

坂上貴之

北海道大学大学院理学研究院・教授

渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト

## §1. 研究実施体制

### (1) 坂上グループ

① 研究代表者: 坂上 貴之 (北海道大学大学院理学研究院, 教授)

② 研究項目

坂上グループでは研究計画に基づき以下の研究を行った。

- [基礎研究] 多重連結領域の流体力学理論の数値的基礎となる Schottky-Klein-Prime 関数の数値計算ライブラリを整備した。
- [基礎研究] 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した。
- [基礎研究] 一様流中の平行平板流における点渦・吸い込み湧き出し対の定常配置の理論の構築した。
- [基礎研究] 渦による環境浄化を目指す Vortex Flushing の研究を行った。
- [基礎研究] 反復法に基づく標準円領域から任意スリット多重連結領域への新しい数値等角写像の手法を開発した。
- [協働研究] アイシンAWにおいてラボステイを実施した(平成24年2月・3月)
- [協働研究] 連携セミナーを計6回実施した。
- [協働研究] 國府クレスト・柴田クレストチームとの合同研究集会を行った。
- [国際研究] 韓国 National Institute for Mathematical Science(国立数学研究所)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。

### (2) 荒井グループ

① 主たる共同研究者: 荒井 迅 (北海道大学大学院理学研究院, 准教授)

## ② 研究項目

- [基礎研究] グラフクラスタリングアルゴリズムを用いて流体の **coherent structure** を計算し可視化するアルゴリズムを構築した.
- [基礎研究] 2次元非圧縮流体の幾何学的理論の流体力学への応用の研究を進めた.
- [基礎研究] **Conley-Morse** グラフ理論など, 大域的な力学系の計算アルゴリズムを, 流体力学などのより現実的な問題へ適用できるように改良を進めた.
- [基礎研究] セルオートマトンを用いたトポロジー最適化と格子ボルツマン法などのセルオートマトンを用いた流体計算を組み合わせる研究を行なった.
- [協働研究] アイシンAWにおいてラボステイに参加した(平成24年3月)
- [協働研究] 國府クレスト・柴田クレストチームとの合同研究集会を行った.

## (3) 石原グループ

① 主たる共同研究者: 石原 卓 (名古屋大学大学院工学研究科, 准教授)

### ② 研究項目

石原グループでは研究計画に基づき以下の研究を行った.

- [基礎研究] 平行平板間乱流の大規模直接数値計算(格子点数  $2048 \times 1536 \times 2048$ )を実施し, 壁乱流データベース( $Re=2560$ )を構築した.
- [基礎研究] 乱流の大規模直接数値計算のデータ解析を実施し, 高レイノルズ数乱流中の渦構造の定量的特徴付けについての研究を進めた.
- [基礎研究] **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FRINGE領域を導入し, 任意形状を過ぎる2次元流の準定常状態の数値解析が可能であることを確認した.
- [基礎研究] ウェーブレットを応用した乱流数値計算の情報縮約手法の開発・検証を行った.
- [協働研究] アイシンAWにおいてラボステイに参加した(平成24年3月)
- [国際研究] 名古屋大学において国際的な計算科学セミナーを実施した(平成23年 10月).
- [国際研究] 名古屋大学において, 国際シンポジウム「**CCS Symposium Autumn 2011**」を主催した(平成23年11月).

## § 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

### 《CREST研究体制の確定》

坂上チームは4月より技術補助員を9月より博士研究員を雇用し、CREST研究実施の体制を確定させた。荒井チームは4月より博士研究員と技術補助員を雇用した。坂上チームと荒井チームが協働してスムーズに研究活動を推進できるように北海道大学中央キャンパス棟にCRESTスペースをレンタルしそこを研究活動の拠点として利用した。石原チームは前年度に引き続き、4月より博士研究員と技術補佐員を雇用した。

