

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 中村 友祐

電磁ビームを用いた大気放電実験において電離波面がビーム源の方向に向かって進展していく様子が観測されており、用いる入射電磁波の波長が数センチ程度のマイクロ波帯、波長が数ミリ程度のミリ波帯、波長が数十マイクロメートル以下のレーザー波長帯においてそれぞれ異なった様子の進展が観測されている。この電離波面の進展は、絶縁破壊の臨界ビーム強度以上の条件におけるものと臨界強度以下の条件におけるものとに分けられ、十分な電離が起きないはずの臨界強度以下においてもなぜ放電が維持されるかについて多くの先行研究が存在する。マイクロ波放電における進展ではフィラメント状の構造が電界集中を引き起こし、それにより臨界強度以下での放電が維持されているという先行研究があり、構造が観測されていないレーザー放電における先行研究では衝撃波が放電を誘起していると考えたと実験結果を説明できるとされている。一方臨界強度以下のミリ波放電実験では、マイクロ波放電で観測されている構造なしに電離波面が進展している様子が観測されており、この進展速度はレーザー放電によるものと比べてパワー密度に対する依存性が大きく異なっている。このため、ミリ波放電における電離波面の進展は他の波長帯におけるものと同じ進展原理では説明が出来ず、満足にこの進展速度を説明できている先行研究は存在しない。また、ミリ波放電における電離波面進展はビーミング推進への応用が期待されているが、推進器内部の圧力上昇が電離波面の進展速度に大きく依存しており、この進展速度を正しく予測することが性能を上げるうえで不可欠である。以上のことから本研究全体における目的は、ミリ波放電における電離波面の進展速度を正しく予測するために、この電離波面で起きている現象を解明することにある。

ミリ波による大気放電実験において電離波面にミリ波特有の楕状構造が形成されることが観測されている。この構造がなぜ形成されるのかは分かっておらず、この構造による電界集中が電離波面の進展を支持している可能性も考えられる。そのため本研究ではこの楕状構造を数値計算により再現し、構造の形成原理の解明とこれが電界に与える影響の調査を行った。この結果、楕状構造は電離波面における電離数密度がミリ波のカットオフ密度を上回るときに入射波と反射波の干渉によって生じることが分かった。一方このような密度を実現し、さらに実験で観測された進展速度を達成するには、入射電界の三倍以上の電界集中が起らなければならないことが分かったが、楕状構造ではここまでの電荷集中が起きないことも明らかとなった。このことから、電界集中だけではミリ波放電における電離波面の進展は説明できず、電離を誘起する他の要素を考慮する必要があると考えられる。

電離波面における電離を誘起する他の要素として本研究では励起中性粒子による電離

誘起の可能性に注目した。高エネルギー励起中性粒子は基底状態の中性粒子に比べ、低いエネルギーの電子との衝突でも電離が可能であり、これが十分存在すれば電離を誘起することが可能である。しかし、このような励起中性粒子は電子と中性粒子の衝突によって生まれるため、電子数密度の高いバルク領域においてのみ生成され、電離波面を駆動しているプリカーサ領域では電子数密度が低く、電離に影響を及ぼせるほど十分な量の生成は起きない。そこで本研究において光脱励起で生じる光子がバルクからプリカーサ領域に励起中性粒子が供給することで駆動する電離波面の進展モデルを新たに提案した。この光子による輸送を拡散近似により定式化し、さらに中性粒子の励起状態についてもシンプルな仮定を導入して定式化することで、このモデルによる電子波面の進展を数値的に模擬した。また、光子による輸送の拡散係数に対する進展速度の依存性や、クエンチング等による発光を伴わない脱励起反応による影響も調査した。この結果、拡散係数に対する進展速度の依存性は低く、脱励起の周波数が 10^6 /s 程度以下であれば進展速度が入射ミリ波強度によらず実験値の 60%程度となり、ミリ波強度に対する進展速度の依存性も含めて先行研究に比べて非常に良い一致をみせた。

以上本研究において次のことが明らかとなった。

- (1) 臨界強度以下のミリ波放電実験で観測された楕状構造の形成は、電離波面の電子数密度がカットオフ密度を超えるときに入射波と反射波の干渉によって生じる。
- (2) 実験結果を電界集中で説明するには電界が 3 倍程度以上集中する必要がある、このような電界集中は楕状構造では起きない。
- (3) 光脱励起で生じた光子によりバルクからプリカーサに輸送される励起中性粒子が誘起する電離を考慮して計算すると、クエンチング等による影響が十分小さい場合には実験における進展速度を 60%程度まで説明できる。