

MMX 搭載惑星空間放射線環境モニタ IREM の開発と 総合システムの試験状況

○神崎 千沙子、相田 真里、広瀬 孝幸、上野 遥、宮崎 英治、
早川 泰正、磯 匠、坂田 祐子、藤井 雅之

Development Results of the Interplanetary Radiation Environment Monitor (IREM) onboard the Martian Moons eXploration (MMX) spacecraft and status of MMX system Proto Flight Test

Chisako Kanzaki, Mari Aida, Takayuki Hirose, Haruka Ueno, Eiji Miyazaki (JAXA),
Yasumasa Hayakawa, Takumi Iso, Yuko Sakata (Meisei Electric Co., Ltd.), Masayuki Fujii (Famscience Inc.)

Key Words: MMX, Space Radiation environment, Solar Energetic Particle (SEP), Galactic cosmic rays (GCR), ΔE -E telescope, linear energy transfer (LET) distributions, Energy Spectrometer

1. 背景・目的

現在 2026 年度の打上げを目指し開発が進んでいる火星衛星探査計画 (Martian Moons eXploration: MMX) は、世界初の火星衛星 (Phobos) サンプルリターンミッションである。MMX ではサンプル採取・回収のほか、リモートセンシング、その場観測および探査技術の獲得を目指した 13 のミッション機器が搭載される。惑星空間放射線環境モニタ (Interplanetary Radiation Environment Monitor: IREM) はこれらミッション機器のうち、探査技術の獲得を目指した機器の一つであり、惑星空間における放射線環境 (太陽フレアおよび銀河宇宙線) の測定技術の確立を目的とする。MMX は 3 つのモジュール (往路モジュール、復路モジュール、探査モジュール) で構成されているが、IREM はこのうち復路モジュールの暴露部に搭載される (図 1)。運用期間は打上げ後の初期チェックアウト→火星周回軌道投入→火星圏離脱→地球帰還までを含む往復約 5 年間 (Phobos への降下着陸上昇運用時などのクリティカル運用時を除く) であり、宇宙放射線環境の常時観測を行う。火星圏における宇宙放射線の実測例は NASA の Mars Science Laboratory (MSL) ミッション^{1,2} や The Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) ミッション³ が挙げられるが、未だその数は非常に限られている。またこれらのミッションでは観測する放射線のエネルギー範囲は MSL ミッションにおいては 100 MeV 程度まで、MAVEN ミッションにおいてもプロトンの計測エネ

ルギー範囲は 12 MeV 程度までである。これらを踏まえて、IREM ミッションの主な目的と意義を次に示す。

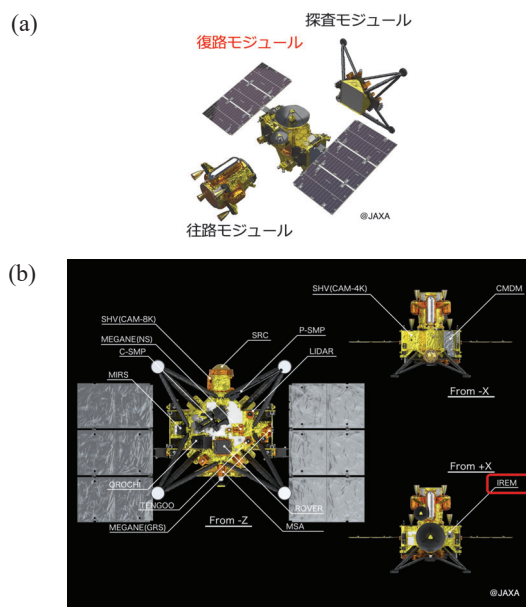


図 1. (a) MMX の構成 (b) MMX における IREM 搭載位置

① 宇宙惑星空間の放射線環境の把握

まず実測例に限られている惑星空間の放射線について常時観測、工学値変換を行うことで、リアルタイムでデータを取得することを目指す。IREM の測定ターゲットは、定常的な銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Ray: GCR) および突発的に太陽から発生する太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic particle: SEP) におけるプロトン、重粒子 ($\sim$ Si) である。また、現在 IREM

の運用期間中に、他の海外機器においても独自の放射線モニタを火星近辺で運用することが計画されている。IREM が取得したデータに加えて、これらの取得データや、先に例に挙げた MSL ミッション等のデータも併せて解析を行うことで、未解明の部分が多い惑星空間の放射線環境についての更なる理解につながると期待される。

② 太陽フレアのエネルギースペクトルの計測

太陽フレアが起ると、高エネルギーの粒子 (SEP) が放出されるが、IREM はこの際に発生する 100 MeV 以上のプロトンのスペクトル取得を目指す。図 2 に示すように、IREM の運用期間は特に地球―火星間の往路において、フレアが起きる確率が高まる太陽活動の活発な時期と重なるため、より多くのデータが得られることが期待できる。これらの太陽フレアデータは、例えばジオスペース探査衛星「あらせ」や太陽観測衛星「ひので」、水星磁気圏探査機「みお」など、宇宙空間のあらゆる場所で放射線を観測している計測機器のデータと組み合わせることで、例えば宇宙天気分野において太陽フレア予測等への応用が期待できる。また突発的に発生する太陽フレアの被ばく線量が懸念される有人宇宙探査活動においても、高エネルギー粒子の情報は必要不可欠である。

