

講座 宇宙天気研究に基づく社会インフラ防護と被害予測

8. 宇宙飛翔体および有人宇宙活動への宇宙放射線影響

8. Space Radiation Effects on Space Vehicles and Human in Space

永松 愛子

NAGAMATSU Aiko

宇宙航空研究開発機構

(原稿受付: 2024年5月2日)

人工衛星を含む宇宙飛翔体の設計や運用において、宇宙放射線環境は、半導体素子の誤動作、衛星の表面帯電、部品材料の劣化などに影響を与える。特に太陽高エネルギー粒子 Solar Energetic Particles (SEP) は、宇宙飛行士の被ばく影響（水晶体や放射線急性障害等、低線量長期被ばく）や健康リスク要因となり、被ばく線量により軌道上での滞在期間は制約を受ける。様々な宇宙飛翔体への安全管理や、宇宙飛行士の安全性を確保の観点から、実環境計測に基づく宇宙天気の利用が重要となる。

Keywords:

Space radiation, Space weather, the International Space Station (ISS), Solar Energetic Particles (SEP), Galactic cosmic rays (GCR)

8.1 宇宙放射線環境

地磁気圏内の放射線影響や被ばくは、①銀河宇宙線、②地球磁場に捕捉された陽子線、③太陽活動によって生じる太陽粒子現象という3種類の一次宇宙線源に起因する。太陽系外から飛来する銀河宇宙線は、電子、陽子、および鉄核までの重荷電粒子から構成され、太陽系において数 MeV/n から 10^9 GeV/n にわたる幅広いエネルギー領域を持ち、そのピークは1 GeV/n 付近にある。

それぞれの粒子のフラックスやエネルギー・電荷分布は、11年周期の太陽活動変化、太陽フレアの発生や地球磁場など、多くの宇宙環境のパラメータに依存して時々刻々と変動する。また、一次宇宙線の強度が高度や方位角、緯度経度等により変化するため、人工衛星や国際宇宙ステーションなどの宇宙飛翔体の飛行高度や軌道傾斜角、地球回転軸のずれによって生じる、南大西洋異常域 (SAA: South Atlantic Anomaly) と呼ばれる地球磁場が地表に下垂した領域との軌道の交差による影響を受け、地球周回軌道中の放射線環境は、常に変動することになる。

1次宇宙線が人工衛星や国際宇宙ステーション (ISS) のモジュールや搭載コンポーネントを通過することによって、2次放射線や中性子が発生し、そのエネルギースペクトルも複雑な挙動を示す (図1) [1-3]。

ISSが飛行する軌道 (~400 km, 軌道傾斜角 51.6度) では、銀河宇宙線と捕捉陽子の線量当量に対する寄与は約半々となる。ISSに宇宙飛行士が6ヶ月滞在する場合、銀河宇宙線と捕捉陽子からは0.1 Sv 程度の被ばくを受けることになる。また、銀河宇宙線と捕捉陽子の寄与に加えて、巨大な太陽フレアや、コロナ質量放出のような現象が起

Aiko Nagamatsu: Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

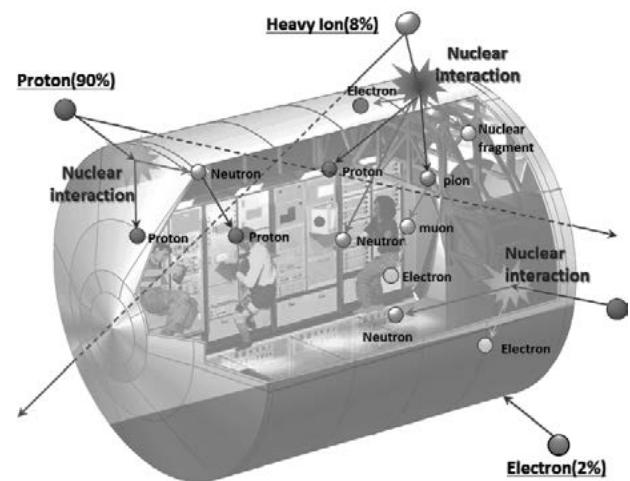


図1 ISSが飛行する低地球軌道環境での宇宙放射線の挙動[1].

