

令和2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), 赤坂和紀, 飯塚森人 (明石工業高等専門学校 機械・電子システム工学専攻), 廣島滉大 (明石工業高等専門学校 電気情報工学科), 大塩裕哉 (龍谷大学 先端理工学部), 船木一幸 (ISAS/JAXA)

Yoshihiro Kajimura (National Institute of Technology, Akashi College), Kazuki Akasaka, Morito Iizuka (National Institute of Technology, Akashi College), Koudai Hiroshima (National Institute of Technology, Akashi College), Yuya Oshio (Ryukoku University), 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¹⁾。

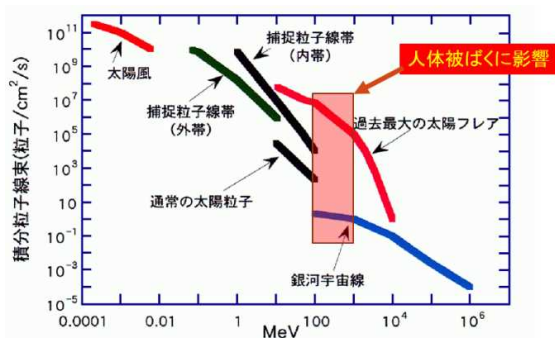


図 1 宇宙放射線の種類とエネルギースペクトル¹⁾

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 (荷電粒子) 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。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、コイルに電流を流して磁場を形成するもので、地球磁気圏と太陽風との相互作用と同様に、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^{2,3)}。また、磁気シールドは少ないコストで宇宙線を防御可能だけでなく、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が提案され数値計算による評価が行われてきた^{4,5)}。この環状電流は、コイル電流と同じ方向に流れることから、結果的に磁気圏の拡大、つまり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。加えて、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のメリットは大きい。

本研究で注目している磁気シールドは、荷電粒子をローレンツ力によって運動量変化させ、コイル内への侵入を防ぐものである。この原理において、荷電粒子の運動量変化は、その反作用としてコイル自体に力を及ぼし、推進力となりうる。これまで、この原理を用いた磁気セイルが研究され、その推進力の評価が行われ、また、その推力の増大を目的として、磁場 (磁気帆) をプラズマ噴射によって拡大して推進力を増大させる磁気プラズマセイルへと発展

させた研究が行われている⁶⁾。本研究は、太陽風プラズマや宇宙放射線（特に荷電粒子）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、太陽風等の荷電粒子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、地上実験によって実施する。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、磁気帆や磁気シールドの飛躍的性能向上のため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。本稿では、令和2年度に実施した実験に関する報告として、放射線荷電粒子を模擬した荷電粒子群を磁気シールドに向けて照射した際、シールド内に侵入する粒子のエネルギー分布を、逆電位アナライザ (Retarding Potential Analyzer : RPA)を用いて定量的に評価した結果について示す。

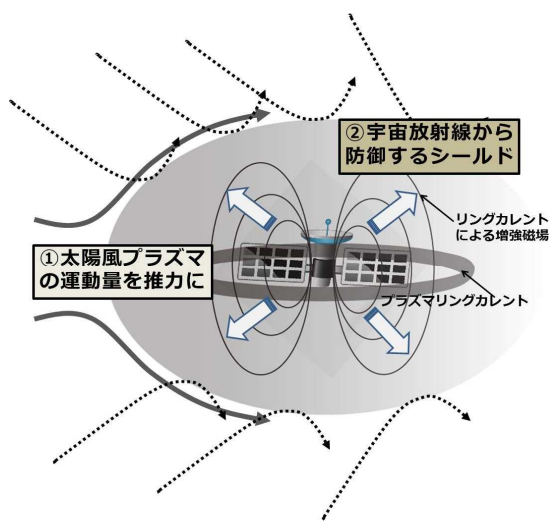


図2 本研究の概要

2. 実験方法：真空チャンバーを用いた実験

2.1. 磁場内に侵入する粒子エネルギー分布の計測

本実験は、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ャンバーを用いて実施した。本実験装置は、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クラスタ化したMPDアークジェット装置、磁気シールドを模擬する円形コイル、そして磁気帆拡大と磁気シールド強化のためのリングカレント形成用のプラズマ噴射源と、これらの駆動系、計測系から構成される。本実験では、はじめに、コイル電流（コイル径 0.08 [m], 25

[turn], 100[A]) によって磁気シールドを形成し、その後 2.5[kV]に充電したMPDアークジェット装置から太陽風を模擬した水素プラズマを放出する。磁気シールド実験概要図を図3に示す。コイル近傍に侵入したプラズマのエネルギーを選択的に測定するための逆電位アナライザ (Retarding Potential Analyzer : RPA)をコイル端から 40 mmの位置に配置し、同じ位置にMPDアークジェットのプラズマが到着したことを確認するダブルプローブを設置しモニタリングとして用いる。次に、磁気シールドを強化する目的で、コイル近傍から熱プラズマを噴出する。コイル近傍から噴射するプラズマは、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LaB₆(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。熱陰極に 100[A], 陽極に 100[V]を印加し、流量を 3 [sccm]としたアルゴンガスを噴出すると、Arプラズマが生成される。その後、コイル磁場に捕捉されたArプラズマが磁場勾配ドリフト運動によってリングカレントを形成し、シールド磁場が強化されると期待される。その時の磁場内への侵入粒子のエネルギー分布を計測する。

