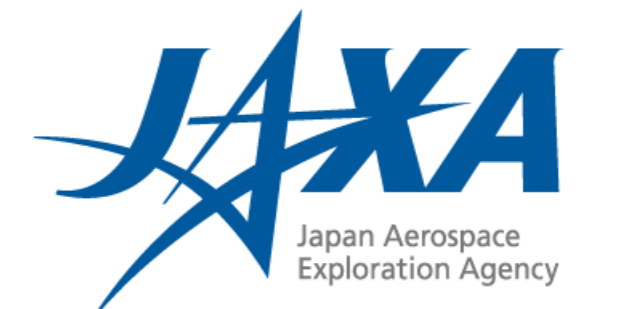


RRMD-V (被ばく線量計測用実時間型放射線計測装置)

を用いた月面放射線環境の実測

永松 愛子^{1, 2}、向井千秋²、寺沢 和洋²、松本晴久³

1. 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
2. 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 宇宙医学生物学研究室
3. 宇宙航空研究開発機構 研究開発本部宇宙環境グループ



地磁気圏外での有人活動と宇宙放射線計測

2030年以降に想定されている、ポスト国際宇宙ステーション (ISS) 計画 (次世代有人宇宙活動計画) では、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。
今後の次世代計画では、国際宇宙ステーションの長期滞在 (約6ヶ月) 以上に、長期間の月面滞在が要求される可能性もある。また、現在までに二百数十名の宇宙飛行士が飛行を経験しているが、民間の商業宇宙利用の活発化に伴い、民間旅行者も含め、この数もますます増えることになる。
宇宙長期滞在中の人間の健康に深刻な影響を及ぼす可能性のある問題として、次の三つが指摘されている。

- ① 微小重力の身体に対する影響
- ② 微小重力下で長期間閉鎖状態によるストレス
- ③ 宇宙放射線による被ばく

LEOでの宇宙飛行士の生涯搭乗期間やミッション毎の滞在期間は、被ばく線量によってのみ制限される。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。月面における次世代有人ミッションを安全に遂行するためには、まず月周回軌道や月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。これらのデータは、月面に人を送り込む前に、有人拠点とする場所がどんな宇宙放射線環境かを高精度に実測して把握する必要がある。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だからである。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。
また、宇宙放射線被ばくで人間が被るリスクを評価し、可能な限り低く抑えるためには適切な放射線防護体系も必要となる。人間が宇宙で被る放射線被ばくを十分な精度で評価するために、これまでも宇宙放射線環境を模擬する計算コードや、宇宙放射線環境に影響を及ぼす宇宙環境観測システムの開発・整備などのために多大な努力が払われてきた。そして、これらをその基礎から支えてきたのは、長年にわたって蓄積されてきた宇宙放射線の実測データであった。「月面有人活動に向けた宇宙放射線環境計測」に関する研究活動の一環として、セレーネ後継機 (セレーネ2号機、2015年搭載を想定) に被ばく線量計測ができる宇宙放射線検出器を搭載し、月面有人活動のための月面放射線環境計測実験を計画している。

宇宙飛行士の被ばく管理

宇宙飛行士の被ばく管理は次の観点から行われる。
① 白内障、不妊、皮膚障害、造血臓器機能不全などの確定的影響が起こることを避ける。
② ガンや遺伝的障害などの確率的影響が起こる確率を低く抑える。
③ 被ばくは、経済的要因、社会的要因やミッションの課題などを考慮しつつ達成できる限りだけ低く抑える (放射線防護におけるALARAの考え方)。
①と②を達成するために以下のような具体的な線量限度が設定されている。

ISS宇宙飛行士の線量限度: (NCRP132, 2000年 より引用)

Table 2	Table 3
確定的影響に対する線量限度 (単位: Gy-Eq)	10年間の宇宙滞在による確率的影響に対する線量限度 (単位: Sv)
期間 骨髄 目の水晶体 皮膚	滞在開始年齢 女性 男性
生涯 - 4.0 6.0	25 0.4 0.7
1年 0.50 2.0 3.0	35 0.6 1.0
30日 0.25 1.0 1.5	45 0.9 1.5
	55 1.7 3.0

