

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(北海道大学大学院理学研究院)

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

- [基礎研究] 多重連結領域における二次元非圧縮流れ場の位相的分類とその語表現の理論を荒井グループとともに完成させた.
- [基礎研究] 多重連結外部スリット領域における, 吸い込み-湧き出し-渦対の時間発展を調べる数値解析的手法を確立した.
- [基礎研究] Kasper 翼における渦および吸い込み-湧き出し-渦対の定常配置の数値的研究を行った.
- [協働研究] 九州大学応用力学研究所, 大屋裕二研究室に Labo. Stay を行った(6月)
- [協働研究] 京都大学大学院工学研究科航空工学専攻, 風洞実験室に Labo. Stay を行った(11月)
- [協働研究] 公益財団法人 鉄道総合技術研究所風洞技術センターに Labo. Stay を行った(11月)
- [協働研究] 連携セミナーを計3回実施した.
- [国際研究] IUTAM Symposium on Vortex dynamics: formation, structure and function (福岡)を共催した.

(2) 荒井グループ(北海道大学大学院理学研究院)

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] 多重連結領域における二次元非圧縮流れ場の位相的分類とその語表現の理論を坂上グループとともに完成させた.

- [基礎研究] 位相幾何学的不変量である絡み目の絡み数を, 流体力学の研究にも用いる事が出来るよう具体的な空間データに対して計算するアルゴリズムを開発した.
- [基礎研究] グラフクラスタリングを用いた流体の構造分解アルゴリズムを改良し, より実際の現象に即した分解が得られるようになった.
- [協働研究] 九州大学応用力学研究所, 大屋裕二研究室に Labo. Stay を行った(6月)
- [協働研究] 公益財団法人 鉄道総合技術研究所風洞技術センターに Labo. Stay を行った(11月)
- [国際研究] 英国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”に参加し, 参加者らと本研究課題に関する研究情報の交換および発信を行った(7月~11月)

(3) 石原グループ(名古屋大学大学院工学研究科)

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

- [基礎研究] 平行平板間乱流の大規模直接数値計算により高レイノルズ数壁乱流のデータベースを構築し, その解析により非等方性に関する統計法則を見いだした.
- [基礎研究] 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, 界面の性質と役割を明らかにした.
- [基礎研究] Volume Penalization(VP)法を用いた二次元流れの数値計算により, 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した.
- [協働研究] 公益財団法人 鉄道総合技術研究所風洞技術センターに Labo. Stay を行った(11月)
- [国際研究] CEMRACS2012に参加し, VP法の応用に関する国際共同研究を推進した.
- [国際研究] M. Farge(パリ, エコールノルマル)と K. Schneider(マルセイユ大)を招聘し, 壁乱流およびVP法についての国際共同研究を推進した.

§ 2. 研究実施内容

《CREST 研究体制》

坂上チームは昨年にひきつづき博士研究員と技術補助員を雇用し研究を継続した。年度の途中で技術補助員が退職したため補助員を新規雇用した。北海道大学中央キャンパス棟におけるスペースのレンタルも継続し、荒井チームとの協働研究を推進した。今年度は特に荒井チームとの協働が進展した。荒井チームも昨年に引き続き博士研究員と技術補助員を雇用する体制で、北海道大学の CREST スペースを中心に活動した。石原チームは昨年と同様に技術補助員を継続雇用した。また、今年度は D1 の学生を RA として雇用したほか、年度の途中から博士研究員を新規雇用した。

