

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03949

研究課題名(和文)非一様な分子反射則を持つ同軸円筒間の希薄気体の運動と熱伝達に関する分子論的研究

研究課題名(英文) Kinetic studies on the mass and heat transfers in a gas between coaxial circular cylinders with nonuniform surface properties

研究代表者

土井 俊行(DOI, Toshiyuki)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00227688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,000,000円

研究成果の概要(和文)：非一様な表面物性を持つ小さな流路を流れる気体の流れを気体分子運動論(ボルツマン方程式)に基づいて調べた。表面物性の非一様性に起因する物質やエネルギーの輸送と、それらに成り立つ相反関係を数値解析的手法で調べた。また、0.1ミクロン以下の狭い隙間を隔てて相対運動する壁面間の潤滑において、壁面間に任意の温度差がある場合に適用できる巨視的潤滑理論を構築した。この潤滑理論がボルツマン方程式の数値解と、条件の広い範囲で一致することを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小さな系の流れにおける、壁面の表面物性の非一様性によって引き起こされる物質やエネルギーの流れと、それらに成り立つ関係の研究を通して、非平衡気体の流れの解の構造を理論的に解明した。また、0.1ミクロン以下のマイクロ潤滑を、従来の巨視的潤滑理論と同程度の容易さで取り扱える新しい潤滑理論を構築した。これらの研究は、超小型電子部品の冷却や、次世代ハードディスクの磁気ディスク/磁気ヘッドの潤滑設計等に広く役立てることができると期待される。

研究成果の概要(英文)：Flows of a gas through a small channel with a non-uniform surface property are studied based on kinetic theory of the gas (the Boltzmann equation). Mass and energy transfers due to the non-uniformness of the surface property and their reciprocity relations are studied numerically. Lubrication flow of a gas between two bodies in a relative motion placed at a distance of less than 0.1 micron is studied, and a macroscopic lubrication theory that is applicable in the presence of an arbitrary temperature difference is derived. It was confirmed that the result of this lubrication theory agrees well with the numerical solution of the Boltzmann equation.

研究分野：流体工学

キーワード：気体分子運動論 希薄気体力学 マイクロ流体力学 気体表面相互作用

### 1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロマシンは現代テクノロジーを支える重要な基礎技術である。気体分子の平均自由行程程度(0.1 ミクロン以下)の小さな系での気体の流れは、巨視的スケールの連続体流れと異なり、気体の非平衡性が著しくなる。このため、物質の流れとエネルギーの流れが密接に連成し、連続体流れでは予想できない輸送現象が現れる。小さな系における流れについては、これまで壁面での気体分子の反射側(表面物性)が一樣である場合については広く研究され、物質とエネルギーの流れの連成効果、すなわち相反関係が知られている。しかし、現代のようにマイクロマシンが多様化し、様々な表面物性を持つ物質で構成されているときには、これまで縮退していた未知の現象が顕在化してくる可能性がある。

(2) マイクロスケールの隙間を隔てて相対運動する物体間の気体潤滑は、ハードディスクにおける磁気ディスクと磁気ヘッドの間の潤滑設計において重要な役割を果たす。0.1 ミクロン以下の隙間の潤滑は、気体分子運動論に基づき、潤滑近似と呼ばれる近似法を用いて広く研究されてきた。連続体潤滑理論とは異なり、マイクロ潤滑では、この近似を無矛盾に進めるため、2 壁面の温度差が小さいということが必要である。大きな温度差を持つ壁面間の潤滑は最新型のハードディスクにおいて今後必要となるが、この解析法の難点がネックとなり、応用にたえうる潤滑理論の構築はこの 30 年間未解決の問題として残されてきた。

### 2. 研究の目的

(1) 非一樣な表面物性を持つマイクロ流路内において、壁面の運動、平面の温度差、等が誘起する気体中の物質、運動量、エネルギーの流れと、それらの間の相反関係を調べた。

(2) 任意の温度差がある壁面間のマイクロサイズの微小隙間潤滑を、気体分子運動論に基づいて調べた。これまで解析を阻んできた困難を回避する近似法を開拓し、連続体潤滑理論の拡張となる巨視的な潤滑方程式を導いた。

### 3. 研究の方法

(1) 気体分子運動論の基礎方程式であるボルツマン方程式に基づく数値解析によって調べた。

(2) ボルツマン方程式の基づく潤滑理論解析によって調べた。また、同方程式による直接数値解析によって理論の妥当性を検証した。

### 4. 研究成果

(1) 文献[1]では、同軸円筒間の気体において、円筒が回転する場合、円筒間に温度差がある場合、および一方向に温度勾配がある各々について、質量、運動量、エネルギーの流れを調べた。もし表面物性が一樣であれば、例えば円筒の回転による熱流は常に周方向であり、円筒間の熱伝達には寄与しない。文献[1]では、円筒の回転により局所的に壁面を通過する熱流が生じること、さらに局所的な熱の流入と流出がちょうどキャンセルし、全体として円筒間の熱伝達は普遍的にゼロになるという性質を発見した。図 1 は、外側円筒の回転による局所的熱流の一例を示す。円筒表面を通して熱が流入している部分と流出している部分があることがわかる。同様に、合計 3 つある相反関係の全てを解明した。

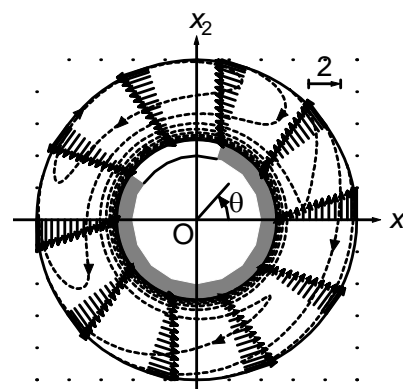


図 1. 回転同軸円筒.

