

佐賀大学  
理工学部集報

第49巻 第1号

目次

素粒子原子核物理学におけるパーシステントホモロジー解析 ..... 河野宏明・開田丈寛.....	1
博士論文要旨及び審査要旨公表 .....	7

令和2年6月

佐賀大学理工学部



## 素粒子原子核物理学におけるパーシステントホモロジー解析

河野宏明\*・開田丈寛\*\*

### The Persistent Homology Analyses in Particle and Nuclear Physics

By

Hiroaki Kouno and Takehiro Hirakida

**Abstract:** We report the persistent homology analyses applied to particle and nuclear physics. As the first step, the analyses of the confinement and deconfinement transition in quark system are shown. We use the effective Polyakov line model which is the effective model of quantum chromodynamics. We analyzed the space distribution of the phase of the Polyakov line which is composed of the time component of gluon field. The persistent diagram in the deconfined phase is much different from that in the confined phase.

**Key words:** particle and nuclear physics, persistent homology, quark, confinement, deconfinement

#### 1. はじめに

現代の素粒子原子核物理学においては、実験的にも理論的にも莫大なデータを解析する必要が生じている。素粒子の反応と言うと少数の粒子が関与するシンプルなイメージを描くかもしれない。だが、素粒子のエネルギーが高エネルギーになればなるほど、粒子・反粒子の生成消滅が増え、複雑な反応過程となる。また、ごく稀な反応を見つけるためには、莫大な数の実験を行い、そこから統計的に結論を導かなければならない。現代のインターネット社会の基本になっている World Wide Web という技術は、素粒子原子核物理学における莫大なデータ情報のやりとりのために生まれた事はよく知られている。

データの数だけではない。現代の素粒子原子核物理学では、素粒子自体が大量にある状況の研究も重要になってきている。素粒子原子核物理学において、高エネルギーの人工的な実験は、基本的に加速器を使って素粒子を加速する事により行われる。粒子のエネルギーが大きくなればなるほど、加速器の大きさは大きくなる。

巨大な加速器を作るには莫大な予算がかかる。たとえば、スイスのジュネーブ近郊にある国際的な円形の加速器であるラージ・ハドロン・コライダー (LHC) は、その全周が約 27km 程度あり、山手線より

少し小さいぐらいで、一部は国境をまたいでフランス領になっている。これ以上に大きな加速器を作る事は、国際協力を行うにしても、予算的にだんだんと難しくなっている。素粒子物理学において、新しく提唱されている理論は、多くの場合、現在の加速器のエネルギーよりも高いエネルギー領域の現象に対応する。それらの高エネルギーの物理現象を実験的に確かめようとする、加速器ではなく、宇宙そのものを巨大な実験装置としなければならない状況になってきた。宇宙初期において、高エネルギーの素粒子が多数飛び交っていたと考えられるからだ。したがって、宇宙の諸現象を説明できる事が、新しい理論の成否を決める事になる。

宇宙初期における高エネルギーの素粒子は、単体でなく、多数の集合状態で存在していた。したがって、それらを理論的に考える場合は、素粒子単体の性質だけでなく、素粒子多体系の性質が重要になる。言ってみれば、素粒子の“物性”が問題になるのである。宇宙初期以外でも、たとえば、中性子星と呼ばれる高密度天体の内部では、高密度の極限状態で素粒子が密集して存在すると考えられており、その極限状態での素粒子の“物性”を解析する事が重要となる。

実は、加速器実験においても同様の事が言える。先に述べた LHC では、単体の素粒子だけでなく、金やウランといった巨大な原子核も衝突させる事できる。そのような衝突でできる状態は高温・高密度の状態、宇宙初期のビッグバンにたとえて、リトル

令和 2 年 5 月 28 日受理

\*理工学部物理学部門

\*\*学校法人出水学園出水中央高等学校

©佐賀大学理工学部

バンと言われることもある。巨大な原子核の衝突では生成される全エネルギーは高くなるが、素粒子の多体系が形成されるため、やはり“物性”の解析が必要となる。

ミクロな素粒子は、一方で場（波）でもある。素粒子物理学を記述する理論は場の量子論であるが、場の理論の立場からすると、多数の自由度を持つ系を非摂動的に扱う必要がある。近年、素粒子の多体系を非摂動的に扱う理論として、格子場のシミュレーションが発達してきた。これは計算機上に作られた、離散時空間に素粒子の場をおき、理論にしたがって場の理論的計算や統計力学的計算をシミュレーションで行う方法である。格子場のシミュレーションにおいても、“物性”的な解析が重要である事は言うまでもない。物性物理学においては、多体系を扱うが、そこから巨視的な性質を導く事が重要となる。近年、物性物理学においては、多体系の持つトポロジーの解析が重要となってきたり、その発展は素粒子物理学にも影響を与えている。ここでは、物性理論で発展してきたパーシステントホモロジー[1]とよばれる手法を素粒子原子核物理学に応用する事を、クォークの閉じ込め・非閉じ込め転移の分析を例として、論じる。

## 2. クォークの閉じ込め・非閉じ込め

ここで問題にする素粒子の物性は、クォークの物性である。物質は原子からできており、原子は原子核の周りを電子が回る形で構成される。原子核は陽子や中性子よりできており、原子の質量のほとんどを担っている。陽子や中性子の間には、中間子が飛び、それによって（強い）核力と呼ばれる力が働き、原子核を構成する。陽子や中性子の仲間の粒子をバリオンと呼び、バリオンと中間子を総称してハドロンと呼ぶ。先にでてきた LHC は、ハドロンを衝突させる大きな加速器という意味である。厳密に言うと、ハドロンは基本的な粒子ではない。クォークと呼ばれる基本的粒子が3つくっついてバリオンを作り、クォークとその反粒子である反クォークがくっついて中間子を作っている。したがって、現代の素粒子物理学では、電子などのレプトンとクォークが物質を構成する基本的な粒子である。基本的な粒子としては、それ以外に力を伝達する光子のようなゲージ粒子と、質量を生み出すヒッグス粒子がある事が知られている。

不思議な事に基本的な粒子であるはずのクォークを単体で取り出す事はできない。これはクォークの間にグルーオンと呼ばれるゲージ粒子の媒介で伝達する強い相互作用が働き、1つのクォークを他のクォークから引き離そうとすると、強い引力が働きク

ォークを引き戻してしまうためであると考えられる。この現象をクォークの閉じ込めと呼ぶ。なお、中間子によって伝達される（強い）核力は、クォーク間の強い相互作用から導かれる2次的な力である。

強い相互作用を記述する理論は量子色力学 (QCD) と呼ばれる理論である。これは電磁気学の量子論である量子電磁気学 (QED) と似た理論であるが、電荷の種類が正負だけでなく、色といった3種の種類も持った理論である。すなわち、クォークには赤、緑、青（これらの名前は光の3原色のたとえにすぎないが）の3色の色電荷をもっており、反クォークはそれらのマイナス、つまり、反赤、反緑、反青の色電荷をもっている。3つのクォークからなるバリオンの場合は、常に、赤、緑、青のクォークが1つずつあり、全体で白色となって、色を持たない。中間子の場合は、色を持ったクォークとその反色を持った反クォークが結合してやはり全体では色を持たない。したがって、クォークの閉じ込めは色の閉じ込めでもある。強い相互作用を伝達するグルーオンも色を持つが、グルーオンもハドロン内に閉じ込められる。

クォークの閉じ込めは、理論解析的な意味においては、未解決の問題である。しかし、格子場のシミュレーション、すなわち格子量子色力学[2]によって、クォークの閉じ込めは再現されている。さらに、温度を上げていくと、クォークの閉じ込めが破れて多数のクォークやグルーオンが自由に運動するクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) ができる事が予言され、高エネルギー原子核衝突でそういった状態が実際にできているらしい事がわかってきた[3]。物性論的な言い方をすると、温度を上げていくと、ハドロン相から QGP 相に相転移するのである。宇宙初期のビッグバン後  $10^{-5}$ 秒ぐらいまでは、そのような QGP が存在したと考えられている。また、中性子星のようなコンパクトな星の内部の高密度状態でも QGP とはやや異なるクォーク物質が存在すると考えられている。

厳密な相転移においては、転移のおこる2つの相は対称性の自発的破れの有無によって区別できる。クォークの閉じ込め・非閉じ込めの場合も、もし、クォークと反クォークの対生成・対消滅の効果が無視できるのであれば、QCD のゲージ対称性に付随する Z3 対称性とよばれる対称性の自発的破れの有無で区別できる。すなわち、ゲージ場の時間成分を使って定義できるポリヤコフライン（ループ）という物理量があるが、これは Z3 対称でない。この物理量の期待値をハドロン相で計算すると零となり、Z3 対称性は守られるが、QGP 相では有限の大きさを持つため、Z3 対称性は自発的に破れる。Z3 対称性におけるポリヤコフラインのように自発的破れを検証できる物理量を秩序変数と呼ぶ。

