＜研究紹介＞
宇宙に医療を―Space Medical Accelerator の挑戦
Medical Care in Space - The Challenge of the Space Medical Accelerator

後藤正幸*，福島洋輝*，今野裕之*，黒松俊吾*，伊東哲史*，丹下仁志*

Masayuki Goto, Hiroki Fukushima, Hiroyuki Konno, Shungo Kuromatsu, Satoshi T Ito, Hitoshi Tange

Ⅰ．はじめに

民間人の宇宙飛行など人の宇宙進出加速に伴い、宇宙での健康管理の重要性が高まっている。一般社団法人 Space Medical Accelerator は、近い将来多くの人が宇宙へ進出するために不可欠となる「医療」に関する新たな技術やサービスを生み出す事を目的として、2022 年に設立された法人である。メンバーは外科医で宇宙医学研究者である創業者の後藤をはじめ、宇宙での医療に精通した医師や研究者、エンジニアを中心に構成されている。本分野の研究論文やビジネスニュースなどを日々分析し、医療やライフサイエンス分野で新たな宇宙事業を目指す企業などの顧客に対して、現場ニーズや将来課題、医学的根拠など専門チームとしての知見を提供している（図 1）。

宇宙での医療は地上とかけ離れた特殊なものと考えられがちだが、「医療資源が限定される」「遠隔医療が中心」など、現在の僻地医療やオンライン診療など地上の医療現場とよく似た課題を抱えている。さらに、国際宇宙ステーションの微小重力環境を生かした宇宙実験、例えばタンパク質結晶生成による創薬研究や、加齢医学や再生医療などの分野において地上医療に飛躍をもたらす科学的成果が数多く生まれている。

宇宙で必要となる医療を追求することは、人類の宇宙進出を加速するに留まらず地上の医療を大きく前進させる事に繋がるのである。Space Medical Accelerator は、「宇宙から新たな医療を、すべての人へ」を Vision として掲げ、本分野で産官学に新たな融合を生み出し、宇宙での医療産業を発展させることを志している。

当社メンバーそれぞれの専門知見から、宇宙での医療に関する現在位置と将来の課題について紹介する。

* 一般社団法人 Space Medical Accelerator

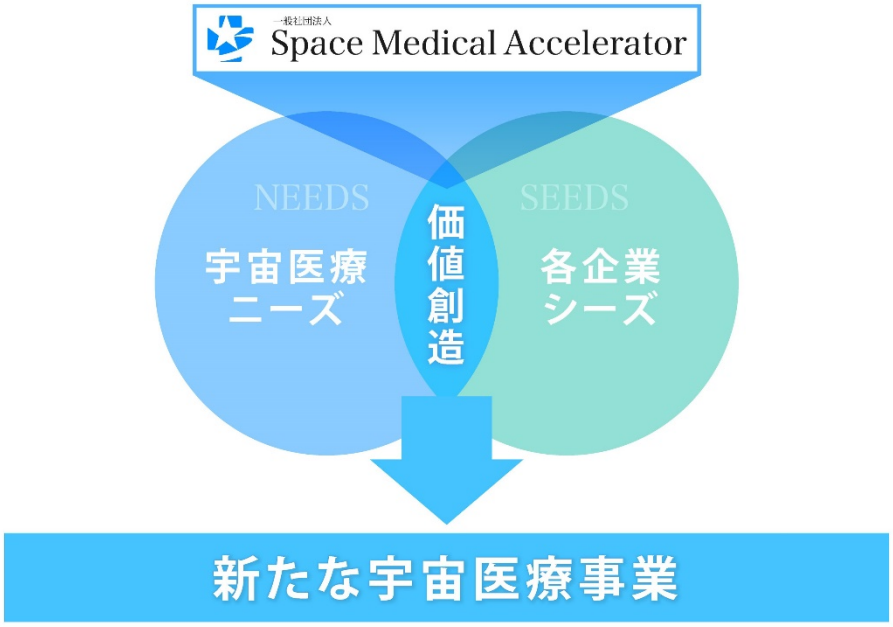

図１．宇宙医療分野の事業コーディネーター（筆者作成）

Ⅱ．宇宙での医療に関する各論

１．軌道上プラットフォームへの生産戦略の適用検討

現在の国際宇宙ステーション（ISS）は実験施設としての役割が大きいが、近い将来、民間企業による地球周回軌道上のプラットフォームの利用拡大フェーズにおいて、医療・バイオをテーマとしたサービスが継続的に行われる「工場」の側面が大きくなると予想される。既に米国を中心に宇宙製造の市場規模の検討が進められており [1), 2)]、Redwire 社は宇宙で製造した工学結晶の販売を始めている [3)]。本章では、工場の競争力を高めるための「生産戦略」のロジック [4), 5), 6)] を、将来の軌道上プラットフォームのサービスに適用して、軌道上の「工場」が目指す姿を考察する。生産戦略は通常、多様な要素を複合的に考慮するが、今回は利益と投下資本の二つの側面に焦点を当てる（表１）。

