

氏 名	安 田 修 悟
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2469 号
学位授与の日付	平 成 17 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 Half-Space Problems for Binary Gas Mixtures in Molecular Gas Dynamics (分子気体力学における2成分混合気体に対する半無限問題についての研究)
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、一般に気体は局所的平衡状態からずれているため、通常の流体力学でその運動を記述することができない。しかし、気体の非平衡度が小さいとき、すなわち比較的常圧に近い低圧気体や比較的大きなマイクロスケール系における気体については、境界で適切な境界条件を用いることにより、気体の振る舞いを流体力学的に記述することができる。この境界条件を求める問題は、平面境界(平板)で仕切られた半無限空間におけるいくつかの典型的な流れを、ボルツマン方程式をもとに解析する問題に帰着する。本論文は、これらの典型的な半無限空間における流れを、二成分混合気体に対して、ボルツマン方程式の精密な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、まず上述の弱非平衡気体の特性と半無限空間における流れを解析する必要性を手短に述べた後、以下の各章で取り扱う内容を要約している。

第1章では、平面境界に沿ってその温度が一様な勾配をもつときに境界に沿って誘起される流れ(熱ほふく流)、および平板から遠く離れたところで、混合気体の一方の成分が平板に沿う方向の一様な濃度勾配をもち、他方が大きさが等しく方向が反対の濃度勾配をもつときに境界に沿って起こる流れ(拡散すべり流)を取り上げている。まず問題と仮定を述べた後、二成分混合気体に対する線形化ボルツマン方程式を用いて問題を定式化し、続いて、二つの流れに対して統一的に、線形化ボルツマン方程式に対する差分スキームを説明している。この差分解析において最も困難な点は、ボルツマン方程式の複雑な衝突積分の処理である。本論文では、以前に単一成分気体に対して曾根・大和田・青木によって考案され、高田によって混合気体に拡張された方法を用いて、この処理を行っている。次に、詳細な数値解析を実際に行い、上述の二つの流れに対して、その挙動を巨視量のみならず気体分子の速度分布関数のレベルで明らかにした。特に、遠方の漸近的流れ場を平板上まで外挿したときに平板上で現れる速度のすべりと平板の温度勾配(熱ほふく流の場合)との間の比例係数(熱ほふくすべり係数)およびそれと遠方での濃度勾配(拡散すべり流の場合)との間の比例係数(拡散すべり係数)を数値的に求めた。これらの係数は、混合気体の成分濃度に依存するが、任意の濃度に対して係数値が即座に得られる形で数値データが整理されている。

第2章では、遠方で平板に平行に混合気体の流れがあり、その速度が平板に垂直方向に一様な勾配を持つ場合、すなわちせん断流を考えている。問題の定式化の後、第1章で説明した差分法による精密な解析を行い、流れの様子を気体分子の速度分布関数のレベルで詳細に調べている。特に、遠方の漸近的流れ場を平板上まで外挿したときに平板上で現れる流速のすべりと遠方での速度勾配との間の比例係数(せん断すべり係数)を数値的に求め、混合気体の任意の成分濃度に対して係数値が即座に得られる形でデータを整理している。第1章および本章において考察した三つの流れにおける外挿速度の平板上でのすべりと平板の温度勾配、遠方での濃度勾配、および遠方での速度勾配との間の比例関係が、実質的に弱非平衡気体を流体力学的に扱う際の流体力学的方程式に対する境界条件を与える。その比例係数が混合気体の成分濃度の任意の値に対し

て即座に取り出せる形で数値データが得られたため、本研究によってこの境界条件が数値的に構築されたことになる。

第3章は、両成分が平面境界で蒸発あるいは凝縮を行う場合に当てられている。やはり第1章で用いたのと同様の差分解析法によって線形化ボルツマン方程式の精密な数値解析を行い、蒸発あるいは凝縮によって生じる遠方における気体の温度、圧力および成分濃度の降下あるいは上昇を明らかにし、それらの量と蒸発量あるいは凝縮量との間の比例係数を精密に求めている。これらの係数についても、任意の成分濃度に対する値が即座に求められるように数値データが与えられている。これらの比例関係は、境界面で蒸発、凝縮を伴う二成分混合気体の流体力学方程式に対する境界条件を与える。

結論では、本論文の結果を要約するとともに、それに基づく今後の発展について簡単に触れている。

論文審査の結果の要旨

平衡状態からのずれが小さい非平衡気体、すなわち比較的常圧に近い低圧気体や比較的大きなマイクロスケール系における気体では、境界で適切な境界条件を用いることにより、気体の振る舞いを流体力学的に記述することができる。この境界条件を求める問題は、平面境界（平板）で仕切られた半無限空間におけるいくつかの典型的な流れを、分子気体力学（ボルツマン方程式）をもとに解析する問題に帰着する。本研究は、二成分混合気体に対して、これらの典型的な半無限空間における流れを、ボルツマン方程式の精密な数値解析によって解明したもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. 二成分混合気体に対する線形化ボルツマン方程式の精密な差分解析法を開発した。さらにこれを用いて、平面境界に沿ってその温度が一樣な勾配をもつときに境界に沿って起こる流れ（熱ふく流）を解析し、混合気体の挙動を明らかにするとともに、誘起される流れの速さと温度勾配の関係を精密に求めた。
2. 平板から遠く離れたところで、混合気体の一方の成分が平板に沿う方向に一樣な濃度勾配をもち、他方が大きさが等しく反対方向の濃度勾配をもつときに境界に沿って起こる流れ（拡散すべり流）を上述の方法で解析し、流れの様子を明らかにするとともに、流れの速さと濃度勾配の関係を精密に求めた。
3. 平板から遠方で、それに平行に混合気体の流れがあり、その速度が平板に垂直方向に一樣な勾配を持つときに、流れの場に生じる一樣な速度の増加（速度のすべり）と速度勾配の関係を精密に求め、流れの様子を明らかにした。
4. 両成分が平面境界で蒸発あるいは凝縮を行う場合について、蒸発あるいは凝縮によって生じる遠方における気体の温度、圧力および成分濃度の降下あるいは上昇を解明し、それらの量と蒸発量あるいは凝縮量の関係を精密に求めた。
5. 以上の結果により、弱非平衡混合気体あるいは相変化を伴う混合気体の、様々な物理的状況に対応する流体力学的方程式に対して、正しい境界条件が導かれた。

以上のように、本論文は、分子気体力学における基本的流れを解明するとともに、弱非平衡状態の二成分混合気体に対する流体力学的方程式の境界条件を完成させたもので、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17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。