

氏名	と ばり ひろ ゆき 戸 張 博 之		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成15年3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	電磁プラズマ推進機の加速機構と外部磁場形状効果		
指導教官	東北大学教授 犬竹 正明		
論文審査委員	主査 東北大学教授 犬竹 正明	東北大学教授 畠山 力三	
	東北大学教授 一ノ倉 理	東北大学助教授 安藤 晃	

論文内容要旨

第1章 序論

21世紀の情報通信を担う通信衛星や気象観測, 資源探査に必要な人工衛星の打ち上げ, 軌道保持および姿勢制御, さらに有人火星探査などの惑星間航行には信頼性の高い宇宙推進技術の確立が不可欠である。化学燃料ロケットによる地球の引力圏外への離脱技術が概ね確立した現在, 惑星間航行時など微小重力空間で利用する高効率推進機の開発が求められている。その有力な候補として, 気体燃料をプラズマ化し, 電磁気力により加速させ推進力を得る電気推進機の開発研究が内外で精力的に行われている。本研究で対象としているMPD(Magneto-Plasma-Dynamic)推進機は, 放電電流と自己誘起磁場の相互作用により推力を得る方式で, 電気推進機の中でも比較的高い推力が得られるものとして, すでに宇宙空間での作動実験に成功している。次世代の宇宙推進機には有人火星探査などのミッションに耐えうる高い信頼性と推進性能が求められる。MPD推進機の推進性能の向上を目的として, 外部磁場を印加する試みがなされ, 実験的に推力の上昇が確認されている。しかし, 外部磁場印加時のプラズマ加速機構は自己磁場加速, ホール加速, 空力加速などが複合した複雑なものであり, 未だ解明にはいたっておらず, 外部磁場印加による推力上昇の物理機構も明らかになっていない。これまで主に行われてきたMPD推進機の推進性能評価, すなわち推力スタンドを用いた推力測定のみでは, プラズマ流中の物理現象を解明するには不十分であり, MPDプラズマの加速機構の解明には, プラズマ流中の流れ場, 電磁場の詳細な計測が不可欠である。

そこで, これまでに東北大学のHITOP装置において外部磁場印加型MPDアークジェットで生成される高速プラズマ流の特性を, 分光計測, マッハプローブ, 飛行時間型粒子計測(Time Of Flight)等を用いて調べてきた。これまでの分光計測により, プラズマの噴出速度は放電電流にほぼ比例することが確認

されており、電磁加速は放電電流に依存することは実験的に明らかになっている。しかし、電磁場と高速プラズマ流の相互作用は十分に調べられていない。MPD 出口近傍の電磁加速力場の評価と動的なプラズマ流の振る舞いとの比較は MPD 推進機におけるプラズマ加速機構の解明に不可欠である。

そこで、本研究は外部磁場印加型 MPD 推進機の加速機構と外部磁場形状効果を、形成される電磁加速力($j \times B$ 力)場の実験的評価とプラズマ流の動的な振る舞いを調べることにより明らかにすることを目的としている。

第 2 章 実験装置

本章では、電磁流体実験装置 HITOP(HIgh density TOhoku Plasma)と電磁加速プラズマ源である MPD アークジェットおよび計測機器について述べている。HITOP 装置の一端に取り付けられた MPD アークジェットは、外径 1cm の棒状タングステン陰極と内径 3cm の円環状モリブデン陽極からなる。放電部には高速電磁弁を用いて推進剤（本実験ではヘリウムを用いた。）を供給し、ここに 5 段の L-C 梯子回路で構成されるパルス整形回路を介し準定常電流を供給し約 1msec の放電を行っている。また、全長 3.3m、内直径 0.8m の円筒型真空容器の周囲には計 17 個の外部磁場コイルが設置され、様々な磁場配位中でのプラズマ生成が可能である。MPD 近傍のイオン温度、軸方向および方位角方向の回転速度は焦点距離 1m の分光器を用いてそれぞれ線スペクトルのドップラー広がり、ドップラーシフトから求めている。下流域ではマッハプローブを用いて詳細な流れ場測定を、イオンおよび電子温度測定にはグリッド付き静電エネルギーアナライザー(GEA)および静電プローブを用いている。またプラズマ中の磁場分布測定には磁気プローブアレイを用いた。

第 3 章 HITOP プラズマの基礎特性

本章では、HITOP 装置において、MPD アークジェットで生成されるプラズマ流の基礎特性を静電プローブ、分光計測で得られた結果をもとに述べている。放電電圧-電流特性、電子温度、密度などのプラズマパラメータを詳細に調べた。推進剤流量が少ない場合には、放電電流 7kA 以上の条件下では軸方向にイオン温度の急激な上昇が観測された。これは推進機の性能に直結する興味深い結果である。この結果より何らかのイオン加熱機構の存在が示唆される。

