

## 学位論文題名

## A Theoretical Study of the Evolution of Electron Swarms in a Gas in the Presence of an Electric Field

(電界の存在するガス中における電子スオーム発展過程の理論的研究)

## 学位論文内容の要旨

近年ガスレーザやプラズマプロセス、環境問題への放電プラズマの応用においてプラズマの定量的解析やシミュレーションが重要になっている。これを行なうには流体モデルと粒子モデルがあるが、本研究は流体モデルを用いるときに不可欠な電子移動速度や拡散係数等の電子スオームパラメータを定量的に求める手法を開発した結果をまとめたものである。

気体中の電子スオームパラメータは流動平衡領域では一般に換算電界 $E/N$  (電界強度/ガス分子密度) で定まる定数で与えられ、さらに初期緩和過程内では初期条件に依存した緩和過程を経て流動平衡時の値に収束する時間依存関数となることが知られている。

このようなスオームパラメータの値を $E/N$ の広い範囲にわたって首尾一貫して見通しよく解析導出するには理論的研究が不可欠であり、コンピュータ数値解析に支援されたボルツマン方程式による輸送特性の解析は優れた研究手段として早くより採用され、より厳密かつ高効率な解析法とアルゴリズムの開発が精力的になされ発展してきた。

この十数年来輸送係数の実験値と理論値を比較検証する中で、実験値に対応する従来の理論的表現および計算手法に論理的厳密さに欠ける点があることが指摘されており、同一名で呼ばれる輸送係数(たとえば移動速度)といえどもその定義の仕方実験方法の違いによって値が異なるという極めて重大な問題が提起され、以来輸送係数の定義とその測定法をめぐって研究がなされてきた。

ここで取り扱う弱電離気体においては電子による気体分子の衝突電離によって発生する電子が放電プラズマを維持するための最も重要な過程であり、この意味で電離あるいは逆に電子の消滅に導く電子付着は原理的に無視しえない現象であるが、これらを伴うときに上述のように輸送係数の定義に問題が生ずる。電離、付着による電子の発生消滅がない系(粒子数が保存される系)では上述のような問題は全く生じない。

本研究は電離、付着により粒子数が保存されない条件下で気体中の電子の輸送発展特性をボルツマン方程式によって解析しようとするものである。

本論文前半部ではガス中の電子、イオンスオームに関する従来のボルツマン輸送理論に対して具体的な実験法に直接対応するよう新たな理論的考察を加え、問題の本質を明らかにし解決に導くとともに従来の輸送理論を補足する新理論を提示した。また後半部では前半部の理論的考察に基き新しく提案された緩和過程解析手法をクリプトンガス中の電子スオームの初期緩和過程の解析に適用した研究成果をまとめている。

本論文は全8章からなっている。

第1章ではこの研究の背景と意義について述べるとともに、ボルツマン輸送理論の発展の歴史について概説して、本研究の占める位置を明らかにした。

第2章は前半の主要部であるが、粒子群の連続性を表現した従来の輸送発展理論がスオームの時間空間的發展を表現する際に、一定時刻におけるスオームの空間的分布(Flight Distance Spectra)の時間的發展をいわば駒撮り写真状に観測し表現する方法に対応している事を示し、これに対して通常のTime of Flight法実験では拡散移動してくるスオームを定位置で待ち受けその到着時間分布(Arrival Time Spectra)を観測していることに注目し、到着時間分布とその時間モーメント情報を直接的に表現する理論を新たに提示するとともに、次の様な結果を導いた。

1) 従来の輸送理論の輸送係数と基本方程式(連続方程式)に対して到着時間分布から直接的に定められる新たな輸送係数を定義しこれによって到着時間分布の空間的發展を表現する新たな発展方程式を提示した。これら両輸送係数及び両発展方程式は同一発展過程を表現する等価な一对のコンプリメンタリーな表現形式であることを示し、流動平衡領域における両輸送係数間の厳密な相互関係式を導くと共に、提案された輸送係数をボルツマン方程式より直接計算するための新たな運動方程式を提示した。

2) これら的一对の表現形式は基本方程式のボルツマン方程式に対する二つの異なる固有値問題に対応していることを示し、それぞれの固有値、固有関数によって表されたボルツマン方程式の初期値問題及び境界値問題の素解(グリーン関数)によって初状態より流動平衡領域に至る全発展過程の時間および空間発展両モードの厳密な理論的表現を導いた。

3) 両輸送係数及び両発展方程式の相互関係は一对の素解から導かれる二つの分散関係式として一般化されること、かつ両分散関係式は同一の発展過程を互いに逆関数の関係にある多項式展開形式で表わされることを示した。

4) ボルツマン方程式から3)の分散関係曲線を直接求めることにより流動平衡領域における両輸送係数を導出することが出来ることを示し、従来のボルツマン方程式解析法に比較して極めて簡易なアルゴリズムの新しい計算技法を提案した。

第3章では第2章の論究を受けて具体的な実験法であるTOF法, Pulsed Townsend法, Steady State Townsend法の理論的表現を提示し、それぞれの実験方法に対応するスオームパラメータ間の関係を考察した。

第4章以降の後半部では第2章の理論的研究成果を短時間短距離における緩和過程(非平衡初期緩和過程)の具体的解析に適用し、従来のボルツマン方程式数値解析法に代えてボルツマン方程式のマトリクス化により実際の数値解析を行なった結果について述べた。

第4章では初期緩和過程解析に射影演算子法を導入し初期緩和過程内での初期条件(初速度分布)の発展過程に及ぼす影響を分離して明解に示し、従来の時間相関関数による輸送係数の表現とボルツマン方程式解析による表記の間の関係を明らかにした。また緩和時間, 緩和距離などのいわゆる緩和パラメータの厳密な定義と計算公式等実用上極めて有益な諸量の理論式を導出した。さらに固有値と固有関数によって表現されたボルツマン方程式の素解を用いて初期緩和過程から平衡に至る全発展過程解析のための新しい数値解析法を提示した。

第2章と第4章の理論によって具体的な問題の解析を行なうには従来のボルツマン方程式数値解析法に代えて、マトリクス数値解析法を導入することが合理的であり最適であることを示した。

第5章では直交関数系によるマトリクス化の方法を概説し、ボルツマン方程式の演算子のマトリクス要素の計算式を与えて具体的なマトリクス方程式に書き換えると共に、第2章と第4章で導かれた解法, 公式等のマトリクス数値解析法について述べた。

第6章では第4章以下の解析理論の具体的な応用としてクリプトンガス中の電子スオームの初期緩和過程の計算にマトリクス数値解析法を適用し、輸送係数の緩和時間, 緩和距離および速度分布関数とスオームパラメータの時間依存性, 発展過程の計算結果について述べている。

第7章ではボルツマン方程式のマトリクス数値解析法を高周波電界下の電子スオームの輸送特性解析に発展させる試みについて考察している。ここでは本格的な解析に先だって直流電界に重畳した小振幅高周波電界の下でのクリプトンガス中の電子スオームの輸送特性を摂動法によって

解析した結果について述べた。

第8章は結論であり、本論文を総括するとともに残された問題、今後の課題について述べた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 頭 博 昭  
副 査 教 授 酒 井 洋 輔  
副 査 教 授 長 谷 川 英 機  
副 査 教 授 山 崎 初 男

## 学 位 論 文 題 名

### A Theoretical Study of the Evolution of Electron Swarms in a Gas in the Presence of an Electric Field

(電界の存在するガス中における電子スオーム発展過程の理論的研究)

近年ガスレーザ、プラズマプロセス、環境問題に対する放電プラズマの応用が進み、その定量的解析やシミュレーション研究の要請が高まっている。本研究は、流体モデルを用いてこれを行なうときに不可欠な電子移動速度、拡散係数、電離係数等の電子スオームパラメータを定量的に求める手法を開発した結果をまとめたもので、全8章からなっている。

第1章は緒論で、本研究の背景、目的、意義について述べるとともに、弱電離気体中の電子に対するボルツマン輸送理論の発展の歴史を概説し、本研究の占める位置を明らかにしている。

第2章は電子スオームの到着を定位置で待ち受け、到着時間分布とその時間モーメント情報をもとに発展を記述する形式の、あたらしい電子スオーム理論を提案するとともに、その妥当性を示している。このような形式の理論の誕生によって初めて従来から行なわれていたいわゆるタイムオブフライト実験に素直にしたがった解析が可能になった点に大きな意義があるものと評価される。従来の電子輸送理論における輸送係数と新しく提案された理論の輸送係数の関係を明らかにするとともにこの一対の表現形式は基本方程式であるボルツマン方程式に対する二つの異なる固有値問題に対応していること、両輸送係数および両発展方程式の相互関係は一対の素解から導かれる二つの分散関係式として一般化されること、ボルツマン方程式からこれらの分散関係式を直接求めることにより流動平衡域での両輸送係数を従来に比較して簡易なアルゴリズムで求めることが出来ることを示す等、電子スオーム解析について多くの新知見を明らかにしている。

第3章は第2章の成果をもとに、具体的な電子スオームの実験方法であるタイムオブフライト法、パルスタウンゼント法、定常タウンゼント法に対する理論的表現示し、さらに各実験方法に対する電子スオームパラメータ間の関係を示している。

第4章以下では、第2章の成果を短時間短距離における非平衡緩和過程の解析に適用している。第4章では射影演算子法を用いて緩和過程に対する初期条件の影響を明らかにするとともに、緩和時間、緩和距離などの緩和パラメータの解析的な定

義を行なうなど実用上有益な定式化を行なっている。さらに固有値と固有関数によって表わされたボルツマン方程式の素解によって初期緩和過程から平衡にいたる全過程の新しい数値解析法を示した。

第5章では直交関数系によるマトリクス化の方法を示すとともにボルツマン方程式の演算子に対するマトリクス要素の計算式を示し、マトリクス方程式に書き換えを行ない、第2章および第4章における取扱いのマトリクス数値解析法を述べた。

第6章は具体的な応用例としてガスレーザで重要なクリプトンガス中の電子スオームの初期緩和過程をマトリクス数値解析法を適用して求め、輸送係数の緩和時間や緩和距離をはじめ、速度分布およびスオームパラメータの時間依存性など、発展過程の解析を行なうとともに、その結果について述べている。

第7章はボルツマン方程式のマトリクス数値解析法をプラズマプロセスで重要な高周波電界下の電子スオーム輸送特性の解析に適用している。本格的な手法の展開に先立つ解析として、直流電界に重畳した比較的小振幅の高周波電界下でのクリプトンガス中の電子スオーム輸送を摂動法によって初めて解析した例を示している。

第8章は結論で、本研究の主要な成果を述べ、今後の課題について触れている。

以上を要するに本論文は近年工学的応用が進められている放電プラズマの定量的解析に不可欠な電子スオームパラメータを厳密に求める手法を開発するとともに、その有用性を示し、多くの新知見を明らかにしたもので、気体エレクトロニクスおよび放電プラズマ工学の進歩に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。