

MMX搭載用惑星空間放射線環境モニタ (IREM : Interplanetary Radiation Environment Monitor) の開発について

永松愛子、松本晴久、上野遥、相田真里、行松和輝、高島健（宇宙航空研究開発機構）、
寺門康男、上野努、河本泰成、坂田 祐子（明星電気株式会社）、
藤井雅之（株式会社ファミサイエンス）、廣瀬孝幸、岡本弘樹（菱栄テクニカ株式会社）

Aiko Nagamatsu, Haruhisa Matsumoto, Haruka Ueno, Mari Aida, Kazuki Yukumatsu,
Takeshi Takashima (Japan Aerospace Exploration Agency), Yasuo Terakado, Tsutomu Ueno,
Yasunari Komoto, Yuko Sakata (MEISEI ELECTRIC CO., LTD.), Masayuki Fujii (FAM Science CO., LTD.),
Takayuki Hirose, Hiroki Okamoto (Ryoei Technica Corporation)

(IREM: Interplanetary Radiation Environment Monitor)の開発について

永松愛子、松本晴久、上野遥、相田真里、行松和輝、高島健(JAXA)、寺門康男、上野努、河本泰成、坂田 祐子(明星電気株式会社)、藤井 雅之(株式会社ファミサイエンス)、廣瀬孝幸、岡本弘樹(三菱電機株式会社)

■ IREM仕様・外観:基本設計(PDR: Preliminary Design Review)フェーズ

IREMは、 $\Delta E-E$ 法及び ΔE -Range法を用いて、粒子弁別とエネルギー計測を行うエネルギー spektrometaである。太陽フレアから生じる高エネルギー陽子(SPEs: Solar Proton Events)の15~300 MeVまでのエネルギースペクトル、および300 MeV以上の陽子線についてはカウント値の取得を目標とする。2020年11月に検討した基本設計(PDR)時のIREMの構成とセンサ詳細を図1と2、表1に、観測性能および物理的仕様を表2、表3、図3示す。

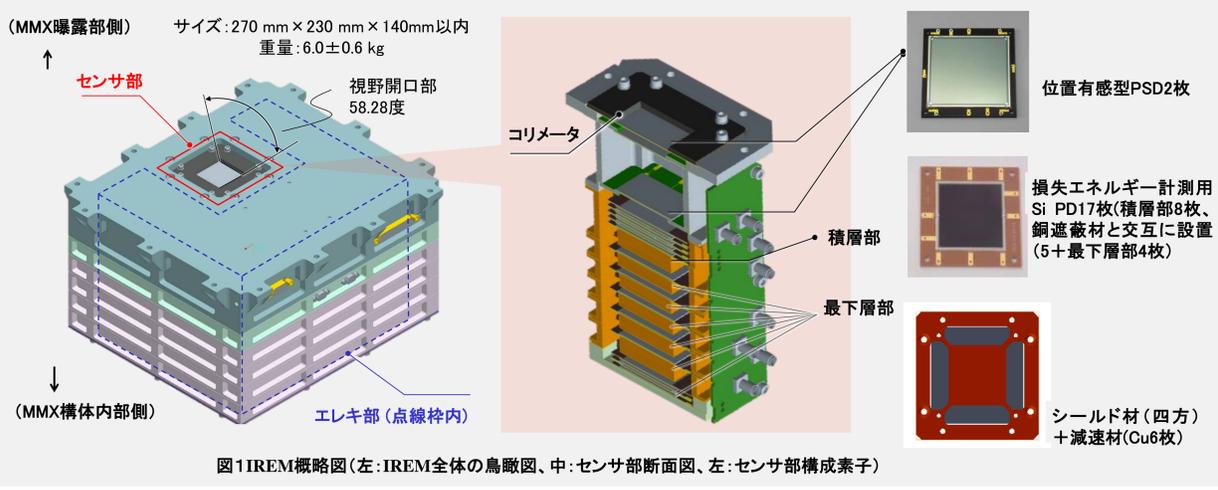


図1 IREM概略図(左:IREM全体の鳥瞰図、中:センサ部断面図、右:センサ部構成要素)

表1 IREMのセンサ部の構成要素

センサ要素 名称	製造メーカー及び型番	枚数	備考
PSD: Position Sensitive Detector	浜松トニクス製S5378	2	宇宙放射線の入射位置を決定する位置有感型センサSELENE搭載HIDで搭載実績あり。
SiPD: Si PINフォトダイオード	浜松トニクス製S14537	17	損失エネルギー計測用、積層部8枚 + 銅遮蔽材と交互に設置するセンサ5枚 + 最下層部4枚から構成される。
減速材(Cu)	-	6	

