

# ウェットタオルを用いた宇宙滞在中の 宇宙放射線被ばくの低減法



小平 聡

Kodaira Satoshi

(放射線医学総合研究所 研究基盤センター)

## 1 はじめに

宇宙は、太陽や銀河からやってくる陽子から鉄イオンにわたる多くの種類の荷電粒子線（宇宙放射線と呼ぶ）が混在した非常に複雑な放射線環境である。国際宇宙ステーション（ISS）の活動領域では、地球自体が持つ磁場によって、放射線の影響がある程度軽減されるものの、そこに滞在する宇宙飛行士は地上で受ける線量の100倍以上（1日当たり0.5~1 mSv）を被ばくする<sup>1)</sup>。また、線量レベルは太陽活動や軌道要素（ISSの高度や姿勢など）、船内遮蔽分布に依存して変動するため<sup>2)</sup>、恒常的な線量モニタリングが不可欠となっている。米国放射線防護委員会（NCRP）によると、宇宙飛行士の生涯線量限度として、25歳時で女性400 mSv、男性700 mSvが勧告されている<sup>3)</sup>。一方で、宇宙放射線を遮蔽するための材料や手法に関する研究や検討も進められてきており、遮蔽方法としては大別して受動型と能動型に分けられる。受動型は、ある程度の物質質量により宇宙放射線を吸収するもので、地上では一般的に鉛ブロックなどが用いられているが、宇宙空間において必要な遮蔽効果を得るためには、打ち上げコストや積載量の観点から極めて困難である<sup>4)</sup>。能動型として、電磁場を用いて荷電粒子の軌道を変更する方法が検討されているが、やはり全体の重量制限の問題のほか、供給電力や冷却機構など

の現実的な設計には課題が多い<sup>5)</sup>。このため、宇宙飛行士の放射線防護は、ISSの船壁や実験計器などによる数g/cm<sup>2</sup>程度のわずかな遮蔽効果に依存するだけで、積極的な遮蔽措置が取られていないのが現状である。有人活動の場が地球近傍のISSから、更に遠く離れた火星などに移りつつあり、宇宙滞在の長期化による被ばく線量の大幅な増加が懸念されている。最近のNASAの火星探査機キュリオシティのデータによると、最短経路の航行でさえも、片道だけで生涯線量限度に迫る線量結果（~660 mSv）となることが報告<sup>6)</sup>されており、人類の宇宙進出のためには、宇宙放射線による被ばくをできる限り低減する手法の確立が求められている。

## 2 ウォーターカーテンと宇宙実験

本研究では、新たな積み荷として遮蔽材をISSへ持ち込むのではなく、既に搭載されており、継続的に補給されている物資を遮蔽材として利用することを考えた。地上での放射線遮蔽とは異なり、荷電粒子線を主成分とする宇宙放射線に対しては、単位質量当たりの阻止能比や核破碎反応断面積の観点から、遮蔽材としては水素原子が最も効果的である<sup>7)</sup>。また、船壁との核反応により二次的に生成される中性子線に対しても、水素原子を主成分とする遮蔽材が有効である。このため、水素原子を含む遮蔽材料

