

国際宇宙ステーション「きぼう」における 宇宙放射線の被ばく線量計測と次世代有人宇宙開発への 応用について

Space Radiation Dosimetry onboard the International Space Station 'Kibo' and the Application of Future Human Space Missions beyond LEO

宇宙航空研究開発機構 有人宇宙環境利用ミッション本部 宇宙環境利用センター
(併任) 宇宙飛行士運用技術部 宇宙医学生物学研究室
(併任) 宇宙科学研究所 月惑星探査プログラムグループ
永松 愛子 (E-mai : nagamatsu.aiko@jaxa.jp)

2008年6月に国際宇宙ステーション日本の実験モジュール「きぼう」が打ち上げられ、その与圧船内ではライフサイエンス/物質材料分野/宇宙医学分野実験・教育文化利用・有償利用が実施されている。宇宙医学の重点課題領域である「宇宙放射線による被ばく」に対する影響研究の一環として、「きぼう」船内で実施されている多様な分野の環境計測データとして、JAXA宇宙環境利用センターでは、受動積算型線量計PADLESを使った宇宙放射線計測を実施している。本報告では、「きぼう」船内の宇宙放射線計測実験概要と次世代有人開発のための地磁気圏外での宇宙放射線計測の取組み、「きぼう」実環境計測データとPHITSコードに基づく「宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデル」の研究開発について紹介する。

1. はじめに

高度約300~500kmを飛行する国際宇宙ステーション (ISS) の船内環境の大きな特徴として、「微小重力環境」と「宇宙放射線による被ばく」の影響を受けることが挙げられる。

日本人宇宙飛行士のISSでの長期滞在に付随する宇宙医学の重点課題領域のひとつとして、「宇宙放射線に対する被ばく管理」があげられる。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 有人宇宙環境利用ミッション本部は、宇宙放射線に対する研究・開発として、以下3つの課題に取り組んでいる (図1)。

①宇宙放射線計測：

A) JAXA宇宙環境利用センターが開発した受動積算型線量計測PADLES (パドレス) :



図1 ISS宇宙放射線に対する被ばく影響研究の骨格とJAXA 有人本部の実施体制 (2012.03現在)。3つの課題のオーバーラップ成果から、次世代有人活動に必須となる宇宙放射線に対する遮蔽・防護の知見が得られる。



図2 線量計を組み込んだファントムと野口宇宙飛行士 (2010年5月)

Passive Dosimeter for Lifescience

Experiments in Space)を用いたISS宇宙放射線環境計測。きぼう船内の定点宇宙放射線環境計測 (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¹⁻⁵⁾。Dosimetric PADLESの一環として、宇宙空間における人体内の宇宙放射線被ばく影響の評価を目的とするマトリョーシカ実験を「きぼう」船内で実施した。人骨、模擬臓器を持つ平均的な成人男性の体格を模擬した人体ファントムの体内・体表面に各機関の受動積算型線量計が設置され、2010年5月から2011年3月までの321日間の被ばく線量を計測した (図2)。

これらの実験概要と計測データは、JAXA公開ホームページ宇宙環境利用データベースの「ISS宇宙放射線環境データベース⁶⁾」に公開され、将来の軌道上生物実験の計画立案、宇宙飛行士の被ばく管理や宇宙放射線シミュレーションモデルの改良に利用される予定である。

B) 「きぼう」利用2期テーマとして採択された能動型線量計の開発テーマ『位置有感生体組織等価物質比例係数箱 (PS-TEPC) の開

発と、それ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 (代表研究者：高エネルギー加速器研究機構 佐々木慎一教授)』の搭載化・運用検討支援。組織等価でなおかつ線エネルギー付与 (LET: Linear Energy Transfer) 分布が測定可能なPS-TEPCは、2014年以降に「きぼう」船内に実機が搭載され、宇宙放射線の実時間線量計測 (連続稼働3ヶ月から1年程度) が実施される予定⁷⁾。

②放射線生物影響：

宇宙放射線による被ばく影響の解明は、宇宙飛行士のISS長期滞在における重要なリスクのひとつである。宇宙放射線環境下では、宇宙飛行士や生物試料は滞在期間中、荷電粒子・中性子による被ばくを低線量率・長期継続的に受ける。これまでの生物影響評価は、高線量域での地上照射試験データを元に外挿して、低線量域での生物影響を推定しているのが現状である。

