

# 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」 事後評価（課題評価）結果

## 1. 研究領域の概要

本研究領域は、熱に関する様々な課題の解決や熱エネルギー有効利用に向けて、熱の根源的な理解と高度に制御・利用するための基盤技術の創出を目指す。具体的には、3つの大きな方針に基づいて研究を推進する。

1つ目の方針は、ナノスケールの熱の振る舞いを理解し、革新的な熱制御基盤技術の構築に取り組み、高効率な放熱・断熱・蓄熱・変換などを可能とする新材料の創製や、従来の特性や機能を飛躍的に向上させる新たなデバイスの創出を目指す。2つ目の方針は、上記熱制御基盤技術の創出のために重要な理論、計測、シミュレーション、加工技術などの研究を推進し、ナノスケールにおける熱の物理現象の予測・検証を可能とし、新たな材料設計、デバイス設計の指針に繋がる技術の構築を目指す。3つ目の方針は、この領域はナノスケールの熱の理解を基本として様々な熱の課題を対象とすることから、方針1、2に示すとおり、様々な階層と広範な分野に関わる学問・技術分野の融合を積極的に推進する。

この領域は、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している。

## 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) 高橋 厚史（九州大学大学院工学研究院 教授）  
二次元材料とナノ計測の融合による相変化伝熱の革新
- (2) 竹内 恒博（豊田工業大学大学院工学研究科 教授）  
異常電子熱伝導度と異常格子熱伝導度の制御
- (3) 中村 雅一（奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 教授）  
分子接合によるナノカーボン系材料の広範囲熱伝導率制御
- (4) 福島 孝典（東京工業大学科学技術創成研究院 教授）  
分子ダイナミクスを利用した熱マネジメント
- (5) 宮内 雄平（京都大学エネルギー理工学研究所 教授）  
ナノ物質科学を基盤とするサーモエレクトロニクスの創成

#### 2017年度採択研究課題（1年追加支援課題）

- (6) 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
- (7) 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

2023年11月25日(土曜日)

2024年2月 各研究者からの研究報告書に基づき研究総括による事後評価(1年追加支援課題)

### 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 研究開発センターストレージデバイス技術ラボラトリー シニアエキスパート
徐 一斌	物質・材料研究機構マテリアル基盤研究センター グループリーダー
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 名誉教授
藤田 博之	東京都市大学 特別教授
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 主任研究員
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
馬場 寿夫	科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
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： 二次元材料とナノ計測の融合による相変化伝熱の革新

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名

研究代表者

高橋 厚史（九州大学大学院工学研究院 教授）

主たる共同研究者

吾郷 浩樹（九州大学グローバルイノベーションセンター 教授）

山口 康隆（大阪大学大学院工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている
---------

○総合評価コメント：

二次元材料とナノ計測（透過型電子顕微鏡や原子間力顕微鏡）を用いて、固気液三相接触線近傍での熱と流れの連成する動的現象の解明を目指して研究を推進した。その結果、相変化伝熱の革新までには至らなかったが、気泡の合体に際して新しい知見を獲得し、マイクロなスケールでの液滴の濡れを調べ、ナノスケールでのヤングの式の理解を進展させた成果は、The Journal of Chemical Physicsに掲載され、editor's choiceに選ばれるなど注目されている。直径 100nm 程度、厚さ数 nm 程度のグラフェンウォーターポケットを形成する技術の確立やポケット内での気泡のダイナミクスの先導的研究、グラフェン表面上での水の「すべり長さ」を計測し、40nm 程度になることを示したこと、さらには、分子動力学 (MD) シミュレーションを用いて理論的な研究を進展させたことも評価できる。絶縁性二次元材料として着目されている hBN の大面積 CVD 成長に成功した成果は、原子層積層系に大きな波及効果をもたらすものであり、Nature Electronics 誌に掲載された。グラフェンのナノスクロール構造の作製も面白い成果である。これらの成果は 59 件以上の質の高い業績論文として発表されている。

