

IIII 宇宙惑星居住科学連合の目指すもの IIIII  
(解説)

## 宇宙環境を利用した宇宙放射線研究の将来シナリオ

高橋 昭久<sup>1</sup>・日出間 純<sup>2</sup>・保田 浩志<sup>3</sup>

### Future Scenario of the Space Radiation Research Using Space Environment

Akihisa TAKAHASHI<sup>1</sup>, Jun HIDEEMA<sup>2</sup> and Hiroshi YASUDA<sup>3</sup>

#### Abstract

Space radiation is one of the major hazards for human health in space. Space radiation consists of various kinds of radiation including high energy heavy (HZE) ions; these complex radiation fields cannot be produced on the ground. In the International Space Station (ISS), exposure doses are approximately 200 times higher than on the Earth's surface. On the Moon and Mars, the radiation level is high, due to HZE ions. 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. But the future mission is now being planned to go to the Moon and Mars. It is necessary to clarify the problem of biological effect and physical dosimetry and then to resolve them as soon as possible. With this thought, here we try to present a scenario of space radiation research for next decades.

**Keyword(s):** Space radiation, Dosimetry, Space exposure experiment, Risk assessment, Radiological protection

Received 31 January 2017, Accepted 16 February 2017, Published 30 April 2017

#### 1. はじめに

今日人類は、居住や産業利用も視野に入れて宇宙に飛び出し、長期滞在に挑戦している。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。JAXA は 2030 年代に月への有人探査を水面下で計画しており<sup>1)</sup>、NASA は日本も巻き込んで火星への有人探査を検討している。

一方、磁場と大気に守られている地上とは異なり、宇宙空間は、生物学的効果の高い重粒子線 (1 粒子でも飛跡に沿って重篤な DNA 切断を引き起こす) を含めて線質の異なる混合放射線が、低線量・低線量率で降り注いでいる。深宇宙では重粒子線成分が増えるため、さらに被曝影響が危惧されている。そのため、宇宙放射線は、宇宙

における不確定なリスク要因の筆頭にあげられている<sup>2)</sup>。

宇宙放射線の物理測定技術の精度向上の必要性は勿論のこと、微小重力と宇宙放射線の相互作用の解明など、取り組まなければならない課題が多く残されている。宇宙で健やかに生きるためにも、宇宙放射線を正しく理解し、分子から個体レベルの急性影響解析や、発がんおよび次世代影響などの晩発影響解析から、宇宙放射線防護研究へとつなげていくことが期待される。

宇宙放射線の人体と環境に与える影響およびこれに関する諸科学の進歩に寄与することを目的として結成された「日本宇宙放射線研究会」の立場から、人類の宇宙での長期居住を可能とする宇宙惑星居住科学の発展を目指す「宇宙惑星居住科学連合」への期待を込めて、これまでの宇宙放射線研究の歴史とともに将来のシナリオについてまとめた。

- 1 群馬大学重粒子線医学研究センター医学生物学部門 〒371-8511 群馬県前橋市昭和町 3-39-22  
Gunma University Heavy Ion Medical Center, 3-39-22 Showa-machi, Maebashi, Gunma 371-8511, Japan.
- 2 東北大学大学院生命科学研究科生態システム生命科学専攻 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1  
Department of Environmental Life Sciences, Graduate School of Life Sciences, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan.
- 3 広島大学原爆放射線医学研究所放射線影響評価研究部門 〒734-8553 広島県広島市南区霞 1-2-3  
Research Institute for Radiation Biology and Medicine, Hiroshima University, 1 Kasumi 2-3, Minami-ku, Hiroshima 734-8553, Japan.  
(E-mail: a-takahashi@gunma-u.ac.jp)

## 2. 宇宙放射線の特徴

### 2.1 宇宙放射線とは

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。銀河宇宙線は粒子のエネルギーが非常に大きいのが特徴である。10 GeV 以上の高エネルギー粒子成分は90%が陽子, 10%弱が $\alpha$ 粒子, 1%程度が重粒子である。太陽から放出される太陽粒子線はほとんど陽子と電子で, 数%が $\alpha$ 粒子と微量の重粒子である。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高エネルギー粒子線が放出されている。補足粒子線とは太陽粒子線など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)という。

