

報告番号	甲 第 12054 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 High Impedance Ion Acceleration using Applied Diverging Magnetic Fields  
(発散磁場印加による高インピーダンスイオン加速)

氏 名 市原 大輔

## 論 文 内 容 の 要 旨

人工衛星の姿勢制御あるいは軌道遷移に用いられる電気推進機は、イオンを静電加速する静電加速型電気推進が主流である。放電室内部で加速されたイオンは推進機外部に排気され推力の源となる一方、一部のイオンは放電室壁面に衝突しこれを損耗する。イオンの生成・加速過程は、放電室内部の電場・磁場形状によって決定される。これまで様々な電磁場を印加し推進機の作動特性が評価されてきたが、イオン壁面損耗の低減と推進性能の維持とを両立する手法は未だ確立されていない。

投入電力に関するエネルギー保存則から、小電流かつ高電圧作動、すなわち高インピーダンス作動により電気エネルギーから運動エネルギーへの変換効率の向上が導かれる。さらに発散磁場を印加し生成したプラズマを磁場中に閉じ込めることで、放電室壁面への拡散抑制が期待できる。イオン壁面損耗の低減と推進性能の維持との両立を目指し、本研究では、発散磁場中における高インピーダンスイオン加速の実現を目的とした。

実験はすべて真空チャンバー内で実施した。推力測定に加え排気プラズマ中の平均イオンエネルギー、イオン電流値及びイオンビーム発散半角を測定しイオン加速特性を評価した。静電プローブを用いたプラズマパラメータ(電子数密度、電子温度、空間電位)計測では各プラズマパラメータの空間分布を放電室内部から推進機下流までの領域で測定することで、イオンの生成・加速過程に係る物理現象を上記イオン加速特性と合わせて検討した。

まず初めに、発散磁場を活用した電気推進機である Applied field Magnetoplasma dynamics (Af-MPD)スラスタの高インピーダンス作動を試みた。熱電子放出型中空陰極を採用しアーク放電の維持に必要な熱電子を確保した。これにより従来の低インピーダンス( $\sim 10^4 \text{ A} \times$

10<sup>1</sup> V)作動に対して 1/10 ~ 1/100 の推進剤流量並びに電力投入でありながら同等の比パワーを維持し、最大 0.26 T の発散磁場中における高インピーダンス直流放電(~20 A×~ 180 V)に成功した。しかしながら、投入電力は主に陽極近傍に形成される電位降下領域(Anode sheath)にて消費されることが推力及び放電電圧測定結果から示唆された。

つぎに、Anode sheath における電力消費は陽極近傍でのプラズマ密度を増加させることで低減可能である。そこで高周波(RF)プラズマ源を陽極上流に有する 2 段式静電加速器、Helicon electrostatic thruster (HEST)に注目し、プラズマ源への RF 電力供給が Anode sheath 電圧並びにイオン静電加速特性に及ぼす影響を検証した。イオン静電加速に用いる直流(DC)放電電力に対して RF 電力が小さい場合であっても、イオンビームエネルギー及びイオンビーム電流が増加した。一方、過剰な RF 電力供給は 2 価イオンの生成につながりイオン生成コストの増加を招いた。RF 放電によるイオン生成と DC 放電によるイオン静電加速とのトレードオフから、推進性能を最大化する最適 RF/DC 電力比が見出された。このとき、陽極電位がプラズマ内部に浸透し Anode sheath における電力損失が低減された。プラズマ源にて生成したイオンは、陽極電位から下流の空間電位までの電位差を加速電圧として活用でき、発散磁場中におけるイオン静電加速特性の向上を達成した。ただし、最適 RF/DC 電力比での作動は Af-MPD スラスタと同等の電力を要することも明らかとなった。

さらに、低電力でのイオン静電加速を目指し、DC 放電のみによる陽極近傍でのプラズマ生成とその静電加速とを試みた。作動ガスを陽極近傍からのみ供給することが電離促進につながり、局所的な高電子数密度領域が形成された。作動ガスの電離電圧を上回る電位降下が陽極近傍に形成され、この電位降下領域にて加速された電子との電離衝突により作動ガスを電離する手法(near-anode ionization scheme)を見出した。陽極近傍における電位降下は、発散磁場下流での電子トラップとこれに伴う実効的な陰極面積の拡大に起因し、プラズマの準中性条件を満たすため、イオン流出に釣り合う電子捕集として自発的に形成されたものと考えられる。陽極近傍の磁場強度を局所的に増加した場合、前述の電位降下量が増加し作動ガスの電離がさらに促進されるとともに、スラスタの中心軸に向かう電界が発散磁場中に形成された。その結果、供給作動ガス流量相当のイオンを放電電圧相当のエネルギーまで静電加速し放電室壁面から遠ざかる向きへ排気することに成功した。

このように、(i) 中空陰極からの熱電子で小電流×高電圧放電を維持し、(ii) near-anode ionization scheme により生成したイオンを静電加速することで、発散磁場中における高インピーダンス作動の実現に成功した。プローブ計測結果に基づく推進性能値は、HEST への最適 RF 電力投入時の値を上回るだけでなく、同電力領域における現行の電気推進機のそれと比類するものであり、本加速方式の有効性を実験により実証した。