

研究領域「ナノスケール・サーマルマネージメント基盤技術の創出」事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

本領域は、ナノスケールの熱制御基盤技術の創出により、熱を味方につけ、新たな段階の高効率利用法を生み出すことで、高度情報化社会の実現や環境負荷の少ないエレクトロニクスや交通輸送・住宅など社会インフラの実現、健康医療分野での新産業・新市場創成を実現し新たな段階の高度熱利用社会の実現を目指す。

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

2017年度採択研究課題

- (1) 内田 健一(物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点 グループリーダー)
スピントロニック・サーマルマネージメント
- (2) 小原 拓(東北大学流体科学研究所 教授)
分子界面修飾とナノ熱界面材料による固体接合界面熱抵抗低減
- (3) 大宮司 啓文(東京大学大学院工学系研究科 教授)
ナノ空間材料に内包された水の吸着・移動の熱制御
- (4) 宮崎 康次(九州工業大学大学院工学研究院 教授)
有機-無機ヘテロ界面によるフォノン・電子輸送フィルタリング
- (5) 柳 和宏(東京都立大学大学院理学研究科 教授)
フレキシブルマテリアルのナノ界面熱動態の解明と制御

2-3. 事後評価会の実施時期

2022年11月28日(月曜日)

2-4. 評価者

研究総括

丸山 茂夫 東京大学大学院工学系研究科 教授

領域アドバイザー

小原 春彦 産業技術総合研究所エネルギー・環境領域 執行役員・領域長

喜々津 哲 (株)東芝研究開発センター シニアエキスパート

徐 一斌 物質・材料研究機構統合型材料開発・情報基盤部門 副部門長

常行 真司 東京大学大学院理学系研究科 教授

鶴田 隆治 西日本工業大学 副学長

花村 克悟 東京工業大学工学院 教授

平山 祥郎 東北大学先端スピントロニクス研究開発センター 総長特命教授・センター長

藤田 博之 東京都市大学総合研究所 特任教授

森 孝雄	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 グループリーダー
山内 崇史	(株) 豊田中央研究所エネルギーマネジメント研究領域 Leading Researcher
山根 常幸	(株) 東レリサーチセンター研究部門技術・特許調査研究部 取締役・研究副部門長・部長

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： スピントロニック・サーマルマネジメント
2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者

内田 健一（物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点 グループリーダー）

主たる共同研究者

三浦 良雄（物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点 グループリーダー）

安 東秀（北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 准教授）

長野 方星（名古屋大学大学院工学研究科 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：

磁性材料におけるスピンを利用した特異な熱現象を明らかにして、新たな熱電デバイスや熱制御を可能にすることを目的とした研究である。異方性磁気ペルチェ効果、異常エッチングスハウゼン効果、表面スピン波を介した空間ギャップを超える熱輸送などについて、新現象の実験的証明を世界に先駆けて行い、極めて高度な学術研究成果を多数挙げている。それを可能にする新計測手法も開発した。特にロックインサーモグラフィ法によるイメージング技術の進展が素晴らしい。応用に関しては、ゼーベック駆動型の横方向熱発電デバイスや熱スイッチング素子の原理確認に成功している。研究代表者がすべてのテーマに積極的に関わり、全体の方向性の中で優れた研究成果を得るように研究を進めた点が高く評価できる。これらの成果は優れた多数の論文にまとめられ、インパクトの大きさから、Natureやその姉妹紙、Phys. Rev. Lett. など国際的な定評のあるジャーナルに多数出版されている。報道発表も異方性磁気ペルチェ効果の世界初の観測がNHKでテレビ報道されるなど大変活発で、特許も出願8件・登録1件と活発に行われた。応用に関しては、発電や、熱スイッチングに関してはまだ実用化への道は遠いものの、センサ（例：熱流センサ）として産業界に新たなデバイスを提供できる。スピントロニック・サーマルマネジメントならではの特徴的な応用分野への発展が期待できる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 分子界面修飾とナノ熱界面材料による固体接合界面熱抵抗低減
2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者

小原 拓（東北大学流体科学研究所 教授）

主たる共同研究者

菊川 豪太（東北大学流体科学研究所 准教授）

佐藤 正秀（宇都宮大学工学部 教授）

八木 貴志（産業技術総合研究所物質計測標準研究部門 グループ長）

元祐 昌廣（東京理科大学工学部 准教授）

長野 方星（名古屋大学大学院工学研究科 教授）

市野 良一（名古屋大学未来社会創造機構 教授）

森 邦夫（いおう化学研究所 代表取締役社長）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント：

固体接着面の熱抵抗を低減する各種手法に関して、広範な研究を行い、当初の目的を概ね達成する成果を得ている。特に固液の界面熱抵抗の課題に対して、世界的レベルにある分子動力学（MD）シミュレーション技術を駆使して取り組み、有意義な結果を多く得ており、それを確かめるための実験が展開されている。極薄膜液相を挟んだ真実接触点近傍の熱輸送、SAM修飾によるAu/水界面の熱コンダクタンスの向上、界面活性剤による熱抵抗低減のメカニズム、ソフトマター熱界面材料（TIM）の探索、超高速TDTR測定技術、ロックインサーモグラフィを利用した界面熱抵抗測定、液膜内温度分布測定などに着実な進展が見られた。高分子吸着層のある固液界面問題を解析して数値データを得るとともに、伝熱工学的な解釈を進めている点は国際的に見てもトップランナーの研究である。今後、一次振動子モデルによる解析に一般性をもたらし、界面熱抵抗の統一的解釈にまで持っていくことができれば素晴らしい。統一概念に基づき体系的に成果を提示することで、イノベーションに向けた強いアピールが可能になると思われる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ナノ空間材料に内包された水の吸着・移動の熱制御
2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者