我々は、ISSにおける宇宙放射線を想定した放射線の低線量・長期照射により誘導される生物影響を把握するために、HIMAC照射室で得られる炭素イオン290MeV/n及び鉄イオン500MeV/n、中性子線源Cf-252、 γ 線を用いた培養細胞、メダカ個体 (表皮と造血器官である腎臓からのRNA) への低線量率照射を行い、遺伝子発現の解析およびタンパク質の質量分析を行っている。

③被ばく管理：

ISS船内では、ISS医学運用要求文書とNCRP142⁸⁾の勧告に基づき、A-C)の宇宙放射線計測が実施されている。各ISSパートナー機関では、様々な宇宙放射線計測機器を開発・搭載し、軌道上検証試験と被ばく管理への適評評価もあわせて行っている。

A) NASA提供するエリアモニタリング装置 (荷電粒子フラックスのy分布を測定する生体組織等価型比例計数管TEPC: Tissue

Equivalent Proportional Counterや荷電粒子スペクトロメーター CPDS : Charged Particle Directional Spectrometer)とロシアが提供する実時間線量/フラックス計測によるエリアモニタリング装置 (DB-8シリコン検出器、R-16電離箱)

B) TLD熱蛍光線量計、OSL光刺激発光線量計、蛍光ガラス線量計、固体飛跡検出器等を含む受動積算型線量計 (PADLESもこれらに含まれる) によるエリアモニタリングおよび宇宙飛行士の個人被ばく線量計測

C) 高線量計測用熱蛍光線量計と軌道上読み出しおよびアニーリングシステムによる船外活動時や緊急被ばく対策用線量計測

JAXA健康医学グループでは、日本人宇宙飛行士のフライト期間中は、A)と宇宙天気によるデータを参照し、ISS内の放射線環境の変動のリアルタイム情報を常時入手・監視している。また、フライト期間中、常時日本人宇宙飛行士が携帯したCrew PADLES線量計を地上回収し、宇宙環境利用センターが解析後に提供する皮膚等価吸収線量結果に基づいた、人体内の組織等価線量 (骨髄、水晶体、皮膚、精巣)と実効線量等量(全身)を算出し、JAXA搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値と照らし合わせたリスク評価を行っている。

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、実測した被ばく線量履歴で制限されるため、長期宇宙滞在のリスク評価、遮蔽設計、飛行計画策定のために、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。

2. LEOにおける宇宙放射線環境

ISSが飛行するLEO (Low Earth Orbit)での最も重要な宇宙放射線被ばくの原因は、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である。11年周期の太陽活動の変化、太陽フレアの発生、船壁や

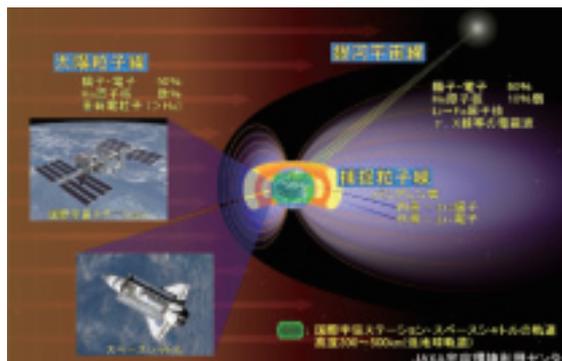


図3 LEOの宇宙放射線環境²⁾

搭載物質など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。また、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二次放射線や中性子の影響も受け、複雑な挙動を示す。地上の自然放射線 (1.5 μ Gy/day、JAXAつくば宇宙センター宇宙実験棟実験室内測定による) に比べ、宇宙放射線環境は線量率が数百倍高く、その放射線の成分 (陽子、重荷電粒子、中性子) は地上のものとは大きく異なる (図3)。

3. PADLESを用いた「きぼう」船内の宇宙放射線計測

2012年現在、「きぼう」船内の宇宙放射線計測に用いられているのは、受動型線量計 PADLESのみであり、1項で述べたArea PADLES、Bio PADLES、Crew PADLES実験のため使用されている。図4に各種実験用の線量計を示す。

