



展 TENBO 望

有人惑星探査と宇宙放射線 —宇宙放射線研究が拓く次世代有人 ミッションに向けて—



永松 愛子

Nagamatsu Aiko

((独)宇宙航空研究開発機構 有人宇宙
ミッション本部 有人宇宙技術センター)

1 宇宙放射線とは

2008年6月に国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の日本の実験モジュール“きぼう”が打ち上げられ、その船内/船外の宇宙ならではの環境を使った多くの実験や技術開発が現在行われている。ISS 船内の最大の特徴は“微小重力環境”と“宇宙放射線環境”である。このうち本稿では“宇宙放射線環境”を中心に述べることにする。

ISSが飛行する地球低軌道 Low Earth Orbit (LEO): 高度約 300~500 km での最も重要な宇宙放射線被ばくの原因は、その起源により、太陽系外から入り込む銀河宇宙線 (GCR: galactic cosmic ray), 地球磁場に捕捉された陽子線, 太陽活動によって生じる太陽粒子線の3種類の1次宇宙線源がある (図1)。電子、陽子及び鉄核までの重荷電粒子から構成される宇宙放射線は、幅広いエネルギー領域を持ち、その上限は 10 GeV/n に及ぶ。これらの1次宇宙線がISS船壁や内部の搭載ラックや構造物を通過することによって発生する2次放射線や中性子を発生

させ、船内の宇宙飛行士や搭載試料はこれらの被ばく影響も受けることになる (表1参照)。

宇宙放射線環境は、太陽周期や11年周期の太陽活動の変化、太陽フレアの発生、飛行高度、測定場所の遮蔽条件によって複雑に変化し、これらに依存して被ばく線量も大きく変化する。この宇宙放射線による被ばく線量は、宇宙飛行士の軌道上での滞在期間を制約する要因となる。宇宙飛行士のフライト当たりの滞在日数や生涯搭乗日数は、宇宙放射線による被ばくで生涯にわたるがん死亡率の増加が3%程度以下になるよう性別・初飛行時の年齢幅によってリスク算定評価により定められている¹⁾。実測した被ばく線量に基づいて算定する実効線量当量及び組織線量当量で管理されるため、精度の高い被ばく線量測定データの蓄積が求められている。

民間人のスペースシップの搭乗や宇宙ホテルでの宿泊等、人類の宇宙滞在のニーズもますます高まっている。将来の月・火星探査に伴う宇宙長期滞在に向けても、宇宙放射線計測は宇宙・航空安全技術の基盤となる技術である。

