会場 A

素粒子論領域

A-1 CP 非対称性に温度依存性を考慮したレプトジェネシス

佐賀大学理工学研究科 [A], 佐賀大学理工学部 [B] 丸山凌磨[A], 船久保公一 [B]

本研究では、初期宇宙におけるレプトン非対称性の生成を解析する。先行研究では、非平衡量子場理論の CTP 形式から運動方程式を導出し、従来のボルツマン方程式で必要となる実中間状態の差し引き（RIS）に対応する相殺が生じ、平衡状態では非対称性が生成されないことが示されている。また、ヒッグス粒子のボース統計に由来する量子統計的補正は、強い washout 領域では最終的なレプトン非対称性への影響が小さいが、弱い領域では初期条件によって無視できない大きさになることが示されている。

本研究では、有効 CP 非対称性の評価に用いられる、重ニュートリノの分布を平衡近傍の形で近似する方法に着目する。この近似を用いる代わりに、分布関数の時間発展を運動量ごとに数値計算し、平衡からのずれを直接反映した CP 非対称性を評価する。さらに、そこから生成されるレプトン非対称性を平衡近似による結果と比較し、重ニュートリノの非平衡性と初期条件が最終収量に与える影響を調べる。

A-3 Exothermic nuclear recoils from thermal quasi-pNGB dark matter

Kyushu University[A], Kanazawa ILAS[B], Kanazawa ITP[C], Kyushu RCAPP[D], Kyushu QUASR[E], Kavli IPMU[F] Sheikh Riasat[A], Toma Takashi[B,C], Tsumura Koji[A,D,E,F]

We study a two-component dark matter scenario comprising a stable pseudo-Nambu-Goldstone boson (pNGB) and its nearly degenerate long-lived quasi-pNGB partner. An approximate scalar symmetry relates their masses and suppresses the tree-level Higgs-mediated elastic scattering of the excited state through the small mass splitting. Their coupled thermal evolution yields comparable relic populations, while requiring the observed total abundance fixes the dark scalar symmetry-breaking scale and hence the dark gauge coupling. At the studied benchmark, an excited fraction of approximately one half survives under the adopted evolution assumptions. The quasi-pNGB excited state can therefore produce exothermic nuclear recoils despite a suppressed tree-level elastic signal. As an application, we examine the high-energy LUX-ZEPLIN event. For relic compatible parameters, the recoil normalization fixes the kinetic mixing, allowing this interpretation to be tested by independent mediator searches.

A-4 Taming lepton portal dark matter by a non-invertible selection rule

熊本保健科学大学 [A] 川村淳一郎[A]

本講演では、非可逆対称性を用いて、レプトンポータル暗黒物質模型におけるフレーバーの破れを制御する仕組みについて議論する。レプトンポータル暗黒物質は、直接検出実験による厳しい制限を回避し得る WIMP 暗黒物質の候補であるが、レプトンフレーバーを破る相互作用への制限が課題となる。まず、通常の可逆対称性では、PMNS 行列の大きな混合角とフレーバーを破るポータル結合の抑制を両立することが難しいことを示す。次に、Z5 対称性の Z2 ゲージ化に基づく模型を紹介し、PMNS 行列と整合的に、ポータル結合が単一のレプトンフレーバーに支配される構造を実現できることを示す。さらに、タイプ I シーソー機構を導入した場合に生じ得るフレーバー混合の影響について議論し、特に Z ボソン崩壊におけるレプトンフレーバー非普遍性を通じた実験的検証の可能性について紹介する。

A-5 粒子干渉計におけるソフト重力子の放射と Faddeev-Kurish 手法

九州大学 [A], 時空量子連携研究機構 [B] 藤井宏太[A], 松村央 [A,B]

量子力学において、粒子が異なる二つの経路を通る場合、周囲の環境に経路を識別する情報が伝わることで、量子干渉が弱まることが知られている。この現象はデコヒーレンスと呼ばれる。特に、量子電磁場や量子重力場との相互作用では、エネルギーが極めて小さい粒子（ソフト粒子）が無限個放射され得るため、通常の漸近状態を用いた計算では赤外発散が現れることがある。

先行研究 [1] では、量子電磁力学において、漸近状態に適切なソフト光子の雲を付随させる「ドレッシング」を考え、散乱振幅の赤外発散を取り除くという要請から、ドレッシングが満たすべき条件（Dress code）が導かれた。このような赤外発散の問題は量子重力においても生じることが知られており、重力におけるドレッシングについても研究が行われている [2]。

本研究では、二経路干渉系から放射されるソフト重力子に注目し、赤外発散の除去とは異なる観点から、重力における Dress code を考察する。具体的には、ソフト重力子が粒子の通った経路を識別する情報（which-path information）を保持することで生じるデコヒーレンスに着目する。二つの経路から生じる重力子の放射状態をエネルギーについて低エネルギー展開し、leading、subleading、subsubleading の各成分について、残余放射が経路情報を運ばないことを要請する。この要請から、それぞれの次数に対するドレッシング条件を導く。これにより、赤外発散の除去を目的として議論されてきた Dress code を、経路情報とデコヒーレンスという量子情報的な観点から、重力における高次の成分へと拡張する。

参考文献

[1] H. Hirai and S. Sugishita, “ Dress code for infrared safe scattering in QED, ” Prog. Theor. Exp. Phys. 2023, 053B04 (2023).

[2] J. Ware, R. Saotome and R. Akhoury, “ Construction of an asymptotic S matrix for perturbative quantum gravity, ” JHEP 10 (2013) 159.

A-7 6 次元 $su(n)$ ゲージ理論における非平坦背景を要求する orbifold 境界条件

九大理 [A], 九大基幹 [B] 牛島紬裕[A], 小島健太郎 [B]

余剰次元上のゲージ場の境界条件は、4 次元で残るゲージ対称性や許される真空構造を制約する。本研究では、orbifold コンパクト化を仮定した 6 次元時空 $M^4 \times T^2/\mathrm{Z}_3$ 上で、局所ゲージ代数を $su(n)$ とする純 Yang Mills 理論を考え、’ t Hooft の twisted boundary conditions（TBC）を課す。Orbifold 上の TBC には、’ t Hooft flux に加え、回転を含む同一視の整合条件にも中心位相が現れる。これらの位相の組合せに着目し、Cartan 型の座標依存遷移関数を用いて整合的な TBC を分類する。その一部について、平坦接続（純ゲージ）の存在を仮定すると遷移関数の整合条件に矛盾が生じることを示し、平坦接続を許さない境界条件の存在を明らかにする。

さらに、具体的な境界条件を固定した下で、一様な Cartan 磁場を持つ配位が古典エネルギーの大域最小となる例を取り上げる。その背景において低エネルギーに残るゲージ対称性や、質量スペクトルについても簡単に触れる。本講演では、$su(3)$ における一例を通じて、非平坦な古典真空の構成と 4 次元で残るゲージ対称性を議論する。

A-8 Non-Invertible Froggatt-Nielsen Symmetry

九大理 [A], 慶應大日吉物理 [B] 大塚啓[A], 横倉諒 [B]

本講演では、量子異常をもつフレーバー対称性を非可逆対称性として捉え直し、ディラック・ニュートリノ質量の起源に応用する枠組みを紹介する。具体的には、Froggatt-Nielsen（FN）対称性の Z_4 部分群と隠れた $U(1)_H$ ゲージ場との混合量子異常に着目し、位相的量子場理論を用いて、モノポールが切り離された低エネルギー極限で非可逆対称性を構成する。さらに、その紫外理論として隠れた $SU(2)_H$ ゲージ理論を考え、インスタントン効果による FN 対称性の非摂動的な破れを通じて、指数関数的に小さいニュートリノ湯川結合を生成する機構を提案する。この機構では、ニュートリノ質量の全体的な小ささをインスタントン効果が、世代間の階層を FN 電荷が担い、同じ電荷の割り当てによってクォークと荷電レプトンの湯川結合の階層も説明する。また FN 電荷と一般的な $\mathcal{O}(1)$ 係数のもとで、ニュートリノ質量の順階層が自然に得られることを示す。

A-9 8 次元非超対称ヘテロ弦の最大拡大点の分類

九大理 [A], 九大高等研究院 [B] 本田大和 [A], カイディジャスティン [A,B], 古賀勇一[B], リュウユエフェン [B]

超対称ヘテロ弦理論の T^2上のオービフォールドを考察することにより、8 次元におけるランクを保存する非超対称ヘテロ弦理論のゲージ対称性の最大拡大点を分類した。8 次元の超対称 $Narain$ 理論における最大拡大点を出発点とし、Kac の定理を用いて位数 2 の内部自己同型の候補を列挙した。そのうち、$Narain$ 格子上の整合的なシフトとして実現できるもののみを採用することで 1210 個の最大拡大点が得られた。そのうち 71 個はタキオンを含まず、さらに 25 個はタキオンもシフトセクターに由来する無質量スカラーも含まない。各最大拡大点について、ゲージ代数および低質量領域のスカラー・フェルミオンスペクトルを決定し、タキオンを含まない場合には 1 ループ宇宙項を評価した。さらに、シフトセクターに由来する無質量スカラーを含まない 25 個のケースについては、1 ループポテンシャルのヘッセ行列を計算し、精密化された $deSitter$ 沼地予想を検証した。

会場 B

理論核物理, 宇宙線・宇宙物理領域

B-1 情報幾何を利用した 2 カラー QCD の相構造研究

福岡工大情工 [A], 佐賀大理工 [B] 柏浩司[A], 大島理樹 [B], 河野宏明 [B]

有限密度 QCD の相構造の解明は、強結合な量子多体系の理解において重要な課題である。本研究では、符号問題の存在しない 2 フレーバー 2 カラー QCD を対象とし、その有効模型である Nambu −-Jona-Lasinio 模型の平均場近似の下で、熱的混合状態に対する情報幾何学的解析を行った。

具体的には、Nambu − Gor'kov 密度行列の Bogoliubov − de Gennes 表現から Bures 計量および Quantum Fisher Information (QFI) を構成し、温度・化学ポテンシャル空間上でその幾何学的性質を調べた。その結果、QFI および計量体積密度はカラー超伝導相境界近傍で顕著な増大を示し、熱状態間の識別可能性が大きく変化することが分かった。一方、カイラルクロスオーバーでは比較的弱い応答しか現れず、BEC-BCS クロスオーバーに対応する明瞭な特徴は見られなかった。以上の結果は、情報幾何に基づく量子状態の識別可能性が、従来の秩序変数とは異なる観点から高密度 QCD 物質の相構造を特徴付ける指標となりうる可能性を示している。

B-2 QCD 物質における有効自由度の非減少性

佐賀大理工 [A], 福工大 [B] 河野宏明[A], 大島理樹 [A], 柏浩司 [B]

格子 QCD 計算によって、零化学ポテンシャルの場合は、温度の上昇に伴って、QCD 物質は**ハドロン**から**クォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）**へ連続的に**クロスオーバー転移**することが明らかになった。しかし、この転移現象の物理的な描像は必ずしも明確でない。低温では、格子 QCD で得られた状態方程式 (EOS) は、**ハドロン共鳴ガス（HRG）模型**によりうまく説明できる。しかし、高温になると、EOS に寄与するハドロン共鳴の種類が急速に増加し、EOS は発散傾向を示す。一方、格子 QCD では、高温で理想 QGP の結果を超える事はない。この事は、HRG の有効自由度は、高温において何らかの理由で抑制される必要がある事を意味する。 2 次元の**共形場理論**においては、系のスケールが大きくなると、系の有効自由度が小さくなる事が示されている（**c 定理** [1]）。この事から、逆に、温度や化学ポテンシャルが増加したとき、系の有効自由度が減少することはないと推測される [2]。この研究では、HRG 模型等の現象論模型を用いて、QCD 物質において、系の有効自由度が上記の予測に合うかどうかを調べ、そこから逆に現象論模型の適用限界を探る [3]。

参考文献

[1] A. B. Zamolodchikov, JETP Lett. **43**, 730 (1986).
[2] R. Oshima, H. Kouno, M. Tachibana and K. Kashiwa, Phys. Rev. D **113**, 094023 (2026), arXiv:2601.16762.
[3] H. Kouno, R. Oshima and K. Kashiwa, arXiv:2603.02085.

B-3 Nonequilibrium Andreev transport at the QGP-2SC interface

佐賀大 [A], 香港大 [B], Jagiellonian 大 [C], 東京大 [D], 佐賀大 [E] 星野帆香[A], Tingyu Zhang[B], Mariusz Sadzikowski[C], 田島裕之 [D], 橘基 [E]

巨大な中性子星の内部には、通常相の QGP とカラー超伝導相の 2SC という、異なるクォーク物質が隣り合う「境界」が存在すると考えられる。本発表ではこの境界における物質の移動（輸送現象）に着目し、クォークが反射してホールに変わる「アンドレーエフ反射」等の現象を議論した。従来の BdG 法とは異なり、非平衡グリーン関数を用いた相対論的定式化を行い、エネルギー差や運動量によって電流がどのように変化するかを解明した。本発表は、香港大の Tingyu Zhang 氏、Jagiellonian 大の Mariusz Sadzikowski 氏、東京大の田島裕之氏、佐賀大の橘基氏との共同研究（arXiv:2606.30521[nucl-th]）に基づく。

B-4 パルス駆動オプトメカ系における古典時間結晶の振幅・位相ダイナミクス

九大理 [A] 原口慶久[A], 福澄諒太郎 [A], 山本一博 [A]

通常の空間的な結晶の類推として、周期的な構造を持ち、時間の並進対称性を破る状態として時間結晶が研究されている。これは、応答周期が駆動周期の整数倍となること（サブハーモニック性）や、摂動に対する安定性などにより特徴付けられる非平衡系であり、新物質相の開拓や量子センサへの応用などでも注目されている。　時間結晶は非平衡な量子多体系において提案されたが、その特徴を古典的に再現する研究も行われている。一つの実現方法として、ばね定数の周期的な変化により振動が成長しサブハーモニック性を持つパラメトリック発振がある。ここに非線形項の効果が加わることで、振幅の成長が飽和し安定な周期軌道が生じる。これをここでは古典時間結晶と呼ぶ。　本発表では、光学機械振動子系（オプトメカ系）を念頭に、周期的な短パルス駆動を受ける非線形振動子の運動方程式から出発し、古典時間結晶状態のダイナミクスと安定性を議論する。解析では、緩変化振幅近似と定数変化法を用いて、周期平均から振幅と位相の時間発展方程式を導出し、連続的な正弦波駆動との違いを明らかにする。特にパルス駆動では、時間平均による共振周波数のシフトに加え、パルス時刻の位相に依存した非線形結合が現れ、振幅と位相の定常点として飽和振幅が決定される。　さらに定常状態の周りで安定性解析を行う。系の状態は駆動の強さ、パルス時間、離調の条件により、有限振幅の定常状態と静止状態が共存する双安定性を示し、初期振幅と不安定解の大小関係から収束先を議論できる。これよりパルス駆動において安定なサブハーモニック軌道が維持されるパラメータ領域や系の量子的な取り扱いなど、今後の展望も議論する。

B-5 深層学習を用いた超新星ニュートリノシミュレー ションデータからの中性子星質量の推定

九大理 [A], 茨城高専 [B], 九大基幹 [C] 日隈祥吾[A], 原田了 [B], 中里健一郎 [C]

重力崩壊型超新星は、太陽の約 8 倍以上の質量をもつ大質量星が進化の最終段階で重力崩壊を起こすことによって発生する爆発現象であり、その中心には中性子星またはブラックホールが残される。この過程で放出される超新星ニュートリノの観測データには、超新星爆発のメカニズムや親星の構造、形成される中性子星などの情報が反映されると考えられる。数値シミュレーションでは、超新星モデルの違いに応じて中心天体への物質降着量が変化し、その結果として爆発後に残される中性子星質量に差異が生じることが示されている [1]。したがって、超新星ニュートリノ観測で得られるデータから中性子星の質量を推定できれば、超新星爆発のメカニズムや親星の構造を理解するための重要な手がかりとなる。Nakazato et al. (2013) [1] では、21 種類の超新星モデルについて、放出されるニュートリノのスペクトルが公開されている。これらのモデルは、親星の初期質量、金属量、衝撃波復活時間の組み合わせが互いに異なる。また、それぞれのモデルについて、形成される中性子星の質量と、重力崩壊開始時からコアバウンス後約 20 秒までの各時刻における、ニュートリノのフレーバーごとの粒子数スペクトルと光度スペクトルが求められている。本研究では、Nakazato et al. (2013) の超新星ニュートリノデータに基づき、深層学習により超新星モデルの分類器と中性子星質量の推定器を構成する。そのために、まず 21 種類の超新星モデルと 2 種類のニュートリノ質量階層を組み合わせた計 42 モデルについて、スーパーカミオカンデで期待される逆 β 崩壊、電子散乱、酸素原子核反応による模擬観測データを作成する。そして、各イベントの観測時刻、電子・陽電子のエネルギーおよび飛行方向を入力とする深層学習モデルを訓練し、計 42 モデルの分類と、中性子星質量の推定を行う。さらに、入力に用いる情報を変えたときの分類・推定精度の変化を調べ、超新星モデルの分類および中性子星質量の推定において、観測データ中のどの情報が重要であるかを検討する。

B-6 超新星背景ニュートリノ観測における理論モデル識別能力と観測条件依存性の評価

九州大学大学院 理学府 [A], 東北大学 理学研究科 [B], 九州大学 基幹教育院 [C] 高橋周大[A], 芦田洋輔 [B], 中里健一郎 [C]

太陽質量の約 8 – 10 倍以上の恒星は重力崩壊を起こし、重力崩壊型超新星としてニュートリノを放出する。過去に起こった超新星から放出されたニュートリノは超新星背景ニュートリノ（Diffuse Supernova Neutrino Background; DSNB）として観測できると考えられている。2026 年 6 月には、スーパーカミオカンデによる探索で 2.6 σ の DSNB の兆候が報告され、DSNB の発見への期待が高まっている。これまで観測データ解析によってフラックス上限を導出し、理論モデルに制限を与える研究が進められており、DSNB の観測・解析により宇宙における星形成の歴史や、ブラックホール形成を含む重力崩壊現象の多様性などの解明が期待されている。一方で、現実的な観測期間とバックグラウンド事象を考慮した条件のもとで、異なる理論モデルが予測するエネルギースペクトルをどの程度識別できるかは、十分に明らかになっていない。そこで本研究では、DSNB 理論モデルから予想されるニュートリノ信号に対し、水チェレンコフ型検出器および液体シンチレータ型検出器の両方を想定し、各検出器で観測されると期待されるエネルギースペクトルをシミュレーションにより構築する。さらに、現実的なバックグラウンド事象まで考慮したモンテカルロ計算を行い、unbinned maximum likelihood 解析を用いて各モデルの尤度を比較することで、異なる理論モデルの識別可能性を評価する。

