

# 宇宙居住と宇宙放射線研究

高橋 昭久 (群大)

## Space radiation research and habitation in space

Akihisa Takahashi\*

\*Gunma University Heavy Ion Medical Center, Maebashi, Gunma 371-8511, Japan  
E-Mail: a-takahashi@gunma-u.ac.jp

Abstract: For human planetary habitation in space, space radiation is one of the major hazards. Many manned space missions are scheduled in the near future. Astronauts are constantly exposed to space radiation, which is different from that on Earth. For the International Space Station (ISS), the major source of radiation exposure results from solar storms. For exploration to the Moon and Mars, it is the exposure to galactic cosmic radiation including heavy-ions that is the most significant health concern. While the ISS is in free fall, the Moon has 1/6, Mars 1/3 of Earth's gravity. Many aspects of the biological effect of the combination of the lower gravity environment and space radiation remain unclear. It is necessary to clarify the problem of biological effect, physical dosimetry and radioprotection and then to resolve them as soon as possible. Here, I try to present a characteristic and the research trend of the space radiation.

*Key words:* space radiation, space exposure experiment, risk assessment, radiological protection

### 1. はじめに

人類は、宇宙に飛び出し、長期滞在に挑戦している。現在、国際宇宙ステーション(ISS)での1年程の長期滞在が可能となり、船外活動の機会も増している。再び月へ、火星へと、有人宇宙探査に対する人類の夢は尽きない。民間の宇宙旅行の幕開けも間近に迫っている。宇宙居住は、安全・安心なのか？ここでは、危険因子の一つである宇宙放射線の特徴と研究動向について紹介する。

### 2. 宇宙放射線の特徴

宇宙空間は、磁場と大気に守られている地上とは異なり、宇宙放射線が降り注いでいる。宇宙放射線は、銀河宇宙線、太陽粒子線、補足粒子線に3分類される。

銀河宇宙線は超新星爆発によって生じ、真空の宇宙空間を非常に高速(エネルギー大)で飛び交っているのが特徴である。10 GeV 以上の高エネルギー粒子成分は90%の陽子、10%弱のヘリウム、極微量の重粒子である。

太陽粒子線は、太陽から放出された数百 MeV に及ぶ陽子と電子がほとんどで、数%のヘリウムと微量の重粒子が含まれる。太陽は11年周期で活動しており、太陽表面の爆発(太陽フレア)によって銀河宇宙線とは比較にならない程の大量の粒子線が放出される。

補足粒子線とは太陽粒子線等が地磁気の磁力線に捕捉されたものである。赤道上空を土星の環のように地球を取り囲む平均高度が約 3,600 km の陽子帯(内帯)と約 18,000 km の電子帯(外帯)の2層の放射能ベルト(バンアレン帯)がある。内帯の一部は南大西洋上空に垂れ下がり、これを SAA(South Atlantic Anomaly)と呼び、ISS における被曝の半分はここを通過する際のものであ

る。被曝量(線量当量)における各種放射線の寄与は、ISS での周回軌道ではこの補足粒子線の陽子と銀河宇宙線・太陽粒子線による重粒子線で約半々、その船内では線壁を介した二次放射線の中性子線が 30%を占め、また、地球磁気圏を遠く離れた月や火星等の深宇宙では、特に重粒子線の割合が増える。

さらに、宇宙空間は微小重力環境であり、月や火星では地上の 1/6、1/3 の重力環境である。長期宇宙滞在を実現するためには、宇宙放射線に特徴的な①低線量・低線量率長期被曝環境、②高 LET 重粒子線を含む様々な線質環境のみならず、③低・微小重力との複合環境を明らかにすることで、リスクを正しく評価し、宇宙での生活の質を高めることが喫緊の課題である。

### 3. 宇宙放射線の人体影響の不確定性

#### 3-1. 線量

ISS での被曝線量は地上の約 100 倍の 0.3 Sv/年<sup>1)</sup>、船外活動では船内の約 5 倍の放射線に曝される。月は大気がないため、月面表面で約 1 Sv/年を超えると推定されている<sup>2)</sup>。火星までの往復と滞在期間の合計約 2 年半で約 1 Sv の被曝が予測されている<sup>3)</sup>。

広島・長崎原爆の急性被曝による疫学的調査の結果から、確率的影響のがん死亡率は、0.1 Sv で 0.5%、1 Sv で 5%上昇することが推定されている。また、組織反応の罹患率が 1%になる予測推定しきい線量は、不死域の一次的不妊(精巣)は 0.1 Sv、造血能低下は 0.5 Sv、永久不妊(卵巣)は 3 Sv、永久不妊(精巣)は 6 Sv と報告されている。さらに、3-10 Sv で骨髄死、10-100 Sv で腸死、100 Sv 以上で中枢神経死が生じる。

放射線防護では確率的影響の最小化と確定的影響の回避が目標である。宇宙飛行士の生涯実効線量制限値についてはロシアや欧州のように一律 1 Sv と決めているが、アメリカや日本では、初めて宇宙飛行を行った年齢と男女の違いを考慮していたり、各国の考え方の違いで統一されていない。火星滞在の目安となる 1 Sv の被曝が許容されているのは、現在、日本の場合、46 歳以上の男性のみである。

