

火星の局所磁場における宇宙放射線環境の室内実験

A laboratory scale experiment of a space radiation environment induced by Martian local magnetic field

○江本一磨(横国大・院), 神田大樹, 月崎竜童(JAXA), 鷹尾祥典(横国大), 西山和孝, 國中均(JAXA)

○Kazuma Emoto (YNU), Daiki Koda, Ryudo Tsukizaki (JAXA),
Yoshinori Takao (YNU), Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract (概要)

We propose radiation protection using Martian local magnetic field for manned Mars exploration. To validate the radiation protection, a laboratory scale experiment of the Martian radiation environment was conducted using an ion beam source and permanent magnets as space radiation and Martian local magnetic field, respectively. We measured ion current distributions sweeping a collector probe with and without magnets, which were corresponded to space radiation distributions on the Martian surface. In addition, we conducted a numerical simulation to evaluate the results of the laboratory scale experiment. The experimental results agree with numerical ones at the two incident angles qualitatively.

記号の説明

- B**: 磁束密度 (T)
- L**: 代表長さ (m)
- m**: 質量 (kg)
- q**: 電荷 (C)
- r**: 旋回半径 (m)
- t**: 時刻 (s)
- v**: 速度 (m s⁻¹)
- ***: 無次元
- 0**: 代表値

1. 研究背景・目的

火星の有人探査を目指した計画が世界各国で進められている¹⁾。しかし、有人火星探査を実現するための課題は数多く残されている。特に宇宙放射線被ばくは健康に悪影響を及ぼすため、極めて重大な問題である。火星の被ばく量は火星探査ローバーCuriosityが観測しており、年間数百 mSvになると予想されている²⁾。直ちに影響が出る被ばく量ではないものの、長期的な活動になる火星探査においてはその影響が懸念されている³⁾。

火星地表面で宇宙放射線から身を守り、長期的な活動を実現する方法として、火星の局所磁場を利用した磁気シールドを提案する。火星の局所磁場とは、地殻に残留する磁場であり、南半球で比較的強い磁場強度を持つ⁴⁾。宇宙から飛来する放射線はそのほとんどが荷電粒子のため、局所磁場を通過

することで粒子軌道が変わると予想される。局所磁場によって火星地表面における宇宙放射線量を減少させることができれば、局所磁場を利用した磁気シールドが成立する。

これまでの研究では局所磁場を含む火星環境を三次元デカルト座標で簡易的にモデル化し、局所磁場を通過する宇宙放射線の軌道を計算する数値シミュレーションを実施した⁵⁻⁷⁾。その結果、局所磁場の構造に対する宇宙放射線の入射角度とエネルギーが、磁気シールドの可否に大きく影響することが明らかになった⁸⁾。

数値シミュレーションによる解析は各粒子の軌道を可視化できるとともに、詳細な宇宙放射線量分布を得ることができる利点がある一方で、膨大な計算コストを必要とする欠点がある。重要なパラメータである宇宙放射線の入射角度とエネルギーを連続的に変化させた数値シミュレーションを実施したいが、現実的な計算時間に収めることは難しい。そこで、連続的な入射角度・エネルギーの変更を可能にするために、火星の宇宙放射線環境を相似的に縮小した室内実験を行う。これまでの研究では実験環境を構築し、複数のコレクタを使用した離散的なイオン電流分布の取得を行った⁸⁾。

本研究では、まず室内実験の結果を評価するための予備計算として、従来の数値シミュレーションを室内実験のスケールで実施した。また、新たにコレクタプローブをステッピングモータで掃引し、連続的なイオン電流分布を取得した。

2. 室内実験モデル

火星の局所磁場における宇宙放射線環境を室内実験とし

表 1 火星環境と室内実験の相似則における各物理量

| | Mars | Experiment |
|-------------------------------|----------|------------|
| Characteristic length | 1,000 km | 10 cm |
| Ion | Proton | Helium |
| Ion energy | 500 MeV | 500 eV |
| Characteristic magnetic field | 5,500 nT | 100 mT |

て再現するため、宇宙放射線軌道の相似則を考える。ここでは荷電粒子で構成される宇宙放射線が火星の局所磁場を通過することでローレンツ力を受けると仮定する。このとき荷電粒子の運動方程式は、