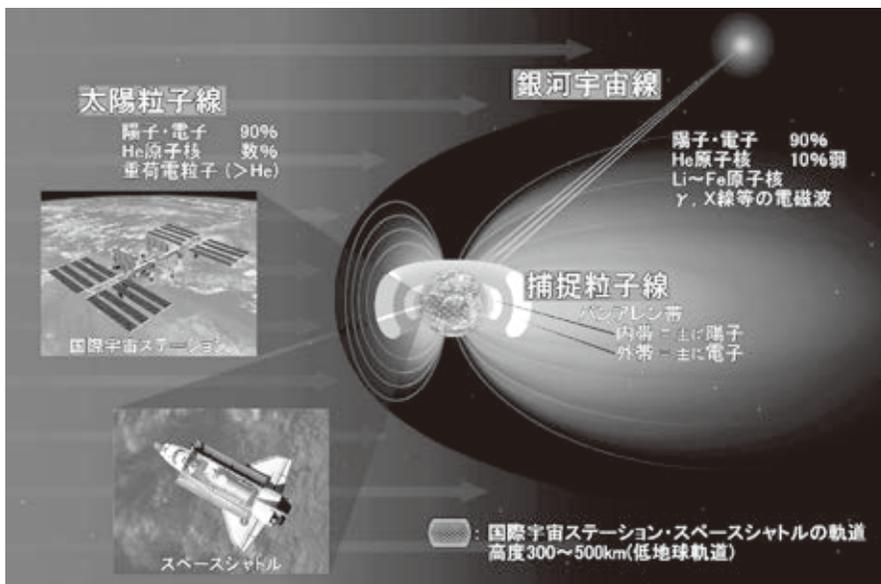


図1 低地球軌道の宇宙放射線環境

表1 宇宙と地上の自然放射線環境（外部被ばく）の比較

	地上	宇宙環境
線源	天然放射性同位元素 2次宇宙線	1次宇宙線 (太陽粒子線, 銀河宇宙線, 地磁気捕捉陽子線) 2次宇宙線 (陽子線, 重荷電粒子線, 中性子線など)
粒子	γ線, ミュオン, 中性子線など (γ線のエネルギーは MeV 程度)	・電子, 陽子から鉄核までの重荷電粒子, 中性子 ・エネルギー範囲の上限は ~10 GeV/n を超える ・被ばく線量に寄与する LET 分布は, 0.2~数百 keV/μm の広範囲にわたる
線質係数	γ線: 1 中性子線: 5~20	1~30
線量率	地上のバックグラウンド線量 1.5 μGy/day	ISS “きぼう” モジュール内 (第23~24期太陽活動期) の JAXA Area PADLES 船内測定結果 220~513 μGy/day

2 ISS “きぼう” の宇宙放射線計測

2014年現在, ISS “きぼう” 船内の宇宙放射線計測には, JAXA が開発した受動積算型線量計 PADLES (Passive Dosimeter for Lifescience Experiments in Space: パドレス, 図2) が用いられる。PADLES は, CR-39 プラスチック飛跡検出器 (ハーツラス TD-1, フクビ化学工業社

製) と熱蛍光線量計 (Thermoluminescent dosimeter: TLD MSO-S, (株)トーレック) から取得したデータを組み合わせ, 被ばく線量に寄与する全線エネルギー付与 (LET: linear energy transfer) 領域の宇宙放射線の吸収線量, 線量当量, LET 分布を測定する。搭載前に個別識別管理された TLD のアニーリング及びロット管理された CR-39 検出器を切り出してナンバ

リングし、実験目的に応じた線量計ケースに封入する。

帰還後、線量計の解析は JAXA つくば宇宙

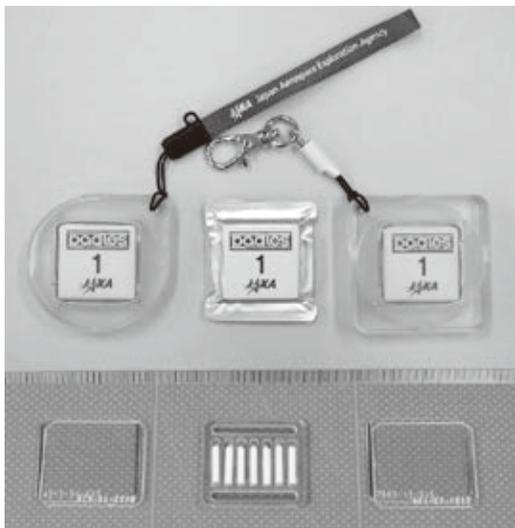


図2 (上) PADLES 線量計, 左から Crew PADLES, Bio PADLES, Area PADLES 用線量計。(下) PADLES 線量計に封入されている素子, 固体飛跡検出器 CR-39 と熱蛍光線量計 TLD

センター宇宙実験棟で実施される。線量計の帰還後、最短で約2週間で線量解析結果を提供が可能である。PADLESの解析システムは、JAXAが早稲田大学と日本大学を中心に考案された測定手法²⁾を宇宙用に改良し、その後、高エネルギー加速器研究機構と放射線医学総合研究所との協力を得て、測定・解析のシステム化・自動化を行った純日本製の解析技術である。このPADLESシステムを用いて、ISS“きぼう”船内では様々な放射線計測実験が継続して実施されている(図3)。

“きぼう”船内の定点宇宙放射線環境モニタリング (Area PADLES), ライフサイエンス実験に使用される生物試料の被ばく影響評価のための線量計測 (Bio PADLES), 長期滞在を行う日本人宇宙飛行士の個人被ばく線量計測 (Crew PADLES), ISS パートナー機関と実施する国際共同放射線物理計測実験 Dosimetric PADLES 等を実施している²⁻⁶⁾。

