

国立研究開発法人科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
さきがけ(個人型研究)
追跡評価用資料

研究領域
「新物質科学と元素戦略」
(2010年度～2016年度)

研究総括: 細野 秀雄

2024年3月

目次

要旨	1
第 1 章 研究領域概要.....	2
1.1 戦略目標.....	2
1.2 研究領域の目的.....	2
1.3 研究総括.....	2
1.4 領域アドバイザー.....	2
1.5 研究課題および研究者.....	3
第 2 章 追跡調査	7
2.1 追跡調査について.....	7
2.1.1 調査の目的.....	7
2.1.2 調査の対象.....	7
2.1.3 調査方法	9
2.2 追跡調査概要.....	9
2.2.1 研究助成金.....	9
2.2.2 論文	10
2.2.3 特許	10
2.2.4 受賞	11
2.2.5 共同研究や企業との連携.....	13
2.2.6 実用化・製品化.....	13
2.2.7 ベンチャー起業.....	14
2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果.....	15
2.3.1 研究領域の展開状況（まとめ図）	15
2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	17
2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献.....	27
2.3.4 その他の特記すべき事項.....	30

要旨

本報告書は、戦略的創造研究推進事業のさきがけ（個人型研究）の研究領域「新物質科学と元素戦略」（2010年度～2016年度）において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）事業及び事業運営の改善等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

第1章では、研究領域概要について、戦略目標、研究領域の目的、研究総括、領域アドバイザー、研究課題および研究者をまとめた。

第2章では、追跡調査の目的、対象および方法を記述し、研究助成金、論文、特許、受賞、共同研究や企業との連携、実用化・製品化およびベンチャー起業についてまとめた。また研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果について、研究領域の展開状況、研究成果の科学技術の進歩への貢献、研究成果の社会・経済への貢献および新たな展開や分野間融合をまとめた。

第 1 章 研究領域概要

1.1 戦略目標

戦略目標：「レアメタルフリー材料の実用化及び超高保磁力・超高靱性等の新規目的機能を目指した原子配列制御等のナノスケール物質構造制御技術による物質・材料の革新的機能の創出」

本戦略目標は、「希少元素・有害元素の代替、戦略的利用のための技術基盤を確立する」という目標達成に向け、目的とする材料機能の発現原理を検証・把握し、ナノスケールの物質構造（原子配列、磁区構造、分子構造等）を制御することによって、単なる「希少元素・有害元素の代替」にとどまらない、「革新的機能材料」の創成を目指すものである。

1.2 研究領域の目的

研究領域：「新物質科学と元素戦略」（2010 年度発足）

物質の機能は、それを構成する元素と不可分な関係にあることが知られている。しかし、元素の数は 100 あまりに過ぎず、そのうち実際に材料に使えるものは、資源や毒性などの制約のために、数が限定されてきている。よって、社会を支え要求に応える材料を産み出すためには、これまでの各元素に対するイメージを刷新し、新しい可能性を切り開く成果が研究者に求められている。物質・材料分野の飛躍的進展には、ナノ領域の科学と技術の開拓が不可欠であるとの共通の認識から、世界各国でその研究が重点的に行われてきている。

これからは、その基盤の上に各国の特質を反映した施策が実行される時期である。「元素戦略」は、天然資源に乏しい我が国が世界に先駆けて開始した研究施策のひとつで、これまで希少な元素を駆使して実現してきた有用な機能を、できるだけありふれた元素群から知恵を絞って実現しようというものである。これは学術的には、持続可能な社会のための新しい物質科学を確立することを意味する。

本研究領域は、資源、環境、エネルギー問題などを解決するグリーン・イノベーションに資するべく、クラーク数上位の元素を駆使して、ナノ構造や界面・表面、欠陥などの制御と活用による革新的な機能物質や材料の創成と計算科学や先端計測に立脚した新しい物質・材料科学の確立を目指す。

1.3 研究総括

細野 秀雄 （東京工業大学元素戦略研究センター長、科学技術創成研究院 教授）

1.4 領域アドバイザー

本研究領域の領域アドバイザーの人選は、以下の視点から行われた。

- (1) 科学技術政策としての「元素戦略」の成り立ちを熟知し、かつ、高い見識を有している方。

- (2) 物質・材料科学の領域で、独自の視点からオリジナリティの明確な研究を推進している研究者。
- (3) 本研究領域がカバーする分野が広範なことから、専門性はもとより俯瞰的視点を持っていると判断した方々。
- (4) 本研究領域発足時にお願ひした方々に加え、採択したメンバーに適切なアドバイスができる専門の近いアドバイザーがいない場合は、その都度適任者を人選し、お願ひした。

表 1-1 領域アドバイザー

氏名	所属	役職	任期
相田 卓三	東京大学	教授	2011年4月～2016年3月
掛下 知行	大阪大学	教授	2011年4月～2016年3月
北川 宏	京都大学	教授	2011年4月～2011年11月
佐々木 高義	物質・材料研究機構	フェロー	2011年4月～2016年3月
瀬戸山 亨	三菱化学(株)／(株)三菱化学科学技術研究センター	フェロー・執行役員／所長	2011年4月～2016年3月
田中 勝久	京都大学	教授	2012年1月～2016年3月
田中 健	東京工業大学	教授	2012年12月～2016年3月
谷垣 勝己	東北大学	教授	2011年4月～2016年3月
玉尾 皓平	理化学研究所	教授	2011年4月～2016年3月
常行 真司	東京大学	教授	2011年4月～2016年3月
中嶋 敦	慶應義塾大学	教授	2011年4月～2016年3月
中山 智弘	科学技術振興機構	エキスパート	2011年4月～2016年3月
野崎 京子	東京大学	教授	2011年4月～2016年3月
真島 豊	東京工業大学	教授	2011年4月～2016年3月
村井 眞二	奈良先端科学技術大学院大学	特任教授	2011年4月～2016年3月
山口 周	東京大学	教授	2011年4月～2016年3月
山根 久典	東北大学	教授	2011年4月～2016年3月
若井 史博	東京工業大学	教授	2013年2月～2016年3月

(注)所属と役職は研究領域終了時点に記載

1.5 研究課題および研究者

研究課題(研究者)の公募は2010年度から3年間、3期にわたり、総計34件の研究課題が採択された。表 1-2 に各期の研究者、研究課題、採択時の所属と役職、終了時の所属と役職、並びに本追跡調査時点の所属と役職を示す。

表 1-2 研究課題と研究者(第 1 期、第 2 期、第 3 期)

期 (研究期間)	研究課題	研究者	採択時の所属・ 役職	終了時の所属・役 職	追跡調査時の所 属・役職 ^{*1}
第 1 期 (2011 年 4 月 ～2014 年 3 月)	金属間化合物を 活性点とする貴 金属フリー排ガ ス清浄化触媒の 開発	阿部 英樹	物質・材料研究機 構半導体材料セ ンター 主任研究 員	物質・材料研究機構 エネルギー・環境材 料拠点 主幹研究員	物質・材料研究機構 主席研究員
	非バルクの環境 を活用した次世 代材料の理論設 計	有田 亮太郎	東京大学大学院 工学系研究科 准 教授	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	東京大学先端科学 技術研究センター 教授
	希少元素を含ま ない新規超伝導 体の電場誘起キ ャリアドーピン グ法による開発	上野 和紀	東北大学原子分 子材料科学高等 研究機構 助教	東京大学大学院総合 文化研究科 准教授	東京大学大学院総 合文化研究科 准教 授
	ユビキタス元素 を用いた高活性 光触媒の開発	梅澤 直人	物質・材料研究機 構光触媒材料セ ンター 主任研究 員	物質・材料研究機構 光触媒材料センター 主任研究員	Samsung Electronics
	有機化学による 擬元素創製への アプローチ	遠藤 恆平	早稲田大学高等 研究所 助教	東京理科大学理学部 准教授	東京理科大学理学 部 准教授
	新しい電子移動 パラダイムに基 づく有機触媒の 創製	小西 玄一	東京工業大学大 学院理工学研究 科 准教授	東京工業大学大学院 理工学研究科 准教 授	東京工業大学物質 理工学院 准教授
	ナノスピノダル 分解による高効 率太陽電池材料 の設計	佐藤 和則	大阪大学大学院 基礎工学研究科 特任准教授	大阪大学大学院工学 研究科 准教授	大阪大学大学院工 学研究科 准教授
	ユビキタス元素 を用いた高性能 熱電変換ナノ材 料の創成	中村 芳明	大阪大学大学院 基礎工学研究科 准教授	大阪大学大学院基礎 工学研究科 教授	大阪大学大学院基 礎工学研究科 教授
	酸化物エレクト ロニクスのパラ ダイムシフトを 目指したアトム エンジニアリン グ	一杉 太郎	東北大学原子分 子材料科学高等 研究機構 准教授	東京工業大学物質理 工学院 教授	東京大学大学院理 学系研究科 教授
	ナノ自己組織化 を用いたスピン 注入型超高効率 熱電素子の開発	水口 将輝	東北大学金属材 料研究所 准教授	東北大学金属材料研 究所 准教授	名古屋大学大学院 工学系研究科 教授
	イオン伝導パス を有する分子結 晶電解質の創製	守谷 誠	名古屋大学エコ トピア科学研究 所 助教	静岡大学大学院理学 研究科 講師	静岡大学大学院理 学領域 准教授
新規異常高原子 価物質における 革新的機能の開 発	山田 幾也	愛媛大学大学院 理工学研究科 助 教	大阪府立大学 21 世紀 科学研究機構 特別 講師	大阪公立大学大学 院工学研究科 教授	
第 2 期 (2011 年 10 月 ～2015 年 3 月)	酸化物半導体表 面における新機 能の探索	石坂 香子	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	東京大学大学院工学 系研究科 准教授	東京大学大学院工 学系研究科 教授
	フェルミ準位近 傍の微細電子構 造と特徴的フォ ノン分散を利用 した環境調和型	竹内 恒博	名古屋大学エコ トピア科学研究 所 准教授	豊田工業大学大学院 工学研究科 教授	豊田工業大学大学 院工学研究科 教授

