

2025年度共同利用研究報告書

2026年02月14日

所属・職名 日本大学理工学部数学科・助教

石原 侑樹

		整理番号	2025a012
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3		
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	日本大学理工学部数学科	職名 助教
7.研究実施期間	2025年11月10日(月曜日)~2025年11月14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、機械学習、代数統計、数理モデリング		
9.参加者人数	59人		

10.本研究で得られた成果の概要

記号計算は、数式や数学的対象を厳密に扱い、数学的構造の解析を可能とする計算手法である。一方で、グレブナー基底や限量子消去（QE）に代表されるように計算量が指数的に増大する 경우가多く、高速化が重要課題となっている。本研究は、2024年度共同利用研究「記号計算の高速化と産業課題解決の応用2」の継続研究として、既存アルゴリズムの改良を通じ産業上の課題解決を目指した。計算機代数、代数幾何学、暗号理論、最適化理論、制御工学、機械学習、数理モデリングなど様々な分野から約60名が参加し、分野横断的な共同研究を実施した。

公開プログラムは11月13・14日にハイブリッド形式で開催され、招待講演4件と組織委員講演3件を実施した。最新研究動向の紹介に加え、異分野からの参加者に向けた神戸氏による記号計算の入門的チュートリアルも実施した。非公開プログラムは11月10~12日に実施され、約9件の研究発表と討論を通じ、継続課題の進展や新規テーマの可能性を検討した。特に、機械学習を用いたグレブナー基底やボーダー基底計算に関する論文[1],[2]について活発な議論が行われた。[2]は本年度に出版された論文であり、謝辞には本共同研究を記載している。以上のように、昨年度に比べ本年度では新たな成果も生まれ、また今後の研究基盤が得られたことで、今後も継続的発展が期待される。

[1] Hiroshi Kera, Yuki Ishihara, Yuta Kambe, Tristan Vaccon, Kazuhiro Yokoyama: Learning to Compute Gröbner Bases. The 38th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024) (2024)

[2] Hiroshi Kera, Nico Pelleriti, Yuki Ishihara, Max Zimmer, Sebastian Pokutta, Computational Algebra with Attention: Transformer Oracles for Border Basis Algorithms, The 39th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2025) (2025)

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3

Speeding Up of symbolic computation and its application
to solving industrial problems 3

成果報告書

◆ 実施概要

- ・ 組織委員
 - 石原侑樹（日本大学理工学部・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・准教授）
 - 神戸祐太（三菱電機株式会社・研究員）
 - 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・准教授）
 - 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（千葉大学国際高等研究基幹・准教授/
国立情報学研究所・特任研究員）
 - 庵智幸（宇宙航空研究開発機構（JAXA）
追跡ネットワーク技術センター・研究開発員）
 - 小松瑞果（神戸大学システム情報学研究科・准教授/
理化学研究所・客員研究員）
- ・ 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(2)
非公開日：九州大学 伊都キャンパス IMIコンファレンスルーム
(ウエスト1号館 D棟 4階 414号室)
- ・ 研究実施期間
 - 公開期間：2025年11月13日(木)、14日(金)
 - 非公開期間：2025年11月10日(月)、11日(火)、12日(水)
- ・ 参加者数：59名
- ・ ウェブサイト：<https://joint.imi.kyushu-u.ac.jp/post-17958/>

◆ 本研究計画の背景・動機・目的

記号計算 (Symbolic Computation) は、数式や数学的対象を扱うための計算方法の1種である。よく比較される計算方法として数値計算があるが、記号計算は厳密計算をベースとした数学的な構造の分析を得意としている。しかしその反面、計算コストが高く、グレブナー基底や限量子消去 (QE) のアルゴリズムなど計算量が指数的であるも多い。本研究では2024年度の共同利用研究「記号計算の高速化と産業課題解決の応用2」の継続研究として、引き続き既存の記号計算の種々のアルゴリズムの改良を通じて、産業に登場する課題の解決を目指す。

◆ 本研究で得られた成果

本研究では、多様な分野の専門家を招聘し、分野横断的な共同研究を行った。参加分野は、計算機代数、代数幾何学、暗号理論、最適化理論、制御工学、機械学習、数理モデリングなど、多岐にわたる。参加者数は、大学、研究所、企業から、対面およびオンラインを合わせて約60名にのぼった。本研究により得られた成果については、公開プログラムと非公開プログラムの成果に分けて、以下に記述する。

