

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04279

研究課題名(和文) マイクロ・ナノスケールの表面構造を用いて熱的に駆動する動力機構の構築

研究課題名(英文) Construction of the thermally driving mechanism using micro/nanoscale surface structure

研究代表者

米村 茂 (YONEMURA, Shigeru)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：00282004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ノコギリ歯形状の表面構造を持つ高温基板に気体分子の平均自由行程程度まで低温物体を近づけた場合に、両物体を接線方向にスライドさせるようにクヌッセン力が働くことを数値実験によって示し、その大きさを理論的に予測することに成功した。この理論によりこのクヌッセン力が働くメカニズムが明確になり、それに基づいて、より強い力を引き出す表面構造の形状を提案し、もとのノコギリ歯の2倍以上のクヌッセン力が得られることを示した。また、これまでノコギリ歯形状の基板で現れるクヌッセン力は数値計算においてのみ確認されてきたが、本研究で構築した実験系においてクヌッセン力が働くことを再現し、その大きさを計測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

Crookesのラジオメーターの駆動力はクヌッセン力的一种と言えるので、クヌッセン力は非常に古くから研究されてきたと言える。また、近年の微細加工技術の向上から、MEMSやNEMSなどのマイクロデバイスの発展が著しい。その構造の微細化に伴い、クヌッセン数が高くなるため、クヌッセン力が顕在化し、その利用が期待できる。しかし、クヌッセン力を駆動力に利用したデバイスはまだほとんど世に出ていない。そのような状況の中で、本研究では、クヌッセン力を用いた新たな一つの動力機構を提案した。これは、学術的にも応用面においてもインパクトが大きいことであると言える。

研究成果の概要(英文)：By numerical experiments, we showed that in the case when a cold object is located within a distance of about mean free path of gas molecules from the ratchet surface of a hot substrate, Knudsen forces are exerted on the two bodies in such a way to slide them. Furthermore, we succeeded in predicting the force theoretically. This theory revealed the mechanism of generation of this Knudsen force. Based on the mechanism, we proposed a surface structure which induces a stronger Knudsen force and showed that we can obtain the force more than twice as strong as the force for usual ratchet. Moreover, although in the past this Knudsen force had been confirmed only in the numerical experiments, in this project we successfully confirmed this force in practical experiments and measured its strength.

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 希薄気体力学

### 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。

研究代表者らはこれまでの研究により、高温のノコギリ歯型のラチェット表面と低温の物体を分子の平均自由行程程度まで近づけた時に、二つの物体をスライドさせるような力が働くことを分子シミュレーションにより明らかにしてきた。我々の分子シミュレーションにより、クヌッセン力のクヌッセン数による依存性や表面に沿った温度勾配との相関などが明らかになっていた。しかし、それらで分かることは現象論的な理解であり、気体を構成する分子のどのような運動や衝突に基づき、クヌッセン力が生成されるのか明確に説明できていなかった。

### 2. 研究の目的

上述の二つの物体をスライドさせる接線方向クヌッセン力をうまく利用すれば、例えば、表面にラチェット形状を加工したレールの上で物体を輸送したり、機械装置の中に使えば、機械要素を駆動したりすることができるようになることを期待できる。本研究では、この物体に働くクヌッセン力のメカニズムを理論的に明らかにする。そして、そのメカニズムを理解することによって、その生成に有利な表面構造を検討し提案する。

### 3. 研究の方法

物体に働く応力は、表面に入射し散乱する膨大な数の分子によって運動量をもたらされた結果として得られる。分子が、分子間衝突を起こした後に入射した場合には、その衝突位置の流れの流速と温度を反映した運動量を、あるいは別の物体と衝突した後に分子間衝突せずに物体表面に入射した場合には、分子が衝突した物体の運動速度と温度を反映した運動量をいま考えている物体表面に持ち込むと考えられる。このため本研究では、分子シミュレーションを行い、入射分子によってもたらされる応力と、分子が入射直前にどこで何と衝突したかを詳細に分析する。合わせて、この分析を吟味しながら、応力生成のメカニズムの理論を構築する。そして、理論で得た知見に基づき、より良い表面形状を検討し、分子シミュレーションによりその効果を確認する。また、並行して実験を行い、現象を現実再現することを試みる。

