortex equilibria for parallel two plate in uniform flow”, *Proc. Roy. Soc. A.*, vol. 468, pp. 1175—1195 (2012) doi: 10.1098/rspa.2011.0617
8. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Fixed equilibria of point vortices in symmetric multiply connected domains”, *Physica D*, vol. 241, no. 5, pp.583—599 (2012) doi: 10.1016/j.physd.2011.11.021
9. H. Koba (Waseda Univ.), A. Mahalov (Arizona State Univ.), T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Global well-posedness for the rotating Navier-Stokes-Boussinesq equations with stratification effects”, *Adv. Math. Sci. Appl.*, vol. 22, pp.61—90 (2012)
10. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), “Codimension one minimal foliations whose leaves have fundamental groups with the same polynomial growth”, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I*, vol. 350, pp.285—287 (2012)
11. G. Misiolek (Univ. Notre Dame), T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Ill-posedness examples for the quasi-geostrophic and the Euler equations”, *Analysis, Geometry and Quantum Field Theory*, Contemporary Mathematics, Amer. Math. Soc. Providence, RI, pp. 251—258 (2012)
12. S. Ibrahim (Univ. Victoria), T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Local solvability and loss of smoothness of the Navier-Stokes-Maxwell equations with large initial data”, *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 396, pp. 555—561 (2012)
13. C-H. Chan (National Chiao Tung Univ.), T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “On possible isolated blow-up phenomena and regularity criterion of the 3D Navier-Stokes equation along the streamlines”, *Methods and Applications of*

- Analysis, vol. 19, pp. 211—242 (2012)
14. N. Aoyama (Hokkaido Univ.), T. Sakajo (Hokkaido Univ.), H. Tanaka (Hokkaido Univ.), “A computational theory for spiral point vortices in multiply connected domains with slit boundaries”, *Japan J. Indust. Appl. Math.*, vol. 30, no. 3, pp. 485—509 (2013) doi: 10.1007/s13160-013-0113-5
  15. M. Yamada (Kyoto Univ.), T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Resonant interaction of Rossby waves in two-dimensional flow on a  $\beta$  plane”, *Physica D*, vol. 245, pp. 1—7 (2013)
  16. E. Foxall (Univ. Victoria), S. Ibrahim (Univ. Victoria), T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Streamlines concentration and application to the incompressible Navier-Stokes equations”, *Tohoku Math. J.*, vol. 65, pp. 273—279 (2013)
  17. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “A rigorous numerical algorithm for computing the linking number of links”, *Nonlinear Theory and Its Applications*, vol. 4, no. 1, pp. 104—110 (2013)
  18. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), “Minimal sets of  $R$ -closed surface homeomorphisms”, *Comptes Rendus Mathematique*, vol. 350, pp. 1051-1053 (2012)
  19. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), “On the relation between completeness and  $H$ -closedness of pospaces without infinite antichains”, *Algebra and Discrete Mathematics Journal*, vol. 15, pp. 287—294 (2013)
  20. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Word representation of streamline topologies for structurally stable vortex flows in multiply connected domains”, *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 469, (2013) doi: 10.1098/rspa.2012.0558
  21. T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Hattori (Tohoku Univ.), “Improvement of Reality of CG Motion Pictures by Hydrodynamic Effects: Effects of Turbulence”, *Proceedings of the 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, pp. 48-49 (2012)
  22. T. Ishihara (Nagoya Univ.), K. Mori (Nagoya Univ.), “Interactive visualizations of the large-scale data generated by the DNS of isotropic turbulence on  $4096^3$  grid points”, *Proceedings of JSST*, pp. 175—177 (2012)
  23. Y. Hattori (Tohoku Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “4D visualization of isotropic turbulence and dynamics of high-enstrophy structures”, *4D visualization of isotropic turbulence and dynamics of high-enstrophy structures*, *Proceedings of JSST*, pp. 170—174 (2012)
  24. D. Chae (Chung-Ang Univ.), T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “On the Liouville theorem for the stationary Navier-Stokes equations in a critical space”, *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 405, pp.706-710 (2013)
  25. S. Ibrahim (Univ. Victoria), T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “Long-time solvability of the Navier-Stokes-Boussinesq equations with almost periodic initial large data”, *J. Math. Sci. the Univ. of Tokyo*, vol. 20, pp. 1-25 (2013)
  26. C-H Chan (National Chiao Tung Univ.), T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “On the stationary Navier-Stokes flow with isotropic streamlines in all latitudes on a sphere or a 2D hyperbolic space”, *Dynamics of PDE*, vol. 10, pp.209—254 (2013)
  27. G. Misiolek (Univ. Notre Dame), T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “Ill-posedness examples for the quasi-geostrophic and the Euler equations”, *Analysis, Geometry and Quantum Field Theory, Contemporary Mathematics*, Amer. Math. Soc., Providence, RI, pp. 251—258 (2013)
  28. T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “ $R$ -closed homeomorphisms on surfaces”, *Topology and its Applications*, vol. 160, pp. 1870—1875 (2013)
  29. T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Recurrence, pointwise almost periodicity and orbit closure relation for flows and foliations”, *Topology and its Applications*,



- vol. 160, pp. 2196—2206 (2013)
30. T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), “Thin Shear Layers in High Reynolds Number Turbulence-DNS Results”, *Flow Turbulence Combust*, vol. 91, no.4, pp. 895—929 (2013)
  31. J.C.R. Hunt (Univ. College London), T. Ishihara (Nagoya Univ.), N.A. Worth (Univ. Cambridge), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), “Thin shear layer structures in high Reynolds number turbulence-Tomographic experiments and a local distortion model”, *Flow Turbulence Combust*, vol. 92, no. 3, pp. 607—649 (2013)
  32. Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), K. Morishita (Kobe Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Small scale universality and spectral characteristics in turbulent flows”, *Proceeding of TSFP-8, Poitiers (2013) INV2*
  33. J.C.R. Hunt (Univ. College London), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Hoarau (Univ. Strasbourg), M. Braza (IMFT), “Turbulence near interfaces-modeling and simulations”, *Proceedings of ERCOFTAC SYMPOSIUM on Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction*, pp. 55—60, (2013)
  34. T. Ishihara (Nagoya Univ.), H. Ogasawara (Nagoya Univ.), “Conditional analysis of statistics obtained near the turbulent-nonturbulent interface of turbulent boundary layers”, *Proceedings of ERCOFTAC SYMPOSIUM on Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction*, pp. 399—403, (2013)
  35. T. Sakajo (Kyoto Univ.), Y. Sawamura (Nagoya Univ.), T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Unique encoding for streamline topologies of incompressible and inviscid flows in multiply connected domains”, *Fluid Dynamics Research*, vol. 46, no. 3 (2014) 031411
  36. 坂上 貴之 (京都大学), 横山 知郎 (京都教育大学), 澤村 陽一 (名古屋大学), “二次元多重連結領域内における構造安定な非圧縮流れの文字列表現アルゴリズム”, *数理解析研究所講究録*, 1900 巻, pp.14—25 (2014)
  37. A. Kawaharada (Hokkaido Univ.), “Ulam's cellular automaton and Rule 150”, *Hokkaido Mathematical Journal*, vol. 43, no. 3, (2014)
  38. 石原 卓 (名古屋大学), 伊藤 貴政 (名古屋大学), 三木 貴史 (名古屋大学), 芳松 克則 (名古屋大学), 寺地 淳 (日産自動車), “ノルマルヘプタン予混合自己着火過程に対する温度非一様性及び乱流の影響の直接数値計算による解析”, *日本機械学会論文集*, vol.80, no.820 (2014) doi: 10.1299/transjsme.2014tep0
  39. R. Nelson (Kyoto Univ.), T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Trapped vortices in multiply connected domains”, *Fluid Dynamics Research*, vol.46, no. 6 (2014) 061402
  40. C-H. Chan (National Chiao Tung Univ.), M. Czubak (Binghamton Univ.), T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “An ODE for boundary layer separation on a sphere and a hyperbolic space”, *Physica D*, vol. 282, pp. 34—38 (2014)
  41. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Decomposition and Clustering for the Visualization of Dynamical Systems”, *Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis I, Mathematics for Industry*, vol. 4, pp. 13-20 (2014)
  42. Z. Yoshida (Univ. Tokyo), Y. Kawazura (Univ. Tokyo), T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Relativistic helicity and link in Minkowski space-time”, *Journal of Mathematical Physics*, vol. 55 (2014) 043101 doi: 10.1063/1.4872236
  43. T. Ishihara (Nagoya Univ.), H. Ogasawara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), “Analysis of conditional statistics obtained near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers”, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 53, pp.50—57 (2014) doi:10.1016/j.jfluidstructs.2014.10.008
  44. M.S. Nasser (King Khalid Univ.), T. Sakajo (Kyoto Univ.), A.H. Murid (Univ.

- Tek. Malaysia), L.K. Wei (Univ. Tek. Malaysia), “A fast computational method for potential flows in multiply connected coastal domains”, Japan J. Appl. Indust. Math., vol. 32, pp. 205—236 (2015) doi: 10.1007/s13160-015-0168-6
45. T. Sakajo (Kyoto Univ.), T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Transitions between streamline topologies of structurally stable Hamiltonian flows in multiply connected domains”, Physica D, vol. 307, pp. 22—41 (2015) doi:10.1016/j.physd2015.05.013
  46. T. Itoh (Hokkaido Univ.), H. Miura (Tokyo Inst. Tech.), T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “Remark on single exponential bound of the vorticity gradient for the two-dimensional Euler flow around a corner”, J. Math. Fluid Mech. to appear (2015)
  47. T. Ishihara (Nagoya Univ.), K. Enohata (Nagoya Univ.), K. Morishita (Kobe Univ.), M. Yokokawa (Kobe Univ.), K. Ishii (Nagoya Univ.), “Accurate Parallel Algorithm for Tracking Inertial Particles in Large-Scale Direct Numerical Simulations of Turbulence”, Parallel Computing Technologies, Lecture Notes in Computer Science, vol. 9251, pp. 522—527 (2015)
  48. T. Sakajo (Kyoto Univ.) and T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Tree representation of topological streamline patterns of structurally stable 2D Hamiltonian vector fields in multiply connected domains”, Under review
  49. P-Y. Hsu, H. Notsu (Waseda Univ.) and T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “A local analysis of the axi-symmetric Navier-Stokes flow near a saddle point and no-slip flat boundary”, J. Fluid Mech., accepted (2016)
  50. T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “A topological characterization for non-wandering surface flows”, Proc. Amer. Math. Soc., accepted (2016)
  51. T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Genericity for non-wandering surface flows”, J. Dyn. Control Systems, under review.
  52. R. Nelson (Kyoto Univ.), B. Protas (McMaster Univ.) and T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Linear feedback stabilization of point vortex equilibria near a Kasper Wing”, preprint.

