

# 研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」 事後評価（課題評価）結果

## 1. 研究領域の概要

本研究領域は、トポロジーという新たな物質観に立脚したトポロジカル材料科学の構築と、それによる革新的な新規材料・新規機能創出を目的とし、「トポロジカル絶縁体」に代表される様々なトポロジカル量子材料に加え、磁性、光学、メカニクス、ソフトマター（高分子材料・ゲル材料など）分野など、広範な領域における”トポロジカル材料科学”の探求を通して、原理的にその性能向上の限界が顕在化してきているエレクトロニクスデバイス分野等において新たなパラダイムを築くことを目指す。

具体的には、電子材料、磁性材料、光学材料、メタマテリアル、高分子材料、分子性材料といった広範な分野での新規トポロジカル物質を開拓し、それらの材料としての設計・制御による革新的機能創出およびデバイス創成へつながる先駆的で独創的な研究を推進する。さらにトポロジカル材料科学の体系化を目指し、物理学・化学・工学・数学等の広範な学問分野の連携を推進する。これらを通じて、様々なトポロジカル物質群、機能群を統合し、従来の物質観を超えたトポロジー材料科学を構築する。

トポロジーを共通言語とした新規物質・材料開発、理論・計算研究、計測・解析技術の開発の緊密な連携を通じて、低エネルギー社会、超スマート社会といった社会的ニーズに応える、革新的材料・デバイス創出につながる物質・材料研究の新たなパラダイムを生み出すことを図る。

## 2. 事後評価の概要

### 2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

「戦略的創造研究推進事業（先端的低炭素化技術開発及び先端的カーボンニュートラル技術開発（ALCA-Next）を除く。）の実施に関する規則」における「第4章 事業の評価」の規定内容に沿って実施した。

### 2-2. 評価対象個人研究者及び研究課題

#### 2020年度採択研究課題

- (1) 翁 銭春（理化学研究所開拓研究本部 客員研究員）  
ノイズの画像化によるトポロジカル材料の電子ダイナミクスの解明
- (2) 鎌田 大（日本電信電話（株）NTT物性科学基礎研究所 リサーチアソシエイト）  
トポロジカルエッジ状態におけるスピン・電荷ダイナミクスの観測と制御
- (3) 北村 恭子（東北大学大学院工学研究科 教授）  
歪（ひずみ）フォトリソニック結晶科学の構築と新奇ビームレーザーへの展開
- (4) 草本 哲郎（大阪大学大学院基礎工学研究科 教授）  
三回対称ラジカルを基とするカゴメーハニカムハイブリッド格子の構築と機能開拓
- (5) 張 奕勁（東京大学生産技術研究所 助教）  
極性二次元物質とそのヘテロ構造におけるバルク光起電力効果
- (6) 中田 陽介（大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授）  
光誘起テラヘルツトポロジカル状態の時空間制御
- (7) 野本 拓也（東京大学先端科学技術研究センター 講師）  
第一原理計算に基づくトポロジカル磁性材料探索
- (8) 速水 賢（北海道大学大学院理学研究院 准教授）  
らせん構造に立脚した新規トポロジカル磁性体の理論的研究
- (9) 広部 大地（静岡大学理学部 助教）

- chiral-induced spin selectivityの幾何学的性質と分子スピン・光機能の探究
- (10) 松永 隆佑 (東京大学物性研究所 准教授)  
トポロジカル半金属を用いたテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス素子開拓
- (11) 山本 慧 (日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 副主任研究員)  
非相反表面波：材料科学に使えるアノマリー

### 2-3. 事後評価の実施時期

2023年10月23日(月曜日) 事後評価会開催

### 2-4. 評価者

#### 研究総括

村上 修一 東京工業大学理学院 教授

#### 領域アドバイザー

石坂 香子 東京大学大学院工学系研究科 教授

石原 照也 香港大学理学部 訪問教授

大淵 真理 富士通(株)富士通研究所 特任研究員

齊藤 英治 東京大学大学院工学系研究科 教授

笹川 崇男 東京工業大学科学技術創成研究院 准教授

佐藤 昌利 京都大学基礎物理学研究所 教授

高田 十志和 広島大学大学院先進理工系科学研究科 研究科長

坪井 俊 武蔵野大学工学部数理工学科 特任教授

眞子 隆志 科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー

村木 康二 日本電信電話(株)NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員

求 幸年 東京大学大学院工学系研究科 教授

#### 外部評価者

該当なし

### 3. 総括総評

本研究領域は、「トポロジー」という新たな物質観に立脚したトポロジカル材料科学の構築と、それによる革新的な新規材料・新規機能創出を目的とし、広範な領域における「トポロジカル材料科学」の探求を通して、原理的にその性能向上の限界が顕在化してきているエレクトロニクスデバイス分野等において新たなパラダイムを築くことを目指している。

