

火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽の初期検討

A preliminary investigation of radiation shielding using Martian magnetic anomalies

○江本 一磨・鷹尾 祥典（横国大）・國中 均（宇宙航空研究開発機構）

○Kazuma Emoto・Yoshinori Takao (YNU)・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract（概要）

We propose radiation shielding using Martian magnetic anomalies to protect crews from harsh space radiation on the Martian surface. Magnetic anomalies are inherent in Mars and could realize the permanent shielding. To validate the radiation shielding using magnetic anomalies quickly, we assumed a three-dimensional numerical model with a simple magnetic field. Then, we simulated energetic particles in a magnetic anomaly and visualized trajectories of them. It is clarified that the performance of the shielding using the Martian magnetic anomaly depends on incident angles of particles. Magnetic anomalies could protect crews from space radiation at specific incident angles on the Martian surface.

記号の説明

- B : 磁束密度 (T)
- c : 光速 (m s^{-1})
- E : エネルギー (J)
- m : 質量 (kg)
- q : 電荷 (C)
- t : 時刻 (s)
- v : 速度 (m s^{-1})
- x : x 座標 (km)
- y : y 座標 (km)
- z : z 座標 (km)
- γ : ローレンツ因子
- θ : 入射角度 ($^\circ$)

1. はじめに

有人火星探査に向けた長期的な計画が進められている^{1,2)}。有人探査での課題は山積しており、食事や医療、エネルギー、資金など多数あげられる。最も深刻な問題の一つは、宇宙放射線被ばくが引き起こす健康被害である。宇宙には太陽や銀河由来の宇宙放射線が飛び交っている。宇宙放射線は約90%が陽子で構成され、残りの約10%を電子と重粒子が占める。宇宙放射線が人体に当たるとDNAが損傷し、癌などの重大な健康被害を引き起こす。地球では地磁気と厚い大気が宇宙放射線を遮蔽するため、宇宙放射線による大きな健康被害は起こらない。一方の火星では固有磁場がなく大気が薄いため、多量の宇宙放射線が地表面に降り注ぐ。火星表面における長

期間活動では甚大な宇宙放射線被ばくを受ける。有人火星探査では宇宙放射線被ばくを防ぐために、宇宙放射線から身を守る方法を確立する必要がある。

宇宙放射線被ばくを最も簡単に防ぐ方法は物理的な壁を設けることである。7 mm のアルミ壁で40 MeV以下の陽子を防ぐことができる³⁾。また、火星の地下空洞を利用した宇宙放射線遮蔽も提案されている。物理的な壁を設ける遮蔽方法は確実である一方、活動の自由度を制限される欠点がある。長期的な有人火星探査では宇宙放射線被ばくに制限されない探査が望ましい。

そこで、火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽を提案する。NASAのMars Global Surveyor (MGS)の探査によって、火星には局所的な磁場が残っていることが明らかになっている⁴⁾。局所的に存在する残留磁場を磁場異常と称する。特に南半球では強力な磁場異常が観測されている。地面に垂直方向の磁場が強く、高度400 kmで約200 nTである⁵⁾。また、東西方向に直線的な磁場異常がNS極交互に並んでいる⁶⁾。

図1に火星磁場異常の模式図を示す。地面上向きと下向きの磁場異常が隣接しているため、上空で磁力線がつながり、磁場トラックが生じていることが予想できる。宇宙放射線の大部分は荷電粒子であるため、磁場異常によって放射線の軌道を変化させることが可能である。磁場トラックで囲われる磁極間には宇宙放射線が到達せず、宇宙放射線被ばく的大幅な減少を見込める。

火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽の利点は恒久性と安定性である。磁場異常は火星の地殻由来のため、有人探査の観点からは半永久的に維持される。また、外的要因によ

らず安定的に遮蔽環境を維持できる。火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽は物理的な遮蔽方法よりも恒久性と安定性で優れているといえる。

本研究では火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽を数値計算で簡易的に検証することを目的とする。火星磁場異常の利用可能性に焦点を当て、簡易的なモデルで磁場異常下における荷電粒子の運動を再現する。大気などの他の要素は考慮せず、火星磁場異常の効果のみに着目する。また、火星表面での被ばく量などの具体的な遮蔽評価は行わない。

2. 研究手法

火星の南半球に存在する磁場異常を三次元デカルト座標系で近似する。磁場異常は数千 km の範囲に渡って存在するため、磁場構造を計算モデルとして再現する際には、火星の曲率を考慮した球座標を適用すべきである。しかし、ここでは簡易的に数値計算を行うために球座標は適用せず、デカルト座標で近似する。