期 (研究期間)	研究課題	研究者	採択時の所属・ 役職	終了時の所属・役 職	追跡調査時の所 属・役職※1
	熱電材料と機能 性電子材料の創 製				
	有機エレクトロ ニクスの革新に 資するユビキタ ス有機材料の開 発	辻 勇人	東京大学大学院 理学系研究科 准 教授	神奈川大学理学部 教授	神奈川大学理学部 教授
	遷移金属フリー のアニオン二次 電池の開発	中野 秀之	株式会社豊田中 央研究所無機材 料研究部 主任研 究員	株式会社豊田中央 研究所機能性Si低次元 材料プログラム プ ロジェクトマネー ジャー	株式会社豊田中央 研究所機能性Si低 次元材料プログラ ム プログラムマネ ージャー
	SiO ₂ ナノ多結晶 体：超高靱性高 硬度を有する新 材料の開発	西山 宣正	愛媛大学地球深 部ダイナミクス 研究センター 准教授	ドイツ電子シンク ロトロン研究所放 射光施設 ビームサイ エンティスト	東京工業大学科学 技術創成研究院 特任准教授
	「フェイク分子」 法による多孔性 金属錯体空間の 超精密ポテンシ ャル制御とオン デマンド二酸化 炭素分離機能発 現	野呂 真一郎	北海道大学電子 科学研究所 准教 授	北海道大学電子科 学研究所 准教授	北海道大学大学院 地球環境科学研究 院 教授
	次世代半導体材 料を目指した螺 旋π共役分子の 創製	島山 琢次	京都大学化学研 究所 助教	関西学院大学理工 学部 准教授	京都大学大学院理 学研究科 教授
	ユビキタス元素 を用いた革新的 ナノポーラス複 合材料とデバイ スの創製	藤田 武志	東北大学原子分 子材料科学高等 研究機構 准教授	東北大学原子分子 材料科学高等研究 機構 准教授	高知工科大学環境 理工学群 教授
	固体イオニクス 未開領域を拓く 錯体集積体の創 出	堀毛 悟史	京都大学大学院 工学研究科 助教	京都大学大学院工 学研究科 助教	京都大学高等研究 院 物質-細胞統合 システム拠点 准教 授
	低配位汎用元素 を鍵とする機能 性物質科学の開 拓	松尾 司	理化学研究所基 幹研究所 副ユニ ットリーダー	近畿大学理工学部 准教授	近畿大学理工学部 教授
	単原子層デザイ ンによる希少金 属フリー超高磁 気異方性薄膜の 開発	薬師寺 啓	産業技術総合研 究所ナノスピン エレクトロニクス 研究センター 主任研究員	産業技術総合研 究所ナノスピンエ レクトロニクス研 究センター 研究 チーム長	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 ーム長
	粒界エンジニア リングで創る超 高保磁力ユビキ タス磁石	山本 明保	東京大学大学院 工学系研究科 助教	東京農工大学大学 院工学研究院 特 任准教授	東京農工大学大学 院工学研究院 准 教授
第3期 (2012年10月 ～2016年3月)	新規高スピン偏 極材料の探索と 原子配列制御に 伴う電子状態と 物性変化	梅津 理恵	東北大学金属材 料研究所 助教	東北大学金属材料 研究所 准教授	東北大学金属材料 研究所 教授
	超過冷却液体を 用いたナノスケ ール複合材料の 創製	岡田 純平	宇宙航空研究開 発機構宇宙科学 研究所 助教	東北大学金属材料 研究所 准教授	東北大学金属材料 研究所 准教授

期 (研究期間)	研究課題	研究者	採択時の所属・ 役職	終了時の所属・役 職	追跡調査時の所 属・役職※1
	革新的磁石材料の 為の超高压合成による 新規磁性化合物の探索	亀川 厚則	東北大学大学院 工学研究科 准教授	室蘭工業大学環境調 和材料工学研究セン ター 教授	室蘭工業大学希土 類材料研究センタ ー 教授
	界面電子軌道混 成を利用した新物 質創生と超省電力 磁化反転技術の開 発	紅林 秀和	ケンブリッジ大 学物理学部 博士 研究員	ユニバーシティカ レッジロンドン電 子工学科 講師	ユニバーシティカ レッジロンドン電 子工学科 教授
	ヒドリド酸化物 の直接合成による 新規機能性材料 の探索	小林 玄器	神奈川県大学工 学部 助手	自然科学研究機構 分子科学研究所 特 任准教授	理化学研究所開 拓研究本部 主任研 究員(兼)分子科学 研究所 教授
	グラファイトの 電子状態制御に よる新規触媒の 創成	近藤 剛弘	筑波大学数理物 質系 講師	筑波大学数理物質 系 准教授	筑波大学数理物質 系 教授
	磁気バブルメモ リの刷新に向けた 、スキルミオンの 結晶学と電磁気 学の構築	関 真一郎	東京大学大学院 工学系研究科 助教	理化学研究所創 発物性科学研究セ ンター ユニッ トリージャー	東京大学大学院 工学系研究科 准 教授
	自発分極変調を 機軸とする物質 探索と機能開発	塚崎 敦	東京大学大学院 工学系研究科 特任講師	東北大学金属材料 研究所 教授	東北大学金属材料 研究所 教授
	スピンのナノ立 体構造制御による 革新的電子機能 物質の創製	中辻 知	東京大学物性研 究所 准教授	東京大学物性研 究所 教授	東京大学大学院 理学系研究科 教 授
	ユビキタス量子 ドットの創製と 光エネルギー変 換材料への展開	宮内 雅浩	東京工業大学大 学院理工学研究 科 准教授	東京工業大学物 質理工学院 教授	東京工業大学物 質理工学院 教授

※1 研究者の追跡調査時の所属・役職が不明の場合は、確認できた中で最新のものとした。

※2 第1期の遠藤は「大挑戦型研究課題」、第2期の竹内は5年型のため研究期間が異なる。

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

追跡調査は研究領域終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の事業および事業運営の改善に資するために行うもので、研究終了後の研究者の研究課題の発展状況等を調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、さきがけ研究領域「新物質科学と元素戦略」(2010 年度～2016 年度)を対象とする。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

採択年	研究者	さきがけ研究期間	さきがけ終了後の調査対象期間
第 1 期 (2010 年)	阿部 英樹	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	有田 亮太郎	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	上野 和紀	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	梅澤 直人	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	遠藤 恆平	2011 年 4 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～調査終了月
	小西 玄一	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	佐藤 和則	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	中村 芳明	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	一杉 太郎	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	水口 将輝	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	守谷 誠	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
第 2 期 (2011 年)	山田 幾也	2011 年 4 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～調査終了月
	石坂 香子	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	竹内 恒博	2011 年 10 月～2017 年 3 月	2017 年 4 月～調査終了月
	辻 勇人	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	中野 秀之	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	西山 宣正	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	野呂 真一郎	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	畠山 琢次	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
藤田 武志	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月	
堀毛 悟史	2011 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月	

	松尾 司	2011年10月～2015年3月	2015年4月～調査終了月
	薬師寺 啓	2011年10月～2015年3月	2015年4月～調査終了月
	山本 明保	2011年10月～2015年3月	2015年4月～調査終了月
第3期 (2012年)	梅津 理恵	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	岡田 純平	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	亀川 厚則	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	紅林 秀和	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	小林 玄器	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	近藤 剛弘	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	関 真一郎	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	塚崎 敦	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	中辻 知	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月
	宮内 雅浩	2012年10月～2016年3月	2016年4月～調査終了月

2.1.3 調査方法

(1) 研究助成金

調査対象期間は、本研究領域の期間中を含めて調査対象月とし、本研究領域の研究者が研究の代表を務める研究助成金を調査した。その中から、原則、研究助成金の総額が1千万円/件以上のものを抽出した。

ただし、各研究課題の開始後に研究助成を受け、当該研究課題が終了する前に、その助成期間が終了してしまう事案および当該研究課題終了と同年度に助成期間が終了する事案に関しては対象外とした。研究助成金の獲得状況については、研究者へのアンケートなどによって調査した。

(2) 論文

論文の抽出は、文献データベースとしてScopusを用い、Book(Book chapter, Book Review)、Editorial、Erratumを除く全文献タイプの論文を対象とした。研究者が著者になっている論文を、①成果論文、②発展論文、③展開論文に分類し論文数を求め、これらの論文について研究者が責任著者となっている論文数も調べた。

ここで、1) 終了報告書に記載の論文、2) 著者の所属がさきがけであるもの、3) 助成金情報にJSTまたはさきがけの記載があるもの、4) 謝辞の対象にJSTがあるもの、四つの条件のいずれかを満たせば①成果論文とし、この①の論文を引用している研究終了後の論文を②発展論文とした。研究終了後の論文で②以外の論文を③展開論文とした。

(3) 特許

特許については、表2-1の研究者が発明者となっており、出願日が研究課題開始以降調査時点までのものを収集した。特許の場合、所属機関などで絞り込みを行うと必要な特許が収集できない危険があるため、所属機関などでの絞り込みは行わず、収集できたデータを目視で確認しリストを作成した。

PATENT SQUAREの国内検索を用い、まずは上記で特許を収集した後、同様に世界検索を行い、特許の海外での登録状況や、日本に出願せず海外に出願したか否かを確認した。

(4) 受賞、共同研究や企業との連携等

研究終了後、現在に至るまでの受賞、共同研究や企業との連携等について、各研究者にアンケートを実施し、それぞれのリストを作成した。

2.2 追跡調査概要

2.2.1 研究助成金

本研究領域の研究者が研究代表者として獲得した研究助成金の状況は添付資料Aにまとめた。研究総括の細野が研究開始当初から領域内コラボレーションを強く求めた結果、研

究終了後に本研究領域の研究者が中心となってチームを組み、阿部、一杉、水口、中辻を研究代表者とする4件がCRESTに採択された。その後も竹内、山本、塚崎、畠山がCRESTに研究代表者として採択されるなど大型の研究助成金を獲得して、研究成果を上げている。詳細なデータは添付資料Aにまとめた。

2.2.2 論文

研究活動の成果を評価する指標としては、発表された論文の内容とともにその件数が重要であり、数値として評価・比較が容易な論文発表件数を以下にまとめた。本研究領域の成果論文および発展論文、展開論文の全論文数、FWCI¹の中央値、FWCI 値ベースのTop0.1%、1%、10%、10%圏外の論文数を表2-2に示す。さらに詳細なデータは添付資料Bにまとめた。

表2-2 研究領域全体の論文数と指標

	論文数	FWCI の中央値	FWCI Top%			
			0.1%以内	1%以内	10%以内	10%圏外
成果論文	367	1.15	5	18	97	270
発展論文	597	0.86	1	17	114	483
展開論文	1076	0.69	3	20	155	921

調査日：2022年9月1日

研究領域全体では、研究期間中の論文数367報(このうちTop10%以内は97報)であり、終了後の発展論文は597報(このうちTop10%以内は114報)、展開論文は1076報(このうちTop10%以内は155報)と大きく増加している。ほぼ全ての研究者で研究終了後の発表論文数が増加しており、特に有田、藤田、塚崎、中辻が研究終了後に100報以上の論文を発表しており、活発に研究活動が展開されている様子がうかがえる。