B-7 暗黒時代 21cm 線で探る微細構造定数

日大文理 [A], 名古屋大学 [B], 佐賀大学 [C] 岡松郁弥[A], 吉浦伸太郎 [B], 高橋智 [C]

月面や月の周回軌道を用いた、暗黒時代の 21cm 線を観測する計画が国内外で進められている。中性水素の超微細分裂に由来する 21cm 線は、最初の天体が形成される以前の「宇宙の暗黒時代」を直接探ることのできる数少ない観測手段の一つであり、天体物理学過程の影響が小さいことから、宇宙論を検証する有力な観測量として注目されている。微細構造定数は電磁相互作用の強さを特徴付ける基礎物理定数であり、その時間変化の有無を検証することは、標準理論を超える物理を探る上で重要である。これまで、ビックバン元素合成、宇宙マイクロ波背景放射、クエーサー吸収線などを用いた検証が行われてきたが、宇宙の暗黒時代における制限はほとんど得られているない。本研究では、微細構造数が暗黒時代の 21cm 線グローバルシグナルに与える影響を計算する。さらに、前景放射及び観測ノイズを考慮した模擬観測に基づき、将来の暗黒時代の 21cm 線観測によって、微細構造定数をどの程度制限できるかを評価する。

B-8 複数場ストカスティックインフレーションにおける高次キュムラントと非ガウス性

佐賀大学 [A], 佐賀大学 [B], パリ高等師範学校 [C] 大嶋悠人[A], 高橋智 [B], 渡慶次孝気 [C]

宇宙初期には、宇宙空間が指数関数的に加速膨張するインフレーションが起きたと考えられている。宇宙マイクロ波背景放射の温度非等方性や宇宙の大規模構造は、インフレーション中に生成された量子揺らぎに起源を持つ。これらの揺らぎを記述する方法の一つに、非摂動論的かつ確率的な手法であるストカスティックインフレーションがある。この枠組みでは、インフラトン場を長波長モードと短波長モードに分離し、短波長モードの効果を確率的なノイズとして取り込むことで、長波長モードの時間発展をランジュバン方程式によって記述する。

本研究では、場空間が (O(d)) 対称性を持つ複数場インフレーション模型に焦点を当て、揺らぎの影響を受けるインフレーションの継続時間（e-fold 数）の統計的性質を調べる。特に、small-noise 展開を用いて、e-fold 数の平均、分散および高次キュムラントを任意の摂動次数で系統的に計算するための漸化式を導出する。

さらに、導出した漸化式を単項式ポテンシャルをはじめとするいくつかのポテンシャルに適用し、場の数 (d) に対する統計量の依存性を調べる。また、摂動展開の高次の振る舞いや収束性を解析することで、場の数 (d) に対して理論的な制限を与えられる可能性について議論する。加えて、曲率揺らぎのパワースペクトルや非ガウス性への応用についても考察する。

B-9 アクシオン暗黒物質における非線形相互作用によるデコヒーレンス

佐賀大学 [A] 正山礼士郎[A], 高橋智 [A]

アクシオンなどの非常に軽いダークマター（DM）は、粒子としての性質だけでなく、波としての性質も持っている。このような DM は、多数の粒子が同じ量子状態を占める場合、古典的な波として近似的に記述することができる。しかし、古典的な波として説明できる性質を観測しただけでは、DM が持つ量子力学特有の性質を確認したことにはならない。そのため、DM と検出器の相互作用によって生じる現象を調べ、古典的な波では説明できない量子効果が検出可能かどうかを明らかにする必要がある。本研究では、DM と検出器の相互作用によって生じるデコヒーレンスに着目し、デコヒーレンスの効果が DM のどのような量子的／古典的性質を明らかにできるか検討する。具体的には、DM と検出器の相互作用ハミルトニアンを用いて密度行列を摂動展開し、検出器の純度の変化を計算することで、DM の量子状態が検出器に与える影響を評価する。さらにアクシオン DM に加え、非線形な相互作用 DM モデルも考え，同様の計算を行う。 これらの結果を比較することで、相互作用の形式の違いがデコヒーレンスや量子効果の現れ方にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目指す。

B-10 重力の量子性検証に向けた重力結合鏡の猫状態モデルと干渉計信号

九大理 [A], 時空量子連携研究機構 [B], 広大先進理工 [C] 村田毅明[A], 山本一博 [A,B], 松村央 [A,B], 西澤篤志 [C]

重力の量子的性質を低エネルギー実験で検証する手法として、重力相互作用による重力誘起量子もつれが注目されている。本研究では、重力相互作用する二つの量子的な鏡 A、B を考え、鏡 A に猫状態を生成する。このとき、鏡 B を光干渉計によって測定し、猫状態と対応する古典的混合状態の検出確率の差を解析する。特に、鏡の質量や固有振動数、猫状態の大きさに対する信号差の依存性を調べ、信号が顕著になる時間スケールと条件を明らかにする。また鏡 B の純度を評価することで、重力誘起量子もつれと干渉信号の関係を考察する。さらに、物質の位置の期待値を重力源とする Schr ö dinger – Newton 型半古典重力模型との比較を行い、特定の条件では古典的混合状態との信号差が消失することを示す。以上より、本模型における干渉計信号が重力の量子的性質を検証するための指標となる可能性を議論する。

B-11 系外惑星の高コントラスト撮像における画像処理手法の定量的評価

大分大学 [A] 武石琉之介[A], 小西美穂子 [A]

系外惑星の撮像では、強い恒星光に埋もれた微弱な惑星光を検出するため、観測画像の前処理と恒星光を抑制する画像処理を施す。従来、すばる望遠鏡の撮像装置 VAMPIRES では明るい恒星が観測されてきたが、本研究ではその約 100 分の 1 の明るさの恒星を対象に従来の前処理の適用性を検証した。おうし座 IQ 星の観測画像 203 枚を用い、星像の品質評価による画像選別と、画像処理に伴って発生する十字パターンの抑制を評価した。 画像選別では、全画像を使用する場合と、3 種類の星像評価指標それぞれで画像の 20、50、80 %を除外する計 10 条件を比較した。評価指標には、星像の先鋭さ、画素値の二乗和平方根による集中度、正規化分散による鮮明さを用いた。恒星の測光値を信号とする信号対雑音比で評価した結果、全画像を使用する条件が最適であった。 十字パターンとは、明るい 2 画素四方を中心として上下左右に明暗が広がる偽信号であり、画素間隔より細かい画像の位置調整に伴って発生した。抑制のため、特に画像間の位置合わせに注目し、①離散フーリエ変換による位相差、②星像の輝度重心、③最大輝度画素の位置を用いる 3 手法を評価した。十字パターンの個数、1 個あたりの広がり、中心の強度、全体強度の 4 指標を用いて、手法①と比べた改善率を求めた。その結果、画像間の位置合わせに手法③を用いた条件では個数が 81.0 以上より、本データでは全画像を用い、画像間の位置合わせは手法③を用いる条件が最適であった。今後は、従来の明るい恒星の前処理では問題にならなかった不良画素の影響を調べ、十字パターンの発生原因と抑制方法を検討する。

B-12 近赤外線偏光撮像を用いた原始惑星系円盤の非対称性解析

大分大学 [A] 坂井有希[A], 小西美穂子 [A]

原始惑星系円盤は、若い恒星の周囲に形成されるガスとダストからなる構造であり、形成された惑星と相互に作用をすることが考えられている。例えば、傾いた軌道を持つ惑星との重力相互作用によって、内側円盤が外側円盤に対して傾くことが数値シミュレーションによって示されている (Nealon et al. 2018)。この時、恒星から放射された光の一部が内側円盤に遮られ、外側円盤への光の照射が方位角によって異なるため、円盤輝度に方位角の非対称性があるように検出される。そこで本研究では、おうし座 DH 星に付随する原始惑星系円盤の方位角の輝度非対称の有無を確認し、内外円盤の傾きなどの構造を決定することで未検出の惑星の可能性を検証する。観測はヨーロッパ南天天文台の大型望遠鏡 VLT とすばる望遠鏡を用い、近赤外線の偏光撮像によって恒星光が円盤上層部のダストによって散乱された偏光強度を取得した。画像データセットに対して適切な画像処理を施した後、円盤の長軸・短軸方向の動径プロファイルを作成して半径依存性を確認することで、円盤散乱光の偏光強度の非対称の有無を調べた。その結果、VLT のデータでは有意な円盤散乱光からの非対称な偏光強度を得られたが、すばる望遠鏡のデータでは有意な非対称は得られなかった可能性が高い。この偏光強度の非対称が内側と外側円盤の異なる傾きによって生じたものかを検討するために、今後は、モンテカルロ法による輻射輸送計算を行う。内側・外側円盤の相対的な傾きや位置角、ダストの空間分布などを変え、観測された偏光強度分布を再現する円盤形状を制約する。これにより、非対称性の起源を検証するとともに、円盤内に未検出の惑星が存在する可能性について検討する。

会場 C

素粒子実験，実験核物理領域

C-1 LHC-FASER 実験での AHCAL 検出器におけるニュートリノ測定の現状と HL-LHC に向けた開発の展望

九州大学 [A], 千葉大学 [B], 名古屋大学 [C], 東京大学 [D], 新居浜高専 [E], 東北大学 [F] 田中翔琉[A], 有賀昭貴 [B], 有賀智子 [A], 稲田知大 [A], 大橋健 [B], 音野瑛俊 [A], 五島征一朗 [A], 酒井了 [A], 佐久間幹人 [C], 佐藤修 [C], 高津大誠 [D], 田窪洋介 [E], 中野敏行 [C], 丸谷晏大 [A], 毛受弘彰 [C], 六條宏紀 [A], 吉川大智 [A], 渡邉和宏 [F]

FASER 実験では、LHC の陽子衝突でビーム軸超前方方向に生成される高エネルギーニュートリノを測定している。超前方領域では、陽子内部の極小 Bjorken-x におけるグルーオンと大きな x を持つパートンとの相互作用によってチャームクォークを含んだハドロンが生成され、その崩壊により高エネルギーニュートリノが生成される。このため、チャームハドロン起源のニュートリノの測定は、極小 x 領域におけるグルーオン飽和など、核子内部構造に関わる未解明減少を調べる新たな手段として期待されている。

特に、ビーム軸からわずか数 mrad 外れたオフアクシス領域では、背景事象となる軽ハドロン起源ニュートリノに対してチャームハドロン起源ニュートリノ割合が相対的に増大する。この特徴を利用し、2026 年 1 月に高粒度ハドロンカロリメータである AHCAL 検出器を LHC のオフアクシス領域に設置し、6 月までデータ取得を行った。AHCAL は、多数のシンチレータセルと鉄吸収体の層が交互に配置され、約 3.3 トンの鉄吸収体がニュートリノの反応標的として機能し、シンチレータが反応で生じたレプトンやハドロンシャワーを検出する。

LHC は 6 月に運転を休止し、現在は高輝度化に向けた準備を進めている。それに伴い、FASER 実験においても AHCAL 検出器の改良を検討している。本講演では、6 月までに AHCAL 検出器で取得したデータの現在の解析状況、および 2030 年以降に予定される高輝度 LHC に向けた改良計画について紹介する。

C-2 ミュオグラフィに於けるエネルギー損失量を付与した計数法の改善

鹿児島工業高等専門学校 A　水野航太朗A, 津野総司 A

ミュオグラフィは、宇宙線ミュオンを利用して物体の内部構造を調べる技術である。本研究で扱う計数法では、材質が既知で一様な物体を通過したミュオンの数から、その物体の厚さを推定する。物体の厚さは、通過するミュオンの数に加え、通過後のエネルギー分布にも影響する。そこで、物体を通過したミュオンが検出器内で失うエネルギーに着目し、その情報を計数に加えることで厚さの変化をより精度よく推定できるかを検討する。純アルミニウム平板の下方に多層シンチレータを配置し、平板の厚さを変えてミュオンの通過と検出をシミュレーションする。エネルギー損失量の指標には、シンチレータ内の単位飛跡長当たりのエネルギー付与量を用いる。本発表では、観測時間をそろえ、計数のみを用いる場合と、この指標の分布を併用する場合とで、基準の厚さからの変化量の推定精度を比較する方法を述べる。

C-3 桜島火山のミュオグラフィ透視実験に於ける山体構造を用いた補正法、及び、海側のミュオン・フラックスについて

鹿児島工業高等専門学校 A　川元太智A, 坂田龍志 A, 津野総司 A

本研究では、宇宙線ミューオンを利用して火山内部の密度構造を調べるミュオグラフィ技術を用い、桜島のマグマの動きの把握や噴火予測に向けた研究を行っている。桜島には 12 セットのミューオン観測器が設置されており、これらの観測データを活用することで、火山内部の変化をより短い時間間隔で捉えることを目指している。

まず、複数の観測器のデータを統合することで、30 分単位での観測を可能にすることを目標としている。しかし、各観測器は設置角度が微妙に異なるため、観測データをそのまま統合することはできない。そこで、ミューオンの観測データから得られた桜島のプロットを用いて山の輪郭を抽出し、山頂付近に共通して見られる 3 つの特徴点を基準として、観測器間の位置のずれを補正する。その後、位置合わせを行った複数の観測データを統合し、噴火前後における火口付近のミューオン到来数の変化を解析することで、マグマの動きの把握や噴火予測への応用を目指す。

一方、ミューオンの到来数は火山内部の密度変化だけでなく、太陽活動や大気状態などの外部要因によっても変動する。そのため、これらの影響を把握することは、ミュオグラフィによる火山内部の変化を正確に評価するうえで重要である。そこで、2019 年から 2025 年までの観測データを用いて、ミューオン飛来量の長期的な時間変動を解析する。特に、太陽活動に伴う年単位の長期変動と、大気状態の季節変化に伴う年周期変動に着目し、正弦波フィッティングによって各周期成分の振幅や位相を推定する。これにより、桜島の観測データに含まれる周期的な変動の特徴を定量的に評価し、火山内部の密度変化と外部環境による変動を区別するための基礎情報を得ることを目指す。

C-4 シンチレーション・ファイバー検出器の信号到達時間を用いた位置決定精度の検証

鹿児島工業高等専門学校 [A] 伊藤槙祐[A], 津野総司 [A]

ミュオグラフィは、宇宙線ミュオンの高い透過力を利用して、火山やピラミッドなどの大型構造物の内部を非破壊で可視化する技術である。従来のミュオン検出器は、シンチレータを XY 方向に重ねた平面構造をとり、数百個のシンチレータそれぞれに光検出器と読み出しチャンネルが必要となるため、装置が高額であることが課題である。この高コストが、多地点での計測や用途の拡大を妨げている。本研究では、シンチレーション・ファイバーを円筒形筐体に巻き付け、ファイバー内を伝わる光信号の到達時間からミュオンの通過位置を推定する新型検出器を提案する。本方式では、わずか 32 本（16 本× 2 層）のファイバーで構成でき、32 チャンネル程度の商用読み出し装置を利用できるため、従来型と同等の検出性能を維持しつつ、製造コストの大幅な削減が見込める。安価で設置が容易な検出器を多地点に配置できれば、地下水構造の把握や老朽化したインフラの点検など、防災や社会基盤の維持管理への貢献が期待される。本研究では、提案する検出器の原理実証に向けた第一段階として、信号の到達時間に基づく位置決定精度を検証する。現在、ファイバー端で得られる光信号を光検出器で電気信号に変換し、FPGA ボードで読み出すシステムを構築している。本発表では、2 本のファイバーを直角に交差させ、交差位置を変えながら信号の到達時間と強度を測定し、それらが位置に応じてどのように変化するかを調べた結果を報告する。

C-5 高輝度 LHC ATLAS 実験に用いるシリコンピクセル検出器モジュールの外観検査手法および品質の評価

九大理 [A], KEK[B], お茶大理 [C] 稲田知大 [A], 生出秀行 [B], 音野瑛俊 [A], 河野能知 [C], 佐伯直哉 [A], 榊原麻希[A], 調翔平 [A], 張皓瑞 [A], 東城順治 [A], 外川学 [B], 中村浩二 [B], 花垣和則 [B], 本多玲士 [A], 山川結美 [C]

高輝度 LHC で行われる ATLAS 実験では、次世代シリコンピクセル検出器の量産が進められている。検出器モジュールの組立工程では、接着時の位置ずれや回転、接着剤のはみ出しなどが生じる可能性があり、組立後の外形を正確に把握することが重要である。本研究では、冷却系への取り付け部材を接着した後のモジュールを対象として、画像解析を用いた外観検査手法の信頼性およびモジュールの品質を評価する。特に、繰り返し測定による再現性や人依存性を調査し、測定結果のばらつきやその要因を明らかにする。さらに、得られた結果をもとに検査手法の改善を図り、測定の再現性向上および人依存性の低減を目指す。また、外観検査の結果から不良モジュールの特徴や発生傾向を評価する。これらを通じて、量産工程に適した外観検査手法の確立と品質管理の信頼性向上を目指す。

C-6 中性子電気双極子能率の精密測定のための新しい超冷中性子検出器の開発

九州大学 [A], 高エネルギー加速器研究機構 [B] 端川祥黎[A], 川崎真介 [B], 吉岡瑞樹 [A]

宇宙に物質が反物質よりも圧倒的に多く存在する理由は未だわかっておらず、素粒子物理学の未解決問題である。その解明に向け、標準模型を超える CP 対称性の破れの探索実験が進められている。その有力な手段として、中性子の電気双極子能率（EDM）の測定が進められている。TUCAN（TRIUMF Ultracold Advanced Neutron）コラボレーションでは、高強度の超冷中性子源を開発し、現在の測定感度を一桁上回る $1 \times 10^(-27) e \cdot cm$ の感度での測定を目指している。測定精度の向上のためには超冷中性子（UCN）源が安定して稼働していることが重要となる。UCN の生成数は陽子ビーム強度や冷却条件に依存するため、UCN 生成領域の近傍で生成状況を監視する検出器が求められている。現行の検出器は放射線遮蔽の外側に設置されており、詳しい生成状況を直接把握することは難しい。放射線遮蔽内では、バックグラウンドとして高速中性子や γ 線が存在すると考えられている。そのため、それらへの耐性を持つ新しい検出器が望まれている。本研究では、UCN 源の安定性を監視するモニター検出器の開発を進めている。検出方針として、薄いシリコン半導体と中性子コンバーターを組み合わせた検出方式を採用している。シリコン半導体のみでは中性子を直接検出することができないため、半導体表面に適当な厚さを持つコンバーター膜を形成し、中性子との核反応で生じる荷電粒子を検出する仕組みである。検出器作製の第一段階として、シリコン半導体を用いた荷電粒子の検出を行った。信号の読み取りに必要な増幅回路を作製し、α線源からの信号を読み出した。また、単位時間当たりの信号数の計測を行い、線源の放射能と立体角から見積もった信号数と比較した。本発表では、検出器の構成と測定セットアップ、各シリコン検出器による測定結果を報告し、今後の中性子検出に向けた展望を紹介する。

