研究室活動状況　2023 年度

研究室の活動状況を，以下順を追って報告する．記載されている項目は，次の通りである．

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

- 論文 (国内外の専門学術雑誌記載のオリジナルな研究論文)
- 国際会議報告集 (国際会議，国際ワークショップ等のプロシーディング)
- 学会講演 (日本物理学会等の学会や，国際会議での講演．招待講演の場合はそのことが明記されている．)
- 著書，訳書，編集等 (著，訳，編の別が氏名の後に示されている．訳書は邦訳の後に () 内に原著者名，原著名が示されている．) 学会誌等（商業誌等を含む）に発表された論文，解説等．(研究所レポートや研究会報告は含んでいない．)
- 特許

素核宇宙グループ

1．研究活動の概要

素核宇宙グループは，素粒子理論分野，高エネルギー理論分野，原子核ハドロン物理分野，および宇宙理論分野からなる大講座である．

1) ニュートリノ振動におけるパラメーター縮退を表す図による θ_{23} のパラメーター縮退の理解 (素粒子理論分野：安田・須釜)

標準的な 3 世代の枠組みのニュートリノ振動研究における最終目的はレプトンセクターにおける CP 非保存位相 δ を決定することである．2012 年に原子炉ニュートリノによって θ_{13} が決定される前は，加速器ニュートリノにより $\nu_\mu \to \nu_e$，$\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e$ の振動確率を測定しても，3 種類のパラメーター縮退 (θ_{13} に関する 2 重縮退，$\Delta m^2_{31} \leftrightarrow -\Delta m^2_{32}$ の符号縮退，$\theta_{23} \leftrightarrow \pi/2 - \theta_{23}$ の 8 分円縮退) による 8 重のパラメーター縮退があるために，一意的に δ が決定できないことが知られていた．2004 年に安田によって考え出されたパラメーター縮退を表す図は，$P(\nu_\mu \to \nu_e) = \text{const.}$，$P(\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e) = \text{const.}$ で指定される点の軌跡を $(\sin^2 2\theta_{13}, 1/s^2_{23})$ 平面内でプロットし，8 重のパラメーター縮退の様子を可視化するものであった．θ_{13} が決定された 2012 年以降は，実験による誤差が十分小さければ 8 重のパラメーター縮退は解決しているはずであるが，現実的には実験誤差の存在のため，符号縮退と 8 分円縮退が未解決となっている．この研究では，現在建設中の加速器ニュートリノ実験である T2HK 実験 (日) と DUNE 実験 (米)，さらには将来計画として検討されている T2HKK 実験 (日韓) と ESSνSB 実験 (スウェーデン) を念頭に置き，主として 8 分円縮退が解決できるかを，上述のパラメーター縮退を表す図を用いて議論した．その結果，第 1 振動最大 ($E = |\Delta m^2_{31}|L/\{4(n+1/2)\pi\}$ $(n=0)$) を観測する T2HK 実験と DUNE 実験では 8 分円縮退が解決できるが，第 2 振動最大 ($E = |\Delta m^2_{31}|L/\{4(n+1/2)\pi\}$ $(n=1)$) を観測する T2HKK 実験と ESSνSB 実験では解決が難しいことがわかった．一般に，第 2 振動最大付近のみを観測する実験では，第 2 振動最大のエネルギー付近で $(\sin^2 2\theta_{13}, 1/s^2_{23})$ 平面内の解の $1/s^2_{23}$ の値がエネルギーに激しく依存することにより，エネルギーに関して平均化すると θ_{23} に関する情報が失われ，8 分円縮退の解決が難しくなることがわかった．さらに，$(\sin^2 2\theta_{13}, 1/s^2_{23})$ 平面内における 2 次曲線は一般に双曲線・放物線・楕円のどれかになるが，どのエネルギー領域で各曲線になるかを，2 次曲線の判別式をエネルギーに対してプロットすることにより議論した．結果として，8 分円縮退を解決する第 1 振動最大付近では双曲線，8 分円縮退の解決が困難になる第 2 振動最大付近では双曲線と楕円の間を激しく往復する振る舞いを持つことがわかった．

2) ステライルニュートリノシナリオにおける無ニュートリノ二重崩壊の現象論 (素粒子理論分野：安田・林)

これまでに標準的な三世代のニュートリノ混合では説明できない現象がいくつか報告されており (LSND 実験, MiniBooNE 実験, 原子炉ニュートリノ異常, ガリウムニュートリノ異常と呼ばれる一連の現象), 第四番目のニュートリノ (過去の LEP 実験から弱い相互作用をするニュートリノは 3 種類しかないことが知られているため, 第四番目のニュートリノは弱い相互作用をしないステライルニュートリノと呼ばれている) を導入する (3+1)-スキームと呼ばれる枠組みが議論されている．特に Neutrino-4 と RENO+NEOS の 2 つの結果は，原子炉ニュートリノ異常現象の肯定的結果である．これらの肯定的結果には批判もあるが，本研究ではこれらの肯定的結果が正しいと仮定し，無ニュートリノ二重崩壊とトリチウムのベータ崩壊に対する予言を試みた．その結果，無ニュートリノ二重崩壊に関しては，四世代のマヨラナ位相の自由度が存在するため，三世代のニュートリノの質量順序が通常順序であろうと逆順序であろうと，

有効マヨラナ質量 m_{ee} が 0 となる可能性がある一方，運が良ければ近未来の実験でシグナルが見える可能性があることがわかった．一方，トリチウムのベータ崩壊に関しては，現行の KATRIN 実験で将来シグナルが見える可能性が高いこともわかった．

3) μTRISTAN におけるニュートリノの現象論 (素粒子理論分野：須釜)

これまでの加速器ニュートリノ実験において観測されてきたニュートリノ振動は，ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ からの振動のみであった．特に，$\nu_\mu \to \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e$ の観測により，CP 非保存位相 δ の測定や CP 対称性の検証がされてきた．現在建設中の加速器ニュートリノ実験である T2HK 実験（日）と DUNE 実験（米）によって，現在よりもさらに精度よく δ が測定される見込みである．しかし，$\nu_\mu \to \nu_e$, $\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e$ の観測による δ の測定は，物質密度の不定性による寄与が大きくなってしまう．そのため，地球内部の構造が完全に理解されていない現在では，これらのニュートリノのみで δ を決定するのは危険である．一方で，ニュートリノ振動を用いた δ の測定は，$\nu_e \to \nu_\mu$ と $\nu_\mu \to \nu_e$ を観測することによっても決定することができ，こちらのほうの観測をする方が，物質密度の不定性による寄与が小さい．また，これら 2 つのニュートリノ振動を観測することは，T 対称性を検証することでもある．CP 対称性の検証とともに T 対称性についても検証することは，素粒子物理学および場の量子論における最も基本的な CPT 定理について検証することである．そのため，ニュートリノセクターにおいて CPT 定理の検証をするためにも，ν_e のビームを用いたニュートリノ振動実験は非常に重要である．こういった中で，最近 μTRISTAN というミューオンコライダーが提唱された．この実験では，非常に豊富なミューオンがあるため，ミューオンの崩壊により生じるニュートリノを利用することができる．また，そのニュートリノは，μTRISTAN においては，ν_e と $\bar{\nu}_\mu$ であり，上に述べたような実験が可能である．μTRISTAN のみでは ν_e ビームしか得られないが，T2HK 実験における ν_μ ビームと組み合わせることで T 対称性の検証や δ の精密測定ができる可能性がある．本研究では，μTRISTAN における ν_e と T2HK における ν_μ のニュートリノ振動の観測結果を組み合わせることで，どれくらいの感度で T 対称性の破れが観測できるかを数値シミュレーションによって評価した．この研究は横浜国立大の佐藤丈氏と高エネルギー加速器研究機構の北野龍一郎氏との共同研究である．

4) 弦理論における量子効果 (素粒子理論分野：北澤)

素粒子の標準模型において，電弱対称性の自発的破れの動力学は未知である．これまでの場の量子論の枠内でのさまざまな努力は実を結んでおらず，それを含み，かつ超えた枠組みとしての弦理論の動力学に期待がかかる．弦理論における量子効果による質量生成について詳細な研究を行った．特に弦理論におけるスカラー場の 2 点関数について詳細に研究をおこなった．外線運動量を質量殻からずらした 2 点関数は，量子効果による質量補正を正しく与えると考えられ，その質量補正は「部分モジュラー変換」という方法によって場の量子論によって理解できる寄与と弦理論ならではの寄与に分けられる．特に後者に注目し，全体の質量補正において 2 乗質量が負になること（この時に対称性の自発的破れが起きる）が可能であるかどうかを検討した．しかし，2 乗質量が負になるための物理的に理解できる簡潔な条件を見つけることができなかった．また，2 乗質量が負になるような超対称性が破れた具体的な模型を構成することもできなかった．これは高エネルギー加速器研究機構の磯暁氏および須山孝夫氏との共同研究である．

5) 宇宙の自然な「暖かいインフレーション」(素粒子理論分野：北澤)

現在の宇宙膨張速度に関するハッブル定数問題の解決に向けて，宇宙の晴れ上がりから現在までの宇宙膨張を支配する暗黒物質と暗黒エネルギーについての様々な観測結果を詳細に検討した．その結果，多くの研究者がこれまでに検討してきたような暗黒エネルギーのエネルギー密度にどのような時間変化が

あってもこの問題は決して解決されないことを明らかにした．さらに観測結果を詳細かつ系統的に検討した結果，暗黒エネルギーではなく，暗黒物質のエネルギー密度が時間変化する場合にはこの問題が解決される可能性があることを示した．この可能性はこれまでに考察されたことがなかったものである．これは JWST の観測が示唆する予想よりも早い時期の銀河形成の問題などを解決する可能性を持つものでもある．

6) 研究活動の概要 (高エネルギー理論分野：ケトフ)

Research of our laboratory during the academic year 2023/2024 was devoted to theoretical studies of cosmological inflation in the very early Universe, the primordial black holes formation and the induced gravitational waves in our new models based on modified gravity and supergravity theories. Graduate students (Ishikawa, Toyama) were actively involved in calculations, both analytically and numerically.

As regards our ongoing research collaboration with the cosmology group at Chulalongkorn University in Bangkok, Thailand, we studied formation of primordial black holes in the Starobinsky supergravity coupled to the nilpotent matter superfield describing Volkov-Akulov goldstino. By using the no-scale Kaehler potential and a polynomial superpotential, we found under certain conditions our model can effectively describe single-field inflation with an ultra-slow-roll phase that appears near the critical (near-inflection) point of the scalar potential. This led to the formation of primordial black holes as part of (or whole) dark matter, while keeping the inflationary spectral tilt and the tensor-to-scalar ratio in good agreement with the current cosmic microwave background (CMB) radiation bounds. After inflation, supersymmetry was spontaneously broken on the high inflationary scale of about 10^{12} GeV with the vanishing cosmological constant. Those new results opened a new way of theoretical modelling for cosmological inflation with production of primordial black holes that may be responsible for the current dark matter in the Universe.

Earlier in the year 2022, our research collaboration with Tomsk State University in Russia, resulted in other new models of primordial black hole formation without supersymmetry, by generalizing the alpha-attractor models of cosmological inflation and the Appleby-Battye-Starobinsky modified gravity model known in the literature. However, our models suffered a small disagreement with precision measurements of the cosmological tilt of scalar perturbations by Planck Collaboration. In order to eliminate the disagreement, during the reported year we improved our models by taking into account small quantum corrections. It allowed us to get a large enhancement (peak) in the power spectrum of scalar curvature perturbations to the level beyond the Hawking (black hole evaporation) limit of 10^{15} g, while having good (within 1 sigma) agreement with Planck observations of CMB, both in the generalized alpha-attractor models of E-type and in the modified Starobinsky-like gravity models.

We numerically investigated slow-roll and ultra-slow-roll phases of inflation, derived the power spectrum of scalar and tensor perturbations and calculated the masses of primordial black holes in those models. For certain values of the parameters, the primordial black holes can be formed with the asteroid -size masses between 10^{17} g to 10^{19} g, beyond the Hawking black hole evaporation limit and in agreement with current cosmological observations. The gravitational waves induced by the primordial black holes production may be detectable by the future space-based gravitational interferometers such as LISA and DECIGO.

Possible quantum corrections to our inflationary models from superstring theory were investigated in our collaboration with the Institute for Nuclear Physics at Moscow State University in Russia.

We derived the form of those corrections in modified gravity and estimated their size as well as their contribution to inflation. Those results were reported in two presentations at the International 2nd Electronic Conference on Universe and published in the Proceedings of that Conference.

Our research was supported by Tokyo Metropolitan University, Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe at the University of Tokyo, and the Japanese Society for Promotion of Science under the grant No. 22K03624. Our new research resulted were well recognized by the international research community because of 3 invited plenary talks given by Principal Investigator (Ketov) at three major international scientific conferences in the UK, Greece and Japan during the year 2023.

7) 原子核ハドロン物理の実験 (原子核ハドロン物理分野：兵藤)

LHC ALICE 実験による $\Lambda K^{\pm}$ 相互作用のフェムトスコピー　Λ バリオンと $K^{\pm}$ 中間子の間の相互作用は低エネルギーでのストレンジネス $S = 0$ および $S = -2$ セクターのチャンネル結合メソン・バリオン散乱において重要な役割を果たしている．さらに，未だ性質が実験的に確定していない $\Xi(1620)$ 共鳴の構造解明に対し，$\Lambda K^{\pm}$ 相互作用の理解が不可欠である．一方で，$\Lambda K^{\pm}$ 系は実験データに乏しく，理論計算に大きな不定性が生じていることが知られている．本研究では LHC の ALICE 実験による $\sqrt{s} = 13$ TeV の高多重度 pp 衝突において $\Lambda K^{\pm}$ 相関関数を測定した．これらの相関関数を Lednicky-Lyuboshits 公式を用いて解析し，従来より高い精度で対応する $\Lambda K^{\pm}$ 散乱長および有効レンジを抽出した．ΛK^{-} 相関においては，相対運動量 $k^* \geq 200$ MeV の領域で Ω の弱崩壊および $\Xi(1690)$，$\Xi(1820)$ 共鳴の崩壊に起因するピーク構造が観測された．さらに低運動量の領域では，$K^{-}\Lambda$ に強く結合すると予想される $\Xi(1620)$ 共鳴の存在が確認された．これは $\Xi(1620) \to \Lambda K^{-}$ 崩壊の初めての実験的測定である．以上の結果は $\Lambda K^{\pm}$ の理解に重要な貢献を果たしている．特に，$\Xi(1620)$ 共鳴の測定は，エキゾチックハドロンの性質およびその起源に対する新たな知見を提供する．また，$\Lambda K^{\pm}$ 散乱長および有効レンジの決定は，関連する理論モデルの精度向上に寄与する．本研究によりメソン・バリオン相互作用の包括的な理解が進み，さらなる実験的および理論的研究の基盤を提供すると期待される．

8) 原子核ハドロン物理の理論 (原子核ハドロン物理分野：兵藤)

崩壊とチャンネル結合の影響を考慮した T_{cc} と $X(3872)$ の複合性　エキゾチックハドロンの内部構造の有力な候補としてハドロン分子構造があり，複合性と呼ばれる物理量でハドロン分子構造が波動関数中に占める割合を定量化することができる．本研究では，低エネルギー普遍性の観点から，有効場の理論を用いて弱束縛状態の複合性について 2 つの性質を解明した．第一に，1 チャンネル弾性散乱にベア状態との結合を含むモデルを導入し，ベア状態のエネルギーを変化させつつ束縛状態の複合性を評価した．閾値近傍の固有状態がハドロン分子構造によって支配されるという一般的な期待に反して，結合エネルギーが小さくても非複合的状態が常に実現可能であることが示された．しかし同時に，非複合的な弱束縛状態を得るためには，パラメーターの fine tuning が必要であることも明らかになった．つまり，低エネルギー普遍性に従い，結合エネルギーが小さくなるほど複合的な成分が支配的な状態を持つモデルを見つける確率が高くなると理解できる．第二に，実際のエキゾチックハドロン解析において重要になる崩壊とチャンネル結合の効果を有効場の理論に取り込み，複合性の値の変化について議論した．崩壊およびチャンネル結合は閾値チャンネル以外の成分の割合を増加させるため，閾値チャンネルの複合性は抑制されることを定量的に示した．具体的な例として，閾値近傍のエキゾチックハドロンである T_{cc} と $X(3872)$ の構造を複合性を用いて評価した．結果として，T_{cc} の構造に対してはチャンネル結合が，$X(3872)$ の構造に対しては崩壊の寄与がそれぞれ重要であることが分かった．本研究は，弱束縛状態の複合性に関する新たな理解を提供する．特に，エキゾチックハドロンの構造において，チャンネル結合

および崩壊の寄与の重要性が定量化された．同時に，低エネルギー普遍性に基づいて，ハドロン物理に限らず閾値近傍の一般の物理現象の理解にも役立つことが期待される．

エキゾチックハドロン研究のための一般的な閾値近傍散乱振幅の構成　エキゾチックハドロンの内部構造を理解するためには，基本的な情報として，散乱振幅の極の位置で表される質量と崩壊幅を決定することが第一歩となる．本研究では，チャンネル結合がある場合の二体閾値近傍の散乱振幅の一般的な挙動を議論した．エキゾチックハドロンを含む実験データの解析に従来よく用いられている Flatté 振幅は，閾値近傍のエネルギー領域でいくつかの制約があることが知られている．また，散乱振幅の一般的な表現を与える M 行列型の振幅は，チャンネル空間における振幅の行列式の性質により，Flatté 振幅とスムーズに接続できない．本研究では，有効場の理論に基づき，閾値近傍で一般的な表現を持ち，かつ Flatté 振幅がスムーズに再現される新しい散乱振幅を提案する．まず，M 行列型の振幅を導く有効場の理論を解析し，従来の繰り込み条件を修正することにより，新しいパラメトリゼーションを持つ散乱振幅を構築した．新しいパラメトリゼーションにより，閾値近傍での散乱振幅の一般的な表現が得られ，Flatté 振幅とスムーズに接続することが可能となった．一般的なチャンネル結合散乱振幅には，運動量の一次のオーダーでも非共鳴バックグラウンド散乱の寄与が存在することを示した．実験データとの比較に向けて，散乱断面積のエネルギー依存性を新しい散乱振幅を用いて評価し，Flatté 振幅の断面積と，より一般的な段面積の間の関係を議論した．Flatté 振幅を用いた場合は，閾値近傍での断面積は典型的にピーク構造または閾値カスプ構造を示すことが知られているが，一般的な場合にはバックグラウンド項との干渉により閾値近傍でディップ構造が生じる可能性があることを明らかにした．本研究で提案した新しい散乱振幅により，エキゾチックハドロンを含む実験データの解析がより正確になることが期待できる．特に，バックグラウンド項の重要性は実験データの解釈において新たな視点を提供すると期待される．

$\Lambda\alpha$ 相互作用のフェムトスコピーによる研究　ハイペロン Λ と核子，原子核との間の相互作用は，中性子星内部の核物質の状態方程式の決定に強い影響を与える．一方で電荷をもたず不安定な Λ を含む系では従来の散乱実験が難しいことから，間接的な実験データを元にこれまで Λ と核子，原子核の相互作用は議論されてきた．本研究では，Λ などの粒子を含む系においてもハドロン間相互作用の情報を引き出すことができるため，近年注目を集めている高エネルギー衝突でのフェムトスコピーの手法を，原子核を含む Λ-^{4}He(α) 系に応用することを提案し，理論的に運動量相関関数を計算した．$\Lambda\alpha$ ポテンシャルは現象論的に作られたガウシアンのモデルと，ハイパー核データを再現するスキルム型の一体ポテンシャルと α 粒子の密度分布を用いて構成したものを用意する．すべてのポテンシャルは ${}^{5}_{\Lambda}$He の Λ 束縛エネルギーを再現するように作られているが，ポテンシャルの短距離部分は実験データで制限されないため，用意したポテンシャルは異なる短距離の振る舞いを示す．これらのポテンシャルを用いて，$\Lambda\alpha$ 運動量相関関数をいくつかのソースサイズに対して計算した．結果として，小さいサイズのソースからの相関関数において，$\Lambda\alpha$ ポテンシャルの短距離部分の振る舞いの違いが相関関数のデータに与える依存性を明らかにした．これは，高密度環境下での ΛN 相互作用の振る舞いを $\Lambda\alpha$ 相関関数の測定から制限できる可能性を示している．また，散乱長と有効レンジを用いて相関関数を記述する Lednicky-Lyuboshits 公式が，小さなソースからの $\Lambda\alpha$ 相関関数をあまり再現しないことも明らかになった．これは本研究で扱う $\Lambda\alpha$ 系のように原子核を含む系では，相互作用の到達距離がこれまで議論されてきた 2 ハドロンの系より長く，Lednicky-Lyuboshits 公式の前提条件が満たされないことに起因すると考えられる．本研究の結果より，高密度環境における ΛN 相互作用の理解や，核物質の状態方程式などの物理の包括的な理解が促進されることが期待される．

9) 宇宙理論 (宇宙理論分野：藤田)

楕円銀河中心のブラックホールへの冷たいガスの降着

楕円銀河の中心には巨大ブラックホールが存在し，活動銀河核として莫大なエネルギーを放出し，銀河の進化や周囲の環境に大きな影響を与えている．そのエネルギーのもとは，ブラックホールに降着するガスの重力エネルギーと言われている．しかしブラックホールにどのようなガスがどのように降着するのかはよくわかっていない．楕円銀河は熱い高温ガスに覆われているので，以前はそのガスがブラックホールに降着していると考えられていたが，その後の研究で，高温ガスの降着率と活動銀河核がジェットとして放出するエネルギーには相関がないこと判明するなど，単純に高温ガスが降着しているとは考えにくい状況になっている．一方，近年楕円銀河に大量の低温の分子ガスが存在することが明らかになってきており，このガスがブラックホールに降着している可能性が指摘されている．そこでチリにある電波干渉計 ALMA を使い，ブラックホールの近傍の高角分解能観測を行った．まず 9 個の銀河団の中心にある巨大楕円銀河の中心部の低温ガス質量と活動銀河核のジェットのパワーに相関があることを見出した．次にサンプルを拡大し，標準的な楕円銀河を含む 22 個について調べたところ，低温ガス質量と活動銀河核のジェットのパワーに相関があるのみならず，低温ガス質量と活動銀河核の電波放射にも相関があることがわかった．これは高温ガスではなく，低温ガスがブラックホールに降着し，活動銀河核の活動を支えていることを示す．

ブラックホール近傍のガス構造

ガスがまさに落ち込もうとしているブラックホール近傍のガス構造は，活動銀河核の活動メカニズムと密接に関連しているはずである．それを明らかにするために，コンパス座銀河の超高角分解能観測を ALMA で行った．その結果，ブラックホール近傍ではガスが流れ込むのみならず，噴出しており，ガスが循環していることがわかった．この結果は Science 誌に掲載され，記者発表も行った．

ミクロなスケールでの宇宙プラズマの振る舞い

粒子スケールでの宇宙プラズマの振る舞いは，観測される大きなスケールでの天体現象に大きな影響を与える．巨大なプラズマ流である宇宙ジェットの進化もそのようなミクロなスケールの現象に支配されている可能性を調べるために，ジェットのプラズマ粒子シミュレーションを行った．その結果，ジェットの安定性は初期磁場の配置に依存することがわかった．

銀河系内ブラックホール連星の検出予測

銀河系内にはブラックホールが 1 億個程度存在していると考えられているが，現在までに同定されているのは伴星からの質量降着によって輝く X 線連星として見つかっているものがほとんどであり，その数はせいぜい数十個程度に留まる．我々は位置天文衛星 Gaia によって伴星の動きを検出することにより発見できるブラックホールと恒星の連星の数を，ブラックホールが誕生時に受けるキックの効果を考慮に入れて予測し，さらにその観測量の間の相関関係からブラックホールの形成過程や連星の進化過程のモデルパラメータに制限が与えられる可能性を示した．

高赤方偏移における超大質量ブラックホールの成長

ビッグバンから 10 億年以内の赤方偏移 6-8 の宇宙に，太陽の 10 億倍にもおよぶ質量をもつブラックホールが存在していることが知られているが，その形成・成長過程は今もはっきりしたことは分かっていない．近年しばしば議論されるのは，ガス密度の高い領域中でブラックホールが周囲のガスを降着すると，幾何学的に分厚い降着円盤が形成されるため，ブラックホール近傍からの放射によるガスの加熱が

非等方的になり，加熱を受けない領域のガスが落ち続けるためブラックホールが急速に質量を獲得できる，というシナリオであった．しかし，このシナリオでは放射による加熱のみが考慮されていた．我々は新たに熱伝導による加熱を考慮することにより，従来ブラックホールが効率よく成長できるとされていたパラメータ領域をより狭める形で修正した．

活動銀河核の X 線スペクトルの軟 X 線超過の起源

活動銀河核の X 線スペクトルには，数 keV から数十 keV まで伸びる冪的な成分に加え，0.1-1 keV に超過成分がしばしば存在することが知られており，その起源は発見から 30 年近くもの間大きな謎とされていた．我々は活動銀河核のエネルギー源である超大質量ブラックホールまわりの降着円盤の理論モデルに自然な拡張を加えることにより，降着円盤表面に 0.1-1 keV 程度の温度をもったプラズマが存在しうることを理論的に示し，そこから生み出される放射が軟X線超過の観測的特徴をよく再現することを発見した．

CALET による宇宙線スペクトルの測定

国際宇宙ステーションに搭載されている宇宙線検出装置 CALorimetric Electron Telescope (CALET) によって，宇宙線中のヘリウム原子核，電子・陽電子のスペクトルを測定した．

10) (宇宙理論分野：佐々木)

観測的宇宙論

今までの観測結果に加え，新たに公表された銀河サーベイの観測データや，今後の観測計画，観測機器の開発状況を念頭に置きながら，宇宙の構造形成の理解を深めることと宇宙論パラメータの決定を主な課題として，観測的宇宙論の理論的研究を進めた．

2．研究業績

1) 論文

S. Sugama, O. Yasuda, Octant degeneracy and plots of parameter degeneracy in neutrino oscillations revisited, *Physical Review* **D109** (2024) 035007.

Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa and Takao Suyama, Stringy Threshold Corrections in D-brane Systems, *Physical Review* **D107** (2023) 126014.

Noriaki Kitazawa, Inflaton as a pseudo-Nambu-Goldstone boson, *Physics Letters* **B840** (2023) 137846.

S. Saburov, S. V. Ketov, "Improved model of primordial black hole production after Starobinsky inflation", *Universe*, **9** (2023) 323.

