

戦略的創造研究推進事業
－さきがけ(個人型研究)－

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」

研究領域事後評価用資料

研究総括: 坂上 貴之

2025 年 2 月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	3
(3) 研究総括	4
(4) 採択研究課題・研究費.....	5
2. 研究総括のねらい	8
3. 研究課題の選考について	11
4. 領域アドバイザーについて	16
5. 研究領域のマネジメントについて.....	18
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	41
7. 総合所見	58

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「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への展開」

① 概要

センサーなどの計測技術や計算機性能の飛躍的向上に伴い、大量のデータが得られるようになり、「ビッグデータ」活用の必要性が指摘され、AI（人工知能）が様々なデータの活用を通じて新たな価値を生み出すようになってきている。このような急速な技術の進展は、情報科学分野のみならず、その背後にある数学の力を活用したものである。

しかしながら、我が国においては数学・数理科学と情報科学との連携は十分ではなく、これがページランクや差分プライバシー、圧縮センシング等の新しい概念を創出する米国等との差を生む要因の一つと考えられている。

このことから、本戦略目標では、現状の問題点（「情報をデータ化すること自体が難しい」「データ自体が少ない、ビッグデータがあっても整理されていない等の場合には対応が困難」等）を踏まえ、データ駆動型アプローチと現象のメカニズムを抽出する数理モデル型アプローチのそれぞれの強みを相補的に生かしながら連携・融合することにより、実社会の情報を活用し尽くすことのできる数理的情報活用基盤の創出を目指す。これにより、様々な科学分野や産業界における情報活用手法のパラダイム変換をもたらすとともに、数学・数理科学による情報科学自体の飛躍的な革新や高度な数学を実社会の情報の活用に応用できる人材の輩出を狙う。

② 達成目標

本戦略目標では、現状の AI やビッグデータ解析等データ駆動型のアプローチだけでは必ずしも十分に活用されていない実社会の情報を活用し尽くすための基盤を創出することを目指す。具体的には、以下の二つの達成を目指す。

- (A) 数学・数理科学と情報科学の連携・融合による、数学の発想を取り入れた革新的な情報活用手法の創出に資する理論及び技術の構築
- (B) 様々な分野や産業界における情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出

③ 具体的な研究例（本目標設定時までの国内外の背景・研究例）

（国内動向）数学・数理科学と情報科学における相互の連携は決して十分なものではなく、生命科学や材料科学等の応用分野の研究者と連携した研究を行う場合でも、情報科学の研究者が応用分野研究者と、数学・数理科学の研究者が同じく応用分野研究者とそれぞれ連携するのが主流であった。しかし、ここ数年、数学研究の世界においても機械学習をはじめと

する情報科学に関心をもつ研究者が増えてきており、情報科学の困難な課題を数学で解こうとする機運が急速に高まりつつある。

例えば、2014 年度から始まったさがけ「数学協働」領域でも機械学習や計算機科学、情報理論などの研究者が出てきている。また、純粋数学者を中心とする日本数学会においても、2018 年 3 月と 9 月の大会で「Society5.0 と数学」と題するワークショップが開催され、立ち見も出るほどの聴衆が集まり、関心の高さをうかがわせている。

(国外動向) 米国ではもともと「数学」の範囲が、いわゆる純粋数学だけでなく、応用数学、統計学、コンピュータサイエンスなどを幅広く含むものと捉えられており、情報科学と数理科学の連携の土壌が醸成されており、そのような環境だからこそ、パラダイムを変えるような革新的な情報活用手法（例えば、ページランク、圧縮センシング等）が生まれてきたと言える。また、国際的な論文動向を見ても、情報科学と数理科学の双方の知見を活かしたデータ活用手法（例えば、データ同化、圧縮センシング、差分プライバシー等）の論文数が、2013 年頃から急速に伸びており、情報科学と数理科学の連携・融合の重要性が国際的にも高まっている。

例えば以下のような目標を目指した研究が考えられる。

- 入力：情報の取扱い
 - ✓ 自然言語情報・感覚などを計算可能なデータに変換（情報のデジタル化）
 - ✓ データの匿名化（プライバシー保護データマイニング）
 - ✓ データの数学的尺度を用いた再構成（データ構造や特徴の抽出、圧縮・縮約、ノイズ除去など）
- 解析：データの解析
 - ✓ 数理モデル型とデータ駆動型の相補的連携による、データの解析・現象の数理モデル化により、少ないデータから有用な情報を抽出（レアイベントの予測・予兆検出など）
 - ✓ データ駆動型との連携による数理モデルの精緻化（より正確な予測が可能に）
 - ✓ 計算機の計算コストの削減（近似計算、疑似乱数活用、計算アルゴリズム最適化等）
- 出力：結果の活用
 - ✓ 解析結果の理由の説明、信頼性の保証、解析結果の社会的利活用と個人情報保護との両立など

④ 科学的裏付け（検討の経緯・背景）

日本数学会で「Society5.0 と数学」と題するワークショップが 2018 年 3 月および 9 月に開催され、情報科学の研究者や企業の研究者などから、情報科学の問題にも「数学の問題」があることの紹介がなされ、今後取り組むべき課題などについて、数学者を交えた議論がなされた。また、産業界のニーズを探るため、文部科学省が JST と協力して 2018 年 6 月から

9月に企業21社（製造業、IT産業、金融・サービス業など）のIT・AI関連部門の技術者など約50名からヒアリング調査を行い、情報・データの活用を巡る企業の課題やその解決を目指す基礎研究への期待などを聴取した。また、2018年11月には、文部科学省主催でアカデミアおよび産業界の有識者を集めたワークショップを開催し、国として取り組むべき課題や若手研究者育成の重要性について議論が行われた。本戦略目標は、このような情報や数学コミュニティの動向等も踏まえ設定するものである。

なお、2018年8月から経済産業省と文部科学省が共同で開催している「理数人材の産業界での活躍に向けた意見交換会」においても、企業のIT・AI部門やIT業界における数学の必要性について議論されている。

当時の「科学技術基本計画」（2016年1月22日閣議決定）において「これらの（超スマート社会サービスプラットフォームの構築に必要となる）基盤技術を支える横断的な科学技術として数理科学が挙げられ、各技術の研究開発との連携強化や人材育成の強化に留意しつつ、その振興を図る。」と記載されている。また、AIをはじめとする情報系研究人材の育成の観点からは「人工知能技術戦略実行計画」（2018年6月26日）において、JSTファンディングによる若手人材の育成が具体的な取組例として更なる充実を期待されている。

⑤ 研究推進の際に見据えるべき将来の社会像

②「達成目標」の実現を通じ、現状のアプローチだけでは必ずしも十分に活用されていない実社会の情報を活用し尽くすための基盤を創出することが期待できる。また、複雑な要素が相互に絡み合う複合的現象のように数理モデル化自体が難しい場合でも、データ駆動型のアプローチとの連携により予測やシミュレーションが可能になることが期待される。これらにより、以下に挙げるような社会の実現に貢献する。

- データ自体が少ないレアイベント（疾患や製造現場の異常、災害等）の予測や予兆検出が可能になることにより、安全・安心が実現する社会
- これまで熟練者の経験知・技能に依存してきた産業界や医療現場等において「経験知」や「コツ」等の抽出・活用が可能になることにより、少子高齢化社会や後継者不足等の問題を克服した持続的成長の実現が可能な社会
- 日本発の革新的な情報活用手法の創出を通じて実現が期待される、世界をリードすることのできる社会

このほか、高度な数学を実社会の情報の活用に応用できる人材が育成され、Society5.0を継続的に支える優秀な人材の輩出が期待される。

(2) 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」（2019年度発足）

次世代の社会では抽象的な概念や論理構造、曖昧な知覚や経験などが、広義の情報として

科学的・社会的・経済的な価値を有するようになると言われている。こうした社会の実現に向けて、数学・数理科学と情報科学が連携・融合し、様々な科学技術分野や産業界における諸課題および膨大なデータなどから、新しい数学的概念や数理構造を抽出し、それを情報化して利活用するアプローチが不可欠となっている。また、プロセスの記述による演繹的アプローチと大量データの利用による帰納的アプローチの双方の数理モデリング手法を高度に発展させ、また相補的に活用する数理的手法の創出を通じて、実社会における情報利活用の高度化・加速も期待されている。

本研究領域では、様々な対象に潜む数理構造や数学的概念を新たな「情報」として抽出し、それを次世代の社会の価値として利活用することで、私たちの認知能力を拡大し、次世代の社会や科学技術・産業の形成につなげるような情報活用基盤の創出を目指す。特に、数学・数理科学、情報科学の各分野の強みを活かしながら、領域として両分野の独立した研究者が連携・相補的に融合することにより、この目標達成を見据えた革新的な数理構造や数学的概念の提唱、その理論の構築、および、その情報化手法の研究・開発を推進する。

なお、本研究領域は文部科学省の人工知能/ビッグデータ/IoT/サイバーセキュリティ統合プロジェクト（AIP プロジェクト）の一環として運営する。

(3) 研究総括

氏名 坂上 貴之 （京都大学 大学院理学研究科 教授）

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

<https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

上記 URL の以下

平成 31 年度新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h31.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 採択時 ²	研究課題	研究 費 ¹
2019 年度	石本 健太	京都大学 教授(2025 年 4 月より) (東京大学 特任助教)	生命ダイナミクスのための 流体数理活用基盤	45
	稲永 俊介	九州大学 教授 (九州大学 准教授)	文字列学的手法によるシー ケンシャルデータ解析	38
	大林 一平	岡山大学 教授 (理化学研究所 研究員)	パーシステントホモロジー による位相高次構造抽出手 法開発	16
	小槻 峻司	千葉大学 教授 (理化学研究所 研究員)	「観測の価値」を最大化す るデータ同化・予測手法の 開発	62
	小林 亮太	東京大学 准教授 (国立情報学研究所 助教)	イベント情報を活用する高 精度時系列モデリング技術 の構築	19
	薄 良彦	京都大学 教授(2025 年 1 月より) (大阪府立大学 准教授)	データ駆動型クーブマン作 用素による非線形力学系の 解析と設計	27
	舘 知宏	東京大学 教授 (東京大学 准教授)	自己組織化による構造折紙 パターンの創生	40
	二反田 篤史	A*STAR Principal Scientist (東京大学 助教)	深層学習の潜在的正則構造 の理解に基づく学習法の安 定化と高速化	40
	早水 桃子	早稲田大学 准教授 (統計数理研究所 助教)	離散幾何学が拓く計算系統 学の新展開	40
	平井 広志	名古屋大学 教授 (東京大学 准教授)	新しい凸性に基づくアルゴ リズムと最適化理論	6
	吉田 悠一	国立情報学研究所 教授 (国立情報学研究所 准教 授)	最適化アルゴリズムの平均 感度解析	15
2020 年度	井元 佑介	京都大学 特定准教授 (京都大学 特定助教)	多重解像度の細胞分化構造 解析システムの確立	45
	川本 裕輔	産業技術総合研究所 主任 研究員	統計解析プログラムのため の形式検証手法	7
	田中 健一郎	東京科学大学 教授 (東京大学 准教授)	最適点配置問題に内在する 近似的凸構造の探求と活用	9

	平原 秀一	国立情報学研究所 准教授 (国立情報学研究所 助教)	メタな視点に基づく計算量理論の新展開	40
	船富 卓哉	奈良先端科学技術大学院大学 准教授	乗法群スパースモデリングによる幾何変換場のモデル化	39
	前原 一満	九州大学 助教	生命現象の定性的理解を支援するデータ解析技術の創出	56
	町田 学	近畿大学 准教授 (浜松医科大学 指定講師)	逆問題の級数的手法による近赤外イメージング	45
	森岡 博史	理化学研究所 研究員 (理化学研究所 特別研究員)	非線形表現学習による大規模ネットワーク動的機能構造の解明	40
	山田 俊皓	一橋大学 教授 (一橋大学 准教授)	マリアバン解析と深層学習による高次元偏微分方程式の新しい計算技術	35
2021 年度	小串 典子	明治学院大学 准教授 (大阪大学 特任助教)	協同的デジタル知識空間の評価指標の確立	27
	河瀬 康志	東京大学 特任准教授	マルチエージェント環境におけるモデリングとアルゴリズム	15
	三内 顕義	京都大学 特定准教授 (理化学研究所 研究員)	対称性を用いた深層学習とそれに繋がる不変式論の研究	9
	柴山 允瑠	京都大学 准教授	変分的および幾何学的手法による人工衛星と惑星探査機の軌道設計	9
	園田 翔	理化学研究所 上級研究員 (理化学研究所 特別研究員)	複雑データに内在する深層構造の理論と応用	40
	谷川 眞一	東京大学 准教授	組合せ計算幾何学の新展開	15
	細江 陽平	京都大学 准教授 (京都大学 講師)	確率統計情報を活用する数理モデルベース適応学習制御	40
	間島 慶	量子科学技術研究開発機構 研究員	量子インスパイア機械学習で切り拓く超高次元脳・行動データ解析	23
	宮武 勇登	大阪大学 准教授	発展方程式の数値計算に対する不確実性定量化理論の創出	23

	本武 陽一	一橋大学 准教授 (統計数理研究所 特任助教)	解釈可能 AI によるパターンダイナミクスの数理構造抽出と材料情報学への応用	43
	横井 優	東京科学大学 准教授 (国立情報学研究所 助教)	選好下のマッチングが生みだす構造の解明と活用	13
			総研究費	921

¹各研究課題とも研究期間の総額、進行中の課題は予定を含む（2024 年 12 月 01 日現在）

²変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

2. 研究総括のねらい

(1) 戦略目標に対する研究領域の位置づけとねらい

① 研究領域の位置づけ

「1. 研究領域の概要」では、現状の AI やビッグデータ解析等データ駆動型のアプローチだけでは必ずしも十分に活用されていない実社会の情報を活用し尽くすための基盤を創出することを目指して以下の二つの領域目標が掲げられている。

戦略目標 (A)： 数学・数理科学と情報科学の連携・融合による、数学の発想を取り入れた革新的な情報活用手法の創出に資する理論及び技術の構築

戦略目標 (B)： 様々な分野や産業界における情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出

これらの目標設定を受けて、本研究領域を「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」（略称：「数理構造活用」領域）と名付け、「数学・数理科学と情報科学の個人研究者が、それぞれの分野の強みを活かした研究を推進し、領域内で連携・融合することで、未来の社会の価値創出に資する多様な対象に潜む数理構造の抽出や数学概念の提案、その理論、それらを情報として利活用する情報活用基盤の構築をめざすもの」と位置づけた。

② 研究領域のねらい

科学技術・産業の形成に資する数理基盤として、プロセス駆動型の記述である数理モデリングと大量のデータを用いたデータ駆動型モデリングは非常に有効な数理的手法だが、現代の社会的課題を構成する生命・医療・環境などのような複合分野の課題を解決する上で、現象が複雑すぎて数理モデル化の難しい場合や、観測データ数やその品質が不十分でデータ駆動モデルが難しい場合などがあり、それらの利活用は容易ではない。一方、産業界においては、各企業が抱える様々な課題を解決するため、経験的かつ潜在的に蓄積された知見をどうデータ化するか、またそもそもデータが少ない場合への対応、個人情報を含むデータの活用、解析の高速化やその結果の信頼性評価などが求められている。こうした状況において、多様な分野にある数理構造や数学的概念を、これまでと質の異なる新しい情報として抽出する数学・数理科学の力、それらを有効利用するための情報科学の力が期待されている。

そこで、本研究領域では、数学・数理科学と情報科学の個人研究者が、それぞれの分野の強みを活かした研究を推進し、領域内でそれぞれが強く連携・融合することで、未来の社会の価値創出に資する多様な対象に潜む数理構造の抽出や数学概念の提案、その理論、それら

を情報として利活用する情報活用基盤の構築をねらいとした。

(2) 研究領域で実現をねらったこと、研究成果として目指したこと

本研究領域では、数理・数理科学と情報科学のそれぞれの分野で卓越した能力を持つ研究者が、さきがけ研究者として本研究領域に集結して切磋琢磨し、お互いの連携や共同研究などを積極的に促すことで、「革新的な情報活用手法の創出に資する理論及び技術の構築（戦略目標(A)）」と「情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出（戦略目標(B)）」を実現することをねらった。

また、本研究領域では上記の戦略目標(A)(B)に沿って、以下のような観点から高く評価される優れた研究成果の創出を目指した。

- 1) 未来の社会の価値へとつながる、様々な対象にある数理構造（代数構造、幾何構造、高次元構造、論理構造など）を提案する萌芽的、挑戦的な数学・数理科学研究。
- 2) 先進的なプロセス駆動型の数理モデル（微分方程式、離散モデル、確率モデルなど）やデータ駆動型数理モデルの提案。また、それらの融合により、高い信頼性や効率化を実現するデータサイエンス研究（レアイベント予測や予兆検出、不確実性定量化など）。
- 3) 数理構造や数学的概念を新しい情報として活用するための情報科学研究（新しいデータ構造やアルゴリズムなど）。
- 4) データの利用を画期的に促進させる計算高速化や高精度化を達成する研究（近似計算、確率シミュレーション、高速アルゴリズム、最適化など）。
- 5) 情報の高度な利活用に資する数学・数理科学・情報科学研究（セキュリティ、個人情報保護、匿名化、情報の非対称性・偏在の緩和など）。

このうち、1)、2)および3)は戦略目標(A)における「革新的な情報活用手法の創出に資する理論や技術の構築」に、4)および5)は戦略目標(B)における「情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出」につなげるための重要な観点である。

(3) 科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと

本研究領域では、数学・数理科学や情報科学分野における卓越した能力を持つ研究者を結集させて、その高いレベルでの研究の相互作用を通じて、人類の現代社会が抱える課題や産業分野における様々な課題の解決の上で、いまだ十分に活用されていない様々なデータや経験知に対して、数学・数理科学技術によってその構造を明らかにし、その情報科学的な手法によるデータ構造化、アルゴリズムの開発処理の高速化などを通してソフトウェアとして実現することを目指している。

すなわち、数学・数理科学といった抽象的で高度な「目に見えない」構造を情報科学が結

びつくことで、「目に見える」我々の実社会の課題解決へと還元する流れを領域全体で促す。このことは、第5次科学技術基本計画が科学技術イノベーションとして掲げている“科学的な発見や発明等による新たな知識を基にした知的・文化的価値の創造”と“それらの知識を発展させて経済的、社会的・公共的価値の創造に結び付ける革新”に領域全体として貢献するものである。

3. 研究課題の選考について

(1) 選考方針

本戦略目標は数学・数理科学と情報科学の研究の連携・融合を通して、革新的な情報活用手法の創出や情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出を目指すものである。これを踏まえて、本研究領域の研究者の選考においては、最初から両分野に通じた研究者だけではなく、数学・数理科学・情報科学のいずれかの分野で卓越した提案を行う個人研究者を結集させ、領域内部でこれら研究者が互いに連携・協働・融合を積極的に促進、その相互作用により領域全体として高いレベルの情報活用基盤を構築することも目指した。一方で、本研究領域が目指す両分野の融合実現を念頭においたとき、数学・数理科学および情報科学の両分野ともすでに我が国における主要な研究分野として大きな学術基盤を有しており、両分野の卓越した能力を持つ若手研究者を集めて融合領域を形成することは容易ではないことが予想された。

そこで、選考においては、戦略目標を踏まえた「数学・数理科学」「情報科学」の二軸で「理論」「応用」を基準として採用し、領域全体として、研究分野のポートフォリオを意識した多様な研究を採用することをこころがけた。また、個々の研究提案の選考においては、本研究領域目標を目指すことの趣旨を十分に理解した上で、その達成に資するものであれば、数学・数理科学者はより数学らしく、情報科学者はより情報らしい卓越した研究を採用することとした。本研究領域の活動を通じて両分野の研究者の連携・融合を強く進めることとした。そのため、募集にあたっては、以下の観点を明確にし、その構想、ビジョンおよび意欲なども考慮した優れた研究提案を選考することとした。

数学・数理科学の研究者に向けて：情報科学との連携が明確でなくても、自身の数学研究が領域内の情報科学研究者と繋がることで、どのような価値を創出・活用できるか？

情報科学分野の研究者に向けて：現時点で数学との連携が明確でなくても、自身の情報科学研究が領域内の数学研究者と繋がることで、どのようなブレークスルーが起こるか？

また、さきがけ研究がボトムアップ型の科学研究費の提案とは異なり戦略目標に応じて研究を構想するものであるという観点も重視し、研究提案では、研究で「できること」だけでなく研究で「やりたいこと」が明確かつ卓越している提案を重視した。

また、研究成果をソフトウェアとして開発することや、開発した理論やソフトウェアを通じて周辺諸分野の研究者との共同研究などを通じて広く成果が展開される可能性があるものも高く評価した。