C-7 $\alpha(^{12}\mathrm{C},\alpha_2)$ 反応を用いたホイル状態対崩壊実験のバックグラウンド評価

九大理 [A] 林田昌大[A], 寺西高 [A], 橋本太一 [A], 浜村大 [A], 藤澤輝郎 [A], 矢倉美祐 [A]

天体におけるトリプルアルファ反応率の決定には $^{12}\mathrm{C}$ の第二励起状態 ($^{12}\mathrm{C}^*$; ホイル状態) の放射崩壊幅 Γ_{rad} が必要である。この Γ_{rad} は実験で直接測定することができないため、互いに独立な 3 つの実験値である放射崩壊分岐比 $\Gamma_{\mathrm{rad}}/\Gamma$、対崩壊分岐比 Γ_π/Γ、対崩壊幅 Γ_π から決定される。我々はこのうち最も精度の悪い対崩壊分岐比 Γ_π/Γ の精密測定を目指しており、実験は反応過程 $\alpha(^{12}\mathrm{C},\alpha_2)^{12}\mathrm{C}^*$; $^{12}\mathrm{C}^* \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + \mathrm{e}^+\mathrm{e}^-$ における反跳 α 粒子と、電子・陽電子対の同時測定を行う。$^{12}\mathrm{C}$ ビームとヘリウムガス標的を用いて、0 度の位置に設置された半導体検出器で反跳 α 粒子を、ヘリウムガス標的の周りに設置されたプラスチックシンチレーターで電子・陽電子対をそれぞれ検出する。

今回の実験では過去に行った検出器系のテスト実験結果を踏まえ、バックグラウンドの低減を目指して、0.2 気圧のヘリウムガス標的を Ta 膜で封入し、49.4 MeV の $^{12}\mathrm{C}$ ビームを照射した。その結果、過去の実験と比べ、バックグラウンド量を半分以下に減らすことができた。また、バックグラウンド源を特定するための追加実験を実施した。本講演では、これらの実験結果を報告し、バックグラウンドのさらなる低減に向けた今後の実験セットアップについて展望を述べる。

C-8 CsI(Tl) シンチレータ信号波形の主成分分析による低エネルギー荷電粒子識別の性能評価

九大理 [A] 浜村大[A], 寺西高 [A], 林田昌大 [A], 橋本太一 [A], 藤澤輝郎 [A], 矢倉美祐 [A]

CsI(Tl) シンチレータでは、発光の減衰時間の粒子依存性を利用した波形弁別法（PSD）が荷電粒子識別に広く用いられている。今回、多変量解析手法のひとつである主成分分析（PCA）を粒子識別に適用した。当研究室で過去に測定した、SiPM 読み出しの CsI(Tl) 検出器による陽子, 重陽子, α線, γ線の信号波形データを用い、PCA と PSD の識別性能を FoM で比較し、特に低エネルギー領域での性能を評価した。本講演では、その結果を報告し、PCA による粒子識別の利点と課題を議論する。

C-9 Xe 原子封入セルのスピン緩和時間測定装置の開発

九大理 [A], 科学大総合 [B], 科学大理 [C], 理研仁科セ [D] 武内悠仁[A], 市川雄一 [A], 清水豪太 [A], 内田遥 [A], 廣田晴音 [A], 石堂泰雅 [A], 佐藤智哉 [B], 高峰愛子 [C], 郷慎太郎 [D], 上野秀樹 [D], 旭耕一郎 [D]

永久電気双極子（EDM）は CP 対称性の破れに感度のある観測量であり、物質優勢宇宙の謎を解く鍵として注目を集めている。我々は、核スピンメーザー法という独自の手法を用いて、Xe 原子の EDM の探索を目指している。　核スピンメーザー法は、核スピンのコヒーレンスを維持する手法であり、長時間の周波数観測により、EDM によるわずかな歳差周波数の偏移をきわめて精密に測定することが可能になる。　我々の用いている能動帰還型核スピンメーザー法では、原子核の歳差運動を光学的に観測し、取得した信号の位相・振幅を元に人工的に生成したフィードバック磁場を印加することで、核スピンのコヒーレンスを維持している。　我々の EDM の測定対象は 129Xe, 131Xe であり、これらの Xe 原子ガスの他、ヘリウム、窒素がバッファガスとしてガラスセルの中に封入されている。核スピンメーザーの安定化のためには、核スピン偏極度が高く、さらに横スピン緩和時間が長いセルを制作する必要がある。　そこで、ガスセル製作系、および製作したセルの性能を評価する装置の整備を行っている製作したガスセルに対して断熱高速型核磁気共鳴（AFP-NMR）法を用い、得られた共鳴信号から、セルの縦緩和時間や核スピン偏極度を測定する。また、パルス NMR 法による横スピン緩和時間の測定を行う。　本講演では、これらのセル製作過程および性能評価の現状について報告し、今後の核スピンメーザーの開発について議論を行う。

C-10 EDM 測定のための環境磁場補正コイルの性能評価

九大理 [A], 科学大総合 [B], 科学大理 [C], 理研仁科センター [D] 清水豪太[A], 市川雄一 [A], 武内悠仁 [A], 内田遥 [A], 石堂泰雅 [A], 廣田晴音 [A], 佐藤智哉 [B], 高峰愛子 [C], 郷慎太郎 [D], 上野秀樹 [D], 旭耕一郎 [D]

永久電気双極子モーメント（EDM）は素粒子標準理論を超える CP 対称性の破れに感度のある観測量である。我々は、核スピンメーザーの手法を用いて、核スピン歳差周波数の精密測定による Xe 原子の EDM 探索を行っている。高精度な周波数測定のためには、時間的および空間的に安定した磁場環境を構築する必要がある。本研究では、実験セットアップにおける磁場環境を定量的に評価するとともに、環境磁場補正コイルによる磁場安定化性能を評価することを目的とする。核スピンメーザーの実験セットアップでは、Xe を封入しているセルが 3 重磁気シールド内に配置する。そして、磁気シールドの外側に環境磁場補正コイルがあり、内部の磁場変動を抑制するようにフィードバック電流を流すようになっている。まず、フラックスゲート磁力計を用いて実験室内の複数地点における磁場の空間成分を測定し、環境磁場の空間分布を評価した。次に、3 重磁気シールド内部の残留磁場を測定し、EDM 測定ポイント付近の磁場強度や軸方向・径方向の磁場分布、磁場勾配を調べた。また、磁気シールドの開閉による残留磁場の変化についても評価した。さらに、環境磁場補正コイルを動作させたときの磁場の時間的変動を測定し、補正コイルによる磁場安定化の効果を検証する。フィードバック制御に用いる PID パラメータを変更し、磁場変動の大きさや応答速度、長時間安定度を評価する。これらの測定結果をもとに、核スピンメーザー実験に適した磁場安定化条件について検討する。本発表では、実験室内および磁気シールド内部の磁場環境の測定結果と、環境磁場補正コイルの性能評価について報告する。

会場 D

領域 4, 6, 13

D-1 蜂の巣格子における狭義第三種ディラックコーン

熊本大学教育学部 [A], 兵庫県立大学理学研究科 [B] 岸木敬太[A], 江藤菜々美 [A], 河野美怜 [A], 長谷川泰正 [B]

グラフェン [1] や α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$[2] は, 質量ゼロのディラック電子系として知られている. 第一種, 第二種, 第三種と三種類に分類される [3,4]. 第一種ではコーンは傾いても過傾斜ではなく, フェルミエネルギーはディラック点に位置する. 第二種では過傾斜し, 電子ポケットやホールポケットが現れる. 第三種ではコーンは臨界的に傾き, 一方向の分散がディラック点近傍で局所的に平坦となる. ただし, 一般には, 線形項はゼロであるが高次項はゼロでないため, ディラック点から離れるとエネルギー分散は平坦ではない.

我々は, 線形項と高次項が消失している場合を「狭義の第三種」と定義した [5]. 狭義の第三種では, 2 つのディラック点をつなぐ分散が平坦となっており, フェルミエネルギーで状態密度が強く発散し, その結果, 電子比熱の温度依存が $T^{1/2}$ になることを明らかにした [5].

本研究では, 単軌道の蜂の巣格子において, 異方的な次近接飛び移り積分を考慮すると, コーンが第一種から狭義の第三種を経て, 第二種に連続的に変化することを示した [6]. さらに, 運動量空間において, ある方向に関して波数依存が消滅する状態（水平線）が生じ, その水平線が狭義の第三種ディラックコーンの平坦分散と一致することをみつけた, そのとき, 水平線の平坦性は強調されており, 結果として, フェルミエネルギーで状態密度が著しく増大する. このことから, 電子比熱や磁化率などに新しい特異性の出現が期待される [6].

[1] K. S. Novoselov, *et al.*, Science **306**, 666 (2004).
[2] K. Kajita, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 072002 (2014).
[3] G. E. Volovik, JETP Lett. **104**, 645 (2016).
[4] T. Mizoguchi, H. Matsuura, and M. Ogata, Phys. Rev. B **105**, 205203 (2022).
[5] K. Kishigi and Y. Hasegawa, Phys. Rev. B **106**, 085430 (2025).
[6] K. Kishigi and Y. Hasegawa, arxiv:2609.00695.

D-2 グラフェン上におけるナノフィン吸着過程の第一原理計算

福岡工大情工 [A], 福岡工大院工 [B] 篠﨑光太郎[A], 小林怜平 [B], 前田文彦 [B], 丸山勲 [B]

少数層グラフェン表面に幅一原子層のリッジ構造であるグラフェンナノフィンが形成されることが報告された [1]．この構造はフィン根元のジグザグ構造が sp3 構造を作ってグラフェンに吸着することでフィンが傾き，⅄字型の安定構造をとることが理論研究 [2] で報告されている．しかし，ナノフィンがグラフェンに吸着する過程については十分に議論されていない．そこで本研究では，いくつかのグラフェンリボンがグラフェンに吸着する過程の最小エネルギー経路を第一原理計算に基づく Nudged Elastic Band (NEB) 法を用いて計算した（図１）．まずリボン端のアームチェア構造がグラフェンに吸着する場合については，先行研究 [3] と同様のエネルギー障壁を得た（図１青）．対して，リボン端がジグザグ構造の場合はエネルギー障壁がない．中でもジグザグ構造が 3 員環を作ってグラフェンに吸着する場合（図１橙），フィンは垂直に立つがエネルギー的に不安定となる．しかしジグザグ構造が根元に sp3 構造を作ることで傾いた⅄字型構造を作る場合（図１緑），そのエネルギー利得はアームチェア構造よりも大きいことが分かる．発表では，より詳細な計算条件や各構造でのエネルギー経路や吸着過程の違いについて報告する．

参考文献 [1] F. Maeda, and H. Hibino, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, p. 06FD16, 2012. [2] 小林怜平, 篠﨑光太郎, 前田文彦, 丸山勲, 第 81 回 日本物理学会（東京）(2026). [3] T. Kawai, S. Okada, Y. Miyamoto, and A. Oshiyama, Phys. Rev. B, Vol. 72, p. 035428, 2005.

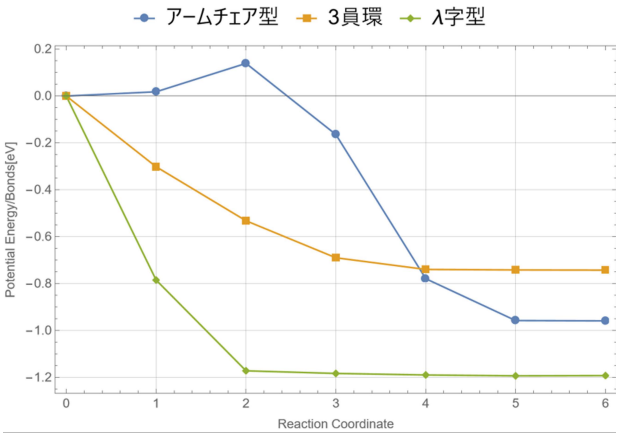


図1 最小エネルギー経路

D-3 局所陽極酸化を用いた MoS_2 ナノリボンの微細加工と低温電気伝導特性

熊大院自然 [A], 九大院総理工 [B], 九大半導体セ [C], 東北大通研 [D], 熊大院先端 [E] 曽郁珊[A], Zhang Zhanshuo[B], 山本快知 [B], Pablo Solís Fernández[B], 吾郷浩樹 [B,C], 大塚朋廣 [D], 原正大 [E]

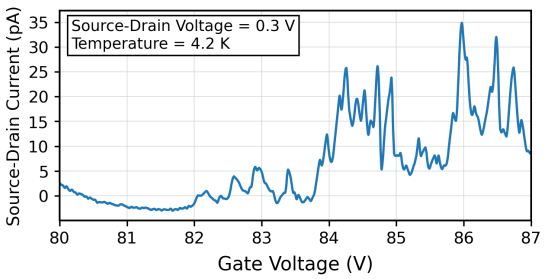
半導体量子ドットの形成には、複数のゲート電極によって電子の閉じ込めを制御する方法が広く用いられている。しかし、この手法では素子の微細化に伴い、ゲート電極の配置に制約が生じ、隣接するゲート間で静電的な干渉が生じるという問題がある。一方、原子間力顕微鏡を用いた局所陽極酸化（AFM-LAO）では、試料表面に酸化障壁を直接書き込むことで、より高い空間分解能で電子の伝導を制御できる利点がある。

本研究では、化学気相成長法（CVD）により合成された MoS_2 ナノリボン [1] を用い、AFM-LAO による人工量子ドットの形成を試みた。SiO_2/Si 基板上のナノリボンに Cr/Au 電極を形成し、Si 基板をバックゲートとする FET 構造を作製した。ナノリボン中央部に 2 本の酸化障壁を書き込み、障壁間に幅 50 nm ×長さ 150 nm の領域を形成した。その後、液体ヘリウム温度（4.2 K）で低温電気伝導測定を行った。

測定の結果、クーロン振動を示唆する電流の振動構造が観測され、その周期は約 0.115 V と見積もられた。平行平板コンデンサモデルから推定した量子ドット面積は約 11,500 nm^2 であり、加工領域の面積（約 7,500 nm^2）と概ね対応している。ただし、より正確な比較には、端効果による電気力線の広がりなどを考慮した静電容量の評価が必要である。

本研究は東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究により実施されたものである。

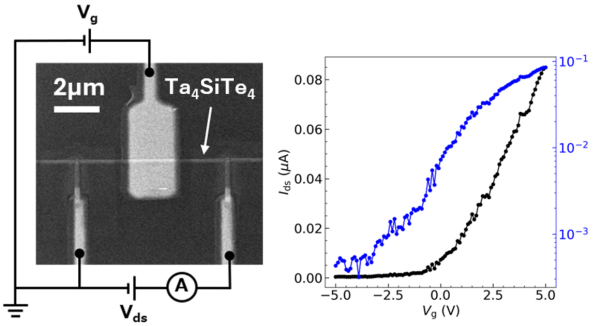
[1] Z. Ma et al., Sci. Adv. 11, eadr8046 (2025).



D-4 一次元 van der Waals 材料 Ta_4SiTe_4 における FET 特性

熊大院自然 [A], 東大物性研 [B], 原子力機構先端研 [C], 名大院工 [D], 熊大院先端 [E] 田畑歩[A,B], 一色弘成 [B,C], 曽郁珊 [A], 橋本義昭 [B], 遠藤彰 [B], 吉田研介 [B], 石井智博 [B], 松永文弥 [D], 竹中康司 [D], 井手上敏也 [B], 岡本佳比古 [B], 橋坂昌幸 [B], 原正大 [E]

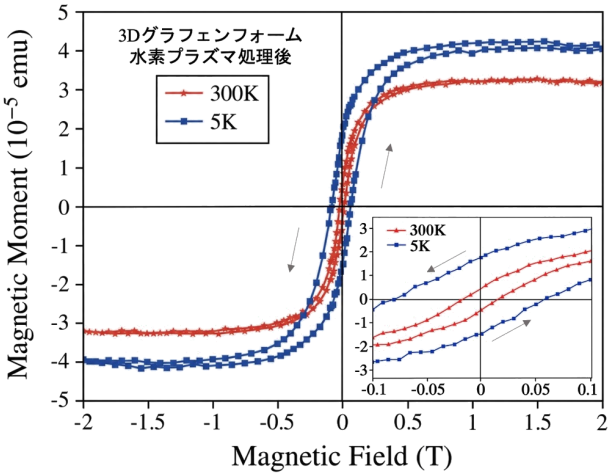
Ta_4SiTe_4は、一次元原子鎖からなる一次元ファンデルワールス物質であり、狭いエネルギーギャップと高い低温熱電性能を示す。これまでキャリア濃度は主に元素置換によって制御されてきたが、ゲート電界による電気伝導制御は十分に検証されていない。本研究では、Ta_4SiTe_4細線を用いたトップゲート型 FET を作製し、ゲート電圧による電気伝導の変調とその温度依存性を調べた。素子作製では、機械的剥離によって得られた Ta_4SiTe_4細線に、酸化抑制とゲート絶縁のため、原子層堆積（ALD）法によって Al_2O_3膜を形成した。その後、集束イオンビーム (FIB) によってコンタクト領域の保護膜および表面酸化層を局所的に除去し、Pt 蒸着によって金属電極と接続した。これにより、チャネル領域を保護しながら電気接触を確保したトップゲート型 FET を作製した。作製した素子では、正のゲート電圧によって電流が増加する n 型のゲート応答が観測され、2K の低ソース・ドレイン電圧下では、負のゲート電圧によって明瞭な OFF 状態が観測された。これらの結果は、本作製手法が Ta_4SiTe_4細線の表面保護と電気接触形成を両立した FET の作製に有効であることを示すとともに、Ta_4SiTe_4の電気伝導をゲート電界によって制御できることを実証している。



D-5 グラフェン系材料における欠陥誘起磁性の評価

熊大院自然 [A], アンリツ先端研 [B], 熊大院先端 [C] 末吉冬聖[A], 越智太亮 [B], 松井朋裕 [B], 原正大 [C]

