

論文の内容の要旨

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A MICROWAVE HALL THRUSTER

(マイクロ波放電型ホールスラスタの実験的研究)

モリナ・モラレス ペドロ

(学生証番号：37-07108)

(1) 研究の背景

ホールスラスタは電磁加速型の電気推進機のひとつである。ホールスラスタはイオンスラスタにくらべ効率が低い反面、イオン加速において空間電荷制限を受けないため電気推進機の中では比較的高い推力密度が得られるという利点を持つ。

ホールスラスタは、プラズマ生成部とイオン加速部を同一にするか、互いに独立させるかによってそれぞれ1段加速型、2段加速と呼ばれており、近年の研究では2段型の方が推進性能及び操作性の面で優れているという結果が得られている。

本研究ではマイクロ波の投入による効果を検討するため、マイクロ波イオン源を用いる二つの2段型ホールスラスタのプロトタイプ（プロトタイプ I、II）を試作し、その作動点及びプラズマ特徴を調べた。さらに、マイクロ波投入によりプラズマの生成が容易になるため、Xe 以外の推進剤（窒素、アルゴン）についても実験を行ない、これらの推進剤について将来的な利用可能性を検討した。

(2) 実験装置

まずマイクロ波伝送系について説明する。マグネトロンにより発振された周波数 2.45GHz のマイクロ波は、導波管を通過して共鳴器（キャビティ）内に入る。マイクロ波はプランジャー間で定在波となり、共鳴器内に蓄えられたマイクロ波電力は石英ガラスを通して加速チャンネルに導かれる。マイクロ波電力は非共鳴吸収と呼ばれるカットオフを伴うマイクロ波電界のプラズマへのしみこみを利用してプラズマへ吸収される。マイクロ波の整合はプランジャーを前後に動かしてキャビティの長さを変えることを行う。実験において利用した共鳴モードは円筒モード TM₀₁₁ である。

プロトタイプ I のホール加速部では、10 x 6.5 x 4mm の SmCo 永久磁石によって 100 から 1000G の間で磁束密度が調節できる。このホール加速部は種々のマイクロ波型電離部に取り付けることが出来るよう、下流で磁気回路を構成しており、この点で従来型ホールスラスタと大きく異なる。加速チャンネルの幅は 6mm、長さは 13mm となっている。

プロトタイプ II のホール加速部では、10 x 6.5 x 4mm（外部磁気ポール）と 4 x 4 x 2mm（内部磁気ポール）の二組の SmCo 永久磁石によって 100 から 500G までの磁束密度

調節ができる。このスラスタは従来型ホールスラスタと異なり、機械的な磁気回路を持たない。ここでは長チャンネル、短チャンネルの二つのコンフィギュレーションで実験を行った。長チャンネルの幅は 11mm、長さは 24mm、短チャンネルの幅は 11mm、長さは 12mm である。

(3) 実験結果

実験では主に推進剤としてキセノンを用い、流量は 14sccm (プロトタイプ I) もしくは 20sccm (プロトタイプ II) に設定した。プロトタイプ II では推進剤としてアルゴン、窒素も用いた。1 回の作動は 10 分程度行い、放電電圧、放電電流、イオン電流、フィラメント電子電流の測定を行った。加速効率、推進利用効率の評価には、ステンレス製のイオンコレクタ (500x500mm) を用いた。コレクタは推進機下流 350mm に設置し、GND に対して -30V の電位を与えてイオンのみ捕集するようにした。プロトタイプ II では単探針を用い空間電位、プラズマ密度、電子温度の分布を測定した。スペクトルアナライザーによって、放電電圧 180V、230V の設定で、放電電流のスペクトルを得た。

プロトタイプ I は放電電圧 150V 以上では、マイクロ波を投入してもプラズマを維持できなかった。DC モードでの最高加速効率は 14% で、マイクロ波モードでは 16% であった。効率が低い理由として以下の原因が考えられる：

