

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03946

研究課題名（和文）マイクロ熱流動場における実在表面に対応した境界条件の研究

研究課題名（英文）Study of boundary conditions for engineering surfaces in micro thermal-fluid fields

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：クヌッセン数が大きいマイクロ熱流動場には、固体表面の境界条件が大きく影響を与える。このような熱流動場で利用される境界条件モデルは、パラメータとして分子の固体表面への平均的な適応割合を表す適応係数が良く利用される。そこで、本研究では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（EAC）と流動抵抗に関する接線方向運動量適応係数（TMAC）を計測するシステムを構築した。また既存のデータをもとに、実験で計測した適応係数から境界条件モデルのパラメータを決定する方法について解析した。計測した適応係数から実際にパラメータを導出することで、境界条件モデルについての検討を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ熱流動場においては、固体表面での状態を決める境界条件モデルが重要な役割を担う。この境界条件モデルについて検討し、二つの適応係数を計測することによって境界条件を決定できることを明らかにした。そして、それを実現するために、同一の固体表面試料に対して二つの適応係数の計測手法を開発するとともに、適応係数から境界条件モデルのパラメータを決定する方法を解析した。

研究成果の概要（英文）：In a micro-thermal flow field with a large Knudsen number, the boundary conditions at solid surfaces have a large influence. The boundary condition in such a field is usually modeled using a parameter called the accommodation coefficient, which represents the average degree of accommodation of gas molecules to the solid surface. In this study, we developed systems to measure the energy accommodation coefficient (EAC) for heat transport and the tangential momentum accommodation coefficient (TMAC) for flow resistance on the same solid surface sample. A method to determine the parameters of the boundary condition model from the measured accommodation coefficients was studied based on the data in literature. Finally, we obtained the parameters from our measured data, and the boundary condition model was studied.

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 散乱分布

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロ熱流動場は、マイクロ・ナノデバイスのみならず、多孔質体内部の微小空間なども該当するため、様々な工業製品において見受けられるようになってきた。このような微小スケールにおける気体流れは、多くの場合は流体における分子の平均自由行程が場の代表長さとは比べて無視できない「高クヌッセン数流れ」となる。このような高クヌッセン数流れでは流体を連続体ではなく分子の運動として理解する必要があり、通常の流体力学とは異なった取り扱いが必要になる。そして、クヌッセン数が大きいことから、流体中の分子は他の分子との衝突だけでなく境界での衝突による影響を大きく受ける。それに加え、微小スケールであることから、体積が大きさの3乗に比例して小さくなるのに比べて表面積は2乗にしか比例しないため、比表面積が非常に大きいという特徴もある。そのため、マイクロ熱流動場においては固体表面における境界条件が特に重要となる。この結果として、例えば数値解析からは境界条件のパラメータの値を変化させるだけで流れ方向そのものを逆転させることができることも報告されている。

高クヌッセン数流れにおいては、流体の内部を運動している分子の観点からすると、固体表面に対して衝突して散乱する過程こそが境界条件と言える。分子はこの散乱過程において、固体表面とエネルギーや運動量を交換し、固体表面の状態の影響を受ける。ただ、影響を受ける程度は様々であり完全に固体表面の状態に適応するとも限らず、衝突後の分子の状態は流体の状態にも依存することが多い。分子が平均的に固体表面の状態に適応する割合は、適応係数として表現することができる。適応係数は適応する物理量に応じて定義され、エネルギー適応係数(EAC)や接線方向運動量適応係数(TMAC)などが良く知られている。EACはエネルギー輸送に関連することから温度分布と、TMACは運動量輸送に関連することから流量と密接に関係する。一般的に適応係数は0~1の値をとるが、値がわずかに変化するだけでも温度分布や流量に与える影響は大きくなることが知られている。そのため、数多くの計測データが報告されており、現在もいくつかの研究グループにおいて実験的な計測が行われている。

この適応係数は高クヌッセン数流れにおいて分子の散乱後の速度分布を与える境界条件モデルのパラメータとしても広く利用されている。境界条件モデルにおいて特に良く用いられているのはMaxwellモデルとCercignani-Lampis(CL)モデルの二つであり、どちらにも適応係数が必要となる。ただ、Maxwellモデルではパラメータとして1つの適応係数を利用するため、非常にシンプルである反面、EAC、TMACなど様々な適応係数のどれを利用したら良いのか明らかでない。一方、CLモデルにおいてはTMACと法線方向の速度に基づく適応係数の2つがパラメータとして利用されるが、後者の適応係数の計測手法が存在しないためにこれまでに計測された値はなく、利用しづらい。そのため、数値解析においては完全適応を仮定するか適応係数に対するパラメータスタディが行われることが多く、せっかく適応係数の計測が行われてもそのデータは利用できていない。ただ、適応係数について原点に立ち戻って考え直すと、分子の固体表面における散乱過程という同じ現象において統計平均量を取る際に、速度の大きさによるものがEACであり、速度の固体表面の接線方向成分によるものがTMACである。そこには関連性があるはずであり、それを利用することによって、実在表面に対しても境界条件を明らかにすることが可能になると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、同じ固体表面試料に対して、EACとTMACの2種類の適応係数を計測することで、同じ散乱過程に対して2つの異なる統計平均量を取得し、それらの値を用いて散乱過程を解析することにより一般的な固体表面試料に対する高クヌッセン数流れの境界条件モデルを提案することを目指す。