研究終了後のTop10%以内の論文数は有田が46報、藤田が28報と非常に多く、いずれも2018年から2021年まで連続してClarivate analyticsのHighly Cited Researcherに選ばれている。また、阿部、畠山、堀毛、塚崎、中辻もTop10%以内の論文数が20報程度あり、質の高い研究成果が生み出されている。

また、本研究領域内での共著論文数は、研究期間中の成果論文では11報だが、研究終了後の発展論文が5報、展開論文が67報と大幅に増加している。これは例えば、阿部、藤田と宮内がチームとして採択されたCRESTで共同研究をするなど、本研究領域での研究を通じて、研究者間のネットワークが広がり、共同研究が進んだ結果と考えられる。

2.2.3 特許

特許は基礎研究から産業への貢献を分析する指標となり、特許からさらに次の段階の研究が発展することから、研究活動の成果を評価する重要な指標である。本研究領域全体の特許の出願件数と登録件数を表2-3にまとめた。研究期間中の特許件数は、研究代表者が

¹ FWCI 値とは、当該文献の被引用数を、同じ出版年・同じ分野・同じ文献タイプの文献の世界平均で割った値である。すなわち、この論文が類似の論文と比較してどの程度引用されているかを示す指標で、FWCI 値が1を上回る論文は、平均よりも多く引用されていることを意味する

成果として報告したものや終了報告書に記載されているものなど、JST が成果として把握しているものである。研究終了後の特許件数は研究代表者が発明者として含まれるすべての特許件数を示す。さらに詳細なデータは添付資料Cにまとめた。

表 2-3 研究領域全体の特許出願状況

	出願件数		登録件数	
	国内	海外	国内	海外
研究期間中	41	14	30	9
研究終了後	205	109	50	21
合計	246	123	80	30

- 1) PCT 出願、海外国への個別特許申請のいずれかがあれば、海外としてカウント。
- 2) 国内特許出願し PCT 出願あるいは直接 PCT 出願された場合は国内出願件数に含めてカウント。

2022年8月17日調査

研究領域全体では、研究終了後に国内、海外共に特許の出願数、登録数が大きく増加しており、研究成果の実用化へ向けた動きも活発である。

研究者別では、最も多く出願かつ登録しているのは第2期研究者の畠山で、研究終了後に国内に102件、海外に67件出願し、それぞれ16件、14件が登録されている。研究期間中の研究成果を発展させ、企業との共同研究により実用化したため、関連の特許出願が突出して多く、本研究領域全体の特許出願数のほぼ半数を占めている。

また、阿部、竹内、中野、堀毛、近藤、中辻、宮内が研究終了後に10件以上の特許出願を行っており、実用化へ向けた研究が進んでいることを伺える。

2.2.4 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞が挙げられる。表 2-4 に研究終了後の研究者の受賞を示す。

堀毛、山本が文部科学大臣表彰若手科学者賞を、石坂、畠山、塚崎、堀毛が日本学術振興会賞を受賞するなど、多くの学会賞なども含めて本研究領域の研究者の受賞は多く、科学技術の進歩への貢献が高く評価されていることが伺える。

表 2-4 研究終了後の受賞リスト

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
1	有田亮太郎	Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2018
2		Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2019
3		Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2020
4		Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2021
1	小西玄一	光化学協会賞	光化学協会	2020

1	中村芳明	第4回 薄膜・表面物理分科会 論文賞	応用物理学会 薄膜・表面物理分科会	2020
1	水口将輝	平成27年度日本磁気学会 優秀研究賞	日本磁気学会	2015
2		第77回功績賞	日本金属学会	2019
3		2019年度矢崎学術賞	矢崎科学技術振興記念財団	2020
1	山田幾也	第17回GSC賞奨励賞	新化学技術推進協会	2018
1	石坂香子	第18回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2022
1	竹内恒博	日本熱電学会学術賞	日本熱電学会	2020
1	辻勇人	日本化学会学術賞	日本化学会	2021
2		有機合成化学協会企業冠賞 富士フィルム・機能性材料化学賞	有機合成化学協会	2021
1	畠山琢次	Chemist Award BCA 2017	MSD 生命科学財団	2017
2		Thieme Chemistry Journals Award 2018	Thieme 社	2018
3		有機合成化学協会 企業冠賞 (富士フィルム・機能性材料化学賞)	有機合成化学協会	2019
4		有機EL 討論会 第13回業績賞	有機EL 討論会	2020
5		第52回市村学術賞 貢献賞	市村清新技術財団	2020
6		国際情報ディスプレイ学会 2020 特別業績賞	国際情報ディスプレイ学会	2020
7		長瀬研究振興賞	長瀬科学技術振興財団	2021
8		第18回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2022
9		第18回日本学士院学術奨励賞	日本学士院	2022
1	藤田武志	第36回本多記念研究奨励賞	本多記念会	2015
2		平成28年度日本顕微鏡学会奨励賞	日本顕微鏡学会	2016
3		Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2018
4		Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2019
5		Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2020
6		Highly Cited Researcher	Clarivate Analytics	2021
1	堀毛悟史	平成28年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	文部科学省	2016
2		第19回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2022
1	薬師寺啓	令和2年度日本磁気学会 優秀研究賞	日本磁気学会	2020
1	山本明保	平成29年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	文部科学省	2017
2		The Cryogenic Materials Award for Excellence	International Cryogenic Materials Conference	2018
3		日本MRS 貢献賞	日本MRS	2019
4		第12回超伝導分科会論文賞	応用物理学会	2021

5		2022 年度優良発表賞	低温工学・超電導学会	2022
1	梅津理恵	第一回東北大学優秀女性研究者賞「紫千代萩賞 (理学・工学分野)」	東北大学	2018
2		第 39 回猿橋賞	女性科学者に明るい未来をの会	2019
3		令和元年度日本磁気学会 優秀研究賞	日本磁気学会	2019
4		Asian Scientist (100) 2020	Asian Scientist Magazine	2020
1	小林玄器	第 39 回本多記念研究奨励賞	本多記念財団	2018
2		第 7 回名古屋大学石田賞	名古屋大学	2018
3		田川記念固体化学奨励賞	電気化学会	2019
4		永井科学技術財団「学術賞」	永井科学技術財団	2022
1	近藤剛弘	2020 年度 Best Faculty member 表彰	筑波大学	2021
2		第 61 回宇部興産学術振興財団 奨励賞	宇部興産学術振興財団	2021
3		2022 年度日本表面真空学会 フェロー	日本表面真空学会	2022
1	関真一郎	IUPAP Young Scientist Prize in Magnetism	国際純粋・応用物理学連合(IUPAP)	2018
2		丸文研究奨励賞	丸文財団	2022
3		第 21 回船井学術賞	船井情報科学振興財団	2022
4		第 43 回本多記念研究奨励賞	本多記念会	2022
1	塚崎敦	第 18 回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2022
1	中辻知	第 23 回日本物理学会論文賞	日本物理学会	2018

2.2.5 共同研究や企業との連携

本研究領域の研究者は企業との共同研究も活発に行っている。畠山は JNC 株式会社との共同研究により青色発光材料を実用化した。また、堀毛が JST の A-STEP で株式会社デンソーと燃料電池の共同研究を行った。中野はトヨタ自動車株式会社とリチウムイオン電池の負極材料に関する共同研究を進め、実用化を目指している。山田、中村、一杉、薬師寺、岡田、小林、近藤、中辻、宮内らも企業との共同研究や技術移転を行っている。

2.2.6 実用化・製品化

畠山が開発した高色純度青色発光材料(DABNA)は有機 EL(Electro-Luminescence)の青色発光(蛍光)材料として JNC 株式会社との共同研究により実用化され、2018 年に大手ディスプレイメーカーのスマートフォンに採用された。薬師寺が開発した MRAM の TMR 素子用のスペーサー材料は最先端の STT-MRAM²製品に採用済みであり、今後すべての STT-MRAM に実装される見込みである。

² STT-MRAM: データの書き込みを TMR 素子に電流を流すことで生じるスピントルク磁化反転によって行う MRAM。

2.2.7 ベンチャー起業

中辻はトポロジカル材料の開発とそれを用いた熱電素子、メモリの開発を行うスタートアップ、TopoLogic 株式会社を 2021 年 7 月に設立した。本さきがけの研究で着想を得た仮想磁場を用いた熱電効果を利用した熱流センサーの開発を進めている。会社の概要は下記の通りである³。

表 2-5 TopoLogic 株式会社概要

会社名	TopoLogic 株式会社
設立	2021 年 7 月 15 日
代表取締役 CEO	佐藤 太紀
事業内容	トポロジカル物質の研究、開発、設計、製造および販売 トポロジカル物質を用いたデバイスの研究、開発、設計、製造および販売 トポロジカル物質およびトポロジカル物質を用いたデバイスに関連するソフトウェアの開発、設計、製造、販売および保守 トポロジカル物質に関連する業務および研究開発のコンサルティング業務
資本金	66,075,136 円 (2022 年 12 月)

一杉は 2019 年 9 月に株式会社クリエイティブエーアイロボティクスを設立し、AI とロボットを活用した自律的な合成システムの開発設計などを行っている。一杉らは、例えば、ロボット自らが成膜し、物性評価を行い、成膜条件および組成の最適化までも行う、「実験室の産業革命」を目指している。会社の概要は下記の通りである⁴。

表 2-6 株式会社クリエイティブエーアイロボティクス概要

会社名	株式会社クリエイティブエーアイロボティクス
設立	2019 年 9 月
代表取締役 COO	橋本 裕之
取締役兼 CTO	一杉 太郎
事業内容	各種ロボット技術開発設計および装置製造 各種ロボットへの人工知能システム開発
資本金	1000 万円

³ TopoLogic 株式会社ホームページ : <https://www.topologic.jp/>

⁴ 株式会社クリエイティブエーアイロボティクスホームページ : <http://cai-robotics.co.jp/>

2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

2.3.1 研究領域の展開状況（まとめ図）

本研究領域では2010年から2012年にかけて合計34件の研究課題を採択し、「レアメタルフリー材料の実用化及び超高保磁力・超高靱性等の新規目的機能を目指した原子配列制御等のナノスケール物質構造制御技術による物質・材料の革新的機能の創出」という戦略目標の下で研究を遂行した。その後の展開と発展の状況をまとめ図2-1に示した。

ほとんどの研究者が研究期間中の成果を発展させており、中辻によるトポロジカル磁性分野の開拓や、有田の第一原理計算手法による高温超伝導の理論研究、関のスキルミオンに関する一連の研究などは学術的に高い評価を受けている。また、畠山、薬師寺は既に研究成果を実用化し、経済的な波及効果を生み出している。さらに、近藤のホウ化水素シート、山本の高温超伝導体多結晶材料、中村のナノ構造熱電材料、小林のヒドリドによる超イオン導電などのように、今後の実用化へ向けた研究の展開が期待される成果が多数見受けられる。

