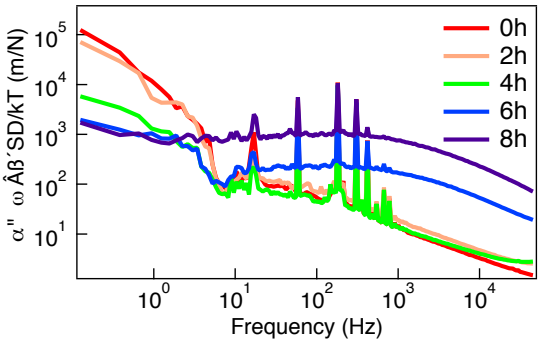
会場 D

領域 7, 12

D-6 細胞死に向かう Hela 細胞のマイクロレオロジー計測

九州大学理学部物理学科 [A], 九州大学大学院理学研究院 [B] 藤原誠[A], 永尾渉 [B], 池永匡宏 [B], 水野大介 [B]

細胞内部は、各種の蛋白質や細胞小器官で混み合っており、健全な細胞の物理的性質は、ガラス的な混み合い状態が、代謝により駆動されたアクティブガラスとして理解される。他方で細胞死の過程では、細胞の代謝や PH、構造の変化とともに、その力学的性質も多大な影響を受けるが、そのメカニズムは不明である。　本研究では、ヒト由来のガン細胞株である HeLa 細胞に、抗がん剤 (パクリタキセル) を作用させ、細胞死を誘導させた細胞内部のマイクロレオロジー (MR) 計測を行った。MR では、細胞内に分散されたプローブ粒子の運動から細胞質の力学的性質を求める。パクリタキセル投与 (0h) 後の、細胞内粒子の揺らぎのパワースペクトルの時間変化を下図に示す。パクリタキセルは微小管の重合を阻害する抗がん剤であるが、むしろ細胞死の誘導とともに細胞質のガラス化・ゲル化が起こり力学特性の変化が生じている可能性がある。



D-7 半屈曲性高分子ゲルの局所力学応答のスケール可能性

九州大学 [A] 白木啓悟[A]

細胞内部では細胞骨格や細胞外繊維等の生体高分子がネットワークゲルを形成している。これらのゲルは曲げに対する復元力を示す半屈曲性の高分子からなり、外力の印加によって硬化する強い非線形応答性を持つため、細胞に力学的な安定性を与える。細胞内部の生理的現象の多くは、細胞骨格が分子モーターの生成する局所的な力学場により駆動されて進行する。従来、生体高分子ゲルの力学応答は、マクロレオメーターを用いて観測されてきたが、この方法では局所的な力学場に対する応答を広い周波数域で観測することができない。そこで本研究では、各種の細胞骨格ゲルに対して光捕捉力によってミクロスケールの力を印加し、周辺媒質の局所的な力学応答をマイクロレオロジー法により観測した。マイクロレオロジー (MR) とは、プローブとして媒質に分散させたコロイド粒子の運動から周囲の媒質のメソスケール（nm〜μ m）の力学物性を計測する手法のことである。任意の制御された捕捉力 (牽引力) をコロイド粒子に印加しつつ、その運動を多重のフィードバック制御により安定的に追跡した。これにより、コロイド粒子を介して媒質に局所力学場が与えられる。その結果、印加する牽引力の増加とともに、プローブ粒子の熱ゆらぎが広い周波数範囲で減少する様子が観測された。細胞骨格ゲルは、外場の印加に対して、まずスケール不変なアファイン変形を起こしたのち、非アファイン性の遅い緩和を示す。広帯域の観測が可能なマイクロレオロジーは、初期のアファイン変形を含めた広い時間スケールの力学緩和挙動を観測できる。本研究では、細胞骨格ゲルのアファイン変形の数理モデルを解析し、実験結果と比較することで、その非線形挙動にスケール不変性が存在する可能性を見出した。

