

3次元ハイブリッド粒子シミュレーションによるプラズマセイルの推進性能評価

Thrust Evaluation of Plasma Sail

Using Three-Dimensional Hybrid Particle-in-Cell Code.



梶村好宏¹⁾、船木一幸¹⁾、篠原 育¹⁾、臼井英之²⁾、松本 正晴¹⁾、上野一磨³⁾、大塩裕哉³⁾、山川 宏⁴⁾
 1)宇宙航空研究開発機構、2)神戸大学工学研究科、3)総合研究大学院大学、4)京大大学生存圏研究所
 Yoshihiro KAJIMURA¹⁾, Ikkoh FUNAKI¹⁾, Iku Shinohara¹⁾, Hideyuki USUI²⁾, Masaharu Matsumoto¹⁾,
 Kazuma Ueno³⁾, Yuya Ooshio³⁾, Hiroshi YAMAKAWA⁴⁾

1)Japan Aerospace Exploration Agency, 2)Kobe University, 3) The Graduate University for Advanced Studies, 4)Kyoto University

概要

惑星間宇宙航行システムとして提案されている磁気プラズマセイル(MPS)は、宇宙機の周辺に人工的なダイポール磁場による小規模磁気圏を作り、それを宇宙機からのプラズマ噴射にて広範囲に展開させ、太陽風を受け止めて推力を得る。

MPSの推力伝達メカニズムについては、Ideal MHD (MagnetoHydroDynamics)を用いた数値シミュレーションによって明らかにされ、以下の知見が出されている。

***噴射したプラズマが超音速である場合、磁気圏境界面に流れる太陽風起源の誘導電流によって生じる誘導磁場が、宇宙機から超音速で噴射したプラズマによって打ち消されてしまい、コイルに生じる電磁気学的な推力は0となる。**

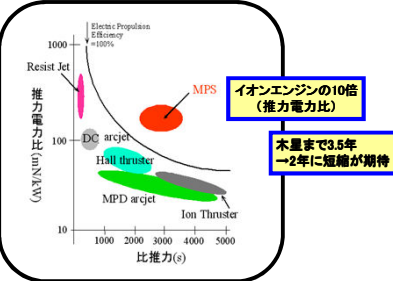
***よって、MPSにおいて、推力を得るためには、磁気圏拡大の為に噴射するプラズマを、亜音速以下の流速(噴射プラズマのβ値を1以下)となるよう工夫する必要がある。**

本研究では、現実的なMPSにおいて想定される磁気圏(太陽風イオンのラーマー半径>磁気圏スケール)において、有限ラーマー半径効果を考慮したハイブリッド粒子モデルを用いた数値解析によって、MHDモデルから出された結論を確かめるべく検討を行い、推力の定量的評価を行う。

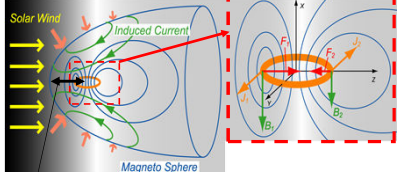


磁気プラズマセイル

磁気プラズマセイル(MPS)の性能



推力発生メカニズムと磁気圏代表スケール



太陽風の動圧により、磁気圏境界に誘導電流が流れる。誘導電流による磁場(B_{ind})が、コイル電流(B_{coil})に作用し、ローレンツ力(F_L)が生じ、その合力が推力となる。

MPSで形成される磁気圏代表スケール: 10~100km
 磁気圏境界における太陽風イオンのGyro半径: 100km
 磁気圏境界における噴射プラズマイオンのGyro半径: 1~10km

シミュレーションで用いる基礎式

太陽風、噴射プラズマイオンの有限ラーマー半径効果を考慮すべく、イオンを粒子、電子を流体として取り扱うハイブリッドモデルを用いる。

イオンの運動方程式 $m_i \frac{dv_i}{dt} = Ze(E + v_i \times B)$ (e: 電子, i: イオン)

電子の運動方程式→質量を0と仮定

$$n_e m_e \frac{dv_e}{dt} = -en_e (E + v_e \times B - \eta J) - \nabla p_e$$

アンペアの法則 $\nabla \times B = \mu_0 (J_e + J_i)$

ファラデーの法則 $\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E$

電流密度 $J_e = -en_e v_e, J_i = en_i v_i$

電場の計算式 $E = \frac{1}{Zen_i} \left[\frac{1}{c} (\nabla \times B_p) \times B - J \times B - ZT_e \nabla(n_i) \right], \nabla^2 \phi = 0$ (真空領域)

電磁場の解法にはCAM-QL法 (Current Advance Method and Cyclic Leapfrog)を用いた。

MPSにおける重要なパラメータ

L_1 : コイル磁気圧と太陽風動圧がバランスするところまでの距離

$r_{L, solar}$: 磁気圏境界における太陽風イオンのラーマー半径

$$L_1 = \left(\frac{M^2}{8\pi^2 \mu_0 n_i m_i v_i^2} \right)^{1/2}$$

β_{inj} : 噴射位置における噴射プラズマの動圧とコイル磁場の磁気圧の比

r_{inj} : 噴射位置における噴射プラズマのラーマー半径

L_2 : 噴射位置における磁場スケール(代表長)=|B|/(d|B/dx|)

