

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」

研究領域中間評価用資料

研究総括: 坪井 俊

2019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 .....	5
(3) 研究総括 .....	5
(4) 採択研究課題・研究費.....	6
2. 研究総括のねらい.....	7
3. 研究課題の選考について.....	8
4. 領域アドバイザーについて.....	11
5. 研究領域のマネジメントについて.....	13
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.....	21
7. 総合所見 .....	35

## 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」

#### ① 達成目標

社会における諸現象のうち、現時点で支配原理・法則が明確でなく、数理モデル化ができれば社会に対して大きなインパクトが見込まれる現象について、数学・数理科学の研究者と応用分野の研究者等による異分野協働等を通じて、数学が持つ抽象性・普遍性を活用し、諸現象に潜む複雑な構造の「本質」部分を数学的に見いだすことにより、以下の実現を目指す。

○現象を数学的に記述するモデルの導出

○導出された数理モデルの実証・検証および評価のための数学的理論等の構築

#### ② 将来実現しうる重要課題の達成ビジョン

本戦略目標を実施し、①「達成目標」に記載した研究成果が得られることで、現時点で支配原理・法則が明確ではない現象について、数理モデルを導出することができる。また、数理モデルを実証、検証および評価するための新たな数学的理論が構築される。さらに、検証された数理モデルは、その普遍性によって、対象や時代の変化を受けることなく、様々な状況下において利用可能となることが期待される。

対象となる現象と応用分野は、例えば以下が想定される。

- ・社会現象（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（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）
- ・生命現象（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）

上記のような現象について数理モデルを導出することで、例えば以下のことが将来に期待される。

○諸現象に潜む複雑な構造の「本質」部分の抽出、数学的に裏付けられた処理の効率化

複雑な構造の現象をモデル化する際の様々な困難（モデルの複雑化等）を回避するため、その「本質」部分を数学的に見だし、数理的な根拠をも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る。例えば、比較的単純で安定な構造によって新たな機能発現

を期待する新材料の創成が、その構造の「本質」部分を数学的に見だし精密に制御することにより可能となることや、画像解析処理時間の大幅な短縮、データ分析に要する時間の大幅な短縮等が期待される。

○リスクが顕在化する前の「兆し」の解明、スマートな未然の対応や効果的制御

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」等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。

また、限られたデータだけによる経験的モデルでは想定できなかった、まだ発生していない現象の「兆し」の検出が可能になることが期待される。

### ③ 具体的内容

(背景)

近年、社会の情報化・複雑化や計測機器の発達、計算機性能の飛躍的向上等に伴い、生命現象や自然現象、社会現象等に関する情報を得ることが可能となり、これらの現象の複雑さが良く分かるようになって来た。しかし、これらの現象については、支配原理・法則が不明確でモデルを作れないため、なぜそのような現象が起こるのかは十分に分からないまま、うまく対処した経験知の積み重ねによって現象を理解しているものも多い。また、経済やエネルギー、防災等においては既に何らかのモデルが用いられていても、個別分野固有の理論的枠組みに基づくモデルだけでは捉えきれないものが増えており、現象の「本質」を理解する上で不可欠な数学・数理科学研究者との連携は必ずしも十分とは言えない。さらに、近年の数学の発展により、これまで応用されたことのない現代数学の理論がこのような現象の「本質」を理解する手掛かりを与え、画期的な成果をもたらす可能性が残されている。

このような状況の中、我が国では2007年度に戦略目標「社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索」を設定し、数学・数理科学研究者と諸科学分野の研究者の連携を促進している。この取組からは、純粋数学の手法を現象解明に適用したことで課題解決に発展したこと、特に、様々な現象を記述する数理モデルの構築が連携による注目すべき成果として報告されている。

これらの状況を踏まえ、本戦略目標では、従来の科学技術の延長では解決が困難な社会的課題に取り組み、ブレークスルーを起こすために、純粋数学の研究者が現実社会の課題の中から数学的問題を取り上げ参加することを期待するとともに数学・数理科学の力が発揮できる「現象の数理モデリング」に注力する。また、数理モデルの導出には、既存のモデルの枠組みを超えて、異なる数学分野の技法を融合することや全く新しい定式化を行う必要もあることから、数学内の様々な分野の研究者間の連携や、異なる数理モデリングにかかわる理論研究者間の連携も不可欠である。

(研究内容)

1) 現象を数学的に記述するモデルの導出

社会現象や工学分野等における既存のモデル化技術と、現象の「本質」を理解する上で不可欠な数学・数理科学的知見や理論とを融合することで、諸現象に潜む複雑な構造の「本質」部分を見だし、データが十分にある現象だけでなく、不足している現象についても、それを記述する数理モデルを導出する。

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が想定される。

これらの現象を記述する数理モデルの枠組みの例としては、以下のようなものがある。

- 1：電力網、通信網、神経網、人の接触関係等の現実の複雑なネットワークにおける構造とダイナミクスを表現するネットワークモデル
- 2：時空間的に異なるスケールのサブシステムが階層を構成するようなシステムを統合的に扱うためのマルチスケールモデルやマイクロモデルとマクロモデルの間に位置づけられるメゾスコピックモデル
- 3：連続変数と離散変数を含む電子回路や物理的作用と化学的作用を含む生物の組織形成等のように異質なシステムが相互作用するシステムを記述するための、ハイブリッドモデルやマルチフィジックスモデル

また、導出された数理モデルの普遍性を活用し、当初対象としていた現象とは異なる現象に応用することで、様々な分野に横断的に応用可能なモデリング技術へ発展することを目指す。

2) 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構築

上記1)で導出される数理モデルや既存の数理モデルについて、実際の課題や現象を記述していることを実証・検証するとともに、モデル評価のための数学的理論や技術の構築を目指す。

④ 政策上の位置付け（政策体系における位置付け、政策上の必要性・緊急性等）

第4期科学技術基本計画（2011年8月19日閣議決定）では、「Ⅲ. 我が国が直面する重要課題への対応」の「(5) 科学技術の共通基盤の充実、強化」において、「数理学」は「複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術」として位置付けられ、それに関する研究開発を推進することが明記されている。

また、数学イノベーション戦略（中間報告）（2012年8月科学技術・学術審議会先端研究基盤部会）においては、「複雑な現象やシステム等の構造の解明」、「リスク管理」、

「将来の変動の予測」等につながる課題が、数学・数理科学の活用による解決が期待される課題として整理されている。

#### ⑤ 他の関連施策との連携および役割分担・政策効果の違い

戦略目標「社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索」（2007年度設定）に基づいて発足した西浦研究総括のCREST・さがけハイブリッド「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」研究領域（西浦数学領域）で、純粋数学をはじめとする幅広い分野の研究者の協働により、新たな数理モデルをはじめ、優れた成果が出始めている。本戦略目標では、同領域と連携しつつ、純粋数学をはじめとする幅広い分野の研究者を取り込みながら、数学と諸分野の協働により社会課題の解決を図る取組を加速して行く。

