

戦略的創造研究推進事業  
—さきがけ(個人型研究)—

研究領域「熱輸送のスペクトル学的理解と  
機能的制御」

研究領域事後評価用資料

研究総括:花村 克悟

2023年1月



## 目次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	1
(3) 研究総括	1
(4) 採択研究課題・研究費	2
2. 研究総括のねらい	4
(1) 戦略目標に対する研究領域のねらい	4
(2) 本研究領域のねらい、研究成果として目指したこと	4
(3) 科学技術の進歩への貢献、科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと	5
3. 研究課題の選考について	5
(1) 1期生(2017年度)選考結果・総評	6
(2) 2期生(2018年度)選考結果・総評	7
(3) 3期生(2019年度)選考結果・総評	9
4. 領域アドバイザーについて	10
5. 研究領域のマネジメントについて	12
(1) 本研究領域における具体的な施策について	12
(2) 研究課題間や他の研究領域、国内外の他の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進、新たな研究コミュニティの創成等について	15
(3) 研究費配分について領域運営上の立場から	16
(4) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況について	16
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について	19
7. 総合所見	34
(1) 研究領域のマネジメント	34
(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況	35
(3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性	35
(4) 所感	36



## 1. 研究領域の概要

### (1) 戦略目標

「ナノスケール熱動態の理解と制御技術による革新的材料・デバイス技術の開発」

### (2) 研究領域

「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」(2017年度発足)

### (3) 研究総括

花村 克悟 (所属 東京工業大学 工学院 役職 教授)

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

<https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

平成 29 年度新規研究領域の事前評価

[https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka\\_h29.pdf](https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h29.pdf)

## (4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 採択時 <sup>2</sup>	研究課題	研究費 <sup>1,2</sup>
2017 年度	井藤 彰	九州大学 准教授 (名古屋大学 教授)	ナノ・ヒーティングによる生体組織凍結保存技術の創出	40.0 (47.2)
	岡島 元	青山学院大学 助教 (中央大学 准教授)	ラマン温度イメージングによる分子選択的な熱分析	40.0 (41.6)
	小川 直毅	国立研究開発法人 理化学研究所 ユニ ットリーダー (チームリーダー)	イメージング分光による非相反量子輸送物質の開拓	40.0
	澤田 敏樹	東京工業大学 助教 (准教授)	生体高分子の階層的な集合化を利用したナノスケール熱動態の理解と機能制御	40.0 (46.0)
	志賀 拓磨	東京大学 助教 (講師)	フォノンの粒子性・波動性を利用したスペクトル・エンジニアリング	40.0
	田口 良広	慶應義塾大学 准教授 (教授)	近接場光を用いたフォノン熱輸送過程の可視化	40.0 (41.9)
	南谷 英美	東京大学 講師 (大学共同利用機関 法人自然科学研究 機構 准教授)	層状物質における電子フォノン相互作用の波数・エネルギー分解第一原理解析	39.4 (44.4)
	矢吹 智英	九州工業大学 准教授	沸騰熱伝達特性スペクトルの計測・制御による新熱デバイス創出	40.0 (43.1)
2018 年度	岡部 弘基	東京大学 助教	生細胞内熱計測による温度シグナリング機構の解明	40.0 (43.6)
	岡本 範彦	東北大学 准教授	電気化学的インターカレーション反応を利用した熱スイッチングデバイスの創出	38.3
	金子 哲	東京工業大学 助教	分子素子実現に向けた単分子温度計測	40.0
	吉川 純	国立研究開発法人	ナノスケール・フォノン輸送の電	35.5

		物質・材料研究機構 主任研究員	子顕微分光	(35.6)
	鈴木 健仁	東京農工大学 准教授	極限屈折率材料の深化と熱輻射 アクティブ制御デバイスの開拓	40.0 (49.3)
	高橋 英幸	神戸大学 助教	高周波電子スピン共鳴によるマグノン熱伝導の制御	40.0 (40.2)
	寺門 信明	東北大学 助教	スピン熱伝導を利用した熱伝導 可変材料の創出	40.0 (42.6)
	原田 俊太	名古屋大学 講師 (准教授)	自然超格子フォノンニック結晶による室温熱輸送制御	40.0
	村上 陽一	東京工業大学 准教授	共有結合性有機骨格の熱的モード 究明と熱応用開拓	40.0 (50.0)
2019 年度	Anufriev Roman	東京大学 特任助教 (特任准教授)	レイフォノンクスによる高度な 熱流マネジメント	40.0
	石井 智	国立研究開発法人 物質・材料研究機構 主任研究員 (主幹研究員)	光と構造制御による温調機能の 開拓	40.0 (45.0)
	岡田 健司	大阪府立大学 助教 (大阪公立大学 准 教授)	結晶性ナノ多孔質材料を用いた 熱輸送の理解と能動的制御	40.0 (46.8)
	梶原 優介	東京大学 准教授	熱励起エバネッセント波を介した ナノスケール熱分光法の開拓	40.0
	柏木 誠	青山学院大学 助教	非秩序系構造材料の非平衡結晶 構造制御による新規熱輸送制御 技術の確立	40.0 (45.0)
	櫻井 篤	新潟大学 准教授	遠方場 Super Planckian 熱ふく 射輸送の可能性	40.0
	Sang Liwen	国立研究開発法人 物質・材料研究機構 独立研究者	分極場工学による界面フォノン 輸送の最適化	40.0
	藤原 邦夫	大阪大学 助教	単原子スケール非平衡熱輸送場 の分子動力学解析	40.0 (41.0)
	堀家 匠平	国立研究開発法人 産業技術研究所 研究員	クーロン効果潜熱輸送による放 熱型熱電発電素子	40.0 (44.0)

		(神戸大学 助教)		
			総研究費	1033.2 (1105.6)

<sup>1</sup>各研究課題とも研究期間の総額，進行中の課題は予定を含む(2022年11月30日現在)

<sup>2</sup>変更/異動/増額のあった場合、下段に括弧つきで記載

研究費については、「成果を上げている研究を更に加速する」という原則により、17名の研究者に総額72百万円の増額を行った。

## 2. 研究総括のねらい

### (1) 戦略目標に対する研究領域のねらい

戦略目標「ナノスケール熱動態の理解と制御技術による革新的材料・デバイス技術の開発」のもとで、さきがけ研究領域を設定するにあたり、領域名称を「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」とした。

本研究領域は、将来の持続可能社会および高度情報化社会・産業に革新をもたらすデバイスや新材料の実現に資するために、熱輸送の指向性制御やスイッチングとそれを可能にする原理解明、さらにその理解を支援する計算手法あるいは熱輸送のスペクトル計測等の基盤技術の創出を目指した。

具体的には、フォノン、分子振動、電子、フォトン（電磁波）、さらにスピンなどの熱を輸送する機構にまで立ち返り、従来の巨視的な熱輸送の概念に、新たに特徴と機能を付与する画期的な研究を推進した。例えば、これらの熱輸送機構について周波数や波長ごとの成分に分解し、成分ごとの輸送指向性付与、遮断を含むオンオフ制御、特定の周波数成分によるエネルギー変換などが想定される。それによって、熱輸送の本質的な理解と制御に寄与する基盤技術、ならびにそれに関するスペクトル学理の構築を目指した。

### (2) 本研究領域のねらい、研究成果として目指したこと

本研究領域は、高度情報化社会の実現に向けた技術革新が進む現況を受け、電子デバイスの発熱問題の解決、未利用熱エネルギーの有効利用への貢献を目指し、熱の制御・利活用に向けた基礎的な原理の解明や基盤技術の確立、将来社会や産業に革新をもたらす新材料創製・デバイス開発を目的とした。また、個人研究者の独創的な発想による先鋭的でより挑戦的な研究を対象とし、熱輸送の本質的な理解と制御に資する基盤技術の創出に貢献し、科学技術イノベーションの源流を生み出すため、これまでに注目されてこなかった新しい概念・発想・手法に取り組むとともに、異分野の知識を融合することも特に意識して運営した。

本研究領域では、これまでに個別の学会で熱の研究を進めていた様々な分野の研究者が分野の垣根を越えて参画し、新しい視点の多岐にわたる提案を採択した。また、異分野の知識



を融合して新たな研究を生み出すネットワークの構築ができるようにも選定した。

戦略目標の達成に向けては、分野の垣根を越え将来的に熱科学に関する研究を牽引していく研究者・研究グループの育成が必須であり、熱分野における複雑かつ本質的な問題の解決を目指し、CREST と成果を共有し新しい連携も行った。

### (3) 科学技術の進歩への貢献、科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと

本研究領域では、機械系、物理系、材料系に加え、化学系、生物系、情報系、数理系など、幅広い専門分野の研究を推進し、異なる分野の科学的知識を融合した総合的な取り組みを奨励し、熱の輸送を自在に操るなどといった新たなサイエンスを切り拓く挑戦的・独創的な研究を推進した。また、熱輸送を巨視的に理解しようとする従来の研究とは一線を画し、新たな概念・発想・手法を用いて、それぞれの周波数あるいは波長ごとの成分に分解した(熱)エネルギー群の特徴を詳細に理解することで、熱輸送の本質的な理解に迫る、画期的な研究を実施することを目指した。

このためには、熱輸送機構の根本を、様々な物理量のスペクトル(フォノン・フォトン・スピンさらに分子振動・回転などにおける周波数スペクトル、粒子・気泡・膜厚・構造因子などのサイズスペクトル、相転移や分子吸着離脱における温度スペクトル、分子衝突における速度スペクトルや頻度スペクトル、など)に分解し、スペクトル学的に理解することが必要となるが、その周波数や波長ごとに、例えば右や左へ自在に熱輸送をスイッチングするような新たな発想や手法の創出を目指し、熱輸送の本質的な理解と制御に寄与する基盤技術、ならびにそれに関するスペクトル学理の構築も目指した。

## 3. 研究課題の選考について

高度情報化社会の実現に向けた技術革新が進む現況を受け、電子デバイスの発熱問題の解決、未利用熱エネルギーの有効利用への貢献を目指し、熱の制御・利活用に向けた基礎的な原理の解明や基盤技術の確立、将来社会や産業に革新をもたらす新材料創製・デバイス開発のために、個人研究者の独創的な発想による先鋭的でより挑戦的な研究を対象とし、熱輸送の本質的な理解と制御に資する基盤技術の創出に貢献し、科学技術イノベーションの源流を生み出すには、これまでに注目されてこなかった新しい概念・発想・手法に取り組むとともに、異分野の知識を融合することも特に意識した。本研究領域では、これまでに個別の学会で熱の研究を進めていた様々な分野の研究者からの、分野の垣根を越えた新しい視点の多岐にわたる提案を採択した。また、異分野の知識を融合して新たな研究を生み出すネットワークの構築ができるようにも選定した。

### (1) 1期生(2017年度)選考結果・総評

本研究領域は、将来の社会・産業に革新をもたらすデバイスや新材料の実現に資するために、熱輸送の指向性制御やスイッチングとそれを可能にする原理解明、さらにその理解を支

援する計算手法あるいは熱輸送のスペクトル計測等の基盤技術の創出を目指す。機械系、物理系、材料系に加え、化学系、生物系、情報系、数理系など、幅広い専門分野の研究を推進し、異なる分野の科学的知識を融合した総合的な取り組みを奨励する。2017度は76件の応募があり、11名の領域アドバイザーの協力を得て書類選考を進め、24件の面接選考を経て、最終的に8件の研究提案を採択した。選考にあたっては利害関係にある領域アドバイザーの関与を避け、厳正な評価を行った。

