

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06141

研究課題名（和文）分子気体力学的なクヌッセン力により駆動するマイクロ物体輸送機構の構築

研究課題名（英文）Construction of the transport mechanism of micro-object driven by Knudsen force based on molecular gas dynamics

研究代表者

米村 茂 (Yonemura, Shigeru)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：00282004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：数値シミュレーションにおいて、マイクロ物体を異なる温度の基板に上から近づけたところ、物体の形状およびその他の条件によって、上向きあるいは下向きのクヌッセン力が得られることを確認し、その力の発生メカニズムを調査した。そして、実験により、物体に作用する力の影響を計測することに成功した。実験系を真空デシケーター内に設置することで圧力の影響も調査し、詳しく特性を解明することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体の周りで、気体の平均自由行程程度の長さ（60ナノメートル）程度で温度変化がある場合、物体に働く力がアンバランスになり、物体に力を働かせることが出来る。このことを数値シミュレーションおよび実験により確かめ、その力のメカニズムを調査した。このことへの理解が進めば、複雑な機構なしに、温度場を作るだけでマイクロ・ナノサイズの物体を輸送することが出来るようになる。マイクロ・ナノスケールでは複雑な加工が難しいため、シンプルであることが重要なポイントなのである。

研究成果の概要（英文）：In numerical simulations, we confirmed that when we put a micro-sized object near a substrate with different temperature from above, upward or downward Knudsen force is exerted on the object. Then, we investigated the mechanism of this force. In experiments, we successfully measured the effect of the force exerted on the object. By putting the experimental system into a vacuum desiccator, we investigated the effect of pressure and successfully understood its tendency in detail.

研究分野：流体工学

キーワード：分子流体工学 クヌッセン力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

物体まわりの気体に、気体分子の平均自由行程程度の長さスケールで温度分布がある場合には、気体は局所的な熱平衡ではなく、物体表面に入射し散乱する気体分子によって物体にもたらされる運動量にアンバランスが生じる。このアンバランスによって物体に働く力をクヌッセン力 (Knudsen force) と呼ぶ。このクヌッセン力により、原子間力顕微鏡のカンチレバーに大きな力が働くことが報告されていたが、その動作機構の解明は不十分であった。

### 2. 研究の目的

クヌッセン力は物体のまわりで、気体分子の平均自由行程程度の長さスケールで温度が変化する場合に現れる。大気平均自由行程が 65nm しかないことから、このクヌッセン力は物体のスケールがマイクロ・ナノスケール程度まで小さくなった時に初めて現れる。この力は通常のスケールでは発生しない現象であるためその理解はあまり進んでいない。そこで、本研究では理論及び数値解析と実験により、クヌッセン力の特性を調査し、それを利用して、物体を浮上させて駆動する輸送機構を構築することを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では、理論的考察および数値シミュレーションによるアプローチによって、クヌッセン力の動作機構を理解し、それに基づいて、有望な物体の特性を予測した上で、数値シミュレーションおよび実験を行う、検証を行う。

### 4. 研究成果

本研究で取り扱う流れ場は高クヌッセン数であるため、Direct Simulation Monte Carlo 法によって分子シミュレーションを行い、分子によってもたらされる衝撃力をカウントすることにより、物体に働く力を調べた。数値シミュレーションにおいて、マイクロスケールの物体を異なる温度の基板に上から近づけたところ、物体の形状およびその他の条件によって、浮上力あるいはダウンフォースが得られることを確認し、その力の発生メカニズムを調査した。

そして、物体に作用する力について実験的に検証するために、まずは画像計測を用いることを試み、実験系の構築を行った。数値解析結果を基に対象となる物体の候補を複数用意した。なお、圧力がパラメータとなるため真空デシケータを用いて減圧下の環境でも計測を実施した。しかし、熱伝導性が重要なパラメータとなることが明らかとなり、画像では計測できないことが明らかとなった。そこで、新たに熱伝導性にも着目して物体の候補をさらに複数追加した。また画像計測と併せて力を計測する工夫も実施した。しかし、厚みも重要なパラメータとなることが明らかとなり、計測が困難であることが判明した。以上の結果を踏まえ、重力の影響を排除するために水平面内の回転を用いた計測を採用し、新たな実験系を設計し、構築を行った。その結果、物体に作用する力の影響を計測することに成功した。実験系を真空デシケータ内に設置することで圧力の影響も調査し、詳しく特性を解明することに成功した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1 . 発表者名 Sushella Edayu Mat Kamal, Yoshiaki Kawagoe, and Shigeru Yonemura
2 . 発表標題 DSMC Simulation of a Gas Flow Around a Solid Body with Microstructure Immersed in a Gas with Temperature Gradient
3 . 学会等名 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shigeru Yonemura and Yoshiaki Kawagoe
2 . 発表標題 A Study on a Force Exerted on Microscale Object due to a Non-Uniform Temperature Field
3 . 学会等名 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Clint John Cortes Otic and Shigeru Yonemura
2 . 発表標題 DSMC Simulation of the Vapor Flow Induced below a Leidenfrost Droplet over Micro-sized Asymmetric Surfaces
3 . 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sushella Edayu Binti Mat Kamal and Shigeru Yonemura
2 . 発表標題 Effect of Geometrical Parameters on Knudsen Thermal Force Exerted on Solid Body
3 . 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Clint John Cortes Otic, 米村 茂
2. 発表標題 マイクロスケールの非対称な加熱表面とライデンフロスト水滴の間の気体の動力学
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Clint John Cortes Otic, 米村 茂
2. 発表標題 マイクロからサブミクロンスケールの非対称形状をもつ過熱表面上で自己推進するライデンフロスト液滴の下の蒸気流の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Clint John Cortes Otic, 米村 茂
2. 発表標題 マイクロスケールの非対称形状表面上のライデンフロスト液滴の下に誘起される蒸気流について
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米村 茂, 川越吉晃
2. 発表標題 非一様な温度場によってマイクロ物体にはたらく力に関する研究
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Clint John Cortes Otic, 米村 茂
2. 発表標題 Understanding the Self-propulsion Phenomenon of a Leidenfrost Droplet on Micro-ratchet Surface using DSMC Simulation
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第54期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米村 茂
2. 発表標題 気体温度勾配により物体に誘起されるクヌッセン力のDSMC法による研究
3. 学会等名 日本原子力学会 2018年春の年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 オテイク・クリントジョン, 米村 茂
2. 発表標題 非対称表面上でのライデンフロスト物体の自己推進に関する研究
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 オテイク・クリントジョン, 米村 茂
2. 発表標題 微細なラチェット表面近傍に置かれた一様加熱されたマイクロビームに働く力に関する数値的研究
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米村 茂
2. 発表標題 マイクロ・ナノスケール気体流れに現れる物理現象と数値シミュレーション
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会 真空技術部会：多様な気体の流れの構造とその応用（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Clint John Cortes Otic and Shigeru Yonemura
2. 発表標題 A Numerical Study on the Behaviour of a Sublimating Leidenfrost Solid on Micro-ratchets
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 オティック・クリントジョン, 米村 茂
2. 発表標題 ラチェット表面におけるライデンフロスト物体の自己推進に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019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
研究 分担者	山口 浩樹  (Yamaguchi Hiroki)  (50432240)	名古屋大学・工学研究科・准教授    (13901)	