

戦略的創造研究推進事業  
さきがけ(個人型研究)  
追跡評価用資料

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」  
(2007 年度～2012 年度)

研究総括:西浦 廉政

2022 年 3 月



## 目次

要旨 .....	1
第 1 章 研究領域概要.....	4
1.1 戦略目標 .....	4
1.2 研究領域の目的 .....	5
1.3 研究総括 .....	5
1.4 領域アドバイザー .....	5
1.5 研究課題および研究者 .....	6
第 2 章 追跡調査 .....	9
2.1 追跡調査について .....	9
2.1.1 調査の目的 .....	9
2.1.2 調査の対象 .....	9
2.1.3 調査方法 .....	11
2.2 追跡調査概要 .....	12
2.2.1 研究助成金 .....	12
2.2.2 論文 .....	17
2.2.3 特許 .....	21
2.2.4 受賞 .....	23
2.2.5 招待講演 .....	25
2.2.6 報道 .....	25
2.2.7 共同研究や企業との連携 .....	25
2.2.8 実用化・製品化 .....	25
2.2.9 ベンチャー .....	26
2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果 .....	26
2.3.1 研究領域の展開状況(展開図) .....	26
2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献 .....	28
2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献 .....	29
2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合) .....	29
第 3 章 各研究課題の主な研究成果.....	31
3.1 2007 年度採択研究課題.....	31
3.1.1 数学と計算機科学の連携による数理モデルの大域的計算理論 (荒井迅) ...	31
3.1.2 ウェブレットフレームを用いた視覚の数理モデル (新井仁之) .....	32
3.1.3 水圏環境力学理論の構築 (坂上貴之) .....	33
3.1.4 臨床医療診断の現場と協働する数理科学 (水藤寛) .....	34
3.1.5 科学工学モデルの安定性に関する計算機援用解析 (長藤かおり) .....	35

3.1.6	保険型金融商品のリスク分散メカニズムの解明 (中野張)	36
3.1.7	自己組織化としての皮膚バリア機能の数理解析 (長山雅晴)	37
3.1.8	輸送と渋滞に関する諸現象の統一的解析と渋滞解消 (西成活裕)	38
3.1.9	「計算機システムの科学」のための数学 (蓮尾一郎)	39
3.1.10	離散アルゴリズムに対する品質保証技術 (牧野和久)	40
3.1.11	確率過程の統計推測法の基礎理論およびその実装 (吉田朋広)	41
3.2	2008 年度採択研究課題	42
3.2.1	ヤング測度による高分子共重合体の微細構造の解明及びヤング測度の展開 (大下承民)	42
3.2.2	幾何学的変分問題の解の大域解析とその応用 (小磯深幸)	43
3.2.3	振動子理論の生物・化学・工学・医療分野への応用 (郡宏)	44
3.2.4	統計モデル多様体の普遍的な性質のベイズ予測理論への応用 (田中冬彦)	45
3.2.5	代数的符号理論による組合せ構造の解析と量子符号への応用 (原田昌晃)	46
3.2.6	システム生物学に関わる情報と記述の諸問題 (春名太一)	47
3.2.7	シャノン限界の実現と次世代情報通信理論の構築 (平岡裕章)	48
3.2.8	情報幾何学の計算論的神経科学への応用 (三浦佳二)	49
3.2.9	非記号計算の基礎理論の構築と構造学習への応用 (石川博)	50
3.3	2009 年度採択研究課題	51
3.3.1	数学を応用した動力学シミュレーション法の開発 (一宮尚志)	51
3.3.2	インフルエンザウイルスの遺伝子変異に内在する数学的構造の探求 (伊藤公 人)	52
3.3.3	符号・暗号のための代数曲線論 (川北素子)	53
3.3.4	非平衡系における界面張力の数理物理学 (北畑裕之)	54
3.3.5	真軌道によるシミュレーションの実現とその応用 (斉藤朝輝)	55
3.3.6	揺らぐ結び目構造の数理 (坂上貴洋)	56
3.3.7	非線型マクロ経済モデルのためのフレームワークの構築 (田村隆志)	57
3.3.8	非線形情報理論：環境雑音を活用する次世代情報処理の実現 (寺前順之介)	58
3.3.9	情報論理学の新パラダイムがもたらす生物現象の計算構造の解明 (浜野正浩)	59
3.3.10	力学系における不安定対称解の探査と制御の新展開 (水口毅)	60
3.3.11	非線形放物型方程式の解の爆発とその応用 (溝口紀子)	61

## 要旨

本報告書は国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業のさきがけ(個人型研究)の研究領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」(2007年度～2012年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、JST事業及び事業運営の改善等に資するため、追跡調査を実施し、その結果をまとめたものである。

本領域では、「社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学/数理科学研究によるブレークスルーの探索(幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として)」が戦略目標として設定され、諸分野の研究対象である自然現象や社会現象に対し、数学的手法を応用するだけでなく、それらの数学的研究を通じて新しい数学的概念・方法論の提案を行うなど、数学と実験科学の融合を促進する双方向的研究が行われた。また、この研究を通じて、社会的ニーズに対応した新しい研究課題を創出し解決するという目的の達成を目指した。この領域で行われた研究は、材料・生命・環境・情報通信・金融などの諸分野におけるブレークスルーへの展開が、将来的に期待されている。

本研究領域の各研究課題は「(1)直面する社会的課題への模索と挑戦」「(2)諸科学(物理, 化学, 生命等)との連携による自然を理解するための新たな探索」「(3)新たな研究課題の発掘と数学的手法の開発」の3つの研究領域の目標に分類される。

研究終了後の代表的な発展研究の成果としては、「(1)直面する社会的課題への模索と挑戦」では、水藤寛は幾何学的モデリングを発展させ、病態メカニズムの数理モデル化と、診断・治療に適した形状表現の数理モデルの構築に取り組んだ。ここでは、大動脈瘤、大動脈解離など病態の状況推定、指標化、進行予測や人工透析に関わる動静脈シャントの血流解析による血管の傷みの軽減など今後期待される成果を上げた。さらに数理モデリングとAI技術の組み合わせによる熟練者の技の言語化も取り組んでいる。長山雅晴は皮膚構造の数理モデルを基にした新たな人工皮膚の設計・構築を行った。この人工皮膚は、今後、皮膚疾患、加齢変化のメカニズム、表皮機能の解明や新薬開発、化粧品安全性試験に用いられるリサーチツールとして期待される。伊藤公人はインフルエンザウイルスの塩基配列の変位のうち70%を予測するモデルを構築した。この研究成果は、塩基配列情報に基づく基本再生産数の推定などのその後の展開につながっている。群宏は様々な分野で問題となる振動子集団ダイナミクスの研究を発展させ、時差ボケの回避方法を提案した。これはシフトワーカーの負担を軽減するスケジュール提案や健康管理などへの応用が見込まれる。西成活裕は渋滞学の第一人者となり、渋滞や群衆マネジメントの研究成果は、空港の施設設計や運営、東京オリンピック運営準備、自治体での群衆事故防止、欧州・中国等での混雑対策などに活用されている。

「(2)諸科学(物理, 化学, 生命等)との連携による自然を理解するための新たな探索」では、新井仁之は色の対比の錯視、画像のエッジにより引き起こされる明暗や色の錯視など錯視現象の数理モデルを構築した。これらは、企業にライセンスし、錯視効果を活

用した商品パッケージ、カードなどに活用されている。また、鮮鋭化画像処理への応用も期待される。坂上貴之は、流線トポロジー理論に基づき流れデータの記述法を開発した。水、空気に限らず、方向を持って変化する現象に対し汎用的に解析可能なソフトウェア「psiclone」を開発し、企業にライセンス供与し活用されている。平岡裕章はパーシステントホモロジーの表現論的研究など実施するとともにパーシステント図で検出された特徴と材料の機能を紐づける機械学習法を構築した。ガラス材料など無秩序系の記述言語となる本研究成果は情報ストレージや太陽光パネルなどの材料開発に直結する。また、パーシステントホモロジーの計算を行うソフトウェア「HomCloud」を開発し企業を含む多くの研究者に活用されている。

「(3)新たな研究課題の発掘と数学的手法の開発」では、蓮尾一郎はブラックボックス解析による物理情報システムの安全性保証手法の開発を行い、内部の動作原理がわからない物理情報システムに対して、その振る舞いの観察により安全性を保証するためのアルゴリズム群を与えた。これは、自動運転のようなセーフティクリティカルなシステムにおいて、ブラックボックス化されたAI部分を包み安全性を保障する新しい手法であり、AIを部品として導入してもホワイトボックス化することなく適用できるようになるため、応用可能性が高い。石川博は高階エネルギー最小化を医用画像解析に応用し、CT画像などの3次元医用画像に対して高度なセグメンテーションを可能とした。これは、早期肺がん切除のための胸腔鏡手術において、注意すべき血管走行を3次元で可視化可能となるため施術支援ツールとして活用されている。また、深層学習により白黒画像のカラー化、欠損画像復元、ラフスケッチ自動線画化など従来にない性能で可能にした。これらソフトウェアはGitHubで公開している。これら技術は新聞・雑誌・書籍における白黒画像カラー化、歴史的写真のカラー化や古い映画の補修などにライセンスされ多岐に渡り数多く活用されている。寺前順之介は大脳皮質の自発揺らぎの研究を進展させ、最新の脳の知見を用いた脳内ニューロンとシナプスの確率的動作に基づいた現在のニューラルネットワークを超える新たな学習則を発見した。

本研究領域の研究期間中の成果論文数は合計で258報、研究終了後の発展論文数はそれより増加し合計359報であった。国際学会における招待講演は、研究終了後合計335件に上った。特許出願は、研究期間中は国内2件、海外1件であったが、研究終了後は国内34件、海外15件に増加した。これらの中で企業との共同出願は18件含まれる。また、研究終了後の受賞は文部科学大臣表彰2件を含み合計28件、報道機関から報じられたニュースリリースなどの件数は586件に上った。

本研究領域の研究者は、海外研究留学時代のネットワーク、国際共同研究プログラムへの応募、さきがけの研究成果に関心を有する海外研究者からの共同研究の打診などにより、国際共同研究も活発に行っている。さらに、企業との共同研究は研究者の1/3が各々複数企業と実施している。多様な業種の多数の企業との連携は、実社会での本研究領域の

数学の研究成果の有効性を表しているとともに、そのすそ野の広さを示しているものと考えられる。

本研究領域は、JST 戦略研究事業で初めての数学関連の領域である。本研究領域により、数理材料科学、数理臨床医学、数理皮膚学、渋滞学などの新しい分野の展開につながった。これら実社会の様々な分野で数学の有用性を示したことは、従前の、命題の証明を中心とする伝統的なアプローチが主流であった数学界に対し、数学を社会に開き、純粋数学だけではなく応用数学およびその研究者の認識向上の大きな端緒となり、我が国の応用数学の人材育成にもつながった。また、本研究領域終了後、JST 戦略研究事業では数理学関連の多くの研究領域が立ち上がった。それら研究領域の中には本研究領域の研究者が研究総括、研究代表者などとして研究の中心を担っているものもある。

これらの業績は本研究領域が研究終了後も研究期間で得られた研究成果がさらに発展し、同時に、各研究者が各々の研究コミュニティの中核的な人材として活躍が広がったものと捉えられる。

本報告書は全3章から構成されており、各章ごとの概要は以下に示すとおりである。

第1章は、研究領域の戦略目標、研究領域の目的、研究総括、領域アドバイザー、研究課題と研究代表者を記載した。

第2章は、追跡調査の実施の概要と、調査結果の概要、そして領域内の特徴について記載した。2.1では、追跡調査の目的、調査の対象、調査方法を記載した。2.2では、各研究代表者が獲得した研究助成金、発表した論文、出願・登録した特許などの成果概要を記載した。2.3では、2.2の成果や各研究課題の展開状況から見た科学技術的および社会・経済的アウトカムの概要を記載した。また、研究領域の展開状況を展開図としてまとめた。

第3章は、さきがけの研究領域終了後の各研究課題の研究の継続と発展状況について、科学技術の進歩の貢献および社会・経済的な波及効果の観点から詳述した。ここでは、研究者のさきがけ研究期間中の成果を簡潔に記載するとともに、研究終了後に発展した内容について、代表的な事例をまとめた。その他で特筆した成果のあるものは、特記事項として記載した。

## 第 1 章 研究領域概要

### 1.1 戦略目標

社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学/数理科学研究によるブレークスルーの探索(幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として)

#### <達成目標>

数学と異分野の連携を深めるためには、まずは一定条件の下で数学研究者の意思に基づくテーマ設定による個人研究を進めつつ、他分野との連携の可能性を模索して共同研究の芽を育て、他分野との共同研究に発展させるといった取り組みを柔軟に組み合わせることが望ましい。また対象とする研究課題が数学を活用することで有効にソリューションにつながるかどうかの判断には、数学研究者サイドで他分野への視野も広い人材を活用することが必要である。そのため、数学—他分野の連携研究のための以下のような体制構築に取り組む。

- ・ 異分野の視点を兼ね備えた数学研究者を研究領域の研究総括として設定。
- ・ 数学研究者から、他分野への展開を期待できる数学の課題を募集し、研究総括による選定の上研究を進める。
- ・ 数学研究者と他分野の研究者の交流の場としてワークショップ等を開催し、数学—他分野の連携研究の機運を醸成する。
- ・ 課題提案者の申請時における他分野との連携のフェーズに応じて、研究形態(個人研究/チーム型研究)を柔軟に設定できるように配慮する。

#### <戦略目標設定の背景>

本戦略目標に関連して、分野別推進戦略の情報通信分野に、「どのような情報通信技術も、数学的成果を利用していることは明らかである。数学研究者の育成の強化は、今後 30 年を考えた場合の情報通信技術、さらには他の領域における科学技術の進展に必須の政策である。」との言及がある他、ライフサイエンス等の他の分野でもシミュレーションやシステム的な研究などの形で数学の必要性が示されている。

また、第 3 期科学技術基本計画に「新たな知の創造のために、既存の分野区分を越え課題解決に必要な研究者の知恵が自在に結集される研究開発を促進するなど、異分野間の知的な触発や融合を促す環境を整える必要がある。」との記述がある。

我が国における数学研究の現状を見ると、日本の数学の研究レベルは一定水準を保っているものの、諸科学、諸分野、産業等への広がりには十分ではない。結果として論文数など量的な拡大は期待できず、研究者数を考慮するとしても欧州並ではあるが、米国には遠く及ばない(4~5 倍)。

政策的に数学振興が脚光を浴びることは皆無に等しく、欧米主要国と比較して日本の数学への投資は極めて少ない(米：約 400 億円、仏：約 190 億円、日：数 10 億円)。

日本の数学は純粋数学研究の比重が大きく応用に関わる研究が少ない。

分野間の専門用語の違いなど異文化間の障壁もあり、異分野の研究との接点がなかなか持てないという特徴がある。

一方で、数学は諸科学の基礎となる学問であり、他分野との連携研究により多くの領域での研究開発においてブレークスルーをもたらすものである。第3期科学技術基本計画においても、「8つの分野別推進戦略を策定する際にも、これら新興領域・融合領域へ機動的に対応しイノベーションに適切につなげていくことに十分に配慮して進める」と述べられている。事実、科学技術政策研究所における国内の重点8分野の産学官研究者に対するアンケート調査では、数学の貢献を期待したい課題があるとの回答は81%に上り、数学へのニーズは高い。

したがって、数学それ自体の振興にとどまらず、その成果を活用することで異分野の更なる発展に貢献できるような取り組みに早急に着手する必要がある。

## 1.2 研究領域の目的

本研究領域は、数学研究者が社会的ニーズの高い課題の解決を目指して、諸分野の研究者と協働し、ブレークスルーの探索を行う研究を対象とする。いわば21世紀におけるデカルト流の数学的真理とベーコン流の経験則の蓄積との統合を目指すものである。

諸分野の例として、材料・生命・環境・情報通信・金融などが想定されるが、社会的ニーズに対応した新しい研究課題の創出と解決を目指すものであればこの限りではない。

諸分野の研究対象である自然現象や社会現象に対し、数学的手法を応用するだけでなく、それらの数学的研究を通じて新しい数学的概念・方法論の提案を行うなど、数学と実験科学の融合を促進する双方向的研究を重視するものである。

## 1.3 研究総括

西浦廉政

(領域発足時)

北海道大学電子科学研究所 教授

(領域終了時)

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 教授

(追跡調査時)

北海道大学 名誉教授

## 1.4 領域アドバイザー

表 1-1 領域アドバイザー

領域アドバイザー	所属	役職	任期
赤平 昌文	筑波大学	名誉教授	2007年5月～2016年3月
池田 勉	龍谷大学	副学長/常務理事	2007年5月～2016年3月

領域 アドバイザー	所属	役職	任期
織田 孝幸	東京大学	名誉教授	2007年5月～2016年3月
小田 忠雄	東北大学	名誉教授	2007年5月～2016年3月
小野 寛晰	北陸先端科学技術大学院大学	シニアプロフェッサー	2007年5月～2016年3月
高橋 理一	(株)コンボン研究所	顧問	2007年5月～2016年3月
津田 一郎	北海道大学	教授	2007年5月～2016年3月
長井 英生	関西大学	教授	2007年5月～2016年3月
宮岡 礼子	東北大学	教授	2007年5月～2016年3月
山口 智彦	国立研究開発法人産業技術総合研究所	主席研究員	2007年5月～2016年3月
野水 昭彦	情報・システム研究機構	シニア URA	2014年7月～2016年3月 (領域運営アドバイザー)

(注)所属と役職はさきがけ終了時点に記載

## 1.5 研究課題および研究者

表 1-2 研究課題と研究者(第1期、第2期、第3期)

期 (研究期間)	研究課題	研究者	採択時の 所属・役職	終了時の 所属・役職	追跡調査時の 所属・役職
第1期 (2007年4月～ 2011年3月)	数学と計算機科学の連携による数理モデルの大域的計算理論	荒井 迅	京都大学 助教	北海道大学創成研究機構 特任助教	中部大学創成学術院人間力創成総合教育センター教養課題教育プログラム(科学リテラシー) 教授
第1期 (2007年10月～ 2011年3月)	ウェーブレットフレームを用いた視覚の数理モデル	新井 仁之	東京大学大学院数理科学研究科教授	東京大学大学院数理科学研究科教授	早稲田大学教育・総合科学学術院教授/東京大学名誉教授
第1期 (2007年9月～ 2011年3月)	水圏環境力学理論の構築	坂上 貴之	北海道大学大学院理学研究院数理学部 准教授	北海道大学大学院理学研究院数理学部 教授	京都大学大学院理学研究科数理学教室教授/数理解析研究所数学連携センター 特任教授/理化学研究所iTHEMS・R-CCS 客員主管研究員/科学技術振興機構さきがけ数理構造領域 領域総括
第1期 (2007年10月～ 2011年3月)	臨床医療診断の現場と協働する数理科学	水藤 寛	岡山大学大学院環境学研究科 准教授	岡山大学大学院環境学研究科 教授	東北大学材料科学高等研究所数理学連携 教授・副所長
第1期 (2007年10月～ 2009年11月*)	離合する粒子多体系	田中 ダン	名古屋大学大学院情報科学研究科 准教授		
第1期 (2007年10月～ 2010年3月)	科学工学モデルの安定性に関する計算機援用解析	長藤 かおり	九州大学大学院数理学研究院数理科学部 准教授	九州大学大学院数理学研究院数理科学部 准教授	Karlsruhe Institute of Technology 非常勤講師

期 (研究期間)	研究課題	研究者	採択時の 所属・役職	終了時の 所属・役職	追跡調査時の 所属・役職
第1期 (2007年9月～ 2011年3月)	保険型金融商品の リスク分散メカニ ズムの解明	中野 張	大阪大学 特任 助教	東京工業大学大 学院イノベーション マネジメント研究科 准教 授	東京工業大学情報 理工学院 准教授
第1期 (2007年10月～ 2011年3月)	自己組織化として の皮膚バリア機能 の数理解析	長山 雅晴	金沢大学理工学 研究域数物科学 系 准教授	金沢大学理工学 研究域数物科学 系 教授	北海道大学電子科 学研究所 教授
第1期 (2007年10月～ 2011年3月)	輸送と渋滞に関す る諸現象の統一的 解析と渋滞解消	西成 活裕	東京大学先端科 学技術研究セン ター 准教授	東京大学先端科 学技術研究セン ター 教授	東京大学先端科学 技術研究センター 教授
第1期 (2007年10月～ 2011年3月)	「計算機システムの 科学」のための 数学	蓮尾 一郎	京都大学数理解 析研究所 助教	京都大学数理解 析研究所 助教	国立情報学研究所 アーキテクチャ科 学研究系 准教授 /システム設計数 理国際研究セン ター センター長 /ERATO 蓮尾メタ数 理システムデザイ ンプロジェクト 研究総括
第1期 (2007年10月～ 2011年3月)	離散アルゴリズム に対する品質保証 技術	牧野 和久	東京大学情報理 工系研究科数理 情報学専攻 准 教授	東京大学情報理 工系研究科数理 情報学専攻 准 教授	京都大学数理解析 研究所 教授
第1期 (2007年10月～ 2011年3月)	確率過程の統計推 測法の基礎理論お よびその実装	吉田 朋広	東京大学大学院 数理科学研究科 教授	東京大学大学院 数理科学研究科 教授	東京大学大学院数 理科学研究科 教 授
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	ヤング測度による 高分子共重合体の 微細構造の解明及 びヤング測度の展 開	大下 承民	岡山大学大学院 自然科学研究科 准教授	岡山大学大学院 自然科学研究科 准教授	岡山大学大学院自 然科学研究科(理 学部数学科) 教 授
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	幾何学的変分問題 の解の大域解析と その応用	小磯 深幸	奈良女子大学 教授	九州大学マス・ フォア・インダス トリ研究所 教 授	九州大学マス・フ ォア・インダスト リ研究所 教授
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	振動子理論の生 物・化学・工学・医 療分野への応用	郡 宏	お茶の水女子大 学お茶大アカデ ミック・プロダク ション 特任助 教	お茶の水女子大 学お茶大アカデ ミック・プロダク ション 特任助 教	東京大学大学院新 領域創生科学研究 科複雑理工学専攻 教授
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	統計モデル多様体 の普遍的な性質の ベイズ予測理論へ の応用	田中 冬彦	東京大学大学院 情報理工学研究 科 助教	東京大学大学院 情報理工学研究 科 助教	大阪大学大学院基 礎工学研究科シス テム創成専攻/数 理・データ科学教 育研究センターデ ータ科学部門/量 子情報・量子生命 研究センター 准 教授
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	代数的符号理論に よる組合せ構造の 解析と量子符号へ の応用	原田 昌晃	山形大学大学院 理学部 准教授	山形大学大学院 理学部 准教授	東北大学大学院情 報科学研究科 教 授
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	システム生物学に 関わる情報と記述 の諸問題	春名 太一	神戸大学大学院 理学研究科 助 教	神戸大学大学院 理学研究科 助 教	東京女子大学現代 教養学部数理科学 科 准教授