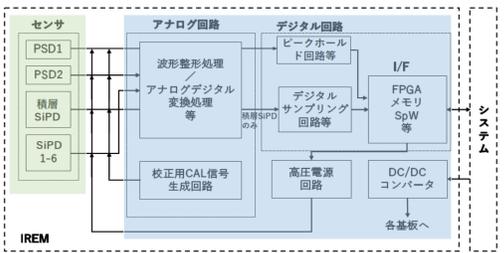


図2 IREMの構成

IREMはセンサ部とエレクトロニクス(エレキ)部から構成される。IREM全体のブロック図を示す。
①センサ部:
入射した宇宙放射線の電荷を検出して損失エネルギーを計測。位置有感型シリコンセンサ(PSD)2枚、損失エネルギーを計測するSiPDセンサ17枚、減速材(Cu)6枚から構成
②エレキ部:
電気信号を整形増幅してデジタル値に変換するアナログ回路と信号処理を行うデジタル回路、DC-DCコンバータにより二次電源を供給する電源回路、センサ部へ印加する高圧電源回路、衛星システムと信号の授受をおこなうI/F部から構成。

表2 物理的仕様に関する要求仕様

仕様項目	値	備考
サイズ	管体 270 mm x 230 mm x 140 mm以内	MMX搭載制約による
質量	- 最大 6.0±0.6 kg (公差 10%)	MMX搭載制約による
視野開口部(視野角)	- 66度(±33度)以下(四角錐)	
G-factor	- 0.4 cm ² str以上(Proton, 300 MeV以上)	SiPD6枚目の位置による
消費電力	- 20 W 以下	MMX搭載制約による
熱的特性	発熱量	20 W 以下
	発熱密度	0.06W/cm ² 以下

表3 観測性能に関する要求仕様

観測対象	観測項目	値	備考
太陽フレア粒子	計測粒子	H-Si(目標)	照射試験後に計測粒子を確認・決定
	計測エネルギー範囲	H: 15(目標)-300 MeV >300 MeV(カウントのみ)	照射試験後に計測エネルギーを確認・決定
	エネルギーチャンネル数	H: 11	
	エネルギー分解能(25°C環境下)	① ADCヒストグラムのFWHMが10%以下 ② ADCヒストグラムのFWHMが10% 以下	①地上評価での入射エネルギーが既知である荷電粒子への応答 ②軌道上での較正ハルス入力に対する応答
銀河宇宙線	計測粒子	H-Si(目標)	照射試験後に計測粒子を確認・決定
	計測エネルギー範囲	H: 15(目標)-300 MeV >300 MeV(カウントのみ)	照射試験後に計測エネルギーを確認・決定
	エネルギーチャンネル数	H: 11	
	エネルギー分解能	太陽フレア粒子と同値	
線エネルギー付与(LET)	下限: 1 keV/um以上 (H相当以上)		積層部1枚目へのエネルギー損失から評価
	上限: 600 keV/ (O相当目標)		
観測可能最大フラックス		1.3E+03/cm ² /str/sec (3.76E+3 cps, パイルアップ検知情報を使った補正後。積層部1枚目の幾何学因子より)以上	RAPIS-1に搭載されたTEDAでは、観測可能(目標) 計数範囲は 陽子2E+5 cps。

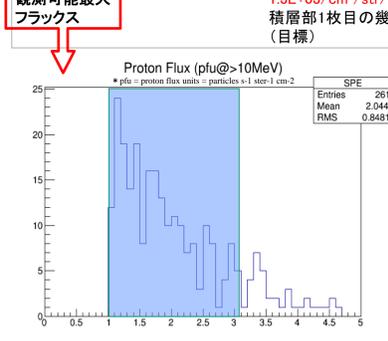


図3 IREMの測定目標とする太陽フレアのフラックスレベルと発生頻度
1976年から2017年までの10MeV以上の261個の太陽フレア実測公開データ(NOAA)を用い、10MeV以上の平均値pfu*から「1.3E+03 /cm²/str/sec以上」を観測する最大フラックスの目標値として設定。この値は、過去の全太陽フレア86.59%を網羅。すべてのフレアイベントの分布の平均は、110.67pfu。

