

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400192

研究課題名(和文)再生核理論の応用と工学的・医学的問題への新展開

研究課題名(英文) Applications of Reproducing kernel theory and its new development in engineering and medical science

研究代表者

松浦 勉 (Matsuura, Tsutomu)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：80181692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々の開発した再生核理論とチホノフの正則化理論の融合理論をもちいて、いくつかの逆問題に挑戦し、具体的な解の計算アルゴリズムを構築し、その有用性を確認した。特に医学的問題に対し新しいアプローチを行った。

具体的には、医学的な分野では(細胞画像による形態解析の研究)2編の論文と3件の学会発表を行い、数学的な分野では(一般化された再生核を積分方程式の解法に応用する研究、再生核理論の立場からのゼロ除算の研究)9編の論文と18件の発表を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a new type of Tikhonov regularization combined with the theory of reproducing kernels. Using our method of regularization we have challenged some famous and historically difficult inverse problems. Furthermore we constructed concrete algorithms for solving those problems and confirmed their effectiveness by numerical experiments. Especially, we tried new approach to the field of medical science. Specifically, we published 2 papers and presented 3 papers in Medical Sciences (Microscopic Image of Podocyte and Cochlear cells) and we published 9 papers and presented 18 papers in Mathematical Sciences (general reproducing kernels and division by zero).

研究分野：数学，応用数理

キーワード：再生核理論 逆問題 数値計算 正則化 積分方程式 アルゴリズム 離散化

1. 研究開始当初の背景

(1) この数年来、我々は再生核理論の展開と応用について研究を続けている。この研究では計算機全盛以前のような抽象的なものではなく、具体的、構成的、さらに可能ならば計算機を意識した実用的なものを目指している。特に逆問題の解構成の手法として再生核理論を適用し、逆問題の解の具体的表現を得ること、計算アルゴリズムを確立することを目標としている。本申請課題は我々のこれまでの(数学としては非常に具体的な)研究成果をさらに工学・医学における具体的な問題レベルにまで展開して、工学、医学、産業界等に寄与することを目的としており、ここ十年来の我々の再生核理論・応用研究の集大成と位置づけている。

(2) 齋藤(研究分担者)は、スタンフォード大学流の具体的な再生核の理論をはじめとして一般論や応用に関する再生核の理論の広い分野を研究テーマとし、40年以上にわたり一貫して研究を行ってきた。その関連論文は140編を超え、英文研究著書も2冊出版し、Applicable Analysis など10を超える国際雑誌の編集委員も務めるなど、再生核理論の専門家として国際的に活躍している。しかしながら具体的な問題へのアプローチに関しては、計算アルゴリズム構築の困難などが障害となり、少数の単純な例を扱うのみであった。そのようなとき、11年ほど前より松浦(研究代表者)が共同研究に加わり、具体的な逆問題から理論の精密化を図るとともに、現実的な計算アルゴリズムの構築を目指すこととなった。その経過の中で、特異性を回避しながら漸近的に真の解に近づくチホノフの正則化法と再生核理論の統合を思い立った。

(3) 松浦(代表研究者)は学生時代より、数理工学を専攻し、甘利俊一教授(東大名誉教授、現在は理化学研究所、脳科学統合研究センター・脳数理研究チーム・チームリーダー)のもとで、神経回路網の数理や統計的学習理論、パターン認識、サポートベクタマシン、独立成分分析などに関する研究を行ってきた。これらの分野ではチホノフの正則化法は(関数解析との関連は意識されていないが)強力な手法として認知されており、この経験を踏まえて両者(チホノフ正則化法と再生核理論)の統合を思い立った次第である。それ以降、我々はこの立場から具体的な問題への精力的なアプローチを始めることとな