期 (研究期間)	研究課題	研究者	採択時の 所属・役職	終了時の 所属・役職	追跡調査時の 所属・役職
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	シャノン限界の実現と次世代情報通信理論の構築	平岡 裕章	広島大学 助教	九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 准教授	京都大学高等研究院 教授・高等研究センター長
第2期 (2008年10月～ 2012年3月)	情報幾何学の計算論的神経科学への応用	三浦 佳二	東京大学日本学術振興会 特別研究員(PD)	東北大学情報科学研究科 助教	関西学院大学理工学部生命科学科 准教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	非記号計算の基礎理論の構築と構造学習への応用	石川 博	名古屋市立大学 准教授	早稲田大学理工学術院 教授	早稲田大学理工学術院 教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	数学を応用した動力学シミュレーション法の開発	一宮 尚志	京都大学グローバル COE 特定研究員	岐阜大学大学院医学系研究科 准教授	岐阜大学大学院医学系研究科医療情報学分野 准教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	インフルエンザウイルスの遺伝子変異に内在する数学的構造の探求	伊藤 公人	北海道大学人獣共通感染症リサーチセンター 准教授	北海道大学人獣共通感染症リサーチセンター 准教授	北海道大学人獣共通感染症リサーチセンター 教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	符号・暗号のための代数曲線論	川北 素子	滋賀医科大学医学部 准教授	滋賀医科大学医学部 准教授	滋賀医科大学医学部 准教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	非平衡系における界面張力の数理物理学	北畑 裕之	千葉大学大学院理学研究科 講師	千葉大学大学院理学研究科 准教授	千葉大学大学院理学研究科 准教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	真軌道によるシミュレーションの実現とその応用	斉藤 朝輝	公立ほこだて未来大学システム情報科学部 准教授	公立ほこだて未来大学システム情報科学部 准教授	公立ほこだて未来大学システム情報科学部 教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	揺らぐ結び目構造の数理	坂上 貴洋	京都大学福井謙一記念研究センター 研究員	九州大学理学研究院 助教	青山学院大学理工学部物理数理学科 准教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	非線型マクロ経済モデルのためのフレームワークの構築	田村 隆志	大阪大学大学院基礎工学研究科 助教	大阪府立大学学術研究院 准教授	大阪府立大学学術研究院第2学群数学系 准教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	非線形情報理論：環境雑音を活用する次世代情報処理の実現	寺前 順之介	理化学研究所脳科学総合研究センター 基礎科学特別研究員	大阪大学大学院情報科学研究科 准教授	京都大学大学院情報学研究科先端数理科学専攻 准教授
第3期 (2010年1月～ 2013年3月)	情報論理学の新パラダイムがもたらす生物現象の計算構造の解明	浜野 正浩	沖縄科学技術研究基盤整備機構 研究員	科学技術振興機構 専任研究者	National Cheng Kung University (国立成功大学) School of Computing 教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	力学系における不安定対称解の探査と制御の新展開	水口 毅	大阪府立大学大学院工学研究科 講師	大阪府立大学大学院工学研究科 講師	大阪府立大学大学院理学系研究科理学専攻非線形物理学グループ 准教授
第3期 (2009年10月～ 2013年3月)	非線形放物型方程式の解の爆発とその応用	溝口 紀子	東京学芸大学教育学部 准教授	東京学芸大学教育学部 准教授	東京学芸大学教育学部 准教授

\*田中ダン研究者は研究期間中に逝去

## 第 2 章 追跡調査

### 2.1 追跡調査について

#### 2.1.1 調査の目的

研究領域終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST の事業および事業運営の改善に資することを目的とし本追跡調査を実施した。

#### 2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、さきがけ研究領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索(2007 年度～2012 年度)」の研究者の中で、故人である田中ダン氏(第 1 期)を除く全員を対象とする。採択研究者は、2007 年度採択 11 名、2008 年度採択 8 名、2009 年度採択 12 名である。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

採択年	研究者	さきがけ研究期間	さきがけ終了後の調査対象期間
第 1 期 (2007 年)	荒井 迅	2007 年 4 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	新井 仁之	2007 年 10 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	坂上 貴之	2007 年 9 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	水藤 寛	2007 年 10 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	長藤 かおり	2007 年 10 月～2010 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	中野 張	2007 年 9 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	長山 雅晴	2007 年 10 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	西成 活裕	2007 年 10 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	蓮尾 一郎	2007 年 10 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	牧野 和久	2007 年 10 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
	吉田 朋広	2007 年 10 月～2011 年 3 月	2012 年 1 月～調査終了月
第 2 期 (2008 年)	大下 承民	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
	小磯 深幸	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
	郡 宏	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
	田中 冬彦	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
	原田 昌晃	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
	春名 太一	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
	平岡 裕章	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
三浦 佳二	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月	
	石川 博	2009 年 10 月～2013 年 3 月	2014 年 1 月～調査終了月

第3期 (2009年)	一宮 尚志	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	伊藤 公人	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	川北 素子	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	北畑 裕之	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	斉藤 朝輝	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	坂上 貴洋	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	田村 隆志	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	寺前 順之介	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	浜野 正浩	2010年1月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	水口 毅	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月
	溝口 紀子	2009年10月～2013年3月	2014年1月～調査終了月

### 2.1.3 調査方法

調査は、2020年5月～7月にかけて実施した研究者アンケート、2020年8月～10月にかけて実施した研究総括及び一部の研究者とのインタビュー、領域事後評価用資料等の文献、エビデンス情報収集のための各種データベース、取りまとめ後の情報に関する研究者への事実確認を基に実施した。具体的な調査方法は以下の通りである。

#### (1) 研究助成金

調査対象期間は、本研究領域の期間中(2007年4月～2013年3月)を含めて調査対象月とし、本研究領域の研究者が研究の代表を務める研究助成金を調査した。その中から、原則、研究助成金の総額が1千万円/件以上のものを抽出した。

ただし、各研究課題の開始後に研究助成を受け、当該研究課題が終了する前に、その助成期間が終了してしまう事案および当該研究課題終了と同年度に助成期間が終了する事案に関しては対象外とした。

研究助成資金の獲得状況の調査については、主に以下のWebサイトおよびデータベースを利用し2020年6月に調査した。ただし、これらWebサイト掲載前やデータベース登録前の情報は研究者からの聞き取り調査を参考にした。

- 競争的研究資金の機関データベース (科学研究費助成事業データベース、厚生労働科学研究成果データベース)
- 公益財団法人助成財団センター ([http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap\\_search.php5](http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap_search.php5))
- 日本の研究.com (<https://research-er.jp/>)

#### (2) 論文

論文の抽出は、文献データベースとしてScopus(データソース:2021年1月時点)を用い、文献タイプはArticle, Review, Conference Paperを対象とし、2021年1月に抽出した。研究期間中および研究終了後について研究者が著者になっている論文を、Author IDに紐づけて出力し、研究終了後に発表された論文リストを作成した。リストの論文については、各論文における研究者の所属情報や謝辞等の情報、また、研究者アンケートへの記載の有無を基に、①さきがけの成果と認められるもの、②さきがけの発展と認められるもの、③さきがけと無関係と考えられるもの、に分類した。また、研究終了報告書に記載のある論文で、上記の検索方法で抽出されなかった論文については、さきがけの成果と認められるものとして、リストに加えた。各分類における論文リストは、研究者への事実確認を通じて、確定させた。

#### (3) 特許

研究者が発明者になっているもので、研究期間中の特許出願および登録の状況と、研究終了以降の特許出願および登録の状況について調査した。特許データベースULTRA Patentを用いて2020年10月に検索した。当該データベースでは、研究者名(漢字名及びアルフ

アベット名)で検索することにより、上記の必要な情報を一覧として得ることができる。また、研究終了報告書や研究者アンケートに記載のある特許で、上記の検索方法で抽出されなかった特許についても、さきがけの成果と認められるものとして、リストに加えた。

#### (4) 受賞、招待講演、報道、共同研究や企業との連携等

受賞については、研究終了以降から現在に至るまでの受賞について、2020年8月にWeb検索を実施し、各研究者の研究室ホームページ、科学研究費補助金(科研費)ホームページなどを参考にし、リストを作成した。また、主要な受賞については、受賞者リストから研究者が受賞者になっている賞を抜粋した。さらに、研究者アンケートに記載のある内容を追加した。

招待講演については、研究終了以降から現在に至るまでの受賞について、2020年8月にWeb検索を実施し、各研究者の研究室ホームページ、科研費ホームページなどを参考にし、国内外の主要な会議についてリストを作成した。さらに、研究者アンケートに記載のある内容を追加した。

報道については、日経テレコンを用いて、研究者名+所属機関(研究開始時点/研究終了時点/現時点)で2020年6月に検索を行った後、研究者の成果かどうかを確認することにより、絞り込みを行った。

共同研究や企業との連携等については、2020年5月にWeb検索を実施し、各研究者の研究室ホームページ、科研費ホームページなどを参考にし、リストを作成した。さらに、研究者アンケートに記載のある内容を追加した。

なお、追跡調査にあたっては、各研究者に依頼して、これらすべてのリストと各研究者の主な研究成果の草稿の確認を可能な限りご協力頂いた。

## 2.2 追跡調査概要

### 2.2.1 研究助成金

外部資金獲得状況は研究発展状況を示す一つの指標となる。各研究者の外部資金獲得状況を表 2-2 に示す。

半分程度の研究者が研究課題終了後も科研費を中心に競争的研究資金を獲得して、研究開発を継続的に行っている。その中でも、科研費の獲得件数では、原田が4件、荒井が3件、坂上(貴之)が3件と多い。また、CRESTなどは、坂上(貴之)、吉田、平岡、石川がCRESTの代表研究者として各々1件、水藤、長山がCRESTを各々2件獲得している他、坂上(貴之)がさきがけ、蓮尾がERATOの研究総括を務めている。

表 2-2 研究助成金獲得状況

科研費 ■ JST ■ 内閣府 ■ 文科省 ■ 厚労省 ■ NEDO ■ AMED ■  
 その他 ■

研究者	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	金額(百万円)	
荒井 迅	2007～2010	さきがけ	数学と計算機科学の連携による数理モデルの大域的計算理論	■	■	■	■															40.0	
	2011～2014	科研費若手研究(A)	遷移ダイナミクスへの新しいアプローチ:力学系の全域計算と計算トポロジーの融合					■	■	■	■												18.7
	2018～2022	科研費基盤研究(B)	高次元におけるカオス発生メカニズムの解明とその応用												■	■	■	■	■				17.0
	2019～2024	科研費国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))	力学系と計算トポロジーの融合による新しいデータ解析技術の開発														■	■	■	■	■	■	18.3
新井 仁之	2007～2010	さきがけ	ウェーブレットフレームを用いた視覚の数理モデル	■	■	■	■															40.0	
	2015～2018	科研費基盤研究(B)	フレームレットを用いた視覚の数理解析的研究とその画像処理への応用									■	■	■	■								11.1
	2019～2022	科研費基盤研究(B)	調和解析的方法によるデジタル・フィルタと非線形画像処理の研究及びその応用													■	■	■	■				10.4
坂上 貴之	2007～2010	さきがけ	水圏環境力学理論の構築	■	■	■	■															40.0	
	2010～2015	CREST	渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト				■	■	■	■	■	■										150～498	
	2014～2017	科研費基盤研究(B)	流体方程式の散逸的弱解を通じた乱流理論の新展開								■	■	■	■									12.2
	2015～2019	科研費基盤研究(B)	次世代高速鉄道のためのトンネル圧縮波変形メカニズムの数理解析的研究									■	■	■	■								11.7
	2018～2021	科研費基盤研究(B)	曲面上の渦力学:曲面の幾何もたらす新しい流体運動の数理解析												■	■	■	■					16.6
	2018～2020	未来社会創造	包括的トポロジカルデータ解析共通数理基盤の実現													■	■	■					45.0
水藤 寛	2007～2010	さきがけ	臨床医療診断の現場と協働する数理科学	■	■	■	■															40.0	
	2010～2015	CREST	放射線医学と数理解析の協働による高度臨床診断の実現				■	■	■	■	■											150～498	
	2015～2020	CREST	臨床医療における数理モデリングの新たな展開									■	■	■	■	■	■					150～498	

研究者	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	金額(百万円)
	2019～2021	未来社会創造	AIの学習と数理から解き明かす熟練者の技													■	■	■				22.5
長藤かおり	2007～2009	さきがけ	科学工学モデルの安定性に関する計算機援用解析	■	■	■																40.0
中野張	2007～2010	さきがけ	保険型金融商品のリスク分散メカニズムの解明	■	■	■	■															40.0
	2007～2010	さきがけ	自己組織化としての皮膚バリア機能の数理解析	■	■	■	■															40.0
長山雅晴	2009～2012	科研費 基盤研究(B)	化学反応を伴う粒子および液滴運動に対する数理解析			■	■	■	■													17.2
	2010～2015	CREST	生理学と協働した数理科学による皮膚疾患機構の解明				■	■	■	■	■	■										150～498
	2015～2020	CREST	数理モデリングを基盤とした皮膚科学の創設									■	■	■	■	■	■	■				150～498
	2016～2019	科研費 基盤研究(B)	自己駆動系の集団運動に対する数理モデリングとその数理解析										■	■	■	■						17.7
西成活裕	2007～2010	さきがけ	輸送と渋滞に関する諸現象の統一的解析と渋滞解消	■	■	■	■															40.0
	2013～2016	科研費 基盤研究(B)	様々な渋滞現象の予兆検知のための数理物理学的手法の開発とその実践							■	■	■	■									18.5
	2017～2019	未来社会創造	個人及びグループの属性に適應する群集制御											■	■	■						60.0
	2020～2024	未来社会創造	個人及びグループの属性に適應する群集制御														■	■	■	■	■	1,000.0
蓮尾一郎	2007～2010	さきがけ	「計算機システムの科学」のための数学	■	■	■	■															40.0
	2012～2015	科研費 若手研究(A)	新パラダイム計算をねじふせる一多様な意味論的手法の合同・発展・応用						■	■	■	■										19.2
	2015～2019	科研費 基盤研究(B)	圏論と数理論理学によるものづくりサポート—ソフトウェア科学のシステム工学への移転									■	■	■	■	■						18.1
	2016～2021	ERATO	蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト										■	■	■	■	■	■				1,200.0
牧野和久	2007～2010	さきがけ	離散アルゴリズムに対する品質保証技術	■	■	■	■															40.0
	2012～2016	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	数理論理学からの計算限界解析						■	■	■	■										93.3

研究者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	金額 (百万円)
	2014 ～ 2019	科研費 基盤研究 (B)	列挙構造を利用した高速アルゴリズム開発								■	■	■	■	■	■						16.1
吉田 朋広	2007 ～ 2010	さきがけ	確率過程の統計推測法の基礎理論およびその実装	■	■	■	■															40.0
	2012 ～ 2015	科研費 基盤研究 (B)	確率過程の理論統計と極限定理の研究						■	■	■	■										18.1
	2014 ～ 2019	CREST	先端的確率統計学が開く大規模従属性モデリング								■	■	■	■	■	■						150～ 498
	2017 ～ 2020	科研費 基盤研究 (B)	統計的漸近解析の基礎理論											■	■	■	■					16.0
大下 承民	2008 ～ 2011	さきがけ	ヤング測度による高分子共重合体の微細構造の解明及びヤング測度の展開	■	■	■	■															40.0
小磯 深幸	2008 ～ 2011	さきがけ	幾何学的変分問題の解の大域解析とその応用	■	■	■	■															40.0
	2013 ～ 2016	科研費 基盤研究 (B)	曲面の変分問題の幾何解析における新しい方法の探求							■	■	■	■									10.8
	2020 ～ 2024	科研費 基盤研究 (B)	特異点を持つ超曲面に対する変分問題及び幾何解析と離散曲面論の新展開														■	■	■	■	■	17.4
郡 宏	2008 ～ 2011	さきがけ	振動子理論の生物・化学・工学・医療分野への応用	■	■	■	■															40.0
	2012 ～ 2013	科研費 新学術領域 研究(研究 領域提案 型)	意思決定ダイナミクスの階層性と不安定性を理解するための基礎理論の構築						■	■												13.0
田中 冬彦	2008 ～ 2011	さきがけ	統計モデル多様体の普遍的な性質のベイズ予測理論への応用	■	■	■	■															40.0
原田 昌晃	2008 ～ 2011	さきがけ	代数的符号理論による組合せ構造の解析と量子符号への応用	■	■	■	■															40.0
	2011 ～ 2014	科研費 基盤研究 (B)	代数的符号理論の新展開を目指して						■	■	■	■										16.4
	2015 ～ 2018	科研費 基盤研究 (B)	代数的符号理論の総合的研究									■	■	■	■							15.0
	2019 ～ 2023	科研費 基盤研究 (B)	代数的符号理論の総合的研究														■	■	■	■	■	13.5
春名 太一	2008 ～ 2011	さきがけ	システム生物学に関わる情報と記述の諸問題	■	■	■	■															40.0
平岡 裕章	2008 ～ 2011	さきがけ	シャノン限界の実現と次世代情報通信理論の構築	■	■	■	■															40.0

研究者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	金額 (百万円)
	2012 ～ 2015	科研費 若手研究 (A)	力学系・グレブナー基底・層コホモロジーを用いた超高性能符号開発						■	■	■	■										14.3
	2015 ～ 2020	CREST	ソフトマター 記述言語の創造に向けた位相的データ解析理論の構築									■	■	■	■	■	■					150 ～ 498
	2020 ～ 2023	科研費 基盤研究 (A)	パーシステントホモロジーのランダム化とシユールベルト計算のインタラクション														■	■	■	■		44.9
三浦 佳二	2008 ～ 2011	さきがけ	情報幾何学の計算論的神経科学への応用		■	■	■	■														40.0
石川 博	2009 ～ 2012	さきがけ	非記号計算の基礎理論の構築と構造学習への応用			■	■	■	■													40.0
	2012 ～ 2014	科研費 基盤研究 (B)	高階エネルギーの近似最適化と学習						■	■	■											17.7
	2014 ～ 2019	CREST	認識の数理モデルと高階・多層確率場による高次元実データ解析								■	■	■	■	■	■						150 ～ 498
	2020 ～ 2024	科研費 基盤研究 (A)	画像空間と画像変換学習システムの構造														■	■	■	■	■	44.2
一宮 尚志	2009 ～ 2012	さきがけ	数学を応用した動力学シミュレーション法の開発			■	■	■	■													40.0
伊藤 公人	2009 ～ 2012	さきがけ	インフルエンザウイルスの遺伝子変異に内在する数学的構造の探求			■	■	■	■													40.0
	2013 ～ 2015	科研費 基盤研究 (B)	文字列集合からの逐次データ同化によるインフルエンザウイルスの抗原変異予測							■	■	■										10.1
	2016 ～ 2018	科研費 基盤研究 (B)	文字列統計量を用いたベイズ推定によるインフルエンザウイルスの抗原変異予測										■	■	■							11.3
川北 素子	2009 ～ 2012	さきがけ	符号・暗号のための代数曲線論			■	■	■	■													40.0
北畑 裕之	2009 ～ 2012	さきがけ	非平衡系における界面張力の数理物理学			■	■	■	■													40.0
斉藤 朝輝	2009 ～ 2012	さきがけ	真軌道によるシミュレーションの実現とその応用			■	■	■	■													40.0
坂上 貴洋	2009 ～ 2012	さきがけ	揺らぐ結び目構造の数理			■	■	■	■													40.0
	2012 ～ 2016	科研費 基盤研究 (B)	非相溶性ブレンドの電気粘性効果						■	■	■	■										18.1

研究者	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	金額(百万円)
	2016～2019	さきがけ	高分子物質のトポロジカル構造解析による新規物性の探索と設計										■	■	■							40.0
田村隆志	2009～2012	さきがけ	非線型マクロ経済モデルのためのフレームワークの構築			■	■	■	■													40.0
寺前順之介	2009～2012	さきがけ	非線形情報理論:環境雑音を活用する次世代情報処理の実現			■	■	■	■													40.0
浜野正浩	2009～2012	さきがけ	情報論理学の新パラダイムがもたらす生物現象の計算構造の解明			■	■	■	■													40.0
水口毅	2009～2012	さきがけ	力学系における不安定対称解の探索と制御の新展開			■	■	■	■													40.0
溝口紀子	2009～2012	さきがけ	非線形放物型方程式の解の爆発とその応用			■	■	■	■													40.0
	2014～2018	科研費 基盤研究(B)	非線形放物型方程式系の解の爆発現象の解析									■	■	■	■							15.1
	2020～2024	科研費 基盤研究(B)	走化性方程式系における爆発現象の構造的研究														■	■	■	■		17.6

2020年7月16日調査

## 2.2.2 論文

論文発表件数は研究者の研究活動を示す重要な指標であるため、各研究者についてさきがけの研究成果に該当する論文数と発展に該当する論文数とを調査した。検索はいずれも2021年1月28日に実施した。

成果論文数は全体で258報、発展論文数は全体で359報であった。

成果論文数では、西成が30報の論文を発表している。発展論文数でも、西成が100報を超える論文を発表している。成果論文と比較をすると、西成の論文発表活動が大きく発展していることがわかる。

表 2-3 さきがけの成果および発展の論文(原著論文)数

期 (採択年度)	研究者	①さきがけの成果							②さきがけの発展						
		論文数	責任著者 論文数	平均 FWCI 数	Top 論文数				論文数	責任著者 論文数	平均 FWCI 数	Top 論文数			
					10%	1%	0.1%	0.01%				10%	1%	0.1%	0.01%
第1期 (2007 年度)	荒井 迅	4(1)	3	1.23	1	0	0	0	3	0	0.57	0	0	0	0
	新井 仁之	3	1	0.00	0	0	0	0	11	0	0.00	0	0	0	0
	坂上 貴之	10	7	0.72	0	0	0	0	14	9	0.99	2	0	0	0

	水藤 寛	4	0	0.21	0	0	0	0	2	1	3.99	1	0	0	0
	長藤 かおり	4	2	0.34	0	0	0	0	2	1	0.36	0	0	0	0
	中野 張	1	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0
	長山 雅晴	10(5)	0	0.77	0	0	0	0	11(7)	2	0.83	0	0	0	0
	西成 活裕	30	2	1.16	4	0	0	0	104	0	1.04	14	0	0	0
	蓮尾 一郎	12	6	1.49	2	0	0	0	26	6	1.02	3	1	1	1
	牧野 和久	5	0	1.27	0	0	0	0	12	0	0.41	0	0	0	0
	吉田 朋広	13	3	0.96	0	0	0	0	14	1	0.78	0	0	0	0
第2期	大下 承民	3	1	0.80	0	0	0	0	1	0	0.00	0	0	0	0
(2008	小磯 深幸	6	2	1.33	1	0	0	0	14	0	0.78	0	0	0	0
年度)	郡 宏	18	3	1.25	4	0	0	0	4	2	1.98	1	0	0	0
	田中 冬彦	4	3	0.03	0	0	0	0	2	0	0.00	0	0	0	0
	原田 昌晃	19	14	0.55	0	0	0	0	10	6	0.23	0	0	0	0
	春名 太一	6	4	0.81	0	0	0	0	12	8	0.29	0	0	0	0
	平岡 裕章	8(1)	2	1.70	2	0	0	0	17(1)	1	1.51	2	0	0	0
	三浦 佳二	8	2	1.20	1	0	0	0	8	5	0.47	0	0	0	0
第3期	石川 博	2	1	2.32	1	0	0	0	10	2	0.75	1	0	0	0
(2009	一宮 尚志	3	3	0.33	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0
年度)	伊藤 公人	8	4	0.87	1	0	0	0	3	1	1.82	1	0	0	0
	川北 素子	2	1	0.84	0	0	0	0	4	2	0.78	0	0	0	0
	北畑 裕之	25(5)	6	0.79	1	0	0	0	31(5)	4	0.92	3	0	0	0
	斉藤 朝輝	6	4	0.72	1	0	0	0	4	2	0.65	0	0	0	0
	坂上 貴洋	22	8	1.34	3	0	0	0	20	8	0.70	0	0	0	0
	田村 隆志	3	2	0.20	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0
	寺前 順之介	6	1	1.23	0	0	0	0	10	3	0.58	1	0	0	0
	浜野 正浩	3	2	0.15	0	0	0	0	2	1	0.00	0	0	0	0
	水口 毅	5	2	0.09	0	0	0	0	6	0	0.31	0	0	0	0
	溝口 紀子	10	7	1.43	1	0	0	0	6	2	1.60	2	0	0	0
	領域全体	258(7)	96	0.99	23	0	0	0	359(8)	67	0.89	31	1	1	1