### 2.2 ISSにおける被曝予想線量

ISSは高度約400 km, 軌道傾斜角51.6度で飛行する。ISSにおける被曝の多くはSAAの下端を通過する際のもので, その内訳は低LET放射線( $\gamma$ 線や高エネルギー陽子など)と高LET放射線( $\alpha$ 線, 重粒子線, 中性子線など)が半々と考えられている。ISS内部の1日あたりの線量は0.4~1 mSvと概算されている<sup>3, 4)</sup>。これは地上における自然放射線量の約200倍に相当するが, それでも生物実験で通常用いられているのに比べて6桁も低い線量率である。ISSでの半年から1年程の長期滞在の間に浴びる放射線量は100~200 mSvと推定されており, 船外活動では船内の約5倍の放射線に曝される<sup>5)</sup>。太陽表面で大規模な爆発(太陽フレア)が生じると, 大量のプラズマ粒子が宇宙空間に放出され, ISS内部の被曝線量は数倍から数10倍近い値が加算されることになる。

### 2.3 月, 火星, 深宇宙における被曝予想線量

地球磁気圏を越えた深宇宙では, 特に重粒子線の被曝量が増す。火星表面の放射線量は, 約230 mSv/年と推定されており, 火星までの往復(片道180日×2回)と滞在期間(500日)の合計約2年半で約1 Svの被曝が予測されており<sup>6)</sup>, 発がんリスクがこれまでのミッション以上に高くなるのが危惧されている<sup>7)</sup>。また, 月は大気がないため, 放射線量は火星表面よりも高く, 約1 Sv/年を超えると推定されている<sup>8)</sup>。

## 3. 宇宙放射線の生物影響研究成果と展望

### 3.1 ヒトが宇宙飛行・滞在できるか?

宇宙開発の初期段階, ヒトが宇宙飛行できるかが大きなテーマであった。当時, 100 kmも上空の宇宙空間では宇宙放射線量がどの程度なのか未知であったとともに, 電子機器はもちろん人体への放射線の影響が懸念されていた。意図的に宇宙に送り込まれた生物は, 今から70年前の1947年にアメリカが打ち上げたV2ロケットに積まれたハエであった。高度109 kmに達した後, ハエを入れたカプセルはパラシュートを使って回収され, 生存が確認された。ハエから始まり, ネズミ, イヌ, サルと宇宙飛行させることで, 宇宙空間の過酷な条件についての知識も増し, 宇宙から無事戻って来られることを確認後, 未知の宇宙空間に人類として初めて挑むことになったのがガガーリンである。日本ではカラーテレビの放送が始まって半年程で, まだまだ白黒テレビが一般的だった1961年のことである。人間が大気圏を越えて宇宙空間で生存できることを証明した功績は大きい。

ヒトも宇宙に行けることがわかれば, 次は宇宙にどれだけ長く滞在できるかがテーマとなった。ガガーリンによるわずか108分の宇宙飛行から, 様々な生命維持装置の革新, 健康管理体制の確立によるところが大きい, 徐々に滞在記録も更新され, これまでに最長で延べ2年を超えた。宇宙滞在の長期化により宇宙放射線被曝量が増加し, 染色体異常など, 目に見えなくても宇宙放射線の傷跡が刻まれることがわかってきている。

宇宙惑星居住では, さらに長期滞在となる。現在, 各国で異なった基準や考え方で放射線被曝の規制が行われているが, それをそのまま宇宙に持ち込んで搭乗員の被曝管理に適用するよりは, ISSでどの程度の被曝量ならば安全と言えるかを明らかにすることが必要であろう。宇宙放射線に対する安全値を実験的に示すことは, 生物学的研究として早急にとりかかるとともに, これまでの研究成果の分析を急ぐべきであろう。また, 宇宙放射線防護を駆使して安心・安全に長期宇宙滞在を可能にしていくことが期待される。

