

論文審査の結果の要旨

氏名 矢野 良輔

本論文は、「Mathematical and Numerical Comprehension of Nonequilibrium Relaxation by Using Kinetic Equations and Its Extension to Reactive and Relativistic Gas (気体論方程式を用いた非平衡緩和の数学的数値的理解と反応気体および相対論的気体への拡張)」と題し、9章より構成されている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べるとともに、気体論や非平衡緩和など本論文での重要な概念の説明を行っている。気体力学において、分子の速度分布関数が平衡分布（ボルツマン分布）からずれる非平衡現象は、衝撃波構造などで顕著に見ることができる。その解明には、速度分布関数の支配方程式であるボルツマン方程式による解析が必要である。数値計算法としてはモンテカルロ直接法が有効であるが、これは確率的手法であり、解の数学的性質を解析的に調べることには適さない。そのため、ボルツマン方程式に対するモデルとして分子衝突の項を簡略化した気体論方程式を扱うことが有効であると述べている。

第2章から第5章は、第1部としてまとめられ、単原子分子気体における並進モードの非平衡現象を扱っている。速度分布関数を Grad 展開し、各種気体論方程式に対するモーメント緩和式を得ており、それらを自己相似、同次非線形、非同次非線形のタイプに分け、非平衡緩和過程において果たす役割について考察している。その結果、従来の気体論方程式は、分子衝突項のゲインタームに対し13モーメントまでの近似であり、衝撃波構造でみられるような強い非平衡性を表現するには、精度が不十分であることを明らかにした。過去の研究の多くは、衝突項を緩和型の式で表したBGK型の気体論方程式に関するものであったが、ここでは衝突項を拡散型の式で表したフォッカー・プランク型の方程式に着目し、それが高次のモーメント緩和をより正確に与えるため非平衡性の強い領域で有効であることを見出した。さらに、2次元円柱前方に生じる衝撃層について気体論方程式の数値解析を行い、分布関数の非平衡現象について定量的な議論を行っている。また、BGK型とフォッカー・プランク型を合わせたハイブリッドモデルを提案し、モンテカルロ直接法の結果と良好な一致が得られることを示している。

第6章は本論文の第2部であり、量子化された内部エネルギーモードをもつ2原子分子の解離現象を気体論の立場から定式化し、数値解析結果を示している。分子の振動モード励起と解離反応の連成および分子と原子の混合気体の効果を表現する気体論方程式をWCU方程式に基づき新たに定式化した。さらに、モーメント緩和式を導出し、粘性係数などの巨視的な輸送係数を求めている。2次元円柱前方に生じる衝撃層流れについて数値解析を行い、解離反応が非平衡現象に及ぼす影響を定性的かつ定量的に明らかにしている。特に、衝撃波構造の中で解離によって促進される異種分子間の非平衡現象である衝撃波分離について詳細に述べている。

第7章は本論文の第3部であり、光速と比べて無視できない速度で運動する分子が存在するために相対論的効果が現れる気体中の非平衡現象を扱っている。過去に提案された相対論的気体論方程式について考察し、モデルの持つあいまいさを排除する改良を示している。光速の50%の一様流中に置かれた2次元円柱前方に生じる衝撃層について数値解析を行い、得られた結果について相対論的動圧などの相対論的効果を定量的に議論している。さらに、相対論的ナビエ・ストークス・フーリエの式と比較を行い、相対論的効果の出現と、気体分子の速度分布関数における非平衡性との間に強い関係があることを見出している。

第8章は本論文の第4部であり、第1部から第3部を通した本論文における研究成果を結論としてまとめている。

第9章は補遺であり、超多次元偏微分方程式である気体論方程式を数値解析する際に必須となる並列型スーパーコンピュータによる効率的なプログラミングについて説明している。

以上要するに、本論文は気体論方程式を用い、分子の速度分布関数の非平衡現象を数学的考察と数値解析の両面から解明するものであり、化学反応や相対論の効果を含む気体論方程式への拡張法を示した点で、先端エネルギー工学、特に高エンタルピー気体力学に貢献するところが大きい。

なお、本論文の第2章から第4章は鈴木宏二郎氏と、5章から7章と9章は同氏および黒田久泰氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析および検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。