

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400184

研究課題名(和文) 超局所解析的手法を用いた逆問題の研究とその実用への還元

研究課題名(英文) Research in inverse problems by methods of microlocal analysis and its application to practice

研究代表者

滝口 孝志 (Takiguchi, Takashi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・総合教育学群・准教授)

研究者番号：50523023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：超局所解析的手法を用いた逆問題について、純粋理論と実用の両者の立場から研究を行った。本研究では、理論と実用の相互還元を視野に入れ、産業・工学・数学の三者による産学・学際連携を基とする研究態勢を整える事も本研究の目標とした。研究課題としては、超局所解析的手法と逆問題に関連して、流体における渦層の記述、CTスキャンにおける基礎理論となるRadon変換における一意性構造の研究、土壌内における水溶液の挙動を記述する数値モデル、コンクリート建造物における音響CT確立に必要な数値、福島における原発事故からの環境再整備に必要な放射能汚染物質を記述する数値モデルなどについて研究を行った。

研究成果の概要(英文)：I studied inverse problems by methods of microlocal analysis from the viewpoint of both theory and application. In this research, in view of mutual return between theory and application, we also tried to promote collaboration among industry, engineering and mathematics. As research tasks, I studied the following problems in relation with microlocal analysis and inverse problems; representation of vortex sheets in fluid, uniqueness in Radon transform which is basic for the theory of CT, mathematical model for motion of aqueous solutions in the soil, mathematical sciences to establish an acoustic CT for concrete structures, mathematical model for concentration of radionuclides which is indispensable for environmental rearrangement in Fukushima area after the disastrous accident of FD1NPP.

研究分野：超局所解析、逆問題

キーワード：超局所解析 逆問題 インフラ再整備 環境問題

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 応募者はこれまで超局所解析と逆問題をテーマに研究してきたが、逆問題における一意性の証明等、両者が関連する問題は少ない。本研究では、本研究課題を広い意味で解釈し、超局所解析と逆問題の両者が関連する問題を中心に、関連する分野における純粋理論の確立から、逆問題解析による研究成果の実用への還元等、計算機による実装までの包括的な研究を行い、幅広い貢献を目指すことを目的とした。

(2) また、研究代表者のこれまでの研究活動が契機となり、工学者や産業における開発者・技術者と研究交流を行う機会を頻繁に得ているが、これらの交流を通じ、数学における理論が実用の役に立っていない例が非常に多く存在していることが明らかになっている。本研究を通じて、**純粋理論における研究者と実用に携わる研究者・技術者との間の架け橋的な役割を果たす**ことも、本研究における目標の一つとしてとりあげ、理論研究による実用問題への貢献、実用の必要性から生ずる純粋理論における新たな研究課題の創出など、純粋理論・実用の両者による相互貢献を目指した協働態勢の確立も目指した。

### 2. 研究の目的

(1) 上記を背景とし、本研究では、超局所解析と逆問題を主テーマとし、純粋理論・実用への還元の両者の立場から研究を行った。

(2) 本研究においては、実用上の要請から生じる問題に対して、その問題に対する数学による解決と実用への還元を目指すため、問題の本質的な理解から最終的な成果の実用への還元まで、各研究段階において分野横断的な研究体制の確立が不可欠である。そのため、本研究を通じて、数学・理論物理等の純粋理論、工学・産業等の実用の協働を促進し、両者の架け橋的な役割を果たすことも、研究目的の一つとした。

### 3. 研究の方法

(1) 超局所的解析的な手法を用いて逆問題の一意性を証明する手法に関しては様々な研究があるが、本研究では超函数の構造などの超局所解析における本質的な研究も行い、一意性が成立するための本質的な構造を解明することも研究テーマとした。また、流体における渦層の記述・弾性体における断層エネルギーの記述など、現象そのものの記述や解析において超局所解析的手法が応用される例が存在するので、それらについても研究対象として研究を進めた。

(2) 実用に携わる工学者、産業界の技術者・開発者達と頻繁に意見交換を行い、実用現場で必要とされている問題を正しく認識する

と共に、それらは数学の問題として、解決可能か、可能な場合は、既存理論の改良で対応可能か、否か、等の判断を行い、実用現場の要求に応えられる理論の確立、実用への還元の為の実装を行うことを目標とした。

(3) 実用の問題から数学理論においても興味深いと思われる研究課題を発掘し、それらの改題を解決することにより、  
“理論から実用へ”  
“実用から理論へ”  
という、両者の相互還元を目指した。