### 3.2 宇宙放射線と微小重力の複合影響は?

今から50年程前, ジェミニで行われた実験で, 宇宙飛行中にわずか5時間であるが, 放射性同位元素を用いて血液照射すると, 地上で同様に血液照射したときと比べて, 染色体異常が増加することが報告されている。このことから, 宇宙環境(試料の吸収線量, 温度, 酸素などの環境要因)が放射線による染色体異常増を相乗的に増

加させると考えられてきた<sup>9)</sup>。しかしながら、不思議なことに宇宙環境因子として微小重力は注目されていなかった。翌年、再実験が試みられ、相乗効果はみられないという最終的な結論が出された<sup>10)</sup>。さらに、20年後ヨーロッパのグループはスペースシャトルに遠心機を持ち込み、宇宙の重粒子線が当たると刻印されるプラスチック板（CR39）にナナフシという昆虫の胚を挟んで、実験を行った。宇宙で遠心機を回して地上と同じ重力にすると重粒子が当たっても影響ないのが、微小重力で重粒子が当たると発生異常が大幅に増えた<sup>11)</sup>。また、ショウジョウバエを用いた実験では、宇宙滞在期間中の物理計測で推定された放射線被曝量では生じ得ないような劣性致死突然変異が子孫に高頻度現れたことから、微小重力環境が宇宙放射線の突然変異誘発頻度を高めた可能性があることが報告されている<sup>12)</sup>。他にも、宇宙放射線だけでは得られないような効果が高まるもの<sup>13, 14)</sup>、逆に、抑えられるもの<sup>15)</sup>が報告されている。しかし、これまでの多くの実験が、宇宙滞在時間も短く、被曝する放射線が少ないためか、地上サンプルと有意な差が見られない結果であった<sup>16-19)</sup>。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明らかにされていない<sup>20)</sup>。そこで、我々は疑似微小重力・高精度放射線同期照射システムを開発した。<sup>21, 22)</sup>本装置が、プラットフォームとして大いに活用されることを期待している。

宇宙空間は微小重力環境であるばかりか、月や火星では地上の1/6、1/3の低重力環境である。地上と異なる重力と宇宙放射線の複合影響を正しく評価することが緊要の課題と考えている。

### 3.3 宇宙放射線による細胞応答は？

様々な感度の高い分子レベルのアッセイ系が進歩し、宇宙放射線による細胞応答が調べられてきた。宇宙で滞在期間に応じてより多くのDNAが切れること<sup>23)</sup>、あたかも宇宙放射線の飛跡に沿ってDNAが切れることの可視化に成功している<sup>24)</sup>。我々はタンパク質の守護神として知られるHSP<sup>25)</sup>や、ゲノムの守護神として知られるp53<sup>26)</sup>が地上サンプルと比べて宇宙飛行で発現誘導することを見出している。さらに、この研究を発展させて、ISSでの初めての生物実験に携わり、宇宙での1G遠心機を利用することで、宇宙放射線、微小重力およびその相乗的な宇宙環境で誘導または抑制される遺伝子<sup>27)</sup>やタンパク質<sup>28)</sup>をリストした。機能のわからない遺伝子やタンパク質も数多くリストされており、今後の科学の進歩で明らかになることが期待される。

現在も引き続き、日本の研究者が中心となり、ISSの「きぼう」を用いて、宇宙放射線による細胞応答の研究、さらに、次世代への影響研究もすすめられている。その中でも、Stem Cells実験は<sup>29)</sup>、ES細胞をISSに長期保存して、染色体異常の解析、細胞の初期発生過程や、胚を偽妊娠マウスの子宮に移植してマウス個体を作製することで、ヒトでは実施困難な発生や次世代への影響の推定を目指している。宇宙での長期滞在にともなう健康へのリスクの予想、安全基準の策定および防御方法の開発に役立てることが期待されている。このような宇宙放射線の次世代影響研究成果の蓄積によって、将来、宇宙惑星で豊かに人類が繁栄して暮らすことの礎となるであろう。