D. Frolovsky, S.V. Ketov, "Production of primordial black holes in improved E-models of inflation", *Universe*, **9** (2023), 294.

D. Frolovsky, S. V. Ketov, "Fitting power spectrum of scalar perturbations for primordial black hole production during inflation", *Astronomy* **2** (2023) 47.

Y. Aldabergenov, S. V. Ketov, "Primordial black holes from Volkov-Akulov-Starobinsky supergravity," *Fortschritte der Physik* **71** (2023) 2300039.

S. V. Ketov, "Inflationary cosmology from supergravity," In *Handbook of Quantum Gravity*, Springer, Singapore (2023).

S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), "Accessing the strong interaction between Λ baryons and charged kaons with the femtoscopy technique at the LHC", *Phys. Lett. B*, **845** (2023) 138145

T. Nishibuchi, T. Hyodo, "Analysis of the Ξ(1620) resonance and Kbar Lambda scattering length with a chiral unitary approach", *Phys. Rev. C*, **109** (2024) 015203

I. Terashima, T. Hyodo, "Hadron-hadron potentials coupled to quark degrees of freedom for exotic hadrons", *Phys. Rev. C*, **108** (2023) 035204

T. Kinugawa, T. Hyodo, "Compositeness of T_{cc} and $X(3872)$ by considering decay and coupled-channels effects", *Phys. Rev. C*, **109** (2024) 045205

A. Tanikawa, K. Hattori, N. Kawanaka, T. Kinugawa, M. Shikauchi, D. Tsuna "Search for a Black Hole Binary in Gaia DR3 Astrometric Binary Stars with Spectroscopic Data", *Astrophys. J.*, **946** (2023) 79

O. Adriani, *et al.*, "Direct Measurement of the Cosmic-Ray Helium Spectrum from 40 GeV to 250 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", *Phys. Rev. Lett.*, **130** (2023) 171002

O. Adriani, *et al.*, "Charge-Sign Dependent Cosmic-Ray Modulation Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", *Phys. Rev. Lett.*, **130** (2023) 211001

M. Shikauchi, D, Tsuna, A. Tanikawa, N. Kawanaka, "Spatial and Binary Parameter Distributions of Black Hole Binaries in the Milky Way Detectable with Gaia", *Astrophys. J.*, **953** (2023) 52

N. Kawanaka, K. Kohri, "Effects of Heat Conduction on Blocking off the Super-Eddington Growth of Black Holes at High Redshift", *Astrophys. J.*, **955** (2023) 67

A. A. Abid, Wu Zhengwei, Abdullah Khan, M. N. S. Qureshi, A. Esmaeili, "Formation of dust acoustic rarefactive solitary structures in a Cairns distributed electron–ion plasma", *AIP Advances*, **13** (2023) 105012

Y. Fujita, T. Izumi, N. Kawakatu, H. Nagai, R. Hirasawa, Y. Ikeda, "The correlation between the 500 pc scale molecular gas masses and AGN powers for massive elliptical galaxies", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, **75** (2023) 925

Abdullah Khan, M.S. Hussain, M. N. S. Qureshi, Shahid Mehmood, A. Esmaeili, "Potential impacts of hydrogen band EMIC waves on the ion velocity distributions: MMS observations", *Physics of Plasma*, **30** (2023) 112901

T. Izumi, K. Wada, M. Imanishi, K. Nakanishi, K. Kohno, Y. Kudoh, T. Kawamuro, S. Baba, N. Matsumoto, Y. Fujita, K. R. W. Tristram, "Supermassive black hole feeding and feedback observed on subparsec scales", *Science*, **382** (2023) 554

O. Adriani, *et al.*, "Direct Measurement of the Spectral Structure of Cosmic-Ray Electrons+Positrons in the TeV Region with CALET on the International Space Station", *Phys. Rev. Lett.*, 131 (2023) 191001

A. Esmaeili, Y. Fujita, "Comprehensive study of magnetic field evolution in relativistic jets based on 2D simulations", *Physics of Plasma*, **31** (2024) 022305

Y. Fujita, T. Izumi, H. Nagai, N. Kawakatu, N. Kawanaka, "The Relationships between Active Galactic Nucleus Power and Molecular Gas Mass within 500 pc of the Center of Elliptical Galaxies", *Astrophys. J.*, **964** (2024) 29

2) 著書

永江知文，兵藤哲雄，"K 中間子原子核の物理", 基本法則から読み解く物理学最前線，共立出版 (2023)

Tetsuo Hyodo, Wolfram Weise, "Theory of kaon-nuclear systems", p2749-p2782, Ed. I. Tanihata, H. Toki and T. Kajino, "Handbook of Nuclear Physics" Springer (2023)

3) 学会講演

● 日本物理学会 第 78 回年次大会 2023 年 9 月 16 日 – 19 日 (東北大学)

須釜祥, 安田修：ニュートリノ振動におけるパラメータ縮退の再考

● 日本物理学会 2024 年春季大会 2024 年 3 月 17〜21 日（オンライン）

衣川　友那，兵藤　哲雄：「閾値近傍の共鳴状態の複合性」

西淵　拓磨，兵藤　哲雄：「カイラルユニタリー法に基づいた $\Xi(1620)$ 共鳴の解析」

寺島　伊吹, 兵藤　哲雄:「クォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルの局所近似の性質と $X(3872)$ への応用」

曽根　克佳，兵藤　哲雄：「新たなパラメトリゼーションの散乱振幅を用いた閾値近傍のハドロン散乱」

渡辺　蒼大，兵藤　哲雄：「高エネルギー衝突での 2 粒子間相関関数における共鳴状態の影響」

● クォーク・ハドロン・原子核物理の潮流と展望 2024 年 3 月 3〜4 日（京都大学基礎物理学研究所）

兵藤　哲雄：「フェムトスコピーによるハドロン間相互作用の研究」

● ストレンジネス核物理：現状と最近の進展 2024 年 1 月 26 日（J-PARC，東海）

兵藤　哲雄：「$\bar{K}N$ 相互作用および関連する物理，その最近の進展」

● セミナー 2023 年 12 月 15 日（新潟大学）

兵藤　哲雄：「フェムトスコピーによるハドロン間相互作用の研究」

● 南部コロキウム 2023 年 12 月 7 日（大阪大学）

兵藤　哲雄：「フェムトスコピーで探る強い相互作用の世界」

● 量子物理学・ナノサイエンス第 375 回セミナー 2023 年 11 月 10 日（東京工業大学）

兵藤　哲雄：「ハドロン共鳴状態の構造」

● 実験，反応・構造計算，格子 QCD で解き明かすハドロン分光 2023 年 11 月 8〜9 日（東北大学電子光理学研究センター）

衣川　友那，兵藤　哲雄：「閾値近傍の共鳴状態の複合性」

西淵　拓磨，兵藤　哲雄：「Analysis of Ξ(1620) resonance with chiral unitary approach」

寺島　伊吹, 兵藤　哲雄：「Derivative expansions of hadronic potentials coupled to quarks for $X(3872)$」

曽根　克佳，兵藤　哲雄：「Near-threshold hadron scattering using new parametrization of amplitude」

渡辺　蒼大，兵藤　哲雄：「高エネルギー衝突での 2 粒子間相関関数における共鳴状態の影響」

● J-PARC と重イオン衝突実験の交差点 2023 年 10 月 27〜28 日（J-PARC，東海）

兵藤　哲雄：「フェムトスコピーによるハドロン間相互作用の研究」

● セミナー 2023 年 10 月 20 日（名古屋大学）

寺島　伊吹：「Hadron-hadron potentials coupled to quark degrees of freedom for exotic hadrons」

● セミナー 2023 年 10 月 20 日（理研少数多体系物理研究室）

曽根　克佳：「Near-threshold hadron scattering using new parametrization of amplitude」

● H 研夏の学校 2023 2023 年 9 月 28-29 日（名古屋大学）

兵藤　哲雄：「Femtoscopy for exotic hadrons and nuclei」

● 第 9 回クラスター階層領域研究会 2023 年 9 月 22 日（理研）

兵藤　哲雄：「Compositeness, Λ(1405), and kaonic nuclei」

衣川　友那，兵藤　哲雄：「New interpretation of compositeness of resonances」

● セミナー 2023 年 9 月 7 日（大阪大学）

兵藤　哲雄：「フェムトスコピーによるハドロン間相互作用の研究」

● セミナー 2023 年 8 月 2 日（九州大学）

兵藤　哲雄：「フェムトスコピーによるハドロン間相互作用の研究」

● セミナー 2023 年 7 月 7 日（名古屋大学）

衣川　友那：「Compositeness of exotic hadrons with decay and coupled-channel effects」

● セミナー 2023 年 5 月 26 日（東京工業大学）

衣川　友那：「Compositeness of exotic hadrons with decay and coupled-channel effects」

● 第 10 回山田研究会「宇宙における降着現象〜活動性・多様性の源〜」　2023 年 6 月 3 日〜5 日（京都大学）

川中 宣太, 嶺重 慎「活動銀河核の軟 X 線超過の起源としての温かいコロナモデル」

● 銀河系中心研究会 2023　2023 年 8 月 3〜4 日（国立天文台）

藤田 裕：「Reverse Shock が示す高速 AGN 風でできたフェルミバブル」

● 日本天文学会 2023 年秋季年会　2023 年 9 月 19〜22 日（名古屋大学）

藤田 裕, 泉 拓磨, 川勝 望, 永井 洋, 平澤 凌, 池田 裕：「銀河団中心銀河の分子ガス質量と AGN feedback の相関」

池田 裕, 泉 拓磨, 藤田 裕, 市川 幸平, 河野 孝太郎, 上田 佳宏, 今西 昌俊, 川室 太希, 平澤 凌, BASS TEAM 「近傍高光度 Swift/BAT–AGN における質量降着と分子アウトフローの探査」

● 高エネルギー宇宙物理学研究会 2023　2023 年 11 月 27〜29 日（東京大学）

藤田 裕：「Reverse Shock が示す高速 AGN 風でできたフェルミバブル」

川中 宣太, 郡 和範: 「超大質量ブラックホールの種の超エディントン成長における熱伝導の影響」

● ALMA フェローシンポジウム　2023 年 12 月 20 日（国立天文台）

川中 宣太: 「High Resolution Observations of the Circumnuclear Molecular Gas Disk in NGC 1275」

● ニュートリノ放射天体の理論ワークショップ　2024 年 2 月 27〜28 日（東京大学）

藤田 裕：「AGN 活動でできた Odd Radio Circles の多波長観測の可能性」

● ブラックホール大研究会〜星質量から超巨大ブラックホールまで〜　2024 年 2 月 28 日-3 月 2 日（静岡県御殿場市・オンライン）

川中 宣太: 「超巨大ブラックホールの超エディントン降着成長における熱伝導の影響」

● CALET による銀河宇宙線・ガンマ線観測の現状と展望　2024 年 2 月 29 日（東京大学宇宙線研究所）

川中 宣太: 「銀河宇宙線原子核スペクトルの理論的解釈とその検証法について」

● 日本天文学会 2024 年春季年会　2024 年 3 月 11〜15 日（東京大学・オンライン）

藤田 裕，泉 拓磨，川勝 望，永井 洋，川中 宣太：「楕円銀河での核周辺分子ガス質量と AGN 活動度の相関」

川中 宣太，郡 和範: 「超巨大ブラックホールの超エディントン降着成長における熱伝導の影響」

<u>国際会議</u>

● Hokkaido Workshop on Particle Physics at Crossroads, 7 – 10 March 2024, Hokkaido University, Sapporo, Japan

S. Sugama: T-violation of neutrino oscillation at μTRISTAN

● MIAMI 2023 Physics Conference, 13 – 19 December 2023, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Sensitivity of Future Long Baseline Experiments and Octant Degeneracy

● 19th Rencontres du Vietnam, Neutrino Workshop at IFIRSE, 16 – 19 July 2023, ICISE, Quy Nhon, Vietnam

O. Yasuda: Complementary between Hyper-K and DUNE to complete the 3-flavor PMNS picture and beyond (Invited talk)

● International Workshop "Focus Week on Primordial Black Holes" 2023 年 11 月 13-17 日 (Kavli IPMU, Japan)

S.V. Ketov: Production of primordial black holes as a probe of high-scale inflation and supergravity (invited plenary talk)

● international Workshop on the Standard Model and Beyond 2023 年 8 月 27-9 月 7 日 (Corfu, Greece)

S.V. Ketov: Inflation, production of primordial black holes and spontaneous SUSY breaking in modified supergravity (invited plenary talk)

● The 30th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY2023), 2023 年 7 月 17-21 日 (Southampton, UK)

S.V. Ketov: Inflation, production of primordial black holes and spontaneous SUSY breaking in modified supergravity (invited plenary talk)

● Fourth International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (HEF-ex 2024) 2024 年 2 月 19-21 日（J-PARC, Tokai, Japan）

T. Kinugawa, T. Hyodo: Compositeness of near-threshold s-wave resonances

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Analysis of $\pi\Xi$ spectrum for $\Xi(1620)$ resonance with chiral unitary approach

I. Terashima, T. Hyodo: Properties of $X(3872)$ from hadronic potentials coupled to quarks

K. Sone, T. Hyodo: Near-threshold hadron scattering using new parametrization of amplitude

● International School for Strangeness Nuclear Physics 2023 (SNP School 2023) 2023 年 12 月 11-15 日（J-PARC, Tokai, Japan）

T. Kinugawa, T. Hyodo: Compositeness of near-threshold s-wave resonances

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Analysis of $\Xi(1620)$ resonance with chiral unitary approach

I. Terashima, T. Hyodo: Derivative expansions of hadronic potentials coupled to quarks for $X(3872)$

K. Sone, T. Hyodo: Near-threshold hadron scattering using new parametrization of amplitude

S. Watanabe, T. Hyodo: The effect of resonances in the two-particle correlation functions in the high energy collisions

● 2023 Fall Meeting of APS DNP and JPS (Hawaii 2023) 2023 年 11 月 26-12 月 1 日（Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA）

T. Hyodo: Compositeness of hadrons and its application to baryon resonances

T. Kinugawa, T. Hyodo: Compositeness of T_{cc} and $X(3872)$ with decay and coupled-channel effects

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Analysis of $\Xi(1620)$ resonance with chiral unitary approach

I. Terashima, T. Hyodo: Hadron-hadron potentials coupled to quark degrees of freedom for exotic hadrons

● Nagoya Workshop on Exotic Hadrons 2023 年 11 月 24-17 日（Nagoya Univ., Japan）

T. Hyodo: Femtoscopy for exotic hadrons and nuclei

T. Kinugawa, T. Hyodo: Compositeness of near-threshold s-wave resonances

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Analysis of $\Xi(1620)$ resonance with chiral unitary approach

I. Terashima, T. Hyodo: Derivative expansions of hadronic potentials coupled to quarks for $X(3872)$

K. Sone, T. Hyodo: Near-threshold hadron scattering using new parametrization of amplitude

● International workshop on J-PARC hadron physics 2023 (J-PARC Hadron 2023) 2023 年 9 月 12-15 日（J-PARC, Tokai, Japan）

T. Kinugawa, T. Hyodo: Compositeness of T_{cc} and $X(3872)$ with decay and coupled-channel effects

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Analysis of $\Xi(1620)$ resonance with chiral unitary approach

I. Terashima, T. Hyodo: Hadron-hadron potentials coupled to quark degrees of freedom for exotic hadrons

K. Sone, T. Hyodo: Near-threshold hadron scattering using new parametrization of amplitude

● 17th International Workshop on Meson Physics (MESON2023) 2023 年 6 月 22-27 日（Krakow, Poland）

T. Hyodo: Theoretical status of antikaon-nucleon interactions

T. Kinugawa, T. Hyodo: Compositeness of T_{cc} and $X(3872)$ with decay and coupled-channel effects

T. Nishibuchi, T. Hyodo: Analysis of $\Xi(1620)$ resonance with chiral unitary approach

I. Terashima, T. Hyodo: Derivative expansions of hadronic potentials coupled to quarks for $X(3872)$

K. Sone, T. Hyodo: Near-threshold hadron scattering using new parametrization of amplitude

● 2nd Workshop on Hadron Interactions, Hyper-Nuclei and Exotic Hadron productions at High-Energy Experiments 2023 年 6 月 22-27 日（Tokyo Univ., Japan）

T. Hyodo: Femtoscopy for exotic hadrons and nuclei

● AGN Winds on the Chesapeake　2023 年 6 月 15 日（Easton, USA）

Y. Fujita: AGN winds as the origin of the Fermi bubbles

● Detecting Missing Baryons in the Universe　2023 年 7 月 20 日（北京, 中国）

Y. Fujita: The Fermi bubbles tell us what created the circumgalactic medium (invited)

● 38th International Cosmic Ray Conference　2023 年 7 月 26 日 (名古屋大学)

N. Kawanaka: Origin of Spectral Hardening and Softening of Secondary Cosmic Ray Nuclei

● East-Asia AGN Workshop 2023　2023 年 9 月 25 日 (鹿児島大学)

Y. Fujita: The correlation between the 500 pc scale molecular gas masses and AGN powers for massive elliptical galaxies

● Synergies at new frontiers 2024　2024 年 3 月 25 日 (東京大学)

Y. Fujita: Current status and expectations for XRISM (invited)

非線形物理研究室

1．研究活動の概要

1) 超近可積分系のトンネル効果と複素軌道のエルゴード性

動的トンネル効果は規則領域とカオス領域とが自己相似的に入り交じる複雑な位相空間で起こる．ここでは，複素半古典論を用いて，位相空間内にプランクスケールの非可積分性由来の不変構造が現れない，超近可積分系のトンネル効果を調べた．超近可積分系の固有関数には，そのトンネルテールには可積分系には見られない階段構造が出現するが，その起源を複素領域での古典力学から説明するのがここでの目的である．非可積分な複素古典力学の著しい特徴は，実位相空間が不変曲線で分断されている状況（混合位相空間）であってもエルゴード性が実現されることであり（厳密な証明が与えられているのは多項式写像のみ)，可積分系に現れないトンネルテールの階段構造は複素古典力学のエルゴード性をもとに説明される．超近可積分系の複素位相空間内に現れる回転領域（Kolmogorov-Arnold-Moser 曲線の複素拡張) の分類を行った後，状態間のトンネル遷移を支配する複素軌道の特定を行い，さらに，これまでトンネル効果の複素半古典解析では考慮されることのなかった古典軌道の作用実部の役割を考察した．トンネルテールに現れる階段構造を，最小作用虚部をもつ複素古典軌道間の干渉の観点から議論した．

2) 可積分写像のトンネル効果

Suris によって導入された 2 次元可積分写像の示すトンネル効果を調べた．2 次元面積保存写像は線形写像以外，非自明な可積分写像はほとんど知られていないが，Suris によって導入された可積分写像は 1 自由度の連続ハミルトニアンを保存量にもち，写像から得られるすべての軌道はそのハミルトニアンが定める 1 次元曲線上に束縛される．ここでは，Suris の可積分写像，および対応する連続ハミルトン系に対して，トンネル分裂，及び，分裂を与える局所モード（トンネル二重項状態の線形結合から得られる状態）のトンネルテールを比較した．その結果，トンネル分裂については両者の間に違いは見られないにも関わらず，局所モードについては明確な差があることがわかった．特に，連続ハミルトン系には可積分系で見られる単調なトンネルテールしか見られないのに対し，可積分写像のトンネルテールには振動を伴うプラトー構造が現れる．トンネル効果は複素領域の古典力学を用いて記述できることから，得られた違いが複素古典力学の差異に現れていることを期待することは妥当である．実際，連続ハミルトン系はハミルトニアンが複素解析的でその解曲線は一価解析的であるのに対し，可積分写像には複素領域に現れる分岐点がダイナミクスに多価性をもたらし，複素領域のダイナミクスには大きな違いがあることがわかった．以上を踏まえた複素半古典的な解析が今後の課題である．

3) 高次元シンプレクティック写像における非自明な一様双曲性領域の探索

系が馬蹄型条件を満たし，かつ一様双曲的であるとき，その力学系は記号力学系と共役になる．2 次元エノ ン写像は，非線形パラメータが十分大きいとき，系は馬蹄型条件を満たし，かつ一様双曲的になることが知られている．この領域で系のダイナミクスは 2 進記号力学系と共役になるが，系の非線形パラメータをさらに小さくしても，一様双曲性の回復する有限の長さをもつ非自明なパラメータ区間 (hyperbolic plateau) が無数に現れる ．ここでは，2 次元エノン写像を結合させた結合エノン写像を導入し，同様の考察を多次元系写像に対して行った．れわれは既に，パラメータ領域の中に，4 進記号列および 2 進記号列に共役な 2 種類のパラメータ領域が存在することを証明したが，Arai によって提案された一様双曲性の数値的証明アルゴリズムを結合エノン写像に対して適用することによって，4 進記号列および 2 進記号列を与えるパラメータ領域とは離れた領域に一様双曲性条件を満たすパラメータ領域が島状に並んで現れることを発見した．このことは結合エノン写像においても，2 次元の場合と同様，系が非自明な

マルコフ分割から得られる有限型サブシフトと共役になるパラメータ領域が存在することを強く示唆する結果である．得られたパラメータ領域にある力学系の位相的エントロピーが，2 進および 4 進記号列に対する位相的エントロピーと異なるものであることを立証するのが今後の課題である．

4) 1 次元ランダム力学系における escape rate

コンパクトな状態空間にホールと呼ばれる系の軌道が脱出する領域を設置した開放力学系に対する考察を行った．特にここでは，軌道がホールから脱出する割合 (escape rate) に注目し，1 次元の拡大写像，および 2 次元の一様双曲的写像それぞれについての脱出率の厳密な評価を議論した．系が状態空間内で拡大的，もしくは一様双曲的である場合，その時間発展は状態空間内で一様にランダムなものになるため，素朴には，ホールの設置位置，形状などに依存せず，その escape rate はホールの面積にのみ依存することが予想されるが，実際には，状態空間内における力学系の特性量に依存することが最近の研究で明らかになっている．ここではまず，マルコフ分割の一つをホールとして設置することにより，escape rate に対する厳密な計算式，および力学系を特徴づける特性量を用いた escape rate の近似式が与えた．特に，決定系については，Afraimovich-Bunimovich が用いた手法を Arnold cat map に対して拡張し，重み付き構造行列を用いた escape rate の厳密な表式，および，熱力学形式に基づく escape rate の評価式を導出した．また，マルコフ分割の一つをホールとして設置し，さらに，系と雑音の結合を skew 力学系の形で定義することにより，ランダム力学系を導入し，その escape rate を議論した．決定系については，熱力学形式に基づく位相的圧力と escape rate との関係について Young らによる考察があるが，ランダム力学系についてはそれに対応するものがない．ここでは，ランダム二倍写像に対して，確率遷移行列を用いた escape rate に対する厳密表式を導き，さらに，いくつかの仮定のもと，Young らが行った熱力学形式に基づく議論を導入されたランダム力学系に対して拡張し，力学系の特性量を用いた escape rate の下限を導いた．

5) 断熱動力学が誘発する新奇なホロノミー

力学的な断熱サイクルは断熱状態に変化をもたらし得る．このことはいわゆるベリー位相やハネー角といった位相変化については有名なものだが，位相変化を度外視したとしても残留する状態変化（新奇なホロノミーとしばしば呼ばれる）については，その具体例と理論的背景が近年になってようやく明らかになってきた．新奇なホロノミーは断熱状態や固有モードの量子数といったトポロジカル数を断熱的に変化させる点で奇妙である．従来，このことと断熱サイクルの大域的な性質との対応が論じられてきた：例えば（擬）固有エネルギーや基準振動数の交差・移動・巻き付き，あるいは，固有射影作用素の集合が描く軌跡のホモトピー分類といったものだ．

本年度は新奇なホロノミーの研究として二つの問題を主に考察した．（a）新奇なホロノミーの一例として知られている，系の切断・接合を伴う断熱サイクルを再考し，波動関数の節の数が切断・接合の直前直後にて変化することを見いだした．これは量子数が変化する箇所が断熱パラメーター空間中で局在することを意味する．この結果を断熱サイクルの大域的性質を論じる一般論と繋げることは未解決問題として残った；（b）古典系での新奇なホロノミーの新しい具体例として，断熱的に強度を変調したパルス磁場中での荷電粒子の運動を調べた．そこでは作用変数のアンホロノミーが起きることで荷電粒子の速度が反転する．つまり，このような断熱サイクルにより荷電粒子に対する “鏡” を作ることができる．

2．研究業績

1）論文

Hajime Yoshino, Normann Mertig, and Akira Shudo: Uniform hyperbolicity of a class of scattering maps, Nonlinearity **36** (2023) 5097 (47 pages).

Ryonosuke Koda and Akira Shudo: Ergodicity of complex dynamics and quantum tunneling in non-integrable systems Phys. Rev. E **108** (2023) 054219 (25 pages).

Yasutaka Hanada, Kensuke S. Ikeda and Akira Shudo: Dynamical tunneling across the separatrix, Phys. Rev. E, **108** (2023) 064210 (17 pages).

Makoto Ohshika, Domenico Lippolis, Akira Shudo: Escape-rate response to noise of all amplitudes in leaky chaos, Physica D, **458** (2024) 134016 (12 pages).

Gergö Nemes: Resurgence in the transition region: The incomplete gamma function, Symmetry, Integrability and Geometry: Methods and Applications **20** (2024), Article 026 (14 pages).

2）学会講演

● 日本物理学会 春季大会 2024 年 3 月 18 日–21 日（オンライン開催）

藤岡佳佑, Li Jizhou, 首藤啓：結合エノン写像における非自明な一様双曲領域

国内研究会

● 非平衡・多階層・複雑系研究会, 2023 年 8 月 28 日–30 日（早稲田大学）

首藤 啓：Ergodicity of complex dynamics and quantum tunneling in ultra-near integrable systems（招待講演）

● Dynamics Days 2023 Kagurazaka，2023 年 12 月 4 日–8 日 (Morito memorial hall, Tokyo University of Science)

Atushi Tanaka, Holonomy in action for classical integrable systems （断熱サイクルは完全可積分古典系の断熱不変量（作用変数）を置換する）

国際会議

● Invitation to Recursion, Resurgence and Combinatorics, April 10–April 14, 2023 (OIST)

Gergö Nemes: Realistic error bounds for asymptotic expansions arising from integrals via resurgence (invited)

● KiPAS Dynamics Days (KiPDD) 2023 –A satellite conference of ICIAM 2023–, Aug 27–Aug 31, 2023 (Keio University)

Akira Shudo: Ergodicity of complex dynamics and quantum tunneling in ultra-near integrable systems (invited).

