

＜講演録＞

宇宙医学の現状と未来

The Present State and Future of Space Medicine

瀧澤玲央*

Reo Takizawa

I. はじめに

自分はファーストガンダムが放送された 1979 年に生まれ、ガンダムとともに育った世代である。本業は外科医であるが、宇宙医学の研究をする研究者でもある。今後、多くの人が宇宙に行く時代になると、健康的な宇宙飛行士だけではなく、疾患を抱えた方も宇宙に行くことになる。そうしたときに安全かつ健康的な生活ができるような研究を進めている。

ガンダムの冒頭のナレーションで、人類が宇宙に行き、そこで子を産み、育て、そして死んでいった、というのがある。ここに述べられている宇宙世紀という未来は、我々の心を躍らせた。また、機動戦士ガンダムに出てくる主人公たちは基本的には若者中心で、その中で葛藤を抱えながら苦難を乗り越えていくという物語に、多くの人々が心を打たれたのではないかと思う。そして、人間がどこまで進化していけるのかという問いを人々に投げかけたアニメ作品であったと思う。今、その問いに私たちが答えようとしている時代に入っている。

NASA のアルテミス計画では、4 名程度の宇宙飛行士が 1、2 ヶ月滞在するということを念頭に考えられている。そして、今の宇宙プロジェクトは、国家だけでなく、さまざまな民間企業が宇宙開発に乗り出している。日本でもトヨタ自動車株式会社と JAXA がルナクルーザーを開発している。宇宙を舞台、人類が生活圏を広げていくというような時代というのは、もうすでに始まっていると言っても過言ではないと考える。さらに、世界宇宙経済は 4,150 億ドルに達しているという SIA（米国衛星産業協会）の推計もある。これらを考えると、ガンダムの描く未来社会は現実に動き始めているのではないかと思う。

II. 宇宙という極限環境

人類が宇宙に暮らしていくということを考えると、宇宙という極限状態、極限環境というものが一体どういうものなのかなというものを考えていかないといけない。

まずは宇宙の定義だが、一般的には、大気がなくなる地上から 100km 以上のことを宇宙と定義することが多い。なお、アメリカ空軍は、国防の観点から地上 80km を宇宙としているなど別の定義もあり、環境上もどこからが宇宙という境が明確にあるわけではない。宇宙環境の特徴的な条件としては、重力がないこと。低軌道、国際宇宙ステーション (ISS) が飛んでいる軌道 400km の高さにおいては、微小重力という環境で、重力がほとんど存在しないという環境になる。もちろん人為的な操作をしない限り空気もないが、ISS に関しては地上と同じような 1 気圧、21%の

* 国際医療福祉大学宇宙医学研究会

酸素、29%の窒素で大気構成がされている。他方で、木村真一先生が講演されていたように、二酸化炭素濃度というのがよくわかっていないというのが現状。また、限られた人間でしか生活しないので、閉鎖空間というのが人的なストレスとなり、精神的な負荷も与える。さらに、地上と異なり、宇宙では放射線から守ってくれるものがないため、高放射線被曝環境である。

では実際に人体においてどのような変化が起きるか。重力がなくなると、足の方に溜まっていた血液が体幹に戻ってくる。体幹に戻ってくると顔がむくんで、体に入っている水分はどんどん尿として捨てられていってしまう。よって、宇宙空間に行くと必ず人類は脱水に陥る。脱水に陥って地上に戻った際には血が足りないわけであるから急には立ち上がれず、起立性低血圧というものが起きてしまう。そういうことが問題となる。そのため宇宙飛行士は基本的に地上に戻る前に約2リットル程度の水分を補充してから戻ることになる。これは一例だが、そのほかさまざまな問題がある。放射線の影響から遺伝的な問題も危惧されるが、生殖の問題に関してはほとんどわかっていない。消化管に関しても吸収が弱くなるのではないかという疑念もあるし、腸内フローラという細菌層の変化も近年指摘されている。

Ⅲ. 宇宙医学とは

こうした、宇宙環境における健康関連課題を克服するために生まれてきたのが宇宙医学という概念である。従来のように、超健康的な宇宙飛行士が宇宙環境で健康的に過ごすということの健康管理という目的ではなくて、人類が長期間、月とか、火星とか、スペースコロニーなどの環境で生活するための医学的な基盤を築くのが宇宙医学ではないかなと考えている。そこで今扱っている宇宙医学のテーマをいくつか整理してみた（図1）。