(4) 年に一度、本研究費と九州大学 MI 研究所の援助を受けながら、逆問題・環境問題などをテーマとする国際会議を開催し、産学連携態勢と国際協力態勢の確立を目標とした。

### 4. 研究成果

(1) 超函数の構造と局所一意接続性との関係について議論した。非準解析超分布に対しては局所一意接続性が成立することと、準解析超分布や佐藤超函数に対しては超局所一意接続性が成立しないことは既知であり、佐藤超函数と準解析超分布に対しては、構造に対応したデータを与えることにより、一般化された局所一意接続性が成立することが知られていた。本研究では、反例を構成することにより、佐藤超函数と準解析超分布に対しては、上記の十分条件よりも少しでもデータを減らすと一般化された超局所一意接続性が成立しなくなることを証明した。本成果により、超函数の構造と局所一意接続性との関係が完全に解明されたといえる。

(2) 完全流体における渦層に記述については、流速ベクトルを複素化することにより佐藤超函数で記述できることが知られていたが、この表現については以下の短所があった。

イ. 既知の表現における本質的なアイデアは流速ベクトルを複素化することにあるため、平面流体にしか適用できない。

ロ. 流速ベクトルが複素化されているため、渦層の表現と実際の流速ベクトルとの対応がわかりにくい。

ハ. 渦層を佐藤超函数で記述するために、渦と湧き出しの効果の和をとっているため、各々の効果がわかりにくい。

本研究ではこれらの短所を改良した。具体的な成果は以下の通りである。

a. 渦・湧き出しの各々を実流速ベクトルを用いた記述として佐藤超函数で表現した。

b. 3次元流体における渦層の表現を与えた。この成果により、完全流体における渦系の記述なども可能になった。

c. 実流速ベクトルによる渦層の記述の研究から、佐藤超函数の構造に関する新たな研究課題も創出された。

(3) 熱方程式を用いた介在物の非破壊検査に関しては数学理論として優れた研究が複数存在するが、これらの研究は、以下に述べる二つの理由により直接実用に適用できない。

イ. 既存の研究では考えている物体の境界全体で熱流を制御し境界全体で温度を観測することを仮定しているが、現実には熱流を制御することは不可能である。

ロ. 既存の研究では高温状態(温度->)から介在物の情報を復元しているが、この方法では検体が溶けてしまうため実用化が不可能である。

イ. については未解決であるが、ロ. については、境界の1点のみで熱源を制御することによる介在物の復元方法を開発した。実用上は、境界全体で検体の温度を制御することも非常に難しく、境界上の数点で熱源を制御するというのが実用上好ましい仮定である。本成果により、熱方程式における逆問題理論は実用化に一步近づいたといえる。

(4) 均一な物体内における介在物の特定については、工学者及び民間企業における技術者達と協働し、コンクリート建造物における音響 CT の開発を進めている。試験体を作り実際の建造物を用いた実験を行うことで、コンクリート建造物内における超音波の挙動を明らかにし、その性質を用いて音響 CT の確立に必要な純粋数学における新たな研究課題を提起した。現在、具体的な非破壊検査において本研究を還元するための研究を進めている。

(5) 医療や産業に応用されている CT スキャンは 1967 年に G.N.Hounsfield によって開発され、1972 年に彼によって開発された CT スキャンの機器が発表された。彼はこの功績により 1979 年にノーベル医学生理学賞を受賞しているが、本人は電気技師であったため、自身が開発した機器で人体に対する非破壊検査が可能になることの理論的証明を与えていない。現在の CT スキャンにおいて、G.N.Hounsfield のアイデアが用いられているものは殆ど存在しないこともあり、彼のアイデアに対する理論的証明は長い間未解決であった。本研究においては、G.N.Hounsfield が用いたアイデアに対する数学的な背景を解説すると共に、彼のアイデアによって CT スキャンが実現したことに対する一つの証明を与えた。

(6) CT スキャンにおける一意性構造の解明には超局所解析を応用した純粋数学による解析が必要であるが、本研究において、大域一意性と関数の持つ増大度の関係を解明した。

(7) 福島における原発事故の収束に必要な放射能汚染物質の挙動を記述する数理モデルの確立及びその環境問題への還元にかん

する研究を行った。具体的には、逆問題を応用し、大気中における将来の汚染物質濃度を求める手法を科発すると共に、土壌中における汚染物質の挙動を記述する数理モデルを提案した。