Table 3の線量を被ばくした場合のリスク増加が、ガンによる死亡率3%を超えないように設定された。(この線量を被ばくした場合のリスク増加は合計で4.2%となる。すなわち、ガンによる死亡率3%増加、致命的でないガンの発生率0.6%増加、遺伝的障害発生率0.6%増加)

2015年に搭載可能で、なおかつ被ばく線量計測データを取得するもつとも適切な能動型検出器として、LET 分布を測定する位置有感Si検出器望遠鏡 (RRMD: Real-time Radiation Monitoring Device)の月周回衛星への搭載化のための検討作業を進めている。

セレーネ2への運用要求

被ばく線量計測データの取得にあたり、(1)各運用フェーズでの計測、(2)飛行高度、(3)計測期間の3つの運用要求を定めた。

各種運用フェーズでの計測

日本がこれまで取得したことがある被ばく線量計測データは、以下の3種類のデータのみである。地磁気圏外の被ばく線量計測データを保有していない。

- ・RRMD 能動型検出器
- スペースシャトルによる短期搭載取得データ、5回)
- ・BBND : Bonner Ball Neutron Detector能動型中性子モニター
- スペースシャトルによる短期搭載取得データ
- ISS搭載実験 (2001年3月~11月)
- ・Area PADLES : 受動積算型線量計
- ISS搭載実験 (2008年6月~JEMの運用期間中、半年毎の積算線量値を算出)

そこで、Table 5に示す地磁気圏外での有人飛行の全運用期間①-③のLET分布が取得できることを要求(1)とする。

- ① 月への遷移軌道フェーズ
- ② 月周回軌道フェーズ
- ③ 初期運用フェーズ から定常運用

Table 5 打ち上げから初期運用フェーズでの計測

運用フェーズ	場所	打上げからの時間	A/I	イベント
打上げ前	LEO	1週間 (TBD)	高圧電源投入可能な時期いつか	衛星コアリング閉鎖/月遷移軌道投入後の衛星分離まで
初期段階	月遷移軌道フェーズ	LEOから地磁気圏外へ	1週間後 (TBD)	この時期から計測を要求
	クリティカルフェーズ	月周回軌道フェーズ	約55日後	この時期から計測を要求
初期運用フェーズ	月周回軌道	期間未定	?	在軌期間中の計測継続の制約をどうするか?
定常段階	月周回軌道	初期運用完了後 10ヶ月間	?	初期運用完了後から月周回軌道上での観測終了まで (科学観測、HOTV後継)

過去の月面の放射線計測

被ばく管理に必要な物理計測:
月面上は、太陽粒子線と銀河宇宙線、銀河宇宙線とレゴリス (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ている。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することが予想されている。
様々なエネルギー・線種が混在する宇宙放射線場において、人体の被ばく影響を調べるためには、以下の物理量の実測が必要である。

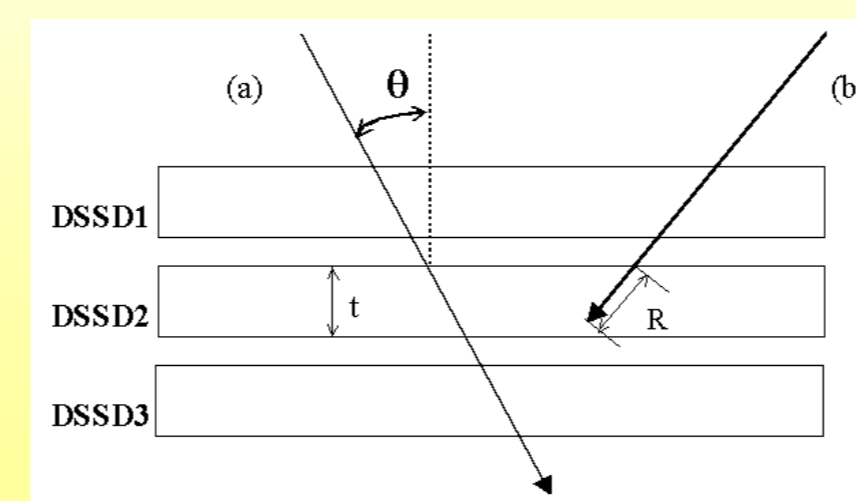
- ① 吸収線量: D (単位質量当たりの吸収エネルギー; Gy=J/kg)
- ② 線量当量: $H=D \times Q$ (LET) (mSv)