研究終了後の状況において特徴的なのは、本研究領域の研究者同士の共同研究が非常に多いことであり、例えば、阿部が研究代表者となり、藤田、宮内を共同研究者として実施されたCREST「多様な天然炭素資源の活用に至る革新的触媒と創出技術」領域の研究課題では高性能の光触媒が開発されるなどの優れた成果が生み出されている。本研究領域によって新たな研究コミュニティが形成され、更に研究が展開していることがわかる。また、本研究領域の研究者による研究成果は根底において、ありふれた元素群から有用な機能を実現するという「元素戦略」に合致しており、新たな物質・材料科学の確立による持続可能な社会の実現への動きが着実に進んでいることを示している。

さきがけ「元素戦略」まとめ図

戦略目標	インプット	アクティビティ/アウトプット	アウトカム (short/mid-term)		アウトカム (long-term) /インパクト																	
			～追跡調査時点	今後予想される展開	今後想定される波及効果																	
戦略目標： レアメタルフリー材料の実用化及び超高保磁力・超高靱性等の新規目的機能を目指した原子配列制御等のナノスケール物質構造制御技術による物質・材料の革新的機能の創出	研究総括： 細野 秀雄	研究成果	科学技術的および社会・経済的な波及効果		・低消費電力有機発光材料の実用化 ・希少元素、有害元素を含まない熱電材料の実用化 ・新規イオン導電体の電気化学デバイスへの応用 ・新規磁性材料などのスピントロニクスへの応用																	
	研究者 34名 阿部 英樹 有田亮太郎 上野 和紀 梅澤 直人 遠藤 恆平 小西 玄一 佐藤 和則 中村 芳明 一杉 太郎 水口 将輝 守谷 誠 山田 幾也 石坂 香子 竹内 恒博 辻 勇人 中野 秀之 西山 宣正 野呂 真一郎 畠山 琢次 藤田 武志 堀毛 悟史 松尾 司 薬師寺 啓 山本 明保 梅津 理恵 岡田 純平 亀川 厚則 紅林 秀和 小林 玄器 近藤 剛弘 関 真一郎 塚崎 敦 中辻 知 宮内 雅浩	論文 ①さきがけ研究成果の論文数 ②さきがけ研究成果の発展の論文数 367 (97) 597 (114) ()の値はTop10%以内論文数 特許申請・登録 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>期間中</th> <th>終了後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">出願</td> <td>国内</td> <td>41</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>海外</td> <td>14</td> <td>109</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">登録</td> <td>国内</td> <td>30</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>海外</td> <td>9</td> <td>21</td> </tr> </tbody> </table>				期間中	終了後	出願	国内	41	205	海外	14	109	登録	国内	30	50	海外	9	21	科学技術の進歩への貢献 ・新たなトポロジカル量子相の発見と、磁性へのトポロジ概念の導入によるトポロジカル磁性分野の開拓(中辻) ・複雑な磁気構造を予測する方法論の開発(有田) ・反強磁性体において、強磁性体と同程度以上の自発的な巨大熱起電力効果を発見(中辻) ・高い対称性を持つ希土類合金で最小の磁気スキムン観察に成功(関) ・多重共鳴効果を用いた高色純度青色発光材料DABNAを開発(畠山) ・新物質BLHOでヒドリドによる超イオン導電状態を実現(小林) ・二次元物質ホウ化水素(HB)シートの発見と機能開拓(近藤) ・鉄系高温超伝導体多結晶材料の開発と磁石化(山本) ・高いLiイオン伝導性を示す分子結晶の発見と電池動作の成功(守谷) ・ナノ構造導入による透明材料の熱電効果増大(中村) ・ホイスラー合金でハーフメタル状態の観測に成功(梅津) ・超多元ナノポーラス合金の開発(藤田)
		期間中	終了後																			
出願	国内	41	205																			
	海外	14	109																			
登録	国内	30	50																			
	海外	9	21																			
			展開 科研費(学術変革領域): 堀毛 科研費(新学術領域): 一杉、辻、中辻 科研費(基盤S): 水口 JST CREST: 阿部、一杉、水口、竹内、山本、塚崎、中辻、畠山 JST 未来社会創造事業: 中辻、一杉 JST ACT-C: 宮内 NEDO事業: 守谷、中辻																			
			受賞/人材育成等 日本学術振興会賞: 石坂、畠山、堀毛、塚崎 日本学士院学術奨励賞: 畠山 文部科学大臣表彰 若手科学者賞: 堀毛、山本 猿橋賞: 梅津 日本化学会学術賞: 辻 Clarivate Highly Cited Researcher: 有田、藤田																			

図 2-1 まとめ図

2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

以下に、研究者のアンケート回答、インタビュー結果などに基づき、研究成果の科学技術の進歩への貢献について幾つかの事例を示す。

中辻は研究期間中に不揮発性メモリへの応用をめざし、室温で動作する新しいホール素子の材料を探索した結果、反強磁性体である Mn_3Sn で異常ホール効果⁵が現れることを世界で初めて発見した。

研究終了後、中辻は2015年度にJSTのCREST「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」領域に採択され、新しい熱電技術の基盤創成を目指して、磁性体を用いた熱電効果の技術開発を行った。研究期間中に見いだした反強磁性体 Mn_3Sn において、強磁性体と同程度以上の自発的な巨大熱起電力効果(異常ネルンスト効果⁶)を世界で初めて発見し、温度差のみで起電力を発生できることを示した⁷。また、本研究領域の有田らと共同で、 Mn_3Sn 内部で磁気ワイル粒子⁸を初めて実験的に発見した。物質中のワイル粒子は異なるカイラリティ(右巻き、左巻き)が対となって発生し、量子力学に基づく波動関数のトポロジを起源として、それぞれ「N極」と「S極」に相当する磁気モノポール(ワイル点)を形成する。物質中の伝導電子の運動はワイル点で発生する仮想磁場⁹の影響を受けており、巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果の発現機構に磁気ワイル粒子が本質的に重要な役割を担っていることを明らかにした¹⁰。また、中辻は強磁性金属間化合物 Co_2MnGa が過去に知られている最高値より10倍以上大きな異常ネルンスト効果を室温で示すことを明らかにした。これもこの材料に存在するワイル点と呼ばれる電子構造のトポロジと密接に関係しているが、この材料での異常ネルンスト効果の増大はそれだけでは説明できないほど大きい。実験や第一原理計算の結果から、この増大はワイル点の性質が変化することに対応した量子臨界現象¹¹であることを明らかにした¹²。

⁵ 異常ホール効果：強磁性体では外部から磁場をかけなくてもホール効果が自発的に現れる物質があり、これを異常ホール効果と呼んでいた。磁化がほとんどない反強磁性体では異常ホール効果を示す物質は見つかっていなかった。

⁶ 異常ネルンスト効果：導体や磁性体に互いに垂直な方向の磁場(磁化)と温度差を与えると、それらと垂直な方向に起電力が生じる現象をネルンスト効果と呼ぶ。特殊な磁性体ではゼロ磁場でもネルンスト効果が発生するが、これを異常ネルンスト効果と呼ぶ。

⁷ 平成29年7月25日 東京大学、理化学研究所、JSTプレスリリース「磁性体を用いて熱から発電を可能にする新技術～反強磁性体での巨大な異常ネルンスト効果の発見」

⁸ 磁気ワイル粒子：ワイル粒子は質量ゼロの粒子で、2015年にTaAsという半金属状態の物質中で発見された。磁気ワイル粒子は従来のワイル粒子とは発現機構が異なり、物質の磁性によって創出される。

⁹ 仮想磁場：波数空間に存在する有効磁場で、電子構造のトポロジに起因する新しい概念

¹⁰ 平成29年9月26日 東京大学、理化学研究所、JSTプレスリリース「「ワイル磁性体」を世界で初めて発見～ワイル粒子で駆動する次世代量子デバイス実現へ道筋」

¹¹ 量子臨界現象：熱揺らぎが全くない絶対零度で、磁場や圧力を変化させることで起きる相転移を量子相転移と呼ぶ。量子相転移が起きる点(量子臨界点)に近いと、有限温度であっても様々な物理量が発散的振る舞いを示し、量子臨界現象と呼ばれている。

¹² 平成30年7月31日 東京大学、理化学研究所、JSTプレスリリース「量子効果で10倍以上の磁気熱電効果を室温で実現～新しい熱電変換、環境発電への応用へ期待」

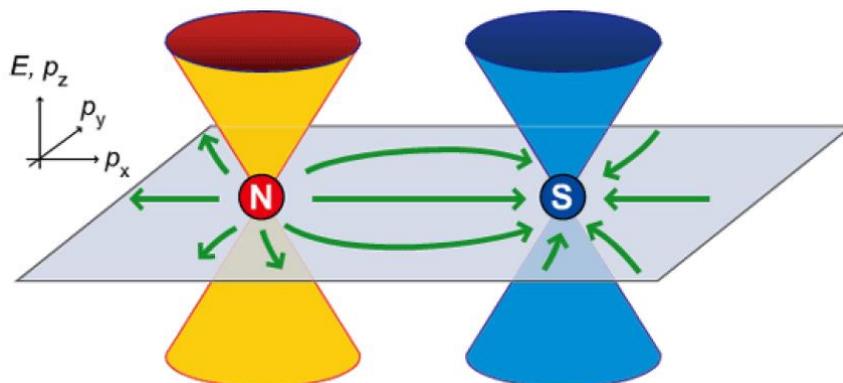


図 2-2 ワイル粒子のエネルギーと運動量の関係の模式図：ワイル点で仮想磁場（緑矢印）が発生して電子の運動に影響を与える¹³

さらに、中辻は 2018 年度からは CREST「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」領域に採択され、次世代メモリーやセンサーの開発を牽引するスピントロニクスにおいて、主構成要素を現行の強磁性体からトポロジカル磁性体に置き換え、その電子構造のトポロジーを利用することで、強磁性に起因する様々な問題を一挙に解決するデバイスの創製を進めている。

例えば、反強磁性体はスピンの応答速度が強磁性体に比べて 2～3 桁早いピコ秒オーダーなので、超高速のメモリー素子への応用の可能性があるが、磁化の向きを用いた情報の書き込み・読み出しは難しいと考えられていた。ワイル粒子を有する反強磁性体 Mn_3Sn では磁化の代わりに仮想磁場の向き、すなわちワイル粒子の運動量空間での分布による情報の記憶が可能であり、中辻らは Mn_3Sn と非磁性重金属 (Pt、W) の多層膜から成るホール素子で電流によるホール電圧の反転に成功した。これは重金属の Pt、W に電流を流すことで生じるスピンの流が Mn_3Sn の仮想磁場に由来するホール電圧を反転していることを示しており、ワイル点の電氣的制御に成功した初めての例である¹⁴。この結果は強磁性体からなる磁気メモリー素子で用いられているスピン軌道トルク磁化反転¹⁵と同様の手法で Mn_3Sn へ情報を書き込めることを示している。