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

と書ける。ただし、火星大気との衝突は無視する。式(1)を無次元化すると、

$$\frac{d\mathbf{v}^*}{dt^*} = \frac{L}{r} \mathbf{v}^* \times \mathbf{B}^*, \quad (2)$$

が得られる。ただし、

$$r = \frac{mv_0}{qB_0}, \quad (3)$$

である。すなわち、 L/r が無次元パラメータになる。火星環境と室内実験の間で、無次元パラメータ L/r を一致させることで、荷電粒子の無次元軌道を一致させることができる。

相似則を成立させるために、火星環境と室内実験の無次元パラメータ L/r を見積もる。表 1 に相似則における各物理量を示す。火星の代表長さ L を 1000 km、代表磁束密度 B_0 を 2000 nT と設定する。宇宙放射線の構成粒子の中で大多数を占める陽子を対象とし、そのエネルギーは 500 MeV とする。このとき、火星環境の無次元パラメータ L/r は 1.70 になる。

火星環境の無次元パラメータ $L/r = 1.70$ に一致するように、室内実験の実験条件を見積もる。代表長さ L は真空チャンバーの大きさの制限から 10 cm とした。このとき、室内実験で実現できる実験条件として、500 eV の He^+ イオンビームと、代表磁束密度 $B_0 = 100$ mT を採用した。これらの条件を満たす室内実験をイオンビーム源と永久磁石を用いて構築する。

3. 予備計算

室内実験の実施に先立ち、実験結果を評価するための予備計算を行う。図 1 に計算モデル、表 2 に計算条件を示す。三次元デカルト座標で局所磁場を含む火星環境をモデル化し、計算領域内を飛行するイオンビームの軌道を計算する。計算領域は室内実験の代表長さから、53 cm × 20 cm × 70 cm の直方体形状とした。火星の局所磁場は東西方向に直線的な磁極として存在するため、本計算では南側の地面に N 極、北側の地面に S 極が存在する配置とした。計算領域内の磁場は、室内実験において永久磁石が生成する磁場構造とし、有限要素計算ソフトの Finite Element Method Magnetics を使用して算出した⁹⁾。ただし、磁場は南北-高度方向断面の二次元分布として与え、東西方向の磁場は無視する。イオンビームは He^+ とし、Buneman-Boris 法を用いて数値的に解いた¹⁰⁾。 He^+ の初期エネルギーは 500 eV とする。入射角度は 15° と 165°

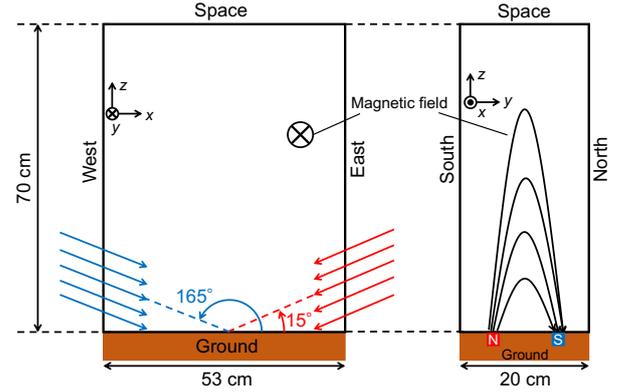


図 1 計算モデル

表 2 計算条件

| | |
|------------------|-----------------------|
| Calculation area | 53 cm × 20 cm × 70 cm |
| Ions | He^+ |
| Ion energy | 500 eV |
| Incident angles | 15° and 165° |

の二種類を設定する。今回設定した磁場構造の場合、それぞれ東側入射と西側入射に相当する。 He^+ の初期位置を計算領域の境界面上でランダムに与え、磁石上面に到達する He^+ の粒子数分布を取得した。また、永久磁石による磁場なしの計算も実施し、磁場による効果を抽出した。

4. 実験方法

火星環境と室内実験の間で成立する相似則を元に、室内実験を構築した。また、コレクタプローブを掃引することで、連続的なイオン電流分布の測定を可能にした。図 2 に実験装置の概略図を示す。チャンバー内に火星の局所磁場を模擬した磁石台を設置した。各磁極は 1 cm 角のネオジウム磁石を使用し、複数個を並べることで磁石列を構成した。磁石列の長さは NS 極ともに 20 cm とし、磁極間の幅は 10 cm である。イオンビーム源には JAXA が開発したマイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 1$ を使用し¹¹⁾、磁石台から約 90 cm 離れた場所に設置した。加速グリッドに一定電圧を印加し、一定エネルギーかつ一様方向のイオンビームを抽出する。