若手研究者の育成・キャリアパス支援に関しては、昇格・就職・創発的支援事業採択などのメンバーが複数おり、優れた取り組みを行ったと考えられる。若手の受賞は活発で、若手から中堅まで多くのプロジェクト参加者のキャリアパス形成や予算獲得に本 CREST プロジェクトは良い影響を与えている。東北大学・小原拓教授チームなど当領域内他チームとの連携も進められ、外国との共同研究も活発に行われた。共同研究者の吾郷教授は学術変革領域 A において「2.5 次元物質科学」を領域代表として推進しており、このプロジェクトの成果も含めて、二次元物質の研究をより広く展開する予定である。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 異常電子熱伝導度と異常格子熱伝導度の制御

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名

研究代表者

竹内 恒博（豊田工業大学大学院工学研究科 教授）

主たる共同研究者

岡田 佳憲（沖縄科学技術大学院大学量子物質科学ユニット 准教授）

佐藤 和則（大阪大学大学院工学研究科 准教授）

下條 冬樹（熊本大学大学院先端科学研究部 教授）

陳 勇（東北大学材料科学高等研究所 主任研究者）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている
---------

○総合評価コメント：

微細電子構造や電気伝導の次元性により生み出される異常電子熱伝導度と非調和振動、相変態、イオン伝導による異常格子熱伝導度の制御を目指し、学理の構築と熱ダイオード、外場による熱流スイッチング、熱電発電素子への応用を目指した。計算コストの著しい低減にも寄与する分子動力学計算に基づく非調和振動で特徴付けられる材料の格子熱伝導予測、広範囲にキャリア密度が変えられる  $\text{Ag}_2\text{S}_{1-x}\text{Se}_x$  における異常電子熱伝導度と異常格子熱伝導度の解析、トポロジカル絶縁体の基礎的な研究などに関して 200 件を超える論文が発表されており、基礎研究への貢献は十分に認められる。CREST 開始直後に多くの議論がなされ、Nature Communications にも掲載された、相転移近傍で測定された特異なパルス状の巨大ゼーベック効果については、チーム内での研究の進展も見られ、それなりの再現性も得られているが、そのメカニズムを含めて未解明の部分がある。今後さらに信頼性のある実験結果が得られ、多くの研究者が納得するメカニズムが提唱されることを期待したい。

熱流スイッチング素子の高性能化では、キャパシタンス構造を、イオン液体を用いた電気二重層型にすることで、誘起できるキャリア密度の桁が増え、熱流スイッチも大きくなることを報告した。1 秒以下のスイッチングが可能で、リーク電流の熱による相変態と組み合わせることで 2.6 倍の変化を報告している。全固体熱ダイオードの高性能化については、相変態による熱伝導度の温度変化を利用して熱ダイオードを実現し、熱整流効果 3.3 倍までが得られることを示した。 $\text{Ag}_2\text{Te}$  で観測された大きな磁気熱伝導効果も面白い。動作の可能性を示すという意味では、価値のある成果が得られている。一方で、相変態を利用する場合、温度範囲が狭く、性能が発揮できる構造も限定的であること、電気二重層構造は、紙を巻いたような構造のデバイスに応用でできる可能性はあるものの、一般には実用には向かないこと、金属に電流を流し加熱して相変態を引き起こす場合、その熱も含めて全体がどうなるのかの議論が必要になることなど、実用を目指す科学技術としてはまだ多くの検討が必要である。

ワークショップの積極的な開催、国内外との活発な共同研究や国際共著論文が多い点も評価に値する。熱流スイッチング素子、熱電変換などに関して、企業と共同で特許が 6 件提出されるなど特許戦略も適切に検討されているが、実用化に向けては、相変態を利用する場合、温度範囲が狭く、性能が発揮できる構造も限定的であるなどの制限が伴うが、これをどのように克服して、どのようにうまく制御して行くのか、その方向性を示すことにも取り組んで欲しい。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 分子接合によるナノカーボン系材料の広範囲熱伝導率制御

