

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03173

研究課題名(和文) 分子気体流における境界の形状効果の解明

研究課題名(英文) Study of the effects of boundary geometry in rarefied gases

研究代表者

高田 滋 (TAKATA, Shigeru)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60271011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、希薄気体や微小系の気体に代表される極限環境で有為になる分子の自由運動的特性により、気体が巨視的物理量(密度、圧力、流速、温度など)のレベルで境界形状に起因した特異な振舞いを示すことを明らかにした。とくにメカニズムの詳細な分析を通して同種の現象が起こる一般的状況を明らかになるとともに、大規模数値計算によりそのことを定量的に実証した。また、この進展と併せて気体の希薄度が軽度な場合を扱うすべり流理論の整備と拡張が相補的な現象理解の役割を担いつつ進められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

速度分布関数の不連続面は至る所に遍在する(ユビキタス)が、それが通常の流体力学(連続体力学)的な物理量にもたらしうる特異な影響までを考察する取り組みは独自のものである。

巨視的考察に基づく流体力学では流速勾配の発散は粘性応力の発散を、等値線の屈折は一樣媒質中での応力、熱伝導率の跳びを意味し許容されないので、本研究により新しい物理的描像が発信される。

解明する現象自体が気体運動論の専門家にとっても新規であるうえ、その要因を速度分布関数の不連続面という微視的現象に結び付ける発想は他に類をみない。また、現象理解のために相補的にすすめたすべり流理論の整備は成果の普及の便を高めるものである。

研究成果の概要(英文)：In ordinary circumstances, inter-molecular collisions inside fluid occur frequently and play a decisive role in determining the fluid motion. In extraordinary situations, most typically in rarefied gases and/or in microscopic systems, however, such collisions is much less dominant, even becomes rare events;

accordingly the fluid motion reflects the free molecular, or ballistic, transport aspects.

In the present project, the influence of this ballistic aspect especially on the macroscopic gas behavior near the boundary is investigated, with a special interest in the correlation between the singular behavior of the spatial gradient of fluid-dynamical quantities normal to the boundary and the geometry of the boundary. Slip-flow theory has been studied simultaneously to proceed the project in an organic way.

研究分野：分子気体力学

キーワード：ボルツマン方程式 希薄気体 特異性 速度分布関数 すべり流理論

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

希薄気体や微小系の気体の振舞いは分子間衝突と分子の自由運動の両者のバランスで決まる(パリスティック伝導)。従来の流体力学の描像にとらわれずに新しい現象を見出すには後者の特性を理解することが重要になる。パリスティック伝導では境界の形状が本質的な役割を果たす。

もっとも端的な例に平行平板間の圧力勾配による流れ(平面ポアズイユ流)がある。真空工学分野ではとくによく知られているが、平面ポアズイユ流の流束は自由運動が優越する極限(自由分子気体)で理論上発散する。しかし平面壁が曲率をもてばこの状況は一変し、自由運動が優越する極限でも流束は発散しない。これは、前者では他の気体分子や壁面と一切衝突せずに直進する分子の存在が一定の割合で許されるが、壁面が曲率をもてば直進する分子は必ず壁面に衝突するので強い制動効果が生まれるからである。このように、境界の幾何学的形状は流れの性質に質的な変化をもたらす。

本研究で特に注目するパリスティック伝導の特徴は、一言でいえば、気体中及び境界上で速度分布関数が不連続面をもつことである。代表者は長年この現象に注目してきた。例えば、境界上での不連続面が凸物体の近傍では気体中に伝播して、バルク領域、境界層(クヌーセン層と呼ばれる気体論的境界層)とは異なる特有の第2境界層として顕在化すること、境界が平面の場合には、これが気体中に伝播せずすぐに消滅することにより、結果として流体力学的な物理量(巨視量)の勾配が対数的に発散することを見出した。さらに、自由分子流(分子衝突のない極限)を使った試算により、不連続面が気体中に残留していると曲がった境界上では巨視量に別種の(強度が異なる)勾配発散が起こることも明らかにしている。不連続面が気体中に残留することで巨視量の等値線が屈折する一見奇妙な現象が起こることも見出している。このように不連続面の減衰機構と残留機構の両者から多様な特異現象が生じることが、本研究を発案する背景となった。

### 2. 研究の目的

希薄気体や微小系の気体のような極限環境で有為になる分子の自由運動の特性により、気体が巨視的物理量(密度、圧力、流速、温度など)のレベルで境界形状に起因した様々な特異な振舞いを示すことを明らかにする。さらにそのメカニズムの詳細を分析して同種の現象が起こる一般的状況を解明する。

### 3. 研究の方法

#### (a) 形状効果による境界上での巨視的物理量の勾配発散

平面境界上での勾配発散を理解するには、ほとんど面に平行に境界面を離れる分子の自由飛行経路に沿って速度分布関数の変化を評価することが本質的だった。これに対して、一般の境界近傍ではそのような分子の飛行経路の長短は本質的にその付近の境界形状で決まるから、勾配発散の特性は局所的な境界形状によって評価、分類できる。この着想に基づく理論の構築と数値解析による実証計算を行う。

#### (b) すべり流理論の吟味と補強

分子間衝突が支配的な状況では、バルク領域の記述には通常の流体力学をやや拡張した「すべり流」の概念が通用する。すべり流理論の骨格は小さな希薄度をパラメータとする運動論方程式の漸近解析であり、ここで問題にする境界の形状効果の影響は「気体運動論的境界層」の

