

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360099

研究課題名(和文) 分子間エネルギー輸送機構に基づいた固液界面熱抵抗の制御

研究課題名(英文) Control of thermal resistance over liquid-solid interfaces based on molecular energy transport mechanism

研究代表者

芝原 正彦 (Shibahara, Masahiko)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40294045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：ナノメートルスケールの微細構造を用いて固液界面領域の液体分子の運動を直接的に制御することにより固液界面熱抵抗を低減する技術や微細構造による固液界面熱抵抗の変化を原理的に予測する方法を確立することを目的として、おもに非平衡分子動力学解析を用いた研究を実施し、ナノメートルスケールの微細構造によって界面熱抵抗が平滑面と比べて増加・減少する物理条件、界面熱抵抗の変化の範囲、界面領域エネルギー輸送メカニズム変化について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to develop technology to reduce thermal resistance over a liquid-solid interface and to predict variation of interfacial thermal resistance by structures at nanometer-precision, influences of structures at nanometer-precision on interfacial thermal resistance and thermal energy transport mechanisms at a liquid-solid interface are investigated directly by non-equilibrium classical molecular dynamics simulations. The thermal energy transport mechanism at a liquid-solid interface varies depending on the structure geometry at the nanometer scale and the liquid-solid interaction intensity, which causes changes in the interfacial thermal resistances that are quantitatively evaluated in the present study.

研究分野：熱工学，分子熱工学，燃焼工学

キーワード：界面熱抵抗 固液界面 エネルギー輸送機構 非平衡分子動力学 ナノ構造

1. 研究開始当初の背景

固体 - 液体間に有意な熱抵抗が存在することは実験的に知られていたが[1], 近年の分子動力学シミュレーションの発展に伴って, さまざまな固体 - 液体界面における熱抵抗値が定量的に算出されるようになってきた[2,3,4]. これらの固体 - 液体界面における熱抵抗の絶対値は, 巨視的なスケールの機械システムにおいてはほぼ無視できるほど小さいが, NEMS(Nano Electro-Mechanical System) や MEMS(Micro Electro-Mechanical System)とよばれる小型の機械システムに用いられる流路や Nano Fluids とよばれる超微粒子を混在させた液体を用いたシステムにおいては, 液体や超微粒子そのものの熱伝導率と比べて, 液体と固体が接する界面の熱抵抗が相対的に大きくなり, 系全体のエネルギー輸送に対して実質的に影響を持つようになる.

このような背景から, 固体 - 液体界面熱抵抗に関する研究が盛んになりつつあるが, その界面熱抵抗の能動的な低減技術に関する研究は, 非常に少なく, かつ, 理論的な理解が不足している.

2. 研究の目的

前述の学術的背景を踏まえて, 界面に存在するナノメートルスケールの微細構造を用いて液体と固体間の界面熱抵抗を低減する技術の確立や固液界面熱抵抗を人為的にどの範囲でコントロールできるのかを明らかにすること, ならびに, 固液界面熱抵抗の変化を原理的に予測できる理論の確立を本研究の目的とする.

上記の目的のためには, 界面に存在するナノメートルスケールの微細構造によって界面液体分子挙動を変化させることで固体 - 液体分子間エネルギー輸送機構をどのように制御可能であるかを明らかにすることが必要である. 本研究では, スリット状微細構造や微粒子の堆積層を用いて, 界面領域の液体分子の運動を直接的に制御することにより, 分子スケールの界面エネルギー輸送を制御することを考えて研究を実施した.

3. 研究の方法

(1) 微細構造が固液界面熱抵抗に及ぼす影響の解明 / 非平衡分子動力学シミュレーションによる検討

本研究では, 流体領域を二つの固体壁面で挟んだ計算モデルを用いた. 本研究では, スリット状微細構造, ナノ粒子付着層, が伝熱面に付着する場合を調べたが, 紙面の都合上, 本報告書では, スリット状微細構造が付着する場合についてのみ述べる. 図1に計算モデル例を示す. 下壁面に設ける微細構造の間隔 L を $L = 0.0$ (フラット面), $0.7, 1.4, 2.8$ nm, 高さ h を 0.0 (フラット面), $0.7, 1.4, 2.1$ nm とそれぞれ変化させた.