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名

研究代表者

中村 雅一（奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 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：

軽量でフレキシブルな熱電変換素子を目指して、ナノカーボン/有機複合材料に注目し、約5桁の広範囲にわたる熱伝導率制御を実現しようとする挑戦的なテーマである。目標とした5桁の制御には至っていないが、0.1W/mK程度の低熱伝導から、500W/mK程度の高熱伝導を実現した。世界的に見ても高いレベルで評価できる成果である。ナノカーボン系に高い親和性を有する新しいアダプターを発見し、タンパク質での吸着能を評価し、さらに、吸着性にすぐれたアダプターについて詳細なアミノ酸の配列分析を行い、ヘリックス構造や疎水性アミノ酸残基の役割などを示唆した点は優れた基礎研究として評価できる。ワイヤー構造における熱伝導率精密評価法を、CRESTメンバーと協力して確立した点は基礎研究として重要である。カーボンナノチューブ（CNT）/ペロブスカイトハイブリッド系では、CNT接触部にうまくペロブスカイトが挟まることを確認するとともに、隣接するCNTの間隔と有機層のアルキル基長の相関でペロブスカイトの接着方向が変わる状況があることを見出した。

ワイヤー構造における熱伝導率精密評価法の確立に向けて、熱拡散率を直接測定する方法としては、スポット周期加熱放射測温法とスキャニングレーザ加熱AC法、熱伝導率を直接測定する方法としてはDC加熱T型法が適していることを確認し、数種の手法に関して、確度低下要因の評価を行い、正しい評価に向けた指針を示したこと、さらに、この成果を論文に公表し、高い注目を集めていることは科学技術イノベーションに貢献する成果である。

CNT紡績糸を熱電エレメントとして用い、布などのフレキシブル基板に縫い込むことでフレキシブル熱電素子を作製する方向に向けて、共同研究先企業と特許利用許諾契約を交わし、フィールドテストを開始するなど、実用化に向けて活発に活動しており、2-3年以内に製品化されることが期待できるなど、大変活発な実用に向けた研究を推進していることも応用研究として高く評価できる。

非接触原子間力顕微鏡ポテンシオメトリ（NC-AFM）は、ナノ構造の電位・温度分布計測法としての展開が進んでおり、別プロジェクト等での継続を期待する。

高いレベルの論文が出版されているが、学位論文8件を除くと全部で15件程度であり、CRESTの成果としてはやや物足りなく、研究開発は確実に成果が得られているが、論文発表が少ないため、同分野の専門家の意見が反映されておらず、ある意味で信頼性が弱いと思われる。

研究遂行を第一に考えた実施体制、若手研究者の育成や研究費の執行状況など、適切に行われた。領域会議や中間評価における総括やアドバイザーの意見を参考に目標や研究内容を適時変更したり、他チームとの連携・協力を積極的に進め、大きな目標の達成に向けた研究を遂行したことは評価できる。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 分子ダイナミクスを利用した熱マネージメント

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名

研究代表者

福島 孝典（東京工業大学科学技術創成研究院 教授）

主たる共同研究者

芥川 智行（東北大学多元物質科学研究所 教授）

穴戸 厚（東京工業大学科学技術創成研究院 教授）

中村 恒夫（産業技術総合研究所 機能材料コンピュータショナルデザイン研究センター  
研究チーム長）

西野 智昭（東京工業大学理学院 准教授）

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：

これまで系統的な熱伝導特性の評価がなされていなかった様々な有機分子に関して、マイクロからマクロスケールの熱伝導特性の評価方法の開発、有機膜・バルクの熱伝導特性の系統的な評価、有機分子の量子熱輸送の第一原理計算シミュレータの開発、水素結合を持つ有機分子による高熱伝導特性の実現などの成果をあげた。有機物内の熱伝導メカニズムおよび分子ダイナミクスの影響は、これまでにシステムティックな知見がなかったが、本研究は、高度な材料合成と熱測定技術の融合により、 $\pi$ スタック系や共有結合、水素結合など代表的な材料に対して熱伝導の測定と解析を行い、分子内熱輸送の原理および分子設計の指針に顕著な成果が得られた。