(2) その他の著作物(総説、書籍など)

1. 荒井 迅 (北海道大学), “カオスと構造安定性”, システム/情報/制御, vol. 55, no.3, pp. 82—87, 2011年3月
2. 荒井 迅 (北海道大学), “圏論の歩き方・連載第1回「圏論と異分野協働—今出川不純集会」”, 数学セミナー」2011年7月号, vol. 589, pp. 57-62 (日本評論社) 2011年6月
3. 荒井 迅 (北海道大学), “圏論の歩き方・連載第8回「歩き方の使い方／今出川不純集会, ふたたび」”, 数学セミナー」2012年3月号, vol.605, pp. 85-91 (日本評論社) 2012年2月
4. 坂上 貴之 (北海道大学), “数学の見方・考え方 流体现象の理解と数学:私の見方”, 数学セミナー6月号 特集=目指せ!「数学道」(日本評論社) 2012年5月
5. 澤村 陽一 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), “Volume Penalization 法による翼果まわりの流れの数値解析”, 生物流体力学及び関連する問題の研究 Study of bio-fluid mechanics and related problems RIMS 共同研究報告集, 101巻, 2012年
6. 坂上 貴之 (北海道大学), “〈数学と諸科学との協働の現場からの報告〉渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト—数学と諸分野との連携活動のアイデアと数学へのフィードバック—”, 雑誌「数学」(岩波書店) 2013年
7. 坂上 貴之 (北海道大学), “渦運動の諸相”, 数学連携研究センター発行 連携する数

学シリーズ (共立出版) 2013 年

8. 坂上 貴之 (北海道大学), “渦の数学が織りなす世界”, 越境する数学 (岩波出版)
9. 坂上 貴之 (京都大学), “見せる数学”, Science Window 冬号 2015 1-3 月号/第 8 巻 4 号 2015 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 26 件、国際会議 46 件)

1. T. Ishihara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number”, The School of Mathematical & Statistical Sciences (SoMSS) Seminar, Arizona State University, 2011/4/13.
2. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of high Re turbulence”, KITP Program: The Nature of Turbulence, University of California, Santa Barbara, USA, 2011/4/20.
3. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of high Reynolds number turbulence”, Seminar at the University of Hong Kong, 2011/6/16.
4. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Monodromy computation and its application to bifurcation analysis”, School and Conference on Computational Methods in Dynamics, Trieste, イタリア, 2011/6/20-7/8.
5. 坂上 貴之 (北海道大学), “多重連結領域の点渦力学”, 第 40 回数値解析シンポジウム, 鳥羽シーサイドホテル, 三重県, 2011/6/20-22
6. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Long time solvability of the Navier-Stokes-Boussinesq Equations and Related Topics”, 2011 ICIAM Satellite Meetings, University of Victoria, カナダ, 2011/7/12-15
7. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Global solvability of the rotating Navier-Stokes equations and related topics”, Minisymposium of ICIAM 2011, Vancouver, カナダ, 2011/7/18-22
8. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Topological and algebraic aspects of the monodromy and bifurcations of complex dynamical systems”, 応用トポロジー: 情報通信・生命科学との連携を目指して, JR 博多駅ビル 10F, 2011/8/30-9/2
9. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “On a generalized Bernoulli principle for the incompressible Euler equations”, Mathematics colloquium, Sungkyunkwan University, 韓国, 2011/9/15
10. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Point vortex dynamics in multiply connected domains and its applications”, International Conference on Fluid and Gas Dynamics, Zhejiang Normal University, 中国, 2011/9/23-27
11. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Topological approaches to coherent structures in fluid dynamics”, CCS Symposium Autumn 2011, 名古屋大学, 2011/11/1-2
12. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Long time solvability of equations in geophysical fluid dynamics”, SIAM Conference on Analysis of Partial Differential Equations, San Diego, 米国, 2011/11/14-17
13. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Long time solvability of equations in geophysical fluid dynamics”, Emerging Topics on Differential Equations and their Applications, Sino-Japan Conference of Young Mathematicians, Nankai University, 中国, 2011/12/5-9
14. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Force-enhancing vortex equilibria for two plates in uniform flow”, Hot Topic Workshop on Fluid Dynamics: Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields, NIMS, 韓国, 2011/12/12-14



15. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “High-performance computing of canonical high-Reynolds-number turbulent flows”, ICTS-TIFR Discussion Meeting-2011, Indian Institute of Science, Bangalore, 2011/12/15
16. 斉木 吉隆 (北海道大学), “カオス力学系の不安定周期軌道解析”, Kunitachi One-Day Symposium on Mathematical Sciences, 一橋大学, 2012/2/3
17. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), “Streamline topologies for structurally stable vortex flows in multiply connected domains and their word representations”, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, Centennial Hall, Kyushu University School of Medicine, 2012/3/12
18. 荒井 迅 (北海道大学), “トポロジーと計算機科学による力学系の大域計算理論への挑戦”, 力学的決定性と統計性の中間領域を探る IV, 関西セミナーハウス, 京都 2012/3/30
19. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), R. Nelson (Hokkaido Univ.), “Applications of vortex dynamics in multiply connected domains”, The 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2012), China National Convention Center (CNCC), 北京, 2012/8/21
20. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Point Vortex Dynamics in Multiply Connected Domains-Theory and Applications”, 4th China-Japan-Korea Conference on Numerical Mathematics, 大津, ピアザ淡海, 2012/8/25
21. 荒井 迅 (北海道大学), “計算トポロジーとその応用について”, 日本応用数理学会 2012 年度年会, 稚内全日空ホテル, 2012/8/30
22. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Plenary Lecture: Towards a mathematical study of offshore tsunami dynamics with vortex-boundary interactions”, International Innovation Workshop on Off Shore Tsunami Energy Dissipation and Peak Height Alleviation, 東北大学工学研究科, 2012/9/11
23. 荒井 迅 (北海道大学), “力学系・流体力学における計算トポロジー的手法について, 力学系の作る集団ダイナミクス—保存系・散逸系の枠組みを越えて—”, 京都大学数理解析研究所 111 号室, 2012/9/26
24. T. Ishihara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), “Strong thin shear layers in homogeneous high Re turbulence-structures and statistics”, First Multi-flow Conference on the Turbulent-Non turbulent interface, Madrid, Spain Oct 25-26, 2012
25. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “A Mathematical clue to the separation phenomena on the two-dimensional Navier-Stokes equation”, Harmonic Analysis and its Applications at Tokyo 2012, Tokyo Metropolitan University, 2012/11
26. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Strong Shear Layer in High Re Turbulence – DNS Results”, Mini Workshop on Urban Research a Review & Outlook on the Hong Kong Built Environment, 2012/12/7
27. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Mathematical theory of potential flows in multiply connected domains”, East Asian Core Doctorial Forum on Mathematics, The First Meeting, Kyoto University (Kyoto, Japan), 2013/1/21
28. 米田 剛 (北海道大学), “A Mathematical clue to the separation phenomena on the two-dimensional Navier-Stokes equation”, 京都大学数理解析研究所研究集会「非圧縮流の数理解析」, 京都大学, 2013/2
29. 米田 剛 (北海道大学), “フーリエ解析と回転場内の Navier-Stokes 方程式について”, 日本数学会年会・実函数論分科会特別講演, 京都大学 2013/3/12
30. R. Nelson (Hokkaido Univ.), “Trapped vortices in multiply connected domains: The Kasper wing problem”, IMA Special Workshop: Joint US-Japan Workshop for Young Researchers on Interactions among Localized Patterns in Dissipative Systems, IMA, Univ. Minnesota, USA 2013/6/6

31. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Topological Instability of Laminar Flows for the Two-dimensional Navier-Stokes Equation with Circular Arc No-slip Boundary Conditions”, PRIMA Congress, (Shanghai, China), 2013/6/24
32. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Encoding of streamline topologies for incompressible vortex flows in 2D multiply connected domains”, Pacific RIM Conference on Mathematics 2013, Sapporo Convention Center (Sapporo, Japan), 2013/7/1
33. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “On the monodromy and bifurcations of the Henon map”, The 6th Pacific RIM Conference on Mathematics 2013, Sapporo Convention Center (Sapporo, Japan), 2013/7/2
34. 坂上 貴之 (京都大学), “二次元多重連結領域における流線の位相構造の分類とその語表現”, 研究集会「渦の特徴づけ」, 北海道大学, 2013/7/31
35. T. Yoneda (北海道大学), “Topological Instability of Laminar Flows for the Two-dimensional Navier-Stokes Equation with Circular Arc No-slip Boundary Conditions”, 第2回岐阜数理科学研究会, 高山市, 2013/9/17
36. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Topological Instability of Laminar Flows for the Two-dimensional Navier-Stokes Equation with Circular Arc No-slip Boundary Conditions”, Fourth Japan-China Workshop on Mathematical Topics from Fluid Mechanics, Tokyo Tech. Univ. (Tokyo, Japan), 2013/9/19
37. T. Yoneda (北海道大学), “Local behaviors of the Navier-Stokes flow: swirling streamline and shear flow”, 「第9回非線型の諸問題」, 高知大学, 2013/9
38. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Mathematical and numerical studies of vortex-boundary interactions -- theory and applications”, The 15th Northeastern Asian Symposium on Method and Modeling for High Performance Scientific Computing, Chengdu (China), 2013/9/24
39. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Decomposition and Clustering for the Visualization of Dynamical Systems”, MEIS2013: Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis, Kyushu Univ. (Fukuoka, Japan), 2013/10/23
40. T. Yoneda (北海道大学), “Navier-Stokes 方程式に対する微分幾何学的考察について”, 幾何学コロキウム, 北海道大学, 2013/10/25
41. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “A differential geometric consideration on the Navier-Stokes flow and its numerical computation”, The analysis seminar, Binghamton Univ. (New York, USA), 2013/11/4
42. T. Yoneda (北海道大学), “A differential geometric consideration on the Navier-Stokes flow”, 第3回弘前非線形方程式研究会, 弘前大学, 2013/11/19
43. Tomoo Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Transitions of streamline topologies between structurally stable incompressible flows in multiply connected domains”, Dynamical Systems, Fluid Dynamics and Lagrangian Coherent Structures, 北海道大学, 2014/3/5
44. 坂上 貴之 (京都大学), “流体とトポロジー”, Top Runners' Lecture Collection of Science, 早稲田大学, 2014/3/10
45. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Mathematical and computational theory for inviscid and incompressible flows in multiply connected domains”, 2014 Japan-Taiwan Joint Workshop on Numerical Analysis and Scientific Computation, Kyoto, 2014/4/5
46. 石原 卓 (名古屋大学), Konstantin Mischaikow (Rutgers Univ.), “Vortical structures in homogeneous high Reynolds number turbulence”, 大阪大学ジョイントセミナー, 大阪大学, 2014/4/17
47. 米田 剛 (東工大), “ミレニアム懸賞問題: Navier-Stokes 方程式”, 応用解析特別講義, 茨城大学, 2014/6/3
48. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Rigorous verification of the first bifurcation problem of the Henon map”, The 10th AIMS Conference on Dynamical Systems,