人体への被ばく量の評価の目安となる実測可能な線量として、「吸収線量」とともに、放射線の線質に依存する「線質係数」を吸収線量に積した「線量当量」が定義されている。②の Q は、LETの関数として与えられているため、 Q の算出にはまずLET (線エネルギー付与・電粒子の飛跡に沿って単位長さ当りに局所的に与えられるエネルギー)を測定する。個々の入射粒子から計測されたLET分布からこの Q が算出できるように、水中での放射線によるLETが関数として与えられている (国際放射線防護委員会ICRPによる)。

被ばく線量に寄与するLET領域は0.2~700keV/μmであり、この広いLET分布を、高精度で測定する必要がある。
部分的・断片的な高エネルギースペクトルや粒子フラックスのみの観測、高LET成分に感度が下がる素子での吸収線量の測定では不十分で、これらのデータは被ばく線量計測に必要なデータの 数%に過ぎない。特に、数十~数百keV/μmの高LET領域では、吸収線量あたりの生物学的効果が、低LET領域よりも大きく発現する。したがって、月面放射線環境を計測する宇宙放射線計測機器は、LET分布を測定し、吸収線量・線量当量も算出できなければならない。

RRMDの測定原理とこれまでの搭載実績

RRMD-Vは、Double-sided Silicon Strip Detector (DSSD)を3枚重ね、2枚目を標準検出器とし線量を測定する。LETの計測は下記の式で求められる。



一突き抜けた粒子に対してのLET
(a) $L_{Si} = E_d / (t/\cos\theta)$
(b) $L_{Si} = E_d / R$
一Siに対するLETから水に対するLETへ換算。
 $L_{water} [keV/\mu m] = L_{Si} \times 1.20 / 2.33$
RRMDは、Table 4に示す通り、過去5回の搭載実績を持つ。

Table 4 RRMDシリーズの搭載実績 (スペースシャトルのみ)。

Mission	STS-65 (IML-2)	STS-79 (S/MM-6)	STS-84 (S/MM-6)	STS-89 (S/MM-8)	STS-91 (S/MM-9)
Flight date	1994.7	1996.9	1997.5	1998.1	1998.6
Detector	RRMD-I	RRMD-II	RRMD-III	RRMD-III	RRMD-II/III
Range of LET [keV/μm]	5 - 600	3.5 - 6000	0.2 - 700	0.2 - 700	3.5 - 6000
Solar activity	min.	min.	min.	mid.	mid.
Flight period [day]	15	10	10	10	10
Altitude [km]	300	400	400	400	400
Remarks	向井宇宙飛行士	DOSTEL ドイツ	BBND	TEPC	アメリカ

K. Terasawa et al., Ioniz. Rad., Vol.28, No.2 (2002) 169-180

放射線に関する過去の月探査ミッション:

1960年頃から、ロシアではルナ・ゾンド無人探査衛星ミッションが、米国では アポロ有人月面探査ミッションが実施された。昨年末までに実施された月探査ミッションのうち、月環境の吸収線量またはLET分布計測を行ったのは、下記の2回ミッションのみである。過去のミッションの多くが、被ばく線量計測ではなく、月面環境や鉱物資源探査を目的とするものであったためである (Table 1)。
① 1960年代 NASAアポロミッション (受動積算型線量計)
月面周回軌道を飛行または月着陸した8、10-17号機の、24人の宇宙飛行士が携帯したTLD熱蛍光線量計により低LET領域のみ計測。線量率としては、150-1270 μGy/day。高LET領域が測定されていないため、全吸収線量、線量当量に対して過小評価となっている。
② 2009年6月18日~ NASA LRO CRaTER (能動型検出器)
A-150組織等価プラスチックブロック2つを6枚のシリコン検出器 (2枚ずつを1セット)で囲んだ能動型検出器。2009年6月からの1年間の計測結果は、12.2 Rad/year (334 μGy/day)であった。