循環・代謝の変化

- ・微小重力で体液が頭部へ移動 → 脳圧上昇・視機能へ影響
- ・3D clinostat による内皮細胞 (HUVEC) の重力応答解析

骨・筋萎縮

- ・骨量・筋量が急速に低下
- ・運動療法 + 電気刺激 + 薬理介入 + 再生医療・ナノマテリアル研究

免疫機能の変化

- ・白血球反応性の低下 → 感染リスク増加
- ・重力が免疫細胞の分化・活性に関与

放射線防護

- ・宇宙放射線によるDNA損傷リスク
- ・BaSO₄ を用いた バイオシールド技術の開発

遠隔医療・自律型医療

- ・通信遅延を補うAI診断サポート
- ・手術支援ロボット・自律型診療システムの構築

図1：宇宙医学が扱うテーマ（筆者作成）

まず、「循環・代謝の変化」。先ほど述べたように、宇宙では体液のバランスが大きく変わる。もともと病気がない人がそういった体液のバランスが崩れても、大きな問題を起こさないかもしれないが、心臓が弱っている人が宇宙空間に行くと、そういった体液バランスの変化により、心臓の負担が非常に大きくなる可能性もある。次に「骨・筋萎縮」。一般的には地上の 10 倍早く老化が進むと言われており、骨密度の低下や筋力の低下が起こる。また、「免疫機能の変化」もあり、免疫が弱くなることが知られている。これは、閉鎖環境におかれることや、放射線被曝の影響だと考えられてきたが、近年の研究では遺伝子の発現が変わることが原因とする見方も出ている。加えて、細菌に関して言えば、宇宙に行くと毒性が強くなる可能性や、メカニズムは不明だが抗生物質が効きにくくなるという厄介な現象も確認されつつある。そして「放射線防護」。どうにか放射線防護の技術を獲得しないと、月や火星に行くまでの時点で、人体が耐久し得ない放射線被曝を受ける可能性がある。

IV. 微小重力の影響

東谷篤志先生の講演での 3D クリノスタット装置の話が出たが、我々も同じものを使い、血管内皮細胞を微小重力環境にさらして育てる実験を行った。これは何を意味するかというと、宇宙では血栓症が、問題になることがある。一般的にはエコノミークラス症候群と呼ばれるようなもので、地上においては足などに血栓ができやすい。しかし、この 2020 年に出された論文では、11 人の宇宙飛行士の頸静脈に血液が滞るようなサインがあつて、その中の 1 人には大きな血栓となっていたことが確認されている¹⁾。一般的には血栓症が起きた場合には、抗凝固薬といわれるような薬を使って血栓を溶かすことになる。しかし、この際には国際宇宙ステーション内に抗凝固薬がなかった。そのため、薬を地上から持って行ってから内服を始め、飲み続けて地上に戻った時には血栓がなくなっていた。結果としてはよかったが、詳細なメカニズムはまだわかっていない。これに関連して、先ほど紹介した実験で我々が血管内皮細胞を培養した目的としては、宇宙で血栓症ができやすいのは、血管内皮細胞の活性が高くなって、血栓を誘発するような素因が出てくるのかもしれないという仮説から始めている。培養自体はうまく育っているが、研究の結果はまだ出ていないので出たらきちんと報告したい。

V. 放射線被曝の影響

もう一つは宇宙の放射線被曝について。宇宙の放射線被曝に関する研究では、アポロ計画に参加した 7 人の宇宙飛行士と、国際宇宙ステーションに飛んだ経験をもつ宇宙飛行士、もしくは宇宙飛行をまだ経験していない宇宙飛行士を対象に、放射線の影響を検証した研究がある²⁾。結果としては、アポロ計画に参加した宇宙飛行士が心臓の血管の病気で亡くなる割合が高かったということがわかっている。これはもちろん、様々なバイアスの存在を加味しなければならないが、これは放射線被曝の影響が少なからずともあったのではないかと推察される。

このような問題に対して我々でできることはないかと考えた時に、放射線防護をするクリームというのを作れないか、というアイデアが出た。これは、簡単に市販のボディクリームに、