コレクタプローブには直径 2 mm の銅棒を使用した。銅棒は絶縁管で覆い、イオンビームから保護した。先端のみ直径 2 mm の平面を露出させ、コレクタ面としてイオンビーム電流を測定する。コレクタ面は磁石台上面側に設置した。火星の局所磁場は地殻の残留磁場のため、本実験では磁石台の上面が仮想的な火星地表面に相当する。そのため、磁石上面におけるイオン電流分布を取得することで、火星地表面における宇宙放射線量に換算することができる。また、コレクタ面は磁石列の長さ 20 cm に対し、ちょうど中間の 10 cm 地点に設置した。

磁石台はステージに搭載し、ステッピングモーターでイオンビーム軸方向の移動が可能になっている。磁石台の移動によって、磁場の有無を切り替えたイオン電流の測定を可能にする。コレクタ面直下に磁石が存在するときは火星環境の模擬実験となり、磁石台をコレクタプローブから遠ざけたときは

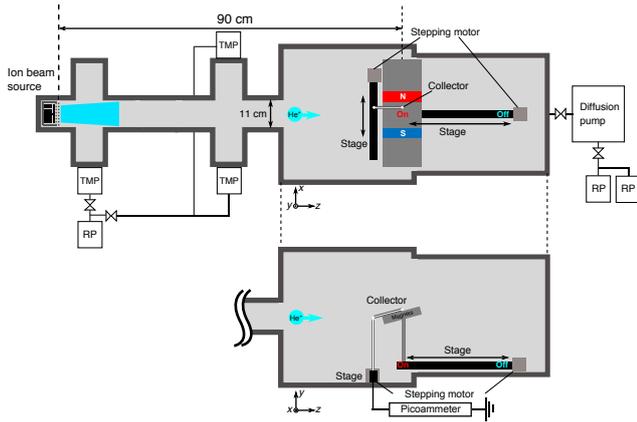


図2 実験装置の概略図

表3 実験条件

| Gas | Helium |
|----------------------|-------------------------|
| Mass flow rate | 14.8 sccm |
| Microwave power | 3.0 W |
| Screen voltage | 500 V |
| Acceleration voltage | 0 V |
| Incident angles | 15° and 165° |
| Sweeping length | 15.6 cm |
| Sweeping velocity | 0.24 cm s ⁻¹ |
| Sampling rate | 200 ms |

磁場なしの実験となる。コレクタ直下における磁石台の有無を切り替えることで、火星の局所磁場による効果を抽出する。コレクタプローブは磁石台とは別のステージに搭載し、磁極を渡る方向に移動する。従来の数値シミュレーションの結果から宇宙放射線量分布は磁極を渡る方向に変化し、磁極列方向には変化しないことが分かっているためである⁹⁾。

表3に実験条件を示す。作動ガスにはヘリウムを使用し、マスフローコントローラで14.8 sccmの一定流量に制御した。投入マイクロ波電力は3.0 Wに固定した。スクリーン電圧を500 V、アクセル電圧を0 Vに固定し、500 eVのHe⁺ビームを引き出した。イオンビーム源は地面に対して水平に設置し、磁石台を傾けることでコレクタ面への入射角度を設定した。本実験では入射角度15°と165°を設定した。この角度は図1における予備計算の入射角度と対応する。コレクタプローブは磁石列N極の外側を始点とし、掃引距離を15.6 cm、掃引速度を0.24 cm s⁻¹とした。イオン電流はピコアンメータで測定し、ロガーを用いてプローブ掃引位置と同期した。ロガーのサンプリング周波数は200 msとした。

5. 計算結果・考察

図3-4に予備計算で得られたHe⁺の規格化粒子数分布を示す。図3は入射角度15°、図4は入射角度165°の結果である。入射角度15°の場合、He⁺が磁極間の5-15 cmの範囲に多く到達した。入射角度165°の場合、磁極間の幅10 cm以上の広い範囲に渡ってHe⁺が全く到達しない結果となった。この結果は従来の数値シミュレーションの結果とおおよそ一致しており⁹⁾、相似則が成立していることが確認できた。