きると、ISSに飛来する太陽粒子線によって最大~1 Svの被ばくを受けるといわれている。米国海洋大気庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) からの太陽-地球圏の宇宙環境情報および船内の宇宙放射線計測機器のリアルタイム実測をもとに、高線量率時には遮蔽の厚い場所であるロシアモジュール機尾またはNASA実験モジュールでの退避などの措置が数回とられたことがあるものの、1998年のISS建設開始からこれまでの運用期間中、宇宙飛行士が地球へ緊急帰還するような大規模な太陽フレアは幸いにも起こっていない。また、8.2で詳細を述べる2011年以降のJAXAロケット (H-2A, H-2B, 革新ロケット) 打上において、太陽活動の急激な変化に伴う打上の延期や中止がなされたことはない。

author's e-mail: nagamatsu.aiko@jaxa.jp

2022年11月に無人試験飛行を成功させたArtemis計画は、2024年以降に4名の宇宙飛行士による月周回ミッションを実施し、2025年度以降に月近傍有人拠点Gatewayの建設を開始する。Gatewayや月表面での探査活動において、人体や搭載される実験供試体への宇宙放射線の影響評価は重点課題として位置づけられており、宇宙放射線・宇宙天気計測に関する3つの初期プロジェクト機器(HERMES, ERSA, IDA)の搭載と実験運用がGatewayで開始される。Gatewayや月表面での探査活動においても、精度の高い被ばく線量予測が必要となる。

太陽フレア発生のタイミングは不定期であり、また発生頻度が太陽活動や時期により大きく変動する。太陽活動に伴う現象や挙動(フレアX線放射, 高エネルギー粒子線, コロナ質量放出, 太陽風のかく乱など)の27日毎の太陽自転周期における過去データの分析とモデル化により, NOAAは太陽嵐(Solar Radio Storm)と電波障害(Radio Blackouts)に関する3-days Forecast[4]を公開しているが, 宇宙飛行士の探査活動の安全を議論するための, 特に高エネルギー粒子による被ばく線量予測は構築されておらず, 宇宙天気予報の研究課題のひとつと言える。

太陽活動や放射線, さまざまな宇宙環境に関する経験モデルは, 搭載環境のSEP発生予測, 線量予測やワーストケースにおける搭載機器の挙動評価など, 搭載・搭乗安全および宇宙機の信頼性設計において必要不可欠である。

8.2 宇宙飛翔体への影響

8.2.1 宇宙放射線による電子部品への障害

打上ロケットおよび衛星プロジェクトごとに, プロジェクト成否に関わる, 衛星バスやミッション機器のSEU(Single Event Upset)発生確率の高い, または閾値が低い重要部品をもとにクリティカル部品がリスト化されており, それらのSEU発生確率に応じた, 各プロジェクト固有のロンチホールド(打上延期・中断)判断基準が設けられている。

放射線の電子部品への影響は, シングルイベント効果(SEE: Single Event Effect)とトータルドーズ(TID: Total Ionization DoseとDDD(Displacement Damage Dose Effect))の2パターンに大きく分けられる。SEEは荷電粒子の入射により引き起こされる機能障害であり, TIDは β 線, γ 線, 陽子線等により発生する電子部品の性能劣化である(図2)。

SEUとはSEEの一つで, 搭載機器の集積回路やメモリ

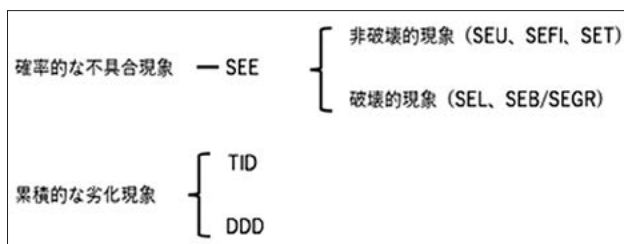


図2 宇宙放射線による電子部品への障害の分類。

素子への荷電粒子の入射により発生した電荷によりビット内情報が反転する現象(回路等の損壊ではないものの, 論理情報に誤りを生じさせる)で確率的な不具合現象である。これらの対象部品はLET[MeV·cm²/mg](Linear Energy Transfer:線エネルギー付与)に対する閾値を持っており, ミッション影響に応じた保護対策や発生確率予測に基づく部品選定が必須であり, ミッション成否に大きな影響を与える。

多くのJAXA科学ミッションでは, これまでの耐放射線強化技術に関する検討結果から, LET閾値が25 MeV·cm/mg未満である部品は, ミッションへの影響評価結果に応じた保護対策をとっている。LET閾値が25 MeV·cm/mgから上限値の部品は, SEU発生確率予測を行い, 選定をする必要がある。多くのプロジェクトでは, LETの異なる荷電粒子の照射試験による部品評価と選別を行う。ビーム照射中の半導体素子からの出力データと温度をモニタすることで, LET閾値とSEU発生確率を評価している。