### 4. 研究成果

研究代表者らは、図1のように、表面にノコギリ歯状の微細構造を持つ高温基板に低温物体を近づけると両物体をスライドさせる力( $\tau_{Kn}$ )が表面に働くことをこれまでに明らかにしていたが、この現象は熱流体力学で説明できず、発生メカニズムも性質もよく分かっていなかった。

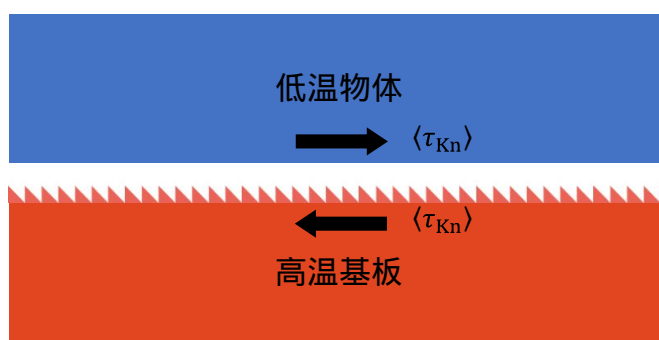


図1：表面微細構造を持つ高温基板と低温物体に働く接線方向クヌッセン力

接触していない物体と基板の間に力が働くということは、両者に挟まれた空間にある気体分子が、一方からもう一方に運動量を伝えているからにはほかならない。そこで本研究では、高温基板と低温物体の間の空気の気体分子の運動を追跡する分子シミュレーション (数値実験) を行い、図2に示すように、両物体の温度差により気体流れが両面間で誘起され、図3に示すように、物体の表面で入・反射する気体分子によって、両物体をスライドさせる接線方向の力( $\tau_{Kn}$ )が発生することを確かめた。

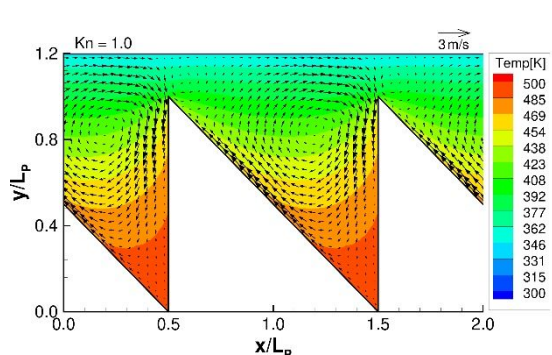


図 2：両面間の温度分布と熱的誘起流れ

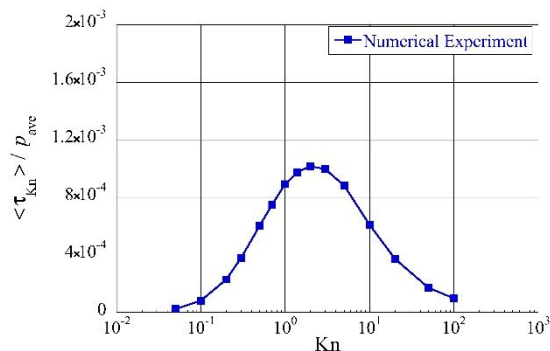


図 3：接線方向クヌッセン力( $\tau_{Kn}$ )

本研究では、平均自由行程 $\lambda$ と高温基板と低温物体の間の距離 $g$ の比をクヌッセン数 $Kn = \lambda/g$ と定義し、これを図 3 のグラフの横軸としている。数値実験の結果、力( $\tau_{Kn}$ )はクヌッセン数 $Kn$ が 0.1 から 100 の間で顕著となり、クヌッセン数 $Kn$ が 2 程度のとき最大となることが分かった。このように、この力はクヌッセン数が 1 程度の大きさを持つ場合にのみ現れるためクヌッセン力と呼ばれている。このクヌッセン力( $\tau_{Kn}$ )は最大で周囲の大気圧 $p_{ave}$ の 1000 分の 1 ほどの強さになるが、これは 1cm の高さの水柱を水平方向に重力加速度で加速できる力であり、決して小さくない。また図 2 に示す流れもクヌッセン数が 1 程度の大きさを持つ場合にのみ両物体の温度差により熱的に誘起され、熱流体力学では予測できない流れである。