図 2 に計算モデルを示す。火星磁場異常を二列の直線的な磁極帯で近似する。 $z=0$ km の xy 平面を地表面とし、 z 軸座標を地表面からの高度とする。 x 軸方向を東西方向とし、 y 軸方向を南北方向とする。MGS による火星磁場異常の観測結果を考慮し、磁場異常を再現するために必要な $0 \text{ km} < x < 5300 \text{ km}$ および $0 \text{ km} < y < 2000 \text{ km}$, $0 \text{ km} < z < 2000 \text{ km}$ を計算領域とする。計算領域内における磁場異常と荷電粒子運動を計算対象とし、計算領域外は考慮しないことにする。磁場異常の N 極の中心を $y = 500 \text{ km}$, S 極の中心を $y = 1500 \text{ km}$ とし、それぞれ x 方向は連続的に配置する。

計算領域内は電流なしと仮定できるため、磁気スカラーポテンシャルを定義できる。磁気スカラーポテンシャルを数值的に解くことで、磁場異常の空間分布を再現する。

計算対象の粒子は宇宙放射線の大部分を占める荷電粒子とする。荷電粒子を質点とみなし、ローレンツ力による軌道変化を計算する。磁場によるローレンツ力を受ける荷電粒子の相対論的運動方程式は、

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

である。式(1)を相対論的 Buneman-Boris 法を用いて数值的に解く⁷⁾。

荷電粒子の初速度 v_0 は初期エネルギー E から逆算して求める。粒子の初期エネルギー E は、

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v_0^2/c^2}} - mc^2 \quad (2)$$

である。式(2)を荷電粒子の初速度 v_0 について解くことで、

$$v_0 = \sqrt{c^2 \left\{ 1 - \left(\frac{mc^2}{E+mc^2} \right)^2 \right\}} \quad (3)$$

を得る。荷電粒子の初期エネルギー E を計算条件として与え、式(3)から粒子の初速度 v_0 を求める。

表 1 に計算条件をまとめる。本研究では日常的に火星表面に降り注ぐ太陽由来の宇宙放射線に着目する。宇宙放射線は約 90% が陽子であるため、本研究では計算対象の荷電粒子を陽子のみとする。太陽由来の宇宙放射線のエネルギー範囲は

10 MeV から 1 GeV である⁸⁾。今回は人体に大きな被害を及し、かつフラックスの大きい 100 MeV を計算対象とする。

太陽から飛来する荷電粒子の入射角度は時刻依存である。火星表面から見た太陽の位置は一日の間に東から南中、南中から西へと変化する。本研究では簡単のために、荷電粒子の初速度ベクトルは xz 軸方向のみを考慮し、 y 軸方向成分を考慮しないと仮定する。 x 軸正方向を基準として、 xz 平面上を反時計回り方向に荷電粒子の入射角度 θ を定義する。今回は火星磁場異常による遮蔽効果が期待できる入射角度として、地面に対して水平に近い $\theta = 15^\circ, 165^\circ$ の二種類を設定した。MGS の観測から地面に垂直な方向の磁場が比較的強いことが分かっている。つまり、地面に対して水平に近い角度で入射する荷電粒子は多数の磁力線を横切り、大きな軌道変化を伴うことが期待できる。

荷電粒子の初期位置は $x = 0 \text{ km}$ および 5300 km の yz 平面上で、高度 $z = 1500 \text{ km}$ とする。五種類の初期位置 $y = 1100, 1300, 1500, 1700, 1900 \text{ km}$ を設定する。等間隔に配置することで、初期位置による軌道の違いを考察する。磁場構造は $y = 1000 \text{ km}$ を中心に対称のため、粒子の軌道も $y = 1000 \text{ km}$ を中心に対称な結果が得られることが予想できる。

三次元デカルト空間における粒子運動と直線的な二本の磁極帯を用いることで簡易的なシミュレーションを行う。磁場異常内における荷電粒子の軌道を可視化する。

磁力線で囲われる磁極間に宇宙放射線が到達するためには磁力線を多数横切る必要がある。特に $y = 1000 \text{ km}$ 周辺は宇宙放射線が横切る磁力線が最多になる領域であり、宇宙放射線の到達量が最も少なくなることが見込める。そこで、 $y = 1000 \text{ km}$ 周辺を有人探査拠点と仮定し、磁場異常による遮蔽効果を評価する。

