

数理科学を基点とする自然科学諸分野の研究交流促進と研究課題の発掘

(平成 26 年度学部長裁量経費 研究報告書)

平成 27 年 3 月 13 日提出

井上和行 (研究代表者, 特任教授), 西田憲司^a, 玉木 大^a, 高木啓行^a, 乙部厳己^a,
小竹 悟^b, 川村嘉春^b, 浜崎亜富^c, 浅見崇比呂^d, 村越直美^e, 岩田拓記^e

a 数理・自然情報科学科, b 物理科学科, c 化学科

d 生物科学科, e 物質循環学科

1. はじめに (研究目的と位置付け)

現代の科学研究においては、個別分野の先鋭化 (= 高度化・専門化) と分野間の融合 (= 連携・学際化) という二つの方向性が顕著であり、研究の現場ではこの状況を踏まえた対応が必要とされる。森羅万象の論理構造に関心をもつ数学では、諸科学から提起される様々な課題を取り込みながら、研究の対象を広げ手法を発展させてきた側面がある。そこで、本研究課題では、自然科学諸分野における最先端の研究テーマを数理科学の視点から関連付けて横断的にとらえ、数理科学的課題を探究するとともに、研究分野の枠を越えた交流の中から、個別分野における研究課題の発掘をも目論むものである。我々は、バーチャルな研究組織「信州数理科学研究センター」(平成 18 年度発足) の活動実績を積み上げる努力を通じて、数理科学をキーワードとした研究交流の風土を理学部に根付かせ、広い学問分野をカバーする上で制約のある、地方大学での理学研究における特色ある「方法論的モデル」を構築したいと思う。

本研究課題は、理学部の事業計画 (平成 22~27 年度) において、「基礎科学研究を推進するための研究組織 (バーチャルを含む) を構築し、コア研究を推進し、大型資金プロジェクトを策定するとともに萌芽的研究を育成して、異分野間交流型研究プロジェクトを推進する」という課題に対応するものである。本研究課題は、数理科学に関心を寄せる理学部の各学科教員の協力を得て取り組まれる。研究代表者は、信州数理科学研究センターの業務を推進する立場から参加する。本年度は数理科学に関連する次の研究課題に対して、学長裁量経費 [教育研究推進経費] が助成された。

研究課題^(☆): 「表現論を基軸とする数理科学の展開: 信州数理科学研究センター特別重点研究」

上記の課題^(☆)では、数理科学における分野横断的研究の推進を目論んでいる。本研究課題は学長裁量経費の課題^(☆)と相互補完関係にあるので、実務面でも連携して取り扱うことについて関係者から了解を頂いた。従って、本報告書では、両方の課題に位置付けられる取組については注釈^(☆)を付して記載することとした。

2. 「数理科学談話会(公開シリーズ)」の開催

数学と自然科学の諸分野における研究テーマを数理科学の視点から横断的に捉え、そこに潜む数理科学的課題を探索し、さらに振り返って個別分野における研究課題の発掘にも役立てる目的で、諸分野間の交流を意図した公開講演会を企画した。これは、理学研究に携わる人たちが集う、バーチャルな「数理科学の広場」である。世話人の方々には、専門分野の異なる人々が共通に関心を持てるような話題を取り上げるようお願いした。講師の方々には、初心者向けの分かりやすい解説をお願いした。このような趣旨の数理科学談話会は公開シリーズとして企画され、以下の 9 件が実施された。会場は、数理・自然情報合同研究室（理学部 A 棟 4F）が使用された。参加人数は、出席ノートに基づくものである。

① 平成 26 年 7 月 14 日（月）16:20－17:50（90 分）

- ・ 講師：縫田光司氏（産業技術総合研究所 主任研究員）
- ・ 演題：「データを暗号化したままで計算できる暗号技術について」(☆)
- ・ 参加者数：17 名（教員等 6 名，学生 11 名）
- ・ 世話人：沼田泰英（数理・自然情報科学科）

<要旨> 暗号化技術は、許可された人以外にデータを読まれないよう特殊な数学的处理を施す技術であり、幅広く実用化されている。一方で、データを暗号化した後で、許可された人以外でも（データを秘密にしたまま）データの中身を変更できるようにしたい状況が存在する。簡単な例としては、多数決を行う際、互いの投票内容を秘密にするため、暗号文を回覧して投票者が賛成であればデータの中身に 1 を加える、といった使い方が考えられる。このように「データを秘密にする」「データの中身を変更可能にする」という一見相反するかのような機能を「両方」実現する暗号化技術である「準同型暗号」は、およそ 30 年前に初めて提案され、現在に至るまで研究が盛んに進められている。