### 3.4 宇宙放射線による障害は予測可能か？

NASAは深宇宙の火星を目指した宇宙飛行についてリスク研究を行い、(1)がん罹患率や死亡率上昇のリスク<sup>30, 31)</sup>、(2)白内障などの変性疾患上昇のリスク<sup>32, 33)</sup>、(3)認知能の低下などの中樞神経系疾患上昇のリスク<sup>34, 35)</sup>などが報告されている。最近、深宇宙に行くこと疾患リスクが高まる可能性が報告されているが<sup>36)</sup>、この結論は統計学的にサンプル数が少なく疑問をいだく報告もある<sup>37)</sup>。

## 4. 宇宙放射線の物理計測研究の展望

### 4.1 生命起源の解明

「物事を根源的かつ論理的に理解する」ことを志向する物理学の諸分野は、マイクロからマクロに至るさまざまなスケールでの物質の存在形態とその性質の解明に取り組んできた。このうち天文学や宇宙物理学の分野は、宇宙の構造や進化過程を明らかにすることに加え、自然界における生命の位置づけを問う学問としてさらなる発展を遂げつつある。その研究手法は、太陽と太陽系の諸天体、恒星と銀河系、銀河と銀河団などを精緻に観測することを基本とし、宇宙放射線（電磁波、中性子、荷電粒子等）の精緻な計測が重要な一角を占める。

20世紀に実用化されたロケットエンジンで人工衛星や宇宙探査機を大気圏外へ送り出すことができるようになり、大気の影響で地上では捉えられない微弱な電波などを観測できるようになった。そして、放射線の検出技術やコンピューター技術の急速な進展により、大量の観測データに基づく高精度の解析が可能となり、宇宙の創生から現在に至る約137億年の過程が次第に明らかになりつつある。今世紀には、太古からの「宇宙に果てはあるのか、始まりと終わりはあるのか？」という人類の根源的な問いに明瞭な答えが得られると期待される。

当該分野の次の展開として、「地球上の生命は宇宙で

孤独な存在か？」という問いに答えようとする研究が注目を集めている。太陽系外の恒星を回る惑星が存在する可能性は古くから指摘されていたが、観測精度の限界から実際にそれを初めて確認できたのは1995年のことである<sup>38)</sup>。以降20年ほどの間に、3千例を超える太陽系外惑星が銀河系内で発見された。近い将来、超高精度のセンシング技術によって、銀河系外における惑星の存在も確認できると予想される。もしそれらの惑星に生命の発生に必要な「水」が存在すれば、地球外生命の発見への大きな足掛かりになる。こうした惑星や水や生命の探査において、X線やガンマ線などの放射線をより精密に測定できる技術の開発は最重要の課題である。並行して、生命科学や放射線生物学などの学問分野と連携した、生命の誕生と進化に関する学問分野の一層の進展も望まれる。

#### 4.2 宇宙放射線に対する防護

前述したように、宇宙空間で人が活動する際には、宇宙放射線により相当に高い被曝を受ける。国際放射線防護委員会(ICRP)は、ある状況で受ける線量が100 mSv以上に達する場合には、防護措置が正当化されると述べている<sup>39)</sup>が、ISSに半年間滞在する宇宙飛行士の被曝は100 mSvを超えることも有り得る。将来の月面や火星の有人探査では、宇宙での滞在期間が長くなる分、もっと高い線量の被曝を受けると推定される<sup>40)</sup>。