● Exact Asymptotics: From Fluid Dynamics to Quantum Geometry, Sep 4–Sep 8, 2023 (OIST)

Akira Shudo: Quantum signatures of chaos (public talk).

Akira Shudo: Role of new Stokes curves in some physics problems (invited).

Gergö Nemes: An introduction to exponential asymptotics (invited).

● Dynamics Days Central Asia and Caucasus-, Oct 2–Oct 5, 2023 (Bukhara, Uzbekistan)

Akira Shudo: Ergodicity of complex dynamics and quantum tunneling in ultra-near integrable systems (invited).

● Koriyama Geometry and Physics Days "Stokes phenomena in geometry & physics": March 30–March 31, 2024 (Koriyama, Nihon University)

Akira Shudo: Stokes geometry in a quantum chaotic system (invited).

Gergö Nemes: Uniform asymptotic smoothings of (higher-order) Stokes phenomena (invited).

Gergö Nemes: On the Borel summability of formal solutions of linear ordinary differential equations with a large parameter (invited).

量子凝縮系理論研究室

1．研究活動の概要

1) 量子力学の諸問題への機械学習の応用

量子力学の基本方程式であるシュレディンガー方程式の機械学習による解法を研究した．とくに摂動を伴うハミルトニアンに対し，摂動の 1 次までの情報から無限次までを取り込んだ解を推定する手法を開発した．さらに，機械学習の Flow-based model による逆繰り込み変換を行い，古典スピン系のシミュレーション技法の改良を行った．前者については論文にまとめ，出版が決まった．後者については投稿中である．[森]

2) 量子力学的粒子系のモンテカルロシミュレーションへの機械学習の応用

N 次元量子力学的粒子系は $N+1$ 次元古典力学的粒子系の問題に焼き直せることから，1 次元粒子系を世界線を用いたモンテカルロシミュレーションで 2 次元古典粒子系の空間配置図に示し，機械学習の画像認識を使って物性解析に応用した．とくに 1 次元ボーズ粒子系のモット転移を例にとり，この画像認識による相転移の臨界指数の特定祖行ったところ，既知の数値と良い一致が見られた．この内容については，現在論文を執筆中である．[森]

3) オートエンコーダを用いた 2 次元イジングモデルの相分離の検証

機械学習はデータ分析手法の一種である．データの中から背景にあるルールやパターンといった特徴量を抽出できる．Deep Learning とは，機械学習手法の一つであるニューラルネットワークを多層に構築したものである．与えられたデータから自ら特徴を抽出することで最適化を行っている．Deep Learning の手法の 1 つオートエンコーダがある．オートエンコーダは入力データの次元を圧縮し，再度元の次元に復元するよう学習することで，次元削減や特徴抽出に用いられるアルゴリズムである．2023 年度は 2 次元イジングモデルの相分離についてオートエンコーダの深層学習モデルを用いる手法を用いて検討を行った．先行研究ではオートエンコーダの再構成誤差が大きいという問題があったが，先行研究のモデルの追試と畳込み型モデルにおける層数の変化に伴う変化の確認を行った結果，より精度の良い学習器が得られた．関連する論文を執筆中である．[荒畑]

4) Bose 原子気体超流動の温度推定器の改良

冷却原子気体で BEC を起こす温度まで冷却するためには，磁場を用いて作成したトラップ中に希薄な原子気体を捕捉する必要がある．冷却原子気体では飛行時間測定法 (TOF) で原子集団を観測するのが一般的である．TOF で温度を見積もる時には，原子集団が理想気体であり，相互作用せずに自由落下すると仮定して計算した密度分布を用いる．しかしながら，原子集団の相互作用は無視できず，相互作用を考慮して推定した温度とかなりの隔たりがある．今年度は，この ZNG 理論を利用し，トラップ切断後の Bose 原子気体の振る舞いを再現する高精度のシミュレーションデータを教師とし，Bose 原子気体超流動の温度推定を行う機械学習モデル (学習器) の作成とその詳細な分析を行った．機械学習を用いた学習器の作成には人の手で決めざるを得ないハイパーパラメータが存在する．本研究では温度推定を行う学習器について Optuna を使用することで効率的に精度の高い学習器の作成に成功した．関連する論文を執筆中である．[荒畑]

5) 二次元格子対称性をもつ普遍的漸近式を用いた短距離相関関数の数値的研究

引き続き非臨界状態にある古典格子模型の相関関数の漸近形の研究を行っている．正方格子の C4v 対称性を持つ漸近式および三角格子の C6v 対称性を持つ漸近式がそれぞれの離散的対称性を反映した 4 次の

代数曲線により与えられることを明らかにしてきたが本年度は主に非単純格子である六角格子の解析を行った．副格子内の相関関数は三角格子と同じ C6v の対称性を有するが副格子間では空間反転対称性を持たない C3v となる為，解析が容易ではない．我々は幾つかの候補から数値計算との比較を通して正しい漸近式を特定する作業を行っている [大塚，藤本雅文 (奈良医大)]

6）フラストレート系に見られる 6 状態クロック普遍性クラスの出現に関する研究

反強磁性 (AF) 体は強磁性 (F) 体と異なり格子構造の影響を受け易く低温まで秩序しないものや新奇な相転移を示すものが多く知られている．カゴメ格子 AF イジング模型はその代表例であり基底状態においても有限な相関長を持つ常磁性相にある．これに対して Takagi-Mekata らは更に次近接 F 相互作用を加えることにより状態を秩序化させ結果として低温において 6 重縮退した秩序相を安定化させられることを見出している．一方高温では常磁性相になることより次近接相互作用をもつカゴメ格子 AF イジング模型は双対 sine-Gordon 模型で記述される 6 状態クロック普遍性クラスにあると予想される．我々は Monte-Carlo 法を用いた機械学習のアプローチおよび転送行列の固有値構造を解析する level-spectroscopy 法を用いて同フラストレート系の大域的な相構造を調べている．[大塚，岡部豊]

2．研究業績

1）論文

E. Arahata and T. Nikuni: “Simulation method for evaporative cooling of trapped Bose gases at finite temperatures” 34th IUPAP Conference on Computational Physics,

Comprehensive studies on the universality of BKT transitions-machine-learning study, Monte Carlo simulation, and level-spectroscopy method, Hiromi Otsuka, Kenta Shiina, and Yutaka Okabe, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 56 (2023) 235001.

2）著書

「スタンフォード物理学再入門 特殊相対性理論・古典場の理論」（レオナルド・サスキンド，森弘之訳，日経 BP）

3）学会講演

●日本物理学会　第 78 回年次大会，2023 年 9 月 16 日-19 日　東北大学

藤本雅文, 大塚博巳: 蜂の巣格子ポッツ模型における副格子間相関関数と C3v 対称性

●日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月 18 日-21 日 オンライン

吉見一慶, 荒畑恵美子, 森弘之：深層学習を用いた特徴量抽出による相推定手法の検証

強相関電子論研究室

1．研究活動の概要

強相関電子論研究室では，量子臨界点近傍の新奇な量子多体状態や，遷移金属化合物，希土類化合物，アクチノイド化合物などのいわゆる強相関電子系物質の磁性や超伝導に関する理論的研究を行っている．これらの系では電子間のクーロン斥力の影響が非常に強く，従来のバンド理論を超えた理論的枠組みが必要となるが，本研究室では，場の量子論的手法や計算物理的手法を駆使して研究を行っている．2023年度の研究室構成は，常勤教員 2 名，連携客員教授 1 名，大学院生 3 名，卒研生 5 名であった．以下は，2023 年度に行った主な研究の概要である．

1) Pr 系 1-2-20 化合物における波数 $\vec{Q} = (\pi, \pi, \pi)$ 四極子秩序の磁場相図

強相関電子系化合物である $PrIr_2Zn_{20}$ は低温で四極子秩序状態に転移し，さらに絶対零度近傍で超伝導が見つかっている興味深い物質である．この系に磁場を印加すると，四極子秩序は次第に抑制され，低温では最終的に $H = 5$T 近傍で消滅することが知られている．発見当初，$H = 0$ での転移温度 $T \simeq 0.15$ K 近傍での温度磁場相図において，結晶の純良性が低いことが原因と見られる異常が確認されていた．最近の純良単結晶育成の結果，この異常が純良性の問題ではなく本質的に新たな相転移の異常であることがわかってきた．このことを念頭に，すでに中性子散乱実験で得られている，秩序変数の波数 $\vec{Q} = (\pi, \pi, \pi)$ をもつ四極子秩序のランダウ自由エネルギーを解析し，single-$\vec{Q}$ の範囲で磁場温度相図を作成した．自由エネルギーには波数 $\vec{Q}$ の四極子と，一様な四極子モードの結合項が複数存在し，その結合定数の大小により，複数の異方的な四極子秩序相の安定化が決まっていることがわかった．これらの結果は転移温度近傍の未知の秩序相についての候補の一つとなるとともに，より複雑な 2 重，4 重 Q の四極子秩序変数をもつ状態の解析の足がかりとなる．

2) 三角格子上のハイブリッド多極子多重 Q 秩序

対称性の破れによって，ホールおよびスピンホール効果や種々の電気磁気効果などの興味深い応答が発現する．それらを系統的に整理するために，近年，多極子の完全基底が整備されてきた．これまで，異なる種類の多極子モーメントが協奏的に秩序を形成する状態は，単純な軌道秩序＋磁気秩序や，電荷秩序＋磁気秩序などが知られてきたが，本研究では電気四極子と磁気双極子や異なる種類の電気四極子の多重 Q 秩序が安定化する三角格子模型を提案し解析した．興味深い状態として，四極子の 3 重 Q 秩序により生じる無秩序サイトに磁気秩序が発現するもの，異なる種類の電気四極子の 3 重 Q 秩序の同時発現などが挙げられる．これらの状態と伝導電子が結合した場合に電荷分布の変調が生じることや，秩序波数が非整合波数になった場合などについて議論した．

3) マンガン酸化物のジグザグ反強磁性相における端のスピン構造

巨大な負の磁気抵抗効果の発現で知られるマンガン酸化物を理論的に考えるときに出発点になるのは, 強磁性的な強いフント結合を通して t_{2g} スピンと結合する遍歴的な e_g 電子の模型である．これは二重交換模型と呼ばれ, マンガン酸化物の基本モデルになっている．しかし，実際のマンガン酸化物で現れる複雑なジグザグ反強磁性スピン構造を理解するには，e_g 電子の軌道自由度の考慮は不可欠であり，軌道自由度を考慮した二重交換模型に基づいて，ジグザグ反強磁性スピン構造の出現がジグザグのトポロジーに基づいて理解できることが指摘されている．さらに，最近，トポロジカル物質の研究が発展するようになって，マンガン酸化物においても端の存在によってトポロジカル状態が出現する可能性が議論されている．実際，ジグザグ反強磁性相における 1 次元的なジグザグ強磁性鎖を取り出したとき，対応する 1

次元強束縛模型はトポロジカル絶縁体の一種であり，開境界条件の下で端に局在した状態が現れることが指摘されている．ただしそれは 1 次元的なジグザグ強磁性鎖を取り出して，端を人工的に作ってその影響を調べるというものであり，端の存在によってジグザク反強磁性相が壊されないということが暗に仮定されている．周期的境界条件を取ったときに現れたジグザク反強磁性相が，ある方向に開境界条件を課したときにも安定的に現れるかどうかは自明なことではない．そこで，2 次元系の 1 方向に周期的境界条件を，別の方向には開境界条件を課した場合に，軌道自由度のある二重交換模型をモンテカルロ法によって解析し，端の存在がジグザグ反強磁性相に与える影響を調べた．その結果，ホールドープをしない場合に現れる E タイプのジグザク反強磁性相は，端の存在に対して比較的強いことがわかった．

2．研究業績

1）論文

S. Hayami and K. Hattori, “Multiple-q dipole-quadrupole instability in spin-1 triangular-lattice systems” *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 124709 (2023).

K. Hattori, T. Ishitobi, and H. Tsunetsugu, “Quadrupole partial orders and triple-q states on the face-centered cubic lattice” *Phys. Rev. B* **107**, 205126 (2023).

H. Kubo, T. Ishitobi, K. Hattori, “Electronic origin of ferroic quadrupole moment under antiferroic quadrupole orders and finite magnetic moment in $J_{\rm eff} = \frac{3}{2}$ systems” *Phys. Rev. B* **107**, 235134 (2023).

2）学会講演

● 日本物理学会　第 78 回年次大会 2023 年 9 月 16〜19 日（東北大学）

久保陽大, 石飛尊之,　服部一匡：「d^1 ダブルペロブスカイト化合物における励起状態の効果」

石飛尊之,　服部一匡：「局所空間反転対称性のない系における非共面磁気秩序とボンド四極子」

● 学術変革領域研究 (A)「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」キックオフミーティング 2023 年 6 月 10〜11 日（岡山大学）

服部一匡：「アシンメトリ量子の揺らぎ・変調・応答の理論構築」

石飛尊之,　服部一匡：「局所空間反転対称性がない系における有限波数秩序が誘起するボンド四極子秩序」

● 学術変革領域研究 (A)「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」夏の学校ミニ 2023 年 8 月 31〜9 月 2 日（北海道大学）

服部一匡：講義「多極子編」

● 若手理論交流研究会 物性研究における最近の進展 2023 年 12 月 21 日〜12 月 23 日（富山県立大学）

服部一匡：「E 表現四極子自由度の系における多様な秩序状態」

国際会議

● International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023, 2-7,July, 2023 Incheon, Korea.

Takayuki Ishitobi and Kazumasa Hattori, “Chiral and polar quadrupole orders in URhSn”

高エネルギー物理実験研究室

1．研究活動の概要

高エネルギー物理実験研究室では，日本が世界をリードしている B ファクトリー実験を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他，ニュートリノ振動実験などの幅広い物理実験を展開している．

1）Belle 実験，Belle II 実験

高エネルギー加速器研究機構で行われている，世界最高輝度の電子・陽電子衝突型加速器 Super-KEKB を用いた国際共同実験 Belle II に参加している．Belle II 実験は，ルミノシティフロンティアの衝突型加速器実験であり，Super-KEKB 加速器で生成された大量の B 中間子対およびタウ粒子対の崩壊を，衝突点を取り囲むように設置された粒子検出器 Belle II で観測する．Belle II 実験は，2022 年 6 月から長期シャットダウン（LS1）に入っていたが，2024 年 2 月よりビーム運転を再開した．

本研究室では，Belle II 検出器の前方エンドキャップ部において荷電 π 中間子と荷電 K 中間子の粒子識別を担う Aerogel RICH (ARICH) 検出器をこれまで長く開発してきた．ARICH 検出器は，シリカエアロゲル輻射体を荷電粒子が通過する際に放出するチェレンコフ光を位置分解能をもつ光検出器 HAPD で検出し，その位置情報（ヒットパターン）から粒子識別を行う，リングイメージング型のチェレンコフ検出器である．本研究室では，将来の ARICH 検出器の高度化に向けた研究開発も進めている．とくに，ARICH 検出器で用いている光検出器に代わる新しい光検出器の開発に取り組んでいる．その光検出器の候補として，シリコン光電子増倍管 (SiPM) の検討を行っている．本年度は，SiPM の放射線損傷を緩和するためのアニーリング手法の開発を進め，その中で特にアニーリングによる光子検出効率への影響について調べた．また，新しい光検出器の検討に加え，その読み出し回路の開発も行っている．本年度は，試作した読み出し回路の性能評価を進め，SiPM を接続して光信号を正しく検出できることを確認した．

長期シャットダウン前の Super-KEKB 加速器では，突然ビームが失われて Belle II 検出器やビーム衝突点付近の超伝導電磁石に大きな被爆を生じさせる問題があり，ルミノシティ向上を阻む大きな要因になっていた．本研究室では，この問題に取り組むプロジェクトにも参加しており，その中で Belle II 検出器に大きな被爆を生じさせる前にビームを正常に破棄するためのビームアボートシステムの高速化に取り組んでいる．本年度は大気中レーザーによる信号伝送を，実際に使用を検討している Super-KEKB トンネル内で試験し，大気中レーザーがビームアボート信号の伝達に利用可能であることを確認した．

2）ATLAS 実験

ATLAS 実験は，ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) で行われている衝突型加速器実験であり，LHC 加速器によって世界最高エネルギー 13.6TeV で陽子と陽子を衝突させ，ヒッグス粒子の性質を調べたり，超対称性理論などの標準模型を超えた新物理の探索を行っている．LHC 加速器は 2026 年から長期シャットダウンを行い，2029 年からルミノシティ（ビーム輝度）を 5 倍〜7.5 倍に増大した高輝度 LHC(HL-LHC) としての運転を開始，最終的な取得データ量を現行 LHC 加速器の 10 倍程度として精密測定を可能にする予定である．

本研究室は, HL-LHC での実験に用いられる予定の, ATLAS 検出器最内層で飛跡検出を行う ITk(Inner Tracker) の開発に参加している．ITk は，シリコン・ピクセル検出器に電子回路基板が取り付けられた構造をしており，ATLAS 実験で使用される検出器モジュール約 10,000 個のうち，日本では 2,800 モジュールが製作される．今年度は，2023 年度から始まる予定の ITk モジュール量産に備え，130 モジュールの

試験量産を行った．作成された ITk モジュールには機械的・電気的な各種検査が行われ，その結果はデータベースに登録される．各種検査を行い，試験結果を判断するソフトウェアの開発を行った．

3）T2K 実験

茨城県東海村の J-PARC で生成した大強度ニュートリノビームを，直線距離で 295km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ検出器で検出する長基線ニュートリノ振動実験である T2K 実験に参加している．T2K 実験は，ニュートリノを生成するニュートリノビームライン，生成したニュートリノを測定する前置検出器，および 295km の飛行後のニュートリノを観測するスーパーカミオカンデの 3 つの構成要素から成り立っており，本研究室では，とくにニュートリノビームラインおよび前置検出器に関係した研究に参加している．T2K 実験では，ミューニュートリノが 295km の飛行中に電子ニュートリノに変化する現象を 2013 年に発見し，現在は，それらの事象を用いてニュートリノの CP 対称性（粒子と反粒子の対称性）の破れの探索を行っている．

CP 対称性の破れを発見するためには，統計誤差とともに系統誤差も大きく削減していく必要があり，系統誤差の一つであるニュートリノと物質との相互作用の不定性の削減を目指した，前置検出器 ND280 のアップグレードに参加している．アップグレードされる検出器の一つとして，1cm^3 角のシンチレータキューブを約 200 万個積み重ね，ニュートリノ反応を 3 次元的に捉える新しい検出器 SuperFGD の開発に本研究室では取り組んでいる．本研究室では，SuperFGD の光信号の読み出しに用いる約 6 万本の波長変換ファイバーおよび約 6 万個の光検出器の健全性を調べるためのキャリブレーションシステムの開発に取り組んでいる．キャリブレーションシステムは 93 個のモジュールからなる．本年度は SuperFGD が，前置検出器 ND280 にインストールされ，運用を開始した．その際，開発したキャリブレーションシステムを用いて，実際に SuperFGD の光検出器のキャリブレーションを行えることを確認した．

4）宇宙線ミュオンを用いた大規模構造物の透視

地上に飛来する宇宙線ミュオンを用いて大規模な物体を透視する研究を進めている．これまで高エネルギー加速器研究機構および筑波大学と共同で，原子炉の透視を行う研究を進めてきた．国際廃炉研究機構および東京電力が行なっている福島第一原発の廃炉に向けた取り組みの一つとして，溶融したと考えられる一号機から三号機の原子炉の炉心の核燃料の状態の調査に協力し，これまでに，福島第一原発 1 号機および 3 号機の炉心の状態の調査を行ない，一連の調査を行ってきた．その後は岩手大学および岩手県立大学などと共同で岩手山の観測を進め，また，新たに茨城県東海村，J-PARC，および茨城大と共同で，東海村の古墳（舟塚 2 号墳）の透視を行うプロジェクトも開始した．本年度は，古墳を透視するためのミュオン検出器の製作を行った．

2．研究業績

1）論文

I. Adachi *et al.*, “Search for the $e^+e^- \to \eta_b(1S)\omega$ and $e^+e^- \to \chi_{b0}(1P)\omega$ processes at $\sqrt{s} = 10.745GeV$”, Phys. Rev. D **109**, no.7, 072013 (2024)

R. Pestotnik, I. Adachi, K. Adamczyk, L. Burmistrov, R. Dolenec, K. Furui, T. Iijima, S. Iwaki, S. Iwata and G. Ghevondyan, *et al.* “Slow control of the Belle II Aerogel Ring Imaging detector”, Nucl. Instrum. Meth. A **1056**, 168569 (2023)

I. Adachi *et al.*, “Search for a $\tau^+\tau^-$ resonance in $e^+e^- \to \mu^+\mu^-\tau^+\tau^-$ events with the Belle II experiment”,

Phys. Rev. Lett. **131**, no.12, 121802 (2023)

L. Santelj, I. Adachi, K. Adamczyk, L. Burmistrov, R. Dolenec, K. Furui, T. Iijima, S. Iwaki, S. Iwata and G. Ghevondyan, *et al.* "Recent developments in data reconstruction for aerogel RICH at Belle II",
Nucl. Instrum. Meth. A **1055**, 168502 (2023)

I. Adachi *et al.*, "Novel method for the identification of the production flavor of neutral charmed mesons",
Phys. Rev. D **107**, no.11, 112010 (2023)

F. Abudinén *et al.*, "Measurement of the branching fraction and CP asymmetry of $B^0 \to \pi^0\pi^0$ decays using $198 \times 10^6 B\bar{B}$ pairs in Belle II data",
Phys. Rev. D **107**, no.11, 112009 (2023)

I. Adachi *et al.*, "Search for an Invisible Z' in a Final State with Two Muons and Missing Energy at Belle II",
Phys. Rev. Lett. **130**, no.23, 231801 (2023)

Y. Seino *et al.*, "Measurement of two-photon decay width of $\chi_{c2}(1\mathrm{P})$ in $\gamma\gamma \to \chi_{c2}(1\mathrm{P}) \to \mathrm{J}/\psi\gamma$ at Belle",
JHEP **01**, 160 (2023)

K. Abe *et al.* , "Measurements of the ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$-induced coherent charged pion production cross sections on ^{12}C by the experiment",
Phys. Rev. D **108**, no.9, 092009 (2023)

K. Abe *et al.* , "Updated measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.6×10^{21} protons on target",
Phys. Rev. D **108**, no.7, 072011 (2023)

K. Abe *et al.* , "First measurement of muon neutrino charged-current interactions on hydrocarbon without pions in the final state using multiple detectors with correlated energy spectra at T2K",
Phys. Rev. D **108**, no.11, 112009 (2023)

K. Abe *et al.* , "Measurements of neutrino oscillation parameters from the experiment using 3.6×10^{21} protons on target",
Eur. Phys. J. C **83**, no.9, 782 (2023)

2) 学会講演

● 日本物理学会　第 78 回年次大会 2023 年 9 月 16〜19 日（東北大学）

T2K 実験 WAGASCI/Baby MIND 検出器による荷電 π 中間子を 1 つ伴うニュートリノ荷電カレント反応測定に向けた事象選別
在原拓司, 角野秀一, 他 T2K Collaboration

T2K 実験における新型前置検出器 SuperFGD の光検出器較正装置の設置，および運用
古井佑典, 在原拓司, 角野秀一, 他 T2K Collaboration

SuperKEKB 加速器ビームアボート高速化のための大気中レーザーによる信号伝送の研究
北村和樹, 角野秀一, 他

Belle II 実験 ARICH 検出器アップグレードのための信号読み出し集積回路の性能評価
黒川俊輔, 角野秀一, 汲田哲郎, 住吉孝行, 本橋完太, 岩城彩希, 鶴藤昌人, 渡辺啓太, 他 Belle II ARICH グループ

● 日本物理学会 2024 年春季大会 2024 年 3 月 18〜21 日（オンライン）

Belle II 実験 ARICH 検出器アップグレードに向けた ASIC の信号分離性能の評価
黒川俊輔, 角野秀一, 汲田哲郎, 住吉孝行, 本橋完太, 岩城彩希, 他 Belle II ARICH グループ

原子物理実験研究室

1．研究活動の概要

反応物理化学研究室と毎週合同ミーティングを開いて情報交換を行いつつ，理化学研究所の東原子分子物理研究室との共同研究体制を維持しながら，研究室の独自性を保った研究とのバランスを取って，イオン衝突を中心とした原子・分子物理学の実験的研究を精力的に推進している．

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程と分光研究

静電型イオン蓄積リングは，静電場のみを用いて分子イオンの軌道制御を行い，分子イオンをリング上に周回させることで長時間蓄積可能な装置である．本装置の強みは周回イオン種の電荷や質量に関する制限がなく蓄積可能で，周回イオンの飛行時間差を用いることで高精度な質量選別もでき，周回中に解離あるいは中性化した分子を高効率に検出できるという点にある．これらの強みを生かして，本学に設置された TMU E-ring を用いて，これまで分子イオンやクラスターイオンの内部エネルギーの緩和，すなわち冷却過程の研究や分光研究を行ってきた．

1-a) 炭素・シリコンクラスター負イオン　本研究室では，レーザーアブレーション法によって生成した高温の直鎖状炭素クラスター負イオンの冷却過程について，系統的な研究を行ってきた．電子親和力より高い内部エネルギーを持った負イオンは電子脱離を起こす．また，振動状態の遷移に伴う赤外線放出によって冷却される振動輻射冷却は広い内部エネルギー領域において主要な冷却機構である．近年，これに加えて，電子基底状態の高振動励起状態から逆内部転換によって電子励起状態に遷移し，そこから蛍光を放出することで冷却が急速に進む再帰蛍光という過程が見いだされた．以前から静電型イオン蓄積リングを周回中の負イオンに対してレーザー光を照射することで電子脱離閾値をわずかに超える状態へと励起し，照射時間とレーザー波長を変えながら生成する中性粒子を観測することで, 内部エネルギー分布を測定する手法を編み出していた．しかし，C_4^- および C_6^- に関する実験データとシミュレーション結果は全く一致せず，定性的な議論すら不充分だった．そこで振動冷却速度と再帰蛍光放出速度を補正する係数を導入したところ，充分な精度で実験結果を再現することに成功し，冷却過程のモデリングがほぼ確立したと言える．最近，この手法を用いて，より複雑な C_n^+, n=27 までの炭素クラスター正イオンの輻射冷却速度を網羅的に測定した．上記のモデルは状態密度を調和振動子モデルで計算し，各速度定数に補正係数を掛けているため，厳密なモデルとは言えない．そこで各冷却速度を明確に分離できる分子イオンの探索を行い，再帰蛍光放出の寄与がない C_7^- において，電子脱離速度を実験的に決定できることを発見した．得られた電子脱離速度定数は従来のモデルによる計算値と 2 桁の差があり，この差は状態密度を調和振動子モデルで計算していることが主な要因であると考えた．状態密度を非調和振動子モデルで計算できるように，共同研究者と従来のモデルを拡張したところ，実験値と理論値の差が 1 桁に収まった．他の要因として，C_7^- は直鎖構造ではなく微小偏角していると報告されているが，これを正しく計算に組み込めていない点がある．シリコンクラスター負イオン Si_n^- については，従来よりも大きな n=10 までのクラスターを生成する方法を確立し，それぞれ冷却速度の測定を行った．現在，これらの結果を元に共同研究者が理論計算をしている．

