

戦略的創造研究推進事業
CREST(チーム型研究)
追跡評価用資料

研究領域
「数学と諸分野の協働による
ブレークスルーの探索」
(2008 年度～2015 年度)

研究総括: 西浦 廉政

2022 年 3 月

目次

要旨	1
第 1 章 研究領域概要.....	3
1.1 戦略目標.....	3
1.2 研究領域の目的.....	3
1.3 研究総括.....	3
1.4 領域アドバイザー.....	3
1.5 研究課題および研究代表者.....	4
第 2 章 追跡調査	7
2.1 追跡調査について.....	7
2.1.1 調査の目的.....	7
2.1.2 調査の対象.....	7
2.1.3 調査方法	8
2.2 追跡調査概要.....	9
2.2.1 研究助成金.....	9
2.2.2 論文	13
2.2.3 特許	17
2.2.4 受賞	19
2.2.5 招待講演	21
2.2.6 報道	21
2.2.7 共同研究や企業との連携.....	22
2.2.8 実用化・製品化.....	24
2.2.9 ベンチャー.....	24
2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果.....	25
2.3.1 研究領域の展開状況(展開図).....	25
2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	27
2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献.....	28
2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合).....	31
第 3 章 各研究課題の主な研究成果.....	34
3.1 2008 度採択研究課題	34
3.1.1 離散幾何学から提案する新物質創成と物性発現の解明(小谷 元子).....	35
3.1.2 生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開(小林 亮).....	36
3.1.3 現代の産業社会とグレブナー基底の調和(日比 孝之).....	37
3.2 2009 年度採択研究課題	38

3.2.1 非線形系の精度保証付き数値計算法の基盤とエラーフリーな計算工学アルゴリズムの探求(大石 進一)	39
3.2.2 ダイナミクス全構造計算法の発展による脳神経-身体リズム機構の解明と制御(國府 寛司)	40
3.2.3 複雑な金融商品の数学的構造と無限次元解析(コハツ・ヒガ アルトゥーロ)	41
3.2.4 現代数学解析による流体力学の未解決問題への挑戦(柴田 良弘)	42
3.2.5 数理医学が拓く腫瘍形成原理解明と医療技術革新(鈴木 貴)	43
3.3 2010 年度採択研究課題	44
3.3.1 デジタル映像数学の構築と表現技術の革新(安生 健一)	45
3.3.2 渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト(坂上 貴之)	46
3.3.3 放射線医学と数理科学の協働による高度臨床診断の実現(水藤 寛)	47
3.3.4 計算錯覚学の構築 - 錯視の数理モデリングとその応用(杉原 厚吉)	48
3.3.5 生理学と協働した数理科学による皮膚疾患機構の解明(長山 雅晴)	49

要旨

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業の CREST (チーム型研究) の研究領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」(2008 年度～2015 年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、JST 事業および事業運営の改善等に資するために、追跡調査を実施し、その結果をまとめたものである。

本研究領域では、3 期にわたり合計 13 件の研究課題を採択し、「社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索 (幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として)」という戦略目標の下で研究を遂行した。研究終了後も引き続き、本研究領域で研究総括が定めた以下の 4 つの目標に基づき研究が進められた。①「世の中の難問に数学が解決の端緒を与える」では、離散幾何学による次世代物質探索 (小谷)、モデリングが難しい問題解決へのアルゴリズム開発 (大石)、確率 parametrix 法の発展 (コハツ・ヒガ)、生命動態の可視化 (鈴木)、大動脈系の数理モデルによる解析 (水藤)、表皮構造の数理モデルの基盤構築 (長山) など、②「細分化された知のつながりを取り戻す」では、動物たちに学ぶ制御法の開発 (小林)、Box-Behnken 計画 (高度な実験計画法の一つ) のためのマルコフ基底発掘 (日比)、モース分解の解析法である MGSTD 法¹の開発 (國府)、R-有界作用素の枠組みでのキャビテーション研究の発展 (柴田)、TFDA²手法を活用するためのソフトウェアの開発と応用展開 (坂上) など、③「共創による新領域開拓」では、流体アニメーションのリアル化技術の開発 (安生)、鏡に映すと接続構造が変わるトポロジー攪乱立体などの開発 (杉原) など、④「成果の社会還元」では、4 名の研究代表者が 12 冊の著書を発表するなど、各目標とも多くの成果があった。また、本研究領域終了後の 13 名の研究代表者による発展論文の総数は 221 報であり、国際学会および国内学会における招待講演は合計 207 件、特許出願は国内 6 件、海外 4 件であった。また、受賞は文部科学大臣表彰、文化功労者を含み 35 件、報道機関から報じられたニュースリリース等の件数は 427 件に上った。

上記の研究終了後の発展を、以下の目次に沿って、本報告書をまとめた。

第 1 章は、本研究領域の概要について述べた。

第 2 章は、本研究領域の追跡調査の対象とした研究代表者と調査期間、調査方法を述べた後、各研究課題における研究終了後の研究成果等について、研究助成金の種類と金額、発表した原著論文数、出願あるいは登録した特許数を表にまとめた。また、科学技術や社会・経済への波及効果として各研究代表者の受賞、招待講演、新聞等への報道、共同研究や企業との連携、実用化・製品化、ベンチャー企業の設立について記載した。

第 3 章は、本研究領域の各研究課題ごとに、研究期間中の研究成果と、研究終了後の展開状況を記載した。

¹ MGSTD 法 : Morse graph method for stochastic time-series data

² TFDA : Topological Flow Data Analysis (トポロジカルデータ解析)

なお、本資料をまとめるにあたり、各研究代表者に研究終了後の成果に関するアンケートを行い、また、本研究領域の代表的な研究課題の研究代表者 5 名(小谷元子、小林亮、安生健一、坂上貴之、水藤寛)にインタビューを行った。アンケート回答、インタビューで入手した情報は第 2 章および第 3 章に反映させた。

第 1 章 研究領域概要

1.1 戦略目標

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

1.2 研究領域の目的

科学の細分化とその情報量の肥大化に伴う社会システムの不確実性と不安定性に対し我々が何をなし得るのかは、数学を含め現代科学がもつ困難な問題である。数学はその抽象性と普遍性により科学におけるその基盤的地位をゆるぎないものとしたが、同時に諸科学、産業との乖離が生じたことも否めない。この乖離を埋め、再び循環、新陳代謝を取り戻すことは、数学の土壌を豊かにするのみならず、21 世紀現代社会をどのようにデザインしていくかという指針に大きな役割を果たすと考えられる。そのための新たな協働のスタイルを模索し、開かれた数学を目指すのが、本研究領域の趣旨である。

具体的には以下を目指した。

①直面する課題に立ち向かう数学者

環境、エネルギー、経済、情報、輸送、医療から人間心理に至る複雑で不確実な社会に山積する全人类的課題に、数学は定量的記述の枠組みを与えるのみならず、そこに潜む根源的な問題の所在や、一見無関係な諸問題相互の関連性を浮かび上がらせる機能を果たす。

②つながる知

数学内での様々な分野間連携、諸科学、諸分野との連携を介して、細分化された知のつながりを取り戻す。

③共創による新領域開拓

連携、協働の結果として、数学を核とした新たな学問領域の萌芽を立ち上げる。

④成果の社会還元とアウトリーチ活動

本研究領域における他分野との協働の成果を、具体的な形で社会還元していく。

1.3 研究総括

西浦 廉政 (採択時)北海道大学電子科学研究所 教授

(終了時)東北大学原子分子材料科学高等研究所 教授

(追跡調査時)北海道大学 名誉教授

1.4 領域アドバイザー

本研究領域は、社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索を目指し、環境、エネルギー、経済、情報、輸送、医療から人間心理に至る幅広い科学技術の研究分野との協働により研究を進めた。この研究領域の概要に沿って研究を行うため、11 人の領域アドバイザーを定め、研究者の指導にあたった。表 1-1 に領域アドバイザーを示す。

表 1-1 領域アドバイザー

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

(注)所属と役職は CREST 終了時点を記載

1.5 研究課題および研究代表者

表 1-2 研究課題と研究代表者(第 1 期、第 2 期、第 3 期)

期 (採択年度)	研究課題	研究 代表者	採択時の 所属・役職	終了時の 所属・役職	追跡調査時の 所属・役職
第 1 期 (2008 年 10 月 ～2014 年 3 月)	離散幾何学から 提案する新物質 創成と物性発現 の解明	小谷 元子	東北大学大学院 理学研究科 教授	東北大学大学院 理学研究科 教授	東北大学 理事・副学長 東北大学材料科学高等 研究所 教授 東北大学大学院理学研 究科 教授
	生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開	小林 亮	広島大学大学院 理学研究科 教授	広島大学大学院 理学研究科 教授	広島大学大学院統合生 命科学研究科 教授
	現代の産業社会 とグレースナーク基 底の調和	日比 孝之	大阪大学大学院 情報学研究科 教授	大阪大学大学院 情報学研究科 教授	大阪大学大学院情報学 研究科 教授
第 2 期 (2009 年 10 月 ～2015 年 3 月)	非線形系の精度 保証付き数値計 算法の基盤とエ ラーフリーな計 算工学アルゴリ ズムの探求	大石 進一	早稲田大学理工 学術院 教授	早稲田大学理工 学術院 学術院長・教授	早稲田大学理工学術院 教授

	ダイナミクス全構造計算法の発展による脳神経-身体リズム機構の解明と制御	國府 寛司	京都大学大学院理学研究科教授	京都大学大学院理学研究科教授	京都大学大学院理学研究科 研究科長・教授 京都大学理学部 学部長・教授
	複雑な金融商品の数学的構造と無限次元解析	コハツ・ヒガ アルトゥーロ	大阪大学大学院基礎工学研究科准教授	立命館大学大学院理工学研究科教授	立命館大学理工学部教授
	現代数学解析による流体工学の未解決問題への挑戦	柴田 良弘	早稲田大学理工学術院教授	早稲田大学理工学術院教授	早稲田大学理工学術院教授
	数理医学が拓く腫瘍形成原理解明と医療技術革新	鈴木 貴	大阪大学大学院基礎工学研究科教授	大阪大学大学院基礎工学研究科教授	大阪大学数理・データ科学教育研究センター特任教授
第3期 (2010年10月～2016年3月)	デジタル映像数学の構築と表現技術の革新	安生 健一	株式会社オー・エル・エム・デジタル研究開発部門取締役・R&Dスーパーバイザー	株式会社オー・エル・エム・デジタル研究開発部門取締役・R&Dスーパーバイザー	株式会社オー・エル・エム・デジタル取締役
	渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト	坂上 貴之	京都大学大学院理学研究科教授	京都大学大学院理学研究科教授	京都大学大学院理学研究科教授
	放射線医学と数理科学の協働による高度臨床診断の実現	水藤 寛	岡山大学大学院環境生命科学研究科教授	岡山大学大学院環境生命科学研究科教授	東北大学材料科学高等研究所 副所長・教授 東北大学大学院理学研究科教授
	計算錯覚学の構築 - 錯視の数理解モデリングとその応用	杉原 厚吉	明治大学研究・知財戦略機構特任教授	明治大学研究・知財戦略機構特任教授	明治大学研究・知財戦略機構 研究特別教授
	生理学と協働した数理科学による皮膚疾患機構の解明	長山 雅晴	金沢大学理工学研究域数物科学系教授	北海道大学電子科学研究所教授	北海道大学電子科学研究所教授

表 1-3 各研究チームの主たる共同研究者

研究代表者	主たる共同研究者
小谷 元子	尾畑 伸明(東北大学大学院情報科学研究科 教授) 福村 裕史(仙台高等専門学校 校長) 川添 良幸(東北大学未来科学技術共同研究センター 名誉教授) 阿尻 雅文(東北大学材料科学高等研究所 教授)
小林 亮	中垣 俊之(北海道大学電子科学研究所 教授) 石黒 章夫(東北大学電気通信研究所 教授)
日比 孝之	大杉 英史(関西学院大学理工学部 教授) 竹村 彰通(滋賀大学データサイエンス学部 教授) 青木 敏 (神戸大学大学院理学研究科 教授) 高山 信毅(神戸大学大学院理学研究科 教授) 野呂 正行(立教大学理学部 教授) 濱田 龍義(日本大学生物資源科学部 教授)
大石 進一	荻田 武史(東京女子大学現代教養学部 教授) 尾崎 克久(芝浦工業大学システム理工学部 教授)

研究代表者	主たる共同研究者
國府 寛司	青柳 富誌生(京都大学大学院情報学研究科 教授) 青井 伸也(京都大学大学院工学研究科 准教授)
コハツ・ヒガ アルトゥーロ	内田 雅之(大阪大学基礎工学研究科 教授)
柴田 良弘	吉村 浩明(早稲田大学理工学術院 教授) 高木 正平(東京都立大学システムデザイン研究科 客員教授) 飯間 信 (広島大学大学院統合生命科学研究科 准教授)
鈴木 貴	村上 善則(東京大学医学研究所 教授)
安生 健一	落合 啓之(九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 教授) 土橋 宜典(北海道大学大学院情報科学研究院 教授)
坂上 貴之	荒井 迅 (中部大学創発学術院 教授) 石原 卓 (岡山大学大学院環境生命科学研究科 教授)
水藤 寛	植田 琢也(東北大学大学院医学系研究科 教授) 齊藤 宣一(東京大学大学院数理科学研究科 教授) 滝沢 研二(早稲田大学理工学術院 教授) 増谷 佳孝(広島市立大学大学院情報科学研究科 教授)
杉原 厚吉	新井 仁之(早稲田大学教育・総合科学学術院 教授) 山口 泰 (東京大学大学院総合文化研究科 教授)
長山 雅晴	傳田 光洋(明治大学先端数理科学 インスティテュート研究員)

※主たる共同研究者の所属および役職は調査時点。

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

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

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、CREST 研究領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索(2008 年度～2015 年度)」を対象とする。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

採択年	研究代表者	CREST 研究期間	CREST 終了後の調査対象期間
第 1 期 (2008 年)	小谷 元子	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～2020 年 12 月
	小林 亮	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～2020 年 12 月
	日比 孝之	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～2020 年 12 月
第 2 期 (2009 年)	大石 進一	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～2020 年 12 月
	國府 寛司	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～2020 年 12 月
	コハツ・ヒガ アルトゥーロ	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～2020 年 12 月
	柴田 良弘	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～2020 年 12 月
	鈴木 貴	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～2020 年 12 月
第 3 期 (2010 年)	安生 健一	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～2020 年 12 月
	坂上 貴之	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～2020 年 12 月
	水藤 寛	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～2020 年 12 月
	杉原 厚吉	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～2020 年 12 月
	長山 雅晴	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～2020 年 12 月

2.1.3 調査方法

(1) 研究助成金

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

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

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

- ・調査対象研究代表者所属大学の研究者データベース
- ・調査対象研究代表者の所属する研究室、本人の Web サイト
- ・競争的研究資金の機関データベース
(科学研究費助成事業データベース、厚生労働科学研究成果データベース)
- ・民間女性研究成果概要データベース(学術研究データベース・リポジトリ 国立情報学研究所[https://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta_pub/CsvSearch.cgi])
- ・公益財団法人助成財団センター(http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap_search.php5)
- ・日本の研究.com(<https://research-er.jp/>)

(2) 論文

論文の抽出は、文献データベースとして Scopus を用い、文献タイプは Article、Review、Conference Paper を対象とした。研究期間中は研究代表者および主たる共同研究者(あるいは研究終了報告書の成果論文で責任著者となっている研究者)が著者になっている論文、研究終了後は主たる共同研究者は含まず研究代表者が著者になっている論文を著者名検索により出力した。著者名から論文リストを作成し、①CREST の成果と認められるもの、②CREST の発展と認められるもの、③CREST と無関係と考えられるものに分類し、論文数を求めた。また、CREST の成果および発展に関する論文について、研究代表者が責任著者となっている論文数も調べた。著者名からは絞り込みの出来ない研究代表者については、CREST 研究のキーワードで絞り込み検索を行った。

(3) 特許

特許の抽出は、データベース PatentSQUARE を用いた。

特許出願および登録状況は、出願日(もしくは優先権主張日)が研究課題開始以降で、研究代表者が発明者になっているものを抽出した。

(4) 受賞、招待講演、報道、共同研究や企業との連携等

研究終了以降から現在に至るまでの受賞、国内外の主要な会議における招待講演、報道、共同研究や企業との連携等について、Web 検索を用い、各研究代表者の研究室ホームページ、科学研究費補助金(科研費)ホームページなどを参考にし、それぞれのリストを作成した。さらに研究代表者の確認により追加した。

2.2 追跡調査概要

2.2.1 研究助成金

各研究代表者が獲得した助成金のリストを表 2-2 に示した。ここでは、原則として研究終了後に実施したもの(研究期間中に並行して実施したものも含む)で、助成金総額が 1 千万円/件以上のものを示しているが、各研究代表者はこれらの他にも助成金(研究分担者として、あるいは研究代表者であるが比較的少額)を獲得して研究を進めている。

研究領域全体では 40 件の研究助成金を獲得しており、小谷は、科研費新学術領域研究(研究領域提案型)「次世代物質探索のための離散幾何学」(2017 年度～2021 年度)を立ち上げ、領域代表者を務めている。また、國府は、さきがけ研究領域「数学協働」「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」(2014 年度～2018 年度)で研究総括を務めた。坂上は、さきがけ研究領域「数理構造活用」「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～2023 年度)で研究総括を務めている。このほか、鈴木が 7 件、小谷、日比、國府、坂上がそれぞれ 5 件の研究助成金を獲得している。

表 2-2 研究助成金獲得状況

科研費 ■ JST ■ 文科省 ■ 厚労省 ■ その他 ■

研究者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	金額 (1000 万円)
小谷 元子	2008 ～ 2013	JST (CREST)	離散幾何学から提案する新物質創成と物性発現の解明																					28.9
	2015	JST (ACCEL)	材料設計基盤としての離散幾何学手法の開発																					1.0 (最大)
	2007 ～ 2016	文科省 (WPI 研究拠点)	世界トップの材料科学研究拠点形成																					1254.8
	2012 ～ 2016	科研費 (基盤研究(A))	量子スピン系の離散幾何解析学																					4.6
	2017 ～ 2021	科研費 (新学術領域研究(研究領域提案型))	次世代物質探索のための離散幾何学(領域代表者)																					-

