

「ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出」
平成 29 年度採択研究代表者

H29 年度
実績報告書

小原 拓

東北大学流体科学研究所
教授

分子界面修飾とナノ熱界面材料による固体接合界面熱抵抗低減

§ 1. 研究実施体制

(1) 小原グループ

- ① 研究代表者：小原 拓（東北大学流体科学研究所 教授）
- ② 研究項目
 - ・固液界面熱輸送特性の解析
 - ・各種材料の TIM 適用性検討

(2) 菊川グループ

- ① 主たる共同研究者：菊川 豪太（東北大学流体科学研究所 准教授）
- ② 研究項目
 - ・自己組織化単分子修飾膜と液体との界面親和性に関する分子動力学シミュレーション
 - ・シリコン系表面に対する分子修飾膜の分子モデリング

(3) 佐藤グループ

- ① 主たる共同研究者：佐藤 正秀（宇都宮大学大学院工学研究科 准教授）
- ② 研究項目
 - ・SAM 修飾表面の構築と高充填性分子接合表面創製プロセス構築への基礎的研究
 - ・ナノ材料分散型ソフトマター系 TIM 材料と創製法の探索

(4) 八木グループ

① 主たる共同研究者：八木 貴志（産業技術総合研究所物質計測標準研究部門
主任研究員）

② 研究項目

- ・界面熱抵抗計測技術の開発と固液界面における熱的接合の解明

(5) 元祐グループ

① 主たる共同研究者：元祐 昌廣（東京理科大学工学部 准教授）

② 研究項目

- ・界面接触のための顕微観察用実験システムの開発
- ・残留気泡、TIM 内温度分布の計測評価のための準備

(6) 市野グループ

① 主たる共同研究者：市野 良一（名古屋大学未来社会創造機構 教授）

② 研究項目

- ・高熱伝導かつ導電性のある熱拡散複合電極材の作製実験
- ・炭素系ナノ材料と金属との複合めっきによる熱伝導皮膜の作製実験

(7) 長野グループ

① 主たる共同研究者：長野 方星（名古屋大学大学院工学研究科 教授）

② 研究項目

- ・界面熱抵抗面内分布測定手法の検討

(8) 森グループ

① 主たる共同研究者：森 邦夫（(株)いおう化学研究所 代表取締役）

② 研究項目

- ・熱抵抗計測技術の開発
- ・界面熱抵抗低減剤・TIM 及び表面修飾の探索

§ 2. 研究実施の概要

パワー半導体など高密度発熱体からの大量の熱を効率的に輸送するため、微細な積層構造で構成される熱の流れの経路において、固体層間で熱の流れを阻害する界面熱抵抗を低減するための学理と技術が求められている。本研究は、熱工学・熱物性・化学・表面科学・分子動力学・高精度計測など最先端の科学技術を結集し、固体層表面を特殊な分子で修飾する、固体表面間を分子で接合する、固体表面間にナノ物質層を介在密着させる(熱界面材料=TIM)などの技術により、固体層間に強力な熱的接続を確立するための学理を確立するものである。重要な研究要素は、TIM(液体、ソフトマター、ナノ複合物質)の探索、固体表面へのTIMの密着・気泡除去、固体-TIM間界面の熱輸送特性、固体表面の分子修飾・分子接合による熱輸送制御などで、これらを解明するための実験計測法や数値解析法、実験試料界面の創製法も重要な課題である。

