

令和 6 年 4 月 25 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03877

研究課題名（和文）任意の温度分布を持つ壁面間のマイクロ潤滑モデルの分子論的研究

研究課題名（英文）Kinetic theory analysis of microscale lubrication of a gas between walls with an arbitrary temperature difference

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） 1,500,000 円

研究成果の概要（和文）：気体分子の平均自由行程(0.1ミクロン以下)程度の間隙のマイクロスケール潤滑を気体分子運動論に基づいて理論的に調べた。無次元曲率(平均隙間÷軸半径)を小さいパラメータとして気体論方程式の摂動解析を行った。隙間が平均自由行程よりずっと小さい場合には、摺動面の小さな曲率の効果のため、従来の潤滑近似を直接応用して導いた潤滑方程式は無次元曲率の平方根に比例する無視できない誤差を生じることを実証した。小さな曲率の効果をもっとよく取り入れた改良型潤滑方程式を導出し、それが隙間の全範囲で気体論方程式の良い近似を与えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の成果として、本来連続体力学で扱えないようなマイクロ潤滑問題を、連続体潤滑理論と同程度の容易さで解析できる改良潤滑方程式および必要な数値データを社会に提供した。研究詳細を示した文献はオープンアクセス化し、万人が読めるようにした。改良潤滑方程式を実際に使用する際に必要な数値データを研究代表者のホームページから公開した。

研究成果の概要（英文）：Microscale lubrication of a gas between circular cylinders with the clearance of the order of the mean free path of the gas is studied on the basis of kinetic theory. The dimensionless curvature, defined as the clearance divided by the radius of the spindle, is small. The Boltzmann equation is studied analytically using a perturbation method. It was clarified that a lubrication equation derived by the direct application of the conventional lubrication theory yields a non-negligible error proportional to the square root of the dimensionless curvature, when the clearance is much smaller than the mean free path. An improved lubrication equation is derived by correctly taking the effect of small curvature into account. It was also demonstrated that the improved equation provides the solution that perfectly agrees with the direct numerical solution of the Boltzmann equation over the entire range of the clearance.

研究分野：流体工学

キーワード：分子気体力学 マイクロ潤滑 非連続体効果

1. 研究開始当初の背景

表題の研究課題の第 1 報の論文[1]は前研究課題(K1803949)の期間内に発表したが、その後、当初予想しなかった下記の発見があったため、研究方針を次のように変更した。

軸と軸受けのように相対運動する物体の間には流体による潤滑が必要である。通常の潤滑の解析においては、連続体流体力学から導かれた潤滑方程式(レイノルズ方程式)が 100 年以上にわたって用いられてきた。一方、2 物体の隙間が気体分子の平均自由行程(0.1 ミクロン以下)程度であるような超微小隙間の潤滑においては、連続体の仮定がもはや成り立たないため、慣用のレイノルズ方程式はもはや使えない。それに代わり、気体分子運動論(ボルツマン方程式)に基づく解析が必要となる。気体論に基づく解析は、コンピュータのハードディスクにおける磁気ディスクとヘッドスライダの間の平面的潤滑に関連し、広く研究されてきた。ここでは、マイクロマシン内部に見られるような軸と軸受けの間の気体潤滑を考える。潤滑理論のキーは、狭い隙間のスケールで隙間流れを観察すると、たとえ流路が曲がっていても局所的には平行平板間流れとみなせるので、これを利用して流体力学の方程式を簡単化できることにある。このアイデアは、連続体力学に限らずボルツマン方程式でも適用できると考えられてきた。ところが、隙間が気体分子の平均自由行程よりもずっと小さい場合には、隙間よりも遠く離れた物体表面から衝突せずに直接やってくる分子の影響が無視できない。この平均自由行程のスケールで見ると、もはや流路の曲がりは無視できない。従って、連続体力学で培われた潤滑理論を気体論に直接応用すると、導かれる潤滑方程式は、平均自由行程よりもずっと小さい隙間の場合にはボルツマン方程式の正しい近似にならないと考えられる。これは、これまで言及されたことのない新しい非連続体効果であり、深く研究する必要があるという結論に至った。