研究者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	金額 (1000万円)
	2017 ～ 2021	科研費 (新学術領域 研究(研究領 域提案型))	物質分離・輸送を最適化する多層・多孔質材料の離散曲面論																					5.2
	2017 ～ 2021	科研費 (新学術領域 研究(研究領 域提案型))	次世代材料探索のための離散幾何解析推進																					27.2
小林 亮	2008 ～ 2013	JST (CREST)	生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開																					22.8
	2014 ～ 2019	JST (CREST)	環境を友とする制御法の創成																					15.0 ～49.8
日比 孝之	2008 ～ 2013	JST (CREST)	現代の産業社会とグレブナー基底の調和																					25.9
	2010 ～ 2014	科研費 (基盤研究 (B))	進化するグレブナー基底の理論を戦略とする凸多面体を巡る未解決問題の探究																					1.6
	2014 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (S))	統計と計算を戦略とする可換代数と凸多面体論の現代的潮流の誕生																					17.9
	2017 ～ 2021	科研費 (挑戦的研究 (開拓))	代数計算と数値計算の融合を戦略とする医薬品候補物の副作用予測モデルの創造への挑戦																					2.5
	2019 ～ 2023	科研費 (基盤研究 (A))	シチジー理論とシンボリック冪の現代的潮流を踏襲する可換環論の戦略的研究の展開																					4.4
	2020 ～ 2024	科研費 (国際共同研究加速基金)	多項式環のシチジー理論を戦略とするグラフ理論の古典論の再編と現代的潮流の誕生																					1.8
大石 進一	2009 ～ 2014	JST (CREST)	非線形系の精度保証付き数値計算法の基盤とエラーフリーな計算工学アルゴリズムの探求																					22.7
	2014 ～ 2019	JST (CREST)	モデリングのための精度保証付き数値計算論の展開																					15.0 ～49.8
國府 寛司	2009 ～ 2014	JST (CREST)	ダイナミクス全構造計算法の発展による脳神経-身体リズム機構の解明と制御																					20.2

研究者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	金額 (1000万円)
	2013 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (B))	力学系の位相計算 理論の応用展開																					1.8
	2016 ～ 2017	JSPS (外国人招へ い研究者)	多重パラメータ遺 伝子ネットワーク のモデリングへの 力学系的アプローチ の数理的研究																					-
	2014 ～ 2018	JST (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 (研究総括)																					-
	2014 ～ 2019	科研費 (基盤研究 (B))	力学系理論に基づ く臨界的遷移の予 兆の探索																					1.6
	2018 ～ 2022	科研費 (基盤研究 (A))	力学系:理論と応用 の新展開																					4.4
	2020 ～ 2023	科研費 (挑戦的研究 (開拓))	理論と実験の協働 による時空間リズム ダイナミクス研究 の新手法の開拓																					2.6
アル トウ ・ヒ ガ	2009 ～ 2014	JST (CREST)	複雑な金融商品の 数学的構造と無限 次元解析																					17.0
柴 田 良 弘	2009 ～ 2014	JST (CREST)	現代数学解析によ る流体工学の未解 決問題への挑戦																					24.1
	2012 ～ 2016	科研費 (基盤研究 (S))	流体現象のマクロ 構造とメゾ構造解 明のための解析理 論の構築																					8.6
	2017 ～ 2021	科研費 (基盤研究 (A))	2相流の数学理論 の構築																					4.1
鈴 木 貴	2009 ～ 2014	JST (CREST)	数理医学が拓く腫 瘍形成原理説明と 医療技術革新																					20.6 (13.0)※
	2014 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (A))	近平衡数理モデル の解析的研究																					3.3
	2015 ～ 2019	JSPS (研究拠点形 成事業)	数理腫瘍学 国際研 究ネットワークの 構築																					7.8
	2016 ～ 2020	科研費 (新学術領域 研究(研究領 域提案型))	細胞内信号伝達経 路の数理モデリン グ																					9.7

研究者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	金額 (1000万円)
	2017 ～ 2021	文科省 (Du-EX)	データ関連人材育成関西地区コンソーシアム																					30.5
	2019 ～ 2023	文科省 (D-DRIVE)	データ関連人材育成プログラム全国ネットワーク																					10.0
	2019 ～ 2021	科研費 (基盤研究(B))	多成分偏微分方程式系の解析的研究																					1.8
	2019 ～ 2020	厚労省	データサイエンス利活用教育訓練プログラムの開発																					5.0
安生 健一	2010 ～ 2015	JST (CREST)	デジタル映像数学の構築と表現技術の革新																					19.9
坂上 貴之	2010 ～ 2015	JST (CREST)	渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト																					16.7
	2014 ～ 2017	科研費 (基盤研究(B))	流体方程式の散逸的弱解を通じた乱流理論の新展開																					1.2
	2017	JSPS (外国人招へい研究者)	ケルビンヘルムホルツ不安定性の安定化を実現する数値モデルの研究																					4.5
	2015 ～ 2019	科研費 (基盤研究(B))	次世代高速鉄道のためのトンネル圧縮波変形メカニズムの数値科学的研究																					1.2
	2018 ～ 2020	JST (未来社会創造事業)	包括的トポロジカルデータ解析共通数値基盤の実現																					4.5
	2018 ～ 2021	科研費 (基盤研究(B))	曲面上の渦力学: 曲面の幾何がもたらす新しい流体運動の数値科学																					1.7
	2019 ～ 2023	JST (さきがけ)	数学と情報科学で解き明かす多様な対象の数値構造と活用(研究総括)																					-
	2010 ～ 2015	JST (CREST)	放射線医学と数値科学の協働による高度臨床診断の実現																					25.2
水藤 寛	2015 ～ 2020	JST (CREST)	臨床医療における数値モデリングの新たな展開																					15.0 ～49.8
	2019 ～ 2021	JST (未来社会創造事業)	AIの学習と数値から解き明かす熟練者の技																					2.3

研究者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	金額 (1000万円)
	2020 ～ 2025	JST (ムーンショット型研究 開発事業) 「恒常性の 理解と制御 による糖尿 病および併 発疾患の克服」(代表 者：片桐秀 樹)	数理モデル解析に よる恒常性の理解 とその応用																					-
杉原 厚吉	2010 ～ 2015	JST (CREST)	計算錯覚学の構築- 錯視の数理モデリ ングとその応用																					22.2
	2016 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (A))	視覚の心理・数理モ デリングと第5世 代不可能立体																					4.3
長山 雅晴	2010 ～ 2015	JST (CREST)	生理学と協働した 数理科学による皮 膚疾患機構の解明																					22.6
	2016 ～ 2019	科研費 (基盤研究 (B))	自己駆動系の集団 運動に対する数理 モデリングとその 数理解析																					1.8
	2015 ～ 2020	JST (CREST)	数理モデリングを 基盤とした数理皮 膚科学の創設																					15.0 ～49.8

*鈴木(大阪大学数理・データ科学教育研究センター)の分担金

2020年4月28日調査
2020年11月16日更新
2021年3月7日確認

2.2.2 論文

論文発表数はその研究活動の状況を示す重要な指標であるため、本研究領域の研究代表者が研究期間中および研究終了後に発表した原著論文の数を表 2-3 に示した。なお、本研究領域では、国際会議での発表を公式な研究成果発表としていることも多く、その発表数も表 2-3 に含まれている。

また、図 2-1 には①CREST の成果と認められるもの、②CREST の発展と認められる論文数および引用件数 Top10%以内論文数を、図 2-2 には各研究代表者の論文数分布、図 2-3 には各研究代表者の責任著者論文数分布、また図 2-4 には各研究代表者の①CREST の成果、②CREST の発展に関する論文数および引用件数 Top10%以内論文数を示した。

表 2-3 CREST の成果および発展の論文(原著論文)数

期 (採択 年度)	研究 代表者	①CREST の成果							②CREST の発展						
		論文 数	責任 著者 論文 数	平均 FWCI 値	TOP%論文				論文数	責任 著者 論文 数	平均 FWCI 値	TOP%論文			
					10%	1%	0.1%	0.01%				10%	1%	0.1%	0.01%
第 1 期 (2008 年度)	小谷 元子	78	1	1.17	7	2	0	0	17	7	0.62	1	0	0	0
	小林 亮	81	9	1.03	6	0	0	0	9	2	0.24	0	0	0	0
	日比 孝之	134	26	0.77	7	0	0	0	41	35	1.77	11	1	0	0
第 2 期 (2009 年度)	大石 進一	38	24	0.63	1	0	0	0	18	16	1.09	2	0	0	0
	國府 寛司	124	2	0.82	5	0	0	0	6	3	0.96	0	0	0	0
	コハツ・ヒガ アルトゥーロ	66	18	0.77	2	0	0	0	11	8	0.92	1	0	0	0
	柴田 良弘	51	11	0.93	3	0	0	0	29	24	1.27	4	1	0	0
	鈴木 貴	60	18	1.07	6	0	0	0	30	21	1.11	3	0	0	0
第 3 期 (2010 年度)	安生 健一	70	8	0.54	2	0	0	0	14	6	0.34	0	0	0	0
	坂上 貴之	52	9	0.88	4	0	0	0	11	10	1.05	1	0	0	0
	水藤 寛	44	3	1.97	9	0	0	0	3	2	9.56	1	1	0	0
	杉原 厚吉	54	15	0.65	1	0	0	0	12	11	0.54	1	0	0	0
	長山 雅晴	32	8	0.86	1	0	0	0	20	8	0.83	2	0	0	0
領域全体		882	151		54	2	0	0	221	153		27	3	0	0
		(2)													

- 1 各研究代表者の論文数は共著による重複論文を含むため、領域全体の論文数の合計数は一致しない。
()中の数値は重複論文数。領域全体の論文数には重複論文数は含めない。
なお、重複論文は、小林と國府の共著、小林と柴田の共著の2報である。
- 2 責任著者とはFirst Author、Last Author、およびCorresponding Authorとした(参考として記載)。
- 3 平均FWCI 値は、調査最終年マイナス1 年まで(今回の調査では2019 年末まで)の論文を対象とし、FWCI 値が得られる論文(FWCI 値=0 含む)で平均した数値とする。
- 4 Top%値はFWCI 値ベースとする。またTop%論文は「論文数」でリストアップした論文を対象とする。
- 5 各Top%論文数は“以内”を意味し、例えばTop10%の欄には1%以下も含む件数がカウントする。

2020 年 5 月 24 日調査

2020 年 11 月 25 日更新

2021 年 3 月 7 日確認

(FWCI TOP%入手日 2020 年 11 月 25 日)

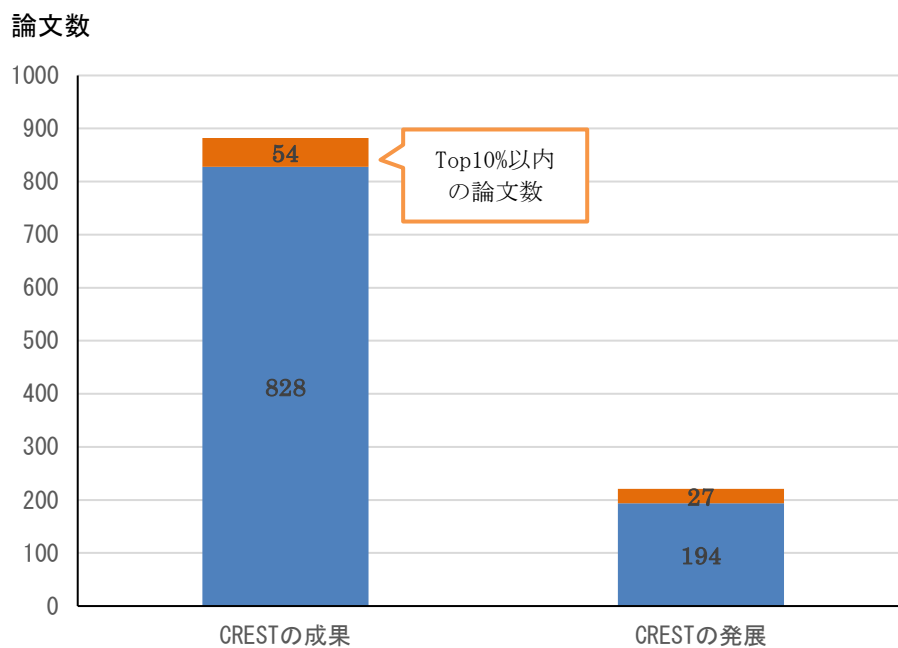


図 2-1 CREST の成果および発展に関する論文数

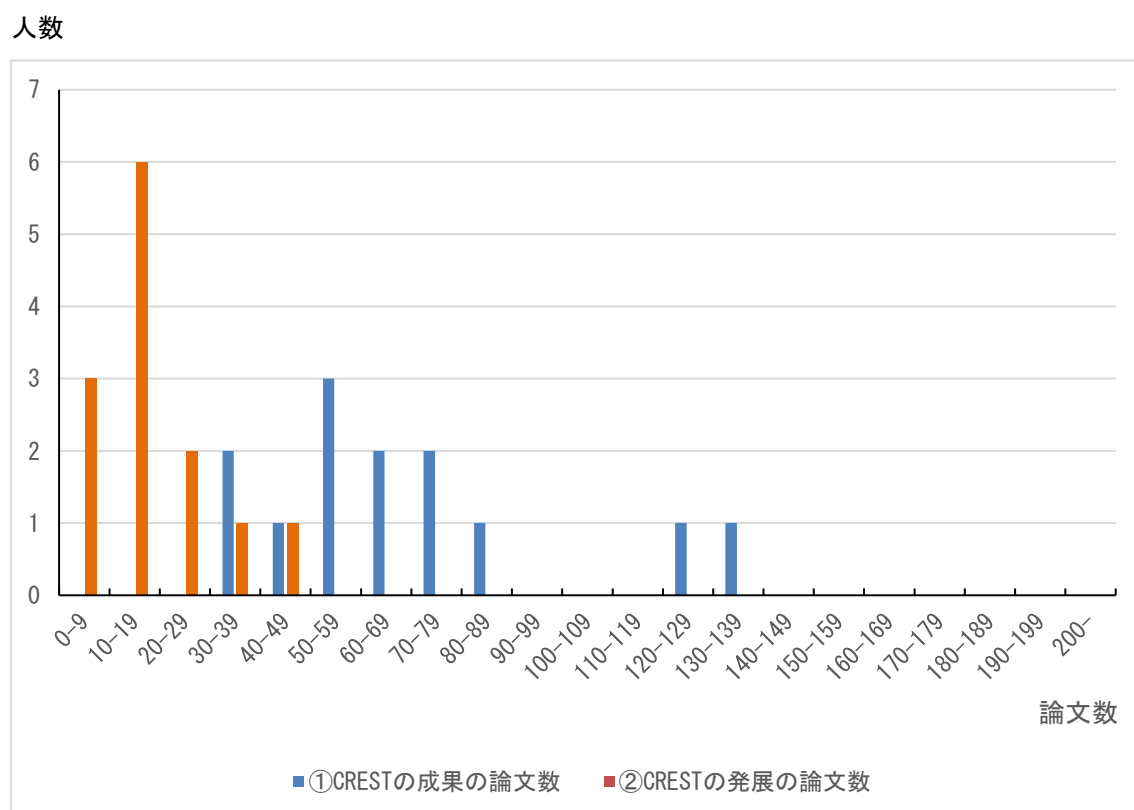


図 2-2 各研究代表者の論文数分布

人数

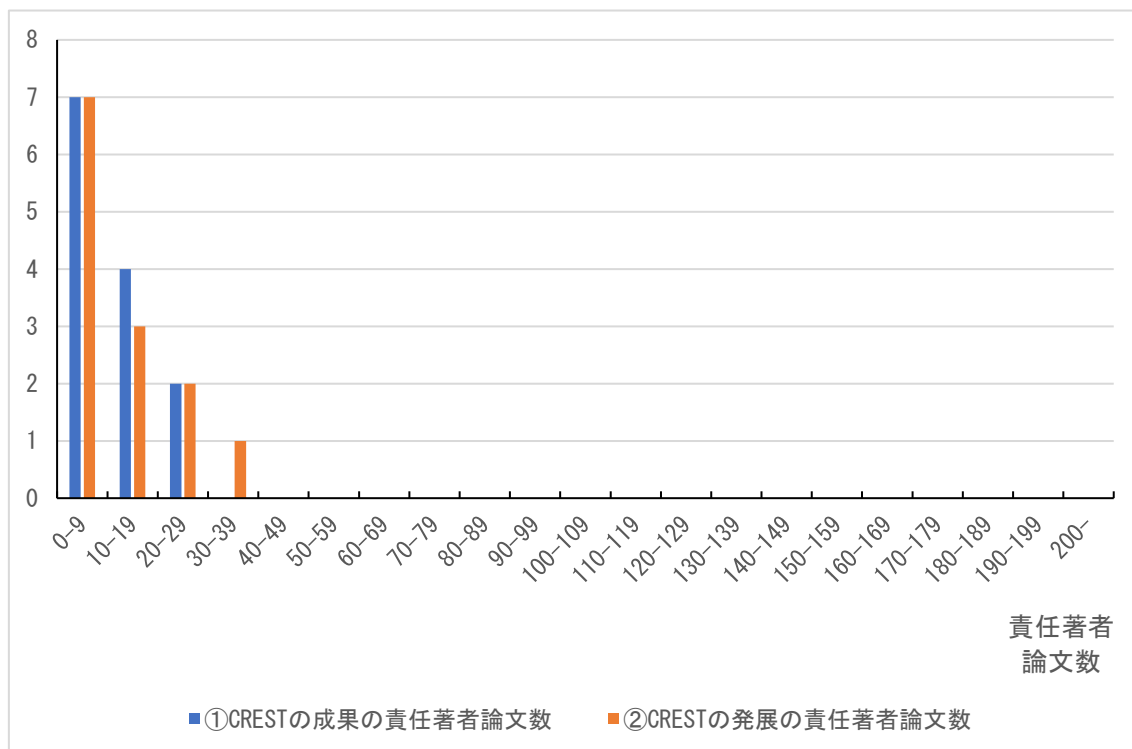


図 2-3 各研究代表者の責任著者論文数分布

領域全体では、研究期間中 882 報、終了後は 221 報であった。研究終了後は主たる共同研究者は含まず研究代表者が著者になっている論文をカウントしているため少なく抽出されていると考えられる。終了後の責任著者論文数は研究期間中とほぼ同じであるため、終了後も研究期間中と同様に、活発に研究活動が展開されている様子がうかがえる。また、Top10%以内の論文は、研究期間中 54 報(このうち Top1%以内の論文は 2 報)、終了後は 27 報(このうち Top1%以内の論文は 3 報)であった。