これまではEACは熱、TMACは流体の問題として捉えられてきたこともあり、同じ固体種に対するデータですら非常に限られており、同じ固体表面試料を対象とした計測は実現されていない。計測手法に関してもそれぞれの原理に基づいて開発されており、EACは流体中の分子間衝突がほとんどない自由分子流領域において金属細線に対する計測が主に行われてきた一方で、TMACは主に連続体からわずかに高クヌッセン数流れの効果が現れる滑り流領域において管内流れの流量計測から速度滑り係数を求めることによって間接的に導出されてきた。つまり、固体試料形状のみならず流れの様相も異なる手法がそれぞれで用いられてきた。そこで、まずは同じ固体表面試料形状を用いることができ、同じ流れの領域における計測を実現する手法を確立することによりEACとTMACに関するこの問題の解決を目指す。統計平均量である適応係数から散乱過程を解明するためには、同一の固体表面試料に対して計測した複数の物理量に対する適応係数を用いて解析を行うことが不可欠であると考えられる。

そして、これらの計測結果を基に境界条件を明らかにする。まずは既存の境界条件モデルを活用し、パラメータの決定方法を確立することを目指す。現存する境界条件モデルでは計測結果を再現できない場合には、境界条件モデルの改良も検討する。さらに、様々な固体表面試料に対する解析を基に、EACとTMACのどちらか一方の計測結果からのパラメータの推定も目指す。どちらか一方の計測結果からのパラメータ推定が実現できれば、これまで蓄積されてきたEACとTMACの計測結果も有効に活用できるようになる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 同一表面に対する実験的計測

EAC と TMAC の 2 種類の適応係数を同一の固体表面試料に対して計測するために、計測手法と計測システムの開発を行う。EAC に関しては、自由分子流領域においては温度の異なる二平面間の熱流束が圧力と EAC に依存することを利用して導出する。計測原理は従来と同じであるが、固体表面試料の形状を従来の細線から平板状に変更するために、既に開発した同心球殻系の計測システムを利用する。TMAC に関しては、滑り流領域において計測された速度滑り係数から換算してきたため、自由分子流領域において直接計測する新しい手法が求められる。そこで、古典的な粘性真空計を参考に、一定間隔に配置した 2 枚の平行円板で、一方を回転させることによる剪断流れから他方が受ける粘性力を自由分子流領域において圧力の関数として計測して TMAC を求めることを試みる。この計測手法では円板状の固体表面試料を用いることになり、EAC の計測と同一の固体表面試料を用いることが可能となる。また、滑り流領域における EAC と関連する温度飛躍係数、TMAC と関連する速度滑り係数との関係性も調べるために、従来同様の金属細線を用いた温度飛躍係数の計測システムを構築するとともに、円管軸上に金属細線を配置することにより速度滑り係数が計測できる計測システムについても開発を行う。これらによる知見だけではなく、清浄な結晶面や分子線散乱実験の既存の豊富な知見も解析においては活用する。

#### (2) 境界条件モデル

得られた EAC と TMAC、温度飛躍係数と速度滑り係数を再現できるような境界条件モデルについて明らかにすることを目指す。そのために、まずは既存の境界条件モデルにおけるパラメータ決定法を確立する。既存の境界条件モデルには EAC と TMAC をパラメータとして利用しているものはないため、これらの適応係数をパラメータに結び付ける関係性を解析する。併せて、これらの適応係数、温度飛躍係数と速度滑り係数の様々な組み合わせをパラメータと結びつけることも検討する。ただ、これらの計測結果は統計平均量であることから、うまくパラメータを逆算できないことも考えられる。そのように既存の境界条件モデルでは計測結果を再現できない場合には、境界条件モデルの改良も視野に入れる。また、従来の知見をできるだけ有効に活用するためにも、様々な固体表面試料に対する解析を実施し、EAC と TMAC のどちらか一方の結果のみからでも境界条件を決定できる可能性についても検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 計測手法・計測システムの開発

