

領域略称名：量子液晶

領域番号：6101

令和3年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る中間評価報告書

「量子液晶の物性科学」

領域設定期間

令和元年度～令和5年度

令和3年6月

領域代表者 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授・芝内 孝禎

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3 研究領域の目的及び概要	5
4 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	7
5 研究の進展状況及び主な成果	9
6 研究発表の状況	14
7 研究組織の連携体制	19
8 若手研究者の育成に関する取組状況	20
9 研究費の使用状況・計画	21
10 今後の研究領域の推進方策	22
11 総括班評価者による評価	24

研究組織

(令和3年6月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	19H05822 量子液晶の物性科学	令和元年度 ～ 令和5年度	芝内 孝禎	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	15
A01 計	19H05823 量子液晶物質の開発	令和元年度 ～ 令和5年度	大串 研也	東北大学・大学院理学研究科・教授	6
B01 計	19H05824 量子液晶の精密計測	令和元年度 ～ 令和5年度	花栗 哲郎	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー	7
C01 計	19H05825 量子液晶の理論構築	令和元年度 ～ 令和5年度	紺谷 浩	名古屋大学・大学院理学研究科・教授	7
D01 計	19H05826 量子液晶の制御と機能	令和元年度 ～ 令和5年度	小林 研介	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授	6
総括班・総括班以外の計画研究 計 5 件					

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	20H05144 分子ダイマーダイポールが創成する量子スピン/電荷液晶	令和2年度 ～ 令和3年度	佐々木 孝彦	東北大学・金属材料研究所・教授	1
A01 公	20H05145 チタン酸ストロンチウム電場誘起伝導表面におけるネマティック超伝導の検証	令和2年度 ～ 令和3年度	野島 勉	東北大学・金属材料研究所・准教授	1
A01 公	20H05150 スピン軌道結合金属における新物質開発と電子液晶状態の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	廣井 善二	東京大学・物性研究所・教授	1
A01 公	20H05160 トポロジカル磁気構造に基づく量子液晶を具現する薄膜物質開発	令和2年度 ～ 令和3年度	松野 丈夫	大阪大学・大学院理学研究科・教授	1
A01 公	20H05161 常磁性液晶へのスピン注入による新機能創出	令和2年度 ～ 令和3年度	内田 幸明	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授	1
B01 公	20H05153 磁気圧電効果を用いた電荷液晶の観測	令和2年度 ～ 令和3年度	塩見 雄毅	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
B01 公	20H05158 多軸ひずみ同時測定で解明する量子液晶の異方的自己組織化の熱力学	令和2年度 ～ 令和3年度	米澤 進吾	京都大学・大学院理学研究科・准教授	1
B01 公	20H05162 複合自由度を有する超伝導における時間反転対称性の破れの観測とその制御	令和2年度 ～ 令和3年度	細井 優	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教	1
B01 公	20H05164 Application of the micro-fabrication technique to the study of nematicity and superconductivity	令和2年度 ～ 令和3年度	孫 悦	青山学院大学・理工学部・助教	1
B01 公	20H05165 ミュオンでプローブする対称性の破れと新奇な電子状態	令和2年度 ～ 令和3年度	足立 匡	上智大学・理工学部・教授	1
C01 公	20H05154 量子液晶におけるトポロジカル励起と創発現象	令和2年度 ～ 令和3年度	赤城 裕	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教	1
C01 公	20H05157 液晶秩序を発現する古典異方粒子系における相転移ダイナミクス	令和2年度 ～ 令和3年度	川崎 猛史	名古屋大学・大学院理学研究科・講師	1

C01 公	20H05159 現代的な多極子理論による高次多極子・ネマティック相とエキゾチック超伝導の研究	令和2年度 ～ 令和3年度	柳瀬 陽一	京都大学・大学院理学研究科・教授	1
C01 公	20H05163 多彩な対称性の破れが織りなす超伝導液晶の新奇動的応答	令和2年度 ～ 令和3年度	水島 健	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授	1
D01 公	20H05147 強相関 π 電子がつくる電荷秩序・強誘電ドメインの形成機構解明と光機能探索	令和2年度 ～ 令和3年度	伊藤 弘毅	東北大学・大学院理学研究科・助教	1
D01 公	20H05148 ネマティック超伝導体の薄膜化によるドメイン制御とマヨラナ粒子の観測	令和2年度 ～ 令和3年度	井上 悠	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス 製造領域・研究員	1
D01 公	20H05155 トポロジカルスピン液晶制御と巨大電子散乱現象	令和2年度 ～ 令和3年度	金澤 直也	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・講師	1
公募研究 計 17 件					

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

研究の学術的背景

棒状や円盤状の構造を持つ分子の集団において、固体と液体の中間状態として、液晶状態が現れることが古くから知られている。この液晶状態は、液体の持つ流動性と固体の持つ異方性を合わせ持つ状態であり、分子の方向が何らかの規則的な秩序構造を持ちながら、容易に形を変えることができる柔軟性を有しているという特徴がある。ここで、液晶に異方性が現れる一因は、分子の構造が棒状や円盤状といった方向性を持っていることにある。その点で、異方性は構成分子自体に自明に内在している。

これに対して、固体中の電子に着目すると、古典的には電子自体は方向性を持たないが、**量子力学的なスピン自由度や軌道自由度により方向性が出現し、電子集団全体として非自明な異方性を獲得する**場合がある。すなわち、量子力学的な粒子が多数集まり、相互作用を及ぼし合うと、新しい状態が創発するのである。特に近年、様々な固体物質の電子状態において、反強磁性や電荷密度波などのよく理解されている秩序ではなく、実体が未解明の秩序が報告されている。これらの新しい秩序は、**電子の液体状態と固体状態の中間的な性質を示すことから、古典的な液晶との強いアナロジーがある**。

例えば、ある種の強相関金属では、電荷ストライプや電子ネマティックとよばれる異方的な電子状態が観測され、結晶構造からは期待されない異方的な金属状態が現れる。磁性絶縁体では、絶対零度まで磁気秩序が現れない量子スピン液体の研究が盛んであるが、そのような状態でも結晶格子の回転対称性を破るスピン状態が示唆されている。また、電子対が形成される超伝導状態においても、非自明な異方性を持つネマティック超伝導や対密度波などの新奇な超伝導状態が盛んに議論されている。

本研究領域の目的および全体構想

このように様々な物質群で出現している液晶に類似した電子状態については、これまでは各論的に、強相関金属・スピン系・超伝導のそれぞれの分野で独立に研究されていた。本新学術領域研究では、これらを「**電荷液晶**」・「**スピン液晶**」・「**電子対液晶**」と整理し、**いずれも量子多体効果によって現れる点に着目し、「量子液晶 (Quantum Liquid Crystals, QLC)」という新概念によって統一的に取り扱う**（下図参照）。既存の分野を超えた新しい連携により、量子液晶の物性を解明すること、またその制御を可能にすることを目的としている。特に、量子液晶の基底状態を解明するとともに、様々な量子液晶に現れる普遍性と多様性の基礎学理を探究する。また、先端技術を駆使して量子液晶の素励起の解明と制御を可能にし、柔軟に変化する液晶の特性と量子性による高速かつ巨大な応答を利用した将来の新技术への基礎を築くことを目指している。本領域では、研究の方法論により以下の4つの研究項目に分類・組織化し、異なる物質を主な対象としてきた研究者を各項目に配置することで、新しい融合研究を促進する。

・研究項目 A01「量子液晶物質の開発」

固体化学の様々な合成手法を駆使して、量子液晶状態の舞台となる新物質の開発を行う。

・研究項目 B01「量子液晶の精密計測」

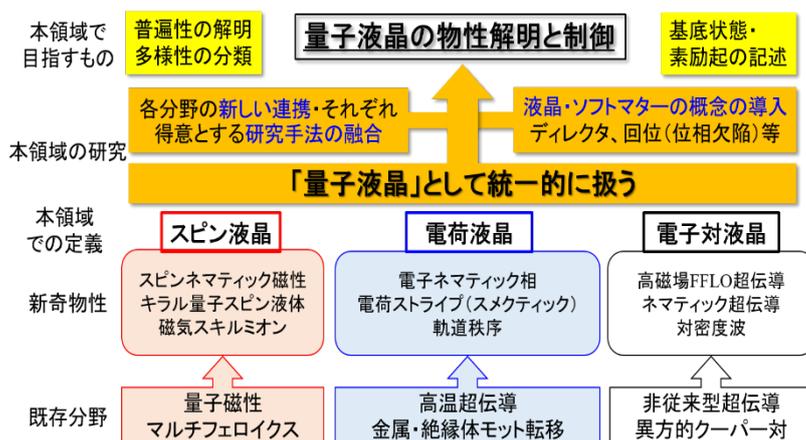
各種先端精密物性計測技術を用いるとともに、異なる技術を組み合わせた新しい測定手法を開発し、量子液晶電子状態の実験的解明を行う。

・研究項目 C01「量子液晶の理論構築」

様々な理論的方法を駆使して、種々の量子液晶電子状態の秩序パラメータの定式化、その量子揺らぎが他の物性に与える影響を研究し、物質および機能の設計を行う。

・研究項目 D01「量子液晶の制御と機能」

微細加工技術を用いた量子液晶のナ



ノサイエンス、および最近急速に発展してきた超高速光技術による状態制御と機能開拓を行う。

これらの連携研究により、開発した物質を精密計測し、理解した上で制御し、機能開拓への道筋を総合的に探究する舞台を提供することで、量子液晶の物性科学の基礎学理の構築を目指す。

革新的・創造的な学術研究の発展

液体と液晶を比較すると、流動性を持つという特徴は共通しているが、水などの液体ではどの方向から見ても内部の構造は区別できないという点で対称性が高い状態である。一方で、液晶では見る方向によって見え方が異なり、対称性が低い状態になっている。つまり、「対称性の破れ」によって2つの状態を区別することができる。研究分野の位置づけとしては、**液体を対象とした物理学は「流体力学」**によって記述され発展してきたが、**液晶を対象とした分野はそのパラエティや階層構造の多様性により多岐にわたっており、容易に形を変えることができる柔軟性を有している特徴から「ソフトマター」**という一大物理分野が形成されている。歴史的には、ノーベル物理学賞受賞者の de Gennes らにより、このように複雑な系でも相転移やスケールリングなどの美しい理論解析が可能であることが示され、液晶ディスプレイなど様々な応用がなされている。

一方で、**液体に対して量子力学的な多体効果を取り入れた「量子流体・量子液体」**の科学が近年発展している。ヘリウムを極低温まで冷却しても固体にはならず、量子揺らぎによるゼロ点振動の効果により液体状態を保つことが知られている。さらに、固体物質中に多数含まれる電子についても、極低温においても液体と類似の流動性を持った状態が実現する。例えば、金属では電子は自由に動き回ることができ、電子間のクーロン反発力はスクリーニングされ、「フェルミ液体」論で記述できる状態となる。また、絶縁体においては、各サイトに局在した電子のスピンの向きが秩序だてて固定される強磁性や反強磁性などの状態は、流動性がないスピンの固体状態としてとらえられるが、例えば反強磁性的な相互作用を持つスピンを三角形に配置しようとしてもフラストレーションが生じるなどの理由により、特殊な状況ではスピンの向きが絶対零度まで固定されない量子スピン液体の状態も起こりうる。このような量子多体効果が重要な「量子流体・量子液体」の分野では、超伝導や量子ホール効果などの重要な概念が生み出され、確立されており、量子液体の研究は物性物理学において大きな役割を果たしてきたといえる。

本領域の研究対象である「**量子液晶**」は、**量子液体に対して、回転対称性や並進対称性の破れを導入した状態であり、液体と液晶を区別する「対称性の破れ」と液体と量子液体を区別する「量子多体効果」の両方を含んだ学術領域**と考えることができる。このような新しい学術領域を開拓することにより、革新的・創造的な学術研究の発展が期待される。

領域設定期間終了後に期待される成果

本新学術領域「量子液晶」では、量子多体効果により出現する、異方的で容易に形を変えることができる柔軟性を有する電子状態に関する新しい**普遍現象を理解し、豊かな多様性を探究するとともに、新規物性の開拓**を進める。対象とする物質群は、銅系・鉄系高温超伝導体、 $4d$ 、 $5d$ 、 f 電子系物質、有機伝導体、フラストレーションを持つスピン液晶候補物質、キタエフ型スピン液体、スキルミオン物質、マルチフェロイック物質など広範囲にわたる。これらの様々な系に共通する物理概念の構築と、それぞれに特徴的な多様性の理解が進むことにより、期間終了後には、物性物理学の教科書に新しい章が付け加えられることが期待される。また、上で述べたような研究分野の位置づけから、「量子液晶」の研究は、ソフトマター分野の量子版と位置付けることができ、**量子液晶の学理が構築**されれば、それ自体が学術的に大きな意義を持つ。量子液体における流動性を保ちながら、対称性を破った液晶との類似性が現れる電子状態を広く研究することで、量子液体とは異なった新しい概念や機能が生まれることが期待される。

また、新しい基底状態を解明し、素励起を制御することは、量子効果を利用した将来の新技术への基礎を築くものである。古典液晶では、柔軟性を生かした偏光制御などの応用がなされているが、その速度は分子の回転運動によって律速される。一方で、電子の多体効果による量子液晶では、外場により電子状態そのものが容易に変化し、**超高速かつ巨大な応答**が期待される。このように量子液晶は、固体中に実現したソフトな電子状態として捉えることが可能であり、古典液晶を超えた機能を示すポテンシャルがある。