一方文献[2]では、平行平板間で、表面物性が流れと直角方向に周期的分布を持つ場合の一方向流れを調べた。気体分子の平均自由行程よりも平板間距離が小さい系の場合、表面物性の非一樣性が原因となってボルツマン方程式の解に特異性が現れ、数値解析が困難になることが報告されていた。文献[2]では、ボルツマン方程式の解析法で知られている積分方程式法をこの問題に適用できるよう拡張し、平板間隔が平均自由行程の 1/10-1/1000 倍にわたる極めて広い範囲での数値解析に成功した。また、数値解に基づき、この系で現れる新たな相反関係を全て解明した。

(2) 0.1 ミクロン以下の微小隙間を挟んだ気体潤滑の問題は、壁面に有限な温度差がある場合には、摂動法と呼ばれる近似解法を適用することが不可能である。そこで文献[3]では、摂動法の出発点となる第 0 近似解を平均自由行程無限大の解で近似する着想を試みた。その結果、任意の温度差の壁面間に適用できる潤滑理論を閉じた形で得ることができた。この理論の長所は、未定の定数を一切含まないため、理論の妥当性はボルツマン方程式の直接数値解析と比較すること

で曖昧さなく判定できる。比較検証の結果、壁面間隔が 0.006-0.6 ミクロン、壁面温度の差が 300 以下の範囲で、本理論が与える結果は直接数値解析の結果と 4 パーセントの精度で一致した。隙間内の圧力分布の比較例を図 2 に示す。理論解(破線)は直接数値解析結果を良く近似している。文献[3]では、壁面の温度はそれぞれの壁面内で一様であることを仮定していた。文献[4]ではこの制約を取り除き、壁面が任意の温度分布を持つ場合に適用できるように、文献[3]の解析を一般化した。図 3 は、壁面の一部だけが加熱されている場合の、隙間内圧力分布を示したものである。理論解(破線)は直接数値解析の結果を 5 パーセントの精度で近似している。文献[3,4]の成果は、磁気ディスクの一部を加熱して記録密度を大幅に向上させる次世代ハードディスクの設計に威力を発揮すると考えられる。

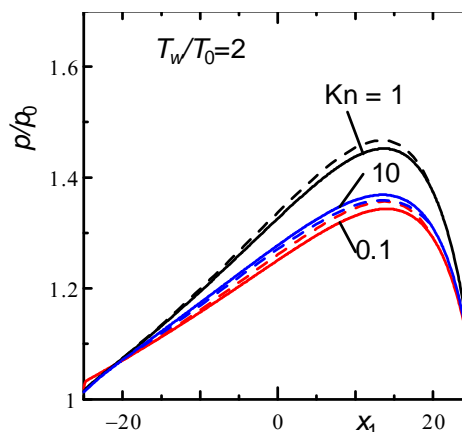


図 2. 微小隙間圧力分布

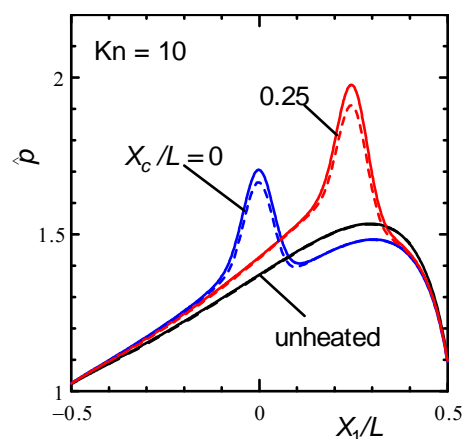


図 3. 微小隙間圧力分布 II

#### <引用文献>

- [1] T. Doi, Flows of a rarefied gas between coaxial circular cylinders with nonuniform surface properties, Open Journal of Fluid Dynamics, Vol. 9, 22-48 (2019).
- [2] T. Doi, Poiseuille flow and thermal transpiration of a rarefied gas between plane parallel walls with nonuniform surface properties: integral equation approach, Fluid Dynamics Research, Vol. 52, 015502 (2020).
- [3] T. Doi, A model of micro lubrication between two walls with an arbitrary temperature difference based on kinetic theory, Physics of Fluids, Vol. 32, 052005 (2020).
- [4] T. Doi, A model of micro lubrication between two walls with unequal temperature distribution based on kinetic theory, Physics of Fluids, Vol. 33, 032014 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Toshiyuki Doi	4. 巻 52
2. 論文標題 Poiseuille flow and thermal transpiration of a rarefied gas between plane parallel walls with nonuniform surface properties: integral equation approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 15502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/ab523b	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 Toshiyuki Doi	4. 巻 32
2. 論文標題 A model of micro lubrication between two walls with an arbitrary temperature difference based on kinetic theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 52005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0004994	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 Toshiyuki Doi	4. 巻 9
2. 論文標題 Flows of a rarefied gas between coaxial circular cylinders with nonuniform surface properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Open Journal of Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 22,48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/ojfd.2019.91002	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 Toshiyuki Doi	4. 巻 33
2. 論文標題 A model of micro lubrication between two walls with unequal temperature distribution based on kinetic theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 32014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0041675	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toshiyuki Doi
2. 発表標題 A model of micro lubrication between two walls with an arbitrary temperature distribution based on kinetic theory
3. 学会等名 2020 Division of Fluid Dynamics 73rd Annual Meeting, Americal Physical Society (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
---------------------------	-----------------------	----

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