

宇宙放射線研究の再構築とその展望

奈良県立医大・生物 大西武雄、高橋昭久

Reconstruction and Its Future in Space Radiation Research

Takeo OHNISHI and Akihisa Takahashi

Nara Medical University School of Medicine, Shijo-cho 840, Kashihara Nara 634-8521

e-mail: tohnishi@naramed-u.ac.jp

Abstract: In recent, NASA has changed space program at several points in space science. One is space travel to Moon instead of Mars. Another is the stopping of large centrifugator in International Space Station. Therefore, we have to reconstruct the space experiments about space radiation. Though the change of these space projects causes, it is quite important to study about effects of space radiation on human body. Since human being expands to space in near future, therefore, the effects of space radiation on human health will be analyzed from an aspect of molecular levels by the application of advanced techniques of molecular biology.

1. はじめに

クリントン大統領は火星へ人を送ると宣言した。その後国際宇宙ステーション (ISS) の建設が進み、数年後には宇宙研究への貢献が期待されていた。しかし、2003 年スペースシャトルのコロンビア号は大気圏内突入時に耐熱セラミックスの不具合により、あまりにも悲惨な空中分解事故がテレビで放映された。この事故にともない、米国 NASA は今後の宇宙計画の方向性の転換を図り、火星への計画を断念し、月を目標とすることを発表した。しかし、宇宙計画の方向性の転換を図っても、人類が長期間宇宙環境で生活することには間違いはない。宇宙環境の四大特徴は、良好な視界・高真空・微小重力・宇宙放射線である。太陽での核融合のみならず、超新星の爆発により銀河の彼方からやってくる高エネルギーの陽子線や重粒子線は、地球表面では磁場と大気によって防がれている。しかし、地球を離れた宇宙空間ではそれらの宇宙放射線に曝される環境である。宇宙放射線は宇宙ステーションの金属の壁も貫き、宇宙飛行士の体に達する。宇宙放射線が眼球や視神経を貫くと、アイフラッシュと呼ばれる白い火花が目の中に飛び散る。他の組織や臓器に宇宙放射線が飛び込んできたときの影響が懸念される。我々は、スペースシャトルやミールに搭載した生物材料で宇宙放射線の生物影響研究を行ってきた[1, 2]。ここでは放射線生物学者の立場から、「宇宙放射線による基礎生物学研究の重要性」をまとめた。

2. 宇宙放射線による生体影響研究

宇宙放射線による人体影響を解明するために、ヒトに直接放射線を照射して研究することが不可能なのでさまざまな生物材料を用いて、ヒトへの放射線影響を類推してきた。

2-1. ISS を利用した長期低線量率宇宙放射線被ばくの生物影響研究

従来の宇宙研究はスペースシャトルを利用した宇宙実験であり、実験期間も最大 2 週間以内に終了できるテーマが選定されてきた。短いフライト

では 1 週間以内のもあった。しかし、今後展開されていく 2010 年からの ISS では半年に渡る長期間の宇宙実験も対象になるであろう。しかし、生物学・医学からの提案ではその研究材料のメンテナンスが同時に要求されるので実験がしやすくなるともいいがたい。長期間の実験がいかに適しているかの目標が要求されることとなる。地上研究では長期間の放射線照射が可能な設備が設置されて、低線量率放射線被ばくの実験系が確立しつつある[3]。

2-2. セントリフュージを利用した微小重力と放射線の相互作用による生物影響研究

宇宙実験が曝される環境は宇宙放射線と微小重力である。宇宙実験で得られた実験結果は常に、その 2 つの環境を念頭に入れなければならない。果たして、宇宙放射線の生物影響に微小重力が影響を与えるのかどうかは大きな問題である。特にクルーの健康から考えると、いかに放射線影響から身を護り、健康を維持していくかが大きな課題となる。正確な宇宙放射線影響を研究するには宇宙空間に 1G となる環境を設定する必要がある。まさにそれを狙ったのがセントリフュージ装置である(図 1)。これさえあれば、宇宙放射線の単独影響、相乗的影響が解析できるのである[4]。この装置は ISS では、当初日本の設備として計画されていたが、すでに計画変更を強いられる状況下にある。幾度も要求書を、NASA や関係諸機関に提出してきたが、設置の可能性は極めて低くなりつつある。現在では中型、小型へと計画を変更せざるを得ないという状況であろうか。