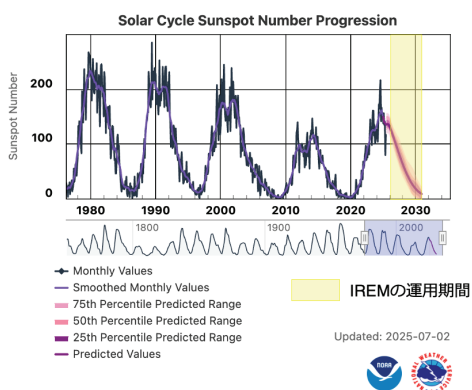


図 2. 太陽黒点数の時間変化 (NOAA SOLAR CYCLE PROGRESSION を用いて作成、一部改変: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>)

以上に述べたように、IREM の取得するデータは放射線物理、国際探査、宇宙天気など、幅広い分野への国際貢献を果たすデータとなることが期待される。

2. IREM の装置構成

IREM のフライトモデル (FM) および装置構成の概略図を図 3 に示す。装置はセンサ部とエレキ部に分かれており、全体のサイズは 255.2 (W) × 225.2 (L) × 139.4 (H) mm、質量は 6.2 kg、消費電力は 18.8 W である。IREM のセンサ部を含む面が暴露部となるよう MMX 構体の表面に埋め込まれるように設置される。

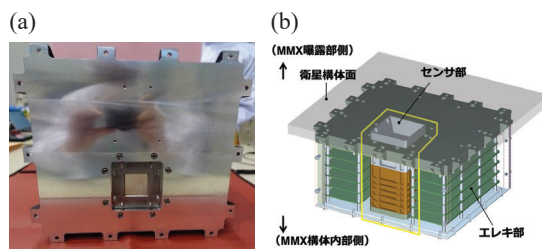


図 3. (a) IREM の FM 品および (b) IREM の鳥瞰図

IREM は、100 MeV から 300 MeV までの高エネルギー粒子の計測を限られたリソースで実現するため、セラミックのキャリアに取り付けられた 19 枚のセンサを積層した、多層型の放射線計測装置として設計された。センサ部の断面図を図 4 に示す。センサ部の視野開口部には、センサ外部からの入射粒子のトリガ誤検知を避けるため、40 MeV 程度の入射陽子が遮蔽できるタンタルコリメータ (2 mm 厚) を設置した。粒子の入射方向を知るために位置検出用の Si センサ (Position Sensitive Detector : PSD)⁴ 2 枚、15~300 MeV までの損失エネルギーを計測する SiPIN フォトダイオード (以下 SSD と表記、28 mm 角) 17 枚、減速材 (Cu) 6 枚から構成されている。積層部分の SSD は、後段の SSD と区別するため ML-SSD と表記する。これら ML-SSD1~3 の 3 つを組み合わせることによって、後述する古典的な ΔE -E 法を使用した粒子の検出が可能である。また、ML-SSD を突き抜けるような高エネルギー粒子については、SSD1~6 における入射粒子の停止位置から検出する。これらのセンサからのアナログ信号は、電荷増幅および波形整形処理を行った後、12 ビット ADC (Analog-to-Digital Converter) を用いてデジタル化される。その後、FPGA (Field Programmable Gate Array) に格納された専用ファームウェアによってパイルアップ処理/検出故障などの判定および不感時間の計測などを実施し、各検出器の波高値から、粒子の種類とエネルギーを決定する。

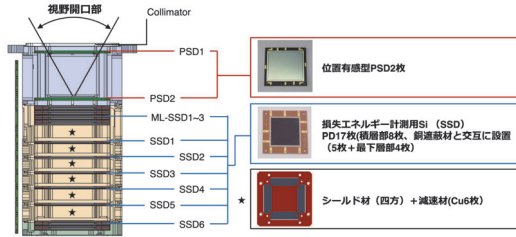


図 4. IREM センサの断面図

3. IREM の取得データ

IREM は宇宙空間に存在する放射線粒子の種類およびエネルギー値を弁別することを目的とする。IREM が取得するデータは ①カウントデータ および ②リストデータの 2 つであり、これらの測定モードは 1 秒間に発生したイベント数によって切り替わる仕様となっている。以下にそれぞれの説明を示す。