D-8 光捕捉による局所的な力印加に見る濃厚コロイド懸濁液のマイクロレオロジー

九州大学 [A] 江藤高宏[A], 林原就斗 [A], 水野大介 [A]

私たちの身の回りに存在するソフトマターは、単純液体とは異なり外力の印加により、力学的性質が大きく変化して多彩な流動挙動を示す。剛体球コロイドの濃厚懸濁液は、その非線形流動のメカニズムを調べるための単純なモデル系として用いられる。従来、市販のレオメーターを用いて、マクロなスケールの流動が広く研究されてきた。しかしながら、濃厚コロイド系の流動挙動は構成粒子の相互作用に由来するため、微視的なレベルでの力学応答を観測することで、その非線形機構の理解に繋がる。本研究では、コロイド懸濁液 (ϕ=0.53) 中に分散させたプローブ粒子に光捕捉により牽引力を加え、揺らぎと輸送特性を観測した。ストークス関係式から求めた周囲媒質の局所粘性は、粒子の輸送速度が増加するにつれ減少した (thinning)。しかしながらこの時の粒子揺らぎには、粘性減少から予測される程の増大は観測されなかった。(図 1)

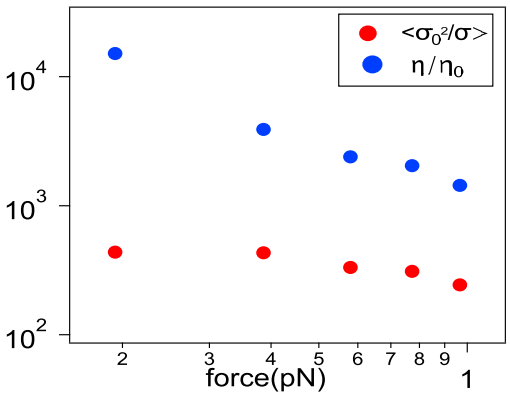


図1：コロイド懸濁液の非ニュートン流動と揺らぎ
η: 懸濁液の粘性率　　η_0：水の粘性率
σ^2：懸濁液の揺らぎの分散　　σ_0^2 :水中の揺らぎの分散

D-9　光トラップを用いたコロイド粒子の交流電場応答測定

九大理 [A], 九大院理 [B]　村上幸輝[A], 壹岐晃平 [B], 木村康之 [B]

コロイド粒子の表面電荷は、コロイド分散系の安定性を支配する基本的かつ重要な物性量の一つである。本研究では、光トラップした単一コロイド粒子の交流電場応答を、レーザーインターフェロメトリ法を用いて直接測定し、複素電気泳動移動度の新しい測定法の開発を目指した。本手法により、1Hz から数十 kHz にわたる広周波領域での単一コロイド粒子の移動度の周波数依存性が、少量のサンプルによって測定可能となる。さらにこれらの測定により、粒子表面における電荷のダイナミクスの理解、また周囲の媒質の粘弾性スペクトル測定が可能となることが期待される。

図 1 に、直径 1μm のシリカ粒子の水中での見かけの移動度μの実部と虚部の周波数依存性示す。低周波ではトラップの効果によりμがゼロになっている。そこで、この効果を除くためシリカ粒子の熱揺らぎから求めたコーナー周波数を用いて、図 1 に対して補正を行った結果を図 2 に示す。これらの結果から、10Hz から 1kHz の範囲で移動度に周波数依存性がないことが確認された。

