

令和元年6月28日現在

機関番号：54501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06898

研究課題名(和文) 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開発

研究課題名(英文) Development of the magnetic shield for both the protection against the space radiation and propulsion mechanism

研究代表者

梶村 好宏 (kajimura, yoshihiro)

明石工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号：20403941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、宇宙飛行士や衛星を、宇宙放射線から守るための磁気シールドを、プラズマ噴射によるリングカレント形成によって強化させる手法を実験によって実証した。コイル(半径2m、電流：127[A])とリングカレント(半径：10[m]、電流：200[A])を用いると、320MeVの宇宙線を9割減できることが分かった。この結果を再現するため、JAXA宇宙科学研究所の共同利用施設である先進プラズマチャンバーを用い、実験による実証を行いシールドの効果を確認することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙放射線は、壁で防御するという従来の考え方に対し、新たな発想として、磁場で防御することに加え、噴射プラズマでシールド性能を自在に制御するというアイデアは、世界的にみても例がなく、成功すれば宇宙放射線防御に関する対人間、対機器に生じる問題を抜本的に解決できる点で独創的で画期的である。磁気シールド技術の確立は、今後近い将来に実現が見通されている宇宙エレベータにも必須技術として利用が見込まれるし、やがて人類が火星への飛行をする際、防御性能を調整可能な放射線防御シールドとして定着することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The protection from cosmic rays is one of the serious problem in long-term space missions scheduled in the future. In the present paper, we propose a method to protect the spacecraft and human bodies from the cosmic rays by using the magnetic shield generated by the coil current and plasma ring current generated by injected thermal plasma from interplanetary spacecraft. In order to protect against cosmic rays of 280[MeV] as a result of the particle tracking simulations, the coil current is needed 127[A] when the coil radius is 2[m], in addition the ring current generated by injected thermal plasma also needed 200[A] when the radius of the ring current is 10[m]. The ground vacuum chamber experiment was conducted to demonstrate the ring current formation by injecting the thermal plasma. It was succeeded to obtain the time exposure photograph of the ring current.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：磁気シールド 磁気セイル 熱陰極 プラズマ源 宇宙 宇宙線

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球に住む我々人類は、地球の固有磁場と大気によって有害な宇宙線から守られてきた。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。例えば人工衛星や宇宙ステーションは常に宇宙線の危機に曝されており、さらに将来計画されている月や火星における地球磁気圏外の長期有人ミッションにおいては宇宙線からの人体保護はより深刻な問題になる。実際に、宇宙飛行士が吐き気や宿酔、目を閉じていた際の閃光を感じる等の報告があり、放射線が重粒子（電荷が 2 以上）の場合は修復不能なほど破壊的に細胞が損傷する可能性もある。また宇宙機に対しては、放射線による機体自体の損傷や半導体素子のソフトウェアが致命的となる。これまでに、さまざまな遮蔽技術が研究されているが、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た。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、図 1 に示すような、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、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人工の磁気シールドである。この原理は地球磁気圏と同様にローレンツ力によって荷電粒子の侵入を防ぐ方法であり、表面に電流が流れるドーナツ状衛星を想定した場合、衛星内部は比較的弱磁場で、磁気シールドが展開できることが理論的に示されたが、高エネルギー宇宙線のシールドのためには  $10^8[\text{A}]$  以上の非常に強い電流を用いる必要がある。また、数値解析においては、これまでに低エネルギー宇宙線を対象とした例が存在するのみである。

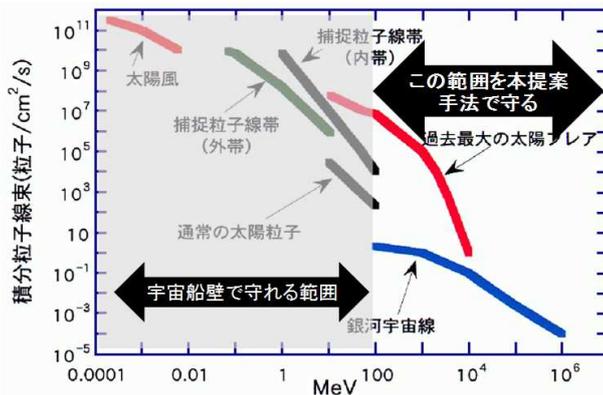


図1 宇宙放射線の種類とエネルギー

### 2. 研究の目的

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ことを目的とする。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向上させる手法の開発と性能の定量的評価を、数値解析及び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。

### 3. 研究の方法

#### 3. 1 数値シミュレーションによる評価方法

コイルとリングカレントを利用し、図 1 に示した範囲の宇宙線から人体や宇宙機を保護するために必要な磁荷の大きさ、それを達成するために必要なコイル電流及びリングカレント電流の大きさを明らかにすることを目的とする。そのために、コイルのみの場合とリングカレントが加わった場合の磁気シールド性能を定量的に評価するために粒子トラッキング手法を用いた数値シミュレーションを行った。シミュレーションモデルを図 2 に示す。