宇宙用半導体部品の微細化(0.1 μ m前後)や化合物半導体(パワーデバイス等)の多様化と使用増加に伴い, 検証試験条件の設定方法やSEU対策が複雑化するなど, 新たな課題も多い。

また, 過去最悪ケースの太陽フレア(ワーストケース1989年の巨大太陽フレア等)をもとに, SEUクリティカル部品のLET閾値と飽和反転断面積によるシミュレーション解析により, SEU発生率(SEUs/device/day)を評価する。両者のデータから部品ごとのデバイス耐性値(event / (device · 時間))や保護対策状況を評価し, プロジェクトのサイエンス達成およびシステム運用として問題がないかプロジェクトごとに判断をすることになる。

保護対策としては, 対象メモリ素子のウォッチドックタイマによる異常検出やエラー検出機能や, リセットモードまでの自動復旧機能をもつこと, 論理演算による冗長化検討などがあげられる。

8.2.2 宇宙環境による打上判断

2011年よりJAXAロケット(H-2A, H-2B, 革新ロケット)および搭載衛星プロジェクトからの協力要請により, 太陽活動現象の確認と打上判断に関する確認会議への情報提供を行ってきた[5]。

プロジェクトごとにロンチホールド判断基準として, ①システム判断(搭載衛星の不具合状況, 地上管制システムの異常の有無, 地上局の不具合の有無等)と, ②宇宙環境の変動が設定されている。また, NASAやESAなどの他局衛星と同様に, プロジェクトによっては, 太陽フレア発生時の軌道上回避運用移行基準をバス機器, ミッション機器個別に設けられている。

また, 宇宙飛翔体の打上判断においても, 打上時の電源の有無や, 打上後の衛星運用の維持継続(特にテレコマ運用と電力制御のエラー回避)とサクセスクライテリアの達成を考慮し, SEU発生確率を考慮した宇宙環境の変動の確認が要求されている。バス系, ミッション系対象部品においていずれもSEU発生頻度が低く, 打上時も

機器電源がOFFでの打上の場合には、宇宙環境の変動に対するロンチホールレベルは設定されないが、変動モニタ確認のみ強化されることもある。

多くのミッションで採用されているロンチホールレベル（宇宙環境の変動）は、「100 MeV以上の太陽粒子現象の頻度が10 PFC (particles · s⁻¹ · ster⁻¹ · cm⁻²: 11年の1太陽周期あたりの平均発生頻度(回)個/cm² · 秒 · 立体角) 以上の場合」である。同じロンチホールレベルが採用されているのは、同程度の部品を使用や類似プロジェクトからの基準取り込みと考えられるが、民間射場での打上や商業宇宙利用のために、基準値の設定方針がより明確になることが望ましい。SEU発生確率を上げる主要因は重粒子である。ロンチホールレベルとして100 MeV陽子の変動をモニタすることは、陽子のLETを考慮しても直接SEUを見ることにはならないのだが、打上前の限られた特定時間の宇宙放射線環境計測の指標としては、非常に有効と言える2つの理由がある。

一つめの理由としては、SEU発生確率予測に使用する宇宙放射線環境モデルの陽子と重粒子のフラックス分布形状が相似しており、陽子の変動と重粒子の変動のトレンドが同じことである[1]。陽子のフラックスが小さくなれば、重粒子のフラックスも同様のトレンドで小さくなる。打上前の短時間の実環境計測では、重粒子の個数は十分な統計精度をためることはできず、重粒子の変動を陽子で把握することができる。これは100 MeV以下の低エネ

ルギー間の陽子フラックスの変動も同じことが言える。

実例として、1989年のワーストケースの陽子フラックスの実測例（米国海洋大気庁NOAAがNASAと共同開発・打上および、NOAAが運用するシリーズ静止気象衛星GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) から取得した公開データ[6])を示す(図3)。

二つめの理由としては、SEUクリティカル部品が太陽フレアによる瞬間的な高放射線環境に対して十分に評価が行われていない場合があり、大きな太陽フレアの変動として100 MeV以上の太陽粒子現象をモニタすることにより、打上から引き続き軌道上運用でのリスクを低減させることができる。

