

**平成28年度 日中韓フォーサイト事業
中間評価資料（進捗状況報告書）**

1. 概要

| | | | |
|--------------------------|--------------------|--------------|---|
| 研究交流課題名 (和文) | 応用逆問題のモデル化とその数値計算 | | |
| 日本側拠点機関名 | 東京大学 大学院数理科学研究科 | | |
| 研究代表者 所属・職・氏名 | 大学院数理科学研究科・教授・山本昌宏 | | |
| 相手国側 | 国名 | 拠点機関名 | 研究代表者 所属・職・氏名 |
| | 中国 | 浙江大学 | Department of Mathematics・Professor・ BAO Gang |
| | 韓国 | ヨンセイ大学 | Computational Science & Engineering Mathematics・Professor・SEO Jin-Keun |

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

○申請時の研究交流目標

本プロジェクトの主要課題である逆問題によるモデルリングと高機能科学計算手法において、中国、韓国側の研究者・研究機関とは長い協力関係にある。特に日本側PIと中国側の研究者とは2000年以来現在に至るまで、新日鐵及び新日鐵・住友金属などとの共同研究で産業界における諸問題の逆問題に基づいたモデル化や計算手法を編み出しイノベーションを生み出してきた。高機能科学計算のためには数値計算手法のためには現象の適切なモデル化が必要であり、そのようなモデル化を定量的に行う逆問題の研究が重要である。本プロジェクトではそのような三国間の共同研究の実績に基づいて、以下を目指す。

研究目標：

- (1) 現代のテクノロジーを支え、公共の福利や健康などを保証するために本質的な課題の数学的な解決ならびにそのためのモデル化を行う。
- (2) モデル化、数学解析、イメージング、数値手法という一連の問題の解決を同一のプロジェクトチームで実施することにより、実用に耐える高機能科学計算手法を確立する。

現象から見た本プロジェクトの課題：

- (1) 非侵襲的な医学診断技術における医学イメージング計算法によるイノベーション。
- (2) センサムやPM2.5などの汚染物質の拡散のより精度のよい将来予測と有効な対策のためのシミュレーション技術としての科学計算法。

数学から見た本プロジェクトの問題：逆問題の数学解析と数値解析手法

長期的な視野からの目標：逆問題によるモデル化に関する研究は人間生活に直結した複雑な現象の解析のためにますます需要が増えていく。そのような重点分野において若手研究者の人材育成を日中韓で解決の必要性が高い上記の課題解決の現場に参加してもらうことを行う。

○目標に対する達成度

上記目標に対する2年分の計画について

- 研究交流目標は十分に達成された。
- 研究交流目標は概ね達成された。
- 研究交流目標はある程度達成された。
- 研究交流目標はほとんど達成されなかった。

【理由】

1. 課題である応用逆問題の解決を中韓の研究者と連携して図り、数学的に意義ある成果を収めているだけでなく、産業界などから実用性の観点からも評価されているため。

数学の有用性を産業など異分野に浸透、認知を得ることは、わが国では最近、ようやく緒についた。このような活動のためには、まずは専ら抽象的すぎると受け取られがちな数学の研究のあり方を、現象解明に柔軟な力を発揮することを個々の課題だけに単発に見せるだけでは不十分であり、国際性を持った数学者の一定のサイズの集団で取り組むことによって初めて、特に逆問題の関連分野において数学力を産業界、異分野で発揮させることができるが、本プロジェクトによる体制はそのような機能をもつバーチャルな研究拠点としての性格を担い始めている。本プロジェクトにおける産学、異分野連携の主な事例は以下の通りである。

(a) セシウムの長期汚染マップを土壌汚染に基づく逆問題の解法によって改良したこと：参加者の羽田野祐子、山本昌宏らによる業績の一端は、「数学セミナー」2015年4月号(pp.66-72)、同6月号(pp.62-68)に公表されている。そのような成果は大気汚染の問題と関連させて、中国側の復旦大学の参加者とも議論し、適用の可能性の拡大を図っている。