また、中辻は鉄にアルミニウムやガリウムを 25% 添加した Fe_3Al 、 Fe_3Ga が、室温・ゼロ磁場でこれまでの報告値を全て凌ぐ世界最高の磁気熱電効果を示すことを明らかにし、これらの材料で発見された巨大な異常ネルンスト効果はノーダルウェブと呼ばれるトポロジカルなバンド構造に由来することを有田らと共に明らかにした。資源としても豊富な汎用材料を用いながら、同一面積・温度差当たりの発電量は従来技術を凌駕するほど大きく、

¹³ 平成 29 年 9 月 26 日 東京大学、理化学研究所、JST プレスリリースの図 2

¹⁴ 令和 2 年 4 月 21 日 東京大学、理化学研究所、JST プレスリリース「ワイル粒子を用いた不揮発性メモリー素子の原理検証に成功-ビヨンド 5G に向けた超高速駆動・超高密度メモリー開発に道-

¹⁵ スピン軌道トルク磁化反転: 強磁性体と重金属から成る多層膜に電流を流すことで起こる磁化反転現象。非磁性金属に電流を流すことで電流と垂直方向に発生するスピンの流を用いて磁化反転を行う。

薄膜型の熱電変換デバイスへの発展が期待されている¹⁶。また、これらの材料の探索において、有田らが開発した第一原理計算を用いて磁気熱電効果を自動的に計算するハイスループット計算手法が貢献している。与えられた結晶構造のもとで実現する磁気構造を高効率で予測し、かつ物性についてもハイスループット計算ができるようになれば、磁性材料探索において大きな波及効果が期待できると考えられている。

中辻は磁性体において新たなトポロジカル量子相を次々に発見し、トポロジカル磁性分野を切り拓いた。特に磁性へのトポロジーの概念の導入により、世界に先駆けて実現したワイル磁性体は、次世代の超高速磁気メモリ、新しい熱電変換デバイスへの応用の可能性からも世界的に注目されている。

関は、研究期間中に反転対称性の破れた一軸性の強磁性体によるスキルミオン¹⁷形成という新しい物質設計指針を発見すると共に、電場・光・スピン流の全ての外場によるスキルミオン制御に成功し、スキルミオンを磁気メモリへ応用していくために必要な基本的な原理を実証した。研究終了後も磁気スキルミオンに関する研究を進展させ、高い対称性を持つ希土類合金(GdRu_2Si_2)中で、既知の化合物では過去最少となる直径 1.9nm の磁気スキルミオンを観察することに成功した。従来、スキルミオンを生み出すには、空間反転対称性の破れや幾何学的フラストレーション¹⁸が必要とされていたが、この新しい物質ではそれらを利用しなくても、動き回る遍歴電子が媒介する多体相互作用を活用することで、従来よりも高密度な極小サイズのスキルミオンを実現できることが明らかになった。この成果はスキルミオン発現の舞台となる物質の大幅な拡張につながると考えられ、スキルミオンの高密度な次世代情報担体としての応用を後押しするものと期待されている¹⁹。

スキルミオンは理想的な二次元系においては粒子としての性質を持つが、現実の三次元系ではスピンの竜巻状に整列した「ひも」としての性質を持つことが予測されていた。関はX線トモグラフィーの原理を応用し、さまざまな角度から観測した二次元透過像を合成することにより「スキルミオンひも」の立体構造を実験的に可視化することに世界で初めて成功した²⁰。また、スキルミオンひもの固有振動モードの伝搬特性を調べ、異なる周波数の振動磁場を用いて共鳴励起することで、3つの固有振動モードを介した信号伝送が可能であることを明らかにした。「スキルミオンひも」がその直径の1000倍以上の長い距離にわたって信号を伝達できること、信号の伝搬特性が順方向と逆方向で異なる性質を持つ

¹⁶ 令和2年4月28日 東京大学、東北大学、金沢大学、JST、理化学研究所プレスリリース「室温・ゼロ磁場で世界最高の磁気熱電効果を実現する鉄系材料」

¹⁷ スキルミオン：ナノスケールの渦状スピン構造体

¹⁸ 幾何学的フラストレーション：格子の幾何学的な性質に由来して、相互作用の競合が起こっている状況。例えば、正三角形の3つの頂点に存在するスピンは、最初の2つのスピンの向きを反平行に揃えると、残るスピンの向きを上向き、下向きのどちらにしてもエネルギーを損する組み合わせができてしまう。

¹⁹ 令和2年5月19日 東京大学、理化学研究所、JST、NIMS、KEK プレスリリース「新機構が生み出す過去最少の磁気渦粒子を発見-超高密度な次世代情報担体としての活用に期待-」

²⁰ 令和3年11月12日 東京大学、関西学院大学、京都大学、理化学研究所、高輝度光科学研究センター、JST プレスリリース「磁石の中の竜巻(スキルミオンひも)の三次元形状の可視化に成功-新しい磁気情報処理手法の開拓に期待-」

ことも発見した²¹。関のこれらの研究成果は磁気スキルミオン粒子・磁気スキルミオンひもの情報媒体としてのポテンシャルを示すものであり、超高密度・超低消費電力の情報担体としての応用が期待されている。

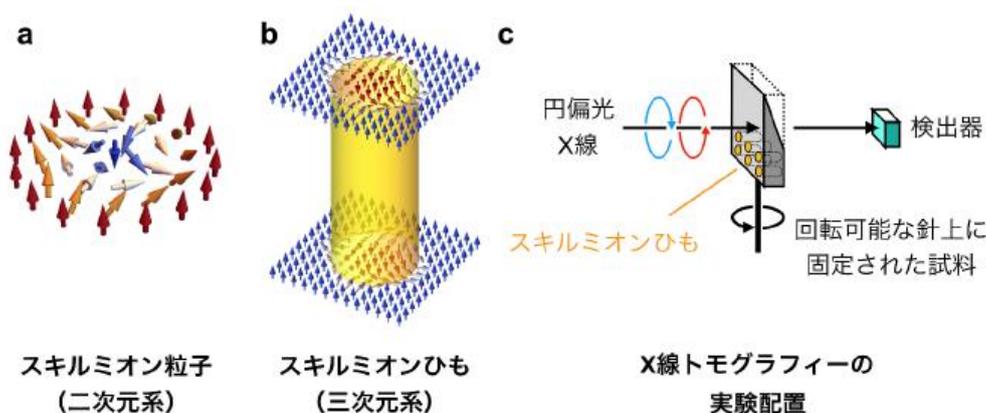


図2-3 (a) スキルミオン粒子の模式図 (b) スキルミオンひもの模式図 (c) X線トモグラフィー実験の測定配置²²

近藤は研究期間中に新物質であるホウ素の二次元シートを発見し、 MgB_2 から取り出す技術を考案していたが、これがきっかけとなり、研究終了後に水素とホウ素で構成される二次元物質であるホウ化水素 (HB) シートを発見し、その機能開拓を進めている。ホウ化水素シートは MgB_2 のマグネシウムイオンとプロトンとのイオン交換反応によって、室温・大気圧下で生成できることを近藤が世界で初めて見いだした²³。この物質は理論的な研究によりグラフェンの性能を凌駕すると予想されており、軽元素のホウ素と水素からなるために、その質量水素密度は 8.5% と高く、爆発のリスクのある高圧水素ボンベに代わる軽量で安全な水素キャリア材料としての応用が期待されていた。2019 年には本研究領域の宮内、藤田らとの共同研究で、ホウ化水素シートが室温・大気圧下において、紫外光の照射のみで水素を放出できることを見だし、安全・軽量・簡単なポータブル水素キャリアとしての応用への期待が更に高まっている²⁴。また、ホウ化水素シートの構造解析から、水素原子が特殊な配置をとっており、その構造が原因で分子が吸着することにより導電性が大きく変

²¹ 2020 年 1 月 15 日 東京大学、理化学研究所プレスリリース「「スキルミオンひも」を用いた信号伝達の成功-フレキシブルで超低消費電力な新しい情報伝送路の実現に期待-

²² 令和 3 年 11 月 12 日 東京大学、関西学院大学、京都大学、理化学研究所、高輝度光科学研究センター、JST プレスリリースの図 1

²³ 平成 29 年 9 月 26 日 筑波大学、東北大学、NIMS、東京工業大学プレスリリース「新しいシート状物質「ホウ化水素シート(ボロファン)」の誕生～優れた水素吸蔵性能を有する新材料～」

²⁴ 令和元年 10 月 24 日 東京工業大学、筑波大学、高知工科大学、東京大学プレスリリース「軽量で安全な水素キャリア材料を開発-室温・大気圧において光照射のみで水素を放出-

化することを明らかにした。この特徴を生かすことで、分子の吸着性を利用した分子応答性のセンサー材料や触媒材料などへの応用も期待されている²⁵。

山本は研究期間中にナノサイズの多結晶をバルク状にすることで、鉄系高温超伝導体が1 テスラを超える強力な磁石となることを実証した。研究終了後は、さらに研究を発展させ、鉄系高温超伝導体のうち、最も実用化が期待されている物質である(Ba, K)Fe₂As₂において、比較的大きな磁場中(数テスラ)で世界最高レベルの超伝導電流を流すことに成功した。(Ba, K)Fe₂As₂ 薄膜を成長する基板や成長温度条件の最適化により、超伝導体内部に無数の小傾角粒界を導入し、それらを高磁場中での磁束量子²⁶の運動を止めるピンニングセンターとして働かせることで、大きな超伝導電流を流すことが可能になった。鉄系高温超伝導体は、銅酸化物系に次ぐ高い転移温度を持つことから、冷凍機による冷却で動作可能で、医療用MRIなどに用いられる強磁場発生用磁石への応用が期待されている²⁷。また、研究期間中にネオジム磁石を上回る磁束密度を達成していた金属系超伝導体 MgB₂ に関する研究については、マグネシウム蒸気をホウ素に作用させて常圧下でMgB₂超伝導多結晶バルクを得る、マグネシウム気相輸送法(MVT法)を開発した。得られた円盤状のMgB₂バルクは高い充填率と高い相純度を有しており、コネクティビティ(電気的結合度)低下の原因である空隙や不純物が減少したことにより、臨界電流密度は従来法で作製した試料の約2倍に向上した²⁸。