JAXAの宇宙飛行体打上前の判断会議（前日、当日、打上直前）ではSEU発生頻度や太陽活動現象の時間軸を考慮しつつ100 MeV陽子の挙動を含む以下の宇宙環境を確認している。

太陽フレアの地球到達（確認）時間に最も近接した現象は④（数分から数時間前）となり順に③>②>①（最も早期の事象）の時間軸となる。②~④はGOESの準リアルタイム（分単位のディレイはある）解析公開データを参照している。

- ① 太陽活動（黒点）：NASA SDO: Solar Dynamics Observatory 衛星 HMI: Helioseismic and Magnetic Imager <https> から確認する。
- ② X線レベル：NOAAのSpace Weather Scaleにより、

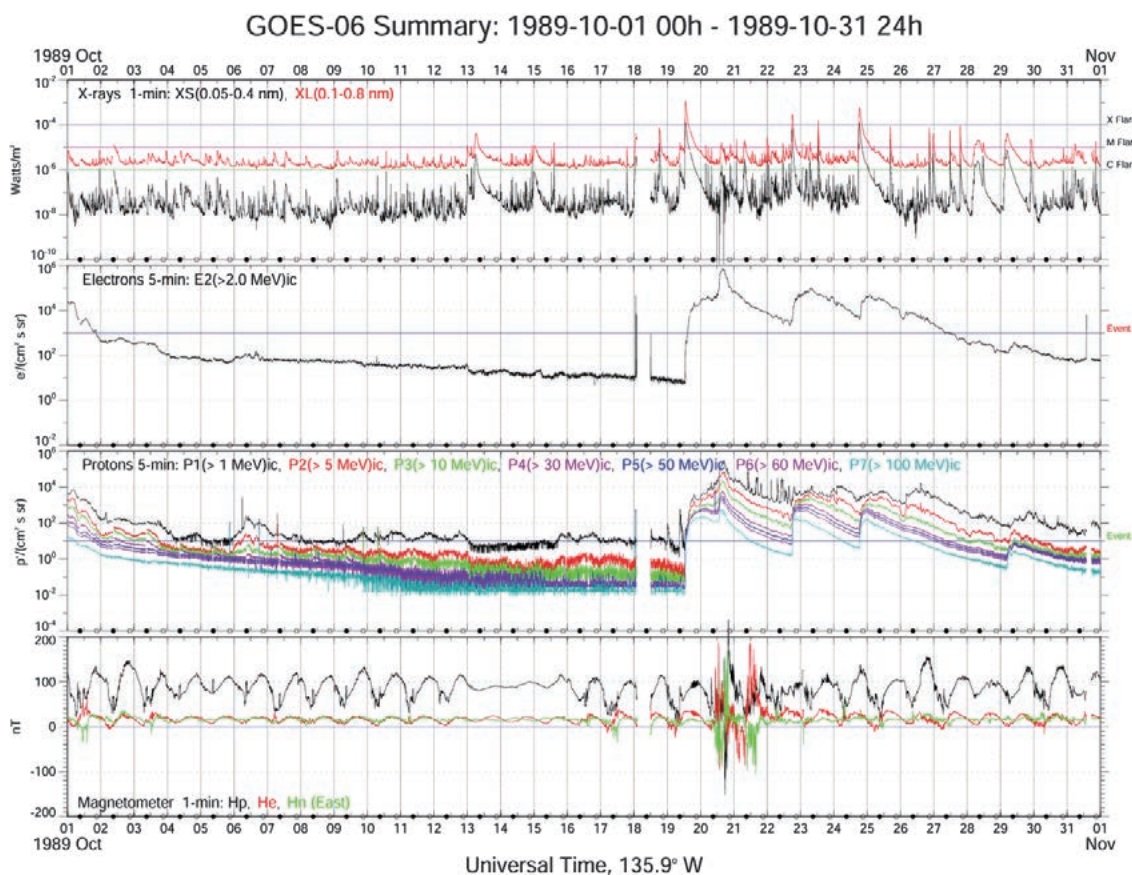


図3 1989年10月のワーストケースの陽子フラックスの変動（NOAA GOES 衛星[6]）。太陽フレア時の各エネルギー以上の陽子フラックスのトレンドやピークタイミングは相似。

NOAA GOESのX線強度 (W/m^2) によって、太陽フレアの規模の指標が分けられており、ピーク時のX線強度に基づいてA, B, C, M, Xの5つのクラス分類があり、各クラスの大きさは1桁ずつ異なる。M及びXフレアが発生すると高エネルギー粒子の発生確率が上がる(表1参照)。