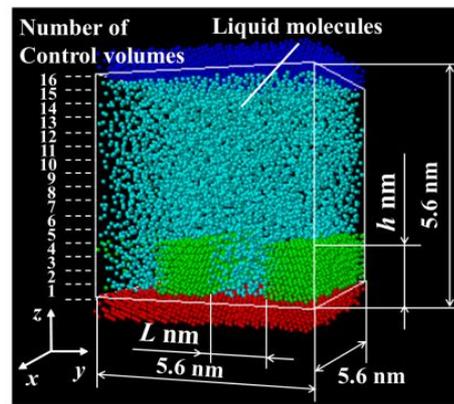


図1 計算モデル(スリット構造付着)

固体壁面は上下面とも4層からなるとし, Langevin 法を用いて, 流体領域側から3層目の固体1層を温度制御することで, 上下壁面間に50 Kの温度差を設けた. 流体分子は, 並進の自由度のみを有する 12-6 Lennard-Jones 流体分子モデルを用い, 水分子と同等の分子量 18.0 を有するとした. 計算開始時のユニットセルは $5.6 \times 5.6 \times 5.6$ nm³ とし, 圧力制御時に z 方向長さを変化させ[5], 最終的な z 方向長さは $5.57 \sim 5.71$ nm の範囲内とした. x 方向および y 方向に周期境界条件を適用した. 各物理量は 5 ns の平均値で示す. 最終的な系内圧力は $5.6 \times 10^4 \sim 4.2 \times 10^6$ Pa の範囲内とした. 本研究では, 界面熱抵抗の圧力依存性について調査し, 上記の圧力範囲内では, 系内圧力の差が界面熱抵抗の変化に対して定性的には大きく影響しないことを確認した. 固体(上下壁面および微細構造)原子は, 鉄原子の原子量 55.8 を有する粒子とし, 固体 - 固体間のポテンシャルには 12-6 Lennard-Jones ポテンシャルを用いた. また, 固体 - 液体分子間のポテンシャルには, 12-6 Lennard-Jones ポテンシャルにポテンシャルパラメータ α を挿入した式(1)を用いた. ポテンシャルパラメータ α は微小液滴の接触角に対して一意な関係があることが知られており, α を変化させることで, 固液間相互作用強さの影響を調べた.

$$\phi_{sl} = 4\alpha\epsilon \left\{ \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right\} \quad (1)$$

下壁面上部を $z = 0.0$ nm としたときの, 微細構造を含めた $z = 0.0 \sim 2.1$ nm の領域を固液界面領域と定義した. 界面領域における温度降下 ΔT とその界面領域を z 方向に通過するエネルギー流束 Q_z から, 次式(2)によって界面熱抵抗 R_n を計算した.

$$R_n = \frac{\Delta T}{Q_z} \quad (2)$$

(2) 微細構造が界面分子間エネルギー輸送機構に及ぼす影響の解明 / 非平衡分子動力学シミュレーションによる検討

学シミュレーションによる検討

式(3)の分子スケールのエネルギー輸送式 [2]を用いて、12-6 Lennard-Jones 流体分子モデルにおける固液界面のエネルギー輸送メカニズムを調査した。

$$Q_z = \frac{1}{V} \left[\sum_i E_i v_{z,i} + \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} z_{ij}^* (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{F}_{ij}) \right] \quad (3)$$

エネルギー流束の計算における検査体積 V には、図 1 に示すように流体領域を熱伝導方向に 16 層に分割した体積を用いた。

4. 研究成果

(1) 微細構造が固液界面熱抵抗に及ぼす影響の解明 / 非平衡分子動力学シミュレーションによる検討

図 2 (a), (b) に、ポテンシャルパラメータ α を変化させた際の、構造間隔 $L = 1.4, 2.8$ nm における構造高さ h と界面熱抵抗 R_n の関係を示す。