宇宙環境を地上で擬似的に再現した実験装置に 3D や 2D クリノスタット装置がある。放射線照射してすぐその装置を利用する場合や、その装置そのものを放射線被ばく環境下に設置するなどの工夫をしている。これにより、生物影響への微小重力と放射線の相互作用があるのか否かがわかる。宇宙実験においても数多くの研究成果が発表されているが、どの現象で放射線影響を測定するのかによっても微小重力影響が異なると判断できる。

さらなる追求はその影響発現のメカニズムまで解明する必要がある。

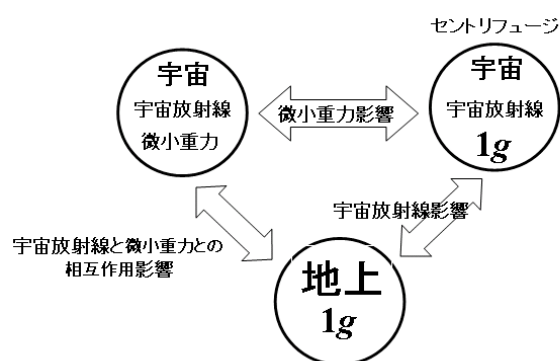


図1 宇宙放射線の生物影響に微小重力が影響するのかを分析する。宇宙空間で1gを再現するセントリフュージ装置を準備することによって微小重力と宇宙放射線の影響を分けることができる。

2-3. 曝露部を利用した太陽紫外線を含む放射線による生物影響研究

生命が地球に誕生したのは宇宙放射線、太陽紫外線が地表まで達していた地球が誕生して間もない約40億年前のことである。当時の地球は嫌気状態で現在よりも多くの太陽エネルギーが地表に達しており、そのエネルギーこそが生命誕生の原動力になったと信じられている。太陽エネルギーは地球の海水中の無機物から有機物を生成し、生命体を構成する化学物質を供給した。それらを得ることにより、自分と全く同じ生命体を複製することができる現在の地球生命体の子孫が誕生したと考えられている。それは共通の遺伝子コドン表を解読する生命体であった。40億年の歳月の後、今日のような多様性に満ちた地球生命体へと進化してきた。かくなる生命誕生と進化の物語に太陽エネルギーがいかにかわって来たかを実験できる環境はもはや地上ではなく、宇宙空間である。ISSに太陽に曝露できる空間（曝露部）を設定することによって、生命誕生、進化の研究テーマが成しえるものと大いに期待している[5]。

地球に太陽エネルギーを利用する光合成植物の誕生後、それらが放出する酸素から太陽紫外線によりオゾンが生成された。オゾン層が形成されたことにより、地上の紫外線のうちUVC（エネルギーの高い短波長の紫外線）が遮へいされたので、植物、動物が水中から地上に這い上がってきたと考えられている。近年人類が生産してきたフロンガスや塩素をはじめとするオゾン層を破壊する化学物質によって、地上に到達する紫外線量が増加することになり、多くの植物、動物に悪影響を与えてしまうこととなる。オゾン層が破壊された環境はまさにISSの曝露部の環境でもあり、地球環境保護の研究にも大いに役立つことを期待している[5]。

2-4. 地上における重粒子線照射装置を利用した高LET放射線と低LET放射線の生物影響研究

宇宙放射線の成分にはエネルギーの高い放射線

（高LET；一定距離あたりに与えるエネルギーが高い放射線）が含まれている。低LET放射線に比べて、高LET放射線による生物影響、人体影響は非常に高い[6]。このことは宇宙放射線が危険であることを意味している。一方、この性質を利用して、がん治療にすばらしい成績を残しつつあるのが重粒子線がん治療である[7]。高LET放射線と低LET放射線の生物影響研究を積極的に進めることはがん研究ばかりか、その治療に携わる医療従事者の健康管理にも、大いに貢献すると期待している。

2-5. 地上における低線量率放射線照射装置を利用した線量率効果の生物影響研究

宇宙環境では低線量率放射線環境で長期間被ばくしている。地上では放射線作業従事者や飛行機などの搭乗員も同じ環境下での労働といえる。原爆被ばく者のデータを基礎に彼らの健康管理がなされている。いまだ低線量や低線量率による人体影響の実験的証拠が示されていない。宇宙研究を進めるにあたり、実に彼らの健康をも考えた被ばく線量限度が示すことができるであろう。また、他の地域よりも自然放射線量が高い、高バックグラウンド地域が、中国、インド、イラン、ブラジルに存在する。彼らの放射影響を疫学的に研究することもこの研究テーマに大いに役に立つ。