- ③ 太陽陽子フラックス：②と同じく、NOAAのSpace Weather Scale[7]によるロンチホールドレベル(10MeV, 表2または100 MeV以上, 表3)が設定されており、2024年現在では、GEOS-16の100 MeV以

表1 太陽フレアの規模と頻度 (NOAA [7]による)。

| 等級 | 分類 | 物理的測定0.1-0.8 nmのX線強度のピーク値強度のピーク値 | 11年の太陽周期あたりの平均発生頻度 |
|----|----------|----------------------------------|--------------------|
| | | (W/m^2) | (回) |
| R5 | Extreme | X20 (2×10^{-3}) | 1以下 |
| R4 | Severe | X10 (10^{-3}) | 8 |
| R3 | Strong | X1 (10^{-4}) | 175 |
| R2 | Moderate | M5 (5×10^{-5}) | 350 |
| R1 | Minor | M1 (10^{-5}) | 2000 |

表2 太陽粒子現象の規模と頻度 (NOAA [7]によるAlert)。

| 等級 | 分類 | 物理的測定10MeV以上の粒子数 | 対応 (ISS宇宙飛行士の被ばく管理) | 11年の太陽周期あたりの平均発生頻度 |
|----|----------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
| | | 1 proton flux unit (pfu) @ >10MeV for Solar Radiation Storms *1,2 | | (回) |
| S5 | Extreme | 10^5 | Alert | 1以下 |
| S4 | Severe | 10^4 | | 3 |
| S3 | Strong | 10^3 | | 10 |
| S2 | Moderate | 10^2 | | 25 |
| S1 | Minor | 10 | | 50 |

*1 : pfu = proton flux unit = particles $s^{-1} ster^{-1} cm^{-2}$
 *2 : Space Weather Prediction Center (SWPC) では、GOES衛星が測定する陽子の2種類のエネルギーレベルに対して、陽子事象の警告を出している。10 MeV以上のGOES衛星プロダクトはNOAA太陽放射嵐 (S-scale) の閾値 (10, 100, 1000, 10000, 100000 pfu) と対応しており、10 pfuのフラックスレベルに達するか、それを超えると予想される場合に発令される。また、100 MeV以上の積分フラックス警告は、1 pfuフラックスレベルに達するか、それを超えることが予想される場合に発令される。

表3 太陽粒子現象の規模と頻度 (Alert/Contingency 対応)。

| 物理的測定100MeV以上の粒子数 | 対応 (宇宙飛行体のロンチホールドレベル)*3 | 対応 (ISS宇宙飛行士の被ばく管理) | |
|-----------------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|
| 1 proton flux unit (pfu) @ >100MeV *1,2 | | | |
| 10^4 | - | Contingency | 遮蔽の厚い場所へ回避 (非常事態) |
| 10^3 | | | |
| 10^2 | | | |
| 1~ 10^1 | ロンチホールドレベル*3 | | 積極的な介入を検討 |
| ~1 | - | | |

*3 : 100 MeV以上の太陽粒子現象の頻度が10 pfu以上の場合。

上の粒子数表3による計測値を参照する。

- ④ 太陽フレアの発生確率 (X線レベルのデータを用いた挙動解析) : Solar Radiation Storm 太陽嵐とRadio blackouts 電波障害の3days-Forecastがあるが、衛星機器への影響を評価し、地球到達 (確認) 時間に最も近接した現象として、Radio blackoutsの数値を参照する。

8.3 搭載試料および搭乗員への被ばく

8.3.1 国際宇宙ステーションにおける被ばく管理

国際宇宙ステーションの被ばく管理においても、太陽-地球圏の宇宙環境の監視のためのNOAA GOES衛星のデータを活用している。Flight Rules[8]に基づき、表2の10 MeVを超える陽子数が10 pfu以上の場合には警戒 (Alert) を出し、ISS内の放射線量の確認、地上側で放射線量のモニタリングを継続、ISS内放射線計測機器動作状況確認を行う。高エネルギー粒子 (Energetic SPE : Solar Particle Event, 静止軌道上で100 MeVを超える陽子数) が1 pfu以上発生した場合は、表3の対処となる[9]。

