

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14076

研究課題名（和文）円管内流れの分子気体力学的研究

研究課題名（英文）Kinetic-theory study on gas flows in a circular pipe

研究代表者

初鳥 匡成（Masanari, Hattori）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：50812765

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、微小な系内を占める気体のポアズイコ流・熱遷移流をボルツマン方程式およびエンスコグ方程式の直接数値解析により調べた。まず、ボルツマン方程式に基づく円管内流れの分析により、質量流量・巨視量場の高精度な数値データを広い範囲の分子間衝突頻度に対して得た。また、エンスコグ方程式に基づく平行2平板間および円管内流れの分析により、高密度気体のポアズイコ流・熱遷移流の振る舞いを広い範囲の気体の濃密さと分子間衝突頻度に対して詳しく調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ・ナノデバイスや微細構造をもつ多孔質体などの微小な系内の気体の振舞いは、通常の巨視的流体力学では正確に記述できない。そのような微小系内の気体流を調べるには、微視的立場に立った分子気体力学による解析が必要である。本研究では、数値計算のアプローチにより、微細な円管内あるいは平行流路内の圧力駆動流・熱的駆動流の特性を明らかにし、その知見を蓄積することができた。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the Poiseuille and the thermal transpiration flows in a gas in small systems have been investigated by means of the numerical analysis of the Boltzmann and the Enskog equations. Accurate numerical results of mass flow and macroscopic fields have been obtained by the analysis of a gas flow in a circular pipe based on the Boltzmann equation. The behavior of the Poiseuille and the thermal transpiration flows of a dense gas have been clarified in detail based on the Enskog equation for a wide range of the gas denseness and the smallness of the system.

研究分野：分子気体力学

キーワード：分子気体力学 ポルツマン方程式 エンスコグ方程式 円管流 高密度気体

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気体の圧力勾配による流れ(ポアズイコ流)と境界面に沿った温度勾配により生じる流れ(熱遷移流)は、マイクロ・ナノデバイスや多孔質体などの微小系内における基本的な形態の気体流である。熱遷移流は機械的駆動部が不要のポンプ(クヌーセンポンプ)や膜による気体分離などへも応用されている。両流れの応用範囲の広さから、単成分気体や混合気体など様々な種類の気体が考察の対象になっている。近年のシェールガス開発等を背景に、ナノ多孔質構造内の高密度気体の流れの研究が活発になってきている。

マイクロ・ナノデバイスや微細構造をもつ多孔質体などの微小な系内の気体では、気体分子の平均自由行程が気体分子の平均自由行程が系の代表長と同程度になる。この場合、気体分子間の衝突は注目する長さスケールで頻繁でなくなるために、気体の状態は通常の巨視的な流体力学で前提とされる局所平衡状態からずれる。このため、巨視的な流体力学では気体の振舞いを正確に把握できない。そのような微小系内の気体流を調べるには、分子-表面相互作用のモデルで定まる境界条件のもとでのボルツマン方程式(高密度気体ではその拡張版の Enskog 方程式)を解く必要がある。この方程式は気体分子の速度分布関数に対するもので、(i) 時刻、位置に加え、分子速度の分だけ独立変数が多く、(ii) 分子間衝突の効果を表す衝突項が複雑な形をしている。このため、この方程式を解くには大規模な計算が必要になる。

微小系流れにおいて、平行 2 平板間の流れ・円管内の流れはともに基本問題としての位置を占めているが、知見の蓄積状態は両者で大きく異なっている [ジオメトリによって上述の困難 (i)(ii)の度合いが違うことが背景にある]。平板間流れに関しては、理想気体(あるいはボルツマン方程式)の場合、信頼できる結果が既に得られている。一方で、円管内流れに関しては、平板間流れと同じレベルの詳しい結果はいまだ得られていない。例えば、熱遷移流に関してはボルツマン方程式を単純化したモデル方程式による研究結果がある状況にとどまっている。また、高密度気体の場合は、平板間流れに関しても知見の蓄積が待たれる状況にある。上述の状況をふまえ、本研究では円管内の熱遷移流・ポアズイコ流の特性を詳しく明らかにするとともに [研究(1)], 高密度気体に対して平行平板間ならびに円管内の両方の流れを調べる [研究(2)]。

2. 研究の目的

(1)

ポアズイコ流については高クヌーセン数領域では有意な誤差を含むもののボルツマン方程式に基づいた研究がなされている。また、高クヌーセン数領域に特化して解の構造を把握し熱遷移流も合わせて詳しく調べた研究がある。これに対して、本研究では直接数値解析により双方の流れを全範囲のクヌーセン数に対し詳しく調べる。流れの性質の詳しい情報を与えることに加え、(i)新たな数値解法やモデル方程式の提案研究における検証材料、(ii)実験的研究における比較対象としての理論値、(iii)より複雑な流れのモデリングの基礎等として他の研究に役立てられるような精密な解の提供を目指す。

(2)

高密度気体では分子の有限の大きさが考慮される(体積排除効果)。その結果、分子同士の衝突の際に 2 分子の位置のずれが有意となり、衝突時に非局所的な輸送が起こる。また、境界の近傍では、分子の衝突が一部ブロックされる。単純な例だが、一定温度の容器内に気体を入れて待つとする。このとき、理想気体では一様な平衡状態が実現するが、高密度気体では、密度が境界近傍で分布をもった(温度は一様)局所平衡状態ができる。このように、両者には基準の平衡状態にすでに違いがある。ポアズイコ流・熱遷移流はその基準状態が圧力・壁温の勾配の印加でずらされて生じるものである。そのため、問題の定式化の段階から理想気体の場合にはなかった新たな要素を考慮して出発する必要が出てくる。本研究では、そのようなポイントをクリアし、それらの流れの特性を直接的に解明することを目指す。