ところが、クォークと反クォークの対生成・対消

滅の効果を検討すると、Z3 対称性は常に破れてしまい、秩序変数による相の区別ができなくなる。したがって、現実の QCD では、ハドロン相と QGP 相の間の転移は、非連続的な厳密な意味での相転移でなく、クロスオーバーと呼ばれる連続的な転移となり、ハドロン相と QGP 相の境界を決める事が困難になる。そこで、トポロジー的な概念を使って、両相を区別する試みなどが行われてきた[4, 5]。ここでは、近年物性物理学（あるいは化学などの分野）で発展してきた、パーシステントホモロジー[1]と呼ばれる手法で両相を区別する試み[6] について報告する。

### 3. パーシステントホモロジー

ここでは、パーシステントホモロジーの概念を簡単に、直観的に紹介する。パーシステントホモロジーの入門書を兼ねた教科書としては、文献[1]などがある。

ある空間に広がって分布するデータの点を考える。簡単のため、まず、Fig. 1(a)のような2次元空間の中の2点を考える。2点を中心とした半径  $r$  の2つの円を考え、 $r$  を次第に大きくする。Fig. 1(b)のように円が接したとき、点が繋がり“線”ができたと考える。(Fig. 1(c)) 3点を考えたときも、同様に隣り合う点の円が接した時に“線”ができると考えるが(Fig. 2(a))、さらに  $r$  が大きくなって3つの円が重なった時は(Fig. 2(b))、“(塗りつぶされた)三角形”ができたと考える(Fig. 2(c))。このように、 $r$  を大きくすると、次々と(位相幾何学で言うところの)“単体”が生成され、それらによって“複体”が構成される。慣習にしたがって、 $r$  の2乗を“時間”と呼ぶ事にしよう。時間と共に、単体・複体が増えていく過程をフィルトレーションと呼ぶ。ここで重要なのは、三角形の場合のように、“線”が3つできた段階では、図形に“穴”があったのに、(塗りつぶされた)三角形ができると“穴”が消滅する事である。

時間が経つと共に穴が生成され、やがてそれは消える。穴が生成される(生まれる)時間 Birth time を横軸に、穴が消える(死ぬ)時間 Death time を縦軸にとってプロットしたものをパーシステント図と呼ぶ。Fig. 3は有効ポリヤコフライン模型と呼ばれる量子色力学の有効理論におけるポリヤコフラインの位相についてのパーシステント図の例である。詳しい説明は次章で行うが、Death time が Birth time より小さい事はないので、穴を表す点はかならず対角線より上にある。

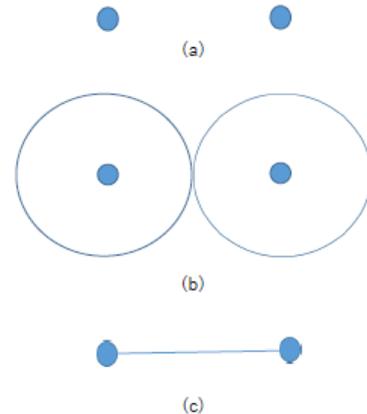


Fig. 1

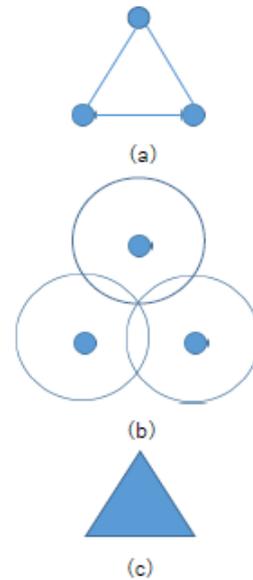


Fig. 2

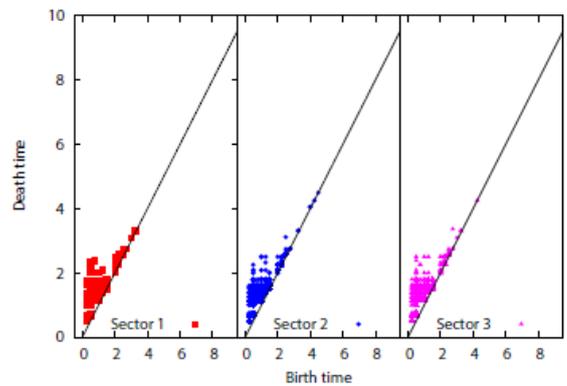


Fig. 3

穴の生成と消滅を示すパーシステント図はデータ空間でのマルチスケールのトポロジーの情報を反映すると考えられる。ただし、対角線に近いものは生存時間が短くデータのノイズ的な揺らぎであると考えられる。対角線から離れた穴は生存時間が長く、パーシステントであり、位相幾何学的な意味があると考えられる。

なお、データ分布の空間が3次元空間であれば、上述の“円”を球に置き換えて考えればよい。

#### 4. 数値解析

クォークの閉じ込め・非閉じ込め転移の基本理論である量子色力学は、複雑な理論であるので、ここではその有効理論である有効ポリヤコフライン模型 (EPLM) を使う事にする。これは、先に出てきたポリヤコフラインを基本的な物理量と考えて、量子色力学を書き変えた有効理論である。この模型の細かい詳細は、文献[6, 7]を参照されたい。ここではパーシステントホモロジー解析の要点のみを述べる。

計算機上の3次元格子空間上に設定されたEPLMをシミュレーションし、統計力学にしたがった配位を生成する事で、ある配位でのポリヤコフラインの空間分布を知る事ができる。ポリヤコフラインは複素数であるが、その位相を複素平面で次のように3つに分け分類し、分類された位相が空間においてどのように分布しているかを解析する

Sector 1 位相が $-\pi/3 \sim \pi/3$

Sector 2 位相が $\pi/3 \sim \pi$

Sector 3 位相が $\pi \sim 5\pi/3$

3つに分けるのは、Z3対称性を考える時の変換であるZ3変換に対応している。Z3変換を行うと、ポリヤコフラインは複素平面内で1/3回転し、別の領域に移るのである。

次に各位相領域に対応するポリヤコフラインの3次元空間での分布を考え、パーシステントホモロジーの解析を行う。(解析では文献[8, 9]で示されている公開ソフトウェアを使用した。)得られたパーシステント図の例が前出のFig. 3である。この図は、低密度の状態(クォーク化学ポテンシャルの値がクォーク質量の0.5倍)の閉じ込め相に対応するもので、3つの領域がほとんど同じパーシステント図になっている。一方、やや高密度(クォーク化学ポテンシャルの値がクォーク質量の0.9倍)の非閉じ込め相に対応する図がFig. 4である。ここでは3つの領域が異なった分布を見せており、Sector 1ではBirth timeの小さい狭い範囲に“穴”は集中して分布しており、他の領域ではBirth timeの大きい部分に広く分布している。3つの領域で差異が大きくなったのは、クォークが非閉じ込めになって、もともと少し破れていたZ3対称性の破れがさらに大きくな

った事を意味している。他の配位を使っても、パーシステント図は閉じ込め・非閉じ込めのどちらの相でもほとんど変わらないので、これらの特性は閉じ込めと非閉じ込めの性質を反映しているものと思われる。なお、低温における閉じ込め相(ハドロン相)と高温における非閉じ込め相(QGP相)についても同様の結果が得られている[6]。

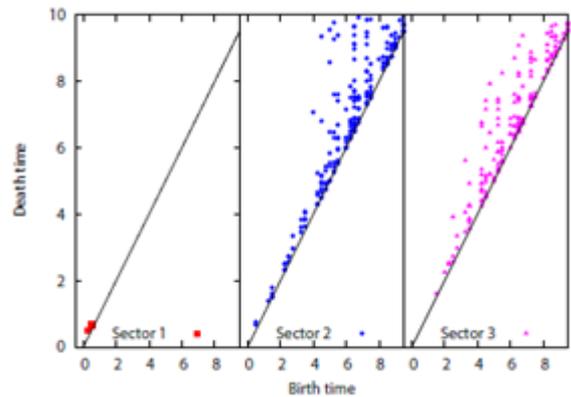


Fig. 4

#### 5. まとめと展望

この報告では、素粒子物理学におけるパーシステントホモロジーによるデータ解析について報告した。クォークに働く強い相互作用の基本理論である量子色力学の有効理論である有効ポリヤコフライン模型を用いて、クォークの閉じ込め相と非閉じ込め相のポリヤコフラインの位相の空間分布を求め、その空間分布をパーシステントホモロジーの手法で解析した。

位相の空間分布のパーシステント図は、閉じ込め相と非閉じ込め相では全く異なる傾向を示した。このことは、両相においては、ポリヤコフラインの位相の空間分布のマルチスケールでのトポロジーが全く異なる事を意味し、パーシステントホモロジーの手法によって、両相が分類できることを示唆する。パーシステントホモロジーの素粒子原子核物理学における応用は、著者達の知る限り、この解析が世界で初めてである。今後は、以下のような研究を行っていきたい。