グラフェンは炭素原子 1 層からなる材料であり、理想構造では反磁性を示す。一方、欠陥導入によってπ電子の一部が局在化し、不対電子スピンに由来する磁気モーメントが形成される「欠陥誘起磁性」が理論的に示されている [1]。実験的にも、グラファイトや還元型酸化グラフェンなどでは、欠陥導入に伴う磁性の発現が報告されている [2,3]。本研究では、水素プラズマ照射によるグラフェン系材料への欠陥の導入・制御を試み、その磁性発現を検証する。水素プラズマ処理に伴う構造・電子状態の変化により、電子の局在化と磁気モーメントの形成が期待される。酸化膜付き Si 基板上の単層 CVD グラフェンに水素プラズマを照射し、磁気応答を評価した。また、単層試料の微弱な磁気信号を評価する上での課題を踏まえ、炭素量と欠陥導入の対象となる表面積を確保するため、多孔質構造を有する 3D グラフェンフォーム [4] を採用した。単層 CVD グラフェンと 3D グラフェンフォームについて、AFM による構造評価と SQUID による磁化測定を行った。磁化測定の結果、単層 CVD グラフェンでは磁気信号が微弱であり、基板の反磁性成分や背景補正に伴う不確かさが定量評価の課題となった。一方、3D グラフェンフォームでは、反磁性の直線成分を差し引いた磁気応答が処理前後ともに高磁場領域で飽和傾向を示し、処理後には飽和磁化が増大した。さらに、温度の低下に伴って飽和磁化および残留磁化が増大する傾向が確認された。[1] O. V. Yazyev and L. Helm, Phys. Rev. B 75, 125408 (2007). [2] X. Yang et al., Carbon 47, 1399 (2009). [3] Y. Wang et al., Nano Lett. 9, 220 (2009). [4] General Graphene Corporation



D-6 トポロジカル超伝導体における磁束ポンピング

九州大学理学府 [A] 林田泰造[A], 工藤耕司 [A], 磯部大樹 [A], 野村健太郎 [A]

系のトポロジカルな性質を反映する代表的な物理現象として、二次元電子系における量子 Hall 効果が挙げられる。量子 Hall 系では、磁束を磁束量子だけ変化させて、系のハミルトニアンにゲージ変換を施すと元に戻ることから、Hall 伝導率の量子化が理解できる [1]。このように、磁束に対する系の応答は、トポロジカルな性質を調べるうえで重要である。　本研究では、量子 Hall 系における磁束誘起電荷ポンプの議論 [2] をトポロジカル超伝導体へ拡張し、Majorana 準粒子のポンピング現象を調べる。トポロジカル超伝導体は量子 Hall 系と類似した性質を持つ一方、超伝導状態では電子と正孔が混成し、平均場ハミルトニアンにおいて粒子数が保存されない。そのため、電荷保存を前提とする量子 Hall 系の議論をそのまま適用することはできない。また、磁束に対する応答を記述する際には、電子のホッピングに伴う Peierls 位相だけでなく、超伝導秩序変数の位相も考慮する必要がある [3]。そこで、これらの位相構造に着目し、磁束挿入に伴う Majorana 準粒子のポンピングを検討する。

参考文献 [1] R.B. Laughlin, Phys. Rev. B 23, 5632 (1981) [2] K. Kudo, Y. Kuno, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B 104, L241113 (2021) [3] O. Vafek, A. Melikyan, M. Franz, and Z. Te š anovi 遺, Phys. Rev. B 63, 134509 (2001)

D-7 磁性 Weyl 半金属の $E_F = 0$ におけるマグノン分散

九州大学理学府物理学専攻 [A], 九州大学時空量子連携研究機構 [B] 下鶴直久[A], 磯部大樹 [A], 野村健太郎 [A,B]

現代の情報処理技術では，より高速で省エネルギーなデバイスの開発が重要な課題となっている．その有力な候補の一つとして，電子の電荷だけでなく，スピンや物質のトポロジカルな性質を利用する新しい物質・デバイスの研究が進められている．特に，磁気の集団的な揺らぎであるマグノンは，電流を流さずに情報を運ぶことができるため，低消費電力な情報伝達への応用が期待されている．

このような背景のもとで注目されている物質の一つが，磁性 Weyl 半金属である．磁性 Weyl 半金属は，磁気秩序によって時間反転対称性が破れ，バンド構造中に Weyl 点と呼ばれる特殊なバンド交差が現れるトポロジカル物質である．この系では，低エネルギーの電子状態が Weyl フェルミオンとして記述される一方，磁化の集団励起としてマグノンが存在する．

本研究では，磁性 Weyl 半金属において Fermi 面が Weyl 点直上にある場合のマグノン分散を解析的に計算した．その結果，長波長領域において，マグノン分散が通常の強磁性体で見られる単純な波数の二乗則から外れ，対数的な補正を受けることを明らかにした．これは，マグノンの伝わりやすさを特徴づけるスピン波剛性が一定ではなく，波数に依存することを意味する．さらに，Weyl 点を結ぶ方向とそれに垂直な方向では，分散の波数依存性そのものが異なることが分かった．

また，格子模型を用いた数値計算との比較により，解析結果の妥当性を検証した．これらの結果は，Weyl 点近傍の電子状態が，マグノン分散に非解析的な波数依存性と方向による違いをもたらすことを示している．本研究は，磁性 Weyl 半金属における電子と磁化の集団運動の結びつきを明らかにし，そのスピンダイナミクスを理解するための理論的基盤を与える．

D-8

磁性 Weyl 半金属におけるスピン誘起電流とその幾何的性質

九大理 [A], ライプツィヒ大 [B], 東大物性研究所 [C], 科学大理 [D], 九大時空量子連携研究機構 [E] 渡邊光太[A], 小沢耀弘 [B,C], 石塚大晃 [D], 磯部大樹 [A], 野村健太郎 [A,E]

強い交換相互作用を持つ磁性体は，磁化ダイナミクスによる電流生成といった，非自明な交差相関応答現象を示し得る．このような交差相関応答は，対称性の低い系において顕著に現れる．具体的には，時間反転対称性と空間反転対称性とが同時に破れている系などである [1]. そこで本研究では，これらの対称性の要求を満足する磁性 Weyl 半金属に着目する．熱浴と結合した MWSM におけるスピン歳差運動を考え，この時間周期ダイナミクスを有効的なゲージ場として扱う．このゲージ場に誘起よって誘起される非線形電流を，Floquet 理論と Keldysh-Green 関数法を用いて解析する [2].

さらに，Berry 曲率，量子計量，シフトベクトルなどの幾何学量を用いて非線形応答を評価し，その起源を明らかにする．本発表では，これらの応答係数について議論し，その性質を交流電場によって誘起される非線形電流応答と比較する [3].

[1] A. Harada, H. Ishizuka, Phys. Rev. B 107, 195202 (2023).

[2] T. Morimoto, N. Nagaosa, Sci. Adv. 2016, 2, e1501524 (2016).

[3] J. Ahn, G. -Y. Guo, N. Nagaosa, PRX 10, 041041

D-9

NbHx 超伝導体中の水素が示すトンネル現象の観測

九大院工 [A], 九大院理 [B], 九大総理工 [C], 高知大理工 [D] 落合陽介[A], 加藤遼馬 [A], 太子周 [A], 飯森陸 [B], 木村崇 [B], 橋爪健一 [C], 志賀雅亘 [D], 河江達也 [A]

最も質量が小さい元素である水素は強い量子性を示し、低温環境下の金属中ではトンネル効果によって拡散することが知られている。さらに、母金属が超伝導転移するとフェルミ面に超伝導ギャップが生じるため、水素のトンネル拡散確率が指数関数的に増大することが理論的に指摘されている [1,2]。我々はこの現象を検証するために、水素を吸蔵させた Nb(100nm) 薄膜に Pd キャップ (20nm) した試料の電気抵抗測定によって超伝導転移の観測実験を行っている。図 1 に T = 230K、水素ガス 70 Torr 雰囲気下において水素を高濃度に吸蔵させた Nb 薄膜の超伝導転移を青いプロットで示す。転移の広がりは試料内部の水素濃度の不均一に起因すると考えられる。さらに T = 300K で試料をアニールすることで水素濃度を均一化させて測定した結果を赤いプロットで示す。アニールにより転移は鋭くなり低温側にシフトしている。しかし、挿入図に示すように抵抗が落ち始める温度の変化は両試料ともに T ～ 4K であることが分かる。これは不均一性の解消によりトンネル確率が増大したために、超伝導のオンセットと抵抗が鋭く落ちる温度に差が生じた可能性がある。講演ではこの結果の詳細について報告する。

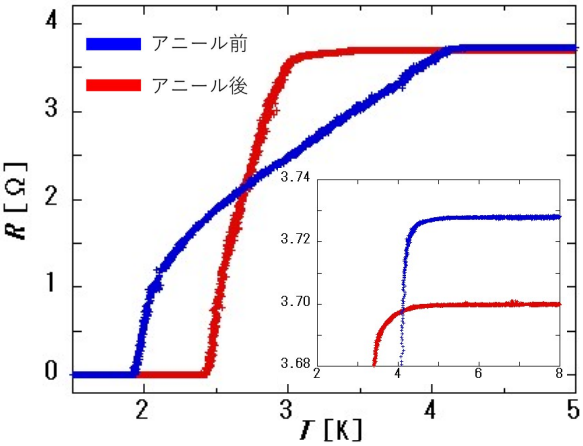


図 1. アニール前後の NbHx の超伝導転移の比較

[1] M. Matsumoto and Y. Ohashi, J. Phys. Soc. Jpn. **62**, 2088(1993).

[2] Y. Ohashi and M. Matsumoto, J. Phys. Soc. Jpn. **62**, 3532(1993).

D-10 超伝導 PdHx/PdDx で出現する核スピンに起因する同位体効果

九大院工 [A], 高知大理工 [B], 九大院理 [C], 阪大基礎工 [D] 加藤遼馬[A], 吉田展一朗 [A], 志賀雅亘 [B], 飯森陸 [C,D], 木村崇 [C,D], 河江達也 [A]

パラジウム水素化物（ PdH_x ）は、水素濃度 x（ x = H / Pd ）がおよそ 0.72 以上になると常圧でも超伝導転移を示し、x の増大とともに転移温度が約 9K まで上昇する。さらにパラジウム重水素化物（ PdD_x ）では x ≃ 0.68 で超伝導が出現し、$x \simeq 1$ では約 $12K$ まで上昇する。つまりPdD_x の超伝導転移温度は PdH_x より高いのだが、その起源については十分に解明されていない。その理由の 1 つとして良質な試料を用いた研究が行われていなかったためである。我々は、T ≦ 200 K の低温で水素を吸蔵させた後、そのまま低温下に冷却および測定を行うことで、水素脱離を抑制した均一な試料の作成に成功し、その超伝導特性を調べている。この低温水素吸蔵で作成した試料の電気抵抗特性を測定したところ、すべての PdH_x /PdD_x 試料において、超伝導転移後に抵抗が急激に減少するにもかかわらず有限抵抗が残り、さらに低温で急激にゼロ抵抗となる二段階転移が観測された [1,2]。さらに PdD_x では、二段階転移に加え残留抵抗域に新たな抵抗異常が出現するため、PdH_x と PdD_x の温度 - 磁場相図は全く異なることがわかった。我々は、この相図の違いを核スピンに起因すると考えている。

[1] R. Kato et al., J. Phys. Soc. Jpn, 95, 024706 (2026).
[2] R. Kato et al., J. Phys. Soc. Jpn, 95, 114707 (2026).

D-11 ブレークジャンクション法による In 酸化物のトンネル分光

九大工 [A], 九大院システム情報 [B], 広大院先端理工 [C] 永田章[A], 宮田翔 [B], 薮田久人 [A,B], 杉本暁 [C], 浴野稔一 [C]

我々は In 系導電性酸化物材料の電気伝導機構を調べる目的で、ブレークジャンクション法により種々の In 酸化物材料のトンネル分光測定を実施している。その過程で多くの In 酸化物材料において、液体ヘリウム中（4.2 K）でのトンネルスペクトルにおいて数 10 meV 幅のギャップ構造を観測した [1]。

最も単純な In 酸化物材料である In_2O_3 セラミックス（市販品）ではピーク間エネルギー約 40 meV のギャップ状スペクトル（図 (a)）が得られ、ゼロバイアス近傍にピーク構造が見られた。このようなスペクトルは超伝導体のものに酷似しているが、ノンドープの In_2O_3 結晶の超伝導転移は我々の知る限り存在せず、ドープした In_2O_3 およびアモルファス InO_x での超伝導転移温度は 4 K 以下である。

図 (b) に示すように、このサンプルの電気抵抗からはマクロな超伝導転移は確認されなかったが、60 K 付近で電気抵抗の振る舞いに異常が見られ、トンネルスペクトルに見られたギャップ構造との関係などについて考察したい。

[1] Yabuta et al., IEEE O. J. Nanotech. 3, 149 (2022).

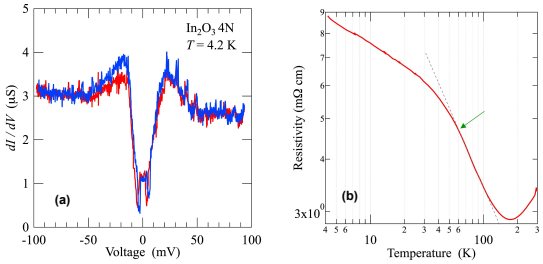


図 In_2O_3バルクセラミックスの (a)ブレークジャンクション法によるトンネル分光スペクトルおよび (b) 電気抵抗率の温度依存性

D-12　椿油抽出用高圧装置の試作

自宅 [A], 久留米工大 [B], 九大理 [C]　巨海玄道[A], 野口聡仁 [B], 光田暁弘 [C]

椿油抽出用高圧装置の試作ー日常生活に生きる高圧技術の探索ー

自宅（年金受給者)、久留米工大 A)、九大理 B) 巨海玄道、野口聡仁 A) 、光田暁弘 B)　福岡市中央区にある梅光園緑道は市民が気軽に散策できる遊歩道としてよく知られている。歩道の両脇には桜、ケヤキ、椿等が植えられている。私は毎朝ここを散歩するがほぼ毎日女性の集団と会う。夏から秋にかけて彼らは椿の実を集めており、私に椿油を作るようにと収穫した椿の実を与えた。彼らは椿油を作る最終工程で圧搾機が必要であることを知っていた。つまり私にそれを作ることを要請したのであった。大学に勤めていればプレスを使って圧力を発生すればいいのだが一般家庭ではプレス機はない。日常生活の中で使う器具を使用してプレス機を作ることを試みそれを使って椿油を抽出することを試みた。我々の日常生活の中で身近なプレス機は車のジャッキである。これは１トン程度の車を持ち上げるので本研究の荷重発生には十分であると考えた。数トンの荷重に耐えるように木枠を失敗を重ねながら作製した。椿油は初めに採集した厚い皮に覆われた椿の実を約一か月放置すると実は割れて殻が開きその中から椿の実を取り出した。小さな実はハンマーなどで割り中身を取り出した。これをグラインダーにかけ粉末にし、蒸気で蒸して暖め手製のシリンダー容器に入れ圧搾機で加圧し油を抽出した。２００グラム程度の粉末から数 CC の油が取れた。この過程の詳細について述べる。

D-13　医学科 1 年次の物理学講義における学修状況と教育効果の調査

佐賀大学医学部 [A]　一ノ瀬浩幸[A], 富永広貴 [A]

我々はこれまで医学科初年度学生に対し，2019 年度・2020 年度・2024 年度に力学概念調査 (FCI) を，2021 年度〜2023 年度に力と運動についての概念調査 (FMCE) および教室用科学的推論テスト (CTSR) を実施してきたが，医学科学生は比較的優秀であり，いずれの調査でも pre・post の結果にほとんど差異は無く，これらの調査によって医学科学生に対する授業効果を測るのは無理があることがわかった。今回我々は，FCI による基礎科学の概念理解度，MPEX による物理学に対する期待・学習観，出席状況や LMS・課題提出による日常的な学修行動，試験による学業成績などの間に何らかの相関があるのではないかと推測し，それを見出すことで講義やその後の進級についてこれなくなる学生の傾向を早期に発見できないかと期待し，これを調査した。今年度は，講義初回に FCI および MPEX（Maryland Physics Expectations Survey）を行った。本学の e-learning システムでは moodle を用いており，学生はそれらをコンピューター実習室および自宅 PC で自由に閲覧する事ができ，講義前後に自発的に予習・復習をするよう促している。moodle のログには学生ごとの資料の利用日時と，動画に関しては最後まで視聴したかなどが記録されており、そのログから資料の利用状況を抽出した。今年度は講義内容の解説動画について学生へ視聴を促すように啓発を強く行った結果，昨年度と比較して閲覧率が向上したが，配布資料や解説動画の閲覧率と成績との間には昨年同様明確な相関は認められなかった。また FCI と成績との相関も例年通りほとんど見られなかった。e-learning 上の資料の閲覧率は全体として低かったが，昨年同様閲覧率は低いにも関わらず成績はそこそこ良い学生が多く，資料があまり活用されていない傾向があった。また資料をよく閲覧している学生に関しても，昨年同様成績が良い学生が多いが，閲覧率が高いにも関わらず成績が振るわない学生も数名いた。MPEX と FCI・成績との比較では，MPEX の平均は 3.5 と比較的良い付近に固まっており，FCI や成績との顕著な相関は見られなかった。また MPEX をカテゴリー別に分けて比較すると，カテゴリー別の MPEX の分布は広がったが，FCI や成績との相関はやはり見られなかった。

会場 E

領域 3, 5, 6, 11

E-1 超伝導 NbN/高スピン分極ホイスラー合金 $Co_2Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si$ 多層膜における平行磁場下での対破壊効果

鹿児島大理 [A], 鹿児島大院理工 [B], 東北大院工 [C], 東北大金研 [D], 九大院理 [E] 青木響[A], 重田出 [B], 窪田崇秀 [C], 木村尚次郎 [D], 関剛斎 [D], 篠崎文重 [E], 淡路智 [D], 廣井政彦 [B]

超伝導体 (S)/強磁性体 (F) ヘテロ構造における超伝導と磁性の相互作用は、様々な非従来型の超伝導現象やスピントロニクスにおける機能性に対して重要な役割を果たす。ハーフメタルと予想されているホイスラー合金 $Co_2Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si$ (CFMS) および超伝導体 NbN は MgO 基板と格子整合性が良く、エピタキシャル成長が可能である。そこで、NbN($d_S = 15$ nm)/CFMS(0 nm $\leq d_F \leq$ 10 nm) 構造の多層膜について、超伝導揺らぎ効果が顕著な超伝導転移温度 T_c 近傍で電気抵抗の測定を行った。加えて、揺らぎ伝導度 σ' の解析を行い、超伝導近接効果を介した CFMS 層によるクーパー対の対破壊効果を調べた。