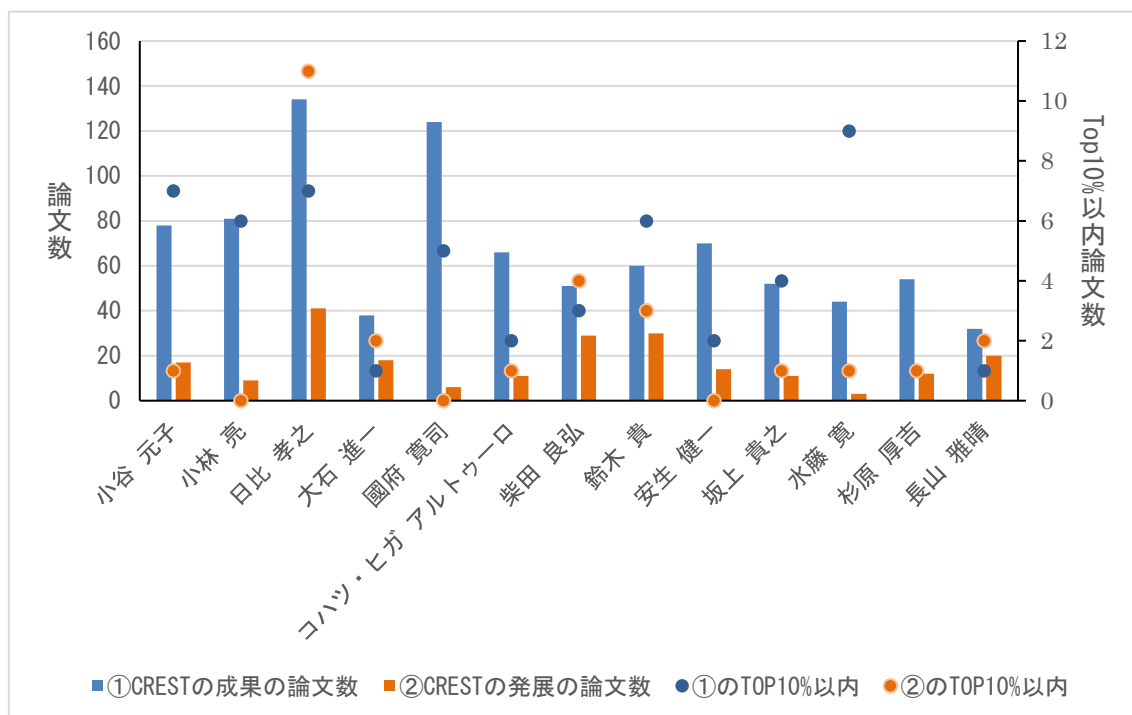


図 2-4 各研究代表者の研究領域期間中・終了後の論文数

研究代表者別では、各研究代表者間でばらつきはあるが、CREST の研究成果の論文を最も多く発表したのは、日比で 134 報、次いで國府が 124 報、小林が 81 報、小谷が 78 報、安生が 70 報、コハツ・ヒガが 66 報であった。また、CREST の研究成果の継続と発展に関しても、日比が 41 報で最も多く、次いで鈴木が 30 報、柴田が 29 報、長山が 20 報、大石が 18 報、小谷が 17 報であった。

CREST の研究成果の継続と発展に関して、本研究領域内での共著論文数は、研究期間中の CREST 研究成果で 2 報、研究終了後の CREST 研究成果の発展に関しては 0 報であったが Top10%以内の論文数は、日比が 11 報、柴田が 4 報、鈴木が 3 報と多く、また Top1%以内の論文数は、日比、柴田、水藤がそれぞれ 1 報であった。

2.2.3 特許

特許出願および登録は、研究目的と段階によりその数は異なるが、当該研究が最終的に一定の成果を収め、実用化による社会貢献につながる段階に達したことを示す重要な指標でもある。本研究領域は対象が数学であったが、研究代表者 6 名が、期間中・終了後を含め、50 件(国内 31 件、海外 19 件)の特許を出願し、33 件(国内 23 件、海外 10 件)が登録された。特許出願を行った研究代表者 6 名の、特許出願数および登録数を表 2-4 に示す。

表 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と登録状況

採択 年度	研究 代表者	研究期間中				研究終了後			
		出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
		国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
2009 年度	鈴木 貴	3	2	3	1	2	1	0	0
2010 年度	安生 健一	3	2	3	2	0	0	0	0
	坂上 貴之	3	4	3	3	2	0	0	0
	水藤 寛	2	2	2	0	0	1	0	0
	杉原 厚吉	11	6	10	4	1	0	0	0
	長山 雅晴	4	0	3	0	1	2	0	0
	領域全体	25 (1)	15 (1)	23 (1)	10 (0)	6 (0)	4 (0)	0 (0)	0 (0)

- 1) PCT 出願、海外国への個別特許申請のいずれかがあれば、海外 1 件としてカウント。
- 2) 国内特許出願し PCT 出願あるいは直接 PCT 出願された場合は国内出願件数に含めてカウント。
- 3) 各研究代表者の特許数は重複特許を含むため、領域全体の特許数の合計数は一致しない。
() 中の数値は重複特許数。領域全体の特許数には重複特許数は含めない。
なお、重複は水藤と杉原の特許 1 件である。

2020 年 4 月 27 日調査
2020 年 11 月 18 日更新
2021 年 3 月 7 日確認

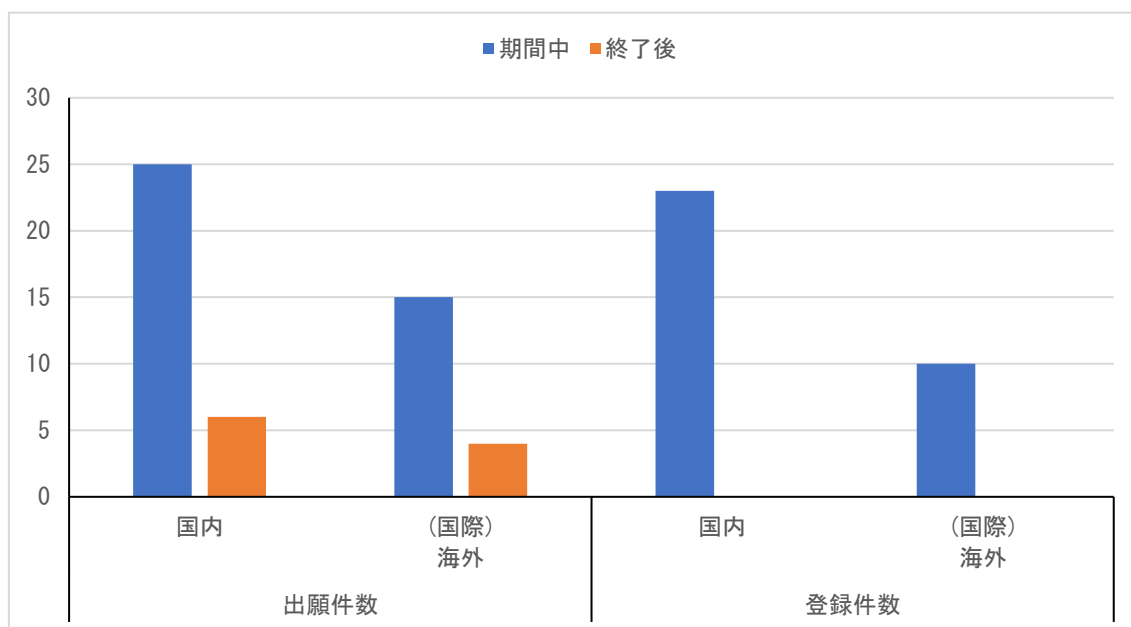


図 2-5 研究期間中・終了後の特許の出願と登録状況

領域全体では、出願件数については国内が研究期間中の 25 件から終了後の 6 件に、海外

が研究期間中の 15 件から終了後の 4 件に減じている。登録件数については、国内は研究期間中が 23 件、海外は研究期間中が 10 件であったが、終了後は国内・海外とも 0 件である。

各研究代表者別では、最も多く出願・登録されているのは、杉原で、期間中・終了後を含め国内に 12 件、海外に 6 件出願し、それぞれ 10 件、4 件が登録されている。これらは、錯視数理モデルに関する立体画像の生成・処理・分析などの特許である。次いで多く出願・登録されているのは、坂上であり、期間中・終了後を含め国内に 5 件、海外に 4 件出願し、何れも 3 件が登録されている。これらは、数理流体モデルに関する新しい記述方法などの特許である。

2.2.4 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞が挙げられる。表 2-5 に、研究終了後の研究代表者の受賞を示す。

表 2-5 研究終了後の受賞

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
1.	小林 亮	明治大学 先端数理科学インスティテュート 現象数理学三村賞	明治大学	2018
2.	日比 孝之	大阪大学 総長顕彰 研究部門	大阪大学	2015
3.		日本学術振興会 科学研究費助成事業 審査委員の表彰	日本学術振興会	2017
4.		日本数学会 代数学賞	日本数学会	2018
5.	大石 進一	電子情報通信学会 業績賞	電子情報通信学会	2016
6.		電子情報通信学会 マイルストーン	電子情報通信学会	2018
7.		電子情報通信学会 功績賞	電子情報通信学会	2019
8.		電子情報通信学会 名誉員	電子情報通信学会	2019
9.		文化功労者	日本国政府	2020
10.	國府 寛司	日本応用数理学会 論文賞 (JJIAM 部門)	日本応用数理学会	2017
11.	鈴木 貴	大阪大学 総長顕彰	大阪大学	2015
12.		日本応用数理学会 論文賞 (理論部門)	日本応用数理学会	2018
13.	坂上 貴之	明治大学 先端数理科学インスティテュート 現象数理学三村賞	明治大学	2020
14.		日本応用数理学会 論文賞 (応用部門)	日本応用数理学会	2020

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
15.	水藤 寛	明治大学 先端数理学科学インスティテュート 現象数理学三村賞	明治大学	2018
16.		平成 31 年度科学技術分野文部科学大臣表彰(研究部門)	文部科学省	2019
17.	杉原 厚吉	日本基礎心理学会 第 8 回錯視・錯聴コンテスト入賞	日本基礎心理学会	2016
18.		日本応用数理学会 論文賞(応用部門)	日本応用数理学会	2016
19.		2nd Prize of the 12th Best Illusion of the Year Contest	Neural Correlate Society	2016
20.		科学技術の「美」 パネル展 優秀賞	科学技術振興機構	2016
21.		日本応用数理学会 論文賞(JJIAM 部門)	日本応用数理学会	2017
22.		Best Illusion of the Year Contest 2017 finalist	Neural Correlate Society	2017
23.		日本図学会 Asian Digital Modeling Contest 2017 finalist	日本図学会	2018
24.		Best Illusion of the Year Contest 2018 finalist	Neural Correlate Society	2018
25.		日本図学会 第 10 回デジタルモデリングコンテスト最優秀賞	日本図学会	2019
26.		「トレンドたまご」の年間ベスト 10	NHK ワールドビジネスサテライト	2019
27.		Best Illusion of the Year Contest 2019 finalist	Neural Correlate Society	2019
28.		日本図学会 優秀研究発表賞	日本図学会	2019
29.		The Best Writing on Mathematics 2019	Princeton University Press	2019
30.		Art and Science Award	芸術科学会	2020
31.		NICOFRAPH 2020 最優秀論文賞	芸術科学会	2020
32.		日経広告賞、出版・コンテンツ・教育部門優秀賞	日本経済新聞社	2020
33.		First Prize, Best Illusion of the Year Contest 2020	Neural Correlate Society	2020
34.		日本図学会 第 12 回デジタルモデリングコンテスト優秀賞	日本図学会	2020
35.	長山 雅晴	北海道大学 研究総長賞 優秀賞	北海道大学	2016

2021 年 2 月 5 日調査
2021 年 3 月 7 日確定

本研究領域の研究代表者に対して授与された賞は 35 件であり、小林(1 件)、日比(3 件)、大石(5 件)、國府(1 件)、鈴木(2 件)、坂上(2 件)、水藤(2 件)、杉原(18 件)、長山(1 件)であった。

大石は、精度保証付き計算法と無誤差変換という画期的な数値計算法を開発した功績により 2020 年度の文化功労者に選出された。また、電子情報通信分野の基礎の発展と研究教育および社会貢献の両面の多大な貢献により、2019 年度電子情報通信学会名誉員として表彰された。水藤は、数学を用いた大動脈病態メカニズムの解明に関する研究により、平成 31 年度科学技術分野文部科学大臣表彰(研究部門)を受けた。杉原は、日本応用数理学会の論文賞を 2 回、Princeton University Press の The Best Writing on Mathematics 2019、芸術科学会の NICOFGRAPH 2020 最優秀論文賞を受賞したほか、錯視作品が多くのコンテストで最優秀賞などを受賞した。

2.2.5 招待講演

研究代表者の研究成果を、国際学会における招待講演として発表した件数が、研究終了後、合計 141 件に上った。特に、小谷が 25 件、コハツ・ヒガが 23 件、小林が 22 件と多い。また、国内学会などにおける招待講演として発表した件数は、研究終了後、合計 66 件であり、小林が 26 件、小谷が 11 件、鈴木が 6 件であった。

小谷は、数学と材料科学の連携などに関する講演を、アジア(中国、韓国、台湾、香港、シンガポール、インドネシア、ベトナム)、ヨーロッパ(英国、スペイン、オーストリア、フランス、スウェーデン)、米国、オーストラリアで行った。また、国内では、異なった分野である日本機械学会や高分子学会でも講演を行った。

コハツ・ヒガは、金融商品の数値解析的問題と確率 parametrix 法などに関する講演を、アジア(中国、シンガポール、マレーシア、ベトナム)、ヨーロッパ(英国、スペイン、フランス、スウェーデン、デンマーク、ノルウェー)、米国、ロシアで行った。

小林は、生物の動きに関する数理モデルなどに関する講演を、アジア(中国、韓国)、ヨーロッパ(英国、スペイン、フランス)、米国で行った。

2.2.6 報道

研究成果の発信、および社会・経済への波及を促す媒体として新聞等の報道がある。

研究終了後に報道機関から報じられた件数は、総数が 427 件に上った。研究代表者別では、杉原が 189 件で最も多く、次いで、小谷が 100 件、大石が 91 件となっている。

杉原は、日本科学未来館や各地の科学館・美術館・博物館などにおける錯視作品展示が 59 件、NHK や各民放による錯視作品のテレビ放映が 39 件、京浜急行電鉄羽田空港駅の錯視サインなどの錯視を使った実用化が 24 件と、錯視作品に関する一般紙の報道が多く、研究成果が社会的にも注目されていることを示している。また、錯視研究に関する取材や、「スウガクってなんの役に立ちますか？」など多くの著書に関する報道が 32 件、自ら執筆した雑誌記事「数字の学校」(PRESIDENT)が 4 件あった。

小谷は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議など公的役職の人事や論議に関する報道が 29 件、所長を務めた東北大学 WPI-AIMR の運営や研究成果に関する報道が 12 件、小谷個人を取り上げた取材報道が 6 件、有識者としてのコメントを掲載した報道が 9 件と、数理分野のみならず科学技術全体で注目されていることを示している。また、自ら執筆した雑誌記事「大人のための最先端理科[数学]」（週刊ダイヤモンド）が 17 件、理化学研究所理事として取りまとめた書籍「科学道 100 冊」に関する報道が 11 件あった。

大石は、2020 年度の文化功労者受賞に関する新聞報道が 67 件、テレビ放映が 16 件であった。また、早稲田大学理工学院と東京都中央区教育委員会の連携による小中学校の理数教育推進に関する報道が 4 件あった。

2.2.7 共同研究や企業との連携

全ての研究代表者が、国内および海外の大学や研究機関、企業との共同研究を進めている。

小谷は、科研費新学術領域研究(研究領域提案型)「物質分離・輸送を最適化する多層・多孔質材料の離散曲面論」で、ボン大学(ドイツ)、ベルリン自由大学(ドイツ)、ケンブリッジ大学(英国)、カルフォルニア大学サンタバーバラ校(米国)と共同研究を進めている。

小林は、同志社大学と「コウモリのエコーロケーション」、早稲田大学と「軟体動物リムネアの学習行動に関わる生体アミン類の役割」、岡山理科大学と「柔軟クロウの建機への展開」、さらに、株式会社小松製作所と「次世代建機の開発に向けた柔軟建機の概念設計」、株式会社タミヤと「i-CentiPot の模型開発」、株式会社村田製作所と「次世代超音波センシング技術とその応用」、トヨタ自動車株式会社と「自律分散制御」に関する共同研究を進めている。また、海外ではタフツ大学(米国)と「昆虫の歩脚の筋骨格系の構造と運動、ソフトロボット」、パリ第7大学(フランス)と「運動量流による動物やロボットの力学的解析」、スイス連邦工科大学と「水陸両用ロコモーションに内在する制御原理の理解」、オタワ大学(カナダ)と「ムカデが示す水陸両用ロコモーションの発現機序解明」、マンチェスター大学(英国)と「絶滅動物のロコモーション復元」、ウォーリック大学(英国)と「生物が示すタフさの発現機序解明と工学応用」、サウサンプトン大学(英国)と「バッタのロコモーション」、ロンドン大学クイーンメリー校(英国)と「棘皮動物の運動制御に関わる神経ペプチドの役割」、アリゾナ大学(米国)と「セアカゴケグモの攻撃行動に関わる神経修飾物質の働き」、ライプツィヒ大学(ドイツ)と「コオロギの攻撃性の発現機序」、ロシア科学アカデミー(ロシア)と「軟体動物リムネアのロコモーションに関わるセロトニンの働き」に関する共同研究を進めている。