この発表では、暗号化技術一般に関する基礎的事項の説明から始め、準同型暗号を成立させる数学的な仕組みや代表的な構成法、準同型暗号を用いた応用事例や、話者の最近の研究などについて紹介する。

<講演のキーワード> 暗号技術，準同型暗号，秘密計算，群論

<講師の研究分野> 群論，組合せ論，暗号理論

②平成 26 年 10 月 28 日（火）15:30－17:00（90 分）

- ・ 講師：高柳 匡氏（京都大学基礎物理学研究所 教授）
- ・ 演題：「ホログラフィー原理と量子エンタングルメント」
- ・ 参加者数：31 名（教員等 12 名，学生 19 名）
- ・ 世話人：小竹 悟（物理科学科）

<要旨> 物質の最小単位を追求する分野は、物理学の中で素粒子物理と呼ばれています。電磁気力（静電気や磁石力など），強い相互作用（原子核を構成する力，核力），弱い相

相互作用（ベーター崩壊を起こす力）という3つの力を統一的に説明するミクロな理論は標準模型と呼ばれていて、現在では確立しています。一方、万有引力（重力）も含めたミクロな理論の構築は容易ではありませんが、超弦理論と呼ばれる理論が最も有力であると考えられています。このように重力の力は他の力に比べて性質が大きく異なり難しいと長い間思われてきましたが、最近の超弦理論の進展のおかげで、実は重力は、そのほかの力と同等であることが分かってきました。その場合に非自明なのは時空の次元が重力理論を考えると1次元増えてしまうという不思議な事実です。この原理を「ホログラフィー原理」と呼びます。その特別な場合はAdS/CFT対応と呼ばれており、超弦理論の最も重要なテーマの一つとなっております。さらに最近では、「量子エンタングルメント」と呼ばれる量子力学の基本的な性質がホログラフィー原理において本質的であり、重力理論の時空は量子ビットの集合体ともみなせることが分かってきました。

本講演では、このような最近の進展を概説します。

<講演のキーワード> 超弦理論, 素粒子理論, 量子情報理論, 一般相対論, AdS/CFT対応

<講師の研究分野> 超弦理論, 素粒子理論, 一般相対論

③平成26年11月28日（金）16:20-17:50（90分）

・講師：古川和快氏（株式会社富士通研究所 シニアリサーチャー）

・演題：「スマートフォンセキュリティの現状について」^(☆)

・参加者数：14名（教員等5名，学生9名）

・世話人：沼田泰英（数理・自然情報科学科）

<要旨> アプリを自由にインストールでき、個人情報も多く搭載しているスマートフォンは、マルウェアなどを作成する悪意あるハッカー達のメインターゲットとなりつつある。また、ユーザがOSに変更を加えられるなど自由度が非常に高く、ユーザがハッキングすることにより企業が意図しない利用方法が可能となっている。講演ではAndroid端末を中心として「個人利用」「企業利用」の観点から、スマートフォンに潜むセキュリティリスクやその対策技術を紹介していく。

<講演のキーワード> スマートフォンセキュリティ

<講師の研究分野> モバイルセキュリティ

④平成26年12月17日（水）15:00-16:30（90分）

・講師：矢後友暁氏（埼玉大学大学院理工学研究科 助教）

・演題：「光化学反応の磁場効果とその数値解析」

・参加者数：26名（教員7名，学生19名）

・世話人：浜崎亜富（化学科）

<要旨> 化学反応に対する磁場効果は、反応中間体としてラジカルやラジカルイオンのような常磁性種が生成する場合に観測される。このような磁場効果は、磁場という用語から

一般的に思い起こされる磁気力やローレンツ力によって引き起こされるわけではない。化学反応の磁場効果は、常磁性種上の不対電子スピンの量子力学的な効果により発現する。溶液中での光化学反応に対する磁場効果は分子の拡散運動と密接に関わっており、磁場効果の大きさは分子の拡散の様相に依存し大きく変化する。我々の研究室では、このような磁場効果の特徴を生かし、磁場効果の磁場依存性や時間変化から微小領域での分子の拡散運動をプローブするという研究を行っている。実際には、ナノ秒過渡吸収測定により光化学反応に対する磁場効果を観測し、得られた結果を統計リュービル方程式により数値解析している。

講演では、イオン液体やメゾポーラスシリカ中で観測された磁場効果について発表を行う予定である。

<講演のキーワード> 光化学反応, スピン化学, 磁場効果, 統計リュービル方程式

<講師の研究分野> 物理化学, 光化学

⑤平成 27 年 1 月 19 日 (月) 16:20-17:50 (90 分)

・講師：野田武志氏(沖縄科学技術大学院大学

ゲノム・遺伝子制御システム科学ユニット 研究員)

・演題：「ホヤ p53 遺伝子の発生における役割と進化」

・参加者数：20 名 (教員等 7 名, 学生 13 名)

