

令和元年度 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），谷岡樹（明石工業高等専門学校 機械・電子システム工学専攻），境康貴（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 工学部 機械システム工学科），船木一幸（ISAS/JAXA）

Yoshihiro Kajimura (National Institute of Technology, Akashi College), Itsuki Tanioka (National Institute of Technology, Akashi College), Kouki Sakai (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⁾．

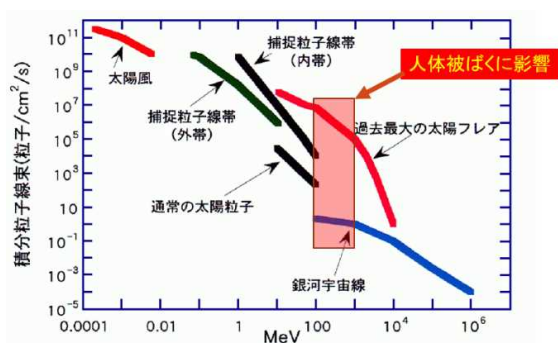


図 1 宇宙放射線の種類とエネルギースペクトル¹⁾

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．これまでに，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、磁気帆や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。本稿では、令和元年度に実施した実験に関する報告として、磁気シールドを強化するために噴出したプラズマが作るリングカレントの様子とそのリングカレントによって形成された磁場分布を測定した結果について示す。また、リングカレント形成時に、放射線を模擬した荷電粒子群をシールドに向けて照射した際、リングカレント形成前後で、シールド性能を評価した結果について、コイル内部に侵入する粒子の定量的評価として、イオン電流を測定した結果を示す。

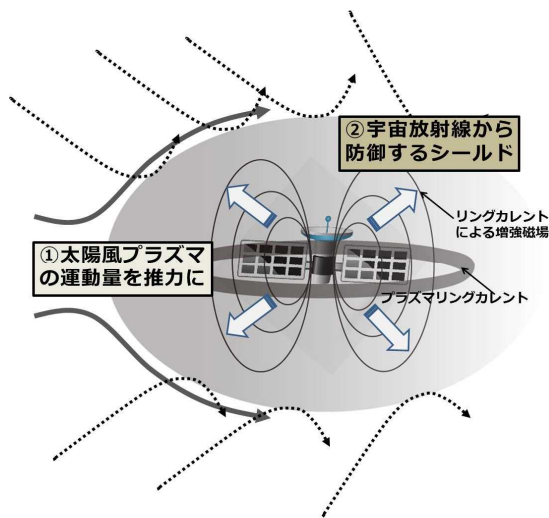


図2 本研究の概要

2. 実験方法：真空チャンバーを用いた実験

2.1. リングカレント形成時の磁場分布の計測

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ェ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], 50[A]）によって形成される磁気シールドの磁束密度分布を、磁気プローブによってコイル近傍から2 [cm] 刻みで計測する。実験概要図を図3に示す。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。流量を3 [sccm]としたアルゴンガスを噴出後、コイル磁場に捕捉された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する。この時の磁束密度分布を同様に計測する。

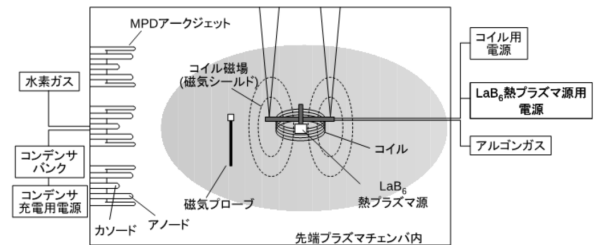


図3 実験概要図（磁束密度測定）

2.2. リングカレント形成時のシールド内侵入粒子の定量的評価

実験装置は、宇宙空間を模擬する真空チェンバー、宇宙線を模擬する宇宙線シミュレータ(Cosmic Ray Simulator : CRS)、磁気シールドを形成するためのコイルとその電源装置、リングカレント形成に必要なプラズマを生成するLaB₆熱プラズマ源とその電源装置、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)から構成されている。図4に本実験の概要図、図5に製作したRPAの外観、図6にRPAの断面図を示す。今回の測定では、RPAの動作に不具合が生じたことから、コイル磁場を変化させたときおよび熱プラズマを噴出した際の磁気シールド効果の傾向を把握することを目的として、イオン電流の計測のみを行った。このイオン電流は磁場内に侵入した、つまりシールドできなかった放射線荷電粒子の量を示している。この測定のため、図6に示したコレクタから最も遠いグリッドにのみ-40 [V]を印加し、