- Differential Equations and Applications, Madrid Spain, 2014/7/10
49. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Vortical Structures in the DNS of Turbulence at Reynolds Number Higher Than  $10^4$ ”, Mini-Workshop for Turbulence Research, Hong Kong, China, 2014/7/11
  50. 坂上 貴之 (京都大学), “渦閉じこめの実現に向けて～二次元多重連結領域の渦力学から”, 数理解析研究所研究集会「乱流研究のフロンティア」, 京都大学数理解析研究所, 2014/7/25
  51. 米田 剛 (東工大), “オイラー方程式の C1 クラスにおける局所非適切性について, 研究集会 渦の特徴付け”, 北海道大学, 2014/7/30
  52. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Dissipation element analysis of an auto-ignition process in a homogeneous n-heptane/air mixture turbulence with temperature fluctuations”, JSPS Supported Meeting on Interscale Transfers and Flow Topology in Equilibrium and Nonequilibrium Turbulence, Sheffield UK, 2014/9/16
  53. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Vortical Structures in High Reynolds Number Turbulence ( $Re \sim 10^5$ ) by Large-Scale DNS on K computer”, Seminar at Imperial College London, London UK, 2014/10/8
  54. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Thin shear layers in homogeneous high Reynolds number turbulence and in turbulent boundary layer”, Seminar at Delft University of Technology, Delft Holland, 2014/10/10
  55. T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), “Local ill-posedness of the Euler equations in a critical Besov space”, 調和解析駒場セミナー, 東京大学 2014/10/25
  56. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Topics in mathematical and theoretical fluid dynamics”, 1st joint conference of A3 foresight program, Mathematics of fluid dynamics and material science, Jeju Korea, 2014/11/21
  57. 石原 卓 (名古屋大学), “Computational science of high Reynolds number turbulence”, 流体方程式の構造と特異性に迫る数値解析・数値計算, 名古屋大学, 2014/12/8
  58. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “On combinatorial and topological clustering of dynamical behaviors in fluids”, Numerical Methods and Analysis for Structures and Singularities in Fluids, Nagoya University, 2014/12/8
  59. 石原 卓 (名古屋大学), “乱流燃焼の大規模直接数値シミュレーション”, 第 22 回 LBM 研究会, 名古屋大学, 2014/12/19
  60. 石原 卓 (名古屋大学), “カノニカル乱流の大規模直接数値計算”, 第 27 回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」, 国立天文台 三鷹キャンパス, 2014/12/25
  61. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Entrapment of force enhancing vortex equilibria in the vicinity of the Kasper Wing”, Modern Applications of Complex Variables: Modeling, Theory and Computations, Banff Canada, 2015/1/15
  62. N. Okamoto (Nagoya Univ.), “Application of wavelet analysis to turbulence”, 2015 International workshop on computational science and engineering, Nagoya Univ., 2015/2/23
  63. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Direct numerical simulation and dissipation element analysis of an auto-ignition process in a homogeneous n-heptane/air turbulence with temperature fluctuations”, Workshop on conditional statistics along lines and trajectories in turbulence, RWTH Aachen Univ. Germany, 2015/8/24
  64. R. Nelson (Kyoto Univ.), “Linear feedback stabilization of point vortex equilibria near a Kasper Wing”, Recent developments in numerical analysis with special emphasis on complex analysis, Univ. Tokyo, Tokyo, 2015/7/24
  65. 荒井 迅 (北海道大学), “複素力学系のモノドロミー”, 第二回解析学の耳袋, 沼津プラ

ザヴェルデ, 2015/10/29

66. Z. Arai (Hokkaido Univ), "On combinatorial methods for dynamical systems and fluid mechanics", 16<sup>th</sup> RIES-Hokudai International Symposium, Hokkaido Univ., 2016/11/12
67. 坂上 貴之(京都大学) "二次元非圧縮流れの流線トポロジーの分類:連続流れに潜む離散構造", 応用数学合同研究集会セッション, 龍谷大学, 2015/2/18
68. T. Sakajo (Kyoto Univ.), "Mathematical modeling of 2D incompressible flow and an application to vortex entrapment model", Second Joint Workshop of China-Japan-Korea A3 foresight program, Xiamen Univ., China 2015/11/28
69. 石原 卓(名古屋大学), "カノニカルな古典乱流の大規模直接数値シミュレーション", 平成 27 年度物性研究所短期研究集会「量子乱流と古典乱流の邂逅」, 東京大学物性研究所, 2016/1/6
70. T. Sakajo (Kyoto Univ.), "Across Reynolds numbers: mathematical modeling and topological flow characterization for 2D incompressible flows", Kyoto University Winter School 2016 "From materials to life: multidisciplinary challenges", Kyoto Univ., 2016/2/24
71. 石原 卓(名古屋大学), "原始惑星系円板乱流と微惑星成長", 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京, 2016/3/15
72. T. Sakajo (Kyoto Univ.), "Mathematical modeling and topological characterizations for 2D incompressible flows across the Reynolds number", Beihang Univ., China 2016/3/25

② 口頭発表 (国内会議 115 件、国際会議 64 件)

1. 石原 卓(名古屋大学), 後藤 崇(名古屋大), 金田 行雄(名古屋大), "乱流混合層 DNS を用いた乱流/非乱流界面近傍の渦構造の条件付き統計の解析" 平成 22 年度共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 九州大学応用力学研究所, 2010/11/12
2. 岡本 直也(名古屋大学), 芳松 克則(名古屋大学), K. Schneider (Univ. d'Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), 金田 行雄(名古屋大学), "3 次元非圧縮性一様等方乱流における, ウェーブレット解析に基づく情報縮約", 平成 22 年度共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 九州大学応用力学研究所, 2010/11/13
3. 森下 浩二(名古屋大学), 石原 卓(名古屋大学), 金田 行雄(名古屋大学), "高レイノルズ数チャンネル乱流の局所等方性の DNS による検証", 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2010/12/22
4. 川原 康弘(名古屋大), 芳松 克則(名古屋大学), 岡本 直也(名古屋大学), "ウェーブレット解析に基づく電磁流体乱流の秩序構造シミュレーション", 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2010/12/20
5. 荒井 迅(北海道大学), "センサーネットワークのトポロジー", 第 2 回暗号及び情報セキュリティと数学の関連ワークショップ, 東京大学, 2010/12/27
6. K. Morishita (Nagoya Univ.), "Local-isotropy in Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow at High-Reynolds Number", 2011 SIAM Conference on Computational Science and Engineering, Reno USA, 2011/2/28
7. 坂上 貴之(北海道大学), "点渦力学と数値等角写像による新展開", 日本学術会議理論応用力学連合講演会 OS「多重連結領域問題の数値解析とその周辺」, 東京工業大学, 2011/3/10
8. 坂上 貴之(北海道大学), "多重連結チャンネル領域における流れ関数の構成", 日本数学会 2011 年度年会, 早稲田大学, 2011/3/22(震災で物理学会は中止になったものの、発表は成立とみなす事になりました)

9. 荒井 迅 (北海道大学), “トポロジーと計算機科学による力学系の大域計算理論への挑戦”, 本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011/3/26 (震災で物理学会は中止になったものの, 発表は成立とみなす事になりました)
10. 荒井 迅 (北海道大学), “Monodromy and bifurcations of the Henon map”, 九州力学系セミナー, 九州大学, 2011/4/19
11. 坂上 貴之 (北海道大学), “多重連結領域の点渦力学”, 広島大学 数理生命分子セミナー兼数学談話会, 広島大学, 2011/5/18
12. 横山 知郎 (北海道大学), “Fixed points of certain Anosov maps on Riemannian manifolds, Emergent Dynamics in Nonlinear Science”, 東京大学, 2011/5/26
13. 横山 知郎 (北海道大学), “Fixed points of certain Anosov maps on Riemannian manifolds”, 北海道大学幾何学コロキウム, 北海道大学, 2011/6/10
14. 坂上 貴之 (北海道大学), “二次元多重連結領域の完全流体の運動”, 東京大学, 東大 GCOE シンポジウム: 致死性不整脈の機序の解明, 東京大学駒場キャンパス, 2011/6/14-16
15. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Point vortex equilibria enhancing forces over two parallel plates”, The 7th East Asia SIAM Conference (EASIAM2011), 早稲田大学北九州キャンパス, 2011/6/29
16. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “On compressed computations for dynamical systems”, The 7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Vancouver カナダ, 2011/7/18
17. 坂上 貴之 (北海道大学), “多重連結領域の点渦力学とその応用”, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「オイラー方程式の数理: カルマン渦列と非定常渦運動 100 年」, 京都大学, 2011/7/20-22
18. 坂上 貴之 (北海道大学), “渦運動の数理”, 渦の特徴づけ, 北海道大学, 2011/8/3-5
19. 坂上 貴之 (北海道大学), “多重連結領域の点渦力学”, 仙台シンポジウム 2011, 東北大学, 2011/8/17
20. 荒井 迅 (北海道大学), “精度保証付き数値計算とその応用について”, マクロ経済動学の非線形数理, 京都大学, 2011/8/29
21. N. Okamoto (Nagoya Univ.), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d'Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), “Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint,” 13th European Turbulence Conference, Warsaw, Poland, 2011/9/12-15
22. T. Ishihara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “Conditional analysis near strong shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number”, 13 European Turbulence Conference, Warsaw, Poland, 2011/9/12-15
23. K. Morishita (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “Small-scale statistics in direct numerical simulation of turbulent channel flow at high-Reynolds number”, 13 European Turbulence Conference, Warsaw, Poland, 2011/9/12-15
24. 坂上 貴之 (北海道大学), “Point vortex dynamics in multiply connected domains and its applications”, Computer Science Seminar, 名古屋大学, 2011/10/24.
25. R. Nelson (Hokkaido Univ.), “Vortex dynamics in multiply connected domains and its applications”, CCS Symposium Autumn 2011, 名古屋大学, 2011/11/2
26. 森下 浩二 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), 金田 行雄 (名古屋大学), “高レイノルズ数平行平板間乱流DNSにおける小スケール統計”, 平成 23 年度共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 九州大学応用力学研究所, 2011/11/10-11/12
27. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Strong shear layers in high Reynolds number homogeneous turbulence,” CCS Symposium Autumn 2011, Nagoya University,

