

戦略的創造研究推進事業
—チーム型研究(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」

研究領域事後評価用資料

研究総括: 坪井 俊

2022年3月

目 次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. 研究領域の概要 | 1 |
| 2. 研究総括のねらい..... | 3 |
| 3. 研究課題の選考について..... | 5 |
| 4. 領域アドバイザーについて..... | 7 |
| 5. 研究領域のマネジメントについて..... | 9 |
| 6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について..... | 25 |
| 7. 総合所見 | 44 |

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」

(2) 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」(2014年度発足)

(3) 研究総括

坪井 俊 (武蔵野大学 工学部数理工学科 特任教授)

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>

平成 26 年度新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h26.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

表1 採択研究課題と研究費 (百万円)

| 採択年度 | 研究代表者 | 所属・役職 採択時** | 研究課題 | 研究費* |
|-------------------|-------|----------------------|---|---------|
| 2014年度 (H26年度) | 石川 博 | 早稲田大学・教授 | 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 | 184 |
| | 岩田 寛 | 東京大学・教授 | 大規模複雑システムの最適モデリング手法の構築 | 141 |
| | 栄 伸一郎 | 北海道大学・教授 | 生命現象における時空間パターンを支配する普遍的数理モデル導出に向けた数学理論の構築 | 169 |
| | 大石 進一 | 早稲田大学・教授 | モデリングのための精度保証付き数値計算論の展開*** | 338 |
| | 小林 亮 | 広島大学・教授 | 環境を友とする制御法の創成 | 260 |
| | 高木 剛 | 九州大学・教授 (東京大学・教授) | 次世代暗号に向けたセキュリティ危殆化回避数理モデリング*** | 263 |
| | 吉田 朋広 | 東京大学・教授 | 先端的確率統計学が開く大規模従属性モデリング*** | 224 |
| 2015年度 (H27年度) | 水藤 寛 | 岡山大学・教授 (東北大学・教授) | 臨床医療における数理モデリングの新たな展開*** | 263 |
| | 長山 雅晴 | 北海道大学・教授 | 数理モデリングを基盤とした数理皮膚科学の創設 | 212 |
| | 平岡 裕章 | 東北大学・教授 (京都大学・教授) | 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*** | 225 |
| | 松本 眞 | 広島大学・教授 | 超一様性の理論と諸科学におけるランダムネスへの展開 | 75 ※ |
| | | | 総研究費 | 2,354 |

*研究費：2021年度上期までの実績額に2021年度下期以降の計画額を加算した金額

**変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

***研究期間を延長した課題

※松本チームは、研究代表者の松本 眞先生の体調不良により、2017年度で研究終了とし、終了報告を行った。

予算の重点配分について、大石チームは、モデリングの数値演算の高速化・大容量化に対応するための、ワークステーションやGPGPUの組み込み等、数値演算能力の向上のための設備増強を行った。

小林チームについては、生物の神経系や運動能力の研究として、生物を観察・分析・再現

するための設備(X線マイクロCT装置、3Dプリンタ、神経シグナル解析装置、生体アンプ等)への投資を重点的に行った。

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そのねらい

「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」という戦略目標に対し、本研究領域を「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」と名付け、「数学者と数学を応用する分野の研究者が相互に連携する研究チームを構成して、現時点で解決が困難な社会的課題に取り組むとともに、そのプロセスの中で数学自体の発展をも目指すもの」として位置づけた。

社会的に重要な課題に関しては、爆発的ともいえる巨大なデータが蓄積されてきており、諸分野の技術の進展によりこれまでは得られてこなかったデータも続々と登場してきている。このようなデータの洪水の中では、これまでに定式化され使われて来た科学技術ではこれらのデータを利活用することが困難になってきている。

このようなデータの本質的な部分を取り出すためには、諸科学分野の発展を受けて、諸現象を記述し予測する学問である数学・数理科学により、深く諸現象を理解して行くことが不可欠である。そこで、数学・数理科学研究者が諸分野と連携して、対象となる複雑な諸現象を現代の数理科学の視座から理解して、必要な数学自体も発展させつつ適切なモデリング手法により、巨大化したデータや新しいタイプのデータから本質的な部分を取り出すことによりこれらのデータを利活用し、課題解決を目指すことをねらった。

(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、解決すべき社会的課題の設定の上で、研究対象に対する理論構成を行う研究者、実験、観測、データ収集等により、研究対象のデータを提供する研究者、現代の数理科学の研究の進展を活かして、研究対象に対する数理モデルを構築する研究者、さらに、数理モデルを用いたシミュレーション等で現場へのフィードバックを行う研究者等により有機的に構成されたチームを作ること、そのチームにより現実の問題から出て来たデータの本質的な部分を数理科学の視点から取り出し、必要な数理科学の問題を解決することにより社会的課題を取り扱う枠組みの整備の実現をねらった。

研究成果としては、現実の問題の解決を進展させるとともに、数理科学に提示された問題の解決に向かうものを目指した。対象となる現象としては、図1に示すように「支配原理・法則が明確でない現象」を対象に、より本質に迫る数学的アイデアに裏付けられた汎用性のあるモデリング手法の構築を目指した。また、導出された数理モデルや既存の数理モデルについて、解決すべき課題の核心となる現象を記述していることの実証・検証やモデル評価のための数学理論や技術の構築を行なうこともねらった。

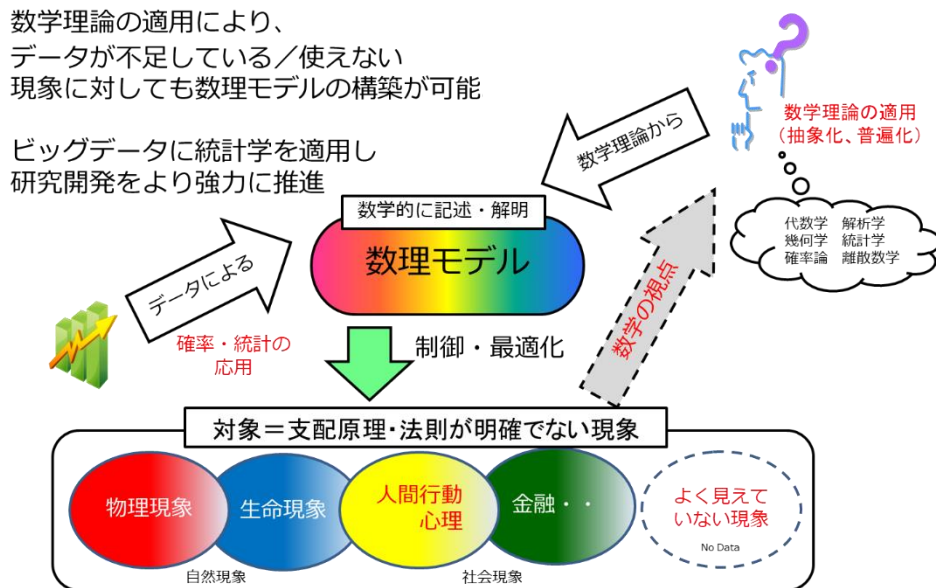


図1 本研究領域が目指す数理モデリング

(3) 科学技術の進歩への貢献や科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと

社会的に重要で、従来の科学技術の延長上では解決が難しい課題に取り組み、ブレークスルーを起こすためには、数学・数理科学研究者が諸分野と連携して、対象となる複雑な諸現象を数学的に理解して解決を目指すことが増々重要となっている。

複雑な構造の現象を現代の数理科学の知見を活かし、根拠を持って簡略化した記述を行うことで、情報量が多く計算機の処理負荷が高い作業を著しく効率化することができ、複雑な社会現象、自然現象、生命現象等の解明に寄与することが期待される。また、現代のグラフ理論の発展を取り入れて、現象をネットワーク構造の変化と捉えて数理モデル化することで、例えば、ネットワーク構造を有する、電力供給システム、経済システム、製造のプロセス、各種情報サービス等に対して、不安定になる「兆し」の検出が可能となり、事前の対策や効果的な制御につながることを期待される。これら実現のためには、数学の持つ普遍性を活かし、数理モデリングの手法を幅広い分野において有効に活用できる人材が重要と考えている。チームの中から若い研究者が理論と現場を結ぶリーダーとして輩出されることをねらって、このような動きを牽引する若手数理科学者を輩出するために、研究チームとして、数学の広い分野、関連する諸科学分野との交流に積極的であることを特に目指すことが、科学技術の進歩やイノベーション創出に寄与すると考えている。

3. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針

本研究領域では、数学的アイデアに裏付けられた革新的モデルを導出する研究、新しい数理的手法を開発する研究、数理モデルの実証・検証および評価のための数学的理論等の研究をおこなう研究チームを募集した。このようなチームは、解決すべき社会的課題をしっかりと設定した上で、研究対象に対する理論構成を行う研究者、実験、観測、データ収集等により、研究対象のデータを提供する研究者、現代の数理科学の研究の進展を活かして研究対象に対する数理モデルを構築する研究者、さらに、数理モデルを用いたシミュレーション等で現場へのフィードバックを行う研究者等により、有機的に構成されたものであると考えている。

対象となる現象と応用分野としては、例えば、社会現象においては、経済変動、感染症の伝搬、交通流、電力・通信ネットワークの変動、災害時の住民行動、各種社会インフラの老朽化等、自然現象においては、気候変動、集中豪雨・地滑り・竜巻・津波等の突発的な自然現象等、また、生命現象においては、遺伝子間の相互作用メカニズム、脳内の知覚認識・情報処理メカニズム等、戦略目標に例示されているものを含むが、これに限定されるものではなく、より本質に迫る数学的アイデアに裏付けられた汎用性のあるモデリング手法の構築を目指した。また、導出された数理モデルや既存の数理モデルについて、解決すべき課題の核心となる現象を記述していることの実証・検証やモデル評価のための数学理論や技術の構築を行なう研究も重要と考えた。

上記の研究を推進するためには、研究チームとして、数学の広い分野、関連する諸科学分野との交流に積極的であることを要望した。また、数学の持つ普遍性を活かし、数理モデリングの手法を幅広い分野において有効に活用できる人材が重要と考えているため、チームの中から若い研究者が理論と現場を結ぶリーダーとして輩出されることもねらった。

(2) 選考結果について

ここ数年間、数理科学と諸科学・産業との連携により社会的課題の解決に取り組むことが色々な場面で行われるようになってきた。この連携の中で多くの研究成果も得られ、また、さらなる研究課題が現れてきている。

2014年度の本研究領域では、この連携をさらに深めて課題解決に取り組むべく、解決すべき社会的課題がはっきり設定された研究提案を取り上げた。

その結果、2014年度は、数学を含む広い学術分野の研究者から、57件の応募があった。11名の領域アドバイザーとともに公平かつ厳正に書類選考を行い、14件の面接課題を選び、最終的に7件を採択した。選考に当たっては、研究提案が現代の数理科学と現実の諸課題を結びつけて課題解決を図るものであること、研究提案者がリーダーシップを十分に発揮し、期間内に一定の成果が十分ねらえるものであること等を重視した。また、最終

決定においては、「数理モデリング」領域が全体として、数理科学と諸科学・産業との連携を医療生命・経済・社会等バランス良く発展させるものになることも考慮した。

2015年度は、前年度採択した研究課題に加えることで、この研究領域が全体としてバランスのとれたものになることも考慮しつつ、前年度同様、解決すべき社会的課題がはっきり設定された研究提案を取り上げた。2014年度に1名の応募者に対して、特定課題調査*を依頼した。同応募者はこの調査の結果を活かした計画を持って2015年度に再応募し、採択された。

2015年度は前年に比べ採択数が減ることも予告していたが、数学を含む広い学術分野の研究者から多数の応募が集まった。実際、42件の応募があり、11名の領域アドバイザーとともに公平かつ厳正に書類選考を行い、11件の面接課題を選び、最終的に4件を採択した。

*特定課題調査：応募された研究提案のうち、少額で短期間に研究データの補完等を行うことができ、それにより次年度以降に応募された場合に評価を的確に行うことが期待される場合に、研究総括が採択課題とは別に、特定課題調査を研究提案者に依頼すること。次年度以降に当該研究領域へ再応募することを条件とするが、他の研究提案と同様に選考を行い、優先的な取り扱いはない。

表2 応募件数と採択件数

| 選考年度 | 応募件数 | 採択件数 (採択率) |
|--------|------|---------------|
| 2014年度 | 57件 | 7件 (12.3%) |
| 2015年度 | 42件 | 4件 (9.5%) |

2年間を通して、99件の応募があり、11件を採択したが、研究領域全体としては、現代の数理科学の広い分野と連携し、データ解析（石川チーム、吉田チーム、平岡チーム）、暗号理論（高木チーム）、精度保証計算高速計算（大石チーム、松本チーム、岩田チーム）、モデル最適化と制御理論（岩田チーム、小林チーム）、医療生命科学（栄チーム、長山チーム、水藤チーム）という形で、さまざまな応用分野の重要な課題において新しいモデリング手法や評価手法の構築に取り組む研究体制が構築できた。（図2）