PADLES線量計パッケージは2.5cm角厚さ5mm程度と小型で電源を必要としないので、生物試料のごく近傍に設置が可能であり、人体への装着も容易である。Area PADLESやCrew PADLES実験では、船壁への取り付けや携帯のために専用のポリカーボネートケースに収納して、線量計素子を搭載している。

線量計測原理は全てのPADLES線量計に共通であり、2種類の受動・積算型線量計素

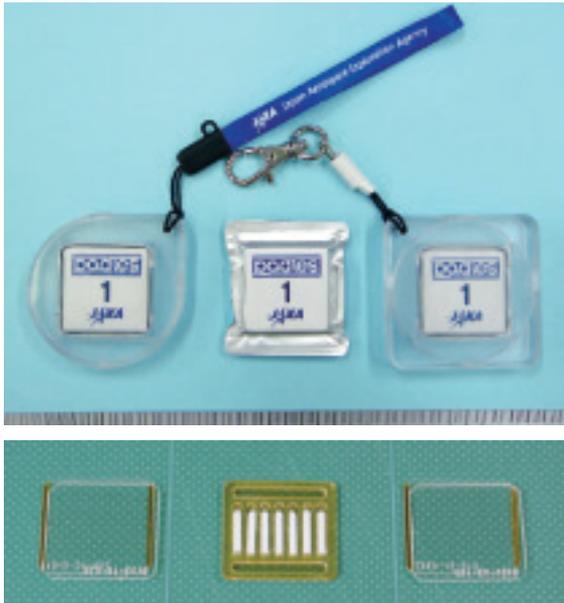


図4 (上)PADLES線量計、右から Crew PADLES, Bio PADLES、Area PADLES用線量計。(下)PADLES線量計に封入されている素子、固体飛跡検出器CR-39と熱蛍光線量計TLD-MSO

子、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TLD（MSO-S、化成オプトニクス製）を使用する。両素子のデータを組み合わせて宇宙放射線に対する全LET領域の吸収線量と線量当量、平均の線質係数の測定を行う。CR-39プラスチック飛跡検出器は宇宙放射線中の高LET成分（ $\geq 10\text{keV}/\mu\text{m}$ ）のLET分布と吸収線量を測定するために用い、TLDは主として低LET領域（ $< 10\text{keV}/\mu\text{m}$ ）の吸収線量を測定するために用いる

CR-39プラスチック飛跡検出器は、プラスチックの中を重荷電粒子が通過するときに行ける潜在軌跡を地上で化学エッチングして可視化し、その貫通孔表面の形状、個数とバルクエッチング量から、通過した個々の宇宙放射線粒子のLETを計測し、LET分布から吸収線量を算出する⁹⁾。

TLD熱蛍光体では、宇宙放射線のエネルギー吸収により電離した電子が、その後の加熱

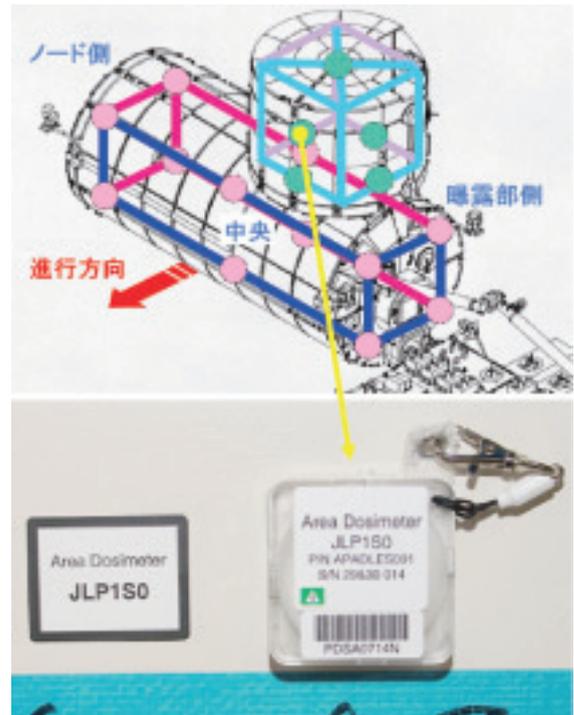


図5 (上) Area PADLES線量計の17カ所の設置位置。(下)「船内実験室」と「補給部」接合部ノード(右舷)側の線量計設置例。

により脱励起する。その脱励起光の強度（熱蛍光）を測定することにより吸収線量測定が可能となる。

両者の計測値を組合せ、全吸収線量とLETの関数として得られるICRP60 Q-L関係を用いた全線量当量、平均の線質係数を算出する。

帰還後、線量計の解析はつくば宇宙センター宇宙実験棟で実施される。PADLES線量計専用の高速・高精度・自動解析システムが構築されており、線量計の帰還・引渡し後、約2週間で線量解析結果を提供することができる。