期待される成果の具体例としては、量子液晶の素励起を媒介とした新しい電子対形成が可能であることが示せれば、通常の超伝導とは異なる高温超伝導の設計指針が与えられる可能性がある。また、キタエフ型スピン液体で発見されたマヨラナ粒子は、トポロジカル量子コンピュータ実現への重要な鍵と考えられており、それを基にした対称性を破る量子液晶では、マヨラナ粒子の新たな制御技術に結び付く可能性がある。さらに、量子液晶の異方性を高速制御することにより、量子波ダイオードなどの応用が考えられ、量子情報伝達に役立つ新機能の開拓が期待される。

4 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見) <公表分>

本研究領域は様々な物質群で発見されている液晶的な電子状態に着目し、量子多体効果による電子系の自己組織化現象を統一的に取り扱う基礎学理を明らかにすることを目指している。絶縁体、強相関金属、超伝導体などの幅広い物質系において古典液晶系と類似の空間的変調を伴う現象を取り上げ、それらを「スピン液晶」、「電荷液晶」、「電子対液晶」という新奇現象に分類し、これら3種類の液晶状態を「量子液晶」という言葉でまとめ、統一概念を形成することは、物性物理学分野において日本発の潮流を生む学理として期待できる。さらに、量子多体効果により出現する異方的で柔らかな量子液晶の電子状態は外場に敏感に変化し、超高速な巨大応答が期待できるデバイスが出現すると予想され、応用面でも波及効果が期待される。

量子液晶という新概念の世界的な浸透を目的とし、量子液晶チャンネル(QLC channel)というホームページ上でのビデオ配信を含めた情報配信が予定されており一定の成果が期待される。

研究組織は物質開発、現象の精密測定、理論、制御と機能探索の四つの計画研究から構成され、量子液晶の物理を多面的に研究する構成となっている。一方で、古典液晶物理学の研究者層を厚くし、電子物性物理学と古典液晶物理学の相乗効果により新奇概念を構築することが望まれる。

所見に対する対応状況

審査結果の所見にて、一定の成果が期待されると評価された情報発信については、計画通り「量子液晶チャンネル(QLC channel)」というビデオ配信サイトを初年度から立ち上げ、まず新学術領域の内容の説明、および2019年9月に名古屋大学で開催した公募説明会の様子を動画にて公表した。その後、2020年3月以降は、領域メンバーによる研究成果の平易な解説を随時公開している。2021年6月までに、量子液晶の一般的な説明を含む解説、英語による成果解説、および研究室の実験デモなどを含めて合計22本のビデオを常時配信し、合計の視聴回数は9,500回を超えている。複数のSNSや、日本物理学会の講演などでもこのQLCチャンネルの取り組みや配信動画が取り上げられるなど、量子液晶の新概念は浸透し始めていると考えている。

また、所見で指摘を受けた古典液晶物理学者の研究者層を厚くすることに関しては、領域主催の研究会などの情報を、日本物理学会領域12の関係者により運営されているソフトマター物理のメーリングリストおよび化学物理のメーリングリスト、さらに日本液晶学会のメーリングリストにアナウンスを行っている。また、公募情報についても、上記メーリングリストやQLCチャンネルを通して広くアナウンスした結果、2020年度から2年間の第1期公募研究において、**古典液晶の実験研究(A01内田)および理論研究(C01川崎)を迎え**、研究会などで相互理解を深める活発な議論を行っている。さらなる取り組みとして、日本液晶学会に所属するA01公募研究の内田を通して、本新学術領域研究の取り組みについて、年4回発行されている**日本液晶学会誌「液晶」の2021年7月号にて、「量子液晶」特集**を組むこととなり、領域メンバー8名(芝内、大串、木村、花栗、佐藤卓、紺谷、求、有馬)による5つの解説が掲載される予定となっている。この解説を通じて、古典液晶物理学の研究者とのさらなる研究交流を促進する。

(留意事項) <未公表分>

・研究内容は主として電子系の研究からの発展であるため、もう一方の柱であると思われる古典液晶物理側からのアプローチを有効にする、かつ、無機物質系だけでなく有機物質系における量子液晶状態についても研究の裾野を広げることを介して、異分野研究者や若手研究者などを公募研究等で積極的に取り込むなど、開かれた領域運営が望まれる。

・空間軸、時間軸の観測装置が、量子液晶の本質をつかむために十分な性能を、5年間で引き出せるかがキーポイントになる。特に空間的なヘテロジニティが本質的に内在される場合や、高速な揺らぎによって平均化が起こっているようなケースの場合、観測に引っかけられない可能性も危惧されることから、観測装置の性能の再検証を行い、設計・製作・観測の綿密な年次計画に基づいた確実な実行が必要である。

留意事項に対する対応状況

留意事項前半に関しては、第1期公募研究において、**無機固体物質系以外を主な研究対象としている研究者5名が参入**し、本新学術領域研究でカバーできる分野の範囲が大きく広がった。上で述べた**古典液晶・ソフトマターの研究者2名(実験、理論研究者それぞれ1名)**のほか、**有機物質・分子性物質の**

物性研究を専門とする実験研究者2名（A01 佐々木、D01 伊藤）、さらにヘリウム超流動を含む量子液体をベースとする理論研究を行っている C01 水島の参加により、領域研究のすそ野が広がり、より広い視野での議論が可能となっている。また、令和2年度より C01 池田が受け入れている博士研究員（渡部）は有機物質を主な対象とした理論研究を専門としており、有機物質系の実験・理論の連携も可能な体制となっている。また、第1期公募研究では、参入した17名の研究代表者のうち、39歳以下の若手研究者は8名に上る。また、このうち1名は外国人研究者であり、本研究領域のダイバーシティを強化できたと考えている。令和4年度よりスタートする第2期公募研究でも、本留意事項に留意した広い研究分野にまたがる募集を行う予定である。

留意事項後半に関しては、精密測定、および制御と機能を担当する B01、D01 班の計7名が空間・時間軸の観測装置の開発・計測を行っており、以下のような綿密な計画を立て、研究を遂行している。

B01 花栗 原子レベルの空間分解能を有する希釈冷凍機中走査型トンネル顕微鏡（STM）を用いた、極低温磁場中の超高エネルギー分解能電子状態観測が既に可能となっており、0.1 meV 以下の分解能で準粒子干渉（QPI）スペクトロスコーピーを用いた研究を推進中である。現在、量子液晶の揺らぎに伴うトンネル電流のノイズ計測の測定系のテスト中であり、今年度完成を目途に研究を進めている。

B01 廣理 高強度 THz 光と STM の技術を融合した時間分解 STM の開発を進めており、THz-STM 装置専用の STM ヘッド部分の作製を完了し、設計・作製した超伝導マグネット付きのヘリウムデュワーの動作チェックも完了した。現在、高繰り返しレーザーパルスによる高強度 THz パルスの発生実験を行い、STM 探針への導光を観察するための顕微鏡観察システムを構築中である。今後、シリコンなどの標準試料を対象とした STM 実験を開始するとともに、THz パルスビームを STM 探針に照射し THz トンネル電流信号を観測するなどの動作確認テストを経て、世界で初めての高磁場環境下で THz パルスビームを導入した時間分解 STM 計測を実現させる。

B01 和達 現在、初年度に導入した 1030 nm のレーザーを用いた、時間空間分解測定の開発を行っている。特に、1030 nm の波長をポンプ光として、第二高調波発生による 515 nm の波長をプローブ光として顕微鏡光源として用いることにより、時間と空間を同時に分解する測定を行う。これにより、量子液晶の異方性を、レーザー照射により制御するフェムト秒スケールの動画としてとることができる。さらに、このレーザーの高次高調波発生により、超短パルスの軟 X 線までを実験室でカバーし、X 線自由電子レーザーと併用してダイナミクス研究をさらに加速させることを目指している。

B01 清水 量子液晶の新たな磁気プローブとして、窒素欠陥中心ダイヤモンドを用いたナノスケールの磁気イメージングシステムの構築に取り組んでいる。すでに、室温においてマイクロメートルの磁気計測に成功しているが、今後は D01 小林と連携し、低温かつナノスケールの計測技術の開発を推進する予定である。これまで取り組んできた従来型の核磁気共鳴分光については、新たに多重磁気共鳴のプローブ開発に取り組み、非平衡フロケ状態における量子液晶について開拓していく。

D01 石坂 量子液晶の時空間構造を計測するため、パルスレーザーとフォトカソード電子銃を用いたポンププローブ型の超高速時間分解電子顕微鏡の開発を行っている。現在までに、明視野像計測で時間分解能 5 ps、空間分解能 3 nm を達成した。また、ローレンツ像計測による磁気イメージングで、時間分解能 10 ns、空間分解能 30 nm を達成している。今後は、フェムト秒レーザーを用いたピコ秒時間分解能の磁気イメージングに取り組み、より高速な磁気パターン計測に挑む。

D01 戸川 量子液晶が示す空間的なヘテロジニティとダイナミクスの相関を解明すべく、透過型電子顕微鏡を用いたナノスケール（空間分解能 ~ 1 nm）での実空間観察とナノスケールの微小試料での 40 GHz までのダイナミクス計測を併用している。必要に応じて共同利用機関が提供する電子顕微鏡装置を用いることで 5 K の低温まで対応できることを実証済みである。現在、さらに時間分解能を向上させるため、サブ THz 帯での光学測定との共同実験を検討している。

D01 小林 空間的なヘテロジニティを観測するための具体的な方策として、ダイヤモンド中の窒素空孔結晶欠陥（NV センタ）を用いた量子スピン顕微鏡の開発を行っている。現在までに、試料表面の磁場・温度を分解能 1 μ T 以下、空間分解能 1 μ m 以下、温度 1 K 以下で、イメージングできることを実証した。今年度は、低温での測定に取り組む。来年度～最終年度にかけて B01 清水と連携し、NMR で確立しているパルスシーケンス技術と組み合わせることによって、時間的なゆらぎ（マイクロ秒以下）のその場観測について取り組む。一方、現在までに開発してきた電氣的な非平衡雑音測定は、分解能（現時点では 10^{29} A²/Hz）のさらなる向上を行っている。測定感度の向上により、量子液晶物質を母体材料とするメゾスコピック系における、より微小な電氣的ゆらぎの検出を目指す。

5 研究の進展状況及び主な成果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

本新学術領域研究では、強相関金属、磁性絶縁体、超伝導体など、様々な固体物質中に出現する、液晶と類似した電子状態をそれぞれ電荷液晶、スピン液晶、電子対液晶と整理し、「量子液晶」と統一的にとらえることにより、その普遍性の解明と多様性の分類を通して、物性を解明し、状態制御による機能開拓を目指し、量子液晶の基礎学理を構築することを目的としている。

現在までの研究で、**量子液晶の多様性・普遍性に関する大きな進展**を見せている。一部を紹介すると、まず第1に、いくつかの**新奇な量子液晶状態が見いだされ、今までにない量子液晶の多様性**が示された。例えば、鉄系超伝導体では今まで最近接の鉄元素を結ぶ方向の量子液晶が知られていたが、それとは45°異なる方向を示す量子液晶状態を発見した。これは、化学組成などを調整することにより、任意の方向に量子液晶の向きを制御できる可能性を示唆する結果である。また別の例では、イリジウム酸化物において、原子間にループ電流が流れ、アナポールとよばれる極のないナノ電磁石が実現した量子液晶状態が発見されている。第2に、**多様な量子液晶の分類を理論的に整理するための指針として、量子液晶構造因子・形状因子という物理量が提案され**、これにより種々の量子液晶が実現する普遍的機構の理解へつながることが期待される。第3に、量子液晶の普遍性を考える上で重要な多体効果を、具体的に調べる方法として、**非平衡伝導特性から多体相関を定量化する実験手法**が提示された。第4に、**量子液晶の揺らぎを発現機構とする非従来型の超伝導が実現**することが実験的に示唆された。これ以外にも、新物質の開発や各種新しい研究手法の開発が進むなど、各研究項目で多角的な研究が順調に遂行されている。

研究項目 A01

A01班では、非自明な対称性の破れを示す新奇量子液晶物質の開発を進めている。これまでに、三つのターゲットに定めた量子液晶に関して、以下のような新奇な電子状態の開拓に成功している。

- **電荷液晶**: $\text{NdCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ の電荷移動現象、梯子型鉄系化合物のキラル軌道秩序、 CsW_2O_6 の電荷秩序
- **スピン液晶**: $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4 \cdot \text{BaMn}_2\text{As}_2$ の磁気四極子秩序、 $\text{LiInCr}_4\text{S}_8 \cdot \text{AgCrS}_2$ の巨大磁場誘起歪
- **エキゾチック超伝導**: $\text{Mg}_2\text{Ir}_3\text{Si}$ ($T_c = 7 \text{ K}$)、 $\text{Sc}_{20}\text{C}_{8-x}\text{B}_x\text{C}_{20}$ ($T_c = 7.6 \text{ K}$)、Ca フリー銅酸化物 ($T_c = 110 \text{ K}$)

計画年度内に達成すべき三つのマイルストーン(新しい金属絶縁体転移系・導電性マルチフェロイクス・室温量子液晶物質)に関しても順調な進展がある。新しい金属絶縁体転移系としては、**キタエフスピン液体と強相関半金属の間を繋ぐ系 $\text{RuBr}_3\text{-RuI}_3$ の開発**に成功しており、今後のさらなる展開が期待できる。また、**導電性マルチフェロイクス BaMn_2As_2 の同定**に成功しており、計画年度内に新奇な量子輸送現象の開拓が見込める。さらに、室温量子液晶物質としては、**室温付近で電荷移動に伴う巨大な潜熱を示す $\text{NdCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ 、室温で原子配置の回転歪みで特徴づけられる秩序「フェロアキシャル秩序」を示す NiTiO_3 など、複数の物質の発見に成功した。**