最後に、同様の戦略目標の下に立てられた、他研究領域や既存の関連領域との連携を取り、

それぞれの領域の特性を活かした相乗効果や国内外の研究者のマッチングを推進することとした。加えて、以下のような成果の幅広いアウトリーチ活動への意欲なども評価した。

- ・ 本研究領域、他関連研究領域とのワークショップなどを共同して行い、多様な分野の研究者で密に情報共有。
- ・ 研究成果の発信、特に一般向けへの発信（例えば、プレス発表、自分の所属学会以外の分野の学会での発表など）を推奨。
- ・ 世界における同様の研究グループの一翼を担えるよう、領域全体として国際的な研究コミュニティに成果を積極的に発信、国際連携を推進。
- ・ 「数学キャラバン」などの一般向けの数学啓蒙活動を積極的に推進。

(2) 選考方法

書類選考および面接選考により選考を行った。書類選考の査読では以下の観点で評価を行った。

- a. 戦略目標の達成に貢献するものであり、研究領域の趣旨に合致しているか
- b. 独創性・挑戦的国際的に高水準の発展が見込まれる基礎研究であるか
- c. 科学技術イノベーションの源泉となる先駆的な成果が期待できるか
- d. 研究提案者は、研究提案の内容、研究姿勢や他の研究者との議論・相互触発の取り組みを通じて、当該さがけ研究領域全体の発展ならびに関係研究分野の継続的な発展への貢献が期待できる存在であるか
- e. 研究提案の独創性は、研究提案者本人の着想によるものであるか
- f. 研究構想の実現に必要な手がかりが得られているか
- g. 個人型研究として適切な実施規模であるか
- h. 総合評価（優れている点・改善は必要な点）

観点 a. ～g. は S、A、B、F、N の 5 段階評、h. では自由記述形式にて行い、様々な視点から提案内容の検討をおこなった。書類審査の実施にあたっては、10 名の領域アドバイザーと 2 名の外部評価者（2019 年は 2 名、2020 年は 1 名、2021 年は 0 名）の協力を得て、査読に関してはその年に対応可能なアドバイザーの数と提案数を鑑み、応募研究課題に対して少しでも査読者数が増えるように考慮して以下のように決定した。

- ・ 2019 年度 課題 1 件にアドバイザー 3 人
- ・ 2020 年度 課題 1 件にアドバイザー 4 人
- ・ 2021 年度 課題 1 件にアドバイザー 4 人

書類選考結果や各評価者のコメントを受けて、面接選考候補者を決定した。面接候補者の決定においては、書類審査を担当するアドバイザーが3～4名と少ないこともあり、そのバイアスをなくすため、書類審査評価が高い提案はもちろん、評価が分かれたものについても高い評価がある提案については面接候補者にするかどうかを、アドバイザーらからの助言などを得て慎重に審議を行った。

面接選考では、各提案の書類選考を通してアドバイザーらから提起された研究提案内容に関する様々な観点を事前に整理して質問をするなどの工夫を行った。また、共通してアウトリーチや情報科学と数学・数理科学の研究者の領域内連携への意欲なども尋ねて、領域全体での戦略目標達成への貢献度などについても検討を行った。一年目の2019年度の面接選考は対面による選考、二年目の2020年度と三年目の2021年度は新型コロナウイルスのパンデミックにともなう行動制限の結果としてオンラインによる面接選考を行った。こうしたデジタル技術を使った選考については、本研究領域が情報科学や数学・数理科学に関係するものであったこともあり、大きな問題もなく実質的な選考が行われた。

(3) 選考結果

2019年度から3年間募集を行い、応募総数160件に対して面接対象57件、最終的に採択は32件となった。女性研究者は3名である。年度別の詳細は以下の表1の通りである。

表1 応募・採択状況一覧

募集年度	応募・採択研究課題数（件）			
	応募数	面接数	採択数	
				女性
2019年度	80	22	11	1
2020年度	47	17	9	0
2021年度	33	18	12※	2
合計	160	57	32※	3

※採択後に1件辞退

研究領域発足第1年目2019年度の募集では80件の応募があった。選考にあたっては応募課題の利害関係者の関与を避け、10名の領域アドバイザーおよび2名の外部評価者の協力を得て書類選考を進め、22件の面接選考を経て、最終的に11件の研究提案を採択した。なお、採択された11件の課題は、生命ダイナミクス、折り紙、系統学といった分野に新しい数理構造を見いだす研究、パーシステントホモロジー、クープマン作用素、イベント情報時系列モデリングといった新しい数理構造の抽出技術、文字列解析、最適化アルゴリズム、データ同化などの数理・情報解析、深層学習や凸最適化に関する数学理論の研究など、近年注目の高い機械学習やAIなどの応用に偏ることもなく、幅広い分野の数理科学・情報科学

の研究者による多様な応用を見据えたバランスのとれた魅力的なものとなった。

第2年目の2020年度では、新型コロナウイルスのパンデミックの影響で領域募集説明会などがオンラインとなった。また、本パンデミックによる社会活動制限のため募集時期に多くの研究者が研究以外の面で様々な制約を受けたこともあり、応募者は47件にとどまった。本応募に対して10名の領域アドバイザーおよび1名の外部評価者の協力を得て書類選考を進め、17件の面接選考を経て、最終的に9件の研究提案を採択した。本年度は、数学分野からの応募者数の比率が前年度より高くなった。また、応募総数は少なかつたにもかかわらず、面接選考に進んだ課題はいずれも優れた提案であり、最終選考審査も大変厳しいものとなり、採択者の提案のレベルは極めて高いものであった。なお、採択課題は生命科学分野に対するトポロジー、ホッジ理論、乗法群スパースモデリングという多方面からの新しい数理構造抽出の課題、近赤外イメージングの逆解析、統計解析プログラムの形式検証といった高度かつ実用上も応用が見込まれる課題、最適点配置やマリアバン解析と深層学習を組み合わせた新しい数理構造解析の理論の課題、さらにはメタ計算理論や非線形表現学習の新理論など情報科学分野の革新的理論の課題など、数学・数理科学や情報科学の卓越した研究が相互作用して、本研究領域が求める目的達成に強く貢献しうる提案が多数採択された。

第3年目の2021年度募集では、新型コロナウイルスパンデミックによる行動制限の影響が継続し、ほとんどのイベントがオンラインで開催せざるを得なくなる中、採択者による動画の公開などを通して広く周知を図ったが、総数で33件の少ない応募数となった。これらの提案に対して10名の領域アドバイザーの協力を得て書類選考を進め、18件の面接選考を経て、最終的に12件（後日1件は辞退）の研究提案を採択した。応募者数はこれまでより少ないものであったが、面接選考に進んだ課題は、それぞれに個性が光る優れた提案であり、採択された研究提案はいずれもレベルも極めて高い「エッジの利いた」ものとなった。本研究領域最後の募集ということもあり、領域内連携で生まれる相乗効果やポートフォリオ、挑戦性や個性など多様な観点を考慮して選考した。その結果、想定よりも多めの採択者を出すことができた。なお、採択課題は、深層学習に対して対称性や作用素論的な数学的な研究を行う課題、衛星軌道設計や自動運転などに貢献する力学経路理論や確率最適制御の理論とソフトウェア実装、選好性や公平性を考慮したマッチング問題の数学理論、Wikipediaなどの協同デジタル空間の数理構造解析手法の課題、剛性構造といった組み合わせ幾何学の数学理論の研究などが採択された。

(4) 選考概況

上記三年間の選考を通じて、本研究領域が目指す戦略目標を領域全体として達成できる体制が十分に整ったと考えている。上記の「3. (3) 選考結果」で各年度での採択研究課題を整理し、「数理科学」と「情報科学」の軸で「基礎」から「応用」の分野を配置したポートフォリオとして以下の図1のようにまとめた。

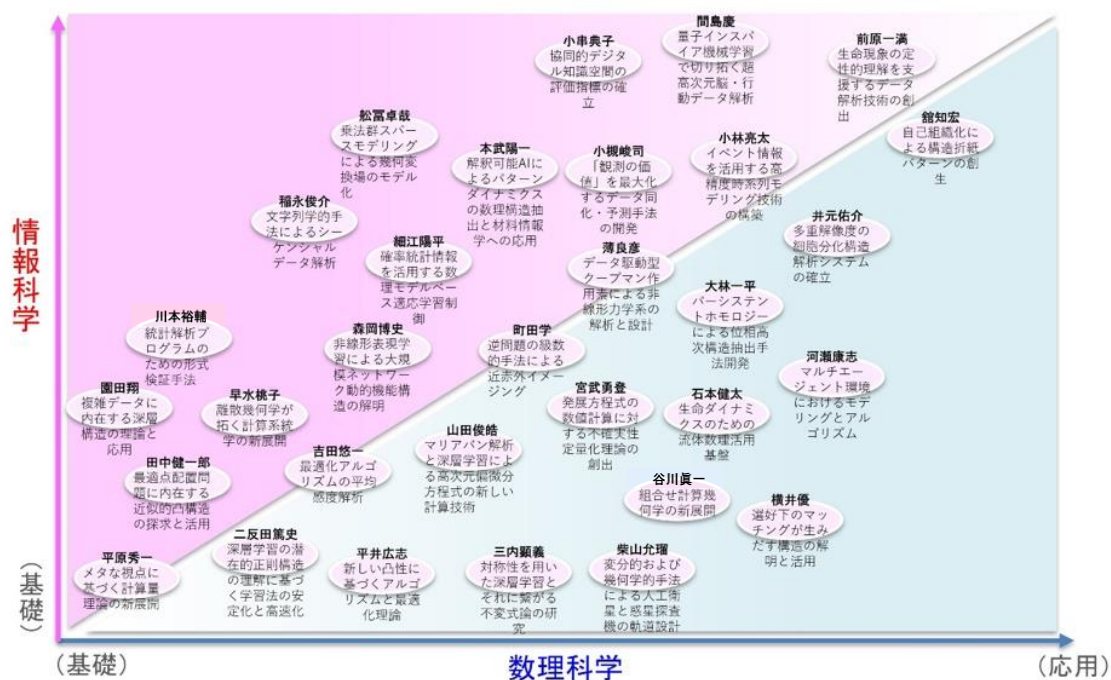


図1 本研究領域さきがけ研究者の研究分野ポートフォリオ

また、本研究領域により達成が求められている戦略目標の二つの観点からは、以下のよう
にまとめられる。

戦略目標(A)「数学・数理科学と情報科学の連携・融合による、数学の発想を取り入れた革新的な情報活用手法の創出に資する理論及び技術の構築」については、例えばメタ計算量理論、深層学習そのものに対する数理科学研究、深層学習を用いた微分方程式の解法の研究、凸性や剛性といった数理的観点、最適点配置、アルゴリズムの平均感度解析、非線形表現学習理論、不確実性定量化など数学・数理科学と情報科学の間にまたがる分野で卓越した数学的な発想が多く取り込まれる研究提案を選考できた。

戦略目標(B)「様々な分野や産業界における情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出」については、マッチング理論を用いた配分、統計解析アルゴリズムの形式検証プログラム、生命科学や脳科学データに対する多様で高度な数理解析手法の開発、近赤外イメージングの逆解析、協同デジタル空間やイベント情報といった近年のデジタル空間の活用を高度化する研究などが含まれ、応用の範囲も非常に広がりを持つ研究提案を選考できた。

以上により、本研究領域の選考を通じて、数理科学系、情報科学系、それぞれに基礎から応用にまで幅広い分野の課題を採択することができ、本目標の達成に資することができる体制が整った。

4. 領域アドバイザーについて

本研究領域は、戦略目標にあるように数学・数理科学と情報科学の連携融合を目標としていることから、領域アドバイザーの人選においては、卓越した研究業績を持つ、数理系の専門家と情報科学の専門家をバランス良く委嘱した。多様性の確保の別観点として、アドバイザーの男女人数（10 名中 3 名）も考慮した。さらに、アカデミアの専門家のみにならないよう、産業界の専門家にも参画を依頼した。また領域運営アドバイザーとして、大学の教授職を兼務している企業経営者にも参画依頼した。

このような方針に従って就任いただいた本研究領域における領域アドバイザー10 名および領域運営アドバイザー1 名は以下の通りである。

表2 領域アドバイザーと領域運営アドバイザー

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 ¹	役職	任期
荒井 迅 (力学系)	中部大学	教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
	(東京科学大学)		
岩田 覚 (数理情報学、 離散計算幾何)	東京大学	教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
落合 啓之 (表現論)	九州大学	教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
楠岡 成雄 (確率論)	東京大学	名誉教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
小磯 深幸 (微分幾何)	九州大学	教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
		(名誉教授)	
佐古 和恵 (情報セキュ リティ)	NEC	技術主幹	2019 年 4 月～2025 年 3 月
	(早稲田大学)	(教授)	
徳山 豪 (理論計算機科 学、計算幾何学、アルゴ リズム)	東北大学	教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
	(関西学院大学)		
平田 (河野) 典子 (数論)	日本大学	教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
		特任教授	
福水 健次 (統計科学)	統計数理研究所	教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月
三好 建正 (データ同 化、UQ)	理化学研究所	チームリーダー	2019 年 4 月～2025 年 3 月
【領域運営アドバイザ ー】大田 佳宏 (数理ソフト開発)	Arithmer/東京 大学	代表取締役社長/ 特任教授	2019 年 4 月～2025 年 3 月

¹ 変更/移動のあった場合、下段に括弧つき記載

本研究領域が掲げる、数学・数理科学と情報科学との融合・連携研究の推進に資する優れた研究提案を適切に選考するためには、両学術分野からの幅広い研究提案が見込まれた。そのため、広く数学・数理科学分野の提案研究内容に関して、代数学（落合啓之氏、平田典子氏）、幾何学（小磯深幸氏）、解析学（楠岡成雄氏）、離散数学（岩田覚氏）、統計学（福水健次氏）に有用なアドバイスをいただいた。

荒井迅氏は、計算機を用いた力学系理論・幾何学の研究に卓越した成果を持つ。徳山豪氏は、その数学・数理科学と情報科学をまたがる広範な分野の見識を有しており、三好建正氏は不確実性定量化・データ同化の研究で我が国をリードする研究者であり、数学・数理科学と情報科学の融合・連携という観点で有用なアドバイスをいただいた。

成果の産業応用の観点からは、企業所属のアドバイザーであり、また暗号理論とその実装研究を行っておられた佐古和恵氏（就任当時 NEC）からアドバイスをいただくことができた。さらに、数学・数理科学を活かした数理ソフト開発の会社を経営されている大田佳宏氏を領域運営アドバイザーとして、本研究領域の成果や運営に関してコメントが多数いただけた。

これに加えて、楠岡成雄氏は先行する数学関連領域である、さきがけ「数学協働」領域（國府寛司研究総括）の領域アドバイザーであり、荒井迅氏と小磯深幸氏は、さきがけ「数学」領域（西浦廉政研究総括）のさきがけ研究者としての経験を持つことから、先行研究領域での様々な試みや議論が伝えられるなど、貴重な助言をいただくことができた。

以上のように、本研究領域の領域アドバイザーおよび領域運営アドバイザーは多様な観点を考慮して委嘱しており、その効果は選考時にも領域活動全体において大いに発揮され、多くの建設的なアドバイスをいただくことができた。

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 領域運営の基本的な考え方

本研究領域では、数学・数理科学者と情報科学のさきがけ研究者の連携・融合研究を通して、数学・数理科学といった抽象的で高度な「目に見えない」数学的な構造を情報科学が結びつくことで、「目に見える」我々の実社会の課題解決へと還元して活用する流れを領域全体で促すことを目指すものである。それに鑑み、本研究領域の運営にあたっては、次の点を基本的な考え方に据えた。

- さきがけ研究の進捗状況を定期的に確認し、戦略目標の観点から適切な専門的な助言や指導が行えるように体制をとること。
- さきがけ研究者の領域内外での連携/融合を促すための活動や支援を積極的に行うこと。
- 本研究領域と他領域、国内外の研究機関、異分野融合・連携・協力を後押しすること。
- 本研究成果の発信のためのアウトリーチや啓蒙活動・教育活動に積極的に取り組むこと。

これらの運営の本方針を踏まえて、本研究領域では次のような活動を実施した。

- **研究課題の進捗状況の把握と評価、研究課題の指導のための活動**
 - ◇ 領域会議の実施
 - ◇ サイトビジットの実施
 - ◇ 担当アドバイザーミーティングの導入
 - ◇ 更新型成果概要シートの作成
 - ◇ 課題の事後評価と成果報告会の開催
- **研究課題間や他の研究領域、国内外の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進**
 - ◇ さきがけ数理構造勉強会の開催
 - ◇ 研究テーマ別グルーピングの実施
 - ◇ 未解決問題ワークショップの開催
 - ◇ 若手数学者交流会 (Session “Young Mathematicians’ Challenge”) の実施
 - ◇ JST 三領域連携ワークショップの実施
 - ◇ JST 複雑流動領域との共同セミナーの実施
 - ◇ シンガポール A*STAR との国際セミナー開催
- **社会との連携、アウトリーチ活動**
 - ◇ 数学キャラバンの実施
 - ◇ 日本評論社「数学セミナー」連載企画

- ◇ 学術向け教科書の発刊や総説記事の出版
- ◇ その他の領域活動の発信

上記活動について、以下にそれぞれの内容を記録とともに説明する。

(2) 研究課題の進捗状況の把握と評価、研究課題の指導のための活動

1) 領域会議

領域会議は、研究総括、さきがけ研究者および領域アドバイザーが一堂に会し、研究者が研究課題進捗状況を報告し、研究内容について討議する合宿形式の非公開の会議である。領域会議を通じて、本研究領域のさきがけ研究者の研究課題の学術的な詳細を参加者が知るとともに、その中での緊密な議論を通して、共同研究の創成や研究者間連携を生み出すことを目指した。

【領域会議の開催概況】本研究領域では、合計で 11 回の領域会議を開催した。通例に倣い領域会議は年に 2 回、合宿形式を基本とした会合を想定していたが、本研究領域においては、新型コロナウイルスパンデミックの影響により社会的行動制限があった第 2 回～第 5 回においては、対面開催は断念せざるを得ず、Zoom を利用したオンライン会合を主とした運営を行った。当初はオンライン会議ツールの選定やオンライン会議による領域会議の進め方には試行錯誤な面があったが、本研究領域が数学・数理科学および情報科学の専門家が集まる領域ということもあり、Spatialchat や Virbela など最先端のコミュニケーションツールを導入することに成功し、対面でのライブ感ある議論の展開にまでには完全に至らないながら、議論しやすい環境を用意して会合を進めることができた。本研究領域における領域会議の開催の概況は以下の通りである。

表 3 領域会議の開催記録

		会場	連携強化策	
第 1 回	2020 年 2 月	クロスウェーブ梅田		1 泊 2 日
第 2 回	2020 年 10 月	Zoom	ブレイクアウトルームによる連携強化	3 日間
第 3 回	2021 年 2 月	Zoom	Spatialchat の利用による討議の促進	3 日間
第 4 回	2021 年 9 月	Zoom	Virbela の利用による討議促進 (ホスターセッションに利用)	3 日間
第 5 回	2022 年 2 月	Zoom	Virbela の利用による討議の促進	3 日間

第 6 回	2022 年 9 月	ホテルグランテラス帯広	ハイブリッド開催	2 泊 3 日
第 7 回	2023 年 2 月	リーセントカルチャーホテル岡山	ハイブリッド開催	1 泊 2 日
第 8 回	2023 年 9 月	ベネシアンホテル白石蔵王	ハイブリッド開催	2 泊 3 日
第 9 回	2024 年 2 月	坂出グランドホテル	ハイブリッド開催	1 泊 2 日
第 10 回	2024 年 9 月	ハートンホテル京都	ハイブリッド開催	1 泊 2 日
第 11 回	2025 年 3 月	JST 東京別館		1 日



図 2 領域会議の様様 (2023 年 9 月、2024 年 2 月)

【領域会議の進め方】領域会議では、対面形式でもオンライン形式であっても、研究者が研究の進捗状況をプレゼンテーションする口頭発表を中心に行われた。研究総括、領域アドバイザー、さきがけ研究者が各研究課題の進捗状況について確認し、適切な助言や指導が行われる機会とした。さらに、さきがけ研究者の領域内連携が進むよう、オンライン開催時には「グループディスカッション」の時間を設けた。実施に際しては Zoom のブレイクアウトルーム機能や SpatialChat、Virbela などのオンライン会議ツールを用いて、バーチャル空間であっても対話が活発になるよう心がけた。また、対面開催時はポスターセッションを複数回実施する十分な時間を確保して、さきがけ研究者の相互議論が進むような環境を用意した。このことは、本研究領域が戦略目標として掲げる数学・数理科学と情報科学の連携・融合を促進する上で十分な効果があったと考えている。

