

## 論文の内容の要旨

論文題目 ホールスラスタ中空陽極の放電安定機構

氏名 横田茂

ホールスラスタは電気推進機の一つで、比推力が 1000~3000 s において 50 % 以上という高い推進効率が得られ、イオンエンジンと比較すると空間電荷電流制限則を受けないため、非常にコンパクトであるという利点をもつ将来有望な推進機である。作動原理は、軸方向電場と周方向磁場のクロスフィールドにて推進剤を電離、加速、排出し、その反作用で推進力を得る、というものである。

このホールスラスタの中でも、アノードレイヤ型と呼ばれるタイプは、放電加速室における壁面へのイオンおよび電子の損失を小さくするために、放電室長を幅に比べて短くしており、より高い推力密度およびより長い寿命を期待できる。しかしながら、ホールスラスタは電離振動と呼ばれる 1 種の放電振動が存在し、アノードレイヤ型ではこの電離振動が起きる作動領域が広い。この放電振動によって、放電電流の最大値が大きくなることから、電源の許容電力値を大きくとる必要があり、これは電源の重量の増加を意味し、宇宙機にとって非常に不利な条件となるため、抑制する必要がある。

この電離振動を抑えるために、一般的に中空形状の陽極が用いられる。しかしながら、この形状の陽極を用いてさえも、振動の収まらない作動領域が存在する。これまで、この陽極形状が振動を抑制するメカニズムは明らかにされてこなかった。本研究の目的は、この中空陽極の安定化のメカニズムおよびその限界を明らかにすることである。このため、数値解析によってアノードレイヤ型ホールスラスタ内部の数値解析を行った。

数値解析には PIC-DSMC 法を用いた。この数値解析においては、全ての中性粒子、電子およびイオンのすべてを粒子として扱った。電位はポアソン方程式を用いて解いた。これにより、アノードレイヤと呼ばれる陽極付近の非線形領域を解くことが可能となる。

この計算手法を用いて、まず通常ホールスラスタにて用いられている平面形状の陽極を用いた際の推進機内部の放電状態を調べるため、推進機内部について 1D3V の数値解析を行った。解析の対象としたのは、東京大学にて開発された 1 kW 級のアノードレイヤ型ホールスラスタである。この数値解析によって、放電電流の振動のおおよその電流値および周波数が、また、作動パラメータによらず放電振動が起こることも再現された。

この数値解析により以下のような放電振動の様子が明らかになった。まず、中性粒子が放電室に入りこむと徐々に電離が始まり、放電室一帯にプラズマ生成領域が広がる。この際、アノードレイヤと呼ばれるように陽極付近に常に電子シースができるわけではなく、急激な電位勾配は電離領域よりも下流に存在し、振動時最も電離量が大きくなる時刻においては、電位勾配は推進機出口付近に存在することがわかった。その後、電離は放電室内

の中性粒子が枯渇するまでつづき、したがって電離量は次第に小さくなり、粒子の数密度分布、プラズマの電位分布ともに電離前の状態に戻る。電離振動はこれの繰り返しであった。

次に、この数値解析手法を元に、中空陽極内部も含めた 2D3V の数値解析をおこなった。過去の実験より印加磁束密度が低い場合は振動がおさまリ、ある一定の磁束密度よりも高くなると大きな放電振動が発生することが分かっている。この数値解析によって、この特徴まで再現された。

この数値解析から以下のことが明らかとなった。まず、低磁束密度の際には、電離が中空陽極内部から放電室内部まで広がっており、イオンを加速排出するための電位勾配は推進機出口付近に存在した。この際、プラズマの電位は陽極よりも高く、陽極付近にはイオンシースができていたことが観測された。一方、高磁束密度で振動が起きている際には、中空陽極内部にまでプラズマが存在していないことがわかった。この際、平面陽極を用いた際と同様の現象で放電振動が起きている。このとき、時間平均をとると、プラズマの電位は陽極よりも低く、陽極表面には電子シースが存在していることがわかった。

これらのシース電圧の陽極に対する正負に関しては、レーザー誘起蛍光法を用いて、推進機内部のイオンの軸方向速度を計測することで検証を行った。この結果、低磁束密度の場合は陽極内部にてイオンの軸方向の加速は認められず、放電室内部から出口にかけてイオンが加速されていることがわかった。一方で、高磁束密度の場合は、陽極内部にてイオンの加速が既に行われていることが明らかになった。これらの結果から、高磁束密度においてはプラズマの電位が陽極よりも低いことが分かり、電子シースが表れていることが示唆され、数値解析の結果と一致することがわかった。

このシースの正負に着目すると、磁束密度の変化とともに、シースの正負が反転し、その境目がちょうど閾値となる磁束密度であった。そこで、何がもとでシースの正負が反転するのかを明らかにするために、1次元のシース解析を行った。この結果、放電電流と陽極に当たるイオンの量のバランスによって、シースの正負が反転することがわかった。陽極に当たるイオンの量は、中空陽極を用いて低磁束密度である際には大きい、平面陽極を用いた際および中空陽極を用いて高磁束密度である際には小さい。これが中空陽極を用いた際の放電振動安定化のメカニズムとその限界であると考えられる。