

# 平成30年度 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム 宇宙放射線防御と推進力発生機構を兼ね備えた 磁気プラズマシールドの性能評価

Performance evaluation of magnetic plasma shield for protecting the cosmic radiation and obtaining the thrust

梶村好宏 (明石工業高等専門学校 電気情報工学科), 中山聡 (明石工業高等専門学校 機械・電子システム工学専攻), 萩原達将 (京都大学 大学院工学研究科), 大塩裕哉 (東京農工大学 機械システム工学科), 船木一幸 (ISAS/JAXA)

Yoshihiro Kajimura (National Institute of Technology, Akashi College), Satoru Nakayama (National Institute of Technology, Akashi College), Tatsumasa Hagiwara (Graduate School of Engineering Kyoto University), Yoya Ooshio (Tokyo University of Agriculture and Technology), Ikkoh Funaki (Japan Aerospace Exploration Agency)

## 1. はじめに

我々人類は、地球の固有磁場と大気により有害な宇宙線から守られて生活している。しかしながら20世紀中盤以降、人類は地球の大気圏外・地球磁気圏外の宇宙空間へと活動の場を広げた結果、宇宙線の脅威に直接曝されるようになった。今後飛躍的に増加する宇宙観測機器や探査機を、宇宙線や太陽風から防御するため、また、地球外の有人飛行を行う際に、高エネルギーの太陽風や宇宙線から身を守るための防御方法の開発は、喫緊の課題となっている。宇宙線の種類とエネルギーをまとめた図を図1に示す。図に示したように、人体被ばくに影響を及ぼすエネルギーは100~1000 [MeV]であることが言われている<sup>1)</sup>。

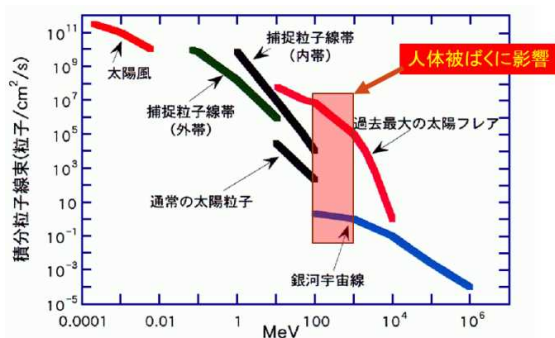


図1 宇宙放射線の種類とエネルギースペクトル<sup>1)</sup>

現在までに様々な研究が行われているが、100[MeV]を超える高エネルギー帯については防御手法が確立されていない。これまでの研究例としては、主として実壁を用いる手法で、2013年にはロシアが身体を拭くために大量にISSに常備されているウェットタ

オルに着目し、板状に積み重ねて作成した遮へい体によって37%の被ばく線量の低減効果を実証している。しかしながら、ロシアの研究結果は、低エネルギー放射線を対象にしており、高エネルギー放射線、かつ時間的に変化するような太陽フレアや放射線の防御に対応するためには、エネルギー強度やタイミングに合わせてシールドの強弱を制御できることが望ましい。また、強い磁場は、逆に宇宙機に影響を与える可能性があることから、宇宙機から遠方に磁場を生成可能なリングカレントを用いる必要がある。この手法にもっとも適した手法が本提案の人工の磁気シールドである。磁気シールドは、地球磁気圏と同様にローレンツ力を用いて宇宙線の侵入を防ぐもので過去に数値解析による評価が行われている<sup>2,3)</sup>。また、磁気シールドは少ないコストで宇宙線を防御可能なだけでなく、宇宙線のエネルギーの大きさに合わせて強度を変化させることができるという利点もある。磁気シールドを強化する手法として、コイル近傍から熱的なプラズマを噴出し、磁場勾配ドリフトによって、コイル近傍にコイル電流と同じ方向に流れる環状電流(リングカレント)を生じさせ磁気モーメントを増加させる手法を提案する。この環状電流は、磁気圏の拡大に伴い、宇宙放射線からの防御を行う磁気シールドの増強が期待される。

本研究は、太陽風プラズマや宇宙放射線からの人体保護及び宇宙機防御のための磁気シールドを、コイル磁場によって形成すると同時に、太陽風を受けて推進力とする磁気プラズマセイル推進システムを同一の磁場で達成できることを実証する。さらに、宇宙機から噴射したプラズマが磁場に捕捉されて生じるリングカレントによって、磁気シールド性能および磁気帆性能を飛躍的に向上させる手法の開発と性能の定量的評価を地上実験を用いて実施する。これにより、磁気モーメント(コイル半径と電流)と遮

