

CREST・さきがけ複合領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」
追跡評価報告書

1. 研究成果の発展状況や活用状況

(CREST)

2006年の文部科学省 科学技術政策研究所からの報告書「忘れられた科学-数学」での指摘も踏まえ、JSTとして初めて数学関連の研究領域が設定された。CREST・さきがけ複合の本研究領域は、「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」という戦略目標の下、自然現象や社会現象に対し、数学的研究を通じて新しい数学的概念・方法論の提案、数学と実験科学の融合で社会的ニーズに対応した新しい研究課題創出とその解決を目指した。

本研究領域終了後、研究代表者が獲得した研究助成金で総額が1千万円/件以上のものは40件に上る。この中で小谷は、科研費新学術領域研究「次世代物質探索のための離散幾何学」を立ち上げている。國府、坂上(貴之)は、それぞれ2014年度、2019年度に設定された数学関連のさきがけ研究領域で研究総括を務めている。小谷はACCEL、小林はCREST、大石はCREST、坂上(貴之)は未来社会創造事業、水藤はCREST、未来社会創造事業、ムーンショット型研究開発事業、長山はCRESTの研究代表者をそれぞれ務めている。この他、鈴木7件、日比、國府がそれぞれ5件、坂上が4件の科学研究費助成事業(科研費)を獲得した。それぞれの研究代表者が1千万円以上の研究助成金を数多く獲得したという事実のみならず、その後の我が国の次世代のトップ研究者育成にも寄与できるような様々な知見、つまり我が国全体の研究を底上げするノウハウを身に付けたと言えよう。このような先見の明を持つ総括的リーダー育成が我が国に必要な喫緊の課題であったが、その目的は達せられた。

論文発表数は、研究期間終了後、研究代表者13名が著者になっている論文だけをみても221報に上る。この中で被引用数Top10%以内の論文数は、日比11報、柴田4報、鈴木3報あり、Top1%以内の論文は、日比、柴田、水藤の3名にそれぞれ1報ある。数学分野特有の少人数での研究で単著も多く、投稿後のレビューに多大な時間がかかる状況を加味すると期待以上の数であり、世界からの注目度も十分高いと考えられる。

招待講演は、研究期間終了後、国際学会では小谷25件、コハツ・ヒガ23件、小林22件など、全体で141件に上る。国内学会では小林26件、小谷11件、鈴木6件など66件あり、研究成果への関心の高さが窺える。

特許出願に関しては、基盤的理論の数理科学の研究成果が直接、特許出願の形として現れにくい状況ではあるが、研究期間終了後の研究代表者のみの特許出願は、国内が6件、海外が4件ある。

受賞は大石の文化功労者、水藤の文部科学大臣表彰、杉原の錯視に関する多数のコンテスト最優秀賞などを含み、杉原18件、大石5件、日比3件、鈴木2件、坂上2件、水藤2件など合計35件に上る。これらの多くの受賞は、この分野で優れた研究が行われ、社会に認

められた証と言える。

報道件数は、研究期間終了後、錯視関連で杉原 189 件、個人を取り上げた取材や有識者としてのコメント等で小谷 100 件、文化功労者や小中学校の理数教育推進に関するもの等で大石が 91 件あり、合計で 427 件に上った。

これらのことから、研究終了後も本研究領域の研究成果が積み上げられ、社会からの関心も集めていることが認められる。

特筆すべきこととしては、純粋数学を社会に還元するのみならず、数学界と社会全般が互いに刺激し合うことによる思いがけない効果をもたらすことの波及において、この「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」という領域が大いに貢献したという事実である。研究領域そのものの牽引のみならず、意識改革を進められたこの成果こそ、他国を牽引するような高いレベルを持つ我が国の純粋数学、しかしながら応用方面に多くの課題があったこの学問の高度な力を真に活かす事業にいざなうことを開始できたと考える。

(さきがけ)

本研究領域の半数以上の研究者が研究終了後も科研費を中心に獲得し、研究開発を発展させている。その中で、原田、荒井、坂上(貴之)は、それぞれ 3 件以上を獲得している。また、坂上(貴之)、水藤、西成は JST 未来社会創造事業の研究代表者、坂上(貴之)はさきがけ、蓮尾は ERATO の研究総括も務めている。さらに CREST の研究代表者として、水藤、長山が各々 2 領域で、坂上(貴之)、吉田、平岡、石川は各々 1 領域で個々の提案する研究課題が採択されており、研究の展開のみならず本分野における研究の中心を担っている。

本研究領域の研究期間中の論文数は 258 報、研究期間終了後の論文数は 359 報で増加している。国際学会における招待講演は、研究期間終了後 335 件に上る。この中で小磯 90 件、寺前が 37 件に上る招待講演を行っている。