った。

(4) そして約10年前、我々は歴史的に難問とされてきた熱伝導における逆問題について、この方法を適用し、新しい陽表現公式を確立した。さらに我々は、得られた逆公式を用いて、任意時刻に任意温度分布を実現する初期温度分布を算定するアルゴリズムを開発し、コンピュータによる数値実験を行い、この方法とアルゴリズムの妥当性を確認することに成功した。そしてその成果をISAAC(International Society for Analysis, its Applications and Computation)の第4回国際会議(2003年8月、トロント)にて報告した。その後、我々は上記の研究を通して得られた方法論を拡張・適用することによって、それまで逆問題として具体的に解くことは困難とされてきた、1) 過剰な境界条件下での常微分方程式の最適近似解の構成問題、2) 波動方程式の逆問題、3) 任意外力を満足するポアソン方程式の数値解の構成方法、4) 部分的に与えられた境界条件を満たす調和関数の数値的構成方法、5) ラプラス変換の実逆変換問題等に応用し有用で適切な解法を見出してきた。またここ数年においては、医用画像の再構成問題にも我々の方法が適用できるのではないかと、研究を続けていた。

2. 研究の目的

(1) コンピュータビジョン、信号処理工学、ロボットアーム解析、大規模・複雑な医用データの解析などの分野において、重要であるが解くことが困難とされ放置されている逆問題、実用的な精度の解を得られない逆問題を、我々の理論の立場から再整理し定式化することによって、その困難性の原因を特定する。

(2) 上記で定式化された問題に対して我々の方法を用いて解の構成アルゴリズムを開発・構築する。さらに「アベイロ離散化法」(齋藤の研究地であるポルトガル・アベイロ大学にちなんで命名)を具体例に適用することによって、この離散化法の利点を具体的に示す。

(3) この研究で得られた我々の方法による種々の逆問題の解構成法と、我々の過去の研究による方法、従来の差分法、有限要素法、境界要素法などによる解法を比較し、高精度計算(今回の研究分担者ではないが、日頃我々と共同研究を行っている京都大学の藤原宏志氏が開発した方法、ライブラリ)においても我々の(新しい)方法が様々な点で優位であることを実証する。

(4) 上記(2)で得られた逆問題の解構成法を現場の普通の計算機でも簡単に使用できるように(パラメータ調整法なども含めて)ユニット化して、工業、産業、医療等の現場に提案する。可能ならば特許出願して特許取得を目指す。

3. 研究の方法

(1) チホノフ正則化法と再生核理論を結びつけ、具体的に計算可能な逆問題の解公式を導いたうえ、数値実験でその有用性を検証する。

(2) いくつかの逆問題に適する解構成のアルゴリズムを構築する。我々の方法論は逆問題に対してある種の汎用性を持つものであるが、具体的な問題を解く際にはその問題特有の困難さが伴うことが普通であり、それらのノウハウがそのまま通用するとは限らないと思われる。この場合には新しいアルゴリズムを見出すことに努める。現場のデータは一般的に測定誤差等の誤差を伴うものであるから、構築したアルゴリズムの誤差解析も並行して行う。さらに計算機を用いて詳細な数値実験を行ない、アルゴリズムの有用性を検証する。

(3) 従来型のニューラルネットワークによる画像パターン解析、深層学習やボロノイ図を用いた(人間の目では判断しにくい)異常細胞の検出などをおこなう。

4. 研究成果

(1) 平成 26 年度

平成 26 年度より群馬大学医学部の松崎利行教授(生体構造学)、廣村桂樹准教授(生体統御内科学)との共同研究を開始した。これは腎臓系球体上皮細胞の走査電子顕微鏡画像による形態解析を我々の理論と画像解析、パターン認識によって行おうとするものである。この研究に関して、2 件の医学系学会において発表した。医学部の先生方の従来の主観的な議論とは異なり、新しい定量的な解析方法であるため、発表現場では若干奇異に思われた節もあるが、何人かの先生方には好意的に受け止められ、更に研究を進めて従来の医学界にはない方法論を打ち立てていただきたい、との励ましの言葉もいただいた。

また、この発表をきっかけに、生体構造学の他の先生から蝸牛有毛細胞(音のセンサ細胞)の組織化過程についての共同研究を行いたいとの申し出をいただいた。このように、

医学方面への拡がりには順調である。

数学的な研究としては、一般化された再生核を積分方程式の解法に応用する研究を行った。これは従来の再生核の定義(特徴付け)を若干拡げることにより、(我々は以前より再生核の積分方程式解法への応用研究は行っていたが)従来扱えなかった複雑な積分方程式の解法にも応用しようとするものである。この研究により、再生核の応用分野がさらに広がるものと考えている。