揺らぎ伝導度 σ' の主要項は、Aslamazov-Larkin 項 σ'_{AL} と、対破壊パラメータ δ を含む Maki-Thompson 項 σ'_{MT} である。本研究では、①超伝導近接効果による超伝導強度 $|\psi|^2$ の減少を表す係数 $\alpha(\leq 1)$ を新たに導入した揺らぎ伝導度 $\sigma' = \alpha(\sigma'_{AL} + \sigma'_{MT})$ および② $\delta = \delta_{int} + \delta_{ext}$ と定義した解析から係数 $\alpha(d_F)$ を求めた。ここで、δ_{int} は S 層で生じる内因性対破壊パラメータであり、δ_{ext} は F 層の影響で T_c が抑制される外因性対破壊パラメータである。σ' の解析から見積もられた α と T_c/T_{c0} の磁性膜厚 d_F に対する依存性を図 1 に示す。図 1 からわかるように、α は $d_F \approx 1$ nm で、また、T_c/T_{c0} は $d_F \approx 3$ nm で最小値をとることが明らかになった。

発表当日は、解析結果の詳細について議論する予定である。

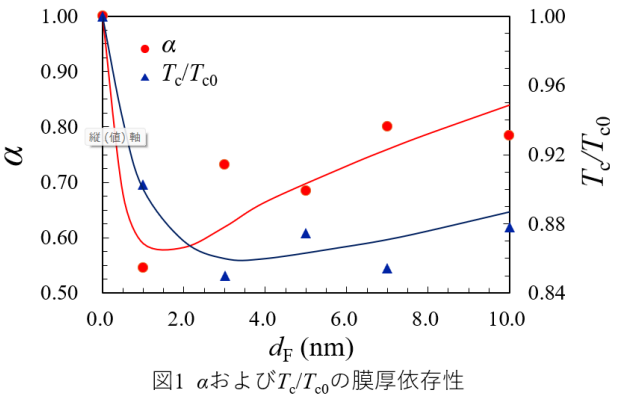


図1 αおよびT_c/T_{c0}の膜厚依存性

E-2 Bi 系高温超伝導体へのスピン注入

福工大院工 [A], 福工大工 [B] 安枝章[A], 岩崎巧生 [B], 中村壮智 [A]

これまで超伝導とスピントロニクスは排他的であると考えられてきたが，超伝導体中のスピンホール効果やスピン伝導，スピン三重項などの新奇超伝導の研究が進んだことから，超伝導体中のスピン輸送現象が注目されるようになった．しかし，実験の多くは BCS 超伝導体を用いたものが主で，ギャップに異方性のある非従来型超伝導とスピン輸送の関係は未解明な点が多い．そこで我々は機械剥離した非従来型伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ に Py の強磁性電極を接合して横型スピンバルブ素子を作製し（図 1），その超伝導状態におけるスピン輸送特性を調べてきた．ゼロ抵抗となった約 55 K 前後の温度域で非局所抵抗の磁場依存性を測定したところ，再現性のあるスピンバルブ信号を観測した（図 2）．この信号の温度依存性を調べたところ，超伝導転移に伴いスピンバルブ信号が大きく変化する他，非局所電圧のバックグラウンドの大きな変化も確認した．講演では温度依存性やマイナーループでの測定結果を踏まえた上で，スピン輸送特性について議論する．

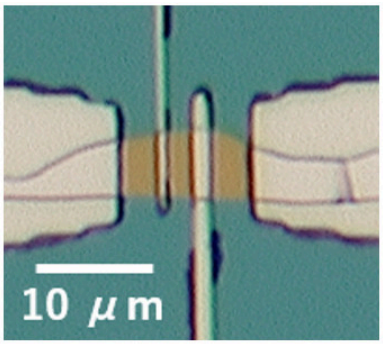


図 1 作製した横型スピンバルブ素子の光学顕微鏡写真．

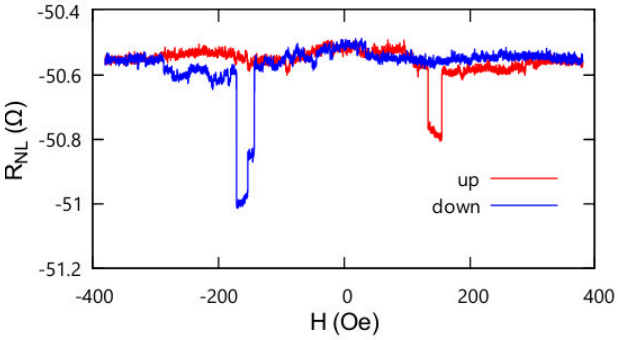


図 2 49.4 K における非局所抵抗の磁場依存性．

E-3 $Fe_{1.3}Mn_{1.7}Si_{1-x}Al_x$ の物性

鹿大院理工 [A], 鹿大先端科学 [B] 中村晴稀[A], 廣井政彦 [A], 重田出 [A], 尾上昌平 [B]

背景

$Fe_{3-y}Mn_ySi$ は、X_2YZ の化学組成で $L2_1$ 型構造を持つホイスラー化合物である（X、Y が遷移金属、Z がⅢ-Ⅴ族の元素）。この化合物は広い組成範囲で研究されており、複雑な磁性を示すことが分かっている [1]。$y = 1.7$ の近傍では、すでに知られている強磁性転移（転移温度 T_C）及び反強磁性と強磁性成分を持つ相（AF 相）への転移（転移温度 T_A）に加え、反強磁性相（AF2 相）へ転移（転移温度 T_{A2}）することが報告された [2]。したがって、$y = 1.7$ 付近で Si の一部を Al に置換した $Fe_{1.3}Mn_{1.7}Si_{1-x}Al_x$ の磁性は興味深いため、$Fe_{1.3}Mn_{1.7}Si_{1-x}Al_x$ を作製し、粉末 X 線解析や磁化測定、電気・磁気抵抗測定を行い、Si の Al 置換によって及ぼされる物性や磁気転移の変化を調べた。特に、$x = 0.2$ 付近で磁性に大きな変化が確認されたことから、その近傍の組成における結晶構造や磁性についてより詳細な調査を行なった。

結果

X 線回折結果より、$x \sim 0.25$ 付近で $L2_1$ 型構造の単相から、$L2_1$ 型構造とβ-Mn 構造の 2 相へと構造の変化が見られ、$x = 1.0$ 付近でβ-Mn のほぼ単相であることが分かった。磁化測定より、$x = 0.2$ 付近まで AF2 相への転移と見られる変化が観測された。また、$x = 0.2$ 付近を境に強磁性が失われていることが分かった。磁気抵抗測定では、$x = 0.1$ において磁気抵抗効果の正から負への変化が見られ、その温度は T_{A2}（AF2-AF 転移）と一致していた。

参考文献

[1] S. Yoon, J.G. Booth, J. Phys. F Metal. Phys. 7, 1079 (1977)

[2] M. Hiroi, T. Nonoyama, G. Adachi, I. Shigeta, H. Manaka and N. Terada, J.Phys. Conf. Ser. 969, 012098 (2018)

E-4 高スピン分極ホイスラー合金 $CoFeTiAl_{1-x}Sn_x$ $(x = 0.7 \sim 1.0)$ の磁気特性

鹿児島大理 A, 鹿児島大院理工 B, 東北大金研 C, 東大物性研 D, 東北学院大院工 E　和田凜太郎A, 木村晴矢 A, 重田出 B, 山内徹 D, 鹿又武 E, 梅津理恵 C, 廣井政彦 B

4 元系ホイスラー合金 CoFeTiSn は、第一原理バンド計算によりスピン分極率 100% のハーフメタルであると予想されているため、スピントロニクス素子の電極材料として期待される機能性材料である。一方、Sn を Al に置換した CoFeTiAl は非磁性半導体であることが報告されている。ハーフメタル特性を有するホイスラー合金は、これまで局在磁性体として理解されてきたため、弱い遍歴磁性体のスピンゆらぎ理論による解析例はほとんどない。そこで本研究では、混晶系ホイスラー合金 $CoFeTiAl_{1-x}Sn_x$ の磁気特性を調べて、スピンゆらぎ理論の観点から議論する。

具体的には、各組成の磁化曲線から Arrott プロットを作成して、磁気自由エネルギーの 4 次の展開係数 F_1、動的スピンゆらぎスペクトルのエネルギー幅 T_0、静的磁化率の波数空間における分散を特徴づける T_A を見積もった。また、キュリー温度 T_C と T_0 を用いて、スピンゆらぎの大きさの指標である無次元パラメータ η を導出した。その解析結果を表 1 に示す。T_0 と T_A は組成変化に対して非単調な振る舞いを示して、Al 置換率 30% で T_0 が最大となった。一方、η は CoFeTiSn で最大となり、Al 置換に伴って単調に減少した。また、CoFeTiSn の η は他のホイスラー合金と同程度の値であったが、$CoFeTiAl_{0.3}Sn_{0.7}$ では典型的な弱い遍歴磁性体である Ni_3Al に近い値を示した。

発表当日は、得られた解析結果の詳細について議論する。

表 1　各材料におけるスピンゆらぎパラメータ

材料	T_0 (K)	T_A (K)	η
CoFeTiSn	1.40×10^3	8.97×10^3	0.527
$CoFeTiAl_{0.1}Sn_{0.9}$	2.02×10^3	9.49×10^3	0.471
$CoFeTiAl_{0.2}Sn_{0.8}$	1.59×10^3	1.14×10^4	0.456
$CoFeTiAl_{0.3}Sn_{0.7}$	4.49×10^3	7.39×10^3	0.294
Ni_3Al	3.59×10^3	3.09×10^4	0.230
Co_2TiGa	8.34×10^2	8.00×10^3	0.530
Co_2NbGa	2.10×10^3	4.70×10^3	0.550
$ZrZn_2$	3.21×10^2	8.83×10^3	0.380

E-5 非線形テラヘルツ分光のための高強度テラヘルツ光源の開発とその応用

九大院理 A, NICTB　小澤悟朗A, 田中海輝 A, 清水颯健 A, 寺井弘高 B, 中村祥子 A

近年、超伝導状態を探る手法として、 テラヘルツ帯の非線形応答が注目されている。これは、多くの超伝導体において、対破壊やヒッグスモードをはじめとした超伝導体内部の素励起のエネルギースケールがテラヘルツ帯に位置するからである。我々は、非線形応答の一つである第二高調波発生を通じて、磁束量子の運動をピコ秒の時間スケールで捉える研究を進めている [1]。

本研究では、こうした非線形応答の測定に適した周波数帯域 (0.1〜数 THz 程度) と十分な電場強度 (数十〜100 kV/cm 程度) を備えたテラヘルツ光源を開発した。図に、発生させたテラヘルツ波の時間波形の一例を示す。講演では、テラヘルツ波の特性評価と、超伝導 NbN 薄膜に対する予備測定の結果を紹介する。

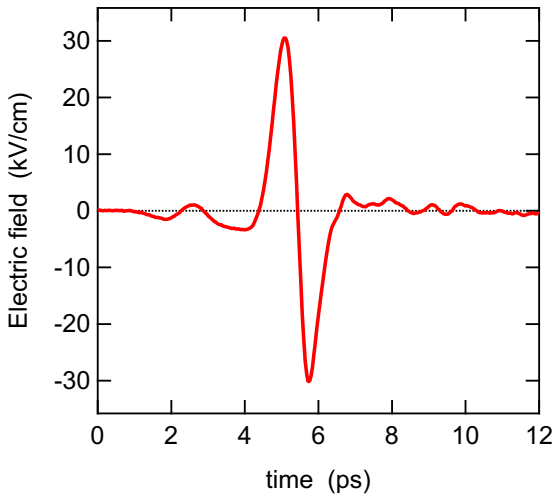


図 1：テフロンレンズで集光した際のテラヘルツ波形

[参考文献]
[1] S. Nakamura et al., PRL. **125**, 097004 (2020).
[2] H. Hirori et al., Appl. Phys. Lett. **98**, 091106 (2011).
[3] G. Ozawa et al., JPS Conf. Proc., accepted.

E-6 近赤外パルス励起による CoFeB/W および Ni/W 二層薄膜におけるテラヘルツ放射の比較

九大院理 [A], 阪大基礎工 [B] 田中海輝[A], 李柏諭 [A], 小澤悟朗 [A], 澤田祐衣 [A], 木村崇 [B], 中村祥子 [A]

磁場中の強磁性体／重金属二層膜にフェムト秒レーザーパルスを照射すると、超高速消磁に伴って角運動量流が生成され、重金属層で面内パルス電流に変換されることでテラヘルツ波が放射される。この現象は、角運動量流の生成・変換に関する超高速ダイナミクスの解明に利用できると期待される。

角運動量流がスピン流の場合、面内電流の極性は重金属層のスピンホール係数に依存するため、プラチナ（Pt）とタングステン（W）では逆符号になると期待される。しかし、強磁性ニッケル（Ni）を用いた二層膜では同符号となることが報告された [1]。そこで、我々も同様の測定を行ったところ、先行研究とは異なり、Ni/W 二層膜の過渡電流に正負の成分が観測された [2]。特に、20 nm の W 層を用いた場合、Ni/Pt と同じ極性を持つ成分が Ni 膜厚とともに増大したので、この成分は界面ではなく Ni 層内での角運動量流生成に由来する可能性が示唆される。

本研究では、この成分が Ni 特有の効果に由来するかを検証するため、異なる強磁性体である CoFeB（CFB）を用いた CFB/W 二層膜を測定した。その結果、Ni/W と同様に正負の電流成分が観測された。一方、CFB 膜厚に対する依存性には、強磁性層内での角運動量流生成を示唆する振る舞いは確認されなかった。発表では、測定結果の詳細を報告する。

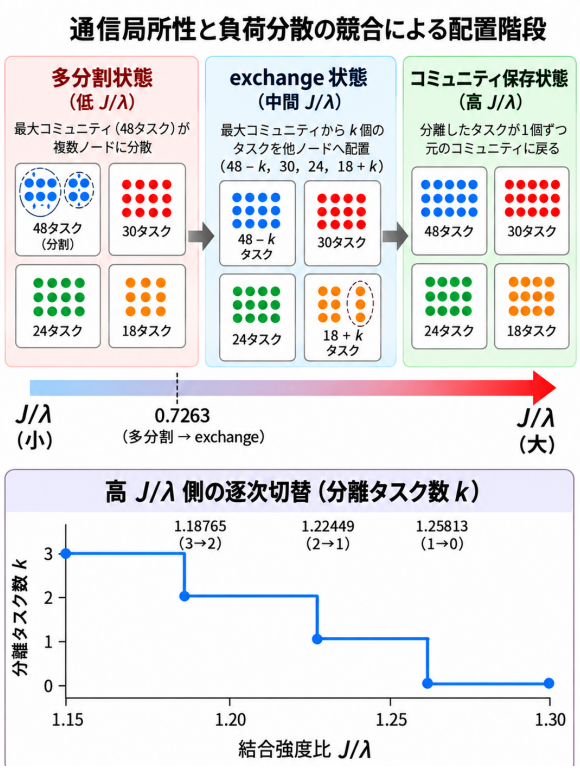
[1] T. S. Seifert *et al.*, Nature Nanotechnology **18**, 1132–1138 (2023).
[2] リハクユ 他，第 130 回日本物理学会九州支部例会（2024 年 11 月 16 日）.

E-7 有限 Potts 模型における通信局所性と負荷分散の競合による逐次配置切替

九州工業大学情報工学部 [A] 大澤智興[A]

[序論] 複数の計算資源へのタスク配置では，通信局所性と負荷均等化が競合する。

[モデル] 配置先を q 状態 Potts 変数 σ_i で表し [1]，通信局所性を強磁性的相互作用，負荷分散を二次ペナルティとして記述した [2]。[方法] 異なる大きさの通信コミュニティをもつ有限系について数値探索を行い，小規模系では厳密列挙した。各配置を $H = \lambda L - JA$ で比較した。[結果] J/λ の増加に伴い，最大コミュニティは多分割状態から exchange 状態へ移行し，さらにコミュニティ保存状態へ至った（図 1）。多分割から exchange 状態への切替点は解析的に $J/\lambda = 0.7263$ と求まり，数値的 onset 0.73 と一致した。高 J/λ 側では分離タスク数が $k = 3 \to 2 \to 1 \to 0$ と逐次的に減少した。[考察] この逐次切替は，通信局所性と負荷均等化の競合による有限 Potts 系の最低エネルギー配置間の準位交差，すなわち有限配置階段として理解できる。



参考文献 [1] F. Y. Wu, Rev. Mod. Phys. 54, 235 (1982). [2] K. Callahan-Coray et al., npj Unconv. Comput. 3, 50 (2026).

E-8 時間依存二次元流におけるラグランジュ粒子運動

福岡県立大人社 [A] 石崎龍二[A]

時間依存二次元流では、カオス的な粒子運動に伴って異常拡散が生じること [1] や、適切な摂動によってカオス輸送を制御できること [2] が報告されている。しかし、粒子軌道のカオス性と粒子拡散の統計的性質との関係については、なお検討すべき点が残されている。

本研究では、時間依存する二次元非圧縮流を考える。流れ関数 $\psi(x, y, t)$ を用いると、ラグランジュ粒子の運動は

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \tag{1}$$

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{2}$$

と表される。この粒子運動は (x, y) 平面上の面積を保存する力学系であり、規則的な運動とカオス的な運動が共存する場合がある。これまでの数値計算では、カオス的な領域において、粒子集団の広がりに通常拡散とは異なる振る舞いがみられ、長距離移動を伴う間欠的な粒子運動も確認された。

本発表では、Lyapunov 指数によって軌道の不安定性を調べるとともに、粒子の平均二乗変位の時間依存性を調べ、粒子軌道のカオス性と拡散との関係について報告する。

参考文献

[1] W. L. Vargas, L. E. Palacio and D. M. Dominguez: Anomalous Transport of Particle Tracers in Multidimensional Cellular Flows, Phys. Rev. E, Vol. 67, 026314 (2003).

[2] T. Benzekri, C. Chandre, X. Leoncini, R. Lima and M. Vittot: Chaotic Advection and Targeted Mixing, Phys. Rev. Lett., Vol. 96, 124503 (2006).