日比は、デュイスブルクエッセン大学(ドイツ)と「トーリック環の regularity」、テュレーン大学(米国)と「edge ideal の射影次元」に関する共同研究を行った。

大石は、ハンブルグ工科大学(ドイツ)と共同研究を行った。「線形計算の精度保証技術の中核となるエラーフリー変換による無誤差計算法」を開発し、世界中で利用されている。

國府は、京都大学工学研究科と「ヒトの安定歩行の相空間構造解析」、北海道大学と「位相計算的時系列解析法とその気象データへの応用」に関する共同研究を進めている。また、ラトガース大学(米国)およびモンタナ州立大学(米国)と「switching system の位相計算理論」に関する共同研究を進めている。

コハツ・ヒガは、スウェーデン、フランス、オーストラリア、イギリスの研究者と「確率 parametrix 法」に関する共同研究を進めている。

柴田は、株式会社豊田中央研究所と共同研究を進めている。また、ドイツダルムシュタット工科大学(ドイツ)、ポーランドアカデミー(ヨーロッパ連合流体数学研究組織)と共同研究を進めている。2016 年からはピッツバーグ大学(米国)の「Adjunct faculty member in the Department of Mechanical Engineering and Material Science」となり、数学と工学の日米の懸け橋的役割を担っている。

鈴木は、東京大学医科学研究所と「細胞内シグナル伝達経路解明」に関する共同研究を行った。また、聖アンドリュース大学(英国)と「血管新生モデリングとシミュレーション」、ヴァンダービルト大学(米国)と「腫瘍微小環境生物学実験」および「システム生物学ソフト開発」に関する共同研究を行っている。ボルドー大学(フランス)とは「細胞変形数理モデリング」に関する共同研究を行っている。

安生は、ビクトリア大学(ニュージーランド)と「キャラクターアニメーション」に関する共同研究を行っている。また、本研究課題から継続して CG の共同研究をしているグループ(北海道大学情報科学研究院教授土橋宜典など)が、富山大学、和歌山大学と「流体・写実的画像生成・デジタルファブリケーション」に関する共同研究を行っている。

坂上は、公益財団法人鉄道総合技術研究所(鉄道総研)、株式会社本田中央研究所、他 1 社との共同研究を進めている。また、英国、米国、オーストラリアなどの研究者と Applied and Computational Complex Analysis の研究グループを立ち上げ、若手研究者を含む人事交流や論文共著を開始した。2019 年度にはこのメンバーが中心となってケンブリッジ大学ニュートン研究所(英国)での長期プログラムを実施して、国際的な活動が広がっている。

水藤は、東北大学病院、岡山大学病院、東北医科薬科大学病院、明石医療センターなどと、「血流解析・臓器形状解析」および「専門医の経験のアルゴリズム化」に関する共同研究を進めている。また、ミラノ工科大学(イタリア)、ロンドン大学(英国)と「血流解析の基礎技術」に関する共同研究を、フィンランド環境研究所(フィンランド)と「シミュレーション技術」に関する共同研究を進めている。

杉原は、ビー・エム・ダブリュー株式会社(BMW Japan)と「車体ペイントに適した錯視図形の開発」に関する共同研究を行った。また、台湾国立大学(台湾)と「立体錯視における脳機能の計測」に関する共同研究を進めている。

長山は、株式会社資生堂と「角層バリア機能」に関する共同研究を、金沢大学、千葉大学、明治大学、広島大学と数理皮膚科学における細胞運動のメカニズム解明にも関連する「自己駆動系の集団運動」に関する共同研究を進めている。また、ポーランド科学アカデミー、フロリダ州立大学(米国)、マックスプランク研究所(ドイツ)とも「自己駆動系の集団運動」に関する共同研究を進めている。

2.2.8 実用化・製品化

小林は、ムカデ型ロボット i-CentiPot の簡易バージョンが、株式会社タミヤから楽しい工作特別企画「ムカデロボット工作セット」として販売されている。

大石らが開発し公開している精度保証付き数値計算の kv ライブラリ(早稲田大学教授柏木雅英)を根幹として、高速化を目指した VCP(Verified Computation for PDEs)ライブラリが開発され(東洋大学助教関根晃太)、現在世界最高速の精度保証付き数値計算ライブラリとなっている。

鈴木は、画像自動診断について株式会社知能情報システム、株式会社プロアシストと共同でソフト開発を行ったほか、株式会社 NHK エンタープライズと共同で、血管新生シミュレーションに関するコンピュータグラフィックス映像を制作した。また、ホモロジーを用いた大腸がん診断実用化について株式会社知能情報システムに特許の実施許諾をした。さらに、2019 年ベンチャー企業として株式会社 APSAM Imaging を創設し、ホモロジーを用いた画像自動診断法の実用化を目指している。

安生は、開発した「不要部分のマスクとマスクされて欠落した部分を補完する技術」のソフトウェア(Interactive Video Completion)³とデモを公開しており、実際に活用されている。

坂上は、TFDA 手法を粉体の分級装置の開発にも適用し、従来よりも高い分級性能を実現した。この技術は日本ニューマチック株式会社に特許をライセンスし、技術移転を行っている。

杉原は、立体工作のための展開図の出版(株式会社誠文堂新光社など 8 社)、変身立体オブジェの商品化(東京書籍株式会社など 2 社)など、成果物が社会で広く活用された。

2.2.9 ベンチャー

小林の CREST⁴での主な共同研究者である大阪大学工学研究科教授大須賀公一が、株式会社小松製作所との共同研究を発展させ、建設・鉱山機械の遠隔化・自律化に関する研究でコマツみらい建機協働研究所を立ち上げた。

鈴木は、組織画像の数理的な特徴量を抽出することによって、大量・正確・高速で自動検査する方法を開拓し、その技術の特許化⁵した。この特許を基に、本研究課題の共同研究者である大阪大学医学系研究科招聘教授中根和昭が、2019 年に株式会社 APSAM Imaging を創設した。ホモロジーを用いた画像自動診断法の実用化を目指している。

³ <http://makotookabe.com/interactiveVideoCompletion/software/ivc-j.htm>

⁴ CREST 研究領域「現代の数理学と連携するモデリング手法の構築」研究課題「環境を友とする制御法の創成」研究代表者：小林 亮(2014 年度～2019 年度)

⁵ 特許第 5522481 号「画像解析装置、画像解析方法、画像解析プログラム、および記録媒体」、発明者：鈴木貴・中根和昭他 2 名

2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

2.3.1 研究領域の展開状況(展開図)

本研究領域では、2008 年から 2016 年にかけて合計 13 件の研究課題を採択し、「社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索(幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として)」という戦略目標の下で研究を遂行した。展開と発展の展開図として図 2-6 に示した。

戦略目標、達成目標	インプット	アクティビティ/アウトプット	アウトカム（short/mid-term）		アウトカム（long-term）/インパクト																																			
			～追跡調査時点	今後予想される展開	今後想定される波及効果																																			
戦略目標： 社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索(幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として) 達成目標： (1)直面する課題に立ち向かう数学者： 環境、エネルギー、経済、情報、輸送、医療から人間心理に至る複雑で不確実な社会に山積する全人類の課題に、数学は定量的記述の枠組みを与えるのみならずそこに潜む根源的な問題の所在や、一見無関係な諸問題相互の関連性を浮かび上がらせる機能を果たす (2)つながる知： 数学内での様々な分野間連携、諸科学、諸分野との連携を介して、細分化された知のつながりを取り戻す (3)共創による新領域開拓： 数学を核とした新たな学問領域の萌芽を立ち上げる (4)成果の社会還元とアウトリーチ活動： 他分野との協働の成果を、具体的な形で社会還元していく	研究総括： 西浦 廉政 研究代表者 <table><tr><td>小谷 元子</td></tr><tr><td>小林 亮</td></tr><tr><td>日比 孝之</td></tr><tr><td>大石 進一</td></tr><tr><td>國府 寛司</td></tr><tr><td>コハツ・ヒガアルトゥーロ</td></tr><tr><td>柴田 良弘</td></tr><tr><td>鈴木 貴</td></tr><tr><td>安生 健一</td></tr><tr><td>坂上 貴之</td></tr><tr><td>水藤 寛</td></tr><tr><td>杉原 厚吉</td></tr><tr><td>長山 雅晴</td></tr></table> 13名	小谷 元子	小林 亮	日比 孝之	大石 進一	國府 寛司	コハツ・ヒガアルトゥーロ	柴田 良弘	鈴木 貴	安生 健一	坂上 貴之	水藤 寛	杉原 厚吉	長山 雅晴	研究成果 論文 <table><tr><td>①CREST研究成果の論文数</td><td>②CREST研究成果の継続発展の論文数</td></tr><tr><td>882 (54)</td><td>221 (27)</td></tr></table> ()の値はTop10%以内論文数 特許申請・登録 <table><tr><td></td><td></td><td>期間中</td><td>終了後</td></tr><tr><td rowspan="2">出願</td><td>国内</td><td>25</td><td>6</td></tr><tr><td>国際</td><td>15</td><td>4</td></tr><tr><td rowspan="2">登録</td><td>国内</td><td>23</td><td>0</td></tr><tr><td>国際</td><td>10</td><td>0</td></tr></table> ソフトウェア ・kvライブラリを根幹とした高速化を目指したVCP(Verified Computation for PDEs)ライブラリ(大石) ・自動画像診断ソフトウェア(鈴木) ・Topological Flow Data Analysis(TFDA)ソフトウェア(psiclone)(坂上)	①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数	882 (54)	221 (27)			期間中	終了後	出願	国内	25	6	国際	15	4	登録	国内	23	0	国際	10	0	科学技術的および社会・経済的な波及効果 各研究課題が協働により進展 ・離散幾何学(離散曲面論の基礎理論の構築、極小曲面のナノ構造の動的構造形成) ・精度保証付き数値計算(モデリングが難しい問題の精度保証付き数値計算の数理モデリング開発) ・数理ファイナンス(確率parametrix法を発展させた、なめらかでない汎関数の無限次元解析) ・数理腫瘍学(生命動態を再現する新規数値シミュレーション法の開拓) ・数理臨床医学(病態メカニズムの数理モデル化、診断・治療に適した形状表現の数理モデルの構築) ・数理皮膚科学(表皮構造の数理モデル基盤の確立) ・動物たちに学ぶ制御の確立(手応え制御、陰陽制御、階層制御) ・統計数学における可換代数研究の進展(マルコフ基底の発掘、A分布のパフィアン系の基底の探究) ・位相計量的時系列解析法(MGSTD法)の開発と気象データへの応用 ・R-有界作用素理論の発展(Navier-Stokes方程式の自由境界問題、クラウドキャビテーション) ・Topological Flow Data Analysis(TFDA)手法の開発(気象、医療、産業機器分野へ適用) ・新たなデジタル映像数学課題の開発(流体データ演出表現手法、インタラクティブな動画修復手法) ・計算錯視学による新しい立体錯視の発見・創作(変身立体錯視の多様な新種) 展開 ・CREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築(大石、小林、水藤、長山) ・未来社会創造事業探索加速型「共通基盤」(坂上、水藤)等 ・科研費新領域「次世代物質探索のための離散幾何学」(領域代表：小谷) ・さきがけ研究総括(國府、坂上)	各研究課題が協働により進展 ・離散幾何学による次世代物質探索(構造・機能・プロセスの相関原理の解明) ・モデリングのための精度保証付き数値計算理論の基盤の拡大 ・数理ファイナンスにおけるSABRモデルの無限次元解析 ・シグナル伝達経路解明の臨床研究への進展 ・数理臨床医学における数理モデルと病態・臓器形状などとの関係の正確性保証 ・数理皮膚科学による皮膚バリア機能の老化現象や非ヒスタミン性痒みを引き起こすメカニズムの解明 ・開発した成果を数理的に統合した制御方法の確立 ・統計モデル、実験計画における二項式イデアルの可換代数展開 ・MGSTD法(ノイズの多い実験・観測データの時系列解析に有効)の多用展開 ・R-有界作用素理論(準線形放物型方程式を統一的に扱える新技術)応用分野の拡大と発展 ・TFDA手法の三次元流れのスライスデータに適用できるソフトウェアの開発 ・企業におけるデジタル映像数学の応用・評価の進展 ・計算錯視学の実用用途展開 ・生命科学や細胞生物学と数学が融合した「数理腫瘍学」の発展 ・「数理臨床医学」分野の発展 ・「数理皮膚科学」の創設 受賞/人材育成等 受賞 計35件/9名 ・専門著書の出版、数学キャラバンによる、数理科学分野の若手技術者の育成	数学／数理科学研究によるブレークスルー ・次世代物質探索において、求める物性・機能を解くミクロ・メゾ構造の予見、動的構造形成の最適化と制御の実現 ・精度保証付き数値計算の普及による有限精度計算の正確性保証可能分野の拡大 ・数理ファイナンスによるリスク評価精度の向上 ・高度医療の実現(医療画像処理技術の向上による、個体の行動変容を促し患者の健康状態への回帰を誘導する社会医学への貢献)(数理臨床医学により、医療現場における、より高度な画像診断やリアルタイムの手術支援)(数理皮膚科学による皮膚疾患のメカニズム、疾患発生病因子の究明) ・産業との共同研究による、惑星探査や災害救助、介護や家事を行うロボットの飛躍的な能力向上 ・統計分布の革新的モデルの開発 ・MGSTD法を用いた臨界的遷移の予兆検出 ・海外との共同研究による海外への普及 ・トポロジカルデータ解析のソフトウェアの医療応用成果を実用化 ・数理科学分野と他の多くの科学分野(物質科学、生命科学、細胞生物学、臨床医学、皮膚科学)との協働による高度な技術開発の進展 ・著書の出版、技術の展示やテレビ放映による、一般社会における数学への興味の拡がり ・数学よろず相談室(Math Clinic)の発展による企業の問題解決と共同研究の推進
小谷 元子																																								
小林 亮																																								
日比 孝之																																								
大石 進一																																								
國府 寛司																																								
コハツ・ヒガアルトゥーロ																																								
柴田 良弘																																								
鈴木 貴																																								
安生 健一																																								
坂上 貴之																																								
水藤 寛																																								
杉原 厚吉																																								
長山 雅晴																																								
①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数																																							
882 (54)	221 (27)																																							
		期間中	終了後																																					
出願	国内	25	6																																					
	国際	15	4																																					
登録	国内	23	0																																					
	国際	10	0																																					

図 2-6 CREST 研究領域の展開図

2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

以下に、研究成果の科学技術の進歩への貢献について幾つかの事例を示す。

小谷は、本研究課題の成果から抽出された課題を基に、科研費新学術領域研究(研究領域提案型)「次世代物質探索のための離散幾何学」を立ち上げ、領域代表者を務めている。本研究ではデータ科学と数学により、物質の機能と構造の相関関係を明確化、体系化し、無機材料、有機材料、複合材料の新しい材料設計の発展に寄与することを目指している。材料のマイクロ構造を記述する離散極小曲面論を構築し、マイクロからマクロに至る階層構造の明確化、階層構造と機能の関心の解析を行った。無機材料では、新たな機能を付加した指数定理を用いてトポロジカル物質の分類、新しいトポロジカル相を発見している。有機材料では、周期性を持たない高分子材料の構造をネットワーク構造と捉え、離散極小曲面論を結びつけることにより、複雑な高分子の構造が記述できるようになった。複合材料では、多連続・多孔質構造を離散曲面論により分類でき、最適化することで相分離によりこれらを実現することが期待されている。

小林は、動物たちに学ぶ「環境を友とする制御」として3つの基本コンセプト(手応え制御、陰陽制御、階層制御)を提案した。手応え制御(環境との相互作用をリアルタイムに評価しながら利用できるものは積極的に利用する制御則)は、クモヒトデ型ロボット PENTABOT に適用することによりその有効性を示した。また、ムカデ型ロボット i-CentiPot(Implicit controlled Centipede robot)を開発し、陰的制御(身体と環境のダイナミクスから表出する制御則)のみで無限定環境(屋外環境)において実時間適応的に移動することが可能であることを示した。

安生は、CG による映像表現に対して、「数学的知見の活用推進と、活用できる数学領域の拡大」に努め、映像制作者のニーズに応える数学的手法の開発と体系化を進めた。キャラクターの変形や動きの補間に関する種々の方法を開発し、映像制作現場での実用化のために、それぞれの手法のユーザインタフェースとプロトタイプを開発した。また、「流体アニメーションのリアル化技術」(流体シミュレーションにより得られた速度場を再利用する方法により自然なアニメーション映像を合成する手法)を開発した。さらに、一般の動画像について、「不要部分のマスクとマスクされて欠落した部分を補完する技術」(不必要な部分をマスク情報として指定し、インタラクティブな編集操作を経て修正動画を出力する手法)を開発し、現在国内の映像制作会社にて評価中である。

坂上は、本研究領域で開発した Topological Flow Data Analysis(TFDA)手法を発展させた。非圧縮性流体の制限を取り除いて圧縮性流体や三次元流れの二次元断面に利用できるトポロジー分類理論への拡張を行うとともに、TFDA 手法を活用するためのソフトウェア psiclone を開発した。

水藤は、血管系の数理モデル構築を進展させ、様々な形状の大動脈における血管壁の変形を考慮したエネルギー損失量とその分布の検討を行うことを通して、心血管系における解析手法を構築した。呼吸器系疾患の分野では、気管支形状をグラフ構造化して比較する手法を構築した。