・世話人：浅見崇比呂 (生物科学科)

<要旨> 動物の体は 1 個の卵から始まり、発生をへて成体のかたちになる。近年の分子生物学的手法の発達により、生物の発生の進化が実験科学として研究できるようになってきた。海産無脊椎動物のホヤは、脊椎動物にもっとも近縁な無脊椎動物である。ホヤの幼生は細胞の数が 2000 個ほどしか無くシンプルではあるが、脊索動物としての基本的な特徴を持つことから脊椎動物や脊索動物の発生の進化を明らかにするためのモデルとして研究が行われている。

本講演で、ホヤ幼生の発生における転写調節因子 p53 遺伝子の役割について報告する。ホヤの p53 遺伝子は卵で発現するが発生過程で急速に分解される遺伝子として発見され、機能解析の結果からホヤ p53 遺伝子がホヤ幼生の脊索の形成に必要であることが明らかになった。最後にホヤと脊椎動物や無脊椎動物での p53 遺伝子の働きを比較することにより、p53 遺伝子の発生における役割の進化について議論を行う。

<講演のキーワード> ホヤ, 脊索動物, 進化発生学, p53

<講師の研究分野> 進化発生学

⑥平成 27 年 1 月 23 日 (金) 16:20-17:50 (90 分)

・講師：植山雅仁氏(大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科 助教)

・演題：「陸域生態系をめぐる温室効果気体とエネルギーの流れ

—数理でつなぐスケールの溝—

- ・参加者数：13名（教員6名，学生7名）
- ・世話人：岩田拓記（物質循環学科）

<要旨> 陸域生態系は光合成，呼吸，蒸発散といった様々なプロセスによって，地球システムをめぐる二酸化炭素や水蒸気，また熱エネルギーの循環に大きく寄与している。生態系をめぐる物質やエネルギーの循環は，個葉や微生物といったマイクロなスケールでの現象から，群落や流域，また大陸や全球といったマクロなスケールでの現象まで，様々な時間・空間スケールの異なるプロセスが介在している。生態学的観測，微気象観測，衛星リモートセンシングなどの得意とする時間・空間スケールが異なるツールを数理モデルでつなぐことで，生態系をめぐる温室効果気体やエネルギーの流れの一端を解き明かすことができる。本講演では，群落微気象モデル，生態系プロセスモデル，機械学習といった数理モデルを用いた生態系の温室効果気体収支の広域評価や，数理モデルの逆解析や最適化によって直接の計測が困難なプロセスの推定法を紹介したい。

<講演のキーワード> 陸域生態系，物質循環，温室効果気体，生態系モデル，数値計算

<講師の研究分野> 生態系生態学，生態系モデリング

⑦平成27年1月28日（金）16:20–17:50（90分）

- ・講師：瀬川悦生氏（東北大学大学院 情報科学研究科 准教授）
- ・演題：「量子ウォークの諸性質」^(☆)
- ・参加者数：11名（教員8名，学生3名）
- ・世話人：沼田泰英（数理・自然情報科学科）

<要旨> 量子ウォークはランダムウォークの量子的類推の数理モデルとして，1990年前後に何人かの研究者によって考案された。そして2000年の始めに空間構造上での量子探索アルゴリズムの中での効能や，ランダムウォークにおけるガウス分布に代わる量子ウォーク特有の分布への収束が示されて以降，分野横断的に現在でも活発に研究がされている。この講演では，主に量子ウォークの特有の統計的性質である線型的拡がり と局在化について紹介する。線型的拡がりとは，対称ランダムウォークの拡散的な拡がりよりも時間に関して2乗のオーダーで拡がることを意味し，局在化は無限グラフにおいて長時間でもある場所の確率が正の値で残ることを言う。この相反する二つの性質が共存することを，幾つかの結晶格子，無限ツリーの場合等に関して，背後にあるランダムウォークからのスペクトル写像等を用いて紹介する。また，単位円周上のローラン直交多項式間の5項の漸化式を与えるCMV行列と呼ばれるものと量子ウォークとの関係についても述べ，それを用いて量子ウォークのある統計的性質とローラン直交多項式のセゲークラスとの結びつきについても紹介する。

<講演のキーワード> 量子ウォーク，固有値写像，CMV行列

<講師の研究分野> 量子ウォーク，ランダムウォーク

⑧平成 27 年 2 月 6 日（金）10:40–12:10（90 分）

- ・講師：阿部拓郎氏(京都大学大学院工学研究科 講師)
- ・演題：「直線配置の数え上げ幾何とベッチ数」^(☆)
- ・参加者数：12 名（教員 5 名，学生 7 名）
- ・世話人：沼田泰英（数理・自然情報科学科）

