

1

2023年4月11日 月惑星に社会を作るための勉強会

宇宙放射線の線量評価や被ばくリスク低減に関する取り組み

小平 聡

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学研究所

深宇宙への進出

地球軌道から離れて、月、さらに遠い火星を目指して

Using the International Space Station

Now

Operating in the Lunar Vicinity (proving ground)

2020s

After 2030

Leaving the Earth-Moon System and Reaching Mars Orbit

7.0-

Phase 0

Continue research and testing on ISS to solve exploration challenges. Evaluate potential for lunar resources. Develop standards.

Phase 1

Begin missions in cislunar space. Build Deep Space Gateway. Initiate assembly of Deep Space Transport.

Phase 2

Complete Deep Space Transport and conduct yearlong Mars simulation mission,

Phases 3 and 4

Begin sustained crew expeditions to Martian system and surface of Mars.

Credit: NASA

宇宙生活の課題

①無重力あるいは微小重力であること
 ②宇宙船の中は閉鎖空間であること
 ③宇宙放射線による被ばくをうけること

● 宇宙滞在時は常に宇宙放射線にさらされる

太陽や超新星などの爆発でつくられ、光の速度まで加速された 水素やヘリウム、炭素、鉄などの粒子

● 宇宙で受ける被ばくの特徴

- 滞在時間に比例して、被ばく線量は高くなる
- 地球上には膨大な大気があるので、宇宙放射線は遮へいされ地上には届かないが、宇宙空間では物質がないため、 宇宙放射線は地上の100倍以上の強さになる
- 地球には地磁気と呼ばれる磁場があるため、宇宙放射線の一部は磁場によって跳ね返されさえぎられるが、磁場の無い 月や火星では宇宙放射線が直接降り注ぐことになり、被ばく線量がさらに高くなる

積極的な宇宙放射線の防護対策を講じることは、今後の深宇宙探査の 安全性を高めるうえで重要



宇宙放射線の被ばく線量と防護の課題

- 常に宇宙放射線に曝され、被ばく線量は積算される
 - ISS軌道では0.5-1mSv/日程度で半年で100 mSvを超え、月面では年間420 mSvと試算
- 地球磁気圏外での宇宙放射線環境は地球低軌道と異なる
 - 火星への往復で660 mSv程度になると試算(NASA/MSLデータ) Zeitlin et al., Science (2013)
 - 宇宙空間では<u>地球低軌道に比べて被ばく線量に占める高LET(線エネルギー付与)の</u> <u>重粒子成分の割合が大きい</u>ので、人体に与える影響は大きくなると予想される
- 放射線防護対策は?
 - 実効的な放射線防対策は取られていないのが現状



銀河宇宙線の主な粒子の実効 線量当量への寄与割合 Naito, Kodaira et al., LSSR (2020)

戦略的な宇宙放射線防護対策が今後の深宇宙探査(月や火星)が必要

Ten year career effective dose limit based on 3% excess lifetime risk of fatal cancer (NC	RP No.142)
---	------------

左	実効線量限度 (mSv)		
	男性	女性	
25	700	400	
35	1000	600	
45	1,500	900	
55	3,000	1,700	

宇宙放射線の遮へいの方法

受動型の遮へい方法

物質中に吸収する方法で、物質の厚みや密度が大きいほど、 高いエネルギーの入射粒子を止めやすくなる

【利点】

遮へい物質を置くだけで遮へい効果が得られる

【問題点】

宇宙放射線をすべて遮へいしようとすると、数m級の厚みが 必要になるほか、遮へいを目的とした遮へい物質が別途必要 になるので、打ち上げのコストや積載量に課題がある

能動型の遮へい方法

電磁気力を用いて荷電粒子の軌道を変更する方法で、電磁場 を強くすると曲げられる入射粒子のエネルギーが高くなる

【利点】

場所をとる遮へい物質が不要で、効率的な遮へい設計が可能

【問題点】

遮へい装置の電源や冷却等のリソースや有効範囲の制限、電 磁場を用いることによる長期的な健康への影響等、課題が多く 実用化はまだ遠い







月面の縦孔地形を利用した放射線防護の可能性

月探査衛星かぐやが発見した、月面上に開いている巨大な穴(縦孔)の中では、宇宙放射線 が遮へいされる、放射線防護に優れた場所になるのではないか?