2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献

本研究領域は、研究総括が定めた4つの達成目標「世の中の難問に数学が解決の端緒を与える」「細分化された知のつながりを取り戻す」「共創による新領域開拓」「成果の社会還元」の下で進められた。以下に、この4つの達成目標ごとの研究成果の社会・経済への貢献について幾つかの事例を示す。

(1) 「世の中の難問に数学が解決の端緒を与える」

小谷は、離散曲面論の具体的な対象として、グラフエンに他の物質をドープして、例えば触媒などの反応場を作る研究を進めている。まず、幾何学的にどういう構造を作ったら機能が上がるのかを考え、次に、その構造を作るにはどのように他の物質を入れればよいかを考える。この研究に離散極小曲面論を用いている。これにより、数学的手法とシミュレーションによって機能と構造の「メカニズムを理解して材料設計ができる」ようになると考えている。無機材料については、従来の3次元物質の表面(2次元トポロジカル相)ではなく、表面の縁(1次元トポロジカル相)だけに生じる興味深い性質があることを見出した。これは新しいトポロジカル相の発見と言え、新しいデバイスの開発につながると期待される。

大石は、モデリングが難しい問題に対し4つの根源的課題(不確定要素問題、悪条件性問題、大規模性問題、構造問題)を抽出し、それぞれの課題に有効なアルゴリズム、計算関数群、解の存在証明法などを開発し、モデリングの改善につなげた。また、大石らが開発し公開している精度保証付き数値計算の kv ライブラリ(早稲田大学教授柏木雅英)を根幹として、高速化を目指した VCP(Verified Computation for PDEs)ライブラリが開発され(東洋大学助教関根晃太)、現在世界最高速の精度保証付き数値計算ライブラリとなっている。

コハツ・ヒガは、本研究課題の成果である確率 parametrix 法を発展させ、なめらかでない拡散過程の無限次元解析を行った。特に停止時刻に関しての部分積分公式が得られ、数理ファイナンスでは、停止時刻がデフォルト時刻を意味するので、信用リスク問題に応用できると考えている。また、最近数理ファイナンスでよく使われている CIR(Cox-Ingersoll-Ross)モデル(利子率の時間的変動を記述する数理モデル)に関して、確率 parametrix 法によるパラメータ推定方法が最適であることを証明した。

鈴木は、生体の組織画像の数理的な特徴量を抽出することによって、大量・正確・高速な医療画像自動検査法を開発した。特に大腸など高分化型腺がんの組織に対してはベッチ数、NASH の風船様細胞に対しては外接楕円フィッティングが有効であることを見出した。また、マルチスケール数理モデルに揺らぎを入れて直接離散化する数値解析学の新しい手法を開発し、細胞変形、血管新生について生命科学のシナリオを統合して構築した数理モデルを用いて、生命動態を視覚化し、生命科学と数理科学の融合を推進した。

水藤は、診断・治療に適した形状表現の数理モデルの構築に取り組んでいる。大動脈系の解析技術は、先天性心疾患の患者の手術方式を決める際に、個人のデータを解析し、方式決定の手段の一つとして活用されうるものである。他の血管系にも研究対象を拡張、人工透析を行う際に使用する上腕部の血管へのシャント設置の解析も行い、患者の負担軽減

を目指している。気管支形状のグラフ構造化技術は、肺疾患の病状の診断に有効な手法と考えられている。さらに、臨床医療熟練者の技術の言語化を図った。本研究課題では、医者から話を聞くことによりデータを集め、統計的に処理する方法を用いていたが、数理モデリングと AI 技術を組み合わせる「人工透析における投薬管理」を研究し、専門医の投薬履歴を学習し、血液検査値から投薬量の増減を提案するシステムを構築した。

長山は、数理モデルから、角層バリア機能だけでなく表皮の持つ層構造を維持し続けるためにはカルシウムイオン局在が本質的であることを示唆した。この研究によって表皮構造の数理モデルの基盤ができた。また、表皮直下で表皮突起間に食い込んでいる真皮乳頭層を形成する数理モデルを構築し、真皮の凹凸が表皮に与える影響を明らかにした。このモデルで真皮乳頭層は表皮細胞との相互作用で変形すること、真皮の凹凸の減少でフラットな基底細胞層ができ、表皮が徐々に薄くなり、角層バリア機能が低下することを示した。これらは、未だに不明な角層バリア機能低下を伴うアトピー性皮膚炎、老人性乾皮症、敏感肌、表皮老化などの発症や角層バリア機能回復のメカニズム解明につながると期待される。

(2)「細分化された知のつながりを取り戻す」

小林らが開発したムカデ型ロボットは、陰的制御に手応え制御、陽的制御、階層制御を加味することにより、月面探査、災害現場探査、農業における見守りなど、事前に使用環境が明確ではない用途への適用が検討されている。また、整地されていない過酷な環境でも自由に動ける建機に適用する研究も進めている。なお、ムカデ型ロボットは、株式会社タミヤから、楽しい工作特別企画「ムカデロボット工作セット」として販売されている。

日比は、D 型根系の格子凸多面体の単模三角形分割から、可換代数のトーリックイデアルの理論を媒介とし、Box-Behnken 計画(高度な実験計画法の一つ)の主効果モデルをマルコフ連鎖モンテカルロ法により検定するためのマルコフ基底を発掘した。さらに、そのマルコフ基底を使い、実際のデータをマルコフ連鎖モンテカルロ法により検定した。歴史上、3 水準の一部実施計画をマルコフ連鎖モンテカルロ法により検定した仕事は存在せず、この統計に関する結果はきわめて独創的である。しかも、凸多面体の単模三角形分割から逆解きの着想によりグレブナー基底を発掘できたことは、グレブナー基底の今後の代数計算の展開への扉を開く開拓的な仕事であると考えている。

國府は、位相計算理論とそれに基づく時系列解析法を発展させ、実験や観測データのよようにノイズを含む時系列データからダイナミクスの大域的な構造をモース分解という形で取り出す解析法として MGSTD 法(Morse graph method for stochastic time-series data)を開発し、気象データ解析に応用した。また、遺伝子制御ネットワークの switching system と呼ばれる結合力学系について、位相計算理論を適用して、モース分解の形で相空間の大域的構造を表現するための理論的枠組みを構築した。

柴田は、無限次元調和解析の理論を放物型偏微分方程式に取り入れ、R-有界作用素の枠組みで流体の運動を記述する Navier-Stokes 方程式の自由境界問題の解析を行った。また、R-有界作用素の枠組みでキャビテーション研究を発展させ、SPH 法と呼ばれる粒子法を用

いた2次元混合流体モデルを構築し、クラウドキャビテーションにおけるリバウンド現象と衝撃波の発生を数値的に実現した。特に、クラウドの発生から成長、圧壊までの過程が、流れ場に発生する双子渦の運動によって引き起こされることを明らかにした。

坂上は、TFDA 手法を環境・医療などの様々な問題に適用している。気象分野では、気圧等高線データを用いたブロッキング現象の同定で有意なデータが得られたため、長期予報に使えると考えている。医療分野では、心血流エコーデータから心不全のパターン判定に適用した。心不全の患者と健常者の画像 20~30 例を解析し、有意な違いを示すデータが得られた。この用途のソフトウェアを作成し、心血流の評価を行う計画を進めている。また、粉体の分級装置の開発にも適用し、従来よりも高い分級性能を実現した。この技術は日本ニューマチック株式会社に特許をライセンスし、技術展開を行っている。装置を開発し 2019 年の粉体工業展に出展するとともに共同発表した。

(3) 「共創による新領域開拓」

安生の開発した数値映像技術「流体アニメーションのリアル化技術」は、煙、炎、雲など CG に多用される対象に適用でき、汎用性がある。また「不要部分のマスクとマスクされて欠落した部分を補完する技術」はソフトウェア(Interactive Video Completion)⁶とデモが公開され、実際に活用されている。数値映像技術が進展し、特定目的の独自の CG が簡単に作成できれば、映像利用者が少ない用途でも経済的に成り立つため、幅広く映像の活用が広がる可能性がある。医療や介護用途には大きな期待があり、学校の理科の実験などへの活用も効果が高いと考えられる。

杉原は、鏡に映すと姿が激変する変身立体錯視を発展させて、鏡に映すと接続構造が変わる「トポロジー攪乱立体」、視点を連続に動かすと変形するように見える「軟体立体」、鏡に載せると姿が現れる「鏡映合成変身立体」などを発見・創作した。また、鏡に映すと姿が変わる変身立体とタイリングとを組合せて鏡に映すと変身するタイリング図形の設計法、平面図形に立体を付加することにより鏡に映すと一部が消える「透身立体」、3つの方向から異なる立体に見える「3方向変身立体」、6つの方向から異なる立体に見える「6方向変身立体」などの設計法を構築した。

(4) 「成果の社会還元」

本研究領域の成果を社会に還元するため、4名の研究代表者が書籍を出版した。日比は、数学への好奇心と基礎理解力の向上を図る著書として、「コミック・証明の探求・高校編」(大阪大学出版会、2014年)、「証明の探求・増補版」(大阪大学出版会、2016年)、「復刊・可換代数と組合せ論」(丸善出版、2019年)、「多角形と多面体—図形が織りなす不思議な世界」(講談社ブルーバックス、2020年)を出版した。コハツ・ヒガは、本研究課題の成果を発展させるため、大学院生を対象とした教科書「Jump SDEs and the Study of Their Densities - A Self-Study Book」(Springer、2019年)を出版した。安生は、本研究課題

⁶ <http://makotookabe.com/interactiveVideoCompletion/software/ivc-j.htm>

にて研究開発した CG 分野における運動や変形の基礎数理に関する書籍「Mathematical Basics of Motion and Deformation in Computer Graphics」(Morgan & Claypool(USA)、2017 年)(九州大学マス・フォア・インダストリ研究所教授落合啓之と共著)を出版した。杉原は、数学や錯視の面白さを社会に伝えるため、「スウガクってなんの役に立ちますか？」(誠文堂新光社、2017 年)、「鏡で変身！？ふしぎ立体セット～驚きの錯覚 不思議立体の世界」(東京書籍、2017 年)、「作って！！ふしぎ・びっくり！！？？ 杉原厚吉先生のトリック工作」(主婦と生活社、2017 年)、「錯覚トリックキット」(幻冬舎、2017 年)、「わかっているけど騙される 錯覚クイズ」(大和書房、2018 年)、「新錯視図鑑」(誠文堂新光社、2018 年)、「錯覚！立体ペーパークラフト」(あかね書房、2020 年)を出版した。

また、鈴木は、雑誌「実験医学」の増刊号「はじめての生命科学で使える数理モデルとシミュレーション」(羊土社、35-5、2017 年)の編集と基礎知識の執筆を行った。血管新生シミュレーションについては株式会社 NHK エンタープライズと共同でコンピュータグラフィックス映像を制作し、この映像は NHK 総合 TV の「ためしてガッテン」(2016 年 7 月 13 日)で放映された。

杉原は、立体錯視作品を台湾国立故宫博物院(2018 年 9 月 21 日～2020 年 5 月 24 日)を初めとして、日本科学未来館、名古屋市科学館、三菱みなとみらい技術館、池田記念美術館、そごう美術館、諸橋近代美術館、静岡科学館、浜松科学館、防府市青少年科学館、姫路科学館、宮崎科学技術館、愛媛県総合科学博物館、愛媛県美術館、岐阜市科学館、仙台市科学館、千葉市科学館、千葉県立現代産業科学館、ニューヨーク国立数学博物館など多くのミュージアムへ作品を提供した。

柴田は、早稲田大学における SGU(Sper Global University)数物系科学拠点の拠点リーダーを務め、国際的、横断的な流体数学とその関連分野の博士後期課程の教育・研究を進めている。

坂上は、京都大学 MACS 教育プログラムの一つとして数学よろず相談室(Math Clinic)を始めた。当初は理学部内だけを対象としていたが、その後、他分野の大学院生などが相談に来るようになり、現在は賛同する教員も増え、相談領域も流れだけでなく、物理学に関係する数学、生物科学に関係する数学などに広がっている。2020 年 7 月までで 22 件の相談があり、共同研究への移行、企業からの寄附金の受託、共同研究計画契約の締結などを進めている。

2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合)

(1) 新たな研究領域の立ち上げ

小谷は、科研費新学術領域研究(研究領域提案型)「次世代物質探索のための離散幾何学」(2017 年度～2021 年度)を立ち上げ、領域代表者を務めている。また、國府は、さきがけ研究領域「数学協働」「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」(2014 年度～2018 年度)で研究総括を務めた。坂上は、さきがけ研究領域「数理構造活用」「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～2023 年度)で研究総括を務めている。

(2) 後継数学研究領域への参画

JST 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」(研究総括：坪井俊)(2014 年度～2020 年度)に、大石(研究課題：モデリングのための精度保証付き数値計算論の展開)、小林(研究課題：環境を友とする制御法の創成)、水藤(研究課題：臨床医療における数理モデリングの新たな展開)、長山(研究課題：数理モデリングを基盤とした数理皮膚学の創設)が参画している。

JST 未来社会創造事業探索加速型「共通基盤」領域「革新的な知や製品を創出する共通基盤システム・装置の実現」(運営総括：長我部信行)(2018 年度～2022 年度)に、坂上(研究課題：包括的トポロジカルデータ解析共通数理基盤の実現)、水藤(研究課題：AI の学習と数理から解き明かす熟練者の技)が参画している。

(3) 公的役職への就任

小谷は、2012 年から東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR)機構長(2017 年に材料科学高等研究所に改称後は所長)を務めた後、2019 年に高等研究機構長、2020 年に理事・副学長に就任した。2014 年からは日本学術会議会員となり、内閣府総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)有識者議員も務めている。また、日本数学会理事長(2015 年度～2016 年度)を務めた。大石は、早稲田大学理工学術院学術院長(2014 年度～2015 年度)を務め、また、日本応用数理学会会長(2015 年度～2016 年度)、電子情報通信学会副会長(2015 年度～2016 年度)を務めた。さらに 2020 年 11 月、精度保証付き計算法と無誤差変換という画期的な数値計算法を開発した功績により文化功労者として表彰された。國府は、2020 年に京都大学理学部学部長・理学研究科研究科長に就任した。

(4) 本研究領域設定の意義

本研究領域は、JST 戦略研究事業で初めての数学領域である。本研究領域により、数理材料科学、数理臨床医学、数理皮膚学、映像数学、計算錯視学などの新しい分野の展開につながった。これら実社会の様々な分野で数学の有用性を示したことは、従前の、命題の証明を中心とする伝統的なアプローチが主流であった数学界に対し、数学を社会に開き、純粋数学だけではなく応用数学およびその研究者の認識向上の大きな端緒となり、我が国の応用数学の人材育成にもつながった。また、昨今の AI やビッグデータ関連の研究の盛り上がりの前に先んじて本研究領域を立ち上げたことは、本研究領域の研究成果や人材がうまくこれら研究につながる結果となった。本研究領域の後、数理科学の関連として 2013 年度から CREST「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」、CREST・さきがけ「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」、2014 年度から CREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」、さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野

の協働」、2015 年度からさがけ「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築」、さがけ「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出」、2019 年度より、CREST「数学・数理科学と情報科学の連携・融合による情報活用基盤の創出と社会課題解決に向けた展開」、さがけ「数学と情報科学で解き明かす多様な対象の数理構造と活用」など多くの研究領域が立ち上がっている。これらの研究領域の中には本研究領域の研究者が研究総括、研究代表者などとして研究の中心を担っているものもある。

第 3 章 各研究課題の主な研究成果

3.1 2008 度採択研究課題

- ・ 離散幾何学から提案する新物質創成と物性発現の解明(小谷 元子)
- ・ 生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開(小林 亮)
- ・ 現代の産業社会とグレブナー基底の調和(日比 孝之)

離散幾何学から提案する新物質創成と物性発現の解明

小谷 元子(東北大学材料科学高等研究所・教授)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

展開している事業:

科研費新学術領域研究(研究領域提案型)(領域代表者)他、計 6 件

CREST の成果: 数学と材料科学の連携基盤の構築

(1)新たな炭素構造の探索と数学的指標の提案 (2)数学的なパターンを用いたナノ秒構造化照明法 (3)アモルファス構造のトポロジカル解析 (4)グラフ理論を用いたハイブリッド材料における最適配置

発展:

1. 科研費新学術領域「次世代物質探索のための離散幾何学」の立ち上げ

本研究課題の成果から抽出された課題を基に科研費新学術領域を立ち上げ、領域代表者を務めている。本領域はデータ科学と数学により、物質の機能と構造の相関関係を明確にし、材料設計の発展に寄与することを目指している。このため離散幾何学によりミクロな構造を記述し、ミクロからマクロに至る構造の階層構造を明確にし、その階層構造が機能とどうつながっているかを解析する研究を進めている。(図 1)

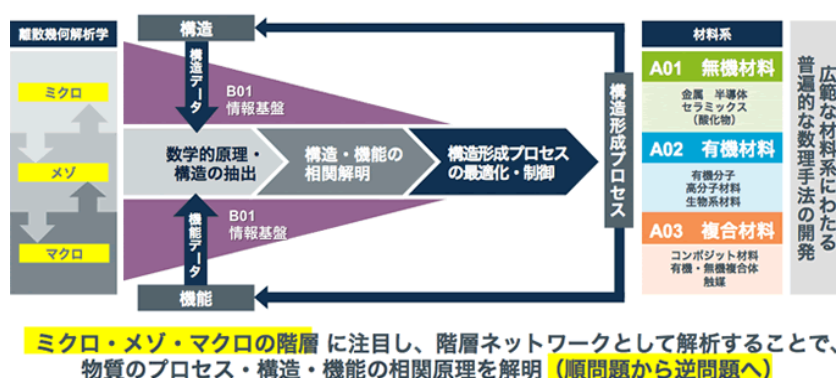


図 1. 科研費新学術領域「次世代物質探索のための離散幾何学」¹⁾

2. トポロジカル物質(図 1 の「A01 無機材料」)の成果²⁾

トポロジカル物質の解析には指数定理を用いるが、周期性を仮定しない、対称性に拡張を持たせるなど、より進んだ指数定理を用いたトポロジカル物質の分類、新しいトポロジカル相の発見を目指している。新しいデバイス開発につながると期待される高次トポロジカル相(角や辺にトポロジカルに守られた状態を持つ量子相)だけに現れる面白い性質を発見した。

3. ネットワーク解析による高分子材料(図 1 の「A02 有機材料」)の成果³⁾

周期性を持たない高分子材料の構造をネットワーク構造と捉え、ネットワーク幾何学、グラフ理論、トポロジー理論と離散極小曲面論を結びつけることにより、複雑な高分子の構造が記述できるようになった。さらに、安定な構造に限定することにより本構造の体系化を可能にした。

4. 極小曲面とナノ構造の動的構造形成(図 1 の「A03 複合材料」)の成果⁴⁾

与えられた曲面に滑らかな曲面がない場合に曲面の幾何学量を取り出すための離散曲面論を構築し、特にガウス写像に注目することで面積の変分公式を求めた。これにより、離散極小曲面、離散平均曲率一定曲面を定義し、幾何学量と実際の物質の内的歪みや外的歪みとの相関、スペクトル量と電子状態の相関などを比較する手法を開発した。

特記事項

(1)東北大学で、2012 年から原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR)機構長(2017 年に材料科学高等研究所に改称後は所長)を務めた後、2019 年に高等研究機構長、2020 年に理事・副学長に就任した。また、2014 年からは日本学術会議会員となり、内閣府総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)有識者議員も務めている。

¹⁾ 科研費「次世代物質探索のための離散幾何学」領域サイト <https://www.math-materials.jp/outline/>. ²⁾ Ikemoto K., Yang S., Naito H., Kotani M., Sato S., Isobe H. "A nitrogen-doped nanotube molecule with atom vacancy defects", Nature Communications, 2020, 11(1), 1807. ³⁾ Morita H., Miyamoto A., Kotani M. "Recoverably and destructively deformed domain structures in elongation process of thermoplastic elastomer analyzed by graph theory", Polymer, 2020, 188, 122098. ⁴⁾ Kotani M., Naito H., Omori T. "A discrete surface theory", Computer Aided Geometric Design, 2017, 58, 24–54.

