

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14157

研究課題名(和文) すべり流における温度ジャンプ係数の計測手法の開発

研究課題名(英文) Development of Measurement method for Temperature Jump Coefficient in Slip Flow 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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、すべり流領域の固体表面において生じる温度ジャンプに対する計測手法の確立を目指した。そして、混合ガスの混合比に対する温度ジャンプ係数の特性の調査を試みた。同心球殻系の装置を利用した計測を試みたが、説明が困難な結果が確認された。そのため、装置内部に対する詳細な熱輸送解析を実施し、同軸円筒系の装置の設計、構築を行った。併せて、混合ガスの熱的適応係数の計測から温度ジャンプ係数の混合比に対する特性を推定した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a method to measure the temperature jump in the slip flow regime was studied, and characteristics of the temperature jump coefficient for gas mixtures as a function of the molar ratio was investigated. The concentric spherical shells geometry was employed for the measurement; however, it was hard to explain measured values theoretically. Therefore, the heat transfer in the apparatus was studied in detail, and a measurement system with the coaxial cylinders geometry was constructed. The thermal accommodation coefficients for gas mixtures were measured, and characteristics of the temperature jump coefficient were estimated.

研究分野：分子流体工学

キーワード：高クヌッセン数流れ 境界条件 熱輸送 温度ジャンプ係数 熱的適応係数

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロ・ナノテクノロジーの成長とともに、熱流動場を利用した様々なマイクロ・ナノデバイスも開発、利用されるようになってきた。ただ、マイクロ・ナノデバイスには駆動源としてエネルギーが供給されており、一部は熱となってデバイスにおける温度分布を生み出すため、デバイス内部の熱流動場の状態を変え、結果として性能を大きく変化させてしまう恐れがある。そのため、放熱を左右するデバイスと周囲流体の間における熱輸送に対する理解が非常に重要となる。特にデバイスが周囲の他の部材と近接していたり、気体を利用していたりする場合には、流体中の分子が他の分子と衝突せずに移動できる平均的な距離である平均自由行程が、系の代表長さである他の部材との距離や流路の幅に比べて無視できない大きさを持つようになり、平均自由行程と系の代表長さに対する比で定義される無次元数であるクヌッセン数が大きい「高クヌッセン数流れ」になる。このような流れにおいては特異な現象が生じることが知られており、その特性解明は重要な課題である。

高クヌッセン数流れはクヌッセン数の大きさに応じていくつかの流れ領域に分類されるが、特に実際のマイクロデバイスにおいて現れることが多いと考えられる、クヌッセン数が比較的小さく連続流に近いすべり流領域においては、通常の連続流と同じように解析できるものの固体表面における境界条件として速度が0とならない速度すべりや温度が壁面温度と一致しない温度ジャンプを考慮する必要があることが知られている。そのため、これらのすべり境界条件の大きさを表す、それぞれの現象に対する係数が解析において必須となる。なお、これらの係数は、流体の分子種、固体表面の材質や表面性状、温度など様々なパラメータに影響を受けることが知られている。

熱流動場に対するすべり境界条件としては、等温での圧力勾配による圧力駆動流に対する速度すべり係数、温度勾配による熱駆動流に対する熱的すべり係数、静止流体における熱輸送に対する温度ジャンプ係数の3つがある。特に流動抵抗に関係する速度すべり係数と熱輸送に関係する温度ジャンプ係数は重要であり、速度すべり係数はマイクロ流路を通過する質量流量の計測やスピニングローターゲージによって、温度ジャンプ係数に関しては真空中での熱流束の計測から、導出されてきた。しかし、未だにデータは十分ではなく、特に産業などで広く一般に利用されている混合ガスに対しては、ほとんど計測結果が存在しない。そこで申請者らは、単原子分子気体の混合ガスに対して計測を行い、混合比の関数としての速度すべり係数の変化を解析した。しかし、温度ジャンプ係数に関しては、数値解析が行われているだけであり、実験結果が渴望されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、連続流領域よりもわずかに希薄効果が現れる少しだけクヌッセン数が大きいすべり流領域において熱輸送の境界条件を表す温度ジャンプ係数を実験的に計測する手法の確立を目指す。そして、その計測手法を用いて、混合ガスの温度ジャンプ係数が混合比に対してどのような特性を持っているかを計測して明らかにしていく。

混合ガスは実用上も広く利用されており、得られた実験結果と特性の知見は有意義である。それだけではなく、混合ガスの温度ジャンプ係数はこれまで数値解析で見積もられてきたものの比較検証するための実験結果が報告されておらず信頼性が十分であるとは言えなかったが、実験結果により検証できるようになることで利用されているモデルなども含めて数値解析の精度向上にも寄与することが期待できる。その結果として、すべり流領域における熱輸送現象の解析は飛躍的に進むことが期待できる。その知見はマイクロデバイス開発に利用することができるだけでなく、マイクロスケールにおける熱流動の基礎的な理解の進展にも寄与することが期待され、分野全体の進歩への貢献が可能となる。

### 3. 研究の方法

#### 1) 同心球殻系による計測と解析

申請者らは、自由分子流領域となる高真空中における熱輸送を圧力の関数として計測することによって、熱的適応係数を計測してきた。熱的適応係数は、分子の運動として考えたときの気体分子と固体表面との平均的なエネルギー輸送効率を表す係数であり、連続体として考えたときの気体と固体表面との熱輸送に関連する温度ジャンプ係数と密接な関係がある。そのため、同じ計測システムを利用して温度ジャンプ係数の計測の実現を目指す。

