

ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出  
2017年度採択研究代表者

2020年度  
年次報告書

柳 和宏

東京都立大学 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

## § 1. 研究成果の概要

近年、折り曲げ可能なディスプレイ・スマートフォンなど、柔軟(フレキシブル)性を有するデバイスが社会に普及しつつある中、その性能の最適化には、フレキシブル材料の熱と電荷の流れの相関の理解は必要不可欠である。また、様々なものがインターネットに繋がる IoT 社会の実現には、無数のセンサーの為に電源確保が必要不可欠であり、あらゆる物の温度差から発電可能なフレキシブルな熱電変換素子は有力な電源の一つである。このようなフレキシブル性の起源となるファンデルワールス接合界面を有する物質系における、熱・電荷・熱起電力の相関と機構を理解し、制御する方法を確立することを目標に、本プロジェクトを進めている。

2020年度は、コロナの中、研究活動が厳しく制限される中、以下の3つの代表的な研究成果を成し遂げてきた。

(成果1)透過型電子顕微鏡(TEM)観察下におけるナノスケール界面での熱伝導の可視化

(成果2)1次元半導体型材料における熱電物性の次元性の発現の解明

(成果3)単層カーボンナノチューブ薄膜の熱伝導率のキャリア注入依存性の解明と ZT 値の評価

成果1は、10nm 程の直径の金ナノ粒子を温度マーカーとすることで、加熱により熱が伝搬していく様子を TEM 観察下で解き明かした成果であり、ナノチューブ間の接合単一界面で数 10~100 度程の温度勾配が形成し得ることを見出した。成果2は、ワイドギャップ半導体と一次元半導体との間で、通常の熱電特性には次元性の違いが見られなかった課題について、熱電伝導率に着目することにより次元性が現れることを実験・理論の両面で解き明かした課題である。成果3は、金電極をトランスデューサとして用いた時間領域サーモフレクタンス法を開発することにより、電界効果によるキャリア注入量と熱伝導率の相関を解き明かす実験手法を確立した顕著な成果である。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 柳グループ

① 研究代表者：柳和宏（東京都立大学理学研究科物理学専攻 教授）

#### ② 研究項目

『課題 1：フレキシブルナノ界面の熱起電力・電気伝導の制御と学理構築』

・ナノチューブ系の熱起電力・電気伝導の制御と物理的機構の解明

研究項目 1-1-1：試料作製技術の推進

研究項目 1-1-2：配列制御 SWCNT の熱起電力 ( $S$ )・電気伝導 ( $\sigma$ ) のキャリア  
注入依存性および温度依存性

『課題 2：キャリア量を制御したフレキシブルナノ界面の熱伝導率の測定技術開発と  
理解の深耕』

・フェルミレベルを制御した薄膜系の熱伝導評価測定技術の開発

研究項目 2-1-1：ゲーティングを組み合わせた新規薄膜熱伝導率評価系の構築

『課題 3：フレキシブルナノ界面の熱動態の制御と学理構築』

研究項目 3-1：ナノチューブ系における ZT 値のフェルミレベル依存性の解明と制御

### (2) 竹延グループ

① 主たる共同研究者：竹延大志（名古屋大学工学研究科 教授）

#### ② 研究項目

『課題 1：フレキシブルナノ界面の熱起電力・電気伝導の制御と学理構築』

・有機導電性高分子・原子層系の熱起電力・電気伝導率の制御と物理的機構の解明

研究項目 1-2-1：試料作成技術の推進

研究項目 1-2-2：界面制御薄膜における熱起電力 ( $S$ )・電気伝導 ( $\sigma$ ) のキャリア  
注入依存性および温度依存性

『課題 3：フレキシブルナノ界面の熱動態の制御と学理構築』

研究項目 3-2：有機導電性高分子・原子層系における ZT 値のフェルミレベル依存性  
の解明と制御

### (3) 平原グループ

① 主たる共同研究者：平原佳織（大阪大学工学研究科 准教授）

#### ② 研究項目

『課題 1：フレキシブルナノ界面の熱起電力・電気伝導の制御と学理構築』

研究項目 1-3：単一ナノ界面における熱起電力・電気伝導測定の実験

### (4) 山本グループ

① 主たる共同研究者：山本貴博（東京理科大学理学研究科 教授）

#### ② 研究項目

『課題 1 : フレキシブルナノ界面の熱起電力・電気伝導の制御と学理構築』  
研究項目 1 - 4 : 多階層性と不均一性を有する系の熱動態の理論的研究

(5) 岡田グループ

① 主たる共同研究者 : 岡田晋 (筑波大学数理物理系 教授)

② 研究項目

『課題 1 : フレキシブルナノ界面の熱起電力・電気伝導の制御と学理構築』  
研究項目 1 - 5 : 計算科学によるナノ界面におけるキャリア蓄積現象・電気伝導・熱起電力の相関の解析

『課題 2 : キャリア量を制御したフレキシブルナノ界面の熱伝導率の測定技術開発と理解の深耕』

研究項目 2 - 2 : ナノ界面におけるマルチスケール熱伝導特性シミュレーション

(6) 河野グループ

① 主たる共同研究者 : 河野淳一郎 (ライス大学 教授)

② 研究項目

『課題 1 : フレキシブルナノ界面の熱起電力・電気伝導の制御と学理構築』

研究項目 1 - 6 : 配向制御ナノチューブ薄膜の作製技術の深化と基礎物性研究

【代表的な原著論文情報】

- 1) “Groove-Assisted Global Spontaneous Alignment of Carbon Nanotubes in Vacuum Filtration”, Nano Lett. 20, 2332 (2020)
- 2) “Solving the Thermoelectric Trade-Off Problem with Metallic Carbon Nanotubes”, Nano Lett. 19, 7370 (2019)
- 3) “One-Dimensionality of the Thermoelectric Properties of Semiconducting Nanomaterials”, Physical Review Materials, 5, 025404 (2021)
- 4) “Visualization of Thermal Transport within and between Carbon Nanotubes”, Nano Lett. 21, 3134 (2021)
- 5) “In situ time-domain thermoreflectance measurements using Au as the transducer during electrolyte gating”, Appl. Phys. Lett. 117 133104 (2020)