3.1 「きぼう」船内の宇宙放射線定点環境モニタリング (Area PADLES)

太陽活動や周囲の遮蔽条件により依存して変化する「きぼう」船内の宇宙放射線環境をモニタリングするために、Area PADLES線量計を「きぼう」船内の定点17か所<「船内実験室」のノード側(右舷)、曝露部側(左舷)、

中央のスタンドオフ4角の船壁に設置される。「補給部」には、「船内実験室」の結合部4か所と、天頂部>に設置し、「きぼう」運用期間中の継続的な船内宇宙放射線環境を計測している。これらの線量計は、約半年ごとまたは各Expedition毎（年2回）に回収・交換設置され、「きぼう」運用中の継続的な宇宙放射線環境計測が実施されている⁵⁾。

「きぼう」船内のArea PADLES線量計の設置位置と、設置画像例を図5に示す。

定点環境モニタリング実験は、2008年6月STS-124 /1Jフライトで搭載された与圧モジュール「船内実験室」の取り付けと同時に開始され、1回目のArea PADLES線量計は2009年3月に着陸したSTS-119 /15Aフライトで回収された。スペースシャトルの退役後、ロシア宇宙機関（ロシア宇宙庁ROSCOSMOS、ロシア生物医学問題研究所IBMP、RSC- エネルギア社）とJAXAとの宇宙放射線に関する研究協力の一環として、Area PADLES線量計は2011年6月からソユーズ宇宙船による打上・回収が行われている。図6に、27Sで搭載されたArea PADLES線量計と、それらを地上へ回収・エッチング後のCR-39表面の光学顕微鏡取得画像例を示す（図6）。

2012年5月に打ち上げられた30Sソユーズ宇宙船にて、8回目のArea PADLES線量計が取り付けられ、現在「きぼう」船内の宇宙放射線環境を計測中である。

3.2 ライフサイエンス実験生物試料の被ばく線量計測（Bio PADLES）

Bio PADLES 線量計は、国際公募テーマや一次選定テーマ公募で採択されたライフサイエンス実験の研究者からの依頼を受けて搭載される。この線量計は、生物試料の被ばく線量を試料のごく近傍で測定するために、生物試料とともに幅広い温度環境（冷凍庫-80℃から細胞培養装置37℃）で運用される。その

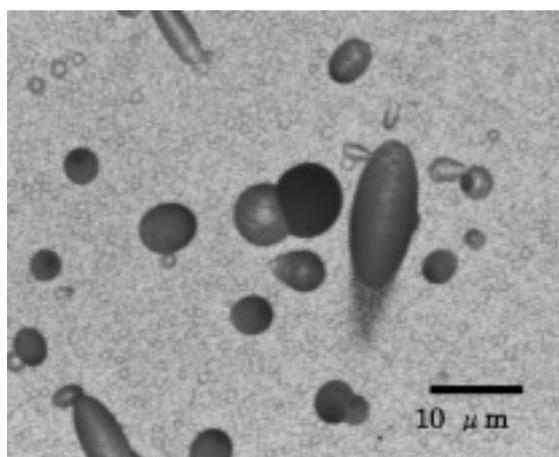


図6 (上)ソユーズ27Sに搭乗したJAXA古川宇宙飛行士。ロシアクルーが27Sソユーズから取り出したArea PADLES線量計を受け取り、「きぼう」船内への取り付けに向かう様子。(下) 27Sで打上・回収した線量計に封入させていたCR-39表面のエッチング後の画像例。エッチングは7NのNaOHにて13.5h行った。エッチング手法については、参考文献(10)を参照。