半年ごとに線量計を交換して継続的なデータを取得する Area PADLES 実験 (図4) では、太陽活動 24 期の極大期・極小期を含む 12 回の放

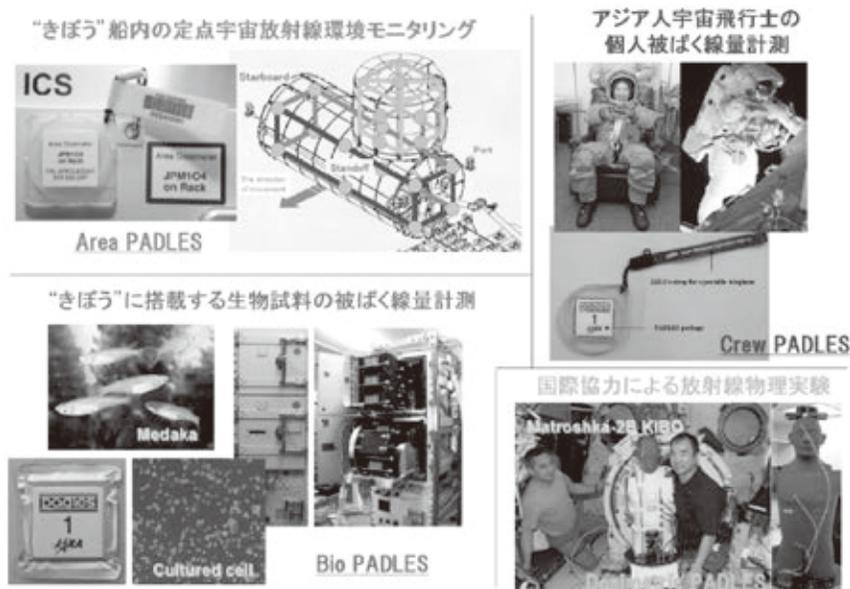


図3 ISS “きぼう” 船内の宇宙放射線計測実験

放射線計測データを取得した。2011年のスペースシャトル退役後は、ロシア宇宙庁との協力によりソユーズ宇宙船を使った搭載及び回収を行い、LEOの宇宙放射線環境の継続したデータ取得を行っている。

Area PADLES 線量計は、遮蔽の比較的薄い場所を選んで設置している。船内に搭載した人体や球体ファントム実験⁵⁾との比較により、体内深部の線量の評価や宇宙飛行士の被ばく管理手法の妥当性評価、将来的な管理方法の改良提案などに役立てられている。

ISS “きぼう” 船内の “微小重力” と “宇宙放射線” による複合的な環境影響を調べるために、培養細胞、昆虫、線虫、植物、マウス精子等が搭載されライフサイエンス実験が行われて

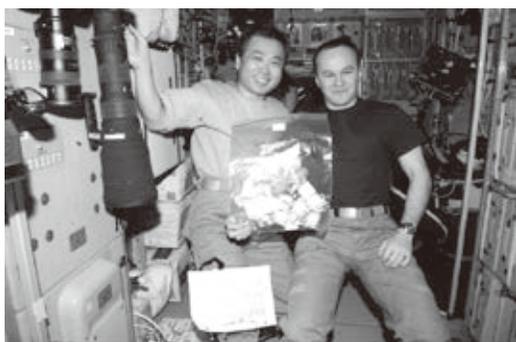


図4 測定後の Area PADLES 線量計を Oleg Kotov ロシア宇宙飛行士に手渡す若田光一宇宙飛行士は日本人初の船長も務めた (2014年3月10日)

いる。これまで20テーマのフライト実験試料に Bio PADLES 線量計が供され、線量データを提供している。軌道上での p53 がん抑制遺伝子群の挙動の把握⁷⁾ や種特異な遺伝子群の抑制⁸⁾ などの生物影響の物理的指標として被ばく線量が重要となる。