初回となる今回の選考においては、本研究領域の目標を着実に達成するため、特に以下を重要視した。

1. 熱輸送の機構に立ち返った画期的な基礎研究提案を選ぶ。
2. 将来、熱科学に関する研究を牽引していくような、優れた研究者を選ぶ。
3. 熱に関する将来的な諸問題の解決に繋がる目的基礎研究に、国として投資し、推進する事業であることに留意する。基礎科学としての価値に加え、単なる現象解明や一般的な解析・計測技術の開発に留まる研究よりも、その先に社会的・公共的価値の創造に結びつく研究を選ぶ。この結果、機械系、物理系に加え、化学系、生物系など幅広い分野における挑戦的・独創的な研究提案を採択することができた。研究者間で大いに議論し、熱に関する将来的な諸問題の解決に資するべく、意欲的にさきがけ研究に邁進していくものと期待している。

今回の研究提案を見ると、研究内容自体は基礎研究として優れたものが多数あった。しかしながら、熱の輸送方向を自在に制御することを目標とした挑戦的な提案は多くなかった。さらにそれを目標とした提案においても、どの程度の熱量を制御できるか、その制御される熱量が社会的諸問題を解決するに何処まで迫れるか、といった視点を考慮したものは多くなかった。

新たに熱分野の研究に挑む方においては、僅かな投入エネルギーを用いて、熱という指向性のないエネルギーをオン・オフスイッチングも含め意図する方向に制御することの難しさに挑戦してもらいたいと思う。一方、熱工学分野においてすでに活躍している研究者にとっては、本研究領域趣旨の挑戦性と困難さを理解していることから却って応募しにくかったかもしれないが、難しく考え過ぎず、自身の研究を下記に示すような新たな視点により柔軟に見つめ直す機会と捉え、熱輸送の本質に迫る挑戦的な提案を期待する。

本研究領域では、熱輸送機構の根本を、様々な物理量のスペクトル(フォノン・フォトン・スピンさらに分子振動・回転などにおける周波数スペクトル、粒子・気泡・膜厚・構造因子などのサイズスペクトル、相転移や分子吸着離脱における温度スペクトル、分子衝突における速度スペクトルや頻度スペクトル、など)に分解し、スペクトル学的に理解することを目指す。それは決して容易なことではないが、多様な分野から優れた研究者が集結し切磋琢磨することで達成できるものと思う。2018年度の募集においては、本研究領域の意義と目的を念頭に、何が熱輸送を機能的に制御するにあたってのボトルネックなのか、を明確にした説得力のある魅力的な研究提案を期待している。

さががけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」領域(H29発足)  
領域ポータルフォリオ

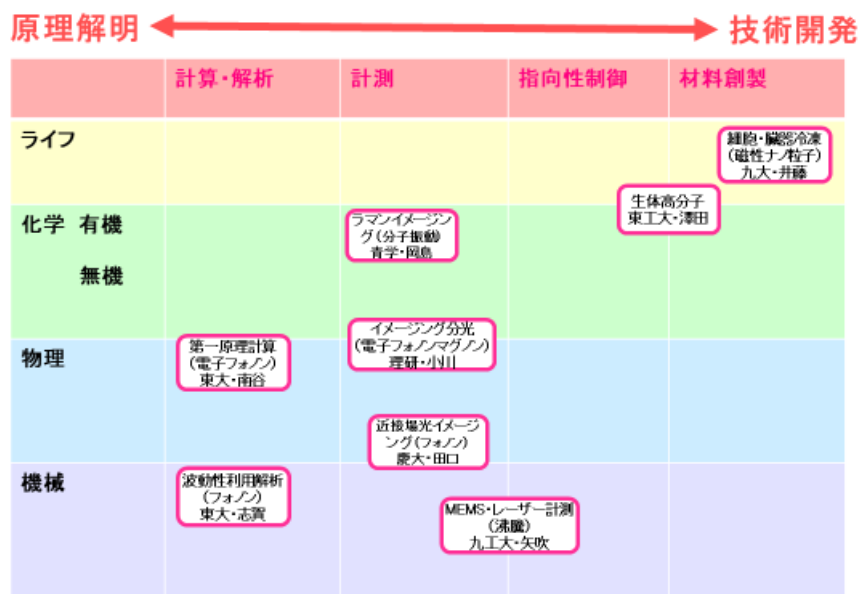


図1. 2017年度採択者ポータルフォリオ

(2) 2期生(2018年度)選考結果・総評

本研究領域は、将来の社会・産業に革新をもたらすデバイスや新材料の実現に資するために、熱輸送の指向性制御やスイッチングとそれを可能にする原理解明、さらにその理解を支援する計算手法あるいは熱輸送のスペクトル計測等の基盤技術の創出を目指し2017年度発足した。機械系、物理系、材料系に加え、化学系、生物系、情報系、数理系など、幅広い専門分野の研究を推進し、異なる分野の科学的知識を融合した総合的な取り組みを奨励する。

2年度目となる2018年度は81件の応募があり、11名の領域アドバイザーの協力を得て書類選考を進め、22件の面接選考を経て、最終的に9件の研究提案を採択した。選考にあたっては、2017年と同様に利害関係にある領域アドバイザーの関与を避け、新たな概念・発想・手法を用いて、熱輸送の本質的な理解に迫る、将来の熱科学研究を牽引し、社会的・公共的価値の創造に結び付く基礎研究を推進すること、などを重要視し、厳正な評価を行った。この結果、機械系、物理系(理学系)、化学系、材料系、生物系、電気系などから、2017年度よりもさらに幅広い分野の研究提案を採択することができた。

2018年度は、2017年度に比べて、“熱輸送のスペクトル学的理解…”の趣旨をよく理解し、咀嚼したうえで自身のオリジナルな発想をこの趣旨に沿うように練り上げた提案が多く見受けられた。その中から、ナノスケールさらに分子・原子スケールの温度計測からその熱輸送機構の解析、さらにマクロスコピックな熱輸送オン・オフスイッチングやスピン熱伝導の指向性制御といった機能性材料創製を目指した分子・原子輸送制御や構造制御、さらには生命活動に関わる熱輸送など、熱輸送そのものの原理や過程の解明から、熱輸送制御デバ

イスの基礎研究に至るまで、本研究領域の研究対象に広がりをもつことができた。これらの提案者が、この“さきがけ”といった仮想研究室に集い、共通する熱輸送の本質的な理解に迫りつつそれぞれの分野における熱あるいは熱輸送に関する課題の解決に資するべく、本さきがけ研究に邁進していくものと期待する。

今回の審査において最終的には採択に至らなかった提案の中にも、興味深く優れた提案が多く見受けられた。その中には紙一重のところまで採択に至らなかった提案もあった。今まで培われた自身の研究成果を、熱輸送機構のスペクトル学的理解にどのように活用するのか、かつそれを理解することで熱に関する諸問題をどのように解決できるかを、必ずしも説明しきれておらず、もう一步の提案も多く見受けられた。

2019年度の募集においても、本研究領域で目指している熱輸送機構の根本を、様々な物理量のスペクトル(フォノン・フォトン・スピンさらに分子振動・回転などにおける周波数スペクトル、粒子・気泡・膜厚・構造因子などのサイズスペクトル、相転移や分子吸着離脱における温度スペクトル、分子衝突における速度スペクトルや頻度スペクトル、など)に分解し、スペクトル学的に理解するとともに、その理解によって熱あるいは熱輸送に関する社会的課題をどのように解決できるか、を明確にした説得力のある挑戦的・魅力的な研究提案を期待している。

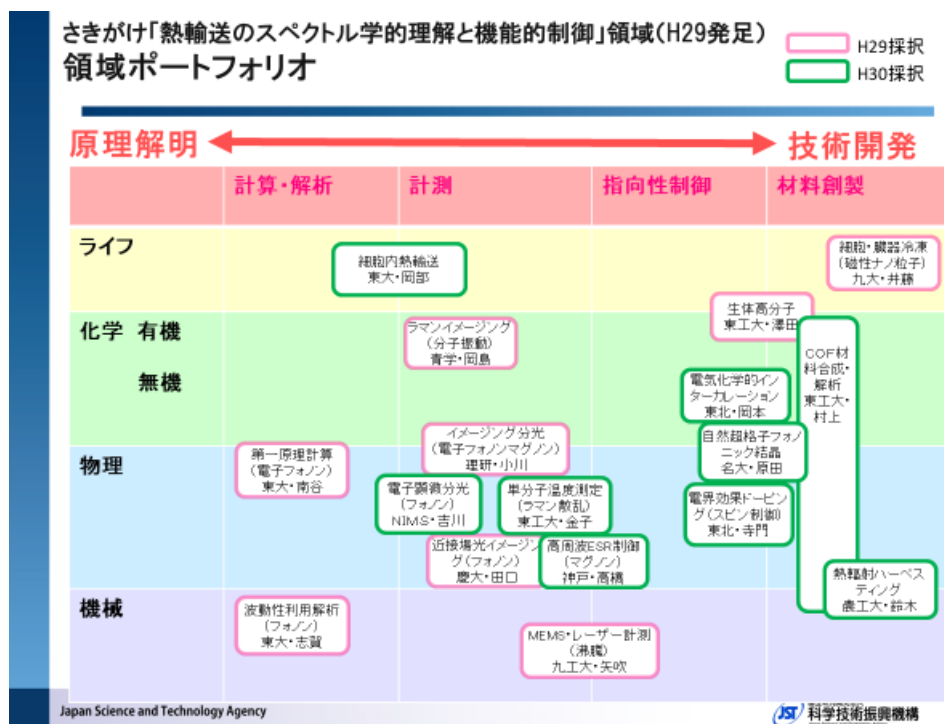


図2. 2018年度採択者ポートフォリオ

(3) 3期生(2019年度)選考結果・総評

本研究領域は、将来の社会・産業に革新をもたらすデバイスや新材料の実現に資するため

に、熱輸送の指向性制御やスイッチングとそれを可能にする原理解明、さらにその理解を支援する計算手法あるいは熱輸送のスペクトル計測等の基盤技術の創出を目指して 2017 年度に発足し、2019 年度は 3 回目の募集となる。

2019 年度は 59 件の応募があり、11 名の領域アドバイザーの協力を得て書類選考を進め、21 件の面接選考を経て、最終的に 9 件の研究提案を採択した。選考にあたっては、2018 年度と同様に利害関係にある領域アドバイザーの関与を避け、新たな概念・発想・手法を用いて、熱輸送の本質的な理解に迫る、将来の熱科学研究を牽引し、社会的・公共的価値の創造に結び付く基礎研究を推進すること、などを重要視し、厳正な評価を行った。2019 年度も“熱輸送のスペクトル学的理解…”の趣旨をよく理解し、咀嚼したうえで自身のオリジナルな発想をこの趣旨に沿うように練り上げた提案および失敗を恐れない挑戦的な提案が多く見受けられた。その中から、非秩序系構造材料やフォノンニック結晶における熱輸送のスペクトル学的理解、あるいはイオン液体ヒートパイプや黒体放射を超えるコヒーレントふく射の可能性など、大変魅力的かつ挑戦的な研究課題を採択した。