- (1) 様々な温度および有限化学ポテンシャル領域でのパーシステントホモロジーの分析。
- (2) 格子QCDシミュレーションで計算されたポリヤコフラインのパーシステントホモロジーによる解析。
- (3) 格子QCDシミュレーションにおけるボーテックス構造のパーシステントホモロジーに

よる解析。

- (4) パーシステントホモロジーによる分類の力学的解釈。

さらに、他のトポロジー的な手法との関連性も吟味していきたい。

#### 謝辞

有益な議論を行っていただきました八尋正信氏、柏浩司氏、高橋純一氏、菅野淳平氏、石井優大氏、宮原昌久氏、大野晃氏に感謝いたします。この研究は科研費（基盤研究(C)一般 20K03974）の支援を受けております。また、計算の一部は大阪大学 RCNP の支援のもと、大阪大学 CMC の大型計算機 SX-ACE を使って行われました。ここに謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- (1) 平岡裕章, 「タンパク質構造とトポロジー」パーシステントホモロジー群入門, 共立出版, 2013 年.
- (2) 青木慎也, 「格子上の場の理論」現代物理学シリーズ 3, シュプリンガー・フェアクラーク東京, 2005 年.
- (3) 秋葉康之, 「クォーク・グルーオン・プラズマの物理」基本法則から読み解く物理学最前線 3, 共立出版, 2014 年.
- (4) M. Sato, Phys. Rev. D 77, 045013 (2008).
- (5) K. Kashiwa and A. Ohnishi, Phys. Lett. B 750, 282 (2015).
- (6) T.Hirakida,K. Kashiwa, J.Sugano,J. Takahashi, H. Kouno and M. Yahiro, Int. J. Mod. Phys. A 35, 2050049 (2020).
- (7) T. Hirakida, J. Sugano, H. Kouno, J. Takahashi and M.Yahiro, Phys. Rev. D 96, 074031 (2017).
- (8) DIPHA plugin for python available at <https://github.com/DIPHA/dipha>.
- (9) HomCloud available at [http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/hiraoka\\_lab/homcloudenglish.html](http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/hiraoka_lab/homcloudenglish.html)



## 博士論文要旨及び審査要旨公表

佐賀大学大学院工学系研究科において、博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）独8条の規定に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨をここに公表する。



氏名(本籍) 郡大心 (佐賀県)  
学位の種類 博士(理学)  
学位記の番号 甲第655号  
学位授与の日附 令和2年3月24日  
学位論文題名 アミノ基を含む簡素な光学活性化化合物を用いた希土類錯体の構造およびキラリティー制御に関する研究

#### 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 山田 泰 教  
(副査) " " 鯉川 雅 之  
" " " 高 椋 利 幸  
" " " 大 渡 啓 介

### 論文内容の要旨

希土類元素を含む化合物は、発光や磁性、触媒などの様々な機能を有するだけでなく、戦略元素を含む資源化合物としても重要である。このような化合物の中でも有機化合物を配位子とする錯体は、発光に代表される光機能に期待が持たれている。近年、配位子に光学活性化化合物を導入し、円偏光発光などの優れた円偏光特性のみならず、キラル磁性やキラル触媒を実現しようという試みがなされている。このようなキラル特性を高いレベルで実現するためには、希土類中心が形成する配位多面体の構造およびキラリティーを的確に制御するための戦略が必要となる。本研究では、アミノ基を含む簡素な光学活性化化合物を用いた独自のアプローチにより、希土類錯体の構造およびキラリティー制御を詳細に検討・追究している。

本論文は、全5章で構成されている。第1章ではアミノ基を含む簡素な光学活性化化合物を用いた希土類錯体の構造およびキラリティー制御に関して、これまでなされている研究の概略を記すと共に、問題点を指摘し、本論文の意義について記述している。

第2章ではキレート配位可能な光学活性ジアミンに着目し、この化合物から誘導可能な分岐状多座配位子を用いて希土類錯体の立体構造およびキラリティーの制御について検討している。その結果、配位子により希土類中心の配位多面体のキラリティーを直接的に制御することが可能であり、一部を他の配位子と交換する反応の際にも絶対配置を含む構造が保持できることを見出している。さらに、この分岐状配位子を含む希土類錯体は円偏光特性にも優れることを明らかにしている。

第3章では二つのアミノ基が隔たれた構造を有するジアミンから誘導される架橋性多座配位子、補助金属イオンおよび補助架橋配位子を用い、希土類イオンを含む異種多核錯体の構造制御について検討している。また、補助架橋配位子に脱プロトン化した

アミノ酸を導入することにより希土類配位多面体のキラリティー制御についても追究している。その結果、構造制御を実現しつつ異種3核錯体の構築が可能であり、アミノ酸の脱プロトン化体を補助架橋配位子として適切に導入した場合にはキラリティー制御も可能であることを明らかにしている。

第4章ではアニオン性希土類錯体の合成時に光学活性モノアミンを塩基としてのみならず、プロトン付加体を対カチオンとする用いる手法により、間接的なキラリティー制御について検討している。その結果、アキラルなアニオン性希土類錯体の場合でも対カチオンによりキラリティー制御が可能であり、円偏光特性を付与できることを明らかにしている。

第5章では研究全体を総括し、記述している。以上のようにアミノ基を含む簡素な光学活性化化合物を用いた希土類錯体の構造およびキラリティー制御に関する研究を通じ、希土類錯体合成における光学活性化化合物の有用性に関して新たな知見が得られると共に、この種の希土類錯体を基盤とした新材料の創出も不可能ではないことを明らかにしている。

以上、本論文は希土類錯体において、簡素な光学活性化化合物を用いるだけで多角的に構造およびキラリティー制御が可能となることを明らかとした点で新規性がある。また、簡素な光学活性化化合物を用いた新たな錯体合成法や集積化法といった応用展開に基礎的な知見を与えた論文としても評価される。

令和2年2月3日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。また、本研究は、審査付学術論文2編、国際会議発表4件等で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。以上の審査結果に基づき、本論文は博士(理学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

### 論文審査結果の要旨

学位申請者、郡大心氏に対して、学位論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する科目について口述試験をおこなうことを事前に通知し、令和2年2月3日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、研究科専門科目(高機能物質化学特論)、研究科特別講義など単位取得科目について行った。特に、金属錯体の合成法と共に、単結晶X線構造解析や各種分光学的測定法の原理と結果の解釈について質問したところ、申請者から適切な解答がなされた。口述試験の解答から広い知識を有していると判断された。

学術論文の主要分野である金属錯体に関する研究については、現在までに掲載が決定済のものを含め

4 編の論文業績を有している。いずれも著名な専門学会誌への掲載であり、その内容から十分な理論構成力および研究遂行能力を有していると判断された。さらに、論文業績は全て英文で記述されており、英語による論文作成能力についても適切な能力もっていることが確認された。

以上のとおり、本申請者は博士論文を中心とした専門科目ならびに専門分野の最終試験に対して、いずれも十分な内容の解答を示し、研究能力、幅広い知識と判断・対応力を備えており、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) 姫野季之 (大分県)  
 学位の種類 博士(工学)  
 学位記の番号 甲第656号  
 学位授与の日附 令和2年3月24日  
 学位論文題名 佐賀低平地における深層混合処理  
 工法の強度発現特性と促進養生法  
 に関する研究

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 日野 剛 徳  
 (副査) " " 柴 錦 春  
 " " " 伊藤 幸 広  
 " " " 小島 昌 一  
 " 佐賀大学名誉教授 三浦 哲 彦

## 論文内容の要旨

本論文は、佐賀低平地における深層混合処理工法の強度発現特性と促進養生法に関する研究をまとめたものである。深層混合処理工法の品質・出来形管理における改良土の強度発現特性の当否がわずか1日で判断できるようになれば、合理性を高められ、より安全・安心な設計・施工に繋げられる。

第1章では、研究の背景として、有明海沿岸道路(佐賀福富道路)・芦刈南インターチェンジにおける被災とその原因究明の過程で再認識された完新統(蓮池粘土と有明粘土)における深層混合処理工法適用時の強度発現特性の複雑さを取り上げた。地盤環境や土質特性の異なる軟弱な粘性土層が複雑に堆積し、旧クレーク等による高い有機物含有量を示すものまである佐賀低平地において、促進養生法を適用することの意義を述べた。

第2章では、土の性質は1次の材料学的性質から3次の力学的性質の連続性によって成り立つとの三笠の視点に立脚し、深層混合処理工法による改良柱体の強度発現特性に正負の影響を及ぼす要因としての蓮池粘土および有明粘土の地盤環境学的性質、コンシステンシー特性および鋭敏性の観点から既往の研究を俯瞰し、本研究の背景と目的の妥当性を確認した。

第3章では、第2章の結果を受けて、佐賀低平地における深層混合処理工法の適用時に直面している課題を整理し、解決のための最新の研究の展開について論じた。地盤の当初から現在に至る環境変遷の結果としての塩分溶脱現象、地下風化および土中の有機物の影響について検討した。さらに、セメント系固化材の配合量 $C$ の増加に伴う強度発現特性、改良限界および供試体の小型化に関する検討を行った。深層混合処理工法における現場配合量の求め方に関する実務の妥当性を見極めるために、標準土としてのカオリンとベントナイト、さらに蓮池粘土を対象

