

日本物理学会第59回年会 九州大学箱崎キャンパス 28pWK5 平成16年3月28日

大出力電気推進機の課題と 有人惑星探査への応用

東北大学大学院 工学研究科

安藤<u>晃</u>, 戸張博之, 服部邦彦, 犬竹正明 細川陽平, 佐藤隆一, 渡邊俊明

多様化する宇宙開発

惑星探查計画

- 様々な探査衛星の打ち上げ ニューミレニアム計画、Muses計
- 惑星の起源、進化を明らかにする
- 地下水、生命の痕跡、資源調査

小型で安価な衛星の開発

次期有人惑星探査は?

- ●月に続く地球外天体への有人飛行の挑戦
- ●長期間のミッションとなるために生じる人体への悪影響 (放射線障害や無重力状態による骨、筋肉への影響
- ●ペイロード比(全質量に対する貨物の質量)の増大化

隕石衝突回避、デブリ除去

● 長期間にわたって駆動力を維持。



→ 従来の化学推進では対応できないミッションが増えてきている。





アメリカの新宇宙戦略

- 2004~ 大型ロケットと有人宇宙船の開発
- 2008 複数の無人月面探査機打ち上げ
- 2010 国際宇宙ステーション(ISS)完成、シャトル引退
- 2015 有人月面探查開始、月面活動基地建設
- それ以降~ 火星やさらに遠い天体への有人飛行実施









火星への有人飛行などの宇 宙開発計画を発表したブッシュ 米大統領 = A P(2004.1.15)

電気推進機の特徴

	利点	欠点	1
イオンエンジン	比推力が高い (噴出速度大)	大型化に難点 構造が比較的複雑 電極損耗など耐久性の問題	イオンエンジン
ホールスラスタ	推進効率が高い 比較的、比推力も高く、 高性能 大型化や多重化が可能	電極や絶縁体への熱負荷が 大きい 放電電流が不安定	ホールスラスタ
DC アークジェッ ト	推力電力比が高い	比推力が低い 電極損耗あり	
MPDスラスタ	推力密度が高く、比推 力も比較的高い。 構造が単純 大型化や多重化が容易	推進効率が低い	D C アークジェット MPDスラスタ

磁場印加型 MPDの開発

大規模な軌道間輸送、有人惑星探査には 100kW級のMPDスラスタ開発が必要

どうやって推進効率を上げるのか?





Helicon plasma source

Directed by F.R. Chang Diaz, NASA Johnson's Advanced Space Propulsion Laboratory





1. 外部磁場中でのMPDプラズマ流の基礎特性と 磁気/ズルによるマッパ数制御 磁場印加型MPDでの電磁場計測と、

磁気ノズルを用いたプラズマ流制御

2. 宇宙推進機への応用を目指した高速プラズマ流中での イオン加熱 イオンサイクロトロン周波数近傍の波動を用いた 高速プラズマ流中でのイオン加熱

MPD (Magneto-Plasma-Dynamic) スラスタ

MPD Thruster

- 環状モリブデン製 陽極 (内径 3cm)
- 棒状タングステン製 陰極 (外径 1cm)
- 高速電磁弁により作動ガスを約3msec
 準定常的に入射
- PFN電源により約1msecの準定常プラ ズマ流を生成



MPDAの加速機構はプラズマ内に流れる放電電流 j とその電流により誘起される自己誘起磁場 B_θによりローレンツ力が生じ,プラズマが加速される.





H-II ロケットによるSFUの打ち上げ(1995)

人工衛星SFU(Space Flyer Unit)にMPDスラスタ システムを搭載した宇宙作動実験.約40000回の 繰り返し放電.比推力約1100秒.

宇宙推進システムとして機能的に成立しうること を実証



1996年1月、スペースシャトルSTS-72に搭乗 した日本人宇宙飛行士、若田光一氏の操るロボッ トアームによって回収。





Ground test of MPD thruster



SFU(Space Flyer Unit)

外部磁場印加によるMPD推進機の性能向上



pulse and thrust efficiency are ± 100 s and $\pm 0.3\%$, respectively.

Sasoh,Arakawa (Univ. of Tokyo) Journal of Propulsion and Power, 8,98(1992).



Tahara, Yoshioka (Osaka Univ.) Journal of Propulsion and Power, 11,337(1995).

外部軸方向磁場中でのMPDプラズマ

外部磁場の印加による周方向回転力の発生







推力測定だけではなく、プラズマ中の電磁力場 や回転機構も含めた解析が必要。 実験装置 (HITOP & MPDA)



●軸方向流速:~50km/sec

Quasi-steady discharge (~ 1ms)Densityn ~1021 [m-3]Ion Mach numberMi~1

MPD近傍での分光測定



外部磁場印加型MPD出口部での流速計測

● MPDA出口近傍において放電電流の増加と共に流速が増加 する。しかし,同時にイオン温度も上昇する。

イオンマッハ数は1以下に制限。



$$M_{i} = \frac{U}{C_{s}} = \frac{U}{\sqrt{\frac{k_{B}(\gamma_{e}T_{e} + \gamma_{i}T_{i})}{m_{i}}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}m_{i}U^{2}}{\frac{1}{2}k_{B}(\gamma_{e}T_{e} + \gamma_{i}T_{i})}} = \sqrt{\frac{E}{W}}$$

イオンマッハ数 M_i は下式の様に流速Uとイオン音速 C_s との比として 表されるが、プラズマの流れのエネルギー E と熱エネルギー W との 比としても考えられる.

