

# 双極子型磁気シールドを用いた宇宙線遮蔽の数値解析

永野 優一, 成行 泰裕<sup>1)</sup>, 臼井 英之<sup>2)</sup>, 小嶋 浩嗣<sup>3)</sup>

高知工業高等専門学校 電気工学科

<sup>1)</sup> 高知工業高等専門学校 電気情報工学科

<sup>2)</sup> 神戸大学 システム情報学研究科

<sup>3)</sup> 京都大学 生存圏研究所

October 19, 2010

## 1. はじめに

宇宙空間は高エネルギーの電子や陽子で構成されたプラズマに満たされている。これらのプラズマの中でも高エネルギーの粒子は宇宙線と呼ばれ、そのエネルギーは最高で  $10^8\text{eV}$  以上に達することが知られている [1]。地球に住む我々は、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 [2]。しかし 20 世紀中盤以降、人類は地球磁気圏外・地球磁気圏外へと活動の場を広げ、それに伴い宇宙線の脅威に直接さらされるようになった。具体的には、航空機に乗る乗務員の被曝や半導体素子のソフトウェアがあげられる。さらに現在の宇宙ステーションなどを中心とした有人の宇宙活動は地球の磁気シールド（磁気圏）の奥深くで行われているが、将来計画されている月・火星における長期の有人ミッションにおいては、宇宙線からの人体保護は深刻な問題になり得る。

宇宙線から衛星・人体を守る方法としては、古くからいくつかの手法が提案されてきた [2, 3] が、余り多くの進展はなかった。しかし近年、月・火星への有人飛行が現実的なこととして議論し始められたことで、注目を集めるようになった。宇宙線から人体を守る方法（シールド）は「受動的手法 (passive shielding)」と「能動的手法 (active shielding)」の二つに分けられる [3]。「受動的手法」とは、地球大気のように厚い壁や水などを居住空間の周りに敷き詰め宇宙線から守る方法である。この手法は原理は簡単であるが、重量がかさばるという大きな欠点があり、打ち上げも含めたミッションとしては現実的ではない<sup>1</sup>。「能動的手法」は電場を使ったものと磁場を使ったものの二通りに分けられるが、電場を使ったものはイオンを跳ね返すと電子が寄って来てしまいシールドの性能低下、損傷等が生じるため現実的ではない。磁場を使用したシールド（磁気シールド）[4] は、原理として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、近年実験やシミュレーションの研究が相次いで発表された [5, 6, 7]。地球の固有磁場などの双極子磁場中には荷電粒子が侵入できないドーナツ状の領域（Stormer 領域）が形成されることが知られており、その理論に基づいて磁気シールドの可能性が議論されていた [8]。しかし近年 Shepherd ら [5] は、現実に想定されるコイルでは、コイル半径が十分小さい場合で無い限り Stormer 領域が形成されず、さらに Stormer 領域が形成された場合でも超相対論的な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ことを数値計算により示した。このような強い電流は実現性に加え、強磁場による人体への悪影響も懸念される。さらに最近になり、Shepherd ら [7] から表面に電流が流れるドーナツ状衛星を想定すると、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示されたが、電流量などの問題は解決されていない。一方で、2008 年に行われた実験 [6] では、宇宙船を模した物質を磁化し超音速プラズマ流の中に配置して実験が行われ、双極子磁場がプラズマ流の中で作る小さな「穴」であっても磁気シールドとしては十分有用であることが示唆された。しかし、実験に使用されるモデルやパラメータは小さなもので、現実的なパラメータとの対応は明らかではない。また数値計算も行われているが、低エネルギー宇宙線の観点からしか議論されておらず、高エネルギー宇宙線についての議論はなされていない。

現在の状況を鑑みるに、全ての宇宙線の侵入を防ぐ磁気シールドを展開するには多くの問題があるが、他の手法の中では磁気シールドが最も現実的であるのも事実である。また、磁気シールドの研究においても、磁場によって宇宙線の侵入がどの程度低減されるかを定量的に示した報告は無く、多角的な視点からのアプローチに欠けているのも事実である。そこで本研究では、月や火星などの地球磁気圏外への有人飛行時における「有効な」磁気シールドの多角的視点からの検討のための基礎的知見を得ることを目的とし、双極子型の磁気シールドによって高エネルギー宇宙線の侵入がどのように遮蔽・低減されるかの詳細な数値解析を行う。

## 2. テスト粒子計算の概要

数値解析を行うにあたって、本研究では磁気双極子磁場を与え、荷電粒子の運動方程式を 4 次の Runge-Kutta 法を用いて数値解析を行った [9]。

### 2.1 宇宙線の運動方程式

電磁場中における宇宙線の運動方程式は、速度  $\vec{v}$ 、電場  $\vec{E}$ 、磁場  $\vec{B}$ 、質量  $m$ 、電荷  $q$  とすると、

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m\gamma} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

である。ただし

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

<sup>1</sup>ただし、水などを地球外で安定供給できれば話は変わってくる。

ここでは、 $\vec{E} = (0, 0, 0)$  として双極子磁場からの宇宙線粒子の運動への影響を議論する。

## 2.2 磁気双極子

本研究では磁場を使用した磁気シールドの実験の数値解析を行うために、円形コイルが発生させる磁場を式 (3) の磁気双極子磁場で表す。

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

ここで、 $Q_m$  は磁気双極子の磁荷、 $\vec{r}$  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。式 (3) は磁気双極子の距離が十分短い場合は非常にいい近似である [10]。