ため、PADLES線量計は、放射線医学総合研究所の重イオン加速器HIMAC生物照射室にて、生物試料が搭載される各温度での重イオン照射（H~Fe核、160~500 MeV）と、同温度での最大6ヶ月までの保管による素子の温度特性評価が行われている。この地上照射実験から得られたフェーディング特性をもとに補正を行い、より精度の高い生物試料の被ばく線量結果の算出を行っている。生物試料から得られた宇宙放射線に対する生物影響と、Bio PADLES線量計で得られた物理計測結果

の詳細な比較検討が行われる。

Bio PADLES線量計が供されるライフサイエンス実験一覧を表1に示す。表中にハッチングで示す実験テーマは、宇宙放射線に対する生物影響を主要な研究課題に取り上げているものである。

3.3 日本人宇宙飛行士の個人被ばく線量計測 (Crew PADLES)

Crew PADLES 線量計は、ISS 搭乗するJAXA宇宙飛行士の被ばく管理を行うための個人被ばく線量計である。Crew PADLES 線量計を船内・船外活動を通してフライト期間中、常時携帯される。

これまで、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8名のアジア人宇宙飛行士の個人被ばく線量計測を行った。

- ・ Muszapharマレーシア飛行士
(2007年10月10日-21日：11日間)
- ・ 土井飛行士
(2008年3月11日-27日：16日間)
- ・ Yi韓国宇宙飛行士
(2008年4月8日-19日：11日間)
- ・ 星出飛行士
(2008年6月1日-15日：16日間)
- ・ 若田飛行士
(2009年3月15日-7月31日：138日間)
- ・ 野口飛行士
(2009年12月21日-2010年6月1日：161日間)
- ・ 山崎飛行士
(2010年4月5日-20日：15日間)
- ・ 古川飛行士
(2011年6月8日-11月22日：167日間)

今後は、ISS第32/33次長期滞在クルーとして、2012年7月に31Sソユーズに搭乗する星出宇宙飛行士の個人被ばく線量計測を実施する予定である。星出宇宙飛行士の船外活動に

表1 Bio PADLES線量計を供した「きぼう」利用ライフサイエンス実験テーマ (2012年6月実施完了テーマ)

実験テーマ 略称名	実験テーマ名	代表研究者
Rad Gene	重力宇宙環境下における哺乳動物の遺伝子の遺伝子発現	奈良県立大 大西英臣
LDH	1-10地層植物におけるDNA複製体のLDR(カーン)遺伝子の検出	理化学研究所 谷田真次夫
Domo Gene	同位体組成分析による細胞分化と細胞成長の検出	東京大学 長島順
Space Seed	種子発芽試験における高等植物の生活環	富山大学 萩原富一郎
Rad SR	宇宙空間における長期宇宙飛行機乗組員の被ばく線量計測	京都工業大学 高橋誠也
CREST	線量のeigen値を用いた宇宙飛行士に対するDNAとタンパク質の検出	東邦大学 東谷篤志
Neuro Rad	宇宙放射線と微小重力の哺乳動物脳への影響	鹿児島大学 高橋孝行
Mus Lab	3Dプリンターによる宇宙飛行士の足跡のモニタリング	徳島大学 二川健
Fish Scale	宇宙空間における骨代謝調節因子の発現プロファイルのモニタリング	東邦大学 高橋誠也
Space Food Nutrient	宇宙食の長期滞在による栄養状態と宇宙放射線の影響	JAXA
Asian Seed	アジア地域による「きぼう」利用協力の推進を目的とした種子種子打上ミッション	AFRSP
Ferulate	重力によるイネ胚生え細胞のフェルリチン生成の検出	大阪府立大学 豊村和幸
Hydro Trap	種子発芽下における根の水分生理とオーキシン輸送遺伝子の発現	東邦大学 高橋誠也

伴い、Crew PADLESも船外（船外活動服の内側）での線量を合わせて積算計測することとなる。

4. ポストISSに向けた宇宙放射線影響の検討

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・生物への影響はさらに大きくなり、有人滞在ミッションの成否を左右する。月の周回軌道や月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低地球軌道 (LEO) の宇宙放射線環境と大きく異なることも予測されている。

4.1 地磁気圏外の宇宙放射線環境の把握

地球から約38万km離れた月面への有人活動において、宇宙放射線はISS 有人滞在ミッションより遥かに成否を左右する環境要因となりうる。LEOを超えた次世代有人ミッションを安全に遂行するためには、まず周回