3 回の公募期間において提案内容は徐々に洗練されてきたと感じており、今回採択された提案も今後 3 年半の研究期間を通じ進展が大いに期待される。一方、提案の繰返しやコメントを受けた部分にあまりにも敏感に応えようとする事で本来の輝きを失った提案も見受けられた。もちろん今回の審査においても紙一重のところまで採択に至らなかった提案も多くあった。これまでの提案を通して、今まで進めてきた自身の研究にスペクトル学的な視点を加える一つのきっかけとなり、それが新たな展開につながることを期待したい。

本研究領域は 2019 年度が最終年度の募集であり、メンバーは総勢 26 名となった。これらの研究者が、この“さきがけ”といった仮想研究室に集い、共通する熱輸送の本質的な理解に迫りつつそれぞれの分野における熱あるいは熱輸送に関する課題の解決に資するべく、本さきがけ研究に邁進していくものと期待する。

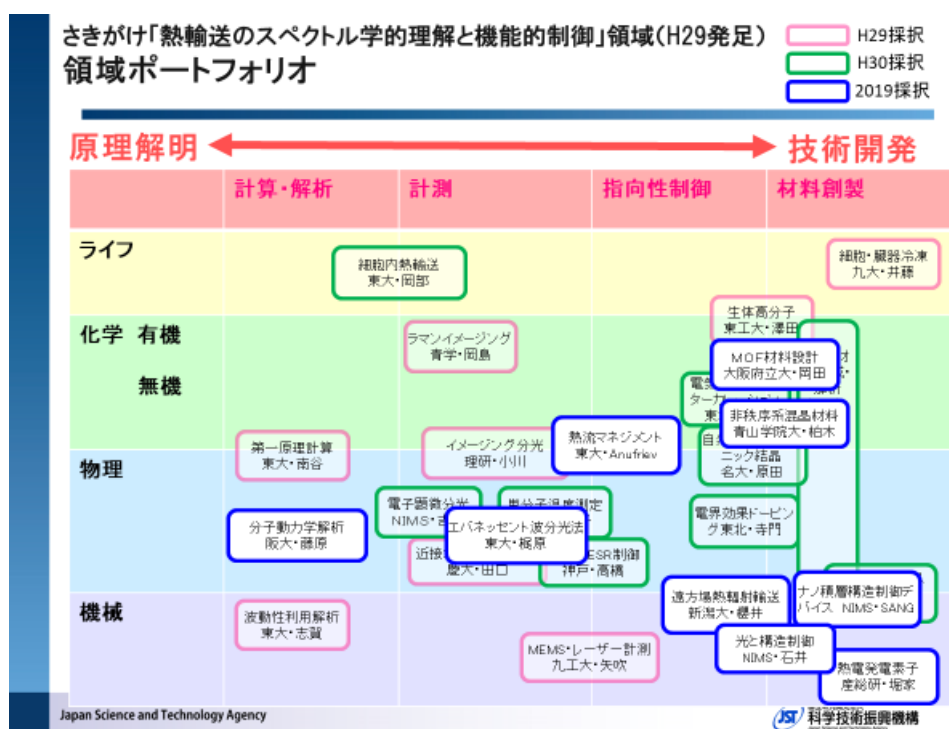


図 3. 2019 年度採択者ポートフォリオ

#### 4. 領域アドバイザーについて

＜領域運営方針・領域アドバイザー選定指針＞

- ・化学・生物・情報・数理系を含めた幅広い専門分野の研究の推進には、熱を主軸とした幅広い分野の専門家が必要。
- ・熱輸送の支配因子・本質理解に寄与する基礎学理には、基礎科学者が必要。

＜アドバイザーの配置＞

- ・新旧熱科学者：次世代の参加誘導とともに、従来からの熱研究者にも参加いただき、参加研究者がコミュニティから認められるように配慮。
- ・基礎科学者：電子、光子、スピン等、学理創出に向けて基礎物理の研究者。
- ・多様な分野の研究者：化学・生物・情報数理などの研究者。
- ・産業界ニーズ、情勢への対応：モノの具現化に向けてデバイス研究者を配置し、産学ともに必要としている計測の研究者。

以上の観点より以下の領域アドバイザーの選定を行った。

表 1. 領域アドバイザーリスト

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 <sup>1</sup>	役職	任期
中村 真一郎 (フォノンエンジニア)	(株)デンソー サーマルシステム開発	FP 開発室長 (Senior Vice	2017 年 6 月～2023 年 3 月

リング)	統括部 (DENSO International America, Inc. Silicon Valley Innovation Center)	President)	
森 孝雄 (固体物性、無機材料)	国立研究開発法人物 質・材料研究機構 国 際ナノアーキテクトニ クス研究拠点	主任研究員 (グループリーダー)	2017年6月～2023 年3月
大野 恵美 (熱輸送・熱工学全般)	(株)IHI 資源・エネルギー・環 境事業領域 ボイラ SBU 基本設計部 (資源・エネルギー・環 境事業領域 カーボンソリューション SBU)	燃焼技術グループ 主 査 (副SBU長)	2017年6月～2023 年3月
小池 洋二 (スピン、解析)	東北大学 大学院工学研究科	教授 (名誉教授)	2017年6月～2023 年3月
萬 伸一 (デバイス)	日本電気(株) IoT デバイス研究所 (国立研究開発法人理 化学研究所 量子コン ピュータ研究センタ ー)	所長代理 (副センター長)	2017年6月～2023 年3月
森川 淳子 (高分子、分子振動)	東京工業大学 物質理工学院	教授	2017年6月～2023 年3月
宗像 鉄雄 (情報数理分野・シミ ュレーション)	国立研究開発法人産業 技術総合研究所 省エ ネルギー研究部門 (福島再生可能エネル ギー研究所)	研究部門長 (所長)	2017年6月～2023 年3月
木崎 幹士 (ディーゼル・燃料電 池)	トヨタ自動車(株) トヨタZEVファクト リーFC技術・開発部	チーフプロフェッショナ ルエンジニア	2017年6月～2023 年3月
藤田 博之	東京大学	教授	2017年6月～2023

(MEMS)	生産技術研究所 (東京都市大学 総合 研究所)	(特任教授)	年 3 月
船津 貴志 (生体温度制御)	東京大学 大学院 薬学系研究科	教授	2017 年 6 月～2023 年 3 月
栗野 祐二 (デバイス・シミュレ ーション)	慶応義塾大学 理工学部	教授 (特任教授)	2017 年 6 月～2023 年 3 月

<sup>1</sup>変更/移動のあった場合、下段に括弧つき記載

## 5. 研究領域のマネジメントについて

### (1) 本研究領域における具体的な施策について

本研究領域においては、個人研究者による独創的な研究提案を推進するだけでは無く、分野の垣根を越え他の研究者との相互作用により個人研究者が自己の殻を破れるか、将来的に熱科学に関する研究を牽引していく新しい「仲間」を作れるか、という人材育成の観点も重要視した。領域内での研究議論は、積極的かつ頻繁に行った。年 2 回の領域会議の他に、本研究領域の最も大きな特徴となる月例の定例研究会である。これは、さきがけ研究者全員に出席を義務付け、毎回 4 名、又は 5 名の研究者が各 50 分(Q&A を含む)の研究発表を行うことで、研究の進捗状況を把握し、研究の進め方を指導した。各研究者にとっては、領域会議と併せて、年間に 4 回から 5 回の発表と議論の機会となり、必要な場合には、研究の目標、方向性、進め方に関する見直しを指導した。併せて、参加する各研究者にとっては、他者の発表、指導に接する貴重な機会であり、また、他者の研究発表に対しても活発に質問することを強力に指導したことで、多くの研究者に「出口から見通した課題設定」の考え方を浸透させる機会となった。この「定例研究会」という少人数の発表者による発表と質疑を全員参加で行うことを通じて、発表者のみならず参加者全員が各自の研究を向上させるきっかけを作ることになり、領域全体のレベルアップを行った。この「定例研究会」は本研究領域の研究期間内で 25 回(予定も含む)を数えた(以下の領域会議・定例研究会の開催リスト参照)。また、秋の領域会議においては、基本的に工場見学を実施し現場目線での研究を意識するように仕向けた。

さらに2017年度に、同じ戦略目標の下に実施するCREST研究領域「ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出」を始めとする、研究領域内外の研究者との連携の場も活用し、本さきがけ研究が、研究者自身の今後の研究を飛躍させた。また研究総括がCRESTのアドバイザーを兼務しており、合同領域会議も開催し連携を深めた。さらにCREST研究者もさきがけの領域会議、定例研究会への参加やさきがけ研究者のCREST領域会議への参加も積極的にいき研究のレベルアップに努めた。



●領域会議・定例研究会 開催リスト

2017 年度	領域会議	2017/11/1
	CREST・さきがけ「相界面」領域会議	2017/12/8
2018 年度	第 1 回定例研究会	2018/4/16
	CREST 合同領域会議	2018/6/21-22
	第 2 回定例研究会	2018/9/3
	領域会議(室蘭)	2018/10/17-18
	第 3 回定例研究会	2019/1/21
2019 年度	第 4 回定例研究会	2019/4/25
	CREST 合同領域会議	2019/5/16-18
	第 5 回定例研究会	2019/6/14
	第 6 回定例研究会	2019/7/22
	第 7 回定例研究会	2019/9/2
	領域会議(八戸)	2019/10/23-25
	第 8 回定例研究会	2019/12/9
	第 9 回定例研究会	2020/1/14
	第 10 回定例研究会	2020/2/13
	第 11 回定例研究会(中止)	2020/3/9
2020 年度	第 12 回定例研究会(中止)	2020/4/20
	CREST 合同領域会議(中止)	2020/5/18-20
	第 11 回定例研究会	2020/7/7
	第 12 回定例研究会	2020/8/21
	第 13 回定例研究会	2020/10/5
	領域会議・課題事後評価会	2020/12/6-8
	第 14 回定例研究会	2021/1/14
	第 15 回定例研究会	2021/2/15
2021 年度	第 16 回定例研究会	2021/3/4
	第 17 回定例研究会	2021/5/17
	領域会議	2021/6/16-17
	第 18 回定例研究会	2021/8/20
	第 19 回定例研究会	2021/11/1
	領域会議・課題事後評価会	2021/12/7-9
2022 年度	第 20 回定例研究会	2022/1/13
	第 21 回定例研究会	2022/3/11
2022 年度	第 22 回定例研究会	2022/4/22

	領域会議	2022/6/9-10
	第 23 回定例研究会	2022/8/2
	領域会議・課題事後評価会(尾道)	2022/11/7-8
	第 24 回定例研究会	2023/1/12
	第 25 回定例研究会 (成果発表会)	2023/3/6-7

2017 年 12 月の CREST さきがけ「相界面」領域会議は、本研究領域の総括が兼務のため、合同で開催された

●工場見学 リスト

年度	見学先
2018 年度	北海道 日本製鋼所 M&E(株) 室蘭製作所
2019 年度	青森県 六ヶ所原燃 P R センター
2020 年度	宮城県 JAXA 角田宇宙センター(Web 見学)
2021 年度	コロナ禍のため見学会中止
2022 年度	広島県 (株)三和ドック

各研究者のサイトビジットについても、研究総括、及び専門分野の領域アドバイザーに同行していただき、研究の進捗状況に加え、その研究環境を施設、設備、さらに人的構成等も含めて視察の上、確認を行うことで、研究課題に関する議論や予算運営等の基本的情報を取得した。また、所属機関への協力依頼を行うことで、円滑な運営が可能となった。サイトビジットについては、以下の通り全員実施した。

