

京都大学	博士 (工学)	氏名	辻 徹 郎
論文題目	Studies on Moving Boundary Problems in Rarefied Gas Dynamics (希薄気体力学における移動境界問題の研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>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的な長さのスケールに比べて無視できない。このときには、気体分子どうしの衝突が十分頻繁ではなく、気体は局所的平衡状態からずれている。この状況では、通常の流体力学によって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。分子気体力学に基づくマイクロスケール気体流の研究は、現在、マイクロ流体力学の重要な一分野である。なかでも、振動するマイクロ梁によって起こる流れなどに関連して、移動境界まわりの気体流の解明が重要な研究テーマになっている。しかし、境界の加速・減速運動によって、分子気体力学の基礎方程式であるボルツマン方程式の解に特異性が生じることは、これまで全く考慮されていない。本論文は、この特異性を正確に記述する数値解法によって、典型的な移動境界問題を詳しく解析した成果、および統計力学の基礎的問題である気体の平衡状態への緩和過程に関する数値的研究の成果をまとめたもので、序文と四つの章および結論から成っている。</p> <p>序文では、まず分子気体力学が必要となる状況および分子気体力学の基礎的事項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。</p> <p>第1章では、高度に希薄で気体分子どうしの衝突が無視できる自由分子気体中を、一定外力のもとで、その面に垂直方向に加速または減速運動をする平板について、その定常運動への漸近過程を数値的に調べている。仮に平板に働く気体による抗力が平板の速さに比例するとすると、平板の速度はその最終速度に素早く近づき、それらの速度の差は時間の指数関数に従ってゼロになる。ところが自由分子気体中の運動では、その近づき方は遅く、その差が時間の逆べきに比例してゼロに近づくことを明らかにした。とくに、その逆べきの指数が、問題の次元を d とすると (すなわち、平板は、$d=3$ のとき矩形平板、$d=2$ のとき無限に長い帯、$d=1$ のとき無限に広い平板である)、$d+1$ となることを示した。</p> <p>第2章では、移動境界問題からは外れるが、上述の緩和過程に関連して、一定温度に保たれた容器内の自由分子気体が、容器と同じ温度の静止平衡状態に近づいていく緩和過程を数値的に調べた。分子どうしの衝突がある場合にはこの緩和は速く、時間について指数関数的であることが (条件付きではあるが) 数学的に証明されている。この問題の重要性は、Cédric Villani がこの証明によって 2010 年のフィールズ賞を受賞したことからも明らかである。ところが、分子どうしの衝突のない自由分子気体では、緩和は気体分子と容器壁の相互作用によってのみ起こるため、その速さは非常に遅く、時間の逆べきに比例して静止平衡状態に近づく。数値的にはあるが、この事実を初めて明らかにするとともに、容器の次元を d とすると逆べきの指数が d であることの強力な証拠を与えた。</p> <p>第3章は、第1章の問題で外力が一定ではなく、フックの法則に比例する復元力であり、平板が円板である場合の考察に当てられている。ある初期位置と速度を与えると、</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	辻 徹 郎
<p>円板は振動運動するが、それは気体が及ぼす抵抗によって最終的には減衰する。この減衰過程を数値的に調べ、自由分子気体では振幅は時間の逆べきに比例してゆっくりとゼロに近づくことを明らかにした。また、問題の次元を d とすると (すなわち、円板は、$d=3$ のとき実際の円板、$d=2$ のとき無限に長い帯、$d=1$ のとき無限に広い平板である)、その逆べきの指数が $d+1$ となることを示した。さらに、気体分子が背景に分布する仮想的粒子群とある種の相互作用をする場合 (特殊なローレンツ気体) には、振動が時間の指数関数に従って減衰しうることを明らかにした。</p> <p>第4章の第1部では、空間的に1次元の問題、つまり無限平板に接する気体に限定し、気体分子どうしの衝突がある場合について、ボルツマン方程式のモデル方程式をもとに移動境界問題を考察している。まず、平板がその法線方向に任意の加速・減速運動をするとき、気体分子の速度分布関数に不連続などの特異性が発生することを初めて指摘した。つぎにその知識をもとに、この特異性を正確に記述する数値計算法を開発している。さらにその数値解法を用いて、平板が突然高い周波数で面に垂直方向に調和振動を始めたときに、半無限空間を占める気体中を伝わる非線形音響波を精密に数値解析した。その過程で、時間とともに局在化する特異性によって、気体分子の速度分布関数が非常に複雑な形になることを初めて示した。第4章第2部では、同じ数値解法により、有限領域における非線形音波伝播の問題、すなわち、平行2平板間の気体において、一方の平板が突然高い周波数で調和振動を始めたときの気体の非定常的挙動を詳しく調べ、定在波が形成されていく過程を明らかにした。</p> <p>結論では、本論文で得られた成果を要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

分子気体力学に基づくマイクロスケール気体流の研究は、マイクロ流体力学の重要な一分野である。なかでも、移動境界まわりの気体流の解明が、現在重要な研究テーマになっている。しかし、移動境界によって、分子気体力学の基礎方程式であるボルツマン方程式の解に特異性が生じることは、これまで全く考慮されていない。本論文は、この特異性を正確に記述する数値解法によって、典型的な移動境界問題を解明した成果、および統計力学の基礎的問題である気体の平衡状態への緩和過程に関する数値的研究の成果をまとめたもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 高度に希薄で気体分子どうしの衝突が無視できる自由分子気体中を、一定外力のもとで、その面に垂直方向に加速または減速運動をする平板について、その定常運動への漸近過程を数値的に調べた。これにより、平板速度がその最終速度にゆっくりと近づき、それらの差が時間の逆べきに比例してゼロになること、逆べきの指数が問題の次元に依存すること、などを明らかにした。
2. 移動境界問題からは外れるが、一定温度に保たれた容器内の自由分子気体が、容器と同じ温度の静止平衡状態に近づいていく緩和過程を数値的に調べた。分子どうしの衝突があると、この緩和は速く、時間について指数関数的であることが知られている。分子どうしの衝突のない自由分子気体では、緩和が遅く、時間の逆べきに比例して近づくこと、逆べきの指数が容器の次元によって決まること、を初めて明らかにした。
3. 上記1.の外力が一定ではなく、フックの法則に従う復元力の場合には、平板すなわち運動する物体は振動運動するが、それは気体が及ぼす抵抗によって最終的には減衰する。この減衰過程を、運動する物体が円板の場合について数値的に調べた。その結果、自由分子気体では振幅は時間の逆べきに比例してゆっくりとゼロに近づくこと、気体分子が背景に分布する仮想的粒子群とある種の相互作用をする場合(特殊なローレンツ気体)には、振動の減衰が指数関数的になりうることを明らかにした。
4. 無限平板に接する気体を考え、気体分子どうしの衝突がある場合について、平板が突然高い周波数で面に垂直方向に調和振動を始めたときに、気体中を伝わる非線形音響波を、ボルツマン方程式のモデル方程式を用いて精密に数値解析した。これに先立ち、平板が任意の加速・減速運動をする場合に、気体分子の速度分布関数に不連続などの特異性が発生することを初めて指摘し、その特異性を正確に記述する数値解法を開発している。非線形音響波伝播の問題では、この解法により、時間の経過とともに特異性が局在化し、速度分布関数が非常に複雑な形になることを示した。

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事実を明らかにしたもので、学術上、実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25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て申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。