守谷は研究期間中に、それまではイオン伝導体としてほとんど注目されることが無かった分子結晶を利用し、選択的ナリチウムイオン伝導性を示す材料を得ることに成功した。研究終了後に、本研究領域の一杉との共同研究で、室温で10⁻⁴ S/cmという高いLiイオン伝導性を示す分子結晶Li{N(SO₂F)₂}₂(NCCH₂CH₂CN)₂を発見した。この有機分子結晶は、室温でのイオン伝導度は既報の分子結晶の最高値と同程度だが、-20℃ではおよそ100倍の伝導度を示し、有機固体電解質としてよく知られるポリマー電解質に見られる低温での急激なイオン伝導度の低下が無い。この分子結晶を用いて加熱・冷却による融解と凝固を利用した非常に簡便なプロセスで全固体電池を作製し、安定的に電池を動作させることにも成功し、低温でも動作する全固体電池の実現が期待されている²⁹。このような有機分子は可燃性があるため、実用化のためには安全性の向上が課題とされている。守谷はJSTのA-STEPで分子結晶電解質の構成要素に難燃性のイオン液体とマグネシウム塩を用い、Mgイオン伝導性を示す分子結晶の開発に成功した。この成果はMg伝導性固体電解質開発の新たな指針を示すものであり、全固体Mg電池の実現に貢献する可能性がある³⁰。

²⁵ 2019年12月10日 NIMS、筑波大学、JASRI、東京大学、東京工業大学プレスリリース「導電性を制御可能な新しいナノシート材料の開発に成功」

²⁶ 磁束量子：超伝導体のリング内側を貫く磁束は $\phi_0=h/2e$ (磁束量子)の整数倍に量子化される。

²⁷ 令和3年10月22日 名古屋大学、東京農工大学、九州大学、JST プレスリリース「鉄系高温超伝導体で世界最高の超伝導電流を実現!～強磁場発生用磁石応用へ前進～」

²⁸ 低温工学 Vol. 57, No. 1(2022) p3-8 「MgB₂超伝導バルクの最近の研究開発動向」、山本明保

²⁹ 令和2年10月29日 静岡大学、東京工業大学プレスリリース「高速リチウムイオン伝導性を示す分子結晶電解質の開発と電解質の融解・凝固を利用した全固体電池の作製」

³⁰ 令和4年5月6日 静岡大学プレスリリース「難燃性のイオン液体を構成要素とし、温和な条件下で高いマグネシウム伝導性を示す分子結晶電解質の作製」

小西は研究期間中に弱いドナー・アクセプター連結系分子の光物理的性質を追求し、分子イメージング材料の開発を行っていたが、研究終了後に、多環式芳香族化合物であるピレンにアクセプターを導入した新規色素を開発し、非侵襲的かつリアルタイムの病態診断法として期待されている二光子励起蛍光顕微鏡の感度を大幅に向上することに成功した。この新規色素は「生体光学窓」と呼ばれる生体組織の光透過性の良い波長領域(650~1100nm)で強く光を吸収し、高効率で発光する³¹。また、一般的な蛍光色素と逆に、希薄溶液状態では発光せず、固体・凝集状態で強発光する凝集誘起発光色素(AIE色素)の開発へと研究を展開し、理論計算によって、溶液中で消光する化学反応経路を持つ分子構造を探索し、新規のAIE色素の開発に成功した。この設計手法は情報科学の手法などとの融合により、機能性蛍光色素の開発への応用が期待されている³²。

藤田は研究期間中に、脱合金化³³によってナノポーラス金属を作製し、排ガス触媒や蓄電デバイス用電極への応用の可能性を示した。研究終了後、本研究領域の宮内と共同で、適切なアルミ前駆体合金の急冷リボン材を作製し、アルカリ溶液でアルミを脱合金化することで、有機化学合成・ガス反応・電極触媒用途に用いられるほぼすべての遷移金属(Cu, Co, Ni, Fe, Mo, Ti)と貴金属(Au, Ag, Ir, Pt, Pd, Ru, Rh)を含んだ14元素から構成される超多元ナノポーラス合金の作製に成功した。この合金は多元素重畳効果(カクテル効果)によって、水の電気分解用電極材として、ベンチマーク触媒である白金やイリジウム酸化物よりも優れた性能と使用耐久性を示した。10元素以上で構成されたハイエントロピー合金は、反応場に応じて自らの形態を自在に変えて活性化する「多能性・万能性」を備えた触媒になる可能性があり、多方面での応用が期待されている³⁴。

有田は研究期間中に非従来型超伝導体に対する超伝導密度汎関数理論(SCDFT)の開発に取り組み、圧力下のリチウムの超伝導転移温度の実験値と理論的な予測値の一致を格段に向上することに成功した。研究終了後は高圧下水素化合物の超伝導転移温度の第一原理計算手法の開発を行うとともに、量子効果、非調和フォノンの効果を取り入れた第一原理研究を行っている。例えば、2019年に130~220GPaの高圧力でランタン水素が250K(-23℃)超伝導化することが報告され、それまでの超伝導転移温度の最高記録を塗り替えたが、従来の理論は、高温で超伝導となる立方晶構造のランタン水素を安定化するには、230GPa以上の高圧が必要と予測しており、それより100GPaも低い圧力で立方晶構造が安定な理由について注目されていた。有田らはそれまでの理論計算で無視されていた原子核の量子ゆらぎに注目し、高圧下ランタン水素においては水素原子核の量子ゆらぎが極めて大きいこと、立方晶ランタン水素が、量子ゆらぎ効果によって広い圧力域で安定化している「量子固体」³⁵状態

³¹ 平成27年1月16日 東京工業大学、山口大学プレスリリース「二光子励起顕微鏡の病態診断応用に道-安価で操作性向上を実現する高性能色素の開発に成功-

³² 令和2年3月31日 東京工業大学、京都大学プレスリリース「理論計算による新設計法で凝集誘起色素の開発に成功-見たい対象だけ光らせる分子イメージング蛍光色素の自在設計-

³³ 脱合金化：合金から特定の元素を選択的に腐食させて溶出させる方法

³⁴ 令和3年8月20日 JST、高知工科大学、東京工業大学プレスリリース「14元素を均一に含む超多元触媒の開発に成功~簡便な方法で作製可能、万能触媒の実現に期待~」

³⁵ 量子固体：量子ゆらぎ効果が大きな固体のこと。

であることを明らかにし、実験で得られた超伝導転移温度を圧力依存性も含め精度良く説明することに成功した³⁶。

中村は、研究期間中に Si ナノドット結合構造の形成により、下限と考えられていたアモルファスシリコンを超えるところまで熱伝導度を低減し、熱電変換材料としての可能性を示した。Si ナノドット結合構造の課題は移動度の劣化による熱電変換性能指数の低下だったが、研究終了後、熱電ナノ構造に関する研究を発展させ、Ge ナノドットを Si 中に埋め込んだ構造を実現し、フォノン輸送に関する興味深い結果を得た。この構造では電気伝導はナノドットの周りの Si 膜中で起きるため移動度の低下はほとんどないが、Ge ナノドットサイズが 10nm 以下ではドットサイズに依存して熱抵抗が低下した。中村らは弾性波シミュレーションとの比較により、熱抵抗のドットサイズ依存性がフォノンの波動としての干渉効果によって現れたと考えている³⁷。

中村は、様々な材料でナノ構造の導入による熱電変換効率向上を目指した研究を進めており、透明な材料である ZnO 薄膜中にドーパント濃度を制御した界面を有する ZnO ナノワイヤを導入し、熱電変換出力因子³⁸を ZnO 薄膜自体の 3 倍に増大させた。これはナノワイヤ界面で生じるドーパント濃度の変化によりエネルギー障壁が現れ、高エネルギー電子が選択的に界面を通過することでゼーベック係数が増大すると共に、界面でのフォノン散乱の促進により熱伝導率が低下したためと考えられている³⁹。また、中村は本研究領域の藤田との共同研究で、急冷法を用いて SiGe と Au のコンポジット材料を作製し、宇宙船に搭載されている電源に利用されている SiGe 熱電材料の値を 3 倍上回る最高熱電出力因子を室温近傍で達成することに成功した。このコンポジット材料は、Au ドープされた SiGe の領域(領域 A)と Au 結晶(領域 B)の二つの領域から構成されており、領域 A では Au 不純物が形成する共鳴準位によりゼーベック係数が増大する一方、領域 B の優れた電気伝導性により電気伝導率が増大するため、従来 SiGe と比較して高いゼーベック係数と高い電気伝導率が同時に実現されている⁴⁰。

³⁶ 2020 年 2 月 6 日 NIMS、東北大学、東京大学、理化学研究所プレスリリース「ほぼ室温超伝導を示す高圧下ランタン水素は量子固体だった」

³⁷ Nanoscale 13, 4971-4977 (2021).

³⁸ 熱電変換出力因子：(ゼーベック係数)²×電気伝導率

³⁹ 2018 年 10 月 31 日 大阪大学プレスリリース「透明ナノワイヤ材料による発電電力増大技術-室内外の温度差をもつ窓ガラスの熱発電利用にむけて-

⁴⁰ 令和 3 年 1 月 29 日 大阪大学、高知工科大学、東邦大学、JST プレスリリース「身近な生活廃熱の発電利用に向けた室温 SiGe 熱電材料」

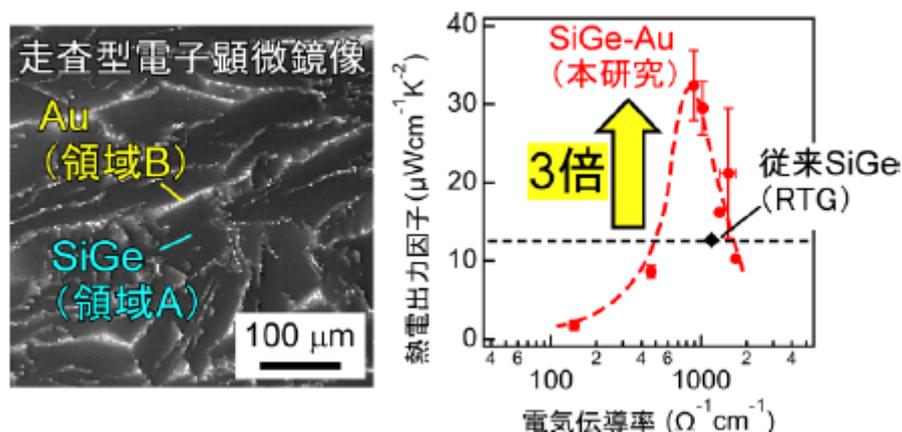


図 2-4 SiGe、Au のコンポジット材料の電子顕微鏡像と熱電変換出力因子の電気伝導率依存性⁴¹

畠山は研究期間中に多環芳香族化合物の π 共役骨格中にホウ素を導入する反応の開発に成功した。本反応により、ジベンゾクリセンの縮環部の炭素-炭素結合をホウ素-窒素結合で置換した材料（アザボラジベンゾクリセン誘導体）を合成し、ジベンゾクリセンと比べて、リン光が大きく短波長側へシフトすることを明らかにした。また、この材料を有機 EL のホスト材料として使うと、発光効率と素子寿命が向上することを示した。研究終了後、畠山は同様の合成反応によりホウ素を窒素と離れた位置に導入することで DABNA を開発し実用化した。