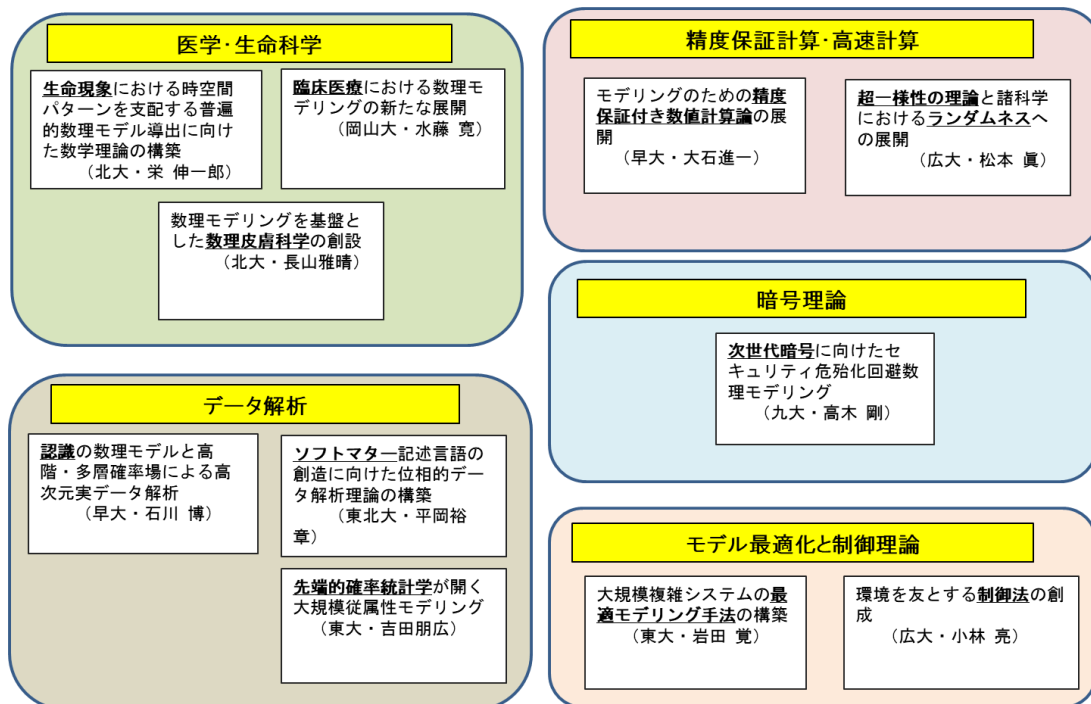


図2 本研究領域の研究課題

4. 領域アドバイザーについて

(1) 領域アドバイザー一覧

表3 領域アドバイザー一覧 (五十音順)

| 氏名 | 所属(現所属) | 役職(現役職) | 任期 |
|-------|-----------|----------------------------|-----------------|
| 阿原 一志 | 明治大学 | 教授 | 2014年5月～2022年3月 |
| 大島 利雄 | 城西大学 | 教授 (数理・データサイエンスセンター 所長) | 2014年5月～2022年3月 |
| 栗原 裕基 | 東京大学 | 教授 | 2019年7月～2022年3月 |
| 小谷 眞一 | 大阪大学 | 名誉教授 | 2014年5月～2020年3月 |
| 田崎 晴明 | 学習院大学 | 教授 | 2014年5月～2022年3月 |
| 土谷 隆 | 政策研究大学院大学 | 教授 | 2014年5月～2022年3月 |
| 中尾 充宏 | 九州大学 | 名誉教授 | 2014年5月～2022年3月 |

| | | | |
|------------|-------------------------|------------------------|-----------------|
| 西浦 廉政 | 東北大学 (北海道大学) | 名誉教授 | 2019年7月～2022年3月 |
| 平田 (河野) 典子 | 日本大学 | 教授 | 2014年5月～2022年3月 |
| 藤重 悟 | 京都大学 | 特任教授 (名誉教授) | 2014年5月～2022年3月 |
| 宮岡 礼子 | 東北大学 | 総長特命教授 (名誉教授) | 2014年5月～2022年3月 |
| 村上 英樹 | 新日鐵住金株式会社 (日本製鉄株式会社) | プロセス研究 所長 (フェロー) | 2014年5月～2022年3月 |
| 山田 道夫 | 京都大学 | 教授 (特任教授) | 2014年5月～2022年3月 |

(2) 人選にあたっての考え方

領域アドバイザーの人選にあたっては、現代の数理科学の広い範囲をカバーすることを考え、数学者の中で数理科学の応用についての知見をお持ちであることを一つの条件として、代数の平田氏、幾何の宮岡氏、阿原氏、解析の大島氏、小谷氏、山田氏に領域アドバイザーをお願いした。より応用的な視点からは、計算数学の重要性に鑑み中尾氏、数理工学からは、土谷氏、藤重氏、数理物理学からは田崎氏、また産業における数理科学の役割の評価のために村上氏をお願いした。これにより、数学の各分野、周辺諸分野からのコメントを期待した。また同時に発足したさきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働(國府寛司 研究総括)」(國府数学領域)との交流を考えて、大島氏、田崎氏、土谷氏、藤重氏、宮岡氏については、國府氏とともに検討し、両方の研究領域を同時にアドバイスしていただくこととした。実際にこの11名のアドバイザーの方々からは、選考時における貴重なコメント、研究課題中間評価時の研究課題期間延長可否評価、領域会議等において建設的なアドバイスをいただくことができた。

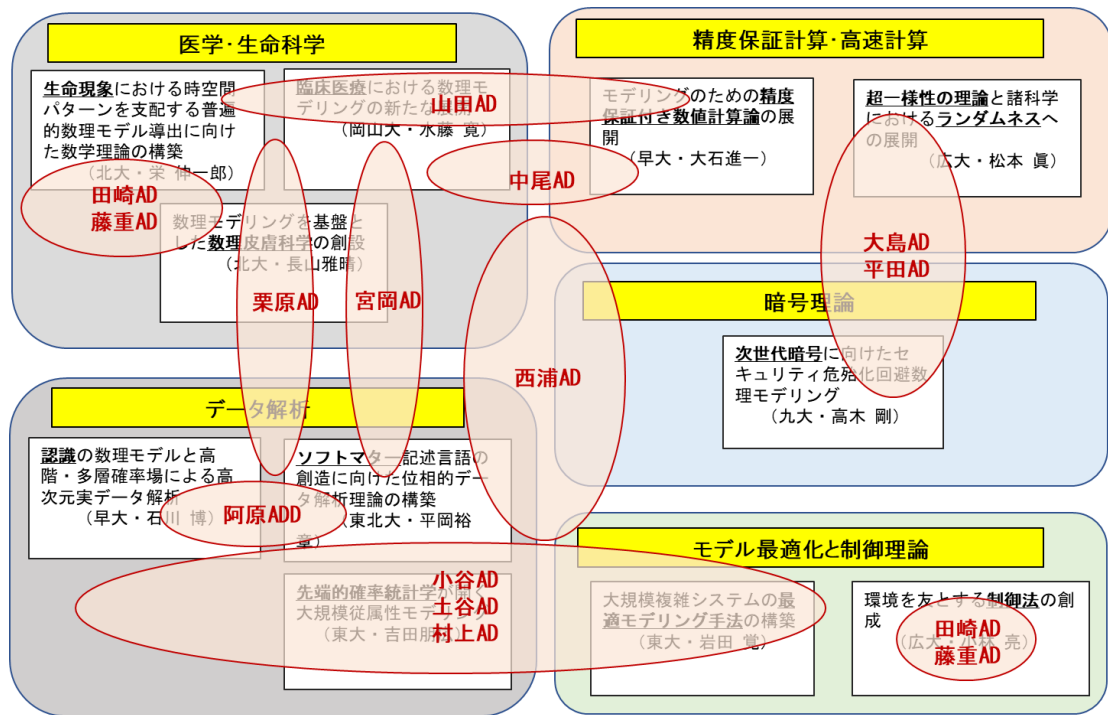


図3 本研究領域の研究課題とアドバイザー専門領域

研究領域中間評価における数理応用の横断的・俯瞰的評価および生命医療関係の評価が可能な領域アドバイザーの拡充が望ましい旨のアドバイスを受け、上記11名に加え2名の方に領域アドバイザーをお願いした。数理の応用に関して横断的・俯瞰的視点からのアドバイスを得るため、西浦氏に領域アドバイザーをお引き受けいただいた。また、生命医療分野への応用を見込むチームが多いにもかかわらず、専門の立場からのアドバイスが受けにくかったことから、栗原氏に領域アドバイザーをお引き受けいただいた。

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

新しい数理モデルの創出と数学の特徴である普遍性の抽出による新たな発展／優れた進展を実現するため、継続的な研究が可能となるような仕組みを導入した。具体的には、研究チームの形成に当たって、研究活動のコアとなる小規模なチームからスタートし、研究の進展に応じて順次研究体制を拡大発展させて行くこととした。また、極めて優れた研究課題については、研究領域終了までの最長2年の延長を可能とした。このため、募集は通常3回のところを2回(14、15年度採択)とし、大部分を初年度で採択する方針とした。

(図4)

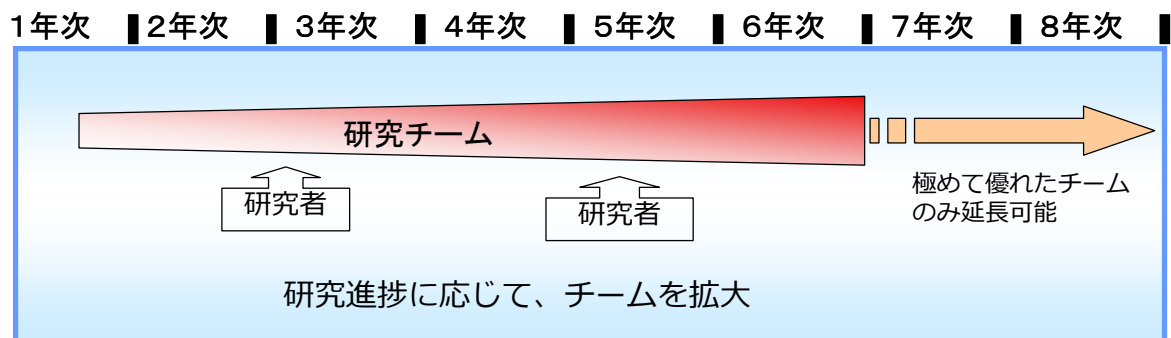


図4 研究体制拡大と研究課題期間延長

各チームがこれまでの数理モデリングの手法を超える成果を挙げる中で延長を希望するチームの中から延長チームを選ぶのは困難な作業であった。数理を社会課題の解決に生かすという面では、各チームそれぞれの取り組みがあったが、チームが集中力を発揮し成果を挙げているということとともに、研究領域の性格を考慮して、技術的に重要な成果であること以上に数理の理論的課題へのフィードバックが十分にあり、新たな数理的知見が生かされることを考慮して選考した。（研究課題中間評価時の研究課題期間延長可否評価において大石チーム、高木チーム、吉田チーム、水藤チーム、平岡チームの5研究課題の研究期間延長を行った。）

領域運営においては、領域会議を定期的で開催して領域内研究者間の交流を活性化させるとともに、応用分野や数学者を巻き込んだワークショップを開催する等、異分野連携・融合を促進する機会を設けた。

数理モデルの導出・実証・検証・評価や課題の解決に当たっては、異なる数学分野の研究者間の連携は元より、応用分野、実験科学や情報科学の研究者との双方向の連携が重要であることから、関連するCREST・さきがけの研究領域との連携を進めるとともに、数理的な研究を推進している研究拠点とも連携して、革新的な数理モデリング手法の開発と幅広い分野の展開を目指した。

(2) 領域運営の具体的活動について

革新的な数理モデリング手法の開発と幅広い分野の展開を目指すために、以下の6つの活動を行った。

- ① シンポジウム
- ② チュートリアル
- ③ 領域会議・数学領域横断若手合宿・未解決問題ワークショップ
- ④ サイトビジット
- ⑤ 数学キャラバン
- ⑥ 教育講座

① シンポジウム

研究成果を広く一般に公開し、アウトリーチ活動を通じて、本研究領域の研究活動への理解を得るとともに、数学と応用分野や数学研究者同士のコミュニケーションの活性化を図った。主なシンポジウムの開催一覧を表4に示す。

表4 シンポジウム開催一覧

| 開催日 | 名称 | 内容 | 場所 | 参加者数 |
|------------------|------------------------------|---|--------|------|
| 2016/8/1 ～15 | 国際シンポジウム | International Conference Patterns and Waves 2016 共催：北海道大学、東北大学、RIES、WPI-AIMR、Research Center of Mathematics for Social Creativity 後援：JST | 北海道大学 | 110 |
| 2017/2/11 ～12 | CREST・さきがけ・数学協働プログラム合同シンポジウム | 数学パワーが世界を変える 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、統計関連学会連合会 | 東京大学 | 253 |
| 2017/9/12 | 数学連携ワークショップ | 日本数学会でのワークショップ 主催：文部科学省、JST、AiMap 共催：日本数学会 | 山形大学 | 30 |
| 2018/1/21 | CREST・さきがけ・AIMaP 合同シンポジウム | 数学パワーが世界を変える 2018 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、統計関連学会連合会 | アキバホール | 183 |
| 2018/9/24 | 数学連携ワークショップ | 日本数学会でのワークショップ 主催：JST 共催：文部科学省、日本数学会 | 岡山大学 | 95 |

| 開催日 | 名称 | 内容 | 場所 | 参加者数 |
|--------------------|---|---|---------------|------|
| 2019/3/10 ～11 | CREST・さきがけ・AIMaP 合同シンポジウム | 数学パワーが世界を変える 2019 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、 統計関連学会連合会 (予定) | ガーデンパレス | 110 |
| 2019/3/15 ～16 | 数学と諸分野の連携にむけた若手数学者交流会 | Young Mathematicians' Challenge 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、 統計関連学会連合会 | JST | 100 |
| 2019/3/19 | 数学連携ワークショップ | 日本数学会でのワークショップ 主催：JST、文部科学省 共催：日本数学会 | 東京工業大学 | 50 |
| 2019/9/19 | 数学連携ワークショップ | 日本数学会でのワークショップ 主催：JST 共催：日本数学会 | 金沢大学 | 80 |
| 2020/2/1 ～2 | CREST・さきがけ・AIMaP 合同シンポジウム | 数学パワーが世界を変える 2020 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、 統計関連学会連合会 | 秋葉原コンベンションホール | 120 |
| 2021/3/13 ～14 | 数学と諸分野の連携にむけた若手数学者交流会 (オンライン) | Young Mathematicians' Challenge 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、 統計関連学会連合会 | | 110 |
| 2021/9/21 ～24 | CREST 「数理モデリング」 成果報告公開シンポジウム (オンライン) | CREST 「数里モデリング」 領域の最終年度としての成果報告会 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、 統計関連学会連合会 | | 230 |
| 2022/3/7 ～8(予定) | 数学と諸分野の連携にむけた若手数学者交流会 (オンライン) | Young Mathematicians' Challenge 主催：JST 後援：日本数学会、日本応用数理学会、 統計関連学会連合会 | | |

(i) 国際シンポジウム

本研究領域の研究チーム（栄チーム、長山チーム、平岡チーム）が中心となり、国際会議“Patterns and Waves 2016”を開催した。本会議では、材料科学から生命科学までの極めて広い応用分野で現れるパターンダイナミクスとその伝播波動現象をメインテーマに、世界最先端の研究者を招いて、今後の研究の展望について多彩な視点から議論した。さらに、國府数学領域、CREST・さきがけ複合「数学と諸分野の協働による ブレークスルーの探索(西浦廉政 研究総括)」(西浦数学領域)の研究総括・研究者の協力も得て、広く JST 数学関係研究領域の研究活動を世界に向けて情報発信するとともに、今後の国際研究者ネットワーク作りを通じた研究の加速を図った。(図 5)

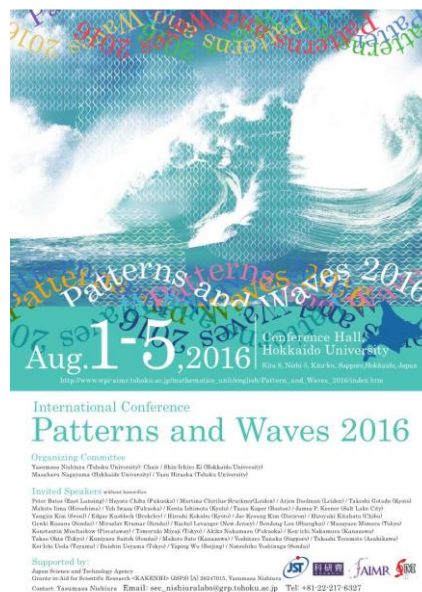


図 5 国際シンポジウムリーフレット

また、高木チームの PQCrypt 2016 (九州大学)、MQC2019 (九州大学)、3rd Asia PQCrypto (2017 年、東京工業大学)、平岡チームの TDART2017 (東北大学)、AAT2017 (北海道大学)、WAT2019 (京都大学)、大石チームの INVA2017 (沖縄)、SCCAVNC2018 (早稲田大学) などがある。