として、一般軟弱土用と高有機質土用のセメント系固化材による小刻みな $C$ の違いを設けた室内配合試験を行った。改良限界の境を示す $C$ はカオリンにおいて $10\sim 20\text{kg/m}^3$ 、ベントナイトにおいて $20\sim 30\text{kg/m}^3$ 、蓮池粘土において $50\sim 60\text{kg/m}^3$ の値が得られ、それぞれの値以上の $C$ によって強度発現が直線的に増加し、実務上の傾向に重なることを見出した。現行の現場配合量の求め方の妥当性が検証できた反面、なおも尽きない低品質・低出来形からなる改良柱体の存在回避に向けて、室内配合試験強度の引上げや改良柱体打設時の十分な攪拌による品質確保が避けられないことを正論した。その上で、より社会に受け入れられ易く、確実な品質・出来形を早期に見極める方法確立の必要性について述べた。蓮池粘土についてはさらに、小型化した供試体における強度発現特性について検討した。供試体サイズの違いによる一軸圧縮強さ $q_u$ と養生日数に伴う強度発現への影響は認められなかったこと、破壊ひずみ $\varepsilon_f$ は小型サイズの供試体が標準サイズの供試体の約2倍を示し、変形係数 $E_{50}$ の値を約8割に減ずること、小型サイズの供試体を用いて $q_u$ の検討を行う際、同値を8割程度に減ずることによって標準サイズの供試体と同等の検討を行うことができると考えられること、などを示した。

第4章では、改良土の促進養生法に関する検討を行った。まず、カオリンとベントナイトを用い、促進養生法の過程と留意点に関する検討を行った。温水養生時間18時間以上のもので強度発現特性は一定値に収束すること、水温 $55^\circ\text{C}$ 程度の設定は妥当なことを示した。さらに、温水養生において、供試体中心部の温度が常温から温水養生の温度に上昇・収束するには50分程度の時間を要するのに対し、養生後の温度から再び常温まで低下するには80分程度の時間を要すること、後置養生後の一軸圧縮試験のタイミングについて30分後から実施してよいこと、などの過程と留意点について明らかにした。次に、クレーク底泥、蓮池粘土および有明粘土を対象に促進養生法を適用した。一般軟弱土用と高有機質土用のセメント系固化材を用いた。 $C$ の増加に伴う28日養生による一軸圧縮強さ $q_{u28}$ と促進養生法による一軸圧縮強さ $q_{u1}$ の強度比 $q_{u28}/q_{u1}$ の変化は、概ね一定の場合と大きく変化する場合が認められた。他方、 $q_{u28}/q_{u1}$ が大きく変化する場合も $C$ の増加とともに同値は低下し、一定値の場合と同程度に収束する傾向を示すことを明らかにした。クレーク底泥の $q_{u28}=2.2q_{u1}$ (一般軟弱土用)と $q_{u28}=3.9q_{u1}$ (高有機質土用)、蓮池粘土の $q_{u28}=1.5q_{u1}$ (一般軟弱土用)と $q_{u28}=2.2q_{u1}$ (高有機質土用)、有明粘土の $q_{u28}=1.7q_{u1}$ (一般軟弱土用)と $q_{u28}=2.8q_{u1}$ (高有機質土用)の暫定式を示した。これらの結果から、 $q_{u1}$ によって $q_{u28}$ を推定できるとの見通しを示した。

第5章では、以上の一連の検討から得られた最新の知見について総括した。

### 論文審査結果の要旨

学位申請者の姫野季之氏によって取り組まれた本研究は、60年以上に及ぼうとする深層混合処理工法になおも尽きない課題の解明に大きく貢献するとともに、今後の国内外における強度発現特性と促進養生法に関する研究の先導的役割の期待、学術的独自性および創造性が認められ、より広い学術、科学技術さらには社会などへの波及効果が期待できる。本研究は審査付学術論文2編等に報告されており、学位申請者は研究者としての十分な能力を有しているといえる。令和2年2月3日に実施された博士論文公聴会において種々の質問がなされ、いずれも学位申請者の明確な説明により質問者の理解が得られた。以上の審査結果に基づき、本博士論文は博士(工学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員一致で合格と判定した。

さらに、学位申請者の姫野季之氏に対し、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、試験の内容は博士論文に関連する内容に基づいて口述試験を行うことを事前に通知し、令和2年2月3日に実施した。口述試験は博士論文「佐賀低平地における深層混合処理工法の強度発現特性と促進養生法に関する研究」を中心として、特に地盤の堆積環境に関する研究、セメントの固化メカニズムに関する研究、供試体サイズに関する研究、深層混合処理工法に関する研究および促進養生法に関する研究における既往の知見、ならびにそれぞれの既往の知見との間で学位申請者の研究成果の何が一線を画し、新たな学術的独自性や創造性として主張できるかを問う内容が意図され、設問された。学位申請者自身の研究成果を踏まえた適切な回答がなされた。さらに、学位申請者は、口述試験から地盤工学および地盤環境学に関する十分な知識と理論構成力を有していると判断された。以上のように、学位申請者は博士論文を中心とした最終試験において、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) 戴 娟娟 (中華人民共和国)  
 学位の種類 博士(学術)  
 学位記の番号 甲第 657 号  
 学位授与の日附 令和 2 年 3 月 24 日  
 学位論文題名 中国の環境汚染と地域環境格差に関する研究

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 張 韓模  
 (副査) " " 宮脇 博巳  
 " " " 澤島 智明  
 " " " 伊藤 幸広

## 論文内容の要旨

中国の改革開放政策から始まった高度経済成長は、中国をアメリカに次ぐ世界第 2 位の経済大国に押し上げた。しかし著しい地域経済格差問題や、汚染物質排出量の急速な増加による環境悪化、さらに地域の環境不平等といった新しい課題を抱えることになった。こうした問題は中国社会にとって早急に解決が求められる課題である。本研究は、これらの問題意識から出発している。

このような問題意識を持つ本研究は、中国の環境汚染や地域環境格差の実態を分析し、その原因を明らかにすることを目的としている。この目的を達成するために、本研究は 3 つ仮説を立て、環境クズネツ曲線、環境ジニ係数、タイル指数、変動指数の測定や、STIRPAT モデルや空間計量経済モデルに基づいて回帰分析などを行い、これらの仮説を検証した。本研究は 8 章の構成である。章ごとの概要は以下の通りである。

第 1 章では、研究背景、問題意識、研究目的、地域環境格差に関する先行研究や研究方法等について論じた。

第 2 章では、中国の経済成長と経済格差問題を検討し、所得格差の是正策である地域開発政策の効果を議論した。中国経済は 1 人当たり GDP が 1 万ドル近くまで成長したが、しかし沿岸部と内陸部、都市部と農村部、また東部、中部、西部と東北部という地域間貧富の差は大きい。そしてこの格差問題を是正するために 2000 年代に相次いで打ち出された、「西部大開発」、「東北振興」、「中部崛起」といった地域開発政策の効果を明らかにした。

第 3 章では、中国の大気汚染、水質汚濁、土壌汚染など環境問題の現状を検討したのち、地域間環境格差を分析し、中国の環境保護政策の動向を明らかにした。また中国の長期的環境政策の内容を分析し、中国の環境政策が「全国環境保護会議」と「5 ヵ年計画」を両輪として進められてきたことを明らかにした。

第 4 章では、経済発展と環境汚染の関係を分析した。分析の結果、中国における環境クズネツ曲線(EKC)は、汚染物質によってパターンが異なることが明らかになった。1 人当たり GDP と 1 人当たり工業排気ガス排出量の EKC は「U 字型」、1 人当たり GDP と 1 人当たり工業廃水排出量の EKC 「逆 U 字型」、1 人当たり GDP と 1 人当たり工業固体廃棄物産出量は「U 字型」を描いていることが明らかとなった。

第 5 章では、グリーン貢献係数と環境汚染の諸要因について議論した。まず、中国 31 の省級地域のグリーン貢献係数を計算し、地域経済発展と環境汚染の関係を分析した。分析の結果、相対的に環境不平等地域は経済的に未発達な中部地域と西部地域、そして東北部に位置していることが明らかになった。次に、STIRPAT モデルに基づき、2000 年から 2014 年まで各省の工業大気汚染を指標にして、パネルデータを用いた回帰分析を行い、中国の環境汚染に影響を与える諸要因を分析した。分析の結果、GDP、第 2 次産業、エネルギー工業投資額の増加が環境に負の影響を与えることを明らかにした。

第 6 章では、変動係数、環境ジニ係数、タイル指数のそれぞれのモデルに基づき、2000 年から 2014 年までの地域別工業排気ガス排出量、工業固体廃棄物産出量のデータを用いて、環境格差の係数検定を行い、地域内環境格差の程度を分析した。分析の結果、中国では地域環境格差が拡大傾向にあり、特に東部地域環境格差は他の地域より大きいことが明らかになった。また、地域環境格差の原因としては、地域間格差より地域内格差がより大きな影響を与えていることを明らかにした。