### 《基礎研究》

A. 坂上チームの研究成果 本チームの基盤となる「多重連結領域における流体力学理論」の数学的・数値的基礎理論を構築した。具体的には多重連結円領域の流体の複素速度ポテンシャルを記述するのに用いられる Schottky-Klein-Prime 関数の数値ライブラリを整備した(ネルソン)、多重連結標準円領域から、任意のサイズや配置を持つ多重連結スリット領域への新しい数値等角写像の開発に成功した(田中・坂上)。また、生物流体における Falling Seeds モデルの基礎として、一様流中における点渦・吸い込み湧き出し対の問題の定式化に成功し、その定常配置問題の数値計算に成功した(青山・坂上)。これらの成果は現在論文としてまとめている。また、今年度は本 CRES 研究に関連して重要な数学的・数値的研究成果を二つ公表した。一つは対称性を持つ多重連結円領域における点渦定常配置に関する特徴づけ(坂上:A-2)を行ったこと、もう一つは一様流中におかれた平行平板流の中にある定常点渦配置が二枚の平板に加わる力を時計回り方向に加速することを明らかにしたことである(坂上:A-1)。これらの理論は点渦・吸い込み湧き出しの閉じ込めによる効率的翼の開発に資する基礎的な結果である。現在は当初計画に含まれていた Kasper Wing 問題の研究を継続的に推進中である。アイシンAWへのラボステイには坂上・斉木・米田・ロドリが参加し、そこで得られたいくつかの問題について予備的な研究を開始した段階である。荒井チームとの連携が進み、流体力学の幾何学的特徴付けに関するセミナーを定期的に行い、研究情報の交換を行った。地球流体・環境工学への応用のための数学基礎研究にも着手した(坂上, 米田:A-3,A-4)。渦によって環境汚染物質を除去する「Vortex Flushing」の研究を開始した(ネルソン)

### B. 荒井チームの研究成果

本チームの目的である、トポロジーやグラフ理論を応用した流体力学の計算手法やビジュアライゼーションの実現に向けた研究を進めた。本年度はまず流体の coherent structure のグラフによる定式化を試みた。グラフ理論やネットワーク理論で用いられるクラスタリングアルゴリズムを用いることで、従来用いられていた finite time Lyapunov exponent を用いた coherent structure と同様の計算をより簡便なアルゴリズムで実現することが出来た。これと平行し、位相幾何学的手法の本研究への応用で鍵となる Conley 指数をより高

速に分散的に計算するアルゴリズムの開発（荒井: B-1）も進めた．また，荒井が研究協力者として関わる國府 CREST との連携では，Conley-Morse グラフという位相幾何学的なデータ構造を用いた力学系の表現手法を，流体などのより現実的な問題に使えるように改良する研究も進めた．本 CREST 坂上グループとの連携では，平面上の非圧縮ベクトル場の幾何学的理論を用いた 2次元流体の相図の分類の研究を進めており，これに関連する幾何学的な成果が得られている（横山 B-2）．石原グループとの連携においては，上記のクラスタリングアルゴリズムを石原グループの問題に適用する試みや，石原グループの計算で得られた圧力場データから渦度を可視化する問題に確率過程を用いる取り組みなどを進めている．アイシン AW へのラボステイにおいては，アイシンの業務に関連した問題に対して，グラフ理論の不変量が使える可能性や（横山），セルオートマトンを用いたトポロジー最適化の流体問題への応用についての議論を行ない（川原田），その方向への研究を開始することとした．

### C. 石原チームの研究成果

高レイノルズ数における渦と境界の相互作用を理解するため，地球シミュレータを用いて，平行平板間乱流の大規模直接数値計算（格子点数 2048x1536x2048）を実施し，壁摩擦速度に基づくレイノルズ数  $Re_\tau=2560$  の壁乱流データベースを構築した．乱流の大規模直接数値計算のデータ解析の結果，壁近傍の乱流場のエネルギースペクトルのレイノルズ数依存性と壁からの距離への依存性を明らかにした（石原，森下 C-1）他，高レイノルズ数乱流中の高渦度領域が形成する強いシア層の構造を明らかにした（石原 C-2）．また，壁乱流の壁近傍の渦度ベクトル場および圧力勾配ベクトル場の可視化解析を実施し，荒井グループが開発するアルゴリズムを応用した流れ場の特徴付けについての議論を進めている（石原，森下，小笠原）．

坂上グループとの連携においては，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フリンジ領域を導入し，その計算結果の妥当性を検証し，任意の形状を過ぎる2次元の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．開発した手法を用いて，回転しながら落下する翼果のモデルの予備的な2次元計算を行った結果，2次元の流れでは，翼上の渦が準定常的に放出され，定常に維持されることはないが，揚抗比が最大となるときの翼上の渦配置は実験で観察されるものと類似であることを確認した（石原，澤村）．現在は，回転しながら落下する翼果の3次元数値解析を実現するためのコード開発が推進中である．また，ウェーブレットを応用した乱流数値計算の情報縮約手法の開発・検証を行い，約 10%の自由度で乱流統計量の時間発展をよく再現できることを確認している（岡本:C-3,C-4）．アイシンAWへのラボステイでは，「翼果」の数値計算と関連して，流体力学および計算科学の視点から協働できそうなテーマについての問題提起と意見の交換を実施した．

