

太陽風を利用した次世代宇宙推進システム「磁気プラズマセイル」

梶村 好宏 (九州大学・総合理工学研究院)

Mail: kajimura@aees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、各国が深宇宙探査ミッションを提案する中で、我が日本においては、イオンエンジンを搭載した探査機「はやぶさ」が小惑星「イトカワ」に到着し、人類初となる月以外の土を持ち帰るサンプルリターン計画を遂行中である。2003年5月に打ち上げられた「はやぶさ」は、約2年半の時を経て小惑星「イトカワ」に到着し、2010年6月の地球帰還を目指し、この4月に小惑星を出発した。このミッションにおいても分かるように、宇宙探査はその探査範囲が広いほど長期のミッションとなる為、効率の良い、大きな推力を発生することが可能な推進システムが求められている。高効率という観点で、燃料を搭載して推進に利用するという考え方から離れ、宇宙にすでに存在している資源・エネルギーを利用して航行するというアイデアは、太陽エネルギーの利用に代表され、その候補としては、ソーラーセイルや、磁気セイルなどが挙げられる。これらのシステムは、「はやぶさ」で用いられているイオンエンジン等の一般的な宇宙推進システムの特徴である、「推進剤を噴射し、その反作用で推進するシステム」とは性質が異なる。磁気セイルは、宇宙機に搭載したコイルに電流を流すことによって磁場を生成し、太陽風プラズマ流を受け、太陽風の運動量変化が反作用として宇宙機に伝わり、推進力を得るシステムである。この磁気セイルは、1990年に米国のZubrinによって提案され、直径が64kmという巨大コイルによって磁場をつくり、太陽風を受け、20Nの推力を得るというものであった。この磁気セイルの長所として、1) 推力の発生に推進剤が不要、2) 推進のための装置が非常にシンプル、3) 推進力の制御(On, OFF 含め)がコイルの電流制御によって容易に可能、などが挙げられる。しかし、十分な推力を得るために要求されるコイルの径が、前述したような非現実的な値であり、技術的な難易度が高く実現には至っていない。

2. 磁気セイルから磁気プラズマセイルへ

磁気セイルが、十分な推力を得るために必要とする磁場を、機械的に大きく作るのではなく、プラズマ噴射を行うことによって拡大し、拡大した磁場で太陽風を受けて航行するというアイデア(Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion:M2P2)が、2000年にワシントン大学のDr.Wingleeによって提案された。我々日本の研究グループは、これを磁気プラズマセイルと呼んでいる。宇宙機周りに噴射するプラズマは、粒子間衝突が極めて少ない無衝突プラズマ流であり、磁場はプラズマ流に凍結(frozen-in)して運ばれる性質を持つ。この性質を利用して磁場を大きく膨らませることができれば、現実的な大きさの超伝導コイルを用いて、N(ニュートン)クラスの推力を得ることが期待できる、とWingleeは試算した。これは、「はやぶさ」に搭載されているイオンエンジンの10倍の性能である。

3. 磁気プラズマセイルで重要な2つのプロセス

磁気プラズマセイルのイメージ図を図1に示す。電離した水素が主成分の超音速プラズマ流である太陽風を利用するこの推進システムは、消費電力に対する推力の比が、現存するどの推進システムよりも大きく、このシステムが実現すれば、現在木星までの3年半の航行が2年に短縮されることが見積もられている。この推進システムには、大きく分けて2つの重要なプロセスが存在する。一つは、前述した、磁場を大きく膨らませる為にプラズマ噴射を行うプロセスである。磁場を大きく膨らませる為には、磁気レイノルズ数が1よりも非常に大きい条件でプラズマを噴射し、磁場凍結の原理によって、磁場を遠方まで拡大する必要がある（磁気インフレーション）。効率よくインフレーションを起こす為には、噴射プラズマの物理パラメータや、噴射方法などを理論、実験、数値シミュレーションなどによって検討する必要がある。二つ目は、磁場と太陽風との相互作用によって、太陽風の運動量変化がローレンツ力となってコイルに伝わり、推進力を生むというプロセスである。発生させる磁場の大きさに対して、得られる推力の推算等の定量的な評価や、磁気インフレーション磁場と太陽風との相互作用からどのようなメカニズムで推力が宇宙機に伝わるのかを明らかにする必要がある。参考論文から引用した磁気プラズマセイルの原理を示した図を図2に示す。

