

研究領域「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

本研究領域は、将来の超スマート社会実現に資するため、連続変形に対する不変性に着目した新たな物質観であるトポロジーに着目し、新規な物理現象の発現の解明、新規機能・新原理・新規構造に基づいた材料・デバイスの創出に資する研究開発を基礎基盤的アプローチから推進することにより、既存の技術では実現できない革新的機能を有する材料・デバイスの創出を目的とします。

具体的な研究分野としては、電子状態のトポロジーに関する物性物理学を中心に置き、フォトンクスやスピントロニクス分野、さらに新規機能を実現するデバイス工学への展開を対象とします。一方、実空間のトポロジーにおいても位相欠陥等のトポロジカルな性質を利用したスピン流の制御に加え、分子の幾何学的性質や絡み合いを制御するソフトマターも対象とします。

これらの研究分野が複合的に連携することで、結晶成長技術、構造や物性の解明と制御のための計測・解析・加工プロセス技術、部素材・デバイス設計技術等の技術基盤の創出やこれらに関する基礎学理の構築も行いつつ、革新的機能を有する材料・デバイスの創出に取り組みます。

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・CRESTにおける事後評価の目的、方法、評価項目及び基準に沿って実施した。

2-2. 評価対象研究代表者及び研究課題

2018年度採択研究課題

- (1) 佐藤 宇史（東北大学材料科学高等研究所 教授）
ナノスピンARPESによるハイブリッドトポロジカル材料創製
- (2) 塚崎 敦（東北大学金属材料研究所 教授）
トポロジカル機能界面の創出
- (3) 中辻 知（東京大学物性研究所 特任教授）
電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成
- (4) 胡 暁（物質・材料研究機構ナノアーキテクニクス材料研究センター 特命研究員）
人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発
- (5) ファム ナム ハイ（東京工業大学工学院 准教授）
トポロジカル表面状態を用いるスピン軌道トルク磁気メモリの創製

2-3. 事後評価会の実施時期

2023年10月23日（月曜日）

2-4. 評価者

研究総括

上田 正仁	東京大学大学院理学系研究科 教授
領域アドバイザー	
安藤 陽一	ケルン大学物理学科 教授
伊藤 耕三	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
尾松 孝茂	千葉大学大学院工学研究院 教授
川崎 雅司	東京大学大学院工学系研究科 教授
小磯 深幸	九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 名誉教授
富永 淳二	産業技術総合研究所 デバイス技術研究部門 名誉研究員
中村 志保	キオクシア（株）メモリ技術研究所 参事
前野 悦輝	（公財）豊田理化学研究所 フェロー
萬 伸一	理化学研究所量子コンピュータ研究センター 副センター長
外部評価者	
該当なし	

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ナノスピン ARPES によるハイブリッドトポロジカル材料創製

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

佐藤 宇史（東北大学材料科学高等研究所 教授）

主たる共同研究者

小口 多美夫（大阪大学大学院基礎工学研究科 特任教授）

組頭 広志（東北大学多元物質科学研究所 教授）

瀬川 耕司（京都産業大学理学部 教授）

山内 邦彦（大阪大学大学院工学研究科 特任助教）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント：

本研究課題は、エネルギー・運動量・スピンのすべてを同時に、世界最高空間分解能で極めて高効率に決定する高分解能角度分解光電子分光（ARPES）装置の開発と、装置を用いて、その場観察と界面機能設計に基づいたトポロジカル材料の創製を目指したものである。

ARPES 装置開発においては、二次元トポロジカル絶縁体の一次元エッジ状態を観察することを目的として、マイクロ ARPES、続いてナノスピン ARPES を着実に開発してきた。その成果は CREST 領域内外で作成されたサンプルの表面電子バンド解析を世界トップレベルに引き上げるとともに、トポロジカル物質探索および確認のために広く利用されるに至った。また材料創製においては、マイクロ ARPES によりパウダー試料でも解析が可能となり、ナノスピン ARPES では $1\mu\text{m}$ を切る分解能を実現し、まさに一次元エッジ状態観察に迫るまで研究展開されており、今後さらなる性能向上により、新奇な材料の創製が実現可能と期待される。また解析結果の AI 学習のプロトコルの開発も解析速度を向上する点で非常に有用なものとなることが期待できる。

当初目標以上の成果を挙げただけでなく、トポロジカル材料科学全体へ多大な貢献を果たした点について高く評価する。今後さらに研究を発展させ、分野の幅を超えた成果創出を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： トポロジカル機能界面の創出
2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

塚崎 敦（東北大学金属材料研究所 教授）

主たる共同研究者

野村 健太郎（九州大学大学院理学研究院 教授）

求 幸年（東京大学大学院工学系研究科 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント：

本研究課題は、トポロジカル・バンドの制御と室温高感度磁気センサー開発、およびキタエフ量子液体などマヨラナ準粒子研究につながる新しい物質の提案と実証を目指したものである。