2-6. 地上におけるマイクロビーム照射装置を利用した生物影響研究

近年放射線発生装置の研究も飛躍的な進歩をとげている。細胞の核にのみ照射したり、細胞質にのみ照射したりする技術が確立してきている。また、一つの細胞にのみ照射し、その隣の細胞に与える影響を調べることができる（バイスタンダー効果）。宇宙放射線に被ばくする状況をすでに地上で再現することができるようになった[8]。このような技術は放射線による人体影響を解明するのに大いに役に立つ。

3. 放射線生物影響としての宇宙研究

放射線影響研究は近年の分子レベルでの研究手法の発達とともにその科学的論拠に整理がつくように進歩してきている。

3-1. 分子レベルからのアプローチ

遺伝子の分析法、抗体の開発など企業による研究試薬の進歩がめざましい。ノーベル賞級の新技術の発明の数年のうちに実用化されている感がある。放射線生物学分野でも、DNA損傷・DNA修復機構・遺伝子発現・翻訳後修飾・シグナル伝達など放射線照射後に細胞、個体が応答する現象の解明に分子レベルからの貢献がめざましい。放射線に応答するいくつかの生体分子が発見されてきた。それらの分子のはたらきははじめから、挙動、役割の終了までを分子レベルで説明できるようになってきた。それぞれの研究者がそれぞれの重要な生体内成分特にタンパク質に注目してきている。そ

これらの多くの分子の相互作用、関係などが生体内シグナルトランスダクションとして網目のように関係をもっていることまで解明されつつある。放射線が照射される前と、照射後の生体内化学反応が時間とともに変わっていく様子は映画のストーリーを追うがごとく興味が尽きない。しかも正常細胞とがん細胞との間での物語の違いはがん治療からみて、大いに役立つ現象である。

3-2. 細胞レベルからのアプローチ

放射線が生体に照射されてから細胞は分子レベルで応答し始めた後、12時間、24時間さらにその後細胞には何が起ころのである。放射線量が大きすぎるので細胞はアポトーシスやネクロシスで死んでしまうのか、それとも細胞分裂を停止させてDNA修復酵素がはたらく環境をそろえ、なんとか生き残ろうともがくのである。例えば、生き延びたとしても放射線による遺伝子・膜・タンパク質などの分子には異なった構造変化として傷が固定されてしまうのか。塩基レベルでの変化・塩基配列・欠損・重複なのか、染色体レベルでの異常として固定されるのか。いや、むしろそのようなものでなく、細胞が次にくる放射線に適応して強くなってしまうのか。生体を構成する細胞の分化能に影響はなかったのか。細胞の寿命や老化が早くなってしまうのか。いや、がん化してしまうのか。実に放射線被ばく後の表現系には細胞レベルでも多様に富んでいる。

3-3. 組織・器官・個体レベルからのアプローチ

宇宙放射線による組織・器官レベルでの組織構築、器官形成、さらに個体レベルでの免疫、防護修復系、急性障害（造血系、消化器系、神経系）や晩発障害（白内障、発がん、老化、次世代への影響）、学習や記憶に及ぼす影響など、興味の尽きない問題が残されている。

3-4. 集団レベルからのアプローチ

宇宙空間は宇宙放射線ばかりでなく、微小重力環境、閉鎖空間である。個体同士のコミュニケーションなど、集団における行動、生殖に宇宙空間の特殊な複合環境がどのような影響をもたらすであろうか[9]。さらに、生命誕生や進化にかかわる壮大な問題の究明に宇宙実験は大いに役に立つであろう。

4. 宇宙放射線防護研究

上空数百 km で地球を周回する宇宙ステーションの船内における放射線の強度、すなわち線量率は地上の数百倍になることが観測されている。宇宙飛行が原因で健康を損ねたという事態を未然に防ぐには、必要な防護策を正確な科学的知見に基づくことが重要である。

4-1. 宇宙放射線被ばく線量の計測

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。特に、宇宙空間では大気で遮られていたエネルギーの高い銀河宇宙線に曝さ