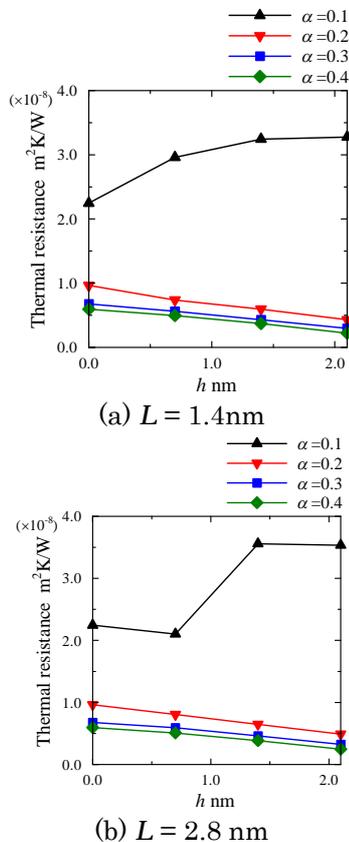


図 2 固液界面熱抵抗に対するスリット構造の形状ならびに固液間相互作用強さの影響

図 2 (a), (b) より、 α が小さい場合 ($\alpha = 0.1$), 構造高さ $h = 0.7$ nm, 構造間隔 $L = 2.8$ nm では、フラット面に比べて界面熱抵抗が減少しているが、その他の L, h の条件では、フラット面に比べて界面熱抵抗は増加していることがわかる。また、 α が 0.1 より大きい場合 ($\alpha = 0.2, 0.3, 0.4$), いずれの構造間隔においても、微細構造を設けた壁面の界面熱抵抗はフラット面の界面熱抵抗に比べて減

少しており、また界面熱抵抗と構造高さの間に負の相関が観察される。以上のことから、固液界面熱抵抗は構造高さ、構造間隔、および固液間相互作用強さによって変化し、それらの条件によって、フラット面に比べて界面熱抵抗が増加する場合と減少する場合が存在することがわかる。

上記の結果に対して、界面熱抵抗と構造物を含めた壁面の幾何的な表面積の相関の有無を検討した。図 3 に、構造間隔 $L = 0.7$ nm の場合の、各ポテンシャルパラメータの条件での構造高さに対する相対熱抵抗および相対表面積の逆数 $1/S^*$ の変化を示す。

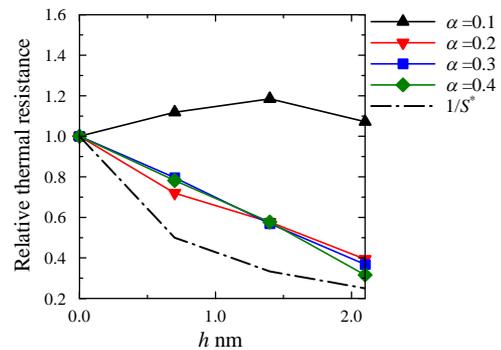


図 3 固液界面熱抵抗の相対値と相対表面積の逆数の関係 ($L = 0.7$ nm)

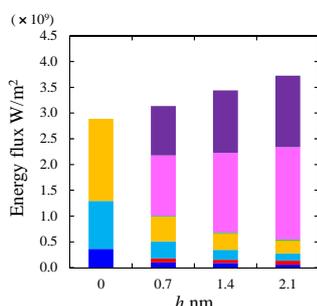
ここで、相対熱抵抗および相対表面積はそれぞれ、各構造高さにおける界面熱抵抗および構造物を含めた壁面の幾何的な表面積を、フラット面における値で規格化したものとして定義した。図 3 より、界面熱抵抗と構造物を含めた壁面の幾何的な表面積の間に相関はみられないことがわかる。

(2) 微細構造が界面分子間エネルギー輸送機構に及ぼす影響の解明 / 非平衡分子動力学シミュレーションによる検討

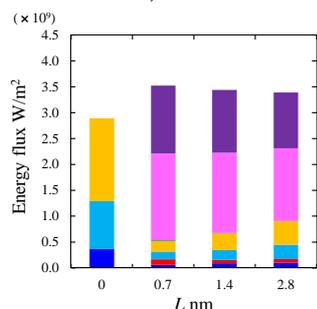
微細構造が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響をより詳細に解明するために、エネルギー輸送メカニズムを調査した。図 4(a) ~ (c) に、下壁面最近接領域 ($z = 0.0 \sim 0.35$ nm) における巨視的な熱伝導方向 (z 方向) のエネルギー輸送の内訳を示す。図 4(a) ~ (c) では、式(3)より計算した全エネルギー流束を、式(3)の右辺第 1 項の各粒子自身の運動による寄与および第 2 項の各粒子間の相互作用による寄与に分けて示している。凡例中の“1st”, “2nd” はそれぞれ第 1 項, 第 2 項の寄与を意味し, “Liquid”, “Solid”, “Nano” はそれぞれ流体分子, 壁面原子, 構造原子の寄与を意味する。例えば, 2nd Nano-Liquid は、式(3)の右辺第 2 項の構造原子 - 流体分子間の相互作用による寄与を示す。フラット面に比べて界面熱抵抗が減少する $\alpha = 0.3, L = 1.4$ nm の場合、図 4(a) より、構造高さが大きくなるとエネルギ