- 2011/11/1
28. 荒井 迅 (北海道大学), “Conley-Morse グラフ入門”, CTDS セミナー, 東京大学生産技術研究所, 2011/11/16
  29. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Monodromy and pruning front of the Henon map”, 力学系とトポロジーのフロンティア, 京都大学数理解析研究所, 2011/11/24
  30. K. Morishita (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “The structure of the vorticity field in the near-wall region of turbulent channel flow at high-Reynolds number,” 64th Annual Meeting of APS Division of Fluid Dynamics, Baltimore, USA, 2011/11/21
  31. Takashi Ishihara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “Strong thin shear layers in high Reynolds number turbulence,” 64th Annual Meeting of APS Division of Fluid Dynamics, Baltimore, USA, 2011/11/21
  32. 米田 剛 (北海道大学), “様々な惑星に存在する帯状流の純粋数学による定式化、及びそれに関連する話題について”, NLPDE セミナー, 京都大学, 2011/12/2
  33. 荒井 迅 (北海道大学), “周期倍分岐ふたたび”, 応用数学合同研究集会, 龍谷大学瀬田キャンパス, 2011/12/16
  34. 澤村 陽一 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), “Volume Penalization 法による翼果モデルまわりの流れの数値解析”, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 大阪大学コンベンションセンター, 2011/12/19-12/21
  35. 荒井 迅 (北海道大学), “力学系における特異点と次元”, 数理連携研究会「10 の根本問題の発掘」, 理化学研究所大河内記念ホール, 2011/12/26
  36. 米田 剛 (北海道大学), “Long time solvability of equations in geophysical fluid dynamics”, 「若手による流体力学の基礎方程式研究集会」, 名古屋大学, 2012/1/6
  37. 米田 剛 (北海道大学), “Long time solvability of equations in geophysical fluid dynamics”, 談話会(解析セミナー), 若手による流体力学の基礎方程式研究集会, 名古屋大学, 2012/1/5-6
  38. 米田 剛 (北海道大学), “様々な惑星に存在する帯状流の純粋数学による定式化、及びそれに関連する話題について”, 談話会(解析セミナー), 茨城大学, 2012/1/17
  39. 米田 剛 (北海道大学), “様々な惑星に存在する帯状流の純粋数学による定式化、及びそれに関連する話題について”, 談話会(解析セミナー), 茨城大学, 2012/1/17
  40. R. Nelson (Hokkaido Univ.), “Vortex dynamics in multiply connected domains and its applications”, Sakajo-Shibata CREST joint seminar, 早稲田大学, 2012/3/2
  41. 横山 知郎 (北海道大学), “ある 2 次元発散なし流れの分類とアーノルドの枠組みにおけるテーラーの仕事について”, Joint seminar with Shibata CREST, 早稲田大学, 2012/3/2
  42. 斉木 吉隆 (北海道大学), 江刺 邦彦 (北海道大学), “離散時間カルドアモデルのトラスについて”, Hayama Meeting VII, 湘南国際村 IPC 生産性国際交流センター, 葉山町, 2012/3/4-6
  43. R. Nelson (Hokkaido Univ.), “Fluidity – A general purpose adaptive unstructured finite-element Navier-Stokes solver”, AW Aisin laboratory stay, 三河安城, 2012/3/14
  44. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “A potential theory with point vortices in multiply connected domains with slits”, Applied Mathematics Seminar, The University of Pau, フランス, 2012/3/15
  45. 横山 知郎 (北海道大学), “Separateness and almost periodicity for topological dynamics”, 第 35 回トポロジーセミナー, たてやま夕日海岸ホテル, 千葉, 2012/3/17
  46. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Hyperbolicity by Computation”, IV Developers Workshop on the Conley-Morse Database Project, Kauai Beach Resort, Hawaii,

2012/3/20

47. 横山 知郎 (北海道大学), “Recurrence, pointwise almost periodicity and orbit closure relation for flows and foliations”, Dynamical Systems and Computation working seminar, 北海道大学, 2012/5/08
48. 横山 知郎 (北海道大学), “Recurrence, pointwise almost periodicity and orbit closure relation for flows and foliations”, 京都力学系セミナー, 京都大学, 2012/5/11
49. 澤村 陽一 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), “Volume Penalization 法による翼果まわりの流れの数値解析”, 京都大学数理解析研究所 研究集会「生物流体力学における同期および関連する現象」, 2012/5/21-5/23
50. R. Nelson (Hokkaido Univ.), “APPLICATIONS OF VORTEX DYNAMICS IN MULTIPLY CONNECTED DOMAINS”, The 8th East Asia SIAM Conference (EASIAM 2012), NTU, 台北, 2012/6/25
51. 米田 剛 (北海道大学), “2次元 Navier-Stokes 方程式による剥離現象の数学的考察について”, Kobe Analysis seminar, Kobe University, 神戸大学, 2012/6/28
52. R. Nelson (北海道大学), 坂上 貴之 (北海道大学), “Application of point vortex motion in multiply connected domains”, 日本流体力学会年会, 高知大学 朝倉キャンパス, 2012/9/16
53. 小笠原 浩樹 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), 金田 行雄 (愛知工業大学), “乱流境界層の直接数値シミュレーションを用いた乱流・非乱流界面の解析”, 日本流体力学会年会 2012, 2012/9/16-18
54. T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Classification of Streamline Topologies for Structurally Stable Vortex Flows in Multiply Connected Domains”, Ninth International Conference on Flow Dynamics, ホテルメトロポリタン仙台, 仙台, 2012/9/21
55. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), Takashi Sakajo (Hokkaido Univ.), “Word representation of streamline topology for structurally stable vortex flows in multiply connected domains”, Topological Dynamics in the Physical and Biological Sciences, seminar, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, 2012/10/9
56. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Algorithms and Word representations of streamline topology”, Tangled Magnetic Fields in Astro- and Plasma Physics, ICMS, 15 South College Street Edinburgh, 2012/10/18
57. T. Ishihara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), “Intense dissipative mechanisms of strong thin shear layers in high Reynolds number turbulence”, 65th Annual Meeting of APS Division of Fluid Dynamics, San Diego, USA, 2012/11/18
58. K. Morishita (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), “Small-scale statistics in direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re=5120$ ”, 65th Annual Meeting of APS Division of Fluid Dynamics, San Diego, USA, 2012/11/18
59. H. Ogasawara (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Conditional analysis of the statistics near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers”, 65th Annual Meeting of APS Division of Fluid Dynamics, San Diego, USA, 2012/11/18
60. 小笠原 浩樹 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), “乱流境界層の DNS における乱流・非乱流界面近傍の構造と統計”, 第26回数値流体力学シンポジウム, 2012/12/18-20
61. 荒井 迅 (北海道大学), “でたらめさの数学”, 拡がる数学 III, 岡山国際交流センター, 2013/1/13
62. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Algorithms and

- Word representations of streamline topology”, 2012 年度冬の力学系研究集会, 日本大学軽井沢研修所, 2013/1/13
63. 荒井 迅 (北海道大学), “On some practical computational problems in dynamical systems”, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「力学系と計算」, 京都大学, 2013/1/14
  64. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), “Almost periodic, recurrence, non-wandering property for decompositions”, 2012 年度冬の力学系研究集会, 日本大学軽井沢研修所, 2013/1/14
  65. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), T. Sakajo (Hokkaido Univ.), “Word representation of streamline topologies for structurally stable vortex flows in multiply connected domains”, 幾何学コロキウム, 北海道大学, 2013/1/25
  66. 横山 知郎 (京都教育大), “Word representation algorithm for divergence-free flows in multiply connected domains”, 第 1 回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿～冬の学校@指宿～, 休暇村指宿 (鹿児島県), 2013/1/31
  67. 石原 卓 (名古屋大学), “高レイノルズ数乱流中の強い渦の組織構造”, RIMS 共同研究 研究集会「偏微分方程式の背後にある確率過程と解の族が示す統計力学的な現象の解析」, 京都大学, 2013/2/14
  68. 森下 浩二 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), 金田 行雄 (愛知工業大学), “高レイノルズ数チャネル乱流の非等方スペクトル”, 九大応力研共同利用研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」, 2013/2/23
  69. 石原 卓 (名古屋大学), 小笠原浩樹 (名古屋大学), “乱流境界層の乱流・非乱流界面近傍の条件付き統計解析”, 九大応力研共同利用研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」, 2013/2/23
  70. T. Yokoyama (京都教育大), “Almost periodic, recurrent, non-wandering properties for foliations”, 日本数学会 2013 年度年会, 京都大学, 2013/3/21
  71. 坂上 貴之 (北海道大学), “多重連結領域における構造安定 な非粘性・非圧縮流れの流線の位相的分類とその語表現”, 日本数学会 2013 年度年会, 京都大学, 2013/3/23
  72. 荒井 迅 (北海道大学), “カオスの骨格”, 龍谷大学特別講義, 龍谷大学 (瀬田市), 2013/5/14
  73. 横山 知郎 (京都教育大), “Minimal sets of R-closed surface homeomorphisms”, 関東力学系セミナー, 東京大学, 2013/5/17
  74. T. Ishihara (Nagoya Univ.), H. Ogasawara (Nagoya Univ.), “Conditional Analysis of Statics Obtained Near the Turbulent/Non-Turbulent Interface of Turbulent Boundary Layers”, ERCOFTAC SYMPOSIUM on Unsteady Separation in Fluid-Structure, Mykonos, Greece, 2013/6/18
  75. J.C.R. Hunt (Univ. College London), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Hoarau (Univ. de Strasbourg), M. Braza (IMFT), “Turbulence Near Interfaces – Modelling and Simulations”, ERCOFTAC SYMPOSIUM on Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction, Mykonos, Greece, 2013/6/20
  76. 石原 卓 (名古屋大学), “高レイノルズ数乱流の渦構造について”, 「宇宙生命計算科学連携拠点」ワークショップ, 筑波大学, 2013/6/29
  77. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “Topological Instability of Laminar Flows for the Two-dimensional Navier-Stokes Equation with Circular Arc No-slip Boundary Conditions”, 京都大学数理解析研究所研究集会「調和解析と偏微分方程式」, 京都大学, 2013/7/10
  78. 坂上 貴之 (京都大学), “二次元多重連結領域の渦力学とその応用”, 京都駅前セミナー, 京都駅前キャンパスプラザ (京都市), 2013/7/19
  79. Y. Hattori (Tohoku Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Dynamic Geometrical Analysis of High-Enstrophy Structures in Isotropic Turbulence”, ETC14, Lyon,



