

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

2018 年度 実績報告書

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原子オーダーでの平坦性と構造の自由度を活かして限定された空間での相変化伝熱の性能を大幅に上げようとするものである。そのために、「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研究項目を設けて融合的に研究を進めている。

ナノ計測としては、AFM と TEM を用いたナノスケールでの水の観察とラマン分光を用いた二次元材料の熱物性計測を行った。具体的には、グラファイト-水界面の微細構造について周波数変調モードを用いて調べた結果、厚さ数 nm の空気層の可動性や水層の密度分布についての新しい知見や、TEM 用液体セルにシリカナノ粒子を混入させた状態での観察における技術的基盤を得ることができた。また、撥水性のカーボンナノチューブ内に充填させた水を TEM 観察したところ内壁の凹凸やピンギに強く依存する気液界面の様子が観察できた。このスケールでの液体の観察結果は、これまでほとんど不可能であった分子シミュレーションと実験との比較が手の届くところまで来たという意味で重要であり、引き続きデータの収集に努める予定である。また、顕微ラマン分光法を応用して矩形波あるいは正弦波の繰り返しレーザー加熱による熱物性計測法を開発した。これらにより光吸収率が未知な材料であっても熱伝導率を正確に得ることが可能になり、将来の二次元材料を用いた相変化伝熱システム的设计に寄与するものと考えている。

固液相互作用の物理では、固体面上の液滴の濡れのマイクロとマクロの物理の接続を念頭に、固体面の液滴を対象とした分子動力学シミュレーションを行った。図1に示すようにナノスケールの分子のふるまいからマクロの物性量である応力の空間分布を抽出することで、濡れという物理現象について1800年初頭より使用されているYoungの式について、ナノスケールにおける力学からの解釈を与えた。また、この力学的解釈に加え、界面エネルギーを熱力学的に算出する方法も試み、それらの対応関係を明らかにした。

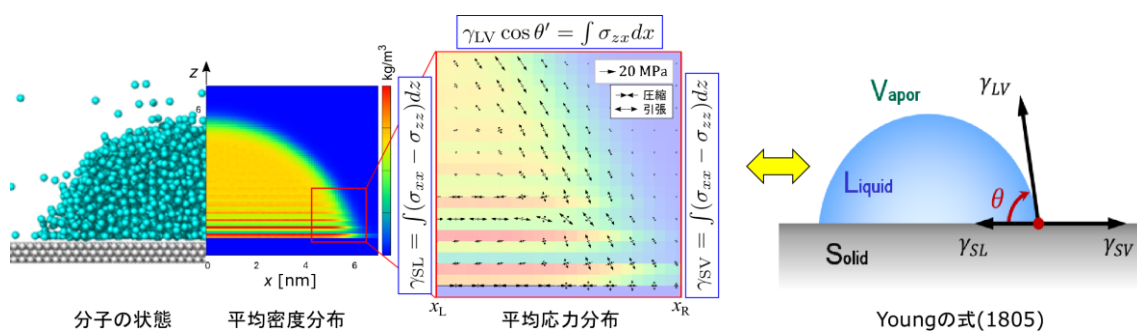


図1 液滴を対象とした分子動力学シミュレーション。濡れという物理現象について、ナノスケールにおける力学からの解釈を与えた。

材料創製では、グラフェン層に挟まれた水のダイナミクスを in-situ TEM により研究するため、TEM サンプルの作製技術開発を進めた。サファイア上の Cu(111)-Ni(111)合金薄膜を触媒として用いて熱 CVD 法で合成した高品質のグラフェンを2枚用い、かつこれまでの転写技術を駆使し

て、2枚のグラフェンに挟まれた微小な水滴(ウォーターポケット)を作製することを試みた。通常、CVD法で合成したグラフェンの転写には高分子膜を保護層として用いるが、TEM観察では不純物としてイメージの劣化につながることから、高分子フリーの転写を検討した。種々の検討の結果、TEM観察が可能なウォーターポケットを得られるようになりつつある。さらに、単層・二層グラフェン、六方晶窒化ホウ素などの二次元材料の高品質合成や高度制御合成についても研究を行い、次年度以降につながる結果を着実に得ることが出来た。

【代表的な原著論文】

1. Yasutaka Yamaguchi, Hiroki Kusudo, Donatas Surblys, Takeshi Omori, Gota Kikugawa “Interpretation of Young's Equation for a Liquid Droplet on a Flat and Smooth Solid Surface: Mechanical and Thermodynamic Routes with a Simple Lennard-Jones Liquid,” *The Journal of Chemical Physics* vol. 150, 4, No. 4, pp. 44701_1-14, 2019.

§ 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 による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-SiO₂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(研究機関別)

- 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