この計測システムは、独自に開発した同心球殻系の構造をしている。球形の真空容器の中心部に、容器の半径に対して1/10程度の大きさの平板ヒーターを設置し、ヒーターの両面に固体試料を真空グリスにより貼り付ける。ヒーターを通电加熱し、供給している電力を計測することによって、固体試料の表面から真空容器に輸送される熱流束を計測する。計測した熱流束は、真空容器内に含まれる気体を通過する熱伝導と固体試料表面からの熱輻射、ヒーターに電力を供給するための導線を通じた熱伝導の合計となっている。このうち、熱輻射と導線を通じた熱伝導は容器内の流体の状態に依存しない。一方で気体を通過する熱伝導は、連続体領域ではフーリエの法則に従う一定値となるが、自由分子流領域においては分子運動によって熱輸送が行われるために分子の数密度、つまり圧力に比例するようになる。そこで、自由分子流領域において圧力の関数として熱伝導による

熱輸送量を計測することにより、固体表面における熱的適応係数を導出できる。

本研究では、相対的に圧力が高いすべり流領域において同様の熱輸送量を計測し、解析することによって温度ジャンプ係数の導出を目指す。ただ、あまり圧力が高すぎて連続流領域に近くなると対流の影響が無視できなくなる恐れがある。そこで、熱流束の圧力に対する変化を見ながら、対流の影響がない範囲で計測した熱流束の値だけを利用して、温度ジャンプ係数を導出することが可能かどうかを検討する。併せて、全ての流れ領域に対して同心球殻系の熱輸送に関する理論的解析を行う。そして、温度ジャンプ係数の導出に必要な条件を洗い出すとともに、導出方法も検討する。もしヒーター形状により計測が困難であると考えられる場合には、ヒーター形状の変更を検討する。同心球殻系における実現が現実的ではないと評価された場合には、従来から熱的適応係数の計測に広く利用されてきた同軸円筒系へと変更する。同軸円筒系の計測システムは金属細線を固体表面として採用するため、固体表面の選択の自由度が低く、交換が容易ではないという問題があるものの、理論解析が容易である対称な系を実現できるという利点がある。

## 2) 混合ガスに対する計測

実際にすべり流領域における熱流束を計測する。圧力を上げながら計測を実施し、特に対流の影響に注意する。また、単原子分子気体の混合ガスに対する計測を、混合比を細かく変化させながら行い、温度ジャンプ係数への影響を調査する。

また、同じ計測システムを用いて、圧力を低くすることにより熱的適応係数の計測を行うことができる。そこで、温度ジャンプ係数の計測に成功したら、自由分子流領域に近い圧力条件での熱流束も計測することにより熱的適応係数の導出も行う。同じ気体分子と固体表面の組み合わせに対する、温度ジャンプ係数と熱的適応係数が計測できるため、その関係性に対する知見が得られることが期待できる。

## 4. 研究成果

まず、同心球殻系の計測システムを用いて、従来の自由分子流領域に近い低圧力条件から、圧力を徐々にすべり流領域に近い圧力範囲まで上げていき、熱流束の計測を実施した。なお、低圧力域で従来と同等の熱流束が計測されていることを確認した上で圧力を上昇させた。圧力を上げるとともに対流の影響が出てくることが予想されたが、計測結果には対流の影響では説明できない差異が見いだされた。

そこで、同心球殻系の計測システム内部の静止流体に対する詳細な解析を実施した。まず、理論解析により自由分子流領域およびすべり流領域、連続流領域における熱流束を考

めた。そして、数値解析結果とも比較することにより、全ての流れ領域での熱流束を解析した。特に単原子分子気体の単体に対しては、従来利用していた経験式に補正が必要なことを明らかにした。自由分子流領域に近い圧力条件を利用して計測した熱的適応係数の解析においてその補正式を適用することにより、計測精度の改善を実現した。ただ、解析を重ねてもすべり流領域での差異の原因は明らかとならなかった。

そこで、金属細線を固体表面として利用した同軸円筒系の計測システムの設計、構築も実施した。この計測システムを用いて広い圧力範囲に対して熱流束を計測することにより、混合ガスにおいて混合比を変化させた際に、温度ジャンプ係数に熱的適応係数が与える影響を抽出することが可能になると期待される。

また、混合気体の特性を調べるために、これまで実施してきた熱的適応係数の計測において、自由分子流領域よりも少し圧力の高い条件での計測も利用することによって、計測する流れ領域の影響を調査した。混合比を細かく変化させて熱的適応係数を計測し、自由分子流領域で構築された理論式から求められる値と比較した。その結果、混合気体においては、高い圧力域を利用したことによって理論値よりも僅かに減少することが明らかとなり、流れ領域による影響が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

H. Yamaguchi, M.T. Ho, Y. Matsuda, T. Niimi, I. Graur, Conductive heat transfer in a gas confined between two concentric spheres: From free-molecular to continuum flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 1527-1534 (2017).  
10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.100

〔学会発表〕(計2件)

細井淳平, 山口浩樹, 尾崎裕基, 松田佑, 新美智秀, 混合気体における熱的適応係数の計測, 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会, 2018年3月13日-14日, 名古屋大学, 愛知.  
竜野友輔, 山口浩樹, 松田佑, 新美智秀, 高クヌッセン数流れにおける面-分子間での熱輸送の計測, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016年9月11日-14日, 九州大学, 福岡.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6．研究組織

(1)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