今回評価対象となる3期生（2020年度採択）11名は、電子材料と磁性材料を中心に、光学材料、有機材料などの幅広い分野で挑戦的な研究を進めてきた。具体的には、磁化のトポロジカルな構造（スキルミオンや特異な反強磁性体）についての理論研究、トポロジカル半金属を用いたテラヘルツ光物性の実験研究、トポロジーの概念に基づくキラル物質中のスピン物性、ファンデルワールス積層のバルク光起電力効果、トポロジカル絶縁体のエッジ状態伝搬のダイナミクスの実験での観測、トポロジーの概念の多様な分野への展開（フォトニック結晶でのトポロジカル端状態、フォトニック結晶での歪による伝搬制御、有機高分子の2次元格子等）、物理現象のトポロジーの数学的基礎の構築などに分類され、それぞれ新しく独創的な研究成果を挙げた。

新型コロナウイルス感染拡大により、特に研究期間前半は、実験装置の調達や実験遂行に支障が生じたり、出張等による研究交流や成果発表ができなかったりと困難な状況であったが、それぞれに工夫をして克服をして、顕著な研究業績を挙げることができた。また、領域の運営方針として各研究者には、当初計画にこだわりすぎず、国内外の研究動向を見ながら、研究項目や展開の方向性を機動的に変えて挑戦してほしいと伝えてきた。3期生の研究者はその趣旨をよく理解し、当初目標を遂行するなかで出てきた新しい着想を発展させて、研究に新しい展開を作ることができており、高く評価できる。また、さきがけをきっかけとした領域内での共同研究もいくつかスタートしており、今後の研究展開が期待される。

また新型コロナウイルス感染拡大により、課題採択後約2年間は対面での会議を行うことができなかったが、オンラインでの領域会議やインフォーマルミーティング（自由参加の意見交換会）をうまく活用することで、積極的に共同研究・研究交流を進めることができた。幸いにその後には対面の会議が可能になり、研究者間の交流や共同研究が一層盛んになるとともに、実地でのサイトビジットも実施することができ各研究者の研究状況の把握と改善の助けとなった。

また、11名のうち6名が研究期間中に異動または昇進しており、またさまざまなプレスリリースでの成果発表も相次ぐなど、さきがけを契機に研究分野において評価され、研究者として着実に成長している。1、2期のめざましい研究業績を領域会議やシンポジウム等で目にしていることが刺激となって、3期生研究者は皆、研究期間後半において大きな研究の進展や、新分野への展開をしており、さきがけでの交流がプラスに作用していると感じられた。今後もさきがけでの経験や得られた人脈を生かして、研究の幅を広げてさらに飛躍することを期待している。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ノイズの画像化によるトポロジカル材料の電子ダイナミクスの解明

2. 個人研究者名

翁 銭春（理化学研究所開拓研究本部 客員研究員）

3. 事後評価結果

本研究の目標は、新しい計測技術である走査ノイズ顕微鏡 (SNoiM: Scanning Noise Microscope) を開発し、トポロジカル材料における電子散乱・散逸過程を実空間で直接可視化して解明することである。当初の目標である低温の走査ノイズ顕微鏡 STM-SNoiM の開発については達成されており、今後の発展が期待できる。STM-SNoiM には、開発されたテラヘルツ領域の光検出機が搭載され、電子温度を低温ナノスケールで測定できるようになった。さらにトポロジカル物質における散逸現象の測定をいくつか行い、室温と低温との現象の違いを見出した点は評価できる。4.2K での STM-SNoiM までは行かなかったが、本成果の低温領域でも充分新しい物理現象にアプローチできる。時間的にトポロジカル物質のエネルギー散逸解明まで充分にできなかったものの、観測技術としては確立することができたため、トポロジカル物質エネルギー散逸解明への道筋はつけられており、今後の展開が期待できる。また低温のナノスケール温度測定技術としても有用な結果である。さらにナノスケールの SHG (2 次高調波発生) の検出など、当初予想していなかった成果も出ている。

装置開発に関して複数の特許出願を行っている点は評価できる。特に、超高感度テラヘルツ検出技術 (特許出願済) はさまざまな応用が見込めそうであり、応用面で期待が大きい。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： トポロジカルエッジ状態におけるスピン・電荷ダイナミクスの観測と制御