そのグリッドに直列接続した $100\ [\Omega]$ の抵抗に流れる電流を測定した．その他のグリッド・コレクタの電位は浮遊電位とした．

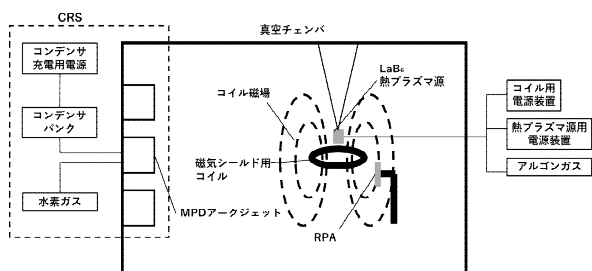


図 4 実験概要図 (イオン電流測定)

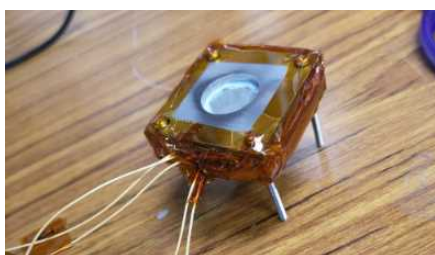


図 5 製作した逆電位アナライザー

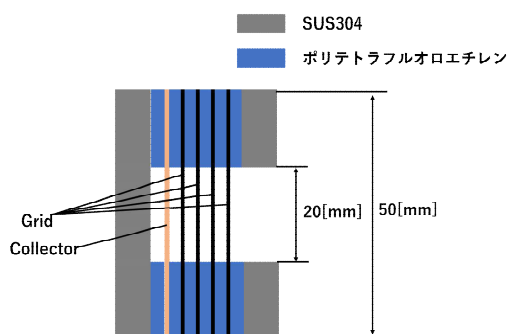


図 6 逆電位アナライザーの断面図

実験条件として，コイル電流を 0, 50, 100 [A] とし，CRS 電圧は 2.5, 3.0, 3.5 [kV] として水素プラズマを生成した．CRS 電圧の変化は，放射線荷電粒子を模擬するプラズマ流のエネルギーを変化させたことに相当する．本実験ではスケールダウンさせたパラメータを用いている．CRS 電圧を 3.5[kV]，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．リングカレント形成のため

の熱プラズマは，流量を 3 [sccm] としてアルゴンガスを供給した．図 7 にイオン電流を計測した RPA の設置位置を示す．

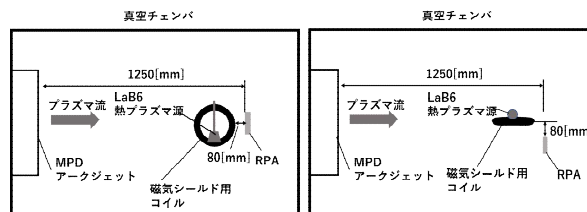


図 7 RPA の設置位置

3. 実験結果

3.1. リングカレント形成時の磁場分布の計測

図 8 に磁気シールドをオフとした場合における熱プラズマ噴出時の撮像を示す．図の発光を伴う部分が，熱プラズマ源から噴出されたアルゴンプラズマの存在を示し，等方的に拡散している様子が見て取れる．図 9 に，コイル電流を 100 [A] として，磁気シールドを動作させた場合の撮像を示す．噴出したプラズマが磁場勾配ドリフト運動によって，コイル近傍をドーナツ状に取り囲んだリングカレント領域が確認できる．このリングカレントによる磁場の変化を計測することにより，実際に磁気シールドが增強されているかを評価する．



図 8 熱プラズマ噴出時の撮像 (磁気シールドなし)

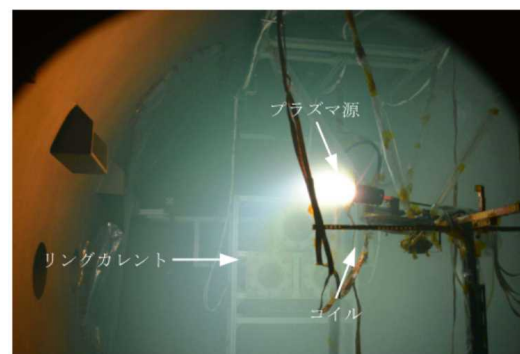


図 9 熱プラズマ噴出時の撮像 (磁気シールドあり)