●サイトビジット 実施リスト

2017/9/15	東大	南谷・志賀
2017/10/11	東工大	澤田
2017/10/24	青学大	岡島
2017/11/6	九工大	矢吹
2017/11/6	九大	井藤
2017/12/12	慶応大	田口
2018/1/19	理研	小川
2018/9/20	東工大	村上
2018/10/1	東工大	金子
2018/10/11	東大	岡部
2018/11/8	東北大	岡本・寺門
2018/11/15	農工大	鈴木
2018/11/22	NIMS	吉川

2019/1/7	神戸大	高橋
2019/1/10	名古屋大	原田
2019/3/25	九工大	矢吹
2019/11/29	NIMS	石井・Sang
2019/12/5	大阪府立大	岡田
2019/12/5	阪大	藤原
2021/6/24	東大	梶原
2021/6/24	新潟大	櫻井
2021/6/30	東大	Anufriev
2021/6/30	青学大	柏木
2022/1/19	神戸大	堀家

また、研究期間中に壁にぶつかった研究者には個人面談を実施し、自己解決するための助言・指導をコロナ禍のため Web 会議を通じて行い、研究者が新たな解決法を見つけ出せるようにした。結果としては、十分なる成果を生み出した。

2021 年 2 月～5 月：1 名（結果：大きな軌道修正を行ったが、新たな実験方法で成果）

2021 年 2 月：1 名（結果：研究の方向性を修正し新たな技術を取り入れて成果）

## (2) 研究課題間や他の研究領域、国内外の他の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進、新たな研究コミュニティの創成等について

本研究領域で採択する研究者は、研究の社会的な背景等をしっかり理解しつつ、自身のさきがけ研究を切り拓き、将来的には産業界との連携を支えられるような人材に成長することを期待している。そのため、SciFos 活動にも参画し、国際交流支援も実施した。

2018 年度 SciFos 活動：岡島、田口

2019 年度 SciFos 活動：吉川、寺門

2018/11/26-28 「相界面」国際ワークショップにおける領域セッション実施：岡島、田口

2022/2/1-2023/1/31 MIT への長期赴任：藤原

さきがけ研究期間においてステップアップした研究者においては、スタートアップ支援も活用させ、更なる飛躍の後押しを行った。

2019 年 4 月：南谷

2019 年 11 月：井藤

2021 年 8 月：堀家

研究者間での連携は数多くあるが、一例としては、1 期生の南谷研究者と志賀研究者更に 3 期生の柏木研究者によるアモルファスの熱伝導率の予測をする技術の開発、1 期生の矢吹

研究者と3期生の藤原研究者による沸騰における気泡発生のメカニズム解析、3期生同士であるアヌフリエフ研究者と梶原研究者によるフォノン結晶のナノスケール熱分布測定などがあり、研究者間での活発な連携も見ることができた。

### (3) 研究費配分について領域運営上の立場から

研究費については、「成果を上げている研究を更に加速する」という原則により、26名中17名の研究者に多様な手段（研究費増額、総括裁量経費、スタートアップ支援、SciFos活動支援、国際強化支援）にて総額72,476千円の増額を行い、有意義に活用した。

内訳としては以下の通りであった。

増額並びに総括裁量経費 53,234千円

澤田	5,990千円	(走査型プローブ顕微鏡の購入)
矢吹	3,110千円	(溶存酸素濃度計測用実験装置の導入)
岡部	3,630千円	(顕微鏡高感度検出器の購入)
鈴木	9,336千円	(デュアルコム分光法の導入、実験室整備など)
高橋	200千円	(ワークショップ参加旅費等)
寺門	2,580千円	(遠心分離機、レーザービームプロファイラ等の購入)
村上	10,088千円	(CO <sub>2</sub> 超臨界乾燥装置、真空蒸着装置の導入など)
石井	5,000千円	(分光エリプソメータ用赤外分光装置の更新)
岡田	6,800千円	(低波数ラマン分光装置の購入)
柏木	5,000千円	(スパッタリング成膜装置の改造)
堀家	1,500千円	(イオン液体ヒートパイプ試作品の購入)

スタートアップ支援 14,672千円

井藤	7,172千円	(九州大学→名古屋大学への異動に伴う昇進)
南谷	5,000千円	(東京大学→分子化学研究所への異動に伴う昇進)
堀家	2,500千円	(産業総合研究所→神戸大学への異動に伴う昇進)

SciFos活動支援 300千円

岡島	100千円
田口	100千円
吉川	100千円

国際強化支援 4,270千円

岡島	1,510千円	(国際ワークショップ開催)
田口	1,790千円	(国際ワークショップ開催)
藤原	970千円	(MITへ長期派遣)

### (4) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況について

本研究領域の若手研究者の本研究期間中の成長も目覚ましく、26名中ほぼ半数の12名が

昇進している。内訳は4名が教授、4名が准教授、4名がその他役職への昇進となっており、現在では採択時にいなかった教授が4名となり、また半数以上の14名が准教授以上の役職となっている。



図4. 昇進結果

具体的には以下の通りとなっている。

表2. 昇進リスト

氏名	採択時	現在
井藤 彰	九州大学 大学院工学研究院 准教授	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
岡島 元	青山学院大学 理工学部 助教	中央大学 理工学部 准教授
小川 直毅	理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー (有期雇用)	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 (無期雇用)
澤田 敏樹	東京工業大学 物質理工学院 助教	東京工業大学 物質理工学院 准教授
志賀 拓磨	東京大学 大学院工学系研究科 助教	産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門 材料構造・物性研究グループ 主任研究員
田口 良広	慶應義塾大学 理工学部 准教授	慶應義塾大学 理工学部 教授
南谷 英美	東京大学 大学院工学系研究科 講師	大阪大学 産業技術研究所 産業科学 ナノテクノロジーセンター 教授
原田 俊太	名古屋大学 未来材料・システム研究所 講師	名古屋大学 未来材料・システム研究所 准教授
村上 陽一	東京工業大学 工学院 准教授	東京工業大学 科学技術創成研究院 教授
Anufriev Roman	東京大学 生産技術研究所 特任助教	東京大学 生産技術研究所 特任准教授
石井 智	物質・材料研究機構 先端材料解析研究拠点 主任研究員	物質・材料研究機構 先端材料解析研究拠点 主幹研究員
堀家 匠平	産業技術総合研究所 ナノ材料研究部	神戸大学 大学院工学研究科応用化学

	門 研究員	専攻 助教
--	-------	-------

また、受賞については採択時にすでに 5 名の研究者が文部科学省若手科学者賞を受賞していたが、研究期間中に、さらに 5 名が受賞し、さきがけ研究の成果も顕著に認められている。他にも数々の賞を受賞しており、主要な賞の例を下記に記す。

表 3. 受賞リスト

氏名	表彰名	受賞日
南谷 英美	文部科学大臣表彰 若手科学者賞	2019 年 4 月
志賀 拓磨		2021 年 4 月
澤田 敏樹		2021 年 4 月
石井 智		2021 年 4 月
Sang Liwen		2022 年 4 月
南谷 英美	第 1 回日本表面真空学会若手女性研究者優秀賞	2020 年 9 月
	第二回日本物理学会米沢富美子記念賞	2020 年 12 月
鈴木 健仁	第 18 回船井学術賞	2019 年 4 月
	第 6 回末松安晴賞	2020 年 6 月
藤原 邦夫	第 19 回船井研究奨励賞	2020 年 2 月
志賀 拓磨	ATPC Young Scientist Award	2022 年 9 月

数多くのプレス発表も行い研究の成果をアピールした。所属機関と国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)との共同プレスリリースも 8 件あった。以下にその共同プレスリリースを記す。

表 4. JST との共同プレスリリース

リリース名	著者	発表日
ウイルスでできた熱伝導フィルムを開発	澤田 敏樹	2018 年 4 月 3 日
超高屈折率・無反射な新材料のレンズで電磁波を操る	鈴木 健仁	2020 年 7 月 14 日
熱伝導を電気で制御する新手法を開発	寺門 信明	2020 年 9 月 2 日
窒化ガリウムでMEMS 振動子を開発	Sang Liwen	2020 年 12 月 14 日
プリンターで創る高屈折率・無反射なスーパー材料	鈴木 健仁	2021 年 4 月 30 日
原子スケールの熱流構造を可視化する解析技術を開発	藤原 邦夫	2022 年 3 月 25 日
アモルファス構造のトポロジーから熱伝導率を予測する技術を開発	南谷 英美	2022 年 6 月 23 日
スピン熱伝導物質のナノシート化に成功	寺門 信明	2022 年 10 月 13 日

このほかにも研究者の所属機関独自でのプレスや新聞発表も 36 件以上を数えている。

本研究領域のねらいの一つでもある研究領域内の異分野の研究者間での相互の研究に対する理解を深め、相互の特徴を生かせる共同研究の推進も奨励した結果、研究領域内における研究議論に加えて、個別の情報交換、装置・技術の相互補完等が活発に行われ、その中から具体化した共同研究テーマとして、1 期生南谷研究者、志賀研究者と 3 期生柏木研究者による共同研究論文のプレス発表があった。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220623/pdf/20220623.pdf>

## 6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

本研究領域は、熱輸送の指向性制御やスイッチングとそれを可能にする原理解明、さらにその理解を支援する計算手法あるいは熱輸送のスペクトル計測等の基盤技術の創出を目指した。そのため、機械系、物理系、材料系、化学系、生物系、情報系、数理系など、異なる分野の科学的知識を融合した総合的な取り組みの奨励も行った。

前述の研究領域の方針のもと、機械系、物理系など主要な研究分野に加え、化学系、生物系など幅広い分野にわたり挑戦的な 26 課題を採択し、領域会議や定例研究会などを通じて、異なる分野の研究者間において議論を行うなど、分野融合に向けた活発な活動を行った。また、各研究者は研究領域の趣旨をよく理解し、研究総括・アドバイザーのアドバイス、産業界との意見交換などを踏まえつつ、自身の従来の枠組みを越えた研究にも挑戦し、それぞれ顕著な成果を上げた。

例えば、小川研究者は、結晶中で発現する非相反物性の基礎物理と限界を明らかにし、バルク物質の熱流制御への応用可能性の探索を行った。特に、実空間で直感に訴える画像情報は非常に強力な物性解析ツールであり、非相反流の分散/空間伝搬をイメージング分光により検出し、方向性を有した量子流/熱流の空間構造と非平衡ダイナミクスを理解を推進した。吉川研究者は、電子顕微分光における空間、波数、エネルギーの 3 つの分解能をバランス良く世界最高レベルまで引き上げ、ヘテロ接合界面に局在する固有の振動モードの存在を示し、ナノサイズ直径の電子線プローブによって局所温度計測を実証するなど興味深い成果を得た。村上研究者は、世界で最も大きな共有結合性有機骨格(COF)の生成を突破口としてその熱物性値の緻密な測定、さらに複合材料や新種の COF の創出にも展開し、今後の応用発展への足がかりを築いた。澤田研究者は、繊維状ウイルスの集合構造を制御することにより、非共有結合でも高い熱伝導率となること、また化学修飾によりその熱伝導率をさらに高くあるいは低くできることを、遺伝子改変と機械学習を導入して明らかにした。Sang 研究者は、AlN/GaN、InGa<sub>N</sub>/GaN 超格子各層ヘテロ界面歪みによるピエゾ分極電界を制御することにより、あるいは InAlN/GaN による自発的分極により、フォノンのコヒーレントな熱輸送を実現させ、GaN とダイヤモンド膜間の中間層としての AlN/GaN ナノ積層を利用することで、界面熱抵抗が大幅に低減できた。藤原研究者は、古典分子動力学法に基づき、単原子以下の