EAC の計測に関しては、既に開発済みの同心球殻系の計測システムがあるため、これまで計測を行ってこなかった非金属や表面性状の異なる試料など様々な固体表面試料に対して計測を行い、計測システムの精度検証を行った。その結果、非金属や表面性状が異なる試料に関しても問題なく計測できることが明らかとなった。また、TMAC で利用する固体表面試料は大きいほうが望ましいため、サイズアップした装置も併せて構築した。また、滑り流領域において EAC の関数となる温度飛躍係数を利用する可能性も検討するため、金属細線を用いた計測システムも構築した。固体試料表面は金属細線である必要があり選択肢が少ないことから、既存のデータが多く検証も行いやすい白金線を利用することとした。計測結果を比較することにより、こちらの計測システムについても問題なく稼働できることを確認した。

TMAC の計測に関しては、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構築した。粘性力は理論通り一方の平板の回転数と比例関係にあることが確認された一方、圧力に対しては比例する傾向は見られたものの外れる結果も見られた。改善するためには、真空装置のものを可能な限り減らすこと、平行度を保った上で平板間の距離をできる限り小さくすることが必要であると考えられる。しかし、低精度ながらも計測が可能であり、TMAC を導出できることが確認された。なお、更なる計測システムの改良が引き続き求められる。また、滑り流領域において TMAC の関数となる速度滑り係数の計測手法についても検討を行った。自由分子流領域の計測が容易ではないことから、速度滑り係数の利用の必要性も高いと考えられる。そこで、EAC で利用する固体表面試料と同一の計測が実現できるよう、金属細線を円管同軸上に配置して金属細線表面における速度滑り係数の計測を試みた。しかし、意図した傾向は計測できたものの、十分な精度を持って TMAC を導出するためには更なる改良が必要であることが分かった。

#### (2) 境界条件モデルのパラメータ決定法の確立

得られた EAC と TMAC を比較すると、特性も大きさも明らかに異なっていることから、パラメータとなる適応係数が 1 つしかない Maxwell モデルでは不十分であることが確認された。そこで、有望である CL モデルのパラメータを EAC、TMAC、温度飛躍係数、速度滑り係数から決定するための方法を求めるため、既存の数値解析結果や計測データにより検討した結果、エネルギーに関する EAC と温度飛躍係数のいずれかと接線方向運動量に係る TMAC と速度滑り係数のいずれかを組み合わせることにより精度よくパラメータが決定できることを明らかにした。また、残念ながら単一の適応係数のみからでは精度よくパラメータを決定することは難しいことも明らかとなった。

### (3) 境界条件モデルのパラメータ決定

最後に、計測した EAC と TMAC の結果を用いて確立した決定法に従ってパラメータを導出したところ、Ar においては問題なく導出できることが確認された。このことは、平衡状態から大きく外れていない流れ場においては CL モデルが十分に利用できる可能性を示唆している。ただし He のように分子量の小さい気体に対しては条件によってはうまくパラメータを決定できないことがあることも明らかとなった。He を用いた計測は、漏れの影響も大きい上に物性値から考えても計測自体が困難であることから、計測システムの高精度化が実現できた上での更なる検証が求められる。速度滑り係数や温度飛躍係数を用いたパラメータの決定も試みたものの、精度は適応係数を用いるよりも悪化することが明らかとなった。

以上から、境界条件モデルとしては高精度に計測された EAC と TMAC を用いてパラメータ決定された CL モデルを用いれば良いことが示された。今後の更なる高精度なデータの蓄積による検証が望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamaguchi Hiroki, Kito Kenji	4. 巻 11
2. 論文標題 Measurement of Heat Transfer from Anodic Oxide Film on Aluminum in High Knudsen Number Flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 234 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi11030234	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 H. Yamaguchi, J. Hosoi, Y. Matsuda, T. Niimi	4. 巻 160
2. 論文標題 Measurement of conductive heat transfer through rarefied binary gas mixtures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 164-170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2018.11.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H. Yamaguchi, K. Kitou
2. 発表標題 MEASUREMENT OF HEAT TRANSFER IN HIGH KNUDSEN NUMBER FLOW FROM ANODIC OXIDE ALUMINUM FILMS
3. 学会等名 International Symposium on Thermal Effects in Gas flows In Microscale (ISTEGIM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口浩樹, 鬼頭憲司
2. 発表標題 陽極酸化皮膜における熱的適応係数の計測
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 山口浩樹, 森大騎, 松田佑, 新美智秀
2. 発表標題 接線方向運動量適応係数に対する流路材質の影響
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 山口浩樹, 松田佑, 新美智秀
2. 発表標題 マイクロスケール気体流れに対する実験的計測
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018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	松田 佑  (Matsuda Yu)  (20402513)	早稲田大学・理工学術院・准教授    (32689)	

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