また、2011年度より文部科学省が大学等と共催している「数学・数理科学と諸科学・産業との連携研究ワークショップ」（2011年度、2012年度は合計57件、参加者合計3,211名）や、文部科学省委託事業「数学・数理科学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム」（2012年度開始）においては、諸科学・産業における数学・数理科学的知見の活用による解決が期待できる課題を積極的に発掘して諸科学・産業との協働による研究テーマを具体化し、具体的な研究へとつなげるための活動を行っている。これらの活動を通じて議論が深められた課題や研究テーマが本戦略目標での研究に発展することが期待される。

#### ⑥ 目標設定の科学的な裏付け

国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)の報告書<sup>※1</sup>によると、我が国におけるモデリングや解析技術の研究は、各大学の数理工学科や複雑理工学科、内閣府最先端研究開発支援プログラムの最先端数理モデルプロジェクト等において進められており、基礎研究の水準は高いと考えられる。今後は、生物医学におけるゲノム情報等のハイスループットデータの蓄積、脳科学における多計測脳波データの取得、地理情報学におけるリアルタイムの交通・輸送情報データの計測等各分野において大量のデータ取得が可能となって来ている中、これらのデータから実際のシステムの本質を抽出し、数理モデリングを行う技術の確立が課題となっている。

また、同報告書では、米国のNSF、NIH、USDA、および英国のBBSRが共同で、約15億円を投じて2012年から5年間のプロジェクト「感染症の生態学と進化」を発足しており、その目標の一部として、感染症抑制のための生態学的、進化的、社会生態学的原理の数理モデリングを掲げていること、米国DOEは、応用数学分野のプロジェクト編成の枠組みにおける指針において、今後どのような数理モデリング研究やアルゴリズム研究にファンディングを配分して行くのかを示していることが記載されている。数理モデリングを中核に据えた本戦略目標を設定することで、各応用分野の研究

者、数理科学研究者、数学研究者等を集めて数理モデリング研究に注力させ、国際競争力のさらなる向上を図る必要がある。

※1 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター，  
『研究開発の俯瞰報告書 システム科学技術分野（2013年）』

## (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）

本研究領域は、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である。具体的には、応用分野の知見と数学が持つ抽象性や普遍性を利用して、支配原理・法則が明確でない諸現象に潜む「本質」部分を見出し、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を推進する。また、本領域は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含んでいる。対象となる現象としては、社会現象、自然現象、生命現象等が想定されるが、社会的ニーズに対応した新しい研究課題の創出と解決を目指すものであれば、対象となる現象として取り込んで行く。

数理モデルの導出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も重視する。さらに、導出された数理モデルが普遍性を持ち、様々な分野の課題解決に応用可能なモデリング技術へと発展して行くことも目指す。

## (3) 研究総括

坪井 俊 （東京大学 大学院数理科学研究科 教授）

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 上段：中間評価時 下段：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 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 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	151
	栄 伸一郎	北海道大学・教授 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	166
	大石 進一	早稲田大学・教授 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	243
	小林 亮	広島大学・教授 広島大学・教授	環境を友とする制御法の創成	260
	高木 剛	東京大学・教授 九州大学・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	191
	吉田 朋広	東京大学・教授 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	160
2015年度 (H27年度)	水藤 寛	東北大学・教授 岡山大学・教授	臨床医療における数理モデリングの新たな展開	194
	長山 雅晴	北海道大学・教授 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	201
	平岡 裕章	京都大学・教授 東北大学・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	190
	松本 眞	広島大学・教授 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	2,015

\*研究費：2018年度上期までの実績額に2018年度下期以降の計画額を加算した金額

※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来ており、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来ている。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来ている。

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。

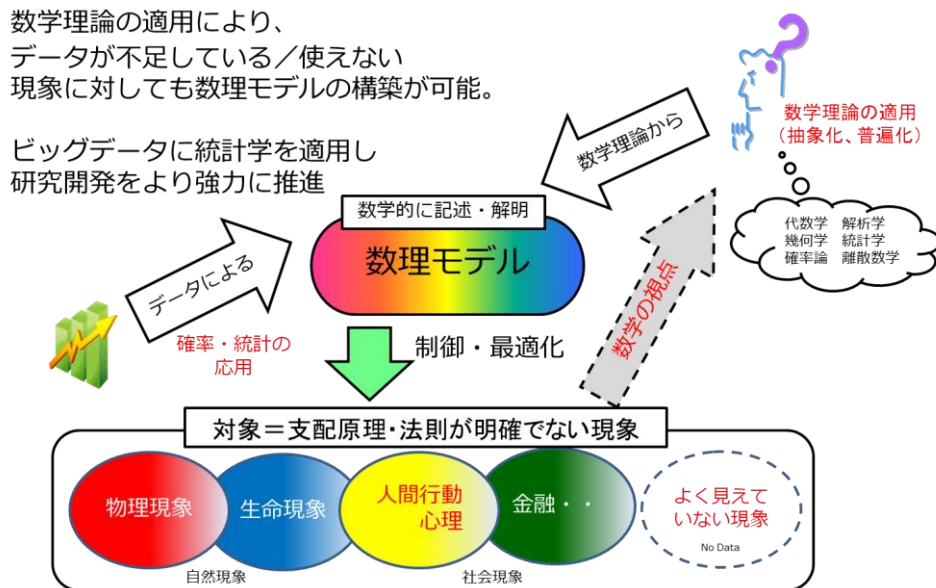


図1 本研究領域が目指す数理モデリング

### (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

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ようにす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

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。

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来た。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来ている。