空間分解能で熱輸送を記述し、熱流束を原子構造の三次元分布として可視化する新しい解析モデルを構築し、原子スケールの熱流構造に基づいた界面熱輸送を操作する新しい方法論の構築とその応用も展開し、今後の発展への足がかりを築いた。

**研究課題名 イメージング分光による非相反量子輸送物質の開拓**

研究代表者: 小川 直毅 (理化学研究所 創発光物性研究チーム チームリーダー)  
戦略的創造研究推進事業 さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」研究領域

研究概要

物質中の熱は、電子、フォノン、マグノン等によって輸送される。これら量子が非相反性応答(ダイオード特性)を示す場合には、熱の流れを整流できる可能性がある。本研究では、超高速レーザーを用いた時間領域での「フォノンイメージング分光」を強磁場中に拡張し、音響フォノンの非相反伝搬(磁気カイラル効果)が高周波領域で増強すること、またマグノンとの結合を介したその磁場制御を明らかにした。

(a) 磁場中フォノンイメージング分光の模式図。集光パルスレーザーによる瞬時加熱で発生した縦波/横波音響フォノンが試料中を伝搬し、超伝導ボロメータでtime-of-flight検出される。  
(b) 磁気カイラル物質Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub>中のフォノン。  
(c) 約200 GHzの周波数を有する横波音響フォノンの到達時間(=速度)、磁場の正負により速度に差が生じる(フォノンの磁気カイラル効果)。

研究成果とインパクト

フォノンの到達を検出する超伝導ボロメータの磁場中動作を検証し、また磁場/温度による超伝導ギャップの変調を介したフォンスペクトロスコピーの可能性を示した。「磁場中フォノンイメージング分光」は、超音波エコーによるフォノン分光に比して、2桁大きな周波数領域のフォノンを励起/検出可能である。

今後の展開等

- ・超伝導ボロメータの高精度化による単一フォノン/マグノンセンサーの可能性
- ・極薄フレキシブル基板を用いた超伝導ボロメータの作製により、同時多点測定や多様な試料形状への対応、また熱ホール効果等の量子熱輸送現象への応用

図 5. 研究課題(小川研究者)

**研究課題名: ナノスケール・フォノン輸送の電子顕微分光**

研究代表者: 吉川 純 (物質・材料研究機構、主任研究員)  
戦略的創造研究推進事業 さきがけ「熱制御」研究領域

研究概要

半導体素子などで熱制御が求められているが、半導体中の熱は結晶格子の振動(フォノン)として運ばれるため、フォノン輸送の理解が重要である。電子顕微分光法を用いて、空間分解能・エネルギー分解能・波数分解能の3つの分解能を高いレベルで両立させることで、数ナノメートル(nm)の分解能でフォノン物性やフォノン輸送特性の解析を可能にする計測技術の開発を進めた。

手法  
Electron probe 2 nm  
Specimen  
Phonon ( $E_{ph} = \hbar v$ ) excitation  
Diffraction plane  
Spectrometer  
Energy loss

測定例  
フォノンモードマップ  
c-BN Diamond  
LO TO  
Energy loss (meV)  
Counts for 70 ms  
Energy loss (meV)  
Number of electrons  $\times 10^{-4}$   
界面熱伝導モード

研究成果とインパクト

1-2nmの空間分解能で、フォノンを検出し、フォノンの分散関係や結晶界面近傍での振動モード分布の可視化、フォノンを用いた局所温度測定などの計測技術を確立した。広く利用されている顕微ラマン分光(空間分解能 $\sim 1\mu\text{m}$ )と比べて、空間分解能が3ヶタも優れている。

今後の展開等

既存装置で個人研究を進める一方、エネルギー分解能を15meVから1meVまで高める新たな計測技術の開発が必要で、電子顕微鏡メーカーとの共同開発が想定される。海外メーカーは動きそうにないので、国内メーカーとの共同開発になる。5億円規模のプロジェクト(CRESTOなど)になる。



図 6. 研究課題(吉川研究者)

**JST 共有結合性有機骨格の熱的模式究明と熱応用開拓**

研究代表者: 村上 陽一(東京工業大学、准教授)  
 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」研究領域

**研究概要**

持続可能な社会の実現のため、熱エネルギーの有効利用が望まれている。共有結合性有機骨格(COF)は結晶性多孔固体の新しいカテゴリであり高い熱安定性とデザイン自由度をもつ。本研究ではCOFのもつユニークな諸性質が新規な熱技術シーズ創出に有望と考え、研究を行った。具体的には、本研究では良質なCOF単結晶の合成法開発から開始し、COFを媒体とした新規な蓄熱材料系の開拓とその関連物性の解明に取り組み、以下の成果を得た。

**研究成果とインパクト**

200  $\mu\text{m}$ 以上と前例の無い大サイズかつ高品質なCOF単結晶合成の一般性のある方法を創出(図1)、その単結晶内への相変化蓄熱材の導入に成功して狙いの複合蓄熱系を創出(図2)、その相変化特性・比熱等を明らかにした上、結晶の大サイズにより熱輸送特性計測に成功した(図3)。本研究の実施により世の中に従来無かった特性のデザインが可能な新規な蓄熱材をもたらした。

**今後の展開等**

- ・大サイズ・高品質COF単結晶の作製法は基盤技術であり知財獲得を展開
- ・蓄熱分野で新技術探索を行う民間企業との産学共同研究へ展開
- ・実装に向け、選ぶCOFと蓄熱材との最適組み合わせの究明研究を展開

**図 1** 発見した核生成剤因子の利用による高品質・大サイズのCOF単結晶成長。左: 機序の模式図。右: COF単結晶の写真。

**図 2** 開発した大サイズCOF単結晶内への相変化蓄熱材導入の達成

**図 3** 開発したCOF単結晶1個に対する熱輸送特性計測の達成

図 7. 研究課題(村上研究者)

**JST 研究課題名 生体高分子の階層的な集合化を利用したナノスケール熱動態の理解と機能的制御**

研究代表者: 澤田 敏樹(東京工業大学、准教授)  
 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」研究領域

**研究概要**

繊維状ウイルスの集合化を制御する手法を確立し、広範囲(サブミクロメートル)にウイルスを規則的に配向させることで、その集合体が有機系高分子の非共有結合を介した熱輸送でありながらガラスを超える高い熱拡散率を示すことを見出した。さらに、遺伝子工学によりウイルス表層に様々なジペプチドを付加し、機械学習により熱輸送に適したウイルスの構造を予測した。その結果、適切な遺伝子改変によりウイルスの熱拡散率が大幅に向上することを見出した。

**研究成果とインパクト**

ウイルスの水溶液を乾燥させるだけで規則的に配向したフィルムを構築できるため、簡便に高い熱拡散率を示す有機系高分子集合体を構築できる。また、遺伝子改変によるライブラリー構築と機械学習の適用により、高熱拡散率を示す改変ウイルスが獲得できるのみならず、機構解明に繋がる優位性をもつ。

**今後の展開等**

- ・本研究成果を基に、ウイルスのアミノ酸配列の合目的な制御に基づく機能物性創発を目指す研究提案が2021年度JST創発的研究支援事業に採択された。熱輸送材以外にも様々な機能や物性をもつウイルス集合体の創製を目指すことで、環境低負荷なバイオ素材からなる高機能材料の創製に繋がると考えられる。

**高度に配向した繊維状ウイルス集合体**

**高配向/高熱拡散率** vs **無配向/低熱拡散率**

**POM** (Polarized Optical Microscopy) images showing aligned and non-aligned fibers.

**AFM** (Atomic Force Microscopy) images showing the surface morphology of aligned fibers.

**SAXS** (Small Angle X-ray Scattering) patterns showing the structural order of aligned fibers.

図 8. 研究課題(澤田研究者)



## 研究課題名 分極場工学による界面フォノン輸送の最適化

研究代表者: SANG Liwen (物質・材料研究機構 独立研究者)  
戦略的創造研究推進事業 さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」研究領域  
研究総括: 花村 克悟 (東京工業大学、教授)

### 研究概要

• 界面熱抵抗(TBR)はGaN系電子デバイスの熱伝導率や熱分布に大きな影響を与えている。本研究では、界面熱抵抗を低減するために、分極電界を持つ新規ナノ積層構造を制御し、フォノン熱輸送の最適化を目指す。さらに、NEMS/MEMS共振器を利用し、フォノン熱輸送の原理をナノスケールレベルで解明することにより、高出力電子デバイスの冷却効率の大幅向上を目指す。

### 研究成果とインパクト

- AlN/GaN、InGa/GaN超格子各層ヘテロ界面歪みによるのピエゾ分極電界を制御することで、フォノンのコヒーレントの輸送が実現した。
- GaNとダイヤモンド膜間の中間層としてAlN/GaNナノ積層を利用することで、TBRが大幅に低減した。
- NEMS振動子を開発し、熱計測技術によりナノスケール界面でフォノン輸送原理を解明した。

### 今後の展開等

• 本研究成果を半導体電子デバイス開発に展開することにより、最適な熱輸送ができ、効率的な放熱が実現し、より実用化に向けて他プログラムなどを利用して研究を推進する。

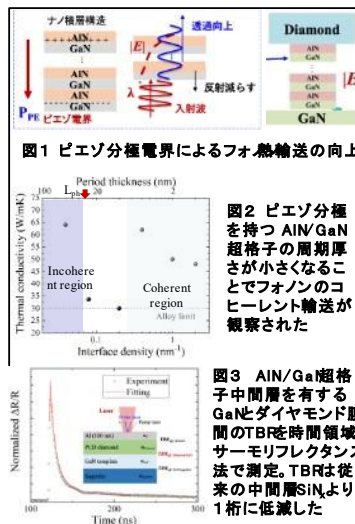


図 9. 研究課題 (Sang 研究者)



## 単原子スケール非平衡熱輸送場の分子動力学解析

研究代表者: 藤原 邦夫 (大阪大学 大学院工学研究科 助教)  
戦略的創造研究推進事業 さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」研究領域  
研究総括: 花村 克悟 (東京工業大学、教授)

### 研究概要

界面における熱輸送現象は、現代社会を維持し発展させる上で重要な制御対象です。本研究では、界面内の単原子スケールの局所空間において熱流を古典分子動力学法に基づき検出することで、界面熱輸送現象の新たな画像・原理を解明することを目的とした。また、単原子スケールで検出された熱流のスペクトル特性に基づき、界面熱輸送を制御する新たな方法論を創出することを目指した。

### 研究成果とインパクト

- 古典分子動力学法に基づき、単原子以下の空間分解能を有する空間で熱流を検出し、三次元分布として可視化する新しい解析技術を構築した。(右図)
- 原子スケールの熱流構造に基づき界面熱輸送を操作する新しい方法論の構築と応用展開した。

### 今後の展開等

- 解析技術のさらなる高度化と応用展開。
- 実験との比較による解析技術の妥当性検証。
- 界面が研究対象である領域内研究者との共同研究の実施。
- マサチューセッツ工科大学との国際共同研究の実施。