また、外部磁場印加により新たに誘起される回転運動について、一般化されたオームの法則、剛体回転の運動方程式を用いて解析を行った。外部磁場印加によって生じたプラズマ流の方位角方向の回転が、

$E \times B$ ドリフト, イオン反磁性ドリフト, 遠心力ドリフトおよび方位角方向の $j \times B$ 力による回転の組み合わせで決定されることを明らかにした。

第 4 章 電磁加速力の空間分布と外部磁場形状効果

本章では, 磁気プローブアレイを用いて, MPD 出口近傍におけるプラズマ中の磁場の 2 次元分布を直接計測し, 形成される電磁加速力場を実験的に評価した結果について述べている。

一様磁場印加時の軸方向の磁場変動は, 外部磁場を打ち消すいわゆる反磁性出力であった。高密度プラズマ流の生成に伴って生じるこの反磁性出力は陰極前面で最も大きく, 外部磁場を 1/2 以上打ち消し, 磁力線が大きく歪められていることがわかった。さらに反磁性出力は下流に進むにつれ弱まること, 放電電流の下流への吹き出しにより方位角方向の磁場変動も生じることから, MPD 近傍にはらせん状収束型磁気ノズルが自発的に形成されることが明らかになった。計測した磁場の空間分布からプラズマ電流を算出し, MPD 近傍の電磁加速力場を定量的に評価した。一様磁場印加時には, 電磁力 3 成分のうち, 径方向内向きの力 (ピンチ力) が他の成分に比べ, 2 桁近く大きくなることがわかった。また, 誘起された半径方向の磁場と反磁性電流との相互作用が軸方向加速を妨げる制動力として作用することが初めて実験的に明らかになった。これに対し, 外部磁場形状を発散型とした場合は, 半径方向磁場の向きが反転し, 制動力として作用した項が加速力に変換しうることを明らかにした。これらの結果は, MPD プラズマ中の電磁加速力は, 外部磁場形状のみでその分布を制御しうることを示している。

第 5 章 考察

本章では, 実験的に得られた MPD プラズマの電磁加速力場と流れ場の比較を行い, 流れの支配因子を考察している。

電磁加速力場と流れ場の比較のために, 分光計測によりイオン温度, プラズマ径, 軸方向および回転速度の軸方向分布を計測した。ただし, HeII ライン ($\lambda = 468.57\text{nm}$) の発光強度の径方向分布から, その $1/e$ 半幅をプラズマ径とした。一様磁場印加時には, イオン温度, 軸方向および回転速度は軸方向にほぼ一様な分布であった。イオンマッハ数は 0.7 程度, すなわち亜音速で推移した。さらに, MPD 近傍で正味の磁場強度が 2 倍以上変化しているにもかかわらず, プラズマ径は軸方向にほぼ一様であった。MPD 出口近傍ではプラズマ流は自発的に形成される磁気ノズルにしたがった形状変化はしておらず, プラズマ径は自己収縮によるピンチ力とプラズマ圧力のバランスで決定されていると考えられる。

さらに、拡張されたベルヌイの式から、MPD プラズマ中のエネルギーバランスを評価した。この結果、自己誘起磁場のエネルギー、流れのエネルギー、熱エネルギーおよび外部磁場印加による付加エネルギーの総和は概ね保存されることがわかり、さらに他のエネルギーにくらべ熱エネルギー成分が1桁大きくなることが明らかとなった。さらに、プラズマ中のイオン温度と電子温度の比がおよそ1.5~2であることから、直接イオン加熱機構が存在すると考えられる。その原因となる物理機構を方位角方向の電磁力、回転速度分布から考察した。すなわち、方位角方向の電磁力は分光計測で得られたプラズマの回転方向と同じ方向に作用し、軸方向にほぼ一様に分布している。他方、方位角方向の回転速度も一様に分布している。このことから、方位角方向にも制動力が存在することが示唆され、それはプラズマの粘性によるものと考えられる。一様磁場印加時では、速度の輸送の程度を表すプラズマの動粘性係数が $\sim 4 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であり、古典拡散係数($D \sim \rho_i / \tau_e$)とほぼ同程度の大きさである。このプラズマの粘性力“Viscous drag”は第3章に述べたイオン加熱現象に寄与する可能性がありさらに検証する必要がある。