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。

選考年度	応募件数	採択件数
2014 年度	57 件	7 件
2015 年度	42 件	4 件

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）

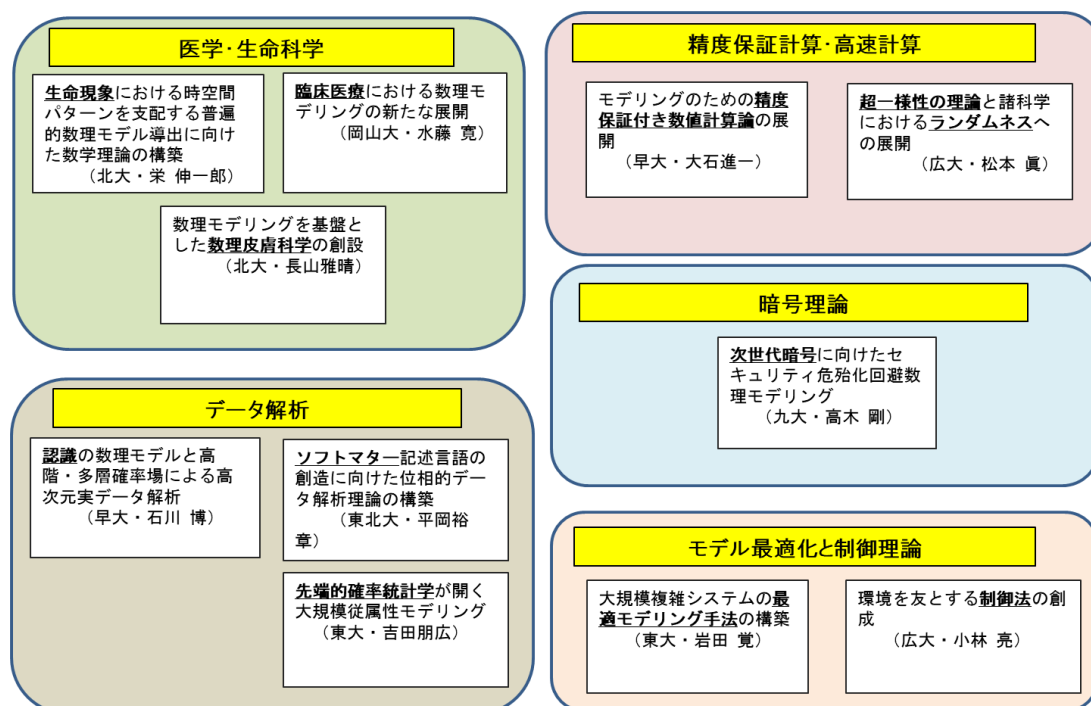


図 2 本研究領域の研究課題

#### 4. 領域アドバイザーについて

##### (1) 領域アドバイザー一覧

氏名	現所属	役職	任期
阿原 一志	明治大学	教授	2014年5月～2021年3月
大島 利雄	城西大学	教授	2014年5月～2021年3月
小谷 眞一	大阪大学	名誉教授	2014年5月～2021年3月
田崎 晴明	学習院大学	教授	2014年5月～2021年3月
土谷 隆	政策研究大学院大学	教授	2014年5月～2021年3月
中尾 充宏	九州大学	名誉教授	2014年5月～2021年3月
平田（河野）典子	日本大学	教授	2014年5月～2021年3月
藤重 悟	京都大学	特任教授	2014年5月～2021年3月
宮岡 礼子	東北大学	総長特命教授	2014年5月～2021年3月
村上 英樹	新日鐵住金株式会社	プロセス研究所長	2014年5月～2021年3月
山田 道夫	京都大学	所長/教授	2014年5月～2021年3月

##### (2) 人選にあたっての考え方

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國府総括の「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」領域（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、中間評価時、研究課題期間延長評価時における建設的なアドバイスをいただくことができた。

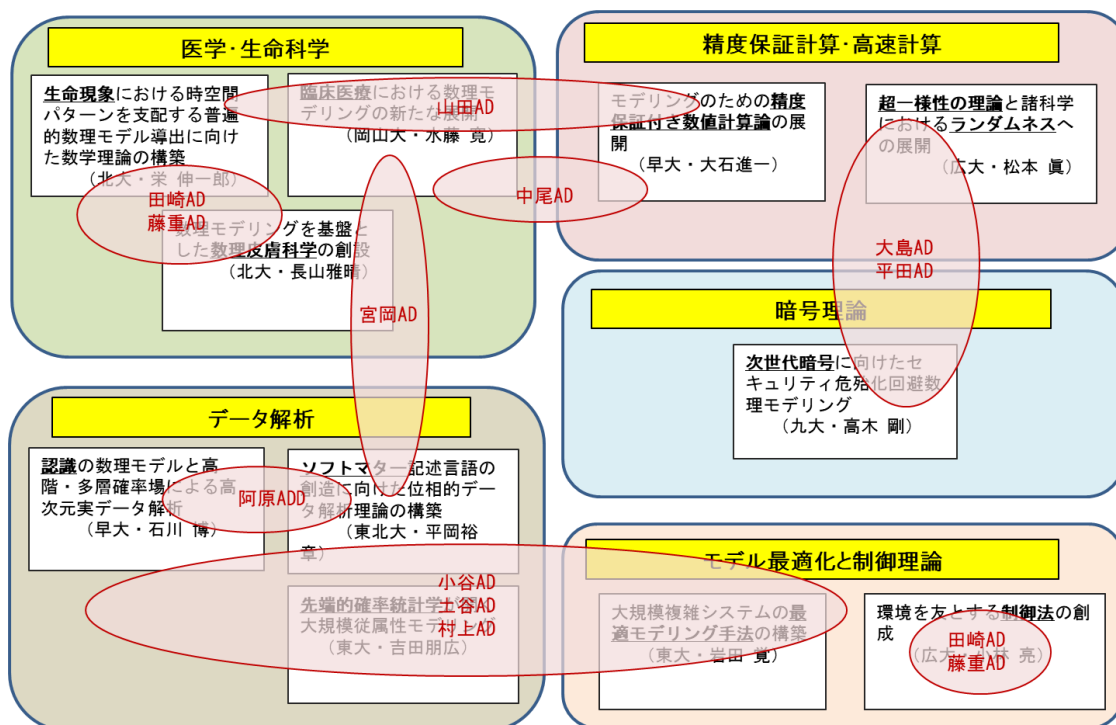


図 3 本研究領域の研究課題とアドバイザー専門領域

## 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2回とし、大部分を初年度で採択する方針とした。(図4)

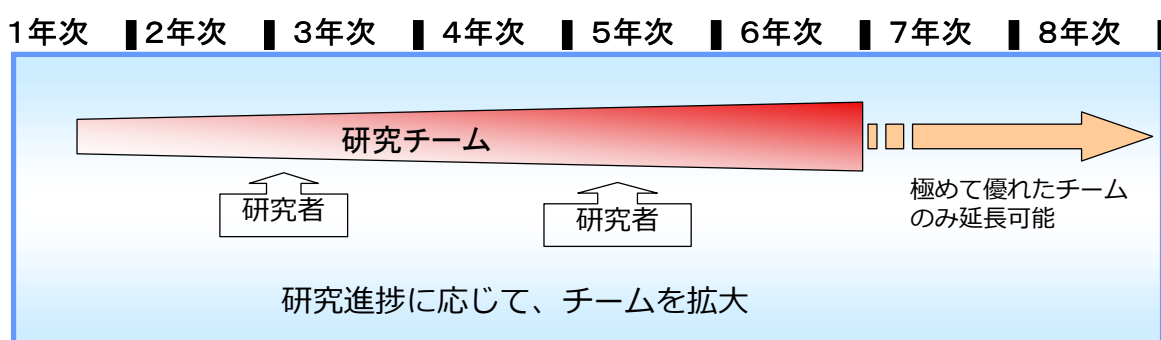


図4 研究体制拡大と研究課題期間延長

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、具体的には、以下の5つの取り組みを行った。

- 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



## 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。

### (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、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)

(過去 1 回開催、次回来年度計画中)

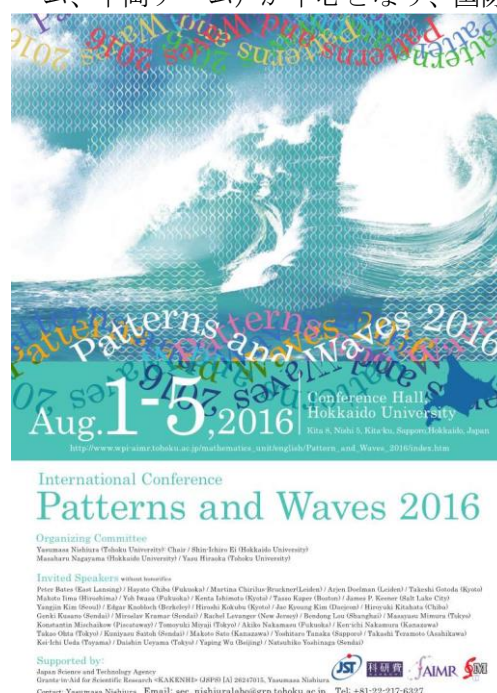


図 5 国際シンポジウムリーフレット

### (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 2 回開催、第 3 回を 2019 年 3 月開催予定)





写真1 数学パワーが世界を変える 2017

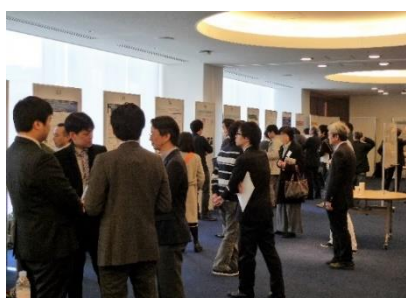


写真2 数学パワーが世界を変える ポスター発表



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2回開催、第3回を2019年3月開催予定)