第 7 章は、地域内環境格差の原因を明らかにするために、京津冀地域パネルデータを用いて、空間計量経済モデルを利用し、京津冀地域における環境規制競争の不均一性と「スモッグ汚染」への影響を分析した。分析の結果、2005-2008 年に近隣都市の環境規制競争はスモッグ汚染を緩和させたが、2008 年以降スモッグ汚染の抑制効果はなかったことが明らかになった。最後の第 8 章は本研究のまとめと政策提言、課題である。

以上、本研究は、中国の環境決定要因が第 2 次産業比率、GDP、エネルギー工業投資であること、地域環境格差が拡大傾向にあること、地域内環境規制競争が地域内環境格差拡大の原因であること、地域開発政策は地域間環境格差に大きな影響を与えたことなどを明らかにした。このような研究結果により、中国の環境汚染や地域環境格差問題を解消する施策を提案するなど有用な知見が示されている。

令和 2 年 2 月 3 日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。また、本研究は、審

査付学術論文 3 編、学会発表 2 件等で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（学術）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

### 論文審査結果の要旨

学位申請者、戴娟娟氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験を行うことを事前に通知し、令和 2 年 2 月 3 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連する内容について行った。地域環境格差の定義、環境ジニ係数の測定方法、地域開発政策の効果、中国のマクロ経済統計の信憑性について質問が行われ、申請者自身の研究成果を踏まえた適切な説明がなされた。さらに申請者は、口述試験から環境経済学や環境社会学に関して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) 石橋 春香(長崎県)  
 学位の種類 博士(工学)  
 学位記の番号 甲第 658 号  
 学位授与の日附 令和 2 年 3 月 24 日  
 学位論文題名 点波源拘束偏微分方程式に基づく  
 非破壊検査手法の研究

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 寺本 顕 武  
 (副査) " " 上野 直 広  
 " " " 辻村 健  
 " " 准教授 イスラム カーン

## 論文内容の要旨

本論文は、極座標系で表現された波動方程式を因数分解することによって導出される点波源拘束偏微分方程式を利用した非破壊検査手法を世界で初めて提案したものである。

近年では航空機、ロケットや人工衛星といった航空宇宙分野や、産業用機械、大型構造物に対して鉄鋼材料から CFRP 材への転換が進んでいる。特に航空機においては近年の環境問題への対策として軽量化が要求されているため鋼材と同程度の強度を持ちながら非常に軽い材料となる CFRP への転換が急ピッチで進んでいる。CFRP 複合材は、その構造から超音波試験に対して本質的な困難さを伴っている。

- 困難さの一つが高い減衰率である。複合材を構成する基材(樹脂)による粘性減衰、樹脂/繊維界面における散乱が原因と考えられている。
- もう一つは、音速(位相速度)の異方性である。すなわち、線維と平行な向きには速度が速いが、そうでない向きには遅いという性質である。そのため、time-of-flight が方向によって異なるため、傷の正確な位置がもとまらないという問題が起こっている。

そこで、本研究では、通常の 1/100 程度の定周波数(30kHz)のガイド波を用いて検査を行っている。ガイド波は薄板材を導波路として進行するためエネルギー減衰が小さく、欠損がなければ非常に遠いところまで伝搬するという特徴をもっており、一度に広い範囲の観測を可能にする。また導波路中に欠損がある場合は局所的にエネルギーが散逸し、その伝搬に影響を及ぼすため、ガイド波の波面を時々刻々解析することで欠損の存在を特定できる。しかしガイド波の多くは音速が周波数と板厚によって変化するため波面の進行とともに入射パルスの形状が崩れるため、time-of-flight 法の適用が困難である。多層繊維強化複合材では枚数や配向の違いによって弾性率(テンソル量)が変化するため、均質な等方性弾性

体の場合と比較して精密な欠損像の再構成が困難であった。そこで、材料の弾性率の違いによらない性質を用いた亀裂の撮像法として、亀裂で散乱された波動場が点波源拘束偏微分方程式に従うことを利用し、点波源を取り囲む領域の位相速度ベクトル場の発散(divergence)にもとづく欠損の検出手法を提案している。

第 2 章は、著者が博士前期課程に在籍していた時に、指導教員とともに開発した「動的せん断ひずみ解析法」についてレビューを行っている。この手法は、互いに直交する向きの面外せん断歪みの間の線形従属性を用いて散乱波と入射波の波面が重畳する領域を検出するものである。当該手法も、今回の点波源拘束偏微分方程式に基づく非破壊検査手法と同様に、音速や周波数に関係なく欠損の検出を行えるが大きな問題点があった。2 つ以上の独立した平面波が重畳すると、亀裂が存在しないにも関わらず大きな背景値が出力され、亀裂の有無の判別が困難になるという問題である。

第 3 章は、本研究が提案する点波源拘束偏微分方程式にもとづく非破壊検査手法の導出過程を数理的に明らかにしている。本研究が対象としている A0 モードラム波は 2 次元の波動場を形成する。そこで、円筒座標系で波動方程式を表現し、ただ一つの点波源が原点に存在する場合を考え、波動方程式を 1 次の微分方程式の積に因数分解する。すると、それぞれの項は、原点から同心円状に発散する波面と原点に集束する波面を表している。さらに、その座標系の原点を任意の点に平行移動し、微分方程式をベクトルを用いて書き直す。このようにして得られたベクトル微分方程式が、点波源拘束微分方程式である。ベクトル微分方程式は、波動場を表すスカラーポテンシャルの gradient がポテンシャル自身とその時間微分の線形結合で表されることを示している。中でもポテンシャル自身の係数が波動場の位相速度ベクトル場の divergence で与えられるため、ポテンシャルの gradient とポテンシャル自身の相互相関演算により位相速度ベクトル場の divergence を取り出すことができる。このようにして導出された位相速度ベクトル場の divergence は、原理的に点波源近傍で限りなく大きな値をとるので、自然な結果として、点波源の位置、すなわち微小欠損の位置を特定することができる。これが、本研究が提案する『点波源拘束偏微分方程式に基づく非破壊検査手法』の原理である。

第 4 章では、LS-DYNA を用いた数値実験により、薄板材を伝搬するラム波の振る舞いを解析している。等方性弾性体の薄板では、中心に直径 15mm の演習場に等しいタイミングで振動を加えた場合、同心円状に波面が伝搬するが、平織の CFRP 薄板を模擬した場合では強化繊維の方向に沿った方向に早い位相

速度で波面が伝播し、その形状が菱形になることが確認できた。

第5章では、S45C鋼板とCFRPに施された人工欠損の撮像実験を行っている。鋼板に直径1mmの貫通孔を1つあけ、欠損の撮像実験を行った。入射波が照射されてからの経過時間が短いときは、波源からの直接波のみが観察されるが、時間の経過にしたがって、供試体の端で反射された複数の波が重なっている。従来の手法では、ある一定の輝度値がプロットされているが、提案する点波源拘束偏微分方程式にもとづく手法による断面像では、輝度値が低下し、細かな凹凸が現れている。このことは、第2章で述べているように、観測領域を複数の波が重畳しているとき、従来の動的せん断ひずみ解析法では、背景全体に渡って正の値となることを示している。つづいて平織のCFRP板に直径1mmの貫通孔を2つ1mm間隔であけ、欠損の撮像実験を行った。の再構成シルエット像と断面像を比較すると、本研究が提案する手法のほうが、鋭いピークが確認できる。本研究にもとづく手法が、分解能1mmを実現していることが示された。さらにこの時のラム波の波長が22-25mmで有ることから、波長の1/20の分解能が実現できていることが明らかになった。最後に1mm幅の線状欠損に対して像再構成実験を行った。その結果点波源拘束偏微分方程式にもとづき、線状欠損にそった近傍に高い輝度値を出力し、その位置および形状を特定することができること、線状欠損での反射波と入射波が重畳しても、背景の輝度レベルの上昇を招かず、鮮鋭度の高い欠損にシルエットが再構成されることが明らかになった。

第6章では、研究成果をつぎのように総括している。A0モードラム波をもちいた非破壊検査において、点波源拘束偏微分方程式にもとづき、位相速度ベクトル場の発散を再構成することにより、欠損の近接場を撮像できることを理論的および実験的に明らかにした。提案手法は、検査対象表面上の個々の観測点近傍における検査対象表面の法線方向(z軸方向)と検査対象表面に沿った向き(x軸方向)に関する面外せん断ひずみ、z軸方向と表面に沿った向き(y軸方向)に関する面外せん断ひずみと、法線方向の変位との間の相互相関と法線方向の変位の自己相関のみを利用しているため、A0モードラム波の速度分散性に左右されずに、再放射源を特定することができることが確認された。さらに提案手法では複数の独立した平面波が存在する場合においても、点状欠損からの散乱波のみを抽出することができるため、背景雑音強度の低い明瞭な再構成像が得られることが数値的に確認された。また提案手法がCFRP中の欠損検出に適用できることが、実験を通して確認された。