## 3. 磁気シールドの数値解析

本研究では磁気シールドの性能を調べるために、磁気双極子の磁荷と宇宙線の初期速度を変化させた時のシールド内に突入する宇宙線の変化について、数値計算を用いた解析を行った。

### 3.1 条件

- 正負の磁荷の位置はそれぞれ  $(0, 0.001, 0), (0, -0.001, 0)$  とする
- 宇宙線は磁極から距離  $x = 1000.0, -1.0 \leq y \leq 1.0, -1.0 \leq z \leq 1.0$  の  $yz$  平面に 250000 個を 0.004 間隔で配置する
- 初期速度  $\vec{v} = (1000.0, 0, 0), (10000.0, 0, 0), (20000.0, 0, 0)$  の 3 パターンとする
- 磁荷  $Q_m$  は  $1.0 \times 10^4$  から  $5.0 \times 10^5$  まで変化させる
- 衛星サイズを半径 0.01 の球程度とし、 $r < 0.1$  のとき磁気シールドを突破されたと判定する
- 時間は 0 から 12 まで時間刻み  $\Delta t = 0.000001$  で変化する

### 3.2 規格化

Table 1規格化

	実際的大小	規格化後の大きさ
長さ	100[km]	1000
速さ	10,000[km/s]	1000
時間	0.01[s]	1
磁場	1.004[ $\mu$ T]	1

今回は、表1のように各値を規格化し数値解析を行った。保存量を計算し誤差判定を行い、その誤差は  $10^{-6}$  以下になるように数値解析を行った。

## 4. 解析の結果

### 4.1 磁荷の変化に対する突入粒子数の変化

$V_0 = 10^3$  の場合は磁荷の増加によって突入粒子数も増加し、ピークを越えると減少している [11]。現段階では  $V_0 = 10^4$  のときは磁荷の増加によって突入粒子数はほとんど変化しておらず、 $V_0 = 2 \times 10^4$  では単調減少となっていることが確認できた (Fig.1)。

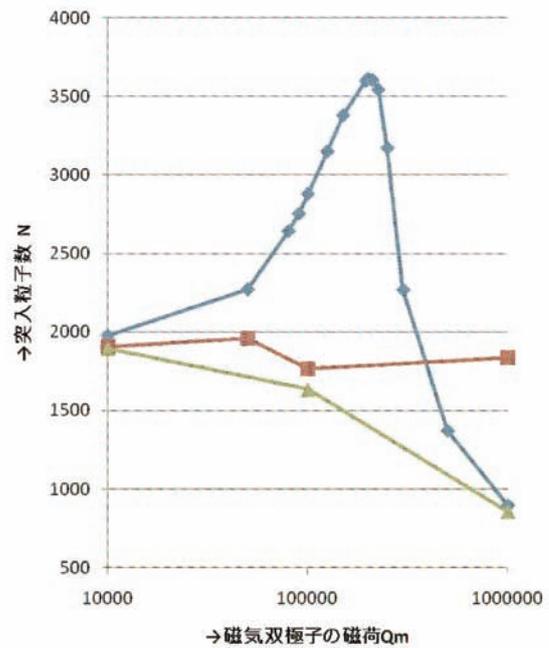


Fig. 1 磁荷の変化に対する宇宙線の突入数。青色の◆、赤色の■、緑色の▲はそれぞれ  $V_0 = 10^3$ ,  $V_0 = 10^4$ ,  $V_0 = 2 \times 10^4$  に対応している。

## 5. 今後の展望

今後は、相対論的な宇宙線の侵入経路を詳しく解析する必要がある。また、複数衛星による編隊飛行や居住空間の形状の検討などの検討を今後進める必要がある。

- [1] 桜井隆, 小島正宜, 小杉健朗, 柴田一成 [著]: 太陽, 日本評論社, 2009
- [2] Shielding Space Explorers from Cosmic Rays, Space Weather, Vol.3, 2005
- [3] Townsend, L.W, Aerospace Conference, IEEE, 724-730, 2005
- [4] Levy, R. H., Afbsd-tn-61-7, Avco-Everett Research Lab. Research Report 106, 1961
- [5] Shepherd, S. G., and B. T. Kress, SPACE WEATHER, VOL. 5, NO. 4, S04001, doi:10.1029/2006SW000273, 2007
- [6] Bamford R et.at, Plasma Phys, Control Fusion 50, 124025, 2008
- [7] Shepherd, S. G., and J. P. G. Shepherd, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, VOL. 46, doi:10.2514/1.37727, 2009
- [8] Cocks, J. C., S. A. Watkins, F. H. Cocks, and C. Sussingham, J. Br. Interplanet. Soc., 50, 479 484. 1997
- [9] E・クライツィグ [著] 田村義保 [訳]: 数値解析, 培風館, 1988
- [10] 砂川重信 [著]: 電磁気学, 培風館, 1988
- [11] 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, 高知高専卒論,2010