蔽可能な放射線エネルギーの関係や、磁気帆（磁気シールド）の飛躍的性能向上の為のリングカレント生成が可能となる最適な噴射プラズマパラメータを明らかにする。図2に本研究の概要を示す。

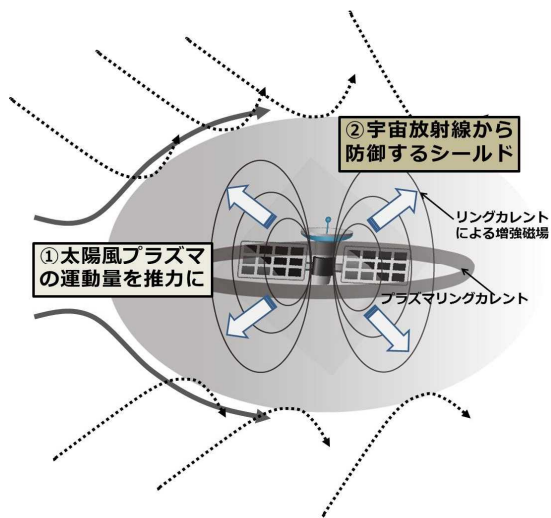


図2 本研究の概要

## 2. 実験方法：真空チェンバーを用いた実験

本研究では、磁気帆中にプラズマを噴出し、磁場勾配ドリフトによるリングカレントでどこまで磁気帆を大きくし推力を増大できるのか、加えて、その磁気帆を磁気シールドとした場合に、どこまでの高エネルギーの宇宙放射線を防御できるのか、これらを定量的に明らかにする。コイルの半径、電流の大きさ、そして噴出するプラズマの流量と温度をパラメトリックに変更し、それらの組み合わせでできた磁気帆に対する推力、磁気シールドに対する防御可能な宇宙線エネルギーを定量的に明らかにする。

実験装置は、JAXA 宇宙科学研究所共同利用実験施設である先端プラズマチェンバーを用い、太陽風プラズマ流および荷電粒子としての宇宙放射線を模擬するMPDアークジェットクラスタ化装置、磁気帆および磁気シールドを模擬するコイル、そして磁気帆拡大と磁気シールド強化として用いるプラズマ噴射源と、これらの駆動系、計測系から構成される。コイルから噴射するプラズマ源は、これまでに使用実績がある、低電力で高密度プラズマを生成可能なLaB<sub>6</sub>(六ホウ化ランタン)を熱陰極として使用したプラズマ源を用いる。加えて、シールド効果を測定するためコイル近傍および中心に突入してくるプラズマ密度を測定するためのプローブを用いる。図3に、平成30年度(平成30年9月及び平成31年1月)に実施した真空チェンバー実験の概要図を示す。また、図4に、LaB<sub>6</sub>熱陰極を用いたプラズマ源の構成を示す。磁気帆および磁気シールドを模擬するコイルは、

φ1.5 [mm]のエナメル線を半径が0.059 [m]のアルミポピンに20ターン巻いたもので、100 [A]で中心磁束密度0.02 [T]の磁場を生成可能である。そしてプラズマ源は、コイルの側面に噴射口が来るように設置し、磁力線に垂直な方向に向かって熱プラズマを噴出する。このプラズマは、磁場勾配ドリフトによって、コイル電流と同じ方向に電流を形成し、磁気シールド強化および推力増加のためのリングカレントが形成される。

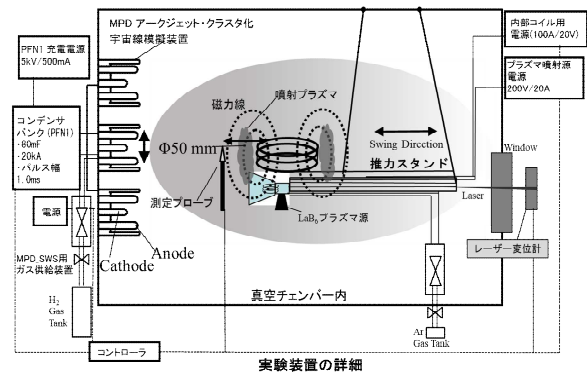


図3 実験概要図

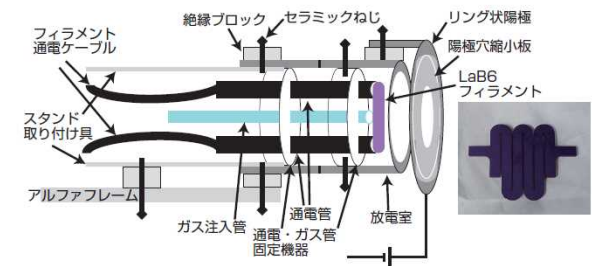


図4 熱陰極 LaB<sub>6</sub>を用いたプラズマ生成源の概要図 (写真は LaB<sub>6</sub> フィラメント)