(iv) 若手数学者交流会 (2019年3月開催予定)

CREST・さきがけ事業の枠にとどまらず、ERATO や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。

若手数学者参加対象領域

- ・ JST CREST「数理モデリング」領域
- ・ JST さきがけ「数学協働」領域
- ・ JST ERATO「メタ数理システムデザイン」領域
- ・ 科研費・新学術領域研究「材料離散幾何解析」(予定)
- ・ 理化学研究所 数理創造プログラム iTHEMS (予定)
- ・ 理化学研究所 革新知能統合研究センターAIP (予定)
- ・ 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

名称	開催日	内容	場所	参加者数
国際シンポジウム	2016/8/1~ 15	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
CREST・さきがけ・数学協働プログラム合同シンポジウム	2017/2/11~ 12	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
数学連携ワークショップ	2017/9/12	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
CREST・さきがけ・AIMaP 合同シンポジウム	2018/1/21	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
数学連携ワークショップ	2018/9/24	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
CREST・さきがけ・AIMaP 合同シンポジウム	2019/3/10 (開催予定)	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	
数学と諸分野の連携にむけた若手数学者交流会	2019/3/15~ 16 (開催予定)	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 (予定)	JST	

## 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。

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した。

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

高木チームは、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して来た。今年度のチュートリアル(2018/5/24)では、チーム内からチュートリアル講演を4件実施した。

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、基礎的な内容から一部最新の研究成果も交えながら体系的に紹介した。

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、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。



図7 大石チーム リーフレット

吉田チーム

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)を紹介した。

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来た。

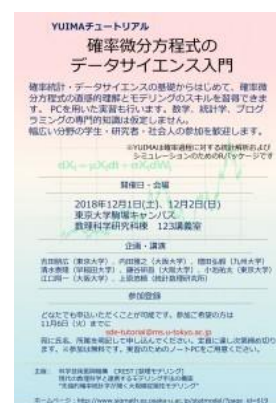


図8 吉田チーム リーフレット

開催日	場所	実施チーム	テーマ
2015/11/12	早稲田大学	石川チーム	マルコフ確率場 (100名)
2016/4/27 ~ 2018/5/24	東京工業大学 九州大学	高木チーム	暗号数理 (過去 5 回開催)
2018/9/10	早稲田大学	大石チーム	精度保証付き数値計算 (53名)
2018/12/1 - 2	東京大学	吉田チーム	YUIMA (80名)

### 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。

#### (i) 数学領域横断若手合宿

JST 数学関連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。

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。

	開催日	場所	会場	参加者
第一回領域 会議	2014/11/30	都内	JST 東京本部	CREST 1 期生、さきがけ 「数学協働」 合同
第二回領域 会議	2016/2/9	都内	東京大学	CREST 1 期生/ 2 期生

数学領域横断若手合宿	2016/2/21~23	淡路	淡路夢舞台国際会議場	CREST
数学領域横断若手合宿	2017/2/21~23	坂出	讃岐五色台	CREST/さきがけ合同
第一回未解決問題 WS	2017/9/25~27	都内	汐留コンファレンスセンター	CREST/さきがけ合同
第二回未解決問題 WS	2018/9/25~27	都内	汐留コンファレンスセンター	CREST/さきがけ合同

#### 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。

	開催日	場所	会場	参加者
高木チーム	2015/5/25	福岡	九州大学	高木先生、田中先生 國廣先生、木本先生
石川チーム	2015/5/28	都内	早稲田大学	石川先生、岡谷先生
岩田チーム	2015/6/11	都内	東京大学	岩田先生、高松先生 松尾先生、鈴木先生
大石チーム	2015/7/31	都内	早稲田大学	大石先生、他
栄チーム	2015/8/4	札幌	北海道大学	栄先生、佐藤先生 長山先生
小林チーム	2015/8/21	仙台	東北大学	小林先生、石黒先生 大須賀先生、青沼先生
吉田チーム	2015/8/31	都内	東京大学	吉田先生、鎌谷先生、増田先生
水藤チーム	2016/9/30	千葉	千葉メディカルセンター	水藤先生、植田先生、斎藤先生、 滝沢先生、増谷先生
長山チーム	2016/10/4	横浜	資生堂リサーチセンター	長山先生、傳田先生
平岡チーム	2016/9/27	都内	東北大学東京分室	平岡先生、他
松本チーム	2016/12/12	広島	広島大学	松本先生、他
松本チーム	2017/9/20	広島	広島大学	松本先生、他

## 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 9 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行く。

	開催日	場所	会場	主催	参加者数
第 11 回	2014/11/9	都内	東京国際交流館 (サイエンスアゴラ)	JST	40
第 12 回	2014/11/24	岡山	岡山大学	岡山大学	95
第 13 回	2014/11/29	水戸	水戸第二高校	JST	113
第 14 回	2015/1/11	いわき	いわき産業創造館	福島大学	20
第 15 回	2016/1/23	岡山	岡山大学	岡山大学	48
第 16 回	2016/1/30	水戸	水戸第二高校	JST	108
第 17 回	2016/11/12	幕張	渋谷教育学園幕張中 学校・高等学校	JST	127
第 18 回	2016/12/17	水戸	水戸第一高校	JST	89
第 19 回	2016/12/19	岡山	岡山大学	岡山大学	56
第 20 回	2017/7/1	春日井	中部大学	中部大学	100
第 21 回	2017/8/20	上田	上田高校	JST	40
第 22 回	2017/10/1	気仙沼	気仙沼中央公民館	お茶の水 女子大学	29
第 23 回	2017/11/12	札幌	北海道大学	JST	88
第 24 回	2017/11/26	岡山	岡山大学	岡山大学	80
第 25 回	2018/1/27	水戸	水戸第二高校	JST	70
第 26 回	2018/5/13	大阪	大阪星光学院中学校・ 高等学校	JST	39
第 27 回	2018/7/7	春日井	中部大学	中部大学	42
第 28 回	2018/11/23	岡山	岡山大学	岡山大学	96
第 29 回	2018/12/15	福岡	九州大学	九州大学	150
第 30 回	2019/1/26	水戸	水戸第一高校	JST	65