バンド制御およびセンサー開発においては、薄膜合成技術を駆使して磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の開発、Fe-Snナノ薄膜による三次元磁気センサーの発明、および反強磁性体 MnTiO_3 のスピンホール磁気抵抗効果素子の開発に至った。バンド制御の科学としても、領域内の共同研究を通じてディラック半金属の電子構造をもったトポロジカル物質のスピンホール効果の原理を解明した。また、アモルファス構造のモデル計算からベリー曲率を計算できる手法を開発し、従来の結晶群を超えた新しいトポロジカル物質探索にも精力的に取り組んだ。新奇物質提案・実証においては、イルメナイト超格子におけるIr酸化物のハニカム格子の超格子の実現やトポロジカル強磁性ワイル金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の薄膜化に成功し、ドーピング依存性などの実験結果の理論的理解も深まった。研究代表者が有する世界トップレベルの薄膜合成技術を核にして、理論研究者と非常にうまく連携を行った結果といえる。

当初目標以上の成果を挙げただけでなく、トポロジカル材料科学全体へ多大な貢献を果たした点について高く評価する。今後さらに研究を発展させ、デバイス性能を向上させることを期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

中辻 知（東京大学物性研究所 特任教授）

主たる共同研究者

有田 亮太郎（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）

大谷 義近（東京大学物性研究所 教授）

薬師寺 啓（産業技術総合研究所新原理コンピューティング研究センター 研究チーム付）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント：

本研究課題は、研究代表者自らが見い出した Mn_3X 系を代表例とするワイル反強磁性体に着目し、その機能性を利用した新規スピン変換物性を開発、およびスピントロニクスデバイスの創出を目指したものである。

物性開発においては、磁気スピンホール効果、フラットバンド金属等、数々の新規物性を発見しそれらの基礎学理を構築した。またデバイスの創出に向け、歪みの導入による Mn_3Sn での垂直2値状態の実現、室温での巨大なピエゾ磁気効果の実現およびピエゾ磁気効果で発生する磁化とホール信号の制御成功、スピン軌道トルクを用いた反強磁性垂直2値状態の電流制御成功など、めざましい成果を挙げた。また当初計画を超えた強磁性トポロジカル材料を用いた熱流センサーの開発や、 Mn_3X 系の反強磁性体からなるMTJ素子におけるトンネル磁気抵抗の世界初観測など、基礎科学のみならず社会実装へ向けた研究開発としても先駆的な成果を多数挙げた。

当初目標以上の成果を挙げただけでなく、トポロジカル材料科学全体へ多大な貢献を果たした点について高く評価する。今後は実用化を本格的に視野に入れ、さらに研究を発展させることを期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

胡 暁（物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センター 特命研究員）

主たる共同研究者

雨宮 智宏（東京工業大学工学院電気電子系 准教授）

菊池 昭彦（上智大学理工学部・機能創造理工学科 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント：

本研究課題は、ディラック型分散関係を示す蜂の巣型物質（人工グラフェン）を材料に、新奇トポロジカルフォトンクス状態の創成、および革新的フォトンクスデバイスの実現を目指したものである。

新奇トポロジカルフォトンクス状態の創成においては、トポロジカルフォトニック結晶での光源と逆向き大きな光渦形成効果の発見等、新奇なホイヘンス-フレネル現象の発見、トポロジカル導波路モードに基づく全光干渉計スイッチの理論構築等、高水準でかつ独創性の高い成果を挙げた。これらの成果はトポロジカルフォトンクス分野に大きく貢献すると期待される。デバイス創成においては、トポロジカル共振器面発光レーザー（TCSEL）やフォトニックバンドダイヤグラム顕微鏡といった独創性の高いデバイスを開発した。これらの成果は光デバイスの機能発現への貢献が期待できる。

当初目標を十分に達成しただけでなく、トポロジカル材料科学全体へ多大な貢献を果たした点について高く評価する。今後は個々の成果を有機的に組み合わせ、最終的にデバイスとして提案されることを期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： トポロジカル表面状態を用いるスピン軌道トルク磁気メモリの創製

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

ファム ナム ハイ（東京工業大学工学院 准教授）

主たる共同研究者

小林 正起（東京大学工学系研究科 准教授）

宮本 泰敬（日本放送協会放送技術研究所 主任研究員）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント：

本研究課題は、トポロジカル絶縁体BiSbの巨大なスピホール角を利用した超高速・低消費電力スピン軌道トルク磁気メモリ（SOT-MRAM）の創製を目指したものである。

SOT-MRAMの創製においては、スパッタリング法を用いた高品質のBiSb製膜技術の確立、サファイア基板や酸化Si基板上のBiSb/垂直磁化多層膜の製膜技術の確立、超巨大な有効スピホール角および超低消費電力磁化反転の実証に成功した。今後は実用化に向け、動作原理の基礎学理構築とさらなる性能評価を期待したい。また、磁性細線におけるカイラル磁壁・スキルミオンの発生とスピン軌道トルクによる超低電流駆動に適するBiSb/磁性体接合を試作した。室温磁性半導体GaFeSbとBiSbの接合においては、スピポンピングによるBiSbへのスピン注入と逆スピホール効果によるスピン流検出に成功し、スピントランジスタ等の能動素子実現に向けた基盤となることが期待される。

当初目標を十分に達成しただけでなく、トポロジカル材料科学全体へ多大な貢献を果たした点について高く評価する。今後は光電子分光グループとの一層の連携強化による成果の拡大を期待したい。