大宮司 啓文（東京大学大学院工学系研究科 教授）

主たる共同研究者

遠藤 明（産業技術総合研究所研究戦略企画部 次長/化学プロセス研究部門付）

千足 昇平（東京大学大学院工学系研究科 准教授）

松田 亮太郎（名古屋大学大学院工学研究科 教授）

平出 翔太郎（京都大学大学院工学研究科 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：

熱を利用した吸湿、吸着・脱離を利用した熱制御に向けて、ナノ空間材料における水などの吸着・移動に関する研究が、基礎研究から応用に近い機器の提案まで広範囲で実施された。基礎研究としてはSWCNT（単層カーボンナノチューブ）に閉じ込められた水の相転移に関する実験・理論両面の理解が進み、柔軟な構造を有するMOF（ナノポーラス金属錯体）の構造変化と吸着、吸熱、発熱などの関係の理解が進んだ。水とCO₂では吸着の強さにより異なる結果が得られることや疎水部分と親水部分の適度な分布が水の速い凝集を促すことなど、詳細な点も明確になった。ナノ空間材料による水などの吸着・移動現象の計測技術が開発され、分子動力学法などの解析手法が進歩したことも重要な成果である。実用に近い部分では、ナノ空間材料を冷媒として用いるヒートポンプが提案され、吸湿機能も期待されるMOFがコーティングされた熱交換器を試作した。多くの優れた論文が定評のあるジャーナルに出版されており、水分移動機構を用いた除湿などに関するレビュー論文が出版されていることも評価できる。また、MOFを用いた圧縮・吸着ハイブリッドヒートポンプの特許が2件出願されている。今後のさらなる展開が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 有機－無機ヘテロ界面によるフォノン・電子輸送フィルタリング
2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者

宮崎 康次（九州工業大学大学院工学研究院 教授）

主たる共同研究者

早瀬 修二（電気通信大学 i-パワードエネルギー・システム研究センター 教授）

飯久保 智（九州大学大学院総合理工学研究院 教授）

沈 青（電気通信大学大学院情報理工学研究科 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：

塗布可能なソフトマターの熱電応用を目指して、有機・無機ヘテロ界面のフォノン・電子輸送特性を追究しようとするもので、熱電の側面からこれまで検討されてこなかったペロブスカイトに目を付け、実績のある Bi_2Te_3 微粒子とコンポジット化するという視点は独創的であった。この過程で熱処理による Bi_2Te_3 微粒子の結合や成長と熱電特性への影響、 CsSnI_3 とのコンポジット薄膜の作製と熱電性能評価、 CsSnI_3 の熱電特性評価、 Sn_2^{+} や Sn_4^{+} の寄与と酸化物ポーラス構造の影響、 Cs_2SnI_6 の検討とn型の実現などの成果を得た。特に、 Bi_2Te_3 - CsSnI_3 混合物で $180\text{--}270\ \mu\text{V/K}$ のゼーベック係数、 $130\text{--}200\ \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ のパワーファクタを得たが、室温でのZTは約0.1に留まり、高い界面電気抵抗が低いZTの要因になっていることを示した。3 ω 法による計測、Diffuse Mismatch Model (DMM)やMaximum Transmission Model (MTM)による熱抵抗計算などにも進展があり、その一部は市販の熱解析ソフトウェアに実装されている。企業との共同で薄膜型熱電モジュールの試作を進めていることも評価できる。論文はやや数が少ないが妥当な成果が出ていると考えることができ、特許も2件出願されている。共同研究先独自の技術も加えて熱電モジュール開発の継続、実用化が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： フレキシブルマテリアルのナノ界面熱動態の解明と制御
2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者

柳 和宏（東京都立大学大学院理学研究科 教授）

主たる共同研究者

竹延 大志（名古屋大学大学院工学研究科 教授）

平原 佳織（大阪大学大学院工学研究科 准教授）

山本 貴博（東京理科大学理学部第一部 教授）

岡田 晋（筑波大学数理物質系 教授）

河野 淳一郎（ライス大学電子・コンピュータ工学専攻 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：

高性能・多機能なフレキシブル熱電変換素子の学理の追究を目指して、カーボンナノチューブ（CNT）系を中心に、様々なフレキシブルな材料の電気伝導、熱物性の統一的な理解を目指した。また、透過電子顕微鏡（TEM）内でのマイクロな熱動態測定にも取り組み、多くのインパクトのある成果を得た。CNT系を中心に金属か半導体かの違いや次元性が重要な役割を果たすことを示し、コヒーレンス長にスケーリング則を取り入れ、局在・非局在の変化を取り入れた新しい熱電応答基礎理論を構築した。まだ、すべての材料を統一的に理解するには至っていないが、その実現に向けて大きな一歩を築いた。さらに、CNT系の配向制御による熱電出力の増強にも成功し、極めて配向性が良く、金属に近い極めて大きい電気伝導を示す二層CNTからなるCNTファイバーにおいて $14\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$ という極めて大きな熱電出力因子を見出した。ミクロスコピックには、TEM内でAuやSnのナノ粒子の融解、蒸発をモニターすることで、ナノスケールでの熱動態を明らかにすることに成功した。非常に多くの優れた論文が、レベルの高いジャーナルに出版されており、招待講演も活発に行われた。ライス大学との連携も上手く行っており、国際会議の開催なども積極的に行われた。