4. 最近の研究情勢と研究成果

Dr. Winglee の設計した M2P2 について、2003 年に NASA の Dr. Khazanov が問題点を指摘した。その内容は、太陽風の動圧と生成磁場の磁気圧がつりあう点においては、太陽風イオンのラーマー半径は、100km 程度と非常に大きく、イオンが磁場をすり抜けてしまい、M2P2 の推力発生量はほとんどゼロである、というものであった。この論文が出された以降、アメリカでは、M2P2 の研究は下火となってしまった。しかし、我々日本の研究者勢は、JAXA の船木一幸准教授をリーダーとして、問題点が指摘された同じ年の 2003 年に、研究グループを立ち上げた。そして、世界に先駆けてこの有望な推進システムを開発し、実現するのだという強い決意の下、M2P2 をベースに仕様を再設計し、磁気プラズマセイルと名づけて研究をスタートさせた。スペースチェンバーによる地上実験や計算機シミュレーションを実施し、多くの新しい成果が出された。その成果についても本講演で紹介する。

5. これからの磁気プラズマセイルの研究

今後も、JAXA が中心となり、日本の研究者が協力して、この磁気プラズマセイルの実現の為、プロジェクトを遂行する。2011 年以降、まずは磁気セイル（プラズマ噴射を伴わないセイル）を地球磁気圏外に打ち上げ、推力の測定などを目的とした飛翔実験が行われる予定である。今後、取り組むべき課題として、磁場を生成する超伝導コイルについて、機械式冷却システムを採用した場合の軽量化の設計、そして、磁気インフレーションの為の低コストなプラズマ源の開発が必要である。また、噴射位置近傍の、プラズマが流体的に

振舞う領域から、遠方の、粒子的に振舞う領域までのマルチスケールフィジックスを考慮した数値解析を行い、太陽風下で磁気インフレーションを実施した際に、太陽風から得ることが出来る推力の推定を行う。その際、変動する太陽風の影響、太陽風が引き連れてくる磁場とのリコネクションの影響なども検討すべき重要な項目である。磁気プラズマセイルの研究グループでは、世界に先駆けてこの推進システムを実用化すべく、日々研究・開発に汗を流しており、共に研究に携わってくれる若き挑戦的な研究者を切望している。

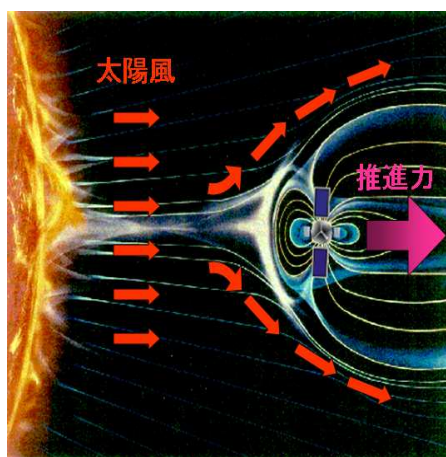


図 1 : MPS のイメージ図

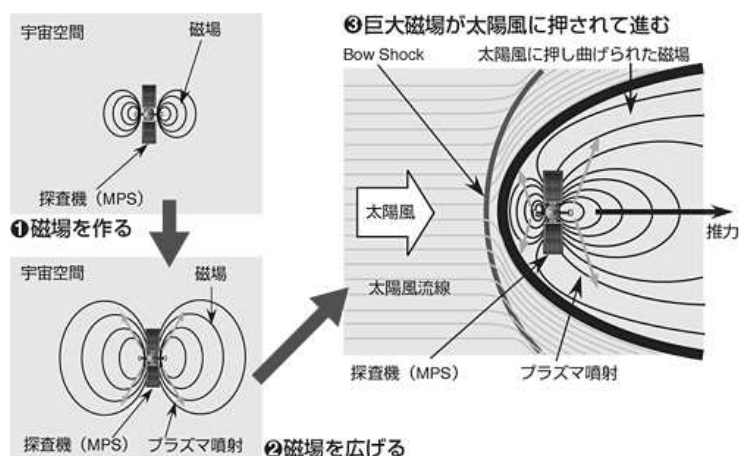


図 2 : MPS の原理

↑九州大学「磁気プラズマセイル」研究室のホームページはこちら。

<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/index-j.html>

参考文献

船木 一幸、山川 宏、“新たな宇宙開発を拓く核融合技術、磁気プラズマセイルの研究と深宇宙探査への挑戦”、プラズマ核融合学会誌、Vol.83、No.3、pp.281-284、(2007)