【ペア発表の実施】上記のように、さきがけ領域会議は各研究開発課題の進捗状況を確認し指導、助言を行うのが主目的ではあるが、各さきがけ研究者にとって 3 回目の領域会議（1 期生は第 3 回領域会議、2 期生は第 5 回領域会議、3 期生は第 7 回領域会議）は、ちょうど研究開発の中間期にあり安定的かつ集中的に研究が進んでいることが見込まれた。そのため、この機会を、自らの研究進捗だけでなく他さきがけ研究者の研究内容への関心を高め、相互の研究連携を同期づけるきっかけ作りには適切なタイミングであると考え、同期採択のさきがけ研究者らを三つから四つ程度のグループに分けて「ペア発表」を行う形式にした。グループ分けにおいては、研究総括が直接指示する形ではなく、さきがけ研究者らがお互いにディスカッションして自発的にグループ分けを行い、ペア発表内容もグループ内で自由に設定する形とした。この結果、研究手法別、研究手法の適用分野別など様々な観点のグループが設定され、その後の数学・数理科学および情報科学のさきがけ研究者内の領域連携が強固かつ自然に進むきっかけとなり、その効果は非常に高いものであった。

【研究進捗確認の実施】本研究領域では、研究期間が残り一年となる各さきがけ研究者にとって 5 回目の領域会議（1 期生は第 5 回領域会議、2 期生は第 7 回領域会議、3 期生は第 9 回領域会議）の機会を利用して、丁寧な研究進捗確認を行い、全領域アドバイザーから各さきがけ研究者に対する「数理構造活用研究進捗確認票」を作成、それを手渡すことで、現在の研究状況に対する評価、および今後 1 年の研究の方向性などについて指導、助言を行った。研究者の自由な発想をそこなわないよう中間評価とせず、進捗確認という形で適切な指導ができたと考えている。

【研究成果発表会検討会の実施】本研究領域では、研究期間が残り半年となる各さきがけ研究者にとって 6 回目の領域会議（1 期生は第 6 回目領域会議、2 期生は第 8 回目領域会議、3 期生は 10 回目領域会議）において、最終年度末に行われる成果報告会についての

プログラム検討会の実施をさきがけ研究者らに依頼した。プログラムなどは、さきがけ研究者らが自主的に企画/立案し、それを研究総括が承認して進める形とした。成果報告会にはパネルディスカッションが含まれているが、毎回さきがけ研究者の自由な発想に基づくテーマでの議論が展開された。

2) サイトビジット

サイトビジットは、研究総括が研究者の研究現場を訪問し、研究環境の確認や研究者と研究総括がフェースツーフェースで意見交換が出来る貴重な機会であり、研究者の所属機関の上長にさきがけ事業の紹介、研究領域の目標などを説明して、さきがけ研究推進や、さきがけ研究領域活動へのご理解とご協力の依頼・承諾を頂く場でもある。

本研究領域においては、1期生、2期生については、コロナ禍であったことから、研究現場への訪問はできずに、Zoomを用いたリモートでの意見交換となった。そのような中でも各研究者とその所属機関の上長に対して、本研究領域の意義について、しっかり時間をかけて実施し、直面している課題の共有と解決に向けた方策について議論する機会とすることができた。

3期生については、コロナ禍が終了し、リアルで各研究室を訪問することができるようになり、より実質的に議論を深めることができた。

本研究領域では、研究実施環境に困難を抱えるさきがけ採択者は少なかった。さきがけ研究者の認知度が上がっていることもあり、各研究機関とも協力的であったことも研究総括としては大変ありがたかった。また、新型コロナウイルスパンデミックの影響で多くの所属機関の研究者が在宅勤務となる中で研究環境をどう維持していくかという点で議論が行われることが多く、領域会議ではなかなか相談しにくいことについて意見交換ができたことは有意義であった。

3) 担当アドバイザーミーティング

本研究領域においては、先行した数理関係の領域「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」の成功例にならい「担当アドバイザー制」に準じる担当アドバイザーミーティングを実施した。これは、さきがけが研究総括および領域アドバイザーが、メンターとして若手研究者を指導していくという趣旨に鑑み、各専門分野のエキスパートである領域アドバイザーの能力を活かして、よりきめ細かい研究指導が行えるようにするものである。それだけでなく、研究者の先輩としての研究マネジメントや日頃の研究・教育業務などに関する様々な相談ができるようにした。

担当アドバイザーの決定にあたっては、各さきがけ研究者の研究開発課題の内容や専門性、さきがけ研究者の希望などを総合的に考慮して適切なマッチングを行った。各さきがけ研究者の担当アドバイザーは以下の通りである。

表 4 担当アドバイザーの一覧

領域アドバイザー	1 期生	2 期生	3 期生
荒井 迅	薄 良彦	井元 佑介	柴山 允瑠
岩田 覚	舘 知宏	前原 一満	小串 典子
落合 啓之	早水 桃子 平井 広志	船富 卓哉	
楠岡 成雄	小林 亮太	山田 俊皓	宮武 勇登
小磯 深幸	石本 健太	田中 健一郎	本武 陽一
佐古 和恵	二反田 篤史	平原 秀一	間島 慶
徳山 豪	大林 一平	森岡 博史	横井 優 河瀬 康志
平田（河野） 典子	稲永 俊介		三内 顕義 谷川 眞一
福水 健次	小槻 峻司	川本 裕輔	園田 翔
三好 建正	吉田 悠一	町田 学	細江 陽平

実施方法は、さきがけ研究者とその担当アドバイザーが 1 対 1 で、研究の進捗状況について年 2 回のミーティングを行い、領域会議と併せて年 4 回の適切な助言・指導の場を持てるように設定し、切れ目のない研究指導が行えるようにした。担当アドバイザーと研究者の組み合わせを決めて、2020 年 5 月から第 1 回目を実施、その後も毎年 2 回ずつ継続的に実施した。

先行した担当アドバイザー制に関する評価を鑑み、実施にあたっては研究者の負担を少しでも減らすよう、説明資料はミーティング向けには新たに作らない、実施結果報告はひな形に乘っ取り簡単なものとするなど、配慮しつつ実施した。

4) 更新型成果概要シートの作成

半年に一度の領域会議のタイミングにあわせて、さきがけ研究者には自らの研究の概要・進捗状況・結果などを一枚にパワーポイントファイルにまとめて提出するように求めた。このことは、領域会議の趣旨を鑑みれば自然であるが、本研究領域では、このファイルを単なる内向きの都度の期間限定された成果報告とするのではなく、他の専門の異なるさきがけ研究者にもわかりやすい一覧性のある魅力的なものとするよう、全体を俯瞰するような更新型として作成を依頼した。

このファイルの更新にあたっては上記担当アドバイザーの協力を得て、担当アドバイザーミーティング実施の機会にこのファイルについても毎回確認をしていただいた。さらに、各さきがけ研究者が参加する最後の領域会議時には全研究成果を一般の人にわかりやすく伝える資料となるよう、最終版のとりまとめ方向を研究総括が個別指導した。こ

のファイルの作成を通じて、専門家にしか伝わらないような成果概要ではなく、自らのさきがけ研究の成果を広く社会に発信できる「研究者の名刺」として活用できるように、指導、助言を行った。こうした社会への発信を意識した継続的な資料作りを通して、さきがけ研究者が自らの行う研究を客観視し、その学術的・社会的意義などを深く考えるきっかけとして役だったと考えている。

5) 課題の事後評価と成果報告会の開催

研究期間終了時の課題事後評価は、担当アドバイザーを研究総括が指定して、その評価や助言を取り入れて、研究総括が行った。また、数学・数理科学および情報科学の連携・融合による革新的数理構造の理論的な研究と、その幅広い活用を目指した研究開発の成果を一般に公開する形での成果報告会をハイブリッド形式で開催した。

1 期生の成果報告会は、2023 年 1 月 29 日に「つながる数学」というタイトルで、JST 東京本部別館（K's 五番町）で開催した。1 期生 11 名によるさきがけ研究課題の成果報告講演に加えて、さきがけ研究者らによるパネルディスカッション「未来につながる数学」が開催された。

2 期生の成果報告会は、2024 年 3 月 10 日に「拡がる数学」というタイトルで、AP 市ヶ谷で開催した。2 期生 9 名によるさきがけ研究課題の成果報告講演に加えて、さきがけ研究者によるパネルディスカッション「トークライブ」が開催された。

3 期生の成果報告会は、2025 年 2 月 20 日に AP 市ヶ谷において開催する予定であり、3 期生 11 名による研究成果報告講演に加えてパネルディスカッションを計画している。

1 期生成果報告会 HP:

<https://www.jst.go.jp/kisoken/aip/result/event/math-structure-fl/index.html>

2 期生成果報告会 HP:

<https://www.jst.go.jp/kisoken/aip/result/event/math-structure-f2/index.html>

(3) 研究課題間や他の研究領域、国内外の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進

① 領域内の連携活動

1) さきがけ数理構造勉強会

新型コロナウイルスパンデミック（2020 年～2022 年）の影響で対面での活動が強く制限された中で、領域会議もすべてオンライン開催となり領域内連携が生まれる環境が十分に作れないという状況にあった。この状況への対応として、本研究領域のさきがけ研究者の連携を深めることを目的として、領域内のさきがけ研究者を対象とした「さきがけ数理構造勉強会」をオンライン開催した。

具体的には、さきがけ研究者にアンケートをとり多くの人が聞いてみたいとテーマを選定し、その分野のさきがけ研究者が講義を行う形式での勉強会を開催した。全3回開催された。開催日および講演者とそのタイトルは以下の通りである。

- ・ 第1回（2021年3月29日）吉田 悠一（1期生）「最適化アルゴリズムの平均感度解析」
- ・ 第2回（2022年3月22日）森岡 博史（2期生）「教師なし表現学習と非線形独立成分分析（ICA）～アイデア・理論・拡張～」
- ・ 第3回（2022年4月11日）宮武 勇登（3期生）「微分方程式の数値計算の不確実性定量化」

参加は任意として開催したが、毎回20名前後の参加者で熱心に議論が交わされた。

【効果】本勉強会を通じて、さきがけ研究者の研究が領域内に広く共有されることとなり、その後の共同研究や議論の活性化に大きく役立った。2022年の秋より、新型コロナウイルスパンデミックに伴う行動制限が次第に緩和されたことを受けて、領域会議などの活動が再開された後にさきがけ研究者の連携がスムーズに進む役割も果たした。

2) テーマ別グルーピング

「5.2. (A) 領域会議」の項目で述べたように、本研究領域は2年目に入った段階から新型コロナウイルスパンデミックにともなう社会的行動制限の影響から、領域会議が対面で開催できず、再開できたのは第6回目の領域会議以後であった。この行動制限の元で領域会議はオンライン開催になり、領域内の連携に大きな障害が発生した。そのため領域会議のオンライン開催では、できるだけ議論が活発になるようなオンライン会議システムを利用するように努めた。例えば、領域会議での3年目のペア発表に向けたペアリングの議論やその後のペア発表の準備を通じた領域内連携の推進、成果報告会の企画を任せたことによる同期のさきがけ研究者がそれぞれの課題を俯瞰して眺めることで連携が進むようにするなどの活動を推進した。

加えて、さきがけ研究者の研究の内容を踏まえて近い内容のものについては、自然なグルーピングを作成して積極的な交流を促した。

例えば生命科学の問題を対象にした課題を推進していた早水桃子、舩富卓哉、前原一満、森岡博史、井元佑介らには共同での議論が進むよう動機付けを行った。その結果、生命科学系の学会での共同セッションの提案に至っている。お互いの数理構造とその活用手法についての情報交換も進んだと考えている。他にも安定マッチング問題で共通の課題を推進する横井優と河瀬康志を共通の担当アドバイザーをつけることで、相互の研究の進捗状況が随時確認でき、議論の活発化が図られた。

② 他の研究領域、国内外他の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進、新たな研究コミュニティの創成など

1) 未解決問題ワークショップ

本ワークショップは、さがけ「数学協働」領域において、研究者相互の議論から自然に生まれた企画であり、以下のような趣旨と方法で、数学・数理科学の活用の一つの実験場として行うという発想と意欲を評価して、JST 数学関連研究領域の共通の活動として支援することになったワークショップである。

【趣旨】 JST 数学関連研究領域（さがけ「数学協働」領域、CREST「数理モデリング」領域、CREST「数理的情報活用基盤」領域、ACT-X「数理・情報」領域、本研究領域）を中心に、数理科学による解決を希望する周辺諸分野の研究者も加えて、研究者同士の研究領域や専門分野の垣根を越えた連携を強化するため、合宿形式のワークショップを開催する。様々な学問的背景をもつ研究者が一堂に会することで、相互理解を深めるとともに、さがけ・CREST 活動における学際的研究の萌芽を育てる契機となることを目指す。数学関係の CREST・さがけ領域にはさまざまな分野の研究者が携わり、各々のフィールドで活躍しているが、異なる研究グループの研究課題に触れる機会は決して多くはない。また、他分野の CREST・さがけ領域の研究課題の中にも数理の視点から解決策を提示できるものがあるはずだが、その交流は限定的である。

本ワークショップでは JST 数学関係領域の研究者から「自身またはグループの研究を進めるために解決できれば嬉しい数学に関連する未解決問題」を募集し、研究領域や専門分野を問わず参加者全員でそれらの解決を目指す。また、JST の他分野の領域の研究者から出題された問題を、数学や情報学の力で解決を試みる。同じ未解決問題の解決に向けて協働することで、新たな研究仲間やコミュニティの創造を後押しし、数学系領域全体としての問題解決力の向上および将来の共同研究や融合的研究のシーズ創出を狙う。投稿問題は「ちょっと人の手を借りたい」というものから、難しい問題まで幅広く受け付け、「数学の問題として定式化できていない応用分野からの話題提供」も歓迎する。

【開催方法】 数学関連領域の研究総括、領域アドバイザー、研究者らからなるオーガナイザーを組織し、HP やメールを通して参加希望者から事前に「解くことができれば研究の加速に役立つと思われる数学における未解決問題」を募集。その中からオーガナイザーが適切なものをいくつかピックアップして、合宿形式のワークショップで問題解決を目指す。ワークショップ参加者は、選定された未解決問題毎のグループに分かれ、それぞれの立場から知恵を出して問題解決に取り組む。問題解決に至った場合には、共著論文発表等につなげる。

【開催概要】第1回未解決問題ワークショップは、2017年9月に開催されてきたが、本研究領域が主催者となったものは、2020年～2024年まで毎年開催した。

- ・ 第4回 2020年9月19日～9月21日 オンライン開催
- ・ 第5回 2021年9月18日～9月20日 オンライン開催（サポート会場 ホテル ヴィラフォンテーヌグランド東京有明）
- ・ 第6回 2022年9月23日～9月25日 TKP ガーデンシティ札幌駅前（ハイブリッド開催）
- ・ 第7回 2023年9月16日～9月18日 アートホテル盛岡（ハイブリッド開催）
- ・ 第8回 2024年9月21日～9月23日 レクトーレ葉山 湘南国際村（ハイブリッド開催）

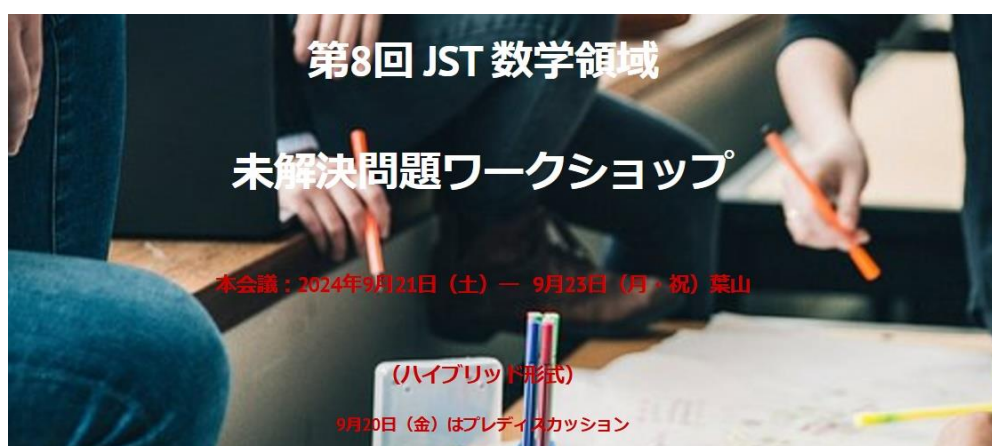


図3 第8回未解決問題ワークショップのHP

【成果】本ワークショップから多様な異分野間の連携・融合・協力に成果が生まれている。その一例を挙げる。

- ・ パーシステントホモロジーにおける係数体の選択による分解への影響について：この成果は論文化に至っている。
- ・ 爆発解ダイナミクスと“動く特異点”：この成果は日本数学会などで発表され、投稿準備中。
- ・ 他にも、Risk-Aware Linear Quadratic Control や筋ジストロフィーの数理構造の検討、整数論のような純粋数学の問題からコンピュータビジョンや神経科学に関する応用的な問題までさまざまな問題について検討された。

こうした様々な未解決問題が分野の垣根を越えて議論され、数学・数理科学および情報科学の連携・融合が進み、成果の周辺諸分野への波及効果もあったが、特に周辺諸分野の研究者との連携がこのワークショップの開催によって生み出されている。

- ・ 本研究領域の1期生の小槻峻司は、自身が持つ気象学のデータ同化に関する課題を提案し、その検討を通じて生み出された連携をもとに、内閣府ムーンショット型研究開発事業目標8へ応募、PMとして採択された。
- ・ 神経科学分野の若手研究者から寄せられた質問に答えたことをきっかけにして、自然な数理科学と神経科学の連携が創成された。この研究連携は本ワークショップからスピンアウトしてサテライト企画「数理科学者と解く！神経科学のオープンプロblem」として独立して開催されている。このことは数学・数理科学を核として新しい研究コミュニティの創成の成果である。

第1回 2022年7月3日～7月6日 Double Tree by Hilton 那覇首里城

第2回 2023年11月7日～11月20日 タングラム斑尾 東急リゾート



図4 数理科学者と解く！神経科学のオープンプロblem@長野 HP

ワークショップ HP: <https://sites.google.com/view/openproblem/>

2) 若手数学者交流会 (Session “Young Mathematicians’ Challenge”)

大型の研究費である JST 戦略的創造推進事業 (ERATO、CREST、さがけ、ACT-X)、JST 未来社会創造事業、JST ムーンショット型研究開発事業、科学研究費 (基盤研究(S)、学術変革(A))などに参画する数学・数理科学の若手研究者 (若手教員・ポスドク・大学院生)が、諸分野との連携から生まれる新しい数学の潜在的可能性を感じ取り、あるいは再認識して、それぞれの研究の方向性やキャリアパスを再考する機会となる研究交流の場

となることを目指して、CREST「数理モデリング」・さががけ「数学協働」・ERATO「メタ数理システムデザイン」領域協力で2019年から始まった「若手数学者交流会」を引き継いで開催した。2020年度は新型コロナウイルスパンデミックの影響で残念ながら中止せざるを得なくなったものの、2021年よりCREST「数理モデリング」・さががけ「数学協働」と協力の下、再開にこぎつけて、現在2025年第6回まで継続開催している。



本研究集会の開催概要は以下の通り。

- 第2回（2021年3月13日～3月14日）オンライン開催
- 第3回（2022年3月7日～3月8日）オンライン開催
- 第4回（2023年3月13日～3月14日）AP市ヶ谷
- 第5回（2024年3月11日～3月12日）ビジョンセンター西新宿
- 第6回（2025年3月16日～3月17日）JST東京本部別館（予定）

第2回から第5回までのホームページ：

YMC2021 <https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/math-challenge2021/index.html>

YMC2022 <https://www.jst.go.jp/kisoken/aip/result/event/math-challenge2022/index.html>

YMC2023 <https://www.jst.go.jp/kisoken/aip/result/event/YMC2023/index.html>

YMC2024 <https://www.jst.go.jp/kisoken/aip/result/event/YMC2024/index.html>

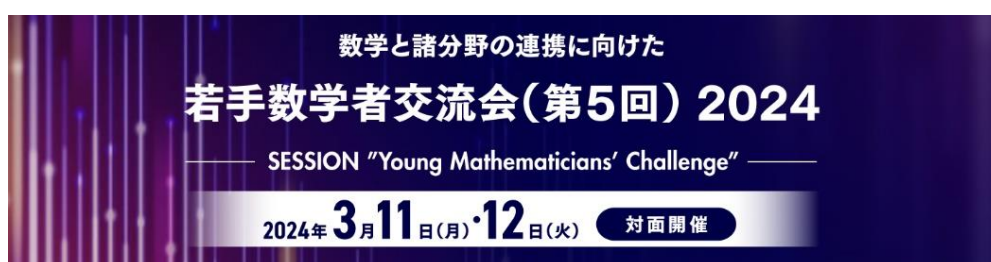


図5 若手数学者交流会（第5回）2024のHPバナー

関連領域の代表者等に若手研究者の推薦を依頼し、2021年～2023年は基調講演1名と参加者からなる口頭発表とポスターセッションからなる交流会を実施し、2024年以後は、参加者が増えてきたため基調講演1名とポスターセッションからなる交流会とし趣旨に沿って若い研究者の交流を促進するようにした。本イベントを通じて、数学・数理科学と情報科学の垣根を取り去る新しい若手研究者コミュニティの形成に貢献したと考えている。

