

氏名	はん だ まさ と 半 田 雅 人
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2385 号
学位授与の日付	平 成 16 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 the Bifurcation of Flows between Two Coaxial Circular Cylinders on the Basis of Kinetic Theory of Gases (気体分子運動論に基づく同心二重円筒間の流れの分岐の研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 青 木 一 生 教 授 永 田 雅 人 教 授 斧 高 一

### 論 文 内 容 の 要 旨

低圧気体や微小系における気体の流れの挙動の解明と制御は、さまざまな工学分野で重要になっている。本論文は、その基本的問題である流れの安定性と分岐を扱ったもので、回転する同軸二重円筒間の希薄気体における流れの安定性と分岐を、気体の希薄度が小さい場合に焦点をあわせ、気体分子運動論をもとに理論および数値解析によって調べた研究の成果をまとめたものである。論文は、序文と三つの章および結論より成っている。

序文では、まず気体分子運動論に基づく流れの安定性と分岐の研究の必要性を述べた後、以下の各章で取り扱う内容を要約している。

第1章では、二重円筒がともに気体の凝縮相でできており、その表面で気体が蒸発あるいは凝縮を起こす場合を考えている。円筒が普通の固体でその表面で蒸発・凝縮が起こらない場合には、異なる角速度で回転する同軸二重円筒間の気体において、円筒の軸方向および周方向ともに一様な単純な周方向の流れ(クエット流)が唯一つ存在する。しかし、軸方向の一様性をはずすと、ある条件の下でクエット流は不安定になり、軸方向にドーナツ状の渦が並ぶ流れ(テイラー渦流)が現れる。一方、円筒表面で気体が蒸発・凝縮をする場合には、軸方向・周方向ともに一様な流れであっても、同じ条件の下で二つの異なる型の流れが存在し得る。一方は内円筒で蒸発、外円筒で凝縮を伴う流れで、他方はその逆の流れである。本章ではこの問題を取り上げ、軸方向の一様性を外したとき、この二つの型の流れが安定に存在するか否かを、ボルツマン方程式をもとに数値解析によって調べた。数値解法としては、DSMC法と呼ばれる粒子的・確率的解法を用いている。これにより、気体の希薄度が小さい場合には、三種の異なる流れ、すなわち、上述の二つの周方向・軸方向に一様な流れとテイラー渦流、が同じ条件で存在することを示し、各流れが安定に存在するパラメータの範囲を明らかにした。また、軸方向・周方向一様な流れを様々な計算系で詳細に調べ、安定性・分岐解析にDSMC法を適用する際の計算系と精度限界の規準を示している。

第2章では、円筒が普通の固体で、その表面で蒸発・凝縮が起こらない場合を考えている。円筒間に有限の温度差があり、円筒の回転速度が小さく、かつ気体の希薄度が小さい場合について、ボルツマン方程式から導かれた流体力学的方程式系をもとに、クエット流からテイラー渦流が分岐する様子および分岐した流れの挙動を解析・数値解析の組み合わせにより明らかにした。さらに、分岐に及ぼす円筒間の温度差および非ナビエーストークス効果の影響を解明した。また、円筒の回転速度がクヌードセン数とともにゼロに近づくように連続流への極限(クヌードセン数ゼロの極限で、常圧気体に対応する)をとると、テイラー渦流は消滅し気体は静止するにもかかわらず、それが連続流極限における温度場に有意の影響を残し、温度場がもともと静止していた円筒間の温度場とは異なったものになることを示した。これは連続流極限における「幽霊効果」の一例である。一般に、連続流極限では古典流体力学(ナビエーストークス方程式)が成り立つと考えられているが、上述の「幽霊効果」は、この極限であるにもかかわらず古典流体力学では正しく記述できない現象である。

第3章は、第2章の研究をさらに推し進めたものである。第2章で取り扱った流れの分岐に及ぼす円筒間の温度差の影響

の現れ方は、ベナール問題からの類推やブシネスク近似による既存の結果とは異なる。分岐点の挙動を、二円筒の温度差が小さいとして解析的に調べ、上述の不一致の原因を明らかにするとともに、ブシネスク近似では正しい結果が得られない原因を究明している。

結論では、各章の結果を要約するとともに、連続流極限における気体分子運動論の重要性を述べ、さらに今後の研究課題について簡単に触れている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、流体力学の基本的問題である回転する同軸二重円筒間における流れの安定性と分岐を、常圧およびわずかに希薄な気体について、気体分子運動論に基づく系統的理論解析と精密な数値解析によって明らかにしたもので、得られた主な成果は次の通りである。

- 異なる角速度で回転する同軸二重円筒間の気体においては、軸方向・周方向ともに一様な単純な周方向の流れ（クエット流）が唯一つ存在する。しかし、軸方向の一様性をはずすと、ある条件の下でクエット流は不安定になり、軸方向にドーナツ状の渦が並ぶ流れ（テイラー渦流）が現れる。一方、円筒表面で気体が蒸発・凝縮をする場合には、軸方向・周方向ともに一様な流れであっても、同じ条件の下で二つの異なる型の流れが存在し得る。本論文ではこの問題を取り上げ、粒子的・確率的解法であるDSMC法を用いた精密な数値解析により、軸方向の一様性を外したとき、上述の二つの軸方向・周方向に一様な流れとテイラー渦流が同じ条件で存在することを示すとともに、各流れが安定に存在するパラメータの範囲を明らかにした。また、軸方向・周方向に一様な流れの詳細な数値解析により、安定性・分岐解析にDSMC法を用いる際の計算系と精度限界の規準を示した。
- 蒸発・凝縮を伴わない場合について、円筒間に有限の温度差があり、円筒の回転速度が小さく、かつ気体の希薄度が小さい場合を考え、ボルツマン方程式から導かれた流体力学的方程式系をもとに、クエット流からテイラー渦流が分岐する様子および分岐した流れの挙動を解析・数値解析の組み合わせにより明らかにした。さらに、分岐に及ぼす円筒間の温度差および非ナビエーストクス効果の影響を解明した。また、円筒の回転速度がクヌードセン数とともにゼロに近づくように連続流への極限をとると、テイラー渦流は消滅し気体は静止するにもかかわらず、それが連続流極限における温度場に有意の影響を残し、温度場がもともと静止していた円筒間の温度場とは異なったものになることを示した。これは、連続流極限における「幽霊効果」の一例で、この極限であるにもかかわらず通常の流体力学が機能しない例である。
- 上記2の分岐に及ぼす円筒間の温度差の影響の現れ方は、ベナール問題からの類推やブシネスク近似による既存の結果とは異なる。分岐点の挙動を円筒間の温度差が小さいとして解析的に調べ、上述の不一致の原因を明らかにした。

以上のように、本論文は、気体分子運動論をもとに、流体力学の基本的問題である同軸二重円筒間の気体における流れの安定性と分岐について詳細に調べ、連続流極限およびその近傍であるにもかかわらず通常の流体力学では記述できない新たな現象を見出したもので、学術上、實際上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16年2月18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。