Table 1 無人月面探査ミッションにおける宇宙放射線計測 (能動型検出器の結果)。

期間	国	衛星等	計測器名称	計測媒体	計測対象・範囲
1960-1970	ソ連	Luna 3 & 4	Gamma Ray Spectrometer	γ線	γ線 0.3MeV
			Inherent Particles	陽子線	陽子線 0.1MeV
1960-1967	米国	Luna Orbiter	Proton Detectors	SS02板×2	陽子線 0.1MeV
			Cosmic Ray Detector	GeMシンチレータ	陽子線 0.1MeV
1960-1972	米国	Apollo	Charged Particle Lunar Environment Experiment	シリコン検出器	陽子線 0.1MeV
			Gamma Ray Spectrometer	NaIシンチレータ	γ線 0.3MeV
1994	米国	Clementine	Alpha Particle Spectrometer	SS01板	α線 5-90MeV
			Neutron Spectrometer	NaIシンチレータ	中性子線 0.1MeV
1998-1999	米国	Lunar Prospector	Gamma Ray Spectrometer	NaIシンチレータ	γ線 0.3MeV
			Gamma Ray Spectrometer	NaIシンチレータ	γ線 0.3MeV
2007-2009	日本	SELENE	CPS	SSD, PSD	陽子線 0.1MeV
			High Energy Particle Detector	シリコン検出器	陽子線 0.1MeV
2007-2009	中国	Chang'e 1	High Energy Particle Detector	シリコン検出器	陽子線 0.1MeV
			Neutron Spectrometer	NaIシンチレータ	中性子線 0.1MeV
2008	中国	Chang'e 1	Neutron Spectrometer	NaIシンチレータ	中性子線 0.1MeV
			Gamma Ray Spectrometer	NaIシンチレータ	γ線 0.3MeV
2008	米国	Lunar Reconnaissance Orbiter	Gamma Ray Spectrometer	NaIシンチレータ	γ線 0.3MeV
			Neutron Spectrometer	NaIシンチレータ	中性子線 0.1MeV
2018 (予定)	日本	SELENE-II	RRMD-II	DSSD板	陽子線 0.1MeV

装置の概念検討

観測目標
月面での有人宇宙活動の前提となる月面での宇宙放射線環境を把握するため、宇宙放射線の荷電粒子に対するLETをイベント・バイ・イベントで測定する。測定LET目標は、被ばく線量に寄与する領域0.2~700keV/μm-water (水中でのLET)とする。月面に滞在する宇宙飛行士の推定被曝線量 (遮蔽なし、2015年打上の想定で太陽活動極大期) 全体の90%以上を実測する。

開発課題
セレーネ搭載のための開発課題として、以下の検討を行った。

- ① DSSDノイズレベルの温度特性データの取得
RRMD-III実機で使用が想定されるDSSDと同等のものを用いて、DSSDノイズレベルの温度による特性の変化を把握し、RRMD-Vに要求される温度範囲として、センサノイズレベル (半幅)の計測下限値である、センサ温度を35度以下と評価した。
- ② 重量評価
RRMD-IIIに必要な放熱面積を確保するために必要な重量を推計し、セレーネへの搭載重量: 2.4kg、サイズ: 282(W) × 190(D) × 90(H) [mm]、電力: 7.6[W] (DC/DC搭載考慮、ヒータ電力未考慮)と定めた。

技術的な実現性
RRMD-Vは、シャトル搭載RRMD-IIIと同等の性能を有し、装置の小型・軽量化を図る。Si位置検出器 (RRMD-Vで使用)を有した放射線計測装置は、GOSATへの搭載化がすでに実現しており、小型化についての技術的な見通しを得ている (Fig. 1-4)。

Fig. 4 GOSAT搭載放射線計測装置 (LPT-3) センサ部: 134W × 71H × 120D (mm)

月面放射線環境のシミュレーション

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) を使って、定常運用時に計測する高度27kmの宇宙放射線環境の評価を行った (Fig. 6)。このコードでは、ほぼ全ての粒子と重イオン (原子核)の物質中の輸送と核反応の3次元シミュレーションを評価することができ、ブレリショナルな比較結果として、ISSでのArea PADLES線量計の実測結果とシミュレーションコードの計算結果を比較し、誤算の範囲内でよく一致していることを確認した。セレーネ搭載実験の実測結果を用いて、シミュレーションコードの高精度化を図る予定である。今後、シミュレーションコードの利用により、月面被ばく管理運用基準の制定のための課題を抽出する。