まず、公開プログラムは、11月13日および14日の2日間にわたり、対面とオンラインを併用したハイブリッド形式で開催した。プログラムでは、4名の招待講演者および3名の組織委員による講演を実施した。招待講演においては、各分野における記号計算の最新の研究動向について、60分の講演をいただいた。いずれの講演においても質疑応答が活発に行われ、分野横断的な観点から有意義な議論が展開された。また、本研究会における初の試みとして、組織委員の神戸氏による「記号計算チュートリアル」講演を実施した。本講演は、記号計算に馴染みのない参加者を対象とした入門的内容であり、他の専門的講演の理解を促進することを目的とするものである。さらに、組織委員の石原による講演では、これまでの成果で得られた機械学習分野の国際会議論文[1]について報告を行った。

次に、非公開プログラムは、11月10日から12日までの3日間にわたり実施した。期間中、大学院生および大学教員らによる約9件の研究発表と、それに基づく研究討論を行った。討論内容は、前年度より継続して取り組んでいる研究課題の進展状況の報告に加え、新たに着手した研究テーマや今後の展開可能性に関する検討など、多岐にわたるものであった。参加者の間では活発な議論が行われ、今後の共同研究の方向性を具体化する上で有意義な機会となった。特に、11月12日の発表においては、組織委員2名 (計良、石原) を含む共著論文[2]の内容について議論を行った。本論文は、機械学習を用いたボーダー基底の計算に関するものであり、謝辞にお

いて本共同研究の支援について言及している。非公開日の主なテーマは以下のとおりである。

11月10日：深層学習のための微分可能な順序最適化手法について

11月11日：UOV 署名方式に付随する Hilbert 級数について
概均質多様体上の相対不変式について 等

11月12日：機械学習に向けた基底のランダム生成について
局面を多項式で表せる組み合わせゲームについて
有限体上のパラメトリック根基イデアルの計算について
最急降下法の適応的ステップ幅について 等

以上のとおり、本共同利用研究においては、前年度と比較して新たな研究成果を得ることができた。得られた知見は、今後の研究展開に向けた重要な基盤となるものである。今後も本共同研究を継続することにより、現時点で顕在化している課題に対する具体的な解決策を見出すことが期待される。最後に、本研究計画の遂行にあたりご支援・ご協力を賜った九州大学関係者の皆様、ご講演いただいた招待講演者の皆様、ご参加いただいた皆様に深く感謝申し上げます。また、会場費をご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対し、厚く御礼申し上げます。

◆ これまでの本共同研究の成果を含む国際会議論文

[1] Hiroshi Kera, Yuki Ishihara, Yuta Kambe, Tristan Vaccon, Kazuhiro Yokoyama: Learning to Compute Gröbner Bases. The 38th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024) (2024)

[2] Hiroshi Kera, Nico Pelleriti, Yuki Ishihara, Max Zimmer, Sebastian Pokutta, Computational Algebra with Attention: Transformer Oracles for Border Basis Algorithms, The 39th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2025) (2025)



公開プログラム参加者集合写真

◆ 公開プログラム 講演者および講演タイトル

招待講演者

- Bruno F. Lourenço (統計数理研究所)
「錐最適化におけるエラーバウンドについて」
- 市原裕之 (明治大学)
「二乗和多項式とその制御問題への応用」
- 伊藤琢真 (情報通信研究機構)
「UOV 構造を持つ多変数公開鍵暗号の安全性解析」
- 奥野彰文 (統計数理研究所)
「計算代数による ReLU 型ニューラルネットの局所最小解全列挙」

組織委員

- 神戸祐太 (三菱電機株式会社)
「記号計算チュートリアル」
- 石原侑樹 (日本大学)
「グレブナー基底と機械学習」
- 庵智幸 (宇宙航空研究開発機構 (JAXA))
「非線形逐次ベイズ推定における微分作用素環上の数式処理の利活用」

開催日: 2025/11/13~2025/11/14

記号計算の高速化と産業課題解決への応用3 | 2025a012

カテゴリ: イベント

タグ:

若手研究

短期共同研究

開催概要

- 開催方法: Zoomミーティングによるハイブリッド開催
- 開催場所:
【公開日】2025年11月13日(木)、11月14日(金): JR博多シティ9階会議室(2)
【非公開日】2025年11月10日(月)、11月11日(火): 九州大学 伊都キャンパス IMIコンファレンスルーム (ウエスト1号館 D棟 4階 414号室)、11月12日(水): JR博多シティ9階会議室(2)
- 主要言語: 日本語
- 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
- 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3
- 研究代表者: 石原 侑樹 (日本大学理工学部数学科・助教)
- 研究実施期間: 2025年11月10日(月) ~ 2025年11月14日(金)
- 公開期間: 2025年11月13日(木) ~ 2025年11月14日(金)
- 研究計画詳細: https://joint2.imi.kyushu-u.ac.jp/research_chooses/view/2025a012