(b) 製鉄過程に現れる材料科学の逆問題に関連して、参加者のY. Liu, D. Jiang, 山本昌宏らにより、望ましい設計条件を双曲型方程式の逆問題によって決定した。これは新日鐵住金との共同研究課題と密接に関連している。

(c) 東和精機株式会社から提示された自動歪取の最適設計について、視えない材料断面形状決定の逆問題の知見を活用してアルゴリズムを開発し、品質向上につなげた。「数学セミナー」2015年12月号(pp.73-79)、2016年2月号(pp.70-75)、同5月号(pp.66-72)に成果の一端が紹介されている。

(d) 海洋研究開発機構から提示された個体群の成長にともなう自己間引きについてのメカニズムを中国からの若手の参加者とともに偏微分方程式論の見地から解明した。

2. 本プロジェクトを通じて、これまでの共同研究の範囲が、応用逆問題を中心にして一層拡充し、研究拠点の構築につながることを期待できるため。

個々の参加者はこれまで、個別的かつショートレンジな研究を行いがちであったが、本プロジェクトの枠組み・ミッションに従い、より広範な国際的な共同研究を継続的に実施できるようになっている。そのような共同研究の例として (a) 材料力学における逆問題 (b) 非整数階偏微分方程式論の構築と逆問題をあげることができる。そのような共同研究が本プロジェクトによりある程度の集中度で遂行されているので、研究成果だけではなく、これまで以上に国際的な認知度が増大した。

3. 応用逆問題を樞子にした産学連携及び異分野連携を本プロジェクトにより展開することにより、我が国だけでなく、中韓の若手研究者の効果的な育成につながっていると判断されるため。

第1項で述べたように、本プロジェクトは産学連携、異分野連携において逆問題を中心としたバーチャルな研究拠点としての性格を担い始めているが、そこには若手の研究者が参加し、各自の応用解析の知見を活かして課題解決にあたる活動を行っている。中国、韓国を含めて従来では、数学と産業界の連携は稀であったが、

本プロジェクトでは、そのような連携は恒常的になされており、若手研究者にとって他では得難い実践の場を提供している。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1) これまで(平成28年7月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※過去2年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

平成27、28年度に山本昌宏、羽田野祐子が環境汚染関連の研究連絡、議論のため復旦大学、ヨンセイ大学に派遣された。セシウム測定に関連する逆問題の共著論文を復旦大学の参加者と準備中である。平成26年12月に日本側参加者がソウルで開催された応用偏微分方程式に関するワークショップに派遣され、研究成果発表、連絡を行った。各年度ともに中国側参加者を日本に招へい(受入)し、非整数階拡散方程式の逆問題やリモートセンシングに関する共同研究を遂行した。また、平成27年12月にはソウルで開催されたワークショップで、応用逆問題の解決に役立つと期待できる代数幾何的手法について参加者が派遣され、研究討論と連絡を行った。国内で開催された産業界からの課題解決のためのスタディグループと「偏微分方程式の逆問題とその応用の新展開」で参加者が成果を発表し、研究打合せを行った。平成28年3月と4月には日本側の参加者が復旦大学および東南大学(南京)を訪問して、地熱発電に関連した不均質媒質における拡散などに関する研究打合せを行った。上記で議論された主な課題は以下の通りである。

現代のテクノロジーを支え、環境保全などのためのよりよいシミュレーションやモデル化に必要な多様な応用逆問題の数学解析とそれに基づいた合理的な数値解析手法の開発を行った。具体的な課題としては以下がある：

1. セシウムなどの汚染物質の拡散の予測の改良のためのモデル方程式としての非整数階拡散方程式の順問題の研究、解の定性的な性質の解明
2. 非整数階拡散方程式の階数や係数などを解の限定された情報から決定する逆問題の一意性、安定性の確立と数値解法の開発
3. 製造業などにおける最適化のための逆問題の数値解法

○セミナー

| | 平成26年度 | 平成27年度 | 平成28年度(7月末まで) |
|------|--------|--------|---------------|
| 国内開催 | 0回 | 0回 | 0回 |
| 海外開催 | 1回 | 1回 | 1回 |
| 合計 | 1回 | 1回 | 1回 |