MPS地上実験の様子 © JAXA

解析モデル図とパラメータ

解析モデル図: solar wind plasma, coil φ=4m, magnetic field

超伝導コイルパラメータ	密度 [m ⁻³]	5.0E+08	5.0E+08	5.0E+18	5.0E+18
コイル半径 [m]	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
コイル電流 [A]	10	10	10	10	10
形成される磁気圏サイズ [km]	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
箱形粒子数	80 × 80 × 80	80 × 80 × 80	80 × 80 × 80	80 × 80 × 80	80 × 80 × 80
セルあたり粒子数	50	50	50	50	50
dx [c/ω _{ci}]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
dt [c/ω _{ci}]	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025

太陽風パラメータ	CASE1.2.3 (標準太陽風)	実太陽風	噴射プラズマパラメータ	CASE2	CASE3
密度 [m ⁻³]	5.0E+08	400.0	密度 [m ⁻³]	5.0E+18	5.0E+18
速度 [km/s]	400.0	400.0	速度 [km/s]	400.0	400.0
電子温度 [eV]	0.01	1.0	電子温度 [eV]	0.01	0.01
イオン温度 [eV]	0.01	1.0	イオン温度 [eV]	10	10
r _{inj} /L ₁	6.25	62.5	r _{inj} /L ₁	2.7	0.0027
M ₀	4	4	β	5	0.5
M ₁	20	20	M ₀	1.8	0.18
イオン慣性長 (c/ω _{ci}) [km]	10	100	M ₁	0.6	0.06

磁気プラズマセイルの推力評価

プラズマ噴射による磁気圏拡大と推力増加

解析モデル図: solar wind plasma, coil φ=4m, magnetic field

解析結果(推力): 推力増分、電力の時間履歴

◆ プラズマ噴射による磁気圏拡大、推力増加を確認

◆ 噴射β < 1が推力増分の必須条件(MHD予測に合致)

◆ 噴射パラメータの最適化によるさらなる推力増大へ

磁気プラズマセイルの推力評価と推力最適化

噴射パラメータの最適化(噴射エネルギー)

プラズマ密度分布と磁気圏境界位置

高βプラズマ噴射(β > 1) 高βプラズマ噴射(β > 1)

MagSail単体の推力が最大8倍に増大

β_{inj} = 0.5, beta = 0.02で最大推力

βが1以上で推力増分なし

パナナ状に磁場分布

さらなる効率化、大推力化に向けた磁気プラズマセイルの改良とその評価

Δドリフトによるリングカレントインフレーションの検討と評価

Background By Dipolar field, Plasma Injection

噴射イオンのΔドリフトによるループ状電流形成

磁気圏拡大の有効な手段となり得る

今後の課題と方針

本解析では、理想的な等方噴射を仮定し、最大8倍(プラズマを噴射後)の推力増分が得られることを示した。また、局所噴射による推力増分も評価した。今後の課題として以下を挙げる。

> 低エネルギー噴射(リングカレントインフレーション)による磁気圏拡大の評価と得られる推力の定量的評価。

> コイルの磁気モーメントが太陽風に対して垂直なケースの評価の実施。

> IMF強度、方向を考慮した際の推力特性の変化や推力ベクトル、トルク特性の評価し、MPSIにおける安定姿勢を決定する。

> イオンエンジンなどの推進システムと比較した際の優位性を得るための改良。

Presented by Yoshihiro Kajimura
 梶村好宏
 宇宙科学研究所
 〒252-5210 神奈川県横浜市
 中央区自由が丘1-1(A-3809)
 Tel.050-3362-5271 Fax.042-759-8570
 E-Mail: kajimura@gs.nas.jaxa.jp

噴射パラメータの最適化(噴射方向)

MPSの推力評価(ヤ性評価)の定義

$$F_{MPS} = F_{MagSail} + F_{Injection} + F_{jet}$$

$$F_{MagSail} + F_{jet} = F_{MagSail} + F_{jet(One-direction)}$$

◆ 噴射プラズマによる磁気圏拡大で増分する推力(F_{Injection})と、噴射プラズマを一方に噴射した場合の推進力(F_{jet})との比較と考える。

◆ F_{Injection}は磁気圏拡大のためのプラズマ噴射によって生じる推力

◆ この値が1以上であることが性能評価において重要。

MPS効率

太陽風方向噴射角度

低流量にすることで、1.15の効率化を確認

数値解析による評価とコードの改良

◆ ハイブリッド粒子モデルを用いた磁気圏拡大手法の検証と定量的評価

◆ コイル磁場の周辺からプラズマを噴射することによってマロドリフト電流が発生。

◆ これはリングカレント電流となり、オリジナルのコイルで作る磁気モーメントを増加させる電流として噴射の効率的な拡大に寄与する。