一般に、有機材料の発光は、LUMO-HOMO⁴²準位間の電子遷移に伴って生じるが、電子遷移が炭素間の結合長の変化（伸縮振動）を引き起こすため、発光スペクトルには伸縮振動のエネルギーに応じた複数のピークが現れる。このため、剛直な構造であるピレンなどの芳香族炭化水素類でも、発光スペクトルがブロードになってしまうことが有機発光材料の根本的な問題点であった。畠山は研究期間中に開発した合成反応により、ホウ素を導入しながら3つのベンゼン環を縮環させることで DABNA を合成し、ホウ素と窒素の多重共鳴効果⁴³により HOMO と LUMO をそれぞれベンゼン環上の隣り合う炭素原子に局在化させることに成功した。この結果、DABNA では LUMO-HOMO 準位間の電子遷移に伴う伸縮振動が起きないため、従来、有機 EL で用いられていた青色発光材料と比べて発光スペクトルの半値幅を 1/2 程度まで狭くできた。また、多重共鳴効果により HOMO と LUMO が局在化しているため、効

⁴¹ 令和 3 年 1 月 29 日 大阪大学、高知工科大学、東邦大学、JST プレスリリースの図 1

⁴² LUMO-HOMO: LUMO はある分子において、電子に占有されていない分子軌道の中で最もエネルギーが低い軌道である最低空軌道。HOMO は電子に占有されている分子軌道の中で最もエネルギーが高い軌道である最高被占軌道。

⁴³ 共鳴効果: 共役 π 電子系を持つ分子は、複数の共鳴構造で書き表すことができるが、実際の π 電子系は複数の共鳴構造の寄与を反映して、それらの中間の構造・性質を示す。共鳴構造の中には、アニオンやカチオンを持つ共鳴構造があるため、その寄与が大きければ、実際の π 電子系には偏りが生じることになる。これを共鳴効果と呼ぶ。ホウ素や窒素は炭素と価電子の数が異なるため、共役 π 電子系の適した位置に導入すれば、アニオンやカチオンを持つ共鳴構造の寄与を大きくすることができる。

率的な逆項間交差⁴⁴が可能であり、熱活性化遅延蛍光 (TADF) 特性⁴⁵も示すことが明らかとなっている。現在も DABNA の誘導体のスペクトル半値幅が非常に狭い特長を生かすべく、TADF 素子やリン光素子における最終発光材料としての実用化へ向けた研究開発が、国内外の大学や企業で活発に進められている。畠山は 2022 年度に CREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能」領域で研究課題が採択されており、ホウ素と窒素を含む有機材料に関する研究の更なる進展が期待される。

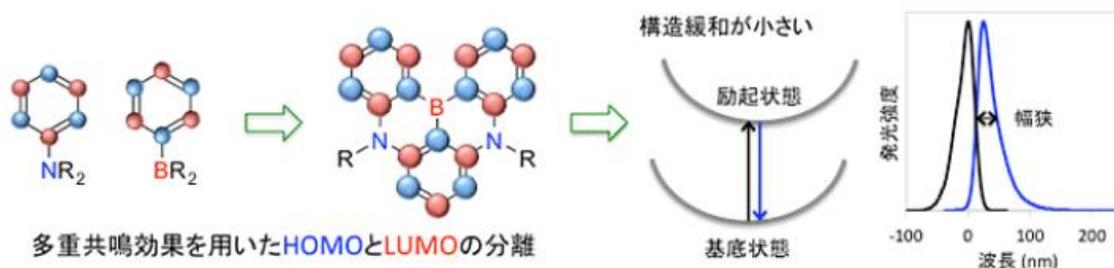


図 2-5 多重共鳴効果を用いた DABNA のデザイン⁴⁶

小林は研究期間中に水素のアニオンであるヒドリド(H⁻)を含有した酸化物(酸水素化物)中でヒドリドがイオン導電することを初めて示し、固体電解質としての性能を明らかにすると共に電池への応用の可能性を示した。それ以前の研究では、ヒドリドがイオン導電のキャリアになることに対して否定的な意見が多かったが、新物質の創出によってヒドリドイオン導電性固体電解質の機能を実証したことは、その後の物質開発の起点となる成果であった。小林の研究を契機として国際的競争が始まっており、ヒドリドイオン導電に関する研究コミュニティが形成されるなど、新たな研究の潮流が生み出されている。

研究終了後には、小林が研究期間中に発見していた新物質 BLHO(Ba_{1.75}LiH_{2.70}O₉)において、300°Cで生じる構造相転移により3桁以上導電率が向上し、実用レベルのイオン導電率となることを示し、ヒドリドによる超イオン導電状態を初めて実現した(図 2-6)。この物質は結晶中に多量のバリウムとヒドリドの空孔を含んでおり、室温では(i)バリウムと空孔、(ii)ヒドリドと空孔、(iii)ヒドリドと酸素がそれぞれ規則化した超格子を形成している。300°C付近で導電率が急激に上昇したのは、この(i)~(iii)の規則が逐次的に解消され、ヒドリド拡散層(LiH₄面)内に局在していたヒドリド空孔が非局在化したことに起因し、導電率がほとんど温度依存性を示さなくなるのは、ヒドリドが液体のように集団運動しているためと考えられている。現在は、BLHOの相転移温度を低温化させるための試みがなされて

⁴⁴ 逆項間交差：三重項励起子が一重項励起子へと変換される過程。

⁴⁵ 熱活性化遅延蛍光(TADF)材料：九州大学の安達らが見出した有機発光材料で、ドナー(電子供与性置換基)とアクセプター(電子受容性置換基)を用いて分子内のHOMOとLUMOを局在化し、効率的な逆項間交差が起きるように設計されており、100%近い発光効率を実現できる。しかしながら、ドナーとアクセプターをつなぐために柔らかい分子設計をする必要があり、分子の動きにより様々な構造を取れること(構造緩和)が原因で発光スペクトルがブロードになってしまう。

⁴⁶ 平成 28 年 2 月 12 日 JST、関西学院大学、JNC 石油化学株式会社プレスリリース「最高レベルの発光効率と色純度を持つ有機 EL ディスプレー用青色発光材料を開発」の図 4

いる。また、BLH0は高圧合成などの特殊手法に頼らずに、常圧下でグラムスケールの試料作製が可能なので、デバイス応用を進める上でも利点となっている。

小林はヒドリドイオン導電現象を活用した新規電気化学デバイスの開発を行っており、ヒドリドイオン導電体を固体電解質として、電気化学的な金属電極の水素化・脱水素化に成功している。また、ヒドリドイオン導電体と混合導電体を接合したデバイスの試作に成功し、電極/電解質界面での水素脱挿入に伴う可逆的な電荷移動が生じていることを確認した。今後の燃料電池や物質変換反応への応用に向けた基礎となる成果である。ヒドリドイオンを電荷担体とする電気化学デバイスの開発は複数の企業と共同で進んでおり、ヒドリドイオン導電性の電極、固体電解質の物質開発に継続して取り組むと共に、産学連携によりヒドリドイオン導電と水素の電荷制御に基づく新たな水素の利活用技術の創出を目指している。

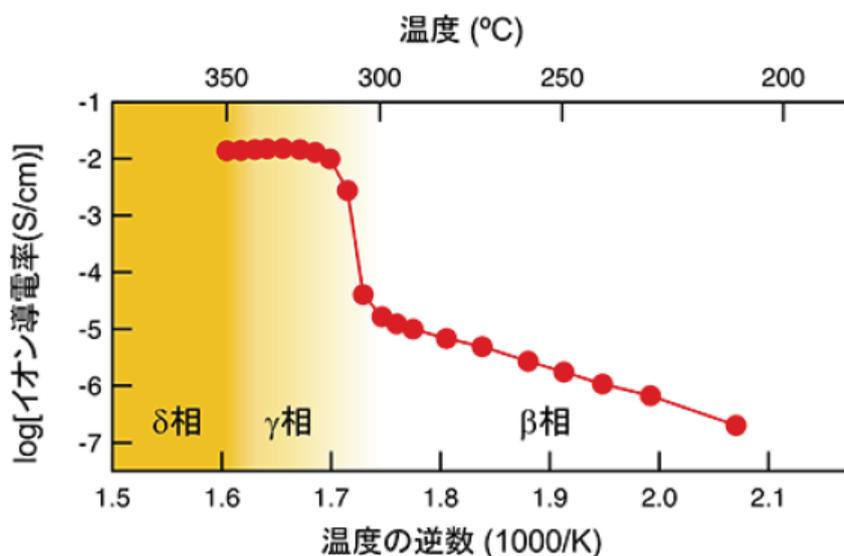


図 2-6 BLH0 のイオン導電率の温度依存性⁴⁷

梅津は研究期間中に Mn 基ホイスラー合金に着目し、新規のハーフメタル強磁性材料の探索を進めたが、最も大きな成果は、ホイスラー合金のバルク単結晶の育成に成功したことであった。それまでも薄膜の単結晶を用いた物性評価は多数の報告があったが、バルク単結晶を用いることで様々な手法による電子状態の精密な観測が可能になり、研究終了後の大きな成果に結びついた。例えば、梅津は良質のバルク単結晶により、世界で初めて Co_2MnGe ホイスラー合金の三次元的なバンド構造を観測し、ハーフメタル的なバンド構造を持つことを明らかにした。理論的にハーフメタルであるという予測があった Co_2MnGe は、類似の物質である Co_2MnSi と共に、スピントロニクスへの応用を目指して幅広く研究されていたが、薄膜単結晶の測定では、世界的にハーフメタル状態の観測に失敗していた。また、これらのホイスラー合金の電子状態を、よく使われている角度分解光電子分光 (APRES)

⁴⁷ 2022 年 1 月 14 日 分子科学研究所プレスリリース「ヒドリド超イオン伝導体の発見」の図 2

だけでなく、新たな測定技術である放射光軟 X 線を用いた共鳴非弾性散乱により明らかにできることを示した点にも意義がある。梅津はホイスラー合金にとどまらず、スピントロニクスへの応用の可能性のある新規化合物の探索へも研究を展開しており、鉄、クロム、硫黄からなる化合物が反強磁性のハーフメタルであることを示した。反強磁性的であれば、磁性体の内部で磁化を打ち消し合うため外部への漏れ磁場が発生せず、高密度な集積が可能になる。また、この材料を組み込むことで強磁性層/反強磁性層から構成されるトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子の構造を簡単にできる可能性が有り、更なる研究の進展が期待されている。