1-b) 二原子分子負イオンの電子脱離スペクトル　本研究室の先行研究から，C_2^- の $X^2\Sigma_g^+(v=6) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=5)$ 遷移の強度分布が $X^2\Sigma_g^+(v=7) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=6)$ 遷移の強度分布に対して極めて低いことが明らかとなった．この現象を解明するために，C_2^- に 540 - 575 nm の波長領域において 0.005 nm 間隔でレーザー光を垂直入射し，光励起に伴い電子脱離した C_2 の中性粒子収量を測定することで振動・回転準位が識別された電子脱離スペクトルを得た．得られた結果と PGOPHER を用いて得られた振動回

転遷移スペクトルのシミュレーション結果を比較することで各線の振動・回転準位を同定した．さらに，$X^2\Sigma_g^+(v=7) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=6)$ 遷移の強度分布をボルツマン分布と仮定したときに実験と理論が一致することがわかった．そこで，この温度を用いて $X^2\Sigma_g^+(v=6) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=5)$ 遷移の強度分布の理論値を求め，実験値との強度比を算出した．得られた $X^2\Sigma_g^+(v=6) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=5)$ 遷移の強度比は回転準位が高くなるにつれて，1 に近づくことがわかった．この強度比から，C_2^- の $B^2\Sigma_u^+(v=5)$ における電子脱離速度定数の回転準位依存性を算出した．得られた結果から $X^2\Sigma_g^+(v=6) \rightarrow B^2\Sigma_u^+(v=5)$ 遷移の強度分布が他の遷移と比較して極めて低い理由は，$B^2\Sigma_u^+(v=5)$ が電子脱離閾値近傍にあるため，回転準位が低いときには蛍光放出と電子脱離が競合しているためだと考えられる．

2) 多価イオンの電荷移行反応

中性原子から複数の電子を剥ぎ取ることで生成される多価イオンは，高い内部エネルギーを有するために中性の物質とは非常に激しい反応を起こす．そのダイナミクスは原子衝突物理学の重要な研究対象であるが，一方で，重原子については多価イオンの原子分光学的データは非常に乏しく，応用的な分野からの基礎データの要求に対して充分に答えられない状況が続いている．本研究室では電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance，ECR) 型多価イオン源を用いて様々な原子の多価イオンビームを生成し，衝突ダイナミクスと原子分光という二つの視点での研究を推進している．

2-a) 連星中性子星合体による重元素合成過程　連星中性子星合体における r プロセスによる重元素元素合成を理解するため，圧倒的に不足している多価重イオンの原子分光学的データを取得する共同研究を東北大・電通大・核融合研と進めている．理論シミュレーションによる予想によれば，可視・赤外発光にはランタノイドの寄与が大きいとされているため，Er に続いて La，Ce，Pr の金属ロッド状試料を用意して，閉殻である Xe 様イオンビームを生成し，一電子捕獲によって生成した Cs 様イオンからの発光観測を目指した．同時に，相対論的原子コードを用いた理論計算を行って発光遷移の同定についても検討した．また，共同研究として電通大において実施しているレーザー誘起ブレークダウン分光 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) について議論を行い，La^+ に関する成果をまとめた．

2-b) EUV 分光における標的からの発光断面積測定　斜入射型極端紫外線分光器を用いて，多価イオンと中性標的気体との衝突に伴う発光スペクトルの測定を行っている．特にこれまで研究例の少なかった標的からの発光に注目し，He 標的の場合に観測される 30.38 nm の He^+(1s-2p) 遷移について系統的に測定した．理論的に或る程度正確な発光断面積が判っている系についてスペクトルを測定することで，分光計測系の検出感度を決定し，その感度を用いることで He^+(1s-2p) 発光の断面積を求めた．検出感度は火災による中断前より大幅に低下しているが，得られた発光断面積の値は一致しており，同じ遷移の発光断面積の入射多価イオンに対する依存性に関する議論を深めて，励起機構に関する理論的な考察を進める予定である．

2-c) 偏向電場型分析器を用いた電荷移行断面積の測定　これまで用いてきた電場追い返し法では正確な電荷移行断面積測定が困難であったため，数年前に偏向電場型の価数分析器を開発していた．今年度から企業との共同研究が本格的に開始され，予備的な実験として多価 Kr イオンと He および H_2 標的について断面積測定を行った．どちらの標的も二電子系であることから，一電子捕獲と二電子捕獲だけが起こるため，衝突セル内で二回衝突が起こると断面積に圧力依存性が観測され，単一衝突条件の検証が容易である．この特徴を活かして 2 価から 8 価までの Kr イオンについて，価数当たり 15 keV の衝突エネルギーで断面積測定を行った．過去に 24 keV 程度の低エネルギーでの測定結果は報告されているが，今回の結果は殆ど過去のものと同程度であり，keV 領域における多価イオンの電荷移行断面積には顕著な衝突エネルギー依存性がないことが確認された．一方で，価数依存性には階段状の構造や振動構造も

観測された．また，地球磁気圏において地球大気由来の分子イオン (N_2^+, O_2^+, NO^+) が希薄な中性水素原子と衝突することで消失する過程が「あらせ」衛星によって観測されている．この現象の解析のためには一価分子イオンと水素原子の電荷移行断面積が必要であるが，過去に測定例は見つからなかった．そこで，水素原子と同じイオン化ポテンシャルをもつ CH_4 を用いた測定を行ったところ，エネルギー変化が小さな近共鳴電荷移行反応と考えると経験式とほぼ一致するような結果が得られたが，理解を進めるために半古典的な理論計算を行っていく．

2-d) 電子ビームイオントラップを用いた電荷交換分光　多価イオンビームと中性標的気体との衝突による電荷交換分光では，長寿命の発光観測は不可能であった．そこで多価イオンを狭い空間に長時間閉じ込めることができる電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap, EBIT) を用いて，電荷移行反応によって生成した励起状態からの寿命が大きく異なる全ての種類の発光を観測する実験を行った．電通大に設置されている世界最大級の EBIT に，本研究室で使用しているシリコンドリフト型 X 線検出器を取り付け，電子ビームによって生成した裸および H 様の高電離 Fe イオンに対して，H_2 および CH_4 の希薄な気体を噴霧して，発光を観測した．気体を導入しない場合でも電子衝突励起によって発光は観測されるので，電子ビームをパルス的に照射することで，電子ビームが ON と OFF の状態における発光を区別して観測した．検出器の分解能が充分とは言えないため全ての輝線を分離して観測することはできなかったが，電子衝撃による発光と電荷移行反応による発光では明らかにスペクトル形状が異なっており，励起状態生成機構の違いが謙虚であることが実証できた．

3) 超流動ヘリウム液滴を用いた冷却分子イオン生成

冷却した高圧ノズルから He 気体を噴出させることで 0.4 K に冷却されたナノサイズの液滴を生成し，希薄な気体との衝突によって液滴に分子を内包させる．この液滴に電子ビームを照射することで He をイオン化すると，液滴内部で連続した電荷移行反応によって内包分子をイオン化することができる．この手法で生成した分子イオンに波長可変な赤外レーザーを照射して，光吸収が起きたときにだけ生成する裸の分子イオンを検出する手法で，液滴に内包され冷却された分子イオンの赤外吸収スペクトルを測定する方法を開発した．この手法を用いて，理化学研究所および共同研究先の南カリフォルニア大学において，アニリン分子および水二量体に対する実験を行った．前者ではイオン化に伴う分子の異性化反応を，後者ではこれまで実験的観測例の無かった半結合 (hemi-bond) 型二量体イオンを，それぞれ世界で初めて観測することができた．

4) 次世代アストロケミストリー

原始惑星系形成領域における多様な化学組成とその進化過程を，ALMA 望遠鏡による観測，はやぶさ 2 が採取した小惑星リュウグウのサンプル分析，理論計算・シミュレーション，気相および固体表面での反応素過程実験，などの情報を合わせて総合的に理解することを目指して学術変革領域研究 (A)「次世代アストロケミストリー：素過程理解に基づく学理の再構築」が 2020 年 12 月に発足した．このプロジェクトにおいて，液体窒素によって冷却した H_2 気体を満たしたイオン移動管に H_2^+ を低エネルギーで入射したとき，イオン分子反応によって 2 種類の H_3^+ が生成することが発見された．正三角形型の H_3^+ が宇宙空間において重要であることは良く知られているが，構造異性体に関する実験的な報告はなく，理論計算から直線型構造の可能性が高まった．また，同様に Li^+ を入射したところ，三体結合反応によって生成した 2 種類の LiH_2^+ が観測された．直接的な証拠はないが，分子構造計算と H_2 気体との弾性衝突断面積のモデル計算から，安定な二等辺三角形と準安定な直線型であることが示唆された．H_3^+ と LiH_2^+ では，三角形型と直線型の生成比は大きく異なるが，移動管内部の圧力および電場に対する挙動は類似しており，これらの三原子分子イオンが共通した性質を持つと考えるのは自然である．但し，まだ間接

的な証拠しか得られていないので，分光学的に直接検証するべく，新規装置の開発に着手している．

2．研究業績

1）論文

S. Iida, S. Kuma, J. W. Niman, S. Masuda, H. Tanuma, P. Ferrari, K. Hansen, H. Shiromaru, and T. Azuma, Direct measurement of delayed-detachment rate constants of C_7^-, *Phys. Rev. A* **108**, 062808 (2023).

A. Iguchi, A. Singh, S. Bergmeister, A.A. Azhagesan, K. Mizuse, A. Fujii, H. Tanuma, T. Azuma, P. Scheier, S. Kuma, and A.F. Vilesov, Isolation and infrared spectroscopic characterization of hemi-bonded water dimer cation in superfluid helium nanodroplets, *J. Phys. Chem. Lett.* **14**, 8199 (2023).

S. Kita, T. Hattori, and H. Tanuma, Energy transfer mechanisms in backward scattering of Cs^+ ions from N_2 molecules, *Phys. Rev. A* **109**, 032803 (2024).

2）学会講演

● 第 11 回イオン移動度研究会　2023 年 4 月 15 日（東京都立大学・南大沢キャンパス）

宇井諒, 伊藤拓哉, 今泉咲希, 田沼肇：低温水素気体中におけるイオン移動度測定による H_3^+ の構造異性体の観測

● 日本物理学会第 78 回年次年会　2023 年 9 月 16 日–19 日（東北大学・川内キャンパス）

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行：超流動液滴に内包した超低温分子イオンの赤外振動分光

今泉咲希, 宇井諒, 田沼肇：低温水素気体中におけるイオン移動度 III

宇井諒, 今泉咲希, 田沼肇：低温水素気体中におけるイオン移動度 IV

● 原子衝突学会第 48 回年会　2023 年 11 月 25 日–26 日（東京工業大学・大岡山キャンパス）

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行：超流動ヘリウム液滴による水二量体イオンの準安定構造の観測

宇井諒, 今泉咲希, 田沼肇：低温水素気体中のクラスターイオン生成と移動度測定

● 「プラズマの分光診断と原子分子素過程の研究フロンティア」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会　2023 年 12 月 20 日–22 日（核融合科学研究所）

板橋美和, 田沼肇：keV 領域における多価イオンの電子捕獲断面積測定

K. Supriya, M. Tanaka, N. Domoto, D. Kato, H. Tanuma, N.Nakamura: Transition probability measurement of lanthanide elements using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS)

● 次世代アストロケミストリー第 4 回領域全体集会　2024 年 3 月 7 日–8 日（立教大学・池袋キャンパス）

田沼肇, 今泉咲希, 宇井諒：直線型 H_3^+ の傍証となる直線型 LiH_2^+ の観測

● 日本物理学会 2024 年春季年会　2024 年 3 月 18 日–21 日（オンライン開催）

井口有紗, A. Singh, S. Bergmeister, A.A. Azhagesan, 水瀬賢太, 藤井朱鳥, 田沼肇, 東俊行, P. Scheier, 久間晋, A.F. Vilesov：極低温環境における水二量体イオンの準安定構造の生成と分光観測

板橋美和, 田沼肇：多価 Kr イオンと二電子標的における電子捕獲断面積

国際会議

● The 14th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths for Astrophysical and Laboratory Plasmas, Paris, France, 10–14 July, 2023

K. Supriya, M. Iwata, D. Kato, M. Tanaka, G. Gaigalas, H. Tanuma, and N. Nakamura: Transition probability measurements for lanthanide elements using laser-induced breakdown spectroscopy

● XXXIII Internal Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Ottawa, Canada, 25 July – 1 August, 2023

S. Iida, S. Kuma, K. Masuhara, S. Masuda, H. Tanuma, K. Hansen, H. Shiromaru, and T. Azuma: Experimental determination of thermal electron detachment rates of C_7^-

A. Iguchi, S. Kuma, H. Tanuma, and T. Azuma: Mid-infrared spectroscopy of aromatic molecular cations in helium droplets

● XXIII International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms, Notre Dame, IN, USA, 3–6 August, 2023

R. Ui, S. Imaizumi, T. Ito, and H. Tanuma: Mobility of molecular and cluster hydrogen ions in cooled hydrogen gas,

● Workshop on Interstellar Matter 2023, Sapporo, Japan, 8–10 November, 2023

H. Tanuma, S. Imaizumi, and R. Ui: Possible observation of linear H_3^+ in the laboratory

宇宙物理実験研究室

1．研究活動の概要

本研究室では，(1) X 線を観測手段とした銀河団，中性子星，白色矮星，太陽系等の宇宙における多様な高エネルギー現象の解明と，(2) 宇宙 X 線観測のための衛星に搭載する望遠鏡や X 線マイクロカロリメータ等の装置開発の 2 つを柱として活動を行っている．

1) 宇宙 X 線観測衛星 XRISM の開発

日本のフラッグシップとなる X 線天文台であり，2023 年 9 月 7 日午前 8 時 42 分に種子島より打ち上げられた．衛星の基本性能の確認を経て，2024 年 3 月に定常運用へと移行した．搭載装置である X 線マイクロカロリメータ Resolve は，X 線光子の光電吸収による素子の温度上昇を精密測定することで分光能力を飛躍的に向上する装置であり，都立大はプロジェクトの立ち上げから開発に大きく貢献してきた．2023 年度は種子島に輸送された装置のヘルスチェックを行って打ち上げに備えつつ，打ち上げ後は較正用線源や天体観測による性能確認を行い，要求値を上回る分光性能が達成できていることを確認した．ゲートバルブと呼ばれる地上での真空保持及び保護等のための入射窓を開くには至っていないが，開放に向けた地上試験や検証を進めている．さらにゲートバルブの影響が無視できる 2 keV 以上でのスペクトルが得られる銀河団やブラックホール等の観測を進めており，多くの新発見が期待できる．図 1 に超新星残骸を観測したスペクトルを示す．「すざく」衛星搭載の CCD に比べて格段に情報量が増えている．関連して都立大 HP での研究紹介も行った．

2) 地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X の開発

これまでにない地球磁気圏の X 線によるグローバル撮像を目指す超小型衛星であり，太陽活動が極大を迎える第 25 太陽周期に合わせて打ち上げを目指している．小型でありながら広がった放射に対して「すざく」衛星並の感度を持つために，広視野・軽量望遠鏡と可視光遮光フィルタ，CMOS センサを組み合わせた X 線撮像分光装置を搭載する．都立大は本プロジェクトの中心機関として全体を見つつ望遠鏡の開発も担当している．2023 年度は望遠鏡の開発を進め，フライトモデルに向けた製作の手順確認や製作プロセスの見直しを進め，望遠鏡のマスクパターンの改良による組立手順の大幅な時間短縮等を行った．図 2 に望遠鏡と試験の様子を示す．並行して他機関と共同で，観測装置と衛星とのインターフェイスの確認や，打ち上げで想定される軌道に基づく衛星の詳細な検討，軌道上での装置較正のための初期観測天体のシミュレーションを用いた選定等，多方面に渡って開発検討が大きく進んだ．

3) 新しい観測装置技術の開発

XRISM や GEO-X の次の宇宙観測を目指す観測装置技術の開発にも取り組んだ．望遠鏡は宇宙観測に必須でありながら高い角度分解能を求めると重量が重くなるトレードオフ関係があった．そこで軽量性を追求した独自手法として MEMS 技術を使った微細穴 X 線光学系を開発しており，GEO-X に搭載予定である．

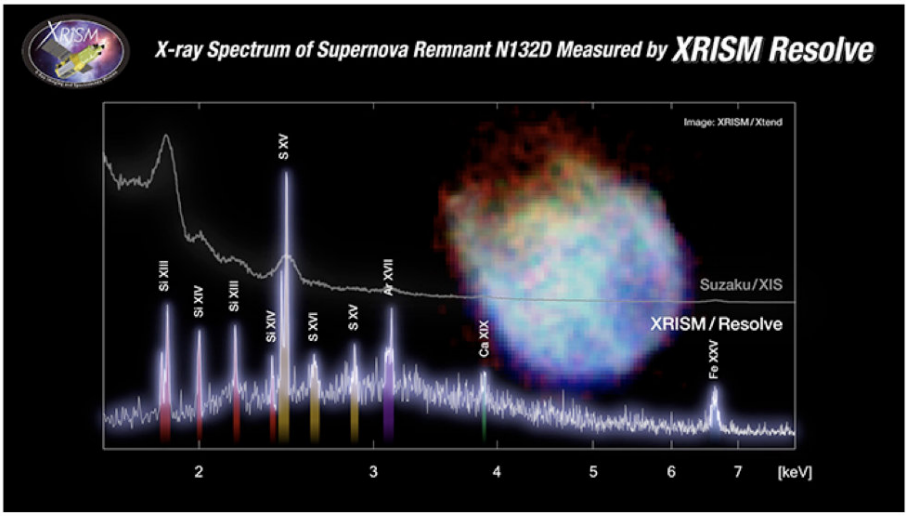
XRISM や GEO-X よりも優れた秒角の角度分解能を目指して，Si 基板の高温塑性変形による手法も開発した．Si 基板を高温でプレスする手法であり，変形治具の改良及び変形条件の網羅的な調査から 10 秒角程度が見込める放物面鏡の製作に成功した．そのほかにも Si 高温塑性変形を応用したブラッグ反射型 X 線偏光系や Schmidt 配置 Lobster eye 光学系，国立天文台との協力による系外惑星の直接撮像用の可視光回折格子の開発等も進めた．今後の日本及び海外の将来計画で考えられている宇宙 X 線観測衛星，月探査計画，超小型衛星等への搭載を目指す．

4) 「すざく」等の衛星データを用いた高エネルギー宇宙物理の研究

すでに打ち上げられた「すざく」等の衛星データを用いた宇宙の高エネルギー現象の研究を進めた．「すざく」で検出した地球磁気圏で生じる太陽風と地球の超高層大気である外圏との電荷交換反応による発光イベントと，衛星軌道や視野を考慮した独自のモデルとの系統的な比較を進めており，XRISM や GEO-X の観測時の電荷交換反応による影響の見積もりに役立つものとなる．太陽風電荷交換反応として共通点のある彗星からの X 線放射についても研究を進め，彗星コマの大気組成の見積もりの定量化を行った．冷たいガスと熱いプラズマの間で宇宙で普遍的に生じている電荷交換反応を理解する手がかりとなる．

また XMM-Newton 衛星に搭載された回折格子を用いた Wolf Rayet 星のスペクトルに見られる He-like イオンからの輝線比からプラズマ密度に制約を付けると共に，連星系の星風同士の衝撃波によって加熱されたプラズマの乱流成分に制約を付けた．これは銀河系内の粒子加速源として重要な Wolf Rayet 星周りのプラズマの物理状態を知る上で重要であり，XRISM 観測にも繋がる．

そのほかにも TESS 衛星のデータを用いた系外惑星周りの原始惑星系円盤の有無についてのモデルを用いた定量的な検証，GEO-X に搭載する観測装置を使った月面からの蛍光 X 線放射の見積もり，機械学習を用いたデータ解析等の研究を多角的に行った．



(クレジット：JAXA)

図 1: 超新星残骸 N132D の Resolve を用いて取得したスペクトル．灰色は「すざく」の CCD で取得したもの．

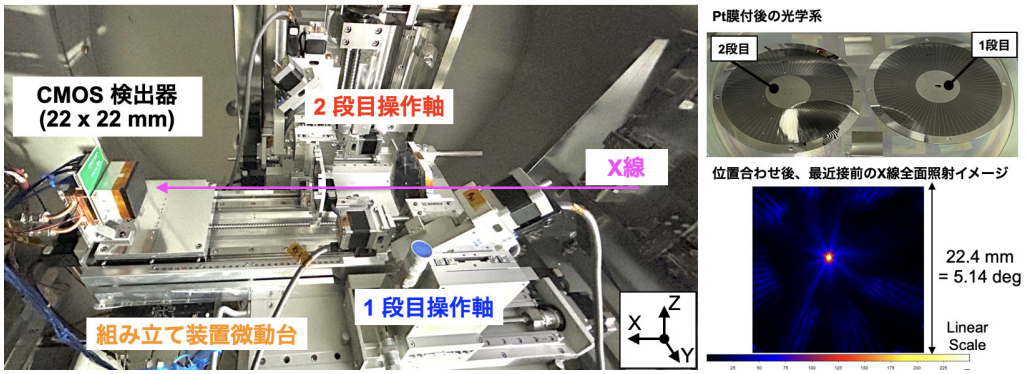


図 2: GEO-X 用 Wolter I 型望遠鏡の試作品と JAXA 宇宙研 30 m ビームラインでの X 線測定の様子．

2．研究業績

1）論文

Y. Ezoe, *et al.*, "GEO-X(GEOspace X-ray imager)", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **9** (2023) 034006

H. Nakajima, Y. Ezoe, M. Numazawa, K. Ishikawa, *et al.*, "Dvelopment of the focal-plane CMOS detector for the GEO-X mission", *J. Astron. Telescope and Instrum.*, **10** (2023) 016001

S. Yoshida, Y. Ezoe, *et al.*, "Performance test results of a helium dewar for the Resolve instrument onboard the XRISM" *Cryogenics*, **139** (2024) 103831

T. Takeda, M. Numazawa, *et al.*, "Gas selection for Xe-based LCP-GEM detectors onboard the CubeSat X-ray observatory NinjyaSat" *J. Instrumentation*, **18** (2023) C06020

T. Hayashi, M. Ishida, *et al.*, "Gravitational Redshift Detection from the Magnetic White Dwarf Harbored in RX J1712.6-2414" *Astrophys. J.*, **953** (2023) 30

A. Miyamoto, M. Ishida, *et al.*, "X-ray plasma flow and turbulence in the colliding winds of WR140" *MNRAS*, **527** (2024) 7121

W. Dunn, Y. Ezoe, M. Numazawa, *et al.*, "Exploring Fundamental Particle Acceleration and Loss Processes in Heliophysics through an Orbiting X-ray Instrument in the Jovian System", *Decadal Survey for Solar and Space Physics (Heliophysics) 2024-2033*, **55** (2023) #101 (査読無し)

2）学会講演

● 日本物理学会　第 78 回年次大会 2023 年 9 月 16〜19 日（東北大学）

田代　信, 石崎　欣尚ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM の現状」

石崎　欣尚，江副　祐一郎, 石川　久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 XII」

石田　学ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線望遠鏡 (XMA) 開発の現状 (8)」

信川　正順, 石田　学ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載軟 X 線撮像装置 Xtend の開発の状況 (12)」

高橋　弘充，石田　学ほか：「硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 気球実験の 2024 年フライトへ向けた準備状況」

武田　朋志，沼澤　正樹ほか：「超小型 X 線衛星 NinjyaSat の打ち上げ前衛星統合試験」

● 日本天文学会 2023 年秋季年会 2023 年 9 月 20〜22 日（名古屋大学）

中嶋　大, 江副　祐一郎ほか：「地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X (GEOspace X-ray imager) の現状 V」

田代　信, 石崎　欣尚ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM の現状」

佐藤　浩介，石崎　欣尚，江副　祐一郎，石川　久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 XI」

内山　秀樹，石田　学ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線撮像装置 (Xtend) の開発の現状 (10)」

水元　岬希，石崎　欣尚ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の地上較正と性能評価」

倉本　春季，石田　学ほか：「硬 X 線偏光検出気球実験 XL-Calibur 用 X 線望遠鏡の開発 (4)」

渡部　蒼汰，沼澤　正樹ほか：「超小型 X 線衛星 NinjaSat に搭載するガス検出器の有感領域端の調査」

林　多佳由，石田　学，石崎　欣尚ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線望遠鏡 (XMA) 開発の現状 (8)」

松本　岳人，石田　学ほか：「像再構成型 X 線光学系に用いる Kirkpatrick-Baez（KB）ミラーの開発」

林　多佳由，石田　学ほか：「強磁場激変星 RX J1712.6-2414 からの重力赤方偏移」

● 第 84 回応用物理学会　秋季学術講演会 2023 年 9 月 19〜23 日（熊本城ホールほか）

山野井　祥映，江副　祐一郎ほか：「宇宙軟 X 線観測用 CMOS カメラの開発」

● 地球電磁気・地球惑星圏学会　 2023 年秋季年会 2023 年 9 月 24〜27 日（東北大学）

江副　祐一郎ほか：「地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X の現状」

伊師　大貴，石川　久美，江副　祐一郎ほか：「地球磁気圏に付随した電荷交換 X 線放射の変動予測モデリング」

伊師　大貴，石川　久美，江副　祐一郎ほか：「地球磁気圏に付随した電荷交換 X 線放射の変動予測モデリング」

● 第 67 回宇宙科学技術連合講演会 2023 年 10 月 17〜20 日（富山国際会議場）

布施　綾太，江副　祐一郎ほか：「高推力推進系を有する超小型衛星 GEO-X のバスシステム検討状況」

中嶋　大，江副　祐一郎ほか：「超小型衛星による惑星磁気圏の X 線撮像観測」

● 惑星圏シンポジウム 2024 年 2 月 20〜22 日（東北大学）

森本　大輝，江副　祐一郎，石川　久美，沼澤　正樹ほか：「X 線天文衛星「すざく」による Tuttle 彗星コマの化学組成への制約」

戸井田　愛理，伊師　大貴，江副　祐一郎，沼澤　正樹，石川　久美：「月の元素組成 X 線探査ミッションの検討」

宮内　俊英，江副　祐一郎，石川　久美，沼澤　正樹ほか：「MEMS 技術を用いた Schmitd 配置 Lobster eye X 線光学系の開発」

辻　雪音，江副　祐一郎，石川　久美，沼澤　正樹ほか：「GEO-X 衛星に向けた MEMS X 線望遠鏡の開発」

● 日本天文学会 2024 年春季年会 2024 年 3 月 11〜15 日（東京大学）

江副　祐一郎ほか：「地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X の現状」

石川　怜, 江副　祐一郎, 石川　久美, 沼澤　正樹ほか：「MEMS 技術を用いた広視野 X 線望遠鏡 Lobster Eye 光学系の開発」

森本　大輝，江副　祐一郎，石川　久美，沼澤　正樹ほか：「X 線天文衛星「すざく」による Tuttle 彗星コマの化学組成への制約」

田代　信，石崎　欣尚ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM の軌道上運用の現状」

石崎　欣尚，江副　祐一郎，石川　久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 XII」

中嶋　大，石田　学ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線撮像装置 (Xtend) の軌道上運用」