1 各研究者の論文数は共著による重複論文を含むため、領域全体の論文数の合計数は一致しない。( )中の数値は重複論文数。領域全体の論文数には重複論文数は含まない。重複論文の概要(関係する研究者名)を注釈に記す。

2 責任著者とは Corresponding Author と同義。責任著者論文数は参考として記載。

3 平均FWCI値は、調査最終年マイナス1年まで(今回の調査では2019年末まで)の論文を対象とし、FWCI値が得られる論文(FWCI値=0含む)で平均した数値とした。

4 Top%値はFWCI値ベースとした。またTop%論文は「論文数」でリストアップした論文を対象とする。

5 各Top%論文数は“以内”を意味し、例えばTop10%の欄には1%以下も含む件数をカウントした。

2021年1月28日調査

表 2-4 成果論文における共著関係

No	期生	研究者(報数)	共著の概要
1	第1期	荒井 迅(1)	平岡 裕章 <sup>A</sup> と1報
2	第1期	長山 雅晴(5)	北畑 裕之 <sup>A,A,A,A,C</sup> と5報
3	第2期	平岡 裕章(1)	荒井 迅 <sup>A</sup> と1報
4	第3期	北畑 裕之(5)	長山 雅晴 <sup>A,A,A,A,C</sup> と5報

注) 共著論文に対して、各共著者が、Aは成果論文、Cはその他と位置付けていることを表す

表 2-5 発展論文における共著関係

No	期生	研究者(報数)	共著の概要
1	第1期	長山 雅晴(7)	北畑 裕之 <sup>B,B,B,B,B,C,C</sup> と7報
2	第1期	平岡 裕章(1)	一宮 尚志 <sup>C</sup> と1報
3	第1期	北畑 裕之(5)	長山 雅晴 <sup>B,B,B,B,B</sup> と5報

注) 共著論文に対して、各共著者が、Bは発展論文、Cはその他と位置付けていることを表す

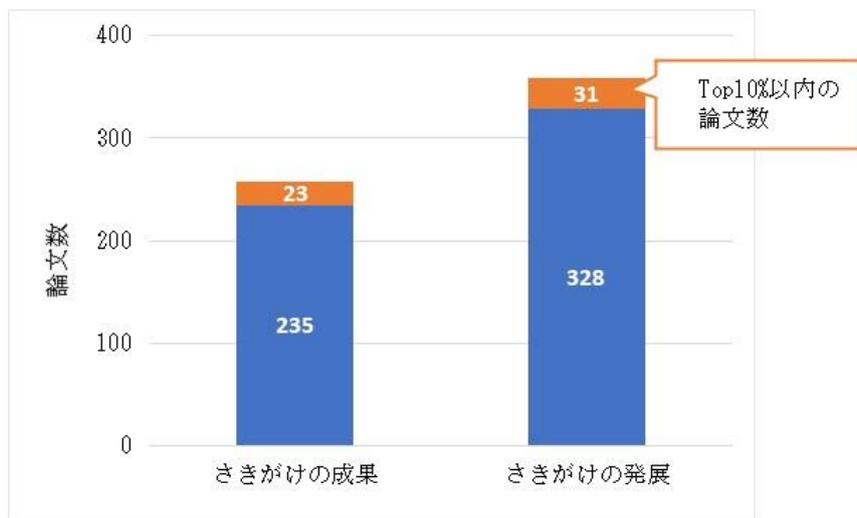


図 2-1 さきがけの成果および発展に関する論文数

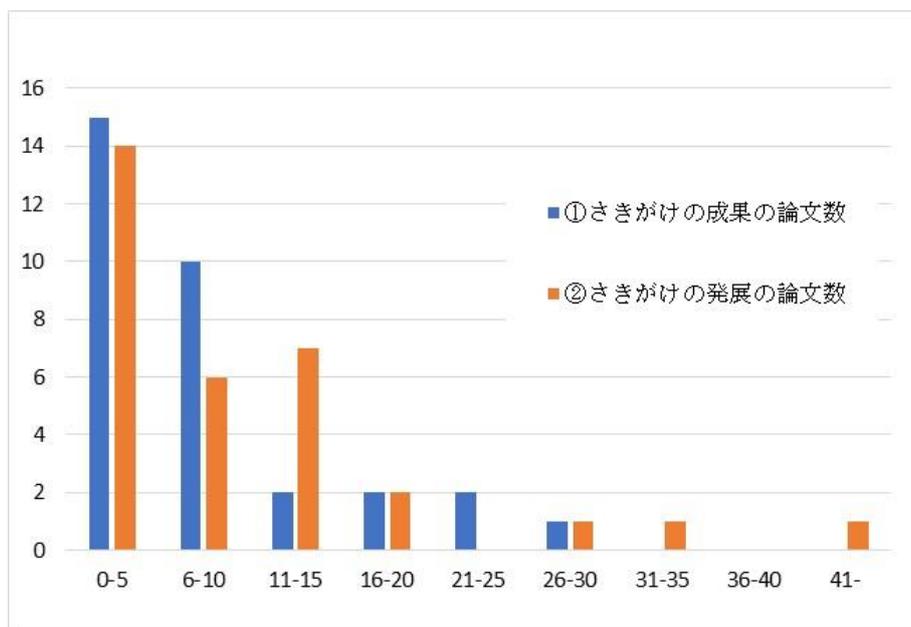


図 2-2 各研究者の論文数分布

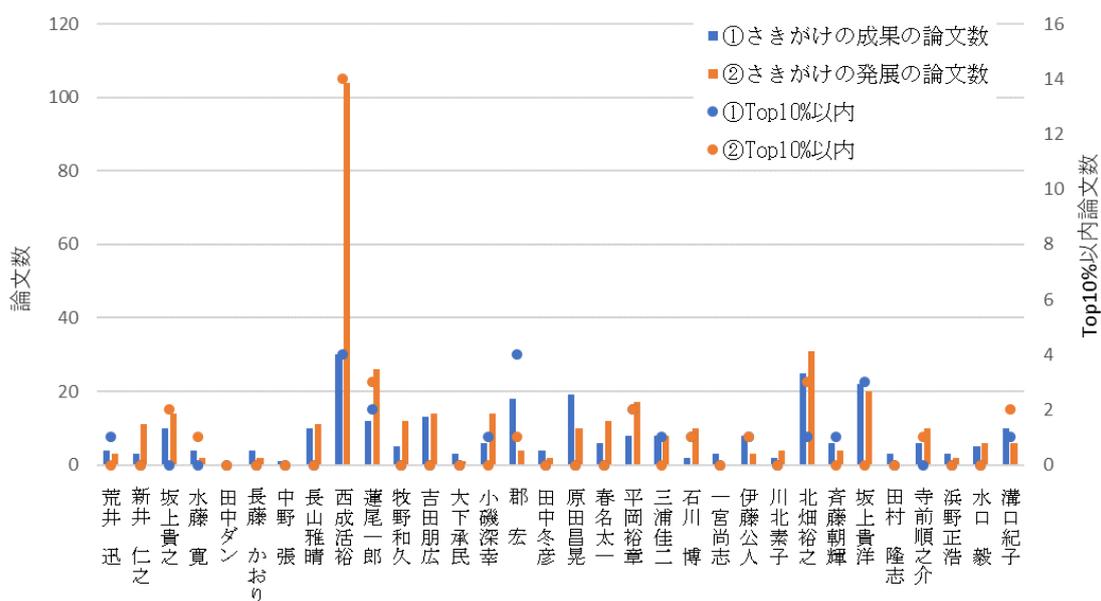


図 2-3 各研究者の研究領域期間中・終了後の論文数

研究者別では、各研究者間でばらつきはあるが、さきがけの研究成果の論文を最も多く発表したのは、第1期の西成で30報、次いで第3期の北畑が25報、第3期の坂上(貴洋)が22報であった。また、さきがけの研究成果の継続と発展に関しては、第1期の西成が104報で最も多く、次いで第3期の北畑の31報であった。

また、Pecentile についても調査を実施したところ、Top10%以内の論文数は、成果論文では 23 報で、西成が 4 報、坂上(貴洋)が 3 報と多い。また、発展論文では 31 報で、西成が 14 報、蓮尾と北畑が 3 報と多い。

また、本研究領域内での共著論文数は、研究期間中のさきがけ研究成果で 7 報、一方で研究終了後のさきがけ研究成果の発展に関しては 8 報あり、さきがけ研究を通じて、研究者間のネットワークの広がりによって共同研究が進んだものと考えられる。

これら論文の業績については、数学分野の特有の状況を加味する必要がある。それは他分野と比較し、一人または少人数での研究が多く単著も多いこと、また、論文投稿の際の厳密証明を行うプロセス、投稿後のレビューに多大な時間がかかるため論文発表まで数年を経ることが稀ではないという状況である。本研究領域の研究者の諸分野への活動拡大は、このような数学分野と他分野との研究成果の出方の違いの理解も進めたものと考えられ、今後の多くの連携研究へとつながって行くものと期待される。

### 2.2.3 特許

特許出願件数・登録件数は研究開発が応用に向けて進展していることを表す一つの指標であると考えられるため、研究期間中と研究終了後の状況について調査し、表 2-6 に示した。

研究期間中の研究者の特許出願は国内 2 件、海外 1 件であった。成立件数(期間中に申し出た特許のうち、現時点で特許登録されている件数)は、国内 1 件(西成)、海外 1 件(郡)であった。

研究期間後の特許出願は、国内 34 件、海外 15 件であり、うち国内 18 件、海外 9 件が特許として成立している。研究期間後では、新井、西成の特許出願数が多く、両者とも、海外出願も積極的に行っている。

また、本さきがけ領域の研究者が発明者として含まれ、企業が出願人となっている特許は、出願 18 件であり、9 件(国内 7 件、海外 2 件)が成立している。

表 2-6 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

採択年度	研究代表者	研究期間中				研究終了後			
		出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
		国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
2007年度	荒井 迅	0	0	0	0	0	0	0	0
	新井 仁之	0	0	0	0	10	5	8	4
	坂上 貴之	0	0	0	0	5	4	3	3
	水藤 寛	0	0	0	0	0	1	0	0
	長藤 かおり	0	0	0	0	0	0	0	0
	中野 張	0	0	0	0	0	0	0	0

	長山 雅晴	1	0	0	0	1	1	0	0
	西成 活裕	1	0	1	0	8	2	4	2
	蓮尾 一郎	0	0	0	0	4	0	1	0
	牧野 和久	0	0	0	0	4	0	2	0
	吉田 朋広	0	0	0	0	0	0	0	0
2008 年度	大下 承民	0	0	0	0	0	0	0	0
	小磯 深幸	0	0	0	0	0	0	0	0
	郡 宏	0	1	0	1	0	0	0	0
	田中 冬彦	0	0	0	0	0	0	0	0
	原田 昌晃	0	0	0	0	0	0	0	0
	春名 太一	0	0	0	0	0	0	0	0
	平岡 裕章	0	0	0	0	0	0	0	0
三浦 佳二	0	0	0	0	0	0	0	0	
2009 年度	石川 博	0	0	0	0	1	1	0	0
	一宮 尚志	0	0	0	0	0	0	0	0
	伊藤 公人	0	0	0	0	0	0	0	0
	川北 素子	0	0	0	0	0	0	0	0
	北畑 裕之	0	0	0	0	0	0	0	0
	斉藤 朝輝	0	0	0	0	0	0	0	0
	坂上 貴洋	0	0	0	0	0	0	0	0
	田村 隆志	0	0	0	0	0	0	0	0
	寺前 順之介	0	0	0	0	1	1	0	0
	浜野 正浩	0	0	0	0	0	0	0	0
	水口 毅	0	0	0	0	0	0	0	0
	溝口 紀子	0	0	0	0	0	0	0	0
領域全体	2	1	1	1	34	15	18	9	

1) PCT 出願、海外国への個別特許申請のいずれかがあれば、海外 1 件としてカウント。

2) 国内特許出願し PCT 出願あるいは直接 PCT 出願された場合は国内出願件数に含めてカウント。

2020 年 10 月 28 日調査

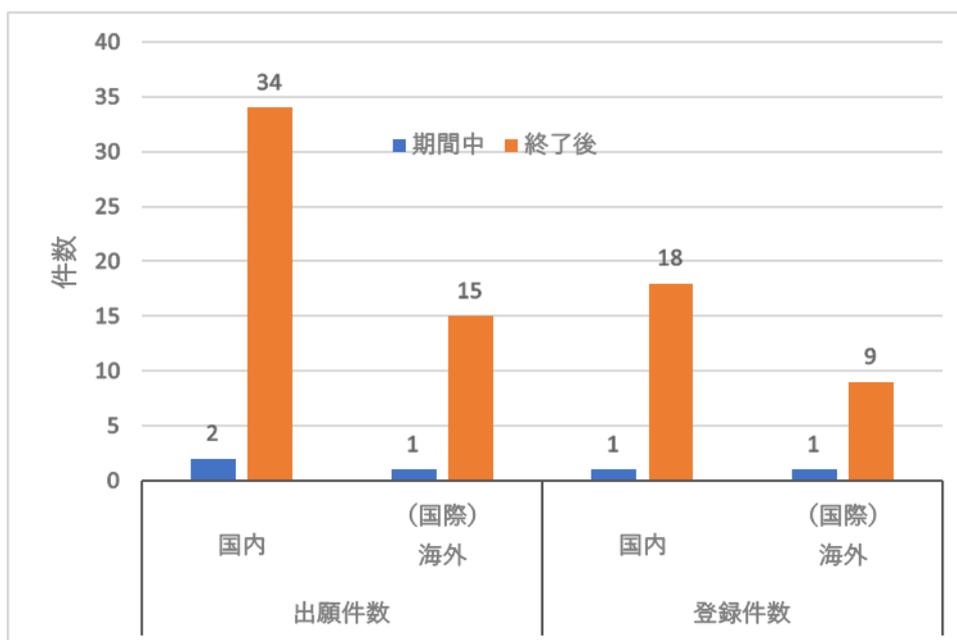


図 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

これら特許の業績については、基盤的理論としての数学・数理科学の研究成果が特許出願の形として必ずしも現れないことを加味する必要がある。それは、アルゴリズムなどの場合、特許が活きる特許侵害確認が困難なこと、オープン・クローズ戦略の中で、オープンとし多数の人に供与することで社会貢献のための応用の拡がりを促したり、社会受容性の醸成や新たな市場形成を狙うことが望ましい場合が多いためである。

#### 2.2.4 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞歴が挙げられる。表 2-7 に、研究終了後の研究者の受賞歴を示す。

若手研究者に対する著名な賞である、文部科学大臣表彰若手科学者賞を、坂上(貴洋)が 2012 年に受賞した他、文部科学大臣表彰科学技術賞を、新井が 2008 年に、水藤が 2019 年に受賞した。また、平岡は、科学技術への顕著な貢献をした研究者として、「ナイスステップな研究者」として選定されている。本研究領域の研究者は、その他、学会賞などを受賞している。

表 2-7 研究終了後の受賞リスト

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
1.	新井 仁之	文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)	文部科学省	2008
2.		日本応用数学会論文賞(JJIAM 部門)	日本応用数学会	2013
3.		第 8 回科学技術の「美」パネル展優秀賞	科学技術団体連合	2014

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
4.		第7回藤原洋数理科学賞大賞		2018
1.	坂上 貴之	現象数理学三村賞	明治大学先端数理科学インスティテュート	2019
2.		日本応用数理学会論文賞(応用部門)	日本応用数理学会	2020
1.	水藤 寛	藤原洋数理科学賞大賞	藤原洋数理科学賞運営事務局	2013
2.		現象数理学三村賞	明治大学先端数理科学インスティテュート	2018
3.		科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞	文部科学省	2019
1.	蓮尾 一郎	藤原洋数理科学賞奨励賞	日本数学会後援	2012
2.		最優秀論文賞	国際会議 CONCUR 2014 プログラム委員会	2014
3.		最優秀論文賞	国際会議 ICECCS 2018 プログラム委員会	2018
1.	牧野 和久	FAW-AAIM 2013 Best Paper Candidates	国際会議 FAW-AAIM	2013
2.		人工知能学会研究会優秀賞	人工知能学会	2015
3.		FIT2015 船井ベストペーパー賞	FIT	2015
4.		ISAAC 2016 Best Paper Award	国際会議 ISAAC	2016
5.		日本オペレーションズ・リサーチ学会 事例研究賞	日本オペレーションズ・リサーチ学会	2019
1.	吉田 朋広	藤原洋数理科学賞大賞	日本数学会, 日本応用数理学会、 株式会社インターネット総合研究所	2019
1.	春名 太一	Best Poster Award	The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems / The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems	2012
2.		Best Paper Award	The 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics / The 3rd International Symposium on Biocomplexity	2018
1.	平岡 裕章	藤原洋数理科学賞奨励賞	藤原洋数理科学賞 運営事務局	2012
2.		科学技術・学術政策研究所 科学技術への顕著な貢献 2016	科学技術・学術政策研究所	2016
1.	三浦 佳二	青葉工学振興会 研究奨励賞	青葉工学振興会	2012
2.		藤原洋数理科学賞 奨励賞	藤原洋数理科学賞運営事務局	2014
1.	石川 博	電子情報通信学会論文賞	電子情報通信学会	2019
1.	坂上 貴洋	日本物理学会 日本物理学会若手奨励賞	日本物理学	2011
2.		科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2012
1.	溝口 紀子	猿橋賞	女性科学者に明るい未来をの会	2011

### 2.2.5 招待講演

研究者の研究成果を、学会における招待講演として発表した件数が、研究終了後、合計335件に上った。特に、小磯が90件と多く、次いで寺前が37件の招待講演を行っている。

小磯は、薄膜や微小液滴の数理モデルである平均曲率一定曲面(CMC)に関する講演が多く、7th International Meeting on Lorentzian Geometry(ブラジル)、8th International Congress on Industrial and Applied Mathematics(中国)等、海外でも多くの講演実績がある。

寺前は、大脳皮質のネットワークダイナミクスの数理モデルに関する講演が多く、International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications(米国)、AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications(スペイン)The Second International Workshop on Brain-Inspired Information Communication Technologies(米国)等、海外でも多くの講演実績がある。

### 2.2.6 報道

研究成果の発信、および社会・経済への波及を促す媒体として新聞等の報道がある。研究終了後に報道機関から報じられた件数は、総数が586件に上った。研究者別では、西成が398件で最も多く、研究成果が社会的にも注目されていることを示している。次いで、石川が66件、新井が37件となっている。

### 2.2.7 共同研究や企業との連携

本研究領域では、研究者自身の海外研究留学時代のネットワーク、国際共同研究プログラムへの応募、さきがけの研究成果に関心を有する海外研究者からの共同研究の打診などにより、国際共同研究も活発に行われている。

坂上(貴之)は、日本ニューマチック工業株式会社、鉄道総合技術研究所などと共同研究を行っている。中野は、年金積立金管理運用独立行政法人との共同研究を行っている。長山は、株式会社資生堂との共同研究を行っている。西成は、三菱電機株式会社、鈴木株式会社、全日本空輸株式会社(以下、ANA)等、多数の企業との共同研究を行っている。蓮尾は、電機、重工業、自動車分野での6企業との共同研究を行っている。小磯は株式会社デンソーとの共同研究を行っている。小磯は、トポロジカルデータ解析の材料科学への応用研究に関して、企業6社と共同研究を行っている。石川は、株式会社東芝、アイシン精機株式会社と深層学習の応用について共同研究している。北畑裕之は、株式会社デンソーと共同研究を行っている。寺前は2社との共同研究を行っている。