① カウントデータ

1 秒間に検出したイベント数が 33 イベント以上であった場合 (SEP 発生時など) は自動的に IREM の測定モードが SEP モードに移行し、カウントデータが生成される。カウントデータは 1 秒間に少なくとも 10,000 イベントまで測定可能であり、SEP が発生した際にも対応できる。IREM には 1 イベント毎にテーブルを検索して該当するカウンタをインクリメントする Look up table (LUT) が実装されており、粒子弁別 (~Si) および入射エネルギー判定が可能である。LUT は放射線シミュレーションツールである Geant4 を使用した計算結果から作成した。IREM に実装されている LUT のうち、古典的な $\Delta E-E$ 法を用いて作成した LUT1 および LUT2 を図 5 に示す。これは各センサでのエネルギーデポジット量 (放射線が失ったエネルギー量) を求めることで、横軸を ML-SSD2 および 3 におけるデポジット量の ADC 平均値、縦軸を ML-SSD 1 における ADC 値としてプロットしたものである。このプロットを一定範囲ごとに CH として分割し、入射された放射線がどの CH に相当するかをカウントしていくことで、粒子の種類とエネルギーが弁別できる。IREM はハイゲインおよびローゲインの二つのデータを取得することが可能であり、LUT1 はハイゲインデータを、LUT2 はローゲインデータを参照している。したがって、LUT1 は主にプロトンの検出を、LUT2 は重粒子の検出をターゲットとしている。これらの LUT については、LUT1 に関しては東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (Cyclotron and Radioisotope Center: CYRIC)、

LUT2 に関しては山形大学 (医学部 東日本重粒子センター) においてプロトンおよび ^{12}C の放射線照射試験を行うことで検証およびエネルギー較正を行った。

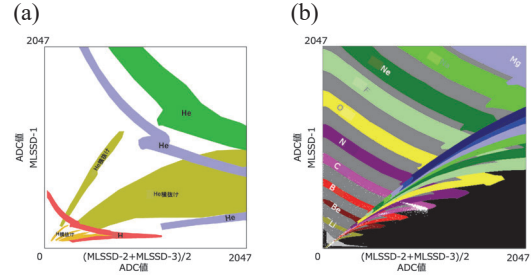


図 5. $\Delta E-E$ plot (a) LUT1 (ハイゲイン、主にプロトン計測用) (b) LUT2 (ローゲイン、主に重粒子計測用)

② リストデータ

1 秒間に検出したイベント数が 33 イベントより少ない場合は GCR モードに移行し、リストデータの生成が優先される。リストデータはトリガ入力条件を満たした場合に出力される、各センサの検出ピーク値をリスト化したデータである。このデータについて Geant4 を用いたシミュレーション結果と照らし合わせることで、イベント毎のより詳細な放射線の種類とエネルギー値を算出することが可能である。これらの値は G-factor を適用することにより、フラックス量への換算も可能となる。G-factor はセンサの有効面積に有効視野 (立体角) を乗じて求められる値であるが、IREM は 19 枚のセンサ全てにおいて G-factor を求める必要がある。現在はこれらの値を正確に算出するため、Geant4 および Sullivan らの計算式⁵を用いて詳細な検討を進めている。

4. 進捗と今後の予定

IREM は 2024 年 3 月に開発完了審査会を経て、MMX システムへのフライトモデルの引き渡しを完了した。現在は 2026 年の打上げに向け、搭載機器を組み合わせた総合システム試験や射場準備、運用データ取得に関するシステム構築を実施している。IREM チームは開発にあたり表 1 に示すサクセスクリテリアを設定している。打上げ後は、最初の SEP イベントに間に合うよう、初期チェックアウトおよび定常的な GCR データにおいて IREM の機能性能を確認する。その後も太陽活動を常時ウォッチするた

めに、運用体制の確立を含めた SEP データ取得が確実に実施できるよう準備する。

表 1. IREM 開発におけるサクセスクライテリア

ミニマム	初期 C/O を完了し、取得した PSD と SSD 全てのリストデータから、定常的な GCR や SEP の 15 MeV～300 MeV のエネルギースペクトル（物理量）に換算できる。
フル	10 MeV 以上 10 pfu 以上のフレアデータを 2 回以上取得し、物理量に換算できる。
エクストラ	100 MeV 以上で 10 pfu 以上のフレアデータを取得し、物理量に換算できる

謝辞

IREM FM の放射線照射試験を実施するにあたり、高エネルギープロトンに関しては、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (Cyclotron and Radioisotope Center: CYRIC) を、重粒子に関しては、山形大学（医学部 東日本重粒子センター）を利用させていただきました。限られたスケジュールの中で、試験に関する知見や助言等、多大なるご尽力を賜りましたこと、ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) C. Zeitlin et al. (2013), Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to the Mars Science Laboratory, SCIENCE, 340, 1080–1084.
- 2) B. Ehresmann, et al. (2016), Charge particle spectra measured during the transit to Mars with the Mars Science Laboratory Radiation Assessment Detector (MSL/RAD), Life Sci. Space Res., 10, 29-37.
- 3) C. O. Lee, et al. (2017), MAVEN observations of the solar cycle 24 space weather conditions at Mars, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 2768–2794.
- 4) T. Takashima, et al. (2004) The development of the high energy particle detector onboard the SELENE spacecraft, IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004, 1, 181-185.
- 5) J. D. Sullivan (1971), Geometric factor and directional response of single and multi-element particle telescopes, Nuclear Instruments and Methods, 95, 1, 5-11.