さらに、これは副産物というべき研究であるが、一般のゼロ除算に関して再生核理論の立場から新しい解釈を得た。この研究については日本数学会において研究分担者が公表したが、まだ評価が定まっていない状況である。

(2) 平成 27 年度

平成 26 年度より開始した群馬大学医学部の松崎利行教授、廣村桂樹准教授と共同研究に関して、平成 27 年度には 1 編の論文とすることができた。

また、平成 27 年度からは群馬大学医学部の向後晶子講師と蝸牛有毛細胞の組織化過程の定量化に関する研究を始めた。従来、組織化過程を示す細胞の収縮・伸長の計測は手作業でおこなっていたが、この方法は作業時間、結果の客観性に問題がある。我々は計算機による画像処理により作業の高速化・自動化、計測結果の客観性の保持を目指している。具体的には細胞膜形状のボロノイ線図による近似法により良好な結果を得て、向後講師が医学方面学会で報告した。

数学的な研究としては、一般化された再生核を積分方程式の解法に応用する研究を継続した。その成果は平成 27 年度 8 月の国際学会にて公表された。これは従来の再生核の定義(特徴付け)を拡張することにより、これまで扱えなかった積分方程式の解法にも応用可能とするものである。この研究に関しては 3 篇の論文、2 件の学会発表、著書 1 冊の発刊をおこなった。これら我々の研究により、再生核の応用分野がさらに広がったと考えている。

さらに、ゼロ除算に関してその成果を日本数学会にて発表した。現在は関数論の分野においてゼロ除算の有用性を見出すべく考察を続けており、我々のゼロ除算は海外でも国内でも認知が広がりつつある。

(3) 平成 28 年度

平成 27 年度から行っている群馬大学医学

部の向後晶子講師との共同研究に関しては、細胞膜形状のポロノイ線図による近似法と深層学習を用いた細胞膜生成により良好な結果を得て、医学関連学会で2件の発表を行った。またこの課題ではH28年度からは新たな科研費（向後講師が研究代表者、松浦は研究分担者）が採択された。

数学的な研究としては、一般化された再生核を積分方程式の解法に応用する研究をおこなっている。これに関しては平成28年度には3件の学会発表をおこなった。さらに我々の再生核理論研究の（数学的な）集大成としてSpringerから専門書（全452ページ）を出した。この著書はこの分野の今後のスタンダードとなると考えている。

さらに、ゼロ除算に関して再生核理論の立場からの研究は平成28年度は日本数学会にて5件の発表を行い、3篇の論文にすることができた。現在は関数論や初等幾何学においてゼロ除算の有用性を見出すべく考察を続けており、我々のゼロ除算は国内外で認知が広がりつつある。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 11件)

(1) T. Matsuura and S. Saitoh, Matrices and division by zero $z/0=0$, *Advances in Linear Algebra and Matrix Theory*, 査読有, Vol.6, 2016, 51-58.
<http://dx.doi.org/10.4236/alamt.2016.62007>

(2) L. P. Castro¹, S. Saitoh, A. Yamada Solutions of Tikhonov Functional Equations and Applications to Multiplication Operators on Szego Spaces, *Complex Analysis and Operator Theory*, 査読有, 2016,
10.1007/s11785-016-0545-4

(3) 元川 嵩介, 松浦 勉, 青木 武生, 腎系球体足細胞画像からの細胞体の抽出とシグナル調節タンパク質 α と糖尿病による細胞変性識別の試み, *Medical Imaging Technology*, 査読有, Vol.33, 2015, 208-216.
10.11409/mit.33.208

(4) Castro, L. P., Rojas, E. M., Saitoh, S., Tuan, N. M., Tuan, P. D., Solvability of singular integral equations with rotations and degenerate kernels in the vanishing coefficient case, *Anal. Appl.*, 査読有, Vol.13, 2015, 1-22,
DOI:10.1142/S0219530514500468

(5) L. P. Castro, M. M. Rodrigues, S. Saitoh, A Fundamental Theorem on Initial Value Problems by Using the Theory of Reproducing Kernels, *Complex Anal. Oper. Theory*, 査読有, Vol.9, 2015, 87-98, DOI
10.1007/s11785-014-0375-1.