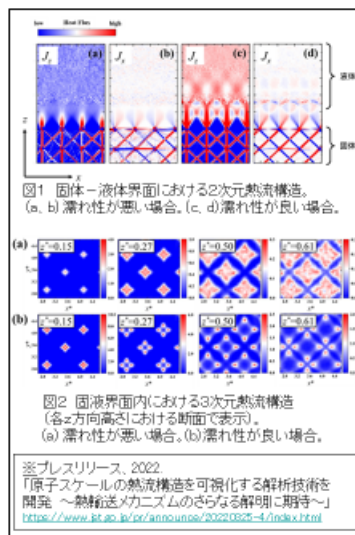


図 10. 研究課題 (藤原研究者)

また、さきがけ「熱制御」領域内のみだけでなく、CREST「ナノスケール・サーマルマネージメント基盤技術の創出」領域と合同でイベントなどを実施しており、これらを通じた研

研究者間の連携等により、新たな共同研究なども生まれた。

さらに、26人のうちほぼ半数の12人が昇進しており、さきがけ研究を通じてそれぞれの研究分野において認知されるとともに、研究室を主宰するPI (Principal Investigator、研究室の主宰者) としての能力も着実に成長している。今後、これらの研究者がさきがけで得られた研究基盤や人的ネットワークを活かして、更なる飛躍をとげることが期待できる。

国際論文も182件提出され、口頭発表も393件実施された。そのうち招待講演は122件にのぼっている。

表5. 成果リスト

採択年度	研究者	論文		特許出願		口頭発表	
		国内	国際	国内	海外	国内	国際
2017年度	井藤 彰	0	2	1	0	1(0)	0(0)
	岡島 元	0	10	0	0	13(2)	3(0)
	小川 直毅	0	15	0	0	7(6)	12(11)
	澤田 敏樹	0	4	0	0	27(11)	4(4)
	志賀 拓磨	2	7	0	0	16(2)	5(1)
	田口 良広	0	0	0	0	9(0)	8(3)
	南谷 英美	0	7	0	0	6(6)	6(6)
	矢吹 智英	0	4	1	0	20(2)	5(2)
2018年度	岡部 弘基	0	5	0	0	11(11)	2(2)
	岡本 範彦	0	3	0	0	3(1)	0(0)
	金子 哲	1	16	0	0	19(1)	7(5)
	吉川 純	0	1	0	0	10(6)	0(0)
	鈴木 健仁	0	7	1	1	11(1)	6(0)
	高橋 英幸	1	2	0	0	11(3)	3(3)
	寺門 信明	0	3	1	0	14(0)	0(0)
	原田 俊太	0	4	0	0	6(1)	6(0)
	村上 陽一	0	1	1	1	9(0)	3(0)
2019年度	Anufriev Roman	0	7	0	0	4(1)	8(3)
	石井 智	1	16	2	0	11(2)	8(8)
	岡田 健司	1	14	0	0	12(9)	4(2)
	梶原 優介	0	3	1	0	16(3)	13(1)

	柏木 誠	0	3	0	0	7(0)	3(0)
	櫻井 篤	0	1	0	0	3(0)	6(1)
	Sang Liwen	0	31	0	0	2(0)	7(1)
	藤原 邦夫	1	13	0	0	25(1)	0(0)
	堀家 匠平	0	3	0	0	1(0)	0(0)
研究領域全体		7	182	8	2	274(69)	119(53)

さらに、研究者毎の特筆すべき研究成果を記す。

#### 井藤研究者

本研究課題では、生体組織の冷凍保存/解凍技術に向け、磁性ナノ粒子が交流磁場中で発熱する原理を利用した「ナノ・ヒーティング」技術を、無細胞・細胞・組織・臓器といった各レベルで検討を行うことを目的として行われた。

その結果、大きな臓器には達していないまでも、細胞・組織の解凍については、その細胞等の機能維持も含めて、解凍時の障害を磁性ナノ粒子の加熱により改善し、臍島や iPS 細胞の保存に応用できることを示しており、従来の方式に比べて、より大容量の生体組織の保存に対応できることが明らかになったことは高く評価できる。また、臓器の保存は、移植を必要とする人たちに貢献できる技術であるため、その波及効果、社会的なインパクトは大変大きいと思われる。

今後は、各種の臓器で熱伝導率等も異なることや、ナノ粒子の混入手法も異なってくると思われることから、多様な臓器に応用できるような手法も開発し、実際の保存への応用を期待する。特に、伝熱の専門家と共同で加熱冷却における伝熱的な理論解明、医療関係者と共同での実際の臓器での移植可能性の検討、凍結保存システムについて企業等と共同で実用化を目指すことを期待する。

#### 小川研究者

本研究課題では、バルク物質の熱流制御への応用可能性を探索するため、結晶中で発現する非相反物性の基礎物理と限界を明らかにすることを目的として行われた。

その結果、バルクにおけるマグノンの熱輸送を定量的に評価し、その寄与が極めて小さいものであることを定量的に明かにしたことは高く評価できる。その際、質の高い物理実験系を緻密な考察を基にして実行していたことも高く評価できる。特に、フォノンのイメージングによって LA フォノンと TA フォノンの伝搬を分離して観測できたことは、大変素晴らしい成果である。

当初の目的をはるかに超えて、フォノンの非相反、イメージング、非相反マグノン伝播、フォノン励起電流の発見につながる研究を達成しており、熱伝導におけるマグノン非相反性の寄与について明確にした点は今後の研究につながると思われる。また、イメージング技

術は、他の物質の研究にも活用できることから、熱伝導の研究に大きな影響を与える可能性がある。

今後、今回構築した磁場中のフォノンイメージング分光を活用できる対象を見つけ、計測技術を役立てることを期待する。

#### 志賀研究者

本研究課題では、輸送原理に基づいた高度な構造制御による、熱スイッチや熱ダイオード、高コヒーレント・フォノン材料の創成に向け、密度汎関数法や分子シミュレーションを用いた、幅広い周波数領域におけるフォノン輸送の素過程を理解することを目的として行われた。

その結果、研究期間中に熱伝導に波動性を利用した具体的な適用事例を提案するまでは至らなかったが、フォノンの波動性・粒子性、コヒーレンス・インコヒーレンス性、フォノン散乱、等の基本的なコンセプトを最新の理論と計算法を駆使してその本質に迫り、フォノンの熱伝導スペクトルの描像に至る大きな成果が得られた。特に、フォノンの波動性を利用することで熱伝導制御が可能であることを理論的に示した点は高く評価できる。

今回は計算により明らかにしているが、新たな手法を実社会へ繋げるためにも実験的な実証、デバイスの提案など行うことができれば波及効果は大きくなることが期待される。熱伝導率フォノンスペクトルを導く概念や計算法により、今後ますます複雑となる熱制御材料開発の指針となることを期待する。

#### 田口研究者

本研究課題では、ナノスケールの局所的なフォノン熱輸送を光学的に可視化するため、近接場光と呼ばれるナノスケールに局在した光を用いてその回折限界を超える高い空間分解能でナノワイヤデバイスのフォノン熱輸送を可視化することを目的として行われた。

その結果、波長を変化させた測定が課題として残っているが、これまでできなかった新たな計測手法を開発し、原理検証まで行った意義は大きいと判断できる。近接場ポンププローブ法を可視光から赤外域に拡張されたことはエンジニアリング的に極めて高く評価でき、元々保有していた技術を他の研究者の知見なども活用しながら着実に進化することで、スペクトル学的な理解も手の届くところまで来ていると思われる。

今回開発した装置でなければ測定できないものへ活用できれば、社会的インパクトは高くなると思われ、さらにそこから新たな学術を見いだすことを期待する。また、さらに広がりを持って世の中に貢献する結果を出していく事も期待する。

#### 南谷研究者

本研究課題では、発熱過程を制御する方法を提案するため、電子フォノン相互作用を密度汎関数摂動理論に基づく第一原理計算によって高精度に計算し、その異方性を明らかにす

ることを目的として行われた。

その結果、通電による発熱について第一原理計算を使って、電子およびホールからフォノンに変換される過程を明らかにした点は高く評価できる。特に、電子は音響モード、正孔は光学モードのフォノンに変換されているといった興味深い結果が得られている。その際、電子とフォノンの相互作用を、クリアな物理モデルの提案により方程式に具現化し計算を行っている。

今回開発した、電子とフォノンの相互作用を第一原理計算と Neural Network Processor を組み合わせた計算法は、今後のフォノンエンジニアリングへの貢献が期待される。開発した計算手法を、不純物の影響等も踏まえ現実的な対象にも適用できるようになると研究成果の波及効果もさらに大きくなると思われる。

今後は、実験を行う研究者との連携を深める等、さらに現実的な成果を出していくことを期待する。

#### 岡島研究者

本研究課題では、分子振動や格子振動の「ラマン温度」に注目して、不均一系や非平衡系における分子種ごとの熱の偏りを分子選択的に可視化するための新規分光イメージング技術を確立することを目的として行われた。

その結果、分子選択的な温度計測のための装置や解析法を構築し、その有効性を示したことは評価できる。特に、マイクロ流路を用いて流路内の反応場における温度上昇を確認することができるようになり、単一分子毎の温度がわかり始めていることは高く評価できる。

本研究成果を更に発展させることにより、局所温度上昇と生成物の熱変性・劣化との関係から、反応系における局所温度の影響等を調べることができるようになり、今後デバイス等へ応用することで、波及効果は大きくなるものと思われる。

本研究課題では、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間研究期間を延長した。その結果、Y字流路により2つの反応物が合流する界面に生成物が局在し、その局在した生成物の温度が周囲の他の反応分子種に比べて系統的に高い温度となることを明らかにした。これは、マイクロリアクターにおいても、化学反応生成物の変性に直接関係する局所温度上昇(ホットスポット)が生ずることを実測した貴重な結果であり、高く評価できる。

#### 澤田研究者

本研究課題では、規則的に集合化した繊維状ウイルスが、非共有結合を基にしているにもかかわらず高い熱拡散率を示すという新しい知見を基に、集合構造を制御し高熱伝導化される機構を明らかにし、生体高分子の熱伝導性材料としての潜在性を明らかにすることを目的として行われた。

その結果、ファージの集合構造の制御に基づいて高熱伝導化できることを見出したとともに、ファージの化学修飾による特性の制御を行うなど、熱輸送材としてファージの利用可

能性を明らかにしたことは高く評価できる。

本研究成果を更に発展させることにより、繊維状フェージ材料を熱輸送材料として簡便に創製するための設計指針を見出すことが期待できるとともに、今後、生体高分子の構造や配列制御と熱輸送の関係性が、一般的な高分子材料の分子設計などに繋がれば波及効果は大きくなるものと思われる。

本研究課題では、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間研究期間を延長した。その結果、化学修飾により繊維状ウイルス集合体の熱伝導率を、さらに高くあるいは低くできることを、遺伝子改変と機械学習を導入して明らかにしている。このアプローチや成果は、高く評価できる。

#### 矢吹研究者

本研究課題では、高分解能で壁面温度場を計測することによる熱伝達機構、平滑面上での沸騰核生成機構、の大きく二つの課題に取り組むことで、これまで未到達であった沸騰現象を理論的に解明することを目的として行われた。

