

論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目 ホールスラスタの放電振動に関する研究

氏 名 山本 直嗣

ホールスラスタは電気推進機の一つで、比推力が 1000~3000s におい推進効率が 50%以上と高く、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ので推力密度が大きく非常にコンパクトであるという利点を持つ将来有望な推進機である。ミッション解析により衛星の LEO から GEO 等の軌道変更用、人工衛星や宇宙大型建造物の南北制御などに適しており、次世代宇宙推進機として現在最も注目され日欧米で競って研究開発が進められており、また月探査の SMART-1 の主推進やモバイル放送用衛星 MBSAT の南北制御など様々なミッションに搭載されつつある。

多くの利点をもつホールスラスタではあるが、克服すべき課題として放電電流振動、特に数十 kHz の低周波振動の低減が挙げられる。この放電電流振動は電源への負荷となるだけでなく、作動停止を招き、さらにこれにより加速チャンネル壁の損耗が促進され、寿命の低下を招くと考えられている。衛星に搭載されている今日においてもこの振動のために、スラスタの作動範囲が限定されている。これまでこの放電振動現象に関して様々な研究が行なわれて来ているが、いまだどの研究機関も根本的な解決法を見出せておらず、いまだ課題として残っている。また壁面損耗だけでなく推進効率の低下や衛星本体や太陽電池パネル等への損傷を与えるイオンビームの発散にも影響を及ぼすとも懸念されている。

本論文の目的はこの放電振動現象の機構を明らかにし、広範な作動範囲において良好な作動状態を維持できるような設計指針を得ることである。

そこで 1 kW 級ホールスラスタを製作し、推進性能及び放電電圧、放電電流の振動特性を測定した。推進性能は放電電圧および推進剤流量を増加させるに従い増加し、最大で推進効率 50% を達成した。これは諸外国のスラスタと性能面で比肩出来るものであった。次にこの放電振動がスラスタの推進性能に及ぼす影響を調査したが、推進効率および推力、プルームの発散角と振動とは直接的な因果関係は見られないことがわかった。一方、推進機にとって重要な性能である寿命と振動の関係を調査したところ、振動がなければ寿命が伸びることが確認できた。

この振動現象の解明のために、この放電振動の特性を明らかにした。すなわちイオン電流や電子密度の計測に加えて高速度カメラによる撮影と放電電流の波形より、この放電振動がプラズマ生成量の変動に起因することを明らかにした。また振動特性（振動数, および振動の大きさ）のパラメータ依存性を調査したところ、放電電圧や推進剤流量と比較して振動特性は磁束密度に非常に敏感であった。これよりこの振動が電子の移動度と密接に関わっていることが分かった。

そこで、この放電振動は中性粒子の擾乱がプラズマ生成量の擾乱を引き起こし、その擾乱が中

性粒子の擾乱にフィードバックされるとする電離不安定性に起因した振動現象であるとし、さらにこの振動はイオンではなく電子の移動度と密接に関わるとして、電離不安定性に起因する振動モデルを構築した。このモデルの妥当性を検証するために、様々な作動条件で振動数並びに安定作動範囲に関してモデルと実験を比較したところ、定性的に一致し、定性的にもそれほどの差異は見られなかった。また、異なったタイプのホールスラスタにおいても、この振動モデルが適用でき、タイプによる不安定性の差異が説明できることがわかった。

構築したモデルに基づき振動を低減する様々な試みを行った。まず、様々な陽極の形状で安定作動範囲がどのように変わるのかを測定した。モデルでは、振動は電子電流の陽極への流入面積に依存するとして、これを大きくすることが安定化につながると示唆していたが、実際にそのような形状に変更することで安定作動範囲は広がった。また、加速チャンネル形状を変更することにより安定作動範囲は広がるというモデルの示唆のもと、末広がり形状の加速チャンネル形状を変更して、その効果を確認したところ、安定作動範囲が拡大した。これらの振動低減方法によって、安定作動範囲が拡大しただけでなく、推進効率も向上していることが確認された。

以上、本研究より、この放電振動現象の機構が明らかになり、広範な作動範囲において良好な作動状態を維持できるような設計への指針を得ることができた。これらの結果はホールスラスタの信頼性、耐久性の向上、電源の軽量化、システムのマージンの増加等非常に有益な結果をもたらし、衛星の低価格化、ひいては人工衛星による高速移動体通信システムや高精度な測位システムの確立に貢献するものと考えられる。