特許出願に関しては、研究期間中は国内 2 件、海外 1 件であったが、研究期間終了後は国内 34 件、海外 15 件に大きく増加した。これらの中で企業との共同出願は 18 件含まれ、本研究領域で行った諸分野との協働活動が、より広く多くの分野に展開され始めていると認められる。

研究期間終了後の受賞は新井、水藤の文部科学大臣表彰 2 件を含み 28 件に上る。報道件数は 586 件に上った。その中で西成の 398 件は特に多く、続いて石川が 66 件、新井が 37 件であった。このことは、自然や社会現象と数学的研究との高度な融合研究に関して、社会的関心が極めて高い証である。

上記のように研究期間終了後も多くの研究者が継続的かつ発展的に研究を進めていることが窺える。

2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

(1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

(CREST)

本研究領域では、研究期間終了後も継続して優れた研究成果を創出し、科学技術の発展に寄与している。以下にその特筆すべき研究成果の事例を示す。

材料・物質関連などで小谷は、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、ミ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係の解析を通じ、無機材料で新しいトポロジカル相を発見、有機材料で複雑な高分子の構造の記述を可能にした。

生命現象・医療関連などで鈴木は、生体組織画像の数理的特徴量を抽出し、大量・正確・高速な医療画像自動検査法を開発、生命動態を視覚化し、生命科学と数理科学の融合を行った。水藤は、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から心血管系における血流の解析手法を開発した。また、呼吸器系疾患の気管支形状をグラフ構造化し、同一患者の異なる時期の比較手法を構築した。長山は、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表皮構造の数理モデルを構築した。

地球環境・トポロジー関連などで坂上は、流体の記述法研究の中で今までの非圧縮性流体の制限を取り除き圧縮性流体や三次元流れの二次元断面に利用できるような理論の拡張を行うとともに、一般活用できるTFDA (Topological Flow Data Analysis)のソフトウェアを開発した。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、MGSTD (Morse graph method for stochastic time-series data) 法を開発、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理論的枠組みを構築した。柴田は、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法と呼ばれる粒子法を用いた2次元混合流体モデルにR-有界作用素理論を取り入れて、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表わし、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。

計算科学関連などで大石は、モデリングが難しい不確定要素、悪条件性、大規模性、構造の4つの根源的課題を抽出し、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、モデリングの改善につなげた。大石らが開発し公開しているライブラリは現在、世界最高速の精度保証付き数値計算ライブラリである。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見いだした。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するなど、統計に関する独創的な結果を得ている。

制御関連などで小林は、動物から学ぶ新たな制御則を提案した。クモヒトデ型ロボットに

適用することで環境との相互作用をリアルタイムに評価しながら制御することやムカデ型ロボットに適用することで屋外などの無限定環境において実時間に適応的に移動可能であることを示した。

映像・視覚関連などで安生は、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、今まで高精度にできなかったキャラクターの変形や動きの補間に関する手法、流体アニメーションのリアル化の手法、不要部分のマスクとマスクされ欠落した箇所を補完手法など開発した。

いずれの研究成果も数学や数理科学が諸科学や産業をさらに進展させる原動力になることを示していると考えられる。

(さきがけ)

本研究領域での特筆すべき研究成果の事例を以下に示す。

材料・物質関連などで平岡は、トポロジカルデータ解析の理論開発、理論の材料科学への応用研究を行った。パーシステントホモロジーを用いることで、ガラス材料に内在する新たな中距離秩序構造を発見することに成功している。このような新たな記述法の開発は、ガラス以外の材料でも基礎的な問題の理解や解決につながると期待される。

生命現象・医療関連などで伊藤はインフルエンザウイルスの塩基配列の変位の約七割を予測するモデルを構築した。これは、塩基配列情報に基づく基本再生産数の推定などにつながった。水藤は臨床医学と数理科学の協働を進め、血管形状の幾何学的特徴付けと血流の構造の関係を明らかにするとともに、熟練医の経験の言語化に取り組んだ。寺前は、最新の脳の知見を用いた脳内ニューロンとシナプスの確率的動作に基づいた新たな学習則を発見した。本学習則は現在のニューラルネットワークよりさらに応用範囲を拡げる人工知能技術につながることが期待される。

地球環境・トポロジー関連などで坂上(貴之)はTFDAにおいて非圧縮性流体の制限を取り除き、圧縮性流体や三次元流れの二次元断面に利用できるトポロジー分類理論への拡張を行った。