軌道や惑星面における宇宙放射線による被ばく線量計測データの取得が必須である。宇宙飛行士の滞在期間を推定する重要な前提条件となる。

また、これらのデータは、宇宙放射線に対する適切な遮蔽厚の決定や宇宙航空機や居住モジュールの適切な遮蔽材料の検討、次世代型宇宙服開発等多くの有人技術開発のために必要不可欠なものである。

月面上は、太陽粒子線と銀河宇宙線、銀河宇宙線と月面表面のレゴリス（月面の土壌堆積層）との相互作用で作られるアルベド中性子・陽子が主な線源と考えられる。地磁気圏のない月周回軌道や月面では、太陽フレアの影響を直接受けるため、被ばく線量は太陽活動に依存してダイナミックに変化をすることが予想されている。

これまで取得された月面の宇宙放射線による被ばく線量は、1968年から1972年に米国で実施されたアポロ有人計画による、24人の宇宙飛行士が携帯したTLD熱蛍光線量計による個人被ばく線量計測結果のみであり、打上から帰還までの積算線量値である¹⁾。アポロ有人計画の計測結果は、高LET領域の宇宙放射線が十分に計測されていないため、実際の個人被ばく線量結果と比較して過小評価である。

2009年6月に米国より打ち上げられた月周回無人衛星ルナー・リコネサンス・オービターには、CRaTER (Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation)と呼ばれる能動型組織等価プラスチック検出器と6枚の固体飛跡検出器を組み合わせたLET分布計測用スペクトロメーターが搭載されている。月遷移軌道への投入後から、極域・低軌道の月面宇宙放射線環境を測定しており、太陽活動極小期に相当する約3年間の実環境データを取得している¹¹⁾。部分的なLET分布は公表されているものの、被ばく線量結果は、未だ公開されていない。

JAXA月・惑星探査プログラムグループでは、セレーネ後継機（セレーネ2号機、2015年以降の太陽活動極大期を想定）に、3枚のSi位置検出器を通過する入射する荷電粒子のLETをイベント・バイ・イベントでリアルタイム計測できる宇宙放射線検出器RRMD-V (Real Time Radiation Monitoring Device-V)を搭載し、月面有人活動の計画立案に役立つ被ばく線量計測実験の実施検討を行っている¹²⁾。

4.2 宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデルの構築

近年、銀河宇宙線モデル等を用いて、月面や火星の土壌組成をもとに、いくつかのシミュレーションによる月面放射線環境の線量推定が実施されている。それらの結果は計算方法や使用モデルによりばらつきがあり、月面での宇宙放射線の人体影響を評価や月面有人開発計画のフェージビリティを議論できるレベルには至っていない¹³⁻¹⁴⁾。

これらのシミュレーション計算では、宇宙環境のようにあらゆる方向から、様々な核種が広いエネルギーを持って入射する環境では、二次粒子や中性子による被ばく線量の正確な評価は非常に難しく、不確実な計算条件で大きな誤差を生じる可能性がある。そのため、4.1項で述べたように、高い精度の実環境計測ミッションが必要とされる。しかし、このようなシミュレーションは、精度の高い検出器による実測値との比較により、計算精度を向上させることで、次世代有人長期滞在技術を構築するための基礎データを提供できる。

月面環境予測や被ばく管理のためのより高精度なシミュレーションコードの開発のために、独立行政法人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)¹⁵⁾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。このPHITSコードでは、ほぼ全ての重イオン（原子核）の物質中の輸送とその核反応を3次元で評価することができる。

JAXA宇宙環境利用センターでは、「きぼう」の構造・遮蔽厚を再現した計算体系を構築し、3.1項に記述した「きぼう」船内の定点宇宙放射線環境計測実験Area PADLES#1-#3（実験期間2008年6月-2010年4月）の実測結果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7）。太陽活動極小期から極大期にかけのArea PADLESシリーズ実験との比較解析により、PHITSコード改良の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る。また、1項で取り上げた「マトリョーシカ実験」の結果を導入することで、実測できない人体深部線量（頭部、眼球、肺、腎臓、精巣）のリスク評価にも応用できる。