## 論文審査結果の要旨

令和2年2月14日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。また、本研究は、審査付学術論文1編、国際学会発表6件等で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。以上の審査結果に基づき、本論文は博士(理学・工学・学術)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。さらに、学位申請者、石橋春香氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験をおこなうことを事前に通知し、同日これを実施した。口述試験は博士論文を中心として、これに関連ある内容について行った。

(1) 論文が提案する「点波源拘束偏微分方程式」の導出過程について質問をした。その結果、本研究が対象としているA0モードラム波は2次元の波動場を形成する。そこで、円筒座標系で波動方程式を表現し、ただ一つの点波源が原点に存在する場合を考え、波動方程式を1次の微分方程式の積に因数分解する。すると、それぞれの項は、原点から同心円状に発散する波面と原点に集束する波面を表している。このうち、発散する波面を与える1次の微分方程式をベースに点波源拘束偏微分方程式を導出したとの回答が得られた。

(2) つづいて、過去に学位申請者らによって提案された「動的せん断ひずみ解析法」の特徴と問題点について質問した。その結果、互いに直交する向きの面外せん断歪みの間の線形従属性を用いて散乱波と入射波の波面が重畳する領域を検出するものであり、今回の点波源拘束偏微分方程式に基づく非破壊検査手法と同様に、音速や周波数に関係なく欠損の検出を行えるが、2つ以上の独立した平面波が重畳すると、亀裂が存在しないにも関わらず大きな背景値が出力され、亀裂の有無の判別が困難になるとの説明があり、さらに実験結果にもとづいて、「点波源拘束偏微分方程式」による手法の方が、背景ノイズレベルが40dB低減していることが示された。

さらに申請者は、口述試験から波動場のベクトル表現や、偏微分方程式に関して十分な知識とシステム構成能力を有していると判断された。

以上述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) 押川雄紀(福岡県)  
学位の種類 博士(理学)  
学位記の番号 甲第659号  
学位授与の日附 令和2年3月24日  
学位論文題名 ジアニリン化合物から誘導される多座配位子を用いた螺旋型および非螺旋型多核金属錯体の構築と分光学的性質に関する研究

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 山田泰教  
(副査) " " 鯉川雅之  
" " " 高椋利幸  
" " " 大渡啓介

## 論文内容の要旨

螺旋構造を有する化合物はDNAやタンパク質などの例に見られるように、生体内で重要な役割を果たすものが少なくない。このような螺旋型化合物を人工的に構築することは、単に構造の美しさを追求する目的のみならず、独特な構造に由来した新しい機能を創製するためにも非常に重要である。螺旋型化合物の中でも、有機化合物を配位子とする金属錯体は、通常の有機化合物だけでは実現不可能な構造や機能を示し得ることから多大な期待が持たれている。本研究では、適度な剛直さと柔軟さを兼ね備えたジアニリン化合物から誘導される多座配位子を用いた独自のアプローチにより、螺旋型および非螺旋型多核金属錯体の構築と分光学的性質について詳細に検討・追究している。

本論文は、全5章で構成されている。第1章ではジアニリン化合物から誘導される多座配位子を用いた螺旋型および非螺旋型多核金属錯体の構築と分光学的性質に関して、これまでなされている研究の概略を記すと共に、問題点を指摘し、本論文の意義について記述している。

第2章では種々のジアニリン化合物から誘導されるN2O2型配位子を用いて合成した複核亜鉛二価錯体を対象として、アニリン骨格間を連結している部位や二つのイミノ基の相対配置の違いが及ぼす構造と分光学的性質への影響について検討している。その結果、二つのイミノ基が隔たりに応じて、螺旋型あるいは非螺旋型の多核錯体が形成されることを見出している。また、一連の複核亜鉛二価錯体は発光を示すが、アニリン骨格間を連結している部位や二つのイミノ基の相対配置の違いにより、発光の起源が異なることを明らかにしている。

第3章では二つのイミノ基が接近したN2O2型配位子を用いて合成される多核錯体を対象として、金属イオンや置換基が及ぼす構造と分光学的性質への

影響を追究している。その結果、亜鉛二価イオンの場合には置換基に依らず複核錯体が得られるが、発光特性には相違が生じることを見出している。また、銅二価イオンの場合、多核構造に多様性が生じることも明らかとしている。

第4章では架橋配位可能な部位を導入した螺旋型複核錯体を対象とし、希土類イオンとの反応性を検証することにより、ジアニリン化合物から誘導される多座配位子を用いて合成可能な螺旋型金属錯体の応用面について検討している。その結果、多座配位子中のアニリン骨格間を連結している部位や金属イオンの違いにより、希土類イオン捕捉能に選択性を付与できることを見出している。

第5章では研究全体を総括し、記述している。以上のようにジアニリン化合物から誘導される多座配位子を用いた螺旋型および非螺旋型多核金属錯体の構築と分光学的性質に関する研究を通じ、螺旋型金属錯体の合成におけるジアニリン化合物の有用性に関して新たな知見が得られると共に、この種の螺旋型錯体を基盤とした新材料の創出も不可能ではないことを明らかにしている。

以上、本論文は螺旋構造を有する化合物において、入手容易な化合物を用いた簡便合成法により螺旋型および非螺旋型錯体の構築が可能であること明らかとした点で新規性がある。また、螺旋型錯体を用いた希少金属のセンシングや抽出といった応用展開に基礎的な知見を与えた論文としても評価される。

令和2年2月3日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。また、本研究は審査付学術論文1編、国際会議発表1件等で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。以上の審査結果に基づき、本論文は博士(理学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

## 論文審査結果の要旨

学位申請者、押川雄紀氏に対して、学位論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する科目について口述試験をおこなうことを事前に通知し、令和2年2月3日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、研究科専門科目(高機能物質化学特論)、研究科特別講義など単位取得科目について行った。特に、金属錯体の合成法と共に、単結晶X線構造解析や各種分光学的測定法の原理と結果の解釈について質問したところ、申請者から適切な解答がなされた。口述試験の解答から広い知識を有していると判断された。

学術論文の主要分野である金属錯体に関する研究

については、現在までに掲載が決定済のものを含め3編の論文業績を有している。いずれも著名な専門学会誌への掲載であり、その内容から十分な理論構成力および研究遂行能力を有していると判断された。さらに、論文業績は全て英文で記述されており、英語による論文作成能力についても適切な能力もっていることが確認された。

以上のとおり、本申請者は博士論文を中心とした専門科目ならびに専門分野の最終試験に対して、いずれも十分な内容の解答を示し、研究能力、幅広い知識と判断・対応力を備えており、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) MUHAMMAD AL MAHMUD  
(バングラデシュ人民共和国)

学位の種類 博士(学術)

学位記の番号 甲第660号

学位授与の日附 令和2年3月24日

学位論文題名 An Empirical Study of South Asian Migration and Remittances Impact on Poverty and Inequality as well as Economic Development. (南アジアにおける移住と送金が貧困、不平等と経済発展に与える影響に関する実証分析)

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 亀山 嘉大  
(副査) " " 品川 優  
" " " 中西 一  
" " " 帯屋 洋之

## 論文内容の要旨

本研究では、2000～15年という時系列データを活用しながら、バングラデシュを含む南アジア各国を分析対象として、発展途上国の貧困や所得格差の解消のための経済要因を探っている。本研究は、どの分析においてもパネルデータ分析を活用した。パネルデータ分析によって、これまで十分に分析がなされてこなかった南アジアの各国を取り上げて、特に人口移動、所得格差(Gini係数)、海外送金の関係を分析した。

第一段階で、経済協力開発機構(OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development)や世界銀行(World Bank)などのデータベースから教育投資、海外直接投資(FDI: Foreign Direct Investment)、海外送金、教育投資、各国の経済成長(労働生産性の向上)、貧困指数(Gini係数)、人口移動などのデータを入手し15年×7カ国のパネルデータを構築した。

第二段階で、海外直接投資(FDI: Foreign Direct Investment)や教育投資が各国の経済成長(労働生産性の向上)にどのような影響を与えているのかを計量的に分析した。

第三段階で、人口移動、所得格差(Gini係数)、海外送金が相互にどのような影響を与えているのかを計量的に分析した。

第1章は、研究背景の説明である。南アジアの各国の経済発展の状況と世界経済における位置付けを説明した。

第2章では、先行研究のレビューを行い、第3章、第4章、第5章の各章で取り上げる研究課題をより詳細に議論した。先行研究の貢献と限界を提示した

上で、本研究の課題や目的を提示した。具体的には、発展途上国の発展要因、あるいは、発展途上国からの人口移動の要因として、従来、多国籍企業の進出に基づく(外部)効果や貿易の効果、FDIをはじめとするインフラストラクチャーの投資に基づく効果が中心に分析されていたが、新たに教育や海外送金の効果を取り入れて、その効果を検証した。