8.3.2 ISS「きぼう」での被ばく線量計測

ISS「きぼう」搭乗宇宙飛行士の被ばく管理には、2008年の「きぼう」宇宙実験棟組み立てミッションから現在まで、JAXAが開発した受動積算型線量計PADLES (Passive Dosimeter for Lifescience Experiments in Space) をもとにしたCrew PADLES (OpNom名: JaCPD) が継続して使用されている[10-12]。アジア国際協力のためのマレーシア宇宙飛行士および韓国宇宙飛行士の2名から、2024年3月にISSから米スペースX社の宇宙船ドラゴンで帰還した古川聡宇宙飛行士の個人被ばく線量計測を含めると、のべ17名の被ばく線量計測を行った。宇宙飛行士の軌道上の滞在可能日数や生涯搭乗日数は、設定した防護のための被ばくしきい値 (生涯実効線量当量制限値) に対して、実際に線量計で測定した線量結果を用いた線量算定に基づき決定される。

宇宙飛行士の滞在期間と場所 (ISSモジュール内) を考慮した宇宙放射線モデルおよびISSモジュールの線壁モデルから算出した防護量 (実効線量および等価線量等) を解析後、Crew PADLESが測定する物理線量 (吸収線量, LET分布, 線量当量) を用いて補正し、最終的な飛行後の個人被ばく線量を算定している。国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告をもとにJAXAが規程を制定した「ISS搭乗宇宙飛行士放射線被曝管理規程」2013年改訂では、初めて搭乗する年代に応じた寄与生涯がん死亡確率 (%) および性差を考慮したりリスク算定評価が放射線被ばく管理のための線量制限値として設定されている。

地磁気圏内を飛行する国際宇宙ステーションにおける被ばく線量算定に用いる宇宙放射線モデル (一次宇宙線エネルギースペクトル) は評価値が用いられており、実測値は使用されていない。また、PADLESは地上に回収してからの化学エッチングや読み出し等の解析作業が必要となる。

2025年以降に建設が開始される月近傍有人拠点Gatewayや月表面での探査活動を含むArtemis計画では、

軌道上からの回収コストや宇宙飛行士の滞在期間が限られていることから、宇宙放射線環境のその場計測やリアルタイム解析・算定技術が必須となる。また、限られたスペースや重量、電源と月面活動等でのポータビリティを考慮した、小型化・省電力化機器の開発が必要となる。

8.4 国際宇宙探査に向けた日本の取り組み

地磁気圏外における探査活動では、宇宙放射線による被ばく線量計測や生体・生物影響の低減、放射線防護技術・遮蔽設計は、極めて重要なキー技術である。

Gatewayプログラムに必要な被ばく管理および環境計測機器については、NASAを中心に規定や制約を宇宙機関間で協議し制定中であるが、必要な計測機器として①荷電粒子計測、②中性子計測、③線量計測に大別できる[13](表4)。

これらの要求を満たす宇宙放射線計測システムとして、8.4.1および8.4.2で紹介する3つの機器の研究開発に着手している。探査活動を支援するための定常的な宇宙放射線環境の把握と、リアルタイムでの被ばく線量評価システムの確立をめざし、目的や測定対象の異なる3種類の放射線検出器

- (1) 超小型ポータブル線量計D-Space/PADLES (図4)
- (2) LET・線量計測用位置有感生体等価比例係数箱PS-TEPC (Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber)
- (3) 月探査搭載用ダイナミックレンジエネルギースペクトル検出器Lunar-RICHeS (Ring Image Cherenkov Spectrometer)

を組み合わせ、任意地点の線量評価・予測を行う協調システム構築を検討している。

8.4.1 超小型ポータブル線量計D-Space/PADLES

D-Spaceは、産業技術総合研究所(AIST)が開発、株式会社千代田テクノルが製品化した個人向けおよび環境計測用線量計「D-シャトル」(23g, 68(L)×32(W)×14(T)mm)を、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と産業技術総合研究所の共同研究により、宇宙放射線(太陽粒子線および銀河宇宙線を構成する荷電粒子)計測用の「超小型ポータブルアラームメータ」として改修・開発した超小型能動型宇宙放射線線量計である。

2022年11月16日に、大型ロケットNASA SLS (Space

表4 国際宇宙探査における宇宙放射線計測[13].

| 項目 | 要求 |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Charged Particles Area Monitoring | 宇宙飛行士滞在期間中の、時間および粒子エネルギー・電荷の関数となる $Z=14$ までの $50\sim 2\text{ GeV/n}$ までの粒子のエネルギー測定 環境計測を行い、 0.01 mGy/min to 10 mGy/min を超えた場合には、アラートによる警告機能を持つこと |
| Neutrons Flux Monitoring | 宇宙飛行士滞在期間中の、時間および中性子エネルギーの関数となる 0.1 to 15 MeV のフラックス測定 |
| Individual Absorbed Dose Monitoring | 個々の飛行士の時間関数となるLET (Linear Energy Transfer) 0.1 to $150\text{ keV/micrometer in water}$ を測定 |

