

# 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

○梶村好宏、三上杏太(明石工業高等専門学校 電気情報工学科)、福井公貴(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、山川 宏(京都大学 生存圏研究所)

## 1. 目的及び背景

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。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。宇宙線から人体及び宇宙機を防御するための手法の一つとして磁気シールドがある。

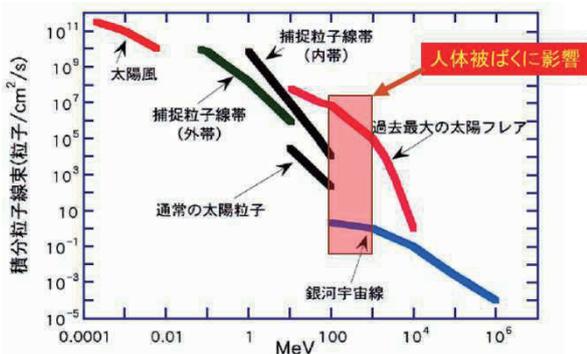


図 1 宇宙放射線の種類とエネルギースペクトル<sup>1)</sup>

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ある。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。本研究では、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、コイルの生成磁場によって形成することに加え、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環状電流によって、磁気シールド性能を向上させ、制御する手法の開発と性能の定量的評価を、数値解析を用いて明らかにする。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環状電流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、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シミュレーションを行う。

## 2. 数値解析手法

### 2.1 宇宙線の運動方程式

電磁場  $\vec{E}$ 、 $\vec{B}$  中での速度  $\vec{v}$  で運動する質量  $m$ 、電荷  $q$  の宇宙線の運動方程式は、式(1)で表される。

$$m\vec{v}' = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

本研究では、電界  $\vec{E}=(0,0,0)$  として、式(1)について 4 次の Runge-Kutta 法を用いて、粒子 1 つ 1 つの運動の軌跡を追跡するシミュレーションを行った。

### 2.2 磁気双極子

磁場を使用した磁気シールドのシミュレーションを行うために、円形コイルが発生させる磁場を式(2)

の磁気双極子磁場で表す。 $Q_m$ は磁気双極子の磁荷 $r$ は磁荷から宇宙線までの相対的な位置ベクトルを表している。

$$\vec{B} = \frac{Q_m}{4\pi} \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|^3} - \frac{Q_m}{4\pi} \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|^3} \quad (2)$$

### 2.3 リングカレントを利用した磁気圏拡大

リングカレントを利用した磁気圏拡大の原理を図2に示す。探査機周囲に、熱速度のみをもったプラズマを放出し、探査機に搭載したコイルが作る磁場にトラップさせ、磁場勾配ドリフトを生じさせることにより、プラズマ電流によるリングカレントを形成する。リングカレントは、コイル電流と同方向に流れるため、コイル電流による磁気モーメントにリングカレントによる磁気モーメントが加算され、磁気モーメントが増加し、磁気圏拡大につながる。

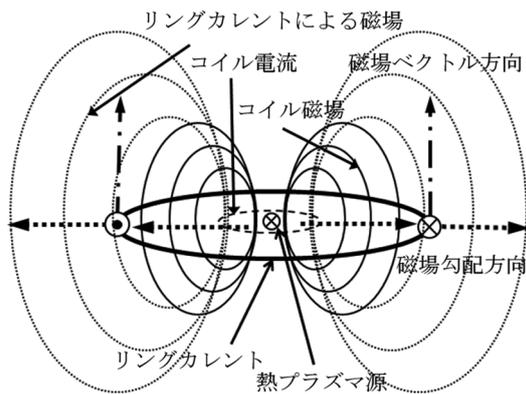


図2 リングカレントを利用した磁気圏拡大

## 3. 実験方法

本研究では、磁荷の大きさと宇宙線の初期速度を変化させた場合、およびリングカレントを形成した場合の磁気シールドの性能を評価する。

### 3.1 規格化

シミュレーションを行う上で、まず表1のように各値を規格化した。

### 3.2 シミュレーション条件

シミュレーションモデルを図3に示す。先行研究のシミュレーション<sup>4)</sup>を再現するにあたって、表2に示す条件でシミュレーションを行った。表2は規格化後の値である。本研究では、宇宙機の居住空間を想定し、 $r < 0.1(10[m])$ 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3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4に示す。