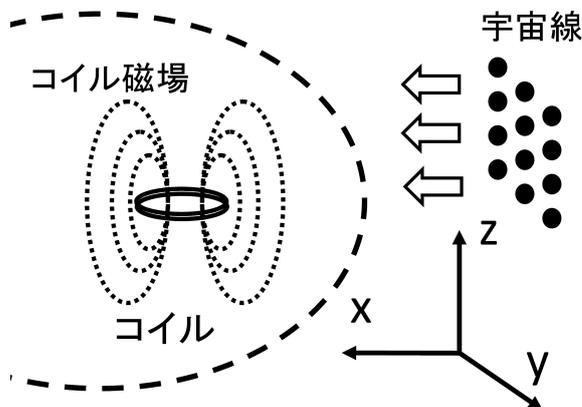


図2 シミュレーションモデル

本研究では、宇宙機の居住空間を想定し、コイル中心からの距離を  $r$  として、 $r < 0.1 (10[m])$  に宇宙線が入ったとき、磁気シールドを突破されたと判定した。また、先行研究のシミュレーション条件に加えて、宇宙線の初期速度を、規格化後の値として 10000、20000 としてシミュレーションを行った。その時のシミュレーション条件を表 1 に示す。また各初速度の時に宇宙線が持つ運動エネルギーを表 2 に示す。

表 1 本研究で設定したシミュレーション条件

正負の磁荷の位置	$(0, 0.001, 0), (0, -0.001, 0)$
宇宙線の初期位置 $\vec{x}$	$(-1000, -1.0 < y < 1.0 \quad -1.0 < z < 1.0)$ yz 平面に 250000 個を 0.004 間隔で配置
宇宙線の初期速度 $\vec{v}$	$(10000, 0, 0), (20000, 0, 0)$
磁荷の大きさ $Q_m$	$1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^7$
時間 $t$	$0 \sim 1.0, 0 \sim 0.5$
刻み時間 $dt$	0.00000025, 0.0000001

表 4 宇宙線の持つ運動エネルギー

規格化後の値	$v_0 = 10000$	$v_0 = 20000$
運動エネルギー [MeV]	57	320

本研究では、探査機に搭載されたコイルの半径を 2[m] とする。探査機からプラズマを放出し、磁場勾配ドリフトによってこのコイルの外側にリングカレント形成されたと仮定し、数値シミュレーションを行う。なお、リングカレントの半径を 2.5[m] と仮定し、流れる電流の大きさを 50、100、200 [A] と変化させた時シールドとしての性能が向上するか解析した。

### 3. 2 地上真空チェンバー実験による評価方法

チェンバー実験の装置は、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、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、 $\phi 1.5$  [mm] のエナメル線を半径が 0.059 [m] のアルミボビンに 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。

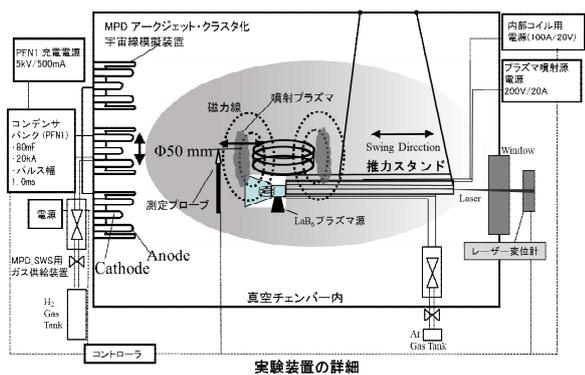


図 3 実験概要図

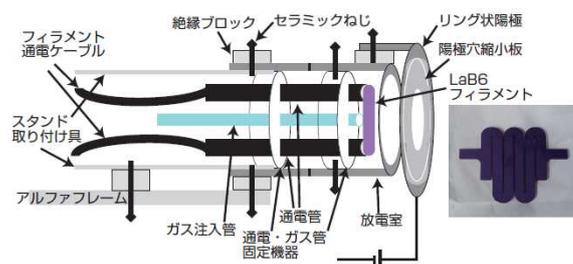


図 4 熱陰極 LaB<sub>6</sub> を用いたプラズマ生成源の概要図 (写真は LaB<sub>6</sub> フィラメント)