【概要】

平成26年度：韓国済州島において、平成26年11月21-23日に本プロジェクトの日中韓の主な参加者が集まりキックオフのための会合を持ち、各自の研究成果、活動を報告し、全員で、本プロジェクトが目的とする応用分野に現れる逆問題の様相とその数学解析ならびに可能な数値手法について議論を行った。また、我が国における逆問題を柱とした産学連携の活動について報告があった。そのような報告に基づき、環境工学における逆問題の共同研究、医用診断におけるイメージングに関する逆問題の議論を開始した。

平成27年度：中国杭州市において、「International conference on Inverse Problems, Imaging, and Applications」(平成27年8月6-9日)を開催し、以下のような議論がなされた：(1) 東京大学と浙江大学の研究者グループで討議していた逆問題の正則化手法の具体的な応用についての議論を深め、韓国側から医用診断への応用についての具体的な方策を会期中に討議した。(2) 双曲型方程式のソース項決定逆問題。

○研究者交流

【概要】

応用逆問題はきわめて多様であり、その解決のために必要となる数学の知見も多岐にわたる。離散幾何を含む逆問題に関連した研究課題における研究者交流として研究集会に参加、成果発表ならびに知見の収集にあたった。本プロジェクトのスコープを狭く限定しないように、研究課題遂行とは必ずしも密接に関連していないが将来的に関連しそうな話題について派遣をし、研究連絡などにあたってもらった。かなり自由度をもった目的であって、派遣人数は小規模であり、具体的には以下の通りである：平成 26 年度に若手 1 名を含む 3 名を中国に、27 年度には 1 名を中国に、28 年度 7 月末までに若手 2 名をそれぞれ中国と韓国に派遣した。

(2)(1)の研究交流活動を通じて申請時の計画がどの程度進展したかを「学術的側面」「若手研究者の育成」及び「日中韓における継続的な研究拠点の構築」の観点から記入してください。

○学術的側面

(1)非侵襲的な医学診断技術における医学イメージング計算法の開発：この課題に関連しては基礎的な部分のサーベイなどが終了し、次年度に向けて活動を本格化させる目途をつけることができた。

(2)セシウムや PM2.5 などの大気中ならびに河川における汚染物質の拡散のより高精度の将来予測と有効な対策のためのシミュレーション技術としての科学計算法：中国側の参加者とともに基礎方程式である非整数階偏微分方程式や関連する方程式やその逆問題の数学解析の共同研究を集中的に取り組み、成果を収めた。成果の一部は出版されている(論文リスト参照)。特に階数が 0 と 1 に間の一般の非整数階偏微分方程式の初期値・境界値問題の解の一意存在と正則性、漸近挙動についての包括的な成果を確立した論文ができあがりつつあり、学会誌に公表予定である。また日本語であるが、山本昌宏は、学部学生にも広く問題を知ってもらい興味をもってもらうために紹介の論説「応用解析—非整数階偏微分方程式の新理論とその応用」(「数学の現在」第 3 巻、東大出版会、2016 年、pp. 188-208)を出版した。

○若手研究者の育成

逆問題手法は、環境問題や医学診断のような我々の生活や産業界の課題解決のために不可欠となり、ますます多様化している。そこで、安全・安心に直結し経済効果をも産み出す応用逆問題は、将来的にも重要になってきている。

そのような課題解決のためには、幅広い研究者、特に若手研究者が参入することが強く求められており、研究の実践を通じた院生からの若手研究者の育成が必要である。本プロジェクトのそのような社会に開かれた観点から、応用逆問題に関連した産業界からの課題の数学による集中的な解決のためのスタディグループ・ワークショップを日本側研究代表者が中心となり各年度あたり 3 回開催し、そのうちの 2 回を本プロジェクトに関連づけて、中国、韓国の若手研究者を招き、実践的な解決に従事してもらい、それを通じて、数学的に意義深いだけでなく真に应用可能な成果を産業や異分野に提供し高い評価を得ている。成果の例としては汚染物質拡散のより良い予測のために拡散現象を支配している物理パラメータの決定を数学的な手法によって向上させた例や、シャフトの自動歪取のための最適プロセスの開発による製品の品質改善などがある。このような人材育成を通じて、日中韓の若手研究者に数学の知識を学んでもらうだけでなく、数学者の論理・思考様式に限定しただけではうまくいかない産学連携や異分野連携の実施において、数学の知見をいかに説得力をもって適用していくかなどのコミュニケーション能力や異分野の困難を数学をベースにしてどのように突破していくかなどについてのノウハウを身につけてもらっており、将来的にこの分野を担い、我が国をハブとした研究者ネットワークを構成する若手人材を輩出してい