2. 研究の目的

本研究では、回転円筒間のマイクロスケール隙間の気体潤滑を、気体論に基づいて調べた。ボルツマン方程式の摂動解析を行い、表面の小さな曲率がどのような本質的影響をおよぼすかを解明した。同時に、ボルツマン方程式の直接数値解析に基づく精密な解を求めた。従来の潤滑近似を直接応用して導出した潤滑方程式は、隙間が平均自由行程よりも小さい場合には正しい近似を与えないことを実証した。さらに、表面曲率の効果を正しく取り入れた改良潤滑方程式を導き、それが任意の隙間についてボルツマン方程式の良い近似を与えることを示した。

3. 研究の方法

平均隙間の円筒半径に対する比を無次元曲率とする；それは通常の潤滑では小さい。そこで小さな無次元曲率に対する摂動法でボルツマン方程式を理論的に解析した。その際、表面が曲がっていることに起因する小さな曲率項の取扱いに注意した。隙間流路に沿っての圧力分布を支配する巨視的潤滑方程式を導いた。これと平行し、曲線座標系で書いたボルツマン方程式を差分法に基づく大規模な計算によって数値解析した。後者を標準解として、前者の性能を評価分析した。

4. 研究成果

(1) 同心円筒間潤滑 問題の物理的本質を抽出するため、同心円筒間潤滑という最も単純化された問題を考えた。円筒座標系で書かれたボルツマン方程式を摂動法で解析した。解析の結果、次の事実が明らかとなった。内円筒が回転し、外円筒は止まっているとする。また、隙間は気体の平均自由行程よりもずっと小さいとしよう。すると、気体分子は 2 円筒間をほとんど衝突することなく自由に行き来する。図 1 は、2 円筒間の気体領域内の任意点 A に、内円筒から直接到達する分子の可能な分子速度の方向の範囲を示している。図 1 から明らかかなように、表面の曲率のため、この範囲は 180 度より小さい。すなわち、円筒から分子によって A 点に運ばれる運動量輸送の寄与は、内円筒からと外円筒からとは対等でなく、内円筒からの寄与が少しだけ小さいことを意味する。初等的な作図によると、この差は無次元曲率の平方根に比例することが分かる。その結果、ボルツマン方程式の解析において、もし曲率に起因する小さな項を無視してしまうと(すなわち局所的に平面とみなすと)、無次元曲率の平方根に比例する無視できない大きな誤差を含んでしまう。図 2 は、内円筒に働く偏心力の大きさを示したものである；グラフの横軸は平均自由行程 ÷ 隙間を表す。

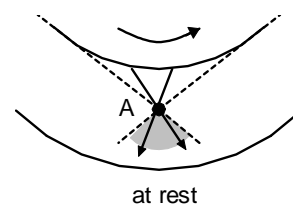


図 1 点 A に到達する分子速度範囲

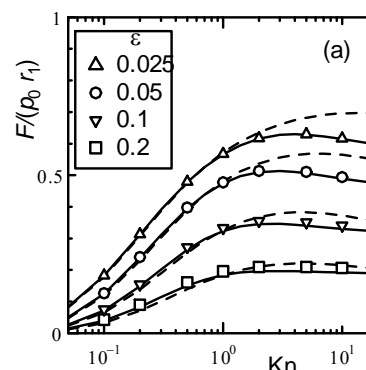


図 2 内円筒に働く力の大きさ

マーカーはボルツマン方程式の直接数値解析による標準解、点線は上述の小さな曲率項を無視して導出した潤滑方程式の解である。隙間が大きいときは妥当な結果を与えるが、隙間が平均自由行程より小さくなると、明らかに無視できない誤差が現れる。一方図2の実線は、上述の曲率項を正しく評価して導出した改良潤滑方程式による解である。隙間の全範囲で直接数値解と完璧に一致していることがわかる。以上の成果は文献[2]として発表した。