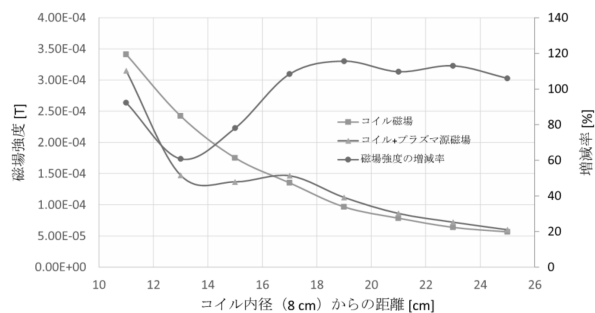


図 10 磁束密度分布と磁場の増減率

図 10 に、コイル中心から 0.08 [m]の位置、つまりコイル内径位置を基準とした位置からの磁束密度分布を、磁気プローブを用いて計測した結果を示す。熱プラズマの噴出によって、リングカレントが形成され、磁束密度分布が変化する結果が得られた。リングカレントの位置を横軸 16.5 [cm]の位置であると考えれば、そこに形成されるリングカレントによって、その内側は磁場が減少し、外側は磁場が増加している結果が確認できる。磁場の増加率として評価すれば、リングカレントが無い場合に比べ、リングカレントを形成した場合は、平均約 10 [%]の磁束密度増加を確認できた。

3.2. リングカレント形成時のシールド内侵入粒子の定量的評価

図 11 に、CRS 電圧 3.5[kV]、噴出プラズマが無い場合に、コイル内部に侵入したイオンの量を表すイオン電流を示す。磁気シールド形成のためのコイル電流を増加させるにしたがって、コイル内部に侵入するイオンの量が減少しており、磁気シールドの効果を確認することができた。磁気シールドが無い場合と比較して、100 [A]の磁気シールドを形成した場合、約 60 [%]の荷電粒子を防御できていることが分かる。

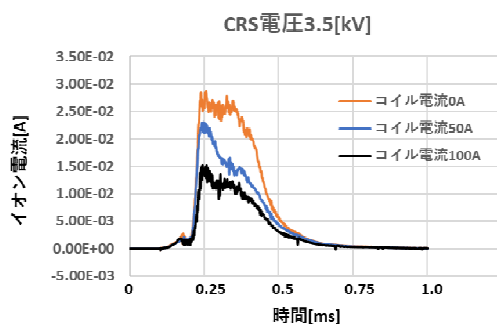


図 11 CRS 電圧 3.5[kV]、噴出プラズマ無の場合のイオン電流

図 12 に、CRS 電圧 3.0[kV]、コイル電流 100[A]の場合のイオン電流を示す。流量を 3 [sccm] としてアルゴンの熱プラズマを噴出し、リングカレントを形成した場合、明らかなイオン電流の減少（約 10 [%]）が確認され、熱プラズマ噴出によるリングカレントの効果によって、磁気シールドが強化されていることが示された。

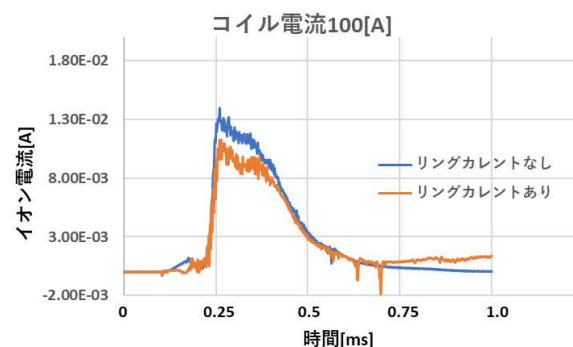


図 12 CRS 電圧 3.0[kV]・コイル電流 100[A]の場合のイオン電流

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。また、コイル近傍から熱プラズマを噴出し、リングカレントを形成して磁気シールドを増強する手法の評価も行った。具体的には、磁束密度分布の測定と、磁気シールド内に侵入する放射線荷電粒子の量としてイオン電流の測定を行った。磁束密度の分布については、リングカレントによって、その外側の磁束密度が約 10 [%]増加することを確認できた。放射線荷電粒子のコイル内部への侵入については、コイル電流が形成する磁束密度の増加およびリングカレントによる磁束密度の増加に伴って磁気シールド内に侵入するイオン量が減少することが確認された。CRS 電圧 3.0[kV]、コイル電流 100[A]のケースで、リングカレントを用いることにより、約 70 [%]のイオン電流の減少が見られ、リングカレントによる磁気シールド性能の強化が確認できた。今後の課題として、磁場内に侵入した放射線のエネルギー分布を逆電位アナライザーを用いて測定し、放射線エネルギーに対する磁気シールド効果やリングカレントによる磁気シールド性能強化の評価を定量的に行う。

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翔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, 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.
- 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.