なお、本研究領域からは、以下の講演があった。

- ・ YMC2021 楠岡成雄（東京大学・名誉教授、本研究領域アドバイザー）「人のつながりと研究の広がり」（基調講演）
- ・ YMC2022 石本健太（京都大学・1期生）「低レイノルズ数流れにおける物体の「かたち」」・吉田悠一（国立情報学研究所・1期生）「アルゴリズムの平均感度解析」
- ・ YMC2023 井元佑介（京都大学・2期生）「数学・生命科学融合研究による1細胞データの高品質化」
- ・ YMC2024 井元佑介（京都大学・2期生）「ビッグデータのランドスケープ解析：生命科学から気象学まで」

3) JST 三領域連携ワークショップ「情報科学と拓く新しい数理科学」

本企画は数理・情報の融合研究の推進を掲げる同じ戦略目標の下に設定されたさきがけ「数理構造活用」領域（研究総括 坂上貴之）・CREST「数理的情報活用基盤」領域（研究総括 上田修功）・ACT-X「数理・情報」領域（研究総括 河原林健一）の共同企画により、2022年9月14日に北海道大学大学院理学研究科にて開催したものである。本企画により、三領域の研究者の交流が促進されるとともに、このワークショップ前後に回された数学関連学会である応用数理学会と日本数学会の参加者への領域活動の紹介を行う企画となった。なお、企画の趣旨と講演者は以下の通りである。

【企画趣旨（抜粋）】日本応用数理学会年会（2022年9月8日～10日）および日本数学会秋季総合分科会（2022年9月13日～16日）が北海道大学で開催されることとなり、そこに多くの数理科学や情報科学関係の研究者が集まる。この機会を活かして、同じ戦略目標の下に設置された三領域による連携研究集会を開催し、そこに各領域から研究者を招聘し、情報科学と数理科学の連携・融合で生まれつつある新しい数理科学研究の姿をご紹介したい。開催方式はハイブリッド形式とし、学会参加のため北海道を来訪する多くの研究者だけでなく、数理科学や情報科学に関係した多くの研究者の参加を促す。

【講演者】梶原 健司（九州大学/CREST(2019年度採択)）小林 徹也（東京大学/CREST(2020年度採択)）大林 一平（岡山大学/さきがけ(2019年度採択)）平井 広志（東京大学/さきがけ(2019年度採択)）相川 勇輔（三菱電機株式会社/ACT-X(2020年度採択)）早瀬 友裕（Cluster Metaverse Lab/ACT-X(2019年度採択)）

ワークショップのイベント HP:

https://www.jst.go.jp/kisoken/aip/result/event/math3ws_2022/index.html

③ 他研究領域および国際機関との連携活動

1) さきがけ「複雑流動」領域との共同セミナーの実施

さきがけ「複雑流動」領域（研究総括 後藤 晋）の領域アドバイザーに本研究領域の坂上研究総括が委嘱されていることをきっかけとして、両領域のさきがけ研究者間の連携を促進するため、2024 年 1 月 19 日に東北大学流体科学研究所において「複雑流動」×「数理構造活用」セミナーを共同開催した。本研究領域からは、町田学、本武陽一、舩富卓哉らが出席し活発な交流が行われた。このセミナーをきっかけに研究マッチングが成立し、さきがけ「複雑流動」領域の研究者である仲田資季氏と本研究領域の本武陽一の申請により以下のような Feasibility Study の追加支援をさきがけ「複雑流動」領域より受けることとなった。

【テーマ】位相的データ解析と行列・テンソル分解による流動場の特徴抽出と予測

【支援額】3,000 千円

【目的】太陽対流層プラズマにおける電磁熱対流場を題材に、実空間における行列・テンソル分解やトポロジカルな特徴量空間における時系列解析のような、質的に異なるダイナミクスの縮約モデリング法の適用を目指す。

この成果は、領域間連携が新しい分野横断の連携研究につながった好例であり、他にも研究の議論を行うレベルでの両領域におけるさきがけ研究者の交流が生まれており、今後の発展が期待される。

2) シンガポール A*STAR との国際セミナー開催

シンガポール科学技術庁 (A*STAR) はシンガポールの科学技術研究の中心的組織であり、世界クラスの科学研究者と人材を育成することを目的としている。A*STAR が設置する Center for Frontier AI Research (CFAR) の研究員として本研究領域の 1 期生である二反田篤史の研究が高く評価され採用されており、同氏との連携により A*STAR と JST 本研究領域の連携ワークショップを 2025 年 1 月 13 日に開催した。このワークショップでは本研究領域から 4 名（園田翔、大林一平、井元佑介、本武陽一）の研究者が講演と 4 名（小槻峻司、山田俊皓、森岡博史、舩富卓哉）によるポスター発表を行い、同研究所の他の研究者との交流も予定している。このワークショップを契機として今後の両国の間の研究交流の活性化を促進する契機としたい。

④ 社会との連携、アウトリーチ活動

本研究領域では、アウトリーチ活動にも力を入れた。

1) 数学キャラバン

数学キャラバンは高校生・一般を対象に、数学・数理科学への理解や興味を深めてもらうことを目的に、2011 年度から JST 戦略的創造研究推進事業における数学関連領域が主催する形で継続している。

新型コロナウイルスパンデミックの影響で高校などでの開催が困難となる中、2022 年第 33 回～2024 年第 40 回まで、毎年、京都府立嵯峨野高校と中部大学とそれぞれ協力しながら開催した。

- 第 33 回 (2021 年 9 月 11 日) JST 数学キャラバン「数学ワークショップ」中部大学アクティブホール (ハイブリッド開催)
- 第 34 回 (2021 年 10 月 15 日) JST 数学キャラバン「拡がりゆく数学 in 京都 2021」オンライン開催
- 第 35 回 (2022 年 7 月 29 日) JST 数学キャラバン「拡がりゆく数学 in 京都 2022」オンライン開催
- 第 36 回 (2022 年 12 月 10 日) JST 数学キャラバン「拡がりゆく数学@中部大学」中部大学リサーチセンター (ハイブリッド開催)
- 第 37 回 (2023 年 9 月 10 日) JST 数学キャラバン「拡がりゆく数学 in 京都 2023」京都府立嵯峨野高校
- 第 38 回 (2023 年 12 月 16 日) JST 数学キャラバン「拡がりゆく数学@中部大学」中部大学 (ハイブリッド開催)
- 第 39 回 (2024 年 11 月 30 日) JST 数学キャラバン「拡がりゆく数学@中部大学」中部大学 (ハイブリッド開催)
- 第 40 回 (2024 年 12 月 21 日) JST 数学キャラバン「拡がりゆく数学 in 京都 2024」京都府立嵯峨野高校



本研究領域からは、以下のように 8 回の開催に対して延べ 9 回の講演が行われた。

- ・ 第 33 回「データを読み解く力 -いま数学が必要とされるワケ-」井元 佑介
- ・ 第 34 回「計算折り紙のかたち」舘 知宏
- ・ 第 34 回「シャボン膜の数学と応用」小磯 深幸
- ・ 第 35 回「大規模数値シミュレーションで切り開く豪雨・洪水予測研究」小槻 峻司
- ・ 第 37 回「不可視の可視化」井元 佑介
- ・ 第 38 回「マッチングの数理とアルゴリズム」横井 優
- ・ 第 39 回「生命の流れからみる数理モデリングの世界」石本 健太

- ・ 第 39 回「編集履歴で分かる Wikipedia 編集の秘密」小串 典子
- ・ 第 40 回「機械学習を支える数学」園田 翔



図 6 第 40 回 JST 数学キャラバン HP バナー

なお、講演者については、ACT-X「数理・情報」、CREST「数理的情報活用基盤」領域とも協力することで、幅を広げ、より効果的な企画と実施ができたと考える。

2) 日本評論社「数学セミナー」連載企画（2024 年 4 月号～2025 年 6 月号）

本研究領域が推進している数学・数理科学および情報科学の連携・融合研究で生まれる新しい数学研究の姿を広く発信することを目的として、「数理 meets 情報科学-DX 時代の数理研究」を日本評論社が発行している雑誌「数学セミナー」に 1 年半にわたる長期連載を企画した。本企画は現在も継続中であり、2025 年 6 月号の座談会を行った後、完結の予定である。

【企画趣旨（抜粋）】 21 世紀に入って 20 年が経過し、現在は機械学習や AI などに代表される情報技術の進歩とその利活用が社会全体に大きな変革をもたらしている原動力となっています。このような DX 時代に相応しい情報技術の進歩に合わせて新しい数学的な問題が生まれ、それが数学研究の進歩をも促しています。このように「情報科学」は「数学」の近縁にある分野として刺激を与えています。この動向を捉えて 2019 年に文部科学省は戦略目標「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への展開」を設定し、それに基づいて JST が発足させた戦略的創造推進事業さきがけ「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」領域（数理構造活用領域、坂上貴之研究総括）が発足しました。現在、このさきがけ領域では 31 名の若手研究者が本目標を達成に向けて研究を行っています。本企画ではこうした情報科学の刺激を受けて生まれた最先端の数学課題の研究者による「情報科学との連携・融合からみた数理科学」をテーマにした連載を企画します。

【記事一覧】

- 2024 年 4 月号：イントロダクション：坂上 貴之（研究総括）

- 2024 年 5、6 月号：機械学習と数理：山田 俊皓（確率論、機械学習による数値解法）・園田 翔（関数解析、機械学習の理論）
- 2024 年 7、8 月号：離散構造と数理：谷川 眞一（剛性理論）・横井 優（離散最適化）
- 2024 年 9、10、11 月号：情報基礎と数理：平原 秀一（計算機科学）・吉田 悠一（アルゴリズム理論）・相川 勇輔（ACT-X、暗号理論）
- 2024 年 12 月号、2025 年 1、2 月号：データサイエンスと数理：井元 佑介（力学系・統計、生物多階層モデリング）・薄 良彦（クーパマン作用素、電気工学）・小串 典子（Web データ解析）
- 2025 年 3、4、5 月号（予定）：現象と数理構造：小島居 祐香（ACT-X、結び目理論と物質）・舘 知宏（幾何学、オリガミ工学）・柴山 允瑠（力学系、宇宙工学）
- 2025 年 6 月号：座談会（予定）

3) 書籍や総説記事ほか出版、ソフトウェア開発

本さがけ研究成果として、書籍、総説、その他様々な記事が出版されている。特許出願も 5 件あった。また、本研究領域の特徴として、ソフトウェア・データベース成果として上がっている。全体の登録件数は 90 件（書籍 17、総説 17、ソフトウェア・データベース 11、その他記事 45）であった。特に、以下の学術書籍は本研究領域発の成果として重要である。

- ✓ 石本 健太：「微生物流体力学：生き物の動き・形・流れを探る」石本健太（著）サイエンス社（2022/12/7）
- ✓ 大林 一平：「マテリアルズインフォマティクス」伊藤聡（編集）、吉田亮、劉暢、Stephen Wu、野口瑤、山田寛尚、赤木和人、大林一平、山下智樹（著）共立出版（2022/8/22）
- ✓ 二反田 篤史：「深層学習の基礎」中山英、二反田篤史、田村晃裕、井上中順、牛久祥孝（著）サイエンス社（2022/11/4）
- ✓ 小林 亮太：「AI 新世 人工知能と人類の行方」小林亮太、篠本滋（著）甘利俊一（読み手）（文春新書 1371）文藝春秋（2022/8/18）
- ✓ 柴山 允瑠：「 n 体問題と変分法-周期解をめぐって-」柴山允瑠（著）日本評論社、（2024/10/2）

また、本研究領域活動を通じてソフトウェア開発も 10 件あった（詳細は「6. (1)」を参照）。多くは専門的な研究のターゲット分野で使われるエキスパートソフトが中心で、一般向けに公開されていないものもあるが、以下のソフトウェアは広く公開を果たしており、本研究領域が掲げる「数理構造活用」を実現において特筆すべき成果と考えている。

大林 一平：ソフトウェア HomCloud (Ver. 3.6. x)

パーシステントホモロジーの計算アルゴリズムは世界中で開発されているが、この HomCloud (Ver. 3.6) は本研究領域での最新の研究成果を実装したものである。従来難しいとされたパーシステントダイアグラムから構造を逆推定する逆解析を可能にした点で優れており、このソフトウェアの産業分野や材料科学分野での利用が促進されている。

4) その他の領域活動の発信

上記の活動に加えて、数学に関係する学会などの人々に向けて本研究領域の活動や成果の講演や JST による研究支援活動について広く周知を図るイベントを開催した。

✓ 日本数学会年会でのシンポジウムでの講演会の企画

日本数学会の教育研究資金検討委員会が主催して 2024 年 3 月 19 日に開催したシンポジウム「数学と諸分野の連携が創出する数学研究」の企画を JST さきがけ「数学協働」領域の國府研究総括と共同で行い、JST から数理科学者も応募が可能な研究支援を受け、研究を行う数学者や数学者との連携により優れた研究を行っている他分野の研究者などを招待して、諸分野連携と数学の連携研究の成果を紹介すると同時に、加えて JST の研究支援事業の紹介なども含めて数学会会員の皆様と情報共有をはかった。

この企画は数学会会員誌「数学通信」に報告書としてまとめられて数学会の会員に広く JST の活動を周知する内容となっている。

教育研究資金問題検討委員会シンポジウム 「数学と諸分野の連携が創出する数学研究」

現在、科学技術振興機構から数理科学者も応募が可能な研究支援が科研費に加えて存在しています。これらの研究では諸分野との連携により数学研究を推進し、それを諸分野の課題解決につなげると同時に、それを題材にした新しい数学上の課題などが提案され、数学研究にも大きな刺激となっています。

そこで、本講演企画では、JST の支援を受けて研究を活動になさっている数学者、また数学者との連携により優れた研究を行っている他分野の研究者をお招きして、諸分野連携と数学の連携研究の成果をご紹介いただき、JST の研究支援事業の紹介なども含めて数学会会員の皆様と情報共有したいと考えております。日時は三日日のお昼休みを含む時間帯で実施し、多くの日本数学会員の皆様に弁当を持参いただき、気楽に聴いていただけるようなスタイルにしたいと思っています。

開催日時 令和 6 年 3 月 19 日 (火) 11 時 15 分～12 時 45 分
開催場所 基礎教育実験棟 1 階 階段教室

プログラム

11 時 15 分～11 時 20 分 葛谷 順重 (文部科学省 研究振興局 基礎・基礎研究課)
「数理論と異分野の連携に向けた取り組みについて」

11 時 20 分～11 時 45 分 蓮尾 一郎 (国立情報学研究所 教授)
「ICT 技術への信頼を支える社会インフラとしての数学基礎論と代数学」

11 時 45 分～12 時 10 分 小堀 峻司 (千葉大学 教授)
「数理論を応用した知能学習・初級研究—さきがけ から ムーンショットへ—」

12 時 10 分～12 時 35 分 高木 剛 (東京大学 教授)
「ポスト量子社会が求める高機能暗号の数理基礎創出と展開」

12 時 35 分～12 時 45 分 坂上 貴之 (京都大学 教授)
「JST の研究支援事業 (特に戦略的創造研究推進事業) について」

主催 日本数学会 教育研究資金問題検討委員会

企画 坂上 貴之 (京都大学、さきがけ数理構造活用領域総括)

國府 寛司 (京都大学、さきがけ数学協働領域総括)

✓ その他、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所の MfIP 連携探索ワークショップ (2024 年 4 月 27 日、明治大学中野キャンパス開催) において「JST による数学支援のかたち」という講演を研究総括として行った。

(4) 研究費配分上の工夫 (拡大、縮小等も含めて、研究領域運営上の立場から)

研究者が研究課題の進捗状況などを踏まえて研究費の見直しを行い、必要に応じて申請された案件を、研究総括として必要性や妥当性を十分に考慮した上、JST の審査を経ることで承認、厳格かつ柔軟な予算変更を行った。また、3 期生の三内顕義は、さきがけ研究の成果が評価され、我が国における生成 AI 開発プロジェクトの責任者の一人となったことをうけて、期間途中の目的達成に伴う早期終了として、開発プロジェクトに専念できるようにした。

その他の予算の追加支援として、以下のものを実施した。いずれも、さきがけ課題推進の加速、領域内連携、国際活動の加速に効果があった。

- 異動に伴って研究環境整備を行う「スタートアップ支援」
小槻 峻司（千葉大学への異動）1,000 万円、小林 亮太（東京大学への異動）175 万円、町田 学（近畿大学への異動）1,000 万円、本武 陽一（一橋大学への異動）240 万円。
- さきがけ研究者間の連携による研究展開を支援する「共同 Feasibility Study」
2020 年 小槻 峻司と小林 亮太の学術変革領域(B)応募に向け「予測に基づく現象制御・現象制御を決定する価値観について」で支援した。小槻：100 万円、小林：60 万円。
- さきがけ研究成果の国際的な展開を支援する「国際強化支援」
 - ✓ 2021 年度 石本 健太：「生命現象の流体数理とデータ活用法を深化させる国際ネットワークの形成」G. K. Taylor 氏（英国・オックスフォード大学）、E. Hannezo 氏（オーストリア・オーストリア科学技術研究所）、R. Merks 氏（オランダ・ライデン大学）、E. A. Gaffney 氏（英国・オックスフォード大学）招聘 300 万円。
 - ✓ 2021 年度 小槻 峻司「観測ビッグデータを有効利用するハイブリッド LETKF 同化研究の加速と深化」Craig Bishop 氏（オーストラリア・メルボルン大学）、Diego Carrió 氏（オーストラリア・メルボルン大学）招聘 145 万円/オーストラリア・メルボルン大学 派遣 65 万円。
- 新型コロナウイルスパンデミック対策支援「新型コロナ関連追加」
2020 年度 小槻 峻司：「データ同化&観測価値推定を用いた COVID-19 感染者予測手法の高度化」1,000 万円
- 研究総括が必要と認めて支援する「総括裁量経費」
川本 裕輔：200 万円、船富 卓哉：180 万円、町田 学：200 万円、間島 慶：19.4 万円、横井 優：300 万円、谷川 眞一：349 万円、本武 陽一：150 万円。
- 研究機関終了後に 1 年研究期間を延長する「1 年延長制度」
2024 年度 町田 学：500 万円、船富 卓哉：480 万円、川本 裕輔：500 万円
2025 年度も延長課題選定中。

(5) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況

本研究領域の研究者は卓越した研究提案を行って本研究領域に採択されており、もとより優れた若手研究者であった。採択後、本研究領域活動を通じてお互いに切磋琢磨し、また研究計画の達成に向けた日々の研究の努力が身を結び、以下に示すように多くの国内外からの受賞や招待講演を受けた。これらの高い評価は、多くの研究者のさきがけ研究期間中あるいは研究終了後に昇任を伴う異動の状況を見てもはっきりとわかる。今後も、さきがけの

成果やさきがけの活動の中で培った数学・数理科学と情報科学の連携や融合の成果を発展させて、我が国をリードするトップレベル研究者へと成長することを大いに期待している。

① キャリアアップ（研究者の移動・昇任の情報）

本研究領域 1 期生から 3 期生 31 名のうち、さきがけ研究期間中に 23 名が昇任した（同一期間内および転任を含む）。例えば本研究領域採択当初は研究員であった大林一平（1 期生）と小槻峻司（1 期生）は、研究機関終了時点で教授に昇任しており、大きなキャリアアップへとつながった。ほか、助教・講師（特定教員を含む）から准教授への昇任は 11 名。准教授から教授への昇任は 8 名、理研の特別研究員から上級研究員は 1 名、特別研究員から研究員 1 名となっている。

また、さきがけ研究終了後に以下の昇任や異動（予定も含む）が 5 名あった。特に、1 期生の二反田篤史は日本を飛び出しシンガポール A*STAR の主幹研究員に異動するなど、活躍の場は世界に広がっていることを示している。

このように本研究領域のさきがけ研究者のキャリアアップは極めて順調に進んでおり、本研究領域ですすめた数学・数理科学と情報科学の連携・融合研究が高く評価されている証拠である。以下にその一覧を示す。

表 5 さきがけ研究者の異動状況

	研究者名	採択時	終了時	2024 年 12 月現在
1 期 生	石本 健太	東京大学 特任助教	京都大学 准教授	京都大学 教授 (2025. 4)
	稲永 俊介	九州大学 准教授	同左	九州大学 教授
	大林 一平	理化学研究所 研究員	岡山大学 教授	
	小槻 峻司	理化学研究所 研究員	千葉大学 教授	
	小林 亮太	国立情報学研究所 助教	東京大学 准教授	
	薄 良彦	大阪府立大学 准教授	京都大学 准教授	京都大学 教授 (2025. 1)
	舘 知宏	東京大学 准教授	東京大学 教授	
	二反田 篤史	東京大学 助教	九州工業大学 准教授	シンガポール科学 技術研究庁 Principal Scientist

