

2023年度共同利用研究報告書

2024年02月18日

所属・職名 東京理科大学理学部第一部応用数学科・助教

石原 侑樹

| | | 整理番号 | 2023a006 | |
|----------|--|-----------------------|----------|----|
| 1.研究計画題目 | 記号計算の高速化と産業課題解決への応用 | | | |
| 2.新規・継続 | 継続 | | | |
| 3.種別 | 若手・学生研究 | | | |
| 4.種目 | 短期共同研究 | | | |
| 5.開催方法 | ハイブリッド開催 | | | |
| 6.研究代表者 | 氏名 | 石原 侑樹 | | |
| | 所属 部局名 | 東京理科大学理学部第一部応用数 学科 | 職 名 | 助教 |
| 7.研究実施期間 | 2023年11月13日(月曜日)~2023年11月17日(金曜日) | | | |
| 8.キーワード | 記号計算（計算代数、数式処理）、グレブナー基底、限量子消去、数理最適化、実代数幾何学、準素イデアル分解、数値数式融合計算、非線形制御理論 | | | |
| 9.参加者人数 | 106人 | | | |

10.本研究で得られた成果の概要

本研究計画は、2022年度IMI共同利用研究「限量子消去の効率的なアルゴリズムの構築と産業課題解決への応用」の継続研究である。本研究では、昨年度浮上した課題の解決を動機の一つとし、また記号計算を産業課題の解決に応用するという目的で、様々な分野の専門家を招き共同研究を行った。その結果、公開日程では、昨年度のおよそ2倍の人数である106名の方にご参加いただき大規模な研究交流がなされた。本研究で得られた成果として下記が挙げられる。

- (1)これまでの記号計算の知見を踏まえた最新の研究動向の共有
- (2)分野の垣根、大学・企業の垣根を超えた研究交流
- (3)昨年度に提起された課題に対するアプローチについての意見交換

まず(1)について、公開日（11/14,15）において5名の方の招待講演を実施した。その内容は記号計算を中心のテーマとし、人工知能、最適化理論、統計学、制御理論などの関わりについて、最新の研究の動向をご講演いただいた。各講演には質疑応答の時間も設けており、対面・オンラインから多くの質問が挙げられ、双方向の研究交流となった。

次に(2)について、今回の共同利用計画では、分野、大学、企業問わず様々なバックグラウンドの方が参加された。特に企業からの参加としては、招待講演にて、Maplesoftの岩ヶ谷先生、富士通株式会社の穴井先生に産業の視点からの記号計算のこれまで、そして未来についてご講演いただいた。その中には昨今話題となっているChatGPTなどの生成AIとの関連もあり、今後の研究を考える上での重要な指針などが得られた。

最後に(3)について、非公開日程にて昨年度の課題について議論を行なった。非公開日の初日では、招待講演のテーマの前提知識であるQE、Transformer、因子分析について参加者の間で知見を共有し、記号計算の高速化との融合も踏まえて議論を行なった。11月16日においては、昨年度のテーマであるQEについて、組織委員が開発したソフトウェア上で計算の実演を行った。11月17日においては、制御理論に関して議論を行い、参加者の間で問題を改めて共有し、課題設定を明確にした。

昨年度ではQEに限定して研究を行っていたが、記号計算に範囲を拡張したことで、研究交流の規模拡大や課題解決へのアプローチの明確化など成果が広がったと考えられる。また今回得られた成果を元に、論文の出版やさらなる共同研究を計画している。

九州大学 IMI 共同利用・短期共同研究

記号計算の高速化と産業課題解決への応用
Speeding up of symbolic computation and its application
to solving industrial problems

成果報告書

◆ 実施概要

- ・ 組織委員
石原侑樹（東京理科大学理学部第一部応用数学科・助教）[研究代表者]
深作亮也（九州大学数理学研究院数学部門・助教）
池松泰彦（九州大学マス・フォア・インダストリ研究所・助教）
神戸祐太（三菱電機株式会社・リサーチアソシエイト）
岩根秀直（リーディング・スキル・テスト株式会社・会社員）
伊藤勝（日本大学理工学部・助教）
小林宗広（株式会社シルフ・インスティテュート・会社役員）
湯野剛史（九州大学大学院システム情報科学研究院・助教）
計良宥志（千葉大学大学院工学研究院・助教）
- ・ 共催
九州大学マス・フォア・インダストリ研究所、
株式会社シルフ・インスティテュート
- ・ 種別・種目
若手・学生研究-短期共同研究
- ・ 開催方法・開催場所
現地開催とZoomミーティングによるハイブリッド開催
公開日：JR博多シティ9階会議室(1)
非公開日：九州大学 伊都キャンパス ウエスト1号館 D棟 4階
IMIコンファレンスルーム (W1-D-414)
- ・ 研究実施期間
公開期間：2023年11月14日(火)、15日(水)
非公開期間：2023年11月13日(月)、16日(木)、17日(金)
- ・ 参加者数
106名
- ・ ウェブサイト
<https://joint.imi.kyushu-u.ac.jp/post-9069/>