生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開

小林 亮(広島大学大学院統合生命科学研究科・教授)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

展開している事業:

CREST¹

CREST 成果:

生物ロコモーションの原理(自律分散制御システム)をまねることにより、複雑環境下でもしなやかに適応できるロボットの製作を目指した。単細胞生物に立ち返り、粘菌の運動の数理モデルから「齟齬関数」という概念を抽出し、アメーバ様ロボット・ヘビ型ロボット・4 脚歩行ロボットなどで、その有効性を示した。粘菌の知的ロコモーションの研究成果は Science 誌に掲載され、2 回目のイグノーベル賞(2010 年)を受賞した(初回は 2008 年)。

発展:

1. 動物たちに学ぶ手応え制御、陰陽制御、階層制御の確立¹

動物たちに学ぶことにより、制御の視座から次の 3 つの基本コンセプトを提案し、制御方法を確立した。①手応え制御: 環境との相互作用をリアルタイムに評価しながら利用できるものは積極的に利用する、②陰陽制御: 陽的制御(明示的な制御則)と陰的制御(身体と環境のダイナミクスから表出する制御則)の適切な結合により環境適応的な制御を実現する、③階層制御: 自律分散制御と中枢制御が適切に組み合わせられていて大自由度を持つ身体を無理なくリアルタイムで制御できる。

2. 陰的制御によるムカデ型ロボットの開発と多足類の歩行・運動の解析¹

陰的制御の概念とその有効性を端的に示すムカデ型ロボット i-CentiPot(Implicit controlled Centipede robot)を開発した。このロボットは、一切陽的な制御を行っていないにもかかわらず、無限定環境(屋外環境)において実時間適応的に移動することが可能である。さらに、多足類における典型的な歩容が、2 通りの脚同士の交差禁止則によって実現されること、また、脚間協調だけではなく、胴体の持つ自由度を融合することで、より高度な運動が実現できることを数理モデルで明らかにした。(図 1)

3. 手応え制御によるクモヒトデ型ロボット PENTABOT の開発¹

クモヒトデは脳を持たない動物である。危機に際し自分の腕を切ることで難を逃れるが、彼らはどのような腕の欠けた状況に際しても、おそらく最適と思われる歩き方をする。このクモヒトデの持つ究極の耐故障性を、「手応え」という概念を導入することによってほぼ完全に再現した。「手応え」とはまず運動を行なって(考える前にまず動く点が従来のロボット制御と大きく異なる点である)、その結果が「運動の意図」とどれだけフィットしているかを定量化したものである。(図 2)



図 1. ムカデ型ロボット i-CentiPot^{1,2}

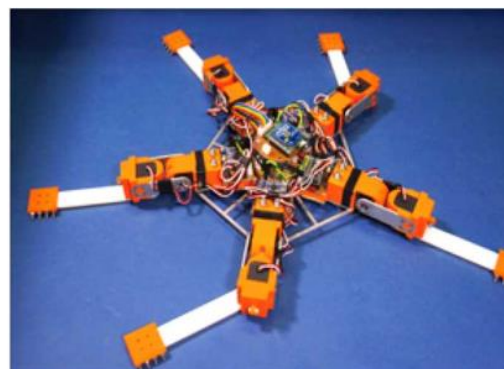


図 2. クモヒトデ型ロボット PENTABOT¹

特記事項

(1)2018 年度明治大学 先端数理科学インスティテュート 現象数理学三村賞を受賞した。

(2)CREST¹ の主な共同研究者大須賀公一は、株式会社小松製作所との共同研究を進展させ、建設・鉱山機械の遠隔化・自律化に関する研究でコマツみらい建機協働研究所を立ち上げた。

¹ 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」(研究総括: 坪井 俊)研究課題「環境を友とする制御法の創成」(研究代表者: 小林 亮)(2014 年度～2019 年度) 実績報告書(2018 年度、H29 年度、H28 年度、H27 年度、H26 年度)

² i-CentiPot の簡易バージョンが、株式会社タミヤから、楽しい工作特別企画「ムカデロボット工作セット」として販売されている。

現代の産業社会とグレブナー基底の調和

日比 孝之(大阪大学大学院情報学研究科・教授)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤研究(S)、科研費基盤研究(A)

他、計 5 件

CREST の成果:

多項式環と微分作用素環のグレブナー基底の理論と計算を飛躍的に深化させ、統計学の根幹に劇的な変革を誘った。その変革は、大規模な計算を可能にするアルゴリズムの進化と相俟って、統計学を不可欠とする産業社会と先端科学の諸分野に広範な影響を及ぼしている。



発展:

1. マルコフ基底の発掘¹

D 型根系の格子凸多面体の単模三角形分割から、可換代数のトーリックイデアルの理論を媒介とし、Box-Behnken 計画の主効果モデルをマルコフ連鎖モンテカルロ法により検定するためのマルコフ基底を発掘した。

さらに、そのマルコフ基底を使い、実際のデータをマルコフ連鎖モンテカルロ法により検定した。歴史上、3 水準の一部実施計画をマルコフ連鎖モンテカルロ法により検定した仕事は存在せず、この統計に関する結果はきわめて独創的である。しかも、凸多面体の単模三角形分割から逆解きの着想によりグレブナー基底を発掘できたことは、グレブナー基底の今後の代数計算の展開への扉を開く開拓的な仕事である。

2A 分布のパフィアン系の基底の探究²

有限分配束の花束の概念を導入し、順序凸多面体のトーリック環の代数構造を駆使し、平面的な分配束の花束に付随する A 分布のパフィアン系の基底のきわめて具体的な記述に成功した。しかも、有限分配束の花束の概念を導入したことにより、その結果を著しく一般化できている。

他方、順序凸多面体に付随する A 超幾何系の系列で、その階数が順序凸多面体の次元に関する多項式で押さえられるものを発見した。順序凸多面体に関する結果は、ほとんどそのまま鎖凸多面体に焼き直すことが可能である。その結果、凸多面体からホロミック勾配法が適用可能な統計分布の、斬新な、豊富な類を提唱できる舞台が設定された。

3. 反射的凸多面体の発展^{3,4}

有限半順序集合の順序凸多面体、有限単純グラフの安定集合凸多面体などから、正規な反射的凸多面体を構成する斬新なテクニックを開拓し、反射的凸多面体の理論の飛躍的な発展の礎を築いた。

格子凸多面体の対(P,Q)の「対とΩ対と呼ばれる概念を導入し、逆辞書式グレブナー基底の理論を武器に、反射的凸多面体の斬新な理論を展開した。とりわけ P と Q が順序凸多面体、鎖凸多面体、有限グラフの stable 多面体などのときを探索し、ある条件の下、それらの「対とΩ対が正規な反射的凸多面体になることを示した。

特記事項

- (1) デュイスブルクエッセン大学(ドイツ)とトーリック環の regularity に関する共同研究を実施した。
- (2) テュレーン大学(米国)と edge ideal の射影次元に関する共同研究を実施した。
- (3) 2018 年に「計算可換代数と組合せ論」で日本数学会 代数学賞を受賞した。
- (4) 数学への好奇心と基礎理解力の向上を図る著書として、「復刊・可換代数と組合せ論」(丸善出版、2019 年)、「証明の探求・増補版」(大阪大学出版会、2016 年)、「コミック・証明の探求・高校編」(大阪大学出版会、2014 年)を発刊した。

¹ Aoki S., Hibi T. and Ohsugi H. "Markov-chain Monte Carlo methods for the Box-Behnken designs and centrally symmetric configurations", J. Stat. Theory Pract., 2016, 10(1), 59-72. ² Hibi H., Nishiyama K. and Takayama N. "Pfaffian systems of A-hypergeometric equations I Bases of twisted cohomology groups", Adv. in Math., 2017, 306, 303-327. ³ Hibi T. and Tsuchiya A. "The depth of a reflexive polytope", Arch. Math., 2019, 113 (3), 265-272. ⁴ Hibi T. and Tsuchiya A. "Reflexive polytopes arising from perfect graphs", J. Combin. Theory Ser., 2018, A157, 233-246.

3.2 2009 年度採択研究課題

- ・ 非線形系の精度保証付き数値計算法の基盤とエラーフリーな計算工学アルゴリズムの探求(大石 進一)
- ・ ダイナミクス全構造計算法の発展による脳神経-身体リズム機構の解明と制御(國府 寛司)
- ・ 複雑な金融商品の数学的構造と無限次元解析(コハツ・ヒガ アルトゥーロ)
- ・ 現代数学解析による流体力学の未解決問題への挑戦(柴田 良弘)
- ・ 数理医学が拓く腫瘍形成原理解明と医療技術革新(鈴木 貴)

非線形系の精度保証付き数値計算法の基盤とエラーフリーな計算工学アルゴリズムの探求

大石 進一(早稲田大学理工学術院・教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

CREST¹

CREST の成果:

数値計算の誤差を厳密に、かつ近似計算の数倍程度の計算量で計算する基盤を構築できた。これにより無限精度の計算をすれば解けることが証明されていた多くの問題について、有限精度でも解けることが証明される。例えば、計算幾何学の問題などが常に正しくかつ多くの場合にほぼ近似計算と変わらぬ計算時間で解けることが示された。

発展:

1. モデリングが難しい問題の精度保証付き数値計算を用いたアプローチ

モデリングが難しい問題では、そのモデル化方程式の精度保証付き数値計算結果と現実の現象が合わないことが多々ある。その不整合は、方程式を解く段階での誤差ではなくモデル方程式自体に問題があることを明確にし、モデルリングの改善に繋げた。(図 1)

2. モデリングを困難にしている根源へのチャレンジ¹

4 つの根源的課題を抽出し、以下の成果を挙げた。①「不確定要素問題」: アフィン演算を応用した高精度な時間発展方程式の解の存在検証法、ペナルティ関数を導入したアフィン演算におけるダミー変数を削減するアルゴリズムの開発。②「悪条件性問題」: 条件数が 10^{30} 程度までの悪条件性を持つ連立一次方程式に適用可能な高精度数値計算法、重複固有値および近接固有値を持つような悪条件な固有値問題に対する革新的な反復改良アルゴリズムの開発。③「大規模性問題」: 偏微分方程式に対する計算機援用証明に現れる大規模問題に対する誤差解析、精度保証付きライブラリを用いた線形計算関数群の開発。④「構造問題」: 水面波の数値モデルである Degasperis-Procesi 方程式の自己適合移動格子スキームの構築、水の土壌への浸透を記述する数値モデルや渦糸の運動を記述する複素 WKI 方程式の自己適合移動格子スキームの構築。

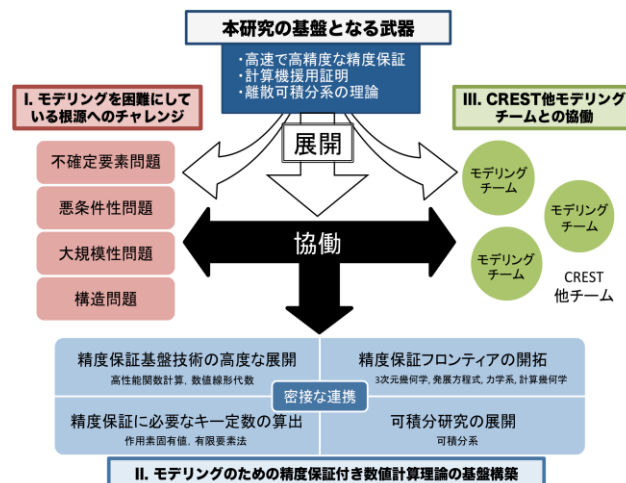
3. モデリングのための精度保証付き数値計算理論の基盤構築¹

4 つの分野で精度保証付き数値計算理論の展開を図り、①数値積分に対する超関数法に対して、精度保証付きで計算を行うための誤差上限を求める方法の構築、特殊関数の精度保証計算法の、複素数入力への拡張、②非線形偏微分方程式における計算機援用証明に有用な非適合有限要素法に対する誤差評価、③3 次元領域における Navier-Stokes 方程式の定常解の検証の可能性の提示、④Max-Plus 代数の演算、および全順序集合上の束の演算で定義される時間発展方程式についての基本的性質検証、などの成果を得た。

特記事項

- (1)ハンブルク工科大学(S. M. Rump 教授)と共同研究を行った。線形計算の精度保証技術の中核となるエラーフリー変換による無誤差計算法を開発し、世界中で利用されている。
- (2)大石グループで開発し公開している精度保証付き数値計算の kv ライブラリ(早稲田大学教授柏木雅英)を根幹として、高速化を目指した VCP(Verified Computation for PDEs)ライブラリが開発され(東洋大学助教関根晃太)、現在世界最高の精度保証付き数値計算ライブラリとなっている。
- (3)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」で研究代表者の大石が文化功労者に選出された。
- (4)日本応用数学会会長(2015 年度～2016 年度)、電子情報通信学会副会長(2015 年度～2016 年度)を務めた。

¹ CREST 研究領域「現代の数値科学と連携するモデリング手法の構築」(研究総括: 坪井 俊)研究課題「モデリングのための精度保証付き数値計算論の展開」(研究代表者: 大石進一)(2014 年度～2019 年度) 実績報告書(H26 年度、H27 年度、H28 年度、H29 年度、2018 年度)² 大石進一提供



ダイナミクス全構造計算法の発展による脳神経-身体リズム機構の解明と制御

國府 寛司(京都大学大学院理学研究科・教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:
JST さきがけ(研究総括)、科研費基盤
研究(A)他、計 6 件

CREST の成果:

(1)ダイナミクスの位相計算理論とそれに基づく新しい時系列解析法の開発 (2)ヒトの安定歩行の相空間構造解析
(3)身体リズム運動の形成原理解明のための統合的方法論の確立 (4)リズムを内在する実データの力学系理論に基づく新たな解析手法の開発

発展:

1.位相計算的時系列解析法とその気象データへの応用¹

実験や観測データのようにノイズを含む時系列データからダイナミクスの大域的な構造をモース分解という形で取り出す MGSTD 法(Morse graph method for stochastic time-series data)と名付けた解析法を開発した。実際の時系列気象データを使って、気圧配置パターンの遷移の解析に応用したところ気象学の知見と一致した。(図 1)

2.switching system の位相計算理論²

遺伝子制御ネットワークの数学的表現の 1 つである switching system と呼ばれる結合力学系について、位相計算理論を適用して、モース分解の形で相空間の大域的構造を表現するための理論的枠組みを構築した。

3.ヒトの安定歩行の相空間構造解析³

本研究課題の成果の 1 つとして発表した「2 足歩行の数学モデルに関する論文」(JJIAM 2015, Proc. Royal Soc. A, 2016)の結果を精密化して、ヒト 2 足歩行の安定領域の形成過程について、より詳細なメカニズムを明らかにした。

4.リズムを内在する実データに基づく結合振動子間の相互作用の推定手法の開発⁴

脳波は膨大な神経細胞活動から生じるリズム的なマクロな神経活動であり、領野間の脳波の同期と機能的役割の関係も指摘されている。脳波と外部刺激との相互作用を位相振動子の力学系としてデータから推定し、生理学的に妥当な結果を得た。(図 2)

特記事項

(1)京都大学工学研究科と「ヒトの安定歩行の相空間構造解析」、北海道大学と「位相計算的時系列解析法とその気象データへの応用」の共同研究を進めている。

(2)ラトガス大学(米国)および モン

タナ州立大学(米国)と switching system の位相計算理論の共同研究を進めている。

(3)日本応用数理学会 2017 年度論文賞(JJIAM 部門)を受賞した。

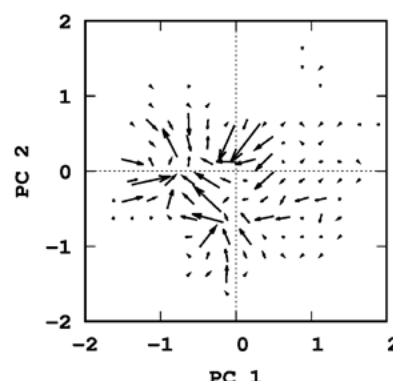


図 1. 実際の気象データから得られた時系列データの解析(気象学の知見と一致)⁴

(対流圏の気象データの PC1(第 1 主成分スコア)・PC2(第 2 主成分スコア)から求まる MGSTD ベクトル場)