電磁推進機への適用を考えた場合、外部磁場印加は電極上での熱伝導損失の低減や流速の制御が期待される一方で、プラズマ中の熱エネルギーへと変換されるエネルギーも大きいことが判明した。この熱エネルギーすなわち磁力線に垂直方向のエネルギー成分を平行方向のそれに変換することで、推進機の効率改善に大きく寄与すると考えられる。そこで、MPD 出口部で亜音速流であることから、固体壁における熱損失が無視できる磁気ノズルによる空力的な加速と、ノズルの発散領域におけるホール加速の複合加速を提案している。

第6章 結論

本章では、本研究で得られた成果を述べ、まとめを行っている。

外部磁場印加型 MPD 推進機の加速機構と外部磁場形状効果を、詳細な流れ場、電磁場の計測を通して議論した。外部磁場印加時には、高密度プラズマ流の生成に伴う反磁性効果により、磁力線の大きな歪みが生じることが示され、プラズマ流に作用する電磁加速力は、外部磁場形状のみによりその分布を制御しうるということが初めて実験的に示された。また、プラズマ流中のエネルギーバランスの評価から、プラズマ中の熱エネルギー成分が他の成分に比べ1桁大きくなることを示した。この熱エネルギーを、磁気ノズルを用いた運動量変換による空力加速、ノズル発散領域におけるホール加速の複合加速を経て、流れのエネルギーに変換することで、高効率加速が実現されると考えられる。

論文審査結果の要旨

次世代情報通信ネットワークを担う通信衛星や宇宙ステーション，さらには有人火星探査などの惑星間航行を目指した宇宙開発にとって宇宙推進技術の開発は必要不可欠である。特に惑星間航行時など微小重力空間において高効率で動作可能な推進機の開発が急務となっている。その有力な候補として，気体燃料をプラズマ化し電磁気力により加速させ推進力を得る電気推進機の開発研究が精力的に行われている。MPD(Magneto-Plasma-Dynamic)推進機は，放電電流と自己誘起磁場の相互作用により推力を得る方式で，電気推進機のなかでも比較的高い推力が得られるものとして，すでに宇宙空間での作動実験に成功している。さらに推進効率の向上を目的として，MPD 推進機に外部磁場を印加する試みがなされ，推力の増加が実験的に確認されている。しかし，MPD 推進機でのプラズマの流れ場計測やプラズマの加速機構に外部磁場が及ぼす効果などはほとんど明らかとなっていない。本論文は，外部磁場印加 MPD 推進機におけるプラズマ流内部の電磁場を詳細に計測し，外部磁場印加によって生じた電磁力場へ及ぼす効果を明らかにした研究をまとめたものであり，全編6章からなる。

第1章は序論であり，本研究の背景と目的を述べている。

第2章では，電磁加速プラズマ源である MPD 推進機および磁気プローブアレイ，分光器等の測定機器について述べている。本研究で用いた磁気プローブアレイは，1つの素子で3方向の磁場変動を計測できるように工夫され，また半径方向に多数設置することで，MPD 推進機出口近傍における磁場の詳細な空間構造を同時計測することを可能にしており，有用であり高く評価できる。

第3章では，MPD 推進機で生成された高速・高密度プラズマ流の電子温度，イオン温度などのプラズマパラメータを詳細に計測した結果について述べている。さらに，一般化されたオームの法則および剛体回転の運動方程式を用いて，軸方向磁場印加に伴って発生したプラズマの周方向回転が， $E \times B$ ドリフト，イオン反磁性ドリフト，遠心力ドリフトの組み合わせで決定されていることを明らかにしている。

第4章では，磁気プローブアレイを用い MPD 推進機出口近傍の磁場の空間構造を直接計測し，プラズマ流中の電流分布の算出と，この計測結果を用いた電磁加速力場の定量的な評価を行っている。外部一様磁場印加時には，プラズマの反磁性効果により収束型の磁気ノズルが自発的に形成されることや，この時誘起された半径方向の磁場と反磁性電流との相互作用が軸方向加速を妨げる制動力として作用することを初めて実験的に明らかにした。これに対し，発散型外部磁場印加時には，半径方向磁場の向きが反転し，制動力として作用した項が加速力に変換しうることを示した。この結果は，外部磁場形状によりプラズマ流に作用する電磁力を制御できることを実験的に初めて示したもので，MPD 推進機への外部磁場印加による推進効率向上にとって有用な成果であり高く評価できる。

第5章では，拡張されたベルヌイの式を用いて MPD 推進機のプラズマ流中のエネルギーバランスを評価している。磁場や流れのエネルギーに比べ熱エネルギー成分が1桁大きくなることを指摘し，その原因として粘性加熱の可能性を挙げている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は，高速プラズマ流中の磁場分布を直接計測し，MPD 推進機の電磁加速力場を定量的に評価することに初めて成功し，外部磁場形状によりその分布や加速力を制御できることを実証した研究であり，電気工学およびプラズマ理工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。