さらに、2019 年に開催された応用数理国際会議 ICIAM2019 では、本研究領域より、6 チームが参加し、ミニシンポジウム等を実施した。

(ii) CREST・さきがけ・文部科学省委託事業合同シンポジウム(数学パワーが世界を変える)

本研究領域の成果を広く一般に公開するため、本研究領域と、國府数学領域、ならびに文部科学省委託事業(数学協働プログラム:数学アドバンストイノベーションプラットフォーム)が協力して合同シンポジウムを開催した。このアウトリーチ活動を通じて、本研究領域の活動への理解を得るとともに、数学と応用分野や数学研究者同士のコミュニケーションのさらなる活性化を図った。(写真 1、2、図 6)

(過去 4 回開催、第 5 回はコロナ禍のため中止)



写真 1 数学パワーが世界を変える 会場

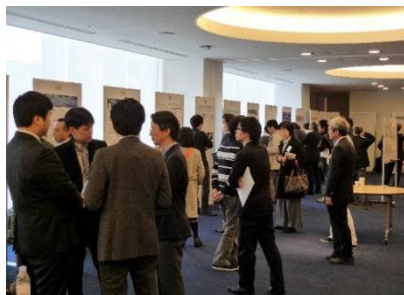


写真 2 数学パワーが世界を変える ポスター



図 6 数学パワーが世界を変える リーフレット

(iii) 数学連携ワークショップ(日本数学会)

日本数学会総合分科会において、数学と諸分野の連携研究活動に対する理解を深めてもらうことを目的にワークショップを開催した。本研究領域における研究を紹介するとともに、応用分野から数理科学への期待についても講演を行い、今後の展望について議論することができた。(過去 4 回開催)

(iv) 若手数学者交流会

CREST・さきがけ事業の枠にとどまらず、ERATO や科学研究費助成事業(科研費)等の事業で活躍している数学の若手研究者(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を設けた。(過去 2 回開催、第 3 回を 2022 年 3 月に開催予定)

若手数学者参加対象研究領域

- ・本研究領域(CREST 「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」)
- ・CREST・さきがけ複合「数学と諸分野の協働による ブレークスルーの探索(西浦廉政 研究総括)」
- ・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(國府寛司 研究総括)」
- ・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(上田修功 研究総括)」

- 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(坂上貴之 研究総括)」
- ERATO「蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト(蓮尾一郎 研究総括)」
- 科研費・新学術領域研究「材料離散幾何解析」(予定)
- 科研費・新学術領域研究「次世代物質探索のための離散幾何学」
- 理化学研究所 数理創造プログラム iTHEMS
- 理化学研究所 革新知能統合研究センターAIP
- 文部科学省委託事業「数学アドバンスイノベーションプラットフォーム」AIMaP

(v) 成果報告公開シンポジウム

本研究領域は、2021 年度が最終年度であるため、各チームのこれまでの成果を一堂に報告する「成果報告公開シンポジウム」を開催した。(2021/9/21~24、図 7)

科学技術振興機構 JST 科学技術振興機構

CREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」
成果報告公開シンポジウム
 DX, AI, これからの数理モデリング

2021年
 9.21 10:00~19:00
 9.22 10:00~17:00
 9.23 10:00~17:00
 9.24 10:00~17:00

参加を希望される方は、下記 Web サイトからご登録をお願いします。
<https://www.jst.go.jp/contents/math-sympo2021>
 問合せ先 mathsympo@math.jst.go.jp 【主催】科学技術振興機構

オンライン開催: 成果報告: Zoom, ポスター: 情報交換会: Viberid

各課題の成果報告

| | |
|--|--|
| 9月21日(水) | 9月23日(金) |
| 10:00 開会 | 13:00-14:00 数値計算における数値モデリングの新たな展開 (講師: 藤原 隆夫 東京大学 教授) |
| 10:10-12:40 「近代物理学における量子シミュレーションと数値モデリング」 (講師: 藤原 隆夫 東京大学 教授) | 14:30-17:00 数値計算と数値モデリングの新たな展開 (講師: 藤原 隆夫 東京大学 教授) |
| 14:30-17:00 「量子シミュレーションと数値モデリングの新たな展開」 (講師: 藤原 隆夫 東京大学 教授) | 17:00 閉会 |
| 18:00-19:00 情報交換会 | |
| 9月22日(木) | |
| 10:00-11:15 「大規模データ駆動型数理モデリング手法の構築」 (講師: 藤原 隆夫 東京大学 教授) | |
| 11:15-12:30 閉会 | |
| 13:00-14:00 「数値計算と数値モデリングの新たな展開」 (講師: 藤原 隆夫 東京大学 教授) | |
| 14:30-16:45 「数値計算と数値モデリングの新たな展開」 (講師: 藤原 隆夫 東京大学 教授) | |
| 16:45-17:00 閉会 | |

2021年 9月21日(水) 10:00~19:00
 2021年 9月22日(木) 10:00~17:00
 2021年 9月23日(金) 10:00~17:00
 2021年 9月24日(土) 10:00~17:00

研究員: 藤原 隆夫 (武蔵野大学 教授)

図 7 成果報告公開シンポジウム リーフレット

② チュートリアル

各チームの研究成果、特にソフトウェアやツール類を広く応用分野に展開するために、一般向けのチュートリアルを実施した。主なチュートリアルの開催一覧を表5に示す。

表5 チュートリアル開催一覧

| 開催日 | 実施チーム | テーマ | 場所 | 参加者数 |
|-------------------|-------------|--|----------------|------|
| 2015/9/1 ～4 | 大石チーム | Introduction to verified computation (Joint Seminar on Numerical Analysis at Niigata University) | 新潟大学 | |
| 2015/11/12 | 石川チーム | マルコフ確率場 | 早稲田大学 | 100 |
| 2016/09/12 | 大石チーム | 偏微分方程式の解に対する精度保証付き数値計算法について (精度保証付きワークショップ) | 早稲田大学 | |
| 2016/09/21 | 水藤・長山・石川チーム | 医用画像と数理 | 北海道大学 | |
| 2016/4/27 ～30 | 高木チーム | 暗号数理 (過去 14 回開催) | 東京工業大学 九州大学 | |
| 2017/1/27 | 平岡チーム | 超基礎からのトポロジカルデータ解析 | 全日通労働組合 | 82 |
| 2017/2/28 | 平岡チーム | 位相的データ解析の基礎と応用 - パーシステントホモロジーの計算ソフトウェアと発展的話題について (統計数理研究所 2016 年度公開講座) | 統計数理研究所 | 80～ |
| 2017/12/22 ～23 | 平岡チーム | 位相的データ解析ソフトウェア HomCloud の紹介 およびパーシステント図の逆問題について (Encounter with Mathematics 第 70 回 パーシステントホモロジーとその周辺) | 中央大学 | |

| | | | | |
|-------------------|----------|--|-----------------------------|----|
| 2018/9/10 | 大石チーム | 精度保証付き数値計算 | 早稲田大学 | 53 |
| 2018/12/26 | 大石チーム | 偏微分方程式の精度保証付き数値計算法 (日本応用数学会「応用数理セミナー」) | 東京大学 | |
| 2018/12/1 ~2 | 吉田チーム | 確率微分方程式のデータサイエンス入門 | 東京大学 | 80 |
| 2019/6/25 ~28 | 吉田チーム | YUIMA Tutorial | Brixen-Bressanone, Italy | |
| 2019/11/28 ~29 | 平岡チーム | パーシステントホモロジーの基礎と応用例の紹介 HomCloud 体験チュートリアル | 理化学研究所 AIP 日本橋オフィス | 91 |
| 2019/12/20 ~22 | 水藤・長山チーム | 数理モデル&機械学習 | 東北大学 | |
| 2020/3/21 ~22 | 吉田チーム | YUIMA チュートリアル | オンライン | |
| 2020/6/18 | 平岡チーム | パーシステントホモロジーのデータ解析への活用. 応用のためのトポロジカルデータ解析チュートリアル&ワークショップ | オンライン | |
| 2020/12/23 | 大石チーム | C++で学ぶ精度保証付き数値計算法の初歩 (日本応用数学会「応用数理セミナー」) | オンライン | |
| 2021/7/3 ~4 | 吉田チーム | YUIMA チュートリアル | オンライン | |
| 2021/9/13 ~17 | 平岡チーム | Online tutorial of quantum beam PDF analysis and topological analysis for disordered materials (Tutorial by ICG TC29 and JSPS Hyper-ordered structures science) | オンライン | |

石川チーム

マルコフ確率場と今後の高次元データ駆動科学、ビッグデータサイエンス、高次元実データ解析の融合の方向性を探るチュートリアルを実施 (2015/11/12)

マルコフ確率場モデリングの数理と応用～高次元ビッグデータサイエンスの視点から～
(<https://www.smapip.is.tohoku.ac.jp/~smapip/2015/MRFModeling2015/>)

高木チーム

毎年2回チーム全体会議を開催しており、2016年度のチーム全体会議(2016/4/27)にて、最初のチュートリアル講演を実施。その後、チーム全体会議の際には毎回チュートリアル講演を同時開催、これまでに全体会議と合わせて計14回実施。また、CREST 暗号数理ミニワークショップを2015年3月から、2021年3月までに、計12回開催。

大石チーム

近年、重要性が増している精度保証付き数値計算について、2018年9月10日国際シンポジウムSCAN2018(実行委員長 大石進一)において「精度保証付き数値計算法の基礎のチュートリアル」を開催。

参加者53名、領域研究者以外の一般・学生、および海外からの参加者が全体の約50%と、研究領域外からの参加が多く、アウトリーチの推進を図ることができた。また、2018年12月26日 日本応用数理学会 三部会連携「応用数理セミナー」にて、初学者を対象とした精度保証付き数値計算法のチュートリアルを開催。(図8)

精度保証付き数値計算ライブラリについて上記を含めチュートリアルを数多く開催している。



図8 大石チーム リーフレット

吉田チーム

2018年12月1日確率統計・データサイエンスの基礎から始めて、確率微分方程式の直感的理解とモデリングのスキル、およびYUIMA(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パッケージ)を紹介(図9)。参加者80名、保険業界からの参加者が多数あり、リスク計画のシミュレーション等でニーズがあることが分かってきた。

また、普及にむけたチュートリアルを海外を含め4回開催している。チュートリアルは企業関係者で募集定員が埋まってしまうほど盛況であった。

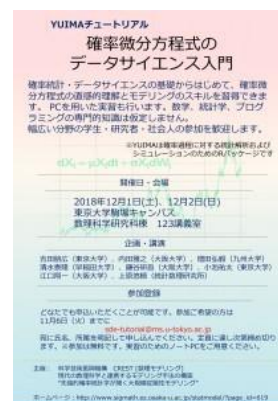


図9 吉田チーム リーフレット

平岡チーム

物質・材料研究機構(NIMS)主催で民間企業向けチュートリアル「超基礎からのトポロジカルデータ解析」を開催、82名が参加した。(2017/1/27)

平成28年度・統計数理研究所公開講座で、企業からの受講生を中心に約80名に対して2日間の講義を行った。(2017/2/27~28)

理化学研究所AIPセンターと共催として、トポロジカルデータ解析のチュートリアルを開催し、91名が参加した。(2019/11/28)

HomCloudについて上記を含めチュートリアルを数多く開催している。

水藤チーム、長山チーム、石川チーム

水藤・長山・石川チームと、新学術領域計算解剖学チームで、医用画像と数理に関する4プロジェクト合同セミナー(非公開)を開催。(2016/9/21)

水藤チームと長山チームで、若手研究者向け「数理モデル&機械学習」チュートリアルを開催。(2019/12/20~22)

③ 領域会議・数学領域横断若手合宿・未解決問題ワークショップ

本研究領域にクローズした会議で、研究者間で研究成果を共有し、より深い議論を行う。特に2016年度以降、本研究領域に参画する若手研究者同士の連携を強化するため、合宿形式の研究会を開催し、数学に関係する学際的研究の萌芽を育てる契機となることを目指した。領域会議・若手合宿・未解決問題WS開催一覧を表6に示す。

表 6 領域会議・若手合宿・未解決問題 WS 開催一覧

| 開催日 | 名称 | 場所 | 参加者 |
|------------------|----------------------------|-------------------|---------------------|
| 2014/11/30 | 第 1 回領域会議 | JST 東京本部 | 本研究領域 1 期生、國府数学領域 |
| 2016/2/9 | 第 2 回領域会議 | 東京大学 | 本研究領域 1 期生/ 2 期生 |
| 2016/2/21 ～23 | 数学領域横断若手合宿 | 淡路夢舞台国際会議場 | 本研究領域 |
| 2017/2/21 ～23 | 数学領域横断若手合宿 | 讃岐五色台 | 本研究領域、國府数学領域 |
| 2017/9/25 ～27 | 第 1 回未解決問題 WS | 汐留コンファレンスセンター | 本研究領域、國府数学領域、西浦数学領域 |
| 2018/9/25 ～27 | 第 2 回未解決問題 WS | 汐留コンファレンスセンター | 同上 |
| 2019/9/6 ～8 | 第 3 回未解決問題 WS | セミナーハウス クロスウェーブ府中 | 同上 |
| 2020/9/19 ～21 | 第 4 回未解決問題 WS (オンライン開催) | | 同上 |
| 2021/9/18 ～20 | 第 5 回未解決問題 WS (オンライン開催) | | 同上 |

(i) 数学領域横断若手合宿

JST 数学関連研究領域に参画する若手研究者同士の連携を強化するため、合宿形式の研究会を開催した。様々な学問的背景をもつ若手研究者が一堂に会することで、数学に関係する学際的研究の萌芽を育てる契機となることを目指した。

(ii) 未解決問題ワークショップ

JST 数学関連研究領域に参画する研究者同士が協力して、同じ「数学における未解決問題」に取り組む合宿形式のワークショップを開催した。

本ワークショップは、本研究領域、國府数学領域、西浦数学領域に参加の若手数理科学者が、現在課題と考えている未解決問題を持ち寄り、それぞれの問題の背景、意義等も説

明した後、参加した若手数理科学者のグループで問題に取り組み、それぞれの知見を出し合い、また、その場でシミュレーション等を含む共同研究を行ない、解決への糸口を見つける取り組みである。

このワークショップで取り上げた未解決問題について、その後も継続して議論を続け、問題の解法がジャーナルに掲載されたという成果も上がっている。

本研究領域の研究期間中に領域横断若手合宿から未解決問題ワークショップに発展的移行し、若手数学者が未解決問題という、より明確な課題に取り組むことにより、より具体的な研究の推進と研究者間交流が進んだ。

④ サイトビジット

サイトビジットでは、研究総括として各チームの研究実施場所を訪問し、研究実施状況の把握と今後の研究の方向性について意見交換することにより、研究の推進を図った。サイトビジット開催一覧を表7に示す。

