

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13684

研究課題名（和文）すべり流の理論における新しい試み

研究課題名（英文）Novel attempt for the generalized slip-flow theory

研究代表者

初鳥 匡成 (Hattori, Masanari)

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、軽度に微小な系あるいは低圧な系における気体の振舞いを流体力学的に記述する一般すべり流理論で記述できる現象の範疇の拡大と、同理論に付随するデータベースの充実化により、理論の一層の普及を試みるものである。本研究では Boltzmann 方程式およびそのモデル方程式の理論解析および数値解析により、波動の現象に関するすべり流理論を構築するとともに、分野で用いられる代表的なモデルの1つである Shakhov モデルに対する一般すべり流理論内の数値データを正確に求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ工学で重要な微小系の気体の振舞いは、通常の巨視的流体力学では正確に記述できない。この場合、通常は、微視的立場に立つ分子気体力学が必要になる。しかし、幸いにして、微小系流れの多くは物体表面での気体流速の「すべり」等を考慮して通常の流体力学を適切に補正すれば扱える（すべり流理論）。従来、この理論は粘性・熱伝導性が支配的な拡散的現象を主な対象としていた。本研究では、この理論を拡張し、気体中の波動の現象を扱えるようになった。また、理論に必要なデータベースを充実化した。これらの成果は、分野での学術的意義に加え、実際の微小系気体流の解析のための枠組みを増強・整備できたという意義をもつと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the present study, we try to extend the scope of application of the generalized slip-flow theory, which fluid-dynamically describes the behavior of a low-pressure gas or a gas in a small system. Simultaneously, we aim to enrich the numerical database required in that theory, thereby making it easier to access the generalized slip-flow theory. By the asymptotic analysis and the numerical analysis of the Boltzmann and its model equation, a slip-flow theory for the acoustic phenomena has been constructed and the numerical data required in the theory has been obtained for the Shakhov model.

研究分野：分子気体力学

キーワード：すべり流 音波 ボルツマン方程式 分子気体力学 希薄気体 希薄気体力学 流体力学

1. 研究開始当初の背景

マイクロ工学で重要な微小系の気体では、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、通常の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。このような場合、通常は、微視的な立場に立った分子気体力学のボルツマン方程式による解析が必要になる。しかし、幸いにも、実際の流れの多くでは微小化の度合いは比較的軽度（気体分子の平均自由行程と系の代表長の比で定義されるクヌーセン数が有限だが小さい）であり、通常の流体力学を適切に補正することで扱える。その理論体系はボルツマン方程式の境界値問題の漸近解析により確立されている（曾根の一般すべり流理論）。

一般すべり流理論によると、低クヌーセン数の気体の振舞いは大域的には流体力学の方程式と「温度のとび」「流速のすべり」を考慮した所定のとび・すべり境界条件で記述できる。ここで「温度のとび」とは、物体表面で気体と物体の温度が異なることを、「流速のすべり」とは、物体表面で流速が物体の移動速度に一致しないことをいう。物体近傍では、平均自由行程程度の厚みの層内で上述の大域的な記述に補正（クヌーセン層補正）を施す必要がある。ここで、個別の問題への理論の適用時に必要となる境界条件中のとび・すべり係数とクヌーセン層補正のデータは、クヌーセン層の構造を決めるボルツマン方程式（又はそのモデル）の基本問題（クヌーセン層問題）を解いて得られる。

この一般すべり流理論は、元々、主に定常な系を対象に確立されていた。最近、代表者の所属グループによる研究で、この理論の非定常系への拡張が行われ、また同時に、（定常な場合もふくめて）長い間モデル方程式でしか完備されていなかったすべり流理論のデータが本来のボルツマン方程式の場合に完備された。すべり流の研究が活発である近年の状況もふまえ、すべり流理論の体系をより豊かなものを目指す。本課題では、すべり流理論のデータベースを充実化してすべり流の特性に関する知見の蓄積と理論のユーザビリティ向上を図る方向性とすべり流理論で記述できる現象の範疇を広げる方向性の2つで研究を行った。

2. 研究の目的

(1)