	早水 桃子	統計数理研究所 助教	早稲田大学 准教授	
	平井 広志	東京大学 准教授	同左	名古屋大学 教授
	吉田 悠一	国立情報学研究所 准教授	国立情報学研究所 教授	
2 期 生	井元 佑介	京都大学 特定助教	京都大学 特定准教授	
	田中 健一郎	東京大学 准教授	同左	東京科学大学 教授
	平原 秀一	国立情報学研究所 助教	国立情報学研究所 准教授	
	町田 学	浜松医科大学 指定講師	近畿大学 准教授	
	森岡 博史	理化学研究所 特別研究員	理化学研究所 研究員	滋賀大学 准教授 (2025. 4)
	山田 俊皓	一橋大学 准教授	一橋大学 教授	
3 期 生	小串 典子	大阪大学 特任助教	明治学院大学 准教授	
	三内 顕義	理化学研究所 研究員	京都大学 特定准教授	
	園田 翔	理化学研究所 特別研究員	理化学研究所 上級研究員	
	細江 陽平	京都大学 講師	京都大学 准教授	
	本武 陽一	統計数理研究所 特任助教	一橋大学 准教授	
	横井 優	国立情報学研究所 助教	東京科学大学 准教授	

② 国内外の顕彰・受賞

本研究領域のさきがけ研究者の研究期間 2024 年 12 月 1 日現在までの受賞は、総数 42 件となった。中でも以下の受賞は、本研究領域の研究成果に対する顕著な評価として注目に値するものである。

石本 健太：2020 年度 日本数学会 応用数学研究奨励賞（2020 年 3 月）

科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞（2021 年 4 月）

現象数理学三村賞奨励賞（2021 年 12 月）
第 11 回 藤原洋数理科学賞奨励賞（2022 年 10 月）
稲永 俊介：情報処理学会 60 周年記念論文（2020 年 10 月）
大林 一平：第 11 回 桜舞賞 研究奨励賞（2020 年 3 月）
小槻 峻司：科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞（2022 年 4 月）
二反田篤史：ICDM19 Best Paper Candidate for KAIS Publication（2019 年 11 月）
Outstanding Paper Award: The 9th International Conference on
Learning Representation (ICLR)（2021 年 4 月）
早水 桃子：科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞（2022 年 4 月）
平原 秀一：船井研究奨励賞（2022 年 2 月）
Complexity Year in Review 2022 Lance Fortnow and Bill Gasarch
（2022 年 12 月）
科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞（2024 年 4 月）
河瀬 康志：日本オペレーションズ・リサーチ学会 論文賞（2024 年 9 月）
細江 陽平：計測自動制御学会 制御部門パイオニア賞（2023 年 3 月）
LAAS-CNRS DD-LAAS Research Fellow（2024 年 1 月）

③ 国際会議での招待講演の状況

本研究領域に採択されたさきがけ研究者は多くの国内外の学会やセミナーなどから招待講演を受けており、総数は 259 件（国際 122 件、国内 137 件）に及んだ。そのうち、国際的な学会が行う Conference、Symposium などでの招待講演は 35 件あった。他にも海外大学のセミナーでの招待講演も数多くあった。新型コロナウイルスパンデミックの影響で海外出張などが全くできない時期が 3 年近く続いたが、その影響も少なく、順調にさきがけ研究者は世界の各分野で活躍の場を広げている。

(6) その他マネジメントにおける特記事項

本研究領域の開始二年目（2020 年 3 月）から 5 年目（2023 年 3 月）まで、新型コロナウイルスの世界的なパンデミックが発生した。このことは全く予想していなかったことであったが、本研究領域が数学・数理科学と情報科学の分野にまたがる研究者が集まっているという特性を活かして、当時の最先端のオンラインツールの活用により、領域全体の研究活動に支障が出ないようにマネジメントを行った。パンデミックによる緊急事態宣言発出後、2 ヶ月後の 2020 年 5 月 4 日、5 月 12 日および 6 月 30 日に採択されていた 1 期生と Zoom ミーティングを実施した。ここで、全さきがけ研究者の研究状況を確認し、研究進捗に支障がないかを全研究者から聞き取り、可能なものについては必要な対策を講じた。

当初は混乱があったものの状況が安定してくるまでの間、継続的にオンラインミーティングを行い、秋の領域会議までの研究進捗状況の把握につとめた。2 期生・3 期生の提案募

集や審査も問題なく実施された。すでに上記「5.2.(1)領域会議」で記載したように、パンデミックに伴う社会的行動制限がある中で、領域会議はオンライン開催せざるを得なくなった。しかし、できるかぎり進捗状況の把握と適切な助言をし、さらにさきがけ研究者間の連携が深まるよう、様々なオンライン会議ツールを利用するなどして、本研究領域全体の活動は大きな問題もなく進めることができた。このような未曾有の危機的状況の中にあっても、領域活動がとまらないよう動いてくださった JST の皆様には深く感謝申し上げたい。

6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

(1) 研究総括のねらいに対する研究成果の達成状況

【成果の概要】本研究領域では、数理・数理科学と情報科学のそれぞれの分野の卓越した研究者が本研究領域に集結して連携・融合により次の二つの戦略目標の達成を狙った。まず、本事後評価時点（1期生/2期生は研究終了時まで、3期生は2023年12月時点まで）における、本研究領域全体での研究成果の概要は以下の通りである。

- ✓ 発表論文数 312 件（査読付き国際論文 302 件、査読付き国内論文 10 件）。
- ✓ 国際会議招待講演 122 件。
- ✓ 受賞 42 件。その詳細は「5. (5)②」に記載。
- ✓ 書籍、総説、ソフトウェア・データベース 90 件（書籍 17、総説 17、ソフトウェア・データベース 11、その他記事 45）その詳細は「5. (3)④」に記載。
- ✓ 特許出願 9 件。
- ✓ プレス発表（メディアも含む） 20 件。

【論文成果】本研究領域は数学・数理科学および情報科学分野の研究を推進しており、成果を測る指標として、発表論文のうち AI 系・計算機科学系の国際トップコンファレンスおよび全学術分野トップジャーナルへの採択数を記す。

- ・ [AI 分野の上位 5 国際カンファレンス](#)（2024 年 12 月時点）
 - Neural Information Processing Systems (NeurIPS) 5 件
 - International Conference on Learning Representations (ICLR) 5 件
 - International Conference on Machine Learning (ICML) 1 件
 - AAAI Conference on Artificial Intelligence 1 件
 - トップ 1～20 まで 24 件
- ・ [計算機科学分野の上位 5 国際シンポジウム・ジャーナル](#)（2024 年 12 月時点）
 - ACM SIAM Symposium on Discrete Algorithms 1 件
 - Journal of the ACM 1 件
 - Theoretical Computer Science 4 件
 - ほか、上位 1～20 まで 11 件
- ・ [全学術分野の上位 10 ジャーナル](#)（2024 年 12 月時点）
 - Nature Communications 1 件
 - Neural Information Processing Systems (NeurIPS) 5 件（AI 分野）
 - Nature Information Processing Systems 5 件
 - Advanced Materials 1 件

- International Conference on Learning Representations (ICLR) 5 件 (AI 分野)
- ほか、トップ 1~40 まで 33 件

このように研究成果は国際的に評価の高いトップコンファレンスやジャーナルに掲載されている。研究論文全体の約 11%が全学術分野の上位 50 のジャーナルへ掲載されており、本研究領域における研究活動の成果のレベルは単に数学・数理科学や情報科学分野にとどまらず学術的に見て高いものであった。

【ソフトウェア開発】本研究領域を特徴付ける成果として、数理構造の利活用を進めるソフトウェアの開発がある。いずれも当該分野で利活用可能なソフトウェアである。

- ・ 大林一平：HomCloud（パーシステントホモロジー解析ソフトウェア、公開）
- ・ 小林亮太：CoNNECT（神経スパイクデータから神経細胞間の相互作用の強さを推定）
- ・ 井元佑介：細胞分化を記述するソフトウェア群
 - RECODE（1 細胞遺伝子発現データのノイズを削減）
 - V-Mapper（細胞分化構造の分岐を位相的データ解析）
 - GRN-LiNGAM（遺伝子制御ネットワークを同定するための統計的因果探索）
 - CellMap（細胞の分化の分岐構と遺伝子発現ダイナミクスを抽出）
- ・ 川本裕輔：StatWhy（統計的因果推論を行うプログラムの正しさを記述・検証）
- ・ 前原一満：ddHodge（大規模オミクスサンプリングデータからダイナミクスを抽出）
- ・ 園田翔：[HyperTree Proof Search with Retrieval Augmented Tactic Generator](#)（LLM による定理自動証明ソフト）
- ・ 宮武勇登：[IsoFuns.jl](#)（代表的な指数型分布に対し、微分方程式の UQ を一般化近単調回帰の Julia パッケージ）

【戦略目標達成への貢献】本研究領域の研究課題の戦略目標 (A) (B) において、本研究領域が設定した①~⑤の研究カテゴリと各さきがけ研究課題の対応関係の概要を示す。その後、これらの内容の詳細については以後の「(2)特筆すべき研究成果」「(3)科学的・技術的な観点からの貢献」「(4)社会的・経済的な観点からの貢献」の観点で個別に記載する。

戦略目標 (A) 革新的な情報活用手法の創出に資する理論及び技術の構築

- ① 未来の社会の価値へとつながる、様々な対象にある数理構造（代数構造、幾何構造、高次元構造、論理構造など）を提案する萌芽的、挑戦的な数学・数理科学研究
- ・ 園田翔：深層学習モデルの汎化性能の理解のための深層構造の積分方程式（リッジレット変換）表現と、その群構造導入による解法の研究。

- ・ 舘知宏：機能性を持つ3次元構造物を動的に形成する「折りガミ工学」分野において、折りの形と構造的に潜む「巨視的視点」と「自己組織化」の数理構造解明と活用。
- ・ 田中健一郎：「汎関数の凸性」や「近似凸性」なる数理構造に注目して点群最適配置に対する近似測度を求める最適化問題の研究。
- ・ 谷川眞一：リンケージやロボットの動作計画、物体の詰め込み問題や有限距離空間の詰め込み問題などに潜む、計算幾何学の組み合わせ構造の解明とその応用研究。
- ・ 二反田篤史：深層学習モデルの背景にある最適化手法の最適解への収束性や潜在的な正則化にある数理構造の解明と活用。
- ・ 平井広志：従来の離散最適化理論の枠組を大きく超えるCAT(0)空間などの「非正曲率距離空間の凸性」を利用した新しい離散最適化理論とその活用。
- ・ 吉田悠一：アルゴリズムの平均感度の導入と新しいアルゴリズムの特徴付けの研究。

② 先進的なプロセス駆動型の数理モデル（微分方程式、離散モデル、確率モデルなど）やデータ駆動型数理モデルの提案。また、それらの融合により、高い信頼性や効率化を実現するデータサイエンス研究（レアイベント予測や予兆検出、不確実性定量化など）

- ・ 石本健太：流体中を動く生物における新しい軸対象構造である「らせん対称性」を導入してその「かたち」を表現する新しい定数（石本定数）を提唱。
- ・ 小槻峻司：「観測の価値」という新概念を導入し、不確実性定量化の手法である局所変換アンサンブルデータ同化や局所フィルタの新しいデータ同化手法の提案。
- ・ 小林亮太：点過程を数理構造とした確率モデリングによる神経スパイクやSNSデータへの応用。
- ・ 柴山允瑠：変分構造を用いた位相幾何的手法により、宇宙工学分野の衛星軌道設計における効率的な新しい軌道を構成する理論研究とその応用。
- ・ 薄良彦：現象を記述する微分方程式や差分方程式などの非線型力学系から誘導されるクーブマン作用素のスペクトルを数理構造の解明と活用。
- ・ 早水桃子：ウイルスやバクテリアなどの複雑な進化の系譜を表現する系統樹という数理モデル「系統ネットワーク」を数理構造の解明と活用。
- ・ 町田学：「逆解析」による偏微分方程式（輻射輸送方程式）の係数決定問題研究と近赤外イメージングへの応用。
- ・ 宮武勇登：発展方程式の数値計算の誤差成長を確率モデル化し統計的手法と融合させることで、誤差成長の不確実性の定量を実現する研究。

③ 数理構造や数学的概念を新しい情報として活用するための情報科学研究（新しいデータ構造やアルゴリズムなど）

- ・ 稲永俊介：文字列の持つ「反復性」と「規則性」という組合せ論的な数理構造を活用して、多様な構造を持つ文字列データを高速に処理するアルゴリズムの開発。

- ・ 大林一平：パーシステントホモロジー（PH）によるトポロジカルデータ解析理論とアルゴリズム、独自ソフトウェア（HomCloud）への実装、材料科学や地質学への応用。
- ・ 小串典子：Wikipedia などの協働デジタル空間における新しい数理的指標の導入と、それを用いた二部グラフによる数理モデルの構築とその応用。
- ・ 川本裕輔：経験的知識を表現できる「信念ホーア論理体系」と、統計的因果推論を行うプログラムの正しさを記述・検証するための「様相論理」の開発と活用。
- ・ 三内顕義：対称性を考慮した機械学習の理論と活用。
- ・ 本武陽一：位相的データ解析、力学系、代数的学習理論などを統合した「解釈可能 AI」数理基盤の構築と応用。
- ・ 森岡博史：非線形独立成分分析（ICA）の数理的研究と、大規模ネットワークデータに発現する動的機能構造と因果関係の抽出への活用。
- ・ 山田俊皓：高次元の線形・半線形二階の微分方程式の数値計算を、マリアバン解析および深層学習を用いて近似する手法（Deep Solver）の開発。

戦略目標(B) 情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出

- ④ データの利用を画期的に促進させる計算高速化や高精度化を達成する研究（近似計算、確率シミュレーション、高速アルゴリズム、最適化など）
 - ・ 井元佑介：細胞機能分化の理解のため、1 細胞遺伝子発現データに対して、その情報を利活用する数理科学的研究とその利活用のための高性能ソフトウェア群の開発。
 - ・ 船富卓哉：「乗法群非可換回帰モデル」により、ヒト胚子の二次元断層スライスの少ない点情報から整合的な 3 次元モデルを再構成する方法の開発と応用。
 - ・ 細江陽平：非定常確率過程の分布をオンライン推定し、制御器の挙動を決める数理モデルベース適応学習制御の実現と自動車の遠隔制御への応用。
 - ・ 前原一満：ベクトル場のホッジ分解により、細胞・組織スケールの大規模オミクスデータから動的な情報を抽出、データの背後に潜む定性的知識を獲得する手法の開発。
 - ・ 間島慶：量子計算・量子物理学の計算アルゴリズムを利活用して、神経科学分野の巨大データの機械学習を高速化するアルゴリズムの開発と応用。
- ⑤ 情報の高度な利活用に資する数学・数理科学・情報科学研究（セキュリティ、個人情報保護、匿名化、情報の非対称性・偏在の緩和など）
 - ・ 河瀬康志：公平性・効率性・耐戦略性を満たす制約付き割当問題の数理構造の解明と、それに基づく様々な状況下での割当問題メカニズムの研究。（情報の偏在の緩和）
 - ・ 平原秀一：有効な暗号体系を構成する上で必要な計算量理論の未解決問題をメタ計算量理論に基づいて研究。（セキュリティ、個人情報保護）
 - ・ 横井優：人々の選好を考慮したマッチング問題に対して、その様々な制約を表現でき

る一般的なモデルの数理構造の研究とアルゴリズムの開発。(情報の偏在の緩和)

(2) 研究領域全体の特筆すべき研究成果

以下の(3)の項目で詳述するように、本研究領域で採択された課題はいずれも戦略目標達成を実現する上で優れた成果を挙げているが、それらの中でも国内外から高い評価を得た研究成果について以下に述べる。

石本健太は、細胞スケールの生物の運動に見られる流れを記述する微分方程式と生物の運動にともなう「形状」と呼ばれる二つの数理構造を結びつける新しい数理概念を構築して、それを活用するための計算手法とその応用研究を行った。新しい数理概念として、軸対称性概念の拡張である「らせん対称性」と生物の「かたち」を表現する新しい定数を導入し、これは同研究者の名前を冠した「石本定数」として認知されるに至っている。また、エネルギー保存則を満たさない線型弾性体の一般的記述である「奇弾性」を持つ物体の遊泳運動を考察し、自発的内部揺らぎによる遊泳を記述する奇弾性遊泳定理を証明するなど、アクティブな弾性体を統一的に記述する数学理論の基盤を構築したことは顕著な成果である。他にも高精度の流体計算により、流速場からデータ駆動的に物体の近くにおける流れ場を精度よく近似する解析表現を与え、それをバクテリアの集団運動の数値計算に適用して壁面の効果と集団運動の関係を特徴付けるなど、ここで明らかになった数理構造の活用の面でもすぐれた成果を得ている。これらの成果が高く評価され、2020 年度日本数学会応用数学研究奨励賞（2020 年 3 月）、科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞（2021 年 4 月）、現象数理学三村賞奨励賞（2021 年 12 月）、第 11 回 藤原洋数理科学賞奨励賞（2022 年 10 月）を受賞している。

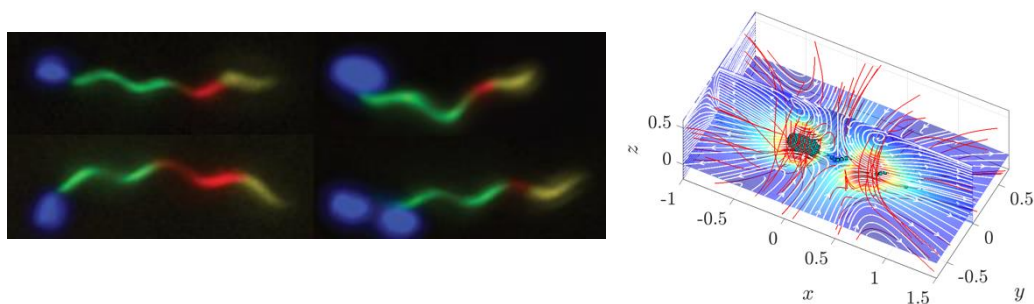


図 7 (左) 染色したバクテリア鞭毛。Renault et al. (2017) eLife 6:e23136 の図を改変した (Creative Commons Attribution License)。(右)「石本定数」が現れる代表的な螺旋物体の例。遊泳バクテリア周りの流れの様子。

平原秀一は、米国クレイ数学研究所によって 2000 年に発表された有名なミレニアム懸賞問題の一つである $P \neq NP$ 予想に関係して、有効な暗号体系を構成するという観点から Impagliazzo によって提案された $P \neq NP$ における 4 つの可能世界の階層 (Cryptomania、Minicrypt、Pessiland、Heuristica) と $P=NP$ 世界 (Algorithmica) について、我々の世界

はどこに存在するかを調べるという根源的な課題に取り組み、顕著な理論的な成果を得た。可能世界を除外するために必要な証明にはブラックボックス帰着の限界、困難性増幅の不可能性、相対化の課題という理論的障壁（バリア）が存在し、その解決を従来の計算量理論で解決することは極めて困難であった。この課題に対して、問題の計算量を計算するために必要な計算量を扱う「メタ計算理論」の観点で取り組み、部分関数版回路最小問題（MCSP*問題）がNP完全であることの証明に成功した。これはNPの平均時・最悪時計算量が同等に困難であるかを問う「Heuristicaの除外」の未解決問題の解決に近づく本質的な結果である。本成果は計算量理論の国際的なトップカンファレンスであるFOCS 2022に採択され、さらに計算機科学の分野でのその年のもっとも顕著な業績に与えられるComplexity result of the year 2022の日本人初の受賞者となった。他にも、平原氏が取り組むメタ計算問題のNP完全であることと $P \neq NP$ に基づく秘密鍵暗号方式が構築できることが同値であることを示し、「HeuristicaとPessilandの除外」という未解決問題に取り組む上でメタ計算理論が本質的な役割を果たすことが保証された。本研究の対象や成果は基礎的なものだが、安全な暗号の実現が不可欠な情報通信社会において、そのようなものが本当に作れるかどうかということを理論的に保証することは極めて重要であり、その成果は人類社会を支える基盤として長くインパクト与えるものである。また、さらに困難な $P \neq NP$ 問題を解決する上で優れた理論的知見を与えるものである。