制御関連などで蓮尾は、内部動作原理が不明なブラックボックスの物理情報システムに対して、その振る舞いの観察により安全性を保証するためのアルゴリズム群を与えた。これは、ブラックボックスをホワイト化する従来のアプローチと異なり、ブラックボックス化されたAI部分を包み安全性を保障する新しい手法である。

映像・視覚関連などで新井は、色の対比の錯視、画像のエッジにより引き起こされる明暗や色の錯視など錯視現象の数理モデルを構築した。文字列傾斜錯視の自動生成、視覚効果を利用した画像処理、新しいデジタル・フィルタ群の設計等につなげている。

社会システム関連などで西成は、渋滞吸収走行による渋滞緩和効果の理論解析、通路における双方向人流のリスク指標や人の混雑判定の指標となる新しい「混雑度」の提案を行い、自動車の走行情報を基にした渋滞発生の予測を可能としている。

上記のように、幅広い科学技術分野との融合を通じた数学・数理科学研究が研究領域設定時の期待通りに実施され、社会や自然科学に有用な研究成果を創出していると考えられる。

これこそが我が国にいままで欠落していた応用への橋渡しに役に立つテーマを中心とした研究創出への寄与といえよう。

(2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

(CREST)

多くの研究代表者が、企業との連携、共同開発を行い、今後の社会・経済に十分貢献すると期待される研究成果を創出している。以下にその特筆すべき研究成果の事例を示す。

生命現象・医療関連などで鈴木は組織画像の数理的特徴量抽出で、大量、正確、高速の自動検査を可能とする技術を基に、共同研究者の中根和昭招聘教授(大阪大学)が、ホモロジーを用いた画像自動診断法を扱う企業(株式会社 APSAM Imaging)を創設した。水藤は、数理モデリングと AI 技術を組み合わせ、人工透析における専門医の投薬履歴の学習と血液検査値から、今まで臨床医療熟練者の暗黙知に依存していた投薬量の増減を提案するシステムを構築した。34 万人以上の透析患者に貢献する本研究成果は社会的インパクトが大きいものと考えられる。長山は、表皮構造の数理モデルに基づき人工皮膚を作製した。これは、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。

地球環境・トポロジー関連などで坂上は、TFDA 手法を民間企業にライセンスしたことで、従来よりも高い性能の粉体分級装置を実現し販売に至っている。また、同じ天候が長期間続き異常気象を引き起こしやすいブロッキング現象の同定を可能にしたことから、長期予報への適用が見込まれる。

金融・経済関連などでコハツ・ヒガは、近年、数理ファイナンスでよく使われている利子率の時間的変動を記述する数理モデル Cox-Ingersoll-Ross 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。

制御関連などで小林が開発したムカデ型ロボットは、玩具メーカーからムカデロボット工作セットとして販売されている。

映像・視覚関連などで杉原は、鏡に映すと接続構造が変わる立体、視点を動かすと変形する立体、鏡に載せると姿が現れる立体、鏡に映すと一部が消える立体、見る方向により異なる変身立体など発見し設計法を構築した。これらの立体錯視作品は、台湾国立故宫博物院、ニューヨーク国立数学博物館など国内外の十以上のミュージアムに提供されており、大変好評を得ている。

アウトリーチ活動での代表的なものとして、日比は、数学への好奇心と基礎理解力の向上を図る書籍、安生は、CG 分野における運動や変形の基礎数理に関する書籍、杉原は、数学や錯視の面白さを伝えるための著書を複数出版していることが挙げられる。また、鈴木は、

血管新生シミュレーションについて企業と共同でコンピュータグラフィックス映像を制作し、NHK 全国放送で放映された。坂上は、京都大学 MACS 教育プログラムの一環として「数学よろず相談室」を始めたことなどが挙げられる。

いずれの研究成果も研究総括がめざしていた“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”などを具現化したものであり、数学や数理科学がこれらを達成する重要な学問であることを示していると考えられる。

(さきがけ)

本研究領域での特筆すべき研究成果の事例を以下に示す。

材料・物質関連などで平岡は、パーシステントホモロジー計算ソフトウェア HomCloud を開発、オープンソースソフトウェアとして公開している。毎年、活用のチュートリアルを開催し普及を進めており、開発材料の異なる様々な企業での使用に広がっている。

生命現象・医療関連などで伊藤の研究成果は、2016 年の WHO Collaborating Centre を中心とする会議体で報告され、インフルエンザワクチン株の選定に向けた変異予測の導入に貢献している。水藤による大動脈瘤、大動脈解離など病態の状況推定、指標化、進行予測や人工透析に関わる動静脈シャントの血流解析による血管の傷みの軽減などは、今後の医療現場での課題の重要な解決策として期待される。群は、時差ボケの回避方法を提案した。これはシフトワーカーの負担を軽減するスケジュール提案や健康管理などへの応用が見込まれる。石川の画像セグメンテーション技術は、早期肺がん切除の胸腔鏡手術において、注意すべき血管走行を 3次元で可視化する施術支援ツールとして既に活用されている。