## 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(予定)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いる。その研究成果として、非エルゴード系や擬似尤度解析における確率分布の漸近展開等において国際的に高く評価される独創的な結果を得ている。具体的には、非エルゴード系に関しては、非エルゴード的統計学の重要な課題である有限時間高頻度観測における確率微分方程式の拡散係数のパラメータ推定に関して  $p$ -変動の漸近展開を与えている (Podolskij, M., Yoshida, N.: Edgeworth expansion for functionals of continuous diffusion processes, *Annals of Applied Probability*, Volume 26, Number 6 (2016), 3415-3455)。これは高頻度金融データ解析における基本的な問題であった。

擬似尤度解析に関しては、本解析に基づく超高頻度金融データに対する有効なモデリング手法を提案している。特に擬似尤度に対してモデル選択のためのベイズ型情報量基準 QBIC の提案とその数学的性質の解明を行った。また、リミットオーダーブックへの応用を見据え、多変量点過程の統計モデルに対して擬似尤度解析を構成するとともに、Hawkes 過程に対するエルゴード性の証明を完成させ、それを成分にする多くの統計モデルに対して統計推測理論の適用を可能にした (Clinet, S. and Yoshida, N. "Statistical Inference for Ergodic Point Processes and Application to Limit Order Book". *Stochastic Processes and Their Applications*, 127, pp.1800-1839, 2017)。本成果は、リミットオーダーブックのモデリングに応用され、強度過程の共変量過程への依存性に関して、現実のデータの特徴を再現するモデルとなっている (Muni Toke I. and Yoshida N., *Modelling intensities of order flows in a limit order book*", *Journal Quantitative Finance* Volume 17, pp.683-701, 2017)。

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。理論研究とその成果の実装が双方を刺激する形で行われており、このソフトウェア YUIMA の普及のための出版もされ、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 3 万回を超えており、2018 年 12 月に行った YUIMA 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)



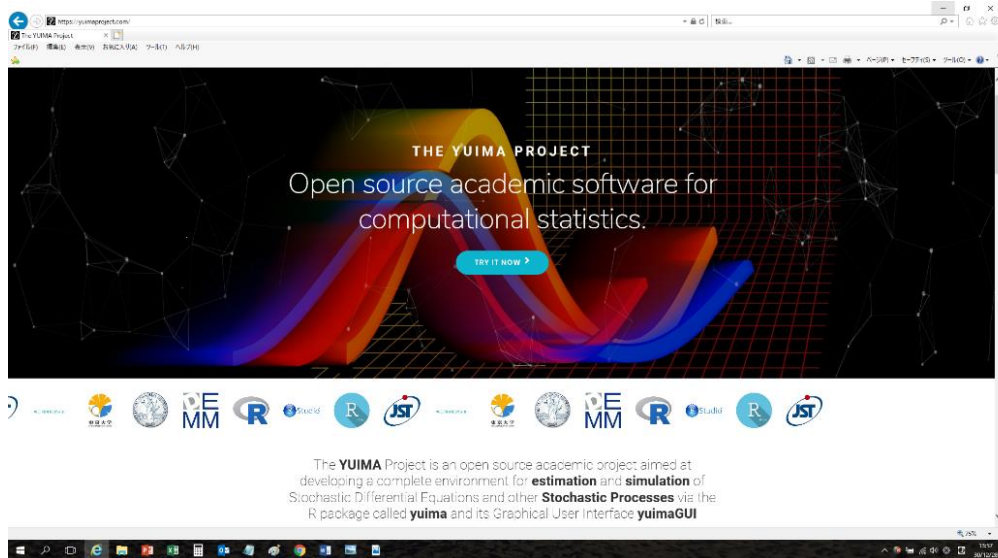


図9 YUIMA Project ホームページ (<https://yuimaproject.com/>)

高木チームでは、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 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。暗号解読をめぐる、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.latticechallenge.org/ideallattice-challenge/>)

現在、量子計算に応用されようとしているのは、量子がもつ0と1の重ね合わせの性質に関する理論であるが、ここでは相互作用を考慮した多体問題 (2体問題) についての最新の実験研究の理論的基盤となる基礎的な知見を得て来ており、これは現在実用化されようとしているポスト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。ラマヌジャングラフは、楕円曲線などの群構造から得られる射をグラフ状に構成したものであり、十分な複雑さが保証されるグラフとなるため、高い安全性を有する暗号方式の構築に利用することができる。これらについては数学的な基礎理論の構築が必要であり、その面での進展が見られている。

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 The 7<sup>th</sup> International Conference on Post-Quantum Cryptography (PQCrypto2016) が開催され、アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) より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 (図10)。その後 NIST のポスト量子暗号の標準化において、CREST の高木チーム関係で複数のポスト量子暗号の構成アルゴリズムを提案しており、現在その安全性評価に参画している。

安全性評価は相互に暗号に対する攻撃手法の考案、提案アルゴリズムの改良を相互に不断に行うものであるが、CREST の高木チームはこの両面の研究の成果を報告し続けて

いる。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(出願番号 2016-006317)も出願している。

暗号による情報のやり取りが社会を支える基盤であることは社会的にも理解され始めており、高木チームの研究は産経新聞に3回、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」、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」に取り上げられている。



図 10 PQCrypto2016 参加者 240 名(北米 80 名、欧州 60 名、アジア 60 名、日本 40 名)  
(<https://pqcrypto2016.jp/>)

大石チームでは、悪条件問題等に対する高精度数値計算法の開発、より個別の問題に対応して三次元双曲多様体の体積の計算や偏微分方程式の解の分岐の問題に対する精度保証計算を始めとする多くの分野で、卓越した成果を挙げている。具体的には、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来ている。今後、精度保証の理論的研究を進めるとともに、多くの現実の問題に対してそれぞれに対応し

た研究を行うことで、数学的証明を積み重ねる議論も深まり、さらに多くの成果が期待できる。

大石チームの研究成果は、精度保証計算ライブラリ kv として公開(図 11)されており、実際に理論的に精度保証計算を必要とする研究者に使われており、社会の多くの分野で有効に利用されることが期待できる状態になっている。数理モデルにおける数値計算の信頼性の問題は、産業の現場においては喫緊の問題であり、社会における認知度は向上して行くと思われる。2018 年 9 月にはチュートリアルが行われ、諸分野の研究者が参加している。