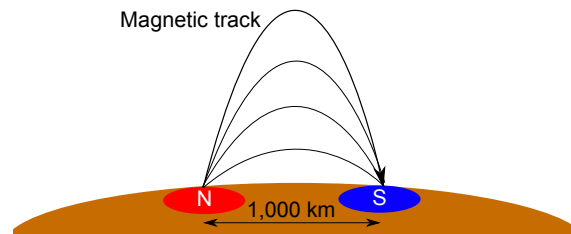


図 1 火星磁場異常の模式図

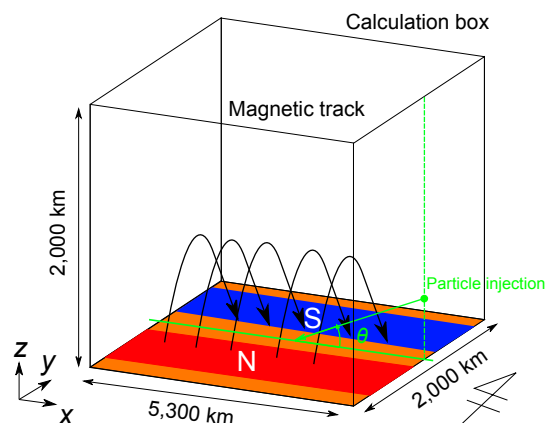


図 2 計算モデル

表 1 計算条件

条件	値
計算領域	5300 km × 2000 km × 2000 km
粒子	陽子
初期エネルギー	100 MeV
入射角度	15°, 165°
時間刻み	1.0×10^{-6} s

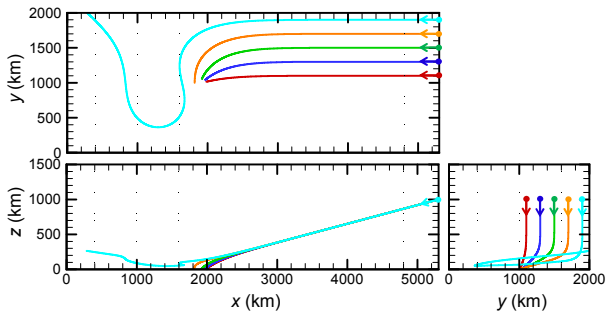


図 3 荷電粒子軌道 入射角度 15°

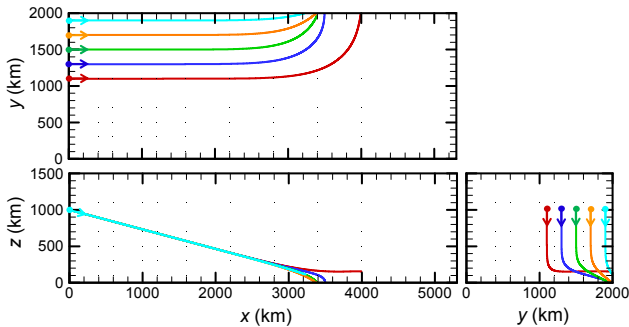


図 4 荷電粒子軌道 入射角度 165°

3. 結果・考察

図 3 に入射角度 $\theta = 15^\circ$ 、図 4 に入射角度 $\theta = 165^\circ$ の荷電粒子軌道を示す。図 2 の計算モデルで示した三次元計算領域内における軌道を可視化し、各三軸方向からの軌道投影図を第三角法で示す。各投影図の視点は、左上の軌道図が z 軸正方向側、左下の軌道図が y 軸負方向側、右下の軌道図が x 軸正方向側である。粒子の初期位置によって軌道の色を変えている。また、計算領域端面上における粒子の初期位置を丸、初速度の方向を矢印で示す。ここでは、 z 軸正方向側から見たときの荷電粒子の旋回方向を時計・反時計回りと区別する。

入射角度 $\theta = 15^\circ$ の荷電粒子は $x = 2000$ km、 $y = 1000$ km 周辺の地面に集中する傾向を示した。 $y > 1000$ km では地面下向きの磁場が存在するため、正電荷を持つ陽子は反時計回りに旋回する。初期高度と入射角度が一定の場合、荷電粒子の y 方向初期位置は地面到達点にあまり影響しないといえる。

ただし、 $y = 1900$ km を始点とする粒子のみ軌道が異なり、地面に到達しなかった。 $y > 1000$ km では他の荷電粒子と同様に反時計回りに旋回するが、 $y < 1000$ km では旋回方向が反転し、時計回りになる。旋回方向を変えながら z 軸負方向速度が減少し、粒子の z 軸方向速度は正に反転する。最終的

に $y = 2000$ km の計算領域端面から領域外に出た。旋回方向を変えながら z 軸方向速度が負から正に反転する現象は磁気ミラー効果によるものだと考えられる。