クヌーセン層問題では、分子間衝突の模型（ボルツマン方程式にあっては分子間力の形で、モデル方程式にあっては衝突項全体の関数形で指定される）が方程式中の衝突項の形に反映され、その具体形にすべり流理論のデータ（とび・すべり係数とクヌーセン層補正）は依存する。本研究では、新たに Shakhov の分子間衝突模型に対するデータを求める。これにより、分子気体力学の分野で用いられる代表的な模型に対するデータを完備することを目指す。

(2)

一般すべり流理論では、考える物理的状況（時間変化のスケールやレイノルズ数）に応じてそれぞれ適切な系が導かれる。上述の最近の研究では、粘性・熱伝導性が支配的な拡散的現象の時間スケールでの低レイノルズ数の気体の非定常流を対象とし、非定常系特有の新たな温度のとびが存在するなどの興味深い現象が発見されている。一方で、気体の振舞いにはもう一つの重要な時間スケール、すなわち波動現象の時間スケールがある。この場合、気体の振舞いは大域的には線形化されたオイラー型方程式系で記述でき、境界近傍にはクヌーセン層に加えてそれよりも厚い流体力学的粘性境界層が現れるであろうことが指摘されている。しかし、とび・すべり境界条件の形、クヌーセン層の構造、等々、その全容は明らかでなく、個々の問題へ適用できる波動のすべり流理論は確立していない。本研究ではこれを確立することを目指す。

3. 研究の方法

(1)

Shakhov モデルに対するクヌーセン層問題の構造をきめる一連の空間 1 次元半無限問題の直接数値解析により、所望のとび・すべり係数とクヌーセン層補正のデータを精確に求める。解法にはこれまでの研究で確立した高次のオーダーにおけるクヌーセン層問題で現れる特異性を適切に扱う方法を応用する。また、Shakhov モデルと Bhatnager-Gross-Krook (BGK) モデルのある種の類似性にも着目し分析を行うことで、任意のプラントル数に対して輸送係数、とび・すべり係数、クヌーセン層補正および速度分布関数を後者から回復できる便利な公式の導出も試みる。

(2)

十分なめらかな任意の形の剛体物体のまわりを占め、初期に一樣な静止平衡状態にある単原子分子気体を考える。(気体に外力は働いていないものとする。)物体の振動運動や温度の小変化により起こる音響的現象をボルツマン方程式と物体面上での所定の気体論的境界条件にもとづいて調べる。(i) 音波の波長程度の代表長に基づくクヌーセン数が十分小さく、(ii) 気体の状態は基準静止平衡状態に近く、問題の線形化が許される(流れのマッハ数が非常に小さい)状況を考える。音響時間スケール下での線形化ボルツマン方程式の小クヌーセン数に対する系統的漸近解析により、気体の振舞いを記述する線形化オイラー方程式系と境界層方程式系をそれらに対するとび・すべり境界条件、クヌーセン層内の補正公式の導出、それを通しての現象の理解を得ることを試みる。

4. 研究成果

(1)

Shakhov の分子間衝突モデルに対して、クヌーセン数展開の 2 次までに現れる全てのとび・すべり係数とクヌーセン層補正のデータを求めた。また、Shakhov の模型と BGK 模型の関係を吟味し、 $2/3$ 以上の任意のプラントル数の場合に温度の問題の多くが BGK 模型の結果から回復することのできる簡便だが厳密な変換公式も導いた。これにより、これまでの研究で得られている二、三の模型の場合のデータとあわせて、分子気体力学の分野で用いられる代表的なモデルに対する一般すべり流理論における数値データを完備できた。データは利用しやすい形にまとめ、京都大学学術情報リポジトリ (<http://hdl.handle.net/2433/199811>) で公開している。また、この成果は日本流体力学会年会および国際希薄気体力学シンポジウムにて発表した。

(2)

最低次では、大域的には初期条件と流速の法線成分が境界のそれと一致するという境界条件のもとでの線形化オイラー方程式系で振舞いがよく記述されること、音響境界層内の補正が温度および流速接方向成分に対しては必要である一方流速の法線成分と圧力場に対しては不要であるということが分かった。この描像は流体音響学の音響境界層理論と対応している。拡散スケールのすべり流理論において通常クヌーセン数の 1 次程度の大きさで現れるせん断による流速のすべり・法線方向の温度勾配による温度のとびの効果はここではよりはやくクヌーセン数の $1/2$ 次の段階で現れることが分かった。これは境界層内での巨視量の急峻な変化が理由である。クヌーセン層の内部をのぞいて、このオーダーまでは系は対応するとび・すべり境界条件下のナビエ・ストークス系と等価であることが分かった。