れる。この銀河宇宙線とは、陽子、ヘリウム、鉄といった重荷電粒子が主成分で、核子あたり数百 MeV にピークを持った幅広いエネルギー分布を構成している。核子あたり GeV を超える非常に高いエネルギーの成分も相当含まれている。こうした高いエネルギーを持った粒子は宇宙船の壁を貫通してくる。ただし、これらの粒子は船壁を通過する際に、主に電子との衝突によって次第にエネルギーを失い、物質を構成する原子核との衝突で壊れていく。その結果として、遮へいが厚くなるに従って、重たくて高いエネルギーを持った粒子の割合は減り、軽くて比較的エネルギーの低い粒子が高い割合を占めるようになる。船内で宇宙飛行士が通常被ばくする核種は、陽子、ヘリウム、中性子であると考えられる。一方、船外活動時は、重い粒子、特に鉄イオンによる被ばくの割合が大きくなると考えられる。スペースシャトルなど、これまでの多くのミッションでは、磁気圏の内側を主に周回するので、捕捉放射線帯の粒子や太陽からの粒子による被ばくは気にしないでよかった。一方、ISSの軌道になると、軌道傾斜角の関係で南大西洋上空の磁力線が垂れ下がった南大西洋異常（SAA: South Atlantic Anomaly）と呼ばれる放射線強度の非常に高い領域を通過することになる。ISSは1日に数回この領域を通るが、その際には放射線帯に捕捉された陽子のフルエンスが増加し、線量率が顕著に高くなることが観測されている[10]。

ISSの建設に先立ち、ISSとほぼ同じ軌道の宇宙飛行（STS-91）において、等身大の人体ファントムを用いた計測が実施され、組織・臓器の線量と実効線量を実測に基づいて評価されている[11]。また、医療用重粒子線加速器（HIMAC）等を用いて固体線量計の重荷電粒子線に対する応答を系統的に調べるとともに、固体線量計を組み合わせる生物学的に等価な線量を簡便に評価する手法が提案、宇宙ミッションで検証されている。

どのくらいのエネルギーのどんな粒子が宇宙で被ばくするのかがわかってこそ、その防護策を検討することができるので、今後も精度の高い計測技術の進歩が期待されている。特に、宇宙放射線による累積およびリアルタイム人体影響推測システムの開発が宇宙放射線影響研究に大いに役に立つ。

4-2. 生物学的効果比と線質係数に関する研究

宇宙放射線に含まれる高 LET 放射線（ α 線、重粒子線、中性子線など）は X 線や γ 線に比べて生物影響の「めやす」を表す RBE（相対的生物効果比）が高い。RBE はある生物学的変化をもたらすのに必要な標準 γ 線に比べて、異なった線質で同じ量の変化をもたらすのに必要な線量の逆数で表されている。RBE は放射線の線質よりも LET により大きく依存している。低 LET 放射線と同じ線量の高 LET 放射線を被ばくした場合、生物影響が大きく現れる（RBE が高い）ことも重大であるが、

高 LET 放射線によってもたらされる遺伝子レベルでの質の違いも重大であることがわかってきている。さらに、高 LET 放射線の影響はそのエネルギー域や着目する生物指標によって大きく異なることから、物理的な吸収線量からだけでは予測することができない。放射線防護の立場からは過去の RBE データの最大値に近い値を線質係数 (Q 値) として定め、吸収線量 (Gy) との積で表した線量 (Sv) という概念が用いられている。しかし、宇宙放射線に含まれる高 LET 放射線 (特に鉄粒子) の RBE のデータはまだ不足している。今後、高 LET 放射線の生物影響について、さらなる科学的解明により、宇宙におけるリスクの推定に大いに役に立つ。

4-3. 宇宙放射線被ばく予報システムの開発

太陽は 11 年周期で活動しており、宇宙放射線源である太陽高エネルギー粒子現象 (SPE: Solar Particle Event) 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。また、太陽活動周期ばかりではなく、突発的に発生する SPE の予測技術を開発が有人宇宙活動を安全に遂行するためには重要であることが提唱されている[12]。

宇宙放射線被ばく予報システムの開発は、有人宇宙活動ばかりではなく、衛星機器、航空機搭載機器、地上の電子機器、通信、気候変動などにも密接にかかわっており、我々の生活にも大いに役に立つ。