<要旨> 直線配置とは，実平面中の直線の有限族のことをいう。まず， n 本の原点を通る直線からなる配置を考えよう。これに新しい直線 L を加えるとき， L 上に交点はいくつ出来るだろうか？ これは高校生でもわかる問いで，答えは 1 ， $n-1$ あるいは n のいずれかである。ではこの問いと答えを，一般の直線配置に拡張することは可能だろうか？ 実は上の問いを『交点数は 1 と $n-1$ の間の整数を取れない』と書き直すことで，同様の定式化が可能である。そしてこの 1 と $n-1$ は，直線が実平面をいくつの連結成分に分割するか，あるいは直線配置の補空間の複素化のベッチ数と深く関連していることがわかる。しかもこの事実は，代数幾何的な手法を用いた証明のみが知られている。本講演ではこのような，直線配置の数え上げ幾何，補空間の組み合わせ論あるいは位相幾何と，代数・代数幾何を用いて結びつけられるいくつかの結果を紹介する。

<講演のキーワード> 直線，交点，ベッチ数，補空間の連結成分，対数的ベクトル場，分裂型，自由直線配置

<講師の研究分野> 代数，代数幾何，超平面配置

⑨平成 27 年 2 月 20 日（金）16:20–17:50（90 分）

- ・講師：田中冬彦氏(大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授)
- ・演題：「量子統計—統計学と量子物理学の新たな融合—」^(☆)
- ・参加者数：16 名（教員等 10 名，学生 6 名）
- ・世話人：沼田泰英（数理・自然情報科学科）

<要旨> 通常の統計学はマクロな世界を対象としていますが，タイトルにある量子統計は，量子力学が関わってくるミクロの世界を対象とした統計学です。統計学は数理的な側面とニーズにこたえる実学の側面があり，両者が相互に刺激しあって発展してきました。量子統計もこの基本思想は変わりません。本講演では主に量子力学や統計学に詳しくない人を想定して，発展途上である量子統計の雰囲気伝えたいと思います。具体的には数理的な興味に基づく諸結果と，最新の量子物理実験でのニーズにこたえる成果を紹介します。前者はたとえば統計学で有名なクラメル・ラオ不等式の量子版が挙げられます。後者については量子スパース推定をとりあげます。国内ではあまり知られていませんが，大規模な行列を推定する量子状態トモグラフィではスパース推定（ベクトルや行列のほとんどの成分が 0 として各成分を推定する統計手法）が威力を発揮します。量子スパース推定はすでに海外の実験で使われ始めています。また，私たちは統計学と量子物理学の接点となるべく

Q-stats という研究者ネットワークを作りました。数理科学研究センターの趣旨を鑑みて Q-stats の活動内容も紹介します。

<講演のキーワード> 統計学, 量子情報理論, 量子トモグラフィ, クラメル・ラオ不等式, フィッシャー情報量, スパース推定

<講師の研究分野> ベイズ統計, 情報幾何, 量子統計

3. 専門分野を対象とするセミナーの実施

数理科学談話会（公開シリーズ）の企画に関連して、その講師による専門分野を対象とするセミナーが2件実施された。

① 平成26年10月29日（水）10:40–12:10【物質基礎科学セミナー】

- ・会場：理学部A棟614号室（6階リフレッシュラウンジ）
- ・講師：高柳 匡氏（京都大学基礎物理学研究所 教授）
- ・演題：「AdS/CFT対応を用いた量子エンタングルメントの解析に関する最近の話題」
- ・世話人：小竹 悟（物理科学科）

② 平成26年12月17日（水）16:45–17:45【化学コロキウム】

- ・会場：理学部A棟211号室（2階リフレッシュラウンジ）
- ・講師：矢後友暁氏（埼玉大学大学院理工学研究科 助教）
- ・演題：「光化学反応の磁場効果とその数値解析 for 化学科」
- ・世話人：浜崎亜富（化学科）

4. 「数理科学談話会」の広報と記録

理学部内でのポスター掲示と案内文配布に併せて、講演会情報を「信州数理科学研究センター」のホームページ(<http://math.shinshu-u.ac.jp/~center/>)と理学部のホームページに掲載し、学内外に広く伝えた。講演の様子はビデオ撮影されており、ビデオ・ライブラリを作成した。平成18年度以降の9年間に実施された数理科学談話会の講演の概要も、センターのホームページ上で公開されている。

5. 理学部における知的交流活動の発展のために

理学部「数理科学プロジェクト」は、専門分野を越えた研究交流の取組として、研究者や受験生の間でも認知度が高まっている。中心的企画である数理科学談話会が理学部の「知的サロン」としてさらに発展するよう、理学部の皆様のご支援をお願いしたい。