



大阪科学・大学記者クラブ 御中

(同時資料提供先：文部科学記者会、科学記者会)

2022年9月28日

大阪公立大学

国際宇宙ステーションにおける 宇宙放射線の生物学的影響が明らかに

<本研究のポイント>

◇凍結したマウス ES 細胞を国際宇宙ステーション (ISS) に打ち上げ、約 4 年間被ばくさせ染色体異常を解析。

◇宇宙放射線の物理学的線量計測に基づく予測と生物学的測定がほぼ一致することを明らかに。

<概 要>

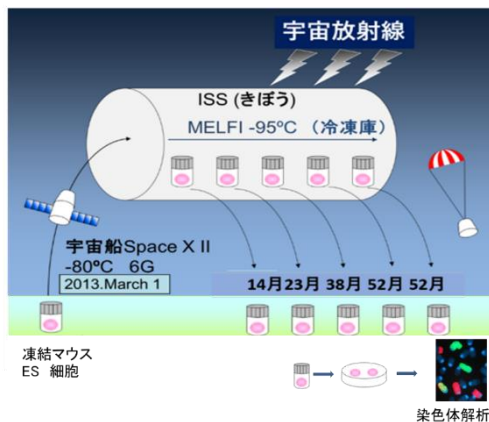


図. 宇宙実験「Stem Cells」の概要

凍結したマウス ES 細胞を国際宇宙ステーションに打ち上げ、長期間保存後、地上に回収し染色体異常を調べた。

宇宙空間には多種類の放射線粒子が飛び交っており、低線量で絶え間なく被ばくします。これまで、物理学的線量により宇宙放射線の人体への影響が推定されてきましたが、実際に宇宙と全く同じ環境を地上で再現できないことから人体など生物への影響を定量的に測定することはできませんでした。

大阪公立大学大学院医学研究科 基礎医科学専攻の吉田 佳世 准教授、大阪市立大学 森田 隆 名誉教授、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の永松 愛子宇宙環境計測領域 研究領域主幹らの研究グループは、宇宙放射線による生物への影響を定量的に測定し、物理学的線量計による予測値と生物学的測定値がほぼ一致することを明らかにしました。

今回、本研究グループは、放射線に対する感受性を高めたマウス胚性幹細胞 (ES 細胞) を凍結し、2013 年 3 月に Space X-2 のドラゴン宇宙船により ISS に打ち上げて 1,584 日間 MELFI と呼ばれる -95°C の冷凍庫に保管させて宇宙放射線を被ばくさせました。その後、約 1 年ごとに 4 回にわたって細胞を地上に回収し染色体異常等を解析するとともに地上での加速器による陽子線の影響と比較しました。

その結果、ISSの冷凍庫内で測定した物理学的線量から予測された宇宙放射線の影響の強さ（線質係数）は、陽子線の1.48倍になりました。一方、ISS内で宇宙放射線が細胞に直接与えた影響（染色体異常）は陽子線の1.54倍であることから、両方の値がほぼ一致することを世界で初めて示すことができました。このことから、宇宙放射線は、未知の複合的な効果で生物学的影響が非常に大きくなる、あるいは小さくなる可能性は低く、物理学的な測定と推定によるリスク評価が信用できることが示されました。本研究成果は、今後、月や火星など、より強い宇宙放射線の影響が予想される深宇宙空間における有人長期滞在の安全につながることを期待されます。

本研究成果は2022年8月18日に「セルプレス」の国際学術誌「Heliyon」オンライン版に掲載されました。

研究者らからのコメント

打ち上げまでに7年間、打ち上げて4年間、さらに解析まで5年間と非常に長期にわたる研究で、放射線高感受性のマウスES細胞を作製し、宇宙に上げるため約1,500本の均質な細胞を凍結したチューブを準備するという大変な実験でした。また実験結果の解釈についても難しかったですが、最終的に本来の目的の宇宙放射線の定量的な結果が得られ喜んでいきます。有人宇宙探査において、必要で重要な課題であったと考えています。国内外の人々にご支援頂いたことに非常に感謝しております。

■掲載誌情報

雑誌名： Heliyon
論文名： Comparison of biological measurement and physical estimates of space radiation in the International Space Station
著者： Kayo Yoshida, Megumi Hada, Akane Kizu, Kohei Kitada, Kiyomi Eguchi-Kasai, Toshiaki Kokubo, Takeshi Teramura, Sachiko Yano, Hiromi Hashizume Suzuki, Hitomi Watanabe, Gen Kondoh, Aiko Nagamatsu, Premkumar Saganti, Francis A. Cucinotta, Takashi Morita
掲載URL： <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10266>