宇宙放射線を遮蔽することが可能だと見込んだ磁極間 $y = 1000$ km 周辺に荷電粒子が集中して到達した。有人探査において磁極間 $y = 1000$ km を拠点とした場合、多量の宇宙放射線被ばくを受けることになる。磁場異常によって宇宙放射線遮蔽を見込んでいたにもかかわらず、むしろ宇宙放射線が集中する危険な領域になる。磁極間 $y = 1000$ km に滞在するためには荷電粒子の地面到達角度を正確に予測し、物理的な遮蔽壁を設けるなどの対策を取る必要がある。 y 方向初期位置によらず $y = 1000$ km 周辺に荷電粒子が集中したため、 $y = 1000$ km から y 方向に移動すると放射線到達量が急激に減少する可能性も考えられる。今後は多様な入射角度で計算を行い、放射線到達量の正確な予測を行う。

入射角度 $\theta = 165^\circ$ の場合、荷電粒子の初期位置によらず $x = 3500$ km 周辺で $y = 2000$ km の計算領域端面から領域外に出た。いずれの荷電粒子も磁極間 $y = 1000$ km から遠ざかるように飛行している。 $x = 1100$ km を初期位置とする荷電粒子の軌道のみ傾向が異なるが、 $y = 2000$ km の計算領域端面から外に出た点は同じである。

磁極間 $y = 1000$ km 周辺を有人探査の拠点とした場合、入射角度 $\theta = 165^\circ$ の荷電粒子は全く到達しない。宇宙放射線被ばくをゼロにできる見込みが高い。有人探査における宇宙放射線遮蔽の観点では望ましい結果となった。

入射角度 $\theta = 15^\circ$ および 165° の荷電粒子軌道から、地面に到達する荷電粒子数は宇宙から飛来するときの入射角度に依存することが予想できる。太陽由来の宇宙放射線を考慮した場合、荷電粒子の入射角度は時刻や季節に依存する。火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽を実現するためには、時刻や季節に応じた行動をする必要がある。今回は荷電粒子の初期エネルギーとして 100 MeV のみを考慮したが、他の初期エネルギーでも同様の旋回特性および遮蔽効果が得られると期待できる。

4. まとめ

火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽の初期検討を行った。簡易的なモデルを組んで数値シミュレーションを行うことで、遮蔽性能を評価した。単一の荷電粒子に着目し、その軌道を可視化したところ、入射角度 $\theta = 165^\circ$ のときに優れた遮蔽性能を見込めることが明らかになった。今後は単一の粒子の計算に加えて、多数の荷電粒子を対象とした数値シミュレーションを行う。地面に到達する宇宙放射線の被ばく量を計算することで、磁場異常による遮蔽効果を評価する。また、入射角度 $\theta = 15^\circ$ における放射線集中効果の改善を試みる。

5. 謝辞

本研究は宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータ (JSS2) および京都大学生存圏研究所の電波科学計算機実験装置 (KDK) を用いて行いました。

参 考 文 献

- 1) Musk, E.: Making humans a multi-planetary species, *New Space*, **5** (2017), pp. 46–61.
- 2) Smith, R. M., Merancy, N., and Krezel, J.: NASA planning for exploration mission 2 (EM-2) and accomplishing exploration objectives in the proving ground, 2017 IEEE Aerosp. Conf., (2017), pp. 1–12.
- 3) Spillantini, P.: Manned exploration and exploitation of solar system: Passive and active shielding for protecting astronauts from ionizing radiation - A short overview, *Acta Astronautica*, **104** (2014), pp. 509–515.
- 4) Acuña, M. H., Connerney, J. E. P., Wasilewski, P., Lin, R. P., Anderson, K. A., Carlson, C. W., McFadden, J., Curtis, D. W., Mitchell, D., Rème, H., Mazelle, C., Sauvaud, J. A., d’Uston, C., Cros, A., Medale, J. L., Bauer, S. J., Cloutier, P., Mayhew, M., Winterhalter, D., and Ness, N. F.: Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission, *Science*, **279** (1998), pp. 1676–1680.
- 5) Connerney, J. E. P., Acuña, M. H., Wasilewski, P. J., and Kletetschka, G.: The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution, *Geophysical Research Letters*, **21** (2001), pp. 4015–4018.
- 6) Connerney, J. E. P., Acuña, M. H., Wasilewski, P. J., Ness, N. F., Rème, H., Mazelle, C., Vignes, D., Lin, R. P., Mitchell, D. L., and Cloutier, P. A.: Magnetic lineations in the ancient crust of Mars, *Science*, **284** (1999), pp. 794–798.
- 7) Birdsall, C. K. and Langdon, A. B.: *Plasma physics via computer simulation*, McGraw-Hill, New York, 1985, pp. 58–63, 356–357.
- 8) Dietze, G., Bartlett, D. T., Cool, D. A., Cucinotta, F. A., Jia, X., McAulay, I.R., Pelliccioni, M., Petrov, V., Reitz, G., and Sato, T.: ICRP publication 123: Assessment of radiation exposure of astronauts in space. *Annals of the ICRP*, **42** (2013), p. 35.