多様な業種の多数の企業との連携は、実社会での本研究領域の数学の研究成果の有効性を表しているとともに、そのすそ野の広さを示しているものと考えられる。

### 2.2.8 実用化・製品化

本研究領域は、以下のような実用化・製品化に向けた取り組みが進められている。

西成の渋滞や群衆マネジメントの研究成果は、空港の施設設計や運営、東京オリンピック運営準備、自治体での群衆事故防止、欧州・中国等での混雑対策として活用されている。

坂上(貴之)は、流線トポロジー理論に基づく数値解析ソフトウェア「psiclone」を開発し、企業にライセンス供与する形で活用されている。

吉田は、確率過程に関するRパッケージ「YUIMA」を開発し、オープンソースソフトウェアとして公開している。

平岡は、パーシステントホモロジーを計算するソフトウェア「HomCloud」を開発し、オープンソースソフトウェアとして公開し複数の企業で活用されている。

石川は、高階エネルギー削減ソフトウェアは医療施術支援ツールとして商用化され、白黒画像着色ソフトウェアは多くのメディア、雑誌で活用されている。

### 2.2.9 ベンチャー

本研究領域において、研究成果に関連して設立されたベンチャーはないが、蓮尾はベンチャー企業の設立を構想している。

## 2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

### 2.3.1 研究領域の展開状況(展開図)

戦略目標	インプット	アクティビティ/アウトプット	アウトカム (short/mid-term)		アウトカム (long-term) / インパクト																	
			追跡調査時点	今後予想される展開	今後想定される波及効果																	
<p><b>戦略目標・達成目標</b></p> <p>戦略目標： 社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学/数理科学研究によるブレークスルーの探索（幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として）</p> <p>達成目標</p> <p>(1)直面する社会的課題への模索と挑戦</p> <p>(2)諸科学（物理、化学、生命等）との連携による自然を理解するための新たな探索</p> <p>(3)新たな研究課題の発掘と数学的手法の開発</p>	<p><b>研究体制</b></p> <p>研究総括 西浦 廉政</p> <p>研究者</p> <p>荒井 迅 新井 仁之 坂上 貴之 水藤 寛 田中 ダン 長藤 かおり 中野 張 長山 雅晴 西成 活裕 蓮尾 一郎 牧野 和久 吉田 朋広 大下 承民 小磯 深幸 郡 宏 田中 冬彦 原田 昌晃 春名 太一 平岡 裕章 三浦 佳二 石川 博 一宮 尚志 伊藤 公人 川北 素子 北畑 裕之 齊藤 朝輝 坂上 貴洋 田村 隆志 寺前 順之介 浜野 正浩 水口 毅 溝口 紀子</p>	<p><b>研究成果</b></p> <p>論文</p> <table border="1"> <tr> <td>①さきがけ研究成果の論文数</td> <td>②さきがけ研究成果の継続発展の論文数</td> </tr> <tr> <td>258 (23)</td> <td>359 (31)</td> </tr> </table> <p>( )の値はTop10%以内論文数</p> <p>特許申請・登録</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">出願</th> <th rowspan="2">国内</th> <th>期間中</th> <th>終了後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th rowspan="2">登録</th> <th>国内</th> <td>34</td> <td>15</td> </tr> <tr> <th>国際</th> <td>18</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table> <p>副次的成果物（ソフトウェア、データベース）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・流線トポロジー理論に基づく数値解析ソフトウェア「psiclone」の開発（坂上貴之）</li> <li>・確率過程に関するRパッケージ「YUIMA」の開発（吉田）</li> <li>・パーシステントホモロジーを計算するソフトウェア「HomCloud」の開発（平岡）</li> <li>・高階エネルギー削減ソフトウェア、白黒画像着色ソフトウェアの開発（石川）</li> </ul> <p>アウトリーチ活動</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・一般向けのアウトリーチとして、さきがけ数学塾（大学生）、JST数学キャラバン（高校生）を開始。後者は2019年まで継続（全体）</li> <li>・数学よろず相談室（Math Clinic）の開始（坂上貴之）</li> </ul>	①さきがけ研究成果の論文数	②さきがけ研究成果の継続発展の論文数	258 (23)	359 (31)	出願	国内	期間中	終了後	2	1	登録	国内	34	15	国際	18	9	<p>科学技術的および社会・経済的な波及効果</p> <p>(1)直面する社会的課題への模索と挑戦</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・臨床医学分野での血流の構造解析への適用（水藤）</li> <li>・脳活動の状況のモデリング手法の開発（三浦）</li> <li>・皮膚構造（表皮、真皮乳頭層）の数理モデルをもとに新たな人工皮膚を設計・構築（長山）</li> <li>・ウイルスの塩基配列によりウイルス動態を解析（伊藤）</li> <li>・渋滞現象の数理モデルに基づき、対策効果を実証、渋滞予測を実現。東京オリンピック準備、欧州・中国等で混雑対策として実装され、効果を示している。（西成）</li> <li>・体内時計の数理モデルをもとに、時差ボケのメカニズムを解明、その回避メカニズムを提案。（郡）</li> </ul> <p>(2)諸科学（物理、化学、生命等）との連携による自然を理解するための新たな探索</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・位相幾何学的・力学的アルゴリズムに基づき、化学反応、力学系等の可視化手法を提案（荒井）</li> <li>・流線トポロジー解析の気象、医療分野への適用（坂上貴之）</li> <li>・結晶・液晶の数理モデルの理論的な拡張（小磯）</li> <li>・パーシステントホモロジーにより、ガラス材料の構造解析手法を構築（平岡）</li> <li>・環状高分子鎖のダイナミクスの一部解明（坂上貴洋）</li> <li>・界面張力勾配による対流現象による物質輸送のモデル構築（北畑）</li> <li>・かざぐるまフレームレットを用いた色の同時対比錯視、エッジ抽出等画像処理への応用（新井）</li> </ul> <p>(3)新たな研究課題の発掘と数学的手法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・計算機システムの品質保証手法に基づき、実用的なアルゴリズム群を実装。ソフトウェアのバグ解析などに活用が開始。ベンチャー設立を企画中（蓮尾）</li> <li>・確率微分方程式に対象を拡大し、統計的推論方法を開発（吉田）</li> <li>・量子ベイズ統計による無情報事前分布の選択原理を提案（田中）</li> <li>・順序エントロピー理論により、時系列間の複雑性の尺度を提案（春名）</li> <li>・高階エネルギー最小化に基づく高精度な3D画像セグメンテーション技術の開発（石川）</li> <li>・真軌道計算に基づく高品質な疑似乱数の生成器の開発（齊藤）</li> <li>・脳の仕組みを利用した新しいニューラルネットワーク学習則の発見（寺前）</li> </ul>	<p>今後予想される展開</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・臨床医学分野での臓器の形状表現への展開（水藤）</li> <li>・ニューロモルフィックデバイスへの学習則の実装（寺前）</li> <li>・良質な人工皮膚による皮膚関連製品開発の加速（長山）</li> <li>・ウイルスの流行可能性のより高度な把握（伊藤）</li> <li>・群衆行動の混雑リスク低減への展開（西成）</li> <li>・シフトワーカーの負担軽減への展開（郡）</li> </ul> <p>可視化手法のより広範な化学反応及び力学系ダイナミクスへの適用（荒井）</p> <p>流線トポロジー可視化の気象・医療分野への適用（坂上貴之）</p> <p>ナノ結晶の構造解明および新たなマテリアル開発への展開（小磯）</p> <p>パーシステントホモロジー理論の先端材料開発への活用（平岡）</p> <p>高分子材料の制御に基づく材料開発への適用（坂上貴洋）</p> <p>金融分野における確率微分方程式のモデリングにおける活用（オプション価格等）（吉田）</p> <p>量子計算機上での量子ベイズ統計モデルの実証（田中）</p> <p>医療画像解析の高度化への活用（石川）</p> <p>画像処理分野における錯視現象の活用（新井）</p>	<p>今後想定される波及効果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・血管等の実態把握を通じた治療支援・診断</li> <li>・皮膚に関する老化・痒みなどの問題の対処方法への展開</li> <li>・渋滞緩和走行や予測を通じた渋滞・混雑の緩和</li> <li>・シフトワーカーの労働環境の改善</li> </ul> <p>ダイナミクスの数理的な理解による基づく科学的・工学的な理解の進展</p> <p>高分子材料、ナノ結晶、アモルファス等の高機能の材料開発による、製品等の高品質化</p> <p>様々な応用分野における数学的手法の実用化</p> <p>将来的な数学分野のブレークスルーにつながる基礎的な知見の蓄積</p>
①さきがけ研究成果の論文数	②さきがけ研究成果の継続発展の論文数																					
258 (23)	359 (31)																					
出願	国内	期間中	終了後																			
		2	1																			
登録	国内	34	15																			
	国際	18	9																			

図 2-5 本研究領域の展開図

### 2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

以下に、研究成果の科学技術の進歩への貢献について代表的な事例を示す。

平岡は、本研究領域での研究終了後、トポロジカルデータ解析の理論開発、及び、理論の材料科学への応用研究を行った。パーシステントホモロジーを用いることで、ガラス材料に内在する新たな中距離秩序構造を発見することに成功している。このような新たな記述法の開発は、ガラスとは何かという長年の基礎科学の問題の理解を深めるものであり、さらに、ガラス以外の材料でのクラック早期発見、劣化破壊に関する研究も実施している。

新井は、本研究領域の研究成果(かざぐるまフレームレット)をベースとした応用研究を展開している。文字列傾斜錯視の自動生成、視覚効果を利用した画像処理(強調等)、新しいデジタル・フィルタ群の設計等の研究を実施しており、それらの研究を含む複数の特許を申請・取得している。長山は皮膚構造の数理モデルを基にした新たな人工皮膚の設計・構築を行った。この人工皮膚は、今後、皮膚疾患、加齢変化のメカニズム、表皮機能の解明や新薬開発、化粧品安全性試験に用いられるリサーチツールとして期待される。

西成は、本研究領域の研究成果を発展させ、渋滞学に関する研究を深化させている。例えば、渋滞吸収走行による渋滞緩和効果の理論解析、通路における双方向人流のリスク指標の提案、人の混雑判定の指標となる新しい「混雑度」の提案、自動車の走行情報をもとに渋滞発生の予測が可能なシステムの開発等を実施した。群は様々な分野で問題となる振動子集団ダイナミクスの研究を発展させ、時差ボケの回避方法を提案した。これはシフトワーカーの負担を軽減するスケジュール提案や健康管理などへの応用が見込まれる。

寺前は大脳皮質の自発揺らぎの研究を発展させ、最新の脳の知見を用いた脳内ニューロンとシナプスの確率的動作に基づいた現在のニューラルネットワークを超える新たな学習則を発見した。

蓮尾はERATO「蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト」の研究総括となり、従来のサイバーフィジカルシステム分析手法の課題解決を目的に、物理情報システムを対象とした安全性保証のためのブラックボックス解析手法を考案している。ブラックボックス解析では、完全に論理的な証明は不可能となるが、テストと論理的な検証を組み合わせることで分析を行うことが可能であり、システム全体としての安全性の保証が可能である。

伊藤は、本研究領域の成果である塩基配列の分析と、数理モデルによる感染動態の分析を組み合わせることを目標にCREST研究領域「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」にて研究課題「大規模生物情報を活用したパンデミックの予兆、予測と流行対策策定」(2014年、研究代表者西浦博)に関する共同研究を実施している。その他、Wright-Fisher-Kimuraモデルをベースとしてウイルス変異の集団への定着確率の分析を実施し、近年では新型コロナウイルスに対してこの分析を実施している。

水藤は本研究領域での研究成果を発展させ、CREST研究領域「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」にて研究課題「臨床医療における数理モデリングの新たな展開」(2015)に取り組んだ。より広い領域での臨床医学と数理科学の協働を進め、血管形状

の幾何学的特徴付けと血流の構造の関係を明らかにするとともに、熟練医の経験の言語化に取り組んだ。

坂上(貴之)は Topological Flow Data Analysis について研究を進め、本研究領域の研究成果(二次元非圧縮流体に対する流線トポロジーの分類理論)を与えられた流れデータに応用できるソフトウェア(psiclone)の開発を実施した。また、非圧縮性流体の制限を取り除いて、圧縮性流体や三次元流れの二次元断面に利用できるトポロジー分類理論への拡張を行い、環境・医療等の様々な問題への適用を図っている。

### 2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献

研究成果の社会・経済への貢献について、平岡はパーシステントホモロジー計算ソフトウェア「HomCloud」を開発し、現在複数の企業がそのソフトウェアを利用している。また、HomCloudの利用者(企業・研究者)を集めたコンソーシアムの設立を計画しており、研究成果を企業等に技術移転し、社会還元しようとして活動している。新井は研究成果のライセンスを企業に展開しており、錯視に関連した製品として、菓子メーカーの商品パッケージや東京大学の浮遊錯視多目的クロス、浮遊錯視図書カードの開発などに研究成果が活用されている。西成の研究成果は欧州や中国など世界中で注目され、実際に渋滞緩和が成功した事例がある。国内では、西成は東京オリンピック組織委員会アドバイザーとして、開催時の混雑解消、安全な観客誘導の方策を担っており、また、ANA との共同研究において、感染リスクを抑制する搭乗方式への変更をアドバイスしている。蓮尾は企業との共同研究で自動運転システムの安全性証明及びテスト方法に関する研究を実施している。今後研究を進めることで、セーフティクリティカルなシステムの解析に貢献できると期待される。伊藤の研究成果は、2016年にWHO Collaborating Centreを中心とする会議体で発表され、その会議体での検討(インフルエンザワクチン株の選定に向けた変異予測の導入)に貢献した。水藤は間質性肺炎の診断に関わる気管支走行の自動抽出と評価に用いるアルゴリズムを完成させている。坂上(貴之)の開発したソフトウェア(psiclone)は企業が水、空気に限らず、方向を持って変化する流れの各種データを解析するために活用されている。また、本研究領域で行った諸分野協働活動を、より広く多くの分野に展開するために、数学よろず相談室(Math Clinic)を開設した。過去3年間で16件の相談があり、いくつかの企業との共同研究に結びついている。

本研究領域の研究者によるアウトリーチ活動も積極的に行われている。例えば、インターネットメディアでの掲載(新井がITmediaにて錯覚に関する連載記事を執筆)や書籍の執筆、シンポジウムの開催(ERATO「蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト」シンポジウム等)、高校生向けの出張授業事業への参画(ACADEMIC FANTASISTA事業)等が実施されており、これらの活動は数学という学問の社会への浸透・普及に貢献している。

### 2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合)

本研究領域には、キャリアアップして教授・教授相当になった研究者が25名おり、要職に就いた研究者を複数輩出している。例えば、平岡は京都大学高等研究院高等研究センタ

一長や東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR)の副機構長に就任している。蓮尾はERATO「蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト」、坂上(貴之)はさきがけ研究領域「数学と情報科学で解き明かす多様な対象の数理構造と活用」の研究統括に就任している。

また、新しい組織の設立例も見られ、西成は関心を持つ企業と議論を行うための群衆マネジメント研究会を開設、また、高度物流人材育成のため、東京大学 先端物流科学寄附研究部門に複数企業による寄附講座を立ち上げた。坂上(貴之)は英国、米国、オーストラリアなどの研究者と Applied and Computational Complex Analysis の研究グループを立ち上げ、若手研究者を含む人事交流や論文共著を開始している。2019年度にはこのメンバーが中心となって英国ケンブリッジ大学ニュートン研究所での長期プログラムを実施する等、国際的な活動に広がりを見せている。

本研究領域では、研究者同士の協力関係が研究領域終了後も継続し、拡大している。例えば小磯と北畑は、微小液滴の数理モデルの幾何学的形状についての共同研究を行い、共著論文を執筆中である。平岡と一宮はCREST研究領域「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」、研究課題「ソフトマター記述言語の創造に向けた位相的データ解析理論の構築」(2015年)にて共同研究を実施している。

本研究領域は、JST 戦略研究事業で初めての数学関連の領域である。本研究領域により、数理材料科学、数理臨床医学、数理皮膚学、渋滞学などの新しい分野の展開につながった。これら実社会の様々な分野で数学の有用性を示したことは、従前の、命題の証明を中心とする伝統的なアプローチが主流であった数学界に対し、数学を社会に開き、純粋数学だけではなく応用数学およびその研究者の認識向上の大きな端緒となり、我が国の応用数学の人材育成にもつながった。また、昨今のAIやビックデータ関連の研究の盛り上がりの前に先んじて本研究領域を立ち上げたことは、本研究領域の研究成果や人材がうまくこれら研究につながる結果となった。本研究領域終了後、数理科学の関連として2013年度からCREST「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビックデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」、CREST・さきがけ「ビックデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」、2014年度からCREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」、さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」、2015年度からさきがけ「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築」、さきがけ「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出」、2016年度からERATO「蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト」、2019年より、CREST「数学・数理科学と情報科学の連携・融合による情報活用基盤の創出と社会課題解決に向けた展開」、さきがけ「数学と情報科学で解き明かす多様な対象の数理構造と活用」など多くの研究領域が立ち上がっている。これらの研究領域の中には本研究領域の研究者が研究統括、研究代表者などとして研究の中心を担っているものもある。

### 第 3 章 各研究課題の主な研究成果

#### 3.1 2007 年度採択研究課題

##### 3.1.1 数学と計算機科学の連携による数理モデルの大域的計算理論 (荒井 迅)

###### 数学と計算機科学の連携による数理モデルの大域的計算理論

展開している事業:

荒井 迅(中部大学創発学術院人間力創成総合教育センター教養課題教育プログラム(科学リテラシー) 教授)

科研費若手(A)、科研費国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))、科研費基盤(B)

研究期間 2007 年 4 月～2011 年 3 月

#### さきがけの成果:

位相幾何学的手法と計算機科学の成果を組み合わせることにより、力学系の大域的計算理論を展開するための基礎となるアルゴリズムを開発した。



#### 発展:

##### 1. 複素力学系の精密な分岐構造の研究<sup>1</sup>

さきがけ期間に開発した手法を発展させ、正則写像の持つ剛性と組み合わせることにより、これまでの手法では解析できなかった複素力学系の分岐構造に関する予想を証明した(図 1)。

##### 2. 化学反応経路の新しい可視化手法の提案<sup>2</sup>

さきがけ期間に取り組んだ位相幾何学的手法のアイデアに基づき、多次元尺度法を化学反応のデータ解析に持ち込み、従来の手法よりも化学反応により即した反応経路可視化アルゴリズムを提案した。反応物、遷移状態、生成物をつなぐ反応経路の中の同じ組成の分子の多数の安定構造が結ばれた反応経路ネットワークにおいて、従来できなかった構造間の類似度が保持された反応経路地図の作成を可能にした。これにより、反応経路の幾何学的な特徴や反応経路ネットワーク全体に対するより深い解析が期待される。

##### 3. 流体力学におけるグラフ理論的手法の開発<sup>3</sup>

さきがけ期間に開発したグラフ理論を用いた力学系の解析アルゴリズムを発展させ、流体の流れ場に対して、その構造をグラフクラスタリングアルゴリズムなどにより解析・可視化する手法を開発した。このアルゴリズムを力学系から得られた有向グラフに適用すると、軌道が互いに密に行き来している領域に対応するものは同じクラスターに参加し、それにより相空間が力学系の構造に応じて分解される。円筒周りの 2 次元流体现象に対しての解析において双子渦など重要な構造を同定することに成功した(図 2)。このトポロジカルなアイデアによる流れの解析手法は、解析的な手法や幾何的な手法に比べて質的な問題を扱うのに向いており、他の手法との組み合わせにより効率的な解析が実現できるものと期待される。

#### 特記事項

九州大学、慶應義塾大学、北海道大学、米国 Rutgers 大学等との共同研究を通じて研究者のネットワークを構築している。また、2.は同様の研究が世界的に進行する中で先行する成果である。

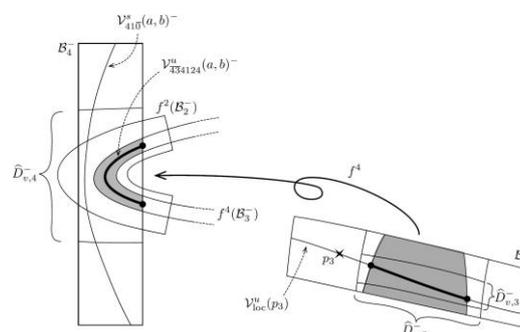


図 1. 複素力学系の分岐構造の研究<sup>4</sup>

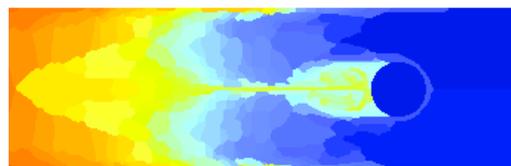


図 2. グラフ理論的手法による可視化イメージ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> SIAM J. Appl. Dyn. Syst. 17-3:2234-2248, 2018 <sup>2</sup> J. Chem. Theory Comput. 14(8):4263-4270, 2018

<sup>3</sup> Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis I, Springer, 13-20, 2014

<sup>4</sup> 荒井教授より提供

### 3.1.2 ウェブレットフレームを用いた視覚の数理モデル (新井仁之)

#### ウェブレットフレームを用いた視覚の数理モデル

展開している事業:

新井 仁之(早稲田大学教育・総合科学学術院 教授、東京大学 名誉教授) 科研費基盤(B)2 件

研究期間 2007 年 10 月～2011 年 3 月

#### さきがけの成果:

脳が行う視覚に関する情報処理の数理モデルを研究対象に、視覚研究の数学的方法とその実際的な応用を研究。視覚情報処理の数理モデル構築のための新たな数学理論として「かざぐるまフレームレット」を提案し、幾何学的錯視の錯視成分の発見と除去方法の提案、任意の元画像に基づく浮遊錯視画像の人工的な生成に成功した。



#### 発展:

##### 1. 色の同時対比錯視<sup>1</sup>

脳内の視覚情報処理の新しい数理モデルを考案し、それを基に、色の対比錯視により視覚に生じる色合いを、シミュレーションにより再現する方法を開発した(図 1)。また、その仕組みを逆方向に適用して、任意の色を特定の背景色の上に描画する場合に、元の色合いが再現できるように自動調整する仕組みを開発した。この仕組みは、任意の希望した色が正確に知覚されるためには、発色をどのように調整すれば良いかという色知覚の逆問題を解いている。本技術は国内外で特許を取得している。

##### 2. 錯視技術の画像処理への応用<sup>2</sup>

脳内の視覚情報処理の非線形的な効果を加味した数理モデルが、人がよく見たい所を鮮鋭化していることを見出し、これに基づくカラー画像の新たな鮮鋭化アルゴリズムを提案した。これは、錯視が視覚系の欠陥であるという説に対し、錯視は物を良く見ようとするための代償であることを数学的理論により示した重要な成果でもある。このほか、視覚機能を模した数理モデル上で部分的に機能の特化をさせ、人の視覚を超える画像処理を可能にした。例えばその一例に、原画像からは視認し難い対象を視認できるようにするエッジ検出技術(図 2)がある。また、脳内の視覚情報処理の数理モデルを用いた 2 次元デジタル・フィルタの新しい設計法も開発し、画像処理、錯視生成技術への応用も得た。これらは国内外で特許を取得し、上記 1 項と共に展開先の拡大を図っている。

##### 3. 錯視技術のさらなる展開

脳内の視覚情報処理の一部(V1 野、V4 野の一部)の新しい数理モデルを考案し、上記 1 項のみならずある種の錯視(ヘルマン格子錯視、シュヴルール錯視など)も含めて統一的な再現に成功している。また文字列傾斜錯視の自動生成にも成功した。これらは心理学分野であった錯視研究を、数学、脳科学との融合分野に進めるものである。

#### 特記事項

- ・各種新聞報道、数多くの展示会出展で研究成果を発信。
- ・「錯視のひみつにせまる本(全 3 巻)」が販売され好評を得て、普及版、中国語訳も出版された。
- ・錯視研究に関連して、文献 1,2 を含め国内 8 件、海外は 5 件他と多数の特許を登録している。錯視に関連した各種製品(商品パッケージ、多目的クロス、図書カード等)を展開しており、企業へのライセンス提供し展開している。

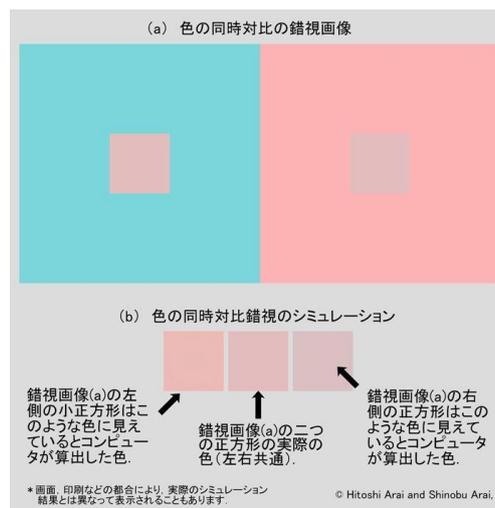


図 1. 色の同時対比錯視のシミュレーション<sup>1</sup>

出所) 新井教授ホームページより取得

<http://www.araiweb.matrix.jp/gazou2018>

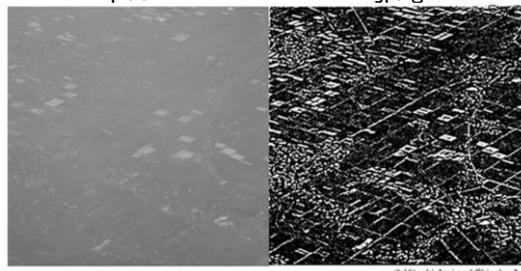


図 2. 視覚情報処理に基づくエッジ抽出<sup>2</sup>

出所) 新井教授ホームページより取得

<http://www.araiweb.matrix.jp/gazou2018>

<sup>1</sup>特許第 5622971 号、<sup>2</sup>特許第 6162283 号、特許第 5599520 号、特許第 5456929 号

## 水圏環境力学理論の構築

坂上 貴之(京都大学大学院理学研究科 教授)

研究期間 2007年9月～2011年3月

展開している事業:

CREST、未来社会創造、科研費基盤(B)3件

### さきがけの成果:

河川や湖沼、海岸で起こる問題を扱うための流れ場を数理解析することを目的に二次元多重連結領域における非粘性・非圧縮流体の運動を取り扱える数学的枠組みを構築、境界と境界から生成された渦との相互作用がその運動の理解に重要な役割を果たすことから、渦と境界の相互作用を理論的・数値的に解析可能とする点渦力学理論を構築した。本理論は有益な数値的手法であり、渦・境界相互作用に関連する分野に展開できる基礎理論となった。



### 発展:

#### 1. 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

二次元多重連結領域における流体理論と数学解析・数値解析の研究とそれを用いた数理流体モデル構成と制御に関する研究を行った。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とそれらを用いた二次元流線パターンのトポロジ流体の新しい記述法(COT表現)を確立した。

#### 2. Topological Flow Data Analysis 手法の開発<sup>1,3</sup>

二次元非圧縮流体に対する流線トポロジーの分類理論を与えられた流れデータに対し応用できるソフトウェア(psiclone:与えられたハミルトンベクトル場からCOT表現を計算するトポロジカルデータ解析ソフト)を開発した。また、非圧縮性流体の制限を取り

- “トポロジー”を利用した新しいデータ解析手法  
流れのデータ(ベクトル場や流線軌道など)から一意なCOT表現とよばれる文字列を割り当てる技術。
- 文字列から流れに関する定量的・定性的情報を抽出。

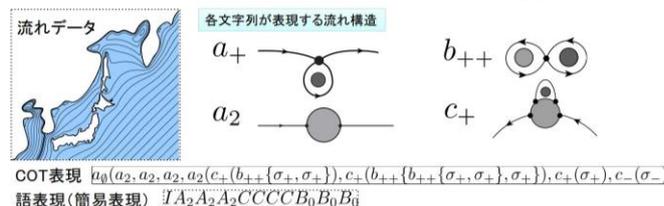


図1. 流線トポロジー解析<sup>1</sup>

除いて圧縮性流体や三次元流れの二次元断面に利用できるトポロジー分類理論への拡張を行った。気象状態のブロッキング現象同定の判断指標としてなど環境や医療などの様々な問題への適用が期待される。トポロジカルデータ解析の医療応用について特許を出願している。<sup>2</sup> 本技術はこれら水、空気に限らず、方向を持って変化する現象に対し汎用的に適用可能である(図1)。

#### 3. 数学よろず相談室(Math Clinic)の開始<sup>4</sup>

さきがけで行った諸分野協働活動を、より広く多くの分野における数理諸課題を解決するためのスキームへと拡大した。諸分野における数学的諸問題を難易度別に仕分けし解決策を提示する。過去5年間で26件の相談があり、共同研究への移行、企業からの寄附金の受託、共同研究計画契約の締結などに進展している。

### 特記事項

- ・開発したソフトウェア等を通じて、民間企業による成果の利用が進展している。日本ニューマチック社へのコンサルティング、鉄道会社、自動車メーカ、素材メーカなど4社と秘密保持契約締結や共同研究を実施中。
- ・京都教育大学、東北大学、理化学研究所など数学分野、京大、京都府立大学医学部と医学分野で共同研究中。
- ・英国、米国、オーストラリアなどの研究者とApplied and Computational Complex Analysisの研究グループを立ち上げ、若手研究者を含む人事交流や論文共著を開始。2019年度には同メンバーが中心となって英国ケンブリッジ大学ニュートン研究所での長期プログラムを実施し国際的な活動を拡大している。
- ・2019年度明治大学 先端数理科学インスティテュート現象数理学三村賞受賞、2020年日本応用数理学会論文賞(応用部門)受賞

<sup>1</sup>JST 新技術説明会資料 [https://shingi.jst.go.jp/var/rev0/0001/0728/2019\\_chizaibu\\_4.pdf](https://shingi.jst.go.jp/var/rev0/0001/0728/2019_chizaibu_4.pdf)

<sup>2</sup>特願 2019-139657、<sup>3</sup>特願 2020-013646

<sup>4</sup>京都大学 諸分野のための数学よろず相談室 <http://www.sci.kyoto-u.ac.jp/ja/academics/programs/macs/clinic/>

**臨床医療診断の現場と協働する数理科学**

水藤 寛(東北大学材料科学高等研究所 副所長・教授)

研究期間 2007 年 10 月～2011 年 3 月

展開している事業:

CREST2 件、未来社会創造

**さきがけの成果:**

放射線医学分野との連携により、医用画像を用いた数値シミュレーションを通して大血管における血流解析を行った。特に胸部大動脈の幾何学的特徴付けに着目し、曲率や捩率などのパラメータと血流の特徴を調べた。



**発展:**

**1. 数理科学と臨床学協働研究推進<sup>1-5</sup>**

臨床医学分野との連携の範囲を広げ、複数の研究者がチームを組むことで様々な疾患に対する医用画像処理、医療統計、流体構造連成を考慮した数値シミュレーション、その基礎となる数学解析などを進めた。特に血管形状の幾何学的特徴付けと血流の構造の関係を調べた(図 1)。

**2. 臨床医療における数理モデリングの協働研究**

病態メカニズムの数理モデル化と、診断・治療に適した形状表現の数理モデルの構築に取り組んだ。大動脈における血流については、高齢者に多い病態である大動脈瘤から先天性疾患に伴う血流の解析に対象を広げ、大動脈縮窄症における不安定渦と壁面剪断応力の関係や左心低形成症候群に伴う血流などを臨床医と協力して調べている。また、気管支拡張症などの診断の効率化や客観化に有用であると考えられている気管支走行の幾何学的特徴を抽出するために、同一患者の異なる時期の気管支形状をグラフ構造化して対応付ける手法を構築した。これは、従来行われてきた専門医の目視による主観的な比較から、より客観的で医師の診療負担を軽減することのできる手法として有望である。

**3. 数理モデリングと AI 技術の組み合わせによる熟練者の技の言語化**

各分野における熟練者の経験として蓄積されてきた様々な判断・予測・推定の技術を AI に学ばせることで、そこに隠されたアルゴリズムを言語化し、普遍化する方法論を構築する研究を進めている。各種の数理モデリング技術を用いて、現象を的確に表現する定式化やパラメータを見つけ出し、適切な記述子を構成することにより、AI の判断論理を理解可能な形にすることを目指している。

**特記事項**

- ・東北大学病院、岡山大学病院、東北医科薬科大学病院、明石医療センター等と、血流解析・臓器形状解析、及び専門医の経験のアルゴリズム化に関する共同研究を進めている。
- ・Politecnico di Milano 及び University College London と血流解析の基礎技術に関する共同研究、Finnish Environment Institute とシミュレーション技術に関する共同研究を進めている。
- ・平成 31 年度科学技術分野文部科学大臣表彰(研究部門)、2018 年度明治大学先端数理科学インスティテュート現象数理学三村賞受賞

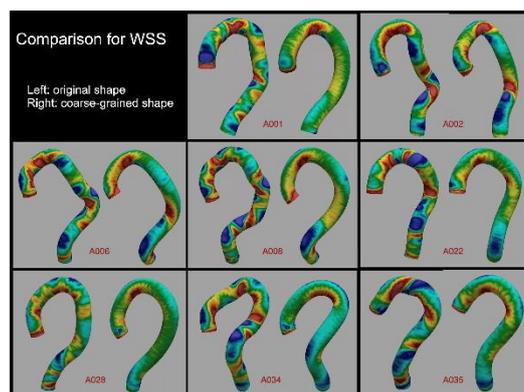


図 1. 血管形状の粗視化を用いた壁面応力比較

出所: 水藤教授より提供

<sup>1</sup> Comput Mech Vol. 54 No. 4:1035-1045, 2014

<sup>2</sup> Cardiovascular Imaging Asia Vol. 2 No. 2:58-64, 2018

<sup>3</sup> Suito, ICIAM 2019, Universitat de València, 2019.7.18.

<sup>4</sup> 特願 2019-009333, 2019/4/8, 人工知能を活用した透析管理システム, 出願人:JST

<sup>5</sup> PCT/JP2020/002305, 2020/1/23, 投薬量管理支援システム, 出願人:JST

### 3.1.5 科学工学モデルの安定性に関する計算機援用解析 (長藤かおり)

#### 科学工学モデルの安定性に関する計算機援用解析

長藤 かおり(Karlsruhe Institute of Technology 非常勤講師)

研究期間 2007 年 10 月～2010 年 3 月

#### さきがけの成果:

1 次元シュレディンガー作用素に対する固有値の除外法および非線形シュレディンガー方程式の解の検証、非圧縮粘性流体の安定性問題、進行波の安定性証明、微分作用素の複素固有対の精度保証、2 次元反応拡散方程式の解の検証、関数方程式の解の安定性証明



#### 発展:

##### 1. ヒルベルト空間上の自己共役および非自己共役作用素の固有値非存在範囲の証明法の開発<sup>1</sup>

さきがけ期間において研究した固有値の除外法に関する研究を発展させ、非自己共役作用素を含む微分作用素の複素平面における固有値非存在範囲の計算機援用証明法を開発した。

##### 2. 進行波の軌道安定性証明<sup>2</sup>

さきがけ期間において研究した進行波の安定性証明法を発展させ、吊橋上での複数の異なる進行波の軌道安定性・不安定性を判定する計算機援用証明法を開発した。

<sup>1</sup> SIAM Journal on Numerical Analysis 52/2, 975–992, 2014

<sup>2</sup> J Differ Equ 268(1):80–114, 2019

### 3.1.6 保険型金融商品のリスク分散メカニズムの解明 (中野張)

#### 保険型金融商品のリスク分散メカニズムの解明

中野 張(東京工業大学情報理工学院 准教授)

研究期間 2007年9月～2011年3月

##### さきがけの成果:

集積された保険リスクの、様々なカテゴリーに応じた効率的な再配分の理論構築の足がかりを築いた。これはリスク移転理論の抽象化であり、カタストロフィー債の価格付け問題に応用された。



##### 発展:

#### 1. 年金基金の管理のための債権を追跡可能なポートフォリオ<sup>1</sup>

さきがけ期間における金融リスクの理論を発展させ、債権を追跡可能な年金基金のポートフォリオ構成方法を示した。国内を対象として数値的な検証を行い、空売りを禁止し、かつポートフォリオの重みの上限を制約として設定し、空売りを禁止した条件においても債権の追跡可能性は保持されることを発見した。

#### 2. 分布不確実性下のヒストリカル VaR の漸近解析<sup>2</sup>

さきがけ期間における金融リスクの理論を発展させ、不確実性下での VaR(Value-at-risk)の性質を調べた。財が Knightian uncertainty を有すると想定した場合のヒストリカル VaR の漸近的性質として、上界と下界の間にほぼ確実に含まれることを示した。

<sup>1</sup> Proceedings of the 46th ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 112–117, 2015

<sup>2</sup> Math Finance 5:103–108, 2015

### 3.1.7 自己組織化としての皮膚バリア機能の数理解析 (長山雅晴)

#### 自己組織化としての皮膚バリア機能の数理解析

長山 雅晴(北海道大学電子科学研究所 教授)

研究期間 2007年10月～2011年3月

展開している事業:

CREST2 件、科研費基盤(B)2 件

#### さきがけの成果:

皮膚科学への数理科学研究の基盤となる表皮モデルを構築した。この数理モデルの数値計算から、皮膚の持つ重要な機能である角層バリア機能の恒常性維持について角層直下のカルシウムイオン局在が重要な役割を果たすことを示唆した。



#### 発展:

##### 1. 表皮構造の恒常性に対するカルシウムイオンの役割<sup>1</sup>

角層バリア機能だけでなく表皮の持つ層構造を維持し続けるためにはカルシウムイオン局在が本質的であることを数理モデルから示唆した。この研究によって表皮構造の数理モデルの基盤が出来た。

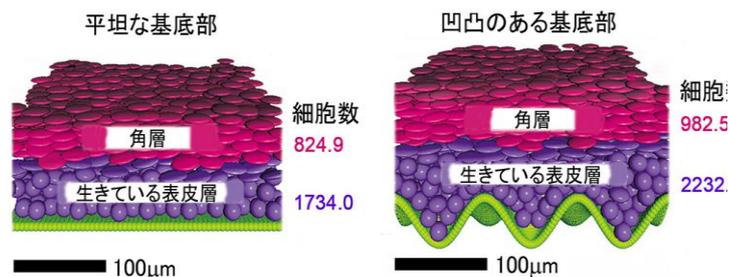


図 1. 数理モデルに対するコンピュータシミュレーションによって表された表皮モデル画像<sup>3</sup>

##### 2. 真皮乳頭層を形成する数理モデルの構築<sup>2</sup>

これまでの数理モデルでは真皮乳頭層が形成されず、真皮の凹凸が表皮に与える影響を調べる事が出来なかったが、この研究によってそれが可能となった。このモデルを用いて、細胞分裂の影響で真皮乳頭層が形成されることを示した。また、その応用として真皮の凹凸の減少により角層バリア機能が低下することを示した。

##### 3. 数理モデルに基づく3次元人工皮膚モデルの構築<sup>3</sup>

人口真皮の凹凸が増えることによって表皮が分厚くなり、角層バリア機能が高まることを数理モデルから示唆した。その結果に基づき、真皮の凹凸に対応する基板を用いて実験を行った結果、真皮乳頭層の間隔に近い形状の基板上で構築された人工皮膚は角層バリア機能が高いことが示された(図 1)。本研究により構築した人工皮膚は、皮膚疾患、加齢変化のメカニズム、表皮機能の解明や、新薬開発、化粧品安全性試験に用いられるリサーチツールとして期待される。

#### 特記事項

株式会社資生堂との皮膚機能に関する共同研究が行われており、痒みや皮膚老化のメカニズム解明、治療法の確立を目指して研究が進められている。<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Journal of Theoretical Biology 397, 52-60, 2016

<sup>2</sup> NPJ Comput. Mater. 4(1):45, 2018

<sup>3</sup> Sci. Rep. 8:17999, 2018

<sup>4</sup> 資生堂プレスリリース、2013年6月、[https://corp.shiseido.com/jp/newsimg/archive/00000000001547/1547\\_m7s53\\_jp.pdf](https://corp.shiseido.com/jp/newsimg/archive/00000000001547/1547_m7s53_jp.pdf)

**輸送と渋滞に関する諸現象の統一的解析と渋滞解消**

西成 活裕(東京大学先端科学技術研究センター 教授)

研究期間 2007 年 10 月～2011 年 3 月

展開している事業:

未来社会創造 2 件、科研費基盤(B)

**さきがけの成果:**

様々な渋滞現象を分野横断的に研究し、その発生のおき目を調べ、渋滞解消の方法の実証を行った。車の渋滞では、速度に応じた適切な車間をとることで渋滞が起きないことを見出し、これを渋滞吸収走行として提案、実際の高速道路で実験を行うことでその有効性を示した。また蟻は行列の中でお互いの間隔を空けておりこれにより渋滞を緩和していることを観測により見出した。



**発展:**

**1. 渋滞吸収走行による渋滞緩和効果の理論解析<sup>1</sup>**

さきがけで実証した渋滞吸収走行を発展させ、高速道路における自然渋滞の緩和のための条件を理論とシミュレーションにより導出した(図1)。車間距離を周囲より広くとる車の存在が渋滞波を吸収し、さらにその車が二次的な渋滞を発生させない条件も明らかにした。本成果は世界中で注目され、欧州・中国などで検証が行われ渋滞緩和に成功している。

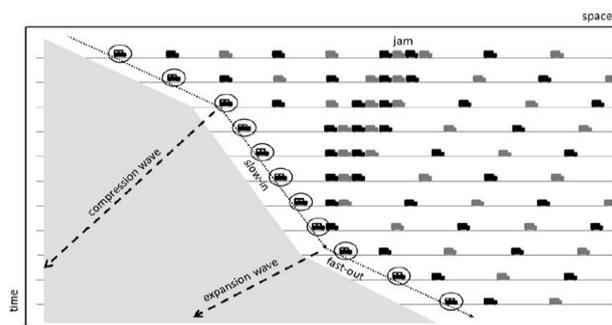


図 1. 渋滞吸収走行の考え方<sup>1</sup>

**2. 通路における双方向人流のリスク指標の提案<sup>2</sup>**

実際の施設での人の流れの分析により、双方向人流が高密度化して危険になる条件を明らかにした。双方向の流量の臨界を求め、通路における安全基準を提案し、これをシミュレーションによっても確認した。本成果は東京オリンピックの準備で活用されており、混雑リスク低減に貢献すると期待される。

**3. 自車の走行情報から渋滞発生の予測が出来るシステムの開発<sup>3</sup>**

高速道路において自車から測定できる速度と車間距離のデータ(ドライブレコーダーデータ)のみを用いて渋滞が発生する予兆を捉える方法を発明した。一定の車間距離まで前方車との間隔が縮まった状態が続けば、その後に渋滞が発生することをデータから割り出し、実際の走行データを用いて高い確率で渋滞予測が出来ることを示した。

**4. 人の混雑判定の指標になる新しい「混雑度」の提案<sup>4</sup>**

人流は車とは異なり、一般に 2 次元の流れのため複雑化し混雑判定は難しい。従来は密度による判定が主流であったが、新たに人流の回転を取り入れることでさらに正確に混雑判定ができる指標を提案した。この新しい指標は様々なケースで密度指標よりも優れていることを示した。成果は世界中から注目され、今後の群集混雑の標準的な指標として使われる可能性が高い。

**特記事項**

- ・成田空港、福岡空港の人員配置、施設、動線設計などでカウンタ待ち緩和に成功。
- ・東京オリンピック組織委員会アドバイザーとして、開催時の混雑解消、安全な観客誘導の方策を検討。東京ドームでの群衆マネジメント、岡崎市等自治体のイベントの群衆事故の防止対策アドバイザー。ANA との共同研究において、感染リスクを抑えるための搭乗方式の変更をアドバイスし、それに基づき ANA が実施。その他 10 社以上のアドバイザー。
- ・(株)日揮、三菱電機(株)、鈴与(株)と共同研究を実施。2020 年に東京大学 先端物流科学寄附研究部門にヤマトホールディングス(株)、SBS ホールディングス(株)、鈴与(株)による寄附講座を立ち上げ、そこで高度物流人材の育成を行っている。

<sup>1</sup> Transport Res Part B, Vol. 50:116-129,2013, <sup>2</sup> J. Stat. Mech. p10003, 2015, <sup>3</sup> 特許第 6632956 号

<sup>4</sup> Transp Res Part C: Emerging Technologies vol. 91:124-155, 2018.

### 3.1.9 「計算機システムの科学」のための数学 (蓮尾一郎)

#### 「計算機システムの科学」のための数学

蓮尾 一郎(国立情報学研究所アーキテクチャ科学研究系 准教授)

研究期間 2007年10月～2011年3月

展開している事業:

ERATO、科研費若手(A)、科研費基盤(B)

#### さきがけの成果:

計算機システムの状態遷移系としての側面に注目し、その数学的構造を圏論的代数・余代数を用いてモデル化し研究した。この理論的研究から計算機システムの品質保証手法をいくつか導出した。



#### 発展:

##### 1. 高階関数型量子プログラミング言語の数理的意味論の提案<sup>1</sup>

量子プログラミング言語のうち、制御構造が複雑な一方簡明なアルゴリズムの記述を可能にする高階関数型言語を対象にして、数理的意味論を構築した。意味論の構築とは「プログラムの意味を数学的に定義する」ことに相当し、プログラムの品質保証や効率化のためのプログラム変換等の諸手法の理論的基礎となる。本成果は量子計算ハードウェアの急速な進化により、再度注目を集めている。

##### 2. 物理情報システムの論理的検証手法の提案<sup>2</sup>

さきがけにおいて開発した計算機システムの適用対象を物理情報システムまで拡張し ERATO(蓮尾メタ数理プロジェクト)において発展させ、従来のソフトウェアのような離散的ダイナミクスだけでなく、物理系の連続的ダイナミクスを併せ持つような物理情報システムに対して、その安全性を数学的・論理的に証明するための論理体系を提案した。この中で確率的システムの解析を行い、プログラムやオートマトンとしてモデルされる、確率的な現象や意思決定問題に対して、マルチンゲールなどの数学的理論による自動解析アルゴリズムを与えた。確率的プログラムのマルチンゲールによる解析は、ゴールの達成確率の上下限を解析しそれを最大化する戦略を高速に計算する手法である。本成果は工業製品の品質確認や自動運転の制御、マーケット投資戦略の策定など、幅広い分野の意思決定を支援するシステムに応用可能である。

また、ブラックボックス解析による物理情報システムの安全性保証手法の開発を行い、内部の動作原理がわからない物理情報システムに対して、その振る舞いの観察により安全性を保証するためのアルゴリズム群を与えた。これは、自動運転のようなセーフティクリティカル(故障や障害が人の命に危険に生じさせる領域)において、アクションを選択する際に演繹的に求めた安全が確保できるセーフティエンベロープ内に限定する(AIのブラックボックスを包み安全性を保障する)新しい手法である。本成果は製造業(自動運転システム含む)において、AIを部品として導入してもホワイトボックス化することなく適用できるようになるため、応用可能性が高い。現在複数の企業と実用化に向けて共同研究を行っている。

#### 特記事項

- ・自動車関連企業(3社)、電機関連企業(2社)、重工業関連企業(1社)、の各々と共同研究実施中。
- ・システム解析、バグ発見、ソフトウェアテストの成果が上記共同研究のなかで相手方企業に利用された。同技術でのベンチャー企業設立を構想中
- ・カナダ Waterloo 大学と自動運転システムの品質保証手法について共同研究。その他協働多数(英国 Oxford 大学、オランダラドバウド大学、米国アリゾナ州立大学、フランス ENS、フランスパリ 13 大学など)
- ・藤原洋数理科学賞奨励賞(2012)、CONCUR 2014 最優秀論文賞、ICECCS 2018 最優秀論文

<sup>1</sup> Ann Pure Appl Log 168-2:404-469, 2017

<sup>2</sup> POPL, 417-430, 2013

<sup>3</sup> ATVA, 476-493, 2018

<sup>4</sup> CAV (1) :401-420, 2019

### 3.1.10 離散アルゴリズムに対する品質保証技術 (牧野和久)

#### 離散アルゴリズムに対する品質保証技術

牧野 和久(京都大学数理解析研究所 教授)

研究期間 2007 年 10 月～2011 年 3 月

展開している事業:

科研費新学術、科研費基盤(B)

#### さきがけの成果:

情報化社会において重要なアルゴリズム論の研究、特に、計算時間、領域、近似比、オンライン競合比など、出力する解の精度を保証するアルゴリズム開発を行うとともに、いくつかの重要な問題に対してその限界も示した。



#### 発展:

##### 1. 3-SAT 問題に対する最高性能を持つ確定論的アルゴリズムの開発<sup>1</sup>

さきがけ期間において研究した離散アルゴリズムの研究を科研費「数理論理学からの計算限界解析(2012～2016年度)」において発展させ、重要な充足可能性問題の1種である 3-SAT 問題に対して、HSSW アルゴリズムの非乱数化を行い、投稿時点で最速の理論性能( $O(1.3303^n)$ )を持つアルゴリズムを開発した。

##### 2. 区分線形関数に対する最適合成順問題の計算量<sup>2</sup>

さきがけ期間において研究した離散アルゴリズムの研究を科研費「列挙構造を利用した高速アルゴリズム開発(2014～2019年度)」において発展させ、区分線形関数に対する最適合成順問題を提案し、その計算複雑性を評価した。同問題は人工知能、コンピュータ・サイエンス、オペレーションズ・リサーチにおいて重要かつ基本的な問題であるが、これまで理論的な解析が行われていなかった。

#### 特記事項

FAW-AAIM 2013 Best Paper Candidates、人工知能学会研究会優秀賞(2015 年)、FIT2015 船井ベストペーパー賞、ISAAC 2016 Best Paper Award、日本オペレーションズ・リサーチ学会 事例研究賞(2019 年)

<sup>1</sup> Algorithmica, 67, 2:112–124, 2013

<sup>2</sup> Algorithmica vo. 80:2134–2159. 2018

## 確率過程の統計推測法の基礎理論およびその実装

吉田 朋広(東京大学大学院数理科学研究科 教授)

研究期間 2007 年 10 月～2011 年 3 月

展開している事業:

CREST、科研費基盤(B)2 件

### さきがけの成果:

2000 年代半ばに提案した擬似尤度解析の理論を発展させ、従属系に対する様々な統計推測問題を解決した。新たな漸近展開法を見出し、非エルゴード統計学を発展させた。確率過程に対する統計解析およびシミュレーションのための R パッケージ YUIMA を開発した。



### 発展:

#### 1. 擬似尤度解析の深化<sup>1</sup>

擬似尤度解析の理論を深化し、適用可能な対象を確率微分方程式に拡大し、その統計推測理論を発展させた。本成果は基礎的な結果となっており、最近スパース推定論への応用も始まっている。

#### 2. 高頻度金融データに対するモデリングおよびリードラグ計量法の開発<sup>2</sup>

確率微分方程式の統計推測理論を基に、金融分野への応用を展開した。超高頻度金融データを伴うリミットオーダーブック(株価気配値)のモデリングを行なった。また、リードラグ現象(資産間で新情報が価格に織り込まれる速度に差がある場合など時系列データ間に時間差を持ち相関関係が現れる現象)のモデリングを行い、リードラグパラメータの一致推定量としてリードラグインデックスを提案した。本成果を基に金融ソリューション系企業とソフトウェアの開発を行なった。海外の情報系企業でリードラグ解析技術が活用されている。

#### 3. 新しい漸近展開法の発見<sup>3</sup>

非エルゴード系に対する漸近展開法を発見し、バリエーションの推定問題に応用した。さらに、ウイナー汎関数に対する漸近展開法、非エルゴード系におけるスカラハド積分の漸近展開法を発見した。オプション価格の漸近展開法は金融分野で広く用いられている。

#### 4. R パッケージ YUIMA の機能拡張<sup>4</sup>

確率過程に対する統計解析およびシミュレーションのための R パッケージ YUIMA の機能を拡張した(図 1)。高頻度データモデルの正規型擬似最尤推定における残差系列の構成、Jarque-Beta 型統計量の漸近分布に基づいたジャンプ除去、レビ過程の擬似最尤推定のための関数群など様々な研究成果を実装し機能を拡張した。30,000 以上のダウンロード実績を持つ。金融業界でも活用され、英国の大学では YUIMA を基礎にバイオ系ソフトウェアを開発した。

### 特記事項

・北里研究所(バイオスタティスティックス)、デンマーク Aarhus University(漸近展開法)、米国 Kansas University (漸近展開法)、スイス Université de Neuchâtel(漸近展開法)、フランス CentraleSupélec Paris(リミットオーダーブックのモデリング)、イタリア University of Milan(YUIMA)、フランス Université de Lille 1(極限定理)、フランス Université d'Evry(確率微分方程式の統計理論)に関して各々と共同研究を実施

・藤原洋数理科学賞大賞(2019 年)



図 1. YUIMA プロジェクトの Web ページ

<https://yuimaproject.com/> 2020 年 10 月 29 日取得

<sup>1</sup> Stoch Process Their Appl 122, 8:2885–2924, 2012

<sup>2</sup> Bernoulli 19, no. 2:363–719, 2013

<sup>3</sup> Stoch Process Their Appl 123, 3:887–933, 2013

<sup>4</sup> J. Stat. Softw. 57, no. 4:1–51, 2014

### 3.2 2008 年度採択研究課題

#### 3.2.1 ヤング測度による高分子共重合体の微細構造の解明及びヤング測度の展開 (大下承民)

#### ヤング測度による高分子共重合体の微細構造の解明及びヤング測度の展開

大下 承民(岡山大学理学部・数学科 教授)

研究期間 2008 年 9 月～2012 年 3 月

##### さきがけの成果:

マイクロ相分離現象に対する空間非一様な平均場モデルを導出した。また、希薄ケースの平均場モデルの定常問題、平衡状態の安定性、および時間発展問題の長時間挙動、粒子移動項をもつ拡張版平均場モデルの定常問題について、材料科学における非線形弾性棒の音響共鳴の変分法による考察を行った。



##### 発展:

##### 非線形偏微分方程式に現れる集中・振動現象, 特異極限問題およびポテンシャルと結合した界面運動の研究

さきがけ期間における非線形微分方程式の研究を科研費

「非線形偏微分方程式に現れる集中・振動現象の研究(2011～2014 年度)」

「非線形偏微分方程式の特異極限問題およびポテンシャルと結合した界面運動の研究(2016～2019 年度)」

において発展させ、非線形問題(偏微分方程式)における集中・振動現象・特異極限問題・界面運動について研究を行った。変分法(レイリー原理)、リャプノフ・シュミット法、特異極限法などの手法により、ポテンシャルがユークリッド空間における滑らかでコンパクトな framed 部分多様体上で 0 となるような臨界周波数の場合の解の性質、2 次元空間におけるマイクロ相分離現象の平均場モデル、分数冪ラプラシアンを持つ半線形反応拡散系の解の大域存在や爆発、3 成分活性因子・抑制因子型反応拡散系の特異極限問題の球対称平衡解の安定性などについて考察した。

<sup>1</sup> The 10th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differ. Equ. Appl., 2014

## 幾何学的変分問題の解の大域解析とその応用

小磯 深幸(九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 教授)

研究期間 2008年10月～2012年3月

### さきがけの成果:

結晶や液晶のエネルギーの数理モデルである非等方的表面エネルギーの平衡曲面について研究し、種々の境界条件に対する解の幾何学的性質や安定解の存在と一意性についての研究成果を得た。特に、種数0の平衡閉曲面の一意存在性を証明した。



### 発展:

#### 1. 平均曲率一定曲面の安定性の厳密な判定法の構成<sup>1</sup>

平均曲率一定曲面(以下、CMC 曲面)は、与えられた境界条件を満たし同じ体積を囲む曲面の中での面積の臨界点であり、シャボン玉のような薄膜や微小液滴の数理モデルを与える。さきがけで研究対象とした非等方的表面エネルギーの研究を進展させ、CMC 曲面が面積極小か否かの精密な判定条件を得、基本的な例の安定性を判定した(図1)。

#### 2. 平均曲率一定曲面に対する分岐理論の構築<sup>2</sup>

3次元ユークリッド空間内の CMC 曲面に対する分岐理論を構築し、分岐枝上の CMC 曲面の安定性(面積極小か否か)の判定法を得た。それを応用して CMC 曲面の例の安定性を判定することにより、理論の有効性を示した。

#### 3. 三重周期極小曲面に対する分岐理論の構築<sup>3</sup>

ソフトマターの秩序構造の数理モデルとして有用な三重周期極小曲面(TPMS)に対する分岐理論を構築した。応用として、TPMS 全体の成す空間がほとんど至る所で局所的に9次元空間となることを証明し、また、既知の三重周期極小曲面族からの分岐の例を発見した。

#### 4. 非等方的表面エネルギーの平衡超曲面の安定性と一意性に関する研究<sup>4</sup>

非等方的表面エネルギーの平衡超曲面について、エネルギー密度関数が凸あるいは非凸である場合の「良い性質を満たす解」の一意存在性及び非一意性を、いくつかの基本的な境界条件の元で得た。本研究成果は有機無機ナノ及びメソスコピックな結晶粒子のエネルギー構造の解明とマテリアル開発への応用が期待できる。また、名古屋大学との有機無機ナノ結晶の形状とエネルギー構造の共同研究の基礎理論となっている。

### 特記事項

- ・本研究の成果を活用し株式会社デンソーと壊れにくい機械の構造を探る共同研究を実施。
- ・千葉大学と微小液滴の数理モデルの幾何学的形状についての共同研究を実施。
- ・佐賀大学、東京工業大学、横浜国立大学、神戸大学、東京電機大学と幾何学的変分問題に関し共同研究実施。
- ・米国・アイダホ州立大学、ブラジル・サンパウロ大学、韓国・KIAS と幾何学的変分問題に関し共同研究を実施。

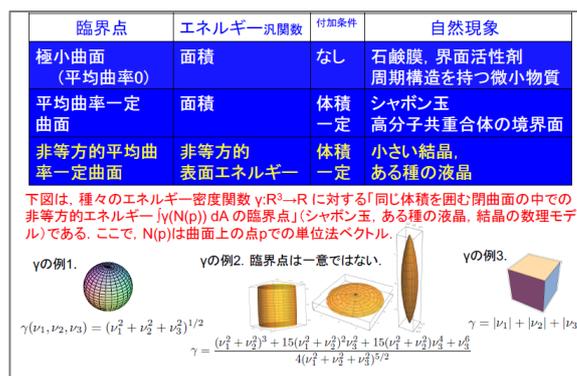


図1. 曲面に対する変分問題

出所:小磯教授より提供

<sup>1</sup> Calc Var Partial Differ Equ's, Calc. Var. 56:159, 2017

<sup>2</sup> J. Math. Soc. Japan Vol.69, No.4:1519-1554, 2017

<sup>3</sup> Ann. de l'Institut Fourier Vol.68, No.6:2743-2778, 2018

<sup>4</sup> M. Koiso, Mathematical and Computational Applications Vol.24, No.4 (2019), 88.

### 3.2.3 振動子理論の生物・化学・工学・医療分野への応用 (郡宏)

#### 振動子理論の生物・化学・工学・医療分野への応用

展開している事業:

郡 宏(東京大学大学院新領域創生科学研究科複雑理工学専攻 教授)

科研費新学術

研究期間 2008 年 10 月～2012 年 3 月

#### さきがけの成果:

様々な分野で問題となる振動子集団ダイナミクスについて、数理モデルによる理論研究を軸に分野横断的研究を実施した。振動の規則性への独立ノイズの影響とネットワークの効果、共通ノイズの同期に対する影響、スモールワールドネットワークにおける同期・非同期転移とカオスの研究や化学反応系に現れる特異な現象の数学的説明、体内時計の数理モデル化と理論・数値解析を行った。



#### 発展:

##### 1. 時差ボケのメカニズムの解明と回避法の提案<sup>1</sup>

マウスの実験データに基づき、哺乳類の概日時計システムを記述する簡潔な数理モデルを提案した。モデルを用いた解析により、時差ボケの科学的理解に貢献するとともに、時差ボケの回避方法を提案した。実験研究者と協働し、時差ボケの回避法が機能することを確認した。本研究成果はシフトワーカーの負担を軽減するようなスケジュール提案や健康管理に応用が見込まれる。

##### 2. 概日リズムの低温条件時の振動停止現象の数理的解明<sup>2</sup>

微生物の概日時計を構成する酵素反応系は、低温条件下で振動を停止する。この振動停止を実験的に精密に観測し、どのような特徴をもつ転移現象であるかを数理的観点から明らかにした。本研究成果では、リズムが消失するメカニズムは減衰振動への転移であるホップ分岐であること、低温条件下で温度に約 24 時間の周期的変化を与えると共鳴現象が起こり、振幅の大きなリズムが回復することを明らかにした。本研究成果は微生物の体内時計にとどまらず、生活リズム障害に対し、メリハリのついたリズムをとりもどす知見を与える可能性がある。また、体内時計が減衰振動子に容易に変わりうるという生物学での新規知見をもたらし、減衰振動が体内時計研究において新規開拓分野となることを示した。

##### 3. 同期を最適化するネットワーク構造の解明<sup>3</sup>

ノイズを含む振動子のネットワークにおける同期レベルの期待値をネットワーク・ラプラシアン固有値と固有ベクトルによって表現した。これによって異なるネットワークの優劣を比較すること、構造の最適化を行うことが可能となった。本研究成果は自然界に多く存在するノイズを含み相互作用する振動子集団のネットワーク構造依存性の解明や機能的構造のデザインにつながると期待される。また、本研究成果の論文は国際学術誌 Chaos の Editor's Pick に選出された。

#### 特記事項

米国セントルイス大学と化学反応系の理論的記述で共同研究を実施。同相結合を持たない電気化学振動子集団における高レベル同期現象について、その特異な挙動を記述する数理モデルを構築し、転移や同期度変化などダイナミクスを解析した。

<sup>1</sup> Sci. Rep. 7:46702, 2017

プレスリリース: [http://www.ocha.ac.jp/news/20170426\\_1.html](http://www.ocha.ac.jp/news/20170426_1.html)

<sup>2</sup> PNAS 114:5641-5646, 2017

プレスリリース: [http://www.ocha.ac.jp/news/20170516\\_1.html](http://www.ocha.ac.jp/news/20170516_1.html)

<sup>3</sup> Y. Katoh, H. Kori, Chaos 30, 013148 (2020) (Editor's Pick に選出された)

## 統計モデル多様体の普遍的な性質のベイズ予測理論への応用

田中 冬彦(大阪大学数理・データ科学教育研究センターデータ科学部門  
准教授)

研究期間 2008 年 10 月～2012 年 3 月

### さきがけの成果:

時系列モデルの無情報事前分布として、優調和事前分布に基づく方法がジェフリーズ事前分布よりも推定性能が優れていることを理論的に示した。

ベイズ予測の量子情報への応用として、実験データから波動関数をベイズ推定する方法を提案した。



### 発展:

#### 1. 量子ベイズ統計での無情報事前分布の提唱<sup>1-3</sup>

さきがけではベイズ予測の応用として量子統計モデルを研究したが、本研究ではベイズ予測の考え方に沿って、純粋状態モデルで、パラメータのとりかたに依存しない無情報事前分布の設定のための基本原理を提唱した。これらは通常のベイズ統計における reference prior の量子版というべきものである。本研究成果は量子トモグラフィなど、量子計算機の実証実験に欠かせない高度な統計手法の理論的基礎につながるものである。

#### 2. AR モデル多様体上の優調和事前分布の発見<sup>4</sup>

ジェフリーズ事前分布よりもよい推定性能を与える無情報事前分布として、優調和事前分布が知られている(図 1)。さきがけでは時系列モデルで優調和事前分布の方が優れていることを理論的に示したが、この研究ではそれを基に AR モデル上の優調和事前分布の存在の有無を調べた。AR モデル多様体や MA モデル多様体について、Schur 多項式の性質を利用した計算手法により、優調和事前分布を明示的に与えた。

#### 3. ARMA モデルのモデル多様体としての幾何学的な性質の分類<sup>5</sup>

さきがけにおける時系列モデルの研究を発展させ、ARMA モデルに対して適用した。ARMA モデル多様体は、AR モデル多様体や MA モデル多様体を部分多様体として含むが、統計的推測の性質は大きく異なる。モデル多様体上の曲率形式によって、両者の違いを微分幾何学的に分類できることを示した。上記 2 項を含め、本研究成果は微分幾何学の専門家や統計学の理論研究者に注目され、派生研究が出始めている。

#### 特記事項

- ・京都大学数理解析研究所の研究集会形式共同研究で以下の代表研究者となり、理論物理、実験物理への統計理論の啓蒙や研究交流を実施。
- ・量子論における統計的推測の理論と応用(2012 年)、高次元量子トモグラフィにおける統計理論的なアプローチ(2013 年)、量子系の統計的推測とその幾何学的構造(2014 年)、量子統計モデリングのための基盤構築(2015 年)、量子システム推定の数理(2016 年)

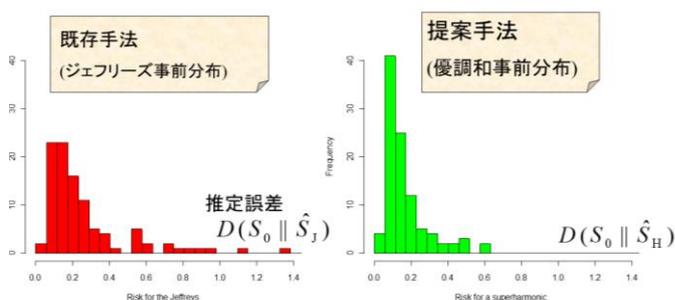


図 1. 既存手法(ジェフリーズ事前分布)と提案手法(優調和事前分布)

出所: 田中冬彦准教授より提供

<sup>1</sup> AIP Adv. Vol.85:062305, 2012.

<sup>2</sup> Phys. Lett. A, Elsevier Vol.376: 2471–2476, 2012.

<sup>3</sup> 応用数理 vol.28, no.2, 2018.

<sup>4</sup> Information Geometry vol. 1 (2):215–235, 2018.

<sup>5</sup> J. Appl. Probab. Stat. Vol.1: 35–43, 2012

### 3.2.5 代数的符号理論による組合せ構造の解析と量子符号への応用 (原田昌晃)

#### 代数的符号理論による組合せ構造の解析と量子符号への応用

展開している事業:

原田 昌晃(東北大学大学院情報科学研究科 教授)

科研費基盤(B)3 件

研究期間 2008 年 10 月～2012 年 3 月

#### さきがけの成果:

符号理論において、代数的な研究が古くから行われている自己双対符号の研究を行い、符号理論における基礎研究の発展を目指した。近年、進展が期待されている量子符号への応用も目指した。



#### 発展:

##### 1. 線形補双対符号の研究<sup>1,2</sup>

さきがけでは自己双対符号を対象としたが、その成果をもとに線形補双対符号に対象を拡大した。線形補双対符号の研究は 2010 年以降活発化しているが、その動機の一つとして、暗号理論への応用が確立されたことがある。本研究では、最小重みが最大となる線形補双対符号の構成や分類を行った。

##### 2. 量子符号の研究<sup>3</sup>

さきがけで行った量子符号への応用研究を発展させ、量子ゆらぎに着目した量子符号の研究に展開した。さきがけの研究を発展させることで、entanglement-assisted quantum code の研究を行った。

#### 特記事項

ミシガン工科大学、ビクトリア大学、マックス・プランク研究所、中央研究院(台湾)、ヴェリコタルノボ大学、ブルガリア科学院、他、民間企業、各々と符号理論、組合せデザイン理論関連で共同研究を実施

<sup>1</sup> M. Araya, M. Harada and K. Saito, IEEE Trans. Inform. Theory 66 (2020), 2751–2759

<sup>2</sup> M. Araya and M. Harada, Cryptography and Communications 12 (2020), 285–300

<sup>3</sup> M. Harada, International Journal of Quantum Information 17 (2019), 1950053 (8 pages)

## システム生物学に関わる情報と記述の諸問題

春名 太一(東京女子大学現代教養学部数理科学科情報理学専攻 准教

授)研究期間 2008年10月~2012年3月

### さきがけの成果:

生命系複雑ネットワークに圏論的対称性を用い、従来の有向経路に相補的な側方経路の機能の解明、順列エントロピーに関わる発見など、圏論や順序集合論にもとづくネットワーク理論、順列エントロピー理論に貢献した。また、離散的・確率的化学反応ダイナミクスを記述する化学マスター方程式と化学フォッカー・プランク方程式を関連づけ、解析的に解くことが困難な確率反応過程の離散性を分析する方法論を構築した。さらに、原始地球上での前生物的分子のアミノ酸熱重合物の微小カプセル形成過程を発見した。

### 発展:

#### 1. 圏論にもとづくネットワーク理論の展開<sup>1</sup>

さきがけで構築した圏論にもとづくネットワーク理論の発展として、有向ネットワークを頂点のプロセスの貼り合わせとして記述する圏論的方法である Kan 拡張を用いて、頂点の入力もしくは出力としての重要度の指標を提案した。さらに、同方法を拡張し、時間発展する数理モデルの構築への応用を行った(図1)。本研究成果は国際会議での成果発表が雑誌論文としての出版を推薦され注目を集めている。

#### 2. 半順序順列エントロピーの理論と展開<sup>2</sup>

さきがけでは順列エントロピーの理論について研究したが、この研究では複数の時系列の間での影響力の度合いを測る指標とその順列エントロピー版の間での関係を明らかにした。また、順列エントロピーを半順序集合論を用いて一般化し、複数の時系列間関係の複雑性を測る指標を提案した。本研究成果は順列エントロピー関係の国際会議での招待講演を継続的に依頼されており、国際的な注目を集めている。

#### 3. 温度勾配下でのアミノ酸熱重合物微小カプセルの形成過程の解明への貢献<sup>3</sup>

さきがけで発見したアミノ酸熱重合物微小カプセルの形成過程解明のため、海底熱水孔付近の微小孔環境を模倣した温度勾配条件を実験室内で再現した。アミノ酸熱重合物微小球を含む溶液をその条件下に置くことで微小球からカプセルが形成される温度条件を明らかにした(図2)。本研究成果は成果発表が国際会議で受賞<sup>4</sup>し、注目を集めている。

### 特記事項

・書籍の出版、雑誌への寄稿、招待講演を通して近年の圏論の普及に貢献している。

著書:「圏論の歩き方」日本評論社(分担執筆)

解説記事: 普遍性とそのゆらぎ: ネットワークの圏論的諸展開、現代思想、2020年7月号、pp.150-163. 圏論と生物のネットワーク、数学セミナー2012年10月号、pp.70-76.

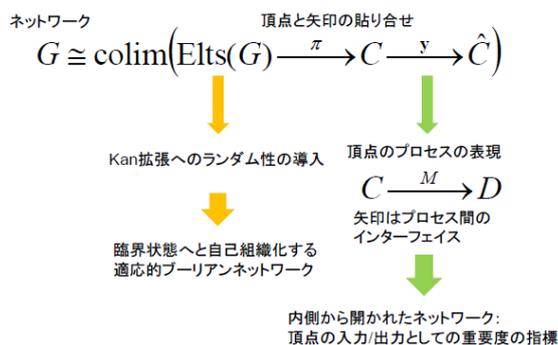


図1. ネットワーク理論の圏論的諸展開

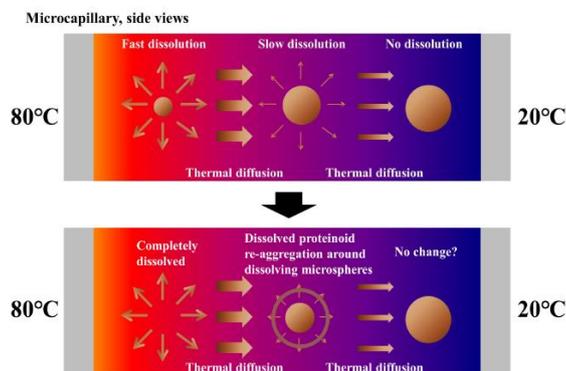


図2. アミノ酸熱重合物微小カプセルの形成過程 (出所) 春名太一准教授より提供

<sup>1</sup> Sci. Rep. 9:4130, 2019, <sup>2</sup> Physica D 388:40-44, 2019, Appl. Netw. Sci. 3:15, 2018

<sup>3</sup> In: M. Umamo et al. (Eds.) Proceedings of the 6th SCIS:2314-2316, 2012

<sup>4</sup> Best Poster Award, The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, Kobe, Japan, November 22, 2012.

**シヤノン限界の実現と次世代情報通信理論の構築**

平岡 裕章(京都大学高等研究院 教授(高等研究センター長))

研究期間 2008 年 10 月～2012 年 3 月

展開している事業:

CREST、科研費基盤(A)、科研費若手(A)

**さきがけの成果:**

誤り訂正符号における最尤推定復号に対して、その離散力学系的構造を解明することによって、高精度・低計算量型の近似復号法を提案した。

ネットワーク符号問題を層コホモロジー群を用いて定式化し、ホモロジー代数の各種手法を用いたネットワーク性能評価(ロバスト性など)について新手法を開発することに成功した。



**発展:**

**1. トポロジカルデータ解析の理論開発<sup>1</sup>**

パーシステントホモロジーの表現論的研究手法を開発し、また確率論的な各種極限定理を証明した。両研究は従来問題設定されていなかったものであり、材料や生命科学者からの要望を取り入れ理論を発展させた。表現論的研究では、時間軸などの時空間パラメータをはじめ様々なパラメータで高次元化し各種評価ができる表現論を構築した。確率論的研究ではランダムなデータノイズがパーシステントホモロジーにどのような影響を及ぼすか新しい理論を構築した。また、パーシステント図を元のデータ空間に引き戻す逆問題解析手法と、パーシステント図で検出された特徴と材料の機能を紐づける機械学習法を構築した。これによりクラックなどを誘発する幾何構造の解明や予測、材料設計へのフィードバックなどが期待される。

これらの研究成果と並行して、パーシステントホモロジーの計算を行うソフトウェア「HomCloud<sup>2</sup>」を開発し公開した。HomCloud は逆問題解析が可能な世界で唯一のソフトウェアである。民間企業を含む多くの研究者に利用されている。

**2. トポロジカルデータ解析の材料科学への応用<sup>3</sup>**

パーシステントホモロジーを用いて、ガラス材料に内在する新たな中距離秩序構造を発見した(図 1)。本研究成果は無秩序系の記述言語を見出したことになり、このような新たな記述法の開発は、ガラスとは何かという長年の基礎科学の問題の理解を深めるものであり、産業的にも情報ストレージや太陽光パネルなどのガラス材料開発に直結する重要な意味を持つ。同研究により、パーシステントホモロジーを用いた材料科学分野における包括的解析手法を開発することができた。SIP 革新的構造材料、情報統合型物質・材料開発イニシアティブ(MI2I)、NEDO 超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクトなどの大型材料科学プロジェクトに本手法が採用された。今後トポロジカルデータ解析がより多くの科学技術分野へ展開されていくことが期待される。

**特記事項**

- ・HomCloud に関し普及活動として毎年チュートリアルを開催、様々な業種から毎回 100 名前後の参加がある。
- ・本研究成果に関連して、民間企業 6 社と共同研究実施。
- ・本研究成果手法は、材料科学等の現場で既に適用されている。
- ・遺伝子データ解析など生命科学研究への応用、経済学者との共同研究で特許統計の位相的解析なども実施。
- ・著書発行「タンパク質構造とトポロジー —パーシステントホモロジー群入門」

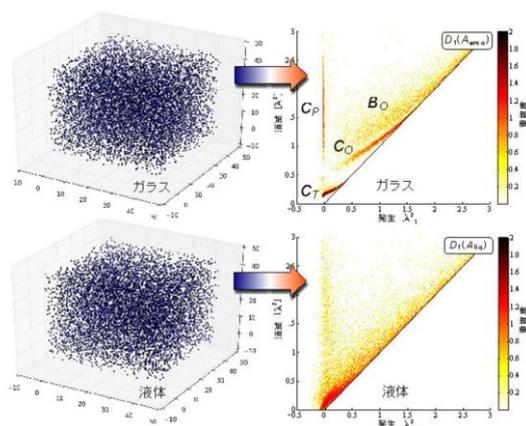


図 1. SiO<sub>2</sub>の原子配置(左)とそのパーシステントホモロジー(右)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Discrete Comput Geom 55:100-157, 2016

<sup>2</sup> 東北大学平岡研究室 HomCloud [https://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/hiraoka\\_lab/homcloud/index.html](https://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/hiraoka_lab/homcloud/index.html), 2020 年 6 月 30 日アクセス.

<sup>3</sup> PNAS 113:7035-7040, 2016

プレスリリース: <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160614/index.html>

## 情報幾何学の計算論的神経科学への応用

三浦 佳二(関西学院大学工学部生命科学科 准教授)

研究期間 2008年10月~2012年3月

**さきがけの成果:** 脳が受け取る時系列データを基に脳の処理メカニズムの解明を目指した。時間変動するデータから、変動しない情報を幾何学的に射影して取り出す数学的方法を考案、脳の嗅覚皮質にある神経細胞の活動データを解析し、匂いの違いを判別するメカニズムを解明した。本数学的方法の問題に依らず普遍性を持ち、時系列の広い適用可能性を示唆した。



### 発展:

#### 1. 無限次元の情報幾何学を用いた脳活動のモデリング<sup>1</sup>

環境や動物の状態が変化していく非定常性が存在する条件での解析手法を提案した。時系列の平均値がドリフトし、さらにドリフトの時間波形に無限の可能性があったとしても、それとは“直交”する、時間変動しない相関パラメータを推定する方法を開発した(図1)。複数神経細胞からの電気活動と応答特性で細胞間のつながりを特定するという重要な実験などにおいて、従来手法は非定常なトレンドを持ってドリフトしている場合、誤った相関を推定していたが、本数学的手法は、その影響を受けず細胞間の活動の相関を正しく推定できる。

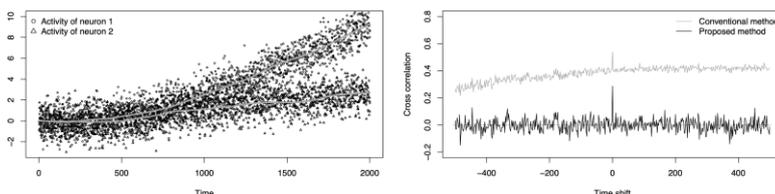


図1. 平均値がドリフトする2時系列(左)に対する相関の検出(右図)  
出所)三浦佳二准教授より提供

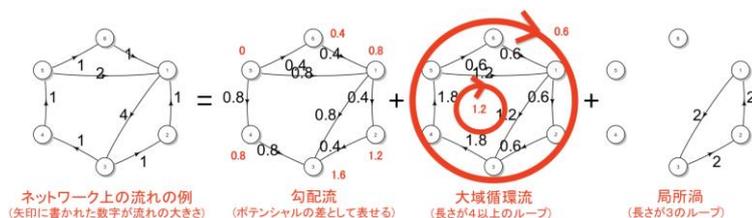


図2. Hodge分解によるヘテロ・大域的な脳活動の遍歴検出  
出所)三浦佳二准教授より提供

#### 2. Hodge分解によるヘテロ・大域的な脳活動の遍歴検出<sup>2</sup>

ネットワークの Hodge-小平分解は、グラフ上の流れを3成分に分解し、データの解釈に役立てるものである。大域的な長いループの数を数えることで、ニューラルネットワークの異なる学習則(構造の時間発展ルール)である Hebb 則と STDP 則を判別できることを発見した(図2)。本数学的手法では、脳活動計測データから Hebb 則と STDP 則を判別し、ループが多くできる、できにくいなど解明でき、神経細胞の層状の分類や再帰的な流れなど神経回路の大域構造の特徴づけにつながる。

#### 3. モース理論に基づく脳型タッチセンサーの設計<sup>3</sup>

タッチする手の形状や位置に依存せずに正しくタッチ回数を数えられるようなカウンターを設計した。連続変形によって変わらない不変量を教えてくれるトポロジーの数学のうち、(1)ポアンカレ・ホップ指数及び(2)オイラー積分を利用したタッチカウンターを2つの柱として開発を行った(図3)。本数学的手法は連続変形で不変な連結成分数(島)や穴の数を計算でき、曲面や円筒状スクリーンへのタッチ、ボールの握りなど認識できる。アルゴリズムは並列化しており大規模ピクセルでも高速計算できる。本手法は分散された神経細胞から大域的整合性のある不変量を取り出す脳の情報処理のモデルにもなる。

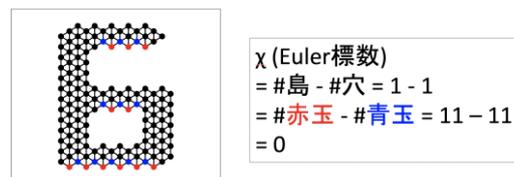


図3. 各格子点上におけるポアンカレ・ホップ指数の計算例「6」

出所)三浦佳二准教授より提供

### 特記事項

- ・上記の研究成果を展開し開発したアルゴリズムは、学术论文でのデータ解析に利用され始めている。

<sup>1</sup> Interdisciplinary Information Sciences Vol. 19, No. 1:35-41, 2013

<sup>2</sup> Neural Netw Vol. 62:20-24, 2015

<sup>3</sup> IEEE ACCESS Vol. 5:14889-14897, 2017.

**非記号計算の基礎理論の構築と構造学習への応用**

石川 博(早稲田大学理工学術院 教授)

研究期間 2009 年 10 月～2013 年 3 月

展開している事業:

CREST、科研費基盤(A)、科研費基盤(B)

**さきがけの成果:**

非記号計算を定義し、それが通常のチューリング計算を含むことを厳密に示した。与えられたデータをその属する空間に自然な写像の組み合わせによる非記号計算の結果として表すための探索をする具体的アルゴリズムを開発した。



**発展:**

**1. 高階マルコフ確率場の低階への変換アルゴリズムの開発<sup>1</sup>**

マルコフ確率場は、画像表現モデルとして使用し、各画素をノード、隣接画素間をつなぐグラフィカルモデル上に構成される。マルコフ確率場の最適化計算(周辺分布の計算問題)は、計算量が大きいという課題がある。さきがけで研究していたパターン認識の研究を発展させ、高階マルコフ確率場を低階に変換するアルゴリズムを開発した。特に、従来変数を付加する必要があったところを、変数付加を不要あるいは少数で済ませる方法を開発した。本研究成果は推定精度の犠牲を最小限にし、計算量を大幅に削減できるものである。

**2. 高階エネルギー最小化の医用画像への応用<sup>2</sup>**

CT や MRI の医用画像 3 次元画像化による可視化や病態変化の正確な把握が可能な診療指標の定量化のため、セグメンテーションが必須となっている。高階エネルギー最小化を医用画像解析に応用した。特に、CT 画像などの 3 次元医用画像に対して、従来不可能であった高度なセグメンテーションを可能にした(図 1)。高階エネルギー低階化ソフトウェアは公開している。肺動脈・静脈セグメンテーションについては東京医科大学病院との共同研究で開発した。早期肺癌切除のための胸腔鏡手術において、本セグメンテーションで注意すべき血管走行を 3 次元で可視化可能となり施術支援ツールとして活用されている。GUI と組み合わせたシステムが富士フイルム株式会社で商用化(2014 年)された。

**3. 深層学習による画像変換の研究<sup>3</sup>**

マルコフ確率場から深層学習へも展開し、深層学習による構造つき予測問題に取り組んだ。深層学習により画像を入力とし加工を加えた画像を出力する各種アルゴリズムを開発した。特に白黒画像のカラー化、欠損している画像の復元やラフスケッチの自動線画化などの画像補完などを従来にない性能で可能にした。白黒画像のカラー化、画像補完技術に関して、テレビで数多く報道された。白黒画像のカラー化、ラフスケッチの自動線画化ソフトは Web 上で GitHub で公開している。本技術は新聞・雑誌・書籍における白黒画像カラー化、歴史的写真のカラー化や古い映画の補修などにライセンスされ多岐に渡り数多く活用されている。

**特記事項**

- ・医用画像への応用技術は第 75 回電子情報通信学会論文賞を受賞(2018 年)
- ・白黒画像のカラー化技術は経済産業省 Innovative Technologies 2016 特別賞「Culture」受賞
- ・株式会社東芝、アイシン精機株式会社と深層学習の応用について共同研究実施
- ・スペイン・マドリード工科大学、ドイツ・ミュンヘン工科大学、イギリス・ダラム大学と共同研究実施

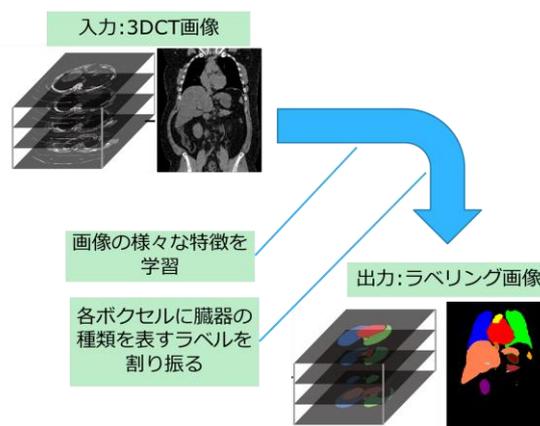


図 1.臓器の位置関係を考慮した高階グラフカットによる 3D 医用画像の多臓器同時セグメンテーション  
出所)早稲田大学石川研究室 HP より取得

<sup>1</sup> IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2014), 1362-1369, 2014.

<sup>2</sup> Int. Conf. Med. Im. Comp. Comp. Assi. Int. (MICCAI2014), 339-347, 2014.

<sup>3</sup> ACM Trans. Graphics, 35(4) (Proc. SIGGRAPH2016), Art.110, 2016.

<sup>4</sup> <http://iizuka.cs.tsukuba.ac.jp/projects/colorization/ja/>, <https://esslab.jp/~ess/ja/research/sketch/>

### 3.3 2009 年度採択研究課題

#### 3.3.1 数学を応用した動力学シミュレーション法の開発 (一宮尚志)

#### 数学を応用した動力学シミュレーション法の開発

一宮 尚志(岐阜大学大学院医学系研究科医療情報学分野 准教授)

研究期間 2009 年 10 月～2013 年 3 月

#### さきがけの成果:

数学を用いた分子動力学シミュレーションの高速化について研究を行い、くりこみ群を用いた分子動力学シミュレーションを提案した。



#### 発展:

##### 1. 位相的データ解析と分子動力学シミュレーションの組み合わせ<sup>1</sup>

さきがけにおいて研究した分子動力学シミュレーションを活用して、CREST「ソフトマター記述言語の創造に向けた位相的データ解析理論の構築(2015～2021 年度)」において、位相的データ解析手法であるパーシステントホモロジーと分子動力学シミュレーションの組み合わせにより、タンパク質の折りたたみ解析を行った。

#### 特記事項

- ・東北大学と位相的データ解析の高分子材料シミュレーションへの適用について共同研究
- ・京都大学と位相的データ解析のタンパク質分子動力学シミュレーションへの適用について共同研究

<sup>1</sup>一宮尚志, 日本物理学会 第 73 回年次大会概要集 p2736 (2018)

### さきがけの成果:

インフルエンザウイルスは遺伝子変異し続けるため、ワクチン株を頻りに更新する必要がある。本研究では、流行株のアミノ酸置換の頻度をガンマ分布で近似し、翌年の流行株を予測する手法を開発した。予測試験の結果、本方法は翌年に起こる変異の約 70%を正しく予測した。



### 発展:

#### 1. Tajima の D を用いたウイルスの流行動態の解析<sup>1</sup>

さきがけで行った遺伝子配列変異の解析を進展させ、病原体遺伝子の塩基配列を集団遺伝学的に解析することにより、感染症の基本再生産数(R0)を推定する技術を開発した。2009 年のパンデミック時にブエノスアイレスで収集されたインフルエンザウイルスの塩基配列の Tajima の D を調べた結果、基本再生産数 R0 は、1.55 (95%信頼区間: 1.31～2.05)であったと推定された(図 1)。また、Wright-Fisher-Kimura モデルをベースとし、ウイルス変異の集団への定着確率分析法を開発した。これにより、社会への大きな脅威となる一定割合で変異が定着するケースについての予測が可能となった。COVID-19 に対しても本研究成果を活用し分析中。

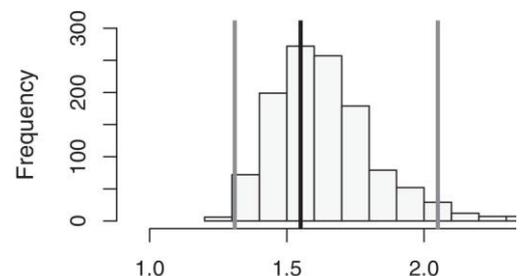


図 1. 塩基配列から推定された基本再生産数  
出所)伊藤教授より提供

#### 2. A 型インフルエンザ感染個体血清のデータの解析<sup>2</sup>

さきがけではウイルスの HA アミノ酸配列を多次元尺度構成法(MDS)により解析したが、本研究ではそれらの解析を活かし、米国マウントサイナイ病院 Krammer 博士と共同で A 型インフルエンザ感染個体血清のデータを解析した。年齢の異なる集団についてコホート研究を行い、全 18 亜型のヘマグルチニンに対する各年齢層の血清の反応性を明らかにした。

#### 3. A 型インフルエンザウイルスの鳥豚間伝播に関する研究<sup>3</sup>

鳥豚間伝播におけるインフルエンザウイルスのポリメラーゼ上のアミノ酸置換を解析した結果、鳥から豚に伝播したウイルスは共通して、PB2 の 478 番目のアミノ酸が I から V に置換していることを見出した。このアミノ酸置換は、鳥インフルエンザウイルスが豚に感染する際に有利に働くと考えられる。

### 特記事項

- ・2016 年 WHO Collaborating Centre を中心とするインフルエンザワクチン株の選定のために変異予測を導入するための会議において、本研究の取組み、研究成果を報告した。
- ・CREST(研究代表者 西浦博)ではさきがけで開発した遺伝情報予測と西浦博教授の感染動態予測を組み合わせた分析を実施した。
- ・北海道大学の ACADEMIC FANTASISTA 事業において高校生向け出張授業を実施している<sup>4</sup>。

<sup>1</sup> Epidemics 21:21-29, 10.1016/j.epidem.2017.04.004, 2017

<sup>2</sup> Nat. Immunol. 18(4):464-473, 2017

<sup>3</sup> Front. Microbiol. 7:2118, 2016

<sup>4</sup> 北海道大学プレスリリース: <https://www.hokudai.ac.jp/news/2013/08/academic-fantasista.html>

## 符号・暗号のための代数曲線論

川北 素子(滋賀医科大学医学部 准教授)

研究期間 2009 年 10 月～2013 年 3 月

### さきがけの成果:

1970 年以降、代数曲線を使って情報通信での効率の良い符号、安全性の高い暗号を構成できることが発見されたが、具体的に使おうとすると未知の部分が多い。有限体上で定義された代数曲線の有理点数はここでの重要パラメータとなる。有理点数に関する Hasse-Weil 上界に達する代数曲線は最大曲線と呼ばれ、様々な性質が知られているが、最大曲線ではない Serre 上界に達する代数曲線は具体例が殆どなく性質も分かっていない。最大曲線でない Serre 上界に達する代数曲線の性質を調べ、Wiman の曲線も Serre 上界に達することを発見、著名な論文にも採録された。



### 発展:

#### 1. 新しい Serre 上界に達する代数曲線の発見<sup>1-5</sup>

上記のさきがけの成果として発表した論文の Serre 上界に達する新しい代数曲線について定義を拡張し、コンピュータ探索を実施し、新しい Serre 上界に達する代数曲線を得た。本研究では最大曲線ではない代数曲線の中から、Serre 上界に達する代数曲線を得ることができた(図 1)。さきがけを含めその前後で継続して論文で発表(図 1 の reference の論文 [1]～[5]注釈に記載)。

genus	example	reference
3	Klein quartic	
4	quot. curve of Fermat curve	[2]
5	sexites	[5]
6	Wiman's sextic	[4]
7	sexites	[5]
8	?	
9	?	
10	Fermat curve	[1]
11	quot. curve of Fermat curve	
$g \geq 12$	?	

#### 2. Serre 上界に達する種数5と7の代数曲線の発見<sup>5</sup>

1.の研究をさらに発展させる形で、種数 6(図 1 内 genus 6、reference [4])。さきがけで発見しその後採録された論文)の平面曲線を定義して、コンピュータ探索を実施した結果、初めて最大曲線でない Serre 上界に達する種数 5 と 7 の代数曲線(図 1 内 genus 5 と 7、reference [5])を得た。

図 1. Serre 上界に達する最大曲線でない曲線の具体例([1]～[5]は川北准教授が著者に含まれる論文) 出所)川北准教授より提供

#### 3. Wiman の次数6の最大曲線の研究<sup>6</sup>

さきがけで発見し 2018 年に論文採録(図 1 内 genus 6、reference [4])した Wiman の種数 6 の最大曲線の特徴を明らかにした。

### 特記事項

・University of Perugia と共同研究を実施した。

1 Private communication, 2004 2 J. Algebra Appl. 4 no.2: 137–178, 2005 3 Contemp. Math. 637: 191–203 2015

4 Eur. J. Math. 4 no.1: 330–334, 2018 5 Lect. Notes Comput. Sci. 11321: 264–271, 2018

6 M. Giulietti, M. Kawakita, S. Lia, M. Montanucci <https://arxiv.org/abs/1805.06317>, to appear in Advances in Geometry

7 D. Bartoli, M. Giulietti, M. Kawakita, M. Montanucci, Finite Fields Appl. 68 2020

## 非平衡系における界面張力の数理物理学

北畑 裕之(千葉大学大学院理学研究院 教授)

研究期間 2009 年 10 月～2013 年 3 月

### さきがけの成果:

界面張力の時間的変化や空間的勾配がある系についての数学的な表現を対象として研究を進め、界面張力勾配がある系でどのようにマランゴニ対流が発生するか、発生したマランゴニ対流が系自体をどのように駆動するかについての知見を得た。



### 発展:

物理学において、平衡系、孤立系に関しては系統立てられた理論が数多く確立されてきたが、非平衡開放系に関しては、未知な部分が多い。自然界において、ほとんどの系は非平衡開放系として記述すべきものである。非平衡系において自発的な運動が見られる系も多く、生物の運動性を一般化したアクティブマターは、非平衡条件下で自由エネルギーを用いて運動する系として盛んに研究されている。アクティブマターは生物を模倣した系であるが、非生物系を用いても作ることができる。水面での樟脳粒の自発的な運動は、濃度差が界面張力勾配を生み出し、自発的に運動するものでありその一例である。このような系は、元々系に非対称性が内在されているような系と、系が自発的に対称性を破り自発的に運動する系に大別される。また、反応拡散系と運動方程式を結合させたモデルを用いて再現されることが知られている。このような樟脳粒の運動について、その形状や領域の境界が運動に対してどのように影響するか、また、樟脳の円板を水面に浮かべると溶解、表面張力差を生み出し Marangoni 対流が発生するが、この Marangoni 対流がどのように運動に影響するかについて数理モデルを構築、下記 1、2 の研究成果を得た。

#### 1. 界面張力駆動自己駆動粒子の運動と対称性の関係<sup>1-3</sup>

・樟脳粒は水面に浮かべると樟脳分子が水面に拡がることで水面の表面張力を下げる。粒が対称形状でも、自発的に樟脳分子濃度のプロファイルの対称性が崩れ、ある方向に運動する。擬 1 次元の水路での樟脳粒の運動について、実験および理論的解析、数値計算を行い、水相の粘性や水路の長さにより、水路の中心に静止する状態から、水路内を往復する運動に分岐することがわかった。数理モデルを縮約することでその分岐がホップ分岐であることが明らかになり、粘性や水路の長さに対する依存性も再現することができた。

・樟脳分子濃度の時間発展と樟脳粒の運動についての発展方程式を考え、常微分方程式に縮約することで円形領域の中心のまわりを回転運動することを見出した。実験および数値計算でも円形領域に閉じ込めた樟脳粒は円形領域の中心のまわりを回転運動することを明らかにし、理論との整合性を確かめた。

#### 2. 界面張力勾配が引き起こす Marangoni 対流による物質輸送<sup>4</sup>

界面張力を変える物質が溶解し、輸送される系について、その物質輸送に関するモデルを構築し、実効的な拡散係数で記述できることを明らかにした。Marangoni 対流による輸送のため、樟脳分子はバルク中の拡散と比べて非常に速く広がる。この輸送現象を拡散係数に組み込むため、第一段階として樟脳粒が固定されている場合とし、定常状態での流れ場と樟脳分子の濃度場を計算、それを実効的な拡散係数を用いて表した。波数には依存するものの Marangoni 対流による樟脳分子の輸送を実効的な拡散係数で近似できることを示した。