E-9 加振下におけるナットの回転方向と軸方向振動 —三軸加速度センサーによる計測—

佐賀大医 [A] 富永広貴[A]

振動から回転への変換は種々の系で研究されている [1, 2]。加振されたボルトに緩く取り付けたナットは，加振体との接続条件に応じて回転方向が反転する [3]。本研究では，ゴムチューブによる直線接続と屈曲接続について，ボルトに固定した三軸加速度センサーと sensor-bridge[4] を用いて振動を計測した。図は上から x, y, z 成分の Scalogram（共通色尺度）で，y はボルト軸方向に近い。S は直線，B は屈曲接続，破線は条件の切替を示す。屈曲接続では直線接続に比べ，軸方向の加速度変動が大きく，約 130 Hz 付近の成分が強まった。今回の計測結果は，前回報告した超高速カメラ映像から得られた運動の描像と定性的に矛盾しない。Petri の転がりを基礎とするモデルでは，本系で想定するねじ面の離間と衝突を伴う運動を十分に表現できないと考える。そこで，締付け予圧のないナットがねじの遊びの範囲を自由に運動し，ねじ面への衝突・反発時に回転が変化する衝突モデルを構築する予定である。非対称なボルトの往復回転に軸方向振動が加わることで，ナットの回転方向が逆転する機構の解明を目指す。

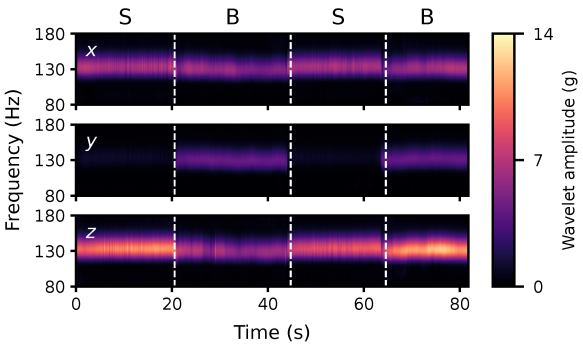
参考文献

[1] P. A. Petri, *Vibration-induced rotation*, S.B. thesis, MIT (2001).

[2] M. Broseghini et al., *PLoS ONE* **14**, e0218666 (2019).

[3] 富永ほか，信学技報 NLP2013-17 (2013); NLP2015-127 (2016); NLP2023-103 (2024).

[4] H. Tominaga, `sensor-bridge`, v1.3.0, Zenodo (2026), DOI: `10.5281/zenodo.23331863`.



E-10 Watts–Strogatz 型ニューラルネットワークにおけるカオス発生の配線依存性

大分大理工 [A], 東大 IRCN[B] 川原口蒼太[A], 末谷大道 [A,B]

多数の飽和型非線形素子が結合した自律ネットワークでは、結合強度の増加に伴い固定点からカオスへの転移が生じる。結合が密でランダムな場合、この転移は結合行列のスペクトル半径で定まる結合強度で起こるとされ、有限サイズでは転移の経路が回路の実現ごとに異なることが知られている。しかし、各素子が少数の素子とだけ結合する疎な回路では、結合の仕方がカオスの発生にどう影響するかは明らかでない。Watts – Strogatz 型ネットワークでは、再配線確率 p を増やすと、まず平均経路長（系全体のつながりの近さ）が短くなり、より大きな p でクラスタリング係数（近傍どうしの結合の密さ）が減少する。本研究ではこの性質を利用し、カオスの発生がどちらの変化に対応するかを調べた。各素子の次数 K、結合重みの分布、結合行列のスペクトル半径を揃えたうえで、近傍への結合を遠距離の結合に張り替える割合（再配線確率）p を変え、多数の回路実現について最大リアプノフ指数を計算し、カオスとなる回路の割合から、カオスが生じる結合強度を求めた。その結果、スペクトル半径の規格化によりどの回路も結合強度 g=1 で原点の固定点が不安定化するにもかかわらず、カオスの発生は g 宮 2 まで遅れた。この遅れは、平均経路長が大きく短縮する小さな p ではほとんど変化せず、クラスタリング係数が減少し始める p の範囲で小さくなり、クラスタリングがほぼ失われる $p \gtrsim 0.5$ でふたたび大きくなった。以上の結果は、カオスの発生のしやすさが、系全体のつながりの近さ（スモールワールド性）と言うよりも、近傍の結合構造の変化と対応して変わることを示唆する。この対応を生む機構の解明は今後の課題である。

E-11 高次元データによるカオス力学系の予測と解析

鹿児島大　理工学研究科 [A] 秦　浩起[A], 柳川　和希 [A], 秦　重史 [A]

高次元の非線形散逸力学系 $\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{F}(\mathbf{X}(t))$ の時間発展について，高次元観測と予測という視点から考察する。なお，ここでは写像系で議論する。

散逸力学系では，初期状態からの過渡的過程を除くと，軌道は（力学系の次元に対し）低次元のアトラクター上にある。また，一般に低次元の力学系 $\mathbf{Y}(t+1) = \mathbf{G}(\mathbf{Y}(t))$ を持つと考えられる。[*1]その例は，ローレンツカオス，B-Z カオス，水滴系カオスなどあるが，$\mathbf{G}$ が高次元の場合，それを見出すことは容易ではない。[*2]

そこで，ここでは視点を変えて，高次元カオス力学系の高次元観測データ

$$\mathbf{Z}(t) = (z_1(t), z_2(t), \ldots, z_m(t)$$

から，系の主要な（知りたい）量 $z_1(t)$ の時間変化を線形和

$$z_1(t+1) = \sum_{i=1}^{m} a_i z_i(t)$$

の形で予測することを紹介する。これが有効となるのは，z_i が $\mathbf{Y}$ の非線形関数で，m がアトラクターの次元より十分大きいことに由来する。また，そこから実効的な時間発展を見出すことについても検討したい。

[*1] ダイナミクスの変数 $\mathbf{X}$ と観測量 $\mathbf{Y}$ は同じではない。もちろん，$\mathbf{G}$ は非線形である。

[*2] 「水滴系のカオス」Robert Shaw，岩波書店 (2006)

E-12 乱流の散逸領域計測を目指した定温度型熱線流速計回路製作の試み

長崎大学大学院 A, 三重大学大学院 B　山田紘大A, 前田翔斗 A, 高橋護 B, 園部陽平 A, 北村拓也 A

乱流は Navier–Stokes 方程式に支配される非線形な流体現象であり、大きなスケールから小さなスケールへ輸送されたエネルギーが、最終的に粘性によって散逸する。このエネルギー散逸過程を実験的に捉えることは、乱流の小スケール構造を理解する上で重要である。一方、散逸領域まで速度変動を計測するためには、十分な時空間分解能を有する計測系が必要となる。特に高周波数領域では、観測された速度スペクトルの減衰が乱流本来の物理現象によるものか、熱線や計測回路の応答特性によるものかを区別することが重要となる。そこで本研究では、散逸領域までの乱流計測を目指し、熱線および定温度型熱線流速計（CTA）回路を含む計測系の構築を試みた。熱線には直径 5 μm のタングステン線に加え、より小さなスケールの速度変動を捉えることを目的として、直径 1 μm の白金線を用いた。これらを自作の CTA 回路と組み合わせて格子乱流の速度変動を計測し、得られた速度スペクトルの高周波数領域について検討した。本発表では、散逸領域までの乱流計測に向けた計測系の構築と、その格子乱流への適用について報告する。

会場 F

領域 7, 8, 9, 10

F-1 第一原理計算による分子性導体 β'-(BEDT-TTF)$_2$ICl$_2$ の低エネルギー格子振動の解析

熊本大 [A], J-PARC[B], 東京電機大 [C], 総合科学研究機構 [D], 埼玉大 [E], 東北大金研 [F] 圓谷貴夫[A], 河村聖子 [B], 中惇 [C], 松浦直人 [D], 谷口弘三 [E], 佐々木孝彦 [F]

擬二次元分子性導体 β'-(BEDT-TTF)$_2$ICl$_2$ (BEDT-TTF= bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene) は、22 K 以下で反強磁性秩序を示すダイマー型 Mott 絶縁体である [1]。J-PARC の AMATERAS を用いた非弾性中性子散乱実験では、広い波数・エネルギー領域にわたるフォノンスペクトルが観測され、特に 36 meV 以下の領域において、明瞭な光学フォノンモードと音響フォノン分散が確認されている。近年の測定により、これらのフォノンモードの散乱強度が結晶軸方向に強く依存することが明らかになりつつある。

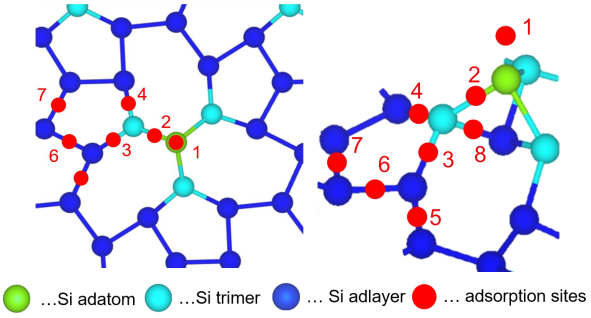
本研究では、非弾性中性子散乱実験との比較および散乱強度の起源の解明を目的として、第一原理計算により β'-(BEDT-TTF)$_2$ICl$_2$ のフォノン分散および固有ベクトルを評価した。さらに、得られたフォノン情報を用いて動的構造因子 $S(\mathbf{Q},\omega)$ を計算し、非磁性状態と反強磁性状態の散乱強度スペクトルを比較した。計算には、実験で報告されている三斜晶 $P\bar{1}$ 構造（単位胞当たり 55 原子）を用いた。反強磁性状態については BEDT-TTF ダイマー上の磁気モーメントが反平行に配列する秩序を表現するため、b 軸方向に単位胞を 2 倍とした $1\times2\times1$ の磁気スーパーセル（110 原子）を構築した [2]。第一原理フォノン計算では、この磁気スーパーセルをさらに c 軸方向に 3 倍した、330 原子からなる $1\times2\times3$ スーパーセルを用いた。反強磁性状態について得られた原子間力定数を、非磁性状態と共通の 55 原子セルに対応するブリルアンゾーンに展開し、同一の波数経路および波数点数を用いて散乱強度を比較した。その結果、非磁性状態および反強磁性状態から得られた $S(\mathbf{Q},\omega)$ は、実験で観測された特徴的なスペクトル形状を概ね再現した。また、反強磁性状態では、いくつかのエネルギー領域において散乱強度の増大が認められた。本講演では、磁気秩序にともなうフォノンスペクトルの変化と散乱強度の結晶軸依存性について報告する。

[1] M. Tokumoto et al., Synth. Met. 19, 215 (1987). [2] T. Tsumuraya, T. Miyazaki, and H. Seo, J. Phys. Soc. Jpn. 93, 123704 (2024).

F-2 第一原理計算による SiC(0001)-3 × 3 再構成表面初期酸化の安定化起源の解明

九工大工 [A] 野村素心[A], 制野かおり [A]

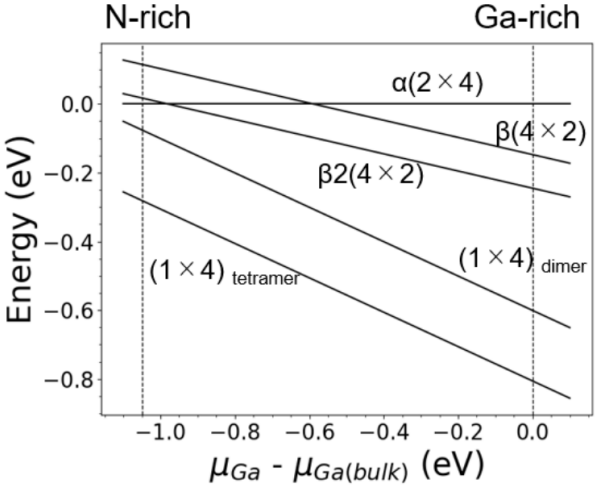
次世代パワー半導体材料である SiC を用いた MOS デバイスでは、酸化界面近傍の炭素関連欠陥に起因する高い界面準位密度がチャネル移動度を低下させることが知られている。本研究では、界面準位密度低減に向け、表面に炭素原子を含まない Si-rich 条件で最安定な 4H-SiC(0001)-(3 × 3) 再構成表面を界面に用いる界面形成を目指す。そこで、酸化膜形成の起点となる初期酸化過程を第一原理計算により解析した。Si adatom のバックボンドへの酸素吸着が最も安定であり、バックボンド酸化を主体とする構造が広い被覆率範囲にわたって最安定となった。また、4/9 ML では実験から提案されている構造よりも安定な構造を見出した。さらに、CI-NEB 法により、その形成機構を検討した。



F-3 第一原理計算による閃亜鉛鉱型 GaN(001) 表面の再構成機構と電子状態

九工大工 [A] 住原陸斗[A], 制野かおり [A]

GaN は、パワーデバイスや光電子デバイスへの応用が期待されるワイドバンドギャップ半導体である。現在実用化されている GaN デバイスの多くはウルツ鉱型が用いられる一方で閃亜鉛鉱型の表面構造は十分に解明されていない。本研究では、閃亜鉛鉱型 GaN(001) 表面を対象に、第一原理計算により表面再構成の安定性と電子状態を評価した。Ga テトラマー、ダイマー、理想表面および GaAs(001) 由来の計 9 種類の構造について、Ga の化学ポテンシャルに対する表面形成エネルギーを比較した。その結果、Ga-rich から N-rich の全領域で (1 × 4) テトラマー構造が最安定となり、GaAs(001) とは異なる傾向を示した。また、バンド構造と状態密度、STM 像の解析から、表面 Ga 原子に由来する局在電子状態の形成とバンドギャップの減少を確認した。今後は振動自由エネルギーを考慮し、表面再構成の熱依存性を評価する。



F-4 第一原理計算による hcp Mg および Mg – Zn – Y 系 W 相の電子・格子熱伝導の解明

熊本大学大学院 [A], 熊本大学 MRC[B] 三木田野佳[A], 圓谷貴夫 [B]

Mg 合金は実用構造用金属材料の中で最も軽量であり、輸送機器の軽量化に資する材料として注目されている。近年では、軽量化に加え、放熱性に優れた高熱伝導材料の開発も求められている。特に、α-Mg (hcp) 母相と、BCC 型ホイスラー構造を有する W 相 ($Mg_3Zn_3Y_2$) から構成される Mg–Zn–Y 系合金は、高強度と高熱伝導度を併せ持つことが報告されている [1]。しかし、本系の熱伝導度に対する W 相の寄与や、hcp Mg と W 相の熱伝導特性の違いは明らかになっていない。そこで本研究では、第一原理計算により、hcp Mg と W 相の熱伝導度をフォノンと電子の寄与に分離して評価した。格子熱伝導度は、有限変位法により 2 次および 3 次の原子間力定数を求めて算出した [2]。電子熱伝導度は、密度汎関数摂動理論と最局在 Wannier 関数を用いた補間により電子–フォノン相互作用から電子の緩和時間を算出し [3,4]、得られた平均緩和時間を用いて定緩和時間近似のもとで Boltzmann 輸送方程式から求めた。その結果、hcp Mg と W 相のいずれにおいても、電子の寄与が大きく、W 相は電子・格子熱伝導度ともに hcp Mg より低いことがわかった。本講演では、W 相の電子熱伝導度が低下する要因を、電子状態と電子–フォノン散乱の観点から議論する。

[1] Y. Wang, S. Inoue, and Y. Kawamura, Mater. Trans. 65 1358–1366 (2024).
[2] A. Togo, L. Chaput, and I. Tanaka, Phys. Rev. B 91 094306 (2015).
[3] N. Marzari, and D. Vanderbilt, Phys. Rev. B 56 12847 (1997).
[4] S. Poncé, E. R. Margine, C. Verdi, and F. Giustino, Comput. Phys. Commun. 209, 116–133 (2016).

F-5 X 線回折 3 次元逆空間マッピングによる強誘電体ドメイン構造解析

九大院システム情報 [A] 宮田翔[A], 片山慶太 [A], 薮田久人 [A]

近年、X 線用二次元検出器および計算機の性能向上により、大量の X 線回折データを用いた三次元逆空間マッピングが可能となり、二次元の測定断面では捉えきれないピーク分裂などの特徴を立体的に把握できるようになった。強誘電体など、結晶方位の異なるドメイン（分域）を有する材料では、ドメイン構造に起因する回折ピークの分裂が逆空間上で観察されることがある。この分裂形態の解析は結晶構造が未知の材料の晶系を推定する手掛かりとなる。本研究では、強誘電性が報告されている一方で、結晶構造の詳細に議論が残る $BiFeO_3$－ $BaTiO_3$ 固溶体の単結晶を対象に三次元逆空間マッピングを行い [1]、回折ピークの分裂形態に基づいて晶系を検討した。$BaTiO_3$ のモル分率が 0.37 の試料では図に示すピーク分裂が観察され、菱面体晶の領域の存在が示唆された。

[1] Yabuta et al., Appl. Phys. Lett. 116, 252902 (2020)

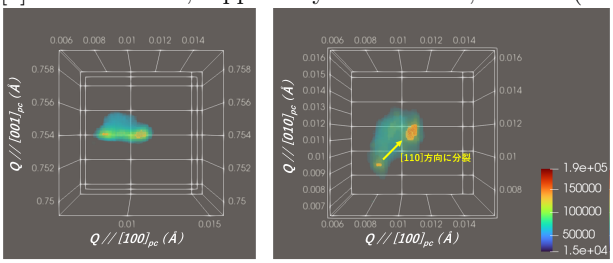


図 $0.63BiFeO_3$－$0.37BaTiO_3$ $(003)_{pc}$ 回折ピークの分裂形態

F-6 MPMS3 用 ^{3}He インサートの開発

九大院工 [A], 九大院理 [B], 岡山理科大 [C] 伊藤大[A], 高橋修二郎 [A], 蓮尾斉彦 [A], 山口恭平 [A], 河江達也 [A], 光田暁弘 [B], 稲垣裕次 [C]

カンタムデザイン社から市販されている SQUID 磁束計 MPMS(Magnetic Property Measurements System) は 1.8 K ≦ T ≦ 400K という広い温度範囲で、磁化を高精度かつ簡便に測定できる装置として、世界中で広く利用されている。その後継機として、約 10 年前より MPMS3 の販売が開始された。これにともない、旧型 MPMS シリーズのサポートは本年 9 月をもって終了する予定である。我々はこれまで、旧型 MPMS 装置と自作の 3He インサートを組み合わせることで、T = 0.5K までの低温領域において [1]、希土類化合物などの磁化測定を行ってきた [2]。しかし旧型装置のサポート終了にともない、低温域での高精度磁化測定を継続するためには MPMS3 に対応した 3He インサートを開発する必要となる。以上のような背景より、我々は新型の MPMS3 に装着可能な 3He インサートの開発を行っている。なお、旧型の MPMS 装置と新型の MPMS3 では測定時の試料駆動方法が全く異なるため、3He インサートの構造も大きく異なる設計となる。試料取り付け用のロッドは本インサート内部に装着され、この状態で MPMS3 本体へ取り付けられる。また、温度計は試料マウント用プレートに取り付けて温度測定を行う。講演では詳細な構造および測定時の問題点について説明する予定である。

[1] Y. Sato et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52, 106702 (2013).
[2] T. Kawae et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 073701 (2013).