その結果、伝熱素過程の中では、対流熱伝達が壁面熱輸送に対して最大の寄与を持つことが明らかとなるとともに、核生成機構については、気泡核が壁面上に生成する過程を直接可視化することに成功したことは高く評価できる。

本研究成果を更に発展させることにより、沸騰熱伝達の数値予測技術の発展に寄与することで、電子機器の冷却技術や、排熱の高効率輸送・利用技術に貢献することが期待される。

本研究課題では、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間研究期間を延長した。その結果、表面の凹凸や汚染を極力減らした成膜細線ヒータ表面の核沸騰において、水の過熱限界に近い過熱度を得た。沸騰熱伝達機構を根本から変えるものではないが、従来達しえなかった過熱度を得たことは極めて興味深く、高く評価できる。

#### 岡部研究者

本研究課題では、細胞内における mRNA の一過性凝集体の形成を担う構造や分子群を同定することで、それらが細胞の温度変動により駆動される原理を調べ、細胞内の熱輸送経路と温度変動機構を解明することを目的として行われた。

その結果、mRNA を標識し、一分子を追跡することにより、通常リボソームと会合状態にある mRNA が局所発熱により解離し、一過性凝集体形成へと至る機構を見出した。また細胞内の主要な発熱源であるミトコンドリアから微小管を介して mRNA へ伝えられるという熱輸送経路の可能性を示唆している。さらに、細胞内を非定常加熱した際の過渡的な温度分布解析により、速やかな温度緩和を示すリボソーム中の水とは異なる、緩慢な温度変化が細胞内には生ずることも示している。

この研究成果は、細胞内の温度変動は、単純な熱伝導によるものだけではなく、mRNA の一過性凝集体形成過程といった熱利用を伴う現象である可能性を示唆しており、温度緩和

時間が 10 の 5 乗オーダーほど異なるといった課題を解決する手がかりとなる可能性があり、大いに評価できる。

本さきがけの研究成果が認められ、量子生命科学会の評議員に就任し、さらに「温度生物学」と関連する学術集会を設立、運営する活動も行っており、更なる飛躍を期待する。

#### 岡本研究者

本研究課題では、電気化学的インターカレーション(挿入・脱離)反応を用いて、機械的駆動部無しに電圧制御だけで熱輸送を可逆的に ON/OFF する熱スイッチング技術を確認することを目的として行われた。

その結果、 $\eta$  型 Fe-Al 系化合物の電気化学インターカレーション反応を起こし、貴電位側に掃引することにより内包 Al 原子が脱離することを確認し、これにより熱拡散率がおよそ 5 倍、熱伝導率がおよそ 6 倍に増大することを示している。しかしながら、卑電位側に掃引しても Al 原子の挿入は確認できず、可逆性が低い可能性も示された。一方、平均フォノン群速度の低減だけでなく、ゲスト原子の非調和性が格子熱伝導率の低下に寄与することが分かったことは、大きな成果として評価できる。

今回の熱スイッチング技術への挑戦において、必ずしも狙い通りにはいかないといった貴重な経験を積み上げたことを今後の糧として、更なる活躍を期待する。

#### 金子研究者

本研究課題では、金属プローブ間に架橋した単分子接合の接続構造を電気伝導計測と分光計測から明らかにし、対応する単分子接合構造における分光学的温度を決定することを試み、金属-有機分子-金属界面における熱輸送機構の解明に資する知見の取得を目的として行われた。

その結果、金属プローブ間のナノギャップに架橋した単分子について、電流-電圧特性とラマン散乱を同時計測することによって単分子の架橋(接合)構造を特定し、その接合軸と傾いた単分子の振動温度は低く電気伝導率が高くなるが、接合軸と平行な単分子の振動温度は高く電気伝導率は一桁低くなるなど、興味深い成果を得ている。これは単分子素子の基礎的データ取得として、高く評価できる。

単分子における貴重なデータの取得が可能となったことは、分子素子の応用に大きく近づく成果であり、さらに新たな計測手法の開拓や材料開発へ研究展開が期待される。

#### 吉川研究者

本研究課題では、フォノンの分散関係や輸送特性を 10 ナノメートル以下の空間分解能で計測・可視化するための基盤技術を確認して、応用することを目的として行われた。

その結果、電子顕微分光(STEM EELS)について、3つの分解能をバランスよく世界最高レベルの空間分解能 数 nm 以下、波数分解能 3/nm 以下、エネルギー分解能 15meV 以下に引き上げた。これを用いることによって、ダイヤモンド(diamond)と立方晶窒化ホウ素(c-BN)の



結晶領域においてフォノン分散が計測できることを実証し、c-BN/diamond ヘテロ接合面の界面に局在する固有の振動モードが存在することを明らかにしている。このようにフォノンの分散関係を、位置と波数とエネルギーの高分解能で測定する技術を確立したことは、極めて高く評価できる。また、装置立ち上げと連携する形でフォノン計測の基盤技術で様々な結果を出しており、音響モードを利用した発熱源の位置の特定ができる可能性もあり、大変興味深い。

本研究成果を通して、3つの分解能をバランス良く引き上げるためには装置の安定性が不可欠であることも明確になった。また、さらに高い分解能への展開、そしてそれを利用することにより解析可能な材料種が飛躍的に増えることも見えてきており、科学技術や産業界への大きな波及効果が期待される。

#### 鈴木研究者

本研究課題では、未利用のまま放射されている熱輻射を電気へ変換(レクテナ発電への応用)することを目標として掲げ、電波、光、電気、音波と同じように熱輻射を自由に制御するための材料とデバイスの創成へ挑戦することを目的として行われた。

その結果、テラヘルツ電磁波領域である 3THz 帯においては、スーパーインクジェットプリンターによりポリイミドフィルムの表裏両面に面対称なペアカット金属ワイヤ(マイクロンサイズ)を銀ペーストインクで描画し、金属-誘電体-金属構造のメタサーフェスを製作することにより高屈折率・低反射となる極限屈折率材料を実現している。また赤外線領域への高周波数化として、100nm厚みの窒化ケイ素膜の表裏面に電子線描画とリフトオフにより島状の金(Au)アレイを製作し、50THzにおける高屈折率・低反射率となる極限屈折率材料を実現するなどの成果を上げている。さらに 200THz 帯における極限屈折率材料にも果敢に挑んでいることは評価できる。

この極限屈折率材料を用いた熱輻射の指向性制御といった熱マネジメントへの展開は大変興味深く、社会実装にも大きく貢献することを期待したい。

#### 高橋研究者

本研究課題では、電子スピン共鳴(ESR)技術を用いて熱輸送測定を行い、マグノンのダイナミクスと磁性体を特徴づける微視的なパラメータ(磁性イオン周囲の局所構造、スピン間相互作用パラメータ等)と熱伝導率の関係を明らかにするとともに、磁気構造の多様性を生かした効率的な熱制御手法を提案することを目的として行われた。

その結果、ミリ波およびテラヘルツ波領域の電磁波照射下で磁性体の熱伝導率を測定する装置を開発できたものの、260GHzまでの周波数領域では熱伝導率の有意な変化を観測するには至らなかった。しかしながら、試料の電磁波吸収を定量する手法は、熱検出型の高周波電子スピン共鳴分光法へと発展し、従来の ESR 手法では難しかった磁場中の連続的な角度回転測定が可能となったことは評価できる。

電子スピン共鳴により熱伝導率を制御するといった当初の目標には届かなかったが、その研究過程において、従来では難しかった測定が可能となり、異方性の大きなスピン系の研究に大きな展開を与える可能性が出てきた。まさに“スピニアウト”した測定法が、大きな波及効果をもたらすなど、今後の発展に期待したい。

#### 寺門研究者

本研究課題では、室温で最大の熱伝導率を有する低次元量子スピン系結晶(La<sub>5</sub>Ca<sub>9</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub>)と酸化物やイオン液体などの電氣的絶縁体との多層構造を作製し、電圧印加による電氣的な正孔濃度制御とそれに伴う熱伝導率の電氣的制御を試み、動的熱回路などを可能にする熱伝導可変材料の創出を目的とした。

その結果、La<sub>5</sub>Ca<sub>9</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub>における熱キャリアであるマグノン、イオン液体を介した電圧印加によって可逆的に生成あるいは消滅させることに成功した。また、世界初のマグノン熱伝導体のナノシート化に成功した。

今後、SciFos 活動で得られた経験を基に、現場の声を念頭に据えた研究課題設定など、社会にも大きなインパクトを与えつつ、サイエンスを深掘りするなどの活躍を期待する。

#### 原田研究者

本研究課題では、室温における熱輸送すなわち高周波フォノンを制御するため、自然超格子酸化チタンの結晶構造を緻密に制御することを目的として行われた。

その結果、自然超格子酸化チタン結晶中の面欠陥周期配列はピコスケールの完全性を有しているため、熱フォノンに対してコヒーレントな界面であることを示し、これにクロム添加による周期的な面欠陥の導入によってフォノンバンドギャップが形成されること、さらに欠陥周期界面の密度増大に伴い熱伝導率が、一旦減少しその後増大する傾向が低温の場合に顕著となることを示した。このように、自然超格子酸化チタンの酸素欠陥密度を緻密に制御することにより、従来の拡散現象とは異なる熱輸送が顕在化することを明確に示したことは、大きな成果として評価できる。

本研究成果は室温における熱輸送制御に一步近づいたことを意味しており、社会実装など今後の興味深い進展が期待される。

#### 村上研究者

本研究課題では、共有結合性有機骨格(COF)材料の合成手法を確立するとともに、その構造解析と熱物性値を明らかにし、従来の材料では達し得ない機能を有する新規の熱輸送制御材料の創成を目的として行われた。

その結果、COF 結晶の成長制御因子をつきとめ、生成に関する普遍的方法論を見出し、世界で最も大きな COF の合成に成功した。それを突破口として、光照射骨格可逆可変 COF の合成への挑戦、COF 内部への相変化蓄熱材の導入、水蒸気蓄熱を目的とする新種 COF の創出、

ならびにその熱拡散率や融点といった熱物性や水蒸気吸着特性などの性能評価など、多くの知見を得た。特に様々な物性値や性能評価に耐えうる大きさのCOFを合成できたことは、大きな成果として評価できる。

本研究成果を皮切りに、COFの研究がより広く展開し、その根幹が本研究成果であること、さらに社会実装に向けた新奇な熱輸送・貯蔵材料として、大きく発展することを期待する。

#### Anufriev 研究者

本研究課題では、いわゆる弾道的（減衰することなく輸送可能）な熱輸送を現実的なナノサイズ構造および室温近傍において実現することを目標に、新たにレイフォノニクスを提唱し、その可能性を探ることを目的として行われた。

シリコンカーバイド薄膜面方向のフォノン輸送について、そのフォノンの平均自由行程を実験的に見出すとともに、フォノンが熱源から冷却面まで飛び交うことを光線追跡法により実験結果を検証している。さらに、このフォノンの平均自由行程が明らかになったことから、ナノオーダーの周期的な穴を配置することにより平均自由行程の長いフォノンのみを選択的に輸送させることにより放熱を速やかに行うなど、レイフォニックといった新たな理論とその実証のための複数プローブ時間領域サーモリフレクタンズ法による熱輸送測定手法を構築している点は評価できる。

このフォニックナノ構造を使い分けることにより弾道的な熱輸送制御が具現化できることから、熱レンズ、熱シールド、指向性の強い熱線エミッター、熱ロングパスフィルターなどの概念の実現および社会実装を期待する。