(6) Tsutomu Matsuura, Saburo Saitoh, Dirichlet's Problem by Using Computers with the Theory of Reproducing Kernels, *Current Trends in Analysis and Its Applications*, 査読有, 2015, 561-568,
DOI:10.1007/978-3-319-12577-0_62.

(7) M. Kuroda, H. Michiwaki, S. Saitoh, M. Yamane, New meanings of the division by zero and interpretations on $100/0=0$ and $0/0=0$, *International J. of Applied Mathematics*, 査読有, Vol.27, 2014, 191-198.
<http://dx.doi.org/10.12732/ijam.v27i2.9>

(8) L. P. Castro, A. S. Silva and S. Saitoh, A reproducing kernel Hilbert space constructive approximation for integral equations with Toeplitz and Hankel kernels, *Libertas Mathematica (new series)*, 査読有, Vol.34, 2014, 1-22,
<http://ara-as.org/index.php/lm-ns/article/download/1205/1141>.

(9) H. Fujiwara, M.M. Rodrigues, S. Saitoh, V.K. Tuan, A new discretization principle in analysis, *Int. J. Math. Comput.*, 査読有, Vol.22, 2014, 75-88,
<http://www.ceser.in/ceserp/index.php/ijmc/article/view/2595/2903>.

(10) L.P.Castro, M.R. Haque, M.M. Murshed, S. Saitoh, N.M. Tuan, Quadratic Fourier transforms, *Ann. Funct. Anal.*, 査読有, Vol.5, 2014, 10-23,
http://www.emis.de/journals/AFA/AFA-tex_v5_n1_a2.pdf.

(11) Saburo Saitoh, Generalized Inversions of Hadamard and Tensor Products for Matrices, *Advances in Linear Algebra & Matrix Theory*, 査読有, Vol.4, 2014, 87-95,
<http://dx.doi.org/10.4236/alamt.2014.42006>.

〔学会発表〕(計 21件)

(1) 元川嵩介, 松浦勉, 系球体上皮細胞画像における足突起領域の自動抽出, *International Conference on Advanced Engineering and Its Education in 2016 (国際学会)*, 2016年10月13日~15日, 桐生商工会議所(群馬県・桐生市).

(2) T. Matsuura, S. Motokawa, T. Matsuzaki, K. Hiromura and T. Aoki, A method for automatic extraction of foot process region from podocyte image GUMI & AMDE2016, 2016年12月9日, 桐生文化会館(群馬県・桐生市).

(3) 齋藤三郎, S. Pinelas, Division by zero $z/0=0$ and differential equations, 日本数学会, 2017年3月24日~27日, 首都大学東京(東京都・八王子市).

(4) 齋藤三郎, P. L. Castro, M. M. Rodrigues, A fundamental theorem on initial value problems by using the theory of reproducing kernels, 日本数学会, 2017年3月24日~27日, 首都大学東京(東京都・八王子市).

(5) 齋藤三郎, 道脇裕, $\log 0 = \log 1 = 0$ and applications, 日本数学会, 2017年3月24日~27日, 首都大学東京(東京都・八王子市).

(6) 齋藤三郎, 藤原宏志, The general sampling theory by using reproducing kernels, 日本数学会, 2017年03月24日~27日, 首都大学東京(東京都・八王子市).

(7) 齋藤三郎, 高木正子, Division by zero $z/0=0$ in complex analysis (draft), 日本数学会, 2016年9月15日~18日, 関西大学(大阪府・吹田市).

(8) 齋藤三郎, 山田陽, Luis. P. Castro, Solutions of Tikhonov functional equations and applications to multiplication operators on Szege spaces, 日本数学会, 2016年9月15日~18日, 関西大学(大阪府・吹田市).

(9) 齋藤三郎, 松浦勉, Matrices and division by zero $z/0=0$, 日本数学会, 2016年9月15日~18日, 関西大学(大阪府・吹田市).

(10) 齋藤三郎, 道脇裕, 奥村博, Division by zero $z/0=0$ in Euclidean spaces, 日本数学会, 2016年9月15日~18日, 関西大学(大阪府・吹田市).

(11) 齋藤三郎, 山田正人, The concept of divisions (fractionals) in fields containing the division by zero, 日本数学会, 2016年3月16日~19日, 筑波大学(茨城県・つくば市).