He⁺が入射する計算領域端の近傍では規格化粒子数が大き

い地点が他の場所よりも広く存在する。これは低高度から入射したHe⁺が急激に磁場の影響を受けたためであり、非現実的な結果になる。そのため、He⁺が入射する計算領域端面から十分に離れた地点の結果が妥当だと考えられる。

室内実験では長さ20 cmの磁石列に対し、中間の10 cm地点をコレクタプローブで掃引する。そのため、実験で得られるデータは図3-4を南北方向に切った二次元分布になることが予想される。また、磁石列端の影響が出るのが予想される。そこで、数値計算と室内実験の結果を比較する際には磁石列端の影響を考慮し、入射角度15°の図3では東端から10 cm地点に相当するLongitude = 43 cm、入射角度165°の図4では西端から10 cm地点に相当するLongitude = 10 cmの断面を予備計算の結果として採用する。

6. 実験結果・考察

図5に入射角度15°におけるプローブ掃引時のイオン電流分布を示す。簡易的に磁石の設置場所とその大きさも示している。磁場なしの場合、イオン電流分布は山型になり、イオンビーム軸から遠ざかるにつれて減少する結果となった。イオン電流値としては1 nA前後である。一方で、磁場ありの場合、イオン電流は磁石列間で磁場なしに比べて大きく、磁石列外側で小さくなる結果となった。イオン電流分布は磁石列近傍でピークを持つ形状になっている。また、磁場がないときは安定したイオン電流分布が取得できているのに対し、磁場ありのときは不安定なイオン電流分布になっている。部分的に電流値が負になっている部分も存在するが、これは放電によってイオンビーム中のわずかな電子が流れ込んだと考えられる。

図6に入射角度15°における規格化粒子数分布を示す。室内実験で測定した磁場ありのイオン電流に対して、磁場なしのイオン電流で規格化した値を規格化粒子数と定義した。図

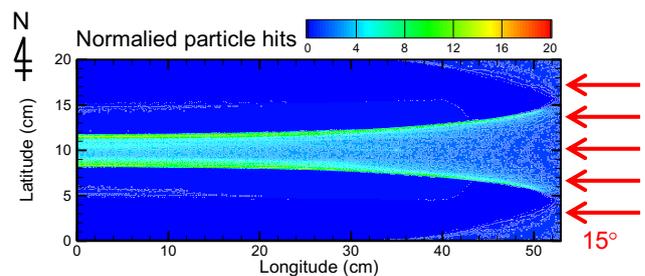


図3 規格化粒子数分布 (入射角度15°)

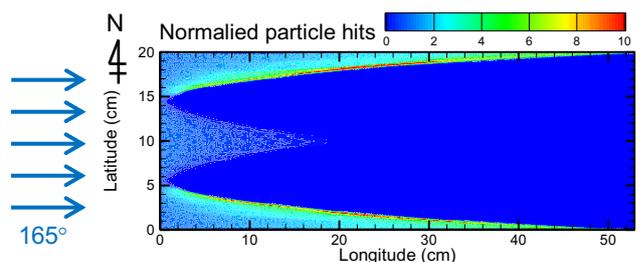


図4 規格化粒子数分布 (入射角度165°)

3に示した予備計算の結果における Longitude = 43 cm の断面も合わせて示す。室内実験と数値計算の結果とともにピークが二つ現れる点や、ピーク間でおおよそ2程度の規格化粒子数になり、定性的な一致を確認した。一方で、ピーク間の距離やピークの中心位置、ピークの高さは一致していない。数値計算で理想的なモデルを用いている点や、室内実験で平行なビームを再現できない点などから、完全に一致させることが困難だと考えられる。

図7に入射角度 165°におけるプローブ掃引時のイオン電流分布を示す。簡易的に磁石の設置場所とその大きさも示している。なお、図5-6とは磁石配置が逆になっている。磁石なしの場合に比べて、磁石ありの場合は磁石列間でイオン電流が減少する結果となった。一方で、磁石列外側ではイオン電流は減少せず、磁石なしと同程度かそれ以上の電流値を示した。入射角度 165°における宇宙放射線量が減少する結果は、図4に示した予備計算の結果と定性的に一致するが、完全に宇宙放射線量がゼロとなる結果にはならなかった。室内実験の場合、磁石列間でも 0.5-1.5 nA 程度の He⁺ が到達している。また、6-10 cm の範囲では、He⁺ の到達量が 1 nA 程度増加し、イオン電流分布は凸形状になる。

