

審査の結果の要旨

氏名 中村 友祐

修士（科学）中村友祐提出の論文は「放電臨界強度以下のミリ波中を進展する電離波面に見られる構造解析とその電離過程」と題し、5章から成っている。

大気中を放電臨界強度以下で伝播するミリ波ビーム中において、電離波面がビームの入射方向に超音速で進展する大気放電が観測されており、この現象を利用して地上から無線伝送されたミリ波の電磁エネルギーを推力へと変換する推進機「マイクロ波ロケット」が提案されている。この推進機の推進性能は電離波面の進展速度に強く依存しており、推進機的设计にはこの進展速度の予測と制御が不可欠である。

電磁波ビーム中での放電進展現象は、レーザー光やGHz帯のマイクロ波を用いた先行研究においても調べられているが、観測されるプラズマ構造や放電モデルはそれぞれ異なっており、ミリ波放電はこれらの先行研究において主張されているモデルでは説明することが出来ない。また、ミリ波放電に関する先行研究においても、放電臨界強度以下で観測される進展速度を再現できる理論的あるいは数値的なモデルは未だ存在しない。

以上を踏まえ、本研究では放電臨界強度以下のミリ波ビーム中における電離波面進展現象の解明を目的として掲げ、数値シミュレーションによる研究を行っている。

第1章は序論であり、研究の背景を説明している。様々な電界中で生じる大気放電についての基礎理論の概観を行ったうえで、110 GHz および 170 GHz のミリ波を使って行われた先行研究で得られた電離波面進展速度と電界強度の関係を整理して示すとともに、観測された電離波面のプラズマの $\lambda/4$ 構造および櫛状構造を紹介し、本研究の目的を述べている。

第2章では、ミリ波電界中での電離波面進展についての解析的な先行研究で使われている物理モデルと基礎方程式について説明し、これらに基づいて数値シミュレーションを行う際の離散化手法について説明している。

第3章では、二次元数値シミュレーションを用いて電離波面でのプラズマ構造の再現を試み、その形成条件、形成原因の解明と構造による電界集中についての調査を行っている。その結果、電子拡散係数とイオン化周波数が構造形成と進展速度決定に深く関わるパラメータであることを見出すと共に、これらのパラメータを大きく変化させて計算を行い、電子数密度が当該ミリ波におけるカットオフ密度を上回るとき、電界方向に向かうプラズマの成長が制限を受けてプラズモイド（粒状のプラズマ）が生じる一方で、ミリ波入射方向にはそのプラズモイドが伸展して櫛状構造が形成されることを突き止めている。さらに入射波とプラズマ前面での反射波の干渉より生じる定在波の幾何学的な関係よりプラズモイドが 0.9λ のピッチで並ぶ理由を示すことに成功している。

一方で、実験で観測された電離波面進展速度を再現するには、イオン化周波数を実験条

件から想定される数値より数桁大きく設定する必要があり、これは入射電界の約三倍の電界強度に設定することに相当すると述べている。さらに数値シミュレーションで再現された多次元構造に起因する電離波面前面への電界集中効果は小さく、パラメータ補正なしで観測された電離波面進展速度を再現するには電離を促進する他の効果を組み入れる必要があると指摘している。

第4章では、第3章で述べた電離を促進する効果として、電離波面を駆動するプリカーサ領域での中性粒子の積算電離現象に注目し、その領域で中性粒子が励起されるモデルの一つとして、バルク領域で励起された中性粒子が輻射によりプリカーサ領域に輸送されるモデルを提案している。励起中性粒子の輻射輸送を一次元拡散方程式で近似して計算を行った結果、輻射輸送過程でのクエンチングや解離による非放射脱励起が無ければ、実験値の50%ほどの速度での進展が可能であることを示している。しかし、現状では高エネルギー準位まで励起された中性粒子のクエンチング速度に関してデータベースが存在せず、本モデルの寄与の大小を議論することはできないと述べている。

第5章は結論であり、本論文の研究成果をまとめている。

以上要するに、本論文は、「マイクロ波ロケット」においてエネルギー変換の役割を担うミリ波大気放電で生じる電離波面進展現象の物理を解明することを目的として、数値シミュレーションにより電離波面のプラズマ構造を再現し、その形成原理、条件、及びその影響を明らかにするとともに、観測結果とシミュレーション結果の差を埋めるために、輻射により励起中性粒子がプリカーサ領域に運ばれるモデルを提唱し、その可能性を示したもので、その結果は独創的で、先端エネルギー工学、特に宇宙推進工学上貢献するところが大きい。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。