- France, 2013/9/2
80. T. Ishihara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), “Thin Shear Layers In High Reynolds Number Turbulence-Dns Results”, ETC14, Lyon, France, 2013/9/3
  81. J. Hunt (Univ. College London), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), “Thin Shear Layers In High Reynolds Number Turbulence-A Coherent-structure Model”, ETC14, Lyon, France, 2013/9/3
  82. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Structure of the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers-DNS results”, Turbulence Colloquium TCM 2013, Sidi Bou Said, Tunisia, 2013/9/7
  83. N. Okamoto (Nagoya Univ.), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d’Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), “Directional multi-scale statistics of quasi-statis magnetohydrodynamic turbulence”, Turbulence Colloquium TCM 2013, Sidi Bou Said, Tunisia, 2013/9/7
  84. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Computational and dynamical complexities of the graph representation of dynamical systems”, 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Santa Fe Convention and Visitors Bureau (USA), 2013/9/9
  85. 坂上 貴之 (京都大学), “多重連結領域における構造安定な非粘性・非圧縮流れ場の分類とその語表現”, 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大学, 2013/9/12
  86. 石原 卓 (名古屋大学), Jha Pradeep (名古屋大学), 金田 行雄, J.C.R. Hunt (Univ. College London), “高レイノルズ数乱流中の剪断層の時間発展”, 日本流体力学会年会 2013, 2013/9/12
  87. 服部 裕司 (東北大学), 石原 卓 (名古屋大学), “一様等方性乱流中の高渦度領域の動的形状解析”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/25
  88. 中野 直人 (東北大学), “CREST「数学」領域における若手の活動について”, CREST 「数学」領域若手交流会, 2013/10/11
  89. 坂上 貴之 (京都大学), “二次元多重連結領域における非圧縮流体の流線構造の位相分類と語表現”, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「生物流体力学における流れ構造の解析と役割」, 京都大学, 2013/11/11
  90. J. K. Pradeep (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Temporal behavior of strong shear layers in high Reynolds number”, APS-66th Annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2013/11/24
  91. T. Ishihara (Nagoya Univ.), H. Ogasawara (Nagoya Univ.), J.C.R. Hunt (Univ. College London), “Structure of the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers - DNS results”, APS-66th Annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2013/11/26
  92. Y. Kaneda (Aichi Inst.Tech.), K. Morishita (Kobe Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Inertial Subrange Spectra in the Log-Law Layer of Turbulent Channel Flow”, APS-66th Annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2013/11/26
  93. 横山 知郎 (京都教育大), “多重連結領域上の構造安定なハミルトン流の遷移について”, 京都力学系セミナー, 京都大学, 2013/11/29
  94. R. Nelson (Hokkaido Univ.), “Vortex-vortex and vortex boundary interactions”, Hokkaido University Mathematics seminar, 北海道大学, 2013/12/4
  95. 荒井 迅 (北海道大学), “複素から見直す分岐理論”, 語ろう数理解析, 京都大学, 2013/12/14
  96. 坂上 貴之 (京都大学), “二次元多重連結領域における構造安定なハミルトンベクトル場の語表現とその応用”, HMMC セミナー, 北海道大学, 2013/12/16
  97. 大竹 悠介 (名古屋大学), 岡本 直也 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), “低磁

- 気レイノルズ数 MHD チャネル乱流における乱流・非乱流界面”, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013/12/17
98. 伊藤 貴政 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), “ノルマルヘプタンの自己着火過程の 3次元 DNS と温度場に着目したデータ”, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013/12/19
  99. 中野 直人 (東北大学), “遅延座標と主成分分析による スカラー時系列データ解析とその応用”, 2013 年度応用数学合同研究集会, 龍谷大学, 2013/12/20
  100. 石原 卓 (名古屋大学), J. Pradeep (名古屋大学), 金田 行雄 (愛知工業大学), J. Hunt (Univ. College London), “高レイノルズ数乱流中の薄い剪断層とその時間変化について”, 大スケール流体運動と乱流揺らぎ 京都大学数理解析研究所 共同研究集会, 2014/1/10
  101. 荒井 迅 (北海道大学), “On some practical computational problems in dynamical systems”, 京都大学数理解析研究所研究集会「力学系と計算」, 京都大学, 2014/1/14
  102. 松本 剛 (京都大学), “乱流を扱うひとつの方法とその応用”, 第 1 回 JST CREST 「数学」領域横断若手合宿, 指宿, 2014/2/1
  103. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “A differential geometric consideration on the Navier-Stokes flow and its numerical computation”, Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics, Hotel Nikko Nara, Nara, 2014/3/4
  104. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Graph Theoretic Algorithms for Dynamical Systems”, Lagrangian Coherent Structures and Dynamical Systems, 北海道大学, 2014/3/5
  105. 横山 知郎 (京都教育大学), “現在の研究とクレストと諸分野との連携について”, 「数学と諸分野の協働によるブレイクスルーの探索」研究領域懇話会・意見交換会 兼「数学と諸分野の協働」研究集会, 伊豆市, 2014/5/1
  106. T. Yoneda (Hokkaido Univ.), “A differential geometric consideration on the Navier-Stokes flow and its numerical computation”, Workshop on Lagrangian Coherent Structures and Dynamical Systems, Hokkaido Univ., Sapporo, 2014/3/7
  107. 中野 直人 (東北大学), “中野直人と応用数学 3 年～確率微分方程式を用いた時系列解析の理論と応用～”, JST「数学」領域懇話会・意見交換会兼「数学と諸分野の協働」研究集会, ラフォーレクラブ伊東, 伊東市, 2014/4/19
  108. 米田 剛 (東工大), “Navier-Stokes 流の局所的振る舞いに対する特性曲線法の応用”, 応用解析研究会, 早稲田大学, 2014/5/17
  109. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Combinatorial decomposition of flow structures”, Joint seminar between OIST and JST mathematics program on vortex-boundary interactions and wall-bounded turbulent flows, OIST, 2014/5/26
  110. T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Transitions of streamline topologies between structurally stable incompressible flows in multiply connected domains”, JOINT SEMINAR between OIST and JST mathematics program on vortex-boundary interactions and wall-bounded turbulent flows, OIST, 2014/5/26
  111. R. Nelson (Kyoto Univ.), “Robustness of point vortex equilibria in the vicinity of a Kasper wing”, Joint seminar between OIST and JST mathematics program on vortex-boundary interactions and wall-bounded turbulent flows, OIST, 2014/5/26
  112. 坂上 貴之 (京都大学), “構造安定な二次元ハミルトンベクトル場の位相分類異論とその流体现象への応用”, 明治大学非線型数理解析セミナー, 明治大学, 2014/6/2
  113. 荒井 迅 (北海道大学), “Monodromy and bifurcations of the Henon map”, 京都

- 大学数理解析研究所 研究集会「力学系:理論と応用の相互作用」, 京都大学, 2014/6/13
114. R. Nelson (Kyoto Univ.), “Robustness of point vortex equilibria in the vicinity of a Kasper wing”, EASIAM 2014, Pattaya Thailand, 2014/6/25
115. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Word representations of structurally stable Hamiltonian flows in multiply connected domains and its applications”, 2014 SIAM Annual Meeting, Chicago USA, 2014/7/9
116. N. Okamoto (Nagoya Univ.), Y. Otake (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Interfacial phenomena in turbulent magnetohydrodynamic channel flows in an imposed magnetic field”, Waves and Turbulence in Rotating, Stratified and Electrically, Conducting Fluids, Cambridge UK, 2014/7/21
117. 荒井 迅 (北海道大学), “つながりかたの数学”, 拡がりゆく数学 in 北海道, 北海道大学, 2014/8/9
118. 岡本 直也 (名古屋大学), “低磁気レイノルズ数電磁流体チャネル乱流における乱流・非乱流界面”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014/9/7
119. 坂上 貴之 (京都大学), “二次元非粘性・非圧縮流れの流線の位相構造の遷移”, 日本流体力学会年会 2014, 東北大学, 2014/9/15
120. 横山 知郎 (京都教育大学), “Relativistic helicity and link in Minkowski space-time”, 日本流体力学会年会 2014, 東北大学, 2014/9/16
121. T. Sakurai (Nagoya Univ.), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d’Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), K. Morishita (Kobe Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Coherent vorticity extraction in turbulent channel flow using orthogonal wavelets”, European Fluid Mechanics Conference 10, Copenhagen Denmark, 2014/9/18
122. T. Uda (Kyoto Univ.), “Numerical Verification for Elliptic Boundary Value Problem with Nonconforming P1 Finite Elements”, 16th GAMM-IMACS International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetic and Validated Numerics (SCAN2014), Wurzburg German, 2015/9/23
123. 坂上 貴之 (京都大学), “多重連結領域の流体運動の数値:数値解析・数値計算の側面から”, 京都大学数理解析研究所 共同研究集会「新時代の科学技術を牽引する数値解析学」, 京都大学数理解析研究所, 2014/10/9
124. 米田 剛 (東工大), “Local ill-posedness of the Euler equations in a critical Besov Space”, 九州関数方程式セミナー, 九州大学, 2014/11/7
125. T. Uda (Kyoto Univ.), “Numerical Verification for Elliptic Boundary Value Problem with Nonconforming P1 Finite Elements”, 1st joint conference of A3 foresight program, Mathematics of fluid dynamics and material science, Jeju Korea, 2014/11/23
126. R. Nelson (Kyoto Univ.), “Robustness of point vortex equilibria in the vicinity of a Kasper Wing”, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco USA, 2014/11/23
127. N. Okamoto (Nagoya Univ.), Y. Otake (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Interfacial phenomena in turbulent magnetohydrodynamic channel flows at low magnetic Reynolds number”, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco USA, 2014/11/23
128. T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), K. Morishita (Kobe Univ.), M. Yokokawa (Kobe Univ.), “Energy Spectra of Higher Reynolds Number Turbulence by the DNS with up to  $12288^3$  Grid Points”, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco USA, 2014/11/24
129. K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), T. Sakurai (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ.