宇宙飛行士を宇宙放射線による被曝から防護する上において、太陽フレアの発生に対する迅速かつ的確な対応は極めて重要である。ISSには既に宇宙天気予報等を活用した警報システムが用意されているが、フレア粒子(多くは陽子)のエネルギーが高く付加される被曝線量が大きくなる場合ほど、警報による通告から大量の粒子が到達するまでの時間は短くなり、被曝を効果的に低減することが難しくなる。この問題に対しては、より早く宇宙船に到達する高エネルギー放射線の流れを自動で検知し解析するシステムの実用化等により、フレア粒子の通過量がピークを成す時刻や船内の線量分布の動的変化を十分な時間的余裕を持って予測し通知できるようにする必要がある。また、太陽フレア粒子の通過時における船内の任意の場所における線量率の変化を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が望まれる。

被曝低減に向けた対応と並行して取り組むべきこととして、ISS内で行われる科学実験で得られた結果等に基づき、高エネルギーの宇宙線粒子が生体に及ぼすリスクの評価手法の確立、宇宙での被曝に係る線量評価法の標準化、そして、それらの新たな知見を包括した放射線防護体系の高度化等も重要な研究課題である。

#### 5. 曝露部研究の展望

ISS「きぼう」の船外曝露部や、人工衛星などはオゾン層で太陽光が遮られることがないので、原始地球上生命の誕生と進化の舞台となった「オゾン層形成前の原始地球光環境」、さらに、近年危惧されている「オゾン層破壊後の未来地球光環境」のモデル実験場になると考える<sup>41)</sup>。

地球で生まれた生命は、太陽放射光と密接に関わり、その誕生から進化の過程で上手く利用してきた。約35億年前に太陽光を利用して光合成を行う生物が誕生し、光合成の副産物としての酸素が徐々に海中・大気中に放出された。この酸素からオゾン層が形成され、有害な紫外線を遮ることで、地上への生物の進出を可能にしたと考えられている。しかし、残念なことに文明の発達はオゾン層を破壊することになった。はたしてオゾン層がなくなっても、生命は存続できるのであろうか。オゾン層の減少は予測できても、地上での人工光源では再現することはできない。宇宙での曝露部を利用し、オゾン層のない太陽放射光に曝すことで解決することができる。このような研究は、生命の進化の初期過程や生命が生き長らえるにはどの遺伝子の獲得が必要であったのか、さらに地球の環境問題からもこの宇宙曝露部利用実験が大きな意義をもつものと考えている。太陽放射光に各種生命体を曝すことによって、生命体がオゾン層形成後に陸上進出したか否かを想定することができるであろう。さらに、地球のオゾン層破壊後、それぞれの生命体の生育限度を知ることでもある。

人類が宇宙という微小重力かつ特殊な宇宙放射線環境へと活動の場を広げつつある今日、宇宙放射線、そして微小重力環境が生命体維持に及ぼす影響を解析するために、曝露部研究は、今後一層重要なファシリティとなるであろう。

#### 6. おわりに

人類が宇宙に進出するためには、低線量・低線量率で様々な線種・線質の宇宙放射線を微小重力環境下、被曝し続ける生物影響を「正しく」把握し、障害を減らすための防護策が必須であることは言うまでもない。しかし、医療のための放射線被曝は現状では避けがたいと思われる。一方、地球温暖化や化石燃料の重要性を考えると、むやみに化石燃料をエネルギー源として使うことも問題である。いかに安全に原子力エネルギーを平和利用するかが重要であると考えられる。福島原発事故以降、放射線による人体影響に対する国民の関心は非常に高い。原子力利用に携わる人々や周辺住民の健康維持に必要な放射線の安全域を示すことに最善を尽くす必要がある。

ISS では、常時宇宙飛行士が滞在して様々な科学研究がなされている。さらに、月面や火星への有人ミッションも計画されている。はたして人間はそのような宇宙空間で長期にわたり滞在することに何の問題もないのだろうか。JAXA では 1990 年代から、新しい宇宙放射線計測センサーなどの技術開発が積極的に進められ、物理計測の精度は格段に進歩した。しかしながら、生物影響に関しては、まだまだ多くの課題を抱えている。ISS での長期滞在にとともに、どの程度の被曝量ならば安全と言えるか明確にすることが大切である。