Y. Mochizuki，石崎　欣尚ほか：「XRISM 衛星搭載極低温検出器の地上・軌道上データを用いた X 線イベント処理最適化」

林　多佳由，石田　学，石崎　欣尚ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線望遠鏡 (XMA) 開発の現状 (9)」

太田　尚亨，沼澤　正樹ほか：「超小型 X 線衛星 NinjyaSat の打ち上げ成功と初期観測」

松本　岳人，石田　学ほか：「像再構成型 X 線光学系に用いる Kirkpatrick-Baez（KB）ミラーの開発 (2)」

武尾　舞，石田　学ほか：「矮新星静穏時における X 線放射プラズマの空間分布の解明および X 線放射スペクトルモデルの構築」

● 日本物理学会 2024 年春季大会 2024 年 3 月 18〜21 日（オンライン）

関口　るな，江副　祐一郎，石川　久美，沼澤　正樹ほか：「X 線天文衛星「すざく」で観測した彗星におけるコマの中性気体組成分析」

石崎　欣尚，江副　祐一郎，石川　久美ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 XIII」

石田　学ほか：「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線望遠鏡 (XMA) 開発の現状 (9)」

高橋　弘充，石田　学ほか：「硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 気球実験の 2024 年フライトへ向けた準備状況」

武田　朋志，沼澤　正樹ほか：「超小型 X 線衛星 NinjyaSat の打ち上げ成功と初期観測」

● 2024 年第 71 回応用物理学会　春季学術講演会 2024 年 3 月 22〜25 日（東京都市大学）

山田　裕太, 江副　祐一郎, 石川　久美, 沼澤　正樹ほか：「MEMS 技術を用いた Schmitd 配置 Lobster eye X 線光学系の開発」

● 第 23 回高エネルギー宇宙物理連絡会研究会 2024 年 3 月 27〜29 日（京都大学）

江副　祐一郎 (招待講演)：「GEO-X ミッション」

国際会議

● 5th COSPAR symposium 2023 年 4 月 16〜21 日（Nanyang Technological Univ., Singapore）

Y. Ezoe, et al: GEO-X (GEOspace X-ray imager) mission

● SPIE Optics + Optoelectronics 2023 2023 年 4 月 24〜27 日（Prague, Chez）

M. Numazawa, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: Development of silicon foil X-ray optics using hot plastic deformation process

H. Morishita, M. Numazawa, Y. Ezoe, K. Ishikawa, et al: Assembly of a MEMS Wolter type-I X-ray telescope for GEO-X

● The X-ray Universe 2023 2023 年 6 月 13〜16 日（Athens, Greece）

D. Ishi, K. Ishikawa, Y. Ezoe, et al: Modeling of solar wind charge exchange emission from the Earth’s magnetosphere and exosphere

● 30th Space Cryogenics Workshop 2023 年 7 月 16〜18 日（Hawaii, US）

S. Yoshida, Y. Ezoe, et al: Performance test results of a helium dewar for the Resolve instrument onboard the XRISM

● The 20th International Conference on Low Temperature Detectors 2023 年 7 月 23〜28 日（Daejeon, Korea）

Y. Ishisaki, et al: Resolve instrument onboard X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)

ソフトマター研究室

1．研究活動の概要

ソフトマターとは，弱い外力に対して大きな応答を示す現象や物質のことをいう．ソフトマターは，階層的な構造を有しており，分子が結合した構造を作り，さらにその構造がより大きな構造（高次構造）を作る．この階層性のため，熱エネルギー程度のエネルギーで様々な転移を起こし，時間スケールが長いために非平衡になりやすい．我々の研究室では，ソフトマターの相転移ダイナミクスや非平衡系に興味を持って，泡沫や粉体の研究を行っている．２０２１年度より細胞内液体液体相分離やタンパク質の線維化などの生体系の物理学的機構の解明を目指して，東京大学薬学部，都医学研，都立大数理・化学・生命科学・応用化学科と共同研究を行っている．

1) 泡沫の状態間転移

液体中に気泡が多く入っている状態を泡沫と呼ぶ. これまで液体の体積分率によって, 状態が経験的に分類されてきた. 5 %以下であれば, dry foam と呼ばれ, 15 %以下であれば, wet foam と分類されてきた. これまで気泡の形状で経験的に分類してきたが, 我々は dry-wet 転移が曖昧なものではなく, シャープな転移であり, 気泡の再配置と関係があることを見出した. すなわち, 力学的な特性によって状態が転移していることを意味している. さらに dry 状態の上に superdry 状態があることも見出した. この superdry 状態も dry 状態と力学的な特性が異なることがわかった.

我々は高速度カメラを用いて，崩壊現象を観察した．液体分率が低い場合には，一つの泡の崩壊が連鎖して周囲も壊していく雪崩的に崩壊する．この雪崩的崩壊には，伝搬モードと貫通モードの２種類あることを見つけ，さらにその濃度依存性について膜の揺らぎが重要であることを見出した．

泡沫のレオロジーは，油洗浄などで日常生活と深く関係している重要なことであるが，泡沫が複雑系なため，いまだにそのダイナミクスすら明らかになっていない．基板上に泡沫をおき，それを塗り広げる研究を行い，そのダイナミクスを泡沫のレオロジーから解明した．基板との濡れ剥がれや泡沫の降伏応力によって，塗り広げやスリップが起こることを見出した．

長年, 未解明であった泡沫の物理学的な状態を明確にし, 今後, 物理学の発展だけでなく, 応用にも大きく繋がる研究を行っている.

2) シリコンオイルコーティングされた粉体系

粉体には，水分を含んでいない乾いた粉体と水分を含んで架橋されている濡れた粉体系に大分される．濡れた粉体系は，水分の空間分布や蒸発が起こるため，安定した実験を行うことが難しく，あまり研究が進んでいない．我々の研究室では，子ども用玩具のシリコンオイルコーティングされた粉体（coated sand）は，安定した引力相互作用を持った粉体系として着目し，研究を行っている．コーティングされていない普通の砂（uncoated sand）と coated sand を混合することで，物性が大きく変化することを見出した．混合比が 0.2 で一度固くなり，0.5 で更に急激に固くなることが見いだされた．接続性のクラスターと剛性クラスターというパーコレーションの概念で説明できると考えている．さらには，内部構造のシミュレーションや破壊などの研究を行い，物理的な理解だけでなく，今後の応用展開まで目指している．

3) 高エントロピー合金の数値シミュレーション

都立大物理学科の超伝導研究室と共同して, 高エントロピー合金の動的性質について数値シミュレーション研究を行っている．様々な種類の原子が混ざっている系において，原子サイズや電荷，空間局在化，

結晶格子歪など多くの要素が関係しており，それぞれの効果を分離することは実験系では困難である．シミュレーションでは，理想的な物質を構築することができるため，高エントロピー合金におけるそれぞれの効果を明らかにすることが可能である．この利点を活かして，高エントロピー合金の物性をミクロスコピックから起源を明らかにすることを目指して，研究を行っている．

2．研究業績

1）論文

Ryo Matsumoto, Kazuki Yamane, Yoshikazu Mizuguchi, Rikuya Ishikawa, Kyohei Takae, Rei Kurita, Hidetomo Usui, Masahiro Ohkuma, Kensei Terashima and Yoshihiko Takano, "Pressure-induced superconductivity and robust Tc against external pressure in (Ge,Sn,Pb)Te", *J. Alloys and Compounds*, **983, (2024) 173906.**

Honoka Fujio, Hikari Yokota, Marie Tani and Rei Kurita, "Gel-like mechanisms of durability and deformability in wet granular systems" *Commun. Phys.* **7, (2024) 23**

Masaya Endo, Marie Tani and Rei Kurita, "Scraping of foam on a substrate" *J. Colloid Int. Sci.*, **650, (2023) 1612-1618.**

Rikuya Ishikawa, Marie Tani, and Rei Kurita "Selective 3-dimensional patterning during phase separation of a continuously laminated layer" *Physica A*, **622, (2023) 128834**

2）著書

栗田玲　CMC 出版「食品分散系の制御技術と応用」（２０２４年）第５章担当

栗田玲　「水 Q&A」　ザ・ビューレック　２０２４年１月号

栗田玲　書籍：技術情報協会「塗布・乾燥のトラブル対策-水性の泡立ち対策、膜厚制御と速乾性の両立」第３章第５節担当

3）特許

特許願　2023-149078 泡沫の洗浄（吸収）指数の制定，および，洗浄指数測定方法　2023 年９月１４日，東京都公立大学法人　栗田玲，金田蒼依

特許願　2023-132483 脱泡方法及び脱泡装置　2023 年８月１６日，東京都公立大学法人　栗田玲，谷茉莉，遠田幸斗

4）学会講演

● 第 10 回複雑熱流体工学研究センターシンポジア　2023 年 10 月　(神戸大学)

栗田　玲（招待講演）「泡沫の物理的基礎と洗浄能力指数の提案」

● 日本物理学会 2024 年春季大会 2024 年 3 月（オンライン）

石川 陸矢, 高江 恭平, 水口 佳一, 栗田 玲「NaCl 型ハイエントロピー合金結晶における格子欠陥による拡散の促進」

古田 祐二朗, 栗田 玲「分散媒の硬化過程における有効ポテンシャルの変化」

金田 蒼依, 栗田 玲「泡沫の混合系における浸透圧」

遠藤 雅也, 谷 茉莉, 栗田 玲「泡沫の塗り広げにおけるパターン形成の観察」

国際会議

● The 7th International Soft Matter Conference　2023 年 9 月 4 日ー 8 日（Osaka International Convention Center, Japan）

Rikuya Ishikawa, Marie Tani and Rei Kurita Three-dimensional pattern formation during phase separation of a continuously laminated layer [poster]

Masaya Endo, Marie Tani and Rei Kurita Spreading foam by a rigid plate on a substrate [poster]

● TMU Materials Science 2023　2023 年 6 月 20 日（Tokyo Metropolitan University）

Rikuya Ishikawa, Kyohei Takae, Yoshikazu Mizuguchi and Rei Kurita Molecular dynamics simulation of diffusion behavior of high-entropy-alloys-type metal tellurides AgInSnPbBiTe5 [Oral]

電子物性研究室

1．研究活動の概要

今年度は，スタッフ 3 名，客員研究員 1 名，大学院生 6 名（博士後期 2 名 [都市外交人材育成基金による留学生 2 名を含む] と博士前期 4 名），学部生 5 名の体制で研究を進めた．以下に主要な成果を示す．

1) Eu 化合物における物質開発及び新奇磁性相の探索

近年，繊維金属磁性体の MnSi や希土類化合物 EuPtSi，Gd_2PdSi_3 等の低温磁気相において，トポロジカル相である磁気スキルミオン状態が発見され，基礎物理及び，次世代の磁気メモリー材料としての応用的観点からも精力的に研究がなされている．我々の研究グループでは，磁性元素である Eu 及び Gd 元素を含む化合物系に注目して，スキルミオン相のみならず，新しい磁気相の探索を目的として多数の化合物育成と物性研究をすすめた．六方晶系 Eu_2Ga_3Ir，正方晶系 $EuTr_2X_2$(Tr: 遷移金属元素，X: Si, Ge)，$EuIr_4In_2Ge_4$，$EuIr_2In_8$，$EuGa_6$，$GdGa_6$，$EuGa_4$ 等について単結晶育成を行い，磁気特性測定から，低温の磁気相図の作成を行った．また，近年の研究から，Hall 効果に，磁気的なトポロジカル相に誘起される創発磁場より大きな寄与が現れたり，磁気構造に依存した大きな異常ホール抵抗が観測されることから，この Hall 効果測定による新奇トポロジカル相の探索実験を行った．その結果，$EuGa_6$ や $EuCu_2Ge_2$ において，トポロジカル相が実現している可能性の高い磁気相を特定することに成功した．これら，Eu 化合物の詳細な磁気相については，原子力機構先端基礎研究センター所属の金子氏および田端氏等との共同研究として，中性子回折実験による磁気構造の決定実験をすすめている．

2) カイラル化合物の純良単結晶育成とフェルミ面および超伝導特性の研究

カイラルな結晶構造を持つ化合物中では，その結晶の対称性を反映した電子状態が形成され，カイラル特有の性質を持ったトポロジカル電子物性が現れる．我々の研究グループでは, このトポロジカルな性質を明らかにするため，結晶構造の対称性に対し，電流や磁場の印加方向も考慮した様々な幾何学的な配置に対し，輸送現象や磁気応答がどのような特徴を示すか興味を持って研究をすすめている．これまで，幾つかのカイラル物質に着目し，単結晶育成と電子物性測定を進めてきた．

昨年度は, 三方晶系をとる TrX_4 (Tr: Rh, Ir; X: Ge, Sn) について高純度単結晶を育成し，de Haas-van Alphen 効果測定によりフェルミ面のトポロジーに加え，バンド構造を明らかにしてきた．本物質系に関して，よりフェルミエネルギー近傍のバンド構造を明らかにするために，早稲田大学の溝川グループとの共同研究として，角度高分解の光電子分光実験を行った．また，カイラル構造物質において観測される，非相反伝導現象の定量的評価と合わせて，$IrGe_4$ の超伝導状態の電子状態を探るため，東北大学の木俣氏及び大阪大学の井澤氏のグループとの共同研究として，収束イオンビーム (FIB) を使った試料の微細加工による，精密輸送特性研究をすすめた．

PdGa は，磁性化合物として有名な MnSi と同型の立方晶系のカイラル構造を持つ．MnSi においては，低温において磁気的トポロジカル相である，磁気スキルミオン相を発現することから，磁気的構造の研究が精力的にすすめられているが，我々の研究グループでは，これら同型の化合物のバンド構造を明らかにするために，非磁性の物質に注目して研究をすすめている．そこで PdGa および PtGa について，Bi を用いたフラックス法により高純度単結晶育成を行った．PdGa については，de Haas-van Alphen 効果測定を行い，バンド計算との比較研究を行った．その結果，フェルミ面は，８つのバンドからなる比較的小さな閉じたフェルミ面が多数あることが明らかとなった．カイラル構造に由来する反対称スピン - 軌道相互作用により，スピンが分裂し，ほぼ同じトポロジーを持った対のフェルミ面が形成されていることを実験的に明らかにした．逆格子空間において，同じ中心座標を持つフェルミ面が複数存在す

ることで，電子のサイクロトロン運動の軌道は交差を起こし，それによって非常に多くの de Haas-van Alphen 周波数が得られることも，この物質系で初めて明らかにした．

3) 対称性強制ディラック点を持つ層状化合物の線形磁気抵抗と第一種超伝導

結晶の対称性によりブリルアン域内に強制的にもたらされる対称性強制ディラック点（symmetry-enforced Dirac point: SEDP）の存在は以前から知られていたが, それが電子物性に与える影響は，未解明の重要な問題である．この問題について調べるため,SEDP として Dirac 点の存在が保証されており，かつ，基礎物性がほとんど未解明の正方晶層状化合物 β-$IrSn_4$（図 1(a): 空間群 $I4_1/acd$, #142）に着目した. まず密度汎関数理論（DFT）計算により, 本系の SEDP が幾つかの高対称点に存在することを確認した．さらに，大きなフェルミ速度（グラフェンにおける値 1×10^6 m/s と同程度）を持つ線形型分散バンドが多数存在することを見出した. この物質は, 高温安定相であるため, 通常の方法では単結晶育成が困難である. 工夫したフラックス法で試行錯誤を行い，残留抵抗比（RRR）が最高で 700 にも達する高品質単結晶の育成に成功した． 低温高磁場領域で，磁場 H に線形に依存する異常な線形磁気抵抗（LMR）を見出した（図 1(b)）．本系は電子とホールを同数含む補償金属であるため，従来の電子輸送理論に基づくならば，H^2 依存を示しながら発散するはずであり，何か特異な電子伝導機構が働いていることを示唆する．LMR は，幾つかのトポロジカル物質で観測されており，その発現機構を明らかにするための研究が世界的に行われている.β-$IrSn_4$ では, ディラック半金属で議論されるアブリコソフの量子限界モデルや，不均一系に適用される移動度ゆらぎの可能性は却下される．一つの可能なシナリオとして，磁場印可による時間反転対称性の消失により，ディラック点がワイル点に分裂することによって，非零のベリー曲率が生じ，伝導電子に磁場に比例する抵抗が働く機構が考えられる. さらに結晶に対する磁場方向を回転させながら, 磁気抵抗 (MR) の角度依存性が微細な構造を持つことを見出し,c 軸方向に開軌道が存在することを指摘した.

さらに，本系の超伝導状態（超伝導転移温度 T_c=1.06 K）の磁場中比熱を詳細に調べ，比熱の異常な増大を臨界磁場近傍で見出した（図 1(c)）．これは，本系の超伝導が第一種であることを示す明確な証拠である．化合物の第一種超伝導体は稀であり，ディラック半金属では，$PdTe_2$ のみが報告されている．上述の高いフェルミ速度が，Pippard のコヒーレンス長を増大させ，第一種超伝導が発現したものと解釈できる．伝導電子の特性をさらに明らかにするために,ARPES 測定を共同研究として進めた.

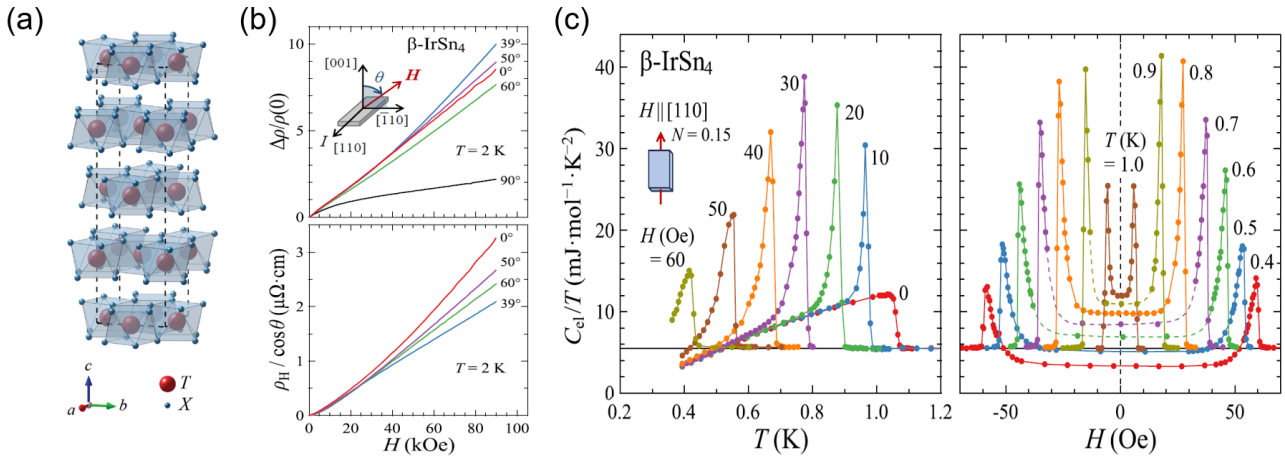


図 1: β-$IrSn_4$ の (a) 結晶構造，(b) 磁気抵抗および Hall 抵抗の磁場依存性 [磁場に対して線形に増大する磁気抵抗の異常な振る舞い]，(c) 比熱の温度および磁場依存性．超伝導転移に伴う比熱のジャンプの異常な増大は, 第一種超伝導の証拠である.

4) カイラル結晶構造を持つ $Y_3Rh_4Ge_{13}$ における超伝導特性の研究

$Ln_3Tr_4X_{13}$ (Ln: 希土類, Tr: 遷移金属, X:Sn, Ge) 化合物は，大きな化合物群をなし，強相関電子系の研究対象として長年研究が行われてきた．一方で，近年この系がカイラル結晶構造への構造相転移を起こすことや，またそれに起因したワイル近藤半金属状態の発現が議論されるなど，本系が示す電気伝導および磁気相関・秩序構造とカイラル構造の関連性について盛んに研究がなされている．加えて，$La_3Tr_4Sn_{13}$ (Tr = Co, Rh, Ir) がカイラル結晶での超伝導を示すことが見出されており，カイラル構造特有の超伝導特性を探索する一つの系として注目されている．

我々はこれまで, Sm 化合物が示す強相関電子物性の探索を目的として，本系の研究を進めていたが，その参照物質として，非磁性の Y 化合物に注目し，$Y_3Rh_4Ge_{13}$ の結晶育成を行った．得られた結晶の詳細な結晶構造解析から，以前の報告とは異なり，本物質が $I2_13$ のカイラル構造 (図 2(a)) を持つカイラル構造物質であることを見出した．さらに，以前に報告されていた超伝導転移温度 (0.7 K) よりも高い温度である 1.5 K で超伝導転移を示す (図 2(b)) ことを見出した．本系は，カイラル構造を持つ超伝導体として，その超伝導状態のみならず，常伝導状態の半金属的な特異な電気抵抗の発現メカニズムについて興味深い系である．

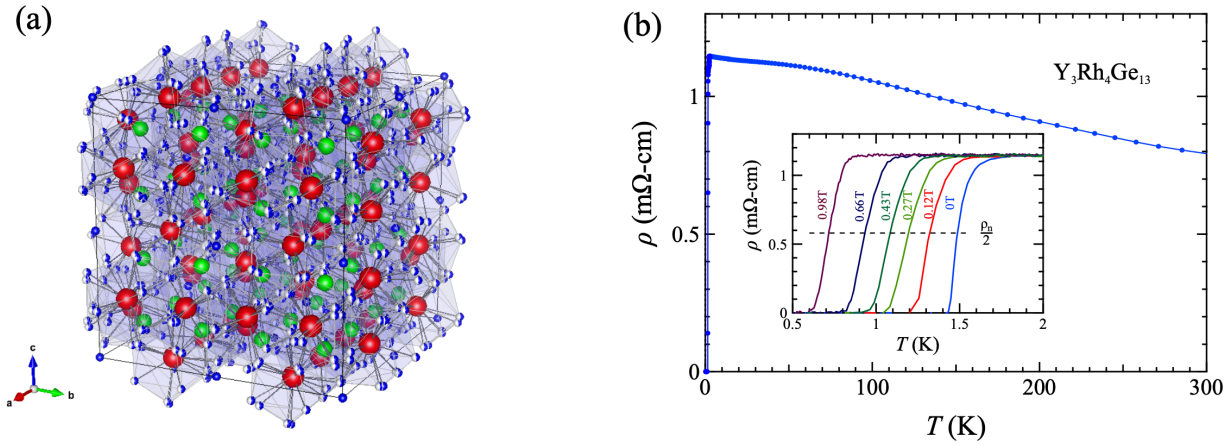


図 2: $Y_3Rh_4Ge_{13}$ の (a) カイラル $I2_13$ 結晶構造，(b) 電気抵抗率の温度依存性．インセットは磁場中での温度依存性の低温部の拡大図.