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4件)

Noriyuki Mita and Takashi Takiguchi  
Development of ultrasonic tomography for concrete structures

[査読なし]

MI 研究 5 (2016) 205-233

[http://www.imi.kyushu-u.ac.jp/files/imipublishattachment/file/math\\_56f0c9a71160f.pdf](http://www.imi.kyushu-u.ac.jp/files/imipublishattachment/file/math_56f0c9a71160f.pdf)

Noriyuki Mita and Takashi Takiguchi  
Basic properties of concrete and its non destructive testing

MI 研究 2, (2015) 117-137

[http://www.imi.kyushu-u.ac.jp/files/imipublishattachment/file/math\\_550a1d94872c6.pdf](http://www.imi.kyushu-u.ac.jp/files/imipublishattachment/file/math_550a1d94872c6.pdf)

Takashi Takiguchi

How the computerized tomography was practicalized,

[査読なし]

Bulletin of JSSAC, 21 (2015) 50-57

<http://www.jssac.org/Editor/Suushiki/V21/V211.html>

Takashi Takiguchi

Unique continuation of microlocally analytic functions and their structure

[査読あり]

Complex Variables and Elliptic Equations 59 (2014), 1507-1519

<http://dx.doi.org/10.1080/17476933.2012.744402>

Tsutomu Sakurai and Takashi Takiguchi  
Achievements by Professor Akira Kaneko

[invited paper]

Complex Variables and Elliptic Equations, 59, 2014, 1501-1506

<http://dx.doi.org/10.1080/17476933.2012.701290>

[学会発表](計 13 件)

Takashi Takiguchi

“Representation of the vortex sheets in the perfect fluid by hyperfunctions”

[招待講演]

復旦大学航天系談話会

2017年3月7日, 復旦大学

(中華人民共和国)

滝口孝志

「移流・異常拡散方程式の解について」

第 16 回地下環境水文学に関する研究集会,

2016年11月27日

筑波大学,

滝口孝志

「コンクリート建造物に対する超音波 CT 開発と窓関数の応用」

ウェーブレット理論と工学への応用,

2016年11月23日

大阪教育大学

Takashi Takiguchi

“Acoustic CT for Concrete Structures”

[招待講演]

Imaging Methods in Coupled Physics Models in 11th AIMS International Conference

2016年7月5日

Hyatt Regence Orlando, Florida

(アメリカ合衆国)

Takashi Takiguchi

“An inverse problem to develop CT for concrete structures”

Recent development in inverse problems for partial differential equations and its applications,

2016年1月29日

京都大学数理解析研究所

羽田野祐子 滝口孝志

「多孔質媒体中における移流・異常拡散方程式について」

第 16 回地下環境水文学に関する研究集会

2015年11月22日

大同大学 白水キャンパス.

Noriyuki Mita and Takashi Takiguchi

“Development of ultrasonic tomography for concrete structures”

Mathematical Backgrounds and Future Progress of Practical Inverse Problems,

2015年11月13日

九州大学 MI 研究所

Takashi Takiguchi

“On mathematical background of practicalization of computerized tomography at its initial stage”

2015年10月30日

第 2 回解析学の耳袋, 沼津市

Takashi Takiguchi

“On the idea for practicalization of the computerized tomography at its initial stage”

微分方程式の逆問題とその周辺

2015年1月26日

京都大学数理解析研究所,

Takashi Takiguchi

“On the representation of the vortex sheets in the ideal fluid”

[招待講演]

若手による流体力学の基礎方程式研究集会,

2015年1月5日

名古屋大学大学院多元数理科学研究科

Noriyuki Mita and Takashi Takiguchi

“Basic properties of concrete and its non destructive testing”

2014年12月18日

Collaboration between theory and practice in inverse problems,

九州大学 MI 研究所

Takashi Takiguchi

“On uniqueness problems for the Radon transform”

Several aspects of microlocal analysis,

2014年10月23日

京都大学数理解析研究所

Takashi Takiguchi

“An inverse problem for the heat equation in view of practical application”

Inverse Problems --from Theory to Application

2014年8月26日

At-Bristol

(イギリス連合王国)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

滝口 孝志 (TAKIGUCHI, Takashi)

防衛大学校・総合教育学群・准教授

研究者番号: 50523023