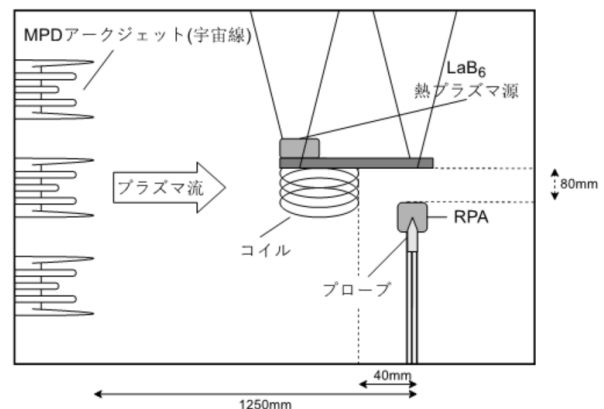


図3 実験概要図



図4 製作した逆電位アナライザ

RPAの外観を図4に、断面図を図5に示す。RPAは、プラズマのエネルギー分布を得る測定機器であり、4枚のメッシュ状のグリッドと1つのコレクタか

ら構成されている。各グリッドには役割があり、First Grid は RPA 内で発生する電場の漏洩を防ぎ、Second Grid, Fourth Grid ではコレクタが電子を捕集することを防ぐ役割がある。また、Third Grid は Second Grid を通過したイオンを Third Grid に印加した正電位により、特定のエネルギー帯のイオンを跳ね返し、Collector はこれらの 4 枚のグリッドを通過したイオンを捕集し、イオン電流を計測することで、イオンのエネルギー分布を得ることができる。

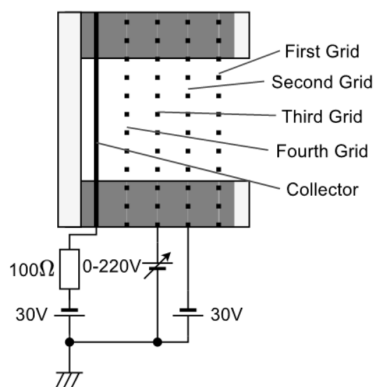


図 5 逆電位アナライザの断面図

実験条件として、シールド用のコイル電流を 0, 100 [A]とし、MPD アークジェット印加電圧は 2.5[kV]として水素プラズマを生成した。MPD 電圧は、放射線荷電粒子を模擬するプラズマ流のエネルギーを模擬している。本実験ではスケールダウンさせたパラメータを用いており、コイルパラメータをコイル径 0.08 [m]、巻き数 25 [turn]とし、コイル電流 100 [A]の条件で磁気シールドを生成させた場合の本実験は、実パラメータとして、半径 2 [m]、電流 10^6 [A · turn]の超電導コイルを用いて磁気シールドを形成し、1.2[MeV]の放射線荷電粒子の防御評価実験を想定していることとなる。

3. 実験結果

3.1. 磁気シールド ON/OFF 時のシールド内に侵入した荷電粒子のエネルギー分布計測

図 6 に、RPA を用いてイオンの速度エネルギーの確率密度を評価した結果を示す。RPA の Third Grid を 0~220[V]まで 20[V]ずつ変化させ、それぞれの条件において 3 回ずつ実験を行い、コレクタ電流を計測し、イオンの速度エネルギーの確率密度の評価を行った。評価手法は文献 7 を参考とした。図 6 では、図 3 に示した RPA の位置における磁気シールド OFF 及び ON 時のシールド内、つまりコイル端から 40 mm

の位置のイオンコレクタ電流を評価した。磁気シールド OFF の場合の破線の結果に対し、ON の場合の結果は、40[V]以上のエネルギーを持つイオンのエネルギーの低減が確認できる。ON/OFF 時の侵入エネルギーの総量の比較を行った結果、磁気シールドによって 22.3[%]のエネルギー減少が確認された。一方、磁気シールドが作動した場合において、40[V]以下の低エネルギー確率分布が上昇している結果となっている。この理由として、コイル近傍の強い磁場に低エネルギー粒子がトラップされ、その粒子が計測に乗ったことが考えられる。これを確かめるため、コイル端から 40[mm]に設置している RPA を 140[mm]の位置まで遠ざけた場合における計測を同様に実施した。その結果を図 7 に示す。RPA を遠ざけることによって、磁気シールド ON の場合において明らかに 40[V]以下の低エネルギーの確率分布が減少している。よって、先に述べたコイル近傍の強い磁場によって低エネルギー粒子がトラップされている可能性が高いことが示唆された。