<研究の背景>

現在、民間人が宇宙へ行くことも可能になり月探査を行うアルテミス計画、さらに火星探査など、深宇宙への長期有人飛行が必要となっています。一方、宇宙放射線の人体への影響は、多くの地上実験や宇宙での物理学的な線量の計測から予測されていました。しかし、宇宙放射線は、地上ではあまり受けない種々のエネルギーを持つ多種類の荷電粒子線を含み、低線量で長期間に絶え間なく被ばくするため、実際に宇宙放射線がどれぐらいの影響を人体に与えるかは明らかではありませんでした。

そこで本研究グループは、凍結したマウスES細胞を国際宇宙ステーション（ISS）に打ち上げて、直接宇宙放射線に長期間被ばくさせ、その影響を生物学的指標（染色体異常）で定量しました。

<研究の内容>

本研究グループは、DNA 損傷の修復に関与するヒストン H2AX 遺伝子を欠損させ放射線に対する感受性を高めたマウス ES 細胞を作製し国際宇宙ステーションに打ち上げました (図 1)。

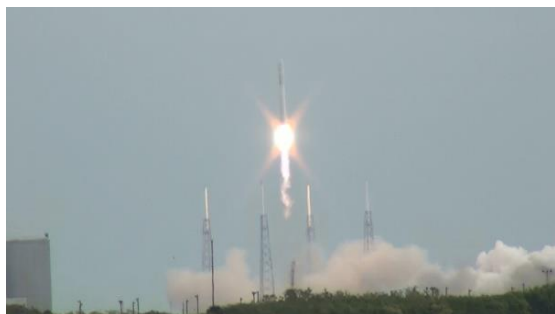


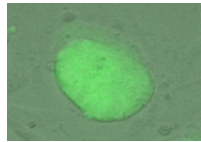
図 1. ファルコン9 ロケットによる
宇宙サンプルの打ち上げ

ES 細胞を入れた容器には物理学的線量を計測する PADLES 線量計を直接取付けました (図 2)。PADLES の解析の結果、MELFI 内に最長保存期間 (1,584 日) で細胞が受けた放射線エネルギーである全吸収線量は 560 mGy (グレイ) であり、1 日あたりの吸収線量率は 0.36 mGy/day でした。さらに PADLES で検出された各荷電粒子の軌跡上に与えるエネルギー値 (線エネルギー付与 [LET] と呼ばれる) をもとに国際放射線防護委員会の 1990 年勧告 (ICRP60) で定められた線質係数をかけ合わせて合計すると生物学的影響を予測する全線量当量は 830 mSv (シーベルト) と推定され、生物学的影響の強さを表す線質係数は 1.48 と推定されました。また、MELFI 内の線量当量率は 0.53 mSv/day となり地上約 100 倍であることも確かめられました。

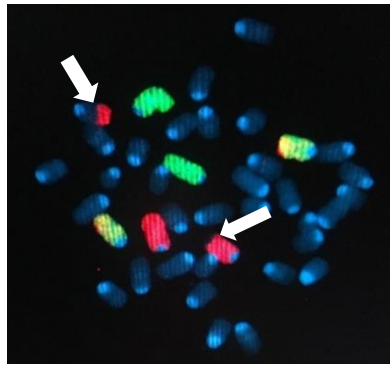


図 2. ISS 船長の若田光一宇宙飛行士による PADLES
線量計と本実験が説明された ([C] NASA, JAXA)。

地上で回収した凍結マウス ES 細胞は、融解、培養した後、染色体を展開し in situ hybridization 方法で第 1 染色体を緑、第 2 染色体を赤、第 4 染色体を黄色で染色し、染色体の転座などの異常を調べました (図 3)。その結果、ISS 内の MELFI で保存したヒストン H2AX 遺伝子欠損細胞では保存期間が長くなるにつれ染色体異常の割合が増加していることが明らかとなりました (図 4)。一方、地上で保存した細胞には、染色体異常の増加はみられませんでした。凍結した細胞では、宇宙放射線による DNA 損傷の修復がないと考えられることから、検出された染色体異常は、長期間にわたる宇宙放射線の被ばくにより蓄積した DNA 損傷を反映していると考えられます。(図 3)。



FISH (Fluorescent in situ hybridization) 法による染色体の蛍光染色と蛍光顕微鏡による染色体異常の解析



第1染色体 (緑)
第2染色体 (赤)
第4染色体 (黄)