表7 サイトビジット開催一覧

| 開催日 | 実施チーム | 参加者 | 場所 |
|------------|-------|--------------------------------|-------------|
| 2015/5/25 | 高木チーム | 高木先生、田中先生 國廣先生、木本先生 | 九州大学 |
| 2015/5/28 | 石川チーム | 石川先生、岡谷先生 | 早稲田大学 |
| 2015/6/11 | 岩田チーム | 岩田先生、高松先生 松尾先生、鈴木先生 | 東京大学 |
| 2015/7/31 | 大石チーム | 大石先生、他 | 早稲田大学 |
| 2015/8/4 | 栄チーム | 栄先生、佐藤先生 長山先生 | 北海道大学 |
| 2015/8/21 | 小林チーム | 小林先生、石黒先生 大須賀先生、青沼先生 | 東北大学 |
| 2015/8/31 | 吉田チーム | 吉田先生、鎌谷先生 増田先生 | 東京大学 |
| 2016/9/30 | 水藤チーム | 水藤先生、植田先生 斎藤先生、滝沢先生 増谷先生 | 千葉メディカルセンター |
| 2016/10/4 | 長山チーム | 長山先生、傳田先生 | 資生堂リサーチセンター |
| 2016/9/27 | 平岡チーム | 平岡先生、他 | 東北大学東京分室 |
| 2016/12/12 | 松本チーム | 松本先生、他 | 広島大学 |

| | | | |
|------------|-------|--------|-------------|
| 2017/9/20 | 松本チーム | 松本先生、他 | 広島大学 |
| 2019/4/17 | 高木チーム | 高木先生、他 | 東京大学 |
| 2019/4/22 | 大石チーム | 大石先生、他 | 早稲田大学 |
| 2019/5/8 | 吉田チーム | 吉田先生、他 | 東京大学 |
| 2020/11/9 | 平岡チーム | 平岡先生、他 | オンライン 開催 |
| 2020/11/30 | 水藤チーム | 水藤先生、他 | オンライン 開催 |

⑤ 数学キャラバン

高校生・一般を対象に、数理科学への理解や興味を深めてもらうことを目的に、数学関連 CREST・さきがけ研究領域のアウトリーチ活動の一環として、継続的に講演会を開催している。

毎回、さきがけ・CREST の研究者が、日頃の研究成果を含めた内容(例えば、“数学からみた生物”等、自然現象を数学的アプローチで解明して行くことを平易な言葉で説明)で、数学が社会に役立っていることを分かりやすく解説している。

2011 年、西浦数学領域の時より始まり、現在の本研究領域と、國府数学領域が引き継いで、活動は既に 11 年目に入り、毎回多くの一般・高校生が参加している。アンケートからは、過半数の参加者が、講演内容を楽しめた、興味を持てたと回答しており、数学が実社会でどのように利活用されているかについて理解や興味を深めることができた。今後も継続的に実施し、数学分野の人材育成につながる活動に寄与していく。数学キャラバン開催一覧を表 8 に示す。

表 8 数学キャラバン開催一覧

| 開催日 | 開催回 | 場所 | 主催 | 参加者数 |
|------------|--------|-------------------|----------|------|
| 2014/11/9 | 第 11 回 | 東京国際交流館(サイエンスアゴラ) | JST | |
| 2014/11/24 | 第 12 回 | 岡山大学 | 岡山大学 | 95 |
| 2014/11/29 | 第 13 回 | 水戸第二高校 | JST | 113 |
| 2015/1/11 | 第 14 回 | いわき産業創造館 | 福島大学 | |
| 2016/1/23 | 第 15 回 | 岡山大学 | 岡山大学 | 48 |
| 2016/1/30 | 第 16 回 | 水戸第二高校 | JST | 108 |
| 2016/11/12 | 第 17 回 | 渋谷教育学園幕張中学校・高等学校 | JST | 98 |
| 2016/12/17 | 第 18 回 | 水戸第一高校 | JST | 91 |
| 2016/12/19 | 第 19 回 | 岡山大学 | 岡山大学 | 56 |
| 2017/7/1 | 第 20 回 | 中部大学 | 中部大学 | 83 |
| 2017/8/20 | 第 21 回 | 上田高校 | JST | 30 |
| 2017/10/1 | 第 22 回 | 気仙沼中央公民館 | お茶の水女子大学 | 31 |

| | | | | |
|------------|------|----------------|----------|-----|
| 2017/11/12 | 第23回 | 北海道大学 | JST | |
| 2017/11/26 | 第24回 | 岡山大学 | 岡山大学 | 88 |
| 2018/1/27 | 第25回 | 水戸第二高校 | JST | 51 |
| 2018/5/13 | 第26回 | 大阪星光学院中学校・高等学校 | JST | 39 |
| 2018/7/7 | 第27回 | 中部大学 | 中部大学 | 42 |
| 2018/11/23 | 第28回 | 岡山大学 | 岡山大学 | 96 |
| 2018/12/15 | 第29回 | 九州大学 | 九州大学 | 150 |
| 2019/1/26 | 第30回 | 水戸第一高校 | JST | 40 |
| 2019/7/13 | 第31回 | 中部大学 | 中部大学、JST | 60 |
| 2019/11/24 | 第32回 | 岡山大学 | 岡山大学 | |
| 2021/9/11 | 第33回 | オンライン開催 | 中部大学 | 50 |
| 2021/10/16 | 第34回 | オンライン開催 | JST | 50 |



図10 ワークショップ リーフレット

⑥ 教育講座

企業・研究機関等に所属し、業務で数理モデルおよびその基盤である数学の学習機会を必要とする人を対象とした、教育講座を本研究領域研究者が主体となり 2016年～2021年の間に、計8回開催した。教育講座開催一覧を表9に示す。

表 9 教育講座開催一覧

| 開催日 | テーマ | 場所 | 主催 |
|---------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|
| 2016/6/7 ～6/8 | 研究者、技術者のための、もう一度、数学 | 神奈川県産業技術総合研究所 | 神奈川県産業技術総合研究所 |
| 2017/10/7 ～10/8 | 画像科学の最前線 － 基礎数理から医療応用まで | 神奈川県産業技術総合研究所 | 神奈川県産業技術総合研究所 |
| 2018/1/22 ～1/24 | 研究者、技術者のための、もう一度、数学 | 神奈川県産業技術総合研究所 | 神奈川県産業技術総合研究所 |
| 2018/11/28 ～11/30 | 研究者、技術者のための、もう一度、数学 | 神奈川県産業技術総合研究所 | 神奈川県産業技術総合研究所 |
| 2019/11/27 ～11/29 | 研究者、技術者のための応用数学 | 神奈川県産業技術総合研究所 | 神奈川県産業技術総合研究所 |
| 2020/10/21 ～10/23(オンライン開催) | 研究者、技術者のための応用数学 | 神奈川県産業技術総合研究所 | 神奈川県産業技術総合研究所 |
| 2021/12/1 ～12/2、12/8～12/9(オンライン開催) | 研究者、技術者のための応用数学 | 神奈川県産業技術総合研究所 | 神奈川県産業技術総合研究所 |



図 11 教育講座リーフレット

6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について

(1) 研究総括のねらいに対する研究の状況

本研究領域では、解決すべき社会的課題をしっかりと設定した上で、研究対象に対する理論構成を行う研究者、実験、観測、データ収集等により、研究対象のデータを提供する研究者、現代の数理科学の研究の進展を活かして、研究対象に対する数理モデルを構築する研究者、さらに数理モデルを用いたシミュレーション等で現場へのフィードバックを行う研究者等により有機的にチームを構成した。

これらのチームは、データ解析（石川チーム、吉田チーム、平岡チーム）、暗号理論（高木チーム）、精度保証計算高速計算（大石チーム、松本チーム、岩田チーム）、モデル最適化と制御理論（岩田チーム、小林チーム）、医療生命科学（栄チーム、長山チーム、水藤チーム）という形で、広がりのある研究分野を持ち、数学の広い分野が実際に応用へ向かうものとなった。これは巨大化したデータや新しいタイプのデータに対応し、現代の数理科学との連携の中で社会の課題に向かうというねらいに合致している。

これらのチームによる研究はほぼ計画通りに成果を達成しており、以下(2)、(3)、(4)に述べる特筆すべき成果を挙げている。特にこのそれぞれの研究チームで社会の問題から、医療・経済・材料等の課題を解決する、新たな数理科学研究が生まれていることは、今後の数理科学に関するCREST研究にとって非常に良い例を与えている。

数理科学者からの貢献が、生体・画像や電力の社会システム等最適化を含んだ新たなモデリング手法の構築に向かっていることは、各チームの研究者の近傍においては良く理解されて来ているが、石川チーム、吉田チーム、平岡チーム、大石チーム、松本チームは、研究成果を汎用のソフトウェアの形で公開して、実際に諸分野の研究者に使われ始めていることから、社会への成果還元のような方法は本研究領域の研究チームの創意によるもので十分評価されるべきものと考えられる。これらの公開ソフトウェアについては、本研究領域内で相互に利用、共同開発されるように、これまでに4チームから本研究領域の若手研究者に対してチュートリアルを実施した。さらに同じ戦略目標も掲げるさきがけ國府数学領域の若手研究者とも交流を推進し、若手の合同合宿、その発展形である「未解決問題ワークショップ」合宿や「若手数学者交流会」等を開催することにより、共同して研究する体制を作ることを支援した。これらの取り組みにより、チームの若い研究者の中から理論と現場を結ぶリーダーが育成され、若手リーダーの輩出も現実のものとなっている。

これらの意味で「数学者と数学を応用する分野の研究者が相互に連携する研究チームを構成して、現時点で解決が困難な社会的課題に取り組むとともに、そのプロセスの中で数学自体の発展をも目指すもの」に向かっており、ねらっている方向への研究成果が得られている。

(2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

吉田チームでは、連続時間非線形時系列に対する統計的モデリングの数学的基礎である確率統計理論と、大規模従属性データに対する統計解析手法の実用的研究を行ってきた。チームの強みである擬似尤度解析をさらに進展させ多くの成果を挙げた。確率微分方程式のパラメータ推定は極めて重要な問題であるが、ジャンプに対してロバストなボラティリティ推定のためのグローバルジャンプフィルター(Inatsugu and Yoshida 2021)、退化拡散過程の適合型推定(Gloter and Yoshida 2021 EJS)、ハイブリッド型推定(Kamatani and Uchida 2015 SISP; Kaino, Uchida and Yoshida 2017 BIC, Kaino and Uchida 2018 SISP, 2018 Metrika)、従属系に適用可能なベイズ型情報量規準(QBIC)の正当化(Eguchi and Masuda 2018 Bernoulli)、非エルゴード的従属性データのための非正規型擬似尤度の開発(Masuda 2019 SPA)、確率偏微分方程式の推定(Kaino and Uchida 2021 JSPI, 2021 JJSDS)など多くの結果が得られた。スパース推定における正則化法の研究においても擬似尤度解析が有用であることもわかってきている(Masuda and Shimizu 2017 MMS, Kinoshita and Yoshida 2019 arXiv, Umezu, Shimizu, Masuda and Ninomiya 2019 AISM, Suzuki and Yoshida 2020 JJSDS)。

この研究を金融データにおける証券価格形成の背後にあるダブルオークションシステムの超高頻度のスナップショットデータからなるリミットオーダーブック(株価気配値)に対して適用し、点過程によるモデリング手法を開発した(Clinet and Yoshida 2017 SPA; Muni Toke and Yoshida 2017 QF, 2019 QF, 2020 arXiv:2001.08442)。金融に関するモデリングでは、高頻度データに対するグラフィカル LASSO (Koike 2020 Entropy)、S&P500、VIX インデックス、Interexpectile Differences の関係性 (Bellini, Mercuri and Ryoji 2020 QF)、高頻度観測される金融資産価格間のマルチリードラグ(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)のウェーブレットの方法によるモデル化(Hayashi and Koike 2018 JFM)、先行遅行関係を内包する 2 証券から成る市場モデル (2 次元の連続時間 Gaussian 確率過程) が無裁定性を有するための十分条件 (市場の摩擦) の研究(Hayashi and Koike 2019 SPL)等の研究が進んだ。

これら最新の理論的研究成果はこのチームが確率過程の統計解析、およびシミュレーションのために公開している R パッケージソフトウェア YUIMA に順次実装されている。ベイズ型情報量基準 QBIC も実装され実用に供されている。これらの研究は、ソフトウェアを現実の超高頻度金融データ等に適用して、必要な推定量の計算や予測シミュレーションを行うことで有効性を示しており、基礎となる確率過程の理論的成果の重要性がそこで明らかになっている。例えば、正確で高速なベイズ推定量の計算は MCMC の深い研究が必要になる。MpCN 法 (鎌谷法) の理論的解析でエルゴード的な意味での有効性 (Kamatani 2017 JAP) や高次元での有効性(Kamatani 2018 Bernoulli) が示され、YUIMA に実装されている。このアルゴリズムでハイブリッドマルチステップ推定のようなベ

ズ推定量の計算もできる。このソフトウェア YUIMA の普及のための出版 (Iacus and Yoshida 2018 Springer) もされ、データ解析に対する社会の必要に応える研究となっている。YUIMA 自体のダウンロード数は中間評価時点でも 3 万回を超えており、開発に向けた YUIMA Conference (3 回)、YUIMA ユーザー会 (5 回)、普及にむけたチュートリアル (4 回) を開催している。チュートリアルは企業関係者で募集定員が埋まってしまうほど盛況であった。(図 12)

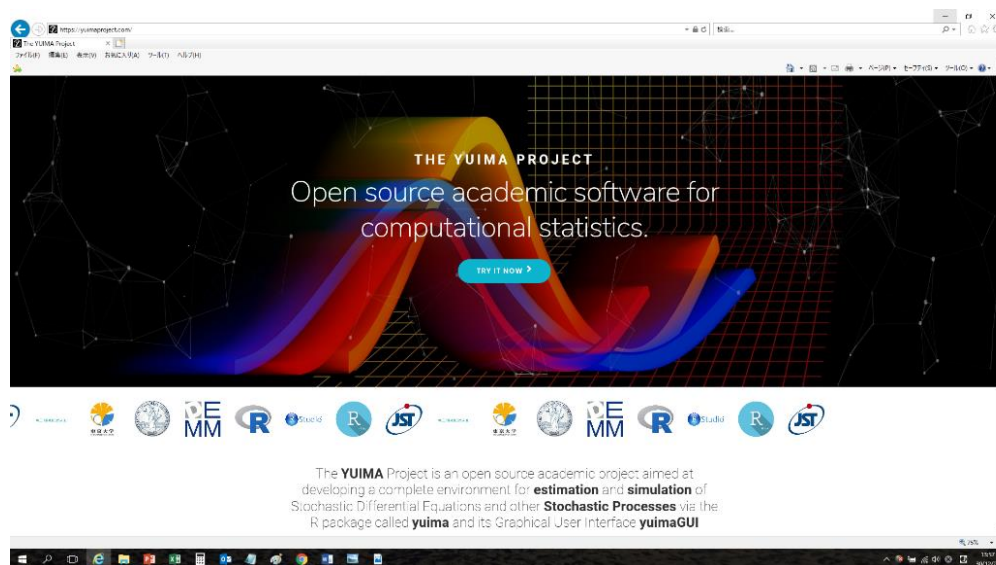


図 12 YUIMA Project ホームページ (<https://yuimaproject.com/>)