- d'Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), K. Morishita (Kobe Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), "Coherent vorticity extraction in turbulent channel flow using anisotropic wavelets", 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco USA, 2014/11/24
130. T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), "Topics in Mathematical fluid dynamics", CMMSC seminar in dynamical system and differential equations, Shinchu Taiwan, 2014/11/24
131. 平田 亮介 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), "乱流境界層における慣性粒子の運動の直接数値シミュレーション", 第 28 回数値流体力学シンポジウム, タワーホール船堀, 2014/12/9
132. 浅田 宗志 (名古屋大学), 石原 卓 (名古屋大学), 芳松 克則 (名古屋大学), "ノルマルヘプタン予混合気の HCCI 乱流燃焼の散逸要素解析", 第 28 回数値流体力学シンポジウム, タワーホール船堀, 2014/12/11
133. 宇田 智紀 (京都大学), "非適合 P1 有限要素法による楕円型境界値問題の精度保証付き数値計算法", 応用数学合同研究会, 龍谷大学, 2014/12/20
134. 後藤田 剛 (京都大学), "Euler 方程式と Euler- $\alpha$  方程式について", 応用数学合同研究会, 龍谷大学, 2014/12/20
135. 横山 知郎 (京都教育大学), "Genericity for non-wandering surface flows", 2014 年度冬の力学系研究会, 日本大学軽井沢研修所, 2015/1/10
136. T. Gotoda (Kyoto Univ.), "The alpha point vortex system and enstrophy variations", 2015 East Asian Core Doctorial Forum on Mathematics, Taipei Taiwan, 2015 年 1 月 19 日
137. 坂上 貴之 (京都大学), "二次元ハミルトンベクトル場のグラフ表現とその応用", 東北大学数理連携フォーラム, 東北大学, 2015/1/26
138. 横山 知郎 (京都教育大学), "ミンコフスキー時空内の相対論的 helicity と絡み目", 東北大学数理連携フォーラム, 東北大学, 2015/1/26
139. T. Yoneda (Tokyo Inst. Tech.), "Loss of continuity of the solution map for the Euler equations", PDE seminar, Minneapolis USA, 2015/1/28
140. 横山 知郎 (京都教育大学), "Topological methods to analyze Hamiltonian surface flows and their applications", Workshop on dynamical systems and computation 2015, 北海道大学, 2015/3/5
141. R. Nelson (Kyoto Univ.), "Linear feedback stabilization of vortex equilibria near a Kasper Wing", ACCA-UK/JP First International Workshop, London UK, 2015/3/12
142. Z. Arai (Hokkaido Univ.), "On the monodromy and bifurcation of the Henon map, Dynamics", Imperial Collage London, UK, 2015/3/12
143. Zin Arai (Hokkaido Univ.), "On parameter loci of the Henon family", ACCA-UK/JP Workshop, Imperial Collage London UK, 2015/3/13
144. T. Ishihara (Nagoya Univ.), K. Morishita (Kobe Univ.), M. Yokokawa (Kobe Univ.), A. Uno (RIKEN AICS), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), "Direct numerical simulation of high Reynolds number turbulence by the K computer", JAPAN-RUSSIA WORKSHOP ON SUPERCOMPUTER MODELING, INSTABILITY AND TURBULENCE IN FLUID DYNAMICS (JR SMIT2015), Moscow, Russia, 2015/3/18
145. N. Okamoto (Nagoya Univ.), M. Domingues (INPE), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d'Aix-Marseille), "A daptive Wavelet Simulation for Weakly Compressible Flow Bounded by Solid Walls of Arbitrary Shape", 2015 SIAM Conference on Computational Science and Engineering, Utah USA, 2015/3/18
146. J.C.R. Hunt (Univ. College London), M. Moustou (Arizona State Univ.), A.

- Mahalov (Arizona State Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), J. Westerweel (TU Delft), M. Braza (IMFT), “Scalar and momentum transfer processes across stratified sheared turbulent interfaces”, Cambridge, UK, 2015/3/23
147. 後藤田 剛(京都大学), “ $\alpha$ 点渦系とエンストロフィー変動”, 日本数学会 2015 年度年会, 2015/3/24
148. 坂上 貴之(京都大学), “渦閉じ込めによる効率的な渦翼の実現を目指して”, 語ろう数理解析, 芝浦工業大学, 2015/5/16
149. 石原 卓(名古屋大学), “超多自由度複雑流動現象解明のための高効率な並列計算コード開発”, 名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト成果報告シンポジウム, 名古屋大学, 2015/6/3
150. T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Coherent vorticity in turbulent channel flow: a wavelet viewpoint”, Ninth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, The University of Melbourne, 2015/7/2
151. 石原 卓(名古屋大学), “超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 7 回 シンポジウム, THE GRAND HALL (品川), 2015/7/9
152. Z. Arai (Hokkaido Univ.), “Rigorous verification of the crossed mapping condition for holomorphic dynamical systems”, Theory and Practice of Real Computation, 明治大学, 2015/7/12
153. 坂上 貴之(京都大学), “Kasper 翼まわりの定常点渦閉じ込めの線型フィードバック制御モデル”, 京都大学数理解析研究所研究集会「乱流を介在した流体現象の数理解析」, 京都大学, 2015/7/23
154. 江畑畑圭(名古屋大学), 石原卓(名古屋大学), 白石賢二, 森下浩二, 中本泰史, 梅村雅之, “微惑星形成過程解明のための乱流の直接数値計算と粒子追跡”, 日本天文学会 2015 秋季大会, 甲南大学, 2015/9/10
155. 服部 裕司(東北大学), 石原 卓(名古屋大学), “一様等方性乱流中の高渦度領域の動的形状解析 II”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015/9/18
156. 石原 卓(名古屋大学), 森下 浩二(神戸大学), 横川三津夫, 宇野篤也, 金田行雄, 大規模直接数値シミュレーションによる乱流のエネルギースペクトル, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015/9/18
157. 荒井 迅(北海道大学), “力学系的・組み合わせ的な手法による流れの分解について”, 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015/9/26
158. 坂上 貴之(京都大学), “翼回りの定常点渦閉じ込めのフィードバック制御モデル”, 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015/9/26
159. 石原 卓(名古屋大学), 末吉 史弥, 荒井 迅, M. Konstantin, “ノルマルヘプタン予混合気自己着火過程の温度場のパーシステントホモロジーを用いた解析”, 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015/9/26
160. 末吉 史弥(名古屋大学), “ノルマルヘプタン予混合気自己着火過程における流れの役割解明のための数値実験”, 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015/9/28
161. 後藤田 剛(京都大学), “エンストロフィー変動に関する  $\alpha$  点渦系の数理解析”, 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015/9/27
162. 松本 剛(京都大学), “石鹸膜で見る渦閉じ込め現象”, JST シンポジウム 2105 22 世紀創造のための数学, アキバホール, 2015/9/28
163. 坂上 貴之(京都大学), “渦と事故目による効率的な渦翼の実現を目指して”, JST シンポジウム 22 世紀創造のための数学(第二部)ステーションコンファレンス東京, 2015/10/01
164. T. Yokoyama (Kyoto Univ. Edu.), “Tree representations of streamline topologies of structurally stable 2D Hamiltonian vector fields”, SIAM Conference on Geometric and Physical Modeling, Salt Lake City, USA, 2015/10/12
165. T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Hattori (Tohoku Univ.), “Analysis of complex

- spatiotemporal structures of vortices in high Reynolds number turbulence”, Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), Tohoku Univ., 2015/10/28
166. 荒井 迅(北海道大学), “複素力学系のモノドロミー”, 大自由度分子系における化学反応機序の理解と制御, 北海道大学, 2015/11/01
167. K. Morishita (Kobe Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), M. Yokokawa, A. Uno, “Energy spectrum in high Reynolds number turbulence - high resolution DNS results” American Physical Society 68th Annual DFD Meeting, Boston, 2015/11/24
168. K. Enohata (Nagoya Univ.), K. Morishita, T. Ishihara, “Relative diffusion of a pair of inertial particles in the inertial sub-range of turbulence”, American Physical Society 68th Annual DFD Meeting, Boston, 2015/11/23
169. T. Ishihara (Nagoya Univ.), K. Morishita, J. Hunt, “Thin shear layers in homogeneous high Reynolds number turbulence and in turbulent boundary layers”, American Physical Society 68th Annual DFD Meeting, Boston, 2015/11/23
170. T. Sakajo (Kyoto Univ.), “Classification and transitions of streamline topologies of structurally stable incompressible flows”, APS 68<sup>th</sup> Annual DFD Meeting, Boston, USA, 2016/11/24
171. 横山 知郎(京都教育大学), “ハミルトン曲面流を解析する位相的な手法とその応用”, ダイナミクス研究会中野, 明治大学, 2015/12/2
172. 荒井 迅(北海道大学), “On parameter loci of the Henon family”, 関東力学系セミナー, 東京大学, 2015/12/04
173. T. Ishihara (Nagoya Univ.), K. Morishita (Kobe Univ.), M. Yokokawa, A. Uno, Y. Kaneda (Aichi Inst. Tech.), “Direct numerical simulations of canonical high Reynolds number turbulence”, 2015 Japan-Russia Workshop, Nagoya Univ., 2015/12/10
174. N. Okamoto (Nagoya Univ.), Y. Otake (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), “Turbulent/non-turbulent interface in turbulent magnetohydrodynamic channel flows at low magnetic Reynolds number”, 2015 Japan-Russia Workshop, Nagoya Univ., 2015/12/10
175. 荒井 迅(北海道大学), “On topological and combinatorial computational methods for dynamical systems”, ダイナミクス研究会中野, 明治大学, 2015/12/15
176. 後藤田 剛(京都大学), “点渦3体衝突が引き起こすエンストロフィー散逸現象の数学解析”, 応用数学合同研究集会 2015, 龍谷大学, 2015/12/17
177. 石原 卓(名古屋大学), 宇野篤也, 森下浩二, 横川三津夫, 金田行雄, “高レイノルズ数乱流中の渦の組織構造とその時間発展”, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 九州大学, 2015/12/17
178. T. Matsumoto (Kyoto Univ.), “Mean flow reversal of a forced two dimensional flow in a no-slip square domain”, Naruto Workshop on Vortex Dynamics, Hotel Add-Inn Naruto Naruto, 2016/1/17
179. T. Gotoda (Kyoto Univ.), “Enstrophy dissipation in three  $\alpha$ -point vortex problem”, Naruto Workshop on Vortex Dynamics, Hotel Add-inn Naruto, Naruto, 2016/1/16

③ ポスター発表 (国内会議 10 件、国際会議 5 件)

1. Z. Arai (Hokkaido Univ.), H. Kokubu (Kyoto Univ.), I. Obayashi (Kyoto Univ.), “Capturing the global behavior of dynamical systems with Conley-Morse graphs”, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, ヒルトンニセコ, 北海道, 2011/6/10

2. 坂上 貴之 (北海道大学), “渦・境界相互作用の流体モデルの構築と応用”, 第2回数学領域シンポジウム, アキバプラザ, 秋葉原, 2011/9/7
3. 荒井 迅 (北海道大学), “渦・境界相互作用の力学系理論と流れ場位相解析ツールの開発”, 第2回数学領域シンポジウム, アキバプラザ, 秋葉原, 2011/9/7
4. 石原 卓 (名古屋大学), “渦・境界相互作用の大規模数値計算による研究”, 第2回数学領域シンポジウム, アキバプラザ, 秋葉原, 2011/9/7
5. N. Okamoto (Nagoya Univ.), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d'Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), “Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint”, Turbulence Colloquium Marseille 2011, 2011/9/26-30
6. K. Morishita (Nagoya Univ.), T. Ishihara (Nagoya Univ.), Y. Kaneda (Nagoya Univ.), “DNS study of the small-scale statistics in turbulent channel flow at high-Reynolds numbers”, CCS Symposium Autumn 2011, Nagoya University, 2011/11/1-2
7. N. Okamoto (Nagoya Univ.), K. Yoshimatsu (Nagoya Univ.), K. Schneider (Univ. d'Aix-Marseille), M. Farge (CNRS), “Intermittency of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint”, CCS Symposium Autumn 2011, 2011/11/1-2
8. 青山 直樹 (北海道大学), “Force-enhancement to two parallel plates by vortex/sink pairs”, 北東数学解析研究会, 北海道大学, 2012/2/17
9. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), “Almost periodicity, R-closedness, Minimality, Compactness, and Recurrence on surfaces”, ICTP-ESF School and Conference in Dynamical Systems, Trieste, Italia, 2012/6/5
10. 中野 直人 (東北大学), “確率微分方程式を用いたベクトル時系列データ解析と軌道の予測可能性”, 第1回 JST CREST 「数学」領域横断若手合宿, 休暇村指宿, 指宿市, 2014/1/31
11. T. Yokoyama (Hokkaido Univ.), “Word representation algorithm for divergencefree flows in multiply connected domains”, 第1回 JST CREST 「数学」領域横断若手合宿, 休暇村指宿, 2014/2/3
12. Y. Sawamura (Nagoya Univ.), “Numerical simulations of vortex generation and evolution around a maple seed using a volume penalization method”, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, Fukuoka, Japan, 2013/3/10-14
13. 中野 直人 (北海道大学), “Empirical Evaluation Formulae for Stochastic Differential Equation Modeling”, 統計数理研究所 数学協働プログラム ワークショップ「気象学におけるビッグデータ同化の数理」, 京都大学, 2015/3/20
14. 横山 知郎 (京都教育大学), “2次元ベクトル場を解析するトポロジカルな手法とその応用”, 第2回 JST CREST 「数学」領域横断若手合宿, 休暇村志賀島, 福岡市, 2015/3/9-3/11
15. 石原 卓 (名古屋大学), “宇宙規模流動現象解明のための計算科学”, 第7回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム, 筑波大学, 2015/12/20