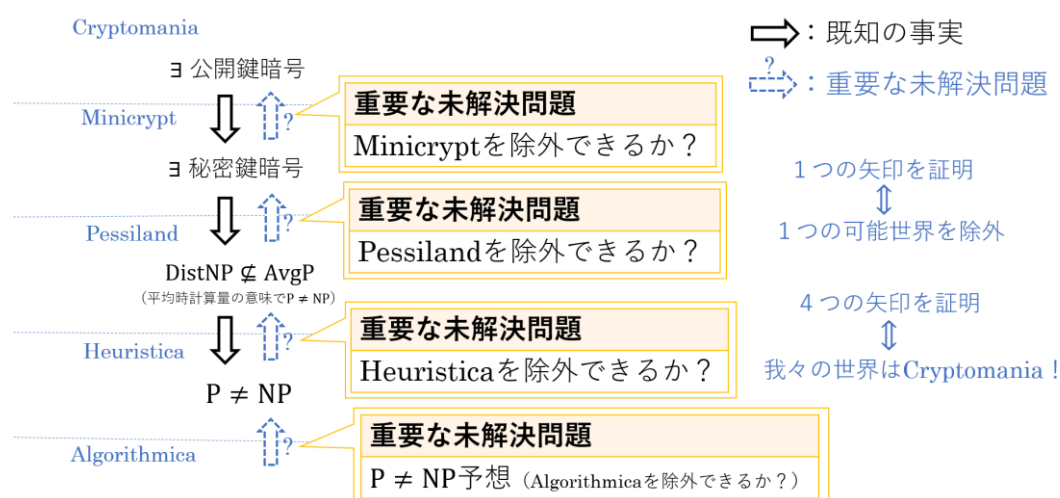


図8 メタ計算量理論による暗号可能性世界の探索（平原秀一氏の研究終了報告書より）

(3) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

1) 戦略目標(A)：未来の社会の価値へとつながる、様々な対象にある数理構造を提案する萌芽的、挑戦的な数学・数理科学研究

園田翔は、深層学習モデルの汎化能力の数理的理解に向けて、隠れ n 層全結合ニューラルネットワークを積分作用素（リッジレット変換）の形で表現し、そこに群構造をとりこんだ一般的な学習機械モデルの枠組みの上で解くことに成功した。これは数学・数理科学と情報

科学の連携・融合という目的にも合致する成果である。さらに、理論的な研究にとどまらず、生成 AI の世界的トレンドをいち早くキャッチアップし、大規模言語モデル (LLM) による数学的推論の自動化プロジェクト (AutoRes) を立ち上げ、定理証明支援系 Lean と LLM を組み合わせた数学定理自動証明システムの実装を達成した。これは、数理推論の高度利活用を進めることを目的とする本研究領域の戦略目標達成に貢献する成果である。

館知宏は、「オリガミ」工学分野において、オリガミは一枚の紙から 3 次元構造物を構成するという意味で曲面の微分可能でない等長変換の数学研究に帰着されるが、これに数理に基づいて曲面のシワを自己組織的に構成する変換アルゴリズムを提案、折りで実現可能な曲面の特徴付けに成功した。さらに、オリガミによって構成された構造物が機能として発現する自由な運動を離散保存力学系モデルによって記述し、その運動を不動点周りの準周期解、安定性・不安定性の分岐といった力学系の概念にすることも成功している。動的オリガミ理論として学術的な価値も高い。



図 9 (左) 内在的、外在的ターゲットから、折り目パターンを生成する
(右) 生成されたパターンを用いた曲線折紙 (館知宏氏の研究終了報告書より)

田中健一郎は、ユークリッド空間内の領域に有限個の点を最もバランス良く配置するという「最適点配置問題」を解決する数学理論とその算法の確立のため、点群配置の問題をその近似測度を求める最適化問題として定式化した。これを解くため、数理構造として「汎関数の凸性」や「近似凸性」に注目して、点の逐次追加による最小化問題を再生核ヒルベルト空間による数値積分誤差の最小化問題として定式化し、その収束解析に成功した。さらにこの方法の収束解析と加速法の開発を行い、既存手法より優れていることを示した。もう一つの手法として、最適輸送問題に現れる Wasserstein 勾配流に沿って流れる押し出し測度による方法を測度の汎関数に拡張し、その収束解析や収束を高速化する加速法を提案することにも成功した。

谷川眞一は、リンケージやロボットの動作計画や実現問題、物体の詰め込み問題や有限距離空間の埋め込み問題などの計算幾何学の諸問題を解決するアルゴリズムに対して、よりジェネリックな対象に着目し、その幾何学的対象に潜むグラフ剛性理論などの組み合わせ構造を利活用することで、計算幾何学におけるアルゴリズム理論の未解決問題を数多く解決

し学術的に貢献した。さらに工学への応用として、テンセグリティと呼ばれる棒材とケーブルで構成された特殊建築物の安定性解析や対称性を有するロボット隊列の分散制御に成果を得た。これは数理構造の利活用という本戦略目標の達成に貢献するものである。

二反田篤史は、深層学習モデルの背景にある最適化手法の最適解への収束性や潜在的な正則化にある数理構造に深く切り込み、ニューラルタンジェントカーネル (NTK) やニューラルネットワークの平均場理論の研究を通して、二層ニューラルネットワークの機械学習モデルに対して最適効率の学習可能条件を与えることに成功した。また、平均場ニューラルネットワークモデルの最適化を実現する凸解析理論を創出し、確率的最適化手法を新たに提案、その理論解析をさらに進めた点は数理構造活用という点でも大いに評価できる。本研究成果は、以下の機械学習分野のトップカンファレンスである ICLR2021 の Outstanding Paper に選ばれている。

Atsushi Nitanda and Taiji Suzuki. Optimal Rates for Averaged Stochastic Gradient Descent under Neural Tangent Kernel Regime. The 9th International Conference on Learning Representations (ICLR2021)、2021.

平井広志は、従来の離散最適化理論の枠組を大きく超えて、モジュラ半束など離散最適化の土台となりうる空間が CAT(0) 性を持つことを示した。同時に、変数付き行列のランクを求める非可換 Edmonds 問題に対して CAT(0) 性を用いた新しい多項式時間アルゴリズムを開発、それを一般化したアダマール空間上の最適化問題の有界性判定に関する凸解析理論の整備を行った。さらに、本理論に立脚した格子点上の離散凸解析アルゴリズムの開発や幾何学的群論や系統樹組み合わせ論、オークション理論への応用などにも成果があり、CAT(0) 性とその凸性を活用した新しい離散最適化理論を構築した。

吉田悠一は、機械学習やデータマイニングなどで普遍的に現れる最適化問題の最適解の近似アルゴリズムの性質をより深く理解するため、従来の最適化問題の近似性能とは一線を画する「アルゴリズム平均感度」という独自の新概念を導入した。平均感度は従来のアルゴリズムの性能評価に新たな一軸を付け加えるにとどまらず、アルゴリズムにリブシッツ連続性の概念の導入することとなり、学術的に独創的かつ卓越した成果である。また、最適化問題の解決アルゴリズムである最小全域木問題、最小カット問題、最大マッチング問題などに本概念を持ち込んで平均感度が低いアルゴリズムを構成することに成功しており、数理構造の活用の観点からも優れた成果を得た。

2) 戦略目標(A)：先進的なプロセス駆動型の数理モデルやデータ駆動型数理モデルの提案。また、それらの融合により、高い信頼性や効率化を実現するデータサイエンス研究

小槻峻司は、膨大なデータの利活用に向け「観測の価値」という新概念を導入し、局所変換アンサンブルデータ同化の高度化、非ガウスなデータ同化手法である局所フィルタなどの新しいデータ同化手法を提案、それを気象場の簡易モデルである SPEEDY など数値実験を行い、その解析精度の向上可能性を示した。さらに、深層畳み込みニューラルネットワー

クを用いた観測ビッグデータの情報圧縮にも取り組むなど、情報・数理の融合で新しいデータ同化の成果へつなげた。

小林亮太は、神経スパイク時系列データに対して、多次元イベント時系列データから相互作用を推定する点過程に基づく統計的モデリング手法（GLMCC）を開発し、神経スパイクデータから神経細胞間の相互作用の強さを高精度に推定することに成功した。さらに、機械学習の問題として定式化して、スパイクデータから神経細胞間の相互作用の強さを推定する技術（CoNNCT）を開発し、この技術を公開し数理構造の利活用を推進した。

柴山允瑠は、人工衛星や惑星探査機の従来の軌道設計における困難を、変分法や位相幾何学などの高度な数学を活用することで、Hill の問題・非等方 Kepler 問題の周期解や制限三体問題の周期解とヘテロクリニック軌道、準周期軌道が月探査軌道の設計・効率化や深宇宙探査軌道の設計に利用できることを示した。本成果は、衛星や探査機の位置精度の向上や運用コストの削減や目的地へ達するまでの時間短縮などの問題を大きく改善する新しい軌道の発見という点で学術的にも意義が深い。

薄良彦は、制御分野に現れる非線型自励系のラプラス領域理論をクープマン生成子のレゾルベント作用素で特徴づけ、クープマン作用素によるデータ解析研究の発展に貢献した。加えて、クープマン作用素解析で用いられる Dynamic Mode Decomposition (DMD) に対して、ノイズに強いロバストなアルゴリズムや固有値の推定解像度を高めるアルゴリズムを開発するなど実用性の高いアルゴリズムの整備を行い、これらを空調システムや電力ネットワークの制御に対して実応用するなど、数理構造の活用を具現化した。

早水桃子は、生物の進化の系譜を表現する「系統樹」を記述する数理モデル「系統ネットワーク」を数理構造として、離散幾何学的モデリングの理論を整備し、その解析を実現するアルゴリズムを開発、生命科学の諸問題への応用を達成した。理論面では、根付き二分系統ネットワークが一意的に直既約分解できること、また系統ネットワークに含まれる全域系統樹の集合がある条件を満たすアーク集合の直積と同型であることを示す構造定理を与えた。これは表現論にも通じる基盤的成果である。さらに、系統ネットワークにおける数理構造である全域系統樹の諸問題を解決する高速アルゴリズムを提案し、数理構造の利活用の数理基盤を構築した。

町田学は、近赤外イメージングの実現に向け、偏微分方程式（輻射輸送方程式）の係数決定問題という逆解析を数理構造として研究を推進。逆解析のための基盤となる近赤外の伝播を記述する 3 次元輻射輸送方程式の順問題に対して、斉次方程式の解析解の線形結合で近似解を求める 3 次元解析的離散方位法（3dADO 法）を開発した。この成果を含む輻射方程式に関して、町田氏は光学分野のインパクトジャーナルである Progress in Optics 誌から総説寄稿を依頼・掲載されている。また、解の計測からパラメータを推定する逆問題では、拡散方程式に対する逆 Ritov 級数の定式化による高次近似アルゴリズムの開発に成功した。さらに、その医学研究への応用として新生児低酸素性虚血性脳症に関する脳血液量の時間変化を予測する数理モデルの開発に成功した。これは数理と医療分野に新たな展開を生む

学際基礎研究として評価できる。

宮武勇登は、様々な現象を記述する微分方程式の数値計算で発生する誤差を確率変数でモデル化、その分散を単調増加制約のもとで推定するという統計学における単調回帰理論として定式化し、単調増加制約を区分的増加制約の緩和、変数間の相関の考慮、離散化誤差分散のベイズ推定手法を組み込むことで、信頼性の高い微分方程式の数値解法のUQを行う理論と実用的なアルゴリズムとソフトウェア実装を実現した。本技術は、値計算の信頼性を担保する成果として、数理構造の利活用を推進する基盤である。

3) 戦略目標(A)：数理構造や数学的概念を新しい情報として活用するための情報科学研究

稲永俊介は、文字列の持つ「反復性」と「規則性」という組合せ論的な数理構造を活用して、動的に変化する文字列データの高速処理アルゴリズム、時系列・グラフ・二次元画像といった多様なデータを「広義の文字列」と見なし、その数理構造を解明した。その結果、木型文字列を高速処理するアルゴリズムや時系列データの高速比較アルゴリズムの開発など、文字列処理分野における重要な成果を数多く得た。

大林一平は、トポロジーの概念を利用したデータ解析手法であるパーシステントホモロジー (PH) によるデータ解析に stable volume と呼ばれる新概念の導入に成功した。これを用いて、PH によるデータ解析で得られるパーシステントダイアグラムから実データの「穴」や「連結成分」の情報を取り出す手法（逆解析）のノイズ耐性問題が解決できることを数学的に示し、この概念を HomCloud に実装して材料科学や地質学などのデータへ適用した。新しい数学概念をソフトウェア実装し、世界的に開発競争が著しい PH 解析のソフトウェアの中における競争力を高めた。

小串典子は、Wikipedia のような協働デジタル空間の情報が自己組織的構造を、記事の複雑性と編集の活動度を測る再帰的指標を軸にした二部グラフ構造として数理モデリングした。その結果、二つの編集傾向のみを仮定した Wikipedia における協同的編集のミニマルモデルを構築、最も簡単な Wikipedia における編集者のモデルであることを確認した。この指標を用いて日本語版と英語版の Wikipedia の違いや類似点を明らかにするなど、データベースにある数理構造の利活用を達成している。

川本裕輔は、医療や生命などの多くの実験分野で広く行われている統計解析の正しさを検証する形式論理の開発と、検証のためのツールの研究開発を行った。従来のプログラム意味論では対応が難しい現実世界を、可能世界として説明し経験や信念を扱うという点に対して経験的知識を表現できる「信念ホア論理」なる新論理概念体系に加え、統計的因果推論を行うプログラムの正しさを記述・検証するための様相論理 (StaCL) を新しい数理構造として、この形式検証を実現するツール「StatWhy」の実装も行った。統計解析を実際に行っている研究者らにこの成果の展開が期待される成果である。

三内顕義は、深層学習の学習プロセスに、対称性を核とした深層学習と不変式論に関する新たな理論的枠組みを提案し、レイノルズ次元と Reynolds realization set という概念を

中心に、不変式論と対称性を用いた深層学習の理論構築に成功した。さらに、そのモデルが従来の深層学習モデルと比較して高い精度と効率性を達成することを示している。対称性という数理構造を従来の理論に取り込んで、対称性を持つデータ構造の利活用を推進する成果として本戦略目標の達成に貢献するものである。

本武陽一は、位相的データ解析・力学系と機械学習を適用したモデルパラメータ、自由エネルギーやハミルトニアン関数などを推定する手法を開発。そこからハミルトニアン・ニューラルネットワーク型の機械学習モデルで大自由度な勾配系の縮約ポテンシャルを学習して、機械学習と人間の協業を実現するための「解釈手法 AI」数理基盤を構築した。この数理の理論から応用までを一気通貫する基盤開発は、数理構造の利活用を推進するものである。

森岡博史は、大規模ネットワークに発現する動的機能構造の解明に向け、非線形独立成分分析（ICA）という独創的な理論の構築、それを基盤にした因果関係の抽出に関して、その数理構造の活用に関する研究を推進した。その結果、データの表現学習の同定性という観点で以下の三つの主な成果を得ている：(1) IIA（Independent Innovation Analysis）：動的非線型モデルの潜在ダイナミクスの表現学習、(2) CCL（Connectivity Contrastive Learning）：ネットワークグラフデータからノード間の潜在因果構造の抽出手法、(3) CRL：抽象表現学習手法の開発。因果関係の抽出は非常に挑戦的であり、適当な条件の下での正当性を示したことは優れた成果である。また、機械学習に関する非線形 ICA の効率に関する証明を与え、数理的な基礎研究を通して一般的な対象からでもその背後にある高次抽象的な因果表現を推定する手法を開発した。

山田俊皓は、確率微分方程式・後退型確率微分方程式による記述を用いて、高次元の線形・半線形二階の微分方程式の数値計算を、マリアバン解析および深層学習を用いて近似する手法（Deep Solver）を開発し、高次元偏微分方程式の数値計算でしばしば現れる「次元の呪い」の克服に成功した。特に、深層学習による解法に相性のよい形で弱近似（楠岡近似）を提案し、与えられた近似誤差を達成するための計算量の研究から、その計算の高速化にも成功した。確率微分方程式に関する数値計算法に対して理論的にその実効性を示した研究は少なく、この理論的成果は学術的に高く評価できる。

4) 戦略目標(B)：データの利用を画期的に促進させる計算高速化や高精度化を達成する研究

井元佑介は、遺伝子から単一細胞、細胞集団ダイナミクスというスケールの異なる階層が繋がって得られる生命の細胞分化構造の解明に向け、超高次元・小サンプル・小データセット・多ノイズ・非時空間構造のデータである 1 細胞遺伝子発現データの情報を利活用する数理基盤を構築した。まず、固有値収束定理や特異値分解を用いて非生物学的ノイズを既存手法よりも圧倒的に高いノイズ除去性能を持つ高速解法 RECODE を開発。次に、細胞分化構造の分岐を記述する位相的データ解析手法である V-Mapper、遺伝子制御連とワークを同定する統計的因果探索手法（GRN-LiNGAM）を開発。最後に、細胞遺伝子発現データから組み合わ

セホッジ分解に基づいて細胞の分化の分岐構と遺伝子発現ダイナミクスを抽出する解析手法 CellMap を開発した。こうした生命科学データの利活用のソフトウェアパッケージを用いてマウス原腸胚形成データ、マウス内分泌細胞分化誘導系の 1 細胞遺伝子発現データ、ヒト始原生殖細胞誘導データ、始原生殖細胞分化誘導系の 1 細胞遺伝子発現データへ適用し、その生命科学分野の課題への有用性を確認した。

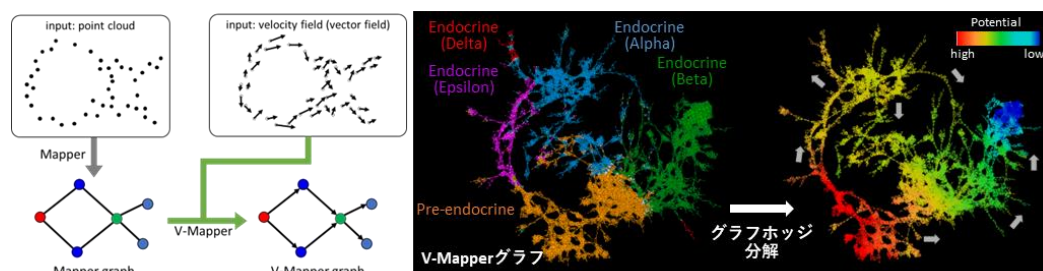


図 10 V-Mapper (左) と 1 細胞遺伝子発現データへの適用 (右)

船富卓哉は、3 次元のヒト胚子の二次元断層スライスの少ない点情報から整合的な 3 次元モデルを再構成という課題に取り組んだ。二枚のスライス上の点の近傍での「ゆがみ」の補正を乗法群の作用として捉え、多様体上の指数写像の線形和として表現することで、従来の加法群に基づく線形回帰モデルでは実現できない効率的な補正を可能にした。さらに、多くのスライスの歪み補正全体として最適化するため、複数のスライス間のグラフ対応関係を用いて、大域的に最適化する手法を開発、逐次的な局所的スライス補正によって誤差が蓄積して 3 次元像全体のゆがむという課題も解決した。ヒト胚子スライス標本は現在では手に入れることが不可能な貴重なものだが、これを 3 次元物体としてデジタル上で再現したことは、発生生物学の研究に貢献するものである。

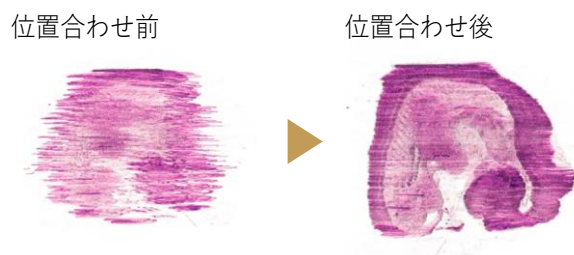


図 11 乗法群非可換回帰モデルと最適化によるヒト胚子スライスデータの再構成

細江陽平は、対象の数理モデルにおける未知部分を事前情報や計測データに基づいて非定常確率過程の分布として補完し、制御の最中に時々刻々と得られる計測データを用いて、非定常確率過程の各時刻での分布を決める重みパラメータをオンラインで推定、それを制御器の挙動を決める数理モデルベース適応学習制御を実現した。確率過程を数理モデルとして利用し、定性等の性質を特定の条件下で保証しつつ、曖昧さの程度に応じて制御性能を向上させられる自動車の自動制御を実現する基盤である。

前原一満は、大規模オミクスデータから抽出されたクラスタ間のネットワークをフローとしてデータの動的に軌跡を推定するため、数理構造として「ベクトル場のホッジ分解」を取り上げ、細胞・組織スケールの大規模オミクスデータから動的な情報を抽出、データの背後に潜む定性的知識を獲得する手法を提案した。これにより、次世代シーケンサー技術を駆使した単一細胞レベルのトランスクリプトーム・エピゲノム解析における、分子の動態をモデリングする基盤技術を開発し、微少な組織切片のエピゲノム解析手法を確立した。大規模オミクスデータのサンプリングから潜在するダイナミクスデータを抽出する ddHodge を開発した。加えて、ホッジ分解を拡張したグラフ上の層を利用することで、大規模データに効率的に適用できる次元圧縮を実現した。