(2) 文献[2]で問題の物理的本質は解明された。ただし、[2]は物理的本質を分かりやすく説明する必要があったため、同心円筒間潤滑というやや人為的な問題を取り上げていた。実際のマイクロマシン等では、軸の偏心による潤滑効果が重要である。そこで、マイクロマシンへの直接的応用を念頭に、図3のような偏心円筒間潤滑の問題に着手した。ここでは、まず双極曲線座標系によるボルツマン方程式を導出した後、基本的に上述(1)と同じ手順で解析を進めた。この研究の特筆すべき点は、双極座標系ボルツマン方程式の直接数値解析が前人未だの研究であり、数値コードの開発は困難を極めたことである。偏心円筒間潤滑においても改良潤滑方程式の解は隙間の全範囲でボルツマン方程式の解と完璧に一致することが示された。図4は、従前型潤滑方程式による偏心力の大きさと直接数値解のそれとの差を無次元曲率の関数として示したものである。上の議論と整合して、従前解は無次元曲率の平方根に比例する誤差を含むことをはっきり示している。以上の成果は文献[3]として発表した。また、改良潤滑方程式を実際に使用するときに必要な全数値データは、研究代表者のホームページで公開している[4]。

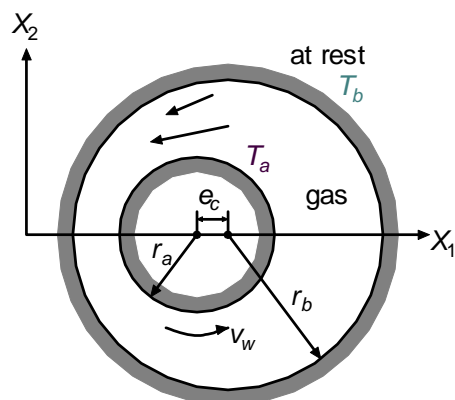


図3 偏心円筒間潤滑問題

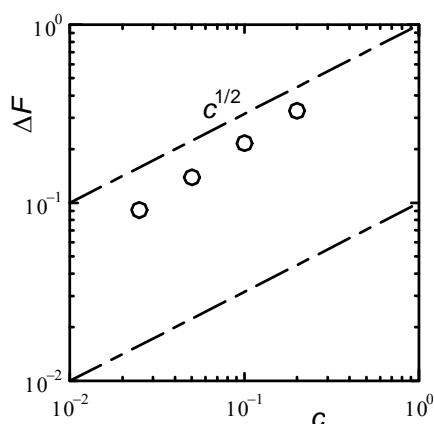


図4 無次元曲率の関数としての従前型潤滑方程式の誤差

<引用文献>

- [1] 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). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0041675>
- [2] T. Doi, Effect of a small curvature of the surfaces on microscale lubrication of a gas for large Knudsen numbers, *Physical Review Fluids*, Vol. 7, 034201 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.034201>
- [3] T. Doi, Generalized Reynolds equation for microscale lubrication between eccentric circular cylinders based on kinetic theory, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 974, A13 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.732>
- [4] T. Doi, Generalized Reynolds equation for microscale lubrication between eccentric circular cylinders based on kinetic theory: supplemental data. <https://www.damp.tottori-u.ac.jp/~lab9/>

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 2件）

1. 著者名 Doi Toshiyuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Effect of a small curvature of the surfaces on microscale lubrication of a gas for large Knudsen numbers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 34201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.7.034201	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 Doi Toshiyuki	4. 巻 974
2. 論文標題 Generalized Reynolds equation for microscale lubrication between eccentric circular cylinders based on kinetic theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2023.732	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0件

〔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
---------	---------