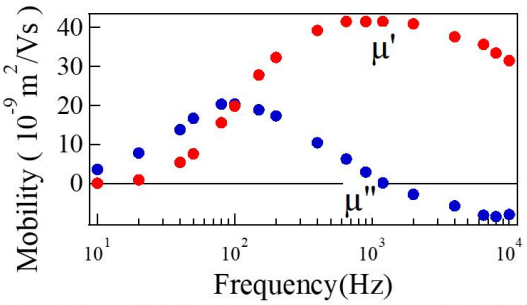


図1：水中での複素移動度の周波数スペクトル（補正前）

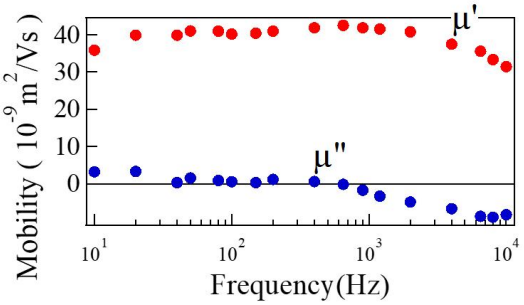


図2：水中での複素移動度の周波数スペクトル（補正後）

D-10　水の負の熱膨張の熱力学的機構

琉球大学理学部物質地球科学科 [A]　安富允[A]

通常の物質は、温度に関係なく、熱すると膨張して、冷やすと収縮する（正の熱膨張）。しかし、水の場合は、ちょっと様子が違う。水は、4 ℃以上では正の熱膨張をするが、それ以下の温度では負の熱膨張をする。すなわち、水は、4 ℃以下では熱すると収縮して、冷やすと膨張する。

真冬の寒冷地では、マイナス数十度まで気温が下がって、湖、川、池などの水が凍ってしまうが、氷が張るのは表面だけである。氷の下では水中生物が元気に泳ぎ回っている。これは、水の負の熱膨張のお陰である。このように、地球上の生物が、年中元気で生きていけるのは、このような水の不思議な性質のお陰である。

正の熱膨張の熱力学的機構については、すでに解明されているが、負の熱膨張については、何世紀にもわたる、大勢の研究者の努力にもかかわらず、謎のままであった。その間に、様々な説が提唱されてきたが、何れも現象論的記述に留まっているか、そうであってほしいという願望を述べているだけであり、現象の本質を捉えた説明はなされていない。最近、我々はこの謎を根源的に解明した。

ここで、何を示せば、熱力学的現象を根源的に解明したと言えるかについて論じてみたい。周知のごとく、物質の熱力学的性質は粒子間相互作用に依って決まるが、関連した諸々の物理量は熱力学の法則と統計力学の技法を使って導き出すことができる。したがって、実験結果を再現する粒子間相互作用を決定し、導かれた物理量と相互作用の関数形の間に成り立つ関係性を明らかにして、現象の背後にある熱力学的機構が明かされれば、熱力学的現象の謎は、根源的に解明できたと言える。本講演は、その成果についての総合報告である。

参考文献 [1] M.Yasutomi, Front. Phys. 2, 64 (2014). [2] M.Yasutomi, Front. Phys. 3, 8 (2015). [3] M.Yasutomi, Front. Phys.,4, 21 (2016). [4] M.Yasutomi, Physics of liquid water (大学院生向け教科書出版予定).

D-11 せん断流動場における MBBA 液晶の電気対流とレオロジー

大分大学　大学院　工学研究科 [A], 別府大学短期大学 [B]　津田洋介[A], 長屋智之 [A], 後藤義友 [A,B]

電気流体対流 (EHC) の存在下で、p-methoxybenzylidene-p-'-n-butylaniline (MBBA) の見かけの粘性は印加電圧が低い領域では増加し、高電圧領域では減少することが報告されている 1)。これは MBBA の負の誘電率異方性に起因する負の電気的応力により、粘度計が感知するせん断応力が減少するためと考えられる。さらに、低周波、高電圧領域の低せん断領域では粘性が負になる現象が見られる。一般に、液晶電気対流の振る舞いは印加電圧や周波数によって変化することが知られている。そこで、見かけの粘性が負になる領域で、せん断速度とせん断応力の関係の電圧、周波数依存性を調べた。せん断速度を制御して電圧依存性を調べた結果を図 1 (a)、せん断応力を制御して電圧依存性調べた結果を図 1 (b)、周波数依存性を調べた結果を図 2 に示す。これらの結果を詳細に報告する。(1) T. Nagaya, M. Niu,S. Nara,Yang Ho Na and H. Orihara, Phys. Rev. E,87, 012501-1-10(2013)