間島慶は、量子力学の公式と数式の変換により機械学習アルゴリズムに高速化に取り組んだ。その結果、従来脳波の入力から予測（推論結果）の出力までに 10 秒程度の時間を要する機械学習アルゴリズムに対して、計算時間を 0.1 秒以下まで抑えることに成功した。この手法をもとに、心の中に想像した画像（想起画像、メンタルイメージ）を脳信号から読み出し、画像として可視化する機械学習アルゴリズムを開発し、従来の類似技術では難しいとされるメンタルイメージの復元を実現可能にした。量子計算のアルゴリズムを利用して、機械学習計算の大幅な高速化を実現している。

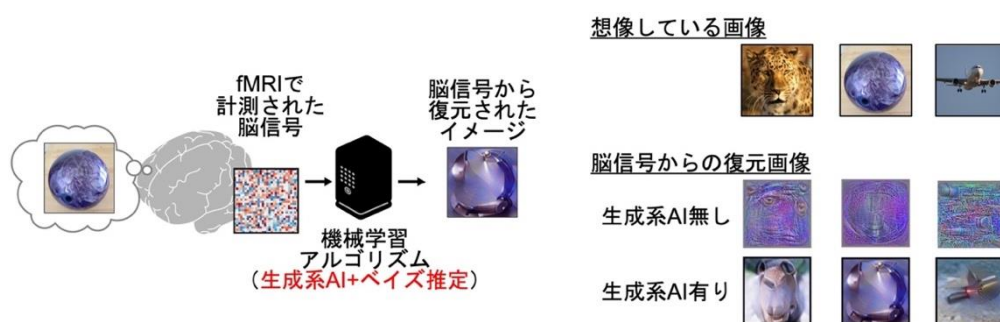


図 12 心の中に想像したイメージを可視化する技術の概略（左）と可視化結果の例（右）

5) 戦略目標(B)：情報の高度な利活用に資する数学・数理科学・情報科学研究

河瀬康志は、複数のエージェントが自身の効用を最大化するよう行動するマルチエージェント環境で、公平性・効率性・耐戦略性の性質を同時に満たす制約付き資源割当問題を考えた。これに対して、配分メカニズム存在のための必要十分条件が、制約が一般化マトロイド構造をもつことであるという基本定理を示した。また、これらの性質をもたない「くじ」や「お金」による公平割当などの現実的な割当メカニズムの数理構造も明らかにした。さらに、フードバンクにおける食料の公平分配のような動的環境での公平割当メカニズム設計問題にも取り組み、最悪の状況に対する漸近的に最適な性能をもつアルゴリズムの開発に成功した。制約付き割当問題は社会的資源の偏在の緩和を図るものであり、多様な割当メカニズムの性質を明らかにしたことは、情報の活用を加速・高度化の基盤として高く評価できる。

横井優は、人々の選好を考慮したマッチング問題に対して、その曖昧性や実問題に現れる様々な制約を表現できる一般的なモデルの数理構造を調べ、選好に同順位を許す拡張モデルにおける「安定マッチングで割当人数の下限を満たすものを計算する問題」や「安定マッチングのペア数が最大ものを求める問題」といった NP 困難な問題の近似アルゴリズム設計に成功した。そのほか、両側選好モデルにおけるサイズ最大ポピュラーマッチング問題が多項式時間可解であることや、マトロイド制約付きの片側選好モデルにおけるサイズ最大マッチングの中でポピュラーな解を計算する多項式時間アルゴリズムも設計した。様々な人々の選好を考慮した社会的にニーズの高いマッチング問題に対して、その数理構造から効率的なアルゴリズムを与えたことは数理構造活用の戦略目標達成に貢献する成果である。

(4) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

山田俊皓の研究成果は、経済分野への貢献が期待される。リーマンショック以後、大手銀行も破綻する可能性があることが認識されて、金融機関のリスク管理に対する国際基準が強化され、国際的な金融機関は XVA (評価調整) と呼ばれる量を計算する必要があるが、そのためには理論的には極めて高い次元の非線形偏微分方程式を解く必要があり、こうした問題解決に貢献するものである。

河瀬康志や横井優らの研究成果は、保育園への入園希望者の割当、研修医の病院への医師配属、学生を学校に割り当てる問題、くじやお金を用いた公平割り当て、フードバンクにおける食料の公平分配といった極めて社会的なニーズが高い割り当ての問題の背後にある数理構造を明らかにしたものである。これらの成果は数理構造の利活用により社会的な課題の解決に貢献するものである。

柴山允瑠は、JAXA などで開催されるシンポジウムで継続的に発表し、衛星開発の軌道工学の専門家との研究交流を継続している。今後も本研究領域の成果が現場の中で活かされることが期待される。本格的な数学理論の宇宙開発への取り組みの継続は、中長期的には社会的な意義も大きい。

大林一平は、PH 解析の伝道師として他分野との連携研究や企業コンサルティング、また PH 解析の教科書を執筆するなどアウトリーチ活動を積極的に行っている。開発した HomCloud は Web 公開 (<https://homcloud.dev/>) されており、逆解析が可能な PH の基本ソフトウェアとして産業分野からの利用も高く、今後このソフトウェアを通じて材料科学分野での貢献が期待できる。

本武陽一が開発した解釈可能 AI を用いた物理モデリング枠組みは、国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS) や大強度陽子加速器施設 J-PARC といった材料科学分野の国立研究所のみならず輸送機器メーカーや SNS マーケティング企業などの民間企業にも注目され、共同研究プロジェクトを立ち上げるに至っている。

館知宏は、本研究課題の成果を活かし、美術家や大学の学生、共同研究者など多様な分野の人を巻き込んでアートと数理を横断する国際的な活動を実施した。数学理論から応用、そ

の社会発信まで非常に高い視点で研究の国際的なコアとなっている。本さがけ研究終了後も継続して開催されており、その社会的貢献は大きい。

- ・ [Connecting Artifacts つながるかたち展 01](#) 2021 年 9 月 18 日～11 月 28 日（東京大学駒場博物館）
- ・ [Connecting Artifacts つながるかたち展 02](#) 2022 年 10 月 27 日～11 月 13 日（東京大学駒場博物館）
- ・ [Connecting Artifacts つながるかたち展 03](#) 2023 年 9 月 30 日～11 月 26 日（東京大学駒場博物館）
- ・ [Connecting Artifacts つながるかたち展 04](#) 2024 年 10 月 5 日～10 月 27 日（科学技術館）

小槻峻司は、データ同化の効果を最大限にする観測地点の最適化手法の提案、SPEEDY での有効性検証を経て、鉄道総研との雨量計測計のセンサー位置最適化という共同研究に繋がった。本成果は数理構造の活用観点から高く評価できる。

小林亮太は、新しい点過程モデルを導入することで、Twitter(現 X)のフェイクニュースの拡散パターンを高精度に予測することに成功し、イベント内容（映画の公開、サッカーの試合など）ごとの人々の興味の変化に見える時間スケールの違いを明らかにした。この手法を発展させて、新型コロナウイルスワクチン接種期間中の Twitter(現 X)における「ワクチン」に関する日本語ツイートの解析を行い、その成果をプレス発表し、注目を浴びた。新型コロナウイルスのような社会的にも関心が高いテーマにおけるデータの解析を、自身の開発した手法で果敢に取り組み、興味深い成果を得たことは社会的な貢献として高く評価できる。

早水桃子は、研究成果を英語で解説する YouTube 動画を作成した。コロナ禍にあって、この活動は非常に反響を呼び、SNS による研究者のアウトリーチのあり方について新しい可能性を示した。

石本健太が明らかにした生命流体における数理構造である「奇弾性」に関する成果のプレスリリースは、Altmetric スコアで上位 5%に位置するなど社会的インパクトが大きい。

(5) 領域内外の連携から生まれた新しい研究成果や研究展開

稲永俊介は、吉田悠一が提案する「平均感度」に関する研究成果に触発され、データ編集に対する圧縮アルゴリズムの頑健性を定量評価する「圧縮感度」と呼ばれる新指標の提案に成功し、それに基づいて圧縮アルゴリズムの性能を俯瞰的に再評価、それを活かして高速パターン検索可能な圧縮データ構造を見いだした。

小槻峻司は、新型コロナウイルス感染動態や脳科学データの時系列解析手法の開発にも取り組み、また舩富卓哉が提案する数理構造（幾何学的変換場の最適化）の展開を試みるなど、その活動範囲を拡大させた。その一つの果実として、領域内のさがけ研究者のつなが

りを最大限に活かして、内閣府ムーンショット型研究開発プログラム目標 8 の PM として採択され新しい研究をスタートさせるなど、本研究領域で得た成果を社会的課題解決に迅速に展開した。

早水桃子、井元佑介、前原一満、船富卓哉らは、領域内連携を積極的に進めて生命科学分野、細胞分化の軌跡推定のためのデータ解析の問題にも取り組み、当初計画を超えた新しい研究展開を図り、その後に JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「予測数学基盤」領域に井元佑介が研究代表者として前原一満を主たる研究者に加えて「1 細胞データ科学を介した融合数理の革新」なる課題で採択された。新しい研究をスタートさせるなど今後の展開が期待される。

吉田悠一は、自らが提案した数理構造である平均感度の展開に積極的に取り組み、他さきがけ研究者をインスパイアし続けた。井元佑介とエピゲノム解析に関する共同研究もスタートするなど、その研究の広がり理論・応用双方に大きな広がりを見せた。

船富卓哉は、小槻峻司とともに気象観測におけるデータ駆動型での移流モデリングに取り組み、気象学における雲データから移流する様子を再現する問題などにも成果を得た。前原一満とは、4 次元（3 次元空間＋時間）空間オミクス解析への応用の研究を推進した。また、領域間連携として、さきがけ「複雑流動」領域（研究総括 後藤 晋）の佐藤慎太郎との共同研究が開始された。

町田学は領域間研究にも積極的に関与した。大林一平とともに質量分析イメージングに発展させ、マウスの脳におけるエントロピーの空間分布についてパーシステントホモロジーを適用した。山田俊皓とともに自身が開発した逆級数の手法を数理ファイナンスに応用した。田中健一郎とともに、自身の輻射輸送方程式の数値解法を代用電荷法に適用する研究を行った。いずれも本研究領域発の共同研究として興味深い成果である。

柴山允瑠は、舘知宏とともに折り紙に現れる写像の中に現れる面積保存写像や conformally symplectic な写像に対して、KAM 理論などが適用し、そこに不変曲線が存在するという理論的成果を得た。これは折り紙の数理構造を解明する研究として興味深いものである。

細江陽平は、田中健一郎との領域内連携による自動制御の実現に利用可能な確率過程のクラスの一つである非定常確率過程に関する共同研究を進めた。計測データを用いて構成される 2 次計画問題をオンラインで解くことにより、重みパラメータの最適近似値を逐次的に求めることが可能であることを数値例で確認した。本研究成果は国内特許出願に至っている。

間島慶は、JST さきがけ「多感覚システム」領域の小山佳との共同研究では強化学習モデルを用いて、サルの変動の傾向を行動データから定量的に評価するプログラムを作成・提供し、このプログラムを利用した研究が *Nature Communications* に出版されている (Oyama, Majima et al., *Nature Communications*, 2024: JST ニュース 2024 年 11 月号)。このほかにも、JST 創発事業合田パネルの佐藤達雄との共同研究では、二光子顕微鏡によって撮像さ

れた神経活動の画像データから細胞の同定を行うプログラムを作成・提供した。マウスの軸索の学習による変化を追跡する研究で用いられ、共同研究として出版されている (Abe, Kambe, Majima et al., *eLife*, 2024)。

(6) 本研究領域に続く研究資金の獲得状況

本研究領域での研究が評価され、さきがけ研究をさらに発展継続させる研究資金を獲得したさきがけ研究者は多い。以下には、その中でも規模の大きい研究資金を獲得している研究者の状況を挙げる。

- ・ JST 創発的研究支援事業 6 名 (石本健太「川村パネル」、小林亮太「後藤パネル」、早水桃子「川村パネル」、井元佑介「川村パネル」、平原秀一「八木パネル」、舘知宏「後藤パネル」)
- ・ 内閣府ムーンショット型研究開発制度目標 8 小槻峻司 (PM、PI)、薄良彦 (PI)、井元佑介 (PI)、船富卓哉 (PI)
- ・ JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「予測数学基盤領域」井元佑介 (研究代表者)
- ・ JST 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「未来数理科学領域」森岡博史 (研究代表者)

そのほかの研究費の一覧は以下の通りである。

- ・ JST 戦略的創造研究推進事業 CREST 主たる研究者 (前原一満、船富卓哉)
- ・ JST ASPIRE 分担 (舘知宏)
- ・ JSPS 二国間交流事業 代表 (薄良彦)
- ・ 科学研究費学術変革領域(A) 分担 (石本健太、稲永俊介、森岡博史)
- ・ 科学研究費学術変革領域(B) 代表 (舘知宏)
- ・ 科学研究費 代表・分担 (石本健太 (挑戦的研究 (萌芽))、稲永俊介 (基盤研究 (B))、小槻峻司 (挑戦的研究 (萌芽))、小林亮太 (基盤研究 (B))、薄良彦 (基盤研究 (B))、平井広志 (挑戦的研究 (開拓))、吉田悠一 (基盤研究 (B))、川本裕輔 (基盤研究 (B))、田中健一郎 (基盤研究 (B))、平原秀一 (挑戦的研究 (開拓))、柴山允瑠 (基盤研究 (B))、園田翔 (挑戦的研究 (開拓))、谷川眞一 (基盤研究 (C))、細江陽平 (基盤研究 (B))、間島慶 (基盤研究 (B))、宮武勇登 (基盤研究 (B)))

7. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

本研究領域では、数学・数理科学者と情報科学のさきがけ研究者の連携・融合研究を通して、数学・数理科学といった抽象的で高度な「目に見えない」数学的な構造が情報科学と結びつくことで、「目に見える」我々の実社会の課題解決へと還元して活用する流れを領域全体で促す様々なマネジメントを行った。まず、年に2回の領域会議においては、担当アドバイザーミーティングをその間に実施し、さきがけ研究者に対して研究の進捗の確認と評価や指導を切れ目なくきめ細かく行うことができた。また、新型コロナウイルス感染症のパンデミックという環境の中でもオンライン・対面でサイトビジットが実施でき、所属機関の理解と支援が得られることで、研究が円滑に進むようにできた。加えて、領域会議実施のたびに PowerPoint で1ページの「更新型成果概要シート」の資料を研究計画の研究進捗にあわせて内容を更新させ、現在の研究進捗状況を自らが意識し、研究終了時には研究計画の成果を広く発信できる資料とした。更新型成果概要シートは毎回研究総括やアドバイザーにチェックいただき、適宜内容について指導を行うなどした。領域会議における成果報告では、無意識のうちに前回からの差分の成果を発表するなど局所的な成果を強調しがちであるが、このシートの作成とその内容指導を通じて、常に個々の研究者の研究計画の全体像での位置づけを明確にするようにしたことは、全体として研究目的の達成において効果があった。課題終了一年前の領域会議では、研究計画の最終的な成果を見据えた研究の流れを促し、課題終了後の事後評価や成果報告会の開催などを通じて、研究成果の発信や評価を適切に行えた。

本研究領域の特徴は、数学・数理科学の研究者と情報科学の研究者の共同や融合、連携を推進することを目指している点であるが、これを実現するために行った様々な活動も効果があったと考えている。新型コロナウイルス感染症パンデミックの影響で対面での活動が強く制限された中でもさきがけ研究者間の連携や議論が進むように、さきがけ数理構造勉強会を行った。これは、あるさきがけ研究者の提案する数理構造の研究内容を多くのさきがけ研究者が深く理解する契機となり、その後の共同研究やその内容にインスパイアされた研究が生み出された。また、数理構造の活用先として共通性が高い研究者をグルーピングして共同の活動を促したことで、その後の共同研究の創出が行われた。その結果として、さきがけ研究者らによるチームアップが行われてムーンショット型研究開発事業（小槻峻司）や戦略的創造研究推進事業 CREST（井元佑介）などの大型研究費の採択につながっており、その効果は非常に高かったと考えている。また、この連携促進活動を通じて、情報科学と数理科学の研究者の自然な協働が成立したことは本研究領域の目的でもあり、この面での効果も高かった。こうした活動のマネジメントのノウハウは、2024 年度に発足した本研究領域に関連が深い CREST「予測数学基盤」領域（研究総括 小谷 元子）やさきがけ「未来数理科学」領域（研究総括 荒井 迅）にも引き継ぐようにしたいと考えている。

本研究領域内部の連携にとどまらず、戦略的創造研究推進事業の他領域、周辺諸分野の研究者、海外研究者との連携のためのマネジメントも積極的に行った。同じ戦略目標を共有する JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「数理的情報活用基盤」領域（研究総括 上田 修功）、ACT-X「数理・情報」領域（研究総括 河原林 健一）との連携は、同分野の若手研究者コミュニティ形成に貢献した。また、さきがけ「複雑流動」領域（研究総括 後藤 晋）とのワークショップの開催では、領域をまたいだ共同研究が生まれている。未解決ワークショップでは、数理科学者の集団が周辺諸分野の未解決問題を解くという活動を通じて、数理構造の活用を多いに促進すると同時に、分野横断的な研究グループの形成にも貢献した。国外にも目を転じて、シンガポール科学技術研究庁（A*STAR）のワークショップの開催は今後の本分野での活動を広げるものである。これらのことは、本研究領域のマネジメントにより広い波及効果が得られたと考えており、今後の展開が期待される。

社会との連携やアウトリーチも重要な活動と位置づけて、本研究領域のマネジメントを推進した。これまで、本研究領域に関連する数学関連領域から継続して行われてきた「数学キャラバン」では、ダイバーシティに配慮して、従来の男女の若手数理科学研究者講演だけでなく、数理科学を用いた企業研究者による企業での研究事例紹介の講演をアレンジした。これにより、数理・数理科学の「数理構造」の情報活用など、幅広い利活用の姿を高校生に示すことができた。これは開催高校からも高い評価を得ている。数理科学や情報科学は、現在の我々の社会において必要不可欠な要素となっており、数学や情報を学ぶ若い世代にその生き生きとした姿を見せられたことはよかったと考えている。「数学セミナー」での連載は、「数学と情報は違う分野」という先入観を打ち破り、伝統的な数学に興味のある本雑誌の読者に対して、数学のイメージを広げることに成功したと信じている。また、学術向けの教科書や総説記事の出版で、それぞれの分野の専門家に向けた本研究領域の研究成果を学術の発展に還元できたと考えている。こうしたアウトリーチ活動全体に対するマネジメントは研究者にとっては、自身の研究の社会的意義を意識させる契機となり、アウトリーチを受ける側にとっては数学や情報のイメージを豊かにすることを促し、これからの未来の社会を支える若い人々へのメッセージを送ることに貢献したと考えており、これらの活動が今後も関連領域に引き継がれるよう強く望む。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

本研究領域では、上記(1)のマネジメント活動を通じて、戦略目標で掲げられた二つの達成目標(A)(B)を実現するべく領域活動を実施してきた。その結果、多様な重要で興味深い研究課題をとりあげて、それぞれの研究課題に取り組むことで数多くの研究成果が上がっている。個々のさきがけ研究者の研究課題からみた戦略目標に対する貢献の詳細は「6. (2) (3)」において詳述したが、以下ではその総括として達成状況を俯瞰したい。

達成目標(A)「数学・数理科学と情報科学の連携・融合による、数学の発想を取り入れた革新的な情報活用手法の創出に資する理論及び技術の構築」の観点では、1)様々な対象にある新しい数理構造の提案と活用、2)先進的な数理モデルの提案とデータ科学研究、3)数理構造や数学概念を活用する情報科学研究の三点に着目して研究を推進した。

1)様々な対象にある新しい数理構造の提案と活用の観点について、各研究者が対象とした問題とそれに対して提案した数理構造は以下である。

研究者	対象	数理構造
園田翔	深層学習モデル	深層構造の積分方程式表現と群構造
舘知宏	折紙工学	折りの幾何構造の巨視的視点と自己組織化
田中健一郎	最適点配置モデル	汎関数の凸性、近似凸性
谷川眞一	物体の詰め込み問題	グラフ剛性理論・組み合わせ構造
二反田篤史	深層学習モデル	ニューラルネットワークの平均場理論
平井広志	離散最適化問題	CAT(0)の凸性
吉田悠一	最適化アルゴリズム	アルゴリズムの平均感度

