

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03853

研究課題名（和文）高クヌッセン数マイクロ熱流動場の制御を実現する表面ナノ構造の探索

研究課題名（英文）Exploration of surface nano structures to control micro thermal flow fields in the high Knudsen number regime

研究代表者

山口 浩樹 (Yamaguchi, Hiroki)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50432240

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：高クヌッセン数となるマイクロ熱流動場はその大きい比表面積から境界条件に強く影響される。そこで、境界条件のパラメータとなる分子の固体表面への適応度を統計的に表す適応係数に着目した。加工や修飾を施した固体表面に対して適応係数を計測することにより、様々な適応係数を持つ固体表面を探索し、表面性状と境界条件の関係を調査した。同一の固体表面試料に対して、熱輸送に関するエネルギー適応係数と流動抵抗に関する接線方向運動量適応係数を計測した。その結果、従来の知見とは異なり特性が単調に変化しない可能性が示唆された。また結果を相補的に用いることで、従来の散乱モデルでは表現できない条件が存在することも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高クヌッセン数のマイクロ熱流動場の状態を決定づける重要な要素としての固体表面における境界条件について、同一の固体表面試料に対して複数の適応係数を計測することにより探索した。その結果としてこれまではあまり知られていない特性をいくつか明らかにすることができ、得られた知見を発展させることによって将来的には固体表面を用いたマイクロ熱流動場の制御につながることを期待される。さらにその結果としてより効率的なマイクロ熱流動場の利用が可能になっていくと考えられる。

研究成果の概要（英文）：A high Knudsen number micro-thermal flow field is strongly affected by the boundary conditions due to its large specific surface area. As parameters of the boundary conditions, we focused on the accommodation coefficients, which statistically represent the degree of accommodation of molecules to a solid surface. We explored the solid surfaces from the accommodation coefficients and studied the relationship between the surface properties and the boundary conditions on various processed and/or treated surfaces.

For the same sample surface, the energy accommodation coefficient related to a heat transfer and the tangential momentum accommodation coefficient related to a flow resistance were measured. These results suggested that the characteristics might not change monotonically, contrary to previous findings. From a complementary study of two accommodation coefficients, it was found that there were conditions that could not be described by the conventional scattering models.

研究分野：分子流体工学

キーワード：高クヌッセン数流れ 適応係数 境界条件

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロ・ナノ加工技術の発展とともに、工業製品などで利用される熱流動場においても小型化が求められる場面においては著しいスケールダウンが進んでいる。マイクロ・ナノデバイスはもちろんのこと、一見すると普通の大きさである燃料電池などにおいてもその内部では多孔質体などによる微小な流路が利用されている。このような微小スケールでは、体積がスケールの3乗で小さくなるのに比べて表面積は2乗でしか小さくならないため、流体の比表面積が大きくなる。そのためマイクロ熱流動場の形成に対しては境界条件が非常に重要な役割を担っていることが分かる。

特に微細化が進んだマイクロ熱流動場では、流体の平均自由行程が系のスケールに対して無視できない「高クヌッセン数流れ」となることも多い。高クヌッセン数流れでは流体を連続体として扱えず多数の分子の運動として理解する必要がある。そのため、境界条件も、分子と固体表面分子群との相互作用という観点から表現する必要がある一方、アヴォガドロ数に匹敵するような多数の分子の統計的な挙動としても取り扱わなければならない難しさがある。その結果として相互作用は気体分子の固体表面分子群への平均的な適応度を表す適応係数を用いて表現されることが多い。この適応係数は適応する物理量に応じてエネルギー適応係数(EAC)や接線方向運動量適応係数(TMAC)などが定義され、EACは熱輸送、TMACは流動抵抗と密接に関係していることが知られている。