F-7 ベイズ推論によるトポロジカル近藤絶縁体 SmB6 の高精度スピン分極率評価

九大院工 [A], 高知大理工 [B], 東大新領域 [C], 茨城大院理工 [D] 内藤叶登[A], 志賀雅亘 [B], 山根将聖 [C], 山口広 [C], 片上舜 [C], 岡田真人 [C], 伊賀文俊 [D], 河江達也 [A]

多くの物質で見られる特異な電子物性を深く理解するためには、フェルミエネルギー近傍の電子状態測定は重要である。特に今回の研究ではトポロジカル絶縁体のスピン分極率に注目する。スピン分極率は、フェルミエネルギーにおけるアップスピン状態密度とダウンスピン状態密度の差によって定義される。そのため、スピン分極率を精密に評価することは、物質の磁気的性質やバンド構造を理解する上で極めて重要である。スピン分極率を測定する実験手法の一つとして、点接合アンドレエフ反射分光（PCARS）法が知られている。PCARS 法では、超伝導探針と試料を微小な接触面積で接合し、界面で得られる微分伝導度スペクトルを拡張 Blonder-Tinkham-Klapwijk（m-BTK）モデルによって解析することで、スピン分極率を見積もる。しかし、m-BTK モデルには、接合部における電子輸送の散乱状態に応じて Ballistic（弾道伝導）極限と Diffusive（拡散伝導）極限の 2 種類の物理モデルが存在する [1]。したがって、スピン分極率を高精度に評価するためには、スペクトル解析に対して適切な物理モデルを選択する必要がある。従来、このモデル選択は経験則に基づいて行われることが多く、客観的な判断基準は十分に確立されていなかった。そこで本研究では、数理科学的手法の一つであるベイズ計測に着目した。ベイズ計測では、ベイズ自由エネルギーを評価することで、実験データの解析に最適なモデルを統計的かつ客観的に選択することができる。本研究では、この手法をトポロジカル近藤絶縁体 SmB $_6$ の PCARS 実験で取得したスペクトルに適用し、スピン分極率の高精度推定を試みた。講演では、得られた解析結果の詳細について報告する。[1] I. I. Mazin, et al., J. Appl. Phys. 89, 7576 (2001).

F-8 ソフトポイントコンタクト法を用いた $CeRu_2Si_2$ の微分伝導度測定

九大院工 [A], 高知大理工 [B], 東北大金研 [C], 都立大 [D] 髙橋修二郎[A], 内藤叶登 [A], 高橋拓也 [A], 寺本翼 [A], 志賀雅亘 [B], 青木大 [C], 大貫惇睦 [D], 河江達也 [A]

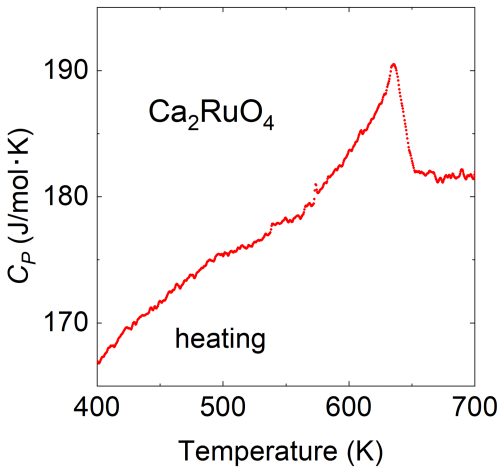
重い電子系物質では、磁場や圧力などの外場により伝導電子と f 電子の混成 (c-f 混成) 強度を変化させることで基底状態が変化する。特に $CeRu_2Si_2$では H〜$7T$ の外部磁場を印加することでメタ磁性転移することが知られている。我々は、この現象に関して微視的観点から調べるため磁場下でのフェルミエネルギー近傍の電子状態測定を目指している。これまで、我々の研究室では点接合分光 (PCS) 法を用いた重い電子化合物の電子状態測定を行ってきた。PCS 法では、探針と試料を微小面積で接触させた状態で微分伝導度 (dI/dV) を測定し、電子状態密度を直接観測する。実際、$CeRu_2Si_2$の PCS 実験を行い、$c-f$ 混成に起因した近藤共鳴状態の観測に成功した [1]。一方、PCS 法では、試料と探針を機械的に接触させているため、外場下での実験が困難である。従って、高磁場下での電子状態測定には、PCS 法とは異なる実験手法が必要となる。そこで、我々は、ソフトポイントコンタクト ($SPCS$) 法に注目した。$SPCS$ 法では、探針と試料を導電性ペーストで固着させた状態で dI/dV 測定を行うため、高磁場下での電子状態測定が可能であると考えられる。本実験では、$CeRu_2Si_2$(001) に Cu 線を導電性ペーストで固着することで接合を作成し $SPCS$ 実験を行った。　本実験で得られた dI/dV 信号を解析した結果、信号が混成ギャップを反映していることがわかった。この $SPCS$ 実験で得られた dI/dV 信号の温度依存性などの結果について発表する。

[1] T. Takahashi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 93, 023704 (2024).

F-9 モット絶縁体 Ca_2RuO_4 の高温比熱測定

久留米工大　教育創造工学科 [A], 久留米工大　基幹教育センタ [B] 小向得翔大[A], 中村関羽 [A], 小倉弘幹 [B], 井野明洋 [A], 中村文彦 [A]

室温でモット絶縁体である Ca_2RuO_4 を昇温すると，360 K で *S-Pbca* から *L-Pbca* 相へ構造相転移し金属化する。さらに昇温し，650 K になると *L-Pbca* から *Bbcm* 相へ構造相転移する．しかし，400 K を超える温度域での比熱は測定されていないため，この相転移の詳細は明らかになっていない。そこで本研究では，微小試料で潜熱を伴う 1 次相転移を含めて比熱の絶対値を測定できる示差走査熱量計 (DSC) を用いて，300-750 K 温度範囲の比熱を測定した。図が示すように，$C_P(T)$ 曲線は 650 K に 2 次相転移に特徴的なブロードなピークを示す。また，ピークの面積から，相転移に伴うエントロピー変化は約 1 J/(mol・K) と見積もられるが，これは $R\ln 2$(約 5.76) よりかなり小さいため，650 K での *L-Pbca* から *Bbcm* 相への構造相転移は，RuO_6 八面体の回転 (傾き) が連続的に消失する変位型の 2 次相転移であると推測される。

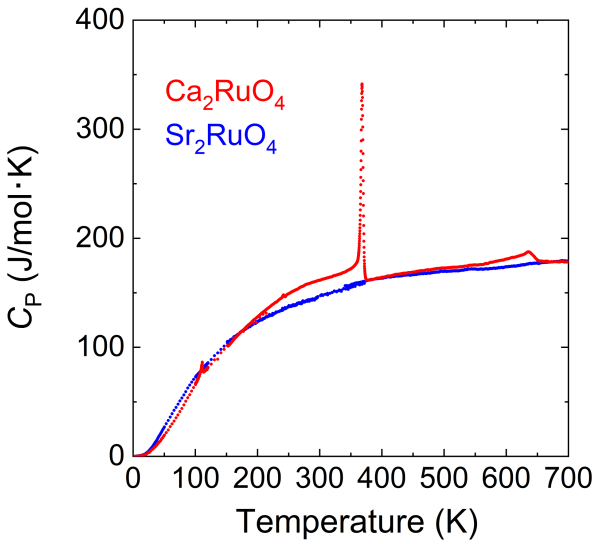


F-10 モット絶縁体 Ca_2RuO_4 の熱力学的解析

久留米工大 基幹教育センター [A], 久留米工大 教育創造工学科 [B] 小倉弘幹[A], 中村関羽 [B], 小向得翔大 [B], 井野明洋 [B], 中村文彦 [B]

モット絶縁体 Ca_2RuO_4 (CRO) では，113 K で反強磁性転移，360 K で S-*Pbca* から L-*Pbca* への構造変化を伴う金属転移，650 K で *Bbcm* への構造相転移が出現する．しかし，これらの相転移の熱力学的整合性は議論されていない．そこで，熱緩和法，示差走査熱量測定などを用いて 3-700 K で CRO の比熱を測定し，各相転移を熱力学的に解析した．

CRO と同型で構造変化のない Sr_2RuO_4 と比較して，CRO の比熱異常を評価した．その結果，113 K 以下の反強磁性秩序で減少したエントロピーは，200-360 K の金属化と 650 K の構造相転移に伴い回復する．これらすべてのエントロピーの収支を合わせると系全体で釣り合う．また，1 次転移とされていた 360 K の比熱異常は 1 次転移的な鋭いピークと 2 次転移的なブロードピークから成る．当日はこのブロードピークの起源も報告する．



F-11 ダブルペロブスカイト型酸化物 La_2NiMnO_6 の単結晶育成と熱電特性評価

鹿児島大学理工学研究科 [A], 鹿児島大学工学部 [B] 道添雄輝[A], 宮坂拓臣 [A], 梅野航 [B], 奥田哲治 [A,B]

ダブルペロブスカイト型酸化物 La_2NiMnO_6 では、Ni と Mn はそれぞれ Ni^{2+} ($3d^8$: $t_{2g}^6e_g^2$、$S=1$) と Mn^{4+} ($3d^3$: $t_{2g}^3e_g^0$、$S=3/2$) の価数状態をとり、Goodenough – Kanamori 則に基づく強磁性的超交換相互作用により、強磁性転移温度 T_C が約 280 K の強磁性絶縁体となることが知られている。また、この物質にホールドープすると、Ni^{2+} の一部が Ni^{3+} に酸化され、ハーフメタル状態が実現する可能性が第一原理計算によって指摘されている。[1] しかし、実際の元素置換では、電子状態の変化に加えて構造的な乱れも生じるため、両者の物性への寄与を分離することが難しく、ハーフメタル化は未だ実験的に直接実証されていない。

本研究では、浮遊帯域溶融法（FZ 法）を用いて、La_2NiMnO_6 および La^{3+} の一部を二価陽イオンで置換した物質の単結晶育成を試みる。得られた結晶について、磁気特性ならびに熱電特性を系統的に調べ、ホールドープによるハーフメタル化の可能性と、優れた熱電特性を示す可能性を検証することを目的とする。

[1] B. Kim, et al., Phys. Rev. B 81, 224402 (2010).

会場 G

領域 12

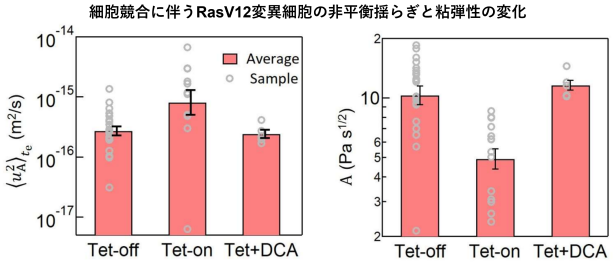
G-1　代謝阻害・細胞競合抑制下のがん細胞の粘弾性と非平衡揺らぎ

九大院理 [A]　田尾優樹[A], 永尾渉 [A], 水野大介 [A]

細胞質は、様々な高分子や細胞小器官から成る複雑な混み合系である。生細胞中では、代謝活動に伴う非平衡揺らぎなど特徴的な力学特性を示す一方、これらが細胞内・細胞間でどのように相互作用し、生命現象に影響するかは十分に分かっていない。

本研究では、正常細胞ががん化細胞を排除する細胞競合に着目し、マイクロレオロジー計測により、細胞質の粘弾性と非平衡揺らぎを測定した。

単独培養では正常細胞と RasV12 変異細胞はいずれも液体-個体相転移の臨界性を示唆する力学特性を示した。一方、共培養下の変異細胞では非平衡揺らぎが増大し、粘弾性が低下した。これはワールブルグ様代謝変化に伴う揺らぎの増大が、混み合った細胞質を流動化させるアクティブガラス的挙動と考えられる。さらに、この代謝変化を阻害すると力学特性が回復し、変異細胞の排除も抑制された。これらの結果は、代謝活動に伴う非平衡揺らぎが細胞質の流動性を変化させ、細胞競合におけるがん化細胞の排除に関与することを示している。



左図は非平衡揺らぎの総強度。右図は複素弾性率のべき乗則 $G^*(\omega) = A(-i\omega)^{\frac{1}{2}}$ における係数A 。Tet-offは非競合条件、Tet-onは細胞競合条件、Tet + DCAはDCA添加によるワールブルグ様代謝変化の阻害条件を示す。各点は個々の細胞の測定値、棒は対数平均、エラーバーは対数値の標準誤差を示す。細胞競合下では非平衡揺らぎが増大し、細胞質が流動化した。一方、非競合条件ではこれらの変化は見られず、DCA添加によっても揺らぎの増大と流動化が抑制された。

G-2 電場誘起液晶乱流における矩形セル内の平均流の渦構造

大分大学理工学部 [A], 九州大学理学研究院 [B], 九州工業大学情報工学研究院 [C] 平尾知樹[A], 小林史明 [B], 許宗君 [C], 折原宏 [A], 長屋智之 [A]

電場誘起液晶乱流の一種である動的散乱モード 2（DSM2）は，長年，等方的な乱流と考えられてきた。しかし，その乱流中に一方向に流れる平均流が形成され，見かけの粘性が負になる現象が報告された [1]。対流領域を 1.2 mm × 1.2 mm の正方形にすると，平均流が対流領域全体に渡る単一の渦を形成することも報告された [2]。

本研究では，対流領域の形状と平均流の渦構造との関係を調べるため，透明電極付きガラス基板を用いて長方形領域を設け，顕微鏡観察と粒子画像流速測定を行った。その結果，1 mm × 2.5 mm の長方形領域では，二つの渦からなる平均流が観測された（図 1）。また，この実験系に対応する 2 次元モデル [2] の数値計算でも複数の渦の形成を確認した（図 2）。これらの結果は，境界条件が DSM2 における平均流の渦構造の形成に重要な役割を果たすことを示唆する。

[1] H. Orihara et al., Phys. Rev. E **99**, 012701 (2019).
[2] Y. Sato et al., Phys. Rev. Lett. (in press).

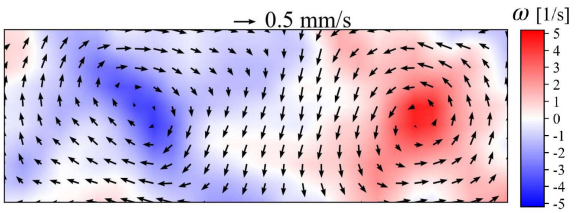


図 1　長方形領域（1 mm × 2.5 mm）で観測された平均流の速度場（矢印）と渦度（色）。

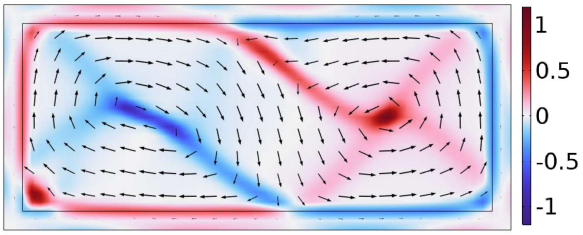


図 2　2 次元モデル[2]の数値計算で得られた長方形領域内の速度場（矢印）と渦度（色）。実線は領域の境界を示す。

G-3 pH 測定による荷電コロイド結晶の物理化学的特性：KOH 溶液添加時の効果

大分大学 [A] 玉井達也[A], 岩下拓哉 [A]

シリカコロイド粒子は、水中で表面のシラノール基が解離することで負に帯電することが知られている。帯電した粒子の周囲には電気二重層が形成され、KOH を添加した系ではカリウムイオンも粒子周囲のイオン分布に寄与する。帯電した粒子間には電気二重層を介した静電反発相互作用が働き、粒子の体積分率、表面電荷密度、イオン強度などの条件によってコロイド結晶が形成される。本研究では、大気平衡下にある荷電シリカコロイド分散液を研究対象とする。分散液の pH と電気伝導度を測定し、両者の KOH 添加濃度依存性を調べた。また、球対称ポアソン・ボルツマンセルモデルを用いて粒子周辺の電位とイオン濃度分布を計算し、表面電荷密度を変えた際の pH の計算値と実測値の比較から表面電荷密度の推定について検討する。

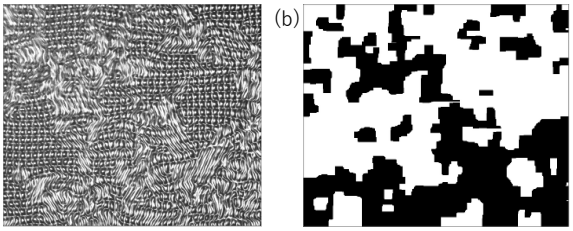
G-4 液晶電気対流における間欠性乱流の粗視化と相関関数

九大工 [A]　河野快音[A], 河野真也 [A], 合志憲一 [A], 石田謙司 [A], 日高芳樹 [A]

液晶電気対流は、ネマチック液晶に交流電圧を印加することで対流が形成される現象で、液晶のパターン形成だけでなく、乱流の輸送現象の研究対象としても用いられている。印加電圧を十分に上昇させると、秩序（グリッド）領域と無秩序（乱流）領域が明確な境界を隔てて共存する「間欠性乱流（図 (a)）」へと遷移する。本研究では、この間欠性乱流が示す乱流拡散の性質を明らかにすることを最終的な目的としている。その第一段階として、グリッド状態と乱流状態の共存がどのような時空構造をもつかを調べる。

そのために、グリッド領域と乱流領域の内部構造に立ち入らず、それぞれを単一の状態とみなす粗視化を行った。具体的には、撮影画像を小領域に分割し、各領域のパワースペクトルから周期性を評価することでグリッド領域と乱流領域に分割し、それぞれ 1 と 0 で表した 2 値化画像を作成した（図 (b)）。この 2 値化画像に対し、空間と時間の相関関数を求め、間欠性乱流における 2 状態の共存の統計的性質を評価する。

(a)　(b)



G-5 境界の形状によるクインケ粒子の集団運動制御

九大理 [A], 九大院理 [B]　渡邊優心[A], イジウォン [B], 朝枝響 [B], 小林史明 [B], 木村康之 [B]

近年、生物の群れや自己駆動する微粒子など、アクティブマターの集団運動に関する研究が活発に行われている。先行研究において、境界の形状によって粒子の運動が制御可能であることが示唆されている。我々は、境界形状による集団運動の制御をさらに進め、クインケ粒子系において、自発的に回転方向が選択された回転運動の実現を目指して研究を行った。