高木チームでは、暗号理論で不可欠な安全性の数理モデリングを行い、想定される最強の攻撃者をモデル化し、その攻撃に対する防御方法の確立を研究してきた。様々な数学問題の解答手続きの長大さをもとに暗号が組み立てられている現在、その解答を高速に求める方法が暗号への攻撃となる。現在定式化されている格子暗号に対し、数理的に高速解法を導き、計算量評価を行うとともに、そのアルゴリズムを用いて暗号解読コンテスト (TU Darmstadt Lattice with Errors Challenge: ドイツのダルムシュタット工科大学が主催するコンテスト。暗号解読をめぐって、世界中の暗号研究者が参加) で、2016 年に世界記録を達成している (https://www.kyushu-u.ac.jp/f/28449/16_07_19.pdf; EuroCrypt2016; Wang, Takagi, IJIS 2020)。また、Okumura, Sugiyama, Yasuda, Takagi, JJIAM 2018 では、円分体の小さな元で生成されるイデアルを秘密鍵として利用している格子暗号の秘密鍵が復元される場合を明らかにしている。

量子コンピューターの実装が現実味を帯びる中で、量子コンピューターを使用しても低い計算量では解答を得られないことが期待されるポスト量子暗号を策定する必要性が生じている。これに関して特に、アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) によるポスト量子暗号の標準化に対する高木チームの取り組みである。高木剛がプログラム委員長となり九州大学でポ

スト量子暗号を専門とする国際会議 PQCrypto2016 が開催され、その場で NIST からポスト量子暗号の標準化に対する具体的な計画が示された。まず高木チームも連携した形でいくつかの暗号方式を提案したが、それらは採択には至らなかった。その後、評価者として参画を続けており、NIST で採択された方式において計算量が小さく暗号が脆弱となる場合の発見などで貢献し高く評価されている。多変数多項式求解問題を用いる NIST 採択方式にも多項式時間で解読が起こる場合の指摘(国際会議 IWSEC2018 Best Paper Award、情報処理学会論文誌 2019 年度論文賞)やグレブナ基底の計算量が小さくできるという指摘(国際会議 PQCrypto 2020)など多くの論文で、攻撃の有効性、すなわち安全性の評価をおこなっている。一方、採択方式を実装していくうえで重要な高効率署名方式 QR-UOV を代数における剰余環の理論を用いて導き提案している(AsiaCrypt2021)。

ラマヌジャングラフは、多数の楕円曲線暗号を構成する格子の間の射をグラフ状に構成することにより暗号性能を高めるための研究において、十分な複雑さが保証されるグラフの構成に必要とされるものである。基礎理論の構築とともに、ラマヌジャングラフを用いて高速化したポスト量子暗号としてのハッシュ関数の暗号装置に関する特許を三菱電機と共同で出願し特許を得た(特許第 6614979 号, Tachibana, Takashima, Takagi, JSIAM Letters 2017)。また、ハッシュ関数を用いない新しい同種写像暗号方式 SiGamal の提案を行っている(AsiaCrypt2020)。

量子現象を用いた暗号の実現に現在応用されようとしているものは単独の量子に関する理論であるが、その安全性問題に関連して、相互作用を考慮した多体問題についての基礎的な知見を得た。すなわち、Kimoto, Reyes-Bustos, Wakayama, IMRN 2021 で、非対称量子ラビ模型(2 体問題)において半整数パラメータにおけるスペクトルの縮退を示した。これは量子暗号に対する強力な攻撃手段を構成する可能性を持つものである。

現実に広く使われている CRT-RSA 暗号に対して、秘密鍵が小さいときの安全性評価をおこなっている(EuroCrypt 2017; Takayasu, Lu and Peng, J. Crypt. 2019)。また、秘密鍵や乱数の漏洩耐性、鍵依存平文安全性、構造保存署名などについての研究を発表出版している。

現在では高木チームの広報の成果でもあるが、暗号理論は社会を支える理論として社会的関心が高まっている。高木チームから数学が安全性を支える鍵であることがわかる研究成果として、一般向けにもなる図書やマスコミを通じて広報されている。実際報道発表は 9 回を数え、NHK のクローズアップ現代「あなたのパソコンが危ない 追跡! 謎の新型ウイルス」、NHK のサイエンス ZERO 「量子コンピューターでも解読不可能!? 新しい暗号誕生なるか」などに取り上げられている。

大石チームでは、精度評価に必要なキ一定数や補間法の改良などの基礎研究を行い、悪条件問題・大規模性問題等に対する基盤となる高精度高速数値計算法を開発し、解の存在のみならず、正值性、符号反転、解の爆発などその特徴的な性質を精度保証付き数値計算により証明する手法の開発をしてきた。

より具体的には、モデルに入るパラメータの不確定性に起因する困難に対して、従来の区間演算からのアプローチではなくアファイン演算に基づき不確定性間の影響を大幅に打ち消しシャープな解析ができることを多方面で示した (Rump and Kashiwagi, NTA, IEICE, 2015)。

高精度な数値計算に伴う計算速度の急減少を解決するために、浮動小数点演算の誤差も浮動小数点演算自身によって計算するエラーフリー変換法を提案し、数値線形代数の基本問題の精度適応型高速数値線形代数解析アルゴリズムを統括的に展開し、スーパーコンピュータからパソコン計算 (GPU 計算を含む) までスケラブルに実装し、行列積計算の精度を保証しつつ最高速に計算できるように改善した。これには漸近対角行列理論を創始し数学的原理を解明 (大石) したことを用いた。

スーパーコンピュータの並列計算の精度保証計算の性能を評価するテスト問題作成システムも開発している。

相転移判定に必要な符号判定を境界値問題の固有値問題に帰着し精度保証付き数値計算によって解決し (田中)、また、アファイン演算による計算誤差打ち消し具合の評価によって可積分性の判定の指標が得られることを示した (柏木・高橋・丸野)。

三次元双曲多様体の体積の計算においては、体積の違う三次元双曲多様体は異なる三次元双曲多様体であるという定理の下で、実際に2つの計算した数値が異なるかどうかは、その計算の精度も計算されていなければ判定できないが、大石チームの貢献により、計算の精度も与えられ、異なる三次元双曲多様体を実際に分離することができた。

偏微分方程式の解が複数存在するかどうかは、どのような関数空間の分離された2つの部分集合のそれぞれに解の存在を示す必要があるが、無限次元の関数空間を有限次元の空間に写像して、そこで分離されていることを示す精度計算法を構築して複数存在を示しており、偏微分方程式の解の分岐が実際に起こる臨界点の計算精度も分かっている。

これらの研究成果は、学術雑誌(149編)、国際学会での講演等(594件)で発表され、国際的にも高い評価を得ている。

チームの研究成果を、精度保証計算ライブラリーkv (図13)、VCPとして公開することにも注力し、新しい研究成果によりライブラリーを更新している。C++上に容易に実装できる形で提供されており、これらの利用のためのチュートリアルも何度も開かれ、基礎から最先端までを解説した書籍を出版 (大石進一編著「精度保証付き数値計算の基礎」コロナ社, 2018) (図14) している。これは研究者には広がりつつあり、社会の多くの分野で有効に利用される状態になっている。



1. はじめに

本ページでは、数値計算の数値保証付きライブラリkvのインストール方法を説明しています。

特に数値保証付きの精度保証付きライブラリkvのインストール方法については、template経由によるインストール方法を説明しています。なお、kvは「zero overhead principle」で設計されているため、非常に速いといえる（※詳細は後述のとおりです）。

数値保証付きの精度保証付きライブラリkvのインストール方法については、このページを参照してください。 [kv-intro.pdf](#) (全8ページ)

2023年11月12日現在、kvはLinux上で動作しています。また、Windowsでも動作しますが、インストール方法は別途説明されています。また、Linux上で動作する場合は、インストール時に必要なライブラリがインストールされていない場合は、インストール時に必要なライブラリをインストールする必要があります。また、Linux上で動作する場合は、インストール時に必要なライブラリがインストールされていない場合は、インストール時に必要なライブラリをインストールする必要があります。

2. 動作環境

C++のコンパイラは、gccが推奨されています。また、Linux上で動作する場合は、インストール時に必要なライブラリがインストールされていない場合は、インストール時に必要なライブラリをインストールする必要があります。

動作環境を安定させるために、以下の環境で動作していることを確認してください。詳細は、[動作環境](#) (intro.pdf, 23. 2. の下) の表を参照してください。

一般的に、次の環境で動作する環境が、以下の環境よりも動作が速いことを確認してください。

- Ubuntu 20.04 (64bit) + gcc 9.3.0
- Ubuntu 22.04 (64bit) + clang 15.0.0
- Ubuntu 18.04 (64bit) + gcc 7.5.0
- Ubuntu 15.04 (64bit) + clang 3.8
- Ubuntu 14.04 (64bit) + gcc 4.8
- Ubuntu 13.04 (64bit) + gcc 4.8
- Ubuntu 12.04 (64bit) + gcc 4.8
- Windows 10 (64bit) + Visual Studio 2017
- Windows 7 (64bit) + Visual Studio 2013
- Windows 7 (64bit) + Visual Studio 2008
- Windows 7 (64bit) + g++ + gcc
- Windows 7 (64bit) + MPFR 2.5.2 + gcc
- Mac OS X Yosemite + g++
- Ubuntu 12.04 (64bit) + MPFR 2.5.2 + gcc
- Ubuntu 12.04 (64bit) + MPFR 2.5.2 + gcc
- Sharp NetWalker PC Z1 + Ubuntu 9.04 + gcc
- Intel Edison + gcc

3. ダウンロードとインストール

ダウンロード: [kv-1.4.3.tar.gz](#) (2023/11/12現在)

([kv-1.4.3.tar.gz](#))

また、[https://github.com/makekvm/kv](#) からアクセスできます。

ヘッドファイルのみがインストールされるようにインストールされています。また、ライブラリはmakeする際のインストールオプションで指定することができます。archiveオプションは、archiveオプションで指定されたディレクトリにインストールされます。また、kvは、current_directoryで指定されたディレクトリにインストールされます。また、kvは、current_directoryで指定されたディレクトリにインストールされます。

- kvのインストールオプション
- kvのインストールオプション

インストール:

```
cd kv
cmake .. -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local
```

ここで、-DCMAKE_INSTALL_PREFIXは、インストール先のディレクトリを指定するためのオプションです。

インストールオプションは、-DCMAKE_INSTALL_PREFIXを指定することで指定できます。また、kvは、current_directoryで指定されたディレクトリにインストールされます。

[[2023/11/12]] 現在、kvはLinux上で動作しています。また、Windowsでも動作しますが、インストール方法は別途説明されています。また、Linux上で動作する場合は、インストール時に必要なライブラリがインストールされていない場合は、インストール時に必要なライブラリをインストールする必要があります。

kvライブラリが動作する環境は、以下の環境よりも動作が速いことを確認してください。

図 13 精度保証計算ライブラリ kv



図 14 書籍「精度保証付き数値計算の基礎」

(3) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

岩田チームでは、現象の数値モデルの性能を最適にする研究を行い、正確な数値と誤差を含む数値を区別する動的システムのモデル化のための混合行列で記述される微分代数方程式の指数減少法に関して、指数 1 以下の同値な微分代数方程式に帰着する手法を開発した (Iwata, Oki and Takamatsu, JACM 2019)。線形マトロイド・パリティ問題は、代表的な組み合わせ最適化問題であるが、1978 年に Lovasz が線形マトロイド・パリティ問題の多項式時間解法を示して以来、40 年近くに渡って未解決であった重み付き線形マトロイド・パリティ問題に対して、多項式時間解法を初めて与えた (Iwata and Kobayashi, Proc. STOC 2017,

STOC Best Paper Award 受賞)。

より実用的には、統一的な 2 値判別モデルを用いた統計モデルの最適化手法、テンソルデータの圧縮アルゴリズムや行列の低ランク基底を用いた圧縮手法を開発するとともに、既存の複数の基底からいくつかの要素を選ぶことで、スパース表現のための辞書を作成する辞書選択に対して、新しい高速貪欲アルゴリズムを開発した。

生命現象としてはシロイヌナズナの概日周期の解析やコウモリの飛翔の解析 (PNAS USA 2016)、社会現象としては配電損失の最小化問題や列車運行システムへの最適モデリング手法の応用を行っている。コウモリが現在の獲物のみならず、その先にいる次の獲物の位置までも超音波で先読みすることで、より多くの獲物を確実に捕らえる飛行ルートを選択していることを数理解析とフィールド計測によって明らかにした (図 15)。このことは、2016 年日本経済新聞、読売新聞でも報道された。2018 年には電力網における周波数変動の数理モデルに関し、日刊工業新聞、日経産業新聞で報道されたが、2018 年北海道におけるブラックアウト後、日経新聞に「電力網の弱点 数学で探る」という形で報道されている。列車運行システムに関しては通勤時間帯の列車が非常に混雑している東京首都圏において、移動時間と電車の混雑率に基づくコスト関数を用いた利用者均衡配分モデルを、時空間ネットワークを圧縮して得られるコンパクトなモデル上で繰り返し解く局所探索法により、優等列車停車駅の最適化を行う手法を開発した。

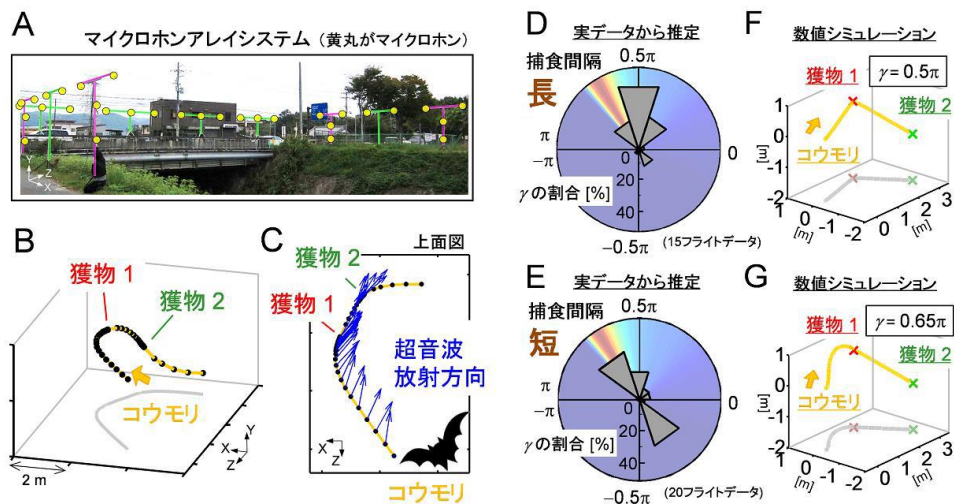


図 15 コウモリ飛行ルートの数理解析

野外での音響計測 (A) で得られたコウモリの軌道の一例 (B, C) と、軌道データから推定されたパラメータのヒストグラム (D, E) とシミュレーション (F, G)