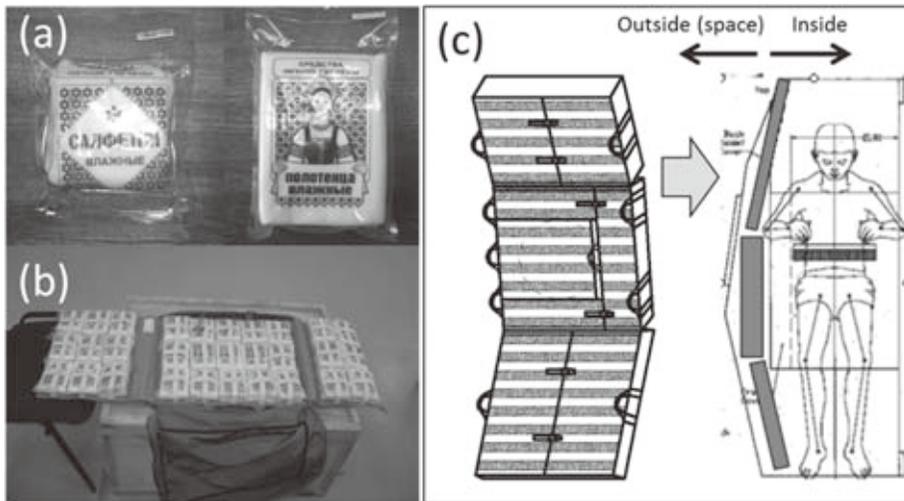


図1 ISSに搭載されているウェットタオル（図中a）とそれを4枚積層しボード状に組み上げ（図中b）、ISS船内に配置する（図中c）<sup>8)</sup>

の開発が世界各国宇宙機関等で精力的に進められている。本研究では、水分を大量に含むものとして宇宙飛行士が入浴の代わりに身体を拭くためのウェットタオル（図1(a)）に着目し、これらを板状に積み重ねて作成し、遮蔽体として利用することを考えた。ウェットタオルを4層に重ね、カーテン状に敷き詰めた“ウォーターカーテン”を作成し（図1(b)）、図1(c)のようにロシアサービスモジュール内の船壁の一部を覆うように設置した。設置したウォーターカーテンの全体の重量は67 kgで、平均的な厚さは6.3 g/cm<sup>2</sup>であった。

2010年6月16日～同年11月26日までの163日間、ウォーターカーテンがある6か所とない6か所の合計12か所（#1～#12）で線量測定を行い、ウォーターカーテンの有無による被ばく線量の変化を実測した。被ばく線量の評価は、熱蛍光線量計（TLD-100）と固体飛跡検出器（CR-39）を組み合わせた積算型線量計<sup>9,10)</sup>により実施した。この手法は、比較的軽い粒子成分と、重い粒子成分をそれぞれの検出器で測定し、その結果を組み合わせることにより、全被ばく線量を評価することができる。線量計自

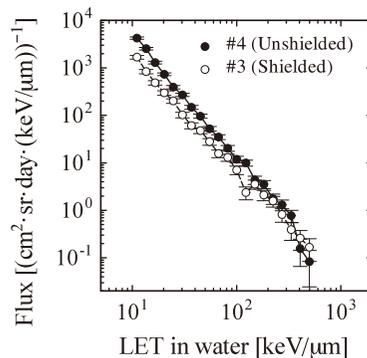


図2 CR-39により測定した線量計#3（ウォーターカーテン；あり）と#4（ウォーターカーテン；なし）のLET（線エネルギー付与）スペクトルの比較<sup>8)</sup>

体は小型・軽量で、取扱いやすいという特徴を有する。

### 3 線量低減効果

ウォーターカーテンありの位置（#3）となしの位置（#4）で測定したCR-39によるLET（線エネルギー付与）スペクトルの比較を図2に示す。明らかに、ウォーターカーテンありの位置での粒子フラックスが低減されていることが分かる。図3に示すように、ウォーターカーテン

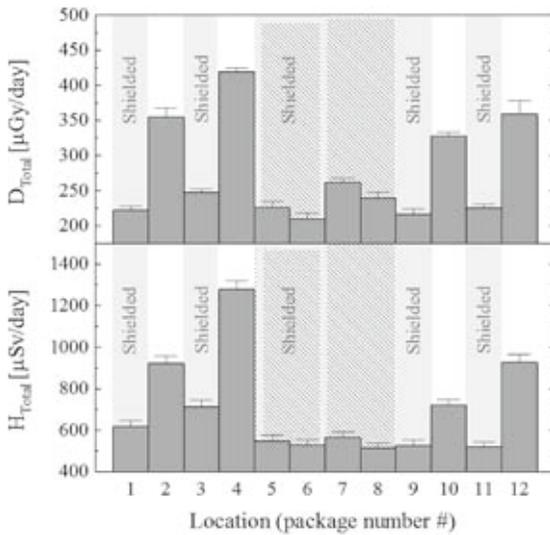


図3 各線量計の位置番号における1日当たりの吸収線量  $D_{Total}$  (上図) と線量当量  $H_{Total}$  (下図) の変化<sup>8)</sup> 斜線枠は宇宙空間を覗くために設置してある円形の厚いガラス窓がある場所で、その部分だけ特別に遮蔽されている状態にある