表1 規格化前後の物理量の対比

	実際の大きさ	規格化後の大きさ
距離	100[m]	1
速度	10[km/s]	1
時間	0.01[s]	1
磁束密度	1.004[ $\mu$ T]	1

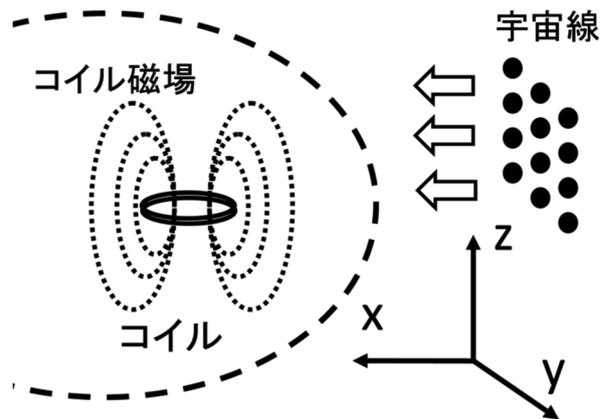


図3 シミュレーションモデル

表2 再現時の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 -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 $\vec{v}$	(1000,0,0)
磁荷の大きさ $Q_m$	$1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$
時間 $t$	0~5.0
刻み時間 $dt$	0.000001

表3 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 -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 $t$	0~1.0, 0~0.5
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	57[MeV]	320[MeV]

3.3 磁気圏拡大時のシミュレーション条件

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、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。

4. 実験結果

4.1 磁気シールドの性能評価

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4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4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4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。

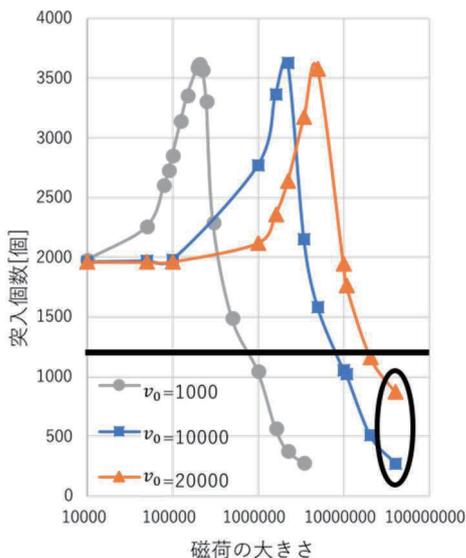


図 4 磁荷の大きさに対する突入個数

4.2 推力の見積もり

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<sup>3,5)</sup>。コイル磁場( $Q_m=1.0 \times 10^6$ )のみの場合、0.000394[μN]、リングカレント( $r=10[m], I=200[A]$ )を形成した場合(図4の黒丸部分)、0.0159[μN]の推力が得られることがわかった。

5. まとめ

本研究で明らかになったことを以下に示す。

- リングカレントを形成した場合、磁気シールドの性能が向上することがわかった。
- コイル( $r=2[m], I=127[A]$ )に加え、リングカレント( $r=10[m], I=200[A]$ )の場合( $Q_m=4.03 \times 10^7$ に相当)、320[MeV]の高エネルギーの宇宙線に対して、磁気シールド(放射線を9割減少可能)として機能することがわかった。
- 推力の評価の結果、リングカレントによる磁気圏拡大によって磁気モーメントが増加し、推力も増大することがわかった。

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) Kajimura, Y., Usui, H., Funaki, I., Ueno, K., Numani, M., Shinohara, I., Nakamura, M., and Yamakawa, H.: 3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail including Ion-Neutral Collision Effect in Laboratory, Journal of Propulsion and Power, 26, 1, 2010, pp. 159-165.
- 3) Kajimura, Y., Funaki, Matsumoto, M., Shinohara, I., Usui, H., and Yamakawa, H., Thrust and Attitude Evaluation of a Magnetic Sail by 3D Hybrid PIC Code, Journal of Propulsion and Power, Vol. 28, No. 3, May-June, 2012, pp. 652-663.
- 4) 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.
- 5) Fujita K. "Particle Simulation of Moderately - Sized Magnetic Sails.", Journal of Space Technology and Science, Vol. 20, No.2, 2005.