■ 搭載位置(MMX探査機の復路モジュール)・運用計画

IREMは、火星衛星探査計画(MMX: Martian Moons eXploration)探査機の打上・初期C/O以降、最大約5年間(2024年11月以降~2029年9月)の宇宙放射線環境を計測する。IREM運用中は、太陽フレアから生じるSPEsだけではなく、定常時のバックグラウンドデータとして銀河宇宙線「GCR: Galactic Cosmic Rays」についても常時計測を行う。太陽フレア発生時と静穏時(定常成分観測)間の観測モード切替は、設定した計数率によって自動遷移する。また、衛星の姿勢情報も常時分配蓄積し、SPEsの入射方向解析に使用する。クリティカル運用(フォボスへの降下着陸上昇運用)やQSO(Quasi-satellite Orbit)近傍運用では、放電等のミッション影響を考慮し、電源を落として計測は実施しない。

IREMの搭載位置を図4、運用計画を表4、運用モードとその概要、ミッションデータ取得モードを表5、表6に示す。

表4 IREMの運用計画(ポスター発表点)

年月	運用計画
2024年9月	MMX打上1~2ヶ月後 11月以降 初期C/O (地球圏)から計測開始
2025年6月	本格的なIREM計測開始
2025年8月	火星圏到着
2028年8月	火星圏離脱
2029年6月	地球軌道~9月ごろ 地球帰還

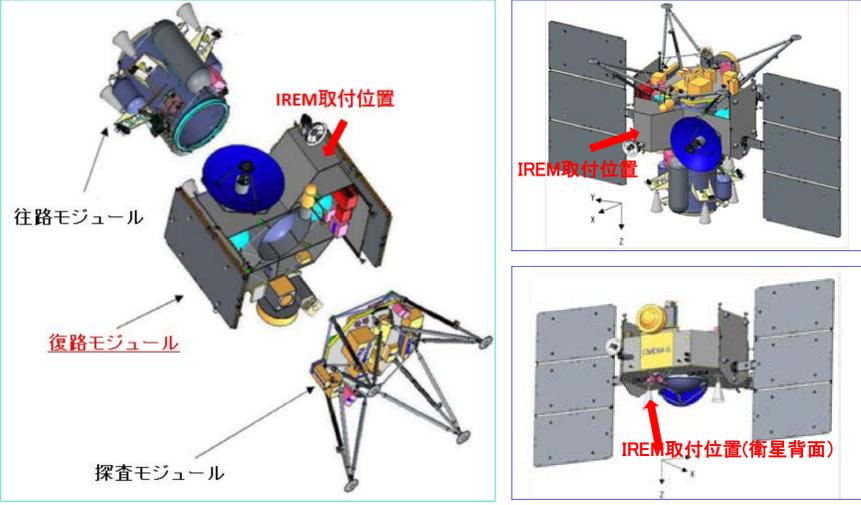


図4 IREMのMMX+Xパネル搭載位置(右:3モジュール展開図、左上:火星軌道投入時、左下:地球帰還時)

表5 IREMの軌道上運用モードと概要

運用モード	運用概要	
OFF	電源OFF	
スタンバイ	高圧電源OFF、HKデータのみ配信する。	
観測モード	常時高圧電源ONとする。地球圏から火星衛星到着、火星離脱から地球帰還までの惑星空間飛行中および惑星近傍運用時において、システムに対して影響がない限り、このモードにする。	
	定常成分観測モード	太陽フレア発生時以外での放射線環境を常時モニタする。HK、ミッションデータ(リストモード)を配信する。
	太陽フレア観測モード	太陽フレアから飛来する粒子のエネルギースペクトルを計測する。HK、ミッションデータ(カウント&リストモード)を配信する。
較正モード	軌道上にて機器のチェックのために、初期チェックアウト時、その他必要と判断された場合に行う。「スタンバイ」後、「較正」モードに遷移させて機器チェックを行う。電気回路に較正用電圧パルスを最低2レベル印加することで、計測エネルギーを較正する。	

表6 ミッションデータ取得モードの出力情報

データ取得モード	運用モード	詳細
カウントモード	太陽フレア観測モード 較正モード	オンボードで粒子弁別及びエネルギー弁別を行い、ある規定の時間で積算されたデータ(積算時刻、14各種 x 11エネルギーチャンネル、LET、計測不感時間の計測など)を取得してエネルギー弁別し、カウントの積算を行う。
リストモード	全モード	1つの放射線イベントが入射したときの、各センサのADC値等の詳細解析データを取得するモードであり、データは地上で解析される。
ダンプモード	全モード	粒子弁別、エネルギー弁別を行うため、IREM内にはテーブルデータを有しているが、確認のため地上に伝送する機能を有する。