#### (4)知財出願

##### ①国内出願 (4件)

1. 流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラム(二次元多重連結領域における構造安定な流れの分類アルゴリズム), 発明者: 坂上貴之, 横山知郎, 出願人: JST, 平成24年9月14日, 特願2012-203601号
2. 流体遷移分析装置、流体遷移分析方法、および、プログラム(一様流中におかれた物体に加わる揚抗比の遷移と流れパターン対応) 発明者: 坂上貴之, 横山知郎,

- 澤村陽一, 石原卓, 出願人:JST, 平成 25 年 8 月 27 日, 特願 2013-176146 号
3. 流体遷移経路取得装置、流体遷移経路取得方法、および、プログラム(二次元多重連結領域における構造安定な流れパターン間の遷移同定アルゴリズム) 発明人:坂上貴之, 横山知郎, 出願人:JST, 平成 25 年 11 月 6 日, 特願 2013-230678 号
  4. 「流れパターンの正規表現作成方法、正規表現作成装置、および、コンピュータが実行可能なプログラム」(二次元多重連結領域における構造安定な流れパターンのグラフ表現と正規表現, 語表現への変換アルゴリズム) 発明者:坂上貴之, 横山知郎, 出願人: JST, 平成 26 年 11 月 6 日, 特願 2014-226532 号

②海外出願 (3 件)

1. 流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラム(二次元多重連結領域における構造安定な流れの分類アルゴリズム) 発明人:坂上貴之, 横山知郎, 出願人:JST, 平成 25 年 8 月 1 日, PCT/JP2013/070939 号
2. 流体遷移分析装置、流体遷移分析方法、および、プログラム (一様流中におかれた物体に加わる揚抗比の遷移と流れパターン対応), 発明者:坂上貴之, 横山知郎, 澤村陽一, 石原卓, 出願人:JST, 平成 26 年 3 月 6 日, PCT/JP2014/056811 号
3. 流体遷移経路取得装置、流体遷移経路取得方法、および、プログラム(一様流中におかれた物体に加わる揚抗比の遷移と流れパターン対応), 発明者:坂上貴之, 横山知郎, 出願人:JST, 平成 26 年 11 月 6 日, PCT/JP2014/079512 号

③その他の知的財産権

該当無し

(5)受賞・報道等

① 受賞

1. 第 28 回 井上研究奨励賞, 米田 剛, 2011/12/26
2. 日本流体力学会論文賞, 金田 行雄 (名古屋大学大学院工学研究科・教授), 石原 卓 (名古屋大学大学院工学研究科・准教授), 横川 三津夫 (独立行政法人 理化学研究所), 板倉 憲一 (独立行政法人 海洋研究開発機構), 宇野 篤也 (独立行政法人 理化学研究所), 2012/2/18
3. 2012 年度 日本数学会賞建部賢弘賞, 米田 剛, 2012/9
4. 2014 年度 日本数学会応用数学研究奨励賞受賞, 西 慧, 2014/12
5. 2015 年度 日本数学会応用数学研究奨励賞受賞, 後藤田 剛 2015/12

② マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 理論社, 北大の研究者たち—7人の言葉—

③ その他

1. 坂上 貴之, “流体力学とトポロジー”, 京都大学数学教室公開講座「現代数学展望」, 京都大学, 2013/8/1
2. 坂上 貴之, “三つ編みとハンドミキサーの不思議な関係 --位相カオスの世界—“, 拡がる数学 IV & JST 数学キャラバン, 岡山大学, 2013/11/17
3. 松本 剛, ”乱流を扱うひとつの方法とその応用”, 第1回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿, 休暇村指宿(鹿児島県指宿市), 2014/2/1
4. 荒井 迅, ”ベクトル場の位相解析技法”, 応用数学チュートリアル 2014, かんぽの宿那覇レクセンター(沖縄県那覇市), 2014/2/22
5. 坂上 貴之(京都大学), 松本 剛(京都大学), “「ながれ」と歩む数学”, 明治大学科学技術研究所 2015 年度 第 1 回公開講座 数学者の夢〜うつろ「ながれ」から確



かなものをさがして, 明治大学, 東京, 2015/7/11

6. 坂上 貴之(京都大学), 松本 剛(京都大学), “トポロジーから見る「ながれ」”, 明治大学科学技術研究所 2015 年度 第 1 回公開講座 数学者の夢〜うつろう「ながれ」から確かなものをさがして, 明治大学, 東京, 2015/7/11

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

該当無し

②社会還元的な展開活動

- 本研究成果を元に, 文部科学省数学イノベーション委員会にて数学と諸分野連携について有識者として講演を行った。(平成 24 年 12 月 11 日)
- 本研究成果に伴う発明技術についてJST知的財産戦略センター新技術説明会にて「流れのパターンを言語化し, 流体設計を最適化する新アルゴリズム」を一般向けに講演を行った。(平成 25 年 12 月 8 日)
- 一般向けの公開講座での講演
  - (1) 平成 24 年 8 月 5 日 北海道大学オープンキャンパス(札幌)
  - (2) 平成 25 年 8 月 1 日 京都大学数学教室公開講座(京都)
  - (3) 平成 25 年 11 月 20 日 岡山大学拡がる数学 IV(第 9 回数学キャラバン)(岡山)
  - (4) 平成 26 年 8 月 9 日 拡がりゆく数学 in 北海道 (第 10 回数学キャラバン)(札幌)
  - (5) 平成 27 年 7 月 11 日 明治大学公開講座(東京)
  - (6) 平成 27 年 8 月 2 日 北海道大学オープンキャンパス(札幌)
- 一般向けの解説書籍の執筆
  - (1)坂上 貴之(京都大学), 越境する数学「渦の数学が織りなす世界」, 西浦 廉政編, 岩波出版(平成 24 年 2 月 28 日)
  - (2)圏論の歩き方委員会(荒井迅が参加)編「圏論の歩き方」, 日本評論社(平成 27 年 9 月 8 日)
  - (3)石原 卓(名古屋大学), “自然や人工系の流体シミュレーション”, パリティ 30 巻 6 号 pp.34-36, 丸善出版(株), (平成 27 年 6 月)
  - (4)荒井 迅(北海道大学), “カオスと力学系”, 数理科学 2015 年 8 月号, pp. 7—13, サイエンス社(平成 27 年 7 月)
  - (5)坂上 貴之(京都大学), 化学工業 2 月号 「流れのパターンを言語化し流体設計を最適化するアルゴリズム」(平成 28 年 1 月)
- 学術書籍の発行  
坂上 貴之, “渦運動の数学的諸相” 共立出版(平成 24 年)
- 本研究成果をインターネット(URL; <http://www.math.sci.hokudai.ac.jp/crest/>)で公開し, 一般に情報提供している
- ラボステイによる交流会の実施(アイシン AW, 鉄道総合研究所, 沖縄科学技術大学院大学)
- 東北大学にて開催された津波の研究集会での基調講演  
平成 24 年 9 月 11 日 International Innovation Workshop on Off Shore Tsunami Energy Dissipation and Peak Height Alleviation
- 本成果における特許技術展開に向けた企業コンサルティングを開始した。(平成 28 年 3 月終了時点で 5 社からコンタクトがある.)

## § 5 研究期間中の活動

### 5. 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
22年12月3日	CREST 連携セミナー	北海道大学	8人	生命流体に関する専門知識の提供
23年7月25日	連携セミナー（慶応大学・相木雅次）	北海道大学	15人	Filament with Axial Flow in the Half Space
23年7月28日	連携セミナー（国立環境研究所・花崎直太）	北海道大学	19人	世界の水資源のコンピューターシミュレーション～いま何ができて、何ができず、これから何に取り組むべきか～
23年9月12日～9月13日	坂上・國府クレスト合同セミナー	北海道大学	21人	
23年10月7日	連携セミナー（名古屋大学・石井克哉）	北海道大学	13人	渦音セミナー
23年10月24日	国際計算科学セミナー	名古屋大学	27人	数学と流体力学の協働について
23年11月14日	連携セミナー（神戸大学・前川泰則）	北海道大学	15人	二次元半空間における渦度方程式の解公式とその応用
23年12月12日～12月14日	国際研究集会 Hot Topic Workshop on Fluid Dynamics: Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields	National Institute for Mathematical Science (韓国・大田)	30人	
24年3月2日	坂上・柴田クレスト合同セミナー	早稲田大学	20人	
25年5月21日	連携セミナー：Chaos, Predictability, and Data Assimilation (三好建正・理化学研究所)	京都大学大学院理学研究科（京都市・京都市）	15人	気象学におけるデータ同化の手法について議論した
25年6月3日～7日	IMA Special Workshop Joint US-Japan Conference for young researchers on interactions among localized patterns in dissipative systems	Institute for Mathematics and its applications (米国・ミネアポリス・ミネソタ大学)	50人	散逸系や生命流体などの非線型現象に現れるパターンダイナミクスの解析手法に関する若手研究者の研究討論会