栄チームでは、細胞集団における生命現象の中で「分化の波の伝播機構」や「細胞接着による増殖制御機構」等に関し、数理モデルと生物実験の比較検討を行い、数理モデ

ルを検証する結果を得るとともに、数理モデル構築へのフィードバックを行っている。ショウジョウバエ視覚中枢系における分化の波の伝播機構においては2016年「脳の形成において生じる分化の波」についてプレスリリースを行っている(図16~18)(Sato, Yasugi, Minami, Miura, Nagayama, PNAS 2016)。これはヤヌスキナーゼ・シグナル伝達転写活性化因子の寄与を示したものとなった(Tanaka, Yasugi, Nagayama, Sato, Ei. SR 2018)。また、楕円形樟脳片運動の普遍性質の検証にも成果を挙げた(Ei, Kitahata, Koyano, Nagayama, Physica D 2018)。さらに、積分核表示によるパターン形成問題の定式化、それによるショウジョウバエの視覚中枢における未分化細胞の神経幹細胞への分化の波のシミュレーション等に成果を挙げ、細胞形状形成において核配置のボロノイ分割によるモデルの有効性を確認した。

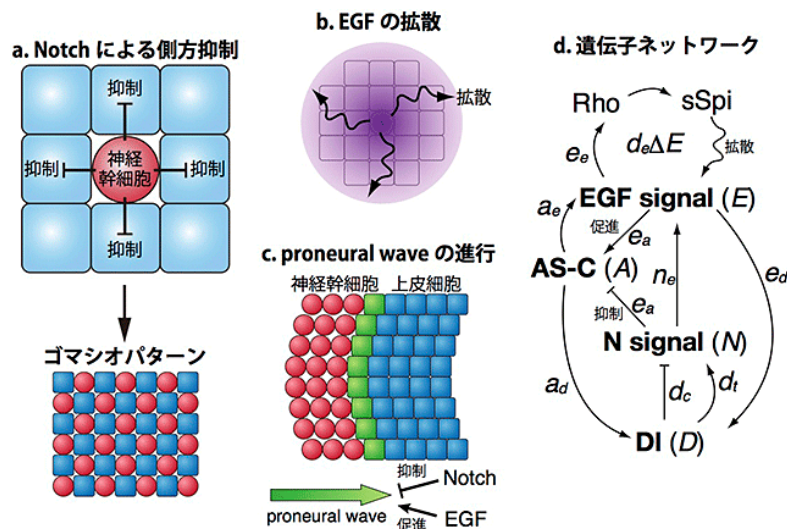
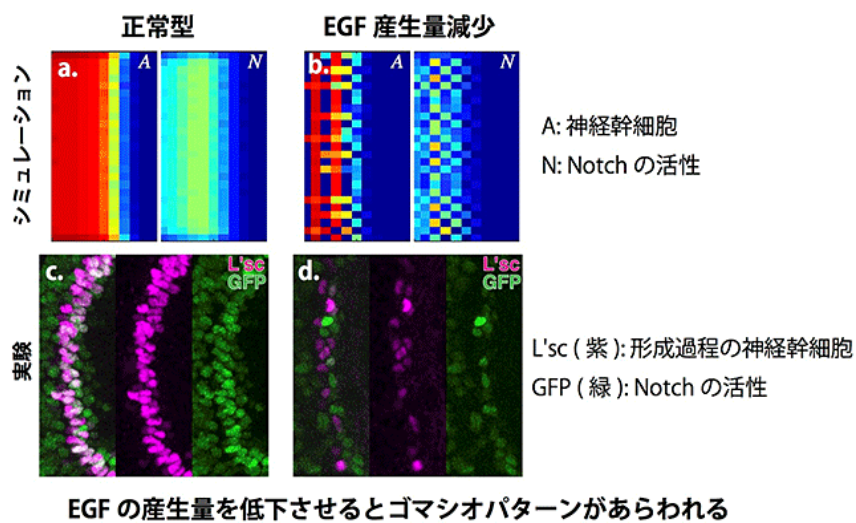


図16 長距離性の情報伝達因子であるEGFと短距離性の情報伝達因子Notchの協調作用



EGFの産生量を低下させるとゴマシオパターンがあらわれる

図17 EGFの拡散とNotchによる側方抑制を組み合わせたProneuralWaveの数理モデル

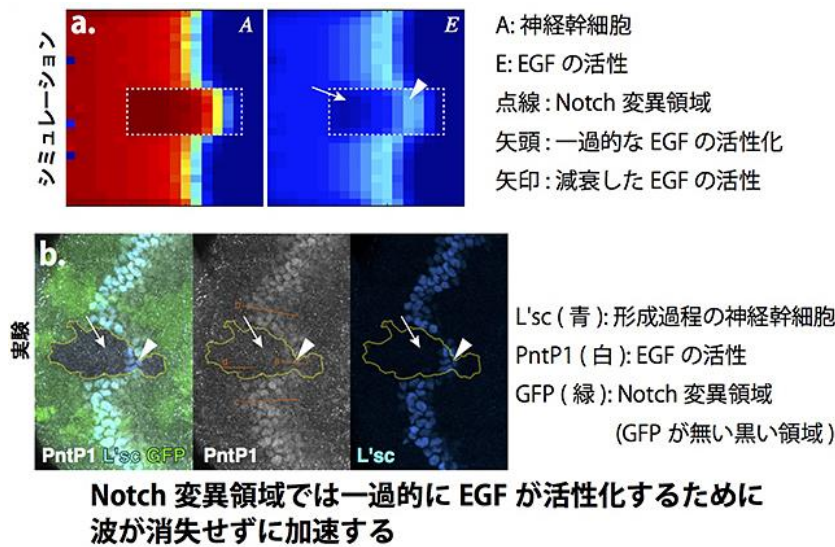


図 18 Notch 変異領域での ProneuralWave の数理モデル

松本チームでは、超一様点集合を用いた数値積分法である擬似モンテカルロ法の理論的研究、社会におけるランダムネスの効果の研究を行った。2 元体上の形式的冪級数環を用いた超一様点集合の構成と、その一様性の基準となるパラメータつき WAFOM の考案、計算誤差の小さい lowWAFOM 点集合の開発は、実解析的関数は係数を有限体係数関数環にあると考えても意味があり、有限体係数関数環に写した世界での積分理論（総和法）が著しく簡略化されることに着目し、これを実数の世界に引き戻した場合に、総和法を行う点集合として得られる。通常モンテカルロ法においては、総和を取る点の個数の平方根の逆数で評価される収束となるが、lowWAFOM 点集合においては、点の個数の逆数程度で評価される急速な収束となる。これは、非常に独創的で優れた研究結果である(図 19～21)。lowWAFOM 点集合については、汎用ソフトウェア R 用のパッケージとしてウェブページ上で公開されている。

また、企業と共同でアリの生態を観察し、局所最適化を回避して大域最適化を得るためのフェロモン感受性の低いアリの役割を見出した。アリの集団の持つランダム性については、アリの全数にチップを張り付けその動きを正確に追跡する方法を開発し、一定のランダム性を持つことがアリ集団の動きのロバスト性を導いていることがほぼ実証できている。これは、その実験方法を含め非常に興味深い結果である。

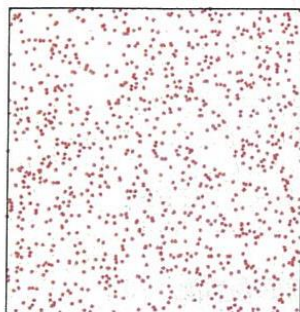


図 19 擬似乱数
(メルセンヌツイスターによる
2次元点プロット)

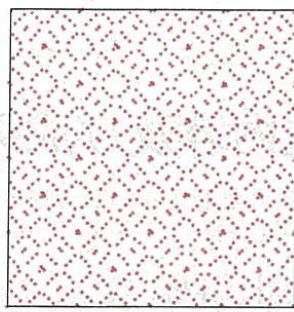


図 20 超一様点集合 1
(t-value を小さくすることでえ
らばれたもの : sobol 点集合)

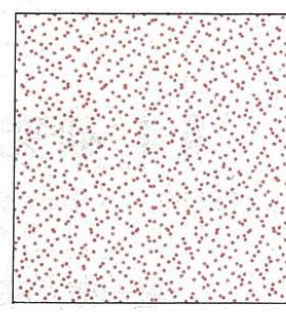


図 21 超一様点集合 2
(sobol 点集合を LowWAFOM 化)

平岡チームでは、パーシステントホモロジーを用いた物質科学の研究を行ない、数学を使ってガラスの原子の秩序性を明らかにし、また粉体が結晶になる際の構造の変化を解明する等に成果を挙げている (Hiraoka et al. PNAS2016)。これらについては、2016年に「ガラスの『形』を数学的に解明」(図 22~23)、2017年に「数学を使って粉体が結晶になる際の構造の変化を解明」(図 24)という共同プレスリリースを行っている。

パーシステント図に対する機械学習法の開発をおこない、パーシステント図を再生核ヒルベルト空間へ連続に埋め込むカーネル法の理論を構築し、その計算手法の提案やガラス転移点の特徴付けなどの応用研究も行った。また、線形機械学習法では逆解析も可能となっており、学習結果に対して幾何学的な解釈を与えることができる (Kusano, Fukumizu, Hiraoka: ICML2016, JMLR2018. Obayashi, Hiraoka, Kimura: JACT2018)。

パーシステント図のスケール極限に関する理論的成果として、いくつかの極限定理の証明に成功している。ユークリッド空間内のランダムな点過程や格子モデルに対し、そこから定まるベッチ数の大数の法則と中心極限定理を証明し、またランダム測度理論を用いることで、パーシステント図の極限定理(大数の法則に対応)を得て、ランダムパーシステント図の極限としてあるラドン測度を得られることを示し、ラドン測度の台の特徴付けを行った(Hiraoka, Shirai, Trinh:AAP2018. Hiraoka, Tsunoda: DCG2018)。

マルチパラメータ・パーシステント加群の研究に Auslander-Reiten 理論を導入し、制限付き 2 パラメータ・パーシステントホモロジーとして可換梯子型クイバーを提案し、梯子の長さに応じた有限性を証明し、マルチパラメータ・パーシステント加群に対して、区間分解・区間近似の概念を提案した。代数的な取り扱いが困難であったマルチパラメータ・パーシステント加群を実用的なデータ解析技術にするうえで極めて有効な手法になるものと思われる (Escolar and Hiraoka. DCG2016)。

これら、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やパーシステントホモロジーの表現論的研究は、ガラス材料など無秩序系の記述言語となるパーシステントホモロジーを用いた物質科学をさらに加速させる。

また、HomCloud というユーザーフレンドリーかつ世界で初めて逆問題解析、機械学習、スパース解析などのより踏み込んだパーシステントホモロジー解析手法を組み込んだソフトウェアを公開していることは研究者コミュニティ・産業界への非常に大きな貢献である。HomCloud には、研究成果によるパッケージが随時付け加えられている。HomCloud は産業応用へのライセンス供与も行っており、大学・企業の研究現場・材料科学の大型プロジェクト（内閣府 SIP, JST MI2I, NEDO 超超プロジェクト）で広く使われ、生命、医療、経済学、環境などの諸分野でも応用されている。異分野共同研究を実施した。医療画像への応用では肝腫瘍の画像解析へパーシステント図の機械学習法を適用し、非常に高い精度で肝細胞癌、転移性腫瘍、肝血管腫の 3 種を識別可能であることが示された。その他にも、生命科学、環境エネルギー問題、企業の特許戦略解析、気象学などへ応用している (Inatsu et al, SOLA, 2017, Oyama et al, Sci. Rep. 2019, Suzuki et al, Comp. Geosci. 2020, Suzuki et al, Sci. Rep. accepted)。また本ソフトウェアを用いて国内材料系企業 6 社との共同研究をおこなっており、材料 TDA コンソーシアム「トポロジカルデータ解析コミュニティ」も設立している（民間企業 19 社、その他研究機関などから 8 機関が参加）。HomCloud Webpage: <https://homcloud.dev>

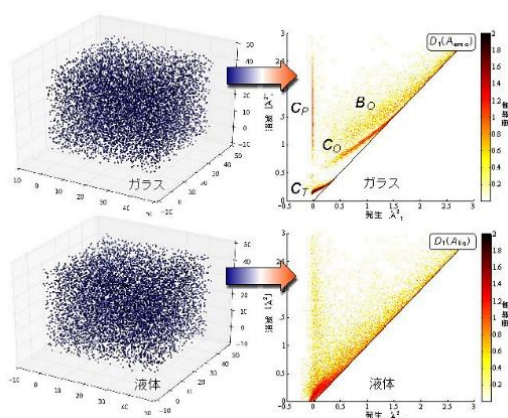


図 22 SiO₂ の原子配置 (左) とそのパーシステントホモロジー (右)

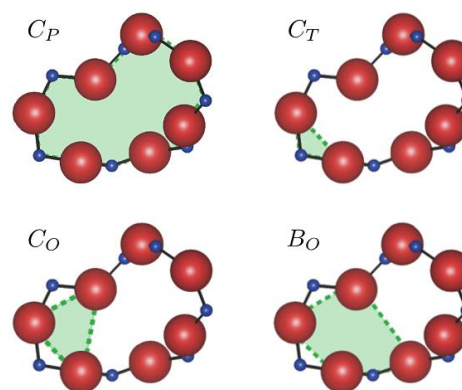


図 23 SiO₂ ガラスのパーシステントホモロジー (図 22 右上) に対応する典型的なリング構造

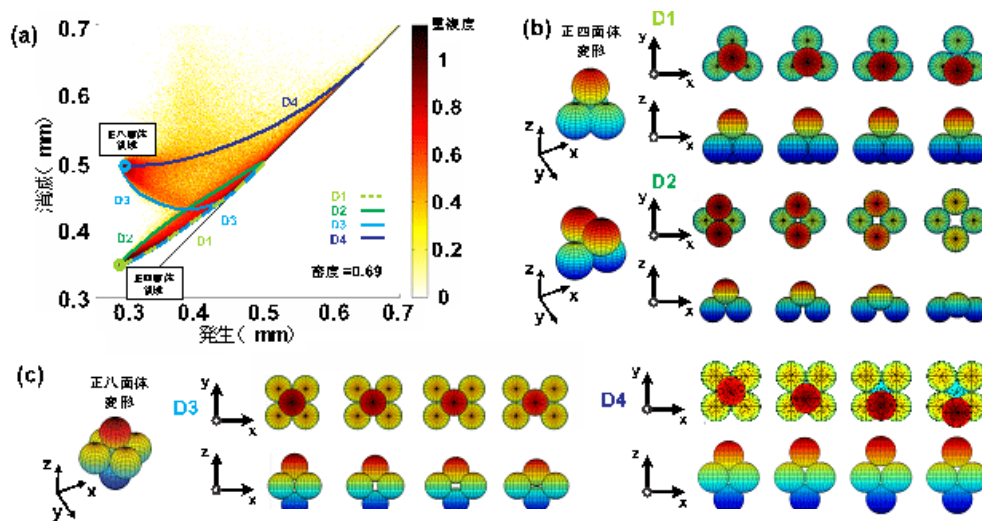


図 24 粉体のパーシステント図を特徴づける 4 つの変形モデル

(4) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

石川チームでは、認識の数理モデルの構築と高階・多層確率場を応用した実データの処理手法の研究を行い、顕著な結果を多数得ている。特に事前知識を活用した高階確率場理論を用いた医療応用されている動脈・静脈のセグメンテーション (Kitamura, Li, Ito, Ishikawa, IJCV 2016; 図 25) は、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必須である。また、大域特徴と局所特徴の双方を活用するネットワークによる白黒画像の自動色付け手法 (Iizuka, Simo-Serra, Ishikawa, 国際会議 SIGGRAGH2016, 経済産業省 Innovative Technologies 2016 特別賞「Culture」受賞; 図 26)、ラフスケッチの自動線画画変換手法 (SIGGRAPH2016)、Smart Inker: ラフスケッチのペン入れ支援 (SIGGRAPH2018)、ディープネット