MPD出口近傍部での電磁力評価

MPDA出口近傍での電磁力場計測



磁気プローブを用いて *dB/dt* を測 定し、磁場ベクトルB の空間分布 を得る。

それを用いて、 rot $B = \mu_0 j$ より、電流成分の空間分布を計算 し、 $F = j \times B$ より電磁力場を評 価する。



磁場および電流の3次元分布計測

MPD近傍での磁場強度と分布



電磁力(j×B)場の構造





MPDA

電磁力場の3成分の中では、内 向きの径方向成分F_r (pinch force) が一番強い。 また、軸方向への加速力 F_z は 減速方向に作用している。 電磁力(j×B)場の制御

発散型磁場を印加することによりF₁成分を制御



電磁力j×B場が外部印加磁場形状で制御可能

MPDAプラズマの回転運動と電位分布

プラズマの回転運動

E×Bドリフト,反磁性ドリフト,遠心力ド リフトの組み合わせで決定.剛体回転 モデルで説明できる.

$$u_{\theta} = -\frac{E_r}{B_Z} + u_Z \frac{B_{\theta}}{B_Z} - \frac{m_i u_{\theta}^2}{e r B_Z} - \frac{k T_i}{e} \frac{2r}{B_Z r_0^2}$$



回転速度の径方向分布と外部磁場強度依存 (I_d=7.2kA, dm/dt=0.11g/s, Z=9cm: 径方向分布) (I_d=8.6kA, dm/dt=0.06g/s, Z=5.4cm: 磁場強度依存)

プラズマ中の電場構造

径方向電場...内向き(E_r<0)

軸方向電場…-Z方向向き(E_z<0), すなわち 電子を加速する(イオンは減 速を受ける)電場



外部磁場形状により回転

場、電磁力場を制御可能

磁気ノズルの有用性

磁気ノズル

- ノズルの使用による利点
 - プラズマの断面積が変化することより空力的な加速が期待される.
 - 回転エネルギーが発散ノズル中で軸方向エネルギーに変換される(スワール 加速).
- 磁気ノズルの優位性
 - コイルの電流値を変えることにより,様々なノズル形状の実現が可能である.
 - プラズマの挙動をコントロールすることが出来る.
 - 固体壁による損失がない
 - 電磁的な効果も期待できる(ホール加速).



ラバール型ノズルによる超音速流の形成

1 次元等エントロピー流モデルに従うと亜音速流 (M_i<1) が左下図のような ラバール型磁気ノズルに流入すると収束領域で M_i が上昇し,スロート部で M_i=1 となり,発散領域で超音速流 (M_i>1) となる.



dM	$2+(\gamma-1)M^2 dA$	dU	_ 1 dA
\overline{M}	$\frac{1}{2(M^2-1)} A$	Ū	$\overline{M^2-1}$ A
dT	$(\gamma - I)M^2 dA$	dp _	$M^2 dA$
\overline{T}	$=$ $\frac{1}{M^2-1}$ $\frac{1}{A}$	$\overline{\rho}$	$\overline{M^2-1}$ A

	M _i <1		M _i >1	
断面積 A	M		11	
Mi	~	1	1	1

 \checkmark

MPDA出口近傍にラバール型磁気ノ ズルを印加することにより超音速流 の生成,および高効率な推進機の実 現が期待される.

高速プラズマ流を生成するために固体ノズルを用いた試みはこれまでにも多く 行われているが,磁気ノズルを用いた研究,特に収束発散型(ラバール型)磁 気ノズルに関する研究はほとんど行われていない。

軸方向分布 ~ ラバール型磁気/ズルによるプラズマ加速 ~

Improvement of Acceleration Performance

 I_d = 7.2kA, dm/dt = 0.1g/s (He), Nozzle Throat at Z=17cm, B₀=0.087T.



B_{LN}を印加したとき、ラバールノズル下流 部でイオン温度が減少し,流速は上昇した. 磁気ラバールノズルによる超音速流の形成

: w/o nozzle : with nozzle



assuming $\gamma_i = 5/3$

ラバール型磁気/ズルを通過する際の回転エネルギーの変化

 I_d = 7.2kA, dm/dt = 0.1g/s (He), Nozzle Throat at Z=17cm, B₀=0.087T.



磁気ラバールノズルを通過する時、回転角 周波数はノズル部でやや上昇する。一方で、 回転エネルギーは下流部で急激に減少する。





磁気ノズル中でのホールパラメータと粒子の振舞



プラズマ直径:r_p → 発光強度の径方向分布をガウス分 布と仮定した際の半値全幅 Alfvén's CIV(Critical Ionization Velocity) 効果

プラズマと中性ガスが磁場を横切って相対運動をするとき,強い相互作 用が生じ,相対速度が下式の V_{cr}に制限される現象。

 $V_{cr} = \sqrt{\frac{2e\phi_i}{m_n}} \qquad \left\{ \begin{array}{l} \phi_i: 電離ポテンシャル\\ m_n: 質量 \end{array} \right.$

 V_{cr} を越えると,中性ガスの電離が起こる.