月面の土壌組成や地形を考慮することで、月面での被ばく線量の推定も行っている¹⁶⁾。

5. まとめ

宇宙放射線に関する計測技術の構築や、宇宙放射線影響評価のための基盤研究は、ISSのみならず、月面有人開発につながるものであり、宇宙医学研究の最重点領域のひとつである。ISSでの太陽活動周期の最大・最小期を含む継続的な環境モニタリング、生物応答と物理計測による定量的な放射線影響評価、宇宙飛行士の個人被ばく線量の蓄積により、はじめてリスク評価へつなげることができる。

ISSでの宇宙放射線計測は、放射線医学総合研究所が実施する加速器を利用した宇宙放射線線量計国際比較実験Icchiban (InterComparison for Cosmic-ray with Heavy Ion Beams At NIRS)プロジェクトでの国際相互比較実験¹⁷⁾により、共通の地上加速器放射線場での同時比較や計測手法の詳細確認ができ、各ISSパートナー機関間での軌道上計測結果の差異の原因が明らかになりつ

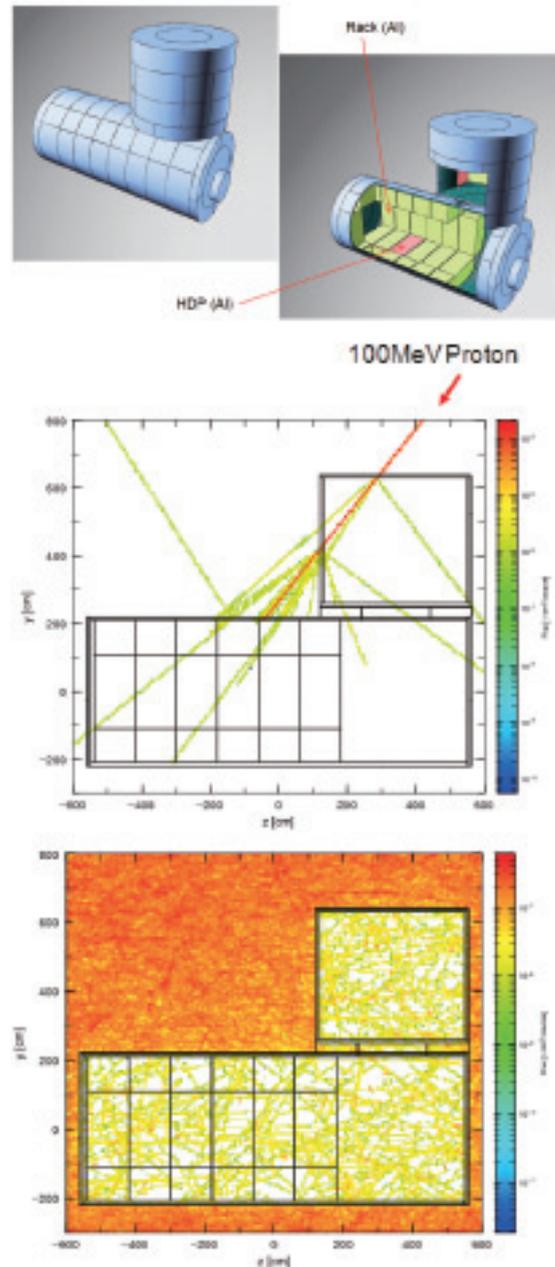


図7 (上)「きぼう」モジュールのPHITSコードのための計算体系。(中)PHITSコードによる代表的な陽子による「きぼう」入射トラックの計算例。100MeV Proton 100個が入射時。(下)捕捉陽子による粒子のトラック。壁内でフラックスが下がるのが確認できる。

つある。放射線医学総合研究所重イオン加速器HIMACでの照射実験において、PADLES受動・積算型線量計については、NCRP142が要求する宇宙放射線計測用線量

計の器械的誤差要求30%以下が十分達成しえいと評価できた。

ISSに限らず、次世代有人宇宙開発においても、「宇宙放射線による被ばく線量」が搭乗日数や生涯滞在日数を制限する。地磁気圏外においても、搭乗員の年間線量制限値の上限値を超えない滞在期間の設定が必要となる。

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」構築により、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できる。