図8に入射角度 165°における規格化粒子数分布を示す。入射角度 15°のときと同様に、室内実験で測定した磁場ありのイオン電流に対して、磁場なしのイオン電流で規格化した値を規格化粒子数と定義した。図4に示した予備計算の結果における Longitude = 10 cm の断面も合わせて示す。室内実験と予備計算の結果ともに、磁石列外側にピークが生じることが確認でき、磁石列間の規格化粒子数もおおよそ一致する。磁石列間の 6-10 cm の範囲で規格化粒子数が増加する点も一致する。しかし、ピークにおける規格化粒子数は予備計算の方が圧倒的に大きく、図6に示した入射角度 15°の規格化粒子数分布と同様にピークの幅も一致しなかった。

図6および8の規格化粒子数分布において、予備計算の結果は粒子の入射面から 10 cm の断面を使用した。しかし、計算モデルにおいて東西方向の磁場を無視しており、計算モデルと実験装置は完全に一致していない。ゆえに、室内実験では 10 cm の断面ではなく、別の断面を観測していた可能性も考えられる。仮に入射面からさらに 1 cm 離れた 11 cm 地点の断面を採用すると、ピークの幅が変化し、予備計算と室内実験がより一致することになる。数値シミュレーションと室内実験を比較するためには、数値シミュレーションにおける磁場を三次元に拡張し、東西方向の磁場を含めた計算を実施する必要がある。

予備計算の場合、低高度から入射した He⁺ が急激に磁場の影響を受けるため、入射する計算領域端の近傍における結果は信頼できないと考えていた。しかし、室内実験でも同様の結果が得られたことから、単に計算上の問題ではなく、磁極列の端が影響している現象だと考えられる。実際の火星の宇宙放射線環境を考える際にも、直線的な局所磁場の端では同様の現象が起こっていると考えられる。

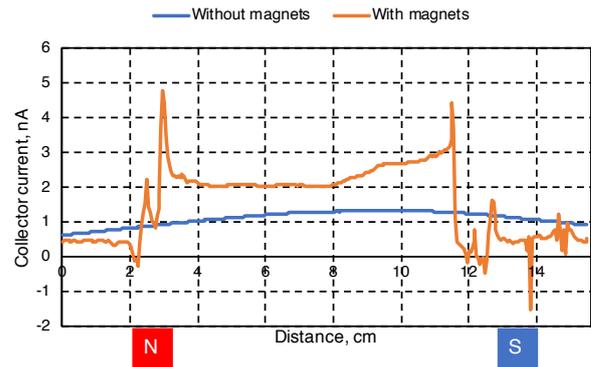


図5 イオン電流分布 (入射角度 15°)

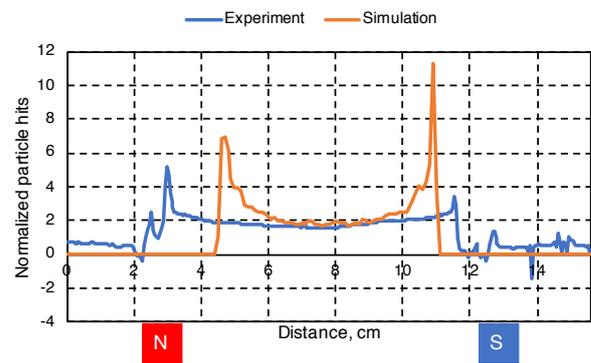


図6 規格化粒子数分布 (入射角度 15°)

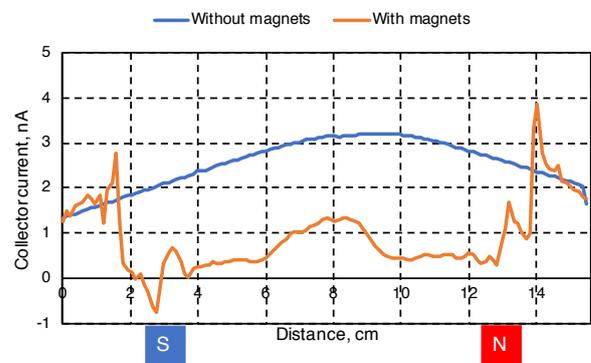


図7 イオン電流分布 (入射角度 165°)