月面縦孔内における被ばく線量の低減化検討

- マリウス丘にある縦孔を例にとり、宇宙放射線の特性を厳密に考慮して、縦孔内の被ばく線量をシミュレーションに よって詳細に評価した
- 縦孔の底では被ばく線量を月表面の10%以下(年間19~24 mSv)に低減可能で、地球上の職業被ばく 基準値(100mSv/5年)以下になることから、縦孔は長期滞在に向けた有力な候補として期待される



8

宇宙船の遮へいによる線量低減化

- 水素を多く含む**質量の小さい材料**が遮へいに適している
- 宇宙船に分厚い遮へい材を追加で搭載するのは現実的ではない
- 陽子線(H)を止めるのではなく、
 <u>銀量低減化</u>を図る思想

宇宙機はアルミニウムでできており、遮へいの観点では不適

Naito, Kodaira et al., LSSR (2020)

 ● 複合材料(炭素繊維強化プラスチック等)や水素を結合させた錯体水素化物が候補
 ● 飛行機や自動車などで使われる軽くて丈夫な炭素繊維強化プラスチックは、宇宙船の 遮へい能力の向上に適した実用的な構造材料として期待











複合材料の遮へい性能の検証(ビーム実験)

● 宇宙放射線を模擬した重粒子線を照射できる重粒子線がん治療装置HIMACを使い、単色・単一粒子のビーム照射により、いろいろな種類の複合材料の遮へい性能を実験的に調べた結果、宇宙船材料として一般的に使われる アルミニウムよりも最大60%遮へい効果が高いことがわかった



CR-39で測定した遮へい厚さに対するLET分布の変化

複合材料の遮へい性能の検証(ビーム実験)

● 宇宙放射線を模擬した重粒子線を照射できる重粒子線がん治療装置HIMACを使い、いろいろな種類の複合 材料の遮へい性能を実験的に調べた結果、一般的に宇宙船材料として使われるアルミニウムよりも最大60% 遮へい効果が高いことがわかった



複合材料の遮へい性能の検証(シミュレーション)

- HIMAC照射実験の結果をGeant4を用いたシミュレーションで再現することを確認した
- 宇宙放射線の組成・エネルギースペクトルを用いて、アルミニウム・炭素繊維強化プラスチック・ポリエチレンで遮へい 後のLET分布を計算・比較した結果、高LET粒子成分が大きく減るものの、壊れた軽い二次粒子が増える
- それでも、12cmの厚さの炭素繊維強化プラスチックで宇宙放射線を遮へいすると、重粒子線の割合を減らして、 被ばく線量を半分程度までに減らすことができる



宇宙放射線の個人被ば〈線量計測

- 宇宙放射線のLET範囲が4桁にわたるので(10⁻¹~10³ keV/µm)、一つの検出器では対応が難しいので、 LET計測範囲が異なる線量計を組み合わせている
- 個人被ばく線量計測の標準的な方法は、低LET領域をルミネッセンス線量計(LD: TLD, OSLD, RPLD等)、 高LET領域を固体飛跡検出器(CR-39)で分けて測定する Doke et al., RM (1995)



標準的な受動型線量計

<u>ルミネッセンス線量計(TLD, OSLD, RPLD)</u>

- ✓ 放射線の電離による電子・正孔が素子内の格子欠陥に捕捉され 蛍光中心が形成され、保持される。
- ✓ 熱や特定の波長の光刺激により、捕捉された電子や正孔が脱励 起する際に呈する蛍光を光検出器で測定する



RPLD(銀活性リン酸塩ガラス) OSLD読み出しリーダー (microStar, LANDAUER)

<u> 固体飛跡検出器(CR-39プラスチック)</u>

- ✓ 荷電粒子の通過経路に沿って分子結合が切断される。化学エッチング処理によりエッチピットが生成され、光学顕微鏡で観察する
- ✓ エッチピットの大きさはLETの関数となり、その個数の分布を求めると LETスペクトルになる



広領域高速画像取得顕微鏡(HSP-1000, SEIKOタイムシステム) ※放医研との共同開発 14



【実験例①】ウェットタオルによる遮へい効果の実証実験

- ISSロシアモジュール内の積み荷であるウェットタオルを遮へい材として転用した場合の遮へい効果を ISS軌道上で実証
- 未開封のウェットタオルを4層重ねて(厚さ約7.4cm)カーテンのように船壁に設置し、その前後に 受動型線量計(6組12か所)を配置し、線量測定値の差分から遮へい効果を測定







- ウェットタオル遮へい体による線量低減率の平均値は37±7 %
- 積み荷を有効活用するという点でコスト削減につながる
- 実験は2010年から開始して計8回実施(現在中断)

【実験例②】たんぽぽ実験

- 宇宙環境における微生物や有機化合物の起源や進化の解明を目的とし、 宇宙空間に曝露した際の放射線量を測定
- きぼう実験棟の曝露部ならびに与圧部にて、2015年~2018年の3年間の 吸収線量の変化を観測した結果、曝露部の年間線量は231±5 mGy (与圧部内は82±1 mGy)であった
- ルミネッセンス線量計と3通りの厚さの減速材(Al, SUS, Pb)を組み合わせて、 線量の減衰傾向から太陽粒子線と銀河宇宙線の寄与を切り分けを行った