一輸送に対する流体分子の寄与が減少し、構造原子の寄与がその減少分以上に増加し、全エネルギー流束が増加していることがわかる。また図 4(b)より、 $\alpha = 0.3$, $h = 1.4$ nm の場合 構造間隔が 2.8 nm から 1.4 nm, 0.7 nm と小さくなる場合のエネルギー輸送の内訳の変化は、前述の構造高さが大きくなる場合と同様の傾向を示していることがわかる。

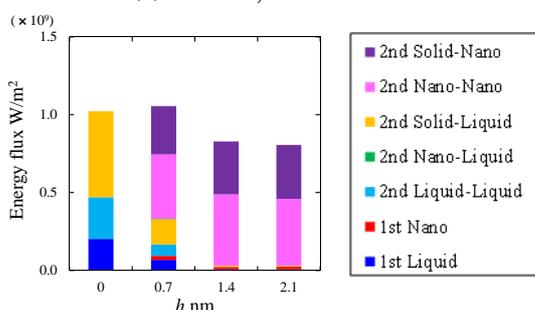
一方、図 4(c)より、図 2(b)においてフラット面に比べて界面熱抵抗が増加する $\alpha = 0.1$, $L = 2.8$ nm, $h = 1.4$, 2.1 nm の場合、フラット面に比べて流体分子の寄与が著しく減少し、構造物の寄与が支配的となっており、全エネルギー流束が減少している。以上の結果より、フラット面に比べて界面熱抵抗が減少する場合と増加する場合で界面領域におけるエネルギー輸送メカニズムが大きく異なることがわかる。



(a) $\alpha = 0.3$, $L = 1.4$ nm



(b) $\alpha = 0.3$, $h = 1.4$ nm



(c) $\alpha = 0.1$, $L = 2.8$ nm

図 4 界面領域におけるエネルギー流束の内訳に対するスリット構造の形状の影響 ($z = 0.0 \sim 0.35$ nm)

(3) まとめ

界面に存在するナノメートルスケールの微細構造を用いて液体と固体間の界面熱抵抗を低減する技術の確立や固液界面熱抵抗

を人為的にどの範囲でコントロールできるのかを明らかにすること、ならびに、固液界面熱抵抗の変化を原理的に予測できる理論の確立を目的として、おもに非平衡分子動力学シミュレーションを用いて研究を行った。

本研究において、スリット状微細構造や微粒子の堆積層を用いて界面領域の液体分子の運動を直接的に制御する場合について検討を行ったが、紙面の都合上、本報告書ではスリット状微細構造が伝熱面に付着する場合についてのみ報告した。なお、微粒子の堆積層が伝熱面に付着する場合について、同様の解析を実施し、類似の結果を得ていることを付記する。以下に、得られた知見を示す。

- ・スリット状微細構造を有する界面の界面熱抵抗がフラット面と比べて増加する場合と減少する場合で、界面領域におけるエネルギー輸送メカニズムが大きく異なる。

- ・スリット状微細構造を有する界面の界面熱抵抗がフラット面に比べて減少する場合、構造高さ、構造間隔をそれぞれ変化させたときのエネルギー輸送メカニズムの変化は同様の傾向となる。

- ・スリット状微細構造を有する界面の界面熱抵抗がフラット面に比べて増加する場合、フラット面に比べて界面領域の流体密度が著しく減少する。また、界面領域の流体分子の寄与によるエネルギー輸送が著しく減少し、巨視的な熱伝導方向のエネルギー流束が減少する。

<引用文献>

- [1]G. L. Pollack, (1969), Kapitza Resistance, Review of Modern Physics, 48-81.
- [2]T. Ohara, (1999), Journal of Chemical Physics, Vol. 111, No. 14, 6492-6500.
- [3]S. Maruyama and T. Kimura, (1999), Thermal Science & Engineering, Vol. 7, 63-68.
- [4]L. Xue, et al., (2003), Journal of Chemical Physics, Vol. 118, No. 1, 337-339.
- [5]H. J. C. Berendsen, et al., J. Chem. Phys., Vol. 81, No. 8, (1984), 3684-3690.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

K. Fujiwara and M. Shibahara, Local pressure components and interfacial tensions of a liquid film in the vicinity of a solid surface with a nanometer-scale slit pore obtained by the perturbative method, The Journal of Chemical Physics, 査読有, Vol. 142, 2015, 094702/1-14. DOI: 10.1063/1.4913495.

R. Toda, Y. Ueki, M. Shibahara and T. Ohara, Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanostructure on the Thermal Energy Transport at a Liquid-Solid Interface, Proceedings of The 25th

International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, Vol.1, 2014, paper44/1-6.