地球環境・トポロジー関連などで坂上(貴之)の開発したソフトウェア psiclone に関しては、企業が水、空気に限らず、方向を持って変化する流れの各種データを解析するために活用が検討されており、気象など環境や医療、製造現場など様々な場面での貢献が期待される。

制御関連などで蓮尾のブラックボックスの物理情報システムの安全性を保証するアルゴリズム群は、自動運転のようなセーフティクリティカルなシステムにおいても AI システムをホワイトボックス化することなく部品としてその調達の閾値を下げる。これは、広い範囲の工業製造現場で応用が期待できる。

映像・視覚関連などで新井は、錯視に関連した知財を企業にライセンスし、菓子メーカーの商品パッケージなどに活用されている。石川の深層学習による白黒画像のカラー化、欠損画像復元、ラフスケッチ自動線画化などの技術は、ソフトウェアを公開しており、これは従来にはない高性能であることからテレビ局、新聞・雑誌・書籍における白黒画像カラー化、古い映画の補修などを扱う業界にライセンスされ、多岐に渡り数多く活用されている。

社会システム関連などで西成は、渋滞学の第一人者となり、空港の施設設計や運営、東京オリンピックの運営準備、複数の自治体でのイベントでの群衆事故防止、欧州・中国等での混雑対策など、今日実際に多くの場面で活用されている。

アウトリーチ活動では、新井の錯覚に関するインターネットメディアでの連載記事や書籍の執筆、蓮尾のシンポジウム開催、本研究領域の研究者による出張授業などが実施されている。これらの数学という学問の社会への浸透・普及に貢献していることも見逃せないものである。さらに、本研究領域の研究者は多様な業種の多数の企業と連携しており、特に坂上(貴之)、中野、長山、西成、蓮尾、小磯、石川、北畑、寺前は複数企業と共同研究を進めている。これらは、実社会に対する数学研究の有効性への期待が現実味を帯びてきているとともに、その裾野の広がりも示しているものと認められる。

(3) その他の特記すべき波及効果

(CREST)

小谷は、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を目指し、科研費新学術領域研究「次世代物質探索のための離散幾何学」を立ち上げ、領域代表者を務めている。また、同様に本研究領域の多くの研究代表者は要職を担っている。

上記の個人のキャリアアップに加えて、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多数進めており、各研究課題で数学と諸科学・産業との融合や研究コミュニティの拡大に尽力していることが認められる。

本研究領域の研究期間終了後での活動で、小谷の数理材料科学、水藤、鈴木の数理臨床医学、長山の数理皮膚学、安生の映像数学、杉原の計算錯視学などの新しい分野が発展した。これは、本研究領域終了後、JST 戦略的創造研究推進事業での数理関連の多くの研究領域が立ち上がる動機付けの一つとなっている。また、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。

さきがけと共に本研究領域での諸分野との協働による産業・社会への有効性の提示は、かつて忘れられた科学であった数学・数理科学の認識の向上、諸分野とのインターフェイスとなる研究人材の育成に大きく寄与する非常に有意な結果に至ったと考えられる。

(さきがけ)

本研究領域終了後の JST 戦略的創造研究推進事業の数理関連の研究領域において、坂上(貴之)はさきがけ、蓮尾は ERATO の研究総括に就任し、他の研究者も研究代表者などとして研究の中心を担っている。また、キャリアアップし教授、教授相当になった研究者が 25 名おり、要職に就いた研究者も複数輩出している。

新しい組織の設立例も見られる。西成は企業と群衆マネジメント研究会を設立した他、高度物流人材育成のための東京大学 先端物流科学寄附研究部門の複数企業による寄附講座も立ち上げた。坂上(貴之)は英国、米国、オーストラリアなどの研究者と Applied and Computational Complex Analysis の研究グループを立ち上げ、国際的な広がりを見せてい

る。

研究者同士の研究成果を持ち寄った融合も進んでいる。例えば小磯と北畑は、微小液滴の数理モデルの幾何学的形状について、平岡と一宮は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などである。

本研究領域終了後での活動において、平岡の数理材料科学、水藤の数理臨床医学、長山の数理皮膚学、西成の渋滞学などの新しい分野のさらなる発展が認められた。これらさきがけの研究者の活躍は、CREST と共に本研究領域の有意性を確固たる形で示しているものと認められる。

以上により研究成果の発展や活用が認められ、科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果が十分に生み出されている。

以上