プログラム

11月10日(月) 非公開 14:00-17:00

11月11日(火) 非公開 9:00-17:00

11月12日(水) 非公開 9:00-17:00

11月13日(木)

●9:30-9:35

研究代表者挨拶

●9:35-10:35

講演者: 神戸祐太 (三菱電機株式会社)

講演タイトル: 記号計算チュートリアル

アブストラクト: 記号計算とは何か, 馴染みのない方にも分かりやすいように, 組織委員が入門的解説を行います.

●10:45-11:45

講演者: 石原侑樹 (日本大学)

講演タイトル: グレブナー基底と機械学習

アブストラクト: 近年, ChatGPTをはじめとする生成AIが世界中で広く利用されており, その多くは「Transformer」と呼ばれる深層学習モデルを基盤としている. 本講演では, Transformerを用いたグレブナー基底の学習について, Kera-Ishihara-Kambe-Vaccon-Yokoyama (2024) の成果を, データセット生成の観点から紹介する. また, Kera-Arakawa-Sato によって開発された, Transformerを基盤とする計算機代数ライブラリ「CALT」を用い, 簡単な数式処理の学習を実演する.

●13:10-14:10

Bruno F. Lourenço (統計数理研究所) #Zoom

講演タイトル: 錐最適化におけるエラーバウンドについて

アブストラクト: 本発表では錐最適化におけるエラーバウンドとその背景を簡単に紹介する. そして, 面縮小法 (facial reduction) と面残差関数 (facial residual function) を用いたエラーバウンドの計算アプローチを述べる. 最後に, 様々な応用を紹介し, 特に, 様々なアルゴリズムの収束率とエラーバウンドの密な繋がりに関する最近の結果を紹介する.

●14:20-15:20

市原裕之(明治大学)

講演タイトル:二乗和多項式とその制御問題への応用

アブストラクト:二乗和多項式は非負多項式のサブクラスとして知られており、実多項式が二乗和で表される場合、すべての変数に対して非負であることが直ちに保証される。本講演では、まず二乗和多項式に関する基礎的な内容を概観した後、講演者が関わってきた制御問題への応用について紹介する。具体的には、行列値二乗和を用いたゲインスケジューリング制御系設計などである。最後に、二乗和緩和と限量子消去法を組み合わせた非線形システムのゲイン関数解析手法についても議論する。

●15:30-16:30

庵智幸(宇宙航空研究開発機構(JAXA))

講演タイトル:非線形逐次ベイズ推定における微分作用素環上の数式処理の利活用

アブストラクト:逐次ベイズ推定は、動的システムから時々刻々得られる観測出力をもとに、その内部状態を逐次的に推定する手法である。リアルタイムな求解が必要となる一方で、確率分布の周辺化や期待値計算といった積分計算がアルゴリズムに含まれるため、推定精度と計算時間はトレードオフの関係にある。本講演では、微分作用素環上の数式処理を活用して必要な積分計算を事前に行い、このトレードオフを改善した結果について紹介する。

11月14日(金)

●9:30-10:30

伊藤琢真(情報通信研究機構)

講演タイトル:UOV 構造を持つ多変数公開鍵暗号の安全性解析

アブストラクト:米国立標準技術研究所(NIST)の耐量子計算機暗号標準化計画の第2ラウンド追加デジタル署名方式に進出している方式のうち、多変数公開鍵暗号をベースとするUOV、MAYO、QR-UOV、SNOVAの4方式は全てUOV型に帰着されることが知られている。本講演ではこのUOV型の構造を持つ方式の安全性解析について紹介する。

●10:40-11:40

奥野彰文(統計数理研究所)

講演タイトル:計算代数によるReLU型ニューラルネットの局所最小解全列挙

アブストラクト:<https://arxiv.org/abs/2508.17783>に基づく本講演では、ReLU活性化を利用するニューラルネットのリッジ正則化付き二乗誤差が区分多項式となる性質を利用し、計算代数に基づく方法により局所極小解を網羅的に全列挙する手法を紹介する。非常に小さなニューラルネットで実際に計算した結果も報告する。本研究は深作亮也氏(九州大)・加葉田雄太郎氏(鹿児島大)との共同研究である。

●11:40-11:45

閉会挨拶