2. 個人研究者名

鎌田 大（日本電信電話（株）NTT 物性科学基礎研究所 リサーチアソシエイト）

3. 事後評価結果

スピン・電荷ダイナミクスの測定・制御として、電子と正孔の共存する2次元トポロジカル絶縁体でのヘリカルエッジ状態の伝搬（量子スピンホール効果）の観測のため、プラズモン等の励起の時間分解測定を行うことで、素励起の伝播特性を実験で解明した。2次元トポロジカル絶縁体の時間分解電気伝導測定では、ヘリカルエッジ状態の電荷ダイナミクスの測定を精度よく行うことができた。この測定結果は非常に高精度で美しいもので、ゲート電圧や磁場の変化に対して電子や正孔のチャンネル数をはっきり同定でき、理論の裏付けとなる非常に良い測定結果を得ている。目標を十分に達成したと認められる。

測定手法として、オンチップ時間分解測定手法を確立したことも高く評価できる。世界最先端のオンチップ時間分解測定手法はさまざまな準粒子伝導の測定に応用でき、トポロジカル物質を含む種々の系における準粒子励起ダイナミクスの解明が進むことが期待できる。その一例として、グラフェンのプラズモンの測定を既に行っており、それを現在マグノンに対して測定を試みているところである。グラフェンにおいては、プラズモン励起の観測に成功していて、さらに当初計画になかった研究内容としてマグノン励起の時間分解測定にも着手できたが、道半ばなので、今後の成果に期待したい。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 歪(ひずみ)フォトニック結晶科学の構築と新奇ビームレーザーへの展開

2. 個人研究者名

北村 恭子（東北大学大学院工学研究科 教授）

3. 事後評価結果

歪フォトニック結晶の学理構築にむけて、フォトニック結晶に空間的に変化する歪を導入した新しい構造について、シミュレーションと実験とを併用して、光が曲がるメカニズムを解明している。重力とのアナロジーなども興味深い結果であるといえる。歪フォトニック結晶において、孔の位置や形状を系統的に変えた場合を精密に測定・計算しており、光の伝搬の精密制御に関して重要な知見を得ている。またテラヘルツ波での歪フォトニック結晶の実証に関しては、シミュレーションと実験との精密な比較から、技術的な課題がどこにあるかをきちんと同定しており、今後の発展に対して重要な示唆となっている。特にすべり歪の場合に、主要な単位格子の位置が元の位置から時間的に変化していくことで光の軌道が大きはずれが期待できることを提案できた。この自由度を活用すれば今後光の経路を操作する手段を広げられる可能性がある。

本さきがけ研究の成果が認められ、2023年10月には、若手教員のうちその専門分野において高い業績を有するものに与えられる、東北大学ディスティングイッシュトリサーチャーの称号を付与されるなど、研究者としての飛躍につながった。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 三回対称ラジカルを基とするカゴメーハニカムハイブリッド格子の構築と機能開拓

2. 個人研究者名

草本 哲郎（大阪大学大学院基礎工学研究科 教授）

3. 事後評価結果

高分子のハニカム格子・カゴメ格子を持つ物質の創製とその性質の研究を目指し、磁場に対して様々な応答をする高分子のハニカム格子・カゴメ格子を持つ物質を創製し、それらの物性を細かく調べており、多くの成果を挙げている。その試みの中で、格子ではないが磁場により変化する発光現象をもつ高分子作成に大きな成果を挙げ、計画を着実に遂行できたと考えられる。磁気光相関機能物質については当初の予定になかったが、MagLum（磁場で物質の発光色が変わる現象）を示す初のラジカル性固体を発見し、さらにその関連物質を多数合成し、それらでの系統的測定により、MagLumの基礎的な性質を解明し、単分子 MagLum を初めて観測するなど目覚ましい成果をあげた。分子磁性と分子発光の分野は元来別々に研究されてきたが、本研究によりそれらの交差領域が開拓されて、スピン相関光機能の理解や制御につながる波及効果がありうる。

研究期間中に分子研から阪大へと所属が変わったが、さきがけの予算などを活用してスムーズに研究を継続できる環境を整えており、技術員、研究補助員などを参画させることでプロジェクトをうまく推進した。

2022年10月には、Journal of Materials Chemistry C (Royal Society of Chemistry) のアドバイザーボードに加わるなど、さきがけ研究成果を活かし、錯体分子化学の領域で研究者としての飛躍につながった。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 極性二次元物質とそのヘテロ構造におけるバルク光起電力効果

