

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

2020 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、「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つの研究項目を設けて研究を進めている。

ナノ計測としては、固液界面に存在する数 nm 程度の気体分子層の加熱による変化とナノバブルへの影響を AFM によって明らかにした。その気体分子層はナノバブル同士の合体にも大きな役割を果たすことが TEM 観察で確認できた。また、内壁がグラフェンで覆われた高さ 50nm 程度のナノチャンネルでの水の毛管現象を計測して厳密に構築した数理モデルとの比較を行った。

分子シミュレーションに関しては、昨年度までに理想的なグラフェン上の水についての接触角の議論が決着したことから、今年度は表面の不純物の影響を OH の表面密度を変えて評価した。ナノバブルについても取り扱いを開始し、壁面上のバブルがナノスケールにおいて極端に扁平な構造をとる要因を固気界面張力を求めることで定量的に明らかにした。関連して、界面張力の理論的抽出法をこれまでに 3 種類確立してきたが、今年度はさらに簡便性と汎用性の高い計算法である Wilhelmy 法の開発にも成功した。

材料創製としては、ナノ計測に不可欠な TEM 観察用のグラフェン・ウォーターポケットの作製と評価に関して、表面の完全な平坦性を阻害するコンタミネーションの原因について、CVD グラフェンを用いた種々の検討を通じて明らかにするとともに、グラフェンに比べて清浄化が期待できる六方晶窒化ホウ素(h-BN)のウォーターポケットの試作にも着手した。さらに、三次元構造体として従来のものより 1 桁から 2 桁小さな細孔を有する Ni フォームとグラフェンフォームを合成することができた。また、完全に積層構造を制御した二層グラフェンの CVD 合成にも成功した。

## § 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-SiO<sub>2</sub>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) S. Nag, Y. Tomo, K. Takahashi, M. Kohno, “Mechanistic Insights into Nanobubble Merging Studied Using In Situ Liquid-Phase Electron Microscopy,” *Langmuir*, vol. 37, No. 2, pp.874-881, 2021.
- 2) Y. Imaizumi, T. Omori, H. Kusudo, C. Bistafa and Y. Yamaguchi, “Wilhelmy equation revisited: a lightweight method to measure liquid-vapor, solid-liquid and solid-vapor interfacial tensions from a single molecular dynamics simulation,” *J. Chem. Phys.*, Vol. 153, 034701, 2020.
- 3) P. Solís-Fernández, Y. Terao, K. Kawahara, W. Nishiyama, T. Uwanno, Y.-C. Li, K. Yamamoto, H. Nakashima, K. Nagashio, H. Hibino, K. Suenaga, H. Ago, “Isothermal Growth and Stacking Evolution in Highly Uniform Bernal-Stacked Bilayer Graphene”, *ACS Nano*, Vol. 14, No. 6, 6834-6844, 2020.
- 4) Y. Uchida, K. Kawahara, S. Fukamachi, H. Ago, “Chemical Vapor Deposition Growth of Uniform Multilayer Hexagonal Boron Nitride Driven by Structural Transformation of Metal Thin Film”, *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 2, No. 10, pp. 3270-3278, 2020.