研究項目 B01

量子液晶は、時空間の階層構造や特異な励起状態を持つことが期待される。B01班は、このような量子液晶の特徴を、精密物性計測技術を糾合するとともに新しい計測技術を開発することによって物質横断的・時空間階層的に研究し、分野や物質の枠を超えた普遍的な量子液晶の物理の構築に資するデータとして提供することを目的としている。具体的には、**(a) 量子液晶の空間階層構造の解明、(b) 量子液晶の素励起とダイナミクスの解明、(c) 新しい量子液晶の探索、(d) 新実験手法の開発、**を行う。これまで、各班員がこれまで培ってきた技術を利用して項目(a)-(c)に関する研究を展開してきた他、項目(d)に対する環境整備や予備実験を行った。

研究項目 C01

C01班では、多彩な量子液晶の根底にある普遍的機構の解明を目指し、物質横断的な統一的理論体系を構築することで、量子液晶の物性科学の発展に寄与するとともに、他の実験班に対する理論的サポートを行う。その実現に向けて、具体的には、**(a)電荷液晶・電子対液晶の発現機構、および創発現象の研究 (b)スピン液晶秩序の発現機構、および創発現象の研究 (c) 動的性質・非平衡現象・観測理論の確立 (d)**

第一原理理論による量子液晶の物質設計の研究を計画的に遂行し、現時点まで着実な進展を見せている。また量子液晶における量子効果の重要性を明らかにするため、古典液晶の研究を遂行している。

研究項目 D01

D01 班は、ナノサイエンスによる電氣的アプローチと超高速光技術に基づく分光的アプローチを組み合わせ量子液晶研究を推進している。領域設定期間の最終目的は、量子液体という特異な柔軟性を持つ電子状態の巨視的な性質を制御する手法を確立し、物性科学の新しい可能性を創出することである。そのために、具体的には **(a) 量子液晶の制御と機能開拓のための先端技術開発、(b) 量子液晶の制御の実証：素励起と配向性、(c) 量子液晶の機能開拓=量子液晶テクノロジー**の3項目に沿って研究活動を展開している。中間評価実施時までには、各項目において具体的な成果を積み重ね、後半の研究につなげることを目指して、研究を推進してきた。実際、以下に示すようにそれぞれにおいて着実な進展を見ている。

(2) 本研究領域により得られた成果

本領域の2年間の研究により、多岐にわたる研究成果が得られ、**258編の論文、114件の国際会議招待講演**などで発表された。公表された論文は、*Nature* (3編) *Science* (3編) *Adv. Mater.* (1編) *Adv. Func. Mater.* (2編) *ACS Nano* (1編) *JACS* (1編) *Phys. Rev. X* (5編) *Sci. Adv.* (6編) *Nat. Commun.* (12編) *Nano Lett.* (1編) *PNAS* (2編) *Phys. Rev. Lett.* (9編) などハイインパクトジャーナルに多く掲載され、Web of Science 調べでは既に7編の論文が高被引用論文 (Top 1%、うち1編はTop 0.1%) に選出されている。本新学術領域の計画研究メンバー間、および公募研究メンバーを含む共同研究も多く実施されており、**34編の共同研究論文が出版**されている。以下、各研究項目の具体的な研究成果について述べる。

研究項目 A01

計画研究 (6名)

大串は、梯子型鉄系化合物 BaFe_2X_3 ($\text{X}=\text{S}, \text{Se}$) において、低次元性・多軌道性・強相関電子効果の協奏により、多彩な磁気秩序/軌道秩序を示すことを明らかにした (B01 **芝内・細井**との共同研究)。特に、ブロック型磁気秩序/プロペラ型軌道秩序は、マルチフェロイクス現象を示すことを明らかにした [*Phys. Rev. B* **102**, 035104 (2020)]。また、導電性マルチフェロイクス BaMn_2As_2 における電気磁気効果に起因する新奇な磁気輸送現象を発見した [固体物理 **55**, 623 (2020)]。

島川は、遷移金属カチオンが秩序配列した酸化物 $\text{NdCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ が、電荷移動に伴う電荷秩序とスピン秩序を起こし、この際の磁気モーメントの変化に伴う磁気エントロピーの変化が大きな潜熱を発生することを明らかにした。電荷転移温度が圧力下で変化することから、この潜熱は圧力熱効果として利用でき、高効率な熱制御を実現できることも実証した [*Adv. Func. Mater.* **31**, 2009476 (2021)]。

永崎は、特徴的な構造や元素の組み合わせを有する新規超伝導体の探索を進め、 SrPd_3P をはじめとするアンチペロブスカイト型リン化合物超伝導体 [*Inorg. Chem.* **59**, 12397 (2020)]、軽元素である B と C を含む超伝導体 $\text{Sc}_{20}\text{C}_{8-x}\text{B}_x\text{C}_{20}$ [*Inorg. Chem.* **59**, 14290 (2020)]、Ca を含まない超 100 K 級銅酸化物超伝導体 [*Commun. Mater.* **2**, 13 (2021)] などの新超伝導体を発見した。

木村は、磁気四極子秩序を示す反強磁性体 $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ を対象として、可視光領域における非相反線二色性の発現・磁気四極子の符号反転に伴う線二色性の符号反転・これらの現象を利用した磁気四極子ドメイン構造の可視化に成功した [*Commun. Mater.* **1**, 39 (2020)]。また、電場変調イメージング技術を応用した電気旋光効果測定により、 NiTiO_3 における「フェロアキシシャル秩序」に起因するドメイン構造を可視化することに成功した [*Nat. Commun.* **11**, 4582 (2020)]。

工藤は、新奇超伝導状態を探索するため、三角形ネットワークとカゴメネットワークを持つ新物質の開発を行なった。秩序型ラーベス相構造に着目した新物質開発により、完全秩序型 $\text{Mg}_2\text{Ir}_3\text{Si}$ [*J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 013701 (2020)] と部分秩序型 $\text{Mg}_2\text{Ir}_{2.3}\text{Ge}_{1.7}$ [*J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 123701 (2020)] を発見した。これらは Ir のブリーディングカゴメネットワークを持ち、それぞれ超伝導転移温度 7 K、5.3 K の新超伝導体である。さらに、Pt ニクタイトの多形現象に着目して物質開発を行い、Pt の三角形ネットワークを持つ stuffed CdI_2 型 $\text{Pt}_{1-x}\text{Bi}_x$ (転移温度 2.4 K) [*J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 063706 (2021)] を発見した。

岡本は、パイロクロア酸化物 CsW_2O_6 において、分数の電子数をもつ状態を利用して固体中で正三角形の分子が形成される新しいタイプの電荷秩序現象を見出した [*Nat. Commun.* **11**, 3144 (2020)]。また、ブリーディングパイロクロア $\text{LiInCr}_4\text{S}_8$ および三角格子 AgCrS_2 が、反強磁性体であるにもかかわらず大きな磁場誘起歪を示すことを発見した。これらは、幾何学的フラストレーションの効果により現れる新しいタイプの磁歪現象である [*J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 073708 (2020), *Appl. Phys. Lett.* **118**, 142404 (2021)]。

公募研究 (5名)

佐々木は、強相関パイ電子系有機物質における幾何学的フラストレーションと乱れに誘引されて発現する量子液体状態に対して、エックス線照射により導入した分子欠陥による乱れ効果をエックス線ホログラフィ手法により局所乱れ構造として可視化し明らかにした[*Phys. Rev. B* **103**, 214106 (2021)]。

野島は、SrTiO₃(100)電場誘起表面の低キャリア密度領域（単位胞面積当たり約 0.3 個以下）において、強誘電性と 2 次元的金属性が共存すると特異な輸送特性現象を見出した。この共存状態は、電気抵抗の温度ヒステリシスや大きな時間緩和だけでなく、一方向（非相反性）を伴うこと、より低温において反対称スピン軌道相互作用と結合することを明らかにした。

廣井は、スピン軌道結合金属であるパイロクロア酸化物 Cd₂Re₂O₇において、ピエゾ素子を用いた正方晶ドメインの制御を行い、奇パリティ多極子相の格子及び電気伝導性の異方性を明らかにした[*J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 114711 (2020)]。また、2つの低温正方晶相の間に斜方晶が存在する事を見出した。

松野は、強いスピン軌道相互作用を持つ SrIrO₃ の薄膜を、面内異方性を持つ基板上に合成した。強磁性金属 CoFeB との界面において、強磁性体の磁化と非磁性体のスピン流との相互作用による生ずるスピンホール磁気抵抗を測定することで SrIrO₃ の持つ電流-スピン流変換効率を決定し、SrIrO₃ が Pt と同程度の高い変換効率を持つことを明らかにした。

内田は、常磁性液晶に特有の磁気特性である磁気液晶効果の起源を明らかにした。常磁性液晶においては、分子運動と相互作用の不均一性によって、分子間相互作用ネットワークが形成されることを、電子常磁性共鳴分光法と分子動力学シミュレーション、密度汎関数理論計算を組み合わせで解明した[*J. Phys. Chem. B* **124**, 6175 (2020)]。

研究項目 B01

計画研究 (7名)

- (a) 磁気トルク・ネマティック感受率測定により、銅酸化物高温超伝導体 HgBa₂CuO_{4+δ}及び鉄系超伝導体 Ba_{1-x}Rb_xFe₂As₂ において、従来と異なる方向を持つネマティック状態を発見した。また、イリジウム酸化物においてアナポール秩序を見出した (笠原・芝内)。さらに、鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x のネマティック量子臨界点近傍で超伝導転移温度の増大を見出し、量子液晶揺らぎによる超伝導の実現を実証した他、Te 置換に伴う電子状態変化を、準粒子干渉効果を利用して調べた (芝内・花栗)。また、GdRu₂Si₂ のスキルミオン格子形成に対する伝導電子の役割を STM によって調べた (花栗)。
- (b) 量子スピン液体候補物質 α-RuCl₃ に対する NMR によって、分数化した準粒子の根拠となる 2 種類のスピギャップの存在を突き止めた他、価電子結合固体に関する新しい知見を得た (清水)。また、非弾性中性子散乱によって、低次元量子磁性体 Ca₃ReO₅Cl₂ におけるスピノン束縛対を確認した。さらに、電流下時分割中性子小角散乱を用いて、MnSi のスキルミオンのスローダイナミクスを明らかにした (佐藤)。高速ダイナミクスでは、SACLA を利用して鉄白金薄膜・コバルト白金超格子薄膜において元素別スピンドダイナミクスを観測し、白金の消磁の時定数が鉄やコバルトよりも長いことを発見した他、ユーロピウムの化合物の価数変化の観測に成功した (和達)。
- (c) 未踏の強磁場・低温領域における熱伝導率や STM の測定システムを立ち上げ、鉄系超伝導体 FeSe において、電子対液晶の一形態と考えられる Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov 相が形成されていることを見出した (笠原・芝内・花栗)。また、正方格子 J₁-J₂ フラストレート磁性体候補物質と目される酸化硫酸バナジウム物質群を見出した (佐藤)。
- (d) 低温強磁場で動作する時間分解 THz-STM の開発に着手し、基本設計と STM ユニットの製作を終えた他、励起レーザーや THz パルスビームを超伝導磁石内の STM 探針に制御して照射するために必要なイメージ転送実験に成功した (廣理)。また、レーザーを用いて実験室で量子液晶のフェムト秒とナノメートルの時間空間分解測定を行う環境整備を行った (和達)。二重共鳴法を用いた光検出磁気共鳴システムの検出感度向上も行った (清水)。

公募研究 (5名)

- (a) 銅酸化物超伝導体 La_{2-x}Sr_xCuO₄ における熱電輸送特性から、擬ギャップとネマティシティの関連に関して知見を得た (足立)。また、ネマティック超伝導体 Sr_xBi₂Se₃ のネマティックドメイン構造を一軸ひずみによって制御することに成功した (米澤)。さらに、梯子型鉄系超伝導体 BaFe₂S₃ における軌道スイッチング現象を弾性抵抗応答によって解明した (細井)。
- (b) FeSe_{1-x}S_x 薄膜における μSR 測定から磁気秩序を観測し、超伝導、磁性、ネマティシティの間の関連を示唆する結果を得た (足立)。
- (c) 電流誘起ネマティック状態探索の過程において、反強磁性金属 EuMnBi₂ が低温で典型的な圧電材料に

匹敵する大きさの磁気圧電効果を示すことを見出した（塩見）。また、反転対称の破れた超伝導体 PbTaSe_2 のトポロジカル表面状態におけるネマティック超伝導状態の兆候を見出した（孫）。

(d) 自発的な結晶ひずみの多軸同時測定が可能な Fiber Bragg Grating 技術を開発した（米澤）。

研究項目 C01

研究計画（7名）

紺谷は、平均場を超えた高次多体効果による電荷液晶形成機構を精力的に研究した。対称性を仮定せず液晶秩序変数を一意に決定する目的で、汎関数繰り込み群および拡張密度波方程式に基づく理論を新規開発した。その結果、ネマティック秩序を与える d 波液晶（ボンド）秩序に加え、渦状カレント秩序を与える p 波液晶秩序が、各種ハバードモデルで出現することを見出した。後者に基づき、銅酸化物高温超伝導体や Ir 酸化物における実験事実を説明することが出来た。

遠山は、動的密度行列繰り込み群などの大規模数値計算により量子液晶状態での動的・熱力学的性質を明らかにした。銅酸化物高温超伝導体のストライプ状態における非弾性中性子散乱スペクトル構造の再現や、パルス光により生成される電子状態の異方性を理論的に再現した。さらにモット絶縁体の動的スピン構造因子の時間変化を計算し、運動量に依存する新しい振動構造の発見と時間分解非弾性共鳴 X 線散乱実験に対する新提案を行った。