#### 石井研究者

本研究課題では、ナノ構造によってふく射の吸収や反射を波長選択し、昼夜を問わずかつ湿潤気候を考慮した自立発電デバイスの構築を目的として行われた。

その結果、分散型ブラッグ反射と銀表面をお互いの干渉を回避しつつ重ねることで太陽光に対する反射率を高く、一方大気の窓よりも広帯域に宇宙放射波長領域を拡張することにより、湿潤気候地域における宇宙放射冷却の可能性を示唆している。さらにこの宇宙放射冷却と太陽光吸収による温度差を熱電発電に利用し、エネルギーハーベスティングとして自立発電の可能性も示唆できたことは高く評価できる。

いくつかの超えるべきハードルはあるものの、環境発電として社会実装に近いと期待される。また、研究を展開する戦略に関する方向性を見出すプロセスを習得したことは今後の糧となることから、更なる活躍を期待する。

#### 岡田研究者

本研究課題では、金属-有機構造体(Metal-organic framework: MOF)の異方性熱輸送を明らかにするとともに、その構造内部に異なる熱輸送素材を挿入することにより分子・ナノス

ケールにおける熱輸送指向性を強調することを目的として行われた。

その結果、熱伝導率や熱拡散率の測定に耐えうるサイズの MOF 配向自立膜の製作手法を見出し、初めて MOF の異方性熱輸送を明確にできたことは大きな進歩として評価できる。さらに、MOF の細孔構造や結晶連続性の異なる多岐にわたる MOF 配向自立膜の合成を行い、その分子・格子構造と熱輸送特性の関係、および MOF 結晶連続性の重要性を明らかにすることができたことは、MOF の基礎的な熱輸送特性として実用化を見据えた重要な知見であった。

本研究課題により製作された MOF 配向薄膜は、熱輸送を制御するうえで高い潜在能力を有すると考えられる。自在に配向方向を制御できれば熱輸送の制御も自在となる可能性があり、今後の異方性熱輸送媒体として最適な構造の MOF の開発が期待される。

#### 梶原研究者

本研究課題では、熱励起エバネッセント波を検出する近接場探針を 2 本導入し、その間の熱輸送を測定すること、および回折格子を利用した低温受光・分光光学系を構築し、パッシブ近接場分光を実現することを目的として行われた。

その結果、400nm まで近接させた 2 つのプローブを独立に駆動および独立にエバネッセント波を検出することに成功している。これを用いて  $6.7\mu\text{m}$  離れた 2 点の温度とその 2 点間熱流束の測定を実現したことは高く評価できる。また、窒化ガリウム表面におけるエバネッセント波強度が表面から離れるにつれ一旦極大値を経て減衰することや、金属表面に比べてそのエバネッセント波が遠方まで及ぶことを明らかにしている。これらはプローブの素材とサイズにも関与することを示唆するなど、更に興味深い展開を期待させる。

本研究成果を通して、パッシブ型近接場分光顕微技術が、実装された電子デバイスの詳細な熱輸送過程をサブミクロンあるいはナノサイズにて評価できることを期待する。

#### 柏木研究者

本研究課題では、スパッタリング法を用いてさまざまな原子配列構造のアモルファス構造を有する金属酸化物薄膜を合成し、その構造制御とその構造における熱物性との相関を明らかにするとともにアモルファスに代表される非秩序構造材料の熱物性起源およびその制御技術の確立を目的として行われた。

その結果、アモルファスアルミナにおいて熱キャリアである拡散子は周波数が高い領域においてその平均自由行程がバルク密度とともに長くなる計算結果に対応して、温度上昇に伴うその熱伝導率の上昇率が密度とともに大きくなることが示された。これはアモルファスの構造制御による熱輸送制御を初めて示したものであり、評価に値する。一方、アモルファスのどのような構造が熱キャリアの平均自由行程を長くするのか、といった課題は残されることとなり、今後の戦略が問われることも明らかになった。

非秩序系構造材料の熱物性に関する挑戦的なテーマであり、異分野の研究者との融合を進め、今後の展開におけるブレイクスルーを期待したい。

#### 櫻井研究者

本研究課題では、熱平衡における遠方場スーパープランキアン熱ふく射の可能性を吟味すること、ならびにそれが不可能な場合には非平衡ふく射放射体を提案し、黒体放射限界を超える機構を明らかにするとともにその発電システムへの展開を目的として行われた。

その結果、熱平衡状態のマクロスケールにおける物体間の遠方場スーパープランキアン熱ふく射は不可能であるとの判断に至り、完全反射表面基板に黒リンを塗布しその厚み方向に電流注入する非平衡ふく射エミッターを提案している。そして、この黒リンのバンドギャップ波長より短い波長域では、電流注入により、光子のエネルギー準位から化学ポテンシャルが差し引かれるために従来のプランク関数を超えるふく射エネルギーが得られることを数値計算から明らかにしたことは評価できる。

物理的・数学的な論理の展開は必ずしもオリジナルではないが、多くの文献を参考に確固たる判断を下したことは自身の礎を築いたといってもよく、その経験が今後の糧となることを期待したい。

#### Sang 研究者

本研究課題では、高出力電子デバイスのホットスポットを除去するため、熱拡散基板となるダイヤモンド薄膜との間に、分極電界を有する新規なナノスケール超格子構造を製作し、その界面熱抵抗を大幅に低減することを目的として行われた。

その結果、AlN/GaN、InGaN/GaN 超格子の各層ヘテロ界面歪みによるピエゾ分極電界を制御することにより、あるいは InAlN/GaN による自発的分極により、フォノンのコヒーレントな熱輸送を実現させ、かつ GaN と熱拡散基板となるダイヤモンド膜間の中間層としての AlN/GaN ナノ積層を利用することにより、界面熱抵抗を大幅に低減させることに成功している。この成果は高く評価できる。

本研究は、実験試料の緻密な製作・計測に基づき、かつ精緻な論理思考により達成されたものであり、この経験は今後の糧になると同時に、製作された超格子構造の社会実装にも期待したい。

#### 藤原研究者

本研究課題では、界面近傍における単原子スケールといった局所空間の熱流を古典分子動力学法に基づいて記述し、原子スケールの熱輸送過程を可視化すると同時に分子運動の周波数毎の熱流（熱流スペクトル）により界面熱輸送を制御する新たな方法論を創出することを目的として行われた。

その結果、古典分子動力学法に基づいて単原子以下の空間分解能で熱輸送を記述し、熱流束を原子構造の三次元分布として可視化する新しい解析モデルを構築し、原子スケールの熱流構造に基づいた界面熱輸送を操作する新しい方法論の構築とその応用にも展開し、今

後の発展への足がかりを築いている。この成果は高く評価できる。

この数値シミュレーションが“new normal(新しい通常)”としてモデルベース開発の主流となることを期待したい。

#### 堀家研究者

本研究課題では、イオン液体を用いたヒートパイプにより、放熱過程において発電を行う「放熱型熱電発電」の実証を目的として行われた。

その結果、イオン液体の気液相転移挙動の評価方法を確立し、広い圧力範囲においてイオン液体の蒸発係数は分子量にほとんど左右されない事を明らかにしている。一方、ナノカーボン表面の電荷流による発電機構は、イオン液体の滴下によるカーボンナノチューブ膜の面内方向温度差によるゼーベック効果であるとして決着させている。イオン液体による新たなヒートパイプの構築を目指しつつ、その熱物性を緻密に測定できたことは大きな成果として評価できる。

蒸発潜熱の大きな媒体を用いたヒートパイプは魅力的であり、小型高出力な電気機器や電子機器への早期の実装を期待したい。

## 7. 総合所見

### (1) 研究領域のマネジメント

本研究領域は、戦略目標にもかかげられているとおり、ナノスケール熱動態の理解を深めその制御技術を獲得することを目的として、機械系、物理系、化学系、生命科学系など様々な分野の研究者に参加を呼びかけ、熱輸送を独自のスペクトル（周波数、サイズ、構造周期性など）に分解し、その輸送機構を明らかにするとともに、可能であればその機構を促進するなど機能的な制御に発展することを期待して進められてきた。幸いにも幅広い分野から応募があり、その中から上記の広い分野にわたり、かつ対象研究も多岐にわたるメンバーを採択することができた。これらのメンバーに上記戦略目標に沿って研究を進めていただくためには、相補的な意見交換や情報交換を頻繁に行うことが是非とも必要と考え、年2回の領域会議に加えて1~2か月に1回の頻度で定例研究会を開催してきた。最終年度の2023年3月には実に25回（新型コロナウイルスの影響による3回の中止を含まず）を数える。この定例研究会は、格式ばった発表ではなく、それぞれの分野における熱輸送に関する課題の共有、各メンバーの研究アプローチに対する示唆や誤解を招きかねない表現の指摘など、一つの仮想的な研究室のゼミとしての役割を担っている。その結果、まったく異なる分野のメンバーからの指摘が大きな成果に繋がっている例も少なくない。アドバイザーも含め、本研究領域の研究推進のために“チーム熱制御”として機能していたと言っても過言ではない。

## (2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

本研究領域ではナノスケールにおける熱動態の理解として、フォノンやフォトンの周波数スペクトルごとの輸送機構やその制御、また半導体内部の電子からフォノン（熱運動）への変換機構、半導体界面におけるフォノン輸送計測など一定の成果が得られていると自負している。一方、革新的材料の創製については、共有結合有機骨格(COF)や金属有機骨格(MOF)さらに繊維状ウイルスなどの利用が本研究領域において産声を挙げたと言え、今後の展開が期待される。しかしながら、さきがけの研究期間と予算では新規デバイスの構築まで達することは困難であり、いくつかの研究テーマについてデバイスへの一歩手前ではあるものの、各要素に分離しそれらの基礎データを取得することに留めるように指示している。

## (3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性

本研究領域では、従来から熱輸送に関わってきたメンバー（主に機械系）と関心あるいは課題意識を有しながらも熱を専門としないメンバーが定例研究会（仮想的研究室ゼミ）により有機的に議論しあうことにより、関わってきたメンバーは異分野における熱輸送といった新たな課題を見出し、専門としないメンバーは熱輸送に関わる本質的な考え方やアプローチを身に着けることができたと言ってよい。わずか26名ではあるが、この精鋭メンバーが本研究領域で得た様々な研究成果を各々の分野の中で広め、学会・協会における相互乗入れが始まろうとしており、本研究領域が果たした役割は極めて大きいと言ってよい。

こうした若いメンバーによる仮想的な研究ゼミは、異分野に跨る新たな学理を創出することに繋がり、少し長い目で見た時には新たなイノベーションにつながるものと考えている。本研究領域に限らず、“さきがけ”プログラムの果たす役割も極めて大きいと思われる。

## (4) 所感

熱マネジメントは、一長一短で片づけることができない永年の課題である。必ずしも思い通りに制御できない、あるいは有効利用できないものの、ほぼ全ての機器において、特に小型・高出力化に伴い、ますます厄介な課題となっている。本研究領域については、熱に関する総花的な研究課題ではなく、研究者独自のスペクトルに分解しながら考えられるものとして取り上げてきた。しかしながら、熱制御の立場から将来のカーボンニュートラルに向けた戦略としては、本研究領域とは対極にあるアプローチにも光を当てた取組みが必要と思われる。

以上