■ 精度向上にむけた解析技術・手法の検討

センサ部の設計情報をもとに、放射線輸送シミュレーションコード(PHITSおよびGEANT4)を用いて、入射エネルギーと各センサの応答の対応づけを行い、エネルギー弁別の判定基準を作成(図5、6)。各センサの電荷を検出することで、各宇宙放射線粒子イベントの入射エネルギーを11のエネルギーチャンネルに分けて出力(エネルギー弁別)することができる。

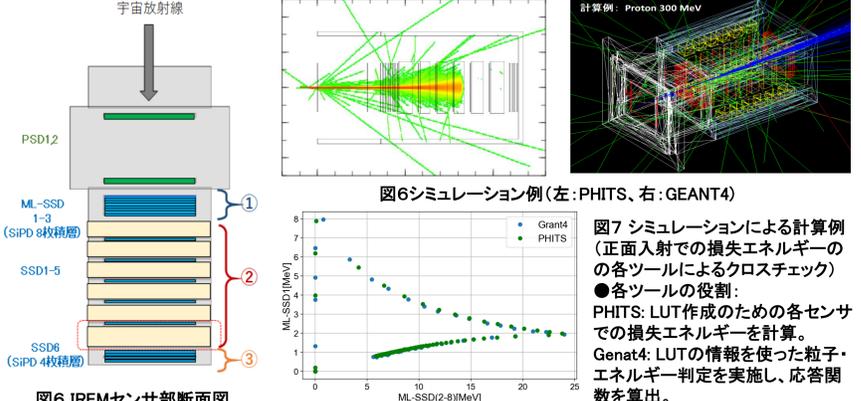
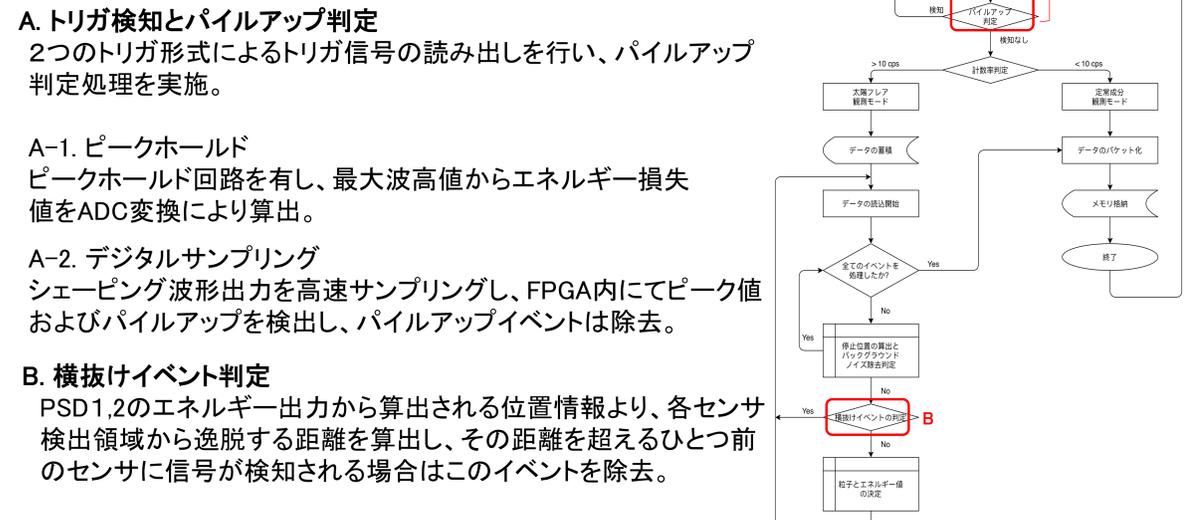


図6 IREMセンサ部断面図
①粒子識別テレスコープによる核種決定及びエネルギー弁別(チャンネル1-3)
②減速材と検出器を組合せたエネルギー弁別(チャンネル4-8)
③シリコンセンサ最下層部(SSD6)でのエネルギー付与によるエネルギー弁別(チャンネル9-11)

■ 機上データ解析フローの検討とイベント判定の工夫

機上解析のフローを図8に示す。



■ 今後の課題・開発計画

PDRにおける設計結果およびセンサ構成要素の温度特性をもとに、IREMのエンジニアリングモデル(EM)の製作を開始する。EMを用いた照射試験を実施し、荷電粒子に対する下記の特性評価を行う。
-放射線輸送シミュレーションコードで算定した荷電粒子種と11の計測エネルギーチャンネルの相関情報を持つ「エネルギーCHカウンタテーブル」の評価
-パイルアップ判定機能の動作確認
-SiPD(SSD6枚目)の個数計測試験:陽子300 MeVのカウントができることを確認