### 《協働研究》

(1) 坂上チームが中心となって風力発電に関する技術開発に関するチュートリアルセミナーに参加し，今後の風力発電事業の動向を詳細にサーベイすると共に今後の協働研究のための人脈作

りを行った。

(2) 連携セミナーを6回実施した。講演者は以下の通り。小林健太(一橋大学)・相木雅次(慶応大学)・花崎直太(国立環境研究所)・長山雅晴(金沢大学)・石井克哉(名古屋大学)・前川泰則(神戸大学)に各分野における専門知識の提供をうけ、議論を行った。

(3) Labo. StayをアイシンAW(愛知県安城市)において2回実施し、アイシン AW の問題や CREST のコンセプトなどの説明が行われた。加えて、期間中は参加者間で濃密かつ活発な議論や意見交換が行われ、今後の協働研究のためのアイデアの交換や協働の方針などが確認された。

(4) JST 数学領域国府 CREST チームおよび柴田 CREST チームの間と合同セミナーを行い、各チーム間の研究動向の把握と同時に、JST・CREST 数学領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」について意見交換を行った。

《国際研究》

(1) 平成23年度12月12日～14日にかけて、韓国大田市にある 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」を実施し、国内外の研究者30名が集まって、CREST 研究に関連する流体力学上の様々な問題について議論を行った。

(2) 平成23年度10月24日、名古屋大学において国際的な計算科学セミナーを開催し、数学と流体力学の協働についての議論を行った。

(3) 平成23年度11月1日と2日の2日間、名古屋大学において国際シンポジウム「CCS Symposium Autumn 2011」を主催し、CREST 研究に関連して、乱流の数値シミュレーションとモデリング、渦と境界の相互作用の数学と計算科学についての議論を行った。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ●論文詳細情報

- A-1. Takashi Sakajo, "Force-enhancing vortex equilibria for parallel two plate in uniform flow," Proc. Roy. Soc. A., DOI: 10.1098/rspa.2011.0617, 2012/1/4 online.
- A-2. Takashi Sakajo, Yosuke Amaya, "Numerical construction of potential flows in multiply connected channel domains," Computational Methods and Function Theory, Volume 11, No.2, pp.415-438, 2011/8/1 online.
- A-3. Takashi Sakajo, "Fixed equilibria of point vortices in symmetric multiply connected domains," Physica D: Nonlinear Phenomena, Volume 241, Issue 5, pp.583-599, DOI: 10.1016/j.physd.2011.11.021, 2012/3.
- A-4. H. Koba, A. Mahalov and T. Yoneda, "Global well-posedness for the rotating Navier-Stokes-Boussinesq equations with stratification effects," Advances in Mathematical Sciences and Applications, 印刷中.

- B-1. Zin Arai, Kazunori Hayashi, Yasuaki Hiraoka, "Mayer-Vietoris sequences and coverage problems in sensor networks," *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 28, No. 2, 2011, pp.237-250, DOI: 10.1007/s13160-011-0039-8, 2011/8/1.
- B-2. Tomoo Yokoyama, "Codimension one minimal foliations whose leaves have fundamental groups with the same polynomial growth," *Comptes rendus Mathématique*, 印刷中.
- C-1. Koji Morishita, Takashi Ishihara, Yukio Kaneda, "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.
- C-2. Takashi Ishihara, Julian C R Hunt, Yukio Kaneda, "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.
- C-3. Naoya Okamoto, Katsunori Yoshimatsu, Kai Schneider, Marie Farge, Yukio Kaneda, "Coherent Vorticity Simulation of Three-Dimensional Forced Homogeneous Isotropic Turbulence," *Multiscale Modeling & Simulation*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Volume 9, Issue 3, November 11, 2011, pp.1144-1161 (DOI: 10.1137/10079598X)
- C-4. Naoya Okamoto, Katsunori Yoshimatsu, Kai Schneider, Marie Farge, "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.