

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 関根 北斗

修士 (科学) 関根 北斗 提出の論文「変動磁場印加型無電極プラズマ推進におけるプラズマ加速 (Plasma Acceleration in Electrodeless Electric Propulsion employing Time-varying Magnetic Field)」では、変動磁場印加型の無電極プラズマ推進機における電子／イオンのダイナミクスを実験的に明らかにし、双方に重要な面内電場の自己形成を指摘した。また、明らかにした物理を用いて、将来的な推進システムとしての展望を議論した。

現在、将来の深宇宙探査ミッションに向け、無電極型プラズマ推進機の実現が必要とされている。主要な無電極型プラズマ推進機である磁気ノズルスラスタは、高周波放電に発散型静磁場 (磁気ノズル) を組み合わせ、プラズマを加速排気するという推進方式を有する。この磁気ノズルスラスタの推進効率は、近年では 1 kW 級において 20 % 弱にまで達している。しかし、既に実用化されている電気推進機は推進効率 50 % 以上を達成しており、磁気ノズルスラスタの推進効率はさらなる向上の必要性を残している。本論文では、静磁場のみを持つ磁気ノズルスラスタに、変動磁場を印加してプラズマを追加速するという方式に着目し、実験を通して理解が不十分であった物理的側面を明らかにしている。

第一章では緒言として、これまでの無電極電気推進機の研究をまとめ、プラズマ加速に関するさらなる物理的理解が推進効率向上の鍵となるとしている。はじめに、磁気ノズルスラスタの先行研究ならびに、効率向上を目指す変動磁場印加型の先行研究をまとめている。次に、変動磁場印加によって期待される物理／効果を示し現状性能をまとめ、同方式における課題を記述している。変動磁場印加型では、電子の周方向運動エネルギーがイオンの軸方向運動エネルギーへと変換されることをコンセプトとしているが、各ダイナミクスの物理的理解が不足しており、この理解が推進効率向上への指針となることを指摘している。このために、本論文の目的を電子／イオンのダイナミクスを実験的に明らかにし、これらのカップリングに重要な物理を解明することと定めている。

第二章では、本論文の実験に用いた実験装置、およびその方法について記している。真空装置および変動磁場印加型無電極スラスタの構成を記述しており、従来の磁気ノズルスラスタと同様、電子は磁化、イオンは非磁化という条件を構築している。プラズマの詳細測定に際しては、全部で 5 種類のプローブが用いられており、それぞれの測定原理や構成、精度と誤差評価を先行研究による知見を取り入れながら述べている。

第三章では、周方向電流駆動実験について述べられている。変動磁場は、周方向電子電流の駆動を目的として印加されるため、電子の周方向ダイナミクスの理解は本質的に重要である。磁場ベクトル測定用磁気プローブを構築し、プラズマ中の磁場／周方向電場／周方向電流／電

子への投入エネルギーの時空間分布を実験的に明らかにしている。また、電子温度／プラズマ密度の計測結果と合わせ、周方向電流の要素について考察している。その結果、磁気ノズル型では無視されていた電子 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト電流の寄与が無視できないことを明らかにしている。

第四章では、イオンの静電的加速について述べられている。マッハプローブを用いてイオン流速の時空間分布を計測し、明らかにしている。さらに、プラズマ中の静電ポテンシャル、密度の時空間分布もあわせて取得し、変動磁場印加中の磁場平行方向および磁場垂直方向の電子およびイオンのダイナミクスがそれぞれ議論されている。特にイオンは常に静電的に加速されていること、また周方向電流が誘起される時刻および領域で強い面内電場が自発的に形成されていることを指摘している。

第五章では、電子／イオンの両ダイナミクスに重要な面内電場の形成機構について、 $\mathbf{r}\text{-}\mathbf{z}$ 面(推進機断面)内では至るところで無電流条件が満たされるという面内無電流仮説を立てている。面内無電流仮説の定式化を行い、強い面内電場の形成を導出し、第三章および第四章で得られた実験結果をよく説明できることが示されている。

第六章では、これまで得られた実験的知見と無電流仮説を用いて、推進機の大電力化に際するスケーリングに関して、重要な条件および方針を示している。またこの方針に適合する、大電力レンジでのプラズマ源設計を、グローバルモデルによって推定し、今後の変動磁場印加型無電極プラズマ推進機の展望および設計指針を議論している。

第七章では、本研究で行われた実験結果および実験的知見を総括し、結言としている。また、推進機設計につながる重要項目と問題点を挙げ、推進機形状などの具体的な候補を示している。

以上を要約すると本論文では、今後の無電極プラズマ推進の発展に大きく貢献する変動磁場印加型プラズマ推進機における電子／イオンのダイナミクスの実験的解明、および両者に重要な面内電場の形成を発見している。また、推進機内の物理現象解明にとどまらず、それらを利用した推進機設計指針も示されており、推進機性能の向上、ひいては将来的な深宇宙探査に向けた工学的側面からの価値も認められる。

よって本論文は博士(科学)の学位請求論文として合格と認められる。

以上 2 1 7 6 字