セレーネ搭載実験による計測結果は、ISSでの宇宙放射線被ばく線量を算定・評価・予測する計算モデル (宇宙放射線被曝管理システム、飛行中線量予測・評価・算定機能系)、世代有人技術のためのシステム/居住モジュールの遮蔽設計、材料・機器 (半導体部品のSEU) 評価へのデータ利用の検証などにも利用が期待できる。

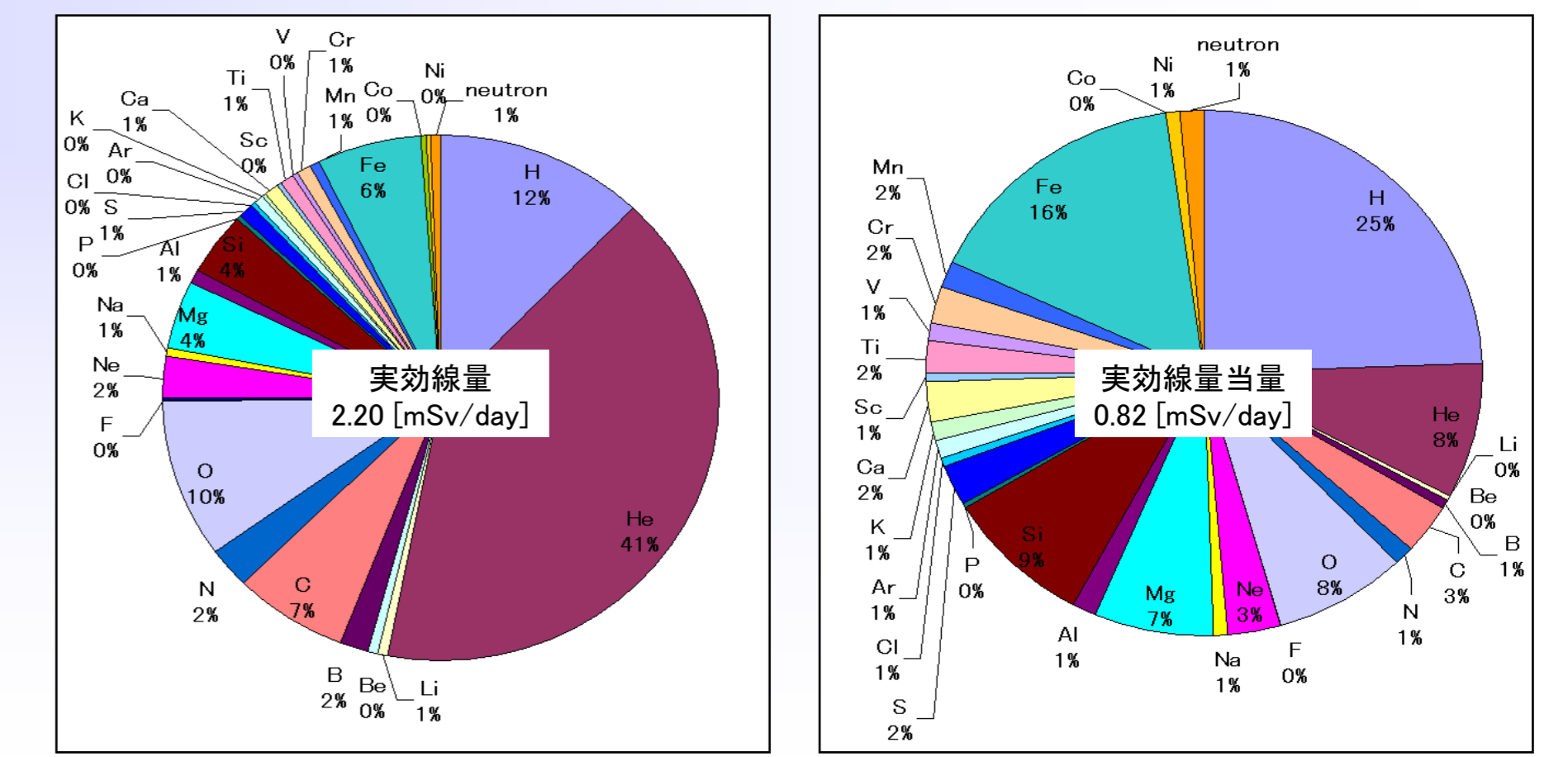


Fig. 6 Phitsシミュレーションコードによる月面上27km, Solar.minの実効線量と実効線量当量