胃の検査など医療用に使われている硫酸バリウムを混ぜてみて、放射線防護が可能なのかどうかというものを、簡易的なレントゲン装置に晒して評価した。結果としては、予想以上に効果があり、硫酸バリウム 15g を混ぜると 28%の放射線を防御することができるようなことが分かった。ただし、これらを皮膚に塗ってみると、固まってざらざらしてしまうので、とても日常生活するのにままならないし、一回塗って手を洗うと、真っ白に見えてしまう。そのため、溶質を変えるか溶媒を変えるかということも考えて、次の実験を進めていこうかと考えている。

VI. 宇宙社会の医療インフラ

自分たちが行なっている研究を簡易的に紹介したが、我々以外にも、多くの民間企業が様々な宇宙研究を行い始めている時代である。そして、今後研究だけでなく、実際にそこに患者がいて、宇宙環境の中でどうやって治療するかという話にもなってくる。例えば、地上であれば、病院施設があり、点滴も重力勾配があるから使えるし、手術時も血液が下に落ちていくからコントロールしながら手技ができる。ところが、宇宙になると、専門的な施設もないし、点滴も重力勾配がないので圧をかけないと流れていかない、手術の際も血が飛び散ったりして視界の確保が困難になる。

一般的に宇宙で使われている診療用の器具として、最も有名なのは、超音波検査機である。ロケットで宇宙に重いものを運ぶのはとてもコストがかかる。CTのような検査機械はトン単位の重さであり、とても宇宙には持っていけない。また、地上の重力を前提としている医療機器の多くは、宇宙で正常に機能しない可能性も高い。そのため、今は限られた医療資源で、限られた治療を行うというのが、宇宙医療の現状である。遠隔で専門医が診察する、遠隔操縦のロボットを活用して地上から治療を届ける、というのは電波が届く距離であればできるが、火星まで行くミッションではできない。NASA のアルテミスミッションでは、火星までの往復と滞在期間合わせて合計2年半程度のミッションが計画されているというが、そういった通信遅延、専門医不在の環境において、医療をどうするか。そういったことを考える時に医学だけではなく、工学や、宇宙分野の専門家との連携が必要になってくる。そうした延長にあるものがハロのような小型作業ロボットだと個人的には考えているし、宇宙で孤独感が強くなる中で、ハロのようなパートナーが会話相手になればメンタルヘルスケアになることも考えられる。そのため、ハロのような小型作業ロボットが宇宙医療をサポートできるような未来を作るとというのが、将来的にやっていきたいことだと個人的に考えている。

ガンダムという作品は単なるロボットアニメではなく、人類がどうやって宇宙に適応して暮らしていくのかという哲学的な問いをもつ作品だと考えている。宇宙に出てもおそらく人間は人間であり続けると思うが、その人間が尊厳を保つためには、宇宙医学がやはり必要な学問だろうと個人的には考えている。さらに 2050 年には 1000 人規模で宇宙に暮らす、ムーンビレッジ構想というのがある。これを元に、1000 人くらいの都市に医療関係者ってどれくらい必要かというと、おそらく 5 人から 10 人くらいが必要になってくるという構想になってくるが、現行の宇宙飛行士の募集・育成ペースだと間に合わない。そうなると専門的な養成課程を経ない民間

の人たちもおそらく宇宙に行くような時代になってくるし、そういった社会を構成する必要性があると考えている。

これが我々国際医療福祉大で宇宙医学研究会が発足して、ガンダムオープンイノベーションに参加したいと思った目的の一つであり、臨床現場にいる医師だけでなくガンダムオープンイノベーションに参加した研究者や学生たちと宇宙医学に関する研究を進め、新たな人材をまたこういったフィールドに引っ張り出してくるというのが我々がやりたいことではないかと考えている。最後に、敬愛する2人の宇宙飛行士からいただいた言葉を紹介する。向井千秋さんからは「仕事場は宇宙」、土井隆雄さんからは「宇宙をめざせ」というコメントをいただいた。よって、「仕事場は宇宙！宇宙を目指せ！」というのが我々の活動理念になっている。

文献

1. Auñón-Chancellor, S. M., Pattarini, J. M., Moll, S., & Sargsyan, A. (2020). Venous thrombosis during spaceflight. *New England Journal of Medicine*, 382(1), 89-90.
2. Delp, M. D., Charvat, J. M., Limoli, C. L., Globus, R. K., & Ghosh, P. (2016). Apollo lunar astronauts show higher cardiovascular disease mortality: possible deep space radiation effects on the vascular endothelium. *Scientific reports*, 6(1), 29901.