◆ 本研究計画の背景・動機・目的

記号計算 (Symbolic Computation) は数学の種々の計算を記号的に取り扱う計算手法である。記号計算は数値計算とは対照的に誤差の生まれない計算であり、問題の背景にある数学的な構造を分析しやすい特徴を持つ。しかしその反面、記号計算は数値計算に比べ計算コストが大きいという欠点がある。例えば、限量子消去 (QE) の計算量は二重指数的であることが知られており、2022年度のIMI共同利用研究「限量子消去の効率的なアルゴリズムの構築と産業課題解決への応用」においては、QEについての短期共同研究を行なった。その際に新しく浮上した課題 (QEを数理最適化理論や制御理論へ応用するための理論の構築など) について取り組むことが本研究計画の動機の1つである。本研究の目的は、継続研究として、QEを含む様々な記号計算のアルゴリズムを対象に研究を行う。また、様々な分野におけるこれまでの記号計算のアルゴリズムを見直し、産業に登場する問題の解決に応用することを目指す。

◆ 本研究で得られた成果

本研究においては昨年度の継続研究として、記号計算を産業課題の解決に応用するという目的で、様々な分野の専門家を招き共同研究を行った。その分野は計算機代数、代数幾何学、暗号理論、統計学、最適化理論、制御工学、機械学習など多岐に渡る。また、昨年度のおよそ2倍の人数である106名の方にご参加いただき、研究交流の規模が拡大したといえる。本研究で得られた成果をまとめると、下記のことを挙げられる。

- (1) これまでの記号計算の知見を踏まえた最新の研究動向の共有
- (2) 分野の垣根、大学・企業の垣根を超えた研究交流
- (3) 昨年度に提起された課題に対するアプローチについての意見交換

その詳細を記載する。まず(1)について、公開日 (11/14,15) において、5名の方の招待講演を実施した。その内容は記号計算を中心のテーマとし、人工知能、最適化理論、統計学、制御理論などの関わりについて、最新の研究の動向をご講演いただいた。各講演には質疑応答の時間も設けており、対面・オンラインから多くの質問が挙げられ、双方向の研究交流となった。

次に(2)について、今回の共同利用計画では、分野、大学、企業問わず様々なバックグラウンドの方が参加された。特に企業からの参加としては、招待講演にて、Maplesoftの岩ヶ谷先生、富士通株式会社の穴井先生に

産業の視点からの記号計算のこれまで、そして未来についてご講演いただいた。その中には昨今話題となっているChatGPTなどの生成AIとの関連もあり、今後の研究を考える上で非常に重要な視点であるといえる。

最後に(3)について、非公開日程において、特に昨年度の提起された課題の解決について議論を行なった。非公開日の初日においては、招待講演のテーマの前提知識であるQE、Transformer、因子分析について、参加者の間で知見の共有を行なった。その際には、記号計算の高速化との融合も踏まえて議論を行なった。11月16日においては、昨年度のテーマであるQEについて、組織委員が開発したソフトウェア上で計算の実演を行った。11月17日においては、制御理論に関して議論を行い、参加者の間で問題を改めて共有し、課題設定を明確にした。

以上のように、今回の共同利用研究において、前年度の継続研究として、新しい成果を得られたといえる。今後も引き続き共同研究を続けていくことで、現時点で浮かび上がっている課題に対し解決策を見出すことが期待される。

最後に、今回の研究計画を遂行するにあたりご協力いただいた九州大学関係者の方々、ご講演いただいた招待講演者の方々、ご参加されたの方々、会場費を支援いただいた株式会社シルフ・インスティテュートの方々に、この場を借りて多大なる感謝を申し上げます。



開会式の様子



招待講演の様子

非公開プログラム日程とテーマについて

- 11月13日：QE、Transformer、因子分析について
- 11月16日：開発したQEのソフトウェアの機能について
パラメトリックボーダー基底について
- 11月17日：記号計算の制御理論への応用について

九州大学 IMI 共同利用・短期共同研究 公開プログラム

記号計算の高速化と産業課題解決への応用
Speeding up of symbolic computation and its application
to solving industrial problems

会場：JR博多シティ9階会議室(1)

主催：九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

共催：株式会社シルフ・インスティテュート

11月14日（火）

9:45-9:55

研究代表者挨拶

10:00-11:00

講演者：岩ヶ谷崇（Maplesoft）（オンライン講演）

講演タイトル：産業課題へのソリューションを考える～数式処理と AI への期待～

アブストラクト：産業における技術課題に対して、様々な形で、数式処理技術は活用されている。一方で、それらの課題への取り組みにおいては、根本的な難しさが従来から存在する。本講演では、産業分野におけるシステムシミュレーションや設計計算など、数式処理技術の実用例を紹介し、どのような観点で利用されているかを再確認する。また、その技術を適用する際に求められる難しさを、利用者の観点で解説し、その延長線上にある AI への期待を議論する。