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 数値シミュレーションによる評価結果

宇宙線の初期速度 ( $v_x=1000, 10000, 20000$ ) の場合における磁荷の大きさに対する突入個数の変化を図5に示す。ただし、リングカレント電流の大きさは、磁荷の大きさに換算した。本研究では、総エネルギーの9割を防御できたとして、残りの1割に相当する1200個(図5の黒線)以下の突入個数の場合、磁気シールドとして機能すると判定した。初期速度  $v_x$  が20000の場合、磁気シールドとして機能する磁荷の大きさは  $4 \times 10^7$  程度であると計算され、それを達成するためには半径2[m]のコイルに127[A]を流し、半径10[m]のリングカレントに200[A]のリングカレント電流を流す必要があることが分かった。図5では、磁荷が0から増加するにつれて、突入個数が増加している。これは、磁場によって、宇宙線粒子がコイル中心に集められ捕捉されているためである。一方、ある磁荷の値を境に突入粒子が減少する。これが磁気シールドの顕著な効果である。

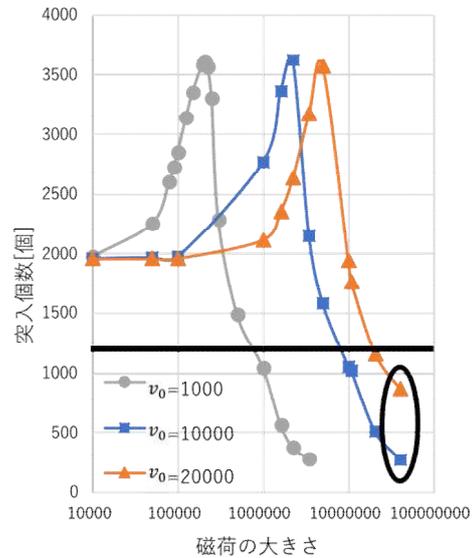


図5 磁荷の大きさに対する突入個数

各条件の場合に、太陽風から得られる推力について評価を行った。過去の研究より磁気圏の代表長に対応する推力値が数値解析と実験によって明らかにされている。コイル磁場 ( $Q_m=1.0 \times 10^6$ ) のみの場合、 $0.000394 [\mu N]$ 、リングカレント ( $r=10[m]$ 、 $I=200[A]$ ) を形成した場合(図5の黒丸部分)、 $0.0159 [\mu N]$  の推力がコイルを搭載した宇宙機に得られることがわかった。本研究の目的である、磁気シールドおよび太陽風を受けて推進力とする磁気プラズマセル推進システムとして機能することを確認した。

##### 4. 2 地上真空チェンバー実験による評価結果

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6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6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実施する計画である。

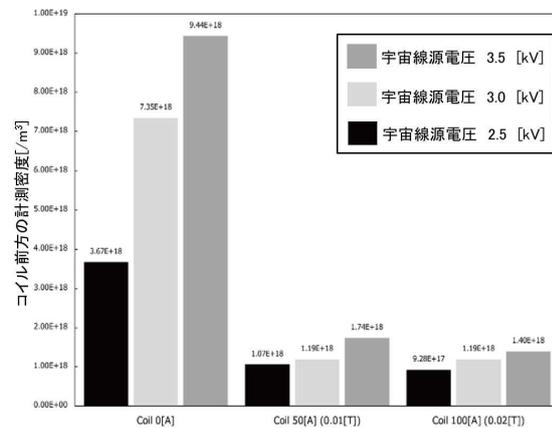


図6 コイル前方におけるプラズマ密度の変化

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]を通電し、Arガスを放電室に8[sccm]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7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かを測定し、評価を行う計画である。



図7 リングカレント形成時の撮像写真

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

1. Yoshihiro KAJIMURA, Tatsumasa HAGIWARA, Yuya OSHIO, Ikkoh FUNAKI, Thrust measurement of a Plasma Sail with a Magnetic Nozzle injecting a thermal plasma generated by LaB6 Cathode, 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2017-o-1-09, 2017.
2. 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14回宇宙環境シンポジウム論文集, JAXA-SP-17-006, pp153-156, 2017.
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 OSHIO, Ikkoh FUNAKI, Evaluation of Magnetic Shielding using ring current generated by injected plasma from Interplanetary Spacecraft, 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), a91054, 2019.

〔学会発表〕(計4件)

1. 福井公貴, 田中大貴, 梶村好宏, 環状電流を用いた磁気シールドの強度及び推力制御評価に向けた数値シミュレーション, 第61回宇宙科学技術連合講演会, P15, 2017.
2. 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14回宇宙環境シンポジウム, 2017.
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, 1E21, 2018.
4. Yoshihiro KAJIMURA, Itsuki Tanioka, Tatsumasa HAGIWARA, Yuya OSHIO, Ikkoh FUNAKI, Evaluation of Magnetic Shielding using ring current generated by injected plasma from Interplanetary Spacecraft, 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) June 17 to 21, 2019, Fukui, Japan, a91054, 2019.

## 6. 研究組織

### (1) 連携研究者

連携研究者氏名：大塩裕哉

ローマ字氏名：Oshio Yuya

所属研究機関名：龍谷大学

部局名：理工学部機械システム工学科

職名：助教

研究者番号(8桁)：80711233

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。