2. 個人研究者名

張 奕勁（東京大学生産技術研究所 助教）

3. 事後評価結果

バルク光起電力の測定の装置を立ち上げて、極性をもつ2次元物質のファンデルワールス積層でのバルク光起電力の測定を行った。コロナ等の要因で測定装置の完成が遅れたり、物質によっては劈開が難しかったことで当初目標どおり測定できないものもあったが、全体としては光起電力の測定に成功し、その物理を議論することができ、さらに今後への新しい研究の種を見出すことができている。その一例として Janus TMD (空間反転対称性の破れた遷移金属ダイカルコゲナイド) や  $\text{WTe}_2$  のツイスト積層など、光起電力の物理に関して新しい物質の候補を見出してきている。またラマン分光や、有機2次元物質を用いた積層作成など、今後の研究の課題となる種を見出すことができた。極性2次元物質の積層は、このバルク光起電力効果実現の重要な候補として注目され、今後の活躍が期待される。

さきがけの理念のもとで研究ネットワークを拡げ、また実験手法を多様化したことは高く評価でき、十分な成果である。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 光誘起テラヘルツトポロジカル状態の時空間制御

2. 個人研究者名

中田 陽介（大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

金属ナノ構造、表面プラズモン、THzなどを組み合わせた独自性の高い研究を推進し、テラヘルツ領域のレーザーパターンの照射によるトポロジカル状態の実証を試み、表面プラズモンの理論と（光の吸収の観測、抵抗値の観測による）観測に成果を挙げた。トポロジーに基づくプラズモン系の性質の理論的解明を進めており、新しい方向性が見受けられ、表面プラズモンのバルク・エッジ対応に関する知見は、トポロジーの概念をより広く適用できる可能性を示唆している。表面プラズモンのゼロモードに関する理論研究は当初は想定していなかった研究成果である。

光照射で可変なメタマテリアルパターンを作ることは道半ばであるが、その基盤となる光による基材の導電率変調までは成功している。ナノ構造による光応答の測定技術を確立し、抵抗低下を実証した。テラヘルツ系の構築もできたので、両者を組み合わせた実験成果を今後期待したい。

本研究成果の社会への還元に関しては、光照射による電気抵抗変化はかなり大きいので、パターン生成による書き換え可能なメタ表面が実現できれば、実験室レベルでは意味のあるデバイスとなり得る。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 第一原理計算に基づくトポロジカル磁性材料探索

2. 個人研究者名

野本 拓也（東京大学先端科学技術研究センター 講師）

3. 事後評価結果

短周期スキルミオン物質の探索と理解、磁性体の磁気構造予測の計算ツール開発に大きな進展があり、ホール効果や磁性体のデータベース化についても進展が見られた。さらにそれを活用した材料探索を開始し一定の成果を得ている。また、磁気構造／ドメイン制御によって磁化反転制御ができることを計算で実証した。磁性体データベースの構築、クラスター多極子を用いた磁気構造の記述や磁気構造の精密な予測は当初予測していなかったが重要な成果である。また反強磁性 TMR の現象論も応用上重要である。

一連の成果により、磁性体の磁気構造予測を精密に行うことができるようになり、スキルミオン物質やノンコリニア反強磁性体の磁性の理解の進展に寄与する研究成果を上げている。また  $Mn_3Sn$  のスピン歳差に関する研究や磁化スイッチに関する研究などは、反強磁性体を用いたスピントロニクスへの応用上大いに注目される。

様々な計算手法の開発も含め、物性探索や材料探索、実験結果の解釈など、質・量ともに最先端で第一原理の物性研究を牽引している気鋭の 1 人だと考えられる。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： らせん構造に立脚した新規トポロジカル磁性体の理論的研究

2. 個人研究者名

速水 賢（北海道大学大学院理学研究院 准教授）

3. 事後評価結果

磁気スキルミオンの安定化機構や、磁気スキルミオンを示す物質に関する計算など実験に直結する重要な理論の成果をあげた。また模型の構築と数値シミュレーションの組み合わせにより、トポロジカル磁性物質を系統的に探索する道を拓いた。ここでは複数の螺旋構造の重ね合わせというアイデアを産み出したことが研究のキーとなっている。系統的・効率的な探索理論を構築したという点で高く評価される。トポロジカル磁性体については、対称性とモデル計算を用いて網羅的な研究を行っており、これはスキルミオンなどトポロジカル磁性体の物質探索に大きな進展を与えるものである。