また、2014年7月現在、マレーシア、韓国の宇宙飛行士を含む、スペースシャトル短期ミッション・ISS 長期滞在ミッションを実施したのべ10名のアジア人宇宙飛行士の個人被ばく線量計測を行い個人線量を提供している。

3 ISSの成果から有人惑星探査に向けて

ISS “きぼう” で取得したデータを基に地上照射実験の体系を構築し、“きぼう” ライフサイエンス実験にも用いられている “メダカ” を使った低線量・長期被ばく影響評価のための地上実験も実施している。

このほか、これまで取得したISSでの宇宙放射線計測データは、宇宙飛行士の被ばく管理やライフサイエンス実験の研究チームへのデータ提供だけではなく、これから “きぼう” で実験を開始する企業や大学・研究機関、H2A に搭載されたジギーバッグ衛星 (ISS と同程度の軌道で飛行) チーム、大学や高校への宇宙放射線に対する教育・普及資料や芸術活動 (PADLES が取得した宇宙放射線の飛跡写真) など幅広い

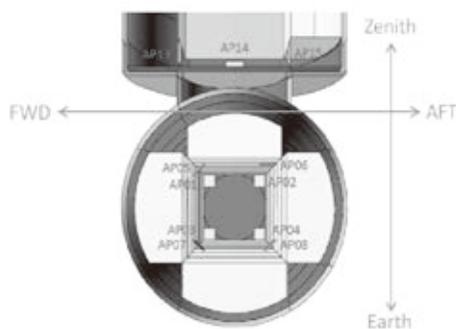
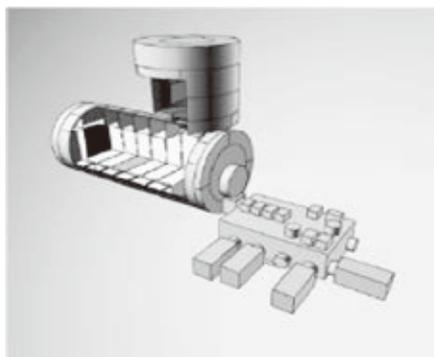


図5 3D バーチャル遮蔽モデル “きぼう”

分野に利用いただいている。

国際宇宙ステーション建設以前の日本では、スペースシャトル等を使った10日前後の短期的な宇宙実験の機会に限られていた。ISSにより初めて長期・継続的なLEOでのデータ取得が可能となり、将来の有人宇宙探査につながるデータ取得につながり始めた。

ISS“きぼう”の打ち上げ以来、船内の様々な遮蔽環境の線量計測実験を実施し、被ばく線量の基礎データを蓄積した。

これらのデータをベンチマークデータとして、(独)日本原子力研究開発機構が開発する粒子・重イオン汎用モンテカルロコードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System^{11,12})を用いた“宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデル構築”に着手している。

“きぼう”船内の構造図面に基づく解析遮蔽厚(船壁厚及びデブリバンパ厚、要素構成部品及び23個の搭載ラックの重量・サイズ等の詳細情報を含む)を“きぼう”組み立てフェーズごとに再現した3Dバーチャル遮蔽モデル“きぼう”をPHITSに導入し、2章に記述した“きぼう”船内の定点宇宙放射線環境計測実験Area PADLESや“きぼう”船内に設置した人体や球体ファントム実験の深部線量とシミュレーション結果との比較による詳細解析を進めている(図5)。太陽活動極小期から極大期にかけて、様々な遮蔽環境におけるPADLES線量計による実測結果との比較解析により、PHITSに組み込むコードやモデル改良ための課題を抽出し、宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデルの高精度化を図っている¹³。

更なる高精度化のため、2014年度から、“きぼう”船外曝露部での継続的な線量計測実験(Free-Space PADLES)を開始する(図6)。“きぼう”は与圧船壁及び搭載物があるため、船内ではその影響を加味した遮蔽材料の減衰実験しか行えない。本実験では、ISSの中で唯一“きぼう”だけがもつエアロックから曝露部専用Free-Space PADLES線量計を船外に出し、ロボ

