

ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出
2018年度採択研究代表者

2022年度
年次報告書

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

主たる共同研究者:

山下 一郎 (大阪大学 大学院工学研究科 特任教授)

研究成果の概要

カーボンナノチューブ(CNT)などのナノカーボン(NC)複合材料では、NC ユニット間の接合界面が熱輸送を律速する。本研究では、そこに有機あるいはハイブリッド分子による接合を形成し、接合部のナノスケール熱輸送を理解し制御することによって、NC 複合材料の熱伝導率を広範囲にわたって調整可能とすることを目指している。以下に 2022 年度の主要な成果を列挙する。

・CNT 系断熱性熱電接合

これまでに開発してきた CNT 分散法¹⁾などを総合して、CNT 紡績糸の熱伝導率を 10~170 W/mK の範囲で調整できるようになった。従来法より低コストな CNT 分散法によっても CNT/タンパク質複合体紡績糸が得られるようになった。課題であった n 型ドーピングの安定性について、アンモニウム塩による効果的なドーピング法を見だし、コーティング無しでも大気中 1 ヶ月以上性能劣化がないことを確認した²⁾。本研究で見いだした新ペプチドアダプターについて、それらで修飾したタンパク質が広く NC 全般に吸着能を有することが確かめられた³⁾。タンパク質分子接合を補完する技術として有機無機ハイブリッドペロブスカイトによる接合形成に成功し、導電率が増加、熱伝導率が減少することを確認した。

・高熱伝導性接合

直描法による CNT リボンについて、本研究で確立した高精度熱伝導率測定法^{4,5)}や各種 CNT 分散法を用いて作製条件の最適化を進め、熱伝導率をさらに高めるための条件が絞り込まれた。

・分子接合部熱輸送機構の理解と制御

分子スケール温度分布計測を目指した周波数変調原子間力顕微鏡ポテンショメトリの開発について、新たに判明した妨害要因をなくすべく装置改良を行った。平行して、測定試料として作製法の確立を進めてきた CNT 網目ネットワークを活用して電界効果トランジスタを作製し、二端子素子によって解明してきたタンパク質分子接合部のキャリア輸送メカニズム⁶⁾について、理解をさらに進めた。その結果、タンパク質分子接合部の電子帯構造およびホール輸送メカニズムが明らかになった。非平衡分子動力学シミュレーションにより、CNT/タンパク質接合部から 2~3 nm の範囲に広がる極めて大きな熱抵抗が存在していることを示唆する結果を得た。

【代表的な原著論文情報】

- 1) “Carbon nanotube/biomolecule composite yarn for wearable thermoelectric application”, *ACS Appl. Energy Mater.*, Vol. 5, No. 3, pp. 3698–3705 (2022).
- 2) “Influence of halogen elements in organic salts on n-type doping of CNT yarn for thermoelectric applications”, (査読中).
- 3) “CNT binding peptides selected by the phage display method”, (査読中).
- 4) “Round robin study on the thermal conductivity/diffusivity of a gold wire with a diameter of 30 μm tested via five measurement methods”, *J. Therm. Sci.*, vol. 31, 1037–1051 (2022).
- 5) “Error factors in precise thermal conductivity measurement using 3ω method for wire sample”, *J. Therm. Anal. Calorim.* vol. 148, 2285–2296 (2023).
- 6) “The role of structural order in the mechanism of charge transport across tunnel junctions with various iron-storing proteins”, *Small*, 2203338 (8 pages) (2022).