

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

2021年度 年次報告書

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

§ 1. 研究成果の概要

本研究は、二次元材料の平坦性と構造の自由度を活かして相変化伝熱の性能を大幅に上げることを目指し、二次元材料を用いた実験と分子シミュレーションに関して、「新規熱輸送デバイスのためのナノ計測」と「ナノスケールにおける固液相互作用の物理」と「二次元材料の創製と応用」という3つの融合的な研究項目を設けている。ナノ計測としては、TEMを用いてグラフェンウォーターポケット内での加熱に伴う気泡の変化や固気液三相界線のナノスケール観察に成功した。固液界面近傍の気体の過飽和領域がピンギングに与える影響もAFMとTEMにより考察した。また、ナノチャンネル実験によってグラフェン上の水のすべり長さを30-40nmと同定した。分子シミュレーションでは、OH修飾されたSiO₂上や、ナノチューブ程度の固体円柱周り、そしてナノバブルについて複数の方法で分子動力学解析から界面張力を精密に算出することに成功した。また界面張力という自由エネルギーについて、エントロピーの寄与を分離することで、物理的な描像が明らかになってきた。固液摩擦の解析についても、平衡系においてGreen-Kubo関係を拡張することで固液摩擦力の自己相関から摩擦係数を抽出する方法論を確立した。加えて濡れとすべりが複合的にかかわる動的接触線周りの解析にも着手し、前進、後退接触角まわりの詳細な熱流体場を抽出することにも成功した。材料創製としては、グラフェンウォーターポケットの作製方法の開発とグラフェンに付随するコンタミネーションの評価に概ね区切りがついたことを踏まえ、グラフェンと大きく異なる表面電子状態を有し、かつ高い熱・化学耐性を有する六方晶窒化ホウ素(hBN)の高品質化と大面積化を目指した研究を推進した。単層hBN、及び均一性を高めた多層CVD膜の合成を中心に行い、hBNを保持膜としたウォーターポケットの作製も実現可能であることを確認した。

§ 2. 研究実施体制

(1) 高橋グループ

- ① 研究代表者: 高橋 厚史 (九州大学 大学院工学研究院 教授)
- ② 研究項目
 - ・TEMとAFMを用いた流体観察技術の開発
 - ・二次元材料および界面における熱輸送計測

(2) 山口グループ

- ① 主たる共同研究者: 山口 康隆 (大阪大学 大学院工学研究科 准教授)
- ② 研究項目
 - ・固気液の接触線の挙動に関する分子スケールの理論的解析
 - ・水-SiO₂および水-グラフェン間の固液界面エネルギーと濡れに関する分子動力学解析
 - ・固液間の摩擦と速度滑りに関する分子動力学解析

(3) 吾郷グループ

- ① 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)
- ② 研究項目
 - ・*in-situ* TEM 測定のためのウォーターポケットの作製法の開発
 - ・単層・二層グラフェンの高品質 CVD 合成法の開発
 - ・六方晶窒化ホウ素や遷移金属ダイカルコゲナイドの CVD 合成法の構築

【代表的な原著論文情報】

- 1) “Pinning in a Contact and Noncontact Manner: Direct Observation of a Three-Phase Contact Line Using Graphene Liquid Cells”, *Langmuir*, vol. 37, No. 42, pp.12271-12277, 2021
- 2) “Thermally Induced Mass Transfer between Nanobubbles and Micropancakes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 181, pp.122001, 2021
- 3) “Slip length measurement in rectangular graphene nanochannels with a 3D flow analysis”, *Carbon*, vol. 189, pp.162-172, 2022
- 4) “Quantifying Interfacial Tensions of Surface Nanobubbles: How Far Can Young’s Equation Explain?” *Nanoscale*, vol. 14, pp. 2446-2455, 2022
- 5) “Machine learning determination of the twist angle of bilayer graphene by Raman spectroscopy: Implications for van der Waals heterostructures”, *ACS Applied Nano Mater.*, vol. 5, pp. 1356-1366, 2022