Y. Ueki, M. Shibahara and Y. Ishida, Molecular Dynamics Study on Influence of Nanoparticle Layer on Liquid-Solid Interfacial Thermal Resistance, Proceedings of The 25th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, Vol.1, 2014, paper22/1-5.

T. Kanda, M. Shibahara and Y. Ueki, Molecular Dynamics Study on Adhesion of Nanoparticle on Solid-Liquid Interface, Proceedings of The 25th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, Vol.1, 2014, paper48/1-6.

M. Shibahara, R. Toda, S. Murakami and T. Ohara, Molecular dynamics study on influences of surface structural characteristics on thermal energy transfer over liquid-solid interfaces, Proceedings of 15th Int. Heat Transfer Conference, 査読有, Vol.1, 2014, 1-14.

DOI: 10.1615/IHTC15.mlt.008513

K. Fujiwara and M. Shibahara, Local pressure components and interfacial tension at a liquid-solid interface obtained by the perturbative method in the Lennard-Jones system, The Journal of Chemical Physics, 査読有, Vol.141, 2014, 034707/1-11.

DOI: 10.1063/1.4890036

T. Matsumoto, S. Miyanaga, M. Shibahara, Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanoparticle Adhesion on Interfacial Thermal Resistance and Energy Transport Mechanism at a Liquid-Solid Interface, the Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal, 査読有, Vol. 13-3/4, 2013, 162-171.

DOI: 10.1504/PCFD.2013.053657.

K. Fujiwara, M. Shibahara, A Molecular Dynamics Study on Wetting Phenomena at a Solid Surface with a Nanometer-Scale Slit Pore, Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 査読有, Vol. 17-1, 2013, 1-9.

DOI: 10.1080/15567265.2012.745636

S. Murakami, M. Shibahara, T. Ohara, Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanostructure Geometry on the Energy Transport and Local Non-equilibrium Behavior at Liquid-Solid Interfaces, Proceedings of 23rd International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, Vol.1, 2012, USB-memory.

T. Matsumoto and M. Shibahara, Molecular Dynamics Study on the Influence of Nanoparticle Adhesion on the Liquid-Solid Interfacial Thermal Resistance,

Proceedings of The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 査読有, CD-ROM, 2012.

S. Murakami, M. Shibahara, T. Ohara, Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanostructure Geometry on the Energy Transport and the Local Non-equilibrium Behaviors at the Liquid-Solid Interface, Proceedings of The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 査読有, CD-ROM, 2012.

T. Matsumoto, S. Miyanaga, M. Shibahara, A Molecular Dynamics Study on the Effects of Nanoparticle Layers on a Liquid-Solid Interfacial Thermal Resistance, Proceedings of The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, 査読有, CD-ROM, 2011.

M. Shibahara, Molecular Dynamics Study on the Influence of Nanostructure Geometry on the Liquid Molecular Local Non-equilibrium Behaviors at Liquid-Solid Interfaces, Proceedings of The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, 査読無, CD-ROM, 2011.

M. Shibahara, T. Ohara, Effects of the Nanostructural Geometry at a Liquid-Solid Interface on the Inter-facial Thermal Resistance and the Liquid Molecular Non-Equilibrium Behaviors, 査読有, Vol.6-2, 2011, 247-255.

DOI: 10.1299/jtst.6.247.

〔学会発表〕(計24件)

佐々木翔平, 藤原邦夫, 芝原正彦, 固体壁面と静的に接する液膜の状態に影響を与える因子に関する分子動力学解析, 日本機械学会熱工学コンファレンス2014, 2014年11月08日~2014年11月09日, 芝浦工業大学(東京都).

藤原邦夫, 芝原正彦, 微細構造を有する固液界面に存在する液膜の熱力学的状態に関する分子動力学解析, 日本流体力学会年会2014, 2014年09月15日~2014年09月17日, 東北大学(仙台市).

Y. Ueki and M. Shibahara, Molecular Dynamics Study on the Influence of a Nanoparticle Layer on Interfacial Thermal Resistance at a Liquid-Solid Interface, The Seventh Taiwan-Japan Workshop on Mechanical and Aerospace Engineering, 2014年09月14日, 台北(台湾).

戸田亮平, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造が固液界面エネルギー輸送機構に及ぼす影響に関する分子動力学的研究, 第51回日本伝熱シンポジウム, 2014年05月21日~2014年05月23日, アクトシティ浜松・コングレスセンター(浜松市).