(12) 齋藤三郎, 道脇裕, 山田正人, Reality of the division by zero $z/0 = 0$, 日本数学会, 2016年3月16日~19日, 筑波大学(茨城県・つくば市).

(13) T. Matsuura, S. Motokawa, T. Matsuzaki, K. Hiromura, and T. Aoki, Image classification of podocyte by neural network, 2nd International Symposium of Gunma University Medical Innovation (国際学会), 2015年12月8日, 刀城会館(群馬県・前橋市).

(14) 齋藤三郎, L. P. Castro, 藤原宏志, M. M. Rodrigues, Vu Kim Tuan, Aveiro discretization method in mathematics: A new discretization principle (II: Applications), 日本数学会, 2015年9月13日~16日, 京都産業大学(京都府・京都市).

(15) Saburo Saitoh, Yoshihiro Sawano, What are reproducing kernels? Generalized reproducing kernels and generalized delta functions, ISAAC (The International Society for Analysis, its Applications and Computation) 2015 (招待講演) (国際学会), 2015年8月3日~8日, マカオ, 中国.

(16) Tsutomu Matsuura, General integral transforms by the concept of generalized reproducing kernels, International Society for Analysis, its Applications and Computation, 2015年8月3日~8日, マカオ, 中国.

(17) H. Michiwaki, S. Saitoh, and M. Takagi, A new concept for the point at infinity and the division by zero $z/0=0$ (note), 日本数学会, 2015年3月21日~24日, 明治大学(東京都・千代田区).

(18) M. Kuroda, H. Michiwaki, S. Saitoh, M. Yamane, New meanings of the division by zero and interpretations on $100/0=0$ and $0/0=0$, 日本数学会, 2015年3月21日~24日, 明治大学(東京都・千代田区).

(19) 松浦勉, 元川嵩介, 糸球体上皮細胞の走査電子顕微鏡画像による形態解析, 医理工生命科学融合医療イノベーションプロジェクト成果報告会, 2015年3月20日, 群馬大学理工学部(群馬県・桐生市).

(20) 松浦勉, 元川嵩介, Extract local area from microscopic image and quantify shape of region, International Symposium of Gunma University Medical Innovation, 2014年12月5日, 桐生市市民文化会館(群馬県・桐生市).

(21) Saburo Saitoh, Delicate inequalities for the Tikhonov extremal functions, The Conference on Inequalities and

Applications '14 (招待講演), 2014 年 9 月
7 日 ~ 13 日, Hotel Aurum,
Hajduszoboszl, ハンガリー .

〔図書〕(計 7 件)

(1) S. Saitoh and Y. Sawano, Springer,
Theory of Reproducing Kernels and
Applications (Developments in
Mathematics), 2016, 452(all).

(2) T. Matsuura and S. Saitoh, Birkhaeser,
Current Trends in Analysis and Its
Applications, 2015, 892(561-570).

(3) L.P. Castro, H. Fujiwara, M.M.
Rodrigues, S. Saitoh, and V.K. Tuan,
Current Trends in Analysis and Its
Applications, 2015, 892(553-560).

(4) M.M. Rodrigues and S. Saitoh,
Birkhaeser, Current Trends in Analysis
and Its Applications, 2015, 892(523-530).

(5) L.P. Castro, M.M. Rodrigues and S.
Saitoh, Springer, Topics in Mathematical
Analysis and Applications, 2014,
814(175-188).

(6) L.P. Castro, H. Fujiwara, T. Qian and S.
Saitoh, Springer, Mathematics Without
Boundary Survey in Interdisciplinary
Research, 2014, 648(101-116).

(7) L.P. Castro, H. Fujiwara, M.M.
Rodrigues, S. Saitoh and V.K. Tuan,
Springer, Mathematics Without Boundary
Survey in Pure Mathematics, 2014,
781(37-92).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

松浦 勉 (MATSUURA, Tsutomu)
群馬大学・大学院理工学府・准教授
研究者番号 : 8 0 1 8 1 6 9 2

(2)研究分担者

齋藤 三郎 (SAITOH, Saburou)
群馬大学・名誉教授
研究者番号 : 1 0 1 1 0 3 9 7