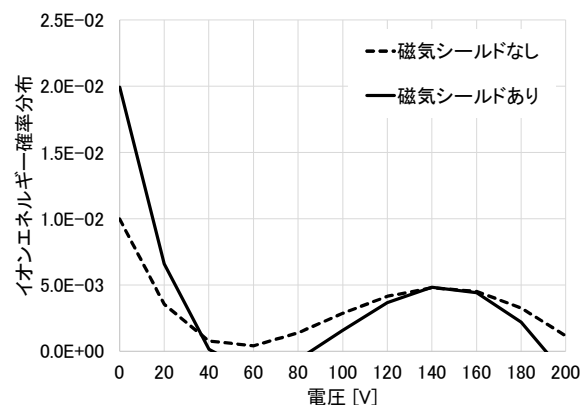


図 6 イオンエネルギー確率密度分布測定結果 (RPA をコイル端から 40 mm に設置)

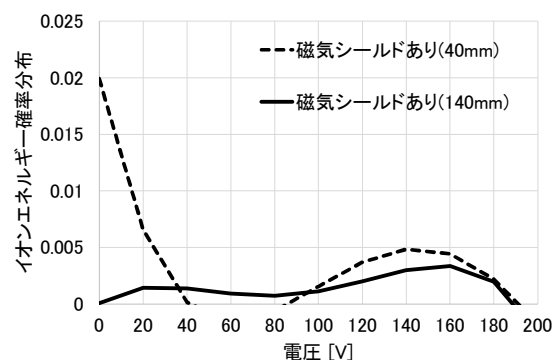


図 7 イオンエネルギー確率密度分布測定結果 (RPA をコイル端から 40 mm → 140 mm に移動)

3.2. リングカレント形成時のシールド ON/OFF 時のシールド内侵入粒子の評価

先の章に示した結果は、リングカレントを形成しない場合における評価であった。同様の実験を、熱プラズマ源を用いてリングカレントを形成した場合において実施した。その結果、リングカレントを形成するために噴出したプラズマが、RPA 内部に大量に侵入し、RPA 内部のグリッド間に頻繁に放電する信号が確認され、適切なエネルギー確率密度を評価することができなかった。図 8 に、磁気シールドを作動させ、同時に熱プラズマ源から 3[sccm]の Ar プラズマを噴出し、リングカレントを形成した際中に、MPD アークジェットプラズマを照射したときの撮像写真を示す。リングカレント形成用のプラズマによって、コイルの周囲に帯状の発光が確認され、その発光部は RPA を覆うように分布していることが確認できる。このため、先の述べたグリッド間に頻繁に放電する現象が観測されたと考えられる。今後、この放電対策を施した RPA の製作や他の評価手法の検討が課題である。

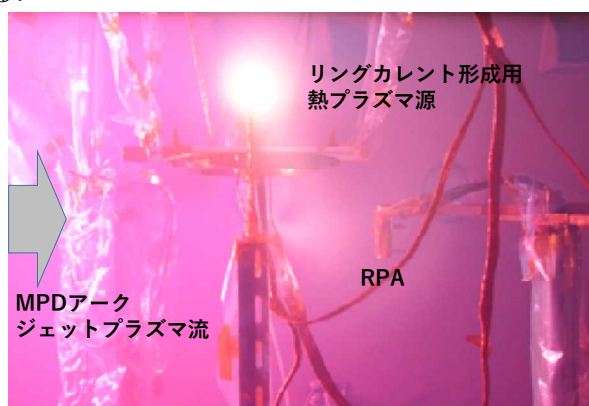


図 8 リングカレント形成時の磁気シールド ON の撮像写真

4. まとめと今後の課題

本研究では、宇宙線のうち荷電粒子を遮蔽する技術として提案されている磁気シールドに注目し、地上実験によって磁気シールドの性能評価を行った。評価には、逆電位アナライザを用い、シールド内部に侵入するイオンのエネルギー確率密度分布を評価した。放射線荷電粒子のコイル内部への侵入については、磁気シールドの形成に伴って、明らかに侵入粒子のエネルギーが減少することが確認できた。一方、リングカレントを形成した場合における磁気シールドの性能評価については、RPA 内部の異常放電のため、評価することができなかつ

た。次年度の実験で解決すべき課題として検討を行う予定である。

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、本研究の実験を行うにあたり、JAXA 宇宙科学研究所宇宙飛行工学研究系船木研究室の皆様にも多大なる支援をいただきました。ここに感謝申し上げます。

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, 准学士論文, 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.
- 4) Yoshihiro KAJIMURA, Itsuki Tanioka, Tatsumasa HAGIWARA, Yuya OSHI, Ikkoh FUNAKI, Evaluation of Magnetic Shielding using ring current generated by injected plasma from Interplanetary Spacecraft, Proc. of 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2019-r-38, 2019.
- 5) 梶村好宏, 谷岡樹, 大塩裕哉, 船木一幸, 磁場中への熱プラズマ放出による環状電流を用いた磁気シールド強化手法の検討, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 3N10, 2019.
- 6) Yoshihiro Kajimura, Tatsumasa Hagiwara, Yuya Oshio, Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa, Thrust Performance of Magneto Plasma Sail with a Magnetic Nozzle, Proceedongs of 30th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS-2015-b-329, 2015.
- 7) 服部 凌大ら, 「はやぶさ 2」表面材料損耗解析に向けたイオンスラストの逆流イオンのエネルギー計測, 平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2017-0025, 2017.