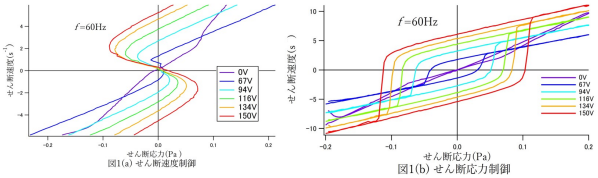


図1(a) せん断速度制御　図1(b) せん断応力制御

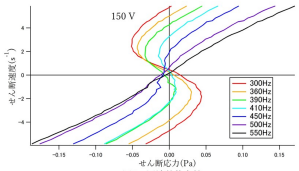


図2　周波数依存性

D-12 液晶電気対流の二値ノイズ印加による影響

大分大学　工学研究科 [A], 大分大学　工学研究科 [B], 別府大学　大分大学 [C]　野中祐輝[A], 長屋智之 [B], 後藤善友 [C]

非平衡散逸系の研究では、対流系がその典型的な対象とされており、有名なものの一つに液晶電気対流 (Electro Convection:EC) がある。EC は、異方性流体である液晶にある閾値以上の電圧を印加すると電気・流体力学的効果により起こる対流のことである。EC は電気制御現象であることから、非平衡散逸系におけるノイズの応答性を調べる対象として研究されてきた [1]。最近、九州工業大学の許らが、EC におけるノイズの応答性を報告した [2]。彼らの実験では、ホワイトノイズをローパスフィルタ (LPF) に通し有色ノイズにする。有色ノイズのノイズ強度と LPF の遮断周波数を変化させることでウィリアムズドメイン (WD) 発生時の閾値電圧の変化を調べた。その結果、以前の研究ではホワイトノイズの強度が増加するに比例して閾値電圧も増加していたが [1]、遮断周波数を 2kHz 以下の有色ノイズを印加することで閾値電圧が減少するという結果が観測された [2]。有色ノイズの効果は許らによって詳細に調べられているが、相関のあるノイズは他にもあり、二値ノイズの効果はまだ十分に調べられていない。そこで本研究では、ノイズの種類を二値ノイズにし、ノイズの相関時間と強度を変化させることで WD 発生するときの閾値電圧の変化を調べた。その結果、ノイズの強度を上げることによって WD 発生時の閾値電圧が減少することが観測された。発表では、EC に対する二値ノイズの効果について詳細に報告する。[1] S. Kai, T. Kai, M. Takata, and K. Hirakawa, J. Phys. Soc. Jpn. 47, 1379 (1979) H. Brand and A. Schenzle, J. Phys. Soc. Jpn. 48, 1382 (1980). T. Kawakubo, A. Yanagita, and S. Kabashima, J. Phys. Soc. Jpn. 50,1451 (1981). [2] Jong-Hoon Huh and Shoichi Kai J. Phys. Soc. Jpn. 83, 063601 (2014)

D-13 コレステリック液晶のトポロジカル欠陥

九大理 [A], 九大院理 [B] 林和気[A], 木村康之 [B]

コレステリック液晶は分子配向にらせん構造（らせんピッチを p とする）を有する複雑液体である。この液晶をセル表面で分子が垂直配向するように表面処理したセル厚 d のセルに閉じ込めると、p と d の大小によって様々な欠陥を伴った配向構造を自発的に形成する。さらに、電場を印加によっても構造が変化することが知られている。

例えば、$p > d$ であるセルでは図左に示すような縞状のパターンが形成される。このセルに低周波の高電場を印加したのち、電場を切ると図右上のような液滴が密充填した安定な構造へと変化する。さらにこの構造に高周波の高電場を印加すると、再び図右下のような縞状のパターンに戻る。