3. 研究の方法

(1)

円管内のポアズイコ流・熱遷移流を気体論的境界条件下のボルツマン方程式の直接数値解析により調べる。空間方向の求解のスキームについては、気体論方程式に適した有限差分スキームを採用する。気体論的境界層の問題の解析(18K13684「すべり流の理論における新しい試み」等)

を通じて構築した方法を円管のジオメトリへ拡張して対応する。また、ボルツマン方程式中で分子間衝突の寄与を表す項(衝突項)の計算には、分子速度面における高速フーリエスペクトル法を利用する。円管内の気体流量値だけでなく、流速場や熱流場の局所的な構造まで詳しく明らかにする。

(2)

平行2平板間および円管内のポアズイユ流・熱遷移流を気体論的境界条件下の Enskog 方程式の直接数値解析により調べる。空間方向の求解のスキームについては、気体論的境界層の問題の解析(18K13684「すべり流の理論における新しい試み」等)を通じて構築した方法を拡張して対応する。衝突項の計算には分子速度面における高速フーリエスペクトル法を利用する。気体流量値だけでなく、流速、熱流、密度、圧力をはじめとする巨視量の空間分布、および速度分布関数の構造まで詳しく明らかにする。

4. 研究成果

(1)

ボルツマン方程式の場合の熱遷移流、ポアズイユ流の質量流量(図1も参照)・巨視量場の高精度な数値データを広い範囲の分子間衝突頻度に対して得ることができた。

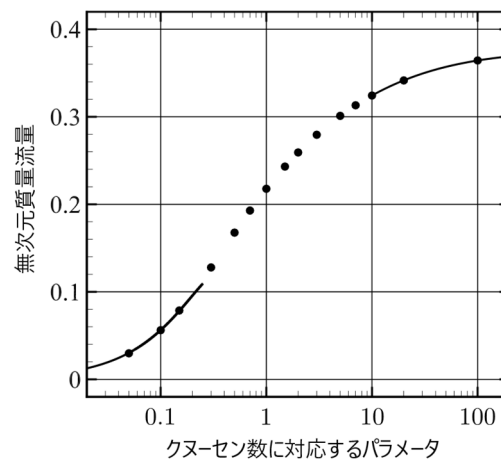


図1 円管内熱遷移流の質量流量. ボルツマン方程式の場合.
シンボル: 本研究.
実線: Funagane & Takata, Fluid Dyn. Res. (2012)の結果.

(2)

平板間の気体の流速および熱流などの巨視量の分布や質量流束(図2も参照), 気体分子の速度分布関数を, 系の微小さと気体の濃密さの指標であるクヌーセン数および分子直径の平板間隔との比の様々な値に対して得ることができた。この分析の結果は、日本流体力学学会年会 2022 および第 32 回国際希薄気体力学シンポジウムにて発表し、査読付きの学術誌 J. Fluid Mech. へ掲載された。また、本研究の過程で、非定常の熱伝達問題に関する結果を派生として得ることができた。本結果も査読付きの学術誌 AIP Adv. へ掲載された。

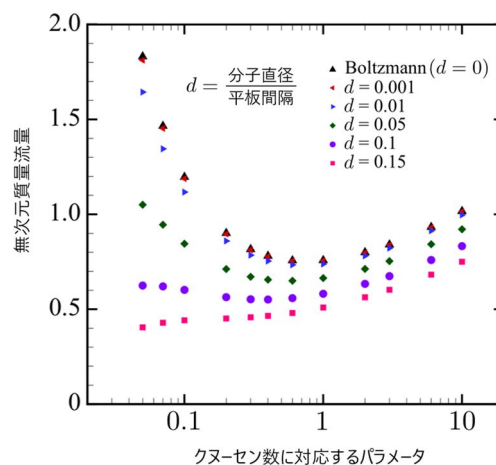


図2 平行平板間の高密度気体のポアズイユ流の質量流量.

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 1件）

1. 著者名 Masanari Hattori, Soichi Tanaka, and Shigeru Takata	4. 巻 12
2. 論文標題 Heat transfer in a dense gas between two parallel plates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 55220
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0091390	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 Masanari Hattori	4. 巻 962
2. 論文標題 Poiseuille and thermal transpiration flows of a dense gas between two parallel plates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2023.270	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 -

1. 著者名 Masanari Hattori	4. 巻 2996
2. 論文標題 Thermally driven flow of a dense gas in a nanochannel	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of 32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 40003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0187368	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 2件）

1. 発表者名 初鳥匡成
2. 発表標題 平行二平板間を占める高密度気体のポアズイユ流と熱遷移流
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 Masanari Hattori
2. 発表標題 Thermally Driven Flow of a Dense Gas in a Nanochannel
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 M. Hattori
2. 発表標題 Poiseuille and thermal transpiration flows in a dense gas between two parallel plates
3. 学会等名 International Workshop: Recent Advances in Kinetic Theory and Non-Equilibrium Fluid Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 初鳥匡成, 田中颯一, 高田滋
2. 発表標題 平行2平板間の高密度気体中の熱伝達
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021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
---------	---------