第3章では、2000～15年における南アジアの7カ国を分析対象として、コブダグラス型の生産関数をもとに、教育投資が労働生産性に与える影響を分析した。推定結果から、教育投資や国の違いが労働生産性に影響を与えていることを示した。

第4章では、2000～15年における東南アジアの7カ国を分析対象として、グラビティモデルをもとに、(日本からアジア各国への)FDIや海外送金が(アジア各国から日本への)人口移動及び旅客(日本から見るとインバウンド)に与える影響を分析した。推定結果から、FDIの効果は有意で正で、日本への人口移動と旅客を推進する要因になっているが、海外送金の効果は負で、日本への人口移動と旅客を抑制する要因になっていることを示した。

第5章では、2000～16年における南アジアの7カ国を分析対象として、Meyer and Shera (2017)を参考にしたグラビティモデルをもとに、人口移動、所得格差(Gini係数)、海外送金が貧困の解消に与える影響を分析した。推定結果から、人口移動、所得格差、海外送金が貧困の解消に、また、海外送金がGDPに影響を与えていることを示した。

第6章は、本研究の結論であり、各章のまとめの後、政策提言と今後の課題を提示した。第3章、第4章、第5章の分析結果をまとめると、教育投資は労働生産性の向上に効果を発揮すること、人口移動と海外送金は貧困の解消に効果を発揮すること、FDIは人口移動を推進する効果をもつが、海外送金は人口移動を抑制する効果をもつことを示した。これらの解釈としては、人口移動と海外送金は貧困の解消に繋がるが、海外送金自体によって発展途上国が豊かになることで人口移動の抑制に繋がっているものと考えられる。

## 論文審査結果の要旨

本研究は、2000～15年という時系列データを活用しながら、著者の出身国であるバングラデシュを含む南アジア各国を分析対象として、発展途上国の貧困や所得格差の解消のための経済要因を探ろうとしたものである。第一段階で、経済協力開発機構(OECD)や世界銀行(World Bank)などのデータベースから教育投資、海外直接投資(FDI: Foreign Direct Investment)、海外送金、教育投資、各国の経済成長(労働生産性の向上)、貧困指数(Gini係数)、

人口移動などのデータを入力し15年×7カ国のパネルデータを構築している。第二段階で、海外直接投資（FDI：Foreign Direct Investment）や教育投資が各国の経済成長（労働生産性の向上）にどのような影響を与えているのかを計量的に分析している。第三段階で、人口移動、所得格差（Gini 係数）、海外送金が相互にどのような影響を与えているのかを計量的に分析している。本研究の計量的な分析手法としては、近年の計量経済分析において標準的な分析手法となっていて、さらに進化しているパネルデータ分析に基づいたものとなっている。これまで十分に分析がなされてこなかった南アジアの各国を取り上げて、特に人口移動、所得格差（Gini 係数）、海外送金の関係を計量分析した点はユニークで、今後さらなる研究の蓄積が求められている分野といえる。

本研究は、全部で6章から構成されている。第1章は、研究背景の説明である。南アジアの各国の経済発展の状況と世界経済における位置付けを説明している。

第2章は、先行研究のレビューを行い、第3章、第4章、第5章の各章で取り上げる研究課題をより詳細に議論している。先行研究の貢献と限界を提示した上で、本研究の課題や目的が提示されている。具体的には、発展途上国の発展要因、あるいは、発展途上国からの人口移動の要因として、従来、多国籍企業の進出に基づく（外部）効果や貿易の効果、FDIをはじめとするインフラストラクチャーの投資に基づく効果が中心に分析されていたが、新たに教育や海外送金の効果を取り入れて、その効果を検証した点はユニークなものである。

第3章では、2000～15年における南アジアの7カ国を分析対象として、コブダグラス型の生産関数をもとに、教育投資が労働生産性に与える影響を分析している。推定結果から、教育投資や国の違いが労働生産性に影響を与えていることを示している。

第4章では、2000～15年における東南アジアの7カ国を分析対象として、グラビティモデルをもとに、（日本からアジア各国への）FDI や海外送金が（アジア各国から日本への）人口移動及び旅客（日本から見るとインバウンド）に与える影響を分析している。推定結果から、FDI の効果は有意で正で、日本への人口移動と旅客を推進する要因になっているが、海外送金の効果は負で、日本への人口移動と旅客を抑制する要因になっていることを示した。

第5章では、2000～16年における南アジアの7カ国を分析対象として、Meyer and Shera（2017）を参考にしたグラビティモデルをもとに、人口移動、所得格差（Gini 係数）、海外送金が貧困の解消に与える影響を分析している。推定結果から、人口移動、所得格差、海外送金が貧困の解消に、また、海外送金がGDPに影響を与えていることを示した。

第6章は、本研究の結論であり、各章のまとめの後、政策提言と今後の課題で締め括られている。第3章、第4章、第5章の分析結果をまとめると、教育投資は労働生産性の向上に効果を発揮すること、人口移動と海外送金は貧困の解消に効果を発揮すること、FDI は人口移動を推進する効果をもつが、海外送金は人口移動を抑制する効果をもつことを示している。これらの解釈としては、人口移動と海外送金は貧困の解消に繋がるが、海外送金自体によって発展途上国が豊かになることで人口移動の抑制に繋がっているものと考えられる。人口減少下の日本では、今後も海外からの人口移動が期待されている。本研究の目的は、発展途上国の貧困や所得格差の解消のための経済要因を探るというものであったが、人口移動と海外送金の関係を含む有益なものとなっている。

以上、本研究は、南アジアの7カ国を分析対象として、各国の経済発展とともに少なくない人口移動が発生していることを課題に据えて、海外送金と人口移動（日本から見ると労働力の受け入れ）はもとより、海外送金と旅客流動（日本から見るとインバウンドの受け入れ）の関係を分析し、海外送金の役割を検証した点で優れているといえる。

なお、本研究は、審査付学術論文3編等に報告したもので構成されている。国内学会やセミナーでも発表を重ね、著者は研究者として十分な能力を有しているといえる。令和2年2月6日（木）に実施した学位論文公聴会で種々の質問があった。著者の対応によって質問者の理解が得られた。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（学術）の学位を授与するに値すると判断され、審査委員全員一致で合格と判定した。

氏名(本籍) 佐藤 梨都子 (佐賀県)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記の番号 甲第 661 号  
学位授与の日附 令和 2 年 3 月 24 日  
学位論文題名 太陽電池の準安定性が積算発電量  
に与える影響に関する研究

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 嘉数 誠  
(副査) " " 田中 徹  
" " " 大石 敏之  
" " 准教授 原 重臣

## 論文内容の要旨

太陽光発電が長期安定化電源として発展するためには、積算発電量の評価を必要とする。太陽光発電は、制御できない日射照度や温度といった気象条件によって出力が変化する。さらに太陽電池の中には、曝露された環境履歴によって発電性能が変化するため、以前と同じ日射照度や温度といった環境であっても、異なる発電量を示すものがある。本研究では、そのような発電性能変化を準安定性と呼び、準安定性が積算発電量へ与える影響について、有機薄膜太陽電池(OPV)と結晶Si裏面パッシベーション(PERC)太陽電池について調査した。

第1章では、太陽電池の種類や特性、太陽光発電システムの概要など一般的なことについて述べ、太陽光発電の現状および本研究の目的を示した。

第2章では、本研究における太陽電池の評価方法を説明した。太陽電池の評価には、国際規格にて標準試験条件(STC)が定められている。産業技術総合研究所九州センターの屋外曝露試験場では、市販の太陽電池が発電設備として系統連系負荷に接続されている。本研究では、室内測定と屋外測定の双方を用いて太陽電池モジュールを評価した。室内測定では、屋外曝露された太陽電池モジュールを定期的に設置架台より取り外し、ソーラシミュレータを用いてSTCでの電流-電圧( $I-V$ )特性を取得した。一方、屋外測定では、太陽電池モジュールを直並列で構成した太陽電池アレイの $I-V$ 特性、斜面全天日射照度と太陽電池の温度を得て、STCにおける日射照度で規格化したシステム出力係数(PR)と、STCの温度である25℃でPRを規格化した $PR^{T=25}$ を算出し、太陽電池の発電性能の経時変化を常時観察可能とした。

第3章では、3年半にわたるOPVの屋外曝露の結果をもとに、実環境下における発電量の経年変化および季節変動について述べた。まず、屋外曝露されているOPVアレイの発電量を解析した結果、これまで報告されている初期の急激な劣化と、続く緩やかな二次劣化を確認した。さらに、これまでの報告に

加え二次劣化中のOPVアレイの発電量は、夏季に上昇し冬季に低下する季節変動を示すことを明らかにした。また、初期状態から約1年間暗所保管していたOPVモジュールへ光照射したところ、発電性能の向上と、その後の暗所保管による発電性能の低下を観測し、さらにこれらが可逆変化であることを確認した。光照射効果による出力上昇飽和に比べ、暗所保管による出力低下は極めて大きな時定数を有するため、日照のある屋外での積算発電量評価には大きな影響はないことが分かった。