内部構造に現れる．境界の幾何的形狀を内部構造の変化に反映させる一般的枠組みの構築を図る．また，すべり流理論の利用の便を図る取り組みを併せて進める．

#### 4．研究成果

- 1) 境界近傍の特異性を示す既発表論文 の数値的実例を，計算規模を大きくして補強した．この補強では信頼に足る数値計算精度を達成するために多倍長計算が必須となり，計算コードの大幅な変更と多大なCPU時間にわたる計算の実行が必要であった．計算の結果， の理論的帰結を裏付ける実証データが得られ，本計画の大きな目的の一つが達成された．
- 2) エアロゾル粒子の気体中での運動力学の基礎を構成する要素問題の一つとしてマグナス効果の問題を取り上げ，これに関連して回転球により誘導される流れの問題を線形理論の枠内で解析・数値解析した．球形という単純な境界形状で理論的予測のとおりの特異性が発現することを実証した．とくに，Maxwell型境界条件を効果的に用いて，この特異性が境界上の速度分布関数の不連続性に関係することを直接，定量的に示したことは，この方面の実証計算における新しい展開となった．

発表論文：<https://doi.org/10.1017/jfm.2018.946>

- 3) 軽度に希薄な気体の振舞いを流体力学的な枠組みに帰着させるすべり流理論の，気体運動論的境界層底部における取扱いの不具合を，展開法自体の変更により直接修正する枠組みを試行した．境界が円筒状あるいは球状のような単純な場合に，これを具体的に扱う試みの可能化が示されたが，幾何形状の一般化には対応できていない．このような状況は，ある意味で理論上の行き詰まりを意味しているが，既存の第二境界層の導入による補正法の実用性があらためて確認された．
- 4) 3)の結果を肯定的に捉える立場から，従来のすべり流理論を補強する目的で，Shakhov模型に対するデータベースの整備を進めた．これにより，標準型ボルツマン方程式（剛体球分子模型），BGKモデル，ESモデル，Shakhovモデルという，現在，最も普及している運動論方程式に基づくデータベースが完了した．なお，データベース整備にあたって用いた技法の多くは 2)でも活用され，相補的な成果蓄積がなされたことは有意義であった．
- 5) 当初は非定常系の解析は予定していなかったが，音響領域の現象を扱うすべり流理論を構築した．これは境界が自身の垂直方向に振動する場合，種々の既往研究で行われている定式化の単純化の手続きに対して，当基盤研究の観点から再考の余地があると考えられたためである．幸い，すべり流理論の枠組みを大きく変えることなく，漸近解析にもとづく理論構成が安全に行えることが示され，バルク領域の現象を記述するオイラー型方程式に加え，音響境界層の支配方程式を導出するとともに，気体論的境界層の構造や境界面での物理量のとびの条件の全容が明らかになった．とくに，音響境界層では非ナビエ・ストークス効果が顕在化すること，音響境界層のためにすべての希薄気体効果が拡散スケールが支配的な系に比べてより顕著になることが示された．一方で，バルク領域の気体の振舞いを記述するうえで永年項の問題が顕在化することがわかり，この問題への合理的で簡便な対応方法を提案した．この成果はまとめた学術誌論文は editor's suggestion 対象論文の評価を受け，掲載されている．

発表論文：[10.1103/PhysRevFluids.4.103401](https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.103401)

参考文献

Takata & Taguchi, Journal of Stat. Phys. 168, 1319(2017)

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 Taguchi Satoshi, Saito Kazuyuki, Takata Shigeru	4. 巻 862
2. 論文標題 A rarefied gas flow around a rotating sphere: diverging profiles of gradients of macroscopic quantities	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 5~33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1017/jfm.2018.946">https://doi.org/10.1017/jfm.2018.946</a>	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 Hattori Masanari, Takata Shigeru	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Masanari Hattori
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

1. 発表者名 田口智清
2. 発表標題 回転する球によって生じる希薄な流れ－巨視量の勾配発散と速度分布関数の不連続－
3. 学会等名 第1回先端流体理工学研究部門公開セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 初鳥匡成
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 初鳥匡成
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 計算科学連携センターセミナー ～非平衡現象のダイナミクス～
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤 和行
2. 発表標題 希薄気体中で回転する球によって生じる流れ
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高田滋
2. 発表標題 希薄気体における流体変数の勾配発散について
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigeru Takata
2. 発表標題 Gradient divergence of fluid-dynamic quantities in rarefied gases on the smooth boundary
3. 学会等名 KI-Net Conference on Recent Advances on Particle Systems in Kinetic Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigeru Takata
2. 発表標題 Gradient divergence of fluid-dynamic quantities in rarefied gases on the smooth boundary
3. 学会等名 Workshop on Kinetic Models: Theory, Numerics and Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigeru Takata
2. 発表標題 Influence of boundary geometry on the fluid-dynamic quantities near the boundary
3. 学会等名 7th International Workshop on Kinetic Theory & Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigeru Takata
2. 発表標題 Structure of the kinetic region near boundary
3. 学会等名 Workshop on compressible Navier-Stokes systems and related problems (II) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 初鳥匡成
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

〔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
研究分担者	田口 智清 (Taguchi Satoshi)  (90448168)	京都大学・情報学研究科・教授  (14301)	
研究協力者	初鳥 匡成 (Hattori Masanari)  (50812765)	京都大学・工学研究科・助教  (14301)	2017.8以降