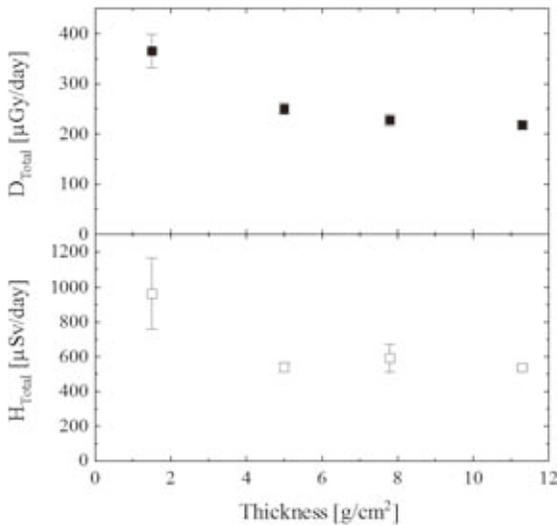


図4 線量計位置による遮蔽厚さの違いを利用することにより得られた、宇宙空間からの物質厚を関数とした線量値の変化<sup>8)</sup>

の有無に応じて日平均の吸収線量と線量当量が変わっていることが分かる。このうち、#5～#8は宇宙空間を覗くために円形の厚いガラス窓が

設置された場所で、その部分だけは既に厚いガラス窓で遮蔽されているため、ウォーターカーテンによる遮蔽効果はほかの設置位置(線量計)に比べて小さい。ウォーターカーテンによる正味の遮蔽効果を調べるために、この4か所(#5～#8)を除いた線量当量を求めた。ウォーターカーテンがない位置では1日当たり  $962 \mu\text{Sv}$  の線量(4か所の線量当量の平均値)であったのに対し、ウォーターカーテンがある位置では1日当たりの線量が  $593 \mu\text{Sv}$  であった。遮蔽率の平均値を求めた結果、ウォーターカーテン(厚さ  $6.3 \text{ g/cm}^2$ )による線量低減割合は  $37 \pm 7\%$  (線量当量値)であることを実証した。また、この結果は粒子・重イオン汎用モンテカルロコード PHITS のシミュレーション計算による推定結果<sup>11)</sup>(水中  $6.3 \text{ g/cm}^2$  の厚さで  $34\%$  の線量低減割合)とほぼ一致している。

線量計位置によって宇宙空間からの厚さが異なることを利用して、放射線量の物質厚さに対する変化の様子を調べた。#2, #4, #10, #12は最も宇宙空間に近い位置にあり、その厚さは船壁のアルミニウム  $1.5 \text{ g/cm}^2$  である。一方で、#1, #3, #9, #11はウォーターカーテンにより遮蔽されており、その厚さはウォーターカーテンと船壁の厚さの和( $7.8 \text{ g/cm}^2$ )になる。また、#7と#8はガラス窓( $5.0 \text{ g/cm}^2$ )の後方に位置している。最も物質厚さがあるのは#5と#6で、ガラス窓とウォーターカーテンの厚さの和( $11.3 \text{ g/cm}^2$ )となる。このように4通りの物質厚さとして分けて考えると、図4のように、宇宙空間からの厚さの関数として線量値の変化は指数関数的に減衰することが分かる。物質厚さが大きくなると、遮蔽効果は相対的に小さくなる。これは宇宙放射線が持つ冪型の連続エネルギースペクトルによる。宇宙放射線の遮蔽に効果的な厚さは  $10 \text{ g/cm}^2$  程度であると言える。