池田は、銅酸化物高温超伝導体における量子液晶と高温超伝導の関係を解析した。第一原理計算により多軌道ハバードモデルを構成して、それを変分モンテカルロ法により解析し、 d - p 間のエネルギー差や $3z^2$ - r^2 軌道の混成具合に着目して、相図の物質依存性を説明した。また、Charge consistent な形での LDA+DMFT および LDA+FLEX のコード開発を行い、強相関効果やスピンゆらぎを取り込んだバンド構造の変形効果を第一原理計算に基づいて計算できるようにした。

有田は、約 150 GPa 高圧下で 250 K 程度の転移温度を示す LaH_{10} における量子効果を調べた。高温超伝導が発現する対称性の高い $Fm-3m$ 構造が、水素原子の量子効果を考慮してはじめて安定になることを明らかにした。次に銅酸化物高温超伝導体と同じ結晶構造を持つニッケル酸化物超伝導体については、銅酸化物高温超伝導体との類似点、相違点を明らかにした上でより類似性を高める物質設計を行なった。この他、高効率な第一原理磁気構造予測法の開発にも取り組んだ。

求は、スキルミオンに代表される非自明な磁気秩序状態からのアプローチを進めた。スピン螺旋の重ね合わせに対してスピンモアレという概念を提案し、様々なモアレパラメタにより、磁気秩序だけでなくトポロジカルな性質や創発電磁場を有効に制御できることや、全く新しいスピントクスチャを創出できることを明らかにした。また、班間協力の成果として、スキルミオン結晶状態において伝導電子に現れる電荷秩序に関する共同研究を行い、電荷スピン結合の重要性を示した。

Shannon は、強相関絶縁体における多彩なスピン液晶状態の出現機構を総合的に研究してきた。特に、キタエフ量子スピン系やパイロクロア量子スピン系、ハニカム格子量子スピン系に対して、大規模数値計算による数値計算を実施し、重要な成果を上げた。さらに、重力理論と量子スピン系のゴールドストーンモードとの関係に着目して、量子液晶における創発現象に対する新たな知見を得た。

佐藤は、スピン液晶物質にレーザーや熱を印加して生じる新しい物性や機能性を理論的に探索した。擬 1 次元スピン液晶相における熱的スピン流の理論の構築、スピン液晶磁性体の強制強磁性相で現れるマグノンペアを高強度 THz レーザーで観測する方法の提案などの成果を得た。また、周期外場で駆動された散逸量子系で生じる非平衡定常状態における一般公式を導出した。

公募研究（4名）

柳瀬は、多彩な物理的起源を持つネマティック相を統一的に特徴づける物理量として熱力学的電気四極子モーメントを考案し、その量子力学的公式を導出した。また、空間反転対称性を自発的に破る様々な秩序相において発現するバルク光電流の微視的起源を解明した。そして、群論を用いた分類により、量子相の対称性と光の偏光状態に依存する光電流の種類と性質を明らかにした。

赤城は、 $S=1$ の bilinear-biquadratic 模型の時間反転対称な量子スピン液晶相におけるダイナミクスを数値的に調べ、観測量に関わる波数空間の相関に特異的な構造を見出した。これは、時間反転対称性を破る磁気双極子がトポロジカル点欠陥により誘起されるためである。また、同模型に一般化 Dzyaloshinskii-守谷相互作用を加えて、安定な 2 次元量子スピン液晶スキルミオン解を解析的・数値的に構成した。

水島は、有限磁場下のキタエフ磁性体では、遍歴マヨラナ準粒子間に働く多体相関効果によってトポ

ロジカル相転移とともに量子液晶状態であるネマティック状態へ1次相転移することを見出した。このネマティック相転移は**芝内**グループ (B01) によって観測された α -RuCl₃ での磁場誘起による回転対称性の破れと整合する結果である。

川崎は、典異方ポテンシャルを用いた分子動力学シミュレーションにより、温度と異方性を変化させた際の平衡相図を完成させた。特に、中程度の異方性を与えた際、2次元系特有の融解転移描像である Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移が剛体球系では2回であるところ、本系では3回起こる領域を発見した。異方性が融解転移にもたらす影響は未開拓であり、基礎的に極めて重要な結果である。

研究項目 D01

計画研究 (6名)

小林は、近藤効果によって形成される量子液体の非平衡挙動から三体相関を検出した[Hata *et al.*, *Nat. Comm.* **12**, 3233 (2021)]。量子液晶において本質的に重要となる多体相関を解明するための重要なステップである。多体量子系における非平衡ゆらぎを測定する技術を開発した[Lee *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* **92**, 023910 (2021)]。さらに、磁化ゆらぎを検出する手法として単一量子スピン顕微鏡の開発を行っている。

有馬は、スピン液晶の磁気-電気および磁気-光情報変換機能に関する研究で成果をあげた。具体的には、反転対称心のある結晶における反強磁性秩序がもたらす磁気キラル二色性を検出した[Sato *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 217402 (2020)]。らせん磁性体において逐次磁気相転移と電気磁気効果等の関連を明らかにした[Araki *et al.*, *Phys. Rev. B* **102**, 054409 (2020); Sato *et al.*, *Phys. Rev. B* **102**, 094418 (2020)]。

戸田はトポロジカル光波の伝播がもたらす幾何学位相 (グイ位相) の制御性を活用した光渦発振を半導体微小共振器に対して実現した[Nakagawa *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13**, 042001(2020)]。また偏光分解型時間分解分光をヨウ素塩基有機導体に対して実施し、不均一性が強く関与する超伝導相転移を見出した[Tsuchiya *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 064712 (2020)]。

石坂は、遷移金属原子の三量体形成によりトポロジカルな電子構造が変化する物質を見出した[Mitsuishi *et al.*, *Nat. Comm.* **11**, 2466 (2020)]。同物質のフォノン物性に着目し、光パルス照射による異方的な横波音響波の伝播をピコ秒時間分解電子顕微鏡で解明した[Nakamura *et al.*, *Nano Lett.* **20**, 4932 (2020)]。ナノ秒時間分解電子顕微鏡を用いた磁気イメージングにより、磁気スキルミオンが高速で分裂、変形し、再結合する様子を観測した[Shimajima *et al.*, *Sci. Adv.* **7**, eabg1322 (2021)]。

岡崎は、電子ネマティック状態を示す FeSe において、光励起や元素置換による電子状態の制御を、高次高調波レーザー時間分解光電子分光、極低温超高分解能レーザー光電子分光によって調べた。時間分解光電子分光では、光励起による超伝導状態の実現を示唆した[Suzuki *et al.*, *Comm. Phys.* **2**, 115 (2019)]。Se を S に置換することで電子ネマティック状態が抑制されることで超伝導状態が BCS 型から BEC 凝縮型にクロスオーバーすることを見出した[Hashimoto *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eabb9052 (2020)]。

戸川は、キラルソリトン格子において引っ張り応力応答がダブルサインゴールドン模型で記述されることを実証した[Paterson *et al.*, *Phys. Rev. B* **101**, 184424 (2020)]。古典液晶にも期待される応力応答であり、その普遍性を示す。キラルソリトン格子の性質を解明 [Shimamoto *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 242401 (2019)]。キラルスピン系希土類系薄膜育成に成功 [Shishido *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 102402 (2021)]。

公募研究 (3名)

金澤は、スキルミオンストリングのゆらぎに着目し、巨大なホール効果[Kanazawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 137202 (2020); Fujishiro *et al.*, *Nat. Comm.* **12**, 317 (2021)] や整流効果[Kitaori *et al.*, *Phys. Rev. B* (in press)] といった量子伝導機能を発見した。スピン液晶のトポロジカル欠陥であるスキルミオンストリングの密度・配向性・ダイナミクスの外場制御性 (歪みや磁場) を中性子回折法によって実証し量子伝導がスピнкаイラリティゆらぎで特徴づけられることを解明した。

井上は、物質における量子液晶相の一つあるネマティック超伝導の制御に向けて、トポロジカル絶縁体の薄膜に電気化学的な手法を適用して、化学ドーピングを行う手法を開発した。ホール効果測定と二次イオン質量分析を組み合わせることで、ゲート電圧で化学ドーピング量を制御することに成功した。これは、ネマティック超伝導体の薄膜を実現するための重要なステップである。

伊藤は、フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波発生顕微鏡を構築し、強相関 π 電子が 100 μm 程度の電子強誘電ドメインに自己組織化することを明らかにした。その成果により、電荷ゆらぎが光励起後わずか 0.1 ピコ秒で増強することや、電子的に形成されたドメイン壁が周期 3 ピコ秒の実時間振動を示すことを見出した。また、これらの電子状態を強制駆動するためのテラヘルツ強電場光源を開発した。

6 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けのアウトリーチ活動等の状況。令和3年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

< 論文発表、全 258 編（うち領域内共同研究 34 編）より抜粋 > （すべて査読あり）

A01 計画研究 量子液晶物質の開発

1. *K. Kimura, Y. Kato, S. Kimura, Y. Motome, T. Kimura, "Crystal-chirality-dependent control of magnetic domains in a time-reversal-broken antiferromagnet", *npj Quantum Mater.* **6**, 54/1-9 (2021).
2. T. Kanematsu, *Y. Okamoto, K. Takenaka, "Large Magnetic-Field-Induced Strain at the Magnetic Order Transition in Triangular Antiferromagnet AgCrS_2 ", *Appl. Phys. Lett.* **118**, 142404/1-5 (2021), [プレスリリース](#).
3. Y. Kosugi, M. Goto, Z. Tan, A. Fujita, T. Saito, T. Kamiyama, W.-T. Chen, Y.-C. Chuang, H.-S. Sheu, D. Kan, *Y. Shimakawa, "Colossal barocaloric effect by large latent heat produced by first-order intersite-charge-transfer transition", *Adv. Func. Mater.* **2021**, 2009476/1-7(2021), [プレスリリース](#), 融合研究.
4. R. Sharma, A. Kreisel, M. A. Sulangi, J. Böker, A. Kostin, M. P. Allan, H. Eisaki, A. E. Böhmer, P. C. Canfield, I. Eremin, *J. C. S. Davis, P. J. Hirschfeld, P. O. Sprau, "Multi-atom quasiparticle scattering interference for superconductor energy-gap symmetry determination", *npj Quantum Materials* **6**, 7/1-7 (2021).
5. *D. Kan, T. Hatano, A. Abe, H. Ikuta, Y. Shimakawa, "Metallic transport properties and electrostatic resistance modulations in LaNiO_3 ultrathin channels electrochemically etched in electric-double-layer transistors", *Appl. Phys. Lett.* **117**, 231602/1-5 (2020), Editor's Pick, 融合研究.
6. T. Hayashida, Y. Uemura, K. Kimura, S. Matsuoka, D. Morikawa, S. Hirose, K. Tsuda, T. Hasegawa, *T. Kimura, "Visualization of ferroaxial domains in an order-disorder type ferroaxial crystal", *Nature Commun.* **11**, 4582/1-8 (2020), [プレスリリース](#).
7. Y. Zhang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Goto, D. Kan, Y. Shimakawa, Y. Moritomo, T. Nishihara, Y. Miyauchi, *K. Matsuda, "Controllable magnetic proximity effect and charge transfer in 2D semiconductor and double-layered perovskite manganese oxide van der Waals heterostructure", *Adv. Mater.* **32**, 2003501/1-8 (2020).
8. T. Hayashida, *K. Kimura, D. Urushihara, T. Asaka, T. Kimura, "Observation of ferrochiral transition induced by an antiferroaxial ordering of antipolar structural units in $\text{Ba}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ ", *J. Am. Chem. Soc.* **143**, 3638-3646 (2021).
9. *K. Kimura, T. Katsuyoshi, Y. Sawada, S. Kimura, T. Kimura, "Imaging switchable magnetoelectric quadrupole domains via nonreciprocal linear dichroism", *Commun. Mater.* **1**, 39/1-9 (2020), [プレスリリース](#).
10. *S. Imaizumi, T. Aoyama, R. Kimura, K. Sasaki, Y. Nambu, M. Avdeev, Y. Hirata, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, Y. Imai, K. Ohgushi, "Structural, electrical, magnetic, and optical properties of iron-based ladder compounds $\text{BaFe}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ ", *Phys. Rev. B* **102**, 035104/1-13 (2020).
11. *Y. Okamoto, H. Amano, N. Katayama, H. Sawa, K. Niki, R. Mitoka, H. Harima, T. Hasegawa, N. Ogita, Y. Tanaka, M. Takigawa, Y. Yokoyama, K. Takehana, Y. Imanaka, Y. Nakamura, H. Kishida, K. Takenaka, "Regular-triangle trimer and charge order preserving the Anderson condition in the pyrochlore structure of CsW_2O_6 ", *Nat. Commun.* **11**, 3144/1-8 (2020), [プレスリリース](#).
12. *F. Du, Y. Ueda, K. Ohgushi, "Large magnon contributions to thermal conductance in quasi-one-dimensional Fe-based ladder compounds $\text{BaFe}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ ", *Phys. Rev. Lett.* **123**, 086601/1-5 (2019).

A01 公募研究

13. *T. Yamada, D. Hirai, H. Yamane, Z. Hiroi, "Superconductivity in the Topological Nodal-line Semimetal NaAlSi ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 034710/1-10 (2021), Editors' Choice.
14. K. Sasaki, T. Okue, T. Nakai, *Y. Uchida, N. Nishiyama, "Lateral Growth of Uniformly Thin Gold Nanosheets Facilitated by Two-dimensional Precursor Supply", *Langmuir* **37**, 5872-5877 (2021), Supplementary Cover.