### 特記事項

・株式会社デンソーと共同研究を行った。  
・ポーランド科学アカデミーと表面張力により駆動される粒子に関して、マックス・プランク研究所と非平衡条件下での揺らぎに起因する拡散増強に関して、小磯教授(九州大学。本さきがけ研究者)と基板上の液滴形状の安定性に関して共同研究を行った。

<sup>1</sup> Phys. Rev. E, 99, 022211, 2019, <sup>2</sup> Physica D, 366:10-26, 2018, <sup>3</sup> Phys. Rev. E, 94, 042215, 2016, <sup>4</sup> J. Chem. Phys. 148, 134906, 2018

## 真軌道によるシミュレーションの実現とその応用

齊藤 朝輝(公立はこだて未来大学システム情報科学部 教授)

研究期間 2009 年 10 月～2013 年 3 月

### さきがけの成果:

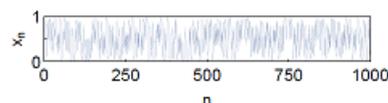
幾つかの数表現を用いて、区分的線形写像を含む区分的 1 次分数写像の真軌道生成法の構築を行った。特に、ある数表現を用いると、一般の区分的1次分数写像に適用可能な真軌道生成法が得られることを明らかにした。また、従来のシミュレーション法では精密な解析が困難だった非線形系を対象に、真軌道を用いたシミュレーション解析を行い、その有効性を確認した。



### 発展:

#### 1. 真軌道計算法の確立<sup>1</sup>

力学系のシミュレーションで通常使用される倍精度浮動小数点数などの固定精度の数表現を使うと、丸め誤差などの数値誤差がシミュレーション結果に混入する。このことは、初期値鋭敏性を特徴として持つカオス系のシミュレーションにおいて、特に深刻な問題となる。計算機で正確に実行できる整数演算のみを使い計算するさきがけ研究の成果を発展・精密化し、区分的線形写像を含む区分的 1 次分数写像の真軌道を計算する新しい方法を確立した。本真軌道生成法を様々な写像(特に、従来の数値計算法ではシミュレーションが困難な 1 方向結合写像系や多次元連分数アルゴリズムにとまう写像、および複雑な形の不変密度をもつ写像)に適用し、典型的軌道と同じ性質を持つ(もしくは系が本来もつ振る舞いを示す)真軌道が得られることを確認した。本真軌道計算は、現在は普及には至っていないが、科学技術計算法として、浮動小数をベースにした数値計算法の代替となり得る数少ない選択肢のひとつであり、今後広まっていくと考えられる。



$n$	$(b_n, c_n)$	$f_n(x)$	$\alpha_n$	$\epsilon_n$
0	(1, -1)	$x^2 + x - 1$	0.618034	1
1	(4, -1)	$x^2 + 4x - 1$	0.236068	0
2	(8, -4)	$x^2 + 8x - 4$	0.472136	0
3	(16, -16)	$x^2 + 16x - 16$	0.944272	1
4	(34, -31)	$x^2 + 34x - 31$	0.888544	1
5	(70, -55)	$x^2 + 70x - 55$	0.777088	1
6	(142, -79)	$x^2 + 142x - 79$	0.554175	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

図 1. 疑似乱数生成の例<sup>2</sup>

出所) 齊藤教授より提供

#### 2. 真軌道疑似乱数の開発<sup>2,3</sup>

疑似乱数は数値計算や暗号通信で不可欠なものであり、また、シミュレーションなどでも活用される重要な基盤技術の 1 つである。開発した真軌道計算を使い疑似乱数生成器を構成した。本疑似乱数生成器は、非周期性などの望ましい性質をもつことが数学的に保証されていると同時に、統計性の良さに関してはエルゴード論による裏付けがある点で、数論的疑似乱数生成器とカオス的疑似乱数生成器の良さを合わせもつ、全く新しい疑似乱数生成器となっている。特に、初期点(種)を良質な疑似乱数列に変換するアルゴリズムだけでなく、初期点の適切な選択方法についても明らかにした。本疑似乱数生成器により、極めて質の高い疑似乱数列を生成できるようになった。この成果の一部をまとめた論文<sup>2</sup>は、掲載誌の Featured Article に選ばれ、また一般向けの紹介記事<sup>3</sup>に掲載されるなど、高い評価を受けている(図 1)。現在、疑似乱数生成の高速化に取り組んでおり、実現できれば、計算コストをおさえつつ、統計性に優れた疑似乱数列を大量に生成できることになりインパクトはさらに大きくなると考えられる。

#### 3. 真軌道をベースにした連分数アルゴリズムの構築<sup>4</sup>

代数的数(要素)上の区分的 1 次分数写像の真軌道をベースにして、多次元連分数アルゴリズムおよび  $p$  進連分数アルゴリズムを構築した。特に、この  $p$  進連分数アルゴリズムは、 $Q$  上 2 次の  $p$  進数体の元に対してだけ周期的展開をあたえる初のアルゴリズムとなっている。

### 特記事項

・金沢大学、東邦大学、津田塾大学、福岡工業大学、富山大学、London 大学、Aix-Marseille 大学と共同研究実施。

<sup>1</sup> Chaos 25, 063103, 2015, <sup>2</sup> Chaos 26, 063122, 2016,

<sup>3</sup> (紹介記事)M. Fellet, Scilight 2018, 440001 (2018). <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5078620>,

<sup>4</sup> Comment. Math. Universitatis Sancti Pauli 67:27-48, 2019

## 揺らぐ結び目構造の数理

坂上 貴洋(青山学院大学理工学部物理数理学科 准教授)

研究期間 2009年10月～2013年3月

展開している事業:

科研費基盤(B)

### さきがけの成果:

環状高分子鎖の濃厚溶液においては、鎖の非交差性のために生ずるトポロジカルな拘束が顕著となり系の物性を支配するが、その理解は未開拓であった。本研究では、トポロジカル体積という概念の導入を通して、トポロジカルな拘束を理論的に記述するための基盤を構築した。



### 発展:

環状高分子のトポロジー(結び目、絡み目構造)は、合成の段階で固定され、鎖を切断しない限り変化しない。このトポロジー一定の拘束条件は、環状鎖系の構造、揺らぎ、さらに DNA、蛋白質など生体高分子の機能発現においても影響を及ぼし、その解明は高分子科学における主要な未解決問題である。さきがけにおいてトポロジカルな拘束により生じるエントロピー的な反発力を記述するトポロジカル体積という概念を導入し、理論的に記述する基盤を構築した。本技術をさらに発展させ、以下 1～3 の研究成果などを得た。

#### 1. 高分子ブレンドの相溶性におけるトポロジー効果解明<sup>1</sup>

異種高分子のブレンドの相溶性は応用上重要な問題であるが、ブレンドが環状高分子を含む場合には、トポロジカルな拘束が相溶性に影響を及ぼす。トポロジカル体積に基づいて、高分子ブレンド相溶性に及ぼすトポロジー効果を記述する平均場理論を構築し、解析を行った。通常の線形鎖-線形鎖ブレンドに比べ、線形鎖-環状鎖では相溶性が大幅に増大すること、逆に環状鎖-環状鎖ブレンドでは相分離の傾向が促進されることなどを見出し、そのメカニズムをトポロジカルな拘束と関連付け、トポロジカルな拘束に由来する長さスケールが相互作用の「遮蔽長」として作用することを見出した。

#### 2. 環状高分子濃厚溶液における異常ダイナミクスの解明<sup>2</sup>

環状高分子鎖濃厚溶液は、鎖の形態や相溶性のような静的性質のみならずダイナミクスやレオロジーも従来よく研究されてきた線形鎖溶液とは大きく異なる。本研究では、トポロジカル体積の概念をダイナミクスに拡張した。特に、環状鎖の自己拡散ダイナミクスに見られる特異な分子量依存性の記述に成功した。上記 1 を含め、本研究成果はトポロジー制御を通じた新規材料開発の視点からの応用も期待される。

#### 3. クロマチン運動の理論モデル構築<sup>3</sup>

遺伝情報を担う染色体は核内で大きく動く。このクロマチンの運動は、動物の胚発生の過程で低下することが観察され、遺伝子発現と密接に関連していると考えられる。しかし、核内の混雑環境下で染色体のような長い紐状の分子が絡まりあうことなくどのように動くかなど不明な点が多い。クロマチン構造を変化させ遺伝子発現を制御するものとして、細胞核のサイズやクロマチンの動きやすさ等の物理的要因に着目し、そのメカニズムと役割を理解することを進めた。細胞核内のクロマチン動態の理解に向けて、遺伝子座の異常拡散挙動を記述する理論モデルを構築した。クロマチン鎖間に作用するトポロジカルな拘束や、細胞環境内における非平衡ノイズの効果について、これらを記述する理論モデルの提案を行った。本研究成果は、今後、生物学者との共同研究を通じた更なる展開が期待される。

### 特記事項

・ベルギー KU Leuven, Hasselt University、カナダ McGill University と高分子ダイナミクスや、クロマチンダイナミクスについて共同研究を行った。

<sup>1</sup> Phys. Rev. E 93, 042502, 2016, React Funct Polym 134:150-155, 2019

<sup>2</sup> Soft Matter 14:7507-7515, 2018

<sup>3</sup> Soft Matter 13:81-87, 2017, Phys. Rev. E 99, 032421, 2019

## 非線型マクロ経済モデルのためのフレームワークの構築

田村 隆志(大阪府立大学学術研究院第2学群数学系 准教授)

研究期間 2009年10月～2013年3月

### さきがけの成果:

合理的期待を含んだ非線形マクロ経済モデルを積分方程式として定式化し、解の存在と一意性を求める研究を行った。



### 発展:

#### 1. 合理的期待を含んだ非線形マクロ経済モデルの解の存在と一意性を解明<sup>1</sup>

現代のマクロ経済学では、個々の経済主体が自身の効用や利益を最大化するという仮定の下、経済主体同士の行動を市場の均衡など適当な仮定と結びつけ分析し、さらに経済主体の将来に対する期待を合理的期待という仮定の下でモデルが構築されている。合理的期待を仮定してモデルを解く場合、定常状態の周りで線形化して数値的に解くのが一般的であり、解の存在が厳密に取り扱われていない。このため、さきがけでは合理的期待の仮定の下でのマクロ経済モデルにおける非線形効果を厳密に取り扱えるよう、合理的期待を含んだ非線形マクロ経済モデルを積分方程式として定式化し、解の存在と一意性を求める研究を行った。ここでは、外乱が非常に小さいか、あるいは定常状態でのインフレ率が高くゼロ金利制約の影響が小さい場合に、適当な仮定の下、合理的期待を満たす解が存在することを示したが、その後の研究を発展させ、基本的なモデルに対して解の存在と一意性を明らかにした。

<sup>1</sup> Tamura, T., Asia-Pacific Financial Markets 27, 257-289 (2020)

## 非線形情報理論：環境雑音を活用する次世代情報処理の実現

寺前 順之介(京都大学大学院情報学研究科先端数理科学専攻 准教授)

研究期間 2009年10月～2013年3月

### さきがけの成果：

我々ヒトを含む生物の脳内で自発的にかつ継続的に発生している不規則な神経活動に関する数理モデルの構築に成功し、この活動が生成されるメカニズムを解明し、またこの活動によって神経細胞間の情報伝達が最適化されていることを明らかにした。



### 発展：

#### 1. 大脳皮質自発発火活動に対する局所回路構造と抑制性ニューロンの影響の発見<sup>1</sup>

大脳皮質神経回路では、外部入力刺激がなくても独立にランダムに発火する持続的自発発火活動と呼ばれる現象がある。今までの研究で大脳皮質神経回路のシナプス結合は、ごく少数のシナプス結合が極めて大きい興奮性シナプス後電位(EPSP)を与え、その強度は対数正規分布であり、また、それらシナプス結合が神経回路中でクラスタを構成し、その指標の一つの相互結合が正の相関であると報告されている。これらをモデル化し、クラスタの存在下では、興奮性神経細胞の発火率が双方向結合によって増大し、間接的に抑制性神経細胞からの共通入力強度が増大することで高い同期発火となること、共通入力の減弱で、クラスタ性と非同期発火の共存が可能になることを解明した。また、抑制性シナプス後電位(IPSP)が対数正規分布のような中程度の不均一性では、持続的自発発火活動を安定化には不十分であることを明らかにした。典型的な IPSP を著しく超える大きな IPSP も報告されており、それらに対し重要な示唆となった。

#### 2. 脳の仕組みを利用した効率的な通信ネットワークの提案<sup>2</sup>

無線センサネットワークは、その多くが、電力制限された多量で小さなセンサが用いられる。センシングデータはそれ自体ではなく、それらから統合された情報が伝達される。一方、大脳皮質は百億を超える神経細胞の巨大ネットワークであり、各神経細胞は数千のシナプスの積算した値が閾値を超えればスパイク発火を出力し、それが連鎖することで情報処理を行っている。この脳の仕組みを利用し、連続するスパイクの時間間隔を関数とし符号化、分散システムでの結果整合性を求めるゴシッププロトコルの情報収集をベースとした効率的な新しい無線センサネットワークの提案を行った。

#### 3. ニューロンとシナプスの確率性に基づくニューラルネットワークの新たな学習則の発見<sup>3</sup>

現在のニューラルネットワークは、半世紀前の大脳皮質視覚野神経細胞の特性をヒントとしたものであり最新の脳の知見とは異なる。最新の知見を用いることでこれを超える人工知能が生み出されると期待される。最新の知見では、神経細胞間でのシナプス結合の有無や強度が、伝播するスパイク発火に応じ徐々に変化する可塑性を有し、環境や経験を反映して脳のネットワーク構造を変えることが分かっており、これが記憶や学習能力の実体であると考えられている。スパイク発火は時系列に見られるランダムネスを有し、シナプス結合強度も、伝播するスパイク発火に適応的に反応し変化するランダムネスを有している。これら2つのランダム性を統合することで、与えられた入力や環境に最も合致する内部状態を、揺らぎを用いた事後分布からサンプリングし生成し続けるというような新たなアルゴリズムを発見した。これは既存のニューラルネットワークとは異なり、実際の脳で実験的に観測される多くの知見と整合している。

### 特記事項

・無線センサネットワークについて大阪大学と、新たなニューラルネットワークのアルゴリズムについて九州大学と共同研究を実施中。

・新たなニューラルネットワークのアルゴリズムについて特許出願済(特願 2019-064222)

<sup>1</sup> PLoS One, 9, 4, e94292, 2014, Frontiers in Computational Neuroscience, 10, 109, 2016, <sup>2</sup> IEICE Trans. Commun, E98-B, 1, 153-159, 2015, IEEE Internet of Things Journal, Volume 3, Issue1, 49-58, 2015, <sup>3</sup> 特願 2019-064222

## 情報論理学の新パラダイムがもたらす生物現象の計算構造の解明

浜野 正浩 (National Cheng Kung University (國立成功大学) School of Computing 教授)

研究期間 2010 年 1 月～2013 年 3 月

### さきがけの成果:

生化学相互作用である RNA 干渉を計算言語で記述することにより再帰的 RNA 干渉の確率的 Turing 完全性を示し、同時に、情報を相互作用として捉えるプロセス計算言語の  $\kappa$  計算を用いることにより、内側からのきめの細かい記述ができ、これが状態爆発に陥らない局所的でコンパクトな RNA 干渉の記述を可能にした。さらに、得られた記述の意味論をマルチ型分岐過程として構成し、干渉の持続可能性の規則精錬化に関する不変性を示した。これにより  $\kappa$  に固有のコンパクト性の妥当さを保証できた。



### 発展:

#### 1. RNA 転写伸張の熱力学モデルと確率プロセス計算<sup>1</sup>

RNA 転写伸張の確率モデルを伸張複合体の  $\kappa$  記述から導かれる化学マスター方程式によって構成し、定常状態の分析をした。さらに Michaelis-Menten 酵素反応との関連を介し自由エネルギーに基づく伸張の意味を与えた。得られた情報科学的な rule 抽象化の健全性を、化学的な準定常状態近似(QSSA)との随伴 (adjoint)対応から保障した。

#### 2. 極性を持つ線形論理の相互作用の幾何学<sup>2</sup>

Polarized linear logic に対する動的な相互作用の幾何モデル(Geometry of Interaction, GoI)を Joyal-Street-Verity のトレース付きモノイダル圏を用いて構成し、証明探索の基本となる focalization を、計算の実行過程を表現する execution 式で特徴づけた。特にこの結果は静的な functoriality に基づく圏論モデルが不動点として導いた。

#### 3. MALL(乗法加法線形論理)の相互作用の幾何学<sup>3</sup>

困難であった加法体系に対する GoI を Hughes-vanGlabbeek のグラフ的証明構造(2005)を用いて与えることに成功した。新しい2つの手法 (i)部分等長写像の\*-代数に対する係数変換 (ii)形式言語のなす半環に対するトレースを用いて、既存モデルの貼り合わせではないきめの細かいモデル構成を可能にした。

<sup>1</sup> Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 326: 73–88, 2016

<sup>2</sup> Mathematical Structures in Computer Science, 28(10): 1639–1694, 2018

<sup>3</sup> ACM Transactions on Computational Logic Volume 19 4: Article No. 25, 2018

## 力学系における不安定対称解の探査と制御の新展開

水口 毅(大阪府立大学大学院理学系研究科 准教授)

研究期間 2009 年 10 月～2013 年 3 月

### さきがけの成果:

力学系の不安定解の探査に関する新手法を開発した。提案方法は、不安定解が対称性を有する場合に有効である。そのことを利用して、乱れた系の対称性が破れた状態から回復する臨界点近傍での特異的な振る舞いを明らかにした。



### 発展:

#### 1. 人名・地名の分布とその非一様性の探査<sup>1</sup>

べき則は臨界点などでみられる特異な振る舞いであり様々な現象で見出される。本研究では日本人の人名と地名についてその分布を調査し、その多寡がべき則にしたがうことを示した。さらにその空間的分布に関する非一様性を定量化することに成功した(図 1)。

#### 2. 生物の集団運動の可視化と解析<sup>2</sup>

生き物の群れには秩序だった運動もあれば乱れた運動もある。さきがけで提案した時系列解析の方法を基にした実データの解析を通して、全体の運動と内部の運動を切り分け、可視化する手段を開発した。また、個体間の相対位置、相対角速度などの運動学的量を用いて解析した(図 2)。本研究成果は自律分散型ロボットの制御理論への応用や、家畜などの生物集団の運動をロボットを用いて制御することなどへ発展する可能性がある。さらに、生物だけでなく例えば自動走行する移動体にも応用できると期待される。

#### 3. 粉体ペーストの記憶効果と粒子配置<sup>3</sup>

固体微粒子と液体とのペーストは、乾燥で液体が減るにつれ、しばしば乾燥亀裂が形成される。物理では非線形動力学のパターン形成の問題として研究が始まり、近年、固い材料の破壊現象とは異なる特徴を持つことがわかってきた。その中でペーストを水平加振した後に静置して乾燥すると加振方向に垂直な方向に乾燥亀裂が現れる揺れの記憶はよく調べられている現象である。揺れの記憶を持つペーストについて、応力測定法を開発、炭酸カルシウムペーストで乾燥前に応力異方性が発達することを見つけた。さらに、石松子ペーストのようなサイズの大きな粉体のペーストで記憶効果を確認し、石松子のミクロな粒子配列にもマクロな異方性と整合する統計的異方性が生じていることを確認した。これらは、亀裂形成以前に存在している異方的な構造を初めて確認した成果であり、記憶効果の解明につながる。

### 特記事項

- ・奈良女子大学、日本大学と破壊現象について共同研究を行った。
- ・ハンガリー-Etövs 大学、ドイツ MaxPlanck 研究所と生物の集団運動に関して共同研究を行った。

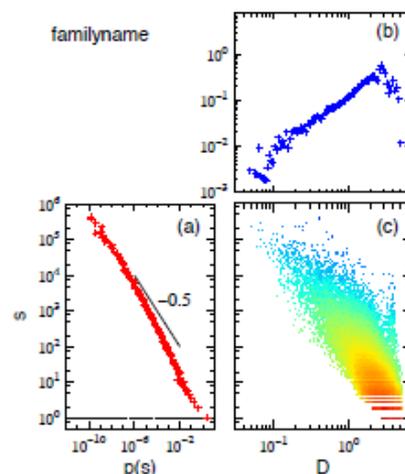


図 1. 名前の多寡および局在性の分布  
出所)水口准教授より提供

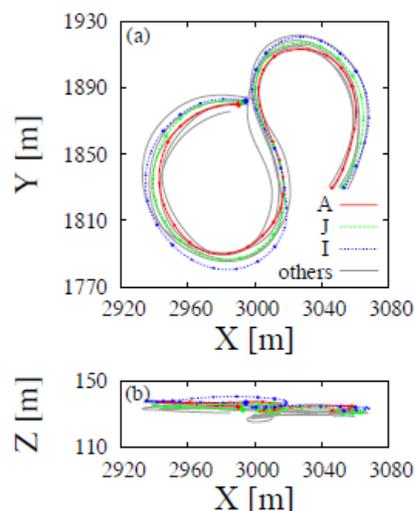


図 2. GPS により測定・可視化された飛行する鳩の動き  
出所)水口准教授より提供

<sup>1</sup> NOLTA, IEICE, 7(4): 499–508, 2016; Journal of the Physical Society of Japan, accepted, 2020

<sup>2</sup> PLOS ONE, 8: e81754(1~6), 2013; PLOS ONE, 10: e0140558(1~17), 2015

<sup>3</sup> European Physical Journal E, 40: 88(1~8), 2017

## 非線形放物型方程式の解の爆発とその応用

溝口 紀子(東京学芸大学教育学部 准教授)

研究期間 2009年10月～2013年3月

展開している事業:

科研費基盤(B)2件

### さきがけの成果:

非線形放物型方程式の解の爆発挙動に関して、従来は爆発時刻までの挙動が研究対象とされていたところ、不完全爆発が発生する条件での爆発後の漸近挙動を明らかにした。



### 発展:

#### 1. 非線形放物型方程式系の解の爆発現象の解析<sup>1</sup>

さきがけで研究した放物型方程式の解の爆発挙動に関する研究を科研費「非線形放物型方程式系の解の爆発現象の解析(2014～2019年度)」において進展させ、扱いが難しく従来は困難とされてきた放物型—放物型走化性方程式系の解の爆発に関する数学的構造を示し、またその挙動を解明した。走化性方程式系はバクテリアの集中現象を定式化したものである。また、高次元で拡散項が退化している場合は宇宙物理学への応用がある。集中現象は数学的には有限時間で解の爆発と定義される。

#### 2. 走化性方程式系における爆発現象の構造的研究<sup>2</sup>

1の研究を科研費「走化性方程式系における爆発現象の構造的研究」においてさらに発展させ、放物型—放物型走化性方程式系の解の爆発問題を領域が有界な場合と全空間の場合を総合的に研究した。放物型—放物型走化性方程式系と単純化された放物型—楕円型方程式系では数学的に異なる構造をもつことを証明した。放物型—放物型走化性方程式系は生物学、宇宙物理学等で用いられる方程式系であり、本研究成果はこれらの分野における科学的理解の進展に寄与すると考えられる。従来は、放物型—放物型走化性方程式系の解の爆発を数学的に扱うのが困難であったため、放物型—楕円型に単純化された方程式系でしか研究されてこなかったが、本研究では本来の放物型—放物型走化性方程式系の解の爆発を数学的に研究し成果をあげた。

<sup>1</sup> Mathematische Annalen, 367: 461–499, 2017

<sup>2</sup> Mathematische Annalen, 376: 39–60, 2020