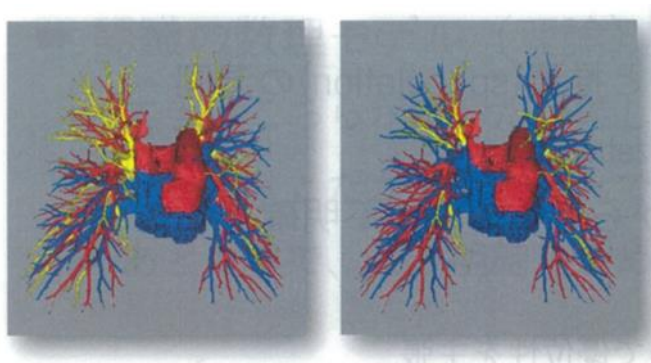


図 25 高階確率場理論を用いた医療応用されている動脈・静脈のセグメンテーション (右側: 精度向上している)

ワークを用いた画像補完手法 (国際会議 SIGGRAPH2017; 図 27) は、社会的に非常に意義の高いものであり、その幾つかについてはウェブ上で公開していることは特筆に値する。これらの研究の社会における注目度も高く、公開されたソフトウェアで白黒画像に色付けした画像は、2016 年以降毎週のように新聞、テレビにて実際に使われ、報道にイノベ

ーションを起こしている。このソフトウェア開発に関わる記事は日経新聞、産経新聞等に取り上げられ、日本テレビ「日テレ NEWS24」、フジテレビ「みんなのニュース」「とくダネ!」、TOKYO MX「モーニング CROSS」、テレビ東京「ワールドビジネスサテライト」等にも取り上げられている。これらの成果は国際会議 SIGGRAPH でそれらが発表されると同時に社会の実用に供されるというものになっている。

理論的に畳み込みフィルタに任意の行列多様体の制約を課すことを可能にする新たな学習方法で、その数値計算アルゴリズムを安定性と局所解への収束保証付で導出し、行列多様体の選択により、画像認識タスクでの認識精度が向上することを実験的に示した (Ozay and Okatani, 国際会議 AAAI-18 2018)。また、「画像理解」の実現へ向けて、画像と言語という異なるモダリティの表現を効果的に融合する「Dense Co-attention ネットワーク」を提案し、1 枚の画像と、そのシーンに関する自然言語の質問文のペアに適切に答えるタスクに適用し、データセット VQA および VQA 2.0 において世界最高の精度を達成した (国際会議 CVPR-18 2018)。

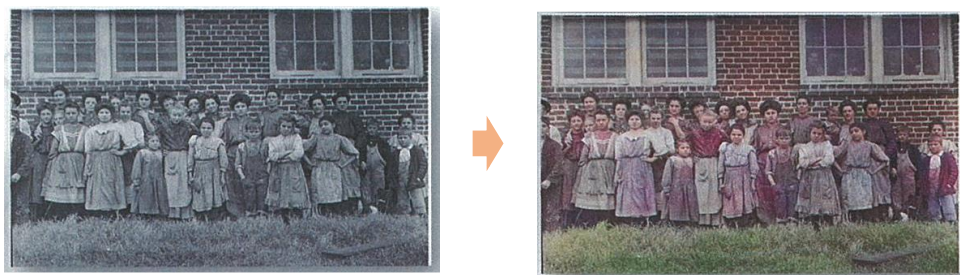


図 26 大域特徴と局所特徴の双方を活用するネットワークによる白黒画像の自動色付け手法

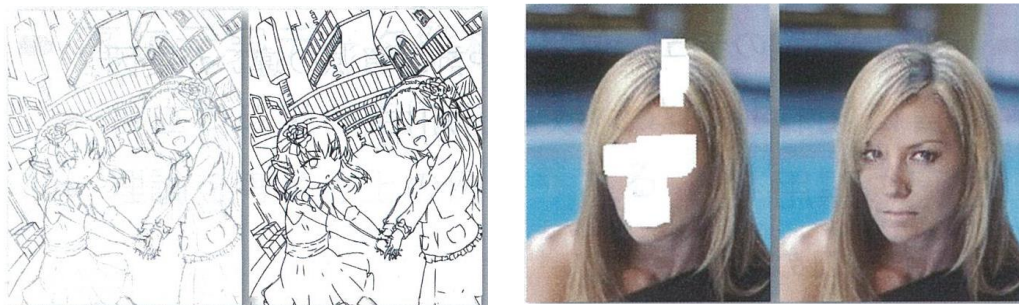


図 27 大域特徴と局所特徴の双方を活用するネットワークによるラフ画の線画変換手法(左側)、画像の自動補完手法(右側)

小林チームでは、環境のデータの極僅かな部分しか知らない状態でも、動きながら運動に役立つデータのフィードバックを受けて分散的に制御する方法として、手応え制御、陰陽制御(明示的な制御則である陽的制御と身体と環境のダイナミクスから表出する制

御則である陰的制御の適切な結合により実現する環境適応的制御)、階層制御(大自由度を持つ身体の自律分散制御と中枢制御の適切な組み合わせによるリアルタイム制御)の方法を確立し、それに基づく開かれた環境(プログラム実行環境が外的要因によって変化する状況)において働くロボットの開発・実用化を研究した。

自律分散制御則の妥当性を四脚ロボット実機に実装して実験的に検証した。極めてシンプルな制御則によって、四脚動物が示す速度に応じた歩容遷移現象を世界で初めてロボットで再現した(Owaki and Ishiguro, SR 2017)。クモヒトデの環境適応能力・故障適応能力を支える自律分散的な制御構造を明らかにした(Kano, Sato, Ono, Aonuma, Matsuzaka and Ishiguro, RSOS 2017; Wakita, Hayase and Aonuma, SR 2019)。クモヒトデ型の制御に関しては、2017年「クモヒトデに学んだ、想定外の故障に「即座に」適応可能な移動ロボット」(図28)としてプレスリリースしているが、日本経済新聞、日刊工業新聞、読売新聞等で報道されている。

また、モデル生物の身体構造を調べるための基盤技術として、X線マイクロCTデータから複雑な3次元構造を再構築するために、明度・テクスチャ・距離の3つの特徴に基づいた尤度を設計し、3次元構造を最尤推定する新規な方法論を開発している。

陰的制御を具現する試作機 i-CentiPot (ムカデ型ロボット) の作成等で成果を挙げている。i-CentiPot については、日経産業新聞、毎日新聞、読売新聞で報道された他、NHK おはよう日本でも取り上げられている。また「タミヤ楽しい工作シリーズ No. 230 ムカデロボット工作セット」として販売されている。

2019年に小惑星「りゅうぐう」を探索した「はやぶさ2」には大須賀が開発に加わった小惑星探査ローバー「MINERVA-II2」が搭載された。全く未知の小惑星の表面で移動可能なローバーの設計に「陰的制御」を主役にして環境の未知性を活かして移動し続ける制御系を構成した。

災害復旧支援のためなど、開かれた環境において働くロボットに対する社会の関心は高く、建機メーカーとの共同研究が進み、全方位柔軟クローラの開発に結び付いている。これは将来のイノベーションに結び付く可能性も大きい。

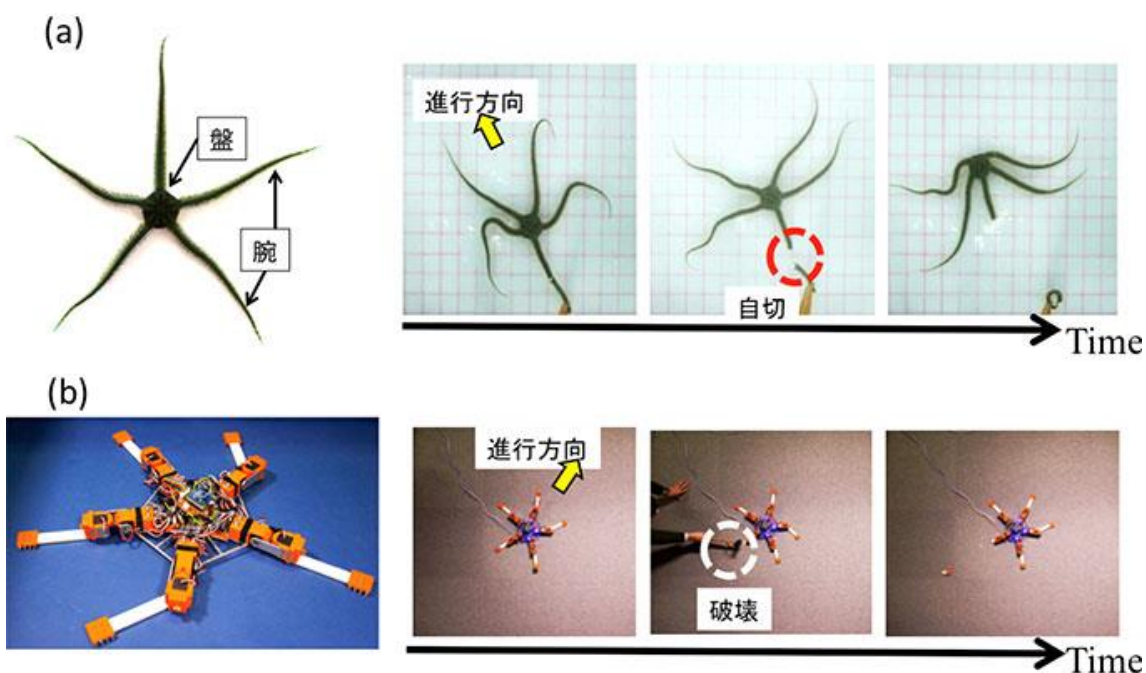


図28 (a) クモヒトデの全体像(左)と腕を自ら切断して推進する様子(右)。

(b) 開発したクモヒトデ型ロボット PENTABOT II (左)と、腕を破壊した時のロボットの運動の様子(右)。ロボットの腕をいかに破壊しても即座に適応し、残った腕を協調させて推進し続けることが可能。

水藤チームでは、放射線医、医療画像解析研究者、数値計算研究者、数値解析の数学研究者が、臨床医療と理論研究の橋を作ることで、医療のニーズに数学が応える連携研究が実施された。実際、5つの班が延長期間を含め見事に連携し、医療画像解析における腸間膜形状構成システム(特願 2017-539181、PCT/JP2016/076246)(内視鏡下手術支援は実装を検討中; 図 29)、MRI データからの機能表示 DNN 学習システム(Masutani, MRMS 2021)、同一患者の異なる時期の気管支の樹木構造の時間変化を追跡するシステム、乳がん診断システムの開発、血管血流モデル解析における血管壁の構造力学解析(Ueda, Suito, Ota, Takase 2018; Takizawa, Tezduyar and Sasaki, CM 2019)、血流現象のシミュレーション(図 30)特に人工透析用動静脈シャント吻合部における血流解析、診断のアルゴリズム解析による客観化における人工透析患者に対する投薬量管理システムの開発(特願 2019-009333、PCT/JP2020/002305)、シミュレーションを支える基礎理論として有限要素法を含み時間発展を許すアイソジオメトリック解析法の確立(Ueda, Saito, JJIAM 2018)、1次元血流モデルの解析など、多くの臨床応用に結び付く成果を挙げた。これらにより、従来の専門医の経験知に基づくものや、目視による主観的な比較から、より客観的なものとなるため、患者の負担や医師の診療負担軽減、診断効率化につながる事が期待できる。

これらの成果は国際学術雑誌、応用数理国際会議 ICIAM2019 の基調講演をはじめとして国際学会で発表されるとともに、実際の臨床医に参考にされる指標を提供しているもので、医学系の雑誌に出版され、医学系学会での講演もされた。さらに研究成果を(国際)特許と

して出願している。臨床医学から数理科学へのニーズに対応して CREST チームとして問題の定式化検討を行い、研究結果を提示しており、医療現場から期待される存在となっている。このために臨床現場と直接に会話して数理と臨床課題の橋渡しをおこない、当事者間の大きなネットワークを築いてきている。チームとしてアウトリーチ活動を精力的に続け後継者の発掘育成を行ってきている。

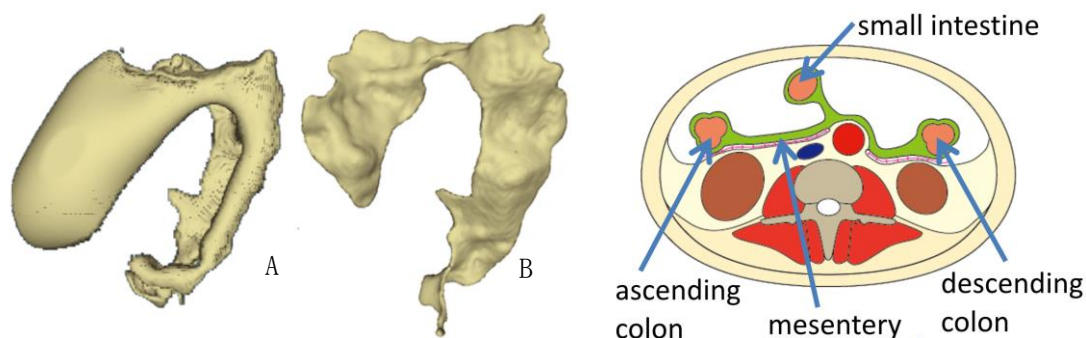


図 29 内視鏡下手術を支援し、安全性を高めるために開発している腸間膜形状推定アルゴリズムをさらに改良し、推定精度を向上させた。

左側のモデリングについて

A: 単純な法線方向推定を用いた RBF による再構成

B: 仮想物理モデルによる法線方向推定の改善



図 30 大動脈縮窄症に対する解析例

長山チームでは、細胞群の動態を用いた皮膚モデルに基づいて、基礎となる方程式が明らかではない現象についてのユニークなモデリング研究をおこなった。2光子顕微鏡を用いた精密な実験観察とあいまって、モデルを精密化することにより、角層バリア機能、Ca²⁺動態、痒み現象、皮膚の再生の状態を説明するとともに、皮膚の角化、KID 症候群、鶏眼、乾癬など様々な病態の再現等の成果を挙げた。真皮乳頭層の凹凸の意味を数理モデルとして明らかにし (Kobayashi, Yasugahira, Kitahata, Watanabe, Natsuga, Nagayama, CM 2018)、厚