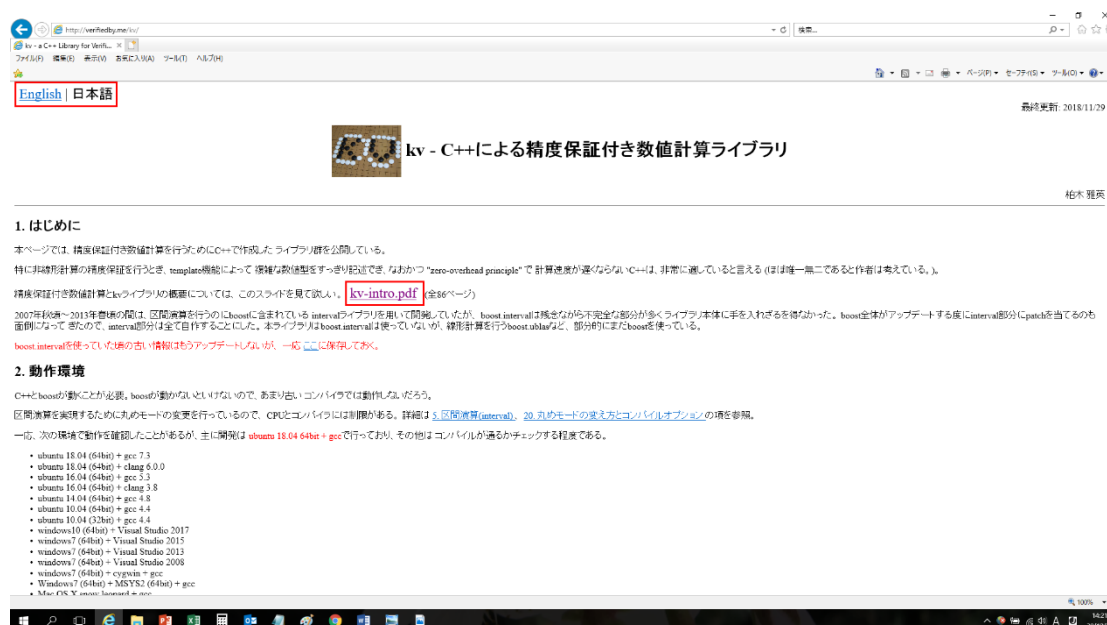


図 11 精度保証付き数値計算ライブラリ kv ホームページ (<http://verifiedby.me/kv/>)

### (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、現象の数理モデルの性能を最適にする研究を行い、微分代数方程式の指数減少法に関して線形時不変微分代数方程式に対し、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。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。(S. Iwata and Y. Kobayashi "A weighted linear matroid parity algorithm", Proceedings of the 49th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC), pp.264–274, 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、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、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。コウモリが目前の獲物のみならず、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的解析とフィールド計測によって明らかにした(図 12)。このことは、2016 年 4 月 12 日日本経済新聞、4 月 16 日読売新聞でも報道された。2018 年 1 月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、北海道におけるブラックアウト後、2018 年 10 月 5 日日経新聞に「電力網の弱点 数学で探る」という形で報道されている。

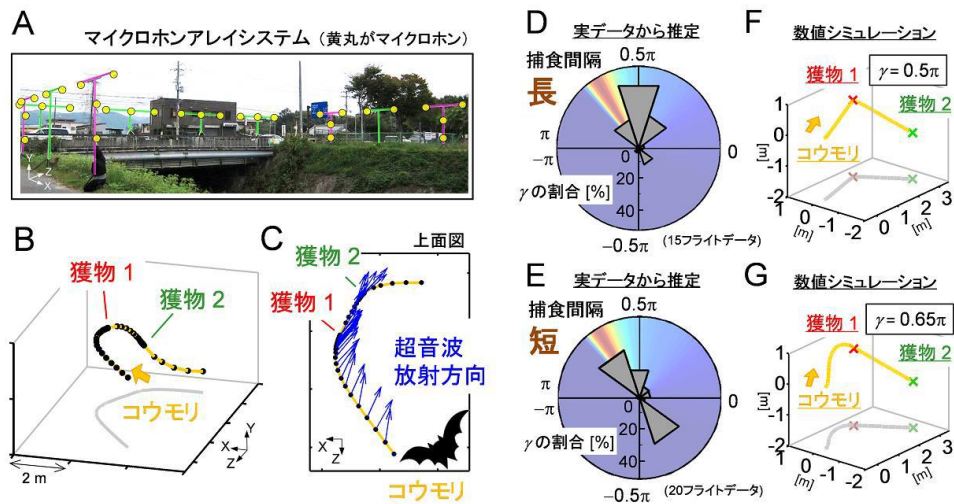


図 12 コウモリ飛行ルートの数理的解析  
 野外での音響計測 (A) で得られたコウモリの軌道の一部 (B, C) と、軌道データから推定されたパラメータのヒストグラム (D, E) とシミュレーション (F, G)

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。2016 年 8 月 17 日に「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 13~15)。特に 2018 年になって、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ている。





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次元上の形式的冪級数環を用いた超一様点集合を構成し、その一様性の基準となるパラメータつき WAFOM を考案した。計算誤差の小さい lowWAFOM 点集合は、実解析的関数は係数が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て考察することにより、総和法を行う点集合として得られる。通常の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 16~18)。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。

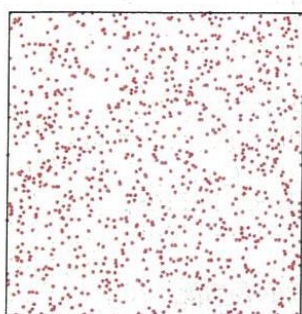


図 16 擬似乱数  
(メルセンヌツイスターによる  
2次元点プロット)

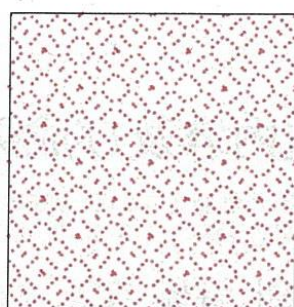


図 17 超一様点集合 1  
(t-value を小さくすることでえ  
らばれたもの : sobol 点集合)

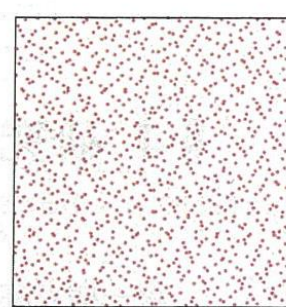


図 18 超一様点集合 2  
(sobol 点集合を LowWAFOM 化)

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配置構造の秩序性を明らかにし、また粉体が結晶化する際の構造の変化を解明する等の成果を挙げている。これらについては、2016年6月14日に「ガラスの『形』を数学的に解明」(図 19~20)、2017年5月12日に「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 21)という共同プレスリリースを行っている。

さらに研究を加速し、パーシステント図に対するカーネル法開発による機械学習との融合を図る一方で、パーシステント図のスケール極限に関する理論的成果も得ている。

また、HomCloud というユーザーフレンドリーかつ逆問題も扱える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産業における研究現場で使用されている。

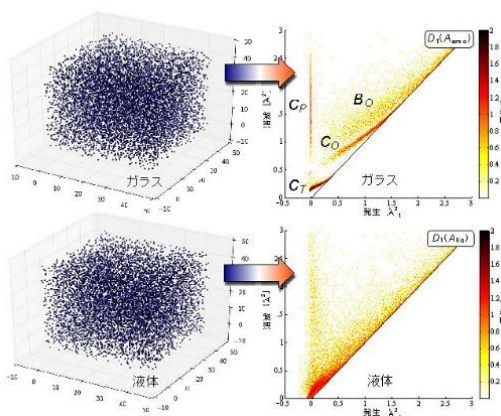


図 19 SiO<sub>2</sub> の原子配置 (左) とそのパーシステントホモロジー (右)