本研究ではこれらの欠陥構造を局所的に発生させることを目指し、さまざまな方法を実験的に検討した結果を報告する。

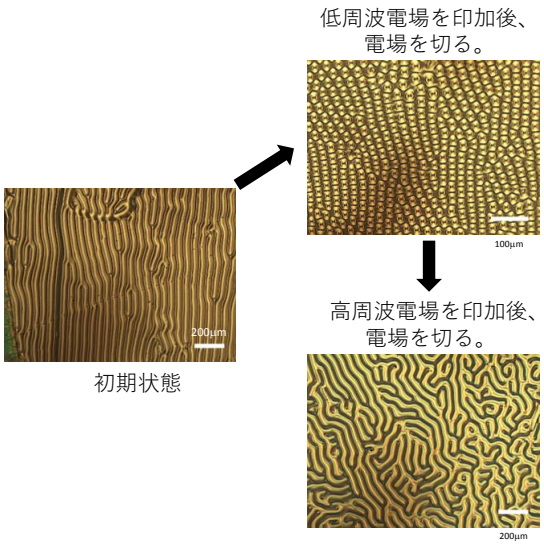


図. 垂直配向セル中でコレステリック液晶が形成するパターン。

D-15 環状分子の固液転移

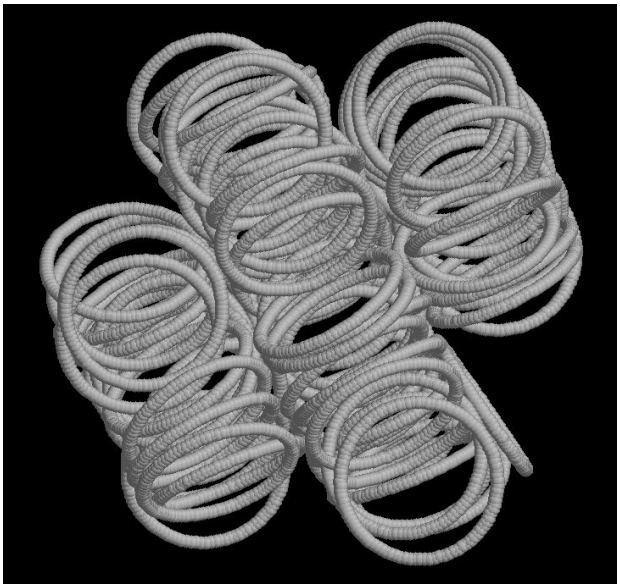
九大理 [A] 上戸美乃[A], 松井淳 [A]

円環状粒子で構成される系の巨視的な性質を調べるため、モンテカルロ法を用いた計算機シミュレーションを行った。異なる 2 つの円環状粒子の微小体積間には距離の 12 乗に反比例する斥力相互作用

$$\phi(r) = \epsilon \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12}$$

がはたらくとして、円環状粒子の間にはたらく斥力相互作用はそれぞれの粒子の微小体積の間に生じる斥力の和となる。ここで、σ は斥力が及ぶ距離スケールであり、円環の半径は 5σ とした。

高温では円環粒子の位置と向きは乱雑であるのに対して、低温では図に示すようなラメラ構造になることがわかった。



D-16　界面不安定性による星形パターンの形成機構

福工大工 [A], 千葉大理 [B], 九大総理工 [C]　田中光貴[A], 下川倫子 [A], 北畑裕之 [B], 坂口英継 [C]

近年、流体の流れと化学反応の 2 つの要因によって促される界面での不安定性に関する研究が注目されている。二流体の粘度や pH を変えることで特徴的なパターンが見える viscous fingering がその例として挙げられる。我々は、コロイド溶液（牛乳）に界面活性剤（2-メトキシメタノール）を 1 滴滴下すると、二流体界面に星形パターン（図 1）が自発的に形成されることを発見した。星形パターンのツノの数（波数）k はベース溶液の粘度μ と共に増加する（図 2)。星形パターンの形成メカニズムは①酸性の界面活性剤と牛乳コロイドの凝集、②凝集したコロイドの掃き寄せ、③コロイドの拡散といった 3 つの要素によると考え、数理モデルを提案した。数理モデルが与えるμ と k の関係は実験が与えるものと近い傾向を示した。