11:00-11:10

休憩

11:10-12:10

講演者：関口良行（東京海洋大学）

講演タイトル：半正定値錐に対する交互射影法の明示公式

アブストラクト：交互射影法は、初期点を二つの集合に交互に射影しながら共通点を求めるアルゴリズムである。画像復元、位相回復、制御理論、行列分解など様々な応用が知られている。本研究では、非横断的に交わる半正定値錐とアフィン平面に対する交互射影列の解析的、および有理型明示公式を求める。また、それらの公式を応用し交互射影法の厳密収束レートを求める。本研究は九州大学の落合啓之氏と協隼人氏との共同研究である。

12:10-14:00

休憩

14:00-15:00

講演者：穴井宏和（富士通株式会社）

講演タイトル：AI とともに織りなす数式・記号計算の新たな地平

アブストラクト：数式処理・計算機代数の研究は人工知能（AI）研究と密接な関係を持ちながら相互に影響を及ぼしてきた。数式処理は AI に数学的な知識と計算能力を提供し、AI は数式処理をより柔軟かつ効率的に応用する手段として活用される。両分野の連携により、より高度な問題解決や知識の活用が具体化され様々な社会課題の解決へ適用されている。本講演では、人工知能の歴史を振り返りつつ、記号計算と関係を紹介し圧倒的なスピードでの進化し続ける生成 AI 時代の数理・AI の向かう世界について考察する。

15:20-16:20

講演者：計良宥志（千葉大学）

講演タイトル：Transformer によるグレブナー基底計算とその計算代数的課題

アブストラクト：Transformer は ChatGPT 等の言語生成モデルの基盤をなす深層学習モデルである。特に近年では、Transformer に数式処理の入出力を膨大に学習させることで、明示的な計算手続きの設計なしに高度な数式処理を実現する研究が登場している。本講演では、計算代数の中核をなすグレブナー基底計算を Transformer により実現した研究を、特にその計算代数的課題の側面から概説する。

11月15日（水）

9:30-10:30

講演者：廣瀬慧（九州大学）

講演タイトル：因子分析の数理と応用

アブストラクト：因子分析モデルは、観測される多変量データから観測されない少数の因子を推定する統計モデルである。因子分析は、もともと心理学や社会科学、経済学に使われる手法で、特にアンケートデータ解析で用いられている。近年は、高次元データ解析の一つの手法として応用されつつあり、自然科学、生命科学に用いられている。数学的には、因子分析モデルはニューラルネットワークや状態空間モデルの特殊なモデルとみなすことができ、あらゆる統計モデルの基礎をなす。因子分析モデルの多くの問題は、複雑な多変数連立代数方程式を解くことと対応し、これは計算機代数と関連する。この講演では、因子分析の数理と応用について概説し、今後の研究の展望について述べる。

10:40-11:40

講演者： 深作亮也（九州大学）

講演タイトル： 因子分析における代数計算の可能性

アブストラクト： 因子分析は多変量解析手法の一つであり，因子分析モデルには最尤法を適用した際に負の分散が推定される不適解問題や，推定結果を解釈しやすくする回転に関する因子回転問題と呼ばれる問題がある．これら問題に関する未解明な部分は，多変数代数方程式系やパラメトリック多項式最適化問題を解くことと対応させることもできる．そして，この対応はグレブナー基底・包括的グレブナー基底系・限量子消去法といった代数計算応用の可能性を秘めている．この講演ではこれまでの共同研究の成果の一部を報告するとともに，代数計算の可能性を模索したい．

※研究実施期間：2023年11月13日(月)～11月17日(金)

※公開日：2022年11月14日(火)，15日(水)

H P 掲載用英文

Speaker: Takashi Iwagaya (Maplesoft)

Title: Think solutions for Industrial challenges ~ Expectation on Symbolic computation and AI ~

Speaker: Yoshiyuki Sekiguchi (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Title: Explicit formulas for alternating projections for the PSD cone

Speaker: Hirokazu Anai (Fujitsu Limited)

Title: A New Horizon of Symbolic and Algebraic Computation Woven Together with AI

Speaker: Hiroshi Kera (Chiba University)

Title: Gröbner basis computation by Transformers and its computer-algebraic challenges

Speaker: Kei Hirose (Kyushu University)

Title: Factor Analysis: Mathematical Aspect and Application

Speaker: Ryoya Fukasaku (Kyushu University)

Title: Computational Algebra and Factor Analysis