参考文献

- (1) 俵 裕子、永松 愛子、“有人宇宙飛行における受動型線量計による被ばく線量測定”，放射線 5，No.3, P217-241 (2008).
- (2) A. Nagamatsu, K. Murakami, S. Araki, H. Kumagai, K. Kitajo, H. Tawara, “Space radiation dosimetry in low Earth orbit by a passive and integrating dosimeter - ‘PADLES’”, Proc. 22nd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Tsukuba, 2007, KEK Proceedings 2008-14, p. 167 (2008)
- (3) G.Reitz, T. Berger, P. Bilski, R. Facius, M. Hajek, V. Petrov, M. Puchalska, D. Zhou, J. Bossler, Y.Akatov, V.Shurshakov, P. Olko, M. Ptaszkiewicz, R. Bergmann, M. Fugger, N. Vana, R. Beaujean, S. Burmeister, D. Bartlett, L. Hager, J. Pálfalvi, J. Szabó, D.O’Sullivan, H. Kitamura, Y.Uchihori, N. Yasuda, A. Nagamatsu, H. Tawara, E. R. Benton, R. Gaza, S. McKeever, G. Sawakuchi, E. Yukihiro, F. Cucinotta, E. Semones, N. Zapp, J. Miller, J. Dettmann, “Astronaut’s organ dose as inferred from measurements using a human phantom outside the ISS”, Radiat. Res., 171, 225-235 (2009).
- (4) 永松 愛子、村上 敬司、俵 裕子、向井 千秋、“国際宇宙ステーション「きぼう」から月面有人探査まで—宇宙放射線に関する技術開発と基盤研究について—”，マイクログラビティ応用学会 Vol26, No.4, p296-302 (2009).
- (5) A.Nagamatsu, K. Murakami, K. Kitajo, K. Shimada, H. Kumagai, H. Tawara, “Area radiation monitoring on ISS Increments 17 to 22 using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo”, Rad.Meas. (2012) to be submitted.
- (6) 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)」
http://idb.exst.jaxa.jp/db_data/padles/NI005.html
- (7) 佐々木慎一、LET計測に基づくリアルタイム宇宙放射線量計の開発、J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., Vol.28, No.3 (2011) 67-73.
- (8) NCRP, 2002. Operational Radiation Safety Program for Astronauts in Low-Earth Orbit: A Basic Framework, NCRP Report No. 142.
- (9) H. Tawara, M. Masukawa, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, N. Yasuda, “Characteristics of Mg₂SiO₄:Tb (TLD-MSO) relevant for space radiation dosimetry”, Radiation Measurements 46, 709-716 (2011).
- (10) H. Tawara, M. Masukawa, A.

- Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, N. Yasuda, "Measurement of a Linear Energy Transfer Distribution with Antioxidant Doped CR-39 Correcting for the Dip Angle Dependence of Track Formation Sensitivity", *Jpn. J. Appl. Phys.* 47,7324-7327 (2008).
- (11) H. E. Spence, "Early Results from the LRO Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER) During this Historic Solar Minimum", 2009 Fall AGU Meeting U21C-07, 103 Moscone South Hampshire (2009 Dec.)
- (12) 永松 愛子、向井千秋、松本晴久：RRMD- V (被ばく線量計測用 実時間型放射線計測装置)を用いた月面放射線環境の実測 (ポスター)、第11回 宇宙科学シンポジウム、相模原 (2011 Jan.)
- (13) G. De Angelis, F.F. Badavi, J.M. Clem, S.R. Blattnig, M.S. Cloudsley, J.E. Nealy, R.K. Tripathi and J.W. Wilson: *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 166, 169-193(2007).
- (14) F.A. Cucinotta, W. Schimmerling, J.W. Wilson, L.E. Peterson, G.D. Badhwar, P.B. Saganti, J.F.Dicello: *Radiat. Res.*, 156, 682-688 (2001).
- (15) H.Iwase, K.Niita, T.Nakamura: *J.Nucl. Sci. Technol.*, 39 1142, (2001).
- (16) 永松 愛子：有人宇宙開発に必要な宇宙放射線研究、有人月探査を見据えた科学・利用ミッションワークショップ (2012, Mar.)
- (17) N. Yasuda, Y. Uchihori, E. R. Benton, H. Kitamura and K. Fujitaka: The intercomparison of cosmic rays with heavy ion beams at NIRS (ICCHIBAN) project, *Radiation Protection Dosimetry*,120,1-4,pp414-420,2006