## 3. 実験結果

実験条件は、はじめに、磁気シールド ON/OFF 時のシールド性能について評価を行うため、模擬宇宙線プラズマ源(MPDアークジェット)の放電電圧を2.5, 3.0, 3.5[kV]に変化させた。つまり、宇宙線プラズマのエネルギーを変化させ、その際のコイル前方5cmの位置でのプラズマの数密度をダブルプローブを用いて計測した。図5に、3種類の模擬宇宙線プラズマにおける数密度変化を示す。図5に示すように、模擬宇宙線プラズマ源の電圧を変化させることによりコイル前方でのプラズマの密度が変化することが確認できる。また、コイル電流を50 [A], 100 [A] と磁場強度を増加させていくにつれて、数密度が減少し、磁気シールドの効果が増加していることが確認でき

る。本実験では、コイルに 100 [A]を供給することで、密度にして 85[%]の宇宙線プラズマを遮蔽することができることを示した。無次元数による定性的な評価と実機性能との対応については今後行うこととしている。

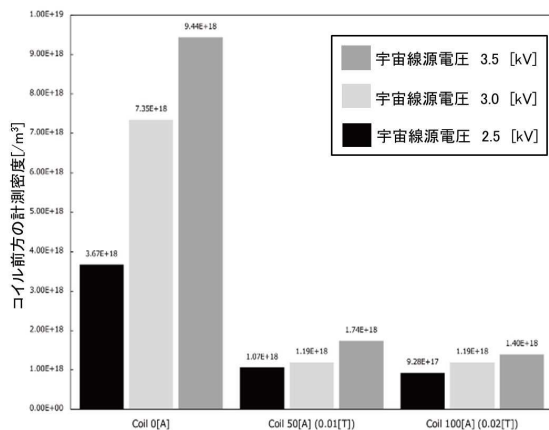


図5 コイル前方におけるプラズマ密度の変化

次に、コイル側方から噴出した熱プラズマによって、リングカレントが形成されるかどうかを確認するため、撮像を行った。プラズマ源の動作条件は、LaB<sub>6</sub> フィラメントに 100[A]を通电し、Ar ガスを放電室に 8[scm]で供給した。プラズマ源の陽極電圧を 100[V]として熱プラズマを生成した。同時に、コイルに 100[A]の電流を与え、シールド磁場を形成し、噴出したプラズマによるリングカレントの形成の様子を確認した。図6にリングカレント形成時の撮像結果を示す。プラズマ源から噴出された熱プラズマがコイルの磁力線に沿って集められる領域と、コイル周囲に形成されたリング状のプラズマ分布が観察できる。今後、リングカレント密度の計測と磁場分布の変化、そしてシールド性能がリングカレントによってどう変化するのかを測定し、評価を行う計画である。



図6 リングカレント形成時の撮像写真

#### 4. まとめ

本研究では、実験的に磁気シールドの性能評価を実施し、宇宙放射線のうち、荷電粒子を想定したプラズマを磁気シールドに衝突させ、密度変化を定量的に評価し、シールド効果による宇宙線の密度の減少を確認することができた。さらに、シールド近傍からの熱プラズマ噴射による環状電流の形成にも成功した。今回の実験では、磁気シールドのみによる宇宙線プラズマの削減率の定量的評価を実施したが、今後は、リングカレント形成時のコイル周囲の密度変化を定量的に評価し、リングカレントの強度を定量的に評価する予定である。さらに、リングカレント形成時に、シールド内部に侵入する宇宙線のエネルギーを定量的に計測し、リングカレントによるシールド強化の制御について評価を行う予定である。

#### 謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所スペースチェンバー共同利用の支援を受けて実施されました。ここに感謝の意を示します。また、本研究に用いた LaB<sub>6</sub> の製作においては、名古屋大学の 大野哲靖教授、佐宗章弘教授、名古屋大学技術部様の多大なる支援をいただきました。感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 宇宙船搭乗員の放射線防護, 藤高和信, 放射線と産業, 63, 11 - 24, 1994.
- 2) 佐藤拓馬: 有人宇宙飛行へ向けた磁気シールドの数値解析, 高知工業高等専門学校電気工学科, 準学士論文, 2010.
- 3) 梶村好宏, 中山 聡, 萩原 達将, 大塩 裕哉, 船木一幸, 宇宙放射線防御と推進力発生機構を兼ね備えた磁気プラズマシールドの検討, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 1E21,2018.