また、宇宙放射線と生物のかかわりを調べることは生命の起源や地球環境への適応、進化の本質的なしくみの解明につながるであろう。さらに、宇宙を知ることが地球をより知ることにになり、地球環境の保全、世界平和の希求の啓蒙につながることを期待する。科学者が宇宙実験に取り組む姿勢を通して、地球の未来を担い、宇宙惑星環境に居住する可能性のある次世代の子ども達に、夢と希望を与えたい。さらに、科学することの楽しさを知ってもらい、日々の生活の中でも物事の真偽を科学的に判断できるきっかけを提供し、科学立国の復興に貢献することを期待している。

物事を「正しく」理解することの大切さを宇宙放射線研究は教えてくれている。

## 謝辞

本文の一部は、JSPS 科研費 JP16H01180 の助成を受けた研究を基礎にしています。

## 参考文献

- N. Sato: JAXA-SP-08-013 (2009) 17.
- F.A. Cucinotta, M.H. Kim, V. Willingham and K.A. George: *Radiat. Res.*, **170** (2008) 127.
- T. Doke, T. Hayashi, J. Kikuchi, N. Hasebe, S. Nagaoka, M. Kato and G.D. Badhwar: *Nucl. Inst. Methods Phys. Res.*, **A365** (1995) 524.
- NASDA: Report of Manned Support Committee on the Subcommittee of Space Radiation Exposure Management, (2001) (in Japanese).
- A. Nagamatsu, K. Murakami, K. Kitajo, K. Shimada, H. Kumagai and H. Tawara: *Radiat. Meas.*, **59** (2013) 84.
- D.M. Hassler, C. Zeitlin, R.F. Wimmer-Schweingruber, B. Ehresmann, S. Rafkin, J.L. Eigenbrode, D.E. Brinza, G. Weigle, S. Böttcher, E. Böhm, S. Burmeister, J. Guo, J. Köhler, C. Martin, G. Reitz, F.A. Cucinotta, M.H. Kim, D. Grinspoon, M.A. Bullock, A. Posner, J. Gómez-Elvira, A. Vasavada, J.P. Grotzinger and MSL Science Team: *Science*, **343** (2014) 1244797.
- M. Durante and F.A. Cucinotta: *Nat. Rev. Cancer*, **8** (2008) 465.
- Y. Jia and Z. W. Lin: *Radiat. Res.*, **173** (2010) 238.
- M.A. Bender, P.C. Gooch and S. Kondo: *Radiat. Res.*, **31** (1967) 91.
- M.A. Bender, P.C. Gooch and S. Kondo: *Radiat. Res.*, **34** (1968) 228.
- H. Bücker, G. Horneck, G. Reitz, E.H. Graul, H. Berger, H. Hoffken, W. Ruther, W. Heinrich and R. Beaujean: *Naturwissenschaften*, **73** (1986) 433.
- M. Ikenaga, I. Yoshikawa, M. Kojo, T. Ayaki, H. Ryo, K. Ishizaki, T. Kato, H. Yamamoto and R. Hara: *Biol. Sci. Space*, **11** (1997) 346.
- Y. Gao, D. Xu, L. Zhao, M. Zhang and Y. Sun: *Int. J. Radiat. Biol.*, **91** (2015) 531.
- D. Xu, Y. Gao, L. Huang and Y. Sun: *Life Sci. Space Res.*, **1** (2014) 44.
- Y. Kobayashi, M. Kikuchi, S. Nagaoka and H. Watanabe: *Biol. Sci. Space*, **10** (1996) 97.
- A. Takahashi, K. Ohnishi, S. Takahashi, M. Masukawa, K. Sekikawa, T. Amano, T. Nakano, S. Nagaoka and T. Ohnishi: *Adv. Space Res.*, **28** (2001) 555.
- H.D. Pross and J. Kiefer: *Radiat. Environ. Biophys.*, **38** (1999) 133.
- T. Ohnishi, A. Takahashi, K. Okaichi, K. Ohnishi, H. Matsumoto, S. Takahashi, H. Yamanaka, T. Nakano and S. Nagaoka: *Biol. Sci. Space*, **11** (1997) 29.
- G. Horneck, P. Rettberg, S. Kozubek, C. Baumstark-Khan, H. Rink, M. Schäfer and C. Schmitz: *Radiat. Res.*, **147** (1997) 376.