辻は研究期間中に炭素架橋を用いた分子構造制御により、理想的な π 電子共役系である炭素架橋オリゴフェニレンビニレン (COPV) と名付けた新物質を開発し、発光特性と光耐久性が優れていることから、有機レーザー材料としての有用性を見出していた。2015 年には DFB レーザー、2018 年にはマイクロ結晶によるレーザー発振に成功したが、さらに発振閾値を下げるために、COPV に光捕集機能を持つ樹状分子部位 (カルバゾール dendron) を付与して巨大分子を合成し、その結晶化に成功した。得られたマイクロ結晶では、樹状分子部位が光アンテナとして機能し、光エネルギーが効率的に COPV 部位に捕集されるため、低閾値でレーザー発振を実現できた⁴⁸。

山田は本研究領域の梅澤、阿部、西山と共同で、水の電気分解に用いる新しい酸素発生触媒 ($\text{CaCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$) の開発を、15 万気圧の超高压合成法を用いて行い、異常高原子価 Fe イオン⁴⁹を含む酸化物が高い触媒活性を示すことを明らかにした。この新材料は資源量が豊富で安価な元素のみで構成されており、既存材料と比べて原料のコストが圧倒的に低いという利点があり、水素ガス製造や次世代蓄電池などのエネルギー分野において広く活用される可能性がある⁵⁰。

2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献

以下に、研究者のアンケート回答、インタビュー結果などに基づき、研究成果の社会・経済への貢献について幾つかの事例を示す。

中辻は 2021 年 7 月に東大発のスタートアップ TopoLogic 株式会社を設立し、技術顧問となっている⁵¹。TopoLogic 株式会社ではトポロジカル材料の開発と、それを用いた熱電素子、メモリ素子の開発を行っている。また、トポロジカル磁性体の巨大磁気熱電効果を用いた熱流センサーの開発を行い、複数の企業と大量生産に向けた共同研究が進展している。

宮内は研究期間中にナノ粒子による光触媒の高効率化を目指した研究を進め、 Cu^{2+} の酸化ナノクラスターを TiO_2 の表面に担持し、 CuO/TiO_2 界面での光励起を用いて可視光に応

⁴⁸ 2020 年 5 月 8 日 筑波大学、神奈川大学、九州大学プレスリリース「光を集めるアンテナをもつ有機マイクロ結晶レーザーを開発」

⁴⁹ 鉄イオンは通常は 2 価または 3 価の価数をとるが、強い酸化雰囲気を用いることで通常よりも高い価数の 4 価の鉄イオンが生じる。

⁵⁰ 平成 27 年 9 月 15 日 大阪府立大学、物質・材料研究機構プレスリリース「安価で資源量が豊富な鉄・銅・カルシウム・酸素からなる水素社会実現のための新しい触媒材料の開発に成功」

⁵¹ TopoLogic 株式会社ホームページ <https://www.topologic.jp/>

答する新たな光触媒を提案し、実証実験で室内照明による高度な抗菌・抗ウイルス活性を示すことに成功していた。この成果を基に開発した $\text{Cu}_x\text{O}/\text{TiO}_2$ ($1 < x < 2$ で、銅は1価と2価の混合状態で存在)が、最近、コロナウイルスの不活性化にも効果があることが認められる⁵²など、光触媒としての性能向上のため、民間企業との共同研究が続けられている。

堀毛は研究期間中の成果を発展させ、これまで主に結晶相のみが研究対象となっていた配位高分子⁵³の結晶の融解、ガラス化を見だし、その非晶質相を利用した材料開発を進めている。JSTのA-STEPではデンソー株式会社と協力し、車載用途において求められる湿度ゼロ・120°Cの環境で実用レベルのプロトン(H⁺)伝導度(13.3mS/cm)を示す「配位高分子ガラス」の合成に成功した。この配位高分子ガラスでは金属イオンとリン酸が大きなネットワークを作り、ネットワーク自体が高い運動性を持ち、その動きでプロトンを連続的に高速輸送しており、電極面積1cm²の燃料電池セルで最大出力密度150mW/cm²を安定に示すなど、固体電解質として十分な性能を持っている。今後、ガラスを形成する金属イオンや分子の種類を幅広く検討することで、燃料電池の性能向上、特に車載環境での用途へ展開が期待されている⁵⁴。

薬師寺は研究終了後もMRAMへの応用に直結する材料の開発を続けている。研究期間中にTMR素子の記憶層の次世代材料として開発したIr/Coが、参照層を高性能化する材料として期待できるため、その薄膜の開発を行った。垂直磁化TMR素子⁵⁵の参照層は上部強磁性体層、下部強磁性体層と、その二層の間のスペーサー層からなり、スペーサー層にはルテニウムが広く用いられてきた。スペーサー層の材料をイリジウムに置き換えたところ、ルテニウムより強固な参照層特性が得られ、許容される膜厚の範囲もルテニウムスペーサーの2倍に広がり、大量生産には有利なことがわかった⁵⁶。この技術は現在、最先端のSTT-MRAM⁵⁷製品に採用済みであり、今後すべてのSTT-MRAMに実装される見込みである。

⁵² 2022年4月14日 奈良県立医科大学、神奈川県立産業技術総合研究所、東京工業大学プレスリリース「抗ウイルス材料 $\text{Cu}_x\text{O}/\text{TiO}_2$ による新型コロナウイルス(変異株)の不活性化およびそのメカニズム解明に成功」

⁵³ 配位高分子：金属イオンと分子(配位子)が交互に連結し、ネットワーク化した材料。多孔性のものは金属-有機構造体(MOF)とも呼ばれる。

⁵⁴ 2020年5月11日 京都大学アイセムスプレスリリース「加湿不要で水素イオンを高速伝導する配位高分子ガラスの合成に成功-車載用燃料電池の電解質材料として期待-

⁵⁵ 垂直磁化TMR素子：強磁性体/絶縁体/強磁性体からなり、強磁性体の磁化は基板面に対して垂直方向に向いている。2つの強磁性体の磁化の向きが平行、反平行で素子の電気抵抗が大きく変化する。

⁵⁶ 平成29年2月28日 産業技術総合研究所、JST、内閣府政策統括官プレスリリース「不揮発磁気メモリーMRAMのための高性能参照層を開発～大容量MRAMの開発を加速～」

⁵⁷ STT-MRAM: データの書き込みをTMR素子に電流を流すことで生じるスピントルク磁化反転によって行うMRAM。

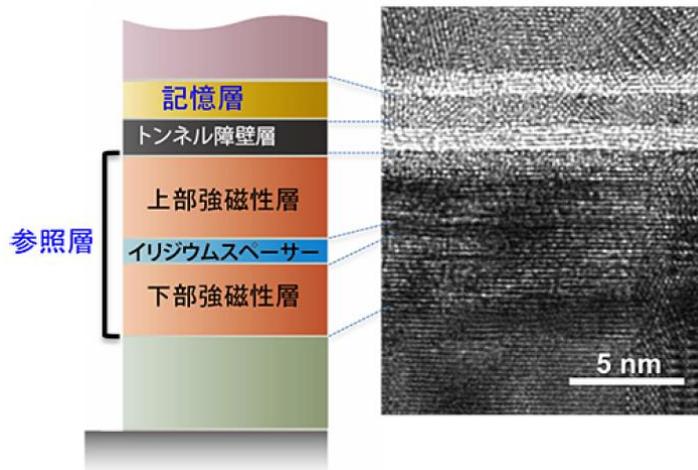


図 2-7 垂直磁化 TMR 素子断面の模式図と電子顕微鏡像⁵⁸

畠山が開発した DABNA は有機 EL の青色発光（蛍光）材料として JNC 株式会社との共同研究により実用化され、2018年に大手ディスプレイメーカーのスマートフォンに採用された⁵⁹。現在、市販のスマートフォンなどの有機 EL ディスプレイの多くに DABNA の誘導体が使われている。DABNA はホウ素、窒素、炭素、水素というありふれた元素のみからなり、短工程で合成できるため低コスト化が可能である。また、スペクトル半値幅が狭いため、画質向上のために不必要な色を光学フィルターで除去する必要が無く、有機 EL ディスプレイを高効率化できる。今後、TADF 素子やリン光素子における最終発光材料としても実用化できれば、更なる高効率化による大きな省エネ効果が期待でき、社会的・経済的なインパクトは極めて大きいと予想される。

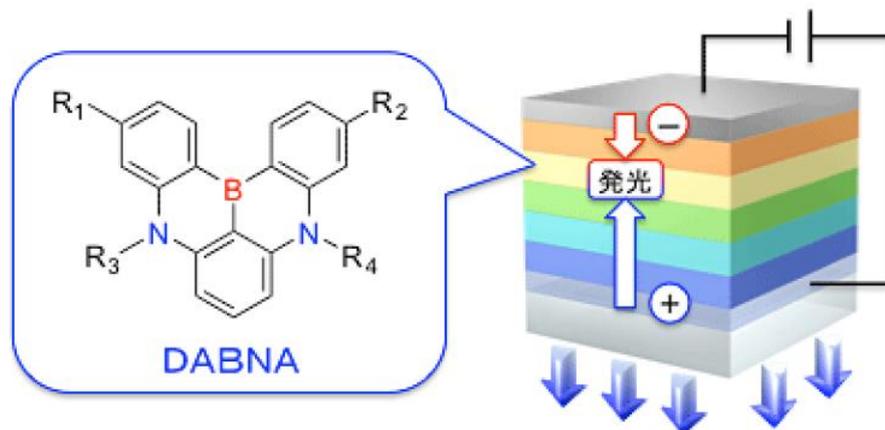


図 2-8 DABNA の分子構造と青色有機 EL 素子⁶⁰

⁵⁸ 平成 29 年 2 月 28 日 産総研、JST、内閣府政策統括官プレスリリースの図 1

⁵⁹ 2018 年 12 月 11 日 JNC 株式会社プレスリリース <https://www.jnc-corp.co.jp/news/2018/el.html>

⁶⁰ 平成 28 年 2 月 12 日 JST、関西学院大学、JNC 石油株式会社プレスリリース「最高レベルの発光効率と色純度を持つ有機 EL ディスプレー用青色発光材料を開発」の図 1

2.3.4 その他の特記すべき事項

本研究領域の研究者の内、12名が研究終了後にキャリアアップして教授・教授相当になった。そのうち5名は採択時の助教相当から教授相当への昇進である。梅津は2020年に教授に昇進したが、100年以上の歴史を持つ東北大学金属材料研究所初の女性教授である。