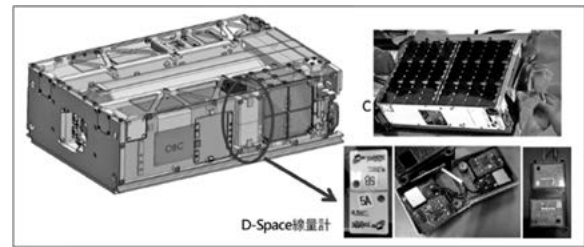


図4 超小型ポータブル線量計D-Space/PADLES.
(上) OMOTENASHI 搭載 D-Space
(左下) Gateway IDA プロジェクト搭載用ラック駆動D-Space
(右下) Gateway 搭載用バッテリー駆動D-Space

Launch System) 1号機「Artemis I」(有人月面探査計画「Artemis」最初のミッションにおける、SLS新型ロケットと有人宇宙船「オリオン」の無人飛行試験機会)によって打ち上げられた日本の超小型月探査機OMOTENASHI (Outstanding MOon exploration TEchnologies demonstrated by NAno Semi-Hard Impactor) 側面に搭載され、日本として初めてとなる地磁気圏外の放射線環境計測に成功した[14, 15].

D-SpaceはISSに搭載実績を持つPADLESとともに、ESA/NASA/JAXAでの国際協力により、2025年以降に打上げ予定のGatewayHALO船内の宇宙放射線環境評価のための国際共同ミッション(IDA: Internal Dosimeter Array)計画への搭載が決定している。月周回軌道の宇宙放射線環境を評価するために必要な物理量計測、宇宙飛行士の被ばく管理等に必要な被ばく線量計測評価を行う計画である。

8.4.2 月面フィジビリティスタディによる月面放射線計測の検討

2021年度月面での科学研究・技術実証ミッションにかかるフィジビリティスタディテーマとして採択された「月面利用の拡大に向けた超小型・高機能な宇宙放射線環境の計測技術とリアルタイム被ばく線量評価システムの構築」(代表研究者:名古屋大学 三好由純教授)において、被ばくに関する計測技術(PS-TEPC, Lunar-RICHeS)および帯電(LEXUS)に関する要素技術の検討が開始されている[16].

被ばくに関する2種類の装置は、8.4.1のD-Spaceとあわせて表4に対応する装置であり、月探査活動への実利用を視野にいれ、ASIC(集積回路)化による小型化・省電力化の技術開発に着手している。

LET・線量計測用位置有感生体等価比例係数箱PS-TEPCは、入射粒子がセンサ部の検出体積中の生体組織等価ガスに与えたエネルギーと飛跡を同時に測定できる生

能動型線量計である。入射粒子の電荷量と2次元位置を取得する電荷収集デバイスである μ -PICにより、タイムプロジェクトンチェンバーとして動作する。入射粒子毎の3次元の飛跡情報から放射線の飛跡長を計測し、LET分布、吸収線量、線量当量を導出することができる。

PS-TEPCは2016年に国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」に設置され、約1年半にわたる動作実証試験を実施した実績を持っている[17, 18]。

Lunar-RICHeSは、DSSD (Double-sided Si Strip Detector) を用いた入射粒子の位置検出部、半導体検出器を積層させた Δ E-E法による低エネルギー計測部、リングイメージングチェレンコフ検出器による高エネルギー計測部を組み合わせたエネルギースペクトロメータである。船外や月面拠点定点に設置し、被ばく線量に寄与する一次宇宙放射線(太陽高エネルギー粒子(SEP)、銀河宇宙線(GCR))の、15 MeV \sim 2 GeVの荷電粒子のダイナミックレンジのエネルギースペクトル測定ができる超小型チェレンコフ検出器である[19]。宇宙飛行士の防護量(実効線量および等価線量等)はエネルギースペクトルの関数として算定されるため、精度の高い計測が求められる。また、深宇宙で2 GeVまでのダイナミックレンジでのエネルギースペクトル測定を、小型・軽量化検出器1台のみで実施することや、リングイメージングによるチェレンコフ検出の軌道上実証をすること自体が世界初の試みとなり、太陽物理現象の解明や宇宙天気予報分野へのデータ利用が期待される。