研究初年度の平成 29 年度は、これら手法の開発を主な重点として研究を進めた。すなわち、2つの固体壁面間に極薄液膜が介在する分子動力学計算系を構築し、固体壁面間熱輸送特性の解析を開始した。また、有機分子の自己組織化単分子膜(SAM)を用いた固体表面修飾によりTIMの固体界面親和性を柔軟に制御することを目的として、修飾表面上に液滴を置いた分子動力学計算系(図 1)により、界面親和性を代表する特性として一般的な液滴の接触角や浸漬仕事(固体表面をTIMで完全に濡らすために必要なエネルギー)を評価した。固体側の熱輸送として特徴的なフォノン輸送を解析するためのボルツマン輸送熱伝導計算システムの構築も進めている。固体や分子層と液体との間の界面熱抵抗に対して、100 MHz クラスの高速周期変調を加えたパルスレーザ光を試料に照射することで、周期加熱成分による試料内部への熱拡散長を100 nm前後に制限した上で、パルス光加熱によるピコ秒オーダーの熱拡散現象を時間分解サーモリフレクタンス法(TDTR)により測定する新しい計測法(図 2)の開発を開始した。計測試料となる分子修飾界面、接合界面、ナノ材料分散型ソフトマター系TIMの創製に対しては、表面修飾プロセスや各種ナノ材料合成プロセスの探索を行い、液相中でのマイクロコンタクトプリントやナノ材料分散液によるスピコーティングなどのウェットコーティングの可能性を見出した。

固体-TIM界面における気泡の態様、これらが界面熱輸送に及ぼす影響、表面の物理化学状態や押し付け圧などが現象に及ぼす影響などを明らかにするため、界面近傍における残留気泡の観察と界面平行面内の温度分布の計測が必要となる。これに対して、固体接合面を顕微観察するための実験システムの開発を進めた。また、

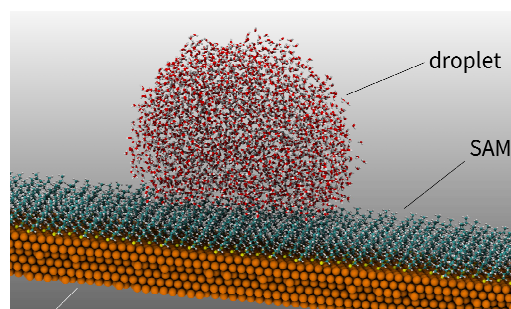
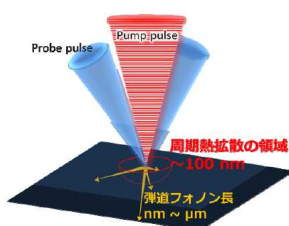


図 1 疎水性 SAM 上の水液滴



	本研究	従来型TDTR
周期変調	数100 MHz	0.2 MHz
パルス周波数	1 GHz	20 MHz
熱拡散制限の手段	周期変調	周期変調
熱拡散制限の特性距離	< 100 nm	数μm

図 2 開発中の界面熱抵抗計測技術(左)と従来技術との比較

30 年度以降に実施予定の残留気泡および TIM 内温度分布計測の準備として、高速度カメラを用いた蛍光異方性の解析による計測原理の検証を行った。(図 3) さらに、実在面スケールでの固体-TIM-固体の熱抵抗の分布を明らかにするため、既に確立したロックインサーモグラフィによる面内熱拡散率測定手法の光学系を表面加熱・裏面検知から表面加熱・試料断面検知へと改良し、空間分解能 $2.7 \mu\text{m}$

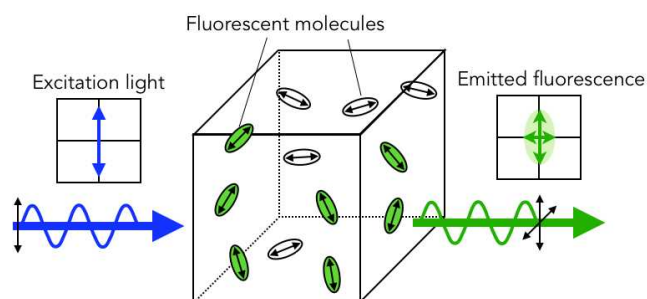


図 3 蛍光異方性の概念図。偏光によって励起されたプローブ分子の蛍光は、液体中の熱揺らぎによってその偏光が一部解消され、その度合いより温度を求める。

の赤外顕微レンズの導入なども併せ、接触界面熱抵抗計測に向けての基本原理が確認された。

ナノカーボン材料を金属と複合化してめっき皮膜とすることで、熱伝導性に優れた皮膜を金属固体表面に形成する実験や、実部材レベルの固体接合面で生起する様々な現象を観察するための熱抵抗計測装置の開発と熱抵抗値に及ぼす TIM 適用の有無や接触面に加える面圧の影響などの解析も開始した。