宇宙放射線のどの粒子成分がウォーターカーテンにより遮蔽されているのかを調べるため

に、粒子成分を 10 keV/ $\mu\text{m}$  未満の低 LET 成分とそれ以上の高 LET 成分に分けて線量低減割合を評価した。この結果、低 LET 成分では  $37 \pm 2\%$ 、高 LET 成分では  $37 \pm 11\%$  であり、LET 成分による線量低減割合の違いはみられなかった。このことから、代表的な宇宙放射線の成分である 90 MeV 以下の陽子、160 MeV/n 以下の炭素イオン、400 MeV/n 以下の鉄イオンなどが、 $6.3 \text{ g/cm}^2$  のウォーターカーテンに吸収されたと考えられる。二次的に生成する中性子成分については、ほかの荷電粒子線の線量と区別して測定することは難しいが、CR-39 により反跳陽子として観測され、LET スペクトルに含まれていると考えられる。ウォーターカーテンによりある一定のエネルギーを持つ中性子線量も低減されていると考えられる。

#### 4 まとめ

本研究では、ISS に既に搭載されているウェットタオルを遮蔽材として活用することに着目し、厚さ  $6.3 \text{ g/cm}^2$  のウォーターカーテンを作成して、宇宙放射線の線量低減効果を実地で調べた。その結果、37%の被ばく線量の低減効果を実証し、ウェットタオルが有効な遮蔽材であることを明らかにした。この手法は常時用意されている物資を有効活用するもので、新たに遮蔽材を持ち込む必要がないため、実現性が高い手法であると考えられる。ISS で活動している宇宙飛行士の被ばく線量の低減に効果的な手法であるだけでなく、将来的に月面や火星等の長期間にわたるミッションを実施する上で、宇宙飛行士の安全性の向上に寄与すると期待される。なお、本研究の詳細は、既に刊行済みの文献 8) を参照いただきたい。

#### 【謝辞】

本研究は、放射線医学総合研究所、ロシア生物医学問題研究所、チェコ原子核研究所を中心とした、多くの共同研究者とともに進めている

プロジェクトであり、多大な協力をいただいた関係各位に感謝いたします。また、本研究で用いている線量計の較正実験は、放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC における共同利用研究課題の一部として行われました。HIMAC 関係者各位に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Benton, E.R. and Benton, E.V., Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond, *Nucl. Inst. & Meth.*, **B184**, 255–294 (2001)
- 2) Kodaira S., *et al.*, Analysis of radiation dose variations measured by passive dosimeters onboard the International Space Station during the solar quiet period (2007–2008), *Radiat. Meas.*, **49**, 95–102 (2013)
- 3) NCRP No.142, National Council on Radiation Protection, No. 142, Bethesda (2002)
- 4) Wilson, J.W., *et al.*, Shielding Strategies for Human Space Exploration, NASA Langley Research Center Hampton, VA. NASA Conference Publication 3360 (1997)
- 5) Townsend, L.W., Critical analysis of active shielding methods for space radiation protection, Aerospace Conference, 2005 IEEE, 724–730 (2005)
- 6) Zeitlin, C., *et al.*, Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory, *Science*, **340**, 1080–1084 (2013)
- 7) Durante, M., Space radiation protection: Destination Mars, *Life Sci. Space Res.*, **1**, 2–9 (2014)
- 8) Kodaira S., *et al.*, Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters, *Adv. Space Res.*, **53**, 1–7 (2014)
- 9) Benton, E.R., Benton, E.V., and Frank, A.L., Passive dosimetry aboard the Mir Orbital Station: internal measurements, *Radiat. Meas.*, **35**, 439–455 (2002)
- 10) Doke, T., Hayashi, T., Nagaoka, S., Ogura, K., and Takeuchi, R., Estimation of dose equivalent in STS-47 by a combination of TLDs and CR-39, *Radiat. Meas.*, **24**, 75–82 (1995)
- 11) Sato, T., *et al.*, Evaluation of dose rate reduction in a spacecraft compartment due to additional water shield, *Cosmic Res.*, **49**, 319–324 (2011)