B01 計画研究 量子液晶の精密計測

15. T. Yokoi, S. Ma, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Shibauchi, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, C. Hickey, S. Trebst, and *Y. Matsuda, "Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect in the Kitaev material candidate $\alpha\text{-RuCl}_3$ ", *Science (in press)*.

16. *K. Gilmore, J. Pelliciari, Y. Huang, M. Dantz, V. N. Strocov, J. J. Kas, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Das, T. Shibauchi, T. Schmitt, "Description of resonant inelastic X-ray scattering in correlated metals", [*Phys. Rev. X* \(in press\)](#).
 17. T. Takenaka, K. Ishihara, M. Roppongi, Y. Miao, Y. Mizukami, T. Makita, J. Tsurumi, S. Watanabe, J. Takeya, M. Yamashita, K. Torizuka, Y. Uwatoko, T. Sasaki, X. Huang, W. Xu, D. Zhu, N. Su, J.-G. Cheng, *T. Shibauchi, *K. Hashimoto, "Strongly correlated superconductivity in a copper-based metal-organic framework with a perfect Kagome lattice", [*Sci. Adv.* **7**, eabf3996/1-7 \(2021\)](#), [プレスリリース](#).
 18. *W.-L. Zhang, S.-F. Wu, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *G. Blumberg, "Quadrupolar charge dynamics in the nonmagnetic FeSe_{1-x}S_x superconductors", [*Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **118**, e2020585118/1-6 \(2021\)](#).
 19. H. Murayama, K. Ishida, R. Kurihara, T. Ono, Y. Sato, Y. Kasahara, H. Watanabe, Y. Yanase, G. Cao, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *S. Kasahara, "Bond directional anapole order in a spin-orbit coupled Mott insulator Sr₂(Ir_{1-x}Rh_x)O₄", [*Phys. Rev. X* **11**, 011021/1-11 \(2021\)](#), [プレスリリース](#).
 20. K. Mukasa, K. Matsuura, M. Qiu, M. Saito, Y. Sugimura, K. Ishida, M. Otani, Y. Onishi, Y. Mizukami, K. Hashimoto, J. Gouchi, R. Kumai, Y. Uwatoko, *T. Shibauchi, "High-pressure phase diagrams of FeSe_{1-x}Te_x: Correlation between suppressed nematicity and enhanced superconductivity", [*Nat. Commun.* **12**, 381/1-7 \(2021\)](#), [プレスリリース](#).
 21. *Y. Yasui, *C. J. Butler, N. D. Khanh, S. Hayami, T. Nomoto, *T. Hanaguri, Y. Motome, R. Arita, T.-h. Arima, Y. Tokura, S. Seki, "Imaging the coupling between itinerant electrons and localised moments in the centrosymmetric skyrmion magnet GdRu₂Si₂", [*Nat. Commun.* **11**, 5925/1-6 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
 22. *T. Shibauchi, T. Hanaguri, Y. Matsuda, "Exotic superconducting states in FeSe-based materials", [*J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 102002/1-34 \(2020\)](#), **Invited Review Paper**, Featured in JPS Hot Topics.
 23. Y. Sanari, T. Otobe, *Y. Kanemitsu, *H. Hirori, "Modifying angular and polarization selection rules of high-order harmonics by controlling electron trajectories in k-space", [*Nat. Commun.* **11**, 3069/1-7 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
 24. K. Ishida, S. Hosoi, Y. Teramoto, T. Usui, Y. Mizukami, K. Itaka, Y. Matsuda, T. Watanabe, *T. Shibauchi, "Divergent nematic susceptibility near the pseudogap critical point in a cuprate superconductor", [*J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 064707/1-6 \(2020\)](#), [News and Comments](#), Editors' Choice.
 25. K. Ishida, M. Tsujii, S. Hosoi, Y. Mizukami, S. Ishida, A. Iyo, H. Eisaki, T. Wolf, K. Grube, H. v. Löhneysen, R. M. Fernandes, *T. Shibauchi, "Novel electronic nematicity in heavily hole-doped iron pnictide superconductors", [*Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **117**, 6424-6429 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
 26. *S. Kasahara, Y. Sato, S. Licciardello, M. Čulo, S. Arsenijević, T. Ottenbros, T. Tominaga, J. Böker, I. Eremin, T. Shibauchi, J. Wosnitza, N. E. Hussey, Y. Matsuda, "Evidence for an Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State with Segmented Vortices in the BCS-BEC-Crossover Superconductor FeSe", [*Phys. Rev. Lett.* **124**, 107001/1-6 \(2020\)](#), **Hot Paper** (Web of Science).
 27. Y. Yip, K. O. Ho, K. Y. Yu, Y. Chen, W. Zhang, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *S. K. Goh, *S. Yang, "Measuring magnetic field texture in correlated electron systems under extreme conditions", [*Science* **366**, 1355-1359 \(2019\)](#), [Perspective](#), 融合研究.
 28. *K. Yamamoto, Y. Kubota, M. Suzuki, Y. Hirata, K. Carva, M. Berritta, K. Takubo, Y. Uemura, R. Fukaya, W. Nishimura, K. Tanaka, T. Ohkochi, T. Katayama, T. Togashi, K. Tamasaku, M. Yabashi, Y. Tanaka, T. Seki, K. Takanashi, P. Oppeneer, H. Wadati, "Ultrafast demagnetization of Pt magnetic moment in L1₀-FePt probed by magnetic circular dichroism at a hard X-ray free electron laser", [*New J. Phys.* **21**, 123010/1-9 \(2019\)](#), [プレスリリース](#).
 29. H. Murayama, Y. Sato, R. Kurihara, S. Kasahara, Y. Mizukami, Y. Kasahara, H. Uchiyama, A. Yamamoto, E.-G. Moon, J. Cai, J. Freyermuth, M. Greven, T. Shibauchi, *Y. Matsuda, "Diagonal nematicity in the pseudogap phase of HgBa₂CuO_{4+δ}", [*Nat. Commun.* **10**, 3282/1-7 \(2019\)](#), Editors' Highlights.
- B01 公募研究
30. J. M. Bartlett, *A. Steppke, S. Hosoi, H. Noad, J. Park, C. Timm, T. Shibauchi, A. P. Mackenzie, *C. W. Hicks, "Relationship between Transport Anisotropy and Nematicity in FeSe", [*Phys. Rev. X* **11**, 021038/1-19 \(2021\)](#).
 31. *S. Hosoi, T. Aoyama, K. Ishida, Y. Mizukami, K. Hashizume, S. Imaizumi, Y. Imai, K. Ohgushi, Y. Nambu, M. Kimata, S. Kimura, T. Shibauchi, "Dichotomy Between Orbital and Magnetic Nematic Instabilities in BaFe₂S₃" [*Phys. Rev. Res.* **2**, 043293/1-6 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
 32. T. Le, *Y. Sun, H. K. Jin, L. Che, L. Yin, J. Li, G. Pang, C. Xu, L. Zhao, S. Kittaka, T. Sakakibara, K. Machida, R. Sankar, H. Yuan, G. Chen, *X. Xu, S. Li, Y. Zhou, *X. Lu, "Evidence for nematic superconductivity of topological surface states in PbTaSe₂", [*Sci. Bull.* **65**, 1349-1355 \(2020\)](#).
 33. *I. Kostylev, *S. Yonezawa, Z. Wang, Y. Ando, Y. Maeno, "Uniaxial-strain control of nematic superconductivity in Sr_xBi₂Se₃", [*Nat. Commun.* **11**, 4152/1-8 \(2020\)](#), Editors' Highlights, [プレスリリース](#).

C01 計画研究_量子液晶の理論構築

34. *K. Tsutsui, K. Shinjo, *T. Tohyama, "Antiphase Oscillation in Time-Resolved Spin Structure Factor of a Photoexcited Mott Insulator", *Phys. Rev. Lett.* **126**, 127404/1-5 (2021), [プレスリリース](#).
35. *M.-T. Huebsch, T. Nomoto, M.-T. Suzuki, R. Arita, "Benchmark for *ab initio* prediction of magnetic structures based on cluster-multipole theory", *Phys. Rev. X* **11**, 011031/1-27 (2021), [プレスリリース](#).
36. *H. Kontani, Y. Yamakawa, R. Tazai, S. Onari, "Odd-parity spin-loop-current order mediated by transverse spin fluctuations in cuprates and related electron systems", *Phys. Rev. Res.* **3**, 013127/1-12 (2021).
37. T. Chen, T. Tomita, S. Minami, M. Fu, T. Koretsune, M. Kitatani, I. Muhammad, D. Nishio-Hamane, R. Ishii, F. Ishii, R. Arita, *S. Nakatsuji, "Anomalous transport due to Weyl fermions in the chiral antiferromagnets Mn_3X , $X=Sn, Ge$ ", *Nat. Commun.* **12**, 572/1-14 (2021), [プレスリリース](#).
38. *M. Uchida, T. Nomoto, M. Musashi, R. Arita, M. Kasasaki, "Superconductivity in Uniquely Strained RuO_2 Films", *Phys. Rev. Lett.* **125**, 147001/1-5 (2020), Editors' Suggestion, Featured in Physics.
39. S. Kunisada, S. Isono, Y. Kohama, S. Sakai, C. Bareille, S. Sakuragi, R. Noguchi, K. Kurokawa, K. Kuroda, Y. Ishida, S. Adachi, R. Sekine, T. K. Kim, C. Cacho, S. Shin, T. Tohyama, *K. Tokiwa, *T. Kondo, "Observation of small Fermi pockets protected by clean CuO_2 sheets of a high- T_c superconductor", *Science* **369**, 833-838 (2020), [Perspective](#), [プレスリリース](#).
40. *Y. Yamakawa, S. Onari, H. Kontani, "Doping effects on electronic states in electron-doped FeSe: Impact of self-energy and vertex corrections", *Phys. Rev. B* **102**, 081108(R)/1-6 (2020), Rapid Communications.
41. J. A. Flores-Livas, L. Boeri, A. Sanna, G. Profeta, *R. Arita, M. Eremets, "A perspective on conventional high-temperature superconductors at high pressure: Methods and materials", *Phys. Rep.* **856**, 1-78 (2020), **Highly Cited Paper** (Web of Science).
42. *T. N. Ikeda, *M. Sato, "General description for nonequilibrium steady states in periodically driven dissipative quantum systems", *Sci. Adv.* **6**, eabb4019/1-7 (2020), [プレスリリース](#).
43. A. Sakai, S. Minami, T. Koretsune, T. Chen, T. Higo, Y. Wang, T. Nomoto, M. Hirayama, S. Miwa, D. Nishio-Yamane, F. Ishii, R. Arita, *S. Nakatsuji, "Iron-based binary ferromagnets for transverse thermoelectric conversion", *Nature* **581**, 53-57 (2020), [プレスリリース](#), **Highly Cited Paper** (Web of Science).
44. H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, A. Sakai, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, R. Arita, S. Miwa, Y. Otani, *S. Nakatsuji, "Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state", *Nature* **580**, 608-613 (2020), [プレスリリース](#), **Highly Cited Paper** (Web of Science).
45. *M. Hirayama, T. Tadano, Y. Nomura, R. Arita, "Materials design of dynamically stable d^0 layered nickelates", *Phys. Rev. B* **101**, 075107/1-18 (2020), **Highly Cited Paper** (Web of Science).
46. I. Errea, F. Belli, L. Monacelli, A. Sanna, T. Koretsune, T. Tadano, R. Bianco, M. Calandra, R. Arita, F. Mauri, *J. A. Flores-Livas, "Quantum crystal structure in the 250-kelvin superconducting lanthanum hydride", *Nature* **578**, 66-69 (2020), [プレスリリース](#), **Highly Cited Paper** (Web of Science).
47. *Y. Nomura, M. Hirayama, T. Tadano, Y. Yoshimoto, K. Nakamura, R. Arita, "Formation of a two-dimensional single-component correlated electron system and band engineering in the nickelate superconductor $NdNiO_2$ ", *Phys. Rev. B* **100**, 205138/1-11 (2019), Editors' suggestion, **Highly Cited Paper** (Web of Science).
48. *D. Hirobe, *M. Sato, M. Hagihala, Y. Shiomi, T. Masuda, E. Saitoh, "Magnon Pairs and Spin-Nematic Correlation in the Spin Seebeck Effect", *Phys. Rev. Lett.* **123**, 117202/1-7 (2019), [プレスリリース](#).

C01 公募研究

49. *M. O. Takahashi, M. G. Yamada, D. Takikawa, T. Mizushima, S. Fujimoto, "Topological nematic phase transition in Kitaev magnets under applied magnetic fields" *Phys. Rev. Res.* **3**, 023189/1-11 (2021).
50. *H. Watanabe, Y. Yanase, "Chiral photocurrent in parity-violating magnet and enhanced response in topological antiferromagnet", *Phys. Rev. X* **11**, 011001/1-30 (2021).
51. Y. Akagi, Y. Amari, N. Sawado, Y. Shnir, "Isolated Skyrmions in the CP^2 nonlinear sigma-model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction", *Phys. Rev. D* **103**, 065008/1-13 (2021), 融合研究.
52. J. W. Yu, *S. H. E. Rahbari, T. Kawasaki, H. Park, *W. B. Lee, "Active Microrheology of a Bulk Metallic Glass", *Sci. Adv.* **6**, eaba8766/1-10 (2020).

D01 計画研究_量子液晶の制御と機能

53. *T. Hata, Y. Teratani, T. Arakawa, S. Lee, M. Ferrier, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, *K. Kobayashi, "Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid", *Nat. Commun.* **12**, 3233/1-7 (2021), [プレスリリース](#).
54. *T. Shimojima, A. Nakamura, X. Yu, K. Karube, Y. Taguchi, Y. Tokura, K. Ishizaka, "Nano-to-micro spatiotemporal imaging of magnetic skyrmion's life cycle", *Sci. Adv.* **7**, eabg1322/1-8 (2021), [プレスリリース](#).
55. T. Hashimoto, Y. Ota, A. Tsuzuki, T. Nagashima, A. Fukushima, S. Kasahara, Y. Matsuda, K. Matsuura, Y.