25年6月11日	連携セミナー： Automated Generation and Optimization of PDE solvers (村主崇 行・京都大学)	京都大学大 学院理学研 究科 (京都 府・京都市)	15人	PDEの数値計算の効率 化を遺伝的アルゴリ ズムで行う自動ソル バーに関する講演お よび議論
25年7月1日～2 日	The 6 <sup>th</sup> Pacific RIM Conference on Mathematics 2013	札幌コンベ ンションセ ンター(北海 道・札幌市)	150人	Topological problems in fluid mechanicsな るセッションを企画 し、関係する国内外 の研究者の講演と討 論を行った
25年9月30日	連携セミナー：低レイ ノルズ数流れにおける 最適物体形状の探索 (近藤継男, (株)豊 田中央研究所)	京都大学大 学院理学研 究科 (京都 府・京都市)	15人	トポロジー最適加法 と呼ばれる最適化手 法を用いた低レイノ ルズ数の流れの最適 化問題についての講 演および議論
25年10月15日	連携セミナー： Interfacial dynamics and free boundary problems for oscillating membrane motions (Elliott Ginder・北海道大学)	京都大学大 学院理学研 究科 (京都 府・京都市)	15人	液滴や液膜などの自 由界面を伴う物理現 象の最小作用原理に もとづく数値計算手 法の解析と応用につ いての講演と議論
25年12月3日	連携セミナー： The spectral link in turbulent frictional drag and turbulent mean velocity profile (Pinaki Chakraborty, 沖縄科学技術大学院大 学)	京都大学大 学院理学研 究科 (京都 府・京都市)	15人	二次元石鹸膜実験装 置による実験で得ら れた乱流統計則とそ の理論に関する講演 と議論を行った。
26年1月24日	連携セミナー： Analysis of complex spatio-temporal patterns via computational algebraic topology (Konstantin Mischaikow, Rutgers Univ.)	名古屋大学 大学院工学 研究科(愛知 県・名古屋 市)	15人	様々なパターンから トポロジー情報を抜 き出す数学と数値計 算法, その乱流問題へ の応用について議論 した。
26年1月31日2 月2日	第1回JST CREST「数学」 領域横断若手合宿～冬 の学校	休暇村指宿 (鹿児島 県・指宿市)	50人	CREST チームの垣根 を越えた相互交流を 目的とする企画

26年2月22日 ～2月24日	応用数学チュートリアル2014	かんぽの宿 那覇レクセ ンター・沖縄 青年会館(沖 縄県・那覇 市)	50人	4CRESTにおける数理的 的手法の共有を図る チュートリアルセッ ションを行った。
26年5月13日	連携セミナーExtreme vortex states and the hydrodynamic blow-up problem (Bartosz Protas, McMaster Univ.)	京都大学大 学院理学研 究科(京都 府・京都市)	10人	流体方程式の解に対す る評価が最適になるよ うな特別な渦運動を最 適化問題として求める 数学的アイデアについ て議論した
26年5月26日	Joint Seminar between OIST and JST mathematics program on vortex-boundary interactions and wall-bounded turbulent flows	沖縄科学技 術大学院大 学(沖縄県・ 恩納村)	30人	本CREST研究の成果を 発表し、同大学院の研 究グループの研究紹介 を受けた
26年6月3日	連携セミナー： Hydrodynamics of cell swimming near boundaries(境界近傍に おける細胞遊泳の流体 力学)(石本健太, 京都 大学)	京都大学大 学院理学研 究科(京都 府・京都市)	10人	細胞遊泳における流体 力学に関する最近の研 究成果について説明を 受けた
26年10月14日	連携セミナー:A flow approach to an inverse problem in potential theory(小野寺有紹, 九州大学)	京都大学大 学院理学研 究科(京都 府・京都市)	10人	最近の講演者によるポ テンシャル論に関する 研究成果について説明 を受けた
26年11月18日	連携セミナー: Strong and weak (1,3) homotopy equivalence classes of spherical curves(伊 藤昇, 早稲田大学)	京都大学大 学院理学研 究科(京都 府・京都市)	10人	講演者による最近の結 び目理論に関する研究 成果について解説を受 けた
26年11月15日	連携セミナー: 共変リア リアプノフベクトルの 引き戻しによるラン ジェント軌道の数値解 析(山口崇幸, 広島大 学)	北海道大学 大学院理学 研究院(北海 道・札幌市)	8名	講演者の最近の力学系 の数値計算に関する話 題について解説を受け た
27年1月6日	連携セミナー： Evolutionary free boundary problems: their analysis and numerical simulation (カレルシュワドレン カ, 京都大学)	京都大学大 学院理学研 究科(京都 府・京都市)	10名	講演者の最近の自由境 界問題の数値解析に関 する成果について解説 を受けた

27年3月9日 ～3月10日	第2回「数学」領域横断 若手合宿	休暇村志賀 島（福岡県・ 福岡市）	30名	西浦領域 CREST に参加 する若手研究者による 研究発表が行われた
27年3月12日 ～3月13日	ACCA-UK/JP First International Workshop	インペリアルカ レッジロンドン （英国・ロ ンドン）	40名	英国インペリアルカ レッジロンドンの研 究者との国際共同研 究集会を行い、CREST 成果の発表と関連す る数学的手法と応用 に関する議論が行わ れた
27年4月21日	連携セミナー：The complexity issues on stochastic games（牧 野和久，京都大学）	京都大学大 学院理学研 究科（京都 府・京都市）	10名	講演者の最近の離散 最適化に関する研究 成果について解説を 受けた。
27年7月14日	連携セミナー： Behaviour of a low-Reynolds-number treadmilling microswimmer near a semi-infinite wall（小 布施祈織，岡山大）	京都大学大 学院理学研 究科（京都 府・京都市）	10名	講演者の最近の微小生 物のモデリングに関 する研究成果について 解説を受けた。
27年7月24日	研究集会 Recent developments in numerical analysis with special emphasis on complex analysis （共催）	東京大学工 学部（東京 都・文京区）	15名	近年の複素解析の応用 研究についての国際 研究集会を行った。CREST より3名の講演者を推 薦した。
27年7月28日	連携セミナー：Using the Schottky-Klein prime function to solve free boundary problems in multiply connected domains （Christopher Green, The Queensland Univ. of Technology）	京都大学大 学院理学研 究科（京都 府・京都市）	10名	講演者の最近の多重連 結領域における数理流 体力学に関する研究成 果について解説を受け た。
27年8月11日	ICIAM 2015, Mini-Symposium “Applied and computational complex analysis II”	China National Convention Center（中華 人民共和 国・北京）	20名	国際応用数学者会議に おいて左記のミニシン ポジウムをオーガナイ ズした。

28年1月15日 ～1月17日	Narto Workshop on Vortex Dynamics	ホテルアド イン鳴門（徳 島県・鳴門 市）	15名	渦力学に関する国際研 究集会をオーガナイズ した。
28年1月18日 ～19日	ACCA-JP/UK Second International Workshop	京都大学大 学院理学研 究科（京都 市・左京区）	50名	英国インペリアルカ レッジロンドンの研 究者との国際共同研 究集会を行い、CREST 成果の発表と関連す る数学的手法と応用 に関する議論が行わ れた

## § 6 最後に

- (1) 基礎研究:境界からの剥離渦の閉じ込めによる効率的な空力特性を持った流れの構成を目的として、Kasper 翼を題材にとって研究を進めた。その結果、基本的な非粘性・非圧縮流体の数理モデルの構築、大規模数値計算との比較、二次元石鹸膜実験装置による渦閉じ込めの実証実験、さらには渦閉じ込めを実現するフィードバック制御モデルの提案までを一貫して行えたことは当初の想定を大きく超える成果であった。また、二次元多重連結領域ハミルトン流れの流線構造の位相分類理論は当初全く想定されなかった数学的にも非自明な研究成果である。両成果とも数学の基礎研究の観点からも満足のものである。

これ以外にも、渦・境界相互作用に関わる数学基礎理論の展開は、坂上グループの米田の基礎研究に新しい研究テーマを提供し、数学研究者に新しい問題の枠組みを提供することにも成功した。Nelson が提供した Schottky-Klein Prime 関数の数値計算ライブラリは世界に向けて HP 上で公開され、現在インペリアルカレッジで推進されている Matlab 実装プロジェクトとの連携などを通じて、本関数を利用して多重連結領域の流体運動を研究する研究者への貢献となった。石原グループでは壁乱流の計算科学において京コンピュータを利用して世界における最高精度の数値計算を実現し、世界的に注目を浴びている。また、荒井グループからは位相幾何学の応用による流体運動の特徴づけに関する様々な手法が提案された。

一方、本 CREST において提案された、いくつかのアルゴリズムについて、その本格的な実装と諸分野への展開を十分に実現行うことができなかった。これは CREST 研究の推進途中でアルゴリズム実装に必要なプログラマを雇用する研究費が確保できなかったことによる。

- (2) 協働研究:「普通の数学者が諸分野研究に自然に取り組める体制を作る」ことを目的に企画された「連携セミナー」→「ラボ・ステイ」という流れは、実施件数は 8 件と少数ではあったものの、その 1 つ 1 つは研究面でも今後の展開を図るという観点でも成功を収めたと考えている。現代数学を学んだものが現場に飛び込み、集中的に現場の問題意識を共有することで、数学的にもまた応用上も意義有る結果に結びつけられることが実証できたと考えている。
- (3) 国際研究:当初はそれぞれの研究分野に関係する研究者の招聘が中心であったが、様々な国際研究機関での研究集会のオーガナイズにより広く本 CREST の成果を発表することとなった。のみならず、ACCA のように JST の支援を受けることで国際的な研究者コミュニティの形成の上で坂上 CREST が中心的な役割を果たすことができたことは当初の予定になかった成果である。
- (4) CREST 間連携活動:JST 数学西浦領域は数学という分野横断性の高い学問を中心としていること、さらに、さきがけ・CREST のハイブリッド領域として設定されたなどの特徴がある。坂上も含めさきがけから CREST へ移行した研究者が数多くいたというメリットも活かして、多くの CREST 間連携を実施することができた。これは、互いの CREST の数学的成果を活かし合う場としてそれぞれの CREST 研究に資するものであっただけでなく、そこに参加するそれぞれの博士研究員らの情報交換の場としても機能し、本領域の戦略目標達成に大きな貢献をなしたと考えている。
- (5) 若手研究者支援:坂上 CREST に参加する若手研究者は純粋数学、応用数学、計算科学などで学位をとったものであり、専門分野としてかなりヘテロな状況であった。これらの人々が 1 つ場所に集まりそれぞれが連携して成果が埋めるような運営を意識して行った。例えば、純粋数学の博士研究者による数学の結果のチュートリアル、応用数学者による流体数理の問題意識の説明、計算科学研究者による数値シミュレーション結果と理論の突き合わせなど、3 分野の研究者がそれぞれの専門を背景にして 1 つのプロジェクトの達成に取り組んだことは大きな成果となった。特に純粋数学を背景としてもつ研究者については、積極的に海外における応用数学研究所における研究集会へ派遣を行い、幅広く知識と問題意識を学ぶように心がけた。

また、ラボ・ステイ活動をきっかけとしてステイ先企業に就職した博士学生がいるなど若手研究者のキャリアパスの形成にも貢献した。