これまで数値解析では、境界条件モデルのパラメータである適応係数を恣意的に変化させることにより熱流動場への影響を調べた研究が行われており、適応係数の値によっては流れの向きが逆転し、温度分布や密度分布も大きく変化することが示されている。この結果は、適切な適応係数を持つ固体表面を採用するだけで、熱輸送の促進や抑制、流動抵抗や流れの向きなど、意図した熱流動場が得られる可能性を示唆している。しかし現在のところ、適応係数の計測は清浄な固体表面や粗さのある工業表面を対象に行われているものの、単に気体と固体の組み合わせに対するデータとして整理されているだけである。適応係数には素材、温度、粗さ、形状、吸着状態など様々な因子が影響するため、意図した適応係数を有する固体表面を自由に用意できるような状態ではない。実際、流路表面の適応係数の違いによって流れ方向を制御し、ポンプとして作用させるアコモデーションポンプが過去には提案されている。しかし、現状では異なる適応係数の表面を意図的に用意することが非常に難しく、提案後はほとんど研究が進められていない。そこで、幅広く固体表面を探索し、任意の適応係数を有する固体表面によって熱流動場を制御する可能性を探求することを考えた。

2. 研究の目的

マイクロ・ナノスケールの構造を付与する表面加工技術や表面修飾技術などの発展に伴い、様々な処理を施した固体表面が広く利用されるようになってきている。しかし、残念ながらこれまでこのような表面処理後の固体表面試料に対する適応係数の知見はほとんど知られていない。そこで、本研究ではこのような技術によって付与されたバルク材とは異なる表面に着目し、様々な性状の固体表面を実現することによって、様々な適応係数を持つ固体表面を探索する。その結果として、任意の適応係数を有する固体表面の選択や創製、さらにはそれを用いることによるマイクロ熱流動場の制御に将来的につながっていく可能性を探求する。

3. 研究の方法

本研究では、高クヌッセン数マイクロ熱流動場における熱流動の制御につなげるために、境界条件を表現するパラメータである適応係数が表面加工や表面修飾により取りうる値の可能性を探索する。そのため、具体的には以下の大きく分けて3つのステップにより進める。

1) 表面加工や表面修飾による固体表面試料の作製

ナノ構造を固体表面に付与する技術は非常に多様である。これまでに得られている適応係数と固体表面の性状との関係に対する知見や、流路形状が熱流動場に与える影響の知見からの類推により、まずは適応係数が非常に小さく相互作用がほとんど行われない固体表面試料と完全に適応したとみなせる固体表面試料の作製を行う。ここでは高分子が密に並んで強固な構造を持つ分子レベルで平坦な表面や、高分子鎖の隙間が大きく開いており分子が自由に流入出できるブラシのような構造を持つ表面などが考えられる。その後、幅広い適応係数を有する固体表面試料、例えばEACとTMACの組み合わせで見た場合にどちらかが大きく他方が小さいといった変わった特徴を持つ固体表面試料などの作製、準備を行う。

2) エネルギー / 接線方向運動量適応係数(EAC/TMAC)の計測

作製した固体表面試料が高クヌッセン数熱流動場に与える影響を調べるために、適応係数の計測を行う。熱輸送特性に影響するEACと流動特性に影響するTMACを計測することによって、その固体表面試料が熱流動場に与える影響を調査する。EACは、温度の異なる二平面間の熱流束が圧力に依存することを利用して導出する。計測には申請者が既に開発した同心球殻

系の計測システムを利用する。TMAC は一定間隔の平行円板を真空中に配置し、一方を回転させたときに他方が受ける粘性力を圧力の関数として計測することでTMACの計測を行う。なお、EACとTMACは同一の固体表面試料に対して計測できるため、結果を組み合わせることで散乱形態をほぼ同定することが期待できる。

EACとTMACの組み合わせとして計測結果を整理し、従来の知見とも組み合わせることで表面性状との関係性を解明し、1)へもフィードバックしていく。

3) 熱流動場への影響の解析

実際に計測した適応係数を基に、可能であれば作製した固体表面を利用することによって意図した熱流動場を実現することを試みる。マイクロ熱流動場としてはできるだけシンプルな形状の流路とし、温度一様で流れのみ、静止流体中で熱輸送のみ、温度分布も流れも共存する場と段階的に発展させながら、作製した固体表面試料によるマイクロ熱流動場の制御性の実現可能性を調査する。

4. 研究成果

1) 表面加工や表面修飾による固体表面試料の作製

適応係数が非常に小さく相互作用がほとんど行われない固体表面試料として、ガラス及び高分子が密に並んで強固な構造を持つパリレンコーティングを施したガラス面を採用する一方で、完全に適応したとみなせる固体表面として、表面からブラシ状に重合した高分子を持つ膜を採用した。