るものと判断している。そのような人材としては例えば本拠点機関における大学院生の参加者や平成27年度ならびに平成28年度7月末までに招へいた上海・復旦大学の数理科学研究科の院生の例がある。

○日中韓における継続的な研究拠点の構築

前項で述べたように、数学の応用への期待と需要が増加しており、異分野連携が益々要請されている。我が国では、数学によるイノベーションを目指した活動が盛んになっている。このような数学をコアにした産学連携、異分野連携は、重要性が広く認識されているにも関わらず、中国や韓国ではまだ十分とはいえず、本プロジェクトは中国・韓国では例を見ない目覚ましい成果と理解されている。特に診断技術や異常操業の検知などに関連した逆問題の研究は産業界でも重要視されている。このような状況の下で応用逆問題をコアにした産学・異分野連携及び連携を通じた数学理論の深化・発展を目指す、このような異分野と数学の間で双方向かつ継続的な協働研究を担う研究教育拠点が日本側拠点機関において実現されている。

さらに、拠点機関においては、本研究代表者を始めとして、アジア以外の欧米などからも多くの研究者が滞在し共同研究に従事しており、本プロジェクトの活動を世界的視野で円滑に展開することが可能になっている。

例えば、本プロジェクトの日本側拠点機関に滞在している中韓の参加者と欧米の訪問研究者の議論や共同研究が進んでいる事例もある。このような協働研究の場は、研究拠点の構築にとって重要なことである。

4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での「日本側拠点機関の実施体制」、「中国・韓国の拠点機関との協力体制」及び、「日本側拠点機関の事務支援体制」について記入してください。

○日本側拠点機関の実施体制（拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等）

本研究代表者は応用逆問題において国際的に活動しており、グローバルな研究者のネットワークのかなめの立場にある。そのような立場を活かして、国内の協力機関との連携も密であると判断している。代表者は逆問題に基づき、平成11年以来、産業界や国立の研究所などとの共同研究に従事しており、そのような異分野との連携により広い人的ネットワークを有しており、それを本プロジェクトのために活用できる。

○中国・韓国の拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

役割分担：

中国：逆散乱問題の数学理論と数値解析法、逆問題の数値手法としての正則化

韓国：医用イメージングの数理と応用

以上は、日本での研究が手薄な分野で、本プロジェクトの枠組みで中韓の研究者と協力している。

日本側：非整数階微分方程式を含む偏微分方程式論による逆問題。中韓では偏微分方程式論に基づく応用逆問題が手薄であるので、この部分を日本側が補う。また、数学をコアにした産学、異分野連携に関しては日本側がイニシアティブを取り、それに中韓の研究者が参加する。

ネットワークの構築：

中国側の拠点機関である浙江大学を中心に、南京の東南大学、上海の復旦大学を含めて本プロジェクトの中国におけるネットワークが拡大している。特に、上記の3つの大学は中国において応用解析などの分野で基幹となる大学であり、そこからの本プロジェクト参加者は広西壮族自治区、山東省、北京などを含む中国全土で種々の研究集会を組織しており、我が国の参加者が参加し研究打合せをする機会が本プロジェクト開始とともに

に順調に増えており、研究者ネットワークが拡大している。韓国とも拠点機関であるヨンセイ大学をコアに、そこと協力関係または共同研究を行っている、梨花女子大学、インハ大学やK I A Sといった研究所との連携が進んでいる。以上のことから、日中韓のネットワーク構築が進行していると判断している。

○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

日本側拠点機関の事務組織により効果的に支援されており、円滑な運営がなされている。