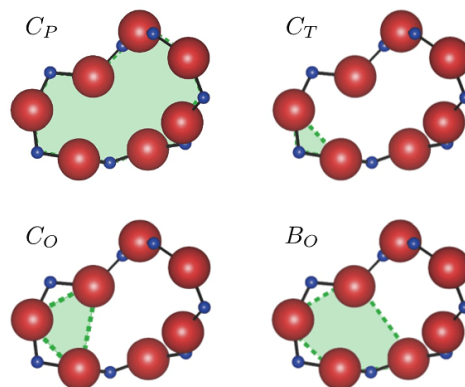


図 20 SiO<sub>2</sub> ガラスのパーシステントホモロジー (図 19 右上) に対応する典型的なリング構造

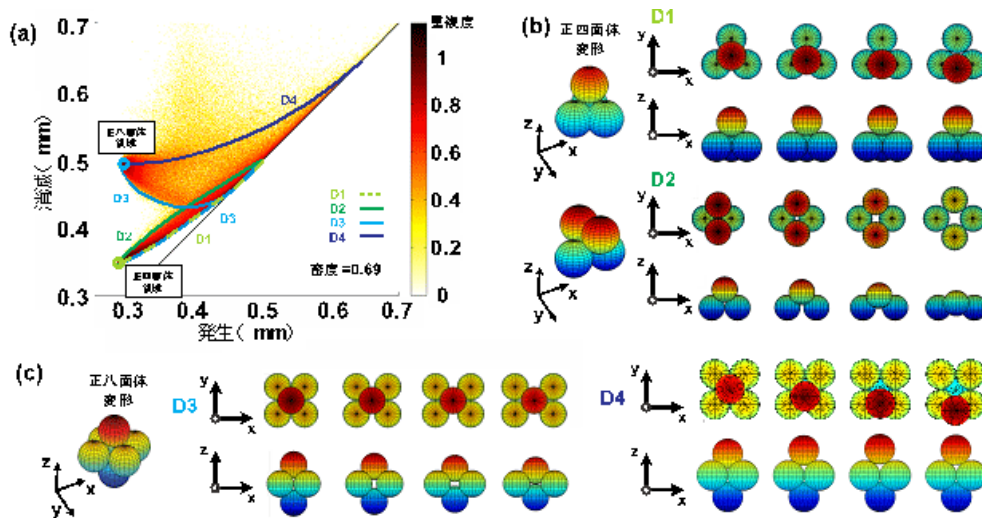


図 21 粉体のパーシステント図を特徴づける 4 つの変形モデル

#### (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(図 22)、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 23)、ラフ面の線画変換手法、画像の自動補完手法等(図 24)は、下記で述べているように、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サービス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。

これらの成果はコンピュータグラフィックスの最も権威ある国際会議 SIGGRAPH に、2016年は「白黒写真の自動色付け」、「ラフスケッチの自動線画化」、2017年は「ディープネットワークを用いた画像補完」、2018年は「Smart Inker: ラフスケッチのペン入れ支援」が採択され、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。

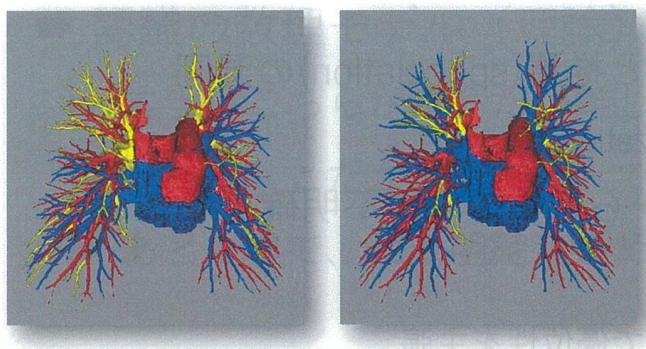


図 22 高階確率場理論を用いた医療応用されている動脈・静脈のセグメンテーション (右側: 精度向上している)

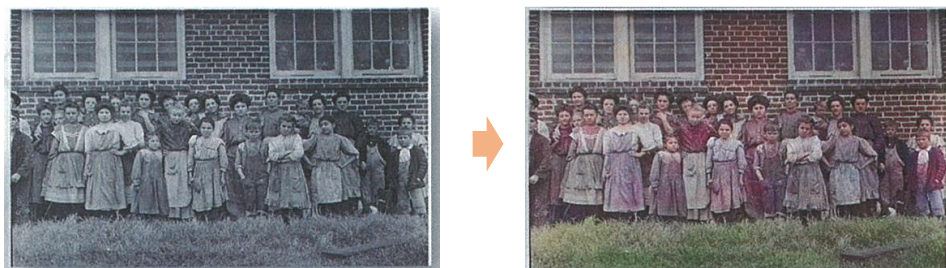


図 23 大域特徴と局所特徴の双方を活用するネットワークによる白黒画像の自動色付け手法

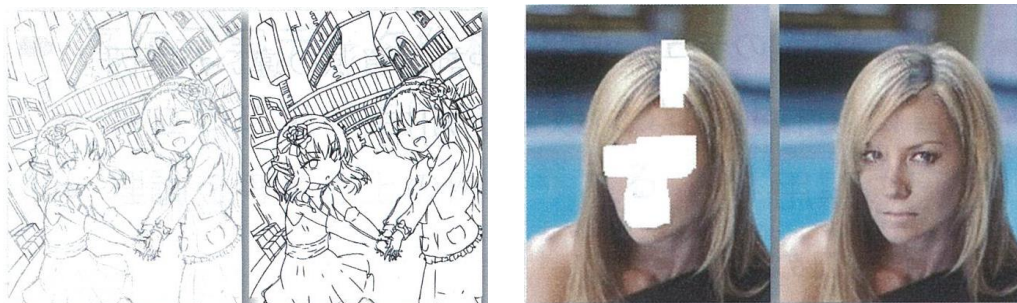


図 24 大域特徴と局所特徴の双方を活用するネットワークによるラフ画の線画変換手法(左側)、画像の自動補完手法(右側)



小林チームでは、環境のデータの内、極僅か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、階層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・実用化に関して、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。クモヒトデ型の制御に関しては、2017年12月13日に「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25)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。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、また産業との共同研究が進んでいることも評価でき、将来のイノベーションに結び付く可能性も大きい。