2. 研究業績

1) 論文

Md Asif Afzal, R. Higashinaka, K. Iwasa, N. Ahmed, R. Tsubota, N. Nakamura, T. D. Matsuda, Y. Aoki: Superconductivity in Chiral Cubic $Y_3Rh_4Ge_{13}$, *J. Alloys Compd.* **978** (2023) 172914 [6 pages]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.172914

G. Hayashi, T. Shimaiwa, M. Okawa, N. Nakamura, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, M. Kitamura, D. Shiga, H. Kumigashira, M. Kopciuszynski, A. Barinov, Naurang. L. Saini, and T. Mizokawa: Electronic Properties of Chiral $IrGe_4$ Studied by Angle Resolved Photoemission Spectroscopy and Band Structure Calculation, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93** (2024) 014702 [6 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.93.014702

Y. Õnuki, K. Karube, D. Aoki, A. Nakamura, Y. Homma, T.D. Matsuda, Y. Haga, and T. Takeuchi : Magnetic and Fermi Surface Properties of Semimetals $EuAs_3$ and $Eu(As_{1-x}P_x)_3$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92** (2023) 114703 [12 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.92.114703

Ryuji Higashinaka, Hideaki Endo, Joe Kajitani, Ryotaro Sakatani, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki: Thermodynamic properties of mixed-valent Eu ions and nonmetallicity in $Eu_3Bi_2S_4F_4$ single crystals, *Phys. Rev. B* **108** (2023) L081122 [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.108.L081122

Nazir Ahmad, Shunsuke Shimada, Takumi Hasegawa, Hiroto Suzuki, Md Asif Afzal, Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki : Liner Magnetoresistance and Type-I Superconductivity in β-$IrSn_4$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93** (2024) 44706 [6 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.93.044706

Yoshichika Ōnuki, Kenri Nakaima, Wataru Iha, Shinya Matsuda, Masato Hedo, Takao Nakama, Dai Aoki, Ai Nakamura, Miho Nakashima, Yasushi Amako, Tetsuya Takeuchi, Tatsuma D. Matsuda Anomalous Hall Effect in Rare Earth Antiferromagnets with the Hexagonal Structures, *New Phys.: Sae Mulli* **73** (2023) 1054-1057. DOI: 10.3938/NPSM.73.1054

Yoshichika Ōnuki Characteristic Fermi Surface Properties of Rare Earth and Actinide Compounds, *New Phys.: Sae Mulli* **73** (2023) 1050-1053. DOI: 10.3938/NPSM.73.1050

Satoshi Tsutsui,Takashi U. Ito, Jin Nakamura,Mio Yoshida, Yoshio Kobayashi,Yoshitaka Yoda1,Jumpei G. Nakamura, Akihiro Koda, Ryuji Higashinaka, Dai Aoki, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki ^{149}Sm synchrotron - radiation - based Mössbauer and μ+SR studies of $Sm_3Ru_4Ge_{13}$, *Interactions* **245** (2024) 55 [9 pages]. DOI: 10.1007/s10751-024-01900-6

Yuto Watanabe, Hiroto Arima, Aichi Yamashita, Akira Miura, Chikako Moriyoshi, Yosuke Goto, Chul-Ho Lee, Ryuji Higashinaka, Hidetomo Usui, Shogo Kawaguchi, Kazuhisa Hoshi, and Yoshikazu Mizuguchi Superconductivity in In-doped $AgPbBiTe_3$ compounds synthesized byhigh-pressure synthesis, *J. Am. Chem. Soc.* **146** (2024) 773. [9 pages]. DOI: 10.1021/jacs.3c10797

Takahiro Sawahara, Hiroto Arima, Takayoshi Katase, Aichi Yamashita, Ryuji Higashinaka, Yoshikazu Mizuguchi Low-Temperature Chiral Crystal Structure and Superconductivity in $(Pt_{0.2}Ir_{0.8})_3Zr_5$, *Physica C* **612** (2023) 1354308. [6 pages]. DOI: 10.1016/j.physc.2023.1354308

2) 学会講演

● 日本物理学会 2024 年春季大会 2024 年 3 月 18 日 21 日　オンライン開催

三宅雅尭, 大貫惇睦, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 反転対称性の破れた結晶構造をとる Cu_3P の単結晶育成と物性 II

Afzal MD Asif, 東中隆二, 岩佐和晃, C, Nazir Ahmed, 坪田椋, 中村直貴, 松田達磨, 青木勇二: カイラル結晶構造を持つ $Y_3Rh_4Ge_{13}$ の低温物性測定と超伝導特性

横山旭, 仲地立, 本間佳哉, 仲村愛, 清水悠晴, 李徳新, 三宅厚志, 本多史憲, 青木大, 松田達磨, 大貫惇睦, 木俣基: 空間反転対称性の破れた反強磁性体 $EuIr_4In_2Ge_4$ の微細加工と電気伝導測定

● 日本物理学会 2023 年秋季大会 2023 年 9 月 16 日 (土) 19 日 (火) 東北大学 川内キャンパス

仲地立, 本多史憲, 上床美也, 本間佳哉, 青木大, 大貫惇睦, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 強磁性体の $EuRu_2Ge_2$ の単結晶育成と電子状態

保井晃, 雀部矩正, 水牧仁一朗, 三村功次郎, 松田達磨: 磁場印加下偏光制御共鳴硬 X 線光電子分光による $YbRh_2Si_2$ の量子臨界点近傍の電子状態観測

田中なつみ, 三宅雅尭, 中村直貴, 仲村愛, 青木大, 播磨尚朝, 大貫惇睦, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 立方晶キラル PdGa のドハース・ファンアルフェン効果

三宅雅尭, 大貫惇睦, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 結晶反転対称性の破れた Cu_3P の単結晶育成と物性

岩佐和晃, 河村聖子, 村井直樹, 中島健次, J.-M. Mignot, S. Raymond, Paul Steffens, 松田達磨, 青木勇二, 川崎郁斗, 藤森伸一, 山上浩志, 横山淳, D. T. Adroja, and A. M. Strydom: $Ce_3T_4Sn_{13}$ (T = Co, Rh, Ir) のカイラル相における $4f$ 電子状態と Weyl-Kondo 半金属

大貫惇睦, 本間佳哉, 仲村愛, 青木大, 竹内徹也, 木田孝則, 萩原政幸, 金道浩一, 本多史憲, 上床美也, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 2 価からずれた反強磁性対 Eu_2Ga_3Ir の電子状態

Afzal MD Asif, ○東中隆二, 中村直貴, 大貫惇睦, 有馬寛人, 山下愛智, 水口佳一, 青木勇二, 松田達磨: 正方晶化合物 $Ln$$Ga_6$($Ln$=La-Lu) の純良単結晶育成と f 電子基底状態の探索

田村柊斗, 脇舎和平, 小松龍司, 中村光輝, 吉澤正人, 松田達磨 A, 中西良樹: 立方晶 $PrOs_2Sn_2Zn_{18}$ の構造・磁気特性

国内研究会

● TMU Material Science2023 国際ワークショップ 2023 年 6 月 20 日 東京都立大学

N. Ahmad: Transport properties of topological electronic state in β-$IrSn_4$

M. A. Afzal: Superconductivity in chiral structure $Y_3Rh_4Ge_{13}$

田中　なつみ: Topological Hall effect in the Skyrmion phase of Gd_2PdSi_3

北川　紘章: Single-crystal neutron diffraction study of unusual ordered phase coexisting with heavy electronic states in $SmAu_3Al_7$

三宅　雅尭: Discovery of Anomalous Non-magnetic Transition in Cu_3P with the Noncentrosymmetric Crystal Structure

仲地　立: Single crystal growth of $EuRu_2Ge_2$ and electronic states under pressure

● 第 2 回 量子物質分野横断研究会　2023 年 12 月 13 日 東京都立大学

三宅雅尭: 結晶反転対称性の破れた Cu_3P の単結晶育成と物性

仲地　立: 強磁性体 $EuRu_2Ge_2$ の単結晶育成と電子状態

田中　なつみ: 立方晶キラル PdGa のドハース・ファンアルフェン効果

池永　玲央: カイラル物質 $LuNi_3Ga_9$ の de Haas-van Alphen 効果測定

国際会議

● H-Physics workshop: Topology, spin-orbit interactions and superconductivity in strongly correlated quantum materials under extreme conditions　2023年10月10日(火)〜12日(木) Grenoble(フランス)

(Invited Talk) Tatsuma D Matsudai: Transport and Fermi Surface Properties of Intermetallic Compounds with Chiral Structure

● MRM2023/IUMRS-ICA2023, 2023年12月11日(月)〜16日(土), 京都国際会議場(京都)

Masataka Miyake, Natsumi Tanaka, Naoki Nakamura, Yoshichika Ōnuki, Dai Aoki, Ai Nakamura, Hisatomo Harima, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, Tatsuma D. Matsuda: de Haas-van Alphen Effect of PdGa with the Cubic Chiral Structure

● CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024, 2024年2月20〜22日, Belle Salle Akihabara(東京)

Nazir Ahmad, Shunsuke Shimada, Takumi Hasegawa, Hiroto Suzuki, Md Asif Afzal, Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki: Linear Magnetoresistance and Type-I Superconductivity in Dirac Material β-$IrSn_4$

超伝導物質研究室

1．研究活動の概要

本研究室では，超伝導体および熱電変換材料の新物質開発および物性研究を進めている．また，高温超伝導体や熱電変換材料の特性向上に向けた応用研究や，超伝導体の新たな応用の可能性を模索する研究も行っており，例えば超伝導体を用いた不揮発磁気熱スイッチングに関する研究に特に力をいれている．主に研究対象とする物質は，層状化合物，多元素固溶をしたハイエントロピー化合物，負の熱膨張をはじめとした異常熱膨張を示す物質，相分離状態の物質であるが，常に新奇物質開発に向けた研究対象の拡張を目指している．

1) 層状超伝導体に関する研究

BiS_2 系超伝導体のフォノン解析　BiS_2 系超伝導体 $La(O,F)BiS_{2-x}Se_x$ は，Se 置換によってバルク超伝導が発現することが知られている．伝導面内方向の局所的な結晶構造乱れを抑制することがバルク超伝導発現に重要であることが示されていた．本研究では，類似物質である $LaOBiS_{2-x}Se_x$ で観測された積層方向（$_c$ 軸方向）の Bi 大振幅振動に注目し，超伝導が発現する（F ドープ組成）$La(O,F)BiS_{2-x}Se_x$ においても Bi 大振幅振動が存在するかを研究した．$LaOBiS_{2-x}Se_x$ においては，中性子非弾性散乱 (J-PARC) によって Bi 振動に対応するフォノンエネルギーがソフト化することを見出していた (Lee et al., APL 2018)．本研究でも，$La(O,F)BiS_{2-x}Se_x$ 多結晶を用いた非弾性散乱実験を JRR-3(TOPAN) にて東北大藤田研と共同で実施した．状態密度にピークが観測はされたが，Se 濃度による明確な変化は観測されなかった．そこで，格子比熱解析を行い，該当するフォノンエネルギーの変化や解析で用いたアインシュタインモデルの振動子強度の変化を追った．比熱解析から，$LaOBiS_{2-x}Se_x$ および $La(O,F)BiS_{2-x}Se_x$ において Se 置換が Bi 振動に対応するアインシュタインモードの振動子強度を増大させることを確認した．フォノンエネルギーに関しては，$LaOBiS_{2-x}Se_x$ では Se 置換によるソフト化がみられたが，$La(O,F)BiS_{2-x}Se_x$ では変化がなかった．このことから，バルク超伝導発現には Bi 振動エネルギーのソフト化は必要なく，振動子強度の増大が関連していると結論付けた．今後，さらなる研究が必要ではあるが，振動子強度の増大は面内局所構造乱れの抑制に起因した状態密度ピークのシャープ化に起因していると考えている．本成果は Abbas et al., Appl. Phys. Express 17, 013002 (2023) に掲載された．

多層型伝導層を持つ BiS_2 系超伝導体の開発　BiS_2 系超伝導体には，伝導層を構成する Bi-S シートの枚数が 1, 2, 4 枚の物質が存在する．本研究では，4 層型伝導層を有する新超伝導体 $La_2O_2Bi_{3-x}Pb_{1+x}S6$ の開発に成功した（Jha et al., Supercond. Sci. Technol. 36, 105002 (2023)）．本系では，x を増加させることで半導体的性質から金属的な性質へと変化させることに成功した．一方，超伝導は観測されなかったため，ピストンシリンダーセルを用いた高圧実験を実施し，圧力下で超伝導状態の観測に成功した．4 層型は 2 層型に比べて例が少ないため，今後の多層型 BiS_2 系超伝導体の開発に重要な成果と言える．本研究は，元超伝導物質研特任研究員の R. Jha 氏（研究当時 NIMS）と共同研究を継続してきた結果である．

2) ハイエントロピー物質の研究

新しい超伝導体の開発　多元素固溶したハイエントロピー超伝導体が注目を集めている．多元素固溶に起因した局所的な結合長の乱れはガラス的なフォノン状態を作り出す一方で，電子系ではバンド選択的な変調が生じる．後述の高圧下での T_c ピンニング現象など興味深い物性が観測されている．よって，新たな組成でハイエントロピー超伝導体を開発することは重要な研究である．本研究では，$AgPbBiTe_3$ を

出発物質として，金属サイト（Ag, Pb, Bi のサイト）を In で系統的に置換することで超伝導体合成に成功した．合成には高圧合成法を用い，常圧下では不安定な本物質の単相合成に成功し，最高の T_c は 2.8 K であった (Sawahara et al., Physica C 612, 1354305 (2023))．

高圧下物性評価　ハイエントロピー超伝導体 MTe は高圧下で T_c の圧力依存性がなくなる T_c ピンニング現象が観測されている．その起源の一つはガラス的なフォノンにあると 2022 年度のハイエントロピー型 MTe の研究で見出した（Mizuguchi et al., Mater. Today Phys. 2023）．本研究では，新たな MTe 型超伝導体 $GeSnPbTe_3$（配置エントロピーはミディアムエントロピー物質に相当）を高圧合成し，圧力印加によって圧力誘起超伝導を見出した．また，本系は金属サイトが同族元素からなるため，電子バンドの顕著なぼやけが生じないことを理論計算から確認した．一方，フォノンはガラス的になり，また圧力下での T_c ピンニング現象が観測された．このことから，T_c ピンニング現象の起源がフォノンのガラス化と強く結びついているという結論に至った（Matsumoto et al., J. Alloys Compd. 983, 173906 (2024)）．これらの MTe 系超伝導体は 3 次元的な結晶構造を持っており，ハイエントロピー化の影響を受けやすい．そこで，層状超伝導体をハイエントロピー化した物質において，T_c ピンニング現象が観測されるか否かの検証を BiS_2 系超伝導体 RE(O,F)BiS_2（RE サイトを希土類で多元素固溶）で行った．RE サイトの固溶元素数を 1 5 元素に変化させた一連の物質をに対して高圧印加を行い電気抵抗測定を行った．また，高圧 XRD を放射光施設 SPring-8 にて行い，結晶構造相転移に関する情報も得た．その結果，RE サイトのハイエントロピー化によって構造相転移に大きな影響はないことが確認された．電気抵抗測定から見積もった T_c の圧力依存性を見積もったところ，RE サイト固溶元素数の影響がなく，どの試料も低圧で上昇し，構造相転移を経て減少に転じる共通の結果となった．本系では RE サイトの多元素固溶が，伝導層に乱れを生じさせないということが以前の研究でわかっており，T_c ピンニング現象は層状超伝導体では生じず，その起源がフォノンのガラス化と強く結びついているというシナリオに矛盾しない結果となった．

銅酸化物薄膜の開発　ハイエントロピー型の銅酸化物超伝導体 $REBa_2Cu_3O_{7-d}$（RE: レアアース，REBCO）では，イオン照射後でも超伝導転移温度がほぼ下がらないことを明らかにしている．この起源を解明するため，照射前後の TEM 観察を実施し，照射による結晶構造の損傷の違いから超伝導特性が低下する起源の解明を試みた．従来の REBCO では，照射によってアモルファス化が進行し，臨界電流密度 J_c が低下するのに対し，ハイエントロピー型 REBCO では，アモルファス化は抑制されたが面間方向の積層欠陥の増大が J_c 低下を招いていることを明らかにした．また，選択する RE 元素の種類が照射後の J_c に影響すること見出したことから，様々な RE 元素組成の試料作製を行うため，新たに導入した PLD 装置と製膜した単結晶薄膜アニール用の管状炉の立ち上げと成膜とアニール条件の探索を実施した．

熱電変換材料の開発　昨年度より取り組んできたハイエントロピー (HE) 型の $AgBiSe_2$ 化合物（$AgBiSe_{2-2x}S_xTe_x$, x = 0.0-0.8）の詳細な熱伝導率の解析を行い，x 増大による多元素固溶が大きな格子の乱れや歪みの導入が格子熱伝導率の低減に寄与し，熱電性能の向上に繋がっていることを明らかにした．得られた成果は，学術論文として投稿中である（arXiv 番号:arXiv:2405.02601）．また，$AgBiSe_2$ は，温度の増大に伴い Hexagonal 構造から Rhombohedral，Cubic 構造へと構造相転移を示す．$AgBiSe_{2-2x}S_xTe_x$ において最も高い熱電性能を示す Cubic 構造において，多元素固溶が熱電性能に与える影響を解明するため，クエンチ処理によって，x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 の 4 試料全てを Cubic 構造化することに成功した．室温以下の熱電特性の評価から，x 増大に伴い熱電性能が増大していくことを見出した．また，Hexagonal 構造と異なり，x 増大による格子熱伝導率の低減には原子の質量さのみが寄与していることを明らかにし

た．得られた成果は，学術論文として，投稿中である（ arXiv 番号:arXiv:2404.00984）．

3) 異常熱膨張を示す超伝導体の研究

$CoZr_2$ への高圧印加による体積負の熱膨張の発現　2022 年度の研究で，正方晶系 $CuAl_2$ 型の遷移金属ジルコナイド $CoZr_2$ およびその遷移金属元素置換系が c 軸方向に一軸的な負の熱膨張を示すことを報告した（Mizuguchi et al., JPSJ 2022）．$CoZr_2$ 系は比較的高い T_c を有する超伝導体であり，超伝導を示しつつ異常熱膨張を示す物質の開発は，極低温と室温の温度サイクルに強い超伝導素子材料になりうるため，その機構解明および新物質開発が望まれる．本研究では，$CoZr_2$ に対してダイヤモンドアンビルセルで加圧し，その状態での熱膨張係数を放射光実験によって見積もることに挑戦した．実験は SPring-8 の BL10XU にて行い，ダイヤモンドアンビルセルにバンドヒーターを取り付け，慎重に加圧と温度制御を行った．$CoZr_2$ に圧力を印加すると，c 軸の負の線熱膨張は大きな絶対値を維持しつつ，a 軸の正の線熱膨張係数の絶対値が顕著に小さくなることがわかった（Watanabe et al., Adv. Electron. Mater. 2024, 2300896 (2024)）．さらに高圧を印加してもその傾向は変化せず，結果として体積膨張係数（β）が負に転じることがわかった．その概念図を図 1 に示す．圧力の印加によって a 軸の線熱膨張係数が抑制された理由は完全には理解できておらず，今後さらなる放射光実験を行い機構解明を目指すとともに，常圧下で同様の体積熱膨張係数が得られる条件を探索する．

異常熱膨張物質の開発　$CoZr_2$ のように負の熱膨張を示す物質の探索を行い，正方晶系 V_3S 型構造を持つ $IrZr_3$ が一軸的な負の線熱膨張を示すことを見出した（Mizuguchi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 92, 074601 (2023)）．あわせて，$IrZr_3$ がバルク超伝導体出ることも磁化率測定から示し，$IrZr_3$ が異常熱膨張を示す超伝導体であることを示した．今後も他の超伝導体での異常熱膨張探索や，熱電変換材料での異常熱膨張探索も進めていきたい．

4) 超伝導体を用いた磁気熱スイッチングの研究

単体元素超伝導体における磁気熱スイッチング　2022 年度の研究で，Nb の超伝導転移近傍での大きな熱伝導率変化と磁気熱スイッチング（外部印加による熱伝導率の大幅な変化）を報告した（Yoshida et al., APEX 2023）．超伝導状態における電子熱伝導率の抑制は古くから知られている現象ではあるが，超伝導体の種類や純度，合金系，相分離系などでの磁気熱スイッチングについては，十分に調べられていない現状だった．そこで本研究では，様々な単体元素超伝導体の磁気熱スイッチング特性を調査した．はじめに，Pb(5N 純度）の特性を評価し，磁場中では超伝導転移が抑制され，非常に高い熱伝導率が観測されることがわかった．その状態と超伝導状態を磁場でスイッチングすることで，20 倍を超えるスイッチング比（$T = 3.2$ K）で観測する観測した．また，純度が 3N の Pb を測定したところ，熱伝導率が大幅に低下し，2.5 K でのスイッチング比も 3 倍にとどまった．このことから，単体元素超伝導体の磁気熱スイッチングでは純度が重要なパラメータであることがわかった（Yoshida et al., J. Appl. Phys. 134, 065102 (2023)）．同様の評価を第一種超伝導体（Pb，Sn，Ta）および第二種超伝導体（Nb，Ta）で行い，第一種超伝導体では臨界磁場近傍で急峻にスイッチングすることが確認され，第二種では上部臨界磁場と下部臨界磁場に依存したスイッチング特性が発現することを確認した（吉田未来，修士論文．論文投稿中）．これらの単体元素超伝導体が示す磁気熱スイッチングは揮発性のもので，外部磁場を取り除くと熱伝導率変化が元に戻ってしまう．一方，純度の低い Pb（3N) においてはわずかなヒステリシスが観測された．

磁束トラップを生かした不揮発磁気熱スイッチング　上述の通り，3N 純度の Pb の熱伝導率の磁場依存性には，小さなヒステリシスが存在した．そこで，純度が究極に悪い Sn-Pb ハンダの磁気熱スイッチン

グ特性を評価した．最初の実験では一般的なヤニ入り Sn60-Pb40 ハンダを用いて実験を行い，不揮発性を持った磁気熱スイッチングが観測された．ハンダは Pb の臨界磁場である約 800 Oe を超える磁場を経験させることで常伝導状態になり高熱伝導率を示す（実験は最低温度 $T = 2.5$ K で行った）．その後ゼロ磁場に向けて消磁すると，高い熱伝導率を維持したままゼロ磁場に到達し，不揮発性を持った磁気熱スイッチングの観測に至った．同様の実験をヤニ無し Sn45-Pb55 ハンダにて行ったところ，同様に不揮発性を持った磁気熱スイッチングが観測され，初期状態と不揮発時のスイッチング比は 1.5 倍に達した．ハンダを組成分析したところ，Sn と Pb が完全相分離している状態が確認され，磁化測定，比熱測定，および磁気光学画像測定から Sn 領域に磁束がトラップされていることが原因で本現象が生じているという結論に至った（特許出願，Arima et al., Commun. Mater. 5, 34 (2024)）．図 2 にその計算結果を示す．Sn 領域に磁束がトラップされることで，Sn 領域の超伝導状態（低熱伝導率）は消磁後も失われており，不揮発性の発現につながる．同様に磁束トラップによる不揮発磁気熱スイッチングと考えられる現象が，高温超伝導体である MgB_2（$T_c = 39$ K）でも観測された（Arima et al., J. Phys. Soc. Jpn. 92, 103702 (2023)）．観測された不揮発スイッチング比は 18 % ($T = 2.5$ K) とまだ低いが，今後の焼結条件最適化や複合材料化によって，そのスイッチング特性が向上する可能性がある．

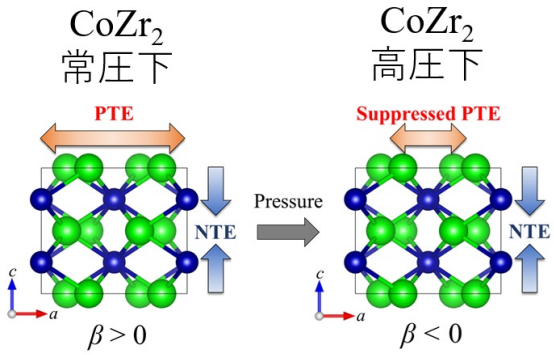


図 1: $CoZr_2$ の高圧下での熱膨張係数の変化

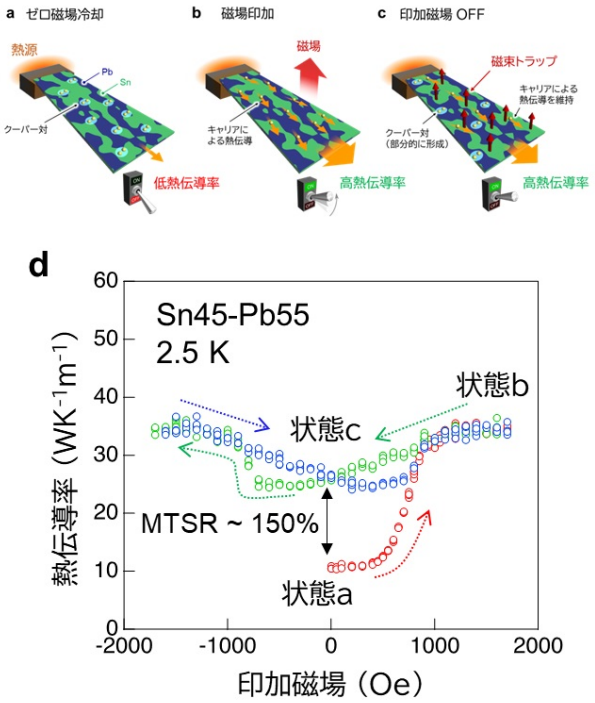


図 2: ハンダにおける不揮発磁気熱スイッチングの概念図

5) 新奇超伝導体・新奇物性の開拓

カイラル構造を持った $(Ir,Pt)_3Zr_5$ 超伝導体の開発　近年，カイラル構造を持った超伝導体の研究がさかんに行われており，高い臨界磁場の発現を期待した新物質開発が行われている．通常の物質探索では，カイラル空間群に属する対象物質を見つけ出し，そこに超伝導発現を期待することが多い．本研究では，類似の結晶構造を有する Ir_3Zr_5（カイラル空間群を持つが超伝導は示さない）と Pt_3Zr_5（カイラル空間群を持たないが超伝導体である）に着目し，その固溶系を合成することでカイラル構造を持ち超伝導を示す新物質の合成に成功した（Watanabe et al., J. Am. Chem. Soc. 146, 773-781 (2023)）．本系で観測された B_{c2} はパウリリミットを下回るものであり，カイラル構造に起因した高い臨界磁場は見られなかったが，固溶可能な 2 つの系に着目しカイラル構造を持った超伝導体を開発する指針を提示すること

ができた.

遷移金属ジルコナイド超伝導体 Zr_4Pd_2O の開発　遷移金属ジルコナイド $TrZr_2$ 系に酸素を加えた Zr_4Tr_2O や類似系 Ti_4Tr_2O において，新超伝導体探索が活気を帯びている．その理由の一つに，内在するパイロクロア型ネットワークやスピン軌道相互作用に起因した高い上部臨界磁場が観測されていることがあげられる．本研究ではこれまでに報告がなかった Zr_4Pd_2O の新規合成（アーク溶解法）に成功した．結晶構造解析および電気抵抗率，磁化率，比熱の評価を行い，合成した新物質が単相のバルク超伝導体であることを報告した（Watanabe et al., Sci. Rep. 13, 22458 (2023)）．また，既報の Zr_4Rh_2O では上部臨界磁場がパウリリミットを下回っていたものの，今回合成した Zr_4Pd_2O の上部臨界磁場はパウリリミットを超えており，Tr サイトの元素の違いによるスピン軌道相互作用の大きさの変化が重要である可能性を示した.

磁場中冷却したハンダ超伝導体における低温比熱異常　不揮発磁気熱スイッチングを示す Sn-Pb ハンダにおける新奇な低温物性を探索した．磁場中冷却によって磁束を Sn 領域にトラップさせ，その状態から温度を上げつつ比熱測定を行った．すると，超伝導状態を失っている Sn の T_c の近傍に，比熱の異常が確認された（Murakami et al., AIP Adv. 13, 125008 (2023)）．一方，観測された異常は Sn の電子系の超伝導転移と仮定すると大きすぎる比熱変化であり，現在その機構を解明すべく様々な組成や磁束トラップ条件での比熱測定を進めている.