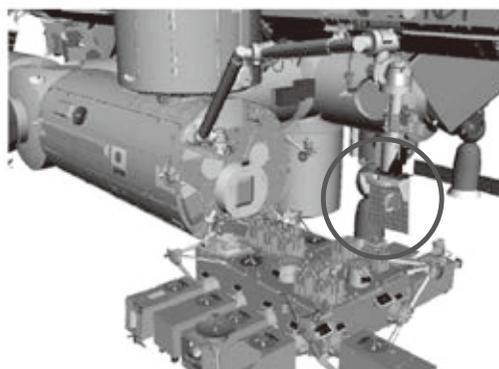


図6 ISS“きぼう”曝露部
丸枠はFree-Space PADLES線量計を取り付ける
ロボットアーム先端を示す

ットアームの組み合わせによりロボットアーム先端に設置して線量計測を行う。

様々な遮蔽厚のケースを用いて、“きぼう”船内では取得不可能な(“きぼう”船壁よりも薄い)遮蔽厚に対する線量減衰データを取得する。同時に計測する“きぼう”船内の線量との比較により、“きぼう”船壁による遮蔽効果も評価する。これらのデータは、宇宙放射線の遮蔽材料の評価・新材料の創出に活用する予定である。

4 まとめ

2020年以降、月・火星における有人滞在ミッションの検討が開始されている。地磁気圏外への有人活動において、宇宙放射線の人体・生物への影響は更に大きくなり、有人滞在ミッションの成否を左右する。月・火星への周回軌道や惑星表面の宇宙放射線場は、国際宇宙ステーションやスペースシャトルが飛行するLEOの宇宙放射線環境と大きく異なる。有人惑星探査ミッションに向け、無人探査衛星を使った月・火星の低軌道の放射線環境計測も始まった¹⁴。様々な周回軌道や惑星表面での船外活動における、宇宙放射線による人体深部線量のリスク評価は、ISSの滞在日数を制約するのと同様に、

有人惑星探査ミッションそのものを定義することになる。

ISS “きぼう” で取得する精度の高い、継続的な線量計測結果を用いた “宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデル” のゴールは、有人惑星探査のための日本独自の有人輸送船や居住モジュールの適切な遮蔽厚や遮蔽材料の検討である。

ISS “きぼう” での測定を継続することで、地磁気圏外での宇宙飛行士へリスク評価と宇宙放射線からの遮蔽・防護技術の獲得に寄与していきたい。

【謝辞】

PADLES 線量計構築に当たり指導いただいた早稲田大学名誉教授 道家忠義先生（故人）に、記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) McKenna-Lawlor, S.M.P., *Acta Astronautica*, (2014) in press.
- 2) Doke, T., *et al.*, *Radiat. Meas.*, **24**, 75–82 (1995)
- 3) 俵裕子, 永松愛子, *放射線*, **5**(3), 217–241 (2008)
- 4) Nagamatsu, A., *et al.*, Proc. 22nd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Tsukuba, 2007, KEK Proceedings 2008–14, p.167 (2008)
- 5) Reitz, G., *et al.*, *Radiat. Res.*, **171**, 225–235 (2009)
- 6) 永松愛子, 他, マイクロ重力応用学会, **26**(4), 296–302 (2009)
- 7) Nagamatsu, A., *et al.*, *Rad. Meas.*, **59**, 84–93 (2013)
- 8) Ohnishi, T., *et al.*, *BBRC.*, **390**(3), 485–488 (2009)
- 9) Kotani, E., *et al.*, *J. Radiat. Res.*, **43**, Suppl., S193–S198 (2002)
- 10) JAXA 公開ホームページ, 宇宙環境利用データベース 「ISS 宇宙放射線環境計測データベース (PADLES データベース)」, <https://ssl.tksc.jaxa.jp/spacerad/NI005.html>
- 11) Iwase, H., *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1142, (2001)
- 12) Sato, T., *et al.*, *Radiat. Meas.*, **41**, 1142–1146 (2006)
- 13) Nagamatsu, A., *et al.*, COSPAR2014, Moscow (2014)
- 14) Zeitlin, C., *et al.*, *Science*, **340**(6136), 1080–1084 (2013)