外部磁場中でのMPDプラズマ流の基礎特性と 磁気/ズルによるマッパ数制御 まとめ

↓ 外部磁場印加時のMPD プラズマ流

軸方向流速:放電電流に比例して増加 周方向回転流速:放電電流と外部磁場に比例して増加

- プラズマの回転、径方向電場を考慮した力学平衡の検討
- ↓ MPD出口部近傍での電磁力場の直接計測
- *→ 「「ール型磁気ノズルによるエネルギー変換*

➡> <u>外部磁場形状による電磁力場及び流れ場の直接制御の可能性</u>



- ↓ ラバールノズル配位での電磁力場、電位分布の評価
- ↓ 推進・回転・電磁場を考慮した解析

宇宙推進機への応用を目指した 高速プラズマ流中でのイオン加熱

VASIMRプロジェクト (NASA)

(Variable Specific Impulse Magneto-plasma Rocket)



Directed by F.R. Chang Diaz, Johnson's Advanced Space Propulsion Laboratory

VASIMRの特徴

生成したプラズマ流を追加熱し、磁 気ノズルで熱エネルギーを運動エネ ルギーに変換することでより高速で 噴射することができる。

推力、比推力可变



目的地への到達時間の短縮

高速プラズマ流中でのイオン加熱の困難な点

(1)共鳴領域を1回しか通過しないため、短い共鳴時間中に加熱ができるか?

(2) プラズマ流が速いため、大きくドップラーシフトを受ける

HITOPでの高速プラズマ流イオン加熱実験



励起した波動の分散関係の計測

(uniform B-field)



波動の分散関係は、異なる2点間 で計測した磁場変動の位相差 (Δθ) より求める。

Obtained Dispersion Relations



ライトヘリカルアンテナでは ω/ω_{ci}<2 のとき、波動の分 散関係はシアアルヴェン波 (SAW)に従い、ω/ω_{ci}>2 の とき、波動の分散関係はコ ンプレッショナルアルヴェン 波(CAW)に従う。. レフトヘリカルアンテ ナでは、励起された 波動の分散関係はコ ンプレッショナルアル ヴェン波(CAW)に従 う。.

周方向モード数mと偏波面の測定





ライトヘリカルアンテナ
作動ガス:アルゴン
外部磁場 : 790G一様
測定位置 : △Z=20cm

ω/ω_{ci}<2の領域で励起された波は周方向モード数
 m= -1のSAW (イオンサイクロトロン波)であると考えられる。

∞/∞_{ci}>2の領域で励起された波は周方向モード数
 m= +1のCAWであると考えられる。

プラズマ熱エネルギーW の測定



T_i, T_e,n_eの計測



プラズマ流加熱効率 (∆W_⊥/I_{ex}) のω/ω_{ci}依存



衝突周波数とエネルギー吸収効率の関係



衝突周波数



現在の実験条件ではイオンサイクロトロン 周波数よりイオン - イオン衝突周波数の ほうが大きい

粒子間衝突によるプラズマの加熱が起こっ ていると考えられる。



共鳴磁場強度を上げ、励起周波数を上げ るか、低密度条件下でイオンサイクロトロ ン共鳴を確認する必要有り。

[|]ci

イオンサイクロトロン周波数

衝突周波数

 ν_{ii}

>

低密度条件下でのイオンサイクロトロン共鳴加熱



低密度となり、衝突周波数が小さくなるにつれてイオンサイクロトロン 共鳴加熱の効果が、<u>支配的</u>になっていると考えられる。



VASIMR

MPD + RF

	ヘリコン波プラズマ	MPDプラズマ
プラズマ源	密度は10 ¹³ cm ⁻³ 、	高密度でマッハ数 1
	イオン温度は低い	の高速プラズマ流
	イオンサイクロトロン加熱	波動加熱(衝突減衰)
RF加熱	磁気ビーチ配位	電子加熱もおこる
	断熱変化	等エントロピー変化
磁気ノズル 	(μ=一定)	磁気ラバールノズル
	高密度化には、高周波化と	コンパクト化や多重化が容易。
問題点	共に 強磁場が必要 。	
	(超伝導コイル?)	



→ 磁気ノズルと組み合わせた加速研究と工学設計のためのパラメータ評価

そして、さらに遠くへ・・・ ~深宇宙探查~

核融合ロケット

核融合プラズマを利用した宇宙推進シ ステム(核融合ロケット)は、他の宇宙推 進システムと比較して、高い排出速度 (即ち高い推進材利用効率)と大きな推 力を同時に達成可能であり、将来の宇 宙開発に必要とされる高速推進システ ムとして非常に有望視されている。





をして きっといつか 銀河旅行へ





to be continued · ·