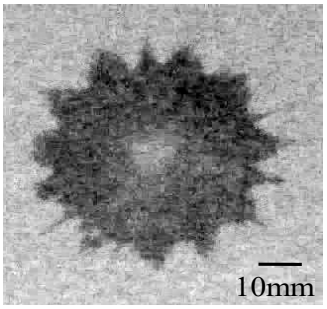


図1　星形パターン

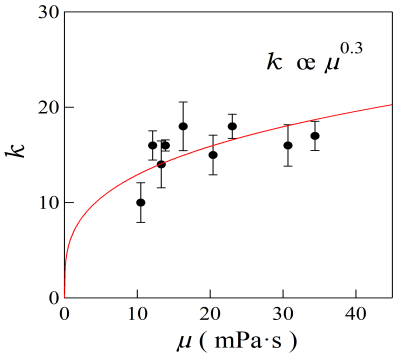


図2 粘度μ-波数kのグラフ

D-17　高濃度ペーストにおける亀裂の断面から見る記憶

福岡工業大学 [A], 九州大学 [B]　武藤靖弘[A], 吉岡拓馬 [A], 久藤祟晃 [A], 下川倫子 [A], 坂口英継 [B]

破壊とは、ものに何らかの力や影響が加わることにより、形状・機能・性質などが失われることである。破損事故などの再発を防ぐためには、破損原因を解明しなければならないが、その破損解析の最も有力な手段の一つが破面の観察とその解析である。破断面には破損するに至った原因と破損の経過などが刻まれており、これらが破損原因の解明に重要な手がかりを与えてくれる。我々は高濃度ペーストの乾燥時における低速破壊の破断面に着目した。図 1 は炭酸カルシウムペーストの亀裂断面の乾燥後の写真である。表面には羽毛状のような模様が観察されたことから、羽毛パターンを特徴づける角度 θ を測定した (図 1)。さらに、高濃度ペーストにおける乾燥破壊時の亀裂の進展速度 v を計測し、θ と v の関係を実験で調べたところ、比例関係を持つことが分かった (図 2)。

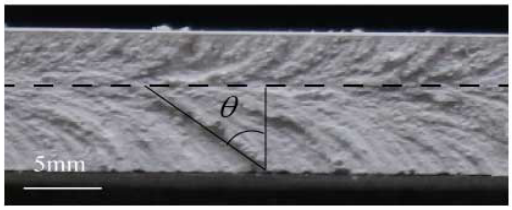


図1　炭酸カルシウムペーストの亀裂の破断

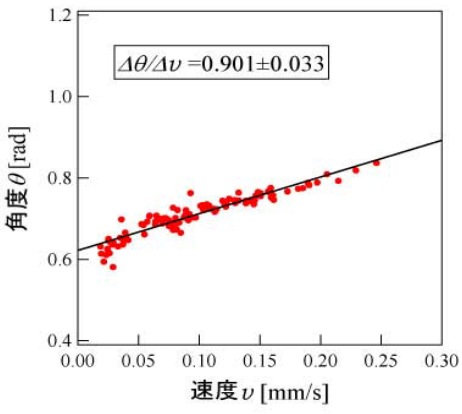


図2　進展速度υと角度θの関係

D-18 過傾斜ディラックコーン系での量子振動の理論

熊本大学教育 [A], 兵庫県立大物質理学 [B] 岸木敬太[A], 長谷川泰正 [B]

グラフェンは 質量ゼロのディラック電子系であり, ディラック点近傍でバンドはコーン形をしている [1]. 一方, 二次元有機導体の α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ も, 質量ゼロのディラック電子系として知られている [2,3]. この物質では, グラフェンとは異なりコーンが傾くことが示されている [2].

