

氏 名	よし だ ひろ あき 吉 田 広 顕
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2754 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 航 空 宇 宙 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Studies on Gas Flows between Two Coaxial Circular Cylinders on the Basis of Kinetic Theory (分子気体力学による同軸二重円筒間の流れの研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 青 木 一 生 教 授 稲 室 隆 二 教 授 斧 高 一

論 文 内 容 の 要 旨

低圧気体やマイクロスケールにおける気体では、気体分子の平均自由行程が系の代表長に比べて無視できず、気体は局所的平衡状態からずれている。この場合には、通常の流体力学では気体の運動を記述することができず、分子気体力学に依らなければならない。また、たとえ気体の平均自由行程が系の代表長に比べて無視できるほど小さく（連続流極限）、気体が大域的に局所平衡状態にあっても、境界面上で蒸発・凝縮などの相変化が起こる場合には、境界面近傍で気体は一般に非平衡状態にある。したがって、通常の流体力学の枠組みでは気体の振る舞いを正しく捉えることができず、分子気体力学に基づく情報が必要となる。さらに、一般には通常の流体力学が成り立つと考えられている状況での連続流極限についても、分子気体力学に基づく極限操作なしでは気体の振る舞いを正しく記述できない場合が多々ある。本論文は、流体力学の基礎的問題である同軸回転二重円筒間の気体の流れを考えることにより、上述の状況における様々な現象を、分子気体力学に基づく精密な理論解析と数値解析によって解明した研究の成果をまとめたもので、序文と三つの章および結論より成っている。

序文では、まず分子気体力学が必要となる状況について手短かに述べた後、以下の各章で取り扱う内容を要約している。

第1章では、同軸回転二重円筒間の気体の流れを、軸方向に物理量が変化しない場合について考察している（円筒間クエット流）。通常の流体力学によれば、内円筒のみが回転し外円筒が静止しているときには、気体の流速は内円筒上で最大で外へ行くほど減少し、外円筒上でゼロとなる。ところが、円筒表面が非常に滑らかで入射する気体分子の多くが鏡面的に反射される場合には、外側に行くほど流速が増加するような流速分布（逆速度勾配）が現れる。ここでは、分子気体力学に基づく系統的漸近解析と精密な数値解析によってこの事実を示すとともに、逆速度勾配が起こるパラメータの範囲を明らかにした。より具体的には、まず基礎方程式であるボルツマン方程式とマクスウェル型拡散—鏡面反射境界条件をもとに、適応係数（境界条件における拡散反射の割合）がクヌーセン数（気体分子の平均自由行程と系の代表長の比）と同程度に小さいとして漸近解析を行い、連続流極限を正しく記述する流体力学方程式とその境界条件を導いた。次にこれをもとに、逆速度勾配現象が起こるパラメータの範囲を詳しく調べた。これとは別に、もとのボルツマン方程式系およびBGKモデル方程式系の直接シミュレーション法および差分法による精密な数値解析を行い、中程度および大きなクヌーセン数に対しても、逆速度勾配が起こるパラメータの範囲を具体的に求めた。

第2章では、軸方向の変化を許す場合を考えている。このときには、状況によって円筒間クエット流が不安定となり、軸方向にドーナツ状の渦が並ぶいわゆるテイラー渦流が現れる。この安定性問題は流体力学の古典的問題であるが、ここでは、これまでほとんど研究が行われていなかった、気体が低圧で円筒が高速回転している場合を取り上げている。すなわち、ボルツマン方程式（実際はそのBGKモデル）系に対して、数値解析に支援された線形安定性解析を行い、円筒間クエット流が不安定となるパラメータの範囲を具体的に求めた。また、直接シミュレーション法によるボルツマン方程式系の数値解析も平行して行い、テイラー渦流の発生および異なる型のテイラー渦流への分岐を具体的に示した。

第3章では、気体が円筒を構成する物質の蒸気とそれ以外の気体（非凝縮性気体）の混合気体である場合について、再び

円筒間クエット流を考察している。この場合には、一般に円筒表面で蒸気の蒸発・凝縮が起こる。まず二成分混合気体に対するボルツマン方程式系をもとに、クヌーセン数が小さい場合について系統的漸近解析を行い、連続流極限を正しく記述する流体力学的方程式系を導出している。次に、それを用いて、(i)連続流極限では蒸気の蒸発・凝縮が止まること、(ii)それにもかかわらず流れの場が無限小の蒸発・凝縮によって有意の影響を受けること、およびiii軸方向の一様性を仮定しているにもかかわらず流れの分岐が起こること、などを明らかにした。(ii)の現象は幽霊効果の一例である。さらにこれらの結果を、連続流極限に近い場合の直接シミュレーション法による数値解析によって確かめている。

結論では、本論文で得られた成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

回転している同軸二重円筒間の流体の流れの問題は、流体力学の基礎的問題として古くから盛んに研究されてきた。しかし、流体が気体で円筒が高速回転している場合についての研究は、問題の難しさからこれまでほとんど行われていない。本研究は、そのような流れを、気体が低圧である場合など様々な物理的状況に対して、分子気体力学をもとに理論的・数値的に解明したもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 軸方向に一様な流れ（円筒間クエット流）において、円筒表面が非常に滑らかで入射する気体分子の多くが鏡面的に反射される場合、内円筒のみが回転し外円筒が静止していても、気体の流速が外側に行くほど大きく外円筒上で最大となるような分布（逆速度勾配）を示すことを、分子気体力学の基礎方程式であるボルツマン方程式の系統的漸近解析と精密な数値解析によって明らかにした。
2. 軸方向の変化を許すと、状況によって円筒間クエット流が不安定となり、軸方向にドーナツ状の渦が並ぶいわゆるテイラー渦流が現れる。この安定性問題を、気体が低圧で円筒が高速回転している場合について考察した。すなわち、ボルツマン方程式（実際はそのBGKモデル）に対して、数値解析に支援された線形安定性解析を初めて行い、円筒間クエット流が不安定となるパラメータの範囲を明らかにした。また、直接シミュレーション法によるボルツマン方程式の直接的数値解析を行い、異なる型のテイラー渦流への分岐が起こることを具体的に示した。
3. 気体が円筒を構成する物質の蒸気とそれ以外の気体（非凝縮性気体）の混合気体で、円筒表面で蒸気の蒸発・凝縮が起こる場合について円筒間クエット流を考察し、ボルツマン方程式系の系統的漸近解析により、連続流極限を正しく記述する流体力学的方程式系を導出した。さらに、それを用いて、連続流極限では蒸気の蒸発・凝縮が止まるにもかかわらず、流れの場が無限小の蒸発・凝縮によって有意の影響を受けること、および軸方向の一様性を仮定しているにもかかわらず流れの分岐が起こることなどを明らかにした。さらにこれらの結果を、連続流極限に近い場合の直接シミュレーション法による数値解析によって確かめた。

以上のように、本論文は、分子気体力学における基本的問題を解明するとともに、これまで知られていなかった新しい現象を明らかにしたもので、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。