本研究では、クインケ粒子として PMMA 粒子（直径 20 mm）を用い、AOT ーヘキサデカン混合溶媒中に分散させた（体積分率 1 %）。UV レジンを用いて作製したラチェット型の流路に分散系を封入して直流電場を印加した。粒子画像流速測定法（PIV）を用いてラチェットの歯の部分（ポケット）における局所的な渦度と、主流（レーン）における全体の速度を測定し、両者の関係を調べた。実験では、流路の幅（比率）や歯の傾斜角を変化させて比較を行った。その結果、流路の幅が小さい（比率 0.75）場合には、電圧を上げて渦度を変化させても全体の速度増加が起こらなかった。一方、流路の幅が小さい（比率 0.8）場合には、ポケット部の渦度が増加すると全体の速度が上昇し、局所的な渦が効率的に主流の推進力に変換されていることが確認できた。以上より、全体の速度は印加電圧や局所的な渦の強さだけで決まるわけではなく、流路幅などの境界条件にも大きく依存することがわかった。

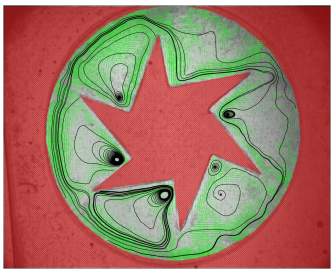


図1　比率0.75、$1.1 \times 10^7\ V/m$における粒子の流線

G-6 大腸菌抽出液の粘弾性測定とその時間変化

九大院理[A] 熊丸一平[A], 水野大介[A]

高濃度の生体高分子を含む細胞質はガラス・ゲル化にともない固化する一方、生細胞は代謝活動の下で流動性を保つ。本研究では HeLa 細胞抽出液を用い、粘弾性の時間変化と ATP 添加の影響を調べた。アクチン重合を阻害し、生細胞内に近い高分子濃度に調整した試料について、光ピンセットでプローブ粒子の揺らぎを測定した。揺らぎを熱的と仮定して粘弾性を求め、ATP 濃度も別途測定した。驚くべきことに、ATP を添加した抽出液は、作製直後には生細胞と定量的に類似したべき乗レオロジーを示した後、時間とともにさらに硬化した（図 1)。粘弾性と 4 kHz の揺らぎから求めた粘性率の増大幅は、測定した条件では ATP 未添加試料より大きかった。ATP の消費も確認された。一方、抽出液では ATP の有無によらず、生細胞で見られる大きな非熱揺らぎは観測されなかった。細胞に近い粘弾性を示す初期過程における時間変化は可逆であるために、試料封入時の攪拌で流動化した構造が再配置して安定化するエイジングの可能性がある。生細胞では、代謝由来の非熱揺らぎがエイジングに拮抗する若返りを引き起こし、流動性を維持する可能性がある。　　ATP 添加による硬化の増大については、ガラスの冷却速度依存性との類推を考える。ATP 消費に伴う分子スケールの駆動が構造再配置を助け、ATP の減少とともに駆動が弱まれば、緩やかな冷却のように、より安定な構造へ移行し得る。ただし、この微視的な駆動仮説は直接検出されておらず、閉鎖系での代謝産物蓄積の影響も分離されていない。物質交換系で ATP 濃度を維持した測定により、これらを検証する必要がある。

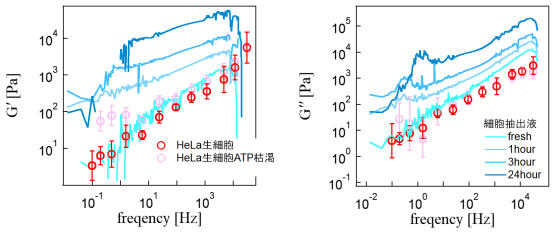


図1 ATP添加HeLa細胞抽出液（高分子濃度0.30 g/mL）の貯蔵弾性率（左）と損失弾性率（右）。実線は作製直後、1、3、24時間後の抽出液、赤丸は生細胞、桃色丸はATP枯渇細胞を示す。抽出液の値はプローブ粒子の揺らぎから評価した。

G-7 原形質流動に着想を得た空間的不均一散逸下の最小アクティブ輸送モデル：基本特性と課題

佐世保工業高等専門学校[A] 三橋和彦[A]

粒子集団における接触連結性と力学的応答の関係は、ジャミングや接触パーコレーションの研究で議論されてきた [1]。また、粒子間接触をグラフとして表現し、力の分布や構造的特徴を解析する方法も発展している [2]。一方、継続的な局所駆動下で、接触構造の発達が巨視的な輸送応答にどのように反映されるかは、別途検討を要する問題である。

本研究では、植物細胞の原形質流動に着想を得て、局所駆動と粒子間接触による集団的な運動応答を調べる二次元最小モデルを構築した。モデルは斥力相互作用を持つ過減衰粒子からなり、下壁近傍で一時的に結合した粒子にのみ一定方向の駆動力を与える。また、壁近傍とその外側に異なる Drag 係数を設定し、空間的に不均一な散逸環境を導入した。粒子間に恒久的な結合はなく、接触状態は粒子運動に応じて変化する。

瞬間的な粒子間接触をグラフとして表現し、駆動粒子からの最短接触経路長を hop と定義した。充填率ϕ=0.61 から 0.65 について、各 5 つの乱数系列で接触構造、接触力および粒子速度を評価した。

その結果、ϕ=0.62 から 0.63 への増加に伴い、駆動粒子から接触経路で到達可能な非結合粒子の割合は約 4.6 %から 35.5 %へ増加した。一方、非結合粒子の平均輸送速度には対応する増大が見られなかった。さらに、hop 別の接触力を大きさ、駆動方向成分の絶対値、符号付き成分に分解すると、接触構造が広く発達する条件でも、正味の力学的応答は駆動粒子近傍に集中していた。

これらの結果は、局所駆動を受ける粒子系において、接触構造の到達範囲と輸送応答が必ずしも対応しないことを示している。本講演では、両者の乖離を接触力の減衰と方向相殺の観点から議論する。

参考文献

[1] T. Shen, C. S. O'Hern and M. D. Shattuck, Phys. Rev. E 85, 011308 (2012).

[2] D. S. Bassett et al., Soft Matter 11, 2731 – 2744 (2015).

G-8 血清飢餓下における細胞のエネルギー代謝と細胞質の粘弾性・揺らぎダイナミクス

九大理学部 [A], 九大院理 [B] 奥野智美[A], 竹田芽衣 [B], 田尾優樹 [B], 趙松川 [B], 水野大介 [B]

培養細胞に対する血清飢餓処理は、細胞増殖やシグナル伝達を抑制するとともに、細胞のエネルギー代謝状態にも大きな変化をもたらす。一方で、このような細胞の代謝状態の変化が細胞質の力学特性や細胞内揺らぎにどのような影響を及ぼすかについては、十分に明らかになっていない。本研究では、血清飢餓状態における細胞質の力学特性の変化を明らかにすることを目的として、細胞のエネルギー代謝と細胞質の粘弾性・揺らぎダイナミクスを測定する。具体的には、異なる血清（FBS）濃度条件で培養した細胞について、細胞外フラックス解析装置（Seahorse）を用いて酸素消費速度（OCR、図 1）および細胞外酸性化速度（ECAR）を測定する。これらを指標としてミトコンドリア呼吸や解糖系による ATP 産生速度を評価する。また、光ピンセットを用いたマイクロレオロジー計測により、細胞質の粘弾性（図 2）および揺らぎダイナミクスを評価する。これらの測定を血清濃度や培養時間が異なる条件で実施し、その結果を比較することで、血清飢餓に伴うエネルギー代謝状態の変化と細胞質の力学特性との関係を検討する。

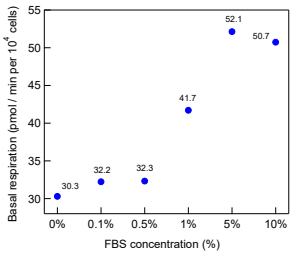


図1　FBS濃度に対するMDCK細胞の基礎呼吸速度（Basal respiration）の変化。MDCK細胞を各FBS濃度（0、0.1、0.5、1、5、10%）で24時間培養後、酸素消費速度（OCR）を測定した。Basal respirationは非ミトコンドリア由来のOCRを差し引いて算出し、各ウェルの細胞数で規格化し、10^4細胞当たりの値として示した。

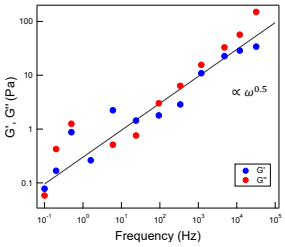


図2　FBS10%を含む培地で培養したMDCK細胞の細胞内粘弾性。光ピンセットを用いたマイクロレオロジー測定から得られた複素粘弾性率の実部（G'）と虚部（G''）の周波数依存性を示す。

G-9 クインケ粒子分散系のレオロジーと集団運動

九大理 [A], 九大院理 [B], 大分大理工 [C] 久保涼香[A], 増田廉 [B], 小林史明 [B], 長屋智之 [C], 木村康之 [B]

バクテリアや鳥の群れなど、自発的に運動するアクティブマターの集団運動に関する研究が近年活発に行われている。さらに集団運動に起因した系の巨視的な物性変化が注目されている。本研究では、直流電場により自己駆動するクインケ回転粒子（直径 50μm の球状 PMMA 粒子の AOT/ヘキサデカン分散系）を対象とし、粒子の集団運動がそのレオロジー特性に及ぼす影響を調べた。実験では、レオメーターを用いた粘度の測定と同時に高速カメラで撮影された動画の PIV 法による速度場解析を行った。図 1 に電場ゼロでの粘度で規格化した相対粘度の電場依存性を示す。高電場下では大きな負の粘性が観測された。また、図 2 には上部プレートを自由に回転できる状態で測定した自発せん断速度の電場依存性を示す。閾値電場以上で自発せん断速度が発生し、電場の増加に伴って増加することがわかった。さらに両者の比較から、負の粘性の発現は自発せん断流れの発生によることが明らかとなった。当日は速度場解析も加えて、クインケ回転粒子系のレオロジーと集団運動の定量的な関係を議論する。

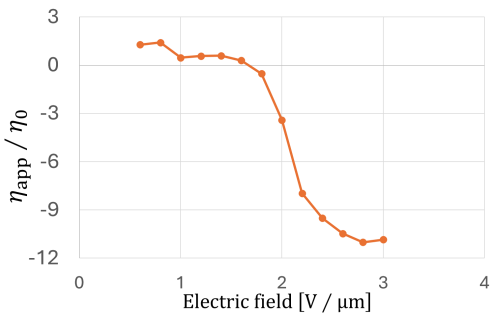


図 1　クインケ粒子分散系の粘度の電場依存性

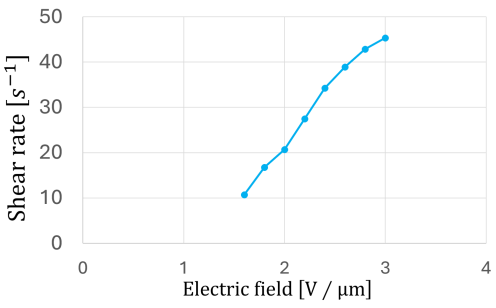
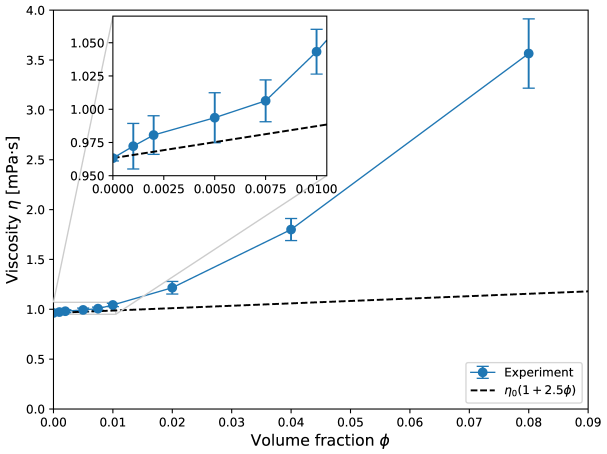


図 2　自発せん断速度の電場依存性

G-10 大気平衡下における無塩系荷電コロイド水溶液の粘度のセルモデル解析

大分大学 A　大谷紗菜A, 岩下拓哉 A

コロイド分散系において粒子間相互作用と構造変化の関係を明らかにすることは、ソフトマター物理学における重要な課題である。特に、荷電コロイド分散系では、電気二重層の形成や、表面電荷の変化が粒子間相互作用に影響し、系の構造変化を引き起こす。しかし、その影響については、まだ十分に明らかになっていない。　そこで、本研究では、大気平衡下における無塩系荷電コロイドシリカ水溶液の粘度の体積分率依存性について考察し、粒子間相互作用と流動特性の関係を明らかにすることを目的とする。本研究では、セルモデル解析により、大気中の CO2 との平衡を考慮し、理論計算から電気粘性効果を考慮した粘度を算出する。また、レオメーターを用いた粘度計測を行い、理論計算と実験の両面から無塩系荷電コロイド水溶液の粘度変化について報告する。



G-11 液晶電気対流パターンの観測画像に基づく乱流輸送

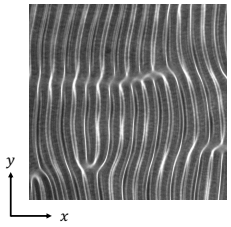
九大工 A　小森郁也A, 河野真也 A, 合志憲一 A, 石田謙司 A, 日高芳樹 A

ネマチック液晶に閾値電圧以上の電圧を印加すると、ロール状の対流構造が周期的に並んだ液晶電気対流が発生する。印加電圧をさらに大きくすると、対流ロールの揺らぎが生じる（図 1)。この状態は欠陥乱流と呼ばれ、局所的に秩序構造を保ちながら大局的には無秩序となる「弱い乱流」の典型例である。乱れが十分に強い「発達乱流」と比べて、弱い乱流による輸送現象の研究は十分ではない。

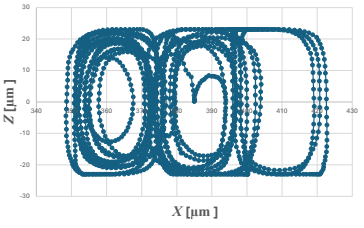
弱い乱流による物質拡散の研究では、混入した粒子を実験で追跡する方法と、数理モデルに基づく仮想粒子の運動を数値シミュレーションする方法が用いられてきた。前者は実際の流れを反映するが、条件を幅広く変えることが難しい。後者は条件を自由に変更できるが、実際の流れに含まれる不規則性を再現しにくい。

そこで本研究では、両手法の弱点を相互に補うことで、弱い乱流の輸送現象の解明を目指した。そのために、実験で得た欠陥乱流の画像から、ロールに垂直な方向の拡散を調べるための 2 次元速度場を構成した。この速度場を用いて仮想粒子の運動を数値シミュレーションし（図 2)、得られた粒子軌道から粗視化拡散係数や易動度の導出を試みた。

(図1)



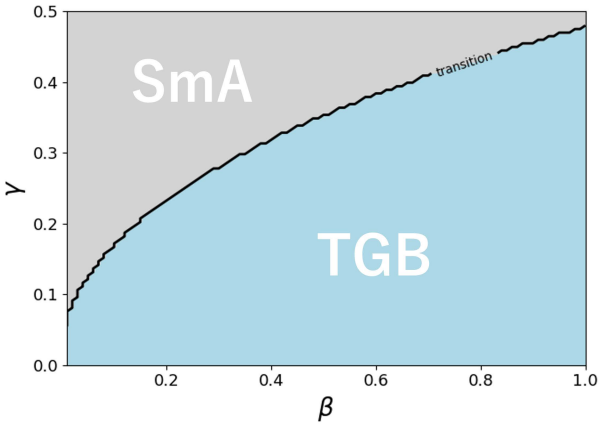
(図2)



G-12　強誘電性スメクチック A 液晶のキラル対称性の破れと構造転移

九州大学大学院理学府 [A], 九州大学大学院理学研究院 [B]　小田稜矢[A], 小田響己 [A], 福田順一 [B]

強誘電性液晶では，構成分子がキラリティを持たない場合でも，分子間の静電相互作用によって自発的にねじれ構造が形成され，キラル対称性が破れることがある．その中でも，強誘電性スメクチックA液晶では，層構造を保ちながら不連続にねじれるＴＧＢ構造が実験的に確認されているものの，その理論的理解は十分ではない．本研究では，強誘電性スメクチックA液晶を対象に，静電遮蔽効果を取り入れた静電相互作用を評価し，自由エネルギーを構築した．これを解析することで，遮蔽の強さや強誘電性の強さが液晶構造に与える影響を解析した．その結果，静電遮蔽の強さを変えるとＴＧＢ構造とねじれのないスメクチックA構造の間で転移が起こり，強誘電性の強さによって転移点も変化することが分かった (図参照)．特に，強誘電性が強い (β が大きい) ほど，遮蔽が比較的強い (γ が大きい) 場合でもＴＧＢ構造が安定になる．



G-13　液晶乱流の幾何学的制御

九大理 [A], 九大院理 [B], 大分大理工 [C]　清原悠翔[A], 宮内良門 [B], 小林史明 [B], 長屋智之 [C], 木村康之 [B]

誘電異方性が負のネマチック液晶にしきい値以上の電圧を印加すると電気対流が発生し、さまざまなパターンが電圧とともに現れる。特に、高電圧下では乱流状態 (DSM 相) が出現することが知られている。しかし、近年、等方的な乱流状態である DSM2 相において、自発流れが発生することが報告されている。本研究では、自発流れが発現する DSM2 相をアクティブ流体とみなし、これをさまざまな境界形状をもったセルに閉じ込め、流れ場の変化を調べた。

ネマチック液晶として安定して自発流れが観測されている 4'-エトキシベンジリデン-4-ブチルアニリン（EBBA）を用いた。ITO ガラスを用いて作成した平行平板セルに液晶を封入し、交流電場を印加した。顕微鏡を用いて動画を撮影し、粒子画像流速測定法（PIV）を用いて流れ場の定量的評価を行った。

厚さ 100μm のセル中での直径 3 mm の液晶液滴内部の流れ場とその向きを図 1 に示す。液滴の中心を中心とする渦状の流れ場が形成されていることがわかった。図 2 に速度場の位置依存性を示す。液滴の中心を除き、一定の速度での流れが発生していることがわかる。当日は ITO ガラス上に UV 硬化樹脂を用いて形成したさまざまな形状の境界壁の持つセル中での結果も報告する。

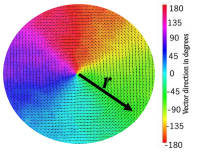


図 1　3 mmの液晶液滴中の流れ場の例

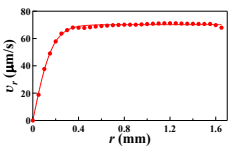


図 2　3 mmの液晶液滴中の流速の位置依存性