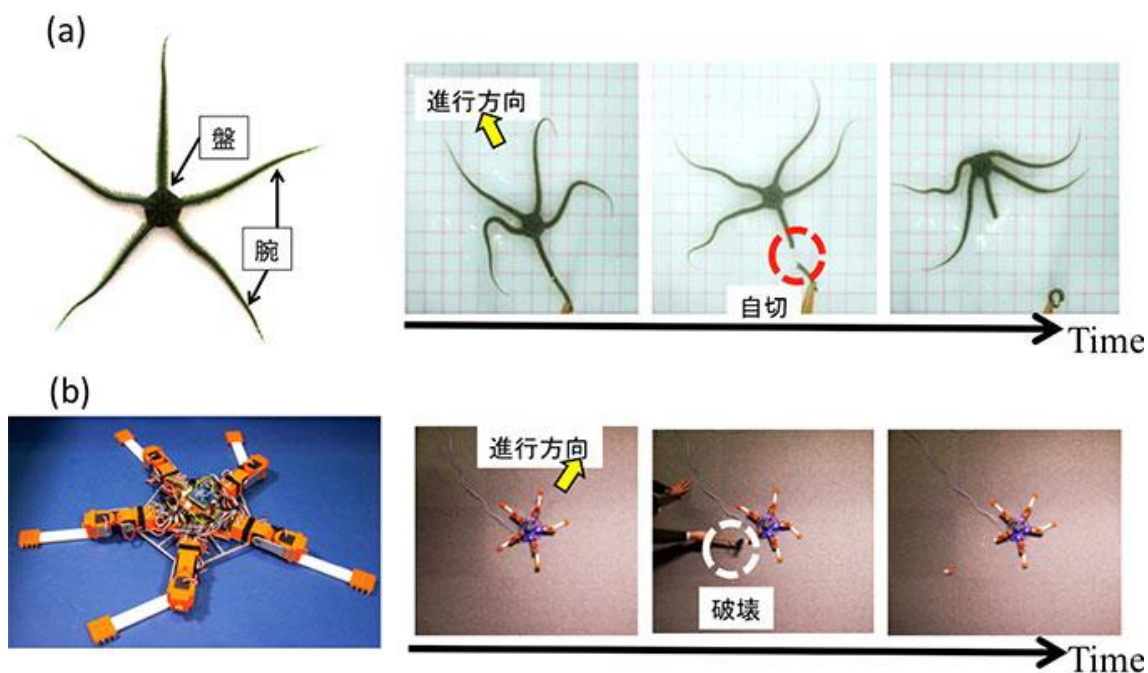


図25 (a) クモヒトデの全体像(左)と腕を自ら切断して推進する様子(右)。

(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よう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、臨床医療のニーズからの問題設定に対して、的確な対応となる研究成果が得られており、さらに、臨床医療側からの期待が高まっている。特に、腸間膜形状推定により、内視鏡下での手術部位の適切な取り扱いを促す手術支援(図26)は実装可能性の検討に入っている。これに関係して「構造推定装置、構造推定方法、および、プログラム」として2件の特許(2017-539181、W02016JP76246)を出願している。また大動

脈血流の研究(図27)などへの適用が進んでいるアイソジオメトリック有限要素解析手法は数学的基礎付けを行うことにより有効性が高まっている。

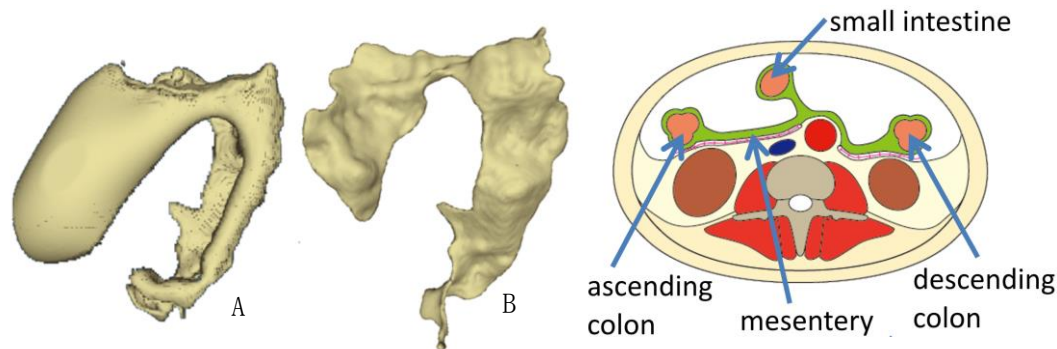


図 26 内視鏡下手術を支援し、安全性を高めるために開発している腸間膜形状推定アルゴリズムをさらに改良し、推定精度を向上させた。

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 27 大動脈縮窄症に対する解析例

長山チームでは、皮膚科学を数理モデル構築とモデル化に必要な実験観察を行っている。特に、顕微鏡観察により皮膚細胞の角化の様子を特定した。ま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、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。これについては、2018年12月20日にプレスリリースを行なった(図28、29)。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を発見している。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」(出願番号2016-125843、2016-256778)、「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」(出願

番号 2017-248116)、「脂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ト」、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。

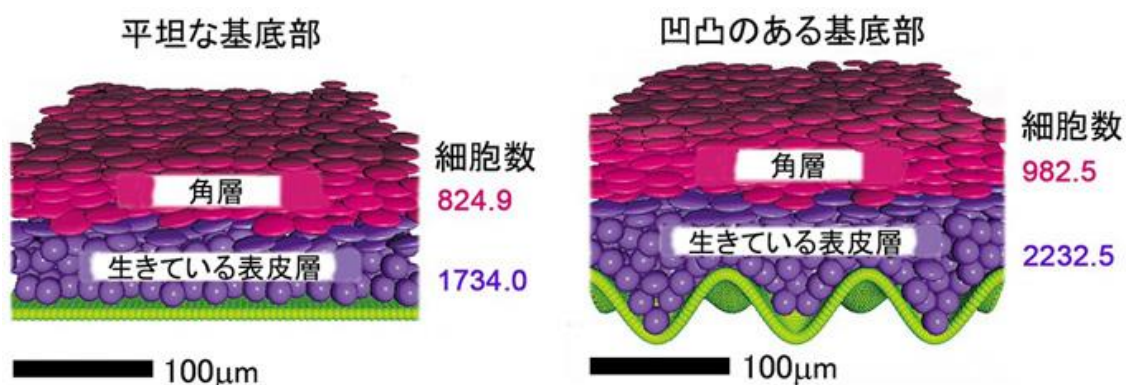


図 28 数理モデルに対するコンピューターシミュレーションによって表された表皮モデル画像

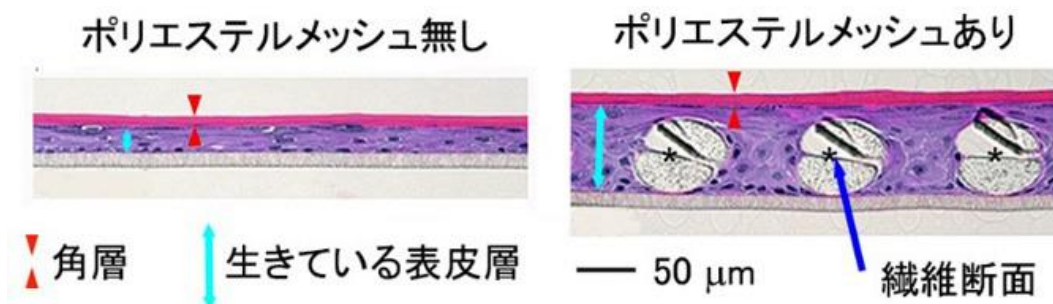


図 29 HE 染色法を用いた表皮モデル断面画像

#### (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、重要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、日本応用数学会論文誌 2015年度論文賞を受賞した。

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。

#### 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 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。

研究成果の社会発信としては、國府数学領域(および2017年は数学協働プログラム)とも共同して2017~2019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。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、今後も続けて行く。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。

### (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。さらに革新的な成果が期待される幾つかのチームには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ると考えている。

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つつある。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始めている。

### (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、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。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るようになって来た。

### (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。これらにより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。

今後 3 年間の本研究領域では、既に課題に対応して構成された数理モデルについては、各チームにより磨き込まれたものになることは当然期待される。一方、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、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。各チームの研究課題が数理科学に主導されたものとして、社会により正当に認知されることを推進して行く。

#### (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、この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からの適切なお意見により、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たように思われる。

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