蛍光トラックを用いた個人被ばく線量計測技術の開発

CR-39は高LET粒子のLET分布の測定に欠かせないが、化学処理工程が必要なため、地上に回収する必要があることや、 長期間曝露によりCR-39に形成される飛動の重なりが増加し、解析が困難になる



地上回収が必要なくその場で線量評価可能な新しい線量計として、素子中に生成した蛍光中心を蛍光顕微鏡系で 走査して<mark>蛍光トラック</mark>として可視化する技術(FNTD)への置き換えを検討中

- トラックの蛍光強度がLETに対応するので、CR-39のようにLETスペクトルが測定可能
- CR-39のような化学処理は必要なく、光学測定のみで閉じるので、その場で線量評価が可能
- ブリーチング処理によりトラック情報を消去できるので長期間運用が可能

【候補材料①】酸化アルミニウム単結晶 (OSLDとして使われている材料とほぼ同じ)



Akselrod & Kouwenberg, Radiat. Meas. (2018)

【候補材料②】 銀活性リン酸塩ガラス (RPLDそのもの)



Kodaira et al., Radiat. Meas. (2020)

LET測定用線量計の比較

- 酸化アルミニウムは検出感度が非常に高く、陽子から重粒子 まで測定できるため、CR-39+LDの組み合わせが不要になる。ただし、宇宙放射線に含まれる陽子線のフラックスが重粒 子成分に比べて3桁高いので、トラック同士の重なり合いが 解析上の問題になる。
- 銀活性リン酸塩ガラスはCR-39と同程度の検出閾値をもつので、高LET粒子を選別して測定可能である。ガラスを通常のLDとして測定すれば低LET領域の線量が得られるので、CR-39+LDの組み合わせを応用して、一つの素子で全LET領域を計測可能

銀活性リン酸塩ガラスの適用を検討中



	CR-39	酸化アルミニウム	銀活性リン酸塩ガラス
励起波長 / 蛍光波長 [nm]	N/A	635 / 750	365 / 600
LET検出閾値 [keV/µm]	~5	~0.5	~5

ガラスを用いた個人被ばく線量計測技術を検討中

携行可能な単一小型チップ素子で個人被ばく線量計測を『その場』で可能にする新しい方法の実用化検討を現在進めている

放射線混在場でのLET分布測定

宇宙放射線の主要な高LET粒子(Fe, Si, Ne, C)を加速器でガラスチップに照射し、 各粒子の蛍光トラックからLET分布を測定 できることを確認



線量評価プロトコール

従来方式を踏襲し、同一のガラスチップ内から高LET粒子の蛍光トラックと低LET粒子由来の蛍光総量を読み出し、線量結果を組み合わせて全線量を評価する



ガラスチップの線量読み取り装置の設計

同一のガラスチップから高LET 粒子の蛍光トラックを読み出す 蛍光顕微鏡系と低LET粒子 由来の蛍光総量を読み出す レーザー光学系の組み合わせ 光学系を発案し、光学系要素 技術の検証と線量読み取り装 置の詳細設計まで完了











- 深宇宙での有人活動に向けた宇宙放射線被ばくに関する課題として、戦略的な宇宙放射線防護対策と、 その場で線量評価する信頼性の高い個人被ばく線量評価手法の開発があげられる
- QSTの取り組みの一部を紹介した
 - □ 月縦孔地形を利用すると、地球上の職業被ばく基準値を下回る環境が確保できる可能性が高い
 [J. Radiol. Prot., 40 (2020) 947]
 - □ 複合材料の活用により宇宙船の遮へい機能を高めて、被ばくリスクの低減化はある程度可能 [Life Sci. Space Res., 26 (2020) 69; Life Sci. Space Res., 31 (2021) 71; Sci. Rep., 12 (2022) 13617]
 - □ 国際宇宙ステーション軌道上での宇宙放射線計測を国際協働で継続しており、船内外での長期変動や空間分布 あるいは遮へい効果に関する測定データの蓄積を進めている [*Radiat. Meas.*, **49** (2013) 95-102; *Adv. Space Res.*, **53** (2014) 1-7; *Astrobiol.* **21** (2021) 1-6、他多数]
 - □ 銀活性リン酸塩ガラスチップで個人被ばく線量計測が『その場』で可能になる [Radiat. Meas., 132 (2020) 10625]

本研究の一部は、QST未来ラボ宇宙量子環境研究グループと三菱重工業株式会社との共同研究による もの、また科研費・挑戦的研究(萌芽)(21K19850)のサポートを頂きました。厚く御礼申し上げます。

ご清聴頂きありがとうございました