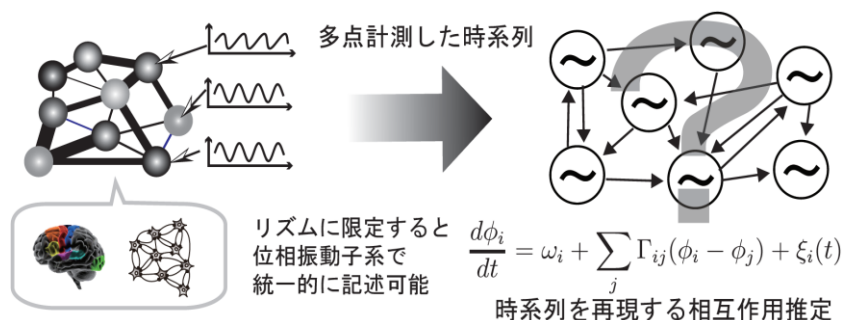


図 2. 力学系理論に立脚したデータ駆動型の数理モデルの構築⁵

¹ Morita H., Inatsu M. and Kokubu H. "Topological computation analysis of meteorological time series data", SIAM J. Applied Dynamical Systems, 2019, 18(2), 1200–1222. ² Gedeon T., Harker S., Kokubu H., Mischaikow K., Oka H. "Global dynamics for steep nonlinearities in two dimensions", Physica D., 2017, 339, 18–38. ³ Okamoto K., Aoi S., Obayashi I., Kokubu H., Senda K., Tsuchiya K. "Fractal mechanism of basin of attraction in passive dynamic walking", Bioinspiration & Biomimetics, 2020, 15(2), 55002. ⁴ Onojima T., Goto T., Mizuhara H. and Aoyagi T. "A dynamical systems approach for estimating phase interactions between rhythms of different frequencies from experimental data", PLOS Computational Biology, 2018, 14(1), e1005928. ⁵ 國府寛司提供

複雑な金融商品の数学的構造と無限次元解析

コハツ・ヒガ アルトゥーロ(立命館大学理工学部・教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤研究(C)2 件

CREST の成果:

複雑に設計された金融デリバティブを理論的に解釈し、それに伴うリスクを軽減し金融危機に対処することを目指した。不連続高頻度な現実のデータの解析・予測に取り組み、確率微分方程式の最大値や停止時間の無限次元解析およびそのリスク評価において、新たなシミュレーション手法として確率 parametrix 法を見いだすなど、金融商品の数学的、数値解析の問題に対し大きな成果を得た。



発展:

1. なめらかでない汎関数の無限次元解析¹

本研究課題の成果である確率 parametrix 法を発展させ、なめらかでない拡散過程の無限次元解析を行った。特に停止時刻に関しての部分積分公式が得られ、数理ファイナンスでは、停止時刻がデフォルト時刻を意味するので、信用リスク問題に応用できると考えている。

確率 parametrix 法のシミュレーションについては、二次漸近展開による方法により、従来の一次漸近展開より精度が良くなったことを明らかにし、さらに、パラメータの大きさによらない原理を見つけた。また、ジャンプ型確率微分方程式のパラメータ推定の近似精度について研究し、最近数理ファイナンスでよく使われている CIR(Cox-Ingersoll-Ross)モデル(利子率の時間的変動を記述する数理モデル)に関して、確率 parametrix 法によるパラメータ推定方法が最適であることを証明した。

2. 本研究課題の成果を発展させるため、大学院生を対象とした教科書を出版^{2,3}

本書は、ジャンプ型確率過程の基礎であるポアソン過程から始め、レヴィ過程を経て無限次元解析の概念を説明するとともに、今までにあった技術と本研究課題で展開した技術との比較をした教科書である。

レヴィ過程とそれに基づく確率微分方程式に関する基本理論、ジャンプ型確率過程に対する無限次元のマリアヴァン解析、数理ファイナンスモデルにおけるジャンプ型確率過程の例などが記述されている。

3. 本研究課題に参画した若手研究者による研究の発展

大阪大学大学院基礎工学研究科教授深澤正彰は、科研費基盤研究(C)「後退確率微分方程式と非線形確率積分」(2017 年度～2019 年度)研究代表者として、後退確率微分方程式の理論と数理ファイナンスへの応用の研究を進めるなど、確率過程に対する統計推定分野で優れた研究を行っている。

東京大学大学院情報工学系研究科准教授荻原哲平は、JST 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」(研究総括國府寛)研究課題「関数空間上への機械学習理論の展開と高頻度金融データ解析」(2014 年度～2017 年度)研究代表者などで、金融問題とデータ解析分野で優れた研究を行っている。

特記事項

- (1) スウェーデン、フランス、オーストラリア、イギリスの研究者と確率 parametrix 法に関する共同研究を行っている。
- (2) 2021 年から海のダイナミクス(海洋で浮遊する粒子の移動軌跡の、正確な数学的記述)について研究するプロジェクトに参加する予定である。

¹ 科研費基盤研究(C)「parametrix による確率無限次元解析」研究代表者コハツ・ヒガ アルトゥーロ(2016 年度～2019 年度)2017 年度実施状況報告書 ² Kohatsu-Higa A., Takeuchi A. “Jump SDEs and the Study of Their Densities – A Self-Study Book”, Springer, 2019/7, 1–346.

³ <https://www.springer.com/gp/book/9789813297401>

現代数学解析による流体力学の未解決問題への挑戦

柴田 良弘(早稲田大学理工学術院・教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤研究(S)

科研費基盤研究(A)

CREST の成果:

現代数学解析を専門とする数学者と第一線の流体力学者との協働で、現状では正確な取り扱いが難しい異なるスケールが入り混じった複雑な現象を表すための多重スケール解析に注目し、キャビテーション現象の解明、物体後流の安定性の解明および流れの大域構造の解明の研究を行った。

発展:

1.R-有界作用素の枠組みにおける流体方程式の自由境界問題¹

無限次元調和解の理論を放物型偏微分方程式に取り入れ、R-有界作用素の枠組みで流体数学の方程式である Navier-Stokes 方程式の自由境界問題の解析を行った。R-有界作用素理論はこれまでにない全く新しい方法であり流体研究の基盤である混相流の数学的に厳密な研究方法を一新した。

2.R-有界作用素の枠組みにおける混相流²

キャビテーション研究を発展させ、SPH 法と呼ばれる粒子法を用いた 2 次元混合流体モデルを構築し、クラウドキャビテーションにおけるリバウンド現象と衝撃波の発生を数値的に実現した。特に、クラウドの発生から成長、圧壊までの過程が、流れ場に発生する双子渦の運動によって引き起こされることを明らかにした。(図 1)(図 2)

3.R-有界作用素における de Leewe の transference 理論³

R-有界作用素に transference 理論を拡張し、準線形放物型方程式系の周期解の存在証明を行う一般的な方法を確立した。この理論を応用して Navier-Stokes 方程式の自由境界問題の周期解の存在を示した。従来のポアンカレ写像を用いる方法では解の様相が全く分からなかったが、これを完全に打破し周期解研究の新側面を与えた。

4.R-有界性理論を用いた数値物理学に現れる放物型方程式系⁴

流体数学研究の新しい研究方法として独自に開発した R-有界性理論を用いて、MHD 方程式、燃焼を記述する多相流体方程式、複雑流体の代表例である液晶問題、Q-テンサーモデルなどの一意可解性を示した。

この成果は R-有界性理論が流体方程式以外の一般的な準線形放物型方程式研究にも有効であることを示しており、流体方程式、MHD、多相流体、複雑流体の統一的な扱いを構築したといえる。

特記事項

(1)株式会社豊田中央研究所と共同研究を進めている。

(2)ダルムシュタット工科大学(ドイツ)、ポーランドアカデミー(ヨーロッパ連合流体数学研究組織)と共同研究を行っている。

(3)2016 年よりピッツバーグ大学(米国)の Adjunct faculty member in the Department of Mechanical Engineering and Material Science であり、数学と工学の日米の懸け橋的役割を担っている。

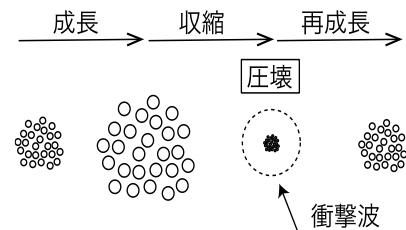


図 1. クラウドのリバウンド挙動と衝撃波現象の概念図⁵

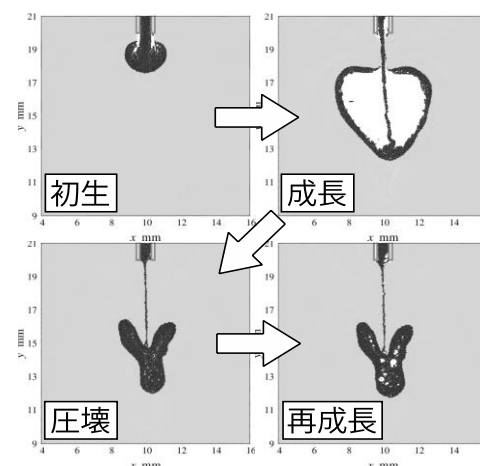


図 2. 粒子法による流れ解析結果⁵
(白色部分が気相領域=クラウド)

¹ Shibata Y. "On some free boundary problem of the Navier Stokes equations in the maximal L_p - L_q regularity class", J. Differential Equations, 2015, 258, 4127-4155. ² Shibata Y. "Fluids Under Pressure", Advances in Mathematical Fluid Mechanics (3rd section), Birkhauser, 2020. ³ Eiter T., Kyed M., Shibata Y. "On periodic solutions for one-phase and two-phase problems of the Navier-Stokes equations", arXiv:1909.13558v1 [math.AP], 2019. ⁴ Schonbeck M. and Shibata Y. "Global well-posedness and decay for a Q tensor model of Incompressible Nematic Liquid Crystals in $\mathbb{R}^N$ ", J. Differential Equations, 2019, 266, 3034-3065. ⁵ 柴田良弘提供

数理医学が拓く腫瘍形成原理解明と医療技術革新

鈴木 貴(大阪大学数理・データ科学教育研究センター・特任教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

科研費新学術領域研究(研究領域提案型)他、計 7 件

CREST の成果:

ホモロジーを用いた大腸がん自動診断法を開拓した。また、数理モデルを用いて細胞膜分子の相互作用を記述し実験値と照合することで未知経路を推測する方法を樹立し、揺らぎを入れることで生命特有の動態を数値的に可視化する方法を確立した。



発展:

1. 数学的特徴量を用いた医療画像自動検査法¹

組織画像の数理的な特徴量を抽出することによって、大量・正確・高速で自動検査する方法を開拓した。特に大腸など高分化型腺がんの組織に対してはベッチ数、NASH の風船様細胞に対しては外接楕円フィッティングが有効であることを見出した。

2. 数理モデルを用いた細胞膜たんぱく質相互作用とシグナル伝達経路の解明²

リガンド刺激をトリガーとする細胞膜分子の相互作用、細胞内シグナル伝達、遺伝子発現のカスケードを数理モデルで記述し、数値シミュレーションを行って測定値と照合することで未知の経路を見出すという細胞生物学の新しい研究方法を確立し、MT1-MMP、NF- κ B 他多数の経路を分析し、実験によって実証した。

3. 生命動態を再現する新規数値シミュレーション法の開拓³

輸送理論、平均場理論の裏付けの下で、マルチスケール数理モデルに揺らぎを入れて直接離散化する数値解析学の新しい手法を開拓し、細胞変形、血管新生について生命科学のシナリオを統合して構築した数理モデルを用いて、生命動態を視覚化し、生命科学と数理科学の融合を推進した。(図 1)

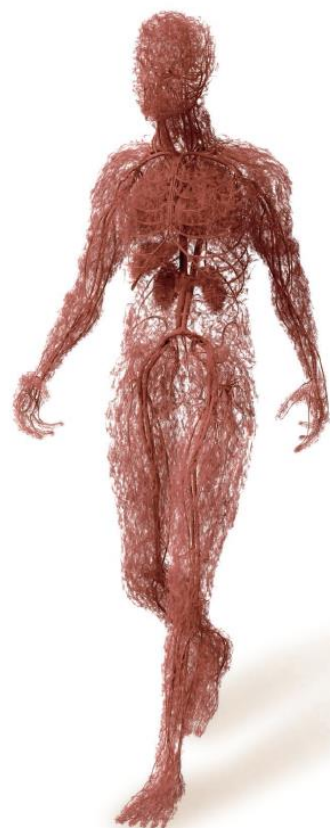


図 1. 血管新生の原理を偏微分方程式で表したシミュレーションによる、人体毛細血管の視覚化⁴

特記事項

(1)自動画像診断について株式会社知能情報システム、株式会社プロアシストと共同でソフト開発を行った。血管新生シミュレーションについて株式会社 NHK エンタープライズと共同でコンピュータグラフィックス映像を制作した。

(2)細胞内シグナル伝達経路解明について、東京大学医科学研究所と共同研究を行った。

(3)聖アンドリュース大学(英国)と血管新生モデリングとシミュレーションについて共同研究、ボルドー大学(フランス)と細胞変形数理モデリングで論文を共著、ヴァンダービルト大学(米国)と腫瘍微小環境生物学実験、システム生物学ソフト開発で共同研究を行っている。

(4)ホモロジーを用いた大腸がん診断実用化について株式会社知能情報システムに特許の実施許諾をした。

(5)2019 年にベンチャー企業株式会社 APSAM Imaging を創設した。ホモロジーを用いた画像自動診断法の実用化を目指している。

¹ 特開 2018-147109 画像領域分割装置、画像領域分割方法、画像領域分割プログラム、及び画像特徴抽出方法。 ² Hatanaka N., Seki T., Inoue J., Tero A., Suzuki T. “Critical roles of I κ B α and RelA phosphorylation in transitional oscillation in NF- κ B signaling module”, Journal of Theoretical Biology, 2019, 462, 479–489. ³ <https://www6.nhk.or.jp/special/detail/index.html?aid=20180401>. ⁴ 鈴木貴提供

3.3 2010 年度採択研究課題

- ・ デジタル映像数学の構築と表現技術の革新(安生 健一)
- ・ 渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト(坂上 貴之)
- ・ 放射線医学と数理科学の協働による高度臨床診断の実現(水藤 寛)
- ・ 計算錯覚学の構築 — 錯視の数理モデリングとその応用(杉原 厚吉)
- ・ 生理学と協働した数理科学による皮膚疾患機構の解明(長山 雅晴)

デジタル映像数学の構築と表現技術の革新

安生 健一(株式会社オー・エル・エム・デジタル・取締役)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:

なし

CREST の成果:

3 次元 CG による、人間やキャラクター、および流体(水、炎、煙等)の映像表現に関して、「人間は、映像の何をみてリアルであると感じるのか?」という基本的な問いに対する数学的知見の発見とその実際の応用を推進した。



発展:

1.アフィン変換の種々のパラメータ付の応用¹

形の変形を伴う 2 次元や 3 次元のアフィン変換群の部分群への分解と指数写像の有効な活用を組織的に議論し、その応用として、アフィン変換で表されるキャラクターの変形や動きの補間の種々の方法を提案した。また、映像制作現場での実用化のために、それぞれの手法のユーザインタフェースとプロトタイプを開発した。

2.流体データの再利用と演出表現手法の開発²

流体シミュレーションにより得られた速度場を再利用する方法を開発した。従来は試みられなかった、高精細でリアルな乱流のアニメーションが作成できるようになった。

3.インタラクティブな動画修復手法の開発³

一般の動画像について、不必要な部分をマスク情報として指定し、インタラクティブな編集操作を経て修正動画を出力する手法を開発した。このような動画修復は、従来手法ではインタラクティブな編集が不可能なため、映像制作現場では多大な時間を要する作業であった。本手法によりそれが大幅に緩和された。(図 1)

4.CG 分野における運動や変形の基礎数理に関する書籍の出版⁴

Lie 群としての行列の取り扱い、CG 分野における運動や変形の取り扱いにおいて、見逃されがちな、しかし極めて有用なアプローチを提供する。本研究課題にて研究開発したこれらの手法を書籍の形でまとめた。

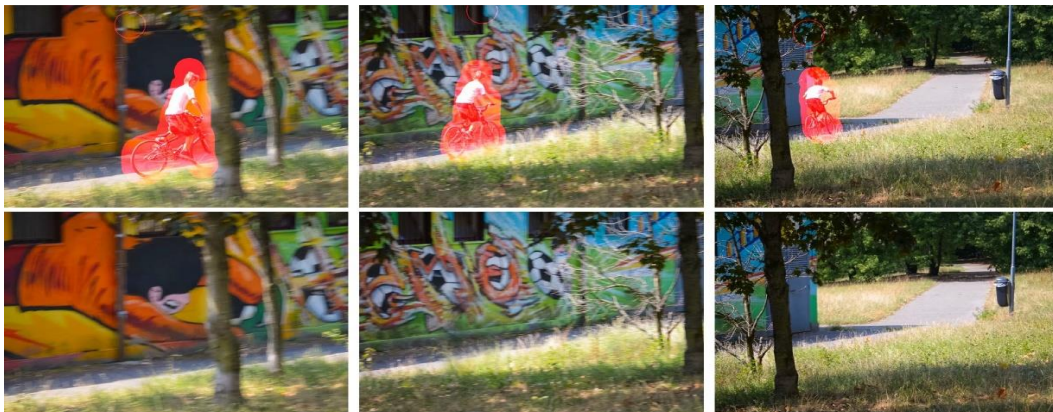


図 1. インタラクティブな動画修復(上段: ユーザは消去したい対象をマスク(赤)で囲む)
(下段: 本手法による結果)⁵

特記事項

(1)上記の成果は、国内外のいくつかの会社にて利用ないし評価されている。

(2)北海道大学グループは、富山大学・和歌山大学と流体・写実的画像生成・デジタルファブリケーションに関する共同研究を行っている。

(3)2018 年より、ビクトリア大学(ニュージーランド)とキャラクターアニメーションに関する共同研究を行っている。

(4)2012 年に「現場の人達のコンファレンス」の主旨で SIGGRAPH と同時開催する Digital Production Symposium を企画、発起人となり立ち上げた。本シンポジウムは毎年数百人の参加者がある。