《基礎研究》

A. 坂上チームの研究成果 今年度は本研究計画の要となる多重連結領域の流体理論において、以下の二つの点で大きな理論面での進展があった。まず、二次元多重連結領域における構造安定な流れ場(流線)の大域的な位相構造を分類し、それぞれに固有の語表現(Word)を与えることに荒井チームとの共同研究により成功した(坂上・横山:B-4)。こうした流れ場の語表現は、単に数学的な分類を与え存在しうるすべての流れの書き出しを可能にするだけでなく、諸分野との協働においてしばしば問題になる「**専門用語の壁**」を越える共通言語としての役割を果たす。この語表現の構成アルゴリズムとその計算機の実装を特許として出願した。この語表現を使って石原チームで行われている一枚翼の数値計算結果の語表現を行い、翼に加わる揚抗比の時間変動の語表現による特徴づけに成功した(坂上・横山・澤村)。次に、多重連結領域における渦力学理論と数値等角写像の研究についても進展があった。昨年度の研究成果に基づいて、多重連結領域スリット領域における吸い込み・湧き出し渦(Spiral vortices)の力学に関する数学および数値解析を一つの理論としてまとめることができた(坂上:A-1)。これにより、さまざまな形状を持つ二次元流れ場モデルの作成が統一的行えるようになり、その応用例として三枚翼上の揚力を増加させるような渦閉じ込め可能性に関する問題(Kasper Wing 問題)を扱い、そのような渦あるいは吸い込み・湧き出し渦対の存在について成果を得た(ロドリ・坂上)。上記二つの理論は今後の CREST の活動を支える二つの柱として、基礎理論の発展およびその弾力的な応用を目指す。また、今後の数値的な展開を目指して、渦剥離渦モデルの数値計算法の開発を行った(坂上・中川)。この数値計算法は閉じ込め渦の非定常な場における安定性を論じる上で来年度以後用いていく。また、渦境界相互作用の数学基礎理論として、境界周辺の流れ場の研究(米田:A-4,A-6)や環境流体の基礎となる流体方程式の数学解析も進展した(米田:A-2,A-3,A-5)。

B. 荒井チームの研究成果 坂上チームと共同で進めた安定な流れ場の大域的位相構造の分類については上記の通りであるが、それ以外にも以下のような研究を行なった。まず、位相幾何学的不変量である絡み目の絡み数を、具体的に空間の点列として与えられた絡み目のデータに対

して計算するアルゴリズムを開発した(荒井: B-1). 絡み数は流体力学における **Helicity** とも関連する重要な不変量であるが, これまでは具体的な3次元空間のデータに対して計算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いう数値解析の道具と代数トポロジーのアイデアを併用することで, 高速に絡み数を計算するアルゴリズムを構築し, 今後の流体力学への応用の基礎を構築した. さらに, 昨年より取り組んでいるグラフクラスタリングを用いた流体の構造の分解については, アルゴリズムを安定化させるための技術的な問題をいくつか改良し, より現象の理解に役立つアルゴリズムを得ることができた(荒井). また, トポロジー最適化を応用した流体設計の研究を進めるため, トポロジー最適化を射影幾何学やセルオートマトン(川原田: B-2)を用いた新しい観点から再検証する研究を進め, 本年度のラボステイにおいてはこれらに関する情報交換を進めた. これらの計算手法を並列化し高速化するための基礎研究として **pospace (partially ordered space)** に関連する研究(横山: B-3)や圏論的な視点からの研究(荒井)も行なった.

C. 石原チームの研究成果 乱流の大規模数値計算に関して, 地球シミュレータを用いた, 平行平板間乱流の大規模直接数値計算により高レイノルズ数壁乱流のデータベースを構築し, その解析により非等方性に関する統計法則を見いだした(石原). また, 「京」の一般利用に採択され, 更なる大規模数値計算を実施するための計算手法の開発検討を実施した. また, 乱流境界層の直接数値計算データを用いて, 乱流・非乱流界面近傍の条件付き二点速度相関を数値的に求め, 乱流・非乱流界面(渦あり領域の境界)が速度変動をブロックする働きがあることを実証した(小笠原・石原). VP法を用いた二次元翼周りの数値計算により得られた結果を詳細に可視化・解析し, 揚抗比が最大になるときと最小になるときの流線のトポロジーが全く異なることを示し, 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した(澤村・石原). また, 荒井グループとの連携を促進するため, 乱流の大規模データの様々な可視化を試みた(石原: C-1, C-2, C-3).

《協働研究》

- (1) 連携セミナーを計三回実施した. 講演者は以下の通り. 木村恵二(京都大学)・宮地徳蔵(鉄道総研)・松本剛(京都大学)に各分野における専門的知識の提供をうけた
- (2) **Labo. Stay** を九州大学応用力学研究所(福岡), 京都大学大学院工学研究科航空工学専攻(宇治), 鉄道総研米原風洞センター(米原)にて行った. 各滞在先で風力発電や鉄道の開発における基礎研究とその実現に関して情報提供をうけ, 意見の交換を行った.
- (3) 坂上は津波被害の低減に関する分野横断的な国際シンポジウムにて, 本 **CREST** が手案するコンセプト「渦境界相互作用」に関して基調講演を行った. また, 数値解析の最近の発展に関する国際研究集会で本 **CREST** の研究成果に関する招待講演を行った. その他にも坂上チームでは国際研究集会の **invited/selected speaker** として講演を行った(坂上, 米田, ロドリ)
- (4) 本 **CREST** の研究成果の社会還元の一環として, 一般雑誌や専門雑誌への紹介記事投稿を

行い. また, 数学的な基礎を述べ紹介する書籍を執筆し発行した.