OPVアレイの発電量が夏季に上昇する原因の一つに、過去の研究報告から熱回復が考えられたため、熱履歴と発電性能の関係を調査した。二次劣化中のOPVモジュール4枚を、恒温槽で温度一定環境に保持し、発電性能が変化するかどうかを経時的に観察した。冬と夏の屋外モジュール裏面温度を考慮し、保持温度を-10、10、30、60℃としたところ、60℃に保持したモジュールのみ熱回復が見られた。さらに、二次劣化中のOPVモジュールの温度係数を求め、毎月の $PR^{T=25}$ を得たが、発電性能の季節変動は消えなかった。これらの結果から、OPVの熱回復が発電性能の季節変動をもたらすことが明らかになった。

第4章では、PERC太陽電池の発電量について、これまでに室内測定で報告されている光誘起劣化(LID)に焦点を絞り、屋外曝露初期の発電性能の変化について述べた。2型式のPERC太陽電池に対して、異なる回路条件下で、屋外曝露による光照射を実施した。室内測定の結果、劣化の程度は異なるものの、両型式のいずれの回路条件でも屋外曝露開始直後にLIDが観察された。開放回路条件において光照射直後に約5%も出力が低下したモジュールでは、完全回復しなかったものの光誘起回復(LIR)も見られた。曝露中の各回路条件におけるPERC太陽電池の温度の解析から、LIDに比べLIRは高温状態を必要とすることが示唆された。

第5章では、第3章及び第4章で得られた知見から、OPVとPERC太陽電池の発電性能について減衰曲線の推定モデルを提案し、準安定性が積算発電量に与える影響を検討した。推定減衰曲線モデルのフィッティングの結果、系統電源としてのOPVの寿命は曝露開始から3年程度と推定した。また、熱回復による発電性能の回復割合が、長期運用時の積算発電量に与える影響は大きいことが示された。一方、PERC太陽電池は、本研究の解析対象期間では安定化していないと考えられ、推定モデルは得られなかった。

第6章では本論文で得られた結果についてまとめ、今後の課題についても触れた。本論文では、環境履歴により発電性能が変化する準安定性に焦点を絞った。積算発電量の評価のためには、劣化や準安定性に加え、日射照度や温度のみならず、スペクトルなどを考慮した発電量評価も必要であり、今後の課題

とする。

### 論文審査結果の要旨

学位申請者、佐藤梨都子氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述で行うことを事前に通知し、令和2年2月14日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連ある内容について行った。半導体デバイスの物理、太陽電池の原理について問うたところ、申請者自身の知識、研究成果を踏まえた適切な説明がなされ、申請者は電気電子工学、具体的には半導体デバイス工学に関して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした電気電子工学、具体的には半導体デバイス工学の十分な知識と理論構成力を有していると判断され、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) 岡本豊(大阪府)  
 学位の種類 博士(工学)  
 学位記の番号 乙第94号  
 学位授与の日附 令和2年3月24日  
 学位論文題名 渦法による波浪と浮体構造物の  
 非線形相互干渉計算法の開発

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 永田修一  
 (副査) " " 萩原世也  
 " " " 木上洋一  
 " " 准教授 今井康貴

## 論文内容の要旨

今日、風力エネルギーや波浪エネルギー等を含む海洋再生可能エネルギーの利用のために、浮体構造物の利用が積極的に進められている。風力エネルギーを利用する浮体式洋上風力発電システムにおいては、厳しい気象・海象条件下で安全に供用するために、浮体底部へのフィン等の付加物の設置による浮体の動揺低減化が図られる場合が多い。また、波浪エネルギーを利用する浮体式の波力発電システムでは、発電量の向上を目的に、動力取り出し装置と連結された浮体の運動が入射波と共振状態になるよう設計される。このような装置では、浮体端部から生じる渦の流体内部への拡散に伴うエネルギーロスが、浮体の挙動や発電性能に大きく影響するため、装置の設計に当たっては、粘性流体計算ツールが必要となる。そこで、本研究では、粘性流体の解析が可能で、現実の3次元問題へも容易に拡張可能な“2次元渦法に基づく浮体運動計算法”を新しく提案した。提案した計算法を、没水平板の強制鉛直振動、三角形や矩形断面を持つ浮体構造物の波浪中運動計算に適用して、浮体の運動等の計算結果と実験結果を比較することにより、計算手法の有効性を示した。本論文は以下の6章からなる。

第1章では、まず、本研究の背景と従来の研究について述べた。次に、本研究で提案した、流速、渦度、流体圧力を未知量とする渦法による2次元粘性流体計算法は、3つの基礎式、即ち、①流速に関する境界積分方程式(一般化されたBiot-Savartの式)、②渦度に関する微分型の運動方程式(渦度方程式)、③境界上の総エネルギー(圧力、位置エネルギー及び運動エネルギーの和)に関する境界積分方程式、に基づくため、各時刻における連立方程式の未知量が流体境界のみに存在する境界要素法的な解法となり、3次元解析への拡張が容易等の利点を持つことを述べた。

第2章では、2次元渦法に関する数値計算法について述べた。具体的には、渦度方程式の解法、渦度

場の表現方法、一般化されたBiot-Savartの式、渦の粘性拡散表示法、物体表面から流体内部への渦の導入モデル、物体に作用する流体圧力の算定方法、二重節点法を用いた積分方程式の離散化法、水面と壁面の交点における流速の拘束条件を順次詳述した。

第3章では、物体表面から流体内部への渦導入モデルとしての“渦層モデル”の渦層厚さを定めるために、渦法厚さを解析パラメータとして、本解析法を、一様流中の2次元円柱周りの流場解析に適用した。円柱後方の流速分布に関する計算値と実験値を比較して、実験値との一致度が最も良い渦層厚さを決定した。

第4章では、自由表面条件の計算精度を検証するために、一定水深域を一方向に進行する水面波の追跡問題を取扱い、水面変位に関する計算値を微小振幅波理論に基づく規則波の解析解と比較し、計算法の有効性を示した。次に、自由表面下の水中で、鉛直方向に強制振動する水平平板に作用する鉛直方向流体力計算に関して、物体表面から流体内部への渦度の発生方法として、滑らかな表面には渦層モデルと、平板の角部からの渦の発生方法にVorticity shedding modelを併用する方法を提案し、計算値と実験値を比較することにより、その有効性を示した。

第5章では、波浪中の浮体運動問題に対する本計算法の有用性を検証するため、2本の線形ばねで係留された没水円柱、矩形及び三角形浮体の波浪中非線形運動解析を実施し、計算値を実験値と比較した。没水円柱と矩形浮体の運動計算では、浮体の運動に関する計算値と実験値は良く一致したが、流体の運動を非粘性流体の無渦運動とした計算結果と渦法計算結果から得られた結果との間に差異は、ほとんど認められなかった。一方、三角形浮体の運動計算では、流体の運動を非粘性流体の無渦運動とした従来の計算法においては、HeaveとPitchの固有周期付近で、浮体運動に関する計算値と実験値には大きな差が現れた。一方、今回提案した渦法計算結果においては、HeaveとPitchの固有周期付近で、浮体運動に関する計算値と実験値は概略一致しており、粘性影響を考慮できる提案手法の有効性が示された。

第6章は結論で、以上をまとめている。

## 論文審査結果の要旨

本研究で提案した、粘性流体を対象とした“2次元渦法に基づく波浪中浮体運動解析手法”は、従来の計算手法で推定が困難であった浮体の固有周期付近の周波数帯も含め、浮体の運動を精度良く評価することが可能な浮体運動計算手法であることがわかった。本解析手法では、渦度、流速、流体圧力を未知量としており、3次元問題への拡張が容易であるため、更に実用的な設計ツールへ展開が可能である。

本研究は、今後の海洋工学の発展に大いに貢献する内容と認めるものである。

令和2年2月7日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。また、本研究は、審査付学術論文2編、学会発表3件等で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。以上の審査結果に基づき、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

令和2年度理工学部  
集報・サイエンテック編集専門委員会

委員長	上	田	俊	(情報部門)
委員	市	川	尚志	(数理部門)
	江	良	正直	(化学部門)
	山	内	一宏	(物理学部門)
	村	上	天元	(機械工学部門)
	堂	蘭	浩	(電気電子工学部門)
	三	島	悠一郎	(都市工学部門)

令和2年6月22日 発行

編集兼 〒840-8502 佐賀市本庄町1  
発行者 佐賀大学理工学部

Reports of the Faculty of Science and Engineering,  
Saga University, Vol. 49, No.1, June, 2020

Contents

The Persistent Homology Analyses in Particle and Nuclear Physics .....	Hiroaki Kouno, Takehiro Hirakida ..... 1
Summary and examination of doctoral thesis.....	7

Published by the Faculty of Science and Engineering,  
Saga University,  
1 Honjo-machi, Saga-shi 840-8502, **JAPAN**