みを持つバリア機能の高い人工皮膚の培養に応用した(2018年プレスリリース;図31,32)。
 また、皮膚の角化のメカニズムの解明(Ipponjima, Umino, Nagayama, Denda, SR 2020)、非ヒスタミン性のかゆみのモデリング(Kobayashi, Kitahata and Nagayama, PR E 2017)、真皮変形の皮膚機能への影響と鶏眼等の形成機構のモデリング(Ohno, Kobayashi, Uesaka, Gotoda, Denda, Kosumi, Watanabe, Natsuga, Nagayama, SR 2021)、触覚メカニズムと触錯覚のモデリング(Nakatani, Kobayashi, Ohno, Uesaka, Mogami, Zhao, Sushida, Kitahata, M. Nagayama, SR 2021)などの成果を挙げている。またチームの資生堂研究者と共同で、スギ花粉が肌のバリア機能を低下させること発見している。これらについて「三次元培養皮膚シート、その製造に使用するための細胞培養容器及びその製造方法」(特願 2016-125843、2016-256778、019-002299)、「トロンビンの抑制作用を指標とした皮膚状態改善剤のスクリーニング方法、及びトロンビン作用阻害剤を含む皮膚状態改善剤」(特願 2017-248116)、「資質流動性を指標としたバリア機能の評価方法」(出願番号 PCT/JP2018/009329)として特許を出願している。スギ花粉と皮膚のバリア機能についての研究は、日経産業新聞、日刊工業新聞、毎日新聞や、フジテレビ「めざましテレビアクア」、TBS「あさチャン!」、フジテレビ「みんなのニュース」、NHKBS プレミアム「美と若さの新常識～カラダのヒミツ」で取り上げられている。皮膚科学者との連携のもと、新規の人工皮膚培養法の研究、鶏眼のメカニズム解明、触覚のメカニズム解明などを進め、また成果を社会に展開する活動を行った。

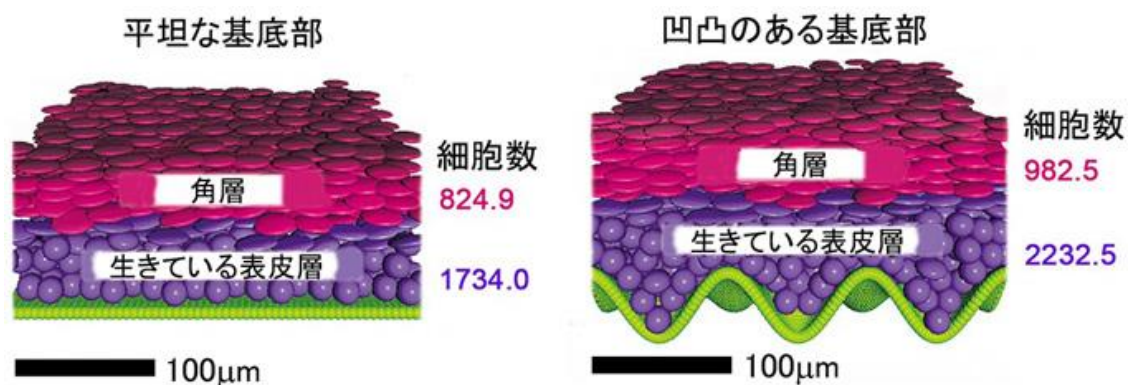


図 31 数理モデルに対するコンピューターシミュレーションによって表された表皮モデル

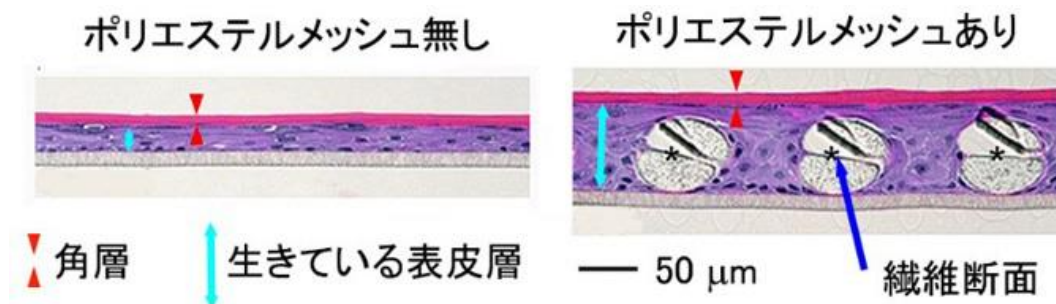


図 32 HE 染色法を用いた表皮モデル断面画像

(5) その他特記事項

受賞については、多くのチームが研究成果を認められ、著名な賞を受賞している。

高木チームの高木剛は 2015 年第 11 回日本学術振興会賞、および The Third International Symposium on Computing and Networking、CANDAR 2015 において CANDAR Outstanding Paper (Ye Yuan, Chen-Mou Cheng, Shinsaku Kiyomoto, Yutaka Miyake, and Tsuyoshi Takagi, “Portable Implementation of Lattice-based Cryptography using JavaScript”, CANDAR 2015, pp. 58-67, 2015) を受賞した。縫田光司は「高機能暗号およびその秘匿検索 技術への応用に関する研究」に対し、2018 年の文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞した。

石川チームの飯塚里志、シモセラエドガー、石川博は「AI による白黒写真の自動色付けシステム」技術に対し、経済産業省の Innovative Technologies 2016 特別賞 Culture を受賞した。

岩田チームの武田朗子は、2016 年に日本オペレーションズ・リサーチ学会の第 6 回研究賞を、岩田覚、小林佑輔は、2017 年の Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC) において、Best Paper Award を受賞した。

大石チームの荻田武史は、「数値線形代数における高速かつ高精度な精度保証法の研究」に対し、2015 年の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を、小林健太は、日本応用数理学会論文誌 2015 年度論文賞を受賞した。2020 年に「精度保証付き計算法という画期的な数値計算法を開発し、幅広い分野に多くの影響を与えた業績」で大石進一が文化功労者に選出された。

小林チームの青沼 仁志らは、2017年のThe 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines において、Outstanding Demo Awardを受賞した。

水藤チームの滝沢研二は、“流体構造連成問題の新世代実解析のための研究”に対し2015年の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞するとともに、2016年ナイスステップな研究者に、また、2016、2017年にWeb of Science Highly Cited Researcher (Engineering)に選ばれた。柏原崇人は、2018年第7回藤原洋数理科学賞奨励賞を受賞している。

長山チームの夏賀健は、2018年マルホ・高木皮膚科学振興財団の高木賞を受賞した。

平岡チームの平岡裕章は、2016年ナイスステップな研究者に選ばれ、大林一平は、2017年第6回藤原洋数理科学賞 奨励賞を受賞した。

本研究領域の目標である数学の持つ普遍性を活かし、数理モデリングの手法を幅広い分野有効に活用できる人材育成は、例えば、以下のような成果を挙げている。

岩田チームでは、5名の博士学生が助教に採用されている。吉田チームでは、7名の博士学生が、特任研究員2名、助教2名、講師1名、特任講師1名、准教授1名に、1名の助教が准教授に、1名の准教授が教授に昇任している。高木チームでは17名の博士学生が、企業研究所研究員10名、産業技術総合研究所研究員2名、ポスドク2名、助教2名、講師1名に、4名のポスドクが助教に、2名の助教が講師に昇任している。平岡チームでは博士学生ポスドクから7名の助教、3名の企業研究者、3名の国立研究開発法人研究員を、大石チームでは8名の大学専任教員を輩出している。

研究課題の中断について

松本チームの擬似モンテカルロ法の研究成果は、(3)でも述べたが、数値積分を必要とする社会の多くの分野で応用されて行くべきものと思われ、そのための協働が今後も強く望まれるところである。やむを得ぬ事情で本課題の研究を2年半で中断することとなったことは残念であったが、このチームからこの分野の若手研究者が育って来ていることは、この意味でも評価できる。

7. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

数理モデリング領域における総括としてのマネジメントは、研究の当初においては研究領域の意図が各チームの運営に浸透するようにサイトビジットを行い、また、本研究領域内の相互交流を目指し、2014年11月30日に合同領域会議、2016年2月9日に領域会議を行った。合同領域会議ではさきがけ國府数学領域との交流も目指した。

サイトビジット、および各チームとの連絡を取ることで、各チームの研究を支えるために、機関等の理解を求めること、各チームでの実験器具の緊急の損耗に対処すること等を行った。

また、チームの成果発表となる国際会議 Patterns and Waves 2016、3rd Asia Post-Quantum Cryptography Forum 2017、ICIAM2019 等での国際交流を促した。一方、それぞれのチームの研究課題が軌道に乗り始めた時期からは、若手研究者の交流とチームの研究成果の社会への発信に努めて来た。

若手研究者の交流について、國府数学領域と協力して行った。2016、2017年の数学領域横断若手交流宿泊における交流を進めてもらうことを行ったが、ここからは若手研究者の要請に応え「数学領域未解決問題ワークショップ」という形で2017年以降毎年行っている。これにより、チームの研究課題と研究領域全体の研究についての若手の理解が進み、また、さきがけ研究者の取り組みに学ぶところもあり、研究の幅がそれぞれ広がり、CRESTの若手研究者のキャリアアップにもつながった。共同研究も広がりいくつかの成果が国際会議等で発表されている。

研究成果の社会発信としては、國府数学領域、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(坂上貴之 研究総括)」(坂上数学領域)とも共同して2017～2020年と毎年「数学パワーが世界を変える」を開催し、本研究領域の研究成果を発信している。また、西浦数学領域の時から行われて来た高校生を対象にした数学キャラバンの活動を推進して来た。また、2016年から教育講座として、すでに企業で活躍している研究者、技術者むけに、「研究者、技術者のための、もう一度、数学」、「研究者、技術者のための応用数学」を開催し、基礎から最新の研究成果までを伝えている。このような社会への発信は、各チームの研究課題にもフィードバックがあり、続けてきたことが本研究領域の成果にもつながった。これらの講演会の参加者の感想等からは、数学と社会の関係をより身近に考えられるようになって来ていると思われる。

2019年から(2020年予定分はCOVID19流行のため2021年に開催、2022年は予定)若手数学者交流会を開催している。これはCREST・さきがけ事業にとどまらずERATOや科研費等の事業で活躍する若手数学者間の交流を深め、さらに多くの数学若手研究者が諸分野との連携研究の実際に触れて研究の幅を広げられることを目的としている。将来の数理科学の応用を担う人材が育つことが期待される。

本研究領域の研究成果をまとまった形で社会に報告する「成果報告公開シンポジウム」

を 2021 年 9 月 21 日～24 日にオンライン開催し、各チームの研究成果を社会に発信した。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況

「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」という戦略目標に対し、諸現象自体について、援用される数学について、数理モデリングについて、シミュレーションについてという、それぞれを担うメンバーを擁する 11 のチームを選考し、戦略目標の達成を図るという方向性は、「数学者と数学を応用する分野の研究者が相互に連携する研究チームを構成して、現時点で解決が困難な社会的課題に取り組むとともに、そのプロセスの中で数学自体の発展をも目指すもの」という位置づけに合致し、研究成果の項で触れたように数々の成果となって表れており、正当なものであったと思われる。実際、1 つのチームはやむを得ぬ事情で途中終了となったが、これらのチームにより広い分野をカバーし、社会の課題に対してモデリング手法を開発し応用できていると考えている。これらのチームの成功は深い数理科学の成果を応用できたことによるものが多い。実際、現在の 10 の研究チームは、それぞれ社会的にインパクトのある研究を行ない、それぞれの数理モデルの有効性は確認されており、その意味では戦略目標は着実に達成されたと考えられる。各チームは、非常に意欲的な研究目標を提示しており、特に、それぞれの研究分野における汎用ソフトウェアの開発と公開の状況を考えると、社会の課題に対する数理モデリング手法の構築という意味で既に大きな貢献をしている。数理科学を活用することで特に革新的な成果が期待される 3 チームは 2 年間、2 チームは 1 年間研究期間を延長することにより、成果をさらに社会に還元できたと考えている。この 5 チームのうち 3 チームは優れたソフトウェアを公開しており、その普及のために (COVID19 の流行の影響のもとで最大限) 研究者に向けての研究集会・社会に向けてのチュートリアルを開催した。2 チームは (COVID19 の流行の影響のもとでも) 医療関係者、暗号理論コミュニティと連携を深め、多くの貢献をした。

(3) 本研究領域を設定したことの意義 (研究開始以前と現時点との比較を念頭にして)

数理モデリング領域の設定は、社会に向けて数学の応用の形として現代数学の発展が社会の課題の解決のために役立つという形を目指したものである。この形の応用は、西浦数学領域の中でも表れて来ているものであったが、本研究領域の遂行は、それがより社会からも見える形のものになり、報道の取り上げ方にしても社会の関心を集めるものになって来たことを感じさせる。特に研究期間の後半では、社会にどう還元して行くかということに各チームで対応してもらい、ソフトウェアの公開、研究相談 (解決が困難な社会的課題に対する、数学的なアプローチの相談) への対応等の形で実現して来ている。本研究領域の活動により、このような動きをさらに支援することは、科学イノベーションにとって重要であることが確認できたと思う。ソフトウェアの公開、研究相談は、

社会と数理科学者の間の対話を促進するものであり、このような対話が今後も重要である。

(4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題

現代数学の研究者の社会の課題に対する取り組みの意欲は、本研究領域を含む様々なプロジェクトにより非常に旺盛になっている。これらによる科学技術イノベーション創出は現実のものになっている。本研究領域のような CREST プログラム、および若手育成のためのさきがけプログラムを続けて行くことは、科学技術イノベーション創出の上では必須である。

社会への貢献として大きなものとして、この CREST で確立して来た汎用ソフトウェアに関しては、利用者からのフィードバックと、より効果的なチュートリアルの実施により、ソフトウェア改良のための人的資源の問題が解決されれば、より精度の高い使いやすいものになり、社会の数理基盤の一つになるはずである。ソフトウェアの公開、研究相談は、社会と数理科学者の間の対話を促進するものであり、その対話の中で科学技術イノベーション創出が醸成されるということが、社会の共通認識になることを望んでいる。

(5) 所感、その他

研究総括就任の依頼を受けた 2014 年の初めには、本研究領域がどのように社会の期待に応えるものになるか不安であったが、発足の時に続いていた西浦数学領域、同時に発足した國府数学領域との情報交換に助けられ、JST 事務局のご協力もあり、本研究領域の研究チームを構成することができた。領域アドバイザーの方々、研究領域中間評価者の方々からの適切なご意見により、各チームの研究成果が社会に還元される見通しが十分立つ所まで来て終了できたと思う。COVID19 の流行は国際共同研究や研究成果の発信などに負の影響を与えたのは否めないが、研究期間の後半、延長期間においての各チームの頑張りは素晴らしいものであり、敬意を表したい。

この 8 年間の AI の進化と社会課題への応用の動きは大きなものであるが、その中で説明できることの必要性が問われている。COVID19 の流行は、一方で流行の予測の重要性とその予測の根拠が問われている。これらの問いに答えることへの期待が数理科学によせられていると思われる。

このように社会の課題解決に関しての数理科学への要請はより強いものになっていると思われる。これに応えるための恒常的な組織、その活動を支える仕組みや支援が望まれる。

以上