クヌーセン数の 1 次のオーダーでは、境界層内での巨視量の急峻な変化により増進された効果が境界条件だけでなく境界層方程式にも現れる。境界条件中では、巨視量の 2 階法線微分に関係するとび・すべりの効果が増進される。境界層方程式では、熱応力の寄与に加え、運動方程式とエネルギー方程式に最低次の流速および温度の 2 重ラプラシアン項が現れることが分かった。これらは従来拡散スケールのすべり流理論においてクヌーセン数の 2 次のオーダーではじめてあらわれていたもので、ここでの音響スケールの場合にはよりはやく段階で現れる。これらの項はナビエ・ストークス系には含まれないもので、たとえ適切なとび・すべり境界条件を用いてもこのオーダーでは境界層の構造はナビエ・ストークス系による記述とは異なる。また、流速の発散に付随する温度のとびの効果はこのオーダーで現れる。このとびは拡散時間スケールの場合にはやはりより高次の効果であるが、ここでは圧縮性の大きさの違いによりそれが増進されることが分かった。

得られた方程式系では気体の粘性と熱伝導性による波の減衰効果はクヌーセン数の 1 次の段階で線形化オイラー方程式系の非同次項としてふくまれる。減衰効果のこの表現は、長時間(長距離)を伝播した波の振舞いに好ましくない形で影響しうる(漸近解における永年項の発生)。ときに永年項にまつわる事柄は本研究で用いたヒルベルト展開の方法の弱点とみなされることがある。この問題点に関しては研究を開始した当初はよく予期できていなかったが、試行錯誤を経て本研究ではこれに対する実際的な処方箋も提示できた。すなわち導いた系を基礎として、そこから永年項の発生を抑制しかつ境界層内やくヌーセン層内をふくむ全領域でクヌーセン数の 1 次まで正しい記述のできる便利な系を構築することに成功した。また、本研究では平板の振動により起こる半無限空間内の音の伝播を BGK モデルに基づき調べ、適用例として紹介した。漸近解は直接数値解によく一致すること、および、提案した永年項の問題への処方箋が有効なことが例証できた。

本研究の成果は、国際研究集会(JSPS/SAC Seminar: ON GAS KINETIC/DYNAMICS AND LIFE SCIENCE)および日本流体力学会年会で講演発表し、また学術誌 Physical Review Fluids に掲載された(Editor's Suggestion 対象論文に選定)

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 0件）

1. 著者名 M. Hattori and S. Takata	4. 巻 4
2. 論文標題 Sound waves propagating in a slightly rarefied gas over a smooth solid boundary	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 103401 (1--29)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.4.103401	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 M. Hattori and S. Takata	4. 巻 受理済
2. 論文標題 Slip/Jump Coefficients and Knudsen-Layer Corrections for the Shakhov Model Occurring in the Generalized Slip-Flow Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5119632	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 初鳥匡成, 山崎涼太
2. 発表標題 振動平板に誘起される希薄気体中の音波
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 初鳥匡成, 高田滋
2. 発表標題 滑らかな剛体のまわりを占める弱希薄気体中を伝わる音波
3. 学会等名 第3回流体基礎工学研究部門公開セミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanari Hattori
2. 発表標題 Sound waves propagating in a slightly rarefied gas over a smooth solid boundary
3. 学会等名 JSPS/SAC Seminar: ON GAS KINETIC/DYNAMICS AND LIFE SCIENCE
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 初鳥匡成, 高田滋
2. 発表標題 滑らかな剛体のまわりを占める弱希薄気体中を伝わる音波
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 初鳥匡成, 高田滋
2. 発表標題 一般すべり流理論におけるShakhovモデルに対するとび・すべり係数とKnudsen層補正
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 M. Hattori and S. Takata
2. 発表標題 Slip/Jump Coefficients and Knudsen-Layer Corrections for the Shakhov Model Occurring in the Generalized Slip-Flow Theory
3. 学会等名 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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