- F. Yatagai and N. Ishioka: *Life Sci. Space Res.*, **3** (2014) 76.
- H. Ikeda, H. Souda, A. Puspitasari, K.D. Held, J. Hidema, T. Nikawa, Y. Yoshida, T. Kanai and A. Takahashi: *Biol. Sci. Space*, **30** (2016) 8.
- H. Ikeda, H. Souda, A. Puspitasari, K.D. Held, J. Hidema, T. Nikawa, Y. Yoshida, T. Kanai and A. Takahashi: *Life Sci. Space Res.*, **12** (2017) 51.
- T. Ohnishi, K. Ohnishi, A. Takahashi, Y. Taniguchi, M. Sato, T. Nakano and S. Nagaoka: *J. Radiat. Res.*, **43** (2002) S133.
- T. Ohnishi, A. Takahashi, A. Nagamatsu, K. Omori, H. Suzuki, T. Shimazu and N. Ishioka: *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **390** (2009) 485.
- T. Ohnishi, K. Tsuji, T. Ohmura, H. Matsumoto, X. Wang, A. Takahashi, S. Nagaoka, A. Takabayashi: *Adv. Space Res.*, **21** (1998) 1077.
- T. Ohnishi, N. Inoue, H. Matsumoto, T. Omatsu, Y. Ohira and S. Nagaoka: *J. Appl. Physiol.*, **81** (1996) 183.
- A. Takahashi, H. Suzuki, K. Omori, M. Seki, T. Hashizume, T. Shimazu, N. Ishioka and T. Ohnishi: *Int. J. Radiat. Biol.*, **86** (2010) 669.
- A. Takahashi, H. Suzuki, K. Omori, M. Seki, T. Hashizume, T. Shimazu, N. Ishioka and T. Ohnishi: *J. Radiat. Res.*, **53** (2012) 168.
- T. Morita: <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/stemcells/> (in Japanese). (19 Apr. 2017)
- F.A. Cucinotta: *PLoS ONE*, **10** (2015) e0120717.
- F.A. Cucinotta: *PLoS ONE*, **9** (2014) e96099.
- F.A. Cucinotta, F.K. Manuel, J. Jones, G. Iszard, J. Murrey, B. Djojonegoro and M. Wear: *Radiat. Res.*, **156** (2001) 460.
- J.A. Jones, M. McCarten, K. Manuel, B. Djojonegoro, J. Murray, A. Feiversen and M. Wear: *Aviat. Space Environ. Med.*, **78** (2007) A56.
- F.A. Cucinotta, M. Alp, F.M. Sulzman and M. Wang: *Life Sci. Space Res.*, **2** (2014) 54.
- V. K. Parihar, B.D. Allen, C. Caressi, S. Kwok, E. Chu, K.K. Tran, N.N. Chmielewski, E. Giedzinski, M.M. Acharya, R.A. Britten, J.E. Baulch and C.L. Limoli: *Sci. Rep.*, **6** (2016) 34774.
- M.D. Delp, J.M. Charvat, C.L. Limoli, R.K. Globus and P. Ghosh: *Sci. Rep.*, **6** (2016) 29901.
- F.A. Cucinotta, N. Hamada and M.P. Little: *Life Sci. Space Res.*, **10** (2016) 53.
- M. Mayor and D. Queloz: *Nature*, **378** (1995) 355.
- ICRP: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publ. 103, *Annals of ICRP*, **37** (2007), Pergamon Press, Oxford.
- NCRP: Radiation Protection Research Recommendations for Missions Beyond LEO. Report **153** (2006), NCRP, Bethesda.
- A. Takahashi and T. Ohnishi: *Biol. Sci. Space*, **18** (2004) 255.