本研究ではこの力の理論を構築するにあたって、物体表面に入射する分子の過去の経験に注目した。低温物体表面に入射する分子は、高温基板表面で入・反射した後、他の分子と衝突すること無く低温物体表面に直接入射する分子のグループと、気体中で他の分子と衝突してから低温物体表面に入射する分子のグループに大別できる。高温基板で入・反射した分子は基板で加熱され、大きな運動量を持つため、それ以外の分子と区別し、二つの分子グループによってもたらされる力の理論式を構築した。図 4 に示すように、この理論式によって見積もられる力と、図 2 で見られた熱的誘起流れによって物体表面に働く粘性力を重ね合わせて得られる力の表面分布(赤線)は、数値実験によって得られた力の表面分布(青線)と良好に一致した。ここで、図 4 の下部に描かれたノコギリ歯形状は基板表面のノコギリ歯の位置を示している。この一致により本理論の正しさが証明された。そして、理論を構築した際の考え方から、高温のノコギリ歯状の基板表面で反射された高エネルギー分子が他の分子と衝突することなく、大きな運動量を持ったまま低温物体の表面に入射することが接線方向クヌッセン力を引き起こす最も大きな要因であることが分かった。これが、ラチェット表面で物体をスライドさせる力の発生メカニズムである。

図 1 および 2 から分かるように、ノコギリ歯には右向き斜面と左向きの垂直面の二つがあり、これらの表面で反射された高エネルギー分子のうち、途中で分子間衝突を経験せずに低温の物体表面に入射できた分子が高い運動量を物体表面にもたらし、力を発生させる。右向きの斜面から放出された分子は主として右向きに放出され、左向きの垂直面を放出された分子は主として左向きに放出される。平均自由行程の数倍の距離になると、ほとんどの分子は途中で分子間衝突を経験し、物体表面に運動量をもたらしることができない。上述のメカニズムに基づけば、左向きの面を物体表面から遠ざけると、その面から放たれた分子が物体表面に到達することができなくなり、これらの分子が左向きの運動量を物体表面にもたらしことを妨げることができるようになる。結果として、右向きの斜面から放たれた分子がもたらす右向き運動量が左向きの面から放出される分子がもたらす左向き運動量で相殺されなくなるので、右向きの力が大きくなることになるだろう。そのような観点から図 5 (a) のノコギリ歯 (Ratchet) のバリエーションとして、左向きの面を物体表面から遠ざけるためにノコギリ歯の尖端の角をシャープにした (b) Modified Ratchet、そして Modified Ratchet の角を極限まで小さくした (c) Oblique Plate、そして、厚みのない Oblique Plate は現実には不可能なので、ある程度の厚みを持たせた (d) Oblique Ridge を考え、これらの場合に働く接線方向クヌッセン力を調べた。その結果、厚みの無い板を傾けた表面形状の Oblique Plate が最も強い接線方向クヌッセン力を生むことが明らかとなった。上述したように、明らかとなったメカニズムから左向きの面が物体表面から遠い方が右向きの接線方向クヌッセン力を得るのに有利になると予測されたが、その予測の通り、左向きの面が物体表面から最も遠い Oblique Plate で最大の接線方向クヌッセン力が得られた。

また、これまでノコギリ歯形状の基板で現れるクヌッセン力は数値計算においてのみ確認されてきたが、本研究で数値実験の系を模して構築した実験系においてクヌッセン力の生成を再現し、その力の大きさを計測することに成功した。今後、この計測についてさらに研究を進め論文にまとめる。

