

研究領域「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」

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ます。

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ます。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ます。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ます。

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ます。そして、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(先端的低炭素化開発を除く。)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

2019年度採択研究課題

- (1) Anufriev Roman (東京大学生産技術研究所 特任准教授)
レイフォノクスによる高度な熱流マネジメント
- (2) 石井 智 (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 主幹研究員)
光と構造制御による温調機能の開拓
- (3) 岡田 健司 (大阪公立大学大学院工学研究科 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
- (4) 梶原 優介 (東京大学生産技術研究所 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
- (5) 柏木 誠 (青山学院大学理工学部 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
- (6) 櫻井 篤 (新潟大学工学部 准教授)
遠方場Super Planckian熱ふく射輸送の可能性
- (7) Sang Liwen (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 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
- (8) 藤原 邦夫 (大阪大学大学院工学研究科 助教)
単原子スケール非平衡熱輸送場の分子動力学解析
- (9) 堀家 匠平 (神戸大学大学院工学研究科 助教)
クーロン効果潜熱輸送による放熱型熱電発電素子

2-3. 事後評価の実施時期

2022年11月7日（月曜日）、8日（火曜日） 事後評価会開催

2-4. 評価者

研究総括

花村 克悟 東京工業大学工学院 教授

領域アドバイザー

栗野 祐二 慶應義塾大学理工学部 特任教授

大野 恵美 (株) IHI 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 副 SBU 長

木崎 幹士 トヨタ自動車 (株) トヨタ ZEV ファクトリー FC 製品開発部
チーフプロフェッショナルエンジニア

小池 洋二 東北大学 名誉教授

中村 真一郎 DENSO International America, Inc. Silicon Valley Innovation Center Senior Vice President

藤田 博之 東京都市大学総合研究所 特任教授

船津 高志 東京大学大学院薬学系研究科 教授

宗像 鉄雄 産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所 所長

森 孝雄 物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点 グループ
リーダー

森川 淳子 東京工業大学物質理工学院 教授

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

3. 総括総評

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ている。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を奨励している。

前述の領域の方針のもと、2022年度に終了する第3期生については、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9課題を採択した。採択後は、領域会議や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、各研究者は領域の趣旨をよく理解し、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、Sang 研究者は、AlN/GaN、InGaN/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。

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・サーマルマネジメント基盤技術の創出」領域と各イベントなど通じて交流をすることで研究者間の連携等が起こり、新たな共同研究なども生まれた。

さらに、3人がさきがけ研究期間中に昇進しており、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を期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： レイフォノクスによる高度な熱流マネジメント

2. 個人研究者名

Anufriev Roman (東京大学生産技術研究所 特任准教授)

3. 事後評価結果

本研究では、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ス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。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 光と構造制御による温調機能の開拓

2. 個人研究者名

石井 智（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 主幹研究員）

3. 事後評価結果

本研究では、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。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

2. 個人研究者名

岡田 健司（大阪公立大学大学院工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

本研究では、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。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

2. 個人研究者名

梶原 優介（東京大学生産技術研究所 准教授）

3. 事後評価結果

本研究では、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、400 nm 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 μm 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。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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
2. 個人研究者名
 柏木 誠（青山学院大学理工学部 助教）
3. 事後評価結果

本研究では、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。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 遠方場 Super Planckian 熱ふく射輸送の可能性

2. 個人研究者名

櫻井 篤（新潟大学工学部 准教授）

3. 事後評価結果

本研究では、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。

研究課題別事後評価結果

1. 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

2. 個人研究者名

Sang Liwen (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 独立研究者)

3. 事後評価結果

本研究では、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。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 単原子スケール非平衡熱輸送場の分子動力学解析

2. 個人研究者名

藤原 邦夫（大阪大学大学院工学研究科 助教）

3. 事後評価結果

本研究では、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へも展開し、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デベロップメントの主流とな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： クーロン効果潜熱輸送による放熱型熱電発電素子

2. 個人研究者名

堀家 匠平（神戸大学大学院工学研究科 助教）

3. 事後評価結果

本研究では、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。