4-4. 放射線防護法の開発

放射線による人体影響を考える場合、時間・距離・遮へいの 3 つの原理を応用することで防止できることは常識である。時間に関して、飛行日数の制限などによって、宇宙飛行士の放射線障害を防護することは可能である。実際、このような観点から、生涯被ばく線量から運用制限することも検討されつつある。距離に関して、SAA などの補足粒子線に対しては、高度や傾斜角度など飛行計画の検討で回避することは可能である。しかし、太陽粒子線や銀河宇宙線に対しては距離のとりようがない。遮へいに関して、アルミニウム相当の遮へい厚は、飛行船の壁で 10g/cm² 程度、船外活動における宇宙服で 1-1.5g/cm² 程度である。宇宙飛行士を守るためにはその壁や宇宙服を厚くすることには、燃料費の節約や作業性などから大きな制約がある。そこで放射線防護の観点からは、船外活動については必要最低限にして、ロボットアームなどで代替することが必要であろう。また、宇宙放射線被ばく予報システムにより、放射線強度が高い時は速やかに宇宙船内に退避することが必要であろう。宇宙船内では放射線強度が高い時みならず、睡眠時など船内活動時間帯以外は船内のシェルターに退避することも必要であろう。総重

量を抑えたコンパクトで、放射線種ごとに応じたシェルターの開発が望まれている。このような放射線防護法の開発研究は、人類の長期宇宙滞在実現のため大いに役に立つ。

5. おわりに

ISS や惑星探査による長期滞在にともない、どの程度の被ばく量ならば安全と言えるか明確にすることが大切である。宇宙放射線に対する安全値を実験的に示すことは、地上のこれまでの放射線被ばくと違い、人の疫学的データがほとんど無いことから困難な側面もある。そこで宇宙放射線生物学的研究として真剣に、しかも早急にとりかかるとともに、これまでの宇宙実験での研究成果の分析も急ぐべきであろう。宇宙放射線による基礎生物学的研究は 21 世紀の放射線生物学者に与えられた命題であろう。危険性をはっきり認識した上で、有人宇宙飛行で得られるメリットをしっかりと押さえておくことが何よりも重要であろう。

参考文献

- 1) 大西武雄; 宇宙放射線生物学, (株)アイプリコム, 樫原, pp. 1-63 (2001)
- 2) Ohnishi T., Takahashi A., Ohnishi K.; Studies about space radiation promote new fields in radiation biology, *J Radiat Res*, **43**, S7-S12 (2002)
- 3) Takahashi A.; Pre-irradiation at a low dose-rate blunted p53 response, *J Radiat Res* **43**, 1-9 (2002)
- 4) 高橋昭久, 大西武雄; 宇宙放射線の生物影響研究におけるセントリフュージの重要性, *宇宙生物科学*, **15**, 167-171 (2001)
- 5) Takahashi A., Ohnishi T.; The significance of the study about the biological effects of solar ultraviolet radiation using the Exposed Facility on the International Space Station, *Biol Sci Space*, **18**, 255-260 (2004)
- 6) 大西武雄; 宇宙の重粒子線による生物影響, *宇宙からヒトを眺めて-宇宙放射線の人体への影響*, 研成社, 東京, pp. 55-62 (2004)
- 7) 高橋昭久, 大西武雄; 重粒子線がん治療における基礎研究のねらい, *放射線生物研究*, in press (2006)
- 8) Matsumoto H., Takahashi A., Ohnishi T.; Radiation-induced adaptive responses and bystander effects, *Biol Sci Space*, **18**, 247-254 (2004)
- 9) 高橋昭久, 大西健, 大西武雄; 宇宙空間における動物の行動と発生, *化学と生物*, **37**, 404-407 (1999)
- 10) 保田浩志; 宇宙で被ばくする放射線の量, *宇宙からヒトを眺めて-宇宙放射線の人体への影響*, 研成社, 東京, pp. 21-32 (2004)
- 11) Yasuda H., Badhwar G.D., Komiyama T., Fujitaka K.; Effective dose equivalent on the ninth Shuttle-Mir mission (STS-91), *Radiat Res*, **154**, 705-713 (2000)
- 12) 富田二三彦; 宇宙放射線は予測できるか, *宇宙からヒトを眺めて-宇宙放射線の人体への影響*, 研成社, 東京, pp. 123-137 (2004)