- Mizukami, T. Shibauchi, S. Shin, *K. Okazaki, "Bose-Einstein Condensation Superconductivity Induced by Disappearance of the Nematic State", [Sci. Adv. 6, eabb9052/1-6 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
56. M. Yokoi, S. Fujiwara, T. Kawamura, T. Arakawa, K. Aoyama, H. Fukuyama, K. Kobayashi, *Y. Niimi, "Negative resistance state in superconducting NbSe₂ induced by surface acoustic waves", [Sci. Adv. 6, eaba1377/1-5 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
57. *D. Hirai, H. Sagayama, S. Gao, H. Ohsumi, G. Chen, T.-h. Arima, Z. Hiroi, "Detection of Multipolar Orders in the Spin-Orbit-Entangled 5d Mott Insulator Ba₂MgReO₆", [Phys. Rev. Res. 2, 022063\(R\) /1-6 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
58. J. A. Hlevyack, S. Najafzadeh, M.-K. Lin, T. Hashimoto, T. Nagashima, A. Tsuzuki, A. Fukushima, C. Bareille, Y. Bai, P. Chen, R.-Y. Liu, Y. Li, D. Flötotto, J. Avila, J. N. Eckstein, S. Shin, *K. Okazaki, *T.-C. Chiang, "Massive suppression of proximity pairing in topological (Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃ films on niobium", [Phys. Rev. Lett. 124, 236402/1-7 \(2020\)](#), Editors' Suggestion.
59. *K. Kuroda, Y. Arai, N. Rezaei, S. Kunisada, S. Sakuragi, M. Alaei, Y. Kinoshita, C. Bareille, R. Noguchi, M. Nakayama, S. Akebi, M. Sakano, K. Kawaguchi, M. Arita, S. Ideta, K. Tanaka, H. Kitazawa, K. Okazaki, M. Tokunaga, Y. Haga, S. Shin, H. S. Suzuki, R. Arita, T. Kondo, "Devil's staircase transition of the electronic structures in CeSb", [Nat. Commun. 11, 2888/1-9 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
60. *A. Nakamura, T. Shimojima, Y. Chiashi, M. Kamitani, H. Sakai, S. Ishiwata, H. Li, K. Ishizaka, "Nanoscale imaging of unusual photoacoustic waves in thin flake VTe₂", [Nano Lett. 20, 4932-4938 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
61. *T. Sato, N. Abe, S. Kimura, Y. Tokunaga, T.-h. Arima, "Magnetochiral dichroism in a collinear antiferromagnet with no magnetization", [Phys. Rev. Lett. 124, 217402/1-5 \(2020\)](#), Editors' Suggestion, [プレスリリース](#).
62. *N. Mitsuishi, Y. Sugita, M. S. Bahramy, M. Kamitani, T. Sonobe, M. Sakano, T. Shimojima, H. Takahashi, H. Sakai, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Taguchi, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ishiwata, Y. Motome, *K. Ishizaka, "Switching of band inversion and topological surface states by charge density wave", [Nat. Commun. 11, 2466/1-9 \(2020\)](#), [プレスリリース](#).
63. *Y. Shimamoto, F. J. T. Goncalves, T. Sogo, Y. Kousaka, Y. Togawa, "Switching behavior of the magnetic resonance in a monoaxial chiral magnetic crystal CrNb₃S₆", [Appl. Phys. Lett. 115, 242401/1-4 \(2019\)](#), Featured Article.
64. *T. Suzuki, T. Someya, T. Hashimoto, S. Michimae, M. Watanabe, M. Fujisawa, T. Kanai, N. Ishii, J. Itatani, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, *K. Okazaki, *S. Shin, "Photoinduced possible superconducting state with long-lived disproportionate band filling in FeSe", [Commun. Phys. 2, 115/1-7 \(2019\)](#), [プレスリリース](#).
65. *T. Suzuki, T. Iimori, S. J. Ahn, Y. Zhao, M. Watanabe, J. Xu, M. Fujisawa, T. Kanai, N. Ishii, J. Itatani, K. Suwa, H. Fukidome, S. Tanaka, J. R. Ahn, K. Okazaki, S. Shin, *F. Komori, *I. Matsuda, "Ultrafast Unbalanced Electron Distributions in Quasicrystalline 30° Twisted Bilayer Graphene", [ACS Nano 13, 11981-11987 \(2019\)](#), [プレスリリース](#).

D01 公募研究

66. *Y. Fujishiro, *N. Kanazawa, R. Kurihara, H. Ishizuka, T. Hori, F. S. Yasin, X. Yu, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, N. Nagaosa, M. Tokunaga, *Y. Tokura, "Giant anomalous Hall effect from spin-chirality scattering in a chiral magnet", [Nat. Commun. 12, 317/1-6 \(2021\)](#), [プレスリリース](#).
67. *N. Kanazawa, A. Kitaori, J. S. White, V. Ukleev, H. M. Rønnow, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, "Direct Observation of the Statics and Dynamics of Emergent Magnetic Monopoles in a Chiral Magnet", [Phys. Rev. Lett. 125, 137202/1-6 \(2020\)](#).

< 国際学会における招待講演、全 114 件より抜粋 >

A01 計画研究_量子液晶物質の開発

1. K. Kudo, "Development of New Superconductors with Ordered Laves Phase Structures", The 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020), AIST Auditorium, Tsukuba, Ibaraki, Japan & Online, 2020/12/1, Invited.
2. K. Ohgushi, "Exploring novel electronic properties near Kitaev spin liquid", 3rd Asia-Pacific Workshop on Quantum Magnetism, Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai, China, 2019/11/24, Invited.

A01 公募研究

3. J. Matsuno, "Emergent Phenomena at Oxide Interfaces with Strong Spin-Orbit Coupling", 2020 MRS

Spring/Fall Meeting & Exhibit, online, 2020/11/27-2020/12/4, Invited.

B01 計画研究_量子液晶の精密計測

4. T. Shibauchi, “Field-angle dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid state of α -RuCl₃”, American Physical Society (APS), March Meeting, online, 2021/03/15-19, Invited.
5. T. Hanaguri, “Spectroscopic-imaging STM studies of FeSe and related materials”, International Conference on Fugaku project Emergence and Functionality of Quantum Matter 2020 (EFQM2020), online, 2020/9/30, Invited.

B01 公募研究

6. T. Adachi, “Spin dynamics in superconducting thin films of iron chalcogenides and high- T_c cuprates probed by low-energy muon”, International Conference on Functional Materials Science (ICFMS2020), online, 2020/11/11-12, Invited.

C01 計画研究_量子液晶の理論構築

7. N. Shannon, “A route to finding fractons? Rank-2 U(1) spin liquid on the breathing pyrochlore lattice”, Correlated Electron Virtual International Seminar (CEVIS), online, 2020/7/2, Invited.
8. H. Kontani, “Unconventional density waves and novel pairing mechanism in strongly correlated electron systems”, International Conference on Electron Correlation in Superconductors and Nanostructures (ECSN-2019), Odessa, Ukraine, 2019/10/8, Invited.

C01 公募研究

9. Y. Yanase, “A Theory from First-principles on Magnetism and Superconductivity in UTe₂”, American Physical Society (APS), March Meeting, online, 2021/3/15-19, Invited.
10. Y. Akagi, “Noncommutative indices for disordered topological phases”, Localisation 2020, online, 2020/8/24-29, Invited.

D01 計画研究_量子液晶の制御と機能

11. K. Kobayashi, “Non-equilibrium Fluctuations in Correlated Quantum Liquids”, APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop on “Highlights on condensed matter physics”, online, 2020/9/4, Invited.

D01 公募研究

12. H. Itoh, “Domain Structures and Photoinduced Dynamics of Electronic Ferroelectrics Investigated by Terahertz-Emission Microscopy”, Asian Spectroscopy Conference 2020 (ASC2020), online, 2020/12/8-10, Invited.

< 主催シンポジウム等 >

1. 領域キックオフミーティング, 2019/8/19, 東京大学浅野キャンパス (東京都文京区)
2. 公募研究説明会, 2019/9/9, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県名古屋市)
3. 国際ワークショップ QLC Topical Workshop on Elastoresistance in Correlated Materials, 2019/9/30, 東京大学柏キャンパス (千葉県柏市)
4. 国際ワークショップ QLC Topical Workshop on Quantum Magnetism and Neutron scattering, 2019/11/8, 東北大学多元物質科学研究所(宮城県仙台市)
5. 令和元年度新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2020/3/26-27, 新型コロナウイルス感染症拡大の影響により開催を中止し、初年度(2019年度)成果報告書を発行
6. 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」A01 班公募研究キックオフミーティング, 2020/5/19, online
7. 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」B01 班公募研究キックオフミーティング, 2020/6/23, online
8. 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」C01 班公募研究キックオフミーティング, 2020/7/9, online
9. 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」D01 班公募研究キックオフミーティング, 2020/8/4, online
10. 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」量子物質開発フォーラム, 2020/10/1-2, online
11. 令和2年度新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2020/12/21-25, online
12. 国際会議 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021), 2021/5/11-13, online
13. QLC セミナー (令和元年度: 14 回、令和2年度: 5 回、令和3年度6月時点: 3 回開催)
14. QLC 若手コロキウム (令和2年度: 1 回、令和3年度6月時点: 2 回開催)

< 一般向けのアウトリーチ活動等、全 83 件より抜粋 >

1. 量子液晶の物性科学 ホームページ開設: <http://qlc.jp/>
2. 動画共有サイト「Quantum Liquid Crystals」チャンネル開設 (研究成果解説など配信動画: 22 本) https://www.youtube.com/channel/UCT4ychc-2b0hf1UtJPLIYNQ?view_as=subscriber
3. ニュースレター (量子液晶の物性科学 News Letter Vol.1-4)、領域ホームページへの掲載及び発送

7 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本研究領域では、今まであまり直接的な研究交流がなかった、主に絶縁体のスピン系を取り扱う研究者と、主に強相関超伝導体を取り扱う研究者の有機かつ直接的な研究交流を推進する形で、これら幅広い物質群に現れる新しい電子状態である「量子液晶」の新学理を構築することを目的としている。

そのために、**従来の研究対象物質群による枠組みを外し**、電荷液晶、スピン液晶、電子対液晶を統一的に扱い、新電子物性物理の体系化に結び付ける。各計画研究項目は実施計画の方法論により分類・組織化し、**異なる物質を主な対象としてきた研究者を各項目に配置**することで、新しい融合研究を促進し、シナジー効果を狙っている。量子液晶の舞台となる物質の開発と純良試料の作製を行う A01「量子液晶物質の開発」、最先端の測定技術と世界的に見てもオリジナリティの高い計測手法を用いて、電子状態の精密計測により基底状態と励起状態を解明する B01「量子液晶の精密計測」、各実験研究に対して方向性を示唆し、結果を統合して実験へのフィードバック・予測・提言を行う C01「量子液晶の理論構築」、さらにナノテクノロジーを用いた微細加工や、光照射と時間分解測定技術の開発により量子液晶の状態制御や機能開拓を目指す D01「量子液晶の制御と機能」の研究項目を組織した。これら4つの研究項目がそれぞれの役割を担い、総括班主導によるギアがかみ合った連携（右図）を構築する。



計画研究のメンバー構成は、各研究項目内で今まで異なる物質系を研究対象としてきた研究者が混在しており、それぞれの研究者がより広い視野を獲得し、連携を図りやすい構成としている。公募研究では、計画研究では手薄であった有機化合物を専門とする研究者（A01 佐々木、D01 伊藤）や、固体物質以外の対象を取り扱う古典液晶・ソフトマターの研究者（A01 内田、C01 川崎）および超流動ヘリウムをベースとする関連研究を行っている研究者（C01 水島）を含む17名の研究代表者を迎え入れ、より多岐にわたる議論・連携が可能になっている。そのうち、外国人研究者（B01 孫）を含む8名が39歳以下の若手研究者であり、領域内のダイバーシティを高める構成とすることができた。

本新学術領域研究では、次ページで述べるような若手研究者支援の取り組みをはじめとした総括班主導の共同研究企画や研究会等の領域メンバーの交流を通じて、多くの領域内連携が始まっている。**既に発表されている領域内共同研究論文は34報にのぼり、これらの論文に係る各研究項目内、研究項目間のそれぞれの共同研究件数（合計43件）を下表に示す。**メンバーが各々物質開発を担当するA01班内を除き、すべての研究項目内および研究項目間で共同研究成果が結実している。特に、精密計測を担当するB01班を中心とした連携が進んでいる。なお、3つの研究項目をまたいだ連携研究も行われており、例えば、磁気スキルミオン構造を持つ磁性体における走査型トンネル顕微鏡を用いた電子構造の研究では、磁性研究の専門家のD01有馬らにより作製された試料を用いて、金属電子状態を専門とするB01花栗らが測定を行い、C01班の磁性専門家の求および第一原理計算を得意とする有田が理論的なサポートを行うことにより、磁気構造の情報を伝導電子の構造から研究するといった新しい研究が展開している。また、令和2年度からスタートした公募研究を含んだ連携も既に複数進行しており、今後引き続き本新学術領域内での研究項目内および研究項目間の連携の強化を進める予定である。