一方で、従来は固体表面粗さの増加に伴い相互作用も大きくなると考えられてきた。しかし、影響が現れる具体的な粗さのスケールについては明らかではない上に、EACでは比較的この知見に従う計測結果がある一方でTMACでは十分な結果がないことも判明した。このことは、表面に構造を付与するにしてもどのくらいの大きさの間隔が必要であるのかについて明らかでないことを意味している。ただ、スケールが大きく異なる構造を作製するには製造方法や材質まで大きく変更しなければならないことも多くあり、実際に作製した固体表面を用いて単なる構造のスケールの影響のみを評価するのは容易ではない。そこで、一般的な工業表面が持つ表面粗さに着目し、表面粗さの異なる固体表面試料を切削や研磨などの加工法を変更させるだけで実現した。実際にいくつかの素材で検討し、特に粗さのスケールに大きな差が出た鋼材(SS400)を採用した。

これらの固体表面試料について適応係数の計測が行えるよう、実験装置で利用できる固体表面試料サイズで準備を行い、固体表面構造の計測も行った。

2) エネルギー / 接線方向運動量適応係数 (EAC/TMAC) の計測

熱輸送に関するEACは開発済みの同心球殻系の計測システムを用い、流動抵抗に関するTMACは古典的な粘性真空計の原理を利用した平行平板による剪断流れが生む粘性力を用いた計測システムを用い、それぞれのシステムを再構築して動作検証を行った上で計測を行った。また新たな計測手法の開発も行った。そして、同一の固体表面試料に対してEACとTMAC、2つの適応係数の計測を行った。

ガラス及びパリレンコーティング、またブラシ状に重合した高分子膜での計測に対しては、TMACにおいてはEACで想定されるような大きな差が生まれず、わずかに変化するだけであることが示唆され、従来の知見とは一致しない可能性が高いことが明らかとなった。一方で、工業表面においては粗さの大小が異なる固体表面試料を対象に計測を行った。EACに関しては従来の知見に従った結果が得られた一方、TMACではこれまではあまり見られない結果が得られた。表面粗さに対して、EACは単調に変化する一方、TMACは単調ではなく複雑に変化する可能性が高いことが明らかとなった。これは表面構造のスケールが表面散乱に複雑に影響することを示唆しており、従来の散乱モデルでは表現しづらいことを示している。そのため、継続的な研究が求められることが明らかとなった。

また、得られた2つの適応係数を相補的に利用することにより散乱形態の解析も行った。ここでは特に単原子分子気体の中でも分子径や分子量が小さいヘリウムにおいては、いくつかの従来の散乱モデルを適用しても適応係数の取得結果を再現できないことが明らかとなった。

3) 熱流動場への影響の解析

熱流動場への固体表面における適応係数の影響を調査できるように、温度を制御した環境において熱流動を計測できるシステムを整備した。しかし、適応係数を大きく変化させ得る組み合わせを明らかにするには至らなかった上、従来の知見からも想定されない特性が明らかとなったことから、こちらも継続した研究が求められることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高橋知宏, 山口浩樹
2. 発表標題 回転円板による接線方向運動量適応係数の計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamaguchi, M. Osada, S. Endo
2. 発表標題 Measurements of thermal and tangential momentum accommodation coefficients on a solid sample surface in high Knudsen number flows
3. 学会等名 32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口浩樹, 長田海裕, 遠藤周
2. 発表標題 適応係数から探るヘリウム分子の固体表面との相互作用
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Yamaguchi, M. Osada, S. Endo, H. Okazaki
2. 発表標題 SCATTERING BEHAVIOR INVESTIGATED FROM MEASUREMENTS OF ACCOMMODATION COEFFICIENTS
3. 学会等名 The 4th European Conference on Non-equilibrium Gas Flows (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川上大河, 山口浩樹
2. 発表標題 金属細線に対する接線方向運動量適応係数計測手法の開発
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口浩樹, 遠藤周
2. 発表標題 工業表面における接線方向運動量適応係数の計測
3. 学会等名 日本機械学会2024年度年次大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関