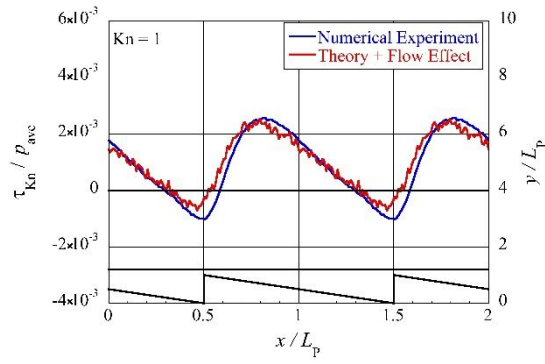


図 4：接線方向クヌッセン数の表面分布

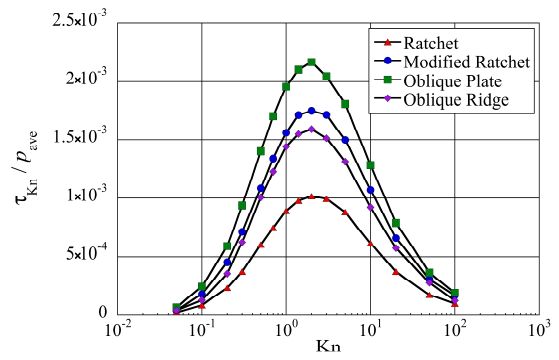


図 6：異なる表面微細構造で得られる  
接線方向クヌッセン数

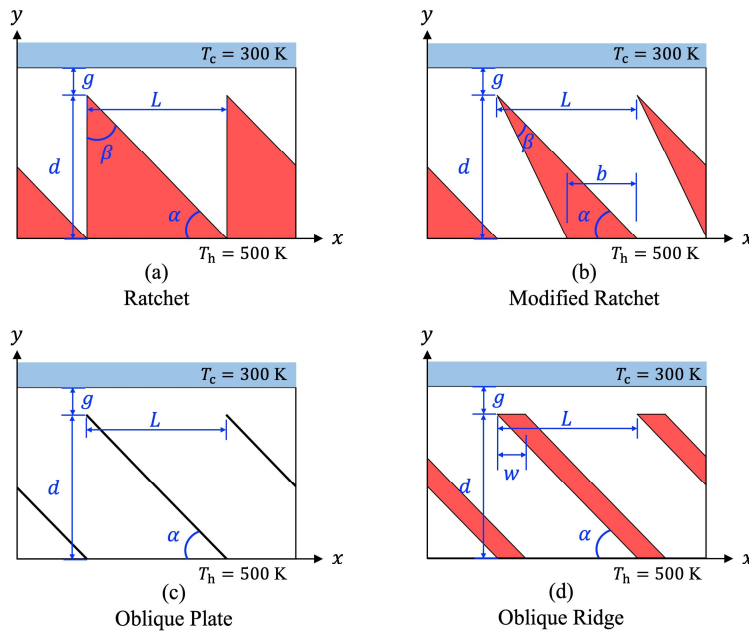


図 5：表面微細構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Clint John Cortes Otic and Shigeru Yonemura	4. 巻 13
2. 論文標題 Effect of Different Surface Microstructures in the Thermally Induced Self-Propulsion Phenomenon	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 871
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi13060871	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Clint John Cortes Otic and Shigeru Yonemura	4. 巻 13
2. 論文標題 Thermally Induced Knudsen Forces for Contactless Manipulation of a Micro-Object	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1092
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi13071092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Clint John Cortes Otic and Shigeru Yonemura(米村 茂)	4. 巻 34
2. 論文標題 Mechanism of tangential Knudsen force at different Knudsen numbers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 72010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0096324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Yonemura and C. J. Otic
2. 発表標題 On the Mechanism of the Thermally Induced Tangential Knudsen Force
3. 学会等名 32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (RGD32) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C. J. Otic, T. Ohara, and S. Yonemura
2. 発表標題 A Computational Study on Thermally Induced Knudsen Forces for a Non-Contact Controlling Device
3. 学会等名 32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (RGD32) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 オティック・クリントジョン, 小原 拓, 米村 茂
2. 発表標題 熱的に誘起されるクヌッセン力を用いたピンセット様装置に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 オティック クリントジョン, 小原 拓, 米村 茂
2. 発表標題 表面微細構造をもつ加熱基板近傍に置かれた物体に誘起される接線方向クヌッセン力の源
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 オティック クリントジョン, 小原 拓, 米村 茂
2. 発表標題 表面微細構造によって誘起される接線方向クヌッセン力のメカニズムに関する一考察
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 Clint John Cortes Otic, Taku Ohara and Shigeru Yonemura
2. 発表標題 On the Tangential Knudsen Force Induced by a Heated Substrate with Surface Microstructure
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米村 茂
2. 発表標題 マイクロ・ナノスケールの気体熱流動に関する研究
3. 学会等名 中部大学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021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 異なる表面微細構造がもたらす接線方向Knudsen力への影響
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020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 異なる表面微細構造によって誘起される接線方向クヌッセン力に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Clint John Cortes Otic and Shigeru Yonemura
2. 発表標題 Self-propulsion of an Object Placed Close to Heated Substrate with Surface Microstructure
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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)	

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
---------	---------