- (i) イオン損失 1：下流磁気回路の軟鉄表面へのイオン損失
- (ii) イオン損失 2：内部ポール上流壁面へのイオン損失
- (iii) 磁束密度が低い場合、イオンビームの拡散損失の割合が大きい。
- (iv) 推進剤供給ポートの数が不十分であったため、空間的に一様な放電が得られなかった。

つぎに、プロトタイプ II の長チャンネルコンフィギュレーションで、Xe20sccm で実験を行った。マイクロ波モードで作動させた場合、低い電圧でも作動させることができる。キセノンより電離電圧が高いアルゴンの場合、マイクロ波を投入すると、加速効率が上がる。

一番性能が良好だったスラスタはプロトタイプ II の短チャンネルコンフィギュレーションである。この実験結果より次のことが分かった：

- (i) 300W のマイクロ波を導入する場合、DC モードと比較してイオン電流が増加し加速効率は約 15% 向上する。マイクロ波モードで作動させた場合、作動範囲が広がり、低電圧でも作動可能となる。すなわちマイクロ波を導入することで、イオン生成効率を向上させることができる。さらにマイクロ波電力を大きくすることによって、イオン生成効率も増加することが明らかになった。
- (ii) 低放電電圧もしくは高放電電圧で作動させた場合、マイクロ波の影響が明確に現れた (Microwave-dominant mode)。80V から 130V までの中間作動領域ではマイクロ波を導入しても、比較的低いイオン電流及び加速効率しか得られない

(DC-dominant mode)ことが分かった。

(iii) 推進剤としてアルゴン、窒素を使用した場合、マイクロ波を導入するとイオン電流、加速効率及び推進剤利用効率が向上することが確認された。

プロトタイプ II の長チャネルコンフィギュレーションでは、DC モードと比較してマイクロ波は上流から導入されるため、以下の理由により性能が改善されると考えられる：

1. 上流側でマイクロ波によって生成されるプラズマの容積が比較的大きい。
2. マイクロ波によって電子温度が上がるため、電離が促進される。つまり生成された電子が上流に拡散する前に中性粒子を電離する。

(iv) シングルプローブの測定結果によって、マイクロ波モードでスラストのアノード付近において電子温度、プラズマ密度共に比較的高い二つのピークが検出された。このことから、マイクロ波によるイオン生成領域と円周方向にドリフト運動を行う電子によるイオン生成領域の二つのプラズマ生成領域が存在することが分かった。

(v) スペクトルアナライザの測定結果によって、マイクロ波モードで操作した場合振動は 10 - 50 kHz (low-frequency oscillations) に抑えられる。これはイオンが二つの領域で生成されるためである。

マイクロ波の投入による効果を検討する冷たい均一プラズマモデルを提案した。解析結果から、磁場がない場合のプラズマ表皮厚さは 4 mm から 12 mm、40G では 16 mm となることがわかった。

(4) 結論

マイクロ波放電型ホールスラストの二つのプロトタイプを試作した。プロトタイプ I では高イオン損失や最適化されていない磁力線形状のため、マイクロ波を投入したときの加速効率は 16% 程度であった。プロトタイプ II の長チャネルコンフィギュレーションではアルゴンにおいてのみマイクロ波を投入した場合加速効率が 10% 向上した。プロトタイプ II の短チャネルコンフィギュレーションが最も高性能であった。キセノンの場合、DC モードと比較してマイクロ波モードでは加速効率が 15% 増加することが分かった。アルゴンと窒素の場合においても、マイクロ波を投入すると加速効率が向上することが分かった。シングルプローブの測定結果により、加速チャネルにおいて二つのイオン生成領域があることが分かった。この新しい電離構造のため電離振動は減少した。

マイクロ波により電子にエネルギーが供給され、プラズマ生成が促進されるというメカニズムにより推進性能の改善が行われ、特にアルゴンや窒素という将来的な推進剤について効果が著しいとわかった。