2. 研究業績

1) 論文

H. Arima, Md. R. Kasem, H. Sepehri-Amin, F. Ando, K. Uchida, Y. Kinoshita, M. Tokunaga, Y. Mizuguchi, "Observation of nonvolatile magneto-thermal switching in superconductors", *Commun. Mater.*, **5** (2024) 34

Y. Watanabe, H. Arima, S. Kawaguchi-Imada, H. Kadobayashi, K. Oka, H. Usui, R. Matsumoto, Y. Takano, T. Kawahata, C. Kawashima, H. Takahashi, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, "Pressure-induced volumetric negative thermal expansion in $CoZr_2$ superconductor", *Adv. Electron. Mater.*, **2024** (2024) 2300896

S. Nakanishi, Y. Nakai, Y. Goto, Y. Mizuguchi, T. Fujii, T. Mito, "Site-Selective NMR/NQR Study on Layered Tin Pnictide Superconductor $NaSn_2Pn_2$ (Pn = P and As)", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **93** (2024) 023703

Y. Watanabe, H. Arima, A. Yamashita, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Goto, C. H. Lee, R. Higashinaka, H. Usui, S. Kawaguchi, K. Hoshi, Y. Mizuguchi, "Low-Temperature Chiral Crystal Structure and Superconductivity in $(Pt_{0.2}Ir_{0.8})_3Zr_5$", *J. Am. Chem. Soc.*, **146** (2023) 773

F. I. Abbas, H. Arima, Md. R. Kasem, Y. Watanabe, T. Hasegawa, C. H. Lee, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, "Stabilization of Bi vibration along c-axis in BiS_2-based layered compounds $La(O,F)Bi(S,Se)_2$ by Se substitution", *Appl. Phys. Express*, **17** (2023) 013002

Y. Watanabe, A. Miura, C. Moriyoshi, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, "Observation of superconductivity and enhanced upper critical field of η-carbide-type oxide Zr_4Pd_2O", *Sci. Rep.*, **13** (2023) 22458

H. Arima, M. Yoshida, Y. Mizuguchi, "Magnetic Field Hysteresis of Thermal Conductivity in Type-I and Type-II Superconductors", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **93** (2024) 015001

T. Murakami, H. Arima, Y. Mizuguchi, "Anomalous field-temperature phase diagram of superconductivity in Sn–Pb solder", *AIP Adv.*, **13** (2023) 125008

Y. Li, Z. X. Sun, N. Kataoka, T. Setoguchi, Y. Hashimoto, S. Takeuchi, S. Koga, K. Hoshi, Y. Mizuguchi, T. Matsushita, T. Wakita, Y. Muraoka, T. Yokoya, "Photoelectron holographic evidence for the incorporation site of Se and suppressed atomic displacement of the conducting layer of La(O,F)BiSSe", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62** (2023) 125001

Y. Mizuguchi, K. Yamane, R. Matsumoto, K. Hoshi, A. Yamashita, A. Miura, Y. Nakahira, S. I Kawaguchi, Y. Takano, "Absence of T_c-Pinning Phenomenon under High Pressure in High-Entropy $REO_{0.5}F_{0.5}BiS_2$ Layered Superconductor", *J. Phys. Soc. Jpn.* , **92** (2023) 114702

H. Arima, Y. Mizuguchi, "Nonvolatile Magneto-Thermal Switching in MgB_2", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **92** (2023) 103702

T. Sawahara, H. Arima, T. Katase, A. Yamashita, R. Higashinaka, Y. Mizuguchi, "Superconductivity in In-doped $AgPbBiTe_3$ compounds synthesized by high-pressure synthesis", *Physica C*, **612** (2023) 1354305

T. Hattori, Y. Watanabe, T. Nishizaki, K. Hiraoka, M. Kakihara, K. Hoshi, Y. Mizuguchi, J. Kitagawa, "Metallurgy, superconductivity, and hardness of a new high-entropy alloy superconductor Ti-Hf-Nb-Ta-Re", *J. Alloys Metallurgical Syst.*, **3** (2023) 100020

R. Jha, J. Valenta, N. Tsujii, T. Naka, T. Kawahata, C. Kawashima, H. Takahashi, T. Mori, Y. Mizuguchi, "Evaluation of insulating behavior by Pb substitution and pressure-induced superconductivity in $La_2O_2Bi_{3-x}Pb_{1+x}$", *Supercond. Sci. Technol.*, **36** (2023) 105002

M. Yoshida, H. Arima, A. Yamashita, K. Uchida, Y. Mizuguchi, "Large magneto-thermal-switching ratio in superconducting Pb wires", *J. Appl. Phys.*, **134** (2023) 065102

Y. Mizuguchi, A. Yamashita, "Uniaxial Negative Thermal Expansion in a Tetragonal V_3S-type Superconductor $IrZr_3$", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **92** (2023) 074601

Y. Fujita, M. Nagao, A. Miura, D. Urushihara, Y. Mizuguchi, Y. Maruyama, S. Watauchi, Y. Takano, I. Tanaka, "Effects of equivalent composition on superconducting properties of high-entropy $REOBiS_2$ (RE = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd) single crystals", *Physica C*, **608** (2023) 1354254

R. Matsumoto, K. Yamane, Y. Mizuguchi, R. Ishikawa, K. Takae, R. Kurita, H. Usui, M. Ohkuma, K. Terashima, Y. Takano, "Pressure-induced superconductivity and robust T_c against external pressure in (Ge,Sn,Pb)Te", *J. Alloys Compd.*, **983** (2024) 173906

T. Nakano, T. Maeda, T. Fujita, A. Yamashita, "Synthesis and physical properties of $(Pb_{0.5}M_{0.5})(Sr,La)_2CuO_z$ ($z\sim5$; M = Fe, Co, Cu, and Zn)" *J. Alloys Compd.*, **958** (2023) 170298

2）特許

特許願　2023-216292 不揮発性磁気熱スイッチ材料，不揮発磁気的熱スイッチング素子及び不揮発性磁気熱スイッチ材料の制御方法　令和 5 年 12 月 21 日，東京都公立大学法人　東京都立大学，水口　佳一，有馬　寛人，他 6 名

特許願　2023-087946 超伝導体及び超伝導体の製造方法　令和 5 年 5 月 29 日，東京都公立大学法人　東京都立大学，山下　愛智，水口　佳一，他 4 名

3）学会講演

国内会議

● 第 84 回応用物理学会 秋季学術講演会　2023 年 9 月 19〜21 日（熊本）

水口佳一，吉田 未来，有馬 寛人，内田 健一：「低 T_c 超伝導体における磁気的熱スイッチング特性」

● 第 1 回スピンカロリトロニクス・カロリック材料融合研究会 2023 年 9 月 24 日（名古屋）

水口佳一：「超伝導体を用いた磁気熱スイッチ材料の研究」

● 第 72 回化合物新磁性専門研究会　2023 年 7 月 21 日（東京）

山下愛智：「ハイエントロピー型 $REBa_2Cu_3O_{7-d}$ 薄膜の超伝導特性」

● 日本物理学会 第 78 回年次大会 (2023 年） 2023 年 9 月 16〜19 日　（仙台）

渡邊雄翔，有馬寛人，山下愛智，三浦章，森吉千佳子，後藤陽介，李哲虎，東中隆二，臼井秀知，水口佳一: カイラルな結晶構造をもつ $(Pt_{0.2}Ir_{0.8})_3Zr_5$ の合成と超伝導特性

有馬寛人, 渡邊雄翔, 山岡人志, 松林和幸, 山下愛智, 水口佳一: 遷移金属ジルコナイド $RhZr_2$ における高圧下電気抵抗と異方的圧縮

澤原嵩大，有馬寛人，片瀬貴義，山下愛智，東中隆二，水口佳一: 岩塩型金属テルライド $AgPbBiTe_3$ の In ドープ超伝導

● 日本物理学会 2024 年春季大会） 2024 年 3 月 18〜21 日 （オンライン）

有馬寛人, Md. R. Kasem, H. Sepehri-Amin, 安藤冬希, 内田健一, 木下雄斗, 徳永将史, 水口佳一: 共晶合金 Sn-Pb ハンダにおける不揮発な磁気熱スイッチ現象

村上拓海，Md.R.Kasem，有馬寛人，渡邊雄翔，山下愛智，水口佳一: 共晶合金 Sn-Pb ハンダにおける Sn の異常な超伝導状態

● 第 20 回日本熱電学会学術講演会（TSJ2023） 2023 年 9 月 25〜27 日（北九州）

山下愛智，瀬下亜里，Poonam Rani，水口佳一，片瀬貴義，三浦章，森吉千佳子，黒岩芳弘，藤田武志: ハイエントロピー型熱電材料の開拓

瀬下亜里, 山下愛智, 藤田武志, 三浦章, 片瀬貴義, 森吉千佳子, 黒岩芳弘, 水口佳一: ハイエントロピー型熱電材料 $AgBiSe_{2-2x}S_xTe_x$ の熱電特性

● 第 29 回渦糸物理ワークショップ 2023 年 12 月 18〜20 日（仙台）

有馬寛人, Md. R. Kasem, H. Sepehri-Amin, 安藤冬希, 内田健一, 木下雄斗, 徳永将史, 水口佳一: 共晶合金 Sn-Pb ハンダを用いた不揮発な磁気熱スイッチング

村上拓海，有馬寛人，水口佳一: 共晶合金 Sn45-Pb55 ハンダの超伝導特性

M. Yamanaka, A. Yamashita, K. Sakurai, N. Oono, T. Fujita, D. Oka, Y. Hirose, A. Shimamura, Y. Nakanishi, Y. Miyata, T. Maeda, Y. Mizuguchi: Pinning mechanism of High-entoropy-type $ReBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films

● 超伝導研究の発展と広がり 2023 年 12 月 20〜22 日　（京都）

有馬寛人, Md. R. Kasem, H. Sepehri-Amin, 安藤冬希, 内田健一, 木下雄斗, 徳永将史, 水口佳一: 共晶合金 Sn-Pb ハンダにおける不揮発な磁気熱スイッチと超伝導特性

国際会議

● Symposium and Workshop on “Advanced Thermodynamics and Metastability”　2023 年 6 月 28〜29 日（Hokkaido, Japan）

A. Yamashita: Analysis of isothermal crystallization of High-entropy-type thermoelectric materials

● The 8th Japan-Korea International Symposium on Materials Science and Technology 2023 (JKMST2023) 2023 年 8 月 22〜25 日（Kochi, Japan）

A. Yamashita: Development and Overview of High-Entropy Functional Materials

M. Yamanaka, A. Yamashita, K. Sakurai, N. Oono, T. Fujita, D. Oka, Y. Hirose, A. Shimamura, Y. Nakanishi, Y. Miyata, T. Maeda, Y. Mizuguchi: Pinning mechanism of High-entoropy-type $ReBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films

A. Seshita, A. Yamashita, T. Fujita, A. Miura, T. Katase, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: High thermoelectric figure-of-merit and ultra-low lattice thermal conductivity of new high-entropytype $AgBi(S, Se, Te)_2$

● EUCAS2023　2023 年 9 月 3〜7 日（Bologna, Italy）

A. Yamashita, M. Yamanaka, Y. Mizuguchi: Development of High-Entropy Superconductors

● 19 th European Conference on Thermoelectrics (ECT 2023)　2023 年 9 月 3〜7 日（Prague, Czech Republic）

A. Yamashita, A. Seshita, P. Rani, Y. Mizuguchi: Development of high-entropy-type thermoelectric materials

A. Seshita, A. Yamashita, Y. Mizuguchi: Thermoelectric properties of high-entropy type $AgBi(S, Se, Te)_2$

M. Yoshida, M. R. Kasem, A. Yamashita, K. Uchida, Y. Mizuguchi: Magneto-thermal switching using superconductors and importance of phonon-glass-electron-crystal states to the switching performance

● Materials Research Meeting 2023 (MRM2023)　2023年12月11〜16日（Kyoto, Japan）

A. Yamashita, M. Yamanaka, K. Sakurai, N. Oono, D. Oka, Y. Hi-rose, T. Maeda, Y. Mizuguchi: Development of High-entropy-type $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films

A. Yamashita, A. Seshita, P. Rani, T. Fujita, A. Miura, T. Katase, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: Development of high-entropy-type thermoelectric materials

T. Sawahara, H. Arima, T. Katase, A. Yamashita, R. Higashinaka, Y. Mizuguchi: Superconductivity in In-doped $AgPbBiTe_3$

M. Yamanaka, A. Yamashita, D. Oka, Y. Hirose, T. Maeda, A. Shimamura, Y. Nakanishi, Y. Miyata, Y. Mizuguchi: Pinning mechanism of High-entoropy-type $ReBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films

Y. Watanabe, H. Arima, A. Yamashita, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Goto, C. H. Lee, R. Higashinaka, H. Usui, Y. Mizuguchi,: Low-temperature Chiral Crystal Structure and Superconductivity in $(Pt_{0.2}Ir_{0.8})_3Zr_5$

A. Seshita, A. Yamashita, T. Fujita, A. Miura, T. Katase, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: High thermoelectric figure-of-merit and ultra-low lattice thermal conductivity of new high-entropy-type AgBi (S, Se, $Te)_2$

● 2023 MRS Fall Meeting and Exhibit　2023年11月26〜12月1日（Boston, USA）

Y. Watanabe, H. Arima, A. Yamashita, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Goto, C. H. Lee, R. Higashinaka, H. Usui, Y. Mizuguchi: Low-temperature Chiral Crystal Structure and Superconductivity in $(Pt_{0.2}Ir_{0.8})_3Zr_5$

T. Sawahara, H. Arima, T. Katase, A. Yamashita, R. Higashinaka, Y. Mizuguchi: Superconductivity in In-doped $AgPbBiTe_3$ compounds synthesized by high-pressure synthesis

表界面光物性研究室

1．研究活動の概要

界面や表面でおこる様々な現象は，物質の性質やデバイスの性能に大きく影響を及ぼす．表面・界面の構造を制御し，新たな物理現象を見出すことを目的として，本研究室は物質創製・測定技術開発の両面で研究活動を進めている．特に，制御された界面での熱・電荷輸送に関わる物理現象や，ナノチューブ構造に由来する特異な量子物性現象，光物性では特に極端非線形光学現象などを対象に研究を進めている．具体的には，一次元材料である単層カーボンナノチューブ（SWCNT）や遷移金属カルコゲナイドナノチューブ（TMDC-NT），またナノチューブを配列させた高次構造や，二次元材料である原子層物質などを積層した界面などを対象に，合成・精製技術開発，新規測定技術開発，電気伝導特性・光物性・熱物性の研究を行っている．それら物質の構造，フェルミレベル，界面の接合構造，の制御を通して新たな物性の探索を行っている．最近では，イオン液体を電解質として用い，物質界面に電気二重層を形成させ，キャリア注入を行い，フェルミレベルを自在にシフトさせ，様々な多様な物性を制御する研究を進めている．2023 年度は，以下のような研究を進めた．

1) ファンデルワールス界面における熱・電荷の流れの研究

制御されたファンデルワールス界面における熱流・電荷流の相関解明　近年，柔らかな材料を用いたウェアラブル端末等のデバイス応用が注目されている．柔らかな材料で作られた薄膜や，ファンデルワールス力で接合した界面を有しており，その界面における熱および電荷の流れを正しく理解することは，基礎・応用の両面で重要な課題の一つとなっている．厚み数 nm の薄膜の熱輸送を定量的に評価する手法は非常に限られ，その一つが時間領域サーモリフレクタンス法（TDTR 法）である．本研究室では，TDTR 計測系を独自に立ち上げ，これまで縦型のデバイスを形成して，SWCNT 薄膜における熱流・電荷流のキャリア量依存性の解明などを明らかにしてきた．また，厚みが 1nm 程の単層の層状化合物からなる原子層材料を対象として，同原子層材料を 4 層積層した格子不整合な界面において，極めて熱伝導が抑制されることを明らかにしてきた．今年度は，そのような格子不整合界面における熱伝導と電気伝導を同時測定する計測可能であることを実証した．4 層積層した MoS_2 に対し，下部にトランスシューサー用の金電極，積層上部に電流計測用の電極を形成し，熱伝導と電気伝導の同時計測が可能であることを示した．真空アニーリングにより，系統的に界面熱伝導と界面電気伝導を変調させ，理論計算とともにその背景を明らかにした．

2) ナノ構造物質における新規物性探索と制御

ナノチューブ糸の熱電物性研究　熱電変換性能（ZT 値）は，ゼーベック係数・電気伝導率および熱伝導率に依存する．これまで私達は電子構造を選択した SWCNT 薄膜を用いて，系統的にキャリア注入制御を行い，ゼーベック係数および電気伝導率に依存する熱電出力因子が，ある特定のキャリア量で増大することを見出してきた．熱電変換性能を決定する為には，熱伝導率のキャリア量依存性と対応させる必要がある．薄膜においては，熱伝導率は面直方向において最も確実な熱伝導率を決定することが可能である．電気伝導率は既存の技術で決定可能である為，残されたゼーベック係数計測技術の開発を今年度は進めた．厚み数 nm の薄膜に形成される温度差は極めて小さくなると予想される．そこで検出感度が高い周期加熱法でゼーベック係数を決定する 2 オメガ法を用いて決定する技術開発を進めた．一方向に配列させた厚み 100nm 程の半導体型 SWCNT 薄膜を作成し，その面直方向のゼーベック係数の決定を特に 2 オメガ法を用いて決定することが可能であることを示した．今度は，原子層積層構造においても実証する予定である．

ナノチューブ・２次元物質における高次高調波発生とその制御　高強度の中赤外レーザーパルスを照射することにより，10 数次に及ぶ高次高調波が固体から発生することが近年明らかになり，固体系における極端非線形光学という新たな研究分野が近年注目されている．本研究室は，京都大学田中耕一郎研究室と共同で，SWCNT 薄膜における高次高調波発生とその制御の研究を進め，電解質ゲーティングを用いたフェルミレベル制御によって，高次高調波の増大・減少を制御できることを明らかにしてきた．しかし，グラフェンにおいては，キャリア注入制御を行っても全く HHG の強度の変化が見られず，電子構造，化学ポテンシャルの位置と HHG との関係の理解は非常に大きな課題であった．今年度ははじめに理論解析を進め，レーザー強度によって HHG の化学ポテンシャル依存性が大きく変化することを突き止めた．その知見に基づいて，半導体型 SWCNT を対象として，HHG のレーザー強度および化学ポテンシャル依存性を明らかにした．その結果，同じレーザー強度においても，化学ポテンシャルを変化させることにより，バンドエッジである K 点を通過し，トンネル過程で価電子帯に移るキャリア量が大きく減少し，HHG が大きく変化することを実験的にも明らかにした．

一次元遷移金属カルコゲナイドナノチューブの合成とその物性解明　遷移金属カルコゲナイドナノチューブ（TMDC-NT）は，非従来型超伝導やバルク光電効果といったカイラル構造に由来する新たな物性が報告され，現在活発に研究がなされている．しかし TMDC-NT は，古くからその合成手法は報告されているが，未だに物性研究が可能な単層の TMDC-NT は合成されていない状況にあり，合成手法の発展はその物性解明において非常に重要な課題となっている．本研究室では，構造と物性との関係を系統的に議論する為，TMDC-NT の合成手法の開発からその物性研究まで取り組んでいる．今年度は比較的直径の小さく（10nm 程）構造が均一な WS_2-NT の合成手法の開発に成功し，その光学特性を明らかにし，直径が小さくなるに従って，バンドギャップが小さくなる非常にユニークな特性を見出した．また，これまで開発してきた WS_2-NT を母材として，その外型に MoS_2-NT を形成するヘテロナノチューブの新規合成を進め，MoS_2 の層状構造・結晶構造をモリブデンや酸化モリブデンの蒸着により半導体的性質で形成されたヘテロナノチューブが合成できることを明らかにした．

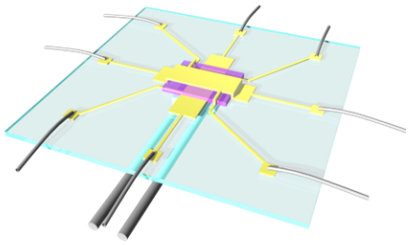


図 1: 縦型デバイス構造を用いた SWCNT 薄膜における熱起電力計測技術開発

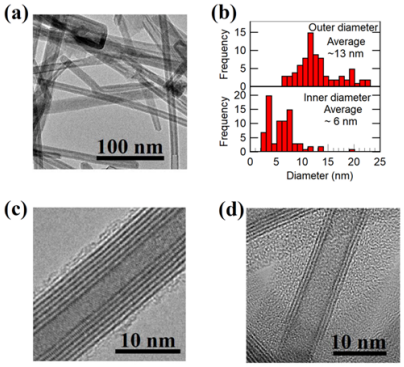


図 2: 直径の比較的小さなナノチューブの合成

2. 研究業績

1) 論文

Yohei Yomogida, Mai Nagano, Zheng Liu, Kan Ueji, Md Ashiqur Rahman, Abdul Ahad, Akane Ihara, Hiroyuki Nishidome, Takashi Yagi, Yusuke Nakanishi, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi: ”Semiconducting Transition Metal Dichalcogenide Heteronanotubes with Controlled Outer-Wall Structures”, *Nano Lett.*, **23** (2023) 10103

Hiroyuki Nishidome, Mikito Omoto, Kohei Nagai, Kento Uchida, Yuta Murakami, Junko Eda, Hitomi Okubo, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Junichiro Kono, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: "Influence of Laser Intensity and Location of the Fermi Level on Tunneling Processes for High-Harmonic Generation in Arrayed Semiconducting Carbon Nanotubes", *ACS Photonics*, bf 11 (2023) 171-179

Jacques Doumani, Minhan Lou, Oliver Dewey, Nina Hong, Jichao Fan, Andrey Baydin, Keshav Zahn, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi, Matteo Pasquali, Riichiro Saito, Junichiro Kono, Weilu Gao: "Engineering chirality at wafer scale with ordered carbon nanotube architectures", *Nature Comm.*, **14**, 7380 (2023)

Yusuke Nakanishi, Shinpei Furusawa, Yuta Sato, Takumi Tanaka, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi, Wenjin Zhang, Hiroshi Nakajo, Soma Aoki, Toshiaki Kato, Kazu Suenaga, Yasumitsu Miyata: "Structural Diversity of Single‐Walled Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes Grown via Template Reaction" *Adv. Mater.*, **35**, 2306631 (2023)

Finn L Sebastian, Felicitas Becker, Yohei Yomogida, Yuuya Hosokawa, Simon Settele, Sebastian Lindenthal, Kazuhiro Yanagi, Jana Zaumseil, "Unified Quantification of Quantum Defects in Small-Diameter Single-Walled Carbon Nanotubes by Raman Spectroscopy" *ACS Nano*, **17**, 21771-21781 (2023)

Md Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Abdul Ahad, Kan Ueji, Mai Nagano, Akane Ihara, Hiroyuki Nishidome, Mikito Omoto, Shigeki Saito, Yasumitsu Miyata, Yanlin Gao, Susumu Okada, Kazuhiro Yanagi: "Synthesis and optical properties of WS2 nanotubes with relatively small diameters" *Sci. Rep.*, **13**, 16959 (2023)

Song Zhu, Wenkai Li, Shengjie Yu, Natsumi Komatsu, Andrey Baydin, Fakun Wang, Fangyuan Sun, Chongwu Wang, Wenduo Chen, Chuan Seng Tan, Houkun Liang, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi, Junichiro Kono, Qi Jie Wang; "Extreme Polarization Anisotropy in Resonant Third‐Harmonic Generation from Aligned Carbon Nanotube Films", *Adv. Mater.*, **35**, 2304082 (2023)

Hiroto Ogura, Seiya Kawasaki, Zheng Liu, Takahiko Endo, Mina Maruyama, Yanlin Gao, Yusuke Nakanishi, Hong En Lim, Kazuhiro Yanagi, Toshifumi Irisawa, Keiji Ueno, Susumu Okada, Kosuke Nagashio, Yasumitsu Miyata: "Multilayer In-Plane Heterostructures Based on Transition Metal Dichalcogenides for Advanced Electronics", *ACS Nano*, **17**, 6545-6554 (2023)

Ryousuke Suzuki, Ryusuke Kakihara, Hiroyoshi Ishii, Tsuneaki Miyahara, Yutaka Maniwa, Kazuhiro Yanagi, Hideaki Iwasawa, Kenya Shimada, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi; "Photoemission Study of One-Dimensional Electronic States of (6, 5),(6, 6), and (7, 4) Single-Walled Carbon Nanotubes", *Journal of the Physical Society of Japan*, *92*, 024703 (2023)

K. Yanagi, "Thermoelectrics in thin films with van der Waals interfaces" *JSAP Review* 230424 (2023)

柳和宏, "ファンデルワールス界面を有する薄膜系の熱電特性", 応用物理, **92**, 79-83 (2023)

2) 学会講演

● ATI ナノカーボン研究会　2023 年 7 月 6 日（熱海）

柳和宏: Correlation between Charge and Heat flows across two dimensional van der Waals interfaces（招待講演）

● 日本物理学会　第 78 回年次大会　 2023 年 9 月 17 日（東北大学，仙台）

柳和宏: ナノチューブの階層制御と熱電物性（招待講演）

● ATF コンフェレンス　 2023 年１１月１４日（長野）

柳和宏: 単層カーボンナノチューブにおける高次高調波発生の制御（招待講演）

● 2.5 次元領域会議 2023 年 7 月 3 日（大阪）

柳和宏: 格子不整合二次元ナノ界面における熱・電荷輸送の相関の解明と制御

伊藤 駿一郎, 上治　寛, 竹延 大志, 柳 和宏: 導電性高分子におけるラメラ層間インターカレーションと熱輸送

S. Nakamura, K. Ueji, K. Zhou, H. Nishidome, T. Yagi, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Correlation between heat flow and current by interface control of ultrathin films made from dry-transferred MoS2

Akane Ihara, Mai Nagano, Yohei Yomogida, Hiroshi Nakajo, Soma Aoki, Toshiaki Kato, Kazunari Matsuda, Keisuke Shinokita, Zheng Liu, Kan Ueji, Kazuhiro Yanagi: Synthesis of Janus transition metal dichalcogenide nanotubes

応用物理学会フォノンエンジニアリング研究会　第 7 回研究会 2023 年 8 月 3 日（沖縄）

K. Ueji, K. Zhou, S. Nakamura, H. Nishidome, T. Yagi, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Correlation between thermal and electrical conductance across the interfaces of stacked transition metal dichalcogenides

● 第 65 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2023 年 9 月 4 日–6 日 (九州大学)

Akane Ihara, Mai Nagano, Yohei Yomogida, Hiroshi Nakajo, Soma Aoki, Toshiaki Kato, Kazunari Matsuda, Keisuke Shinokita, Zheng Liu, Kan Ueji, Kazuhiro Yanagi: Synthesis of Janus transition metal dichalcogenide nanotubes

蓬田陽平, F. L. Sebastian, 細川祐矢, N. F. Zorn, S. Wieland, 柳和宏, J. Zaumseil: Near-infrared circularly polarized photoluminescence and electroluminescence from enantiopure single-wall carbon nanotubes