NASA の宇宙飛行士 295 名について、0.008 Sv に満たない低線量被曝群(平均 0.0036 Sv)とそれ以上の高線量被曝群(平均 0.045 Sv)に分けて調査され、低線量群と比べて、高線量群で変性疾患の白内障の発症時期が早くなり、高頻度に発症することが明らかにされた<sup>4)</sup>。水晶体の放射線感受性は従来考えられていたよりも高いことから、2011 年 ICRP 勧告で水晶体等価線量限度が 0.15 Sv/年から 0.05 Sv/年に引き下げられた。この勧告を、地上と同様に宇宙飛行士の生涯実効線量制限値にまで適応するとすると、長期宇宙滞在は不可能になってしまう。

### 3-2. 線量率

放射線を一度に被曝したのか、二度三度に分けて被曝したのか、または、少ない量で長期に渡って被曝し続けたのかで、生物影響の現れ方は異なることが知られている。X 線や $\gamma$ 線の場合、線量率が低いほど生物影響が低く、線量率効果として理解されている。照射中に放射線からの回復・修復が起こっていることが原因と考えられている。宇宙放射線は低線量率なので、安全のように思われる。しかし、高 LET 放射線の中性子線では、低線量率被曝の方が形質転換率を高くすることが報告されている<sup>5)</sup>。この現象は逆線量率効果と呼ばれている。線量率が減少する程、生物学的効果比が高くなるため、高 LET 放射線の寄与が大きくなる深宇宙飛行では、さらに、慎重に考慮する必要がある。それ以外にも、低線量・低線量率による空間的不均一被曝ではバイスタンダー効果について、時間的不均一被曝では適応応答についても考える必要がある。

### 3-3. 線質

重粒子線は 1 粒子でも飛跡に沿って重篤な DNA 切断を引き起こし、生物学的効果が高い<sup>6)</sup>。そのため、中枢神経等にヒットした時の悪影響が危惧されている。実際、マウスの実験ではあるが、脳への低線量の重粒子線被曝によって、脳神経ネットワークが減少し、混乱や物忘れが起こること<sup>7)</sup>、アルツハイマーが進行すること<sup>8)</sup>等が報告されている。さらに、アポロ飛行士の高い循環器系疾患死亡率から、重粒子線が原因ではないかと考えられている<sup>9)</sup>。しかし、この報告は 7 名のアポロ飛行士の解析結果のため、統計学的にサンプル数が少なく疑問をいさぐ報告もある<sup>10)</sup>。

### 3-4. 複合影響

宇宙実験という制限のもと、再実験が困難なことから、放射線と微小重力との相互作用の真偽については未だ

解決されたとはいえない<sup>11,12)</sup>。我々は疑似微小重力装置の 3D クリノスタットと炭素線および X 線同期照射システムを新規開発しており<sup>13,14)</sup>、微小重力下の放射線に対する DNA 損傷応答、遺伝子発現、メタボローム発現等複合影響を解析する予定である。放射線の効果は微小重力で変化するのか、しないのかが明らかになることが期待される。

最終的には個体(ヒト)の、宇宙での低・微小重力、さらに、閉鎖環境との宇宙放射線の複合影響について明らかにされることが期待される。今後、宇宙飛行士を対象としたコホート研究や症例対照研究等の臨床研究を基に、個人レベルの遺伝子背景等を加味して、宇宙放射線の影響が明らかにされることが期待される。

## 4. 宇宙放射線障害から免れる防護研究へ

宇宙飛行士を宇宙放射線被曝から防護する上において、①宇宙天気予報(ISS 搭載太陽フレア発生に対する警報システムの高度化)、②物理線量測定(船内の任意の場所における線量率の変化をリアルタイムで宇宙飛行士自身が確認できる可搬型の放射線モニタの配備等)、③生物線量測定(宇宙線が生体に及ぼすリスク評価手法の確立、線量評価法の標準化、放射線防護体系の高度化等)、④防護材開発(宇宙船内物品の設置位置・量による最適化、全方位において船内線量を最小化する船壁厚の最適化、月/火星面上でのレゴリス遮蔽材の検討・地下シールドの検討等)、⑤防護剤開発、⑥宇宙移動期間の短縮等も重要な研究課題である。

## 5. おわりに

安全・安心な宇宙惑星居住のためには、宇宙放射線の特徴を正しく理解することが欠かせない。

(本研究は JSPS 科研費 JP15H05935 の助成を受けたものです)

## 参考文献

- 1) Doke T, et al. *Nucl Inst Methods Phys Res* A365: 524-32 (1995).
- 2) Jia Y, et al. *Radiat Res* 173:238-44 (2010).
- 3) Hassler DM, et al. *Science* 343:1244797 (2014).
- 4) Cucinotta FA, et al. *Radiat Res* 156:460-6 (2001).
- 5) Hill CK, et al. *Br J Cancer* 6:97-101 (1984).
- 6) Nakajima N, et al. *PLoS ONE* 8:e707107 (2013).
- 7) Parihar VK, et al. *Sci Adv* 1:e14002561 (2015).
- 8) Cherry JD, et al. *PLoS ONE* 7:e53275 (2012).
- 9) Delp MD, et al. *Sci Rep* 6:29901 (2016).
- 10) Cucinotta FA, et al. *Life Sci Space Res* 10:53-6 (2016).
- 11) Yatagai F, et al. *Life Sci Space Res* 3:76-89 (2014).
- 12) Moreno-Villanueva M, et al. *NPJ Microgravity* 3:14 (2017).
- 13) Ikeda H, et al. *Life Sci Space Res* 12:51-60 (2017).
- 14) Ikeda H, et al. *Biol Sci Space* 30:8-16 (2016).