有機熱デバイスには至らなかったが、有機の特徴を活かした熱物性、熱輸送特性の学理構築に向けて大きな進展があった。具体的には、同一組成、構造で共有結合/非共有結合（分子間力による結合）が実現できる BIT-Hep2 を用いて、共有結合の熱伝導に与える効果を調べ、室温では差がないが、フォノンの散乱が抑制される低温では共有結合があることにより顕著に熱伝導が増大することを見出した。また、有機材料に一般的に見られる  $\pi$ スタック構造において、並行と垂直方向で熱輸送の様相が異なることを明らかにし、 $\pi$ スタック方向には音響フォノンが熱伝導を担うことを示した。さらに、水素結合ネットワークにより 1 桁以上熱伝導度が高くなることを示し、分子間相互作用の中でも水素結合が顕著に熱伝導に寄与することを実証した。理論的な基礎研究として、分子構造と熱輸送の相関の議論に寄与する第一原理フォノン熱輸送シミュレータの開発・実装を行ったことも評価できる。分子ローターを有する有機材料を実現したことも面白い。分子の回転の熱伝導への貢献はまだはっきりしないが研究のスタート点に立った意義は大きい。業績論文が 160 件以上あり、論文発表などは非常に高いレベルで行われた。

CREST 内の各チームとの連携を上手く推進し、有機材料の信頼性のある熱物性計測を実現したこと、グループの持つ合成技術を活かして、他のグループへの有機材料供給を積極的に行なったこと、高効率な光熱変換挙動を示す分子性マンガングラスタを発見したことも高い評価に値する。走査型サーマル顕微鏡 (SThM) において、温度や輻射特性の分布を非接触で可視化できること、さらには接触条件よりも高解像度のイメージングが可能になることを見出したことも、非接触で非破壊なナノ熱計測に繋がる有望な技術として特筆に値する。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ナノ物質科学を基盤とするサーモエレクトロニクス創成

2. 研究代表者名及び主たる共同研究者名

研究代表者

宮内 雄平（京都大学エネルギー理工学研究所 教授）

主たる共同研究者

小鍋 哲（法政大学生命科学部 教授）

田中 丈士（産業技術総合研究所ナノ材料研究部門 研究グループ長）

山本 貴博（東京理科大学理学部第一部 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：

カーボンナノチューブ（CNT）の熱励起子物性を明らかにして、高効率なエレクトロニック熱光変換デバイスを実現しようとする挑戦的なプロジェクトである。1000Kを超える高温条件での単一架橋CNTにおいて、狭帯域な非平衡励起子放射が生じることを見出した。さらに、クーロン相互作用による強い量子相関を特徴とする一次元物質からの放射の理論構築を進め、励起子が熱エネルギーで生成可能なことを理論的に明らかにするとともに、実験的に観測される狭帯域熱放射スペクトルが励起子効果を取り入れてはじめて理解できることを示すなど、研究代表者が提唱するサーモエレクトロニクスなる新学術体系に向けて、実験と理論の両面で基礎学理の構築に努めた。さらに、研究の過程で、CNT集合体の高温での安定性を調べる中で、微量酸素の下で加熱処理することで、カイラル角を保存したままCNT同士が融合し、直径が2倍のCNTに変換される現象を発見した。これらの成果は、Nano Lettersなど質の高い、39件以上の業績論文にまとめられており基礎的な研究成果は期待を超えるレベルになったと評価する。

励起子発光をベースにした狭帯域高温発光を用いて、広帯域太陽光の狭帯域近赤外光へのスペクトル変換を実現し、これを新しい太陽熱光発電技術に応用しようとする観点からこの提案に関する特許が出願されており、海外特許出願も検討されている。一方で、特許は2件であり、プロジェクトの応用目標を考えるとやや不足している。非平衡太陽熱光起電力発電および光アイソレータの特許出願は評価できるが、CNTの融合現象の発見、CNT/窒化ホウ素ナノチューブ（BNNT）複合構造での高温安定性の確認などの成果から基本特許が出てよいと思われる。CNTを集積した太陽光選択吸収膜などの研究成果を企業にアピールするセミナーの開催などは評価できる。

本研究で得られた、高純度薄膜作製技術、熱エネルギーの狭帯域近赤外光への変換技術、非平衡太陽熱光起電力発電の新しい概念などの成果は、回収されたCO<sub>2</sub>中の炭素から再構成されるCNTを用い、太陽光や太陽熱などのエネルギー変換技術に繋がるもので、カーボンニュートラル実現に向けた実用化への展開を期待する。

本研究期間中に代表者が独立した研究室を立ち上げたことは研究の加速に寄与したと判断され、また若手のモチベーション向上、キャリアパスにも繋がったと評価される。若手から中堅研究者の受賞も多く見られ、多くの研究参加者のキャリア形成にこのプロジェクトが貢献している点も評価に値する。

## 研究課題別事後評価結果（1年延長課題）

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化学プロセス研究部門 部門付）

千足 昇平（東京大学大学院工学系研究科 准教授）

平出 翔太郎（京都大学大学院工学研究科 助教）

松田 亮太郎（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：

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CO<sub>2</sub>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。

（2024年2月追記）

「ナノ空間材料における水などの吸着・移動」に関する研究に関して、多孔性配位錯体MIL-101の水吸着挙動の解明に関する研究を深め、構造変化による吸着熱の抑制効果についての検討を行った。同型の結晶構造と組成を有しながら、構造の柔軟・堅牢性が異なる場合、水吸着熱が構造に依存することが測定により明らかになった。また、単層CNTに内包した水分子の吸着・移動現象の計測に関し、スリットなどの間に転写・架橋させる新たな架橋単層CNT作製技術の開発に成功した。従来得ることが難しかった架橋構造の作製が可能になり、単層CNT研究を飛躍的に促進することが期待できる。

「圧縮-吸着ハイブリッドヒートポンプサイクル」に関して、バッチ式運転の実験装置を用いて、MOF-CO<sub>2</sub>の吸着・脱着、CO<sub>2</sub>の圧縮・膨張の緩和時間を計測、輸送特性についての考察を進め、より実機に近いバッチ式運転装置の設計の指針を得た。また、最終ゴールである「(MOF粒子とCO<sub>2</sub>を一緒に冷媒配管内を循環させる) 循環式の圧縮-吸着ハイブリッドヒートポンプサイクル」の設計開発にも着手し、3件の特許を出願するなど、実用化に向けた研究開発を着実に進めている。

## 研究課題別事後評価結果（1年延長課題）

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）

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）内でのミ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ルング則を取り入れ、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。また、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。

（2024年2月追記）

新たな配列CNT系の創出とその熱電特性の検証を行い、高純度に精製した半導体型単層CNTの薄膜を用いて、その軸に垂直方向の熱伝導率およびゼーベック係数、電気伝導率のキャリア注入依存性を解き明かし、ZT値は室温において0.1を超えうることを示したことや、ユタ大学Gao、ライス大学Konoらとともに、配列CNTを、系統的に方向を変化させた形で積層させることにより、巨大の円偏光二色性を見出すことに成功したことは高く評価できる。

単一界面で生じる界面ゼーベックの起源について、計算科学のアプローチでその背景を明らかにすることを達成した。界面ゼーベックは、化学ポテンシャルの位置に大きく依存し、界面熱抵抗を系統的に変化させた振る舞いを再現することが可能であることを示した。

さらに、Au-TDTR計測系の構築により、フレキシブル界面へのイオンのインターカレーションや、またキャリア注入による電気伝導率の向上による熱伝導が変調する様子を捉えることが可能となり、導電性高分子での電気化学ドーピングによる熱伝導の変調を検出することに成功したことも評価される。