中でもトポロジカル磁性体の新しい伝導・交差応答現象の予言や、さきがけ領域内でのさまざまな共同研究については、今後のさらなる展開が期待できる。さきがけ外の実験グループとの協業、理論家との共同研究ともに非常に有効に機能し、当初の目的、想定されていなかった展開ともに十分以上の成果を挙げており、特に発表論文の数やその中の筆頭論文の数は驚異的なものである。2023年11月には、「相関電子系に対する多極子表現論の構築と交差相関応答への適用」に対して凝縮系科学賞（注）を受賞するなど、さきがけでの研究成果を活かして、研究者としての飛躍につながっている。

（注）凝縮系科学に従事する優れた若手研究者を奨励することを願い、青山学院大学（現 岡山大学 特任教授）の秋光純教授と東京理科大学の福山秀敏教授が私費を投じて2006年に創設した賞。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： chiral-induced spin selectivity の幾何学的性質と分子スピン・光機能の探究

2. 個人研究者名

広部 大地 (静岡大学理学部 助教)

3. 事後評価結果

キラルな有機超伝導体の端に現れる反平行スピン対の存在を示すなど、キラル分子性材料によるスピン整流効果である CISS (chiral-induced spin selectivity) 効果の理解に関して大きな成果を挙げた。この CISS 機構仮説の検証は、超伝導体の CISS の基礎となる萌芽的な研究成果であるが、当初は想定していなかったもので、Nature 誌掲載に結び付けることで研究者としての大きな経験値になったものと思われる。

また独自手法の開発による Te へのドーピング技術や Te の巨大電流整流、液浸による電子ドープなど、当初の計画にはないがインパクトの大きな研究成果をあげており高く評価できる。無機と有機にまたがってダイナミックに研究を展開していて、柔軟に研究を進め、対象とする材料の範囲を大きく広げ、そこで大きな成果を挙げていることは高く評価され、今後の飛躍が期待される。また一部の成果は特許申請につながるなど、本人にとって新しい知見や展開が得られていて、研究者としての今後の発展にプラスになっていると思われる。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： トポロジカル半金属を用いたテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス素子開拓
2. 個人研究者名  
松永 隆佑（東京大学物性研究所 准教授）
3. 事後評価結果

3次元トポロジカル半金属に現れる線形エネルギー分散やベリー曲率に由来した特異な非線形応答及び異常応答を解明し、テラヘルツ電場での制御を実現し、室温で動作する高速エレクトロニクス・スピントロニクス素子の開発を目標としている。目標とした中ではディラック半金属でのテラヘルツ誘導放出や反強磁性体のテラヘルツ・スピン制御など、当初の目標は充分達成されたと判断される。

また当初の目標以外に多くの十分な成果を挙げている。テラヘルツ光技術を駆使して偏光回転角の精密測定を実現し、ホール伝導度の観測などに成果を挙げている。例えば異常ホール効果の超高速ダイナミクス測定は、異常ホール効果を従来より3桁小さい時間スケールで測定するなどの点で重要な結果である。また高密度円偏光光励起による異常ホール効果の観測では、理論予測を超える実験結果を得たことで、トポロジカル物質に対する円偏光照射や、ディラック半金属のフロッケエンジニアリングに関する理解が進んだ。また、3回・5回回転対称なパルス光生成にも成功し、インパクトのある研究成果を生み出した。

さまざまな時間分解測定の成果はそれぞれにインパクトがある。例えばスピンホール効果のテラヘルツ周波数分解測定などはこの現象の基礎となる重要なデータであるが、いままでに測定例はなかった。このような世界最高水準の測定により新しい物性が明らかにできる点は、大きな波及効果を生み出しうるもので高く評価できる。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 非相反表面波：材料科学に使えるアノマリー

2. 個人研究者名

山本 慧（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 副主任研究員）

3. 事後評価結果

表面音波の応用研究については、さきがけ外の実験研究者と協力してかなりの成果をあげていて、主要な学術誌に多数の論文を発表している。特に表面音波と磁気の結合についての一連の研究成果はスピントロニクス応用への可能性がある。これらの共同研究における理論構築では主要な役割を果たしており高く評価できる。一方、表面音波やプラズモンなどのトポロジーの特徴づけとアノマリーの関係については試行錯誤の結果、coarse geometry（粗幾何学）という枠組みが有効であることを見出しており、今後それに関して研究を進展させていくことが期待される。

期間中に粘り強く数学に取り組み、深い数学の知見に基づき、物理現象へのアプローチを行う準備を進めたことが評価できる。この研究が結実するにはもう少し研究の蓄積が必要であろうが、さきがけ研究を通じて海外研究者との活発な交流を行うことができおり、これらの交流や試行錯誤により得た知見が、今後の研究の進展につながる大きな財産になったと思われる。