● 2023 年度 第 10 回 ZAIKEN Festa　 2023 年 10 月 5 日（早稲田大学）

伊原茜, 永野麻衣, 蓬田陽平, 中條博史, 青木颯馬, 加藤俊顕, 松田一成, 篠北啓介, 劉崢, 上治寛, 柳和宏: ヤヌス遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブの合成

● 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会　 2023 年 9 月 19 日–23 日（）

蓬田陽平, F. L. Sebastian, 細川祐矢, N. F. Zorn, S. Wieland, 柳和宏, J. Zaumseil: 単一構造単層カーボンナノチューブからの近赤外円偏光発光

蓬田陽平, Md. A. Rahman, 伊原茜, 西留比呂幸, 大元幹人, 上治寛, Y. Gao, 岡田晋, 宮田耕充, 柳和宏: 小直径遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブの合成と光学特性

上治 寛，朝鳥 祥史郎, 安倍 陸斗, 松岡 勇也, 一ノ瀬 遥太, 蓬田 陽平, 八木 貴志, 柳 和宏: 配向した単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電性能

上治 寛，チョウ カイヤオ， 中村 颯太， 齋藤 滋輝， 西留 比呂幸， 八木 貴志， 蓬田 陽平， 宮田 耕充， 柳 和宏: 人工積層した MoS2 薄膜の面直方向電荷輸送・熱輸送のアニーリング効果

● 2nd workshop of Quantum material research center　2023 年 12 月 13 日（東京都立大学）

Abdul Ahad, Md. Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Kan Ueji, Akane Ihara, Yasumitsu Miyata, Yasushi Hirose, and Kazuhiro Yanagi: Synthesis of Arrayed WS2 Nanotubes

大元 幹人, 西留 比呂幸, 内田 健人, 遠藤 尚彦, 宮田耕充, 上治 寛, 蓬田 陽平, 田中 耕一郎, 柳 和宏: 単層遷移金属ダイカルコゲナイドの高次高調波発生のキャリア注入依存性

朝鳥　祥史郎, 上治　寛, 中村　颯太, 斎藤　滋輝, 牧野　恭敬, 金子　嘉彦, 八木　貴志, 蓬田　陽平, 宮田　耕充, 柳　和宏: モノドメイン積層界面における熱流と電流の相関

齋藤　滋輝，金子　嘉彦, 朝鳥　祥史郎, 八木　貴志, 大久保　瞳, 上治　寛, 蓬田　陽平, 柳　和宏: 単層カーボンナノチューブ薄膜における薄膜面外方向の熱電性能測定

● 2.5 次元領域会議　2023 年 12 月 25 日（名古屋大学）

柳和宏: 格子不整合二次元ナノ界面における熱・電荷輸送の相関の解明と制御

朝鳥　祥史郎, 上治　寛, 中村　颯太, 斎藤　滋輝, 牧野　恭敬, 金子　嘉彦, 八木　貴志, 蓬田　陽平, 宮田　耕充, 柳　和宏: モノドメイン積層界面における熱流と電流の相関

● 第７１回春季応用物理学会学術講演会　2024 年 3 月 22 日–25 日（東京都市大学）

大元幹人，内田健人，西留比呂幸，上治寛，蓬田陽平，遠藤 尚彦，宮田 耕充，村上雄太，田中耕一郎，柳和宏: 単層 MoS2，MoSe2 の高次高調波発生のキャリア注入依存性

齋藤　滋輝，金子　嘉彦, 上治　寛, 蓬田　陽平, 八木　貴志, 柳　和宏: 単層カーボンナノチューブ薄膜における面直方向熱電性能評価

国際会議

● US-Japan meeting　2023 年 7 月 17 日（US-Japan meeting）

Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric figure of merit of aligned and Fermi-level tuned carbon nanotubes（Invited）

● ISSP Regular Workshop　2023 年１２月５日（物性研，柏）

Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric performance of single walled carbon nanotubes（Invited）

● PIRE Workshop 2023 年 5 月 18 日（横浜）

Kazuhiro Yanagii: Thermoelectrics at controlled nanotube and 2D interfaces

● MNC conference 2023 2023年11月14日–17日（京王プラザホテル札幌，札幌）

Sota Nakamura, K. Ueji, K. Zhou, S. Saito, H. Nishidome, T. Yagi, T. Shiga, T. Yamamoto Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Correlation between heat flow and electrical current across 4 layered MoS2

The 23rd international conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT23) 2023年6月3日–10日（France）

Akane Ihara, Mai Nagano, Yohei Yomogida, Hiroshi Nakajo, Soma Aoki, Toshiaki Kato, Kazunari Matsuda, Keisuke Shinokita, Zheng Liu, Kan Ueji, Kazuhiro Yanagi: Synthesis of Janus transition metal dichalcogenide nanotubes

Akane Ihara, Mai Nagano, Yohei Yomogida, Hiroshi Nakajo, Soma Aoki, Toshiaki Kato, Kazunari Matsuda, Keisuke Shinokita, Zheng Liu, Kan Ueji, Kazuhiro Yanagi: Control of high-harmonic generation in transition metal dichalcogenide by carrier injection

Shojiro Asatori, Rikuto Abe, Kan Ueji, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric properties of aligned single-walled carbon nanotubes thin film

Y. Yomogida, F. L. Sebastian, Y. Hosokawa, N. F. Zorn, S. Wieland, K. Yanagi, J. Zaumseil: Circularly polarized near-infrared photo- and electroluminescence from enantiopure single-chirality single-wall carbon nanotubes

K. Ueji, K. Zhou, S. Nakamura, H. Nishidome, T. Yagi, Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: THERMAL AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY THROUGH ULTRATHIN FILMS MADE FROM DRY-TRANSFERRED TRANSITION METAL DICHALCOGENID

● PIRE-JUNCTION workshop 2023年7月25日（ライス大学，ヒューストン，米国）

Kazuhiro Yanagi: Thermoelectrics at controlled nanotube and 2D interfaces

● APS March Meeting 2024　2024年3月4日–8日（Minneapolis, America）

K. Ueji, K. Zhou, T. Shiga, S. Nakamura, H. Nishidome, T. Yagi, Y. Yomogida, T. Yamamoto, Y. Miyata, K. Yanagi: Correlation between Heat Flow and Electrical Current across Four-layered MoS2

ナノ物性研究室

1．研究活動の概要

数原子幅の厚さを持つシート，ワイヤー，チューブ構造を持つナノ物質では，バルク物質では見られない興味深い性質が現れる．本グループでは，遷移金属カルコゲナイド（TMC）を中心とするナノ構造物質系において，試料作製と物性実験に関する研究を進めている．2023 年度の主な研究・教育活動の概要は以下のとおりである．

1）二次元ヘテロ構造の合成と物性解明

二次元物質のヘテロ構造は，異なる層の複合化による物性制御や光・電子デバイス応用が期待されている．本グループでは，遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）の化学気相成長や転写，そして作製したヘテロ構造の光・電子物性について研究を進めてきた．今年度は，異種元素をドープした TMD の電子輸送特性（奥川卒業論文），導電性原子間力顕微鏡を利用した TMD における不純物元素の評価（澤井卒業論文），セレン系 TMD 結晶を利用したにテルル化タングステンの成長と接合界面の構造解析（曽根崎卒業論文），ドライ転写法を利用した TMD 積層ヘテロ構造の作製と励起子光物性（牧野修士論文）などについて研究を進めた．特に，TMD の欠陥評価・制御，また転写法によるヘテロ構造形成に関する成長技術が進展した．引き続き試料の高品質化を通じ，二次元ヘテロ構造に特有な物性探索を進めていく．

2）ナノワイヤー・ナノチューブの合成と物性解明

遷移金属カルコゲナイドのナノワイヤーやナノチューブは，その特異な結晶構造に由来する物性が注目を集めている．一方で，その良質な試料の作製技術が課題となっている．今年度は，窒化ホウ素（BN）ナノチューブをテンプレートとした TMD ナノチューブの合成と構造解析（古澤修士論文）を進めた．特に，TMD の気相成長技術を適用することで，様々な組成の TMD ナノチューブの合成に成功した．また，電子顕微鏡観察により直径やカイラル構造の解析を進め，様々なカイラル構造を持つ TMD ナノチューブがランダムに形成することを明らかにした．

2．研究業績

1）論文

W. Zhang, Z. Liu, H. Nakajo, S. Aoki, H. Wang, Y. Wang, Y. Gao, M. Maruyama, T. Kawakami, Y. Makino, M. Kaneda, T. Chen, K. Aso, T. Ogawa, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, M. Koshino, S. Okada, K. Matsuda, T. Kato, Y. Miyata: "Chemically Tailored Semiconductor Moiré Superlattices of Janus Heterobilayers", *small structures*, (2024) in press

A. Kumatani, H. Ogawa, T. Endo, J. Lustikova, H. Ida, Y. Takahashi, Y. Miyata, Y. Ikuhara, H. Shiku, Y. Wakayama: "Emergence of electrochemical catalytic activity via an electrochemical-probe on defective transition metal dichalcogenide nanosheets", *APL Energy*, **2** (2024) 016107

T. Fukui, T. Nishimura, Y. Miyata, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio: "Single-Gate MoS_2 Tunnel FET with a Thickness-Modulated Homojunction", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16** (2024) 8993-9001

M. Kaneda, W. Zhang, Z. Liu, Y. Gao, M. Maruyama, Y. Nakanishi, H. Nakajo, S. Aoki, K. Honda, T. Ogawa, K. Hashimoto, T. Endo, K. Aso, T. Chen, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, Y. Takahashi, S. Okada, T. Kato, Y. Miyata: "Nanoscrolls of Janus Monolayer Transition Metal Dichalcogenides", *ACS Nano*, **18** (2024) 2772-2781

M. Okada, Y. Okigawa, T. Fujii, T. Endo, W. H. Chang, N. Okada, T. Irisawa, Y. Miyata, T. Shimizu, T. Kubo, T. Yamada: "Characterization of band alignment at a metal–MoS_2 interface by Kelvin probe force microscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63** (2023) 01SP15

K. Nagai, K. Uchida, S. Kusaba, T. Endo, Y. Miyata, K. Tanaka: "Effect of incoherent electron-hole pairs on high harmonic generation in an atomically thin semiconductor", *Phys. Rev. Res.*, **5** (2023) 043130

Y. Yomogida, M. Nagano, Z. Liu, K. Ueji, M. A. Rahman, A. Ahad, A. Ihara, H. Nishidome, T. Yagi, Y. Nakanishi, Y. Miyata, K. Yanagi: "Semiconducting Transition Metal Dichalcogenide Heteronanotubes with Controlled Outer-Wall Structures", *Nano Lett.*, **23** (2023) 10103-10109

M Shimasaki, T. Endo, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, T. Nishihara, Y. Miyata, Y. Miyauchi: "Exciton energy transfer under low temperature in a lateral heteromonolayer of WSe_2–$MoSe_2$", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62** (2023) 112002

M. A. Rahman, Y. Yomogida, A. Ahad, K. Ueji, M. Nagano, A. Ihara, H. Nishidome, M. Omoto, S. Saito, Y. Miyata, Y. Gao, S. Okada, K. Yanagi: "Synthesis and optical properties of WS_2 nanotubes with relatively small diameters", *Sci. Rep.*, **13** (2023) 16959

Y. Nakanishi, S. Furusawa, Y. Sato, T. Tanaka, Y. Yomogida, K. Yanagi, W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, T. Kato, K. Suenaga, Y. Miyata: "Structural Diversity of Single-Walled Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes Grown via Template Reaction", *Adv. Mater.*, **35** (2023) 2306631

W. Peeters, S. Toyouchi, Y. Fujita, M. Wolf, B. Fortuni, E. Fron, T. Inose, J. Hofkens, T. Endo, Y. Miyata, H. Uji-i: "Remote Excitation of Tip-Enhanced Photoluminescence with a Parallel AgNW Coupler", *ACS Omega*, **8** (2023) 38386-38393

H. Naito, Y. Makino, W. Zhang, T. Ogawa, T. Endo, T. Sannomiya, M. Kaneda, K. Hashimoto, H. E. Lim, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Y. Miyata: "High-throughput dry transfer and excitonic properties of twisted bilayers based on CVD-grown transition metal dichalcogenides", *Nanoscale Adv.*, **5** (2023) 5115-5121

A. Kumatani, H. Ogawa, T. Endo, Y. Kobayashi, J. Lustikova, H. Ida, Y. Takahashi, T. Matsue, Y. Miyata, H. Shiku: "Electrochemical imaging correlated to hydrogen evolution reaction on transition metal dichalcogenide, WS_2", *J. Vac. Sci. Technol. B*, **41** (2023) 052401

H. Suzuki, M. Kishibuchi, M. Misawa, K. Shimogami, S. Ochiai, T. Kokura, Y. Liu, R. Hashimoto, Z. Liu, K. Tsuruta, Y. Miyata, Y. Hayashi: "Self-Limiting Growth of Monolayer Tungsten Disulfide Nanoribbons on Tungsten Oxide Nanowires", *ACS Nano*, **17** (2023) 9455-9467

2）著書

中西勇介: ”多様な無機ナノチューブの単層合成〜ナノ試験管をテンプレートとして活用する〜”, 「化学」79 巻 2 号 p.37-41 (2023)

中西勇介, リムホンエン, 宮田耕充: ”1 次元遷移金属カルコゲナイド細線の気相成長”, 「応用物理」92 巻 5 号 p.292-296 (2023)

宮田耕充，吾郷浩樹，松田一成，長汐晃輔: ”遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向”, (2023)

3）学会講演

● 学術変革領域研究（A）「２．５次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」第５回 領域会議 2023 年 7 月 2–3 日（大阪大学）

金田賢彦: ヤヌス遷移金属カルコゲナイドスクロールの作製と評価

Wenjin Zhang: Chemically-tailored semiconductor moiré superlattices of Janus heterobilayers

● 2023 年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会 2023 年 7 月 29 日（島根大学）

石村拳太郎，鈴木弘朗，宮田耕充，林靖彦: 単層二セレン化モリブデンの金属塩を用いた化学気相成長法による成長形態制御

● 第 65 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2023 年 9 月 4–6 日（九州大学）

H. Suzuki, M. Misawa, Z. Liu, K. Tsuruta, Y. Miyata, Y. Hayashi: Growth of monolayer WS_2 nanoribbons on W_xO_y nanowires

S. Furusawa, R. Senga, Y. Sato, Z. Liu, K. Suenaga, Y. Miyata, Y. Nakanishi: Anomaly in chirality distribution of ultrafine MoS_2 nanotubes confined in boron-nitride nanotubes

H. Ou, K. Oi, R. Usami, T. Endo, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu: Strain Modulation to Moiré Superlattices in Two-Dimensional Material van der Waals Heterostructures

R. Natsui, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Anisotropic optical properties of W6Te6 and In-intercalated W6Te6 bundles

T. Tanaka, Y. Sato, K. Suenaga, Y. Miyata, Y. Nakanishi: Morphology and Raman response of few-nm-wide MoS_2 nanoribbons encapsulated in boron-nitride nanotubes

M. Kaneda, W. Zhang, Z. Liu, Y. Gao, M. Maruyama, Y. Nakanishi, H. Nakajo, S. Aoki, K. Honda, T. Ogawa, K. Hashimoto, T. Endo, K. Aso, T. Chen, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, Y. Takahashi, S. Okada, T. Kato, Y. Miyata: Fabrication and characterization of Janus MoSSe nanoscrolls

S. Toida, S. Yamaguchi, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio, Y. Miyata: Transport properties of vertical and in-plane $Nb_xMo_{1-x}S_2/MoS_2$ heterostructures

Y. Sonezaki, Y. Nakanishi, Y. Miyata: Lateral growth of metallic WTe_2 from edges of multilayer transition metal dichalcogenides

T. Ogawa, W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Kato, Y. Miyata: High-quality Janus MoSSe monolayers prepared on hBN

M. Okada, Y. Okigawa, T. Fujii, T. Endo, W. H. Chang, N. Okada, T. Irisawa, Y. Miyata, T. Shimizu, T. Kubo, T. Yamada: Observation of Fermi-Level Pinning at the Metal–MoS_2 Interface via Kelvin Probe Force Microscopy

● 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 2023 年 9 月 19–23 日（熊本城ホール）

遠藤尚彦，小川朋也，橋本和樹，渡邊賢司，谷口尚，中西勇介，宮田耕充: 熱処理による単層 Janus MoSSe の作製と評価

鈴木弘朗，宮田耕充，林靖彦: 酸化タングステンナノワイヤ上に成長した単層二硫化タングステンナノリボンの光学特性

金田賢彦，張文金，劉崢，高燕林，丸山実那，中西勇介，中條博史，青木颯馬，本田航大，小川朋也，橋本和樹，遠藤尚彦，麻生浩平，陳桐民，大島義文，高村由起子，高橋康史，岡田晋，加藤俊顕，宮田耕充: ヤヌス MoSSe ナノスクロールの作製と評価

中島隆一，西村知紀，金橋魁利，上野啓司，宮田耕充，長汐晃輔: 表面偏析による積層構造制御を利用した WSe_2 FET の p 型動作

張文馨，畑山祥吾，齊藤雄太，岡田直也，遠藤尚彦，宮田耕充，入沢寿史: Sb2Te3 層状膜による MoS_2 上低抵抗コンタクトの実現

宇佐美怜，遠藤尚彦，宮田耕充，蒲江，竹延大志: ファンデルワールスヘテロ構造への電気二重層キャリアドーピング

上治寛，チョウカイヤオ，中村颯太，齋藤滋輝，西留比呂幸，八木貴志，蓬田陽平，宮田耕充，柳和宏: 人工積層した MoS_2 薄膜の面直方向電荷輸送・熱輸送のアニーリング効果

蓬田陽平，Md. A. Rahman，伊原茜，西留比呂幸，大元幹人，上治寛，Y. Gao，岡田晋，宮田耕充，柳和宏: 小直径遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブの合成と光学特性

堀幸妃，岡田直也，張文馨，入沢寿史，田母神唯，夏井隆佑，遠藤尚彦，宮田耕充，小椋厚志: 硫化水素アニールによる MoS_2 トランジスタの駆動電流向上

● 第 13 回 CSJ 化学フェスタ 2023 2023 年 10 月 17–19 日（タワーホール船堀）

古澤慎平，千賀亮典，佐藤雄太，劉崢，末永和知，宮田耕充，中西勇介: 絶縁性テンプレートを用いた遷移金属カルコゲナイド単層ナノチューブの合成と構造解析

● 化学工学会 CVD 反応分科会 第 39 回シンポジウム「二次元材料の合成と応用の最新動向と展望」2023 年 11 月 14 日（早稲田大学）

宮田耕充: 遷移金属ダイカルコゲナイドの合成と機能（招待講演）

● 九州工業大学機械知能工学科セミナー 2023 年 11 月 14–15 日（九州工業大学）

中西勇介: 絶縁体テンプレートを活用した一次元物質の合成・物性研究（招待講演）

● 学術変革領域研究（A）「２．５次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」第６回 領域会議 2023 年 12 月 26–27 日（名古屋大学）

小川朋也: hBN 基板上での単層 Janus MoSSe の高品質合成

戸井田尚大: hBN 基板上の多層 $Nb_xMo_{1-x}S_2/MoS_2$ の電子輸送特性

● 応用物理学会応用電子物性分科会主催 応用電子物性分科会 研究例会　２次元層状物質研究の最前線 2024 年 2 月 22 日（オンライン）

宮田耕充: 遷移金属ダイカルコゲナイドヘテロ構造の作製と評価（招待講演）

● 第 66 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2024 年 3 月 6–8 日（名古屋大学）

A. Ahad, M. A. Rahman, Y. Yomogida, K. Ueji, A. Ihara, Y. Miyata, Y. Hirose, K. Yanagi: Synthesis of Arrayed Tungsten Oxides Nanowires and Their Conversion into Nanotubes

T. Endo, H. Shimizu, S. Toida, W. Zhang, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Miyata: Carrier transport properties of few layer WSe_2 grown on hBN

S. Nakamura, K. Zhou, K. Ueji, S. Asatori, H. Nishidome, T. Shiga, T. Yamamoto, T. Endo, Y. Yomogida, Y. Miyata, T. Yagi, K. Yanagi: Correlation between the cross-plane thermal and electrical conductance in randomly stacked MoS_2 homo-structure

T. Ogawa, W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Kato, Y. Miyata: Synthesis and optical properties of high-quality Janus WSSe monolayers on hBN

M. Omoto, K. Uchida, H. Nishidome, K. Ueji, Y. Yomogida, T. Endo, Y. Miyata, Y. Murakami, K. Tanaka, K. Yanagi: Influence of Carrier injection on high harmonic generation in monolayer MoS_2 and $MoSe_2$

● 日本化学会 第 104 春季年会 2024 年 3 月 18–21 日（日本大学）

Y. Nakanishi: Structural diversity of single-walled chalcogenide nanotubes grown via template reaction

● 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 2024 年 3 月 22–25 日（東京都市大学）

岡田光博，沖川侑揮，遠藤尚彦，張文馨，岡田直也，宮田耕充，久保利隆，入沢寿史，山田貴壽: ケルビンプローブフォース顕微鏡による金属-二次元材料コンタクト界面の評価

四谷祥太郎，丸山実那，岡田晋，遠藤尚彦，宮田耕充，陳麗米，大島義文，桐谷乃輔: 自発形成する液滴の凝集運動による折り畳み捻り 2 層 MoS_2 の形成

張文馨，畑山祥吾，齊藤雄太，岡田直也，遠藤尚彦，宮田耕充，入沢寿史: Bi2Te3 層状膜による単層 WSe_2 pMOSFET の性能向上

大元幹人，内田健人，西留比呂幸，上治寛，蓬田陽平，遠藤尚彦，宮田耕充，村上雄太，田中耕一郎，柳和宏: 単層 MoS2，MoSe2 の高次高調波発生のキャリア注入依存性

中山航陽，戸井田尚大，遠藤尚彦，稲田貢，佐藤伸吾，谷口尚，渡邊賢司，宮田耕充，松田一成，山本真人: 金属－絶縁体相転移材料を用いた MoS_2 の局所発光強度変調

国際会議

● 6th EU – Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (2023) 2023年5月25日（Tokyo University, Japan）

Y. Miyata: 1D nanostructures based on transition metal chalcogenides (Invited)

● NT23 2023年6月4–9日 (Arcachon, France)

Y. Miyata: 1D Transition Metal Chalcogenides: Growth, Structures, and Properties (Invited)

Yusuke Nakanishi: One-dimensional van der Waals Heterostructure: Single-Walled Nanotubes of Transition Metal Dichalcogenides Isolated by Boron-Nitride Nanotubes

● EM-NANO2023 2023年6月5–8日 (Ishikawa Industrial Promotion Center, Japan)

M. Okada, Y. Okigawa, T. Endo, W. H. Chang, N. Okada, T. Irisawa, Y. Miyata, T. Shimizu, T. Kubo, T. Yamada: Kelvin probe force microscopy studies on the layer-number-dependence of work function modulation behavior at metal-MoS_2 interface

● 2DTMDCs2023 2023年6月26–29日 (University of Cambridge, UK)

Y. Miyata: 1D nanostructures based on transition metal chalcogenides (Invited)

● More-TEM Project Meeting 2023年7月19–20日（Osaka University, Japan）

Yusuke Nakanishi: Coaxial Nanotubes: Single-Walled TMD Nanotubes Isolated by Template Nanotubes (Invited)

● JKMST2023 2023年8月22–25日（Kochi University of Technology, Japan）

M. Yamanaka, A. Yamashita, D. Oka, Y. Hirose, T. Maeda, A. Shimamura, Y. Nakanishi, Y. Miyata, Y. Mizuguchi: Pinning mechanism of High-entropy-type $REBa_2Cu_3O_7 - \delta$ thin films

● 13th A3 Symposium on Emerging Materials 2023年10月29–11月2日（Korea University, Seoul）

Y. Miyata: Low-dimensional nanostructures of Janus transition metal dichalcogenides (Invited)

S. Toida, S. Yamaguchi, R. Okukawa, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio, Y. Miyata: Fabrication and transport properties of vertical and in-plane $Nb_xMo_{1-x}S_2/MoS_2$ heterostructures

T. Ogawa, W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Kato, Y. Miyata: Synthesis of high-quality monolayer Janus MoSSe on hBN substrates

● 2023 MRS Fall Meeting 2023年11月26–12月1日（Boston, Massachusetts）

W. H. Chang, S. Hatayama, Y. Saito, N. Okada, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa: Significant Device Performance Enhancement of 1L MoS_2 nMOSFETs by van der Waals contact formation with Sb2Te3

● Mini-Workshop at NTNU-Physics 2023年12月4日（National Taiwan Normal University, Taiwan）

Y. Miyata: Growth and Characterization of 1D Transition Metal Chalcogenides (Invited)

● JAIST International symposium on Nano-Materials for Novel Devices 2024年1月11–12日(Kanazawa Chamber of Commerce and Industry Hall)

T. Ogawa: Synthesis and optical properties of high-quality monolayer Janus MoSSe on hBN substrates

● International Workshop on Science of 2.5 Dimensional Materials 2024 年 1 月 16 日（Kyusyu University, Japan）

Y. Miyata: Low-dimensional nanostructures of Janus TMDs (Invited)

● International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials 2024 2024 年 3 月 9–15 日（Kirchberg in Tirol, Austria）

Y. Miyata: Growth and Characterization of 1D Transition Metal Chalcogenides (Invited)

編集後記

2023 年度は，研究活動における国際交流の回復が最も印象深い．新型コロナウィルス感染症の影響より，2022 年度までは様々な事情で渡航をためらう人も多かったのではないかと思われる．国際交流については完全に停滞していた期間だった．2023 年度は入国に関する制限がようやく無くなり，コロナ以前の状況と同じように活動できたと感じる．個人的にも海外の知人と数年振りの再開や新しい国際共同研究の開始など，多くの進展があった一年であった．若い人が以前のように国際経験を積めることは本当に重要であり，この状況は大変に喜ばしい．一方で別の問題として，円安および海外の物価の向上の影響が徐々に強くなっていることを実感する．海外出張における航空券や現地の物価・宿泊費の価格，国際会議の参加費，論文の掲載料，そして特に国外で製造する実験装置の価格は毎年の様に値上がりしてきた．同時に，国外では高価な装置を次々に導入するなど，研究活動が経済状況に大きく影響されることを体感している．とはいえ長い目でみて足元の教育/研究活動をより良いものにできるよう，日々精進していきたい．

(宮田耕充 記)

2023 年度 年次報告編集委員
角野秀一（2023 年度物理学教室主任）
宮田耕充
北澤敬章