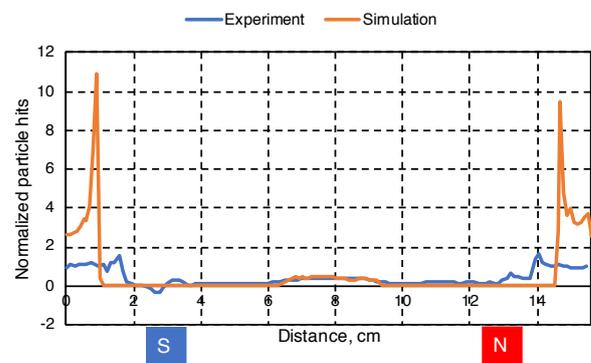


図8 規格化粒子数分布 (入射角度 165°)

7. 結 論

火星の局所磁場を利用した宇宙放射線防御を目指し、火星の宇宙放射線環境を模擬した室内実験を実施した。室内実験の実施に際し、火星の局所磁場を飛行する宇宙放射線の軌道に対して相似則を適用し、荷電粒子の無次元軌道が一致する室内実験の条件を見積もった。この見積もりを元に、イオンビーム源と永久磁石を用いて火星の模擬環境を構築し、 He^+ のイオン電流を測定することで宇宙放射線量に相当する分布を取得した。入射角度 15° と 165° の二つの条件で実験を行い、どちらも従来の数値シミュレーションの結果と定性的に一致することを確認した。一方で、数値シミュレーションでは理想的なモデルを採用していることや、室内実験で完全に一樣なイオンビームが得られていないことなどから、定量的な一致を図ることは困難であることが分かった。今後はイオンスラスタの加速電圧を連続変化させた実験や、磁石台を連続回転させることによる入射角度変更を実施し、ダイナミックな宇宙放射線環境を再現する実験を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 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 Aerospace Conference, Big sky, pp. 1–12, 2017.
- 2) Hassler, D. M., Zeitlin, C., Wimmer-Schweingruber, R. F., Ehresmann, B., Rafkin, S., Eigenbrode, J. L., Brinza, D. E., Weigle, G., Böttcher, S., Böhm, E., Burmeister, S., Guo, J., Köhler, J., Martin, C., Reitz, G., Cucinotta, F. A., Kim, M., Grinspoon, D., Bullock, M. A., Posner, A., Gómez-Elvira, J., Vasavada, A., Grotzinger, J. P., and MSL Science Team: Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover, *Science*, **343** (2014), p. 1244797.
- 3) Cucinotta, F. A. and Cacao, E.: Non-targeted effects models predict significantly higher mars mission cancer risk than targeted effects models, *Scientific Reports*, **7** (2017), p. 1832.
- 4) Acuña, M. H., Connerney, J. E. P., Ness, N. F., Lin, R. P., Mitchell, D., Carlson, C. W., McFadden, J., Anderson, K. A., Rème, H., Mazelle, C., Vignes, D., Wasilewski, P., and Cloutier, P.: Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment, *Science*, **284** (1999), pp. 790–793.
- 5) Emoto, K., Takao, Y., and Kuninaka, H.: A Preliminary Study on Radiation Shielding Using Martian Magnetic Anomalies, *Biol. Sci. Space*, **32** (2018), pp. 1–5.
- 6) 江本一磨, 鷹尾祥典, 國中均: 火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽の初期検討, 平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, STEP-2017-021, 2018 年 1 月.
- 7) 江本一磨, 鷹尾祥典, 國中均: 火星の磁場を利用した宇宙放射線防御の数値計算, 日本宇宙生物科学会第 32 回大会, 仙台, O1-7, 2018 年 9 月.
- 8) 江本一磨, 神田大樹, 月崎竜童, 鷹尾祥典, 西山和孝, 國中均: 火星磁場異常を利用した宇宙放射線遮蔽の実証, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 久留米, P35, 2018 年 10 月.
- 9) Finite Element Method Magnetics, <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- 10) Birdsall, C. K. and Langdon, A. B.: Plasma physics via computer simulation, New York, McGraw-Hill, 1985.
- 11) Koizumi, H. and Kuninaka, H.: Low Power Micro Ion Engine Using Microwave Discharge, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, AIAA 2008-4531, 2008.