	A01 (物質開発)	B01 (精密計測)	C01 (理論構築)	D01 (制御と機能)
A01 (物質開発)	0 (うち公募0)	4 (うち公募3)	1 (うち公募0)	1 (うち公募1)
B01 (精密計測)	4 (うち公募3)	21 (うち公募6)	6 (うち公募3)	4 (うち公募1)
C01 (理論構築)	1 (うち公募0)	6 (うち公募3)	1 (うち公募0)	3 (うち公募0)
D01 (制御と機能)	1 (うち公募1)	4 (うち公募1)	3 (うち公募0)	2 (うち公募2)
計	6 (うち公募4)	35 (うち公募13)	11 (うち公募3)	10 (うち公募4)

8 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和3年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

若手研究者の育成に係る取り組みについて、まず第1期公募研究17件中8件の公募研究の研究代表者が39歳以下の若手研究者となっている。また、本新学術領域研究により雇用したポスドク研究員は合計7名であり、令和元年度から公募を行い、B01班で実験系研究員2名、およびC01班で理論系研究員5名を採用した。さらに、各計画研究、公募研究のメンバーのそれぞれの研究室所属の助教や大学院生を含む若手研究者を対象に、総括班を中心に、**若手研究者交換プログラム、海外派遣プログラム、若手研究奨励賞の支援活動**を推進している。また、2020年3月以降については、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、若手研究者交換プログラムおよび海外派遣プログラムによる国内外の移動が困難な状況になったことに対する対応策として、オンラインプラットフォームを活用した、**若手コロキウムやQLCチャンネルでの若手研究者の育成活動を開始**した。以下それぞれのプログラムの状況について説明する。

若手研究者交換プログラム 各研究項目内、項目間での連携強化のため、領域メンバーのグループ内の若手研究者（助教、ポスドク研究員、大学院生などを含む）が、領域内の他のグループに訪問し、共同研究を実施することを促進するものである。コロナ禍により人の移動が制限され、当初の予定より困難な運営を余儀なくされたが、現在までに、同一キャンパス内交換3件を含む**計20件（うち異なる研究項目間12件）の共同研究**を実施した。A01班では、大串グループ(Gr.)で作製された試料をB01佐藤Gr.で測定したもの3件、木村Gr.で得られた実験結果について助教がC01求Gr.を訪問して共同で議論したものの、計4件を実施した。B01班では芝内Gr.の大学院生がA01永崎Gr.や木村Gr.を複数回継続的に訪問して試料を作製した。また、清水Gr.の大学院生がA01永崎Gr.で試料作製を行った。芝内Gr.の大学院生がA01公募の佐々木Gr.で光学測定を、またD01岡崎Gr.にて継続的に光電子顕微鏡測定を、佐藤Gr.助教がA01公募の廣井Gr.で議論を行っている。その他、班内で共同研究を行ったものが3件、合計9件を実施した。D01班では、有馬Gr.の大学院生がB01芝内Gr.の極低温測定装置を用いて複数回測定を行ったもの、有馬Gr.の大学院生がC01理論求Gr.と議論し論文を発表したもの、その他班内で共同実験を行ったもの、計7件を実施した。

海外派遣プログラム 若手研究者の国際的な研究活動を支援するために、海外の研究機関との共同研究や、海外で開催される国際会議やワークショップへの参加に対して、総括班から渡航費等の支援を行っている。初年度の令和元（2019）年度には、大学院生および若手研究者を5か国（スイスチューリッヒにおいてセミナーツアーおよび共同研究打ち合わせ、カナダバンクーバーにて μ SR共同実験、オランダナイメーヘンにて高磁場共同実験、北京および台湾にて研究成果発表）に派遣し、国際共同研究の実施や国際会議での発表など、**海外渡航支援を半年余りで計12件**支援した。令和2（2020）年度には、事実上海外渡航が不可能となり、**オンライン国際会議への参加登録料支援を9件**行った。

若手研究奨励賞 各年度若手研究者に募集を行い、若手研究奨励賞の受賞者の選定、および授与を行っている。初年度は、若手奨励賞の募集開始後に領域研究会がコロナ禍により中止となったため、書類審査と面接審査を経て**2名の受賞者**を選定し、令和2年度オンラインキックオフミーティングにて授賞式を行った。2年目は、領域研究会でのポスター発表を採点し、**3名の受賞者**を決定し、同研究会にて発表・表彰した。

QLC若手コロキウム コロナ禍により渡航が制限されたため、若手研究者支援を別の形で強化するためのQLC若手コロキウムを開始した。これは、大学院生やポスドク研究員などの若手研究者が、自分の研究を他分野の若手研究者にわかりやすく解説するオンラインの取り組みであり、相互理解を促進するものであり、領域計画書には記載のない新しいプログラムである。現在までに、若手研究奨励賞受賞者を含む**10名の若手研究者がコロキウムで発表**を行っており、毎回若手研究者同士で活発な議論が行われている。

QLCチャンネル オンラインを活用した若手研究者育成の取り組みとして、若手研究者による研究成果のわかりやすい解説を依頼して、領域の動画サイト「QLCチャンネル」にてビデオ配信している。現在までに公開している22本の動画のうち、**11本は若手研究者が作成、解説**を行っているものである。短い時間でわかりやすくプレゼンテーションを行う能力の向上に役立つものと考えている。

9 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

研究費の使用状況や今後の使用計画

本新学術領域研究では、各研究項目において必要な設備を整備し、研究を進めるとともに、総括班において共通設備を整備し、共同利用を促進し領域内の連携を進めるものである。初年度末からのコロナ禍の影響による納期の遅延などにより、研究費の繰り越しがいくつか発生し、一時的な遅れは発生したものの、研究計画の遂行に大幅な変更はなく、全体としては設備関係についての**研究費使用状況に関する大きな支障は生じていない**。

より大きなコロナ禍の影響を受けたものは、人的移動の制限によるオンラインでの研究会の開催が不可能になった点である。特に、2020年3月に東京大学柏キャンパスにて開催を予定していた令和元年度領域研究会を直前に中止せざるを得なくなり、研究会開催費用として総括班で予定していた研究費の実行ができなくなった。この中止にあたっては、あらかじめ学術調査官を通して文部科学省に相談の上、研究費を令和2年度に繰り越しし、発表予定であった領域メンバーの研究成果の内容をまとめ、初年度(2019年度)成果報告集を作成し、領域ホームページにて公開するとともに、ニュースレターvol.2として関係者に送付した。令和2年度以降については、人が集まるイベントが実質的に禁止され、オンライン開催が困難な状況が継続し、研究会、セミナー、国際会議とも**Zoom（口頭発表）およびRemo（ポスター発表）を活用し、オンライン開催**した。オンラインでの交流は不可能な一方で、旅費不要のため海外からの参加も容易となり、発表についてはスライドの英語化を必須とすることで、国際的な議論が可能となっている。また、このような変更に伴う研究費の使い道に関しては、以下に述べるような領域研究の活性化に効果的な使用の工夫を行っている。今後も、研究会等のオンライン開催が可能になるまでは、オンラインを活用した領域運営を行い、領域内の連携を強化しながら研究を推進していく予定である。

研究費の効果的使用の工夫

上述の計画段階では予期しなかったコロナ禍に関連する変更を除いては、基本的には、研究計画調査にはほぼ沿って研究費の執行を行っている。研究会や国際会議、および若手研究者海外派遣プログラムに関する総括班の研究費を有効に活用するため、特にオープンアクセスジャーナルで顕著になっている近年の論文掲載料の高騰による各研究者の研究予算を確保するために、総括班での論文掲載料のサポートを開始した。領域内の連携を強化するのに役立つために、**領域内共同研究の成果としての論文掲載料のサポート**を優先とし、プレスリリースやQ&Aチャンネルでの動画解説とリンクさせ、総括班で審査の上、支援を実行している。現在までに、8編の論文（*Nat. Commun.* 2編、*Sci. Adv.*、*Phys. Rev. X*、*PNAS*、*Commun. Mater.*、*Commun. Phys.*、*J. Phys. Soc. Jpn.*各1編）に対して支援を行い、うち6本はオープンアクセスジャーナルの論文である。領域メンバーは、それぞれの予算を研究実施のための経費に集中させて運用することができ、掲載料を気にせずハイインパクトジャーナルにトライすることが可能になったと考えている。

設備等の活用状況

本領域内の連携を高めるために、比較的共用性の高い3つの実験設備を総括班で整備する計画であり、まず令和元年度末に東北大学に共通設備である基礎物性測定装置を導入した。装置は順調に稼働しており、電気抵抗率・ホール係数・誘電率の測定が迅速な形で進んでいる。コロナ禍の影響により共用の実績はまだ少ないが、データ収集を引き受ける形の活用も図っている。また、領域ホームページにて利用案内を提示し、領域内での共用を積極的に進めている。他の2つの装置については、今年度中に大阪府立大学に集束イオンビーム加工装置を導入し、老朽化した現有設備を置き換える予定であり、来年度には東京大学において現在技術開発を進めている、コヒーレント軟X線小角散乱装置を導入予定である。

また、令和元年度末より、東京大学柏キャンパスにおいて、**使用されていない磁気特性測定システムを借り受けることが可能となったため、本新学術領域の共用装置の一つとして運用**している。現在、極低温高磁場領域の磁気特性の測定が可能になっており、A01 木村、B01 芝内、D01 有馬の3グループが定常的に活用している。現在までにオンライン予約システムを構築し、コロナ禍明けには来訪して使用することが可能となる予定である。また、本装置の運用に必要な寒剤などの消耗品の一部を総括班でサポートを行っている。

10 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後公募する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

本研究領域の特色は、各研究項目内で今まで異なる物質系を研究対象としてきた研究者を混在させることにより、それぞれの研究者がより広い視野を獲得し、連携を図りやすい構成としていることである。計画研究のメンバー26名には、最先端の量子ビームを用いた散乱実験、走査型および電子顕微鏡測定、超高速分光、電子構造および局所構造解析、熱力学・熱電子輸送特性、核磁気共鳴などの物性研究で十分な実績があり国際的に活躍している研究者と、超伝導体、フラストレート磁性体、マルチフェロイクス物質などの物質開発で世界をリードする研究者、そして量子ドット、ソリトン系などのナノサイエンスに精通している実験家、さらには量子スピン系、超伝導、スペクトロスコーピーに関する十分な実績を有する理論研究者が参画している。また、第1期公募研究の研究代表17名が加わり、古典液晶・ソフトマター、有機導体・分子性物質、ヘリウム超流動などの専門家を含め、よりカバーする分野の裾野が広がった構成となった。

現在までに、既に**多くの領域内連携が進行しており、共同研究の成果も着実に結実**している。今後も引き続き連携の強化を進める領域運営を行っていく。研究内容としては、C01理論班を中心に構築され始めている、多様な量子液晶を系統的に理解するための理論フレームワークを、多角的な先進測定法を先鋭化することで実験研究により検証するとともに、量子液晶の普遍性の解明と多様性の分類という本新学術領域の学理構築目標に向かって、研究を推進していく予定である。

量子液晶物質の開発を担当する研究項目 A01では、現在までに順調に様々な新物質が開発されているが、引き続き固体化学の様々な合成手法を駆使して、量子液晶状態の舞台となる新物質の開発を行う。構造-物性相関を考慮に入れた物質探索に加えて、C01班の理論的な設計指針をもとに量子液晶物質を設計・作製し、B01班およびD01班で行う先端実験に試料提供を行って、種々の物質に共通する概念の抽出と多様性の理解に向けた研究舞台を築く。今後具体的に視野に入れている物質群は、B01芝内らの実験とC01公募研究の水島らの理論研究により示唆されたキタエフスピン液体におけるトポロジカルネマティック転移のさらなる理解に向けた蜂の巣構造を持つキタエフスピン液体周辺物質や、幾何学的フラストレーションをもつカゴメ構造を持つ新物質、新しくイリジウム酸化物で発見されたアナポール量子液晶と対称性が類似する磁気トロイダル物質など多岐にわたる。また、異なる化学的手法を得意とする世代を超えた研究者の交流を促進するために、A01班が主催となり、2020年10月には「第1回量子物質開発フォーラム」を開催した。領域内外の物質開発に係る研究者による活発な議論が行われ、意義深い研究会となった。今後も引き続き**「量子物質開発フォーラム」を企画・開催**し、特に若手・中堅研究者の交流、連携を深めていく。

量子液晶の精密計測を担当する研究項目 B01を核として領域内の強い連携が生まれ、新しい量子液晶の発見や、量子液晶揺らぎと超伝導の関連の実証など、大きな成果が得られているが、B01班では今後もこの研究推進体制を維持し、以下の4つの項目を中心に研究を進める。まず第1に、電子構造の高い空間、エネルギー分解能を有するSTM、スピン構造の微視的プローブであるNMRや中性子非弾性散乱と、巨視的な情報を与える比熱、磁化、輸送現象の測定の両面から、量子液晶の空間階層構造の解明を目指す。第2に、量子液晶の素励起とそのダイナミクスの解明のため、低エネルギー励起に敏感な種々の計測手段を用い、C01理論班との協力による理論解析によって素励起の特徴を解明する。さらに、共鳴軟X線やトンネル電流揺らぎの測定や、現在開発中の時間分解THz-STMを用いた量子液晶のダイナミクスに関する研究も行う。第3に、引き続き新しい量子液晶の探索を行う。特にスピン構造をSTMにより伝導電子の状態分布として調べる新しく確立された手法や、実時間中性子小角散乱実験、多重磁気共鳴プローブなどの新たな手法を用いた研究を展開する。第4に、これらの研究を支える新実験手法の開発を進める。高磁場環境下のTHz-STM、光検出磁気共鳴イメージング、高調波レーザーを用いた長短パルス軟X線分光などの開発により、量子液晶の時間的空間的構造を解明する。

