

# 宇宙電気推進システムの制御に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科

大須賀弘行

宇宙電気推進システムは、静止衛星の南北制御や東西制御に応用され、さらに深宇宙への進出においては、小惑星探査機『はやぶさ』のイオンエンジンによる動力航行により、その潜在的能力が広く知られている。今後は、大気抵抗や太陽輻射圧を補償する超低高度衛星の主推進機への応用や太陽光発電システムの建設を支える宇宙物資輸送へ進展して行くことが期待されている。一方で、宇宙電気推進が特徴とする高比推力性は、利用できる宇宙電力の制限から低推力、連続加速という性質を同時に伴うため、化学推進機のインパルスに準拠した軌道計画や設計法とは次元の異なる新しい技術が必要である。例えば軌道維持や目標到達までに長時間を要するため、衛星運用現場にあつては、軌道計画、軌道変換、軌道決定、評価及び再計画という運用サイクルが発生する。実務の再履行性・再試行性という新たな戦術を獲得できることに平行して、運用の煩雑性が増加するため、電気推進システムの制御の自律化によって解決することが課題となっている。ホールスラストシステムは、比推力が 1000 秒から 3000 秒で推進効率が 30%以上と高く、イオンエンジンシステム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は、約  $50\text{mN/kW}$  と大きく、システムが非常にコンパクトになる特徴を有した電気推進機である。しかし、ホールスラストシステムはスラストの動作原理上から数十 kHz の大きな放電電流振動を伴うため作動範囲は狭く限られ、システムの制御の自律化にあたり、この低周波振動の低減が克服すべき大きな課題である。なぜならこの低周波振動は、ホールスラストの作動停止や壁面損耗を引き起こし、さらに従来の磁場を一定とする制御手法では推進効率の低下を招くからである。衛星に搭載されている今日においてもホールスラストシステムの自律化を目的とした制御手法は、低周波振動を実用的に抑制することが難しいことからこれまで、殆ど研究がなされていない。

本論文はその実現性を強く望まれながら実用的な方式では未だ十分な成果が得られていないホールスラストシステムの制御の自律化について、低周波放電振動の低減を着眼点として推進効率の向上と安定に動作する推進制御方法の自動化を開発し、寿命末期まで安定作動できることを実証した結果をまとめたものであり、6 章からなっている。

第 1 章は序論であり、様々な宇宙機の中で、電気推進機が期待される役割、およびその実現に不可欠なホールスラストシステムに要求される性能について、説明している。

さらに、これまで研究されたホールスラストの放電振動の抑制や制御手法に対する研究動向をまとめ、本研究で提案する制御手法の研究開発の考え方と方向を論じている。

第2章では、初にチャンネル壁に損耗のない20mN級ホールスラストを使用し、推進性能と放電電圧、電流と磁場電流と振動特性を測定した。この結果、(i)放電振動は推進効率と推力に直接的な因果関係が認められないこと、(ii)放電振動の周波数と振幅の大きさは、磁束密度の変化幅には非常に敏感であることを明らかにした。次に様々な作動条件下で放電振動の振幅に着眼した振動周波数と安定作動範囲の確認実験を行い、磁場を最適に制御することが放電振動を実用的に抑制し、さらには電力消費も低減し推進効率を向上させる望ましい制御手法であることを提案した。その結果、その推進性能は放電電圧と推進剤流量を増加する毎に従い増加し、低流量( $1.36 \times 10^{-6}$  [Kg/sec])のもとで、最大で推進効率36%を達成することを実証した。これは構成が単純なトリムコイルを持たない20mN級のホールスラストとしては、諸外国と比較して、性能面で比肩できるものであった。

第3章では、形状寸法の異なる250mN級ホールスラストに対してもこれらのシステムの制御が活用できるか、その作動範囲の安定性を放電振動マップ上で、比較を行った。その結果、放電振動の大きさの傾向は定性的に一致し、定量的な差異はほとんど認められず、20mN級のホールスラストと250mN級のホールスラストの安定動作範囲が規格化できることを明らかにした。さらに電力密度を指標とした実用的なシステムの制御手法を提案した。

第4章では、ホールスラストの長時間動作により、チャンネル材が磨耗劣化し、加速チャンネル形状が、広がるという田原、小紫、中川らの開発結果の示唆を得て、磨耗模擬した加速チャンネルを試作し、20mN級の磨耗模擬ホールスラストで、安定性の効果を確認した。この結果、安定作動範囲もチャンネル口径が広がると変わることを明らかにし、システムの制御の方法として、放電電圧と磁場電流の最適制御(放電電流振動低減方法)を行なうことを提案した。次にこの制御効果が、安定作動範囲が拡大するだけでなく、推進効率も向上できるということを実験により証明した。さらに最適動作点を見出す自律制御手法の提案を行い、この自動制御アルゴリズムの動作を磨耗模擬ホールスラストを使って実証した。

第5章では、システムの制御についてデジタル制御の適用を研究した。従来方式はアナログ制御であり、一方でプラズマが非線形制御系となるため、衛星に要求される電磁適合性に適合させるには電源フィルタの設計質量が大きいという課題がある。この課題に対して、モデルを用いたデジタル制御を適用した制御を行うことにより、係る質量を半減し、ホールスラストシステムの電源部の小型軽量化に寄与できることを提案した。このようなシステム制御のデジタル化は、通信機器の電源や産業応用機器の電源に活用することにより、既存システムの制御用電源の小型軽量化に広く貢献できると期待される。

第6章は結論であり、本論文で得られた結果を要約するとともに、今後の研究課題について触れ、将来のホールスラストシステムの発展への提言とこれらの研究を通して得たデジタル制御技術の適用への提言を行っている。