¹ Kaji S. and Ochiai H., “A concise parametrization of affine transformation”, SIAM J. Imaging Sci., 2016, 9(3), 1355–1373. ² S Sato, Y Dobashi, T Kim, T Nishita “Example-based Turbulence Style Transfer”, ACM Transactions on Graphics, 2018, 37 (4) Article 84. ³ Okabe M., Noda K., Dobashi Y. and Anjyo K. “Interactive Video Completion”, IEEE Computer Graphics & Applications, 2020, 40 (1), .127–139. ⁴ Anjyo K. and Ochiai H. “Mathematical Basics of Motion and Deformation in Computer Graphics” 2nd ed. 2017, Morgan & Claypool (USA). ⁵ 安生健一提供

渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト

坂上 貴之(京都大学大学院理学研究科・教授)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:

JST さきがけ(研究総括)、JST 未来社会創造事業¹ 他、計 5 件

CREST の成果:

二次元多重連結領域における流体理論と数学解析・数値解析の研究とそれを用いた数値流体モデル構成と制御に関する研究を行い、構造安定な二次元非圧縮流の流線パターンのトポロジーの分類理論と遷移理論とそれを用いた二次元流線パターンのトポロジーの分類理論と遷移理論を用いた流体の新しい記述法を確立した。また、壁乱流の理解や位相解析ソフトウェアの開発を行った。加えて数学をコアとする諸分野連携の枠組みを整えた。

発展:

1.Topological Flow Data Analysis(TFDA)手法の展開¹

非圧縮性流体の制限を取り除いて圧縮性流体や三次元流れの二次元断面に利用できるトポロジー分類理論への拡張を行い、これらを環境・医療などの様々な問題に適用している。気象分野では、気圧等高線データを用いたブロッキング現象の同定に適用、医療分野では、心血流エコーデータから心不全のパターン判定に適用した。(図 1)

また、粉体の分級装置の開発にも適用し、従来よりも高い分級性能を実現した。

2.Topological Flow Data Analysis(TFDA)ソフトウェアの開発¹

本研究課題で得られた成果の一つである、二次元非圧縮流体に対する流線トポロジーの分類理論を与えられた流れデータに応用できるソフトウェア(psiclone)を開発した。psiclone は、格子点上の高さ関数(ハミルトン関数)のデータだけで、TFDA の COT 表現(ハミルトンベクトル場に表示される流線位相構造の配置を文字列表現)とレーブグラフ(等高線に付随して定義することのできる離散グラフ構造)を計算するソフトウェアで、トポロジカルな構造だけでなく、構造の影響領域(定量情報)も抽出できる。(図 2)

3.数学よろず相談室(Math Clinic)の開始²

本研究課題で行った諸分野協働活動を、より広く多くの分野における数理諸課題を解決するためのスキームへと拡大した。2020 年 7 月まで 22 件の相談があり、共同研究への移行、企業からの寄附金の受託、共同研究計画契約の締結などを進めている。

特記事項

(1)日本ニューマチック株式会社への特許実施許諾を行い、粉体機械の新製品開発を行った。また、公益財団法人鉄道総合技術研究所との共同研究契約締結、株式会社本田中央研究所との秘密保持契約、他 1 件の共同研究契約を締結した。

(2)英国、米国、オーストラリアなどの研究者と Applied and Computational Complex Analysis の研究グループを立ち上げ、若手研究者を含む人事交流や論文共著を開始した。2019 年度にはこのメンバーが中心となって英国ケンブリッジ大学ニュートン研究所での長期プログラムを実施して、国際的な活動が広がっている。

(3)2019 年度明治大学 先端数理科学インスティテュート 現象数理学三村賞を受賞した。

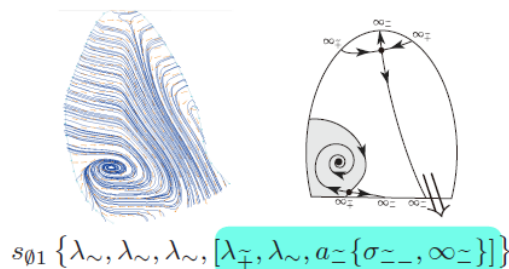


図 1. 心血流エコーデータ(“渦流領域”(医師の経験知)の確定と文字による抽出)¹

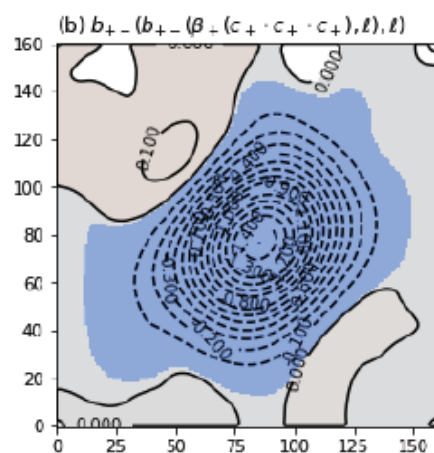


図 2. psiclone 解析例(四角形領域におけるナビーストックス流)¹

¹ 未来社会創造事業探索加速型「共通基盤」領域「革新的な知や製品を創出する共通基盤システム・装置の実現」(運営総括:長我部信行)「包括的トポロジカルデータ解析共通数理基盤の実現」(研究開発代表者:坂上貴之)(2018 年度～2020 年度)中間成果報告会資料(2019 年 9 月 4 日)² <http://www.sci.kyoto-u.ac.jp/ja/academics/programs/macs/clinic/>

放射線医学と数理科学の協働による高度臨床診断の実現

水藤 寛(東北大学材料科学高等研究所・副所長・教授)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:

CREST、JST 未来社会創造事業他

計 3 件

CREST の成果:

臨床医学分野との連携の範囲を広げ、複数の研究者がチームを組むことで様々な疾患に対する医用画像処理、医療統計、流体構造連成を考慮した数値シミュレーション、その基礎となる数学解析などを進めた。

発展:

1. 臨床医療における数理モデリングの協働研究¹

本研究課題の成果である幾何学的なモデリングをさらに発展させ、病態メカニズムの数理モデル化と、診断・治療に適した形状表現の数理モデルの構築に取り組んだ。

大動脈における血流については、高齢者に多い病態である大動脈瘤から先天性疾患に伴う血流の解析に対象を広げ、大動脈縮窄症における不安定渦と壁面剪断応力の関係(図 1)や左心低形成症候群に伴う血流などを臨床医と協力して調べている。

また、気管支拡張症などの診断の効率化や客観化に有用であると考えられている気管支走行の幾何学的特徴を抽出するために、同一患者の異なる時期の気管支形状をグラフ構造化して対応付ける手法を構築した(図 2)。これは、従来行われてきた専門医の目視による主観的な比較から、より客観的で医師の診療負担を軽減することのできる手法として有望である。

2. 数理モデリングと AI 技術の組み合わせによる熟練者の技の言語化²

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

特記事項

(1) 東北大学病院、岡山大学病院、東北医科薬科大学病院、明石医療センター等と、血流解析・臓器形状解析、および専門医の経験のアルゴリズム化に関する共同研究を進めている。

(2) ミラノ工科大学(イタリア)およびロンドン大学(英国)と血流解析の基礎技術に関する共同研究、フィンランド環境研究所(フィンランド)とシミュレーション技術に関する共同研究を進めている。

(3) 平成 31 年度科学技術分野文部科学大臣表彰(研究部門)、2018 年度明治大学 先端数理科学インスティテュート 現象数理学三村賞を受賞した。

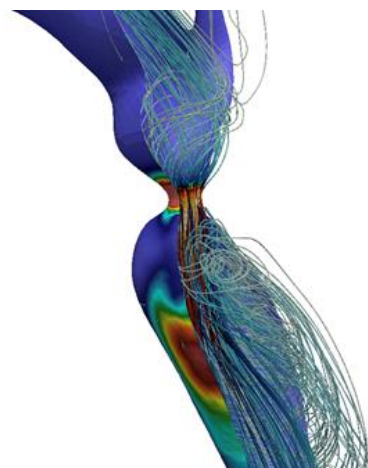


図 1. 大動脈縮窄症の解析³

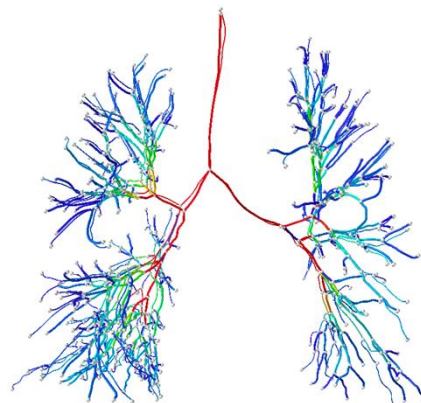


図 2. 異なる病期の気管支比較(色は断面積)³

¹ 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」(研究総括: 坪井俊)研究課題「臨床医療における数理モデリングの新たな展開」(研究代表者: 水藤寛)(2015 年度～2020 年度) H27 年度実施報告書、H28 年度実施報告書、H29 年度実施報告書、2018 年度実施報告書² JST 未来社会創造事業探索加速型「共通基盤」領域「革新的な知や製品を創出する共通基盤システム・装置の実現」(運営総括: 長我部信行)研究課題「AI の学習と数理から解き明かす熟練者の技」(研究開発代表者: 水藤寛)(2019 年度～2021 年度) https://www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/saitaku2019/JPMJMI19G9_suito.pdf³ 水藤 寛提供

計算錯覚学の構築 — 錯視の数理モデリングとその応用

杉原 厚吉(明治大学研究・知財戦略機構・研究特別教授)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業：
科研費基盤研究(A)

CREST の成果：

立体知覚の数理モデル構築と新しい奥行錯視の発見(杉原チーム)、画像分解理論に基づいた脳の視覚情報処理モデルの構築と錯視図形の生成・解析・新種発見(新井チーム)、認知科学の視点も取り入れたハイブリッド画像・視覚復号型暗号の機能向上・多機能化(山口チーム)などの成果を得た。

発展：

1. 変身立体錯視の多様な新種の発見・創作¹

鏡に映すと姿が激変する変身立体錯視を発展させて、鏡に映すと接続構造が変わる「トポロジー攪乱立体」、視点を連続に動かすと変形するように見える「軟体立体」、鏡に載せると姿が現れる「鏡映合成変身立体」などを発見・創作した。(図 1)

2. 変身タイル設計法の構築²

鏡に映すと姿が変わる変身立体と、1 種類のタイルを隙間も重なりもなく平面に敷き詰めてできるタイルとを組合せ、鏡に映すと変身するタイル図形の設計法を構築した。(図 2)

3. 立体と平面図形のハイブリッド化による新しい立体錯視の発見・創作³

平面図形に立体を付加することにより、鏡に映すと一部が消える「透身立体」、3 つの方向から異なる立体に見える「3 方向変身立体」、6 つの方向から異なる立体に見える「6 方向変身立体」などの設計法を構築した。

4. 立体錯視作品のミュージアムへの提供

台湾国立故宮博物院(2018 年 9 月 21 日～2020 年 5 月 24 日)を初めとして、日本科学未来館、名古屋市科学館、三菱みなとみらい技術館、池田記念美術館、そごう美術館、諸橋近代美術館、静岡科学館、浜松科学館、防府市青少年科学館、姫路科学館、宮崎科学技術館、愛媛県総合科学博物館、愛媛県美術館、岐阜市科学館、仙台市科学館、千葉市科学館、千葉県立現代産業科学館、ニューヨーク国立数学博物館など多くのミュージアムへ作品を提供した。

特記事項

- (1)ビー・エム・ダブリュ株式会社(BMW Japan)との車体ペイントに適した錯視図形の開発で共同研究を行った。
- (2)台湾国立大学(台湾)と立体錯視における脳機能の計測で共同研究を進めている。
- (3)立体工作のための展開図の出版(株式会社誠文堂新光社など 8 社)、変身立体オブジェの商品化(東京書籍株式会社など 2 社)など、成果物が社会で広く活用された。
- (4)日本応用数理学会 2017 年度 JJIAM 部門論文賞を受賞するなど、多くの受賞を受けた。



図 1. 鏡に映すと形だけでなく繋がりも変わるトポロジー攪乱立体錯視⁴

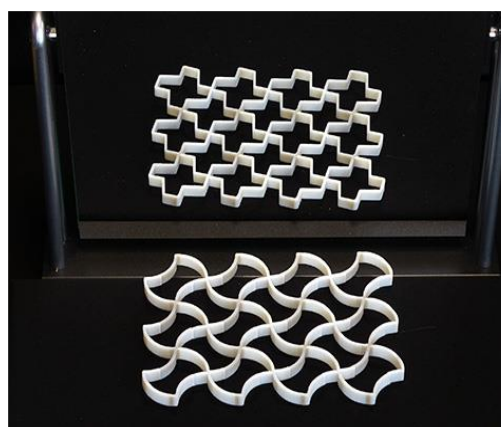


図 2. 平面に敷き詰められるという性質を保ったまま変身⁴

¹ Sugihara Y. "Topology-disturbing objects: a new class of 3D optical illusion", Journal of Mathematics and the Arts, 2018, 12(1), 2-18. ² Sugihara Y. "Ambiguous tiling", Computer Aided Geometric Design, 2020, 79, 101851. ³ Sugihara Y. "A New Type of Impossible Object That Becomes Partly Invisible in a Mirror", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 2016, 33, 525-535. ⁴ 杉原厚吉提供

生理学と協働した数理科学による皮膚疾患機構の解明

長山 雅晴(北海道大学電子科学研究所・教授)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:

CREST¹

科研費基盤研究(B)

CREST の成果:

皮膚科学に対する数理科学的研究の基盤となる表皮モデルを構築し、皮膚疾患の再現を行った。また、数理モデルの数値計算から、皮膚の持つ重要な機能である角層バリア機能の恒常性について数理科学的な定義を与え、角層バリア機能の恒常性は角層の層構造の安定性によって成立していることを示した。

発展:

1. 表皮構造の恒常性に対するカルシウムイオンの役割²

角層バリア機能だけでなく表皮の持つ層構造を維持し続けるためにはカルシウムイオン局在が本質的であることを数理モデルから示唆した。この研究によって表皮構造の数理モデルの基盤が出来た。(図 1)

2. 真皮乳頭層を形成する数理モデルの構築³

これまでの数理モデルでは真皮乳頭層が形成されず、真皮の凹凸が表皮に与える影響を調べることが出来なかったが、この研究によってそれが可能となった。このモデルでは細胞分裂の影響で真皮乳頭層が形成されることを示唆することが出来た。このモデルの応用として真皮の凹凸の減少により角層バリア機能が低下することを示した。(図 2)

3. 数理モデルに基づく 3 次元人工皮膚モデルの構築⁴

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

特記事項

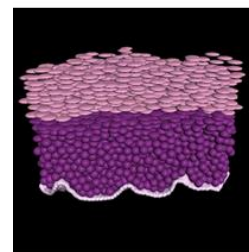
(1) 株式会社資生堂と、角層バリア機能に関する共同研究を進めている。

(2) 金沢大学、千葉大学、明治大学、広島大学と、数理皮膚科学

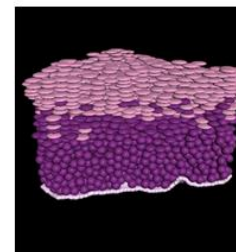
における細胞運動のメカニズム解明にも関連する自己駆動系の集団運動に関する共同研究を進めている。

(3) ポーランド科学アカデミー(ポーランド)、フロリダ州立大学(米国)、マックスプランク研究所(ドイツ)とも、自己駆動系の集団運動に関する共同研究を進めている。

ピンク: 角質細胞
紫: 表皮細胞
薄いピンク: 基底膜



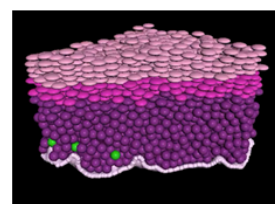
Ca²⁺局在あり



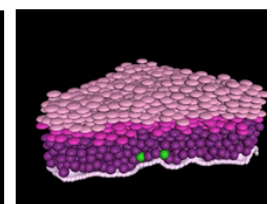
Ca²⁺局在なし

図 1. 表皮の持つ層構造⁵

ピンク: 角質細胞
赤紫: 顆粒細胞
紫: 有棘細胞と基底細胞
緑: 表皮幹細胞
薄いピンク: 基底膜



真皮が柔らかい場合
表皮が分厚く
バリア機能高い



真皮が強い場合
表皮が薄くなり
バリア機能が低下

図 2. 真皮乳頭層とバリア機能⁵

¹ 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」(研究総括: 坪井俊)研究課題「数理モデリングを基盤とした数理皮膚科学の創設」(研究代表者: 長山雅晴) (2015 年度～2020 年度) ² Kobayashi Y., Sawabu Y., Kitahata H., Denda M., Nagayama M. "Mathematical model for calcium-assisted epidermal homeostasis", Journal of Theoretical Biology, 2016, 397, 52–60. ³ Kobayashi Y., Yasugahira Y., Kitahata H., Watanabe M., Natsuga K. and Nagayama M. "Interplay between epidermal stem cell dynamics and dermal deformation", npj Computational Materials, 2018, 4(1), 45. ⁴ Kumamoto J., Nakanishi S., Kakita M., Uesaka M., Yasugahira Y., Kobayashi Y., Nagayama M., Denda S. and Denda M. "Mathematical-model-guided development of full-thickness epidermal equivalent", Scientific Reports, 2018, 8, 17999. ⁵ 長山雅晴提供