量子液晶の理論構築を担当する研究項目 C01では、様々な量子液晶を一般化する概念として導入された量子液晶構造因子・形状因子に基づく理論解析を進め、実験研究と協力しながら量子液晶秩序の背後にある普遍的な原理の解明と多様性の分類を目指す。各研究者が得意とする第一原理計算、平均場近似

を超えた高次ダイアグラム計算、群論的手法、非平衡理論、大規模数値シミュレーションなど様々な理論的方法を駆使して、種々の量子液晶電子状態の秩序パラメータの定式化、その量子揺らぎが他の物性に与える影響を研究し、物質および機能の設計を行う。また、令和 2 年度から雇用を始めたポスドク研究員を中心として、QLC 若手コロキウムを随時開催し、若手研究者の育成を視野に入れながら、領域内の連携を強化し、領域研究の活性化を図る。

量子液晶の制御と機能を担当する研究項目 D01 では、当初の予定通りに研究は進展しており、今後も引き続き、微細加工技術を用いた量子液晶のナノサイエンス、および最近急速に発展してきた超高速光技術による状態制御と機能開拓を行う。ダイヤモンド中の窒素空孔結晶欠陥 (NV センタ) を用いた量子スピン顕微鏡や、次世代放射光源を用いた磁気イメージング手法の開発、時間分解光電子分光、超短光パルスを用いたコヒーレントクエンチ分光、超高速時間分解電子顕微鏡・電子回折などの先進光技術を用いた量子液晶の多段的な時空間構造を明らかにするとともに、B01 班による測定結果をもとに、量子液晶の高速制御および機能開拓を目指す。

以上の研究を円滑に推進するために、本新学術領域では、総括班が主体となり特に以下の 3 つの点に注力している。引き続きこれらを念頭に領域の運営を行う予定である。

領域内の研究活動活性化

現在までに行っている若手研究者交換プログラムや論文投稿料支援など共同研究促進のための様々な企画をより拡大して遂行するとともに、トピカルなフォーラムや研究会を引き続き開催する。現在までに 22 回行っている QLC セミナー、3 回行っている QLC 若手コロキウムを継続的に企画、運営する。また、2021 年 9 月に行われる日本物理学会 2021 年秋季大会では、本新学術領域が提案した共催シンポジウムが予定されている。現在、コロナ禍により多くの企画がオンラインの会議となっているが、ワクチン接種が進むにつれ、オンサイトの会議の開催が可能になれば、より直接的な議論が可能となることが期待される。また、領域の研究活動を広く知ってもらうための広報活動として、現在うまく機能している動画サイト「QLC チャンネル」を活用したビデオ解説を継続的に運営し、コンテンツの充実化を図っていく。また、ニュースレターも引き続き年 2 回のペースで発行し、関係者に送付するとともにホームページで公開する。

第 2 期公募研究の募集においては、更に多角的な研究を展開するために、異分野研究者の交流を促進に資する募集を行う。2021 年 8 月の公募開始以降に、公募研究説明会をオンライン開催するとともに、QLC チャンネルにてその様子を公開する予定である。共同研究を推進する提案や、無機物性分野以外からの学際的な研究提案も広く募集し、液晶を含むソフトマター、有機物質系、量子情報、応用数学などの研究分野からの研究者の参画を促す。

若手研究者の研究支援、若手人材の育成

現在不可能となっている海外渡航が可能となった時点で、若手研究者の海外派遣を再開する。国際共同研究の遂行や、国際スクール、国際会議の参加を通して、若手研究者の海外経験を支援する。また、各年度に行う領域研究会にて、審査の上、数名の若手研究者に若手研究奨励賞を授与する。

若手研究者交換プログラムについても、引き続き継続し、特にコロナ禍明けには加速し、領域内連携を推進するとともに若手研究者の視野を広げるようにする。人的移動の制限をカバーする目的で開始した QLC 若手コロキウムは、毎回若手研究者による有意義な議論がなされているため、コロナ禍明けにおいても継続的に開催する。

国際化

2021 年 5 月 11 日から 13 日の日程で本領域が主催した国際会議 International Conference on Quantum Liquid Crystals (QLC2021)では、8 カ国から 21 名の領域外招待講演者を含む 38 の招待講演と 91 のポスター発表があり、274 名の研究者が登録した。やむを得ずオンライン開催となったため、海外との時差の問題があったが、すべてのセッションで 130-180 名の参加者があり、非常に有意義な議論が行われた。引き続きトピカルな国際ワークショップや 2023 年度に予定している国際会議 QLC2023 を開催し、我々の領域研究を国際的にアピールしていく。このような国際的な活動を通して、海外研究機関の研究者との共同研究を促進するとともに、国外の放射光施設 (Diamond および台湾 Photon Source、LCLS)、中性子散乱施設 (ORNL、PSI)、強磁場施設 (Toulouse、Tallahassee、Los Alamos)、電子線照射施設 (Ecole Polytechnique) などの利用も活発に行う予定である。また、海外の研究者と共同で国際ワークショップや学会シンポジウムを提案し、本 QLC プロジェクトのプレゼンスを国際的に示していきたい。

11 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域採択直後から、国内3名、海外2名の顕著な学術業績を持つシニア研究者に総括班評価委員をお願いしている。国内の委員には、キックオフミーティング、領域研究会、国際会議に参加いただき、海外の委員には、英語の資料を送付するとともに国際会議に参加いただいた。

以下、各委員からの評価コメントを示す。

藤森淳（早稲田大学理工学術院客員教授、東京大学名誉教授）

本領域は、液晶のネマティック秩序と類似した回転対称性の破れを示す電子系・スピン系・超伝導対系を「量子液晶」として捉え、新しい学問領域として発展させることを目指して発足した。

領域発足以来2年間、実験・理論・物質開発の連携で量子液晶研究を推進し、すでに多くの重要な成果を挙げている。電子液晶に関しては、鉄系超伝導体において磁気ゆらぎよりもネマティックゆらぎが超伝導を引き起こしていることの実験的証明、超伝導と競合する様々な秩序（ネマティック秩序、電荷秩序、ボンド秩序、電荷ループ電流秩序、スピングループ電流秩序など）を系統的に理解する理論の提案、鉄系超伝導体・銅酸化物超伝導体以外の物質におけるネマティック秩序の観測などが特筆すべき成果である。スピン系に関しては、多重極秩序状態、磁氣的・構造的カイラリティの計測・可視化で顕著な成果を挙げている。また、三体相関の観測、BEC-BCSクロスオーバーの観測など、固体電子論の基礎に関わる重要な成果を挙げている。成果発信に関しては、ハイインパクトジャーナルでの論文掲載、主要な国際会議での招待講演を数多く行い、また本年度は国際会議を開催し、研究組織として国際的に大きな存在感を示している。領域主催の全体研究会、トピック別研究会、オンライン・セミナーを通じて、恒常的に活発な情報交換、情報発信を行っている。さらに、YouTubeを利用したアウトリーチ、若手研究奨励賞を通じた若手研究者の育成にも成功している。

今後、実験と理論の連携をさらに強めることによって、ネマティック状態発現の微視的機構が（構造・電荷・スピン・軌道のフラストレーションとの関連も含めて）明らかにされていくことが期待される。また、スピン系、超伝導対系の量子液晶状態の研究も電子系の研究との関連で発展することが期待される。

川村光（神戸大学分子フォトサイエンス研究センター客員教授、大阪大学名誉教授）

本新学術領域「量子液晶の物性科学」は、古くより知られている分子液晶の概念の発展形として近年磁性体や電子系、超伝導体等を舞台に研究が進んできた「液晶的な」秩序状態を対象に、これらの系・分野を横断的に捉え「量子液晶」として統一的に扱うことによって、その基礎学理と応用の格段の深化と展開を図ろうとするものである。上記3分野の理論・実験を含む研究者間の研究交流と相互理解・相互刺激は極めて重要であるが、今次の新型コロナの世界規模の大流行が大きな影を落としたことは否めない。オンラインでのQLCセミナーやQLC若手コロキウム、年末の成果発表会（領域研究会）および本年5月のオンライン国際会議 "International Conference on QLC2021" の開催等、コロナ下でもメンバー間の相互交流の努力は払われているが、本新学術領域のように、潜在的には大きな発展性を秘めているテーマを具現化していく際に当たっては、やはり大きな障害になったであろうことは想像に難くない。一方で、個々のテーマにおいては、色々と興味深い成果が得られていると思う。例えば、ある種の鉄系超伝導体を対象に元素置換量を系統的に変化させることにより量子液晶状態と超伝導状態との関係性を明確化した実験や、通常は強磁性体において観測される巨大磁歪をフラストレーションがある反強磁性体においても見出し、今後の磁性材料応用に途を拓く実験など、大変興味深い成果が報告されている。期間の後半では、これら個々の分野における成果をさらに積み重ねつつ、領域全体としての統合的な成果、新しいコンセプトや普遍性の高い新現象や新技術の創出まで繋げて頂きたい。幸い、ワクチン接種が進めば、期間後半ではメンバー相互間の直接交流の機会を増やすことも可能となろうことが期待され、期間後半では大目標に向かってのメンバー一丸になったのチャレンジを期待したい。

田島節子（日本物理学会会長、大阪大学名誉教授）

通常は気体、液体、固体といった三態で議論されている電子やスピンの状態が、液晶という新しい状態をとる場合があることに着目し、この電荷液晶、スピン液晶、更には電子対液晶の学理を構築することが、本領域の目的である。研究を開始してすぐに、新型コロナウィルスのパンデミックという不運に見舞われ、研究集会のほとんどがオンライン開催になったことにより、グループ内での密な情報交換が限定的なものにならざるを得なかったのは、大変残念である。一方、そのような困難な状況下でも研究は着実

に進められ、種々の実験手法による液晶ドメインの観測や、液晶状態で見られる新しい状態の発見など、新しい成果が数多く論文として出版された。プレスリリースの数も多い。領域メンバーとは相補的なテーマに取り組む優れた研究者が公募研究で加わり、研究の厚みが増したことは、高く評価できる。領域内の情報交換ツールとして、ホームページやニュースレターがうまく機能している。また領域内の研究会だけでなく、2021年5月に国際シンポジウムをも開催して議論の活性化を図ったことも、評価できる。

今後は、測定手法の更なる先鋭化、液晶状態を記述する理論モデルの確立、液晶状態の制御を目指し、量子液晶という新しい物性の学理構築に向けて、研究を収束させていくことを期待したい。コロナパンデミックで中断している若手研究者の海外派遣が、来年には再開されることも期待する。また、計画調書にはなかったが、本プロジェクトの最後に、量子液晶に関する特集号を何らかの学術誌から出すことを提案したい。

Andrey V. Chubukov (Professor, University of Minnesota; Recipient of 2018 John Bardeen Prize)

The goal of the activity is to find common underlying physics in various realizations of QLC's in condensed matter systems, including spin nematics (localized and itinerant, with composite spin order), charge nematics (systems like FeSe, which undergo Pomeranchuk instability in a d-wave charge channel), and superconductors with either spatially non-homogeneous order parameter that breaks lattice rotational symmetry (like in a version of FFLO/pair density wave order), or in which superconductivity either co-exists with a nematic order or induces it (like was recently argued for superconductivity in LiFeAs and in twisted bilayer graphene). My evaluation of this activity is highly positive. The research groups involved in this activity published many high-quality papers in prestigious peer-reviewed journals. I personally was highly impressed by publication "Relationship between Transport Anisotropy and Nematicity in FeSe", in Phys. Rev. X **11**, 021038 (2021), which is the result of the collaboration between QLC group and scientists at Max Planck Institute in Germany. The full list of publications over the 2 years of QLC activity is very long and includes both experimental and theoretical works published in journals Nature Communications, npj Quantum Materials, Applied Physics Letters, to name a few. In May 2021, the QLC group organized a highly successful International Conference on QLC, with talks from prominent researchers from around the world. I personally very much enjoyed high-quality talks on all pillars of the QLC activity and on the goal of the organizers to search for common organizing principles of various realizations of QLC phases in condensed matter systems.

In my view, the QLC activity is running extremely well, and I expect many more fundamental discoveries and publications in high-profile journals in the second half of the activity period.

Peter J. Hirschfeld (Distinguished Professor, University of Florida)

This is a brief review of a vast effort to study the properties of quantum materials and devices, and to develop ideas for new ones. My ability to evaluate is limited to a glimpse at their stated goals, and the publication output over the past two years from four subgroups; I assume site visits have been out of the question because of the difficulty of meeting in person due to Covid-19 restrictions. Let me begin by saying that the publication output is prodigious even for a team of 26 researchers, and especially given the limitations of the past 15 months on research. The publications are not only numerous, but have appeared almost exclusively in highest quality journals, from JPSJ to Nature, to Science and APS journals. There is clearly wide collaboration among the different subgroups, sharing samples, theoretical knowhow, and experimental techniques to attack a wide variety of frontline quantum problems. There is no doubt that this excellent group of researchers is collectively having an enormous impact on the field of quantum materials.

The signature achievements directly in this area have been the discovery of remarkable effects on superconductivity near the pressure- or doping-driven nematic critical point in Fe-based superconductors, possibly driven by the elusive Bose-Einstein condensate; magnetic field-induced strain in a triangular antiferromagnet; measurement of a divergent nematic susceptibility at the end of the pseudogap line in a cuprate superconductor; and control of domains of topological nematic superconductivity through externally-applied uniaxial stress. Most other publications are high-quality studies of quantum materials that do not focus directly on quantum liquid crystals. However, the degree of cross-fertilization is remarkable, and I believe that as this collaboration ramps up and the current barriers to research due to Covid fall, those researchers who have been studying problems of the quantum liquid crystal state will share their expertise, and those from outside this subfield will become increasingly motivated to study these problems.

Overall, progress in the past two years has been quite remarkable under the circumstances.