写真では第2染色体 (矢印) の転座がみられる

図3. 宇宙放射線による生物学的影響の解析

凍結したマウス ES 細胞を融解、培養後、FISH 法により染色体に蛍光物質を結合させ、染色体の異常を解析した。

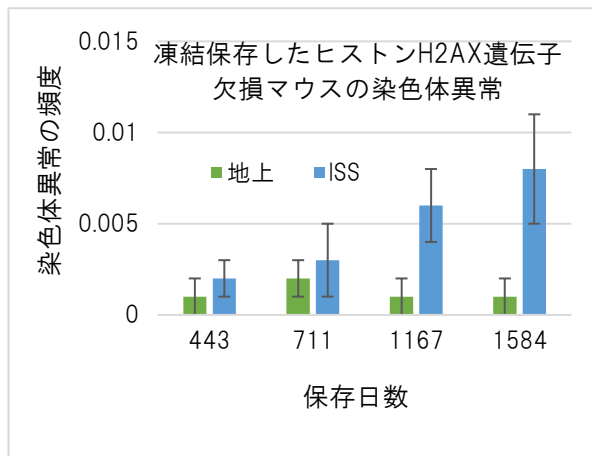


図4. マウス ES 細胞の宇宙放射線による染色体異常の増加

MELFI 内で保存した細胞と地上で保存したマウスヒストン H2AX 遺伝子欠損 ES 細胞の染色体の異常の頻度を比較した。

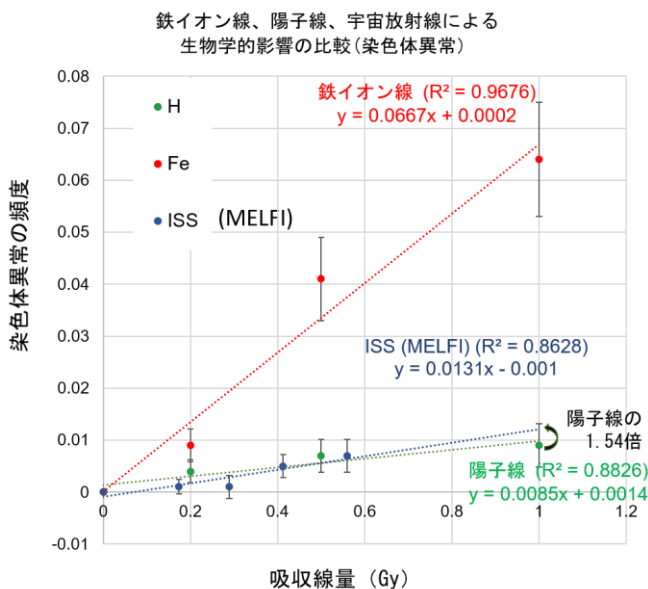


図5. 宇宙放射線の生物学的影響の解析
放射線による染色体異常の頻度を吸収線量に対してプロットした。直線の傾きが放射線の生物学的効果の強さ (線質係数) に対応すると考えられる。

研究グループは量子科学技術研究開発機構 (千葉) の重粒子線がん治療装置 (HIMAC) の共同利用研究によりマウスヒストン H2AX 遺伝子欠損細胞に陽子線と鉄イオン線を照射し染色体異常をコントロールとして測定しました。その結果を横軸には照射した吸収線量を、縦軸には染色体異常の頻度を示しました (図5)。宇宙サンプルについても、PADLES で測定した吸収線量を横軸

にプロットしました。その結果、生物学的影響の強い鉄イオン線照射では、吸収線量の増加にしたがって染色体異常の割合が急激に増加していきます。一方、陽子線でも増加しますが、その割合は低いことがわかります。MELFI で保存し宇宙放射線を被ばくした細胞は、陽子線よりやや急な傾斜を示しました。

このように、吸収線量に対する染色体異常頻度の増加の傾斜は、それぞれの放射線のもつ生物学的影響の強さの目安、すなわち線質係数に相当すると考えられます。そこで陽子線を基準の 1.0 とすると、ISS 内の MELFI での染色体異常はその 1.54 倍になることが明らかになりました。この値は PADLES による予測値である 1.48 とほぼ等しい (1.04 倍) 値であり、宇宙放射線の物理学計測に基づく予測と生物学的測定がほぼ一致することを世界で初めて示すことができました。

<今後の展開>

今回のような宇宙実験は、凍結した細胞や動物個体を宇宙で長期間保存・飼育することが必要ですが、今後、月や火星など、より強い宇宙放射線の影響が予想される未知の深宇宙の空間における有人長期滞在の安全性を確かめるために役立つと考えられます。

<資金情報>

本研究は、科研費 [課題番号 : 15K11919, 24620007, 21K12242]、日本宇宙フォーラム (JSF)、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の対象研究です。

<補足説明>

荷電粒子線：電荷をもつ電子線、陽子線、重イオン線などの電離放射線

吸収線量：単位質量の物質に放射線を照射して吸収されるエネルギー (Gy : グレイ)

線質係数：放射線の性質による生物学的な影響の強さをあらわす。X 線、電子線や陽子線などの低 LET 放射線を 1.0 とする。

線量当量：吸収線量に放射線の種類による生物に対する影響の違い(線質係数)を掛けた量 (Sv : シーベルト)

尚、本研究では、物理学的線量として放射線線量計からの LET の値を求め関連する線質係数から線量当量を計算しています。火星などの線量測定でも使用されている基本量です。

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院医学研究科実験動物学

担当：森田 隆

TEL : 06-6645-2672

E-mail : tmorita@omu.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課

担当：上嶋^{かみしま} 健太

TEL : 06-6605-3411

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp