

## 学位論文題名

## Studies on Electron Swarms in Gases using a Propagator Method

(プロパゲータ法による気体中電子スオームに関する研究)

## 学位論文内容の要旨

弱電離非平衡プラズマは半導体デバイス製造プロセスをはじめとし、イオン源、気体レーザー、光源、プラズマディスプレイ、汚染物質除去など様々な分野で利用されている。本プラズマは電子の温度が他の種に比べて極端に高く数十万度にも達するのが特徴で、電子の働きにより電気的エネルギーを様々な物理化学反応に効果的に利用できる。

弱電離プラズマ現象は、放電空間内の多数の電子と気体分子との衝突が主要な過程である。弱電離プラズマ現象の基礎である電子スオーム(電子群)の諸特性に関する研究は、電子集団の統計的性質を個々の電子の微視的な振る舞いに基づいて導き出すもので、計算機シミュレーションはその有力な解析手段の一つである。一方、各種プラズマ応用技術における性能向上、最適化を目的としたプラズマ解析では、更に空間電荷電界の効果、イオンの流れ、光や磁界との相互作用など多様な物理過程を考慮する必要があり、計算の負荷が常々研究上の制約となっている。

本研究で着目したプロパゲータ法は伝搬現象を扱う数値計算手法の一種で、電子スオームを位相空間における流れとして扱う。位相空間を微小な領域に分割し、電子の微小領域間の移動をプロパゲータ(グリーン関数)と呼ばれる状態遷移確率関数を用いて時間経過に沿って逐次計算するものである。数値計算のほとんどが積和演算であるため並列処理の一種であるベクトル演算に適しており、膨大な計算に対する解決法の一つとして期待される。

本研究はプロパゲータ法を汎用的な弱電離プラズマ解析手法として確立することを目的とし、その基礎として電子スオームの解析を行なった。本論文ではまず、一般的な流れの解析手法の一つであるプロパゲータ法に電子スオーム解析に特有な物理過程を組み入れ、典型的な観測モデルに基づいた電子スオーム解析を通じてプロパゲータ法の基礎計算技術とモデルに応じた数値計算手法の体系化を試みた。これに続いて、従来の手法では解析困難であった条件を含む各種条件下において電子スオーム特性を解析することによりプロパゲータ法の有用性を示すとともに、プロパゲータ法の数値計算技術と電子スオームの性質の双方について新たに得られた知見をまとめたものである。

本論文は7つの章からなり、以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、弱電離プラズマ現象の基礎となる電子スオームの解析において考慮すべき電子過程、つまり電界からエネルギーを得るドリフトの過程と、高エネルギー励起種やイオン種を生成する電離や励起などの衝突過程を列挙し、これを数値的に扱うプロパゲータ法の計算原理や、従来の計算手法などが述べられている。

第3章から第6章では、種々の条件のもとで電子スオーム諸特性を解析しており、解析技術と物理的性質の双方について本解析で得られた新たな知見が示されている。

第3章では平行平板電極間の定常タウンゼント条件における電子スオームの空間的緩

和過程を解析し、位置依存の電子エネルギー分布が求められた。定常タウンゼント法は陰極から初期電子を連続的に供給し、電子スオーム進展を放電電流として観測するもので、電離係数などの電子スオームの諸特性値が得られる。電界下を運動する荷電粒子はポテンシャルに束縛されているため、プロパゲータ法において電子の位置と運動エネルギーの関係を正確に扱うためには、エネルギー保存則を厳格に考慮した位相空間の分割法と電子運動の取り扱い規則が必要になる。エネルギー保存則を組み入れたプロパゲータ法を構成することにより、電子スオーム緩和過程の厳密な解析結果が得られた。

第4章では、自由空間における定常タウンゼント条件およびパルスタウンゼント条件の流動平衡電子エネルギー分布を求める手法が示されている。時間空間的に進展する電子スオームに対し、時間積分により定常状態を観測するものが定常タウンゼント条件、空間積分により時間進展を観測するものがパルスタウンゼント条件である。両条件は実験的観測法における時間空間表現について相補的な関係にあり、観測条件による電子スオーム特性値の違いを理解するための基礎モデルである。両条件における流動平衡状態の電子エネルギー分布は、空間もしくは時間に関する指数関数的な電子数の変化を仮定することにより、速度空間における計算から求めることが可能で、プロパゲータ法による両条件下の解析手法を示した。観測法に応じた数値的条件設定についてボルツマン方程式による解析手法と比較しながら、物理的意義についての検討がなされている。

第5章では電子スオームの拡散現象を取り扱っており、気体分子との衝突により電界ポテンシャルを遡る方向へ拡散した電子スオームの特性について解析している。初期電子が十分高いエネルギーを持つ場合、気体分子との衝突による後方散乱のため電子は電子源よりも上流(電界を遡る方向)へも拡散し、通常の下流領域と同様の指数関数的定常空間分布を形成する。しかしながら上流領域と下流領域とでは、観測位置における個々の電子の通過回数の奇偶性の違いから電子エネルギー分布およびその他諸特性が全く異なったものとなることがわかった。通常は実効電離係数および実効電離周波数の値の正負が気体媒質の電離性/付着性を示す指標であるが、上流領域では電離周波数とドリフト速度の正負がその指標となることが明らかになった。本章ではまた、電子が電子源上流領域へ拡散する現象が、放電空間における陽極(電子吸収壁)近傍の電子数密度の減少に関連があることが示された。この現象は、陽極に吸収された電子が後方へ拡散できないことにより現れる空隙で、空隙の挙動は上流領域における電子スオームと同様の特性を示すことが明らかにされた。放電空間への電極等の境界の影響を緩和距離として定量化する手段が得られたことを意味する。

第6章では、電子流連続の式における電子密度勾配の一次の係数である電子スオーム重心移動速度をモーメント方程式により導出した。本来電子スオーム重心移動速度は実空間で定義され、これを与えるためには実空間の分割や級数展開などの操作が要求されていたが、本章では電子スオーム重心移動速度を零次と一次の連立モーメント方程式により速度空間で算出する手法を新たに提案し、より簡便な計算手法を示した。モーメント方程式による計算では、電離や付着による電子数変化が電子スオーム重心移動速度に与える影響が明確に区別され、電子数の増減とモーメントの符号の組み合わせにより分類されることが示された。プロパゲータ法による計算では、それぞれの分類の根拠となる物理過程の定量的寄与が個別に計算され、従来から定性的な説明として与えられていた電子スオーム中の電離や付着の発生位置と重心移動速度変化の因果関係を定量的かつ系統的に示すことができた。

第7章は結論であり、本研究の総括および将来の展望が述べられている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 酒 井 洋 輔  
副 査 教 授 長 谷 川 英 機  
副 査 教 授 本 間 利 久  
副 査 教 授 榎 戸 武 揚

## 学位論文題名

### Studies on Electron Swarms in Gases using a Propagator Method

(プロパゲータ法による気体中電子スオームに関する研究)

弱電離非平衡プラズマは、電子の温度が他種粒子に比べて高く数万～数十万度にも達することが特徴で、近年この電子による様々な物理化学反応を利用した技術（半導体デバイス製造プロセス、気体レーザ、光源、プラズマディスプレイ、汚染物質除去など）の開発研究が行われている。本プラズマ中の電子は電界による加速度運動と気体分子との衝突が主要な過程で、巨視的には群（スオーム）として振る舞う。従って、より高度な技術開発においては電子スオームの性質を詳細に理解しなければならない。スオームの解析には計算機シミュレーションは有力な一手段である。

本論文では、伝搬現象を扱う数値計算法の一種であるプロパゲータ法（電子スオームを位相空間における流れとして扱う）を電子スオームの解析に導入し、まず電子スオームの観測モデルに対応した数値計算法の体系化を試みた。本方法は、数値計算のほとんどが積和演算であるため並列処理の一種であるベクトル演算に適しており、膨大な計算に対する解決法の一つとして期待される。つぎに、各種条件下において電子スオーム特性を解析することによりプロパゲータ法の有用性を示すとともに、プロパゲータ法の数値計算技術と電子スオームの性質の双方について得られた新知見をまとめたものである。

本論文は7つの章からなり、以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、弱電離プラズマ現象の基礎となる電子スオームの解析において考慮すべき電子のドリフトと拡散過程ならびに電離や励起衝突過程を挙げ、これを数値的に扱うプロパゲータ法の計算原理や、従来の計算手法を述べている。

第3章では平行平板電極間の定常タウンゼント条件における電子スオームの空間的緩和過程を、エネルギー保存則を厳格に考慮したプロパゲータ（位相空間の分割法と電子運動の軌道計算の取り扱い）を導入して解析した。その結果、電子スオーム緩和過程（位置依存の電子エネルギー分布）を数値拡散を含まない条件下で明らかにした。

第4章では、自由空間における定常タウンゼント条件およびパルスタウンゼント条件の流動平衡状態における電子エネルギー分布を求める手法が示され、対応するボルツマン方程式解析手法と比較しながら、本方法に基づく解析結果を検討し、スオームの物理的性質が詳細に検討された。

第5章では電子スオームの拡散現象を取り扱っており、気体分子との衝突により電界ポテンシャルを遡る方向へ拡散した電子スオームの特性について解析している。電子スオームが後方散乱により電子源よりも上流（低電位側）へ拡散する現象が検討され、上流と下流領域とでは観測点における電子の通過回数の奇偶性の違いから電子エネルギー分布およびその他諸特性が異なること、また上流領域の現象は陽極（電子吸収壁）近傍の電子数密度が減少する特性と等価であることを明らかにした。

第6章では、電子流を表すボルツマン方程式に位置の重みを乗じて得られる零次と一次のモーメント方程式から構成されるプロパゲータを導入し、本来実空間で定義されるスオーム重心の移動速度を、速度空間内で算出する方法を新たに提案した。その結果、数値解析の能率化が見られたこと、また電離や付着による電子数変化が重心移動速度に与える効果を明確化し、電子スオーム中の電離や付着の発生位置と重心移動速度変化の因果関係を定量的かつ系統的に明らかにした。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめると同時に将来の展望が述べられている。

以上のように、本論文は非平衡プラズマ特性の基礎となる電子スオームの解析にプロパゲータ法を体系化して導入し、電子スオームの特性をより定量的に厳密に検討したものであり、放電工学および非平衡プラズマ工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

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。