《国際研究》

- (1) 九州大学にて2013年3月10日～14日に行われた International Union of Theoretical and Applied Mechanics シンポジウム“Vortex Dynamics: formation, structure and function”を共催した. 世界中から集まった参加者と本クレスト研究に関連する研究の意見交換を行うと同時に, 本クレスト活動を中心とした国際的研究連携について具体的な方向を検討した.
- (2) 高レイノルズ数乱流の渦構造について, J.C.R. Hunt(UCL) との国際共同研究を推進するとともにその研究成果に関する招待講演を実施した.
- (3) M. Farge(パリ, エコールノルマル)とK. Schneider(マルセイユ大)を招聘し, 壁乱流の自由度縮小および VP 法を用いた平行平板間乱流のシミュレーションについての国際共同研究を推進した.
- (4) 英国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”に参加し, 参加者らと本研究課題に関する研究情報の交換および発信を行った(7月～11月)

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- A-1. Naoki Aoyama, Takashi Sakajo, Hidehiro Tanaka, “A computational theory for spiral point vortices in multiply connected domains with slit boundaries”, to appear in Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics (2013)
- A-2. G. Misiolek and T. Yoneda, “Ill-posedness examples for the quasi-geostrophic and the Euler equations”, in Analysis, Geometry and Quantum Field Theory, Contemporary Mathematics, Amer. Math. Soc. Providence, RI (2012) 251—258.
- A-3. S. Ibrahim and T. Yoneda, “Local solvability and loss of smoothness of the Navier-Stokes-Maxwell equations with large initial data”, J. Math. Anal. Appl., 396 (2012) 555—561.
- A-4. E. Foxall, S. Ibrahim and T. Yoneda, “Streamlines concentration and application to the incompressible Navier-Stokes equations”, to appear in Tohoku Math. J.
- A-5. C-H. Chan and T. Yoneda, “On possible isolated blow-up phenomena and regularity criterion of the 3D Navier-Stokes equation along the streamlines”, Methods and Applications of Analysis, 19 (2012) 211—242.

- A-6. M. Yamada and T. Yoneda, “Resonant interaction of Rossby waves in two-dimensional flow on a β plane”, *Physica D*, 245 (2013) 1—7.
- B-1. Zin Arai, “A rigorous numerical algorithm for computing the linking number of links”, *Nonlinear Theory and Its Applications*, Vol. 4, No. 1 (2013), 104—110.
- B-2. Akane Kawaharada, “Ulam's cellular automaton and Rule 150”, *Hokkaido Mathematical Journal*, to appear (印刷中)
- B-3. 横山知郎, “On the relation between completeness and H-closedness of pospaces without infinite antichains”, *Algebra and Discrete Mathematics Journal* (受理)
- B-4. Tomoo Yokoyama and Takashi Sakajo, “Word representation of streamline topologies for structurally stable vortex flows in multiply connected domains”, *Proceedings of Royal Society, A*, 469, DOI: 10.1098/rspa.2012.0558
- C-1. Takashi Ishihara, Yuji Hattori, “Improvement of Reality of CG Motion Pictures by Hydrodynamic Effects: Effects of Turbulence”, *Improvement of Reality of CG Motion Pictures by Hydrodynamic Effects: Effects of Turbulence*, Ninth International Conference on Flow Dynamics, 2012
- C-2. Takashi Ishihara, Kensaku Mori, “Interactive visualizations of the large-scale data generated by the DNS of isotropic turbulence on 4096^3 grid points”, *USB Proceedings of JSST2012 International Conference on Simulation Technology*, 2012
- C-3. Yuji Hattori, Takashi Ishihara, “4D visualization of isotropic turbulence and dynamics of high-enstrophy structures”, *4D visualization of isotropic turbulence and dynamics of high-enstrophy structures*, *USB Proceedings of JSST2012 International Conference on Simulation Technology*, 2012

(3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)