我々は [4], y 軸方向の一軸圧力 (P) が $P = 2.3$ kbar のとき, ディラックコーンが臨界的に傾き, バンド交差点付近の分散が, 三方向 ($\pm k_x$ と $-k_y$) に関しては線形, 一方向 (k_y) については二次曲線になっていることを見つけた. これを 3/4 ディラックコーン, 新しい交差点を 3/4 ディラック点と名付けた. ランダウ準位は $(nH)^{\frac{4}{5}}$ に比例することも示した [4,5].

$P \leq 3.0$ kbar では, ホールポケットと電子ポケットのフェルミ面が共存する補償された金属になっている. 伝導面に垂直磁場を印加した場合, ランダウ量子化が起こり, de Haas van Alphen (dHvA) 振動の出現が期待される. 特に, $P \sim 0.2$ kbar では, 1 つの電子ポケットが 2 つの小さな電子ポケットに分裂し, フェルミ面のトポロジーが変化する. その変化は, 磁気貫通現象に大きな影響を与えていることが予想される. さらに, そのトポロジー変化は Lifshitz 転移 [6] にも関連している.

しかしながら, そのような系の dHvA 振動はこれまで研究されていなかった. 電子ポケット間の鞍点で, サイクロトロン振動数が発散するので準古典論的な理解は困難になる. 本研究では, 量子論的に Lifshitz 転移近傍の dHvA 振動について調べる.

[1] K. S. Novoselov, *et al*, Science **306**, 666 (2004).
[2] S. Katayama, A. Kobayashi and Y. Suzumura, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 054705 (2006).
[3] N. Tajima, S. Sugawara, M. Tamura, Y. Nishio and K. Kajita, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051010 (2006).
[4] K. Kishigi and Y. Hasegawa, Phys. Rev. B **96**, 085430 (2017).
[5] Y. Hasegawa and K. Kishigi, arxiv:1809.02276.
[6] I. M. Lifshitz, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **38**, 1569 (1960) [Sov. Phys. JETP **11**, 1130 (1960)].

D-19 静水圧力下の α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の 3/4 ディラック

熊本大学教育 [A], 兵庫県立大物質理学 [B] 今福晴仁[A], 岸木敬太 [A], 長谷川泰正 [B]

二次元物質であるグラフェンは導電性や，強靭性から様々な分野で注目されている．この物性はグラフェン中の π 軌道の電子状態に起因しており，その電子は「質量のない *Dirac* 電子」と呼ばれ， フェルミエネルギー付近では四方向の分散が線形であり，バンドはコーン形をしている．それはディラックコーンと呼ばれている．「質量のない *Dirac* 電子」を持つ代表的な物質はグラフェンの他に二次元有機導体である $\alpha-(\mathrm{BEDT-TTF})_2\mathrm{I}_3$ がある [1].

$\alpha-(\mathrm{BEDT-TTF})_2\mathrm{I}_3$ の結晶軸の y 軸方向に一軸圧力を 3.0kbar 以上与えた場合，フェルミエネルギー付近の状態は，グラフェンと同じくゼロギャップ半導体になっているが，ディラックコーンはグラフェンとは異なり傾いている．さらに，一軸圧力を 2.3kbar 与えたときには，三方向の分散が線形であり，一方向の分散が二次曲線である特徴的なバンドが確認され，3/4 ディラックコーンと名付けられた [2].

本研究では，$\alpha-(\mathrm{BEDT-TTF})_2\mathrm{I}_3$ の静水圧力下での 3/4 ディラックコーンの存在の可能性について，拡張ヒュッケル法で得られた飛び移り積分 [3] 用いて，エネルギーバンド図を詳細に調べた．その結果，静水圧力が 7.5kbar のとき，下から 3 番目と 4 番目のバンドの接点付近で，3/4 ディラックコーンが存在することを明らかにした．

参考文献

[1] K. Kajita, Y. Nishio, N. Tajima, Y. Suzumura, and A. Kobayashi, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 072002 (2014)
[2] K. Kishigi, and Y. Hasegawa, Phys. Rev. B **96**, 085430 (2017)
[3] R. Kondo, S. Kagoshima, N. Tajima, and R. Kato, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 114714 (2009)