二反田篤史と園田翔は近年発展と社会への波及が著しい機械学習やAIの背後に潜む数理構造の研究に取り組み、互いに異なる独創的な切り口の数理構造を提案し、深層学習モデルの持つ深層性や汎化性能の解明を通じて、より信頼性の高い深層学習モデルの基礎とした。田中健一郎と谷川眞一は、点の最適配置問題や物体の詰め込み問題といった幅広い応用を持つ課題の中に最適化汎関数の凸性やグラフ剛性理論と組み合わせ構造を導入して、その数理構造の理論的理解に貢献した。平井広志と吉田悠一は、グラフ構造などの離散的な数理構造を背景に最適化を行う問題やそれを解決するアルゴリズムに対して、CAT(0)の凸性や平均感度という新しい数理構造を導入してその数学的な性質を解明、応用可能性を示している。また、舘知宏は、折紙工学という我が国発の研究分野を牽引する研究者として、折り構造に潜む幾何学的性質やその力学系的性質を数理構造として提案することで、希望通りの折り方を実現する手法を提案その活用を可能にした。

2)先進的な数理モデルの提案とデータ科学研究の観点について、様々な対象に対して以下のような数理モデルが提案され、モデルに内在する数理構造の活用が図られた。

研究者	対象	数理モデル
石本健太	流体中の微生物の運動	奇弾性による能動的な生物の運動モデル
小槻峻司	気象現象	局所フィルタによる非ガウスアンサンブルデータ同化モデルの提案

小林亮太	神経スパイク時系列データ	点過程に基づく統計的モデリング (GLMCC) の提案
柴山允瑠	人工衛星の軌道設計	変分法や位相幾何学に基づくハミルトン力学系モデルの解析
薄良彦	電力・空調ネットワーク制御問題	生成子のレゾルベントの特徴付けによるクーブマン作用素モデル
早水桃子	生物の進化系統樹	系統ネットワークを用いた離散数学モデル
町田学	近赤外線イメージング	複写輸送方程式モデルとその逆解析
宮武勇登	微分方程式の数値解法	誤差の確率変数化による不確実性定量モデル

このように数理モデリングは多彩な対象に対して提案がなされており、そこで利用される数理構造も多種多様であることがわかる。いずれの研究成果も応用上の重要かつ解決が困難な問題に取り組むことで、生命現象における新しい数理概念の発見と活用（石本・早水）、不確実性の定量化を含む新しい計算手法の提案とその実装による活用（小槻・小林・宮武）、数学の解析的な手法の本格的な応用（柴山・薄・町田）など、数理構造を通して情報を活用しつくす数理共通基盤が多数見出された。

3) 数理構造や数学概念を活用する情報科学研究では、以下のような数理構造や数学概念が活用される情報活用基盤が成果として得られた。

研究者	数理構造	情報活用基盤
稲永俊介	文字列の組み合わせ構造	文字列データ高速処理アルゴリズム
大林一平	パーシステントホモロジー	逆解析を可能にするトポロジカルデータ解析ソフトウェア
小串典子	二部グラフ構造	協働デジタル空間の解析アルゴリズム
川本裕輔	信念ホープ論理・様相論理	統計的因果推論の正しさの形式検証アルゴリズム
三内顕義	対称性と不変式論	深層学習の高度化
本武陽一	位相的データ解析・力学系	解釈可能 AI モデル構築
森岡博史	非線形独立成分分析	高次抽象的なデータの因果推定アルゴリズム
山田俊皓	確率微分方程式・マリアバン解析	深層学習を用いた高次元偏微分方程式の解法

いずれの研究成果も、高度な数理構造を導入してそれをもちいて様々な対象に対して有効なアルゴリズムやソフトウェアが提供されている。大林一平（パーシステントホモロジー解析）と川本裕輔（統計因果推論の形式検証）は、これらの成果をソフトウェアとして構築している。三内顕義や山田俊皓は対称性やマリアバン解析など数学の理論を活用して、新しいアルゴリズムを提案した。小串典子、本武陽一と森岡博史は、複雑なシステムに対する指標の導入、新しいAIモデリングのパッケージおよび因果推定に成果があり、いずれも本研究領域が提案する情報学的な観点での成果創出が達成された

以上の 1)～3)の成果からわかるように、それぞれの研究者は数学・数理科学あるいは情報科学をバックグラウンドにする研究者でありながら、本研究領域での活動を通じた成果は多様な観点にまとめられていることが特徴的である。こうしたことを踏まえて、多様な対象に対して、数学・数理科学と情報科学の連携・融合による、数学の発想を取り入れた革新的な情報活用手法の創出に資する理論及び技術の基盤は構築されたと考えている。

達成目標(B)「様々な分野や産業界における情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術の創出」の観点では、4)データの利用を画期的に促進させる計算高速化や高精度化を達成する研究および、5)情報の高度な利活用に資する数学・数理科学・情報科学研究において成果があった。

4)データの利用を画期的に促進させる計算高速化や高精度化を達成する研究では、以下のような成果が得られた。

研究者	利用対象	成果
井元佑介	1 細胞遺伝子発現データ	高速ノイズ除去(RECODE)、位相的データ解析手法(V-Mapper)、統計的因果探索手法(GRN-LiNGAM)
船富卓哉	ヒト胚子断層スライスデータ	乗法群スパースモデリング再構成手法
細江陽平	自動車自動制御	非定常確率過程による高速適応学習制御器
前原一満	大規模オミクスデータ	ホッジ分解に基づくダイナミクス抽出(ddHodge)
間島慶	脳波データ	量子インスパイア高速計算法

本カテゴリでの成果はいずれも、生命科学の高次元かつ大規模なデータ（1細胞遺伝子発言データ、大規模オミクスデータ）や複雑データ（ヒト胚子スライスデータ）、加えてノイ

ズなどが含まれるデータ（自動車運転制御、脳波データ）に対して、効果的なノイズ除去やノイズの取り扱いを含めた数理構造化によってそれらの課題を解決し、高速に解析を進めるアルゴリズムや手法が提案されて活用基盤として提供されている。

5) 情報の高度な利活用に資する数学・数理科学・情報科学研究の観点では、セキュリティ、個人情報保護、匿名化、情報の非対称性・偏在の緩和など、経済的・社会的課題に対して今後基盤となる数理構造の研究が推進されて、以下のような成果を得ている。

研究者	数理構造	活用先
河瀬康志	離散最適化(制約つき 割当問題)	情報の非対称性・偏在の緩和
平原秀一	メタ計算量理論	セキュリティ、個人情報保護
横井優	離散最適化(選好つき マッチング問題)	情報の非対称性・偏在の緩和

以上の 4)、5) の成果では、生命科学・自動車の自動運転のような複雑かつノイズを含む大規模データを効果的に処理するための数理構造の提案とその利活用のためのアルゴリズム、ソフトウェアが開発された。またマッチング問題や暗号体系の構築など、資本の公平配分や安全安心な情報社会の構築など、我々の未来の社会において重要度が高い課題を支える数理構造の理論研究が進められた。これらは情報の活用を加速・高度化する次世代アプリケーション基盤技術である。

これらの研究を総合して、戦略目標(A)(B)ともに十分な成果が得られたため、本戦略目標の全体として戦略目標は達成されたと考えている。

(3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性（研究開始以前と事後評価時点の比較を念頭において）

「1. (1)①概要」において、本研究領域の設置根拠となった戦略目標を達成することで実現されることの意義として、次の4つの観点が述べられている。

- 1) データ駆動型アプローチと現象のメカニズムを抽出する数理モデル型アプローチのそれぞれの強みを相補的に生かしながら連携・融合すること。
- 2) 実社会の情報を活用し尽くすことのできる数理的情報活用基盤の創出すること。
- 3) 様々な科学分野や産業界における情報活用手法のパラダイム変換をもたらすこと。
- 4) 数学・数理科学による情報科学自体の飛躍的な革新や高度な数学を実社会の情報活用に応用できる人材の輩出。

これらを踏まえて、本研究領域での成果についてまとめると以下ようになる。

1)については、数理構造を活用する理論的基盤として、プロセス駆動型の数理モデルの構築はこれまでの科学技術の発展に貢献してきたが、21 世紀に入って急速に進歩した機械学習や AI などに代表されるデータ駆動型の数理モデルも重要になっている。

二反田篤史や園田翔、三内顕義らはこのデータ駆動型数理モデルの解析という観点で、数学・数理科学の視点を持ち込みその構造を明らかにした。これは数学・数理科学から情報科学分野への強い貢献となっている。

プロセス駆動モデルとデータ駆動モデルを融合する上での研究も活発に行われ、宮武勇登が提案した微分方程式の誤差成長を不確実性定量するための基礎理論から、気象現象の予測・制御、自動車運転制御などの課題に対して、データ同化（小槻峻司）や確率制御（細江陽平）などの高度な数理を駆使したプロセス駆動モデルとデータの連携・融合研究にも成果があった。

数学・数理科学と情報科学の成果を組み合わせる新しい展開を生んだ研究も見逃せない。山田俊皓はマリアバン解析と機械学習を組み合わせることで、「次元の呪い」のため従来の手法では解けなかった高次元の偏微分方程式の数値解法を実現した。本武陽一は位相的データ解析と機械学習を融合させて、解釈可能な AI モデル作成に道筋をつけた。舩富卓哉は、乗法群の構造をスパースモデリングに取り込むことで、座標変換の誤差最小化に基づく新しいデータ解析手法を提案した。大林一平は、自らの提案した新しい数理概念（stable volume）にもとづいて、独自開発するパーシステントホモロジーソフトウェアの独自性を高め、世界のユーザーに選ばれるソフトウェアとなった。柴山允瑠は、ハミルトン力学系に対する変分構造という数理構造を活用して、軌道設計を実現するシミュレーション研究をおこなった。我が国の宇宙開発に数学者が今後参画して画期的な成果につながることを期待できる。

2)については、周辺諸科学や産業などに現れる課題で現れるデータはノイズ、大規模化、高次元化が進み、単純な機械学習モデルやプロセス駆動モデルでは記述できないほど複雑になっている。こうした特徴を持つ生命科学で得られる 1 細胞遺伝子発現データや大規模オミクスデータ、脳科学データ、大規模文字列データなどに対して、数学・数理科学者（井元佑介・小林亮太）としてまた情報科学者（稲永俊介・小槻峻司・細江陽平・前原一満、間島慶）が様々な数理科学・情報科学的アプローチから実際にデータを「利用しつくす」アプリケーションが多数提供された。

社会科学や実験科学など、従来の活用先にはなにくかった分野の諸問題解決に貢献する数理構造の提案と活用も行われた。川本裕輔の提案した統計的推論の形式検証の理論とその検証ソフトウェア群は、生命科学系など統計的な処理を主体として実験が行われる分

野の信頼性を担保することに貢献する。また、小串典子の協働的デジタル空間の情報を捉える指標の提案、河瀬康志や横井優らによる様々な条件かでのマッチング最適化問題の理論は、今後のこうした課題解決の数理基盤として広く活用されることが期待される。

3)については、石本健太が提案した「奇弾性」やそのパラメータとして与えられる「石本定数」は、流体中を移動する微小生命体を扱う生物物理の基本的概念となっており、この成果は高い評価を受けている。平原秀一が提案したメタ計算量理論は、数学の未解決問題として有名な $P \neq NP$ 問題の解決に近づく計算機科学分野重要なマイルストーンとして国際的にも高い評価を受けた。平井広志が研究した $CAT(0)$ 空間の凸性の数学理論や、谷川眞一の取り組んだ計算幾何学における剛性理論の組み合わせ構造の研究、早水桃子の系統ネットワークの研究は、いずれも離散幾何学における重要な成果として評価されている。森岡博史の提案した非線形因果推定法は、従来の因果推定を超える手法として注目を浴び、継続して「未来数理科学」領域のさきがけ研究者として、この手法をさらに展開することになった。

4)については、数学・数理科学による情報科学自体の飛躍的な革新という観点では、あらためて列挙するまでもなく、312本にもおよぶ学術論文やコンファレンスプロシーディングスへの採録がなされ、国内外の学術的な受賞も多数得た。また、本研究領域に採択された多くのさきがけ研究者が本研究領域採択後に昇進しており、これは数学・数理科学および情報科学の分野で高く評価されていることの結果である。今後の彼らの活躍は、当該分野の研究の発展や後継者育成という観点で飛躍的な革新を生み出すことにつながるであろう。また、多くのさきがけ研究者の研究課題が具体的な適用先を定めてその研究活動を行っており、その成果を受けて多くの成果が還元され、さきがけ研究者のみならず、ここで作成された各種ソフトウェアの利用を通じて、数理構造の活用により研究を加速できる研究者の育成にも貢献した。

以上のように、戦略目標を通じて多くの設定の狙いとなった項目が実現された。このような状況は、「数学・数理科学」と「情報科学」の連携・融合を旗印に「情報を使い尽くす」基盤創出を目指す戦略目標が立てられたことで実現したものであると考える。その観点で、本戦略目標および数理構造活用領域の設定は妥当なものであり非常に意義深いものであった。また、この戦略目標がたった2019年以後、急速なスピードで機械学習やAI（特に生成AI）が発展したが、これに少し先んじて本戦略目標に基づいて本研究領域が設置されており、さきがけ研究者の多くが、本研究領域の活動を通じて、こうした世界的動向の流れの最先端に合流できており、その観点でも意義があった。

(4) 今後への期待、展望、課題

本研究領域の研究者に対しては、自らの研究開発の成果をさらに発展させて、研究者とし

でのキャリアを積み重ねてほしいと考えている。本研究領域のマネジメントにおいて、新型コロナウイルス感染症のパンデミックの影響を受けつつも、領域内外の研究者の実質的な連携が実現するよう心がけたこともあり、さきがけ研究者や同じ戦略目標を共有した ACT-X の若手研究者同士が互いに連携して、さきがけ研究期間の終了後に大型の研究資金に採択された例も数多くあった。これは直接的に研究成果がより大きな課題解決へ向かう一つの方向として大いにその発展に期待したい。こうした観点から、さきがけ研究者の未来には期待と確かな展望が間違いなくある。

少し視点を高くして、数学・数理科学と情報科学の連携・融合に関して、課題・展望・今後の期待について記載する。数学・数理科学分野では、AI や機械学習の研究の場での利活用は全く遅れているという現状がある。2024 年度のノーベル物理学賞や化学賞が AI の利用によるものであったことを踏まえると、この我が国での現状には改善すべき点がある。しかし、本研究領域での研究活動を通じて、数理科学者と情報科学者の深い連携が進み、またそこから多くの課題解決への手段が提供されたことを鑑みれば、今後の数学・数理科学と情報科学の高いレベルでの融合という方向性の維持は、我が国の科学技術の国際的なステータスを保つ上での原動力になることは間違いない。今後もこうした融合が進むような研究者支援が継続することが望ましい。

本研究領域での成功を受けて見えてきた課題についても述べたい。高度な数学・数理科学の成果の社会還元を図るツールとして、自らソフトウェアを開発して GitHub などを通じて、それを公開することは情報科学の分野では自然に行われた。しかし、数学・数理科学者がこうした数理ソフトウェアを開発しても、業績として評価されにくいという背景がある。そのため、自らが提案した数学的新概念をソフトウェアに実装して展開を図ることをためらう若手研究者も多い。一方で、本研究領域では、数理構造の高度な利活用を実現するソフトウェア開発の積極的評価によって、多くの理論的にも応用的にも優れた成果が多数生まれた。この事実を踏まえれば、数学・数理科学者が数理ソフトウェア開発を行う場合の支援やその評価のあり方、あるいは外部のプログラム開発者との迅速な連携を促す仕組みなどをどのように構築していくかについて、検討が必要であろう。

研究開発支援の枠組みとしての戦略的創造研究推進事業の観点では、本研究領域は、数学・数理科学者である坂上が研究総括として設置され、特定の応用や課題解決を意識した基礎研究ではなく、多様な数学/数理科学や情報科学の分野的背景を持つ研究者が参画できる領域となった。両分野の特徴として、一つの成果が他の分野にも容易に展開するという「水平展開力」があるが、本研究領域ではこの特徴を余すところなく活かすことができ、縦横無尽の連携が生まれる土壌ともなった。また、成果の応用先も当初の想定を超えてひろがり、ある分野の課題解決のための数理・情報基盤が他の分野に応用されるに至っている。このような形で、数学・数理科学と情報科学が中心となった横断型の研究領域の設定は今後も継続されることが望ましい。その意味でも、2024 年度から戦略目標「新たな社会・産業の基盤となる予測・制御の科学」が設定され、その実現のために CREST「予測数学基盤」領

域（研究総括 小谷 元子）および、さきがけ「未来数理科学」領域（研究総括 荒井 迅）という、数学・数理科学者を総括とする二つの研究領域が設置されたことは、大変素晴らしいことである。本研究領域で培った様々な活動や考え方がこれらの研究領域にひきつがれていくよう今後も緊密に連携をとっていきたいと考えている。

最後に未来社会＝Society5.0 の実現に向けた観点についても述べる。現在の世界は気候温暖化や食糧問題、環境問題など地球全体をわたるグローバルな課題が山積しており、我々人類の生存そのものを脅かそうとしている。これらの課題を整理する上で、持続可能な社会の実現にむけた SDGs（Sustainable Development Goals）目標が定められており、ここから派生する様々な課題を解決するためにあらゆる科学技術分野の貢献が求められている。数学・数理科学分野や情報科学分野も例外ではなく、こうした課題を本質的に解決しうる学術として重要な役割を果たすことが期待されている。すなわち、これらのリアルな社会の課題解決を加速するために、計算機を用いた DX 技術であるデジタルツインの構成、大規模な数値計算による予測、高性能の計測機器から得られるデータの活用を促すことが強く求められている。こうした DX 技術を支えるのが、情報科学であり、数値計算や計測データから有効な数理構造を介して高度に活用し尽くすことが必要になる。ここに、本研究領域が生み出したような数理構造活用基盤が加わり、また今後課題に応じて新しい数理構造活用が行われる研究土壌が生まれることは、我が国のみならず人類全体の幸福に資するものである。こうしたパラダイムの展開のためには、あらゆる啓蒙活動や研究支援、成果還元の仕事が必要であると考えている。こうした動きに、本研究領域に関わった多くの人々の積極的な関与を期待したい。

(5) 所感、その他

さきがけの研究総括は、多くの時間を費やしたが、それに見合うだけの非常に楽しいものであった。研究総括を受けた時点で、私はまだ 40 代の後半であり、研究者個人としても研究活動を続ける「プレイングマネージャー」としての運営が求められたことは、自身にとっても挑戦的なことであったと感じている。

しかし、この研究総括としての仕事を進めた後で思うことは「案ずるより産むが易し」であった。まず、非常に厳しい選抜を経て集まった本研究領域の若手研究者は、既存の分野の枠を超え、新しい科学技術の潮流を作ろうという意欲に満ちた人々であり、彼らの研究内容について知り、その理解を深めることは単に戦略目標の達成のためだけでなく、私の一研究者として学術全般を俯瞰する上での見識を深めることにつながった。特に、近年発達が著しいデータ解析や機械学習・AI 技術については、認識するところが深くなったことは、プレイヤーとしての私自身の研究の幅を広げることに貢献したと思う。

また、さきがけ研究総括として自身の必ずしも専門でない分野の評価も求められる機会が多くあった。この経験も、現在の我が国における学術全体の中における数学・数理科学の位置づけを知る上で大きな糧となった。現在、内閣府のムーンショット型研究開発事業目標 8

において、課題解決に対する数理科学の展開を担うサブプログラムディレクターとしてマネジメントしているが、研究総括としての経験はこれに強く寄与した。

また、本研究領域の領域アドバイザー・領域運営アドバイザーには、研究総括の私では詳細がカバーできない様々な分野について貴重なアドバイスをいただいた。のみならず、担当アドバイザーとして、本研究領域のさきがけ研究者の研究進捗に積極的に関わっていただいたことは、研究者の成長のみならず本研究領域の成功において欠かせないものであった。ここにお礼を申し上げたい。

既に何度か触れたように、2024 年度には数学者を研究総括とする本研究領域と同じ思想をもちうる新しい研究領域が二つ設置されたことは誠に喜ばしいことである。特に、さきがけ「未来数理科学」領域の荒井迅研究総括は、本研究領域における領域アドバイザーの一人であり、さきがけ領域運営をともに行うことができたことで、これまでの数学関連研究領域の取り組みや基本となる考えがそこに受け継がれ、新領域運営に活用されてより大きな成果や発展として結実することを確信している。

最後に、本研究領域は発足して 1 年目に新型コロナウイルス感染症のパンデミックが発生し、これまでの領域運営のノウハウでは全くカバーできない事象が多数発生した。このような状況の中でも、選抜、領域会議、各種イベントなどの実施において JST の柔軟な協力があつたことに感謝したい。特に、本研究領域の発足から終了直前まで、研究総括の右腕として事務的に支えてくださった近藤賢司氏にはこの場を借りて感謝の意を表したい。

以上