これらの装置開発は、月面・月周回の宇宙放射線の様子を定常的に把握し、さらに地磁気圏外の線量予測を行っていくための必須の技術であり、将来の民間宇宙事業や宇宙旅行事業においても安全信頼性の担保において必要となるツールである。

8.5 まとめ

宇宙飛翔体および有人宇宙活動への宇宙放射線影響として、ミッション影響の高いSEU発生確率に着目した障害と宇宙環境による打上判断についてまとめた。また、搭載試料および搭乗員への被ばくとして、太陽-地球圏の宇宙環境の監視と被ばく線量計測への取り組みについて紹介した。国際宇宙探査においては、宇宙環境の変動を直接受けることになり、地磁気圏内よりも重篤な放射線影響を受けることになる。宇宙飛翔体への安全管理や宇宙飛行士・宇宙旅行者の安全性を確保の観点から、打上時・運用時の判断しやすい基準やルールとの制定と、実環境計測と連動した宇宙天気の利用、高エネルギー粒子SEPの発生予測および線量予測技術が重要となる。

謝辞

本原稿を執筆するにあたり、8.2 宇宙飛翔体への影響では、JAXA/ISAS 専門・基盤技術グループの生田歩夢研究開発員にご協力いただきました。8.4 国際宇宙探査に向けた日本の取り組みでは、産業技術総合研究所(D-Space)、高エネルギー加速器研究機構(PS-TEPC)、理化学研究所

(Lunar-RICHeS)との共同研究により研究開発を進めています。原子力研究開発機構との共同研究において、8.4の装置開発に伴いPHITSシミュレーションによる設計・解析にご協力をいただいております。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 大西武雄(監修)永松愛子:放射線医学の事典1.15宇宙放射線と遮へい防護 p52(朝倉書店, 2019) ISBN: 978-4-254-30117-5 C3047.
- [2] E.R. Benton and E.V. Benton, Nucl. Instrum. Meth. B **184**, 255 (2001).
- [3] 俵 裕子 他:放射線 **27**, 29 (2001).
- [4] SPACE WEATHER PREDICTION CENTER NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION: <https://www.swpc.noaa.gov/forecasts>
- [5] 永松愛子:JAXA ロケット打上に伴う宇宙環境情報の確認手順について(JAXA 技術資料 GRS-2023005).
- [6] NOAA GOES データ <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html>
- [7] NOAA Space Weather Scale <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- [8] ISS Generic Operational Flight Rules, Volume B, Section B14, Operations Directorate JSC 12820.
- [9] 佐藤 勝:2014) 宇宙飛行士の放射線被ばく管理と宇宙天気予報, 第9回宇宙天気予報ユーザーズフォーラム, https://sw-forum.nict.go.jp/pdf/forum_4_140320.pdf
- [10] A. Nagamatsu *et al.*, Radiat. Meas. **59**, 84 (2013).
- [11] A. Nagamatsu *et al.*, Phys. Procedia **80**, 25 (2015).
- [12] ISS 宇宙放射線環境データベース(PADLES データベース) <https://humans-in-space.jaxa.jp/spacerad/index.html>
- [13] GP 10016, Baseline "GATEWAY PROGRAM SUBSYSTEM SPECIFICATION FOR CREW HEALTH AND PERFORMANCE (CHP).
- [14] 永松愛子:OMOTENASHI 探査機より届いた「D-Space」からの深宇宙線量情報, FBNews No.567(2024.3.1発行).
- [15] 文部科学省宇宙開発利用部会(2023年6月27日)資料, SLS 搭載超小型探査機プロジェクトの状況, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/059/kaisai/1423010_00027.htm
- [16] Y. MIHOSHI *et al.*, High-quality and compact space radiation instruments for the development of lunar surface, ESWW 2023 - 19th European Space Weather Week (2023).
- [17] Y. Kishimoto *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 016003 (2020).
- [18] JAXA きぼう利用テーマHP「位置有感生体等価比例計数箱による宇宙ステーション内での線量当量計測技術の確立」 <https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/science/70618.html>
- [19] 2023.15-6 第23回宇宙科学シンポジウム(SSS23 P-114) https://researchmap.jp/multidatabases/multidatabase_contents/download/239942/531ed8a04294fb64987c2ecd75264d4a/28895?col_no=2&frame_id=754519