藤原邦夫, 芝原正彦, 微細構造を有する固液界面に存在する液膜の熱力学的状態に関

する分子論的描像, 第 51 回日本伝熱シンポジウム 2014 年 05 月 21 日 ~ 2014 年 05 月 23 日, アクトシティ浜松・コンgresセンター (浜松市).

戸田亮平, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造が固液界面エネルギー輸送機構に及ぼす影響に関する分子動力学的研究, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 17 日 ~ 2013 年 12 月 19 日, 名古屋大学(名古屋市).

K. Nakahashi, K. Fujiwara, M. Shibahara, A Molecular Dynamics Simulation on the Mechanical Balance of the Force Applied to a Thin Liquid Film on a Nanometer-Scale Slit Pore, The 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2013 年 11 月 01 日 ~ 2013 年 11 月 05 日, 山口東京理科大学 (山陽小野田市).

中橋和樹, 藤原邦夫, 芝原正彦, 微細構造が固液界面での液体挙動と力の均衡に及ぼす影響に関する分子動力学的研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013, 2013 年 10 月 19 日 ~ 2013 年 10 月 20 日, 弘前大学 (弘前市).

M. Shibahara, S. Murakami, T. Ohara, Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanochannel Geometry on the Energy Transport Mechanism at Liquid-Solid Interfaces, the 4th International Symposium on Micro and Nano Technology, 2013 年 10 月 08 日 ~ 2013 年 10 月 12 日, Shanghai(China).

K. Fujiwara and M. Shibahara, A Molecular Dynamics Study on Wetting Phenomena at a Solid Surface with a Nanometer-Scale Slit Pore, the 4th International Symposium on Micro and Nano Technology, 2013 年 10 月 08 日 ~ 2013 年 10 月 12 日, Shanghai(China).

M. Shibahara and T. Koike, Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanoparticle Adherent Layer on Interfacial Thermal Resistance at a Liquid-Solid Interface, the ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels ICNMM2013, 2013 年 06 月 16 日 ~ 2013 年 06 月 19 日, 北海道大学 (札幌市).

K. Nakahashi, K. Fujiwara, M. Shibahara, Effects of the Local State of Liquid Molecules on Wetting Phenomena at a Solid Surface with a Nanometer-Scale Slit Pore, the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, 2013 年 06 月 03 日 ~ 2013 年 06 月 06 日, Hong Kong(China).

芝原正彦, 村上翔, 小原拓, ナノメートルスケールの微細構造が固液界面エネルギー輸送機構に及ぼす影響, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, 2013 年 05 月 29 日 ~ 2013 年 05 月 31 日, ウェスティンホテル仙台(仙台市).

藤原邦夫, 芝原正彦, 微細構造を有する固

液界面における液体分子の安定性に関する分子動力学的研究, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012 年 12 月 18 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都).

村上翔, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012 年 12 月 18 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都).

神谷崇仁, 藤原邦夫, 芝原正彦, 界面微細構造が固液界面での液体分子挙動に及ぼす影響に関する分子動力学的研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012, 2012 年 11 月 17 日, 熊本大学 (熊本市).

芝原正彦, 村上翔, 松本拓也, 小原拓, ナノメートルスケールの微細構造が固液界面の熱抵抗とエネルギー輸送機構に与える影響に関する分子動力学的研究, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 09 月 10 日, 金沢大学 (金沢市).

芝原正彦, 松本拓也, 固液界面の熱抵抗とエネルギー輸送機構にナノ粒子付着が与える影響に関する分子動力学的研究, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 2012 年 05 月 30 日, 富山国際会議場 (富山市).

村上翔, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 2012 年 05 月 31 日, 富山国際会議場 (富山市).

村上翔, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011 年 12 月 21 日, 大阪大学 (吹田市).

①松本拓也, 芝原正彦, ナノ粒子層が固液界面熱抵抗に及ぼす影響に関する分子動力学解析, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011 年 12 月 21 日, 大阪大学 (吹田市).

②村上翔, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京工業大学 (東京都).

③松本拓也, 芝原正彦, ナノ粒子層が固液界面熱抵抗に及ぼす影響に関する分子動力学解析, 日本機械学会 第 16 回動力エネルギー技術シンポジウム, 2011 年 6 月 23 日, 関西大学 (吹田市).

④芝原正彦, 小原拓, 村上翔, 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, 2011 年 6 月 1 日, 岡山コンベンションセンター (岡山市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芝原 正彦 (SHIBAHARA, Masahiko)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40294045