表 1
軌道上プラットフォームにおける利益拡大・投下資本圧縮

	利益拡大
方向性	工場が保有する能力を最大限発揮して、より多くの仕事をこなす
律速工程	工場能力は生産プロセス中の律速工程の能力に相当 軌道上サービスにおける律速工程の特定が必要
充足度	打ち上げごとに、割り当てられる積載量を充足させる 他の工程はそれを定常的に処理できる能力を目指す

	投下資本圧縮
方向性	時間（クルータイムとリードタイム）の最小化
クルータイム	宇宙飛行士の占有時間の最小化 自働化やシミュレーション技術の利用
リードタイム	プラットフォームの占有時間の最小化 １個流し戦略の実施

【利益拡大】

- 利益拡大の一つの方向性として、工場が保有する能力を最大限発揮して、なるべく多くの仕事をこなすことが考えられる。
- 工場能力は生産プロセス中の律速工程の能力に相当する。軌道上サービスにおける律速工程の特定には、詳細な検討が必要だが、定性的に考えて「ロケット打ち上げ」が有力候補としてあげられる。
- 打ち上げごとに、軌道上サービスのために割り当てられる能力つまり積載量を常に充足させて、他の工程はそれを定常的に処理できる能力を目指すことが、利益拡大化の一つの姿と考えられる。

【投資資本圧縮】

- 投下資本の最小化の方向性として、軌道上サービスにおいては「時間」が大きな要素となってくる。
- 一つは時間単価が非常に高い宇宙飛行士を占有する時間、すなわちクルータイムの最小化である。主なアプローチとして自働化であるが、生産作業そのものだけでなく、準備や確認のためのすり合わせのための占有時間を省略するシミュレーション技術も含まれる。
- もう一つは軌道上プラットフォームを占有する時間、すなわちリードタイムの最小化である。軌道上のごく限られたスペースで生産し続けるためには、生産ロットを小さくして中間在庫を少なくする「1 個流し」を徹底していかなければならない。

これらの要素を鑑みると、軌道上サービスでは「打ち上げの最大積載量をクルータイム・リードタイム最小で処理するジャストインタイム生産」が一つの目指すべき生産形態と考えること

ができる。一方で、こうした生産の実現には、例えば一品一様の顧客ニーズへの対応ではなく、顧客の様々なニーズに標準メニューとオプションメニューの組み合わせで対応する（いわゆるモジュラーデザイン）など、より上流のビジネスプロセスも含めた課題が複数ある。軌道上プラットフォームの「工場化」をどのような姿で実現すべきか、今後も考察していきたい。

2. 宇宙旅行時代のメンタルヘルス

宇宙への旅が誰にでも可能になる時代が近づいている。2023 年 9 月 26 日の Forbes の記事によると、2021 年以降の 1 年半で宇宙旅行者の数はすでに 68 人に達し、ヴァージン・ギャラクティックが提供する 6,660 万円の宇宙旅行ツアーには、すでに 800 人の待ちリストがあるとされている [7)]。

現在の宇宙旅行といえば、宇宙に弾道飛行で到達し、数分間の無重力状態を体験する短時間のツアーが一般的である。しかし、将来的には 2021 年に民間人の前澤友作氏が国際宇宙ステーションに滞在したような、長期滞在ツアーも実現するだろう。

多くの人が「宇宙での滞在」に優雅なイメージを抱くかもしれないが、実際の宇宙は、死と隣り合わせの極限の環境である。物理的に逃げ場がないことを冷静に考えれば、心理的な閉塞感や圧迫感から宇宙で恐怖を感じることは自然な感情である。また、宇宙ロケットや宇宙ステーション内は完全に人工的な環境であり、自然の中のようにリラックスできる場所ではない。騒音や振動、光、匂い、有害物質、放射線、異なる文化をもつ他人とのコミュニケーションなど、様々な刺激がストレスとなりえるので、このような要因がメンタルに及ぼす影響を考慮する必要があるだろう。厳しい選抜をくぐり抜け、トレーニングを積んだ宇宙飛行士ですら、宇宙に滞在している間はさまざまなメンタルケアを受けている [8)]。

宇宙でのメンタルヘルス問題の解決策は、有形無形のストレスにさらされている現代社会においても広く応用が可能と考えられる。一般市民が精神的な不調なく安心して宇宙で時間を過ごせるようにすることは、今後の宇宙旅行時代の大きな課題であり、様々な分野からのアプローチが求められている。

3. アカデミアでの宇宙医学の盛り上がりと次世代への課題

宇宙医学はこれまで、日本宇宙航空環境医学会を中心にほとんどの研究が発表されてきた。しかし、近年では宇宙医学がメジャーな国内医学会でも注目を集め、アカデミック領域での盛り上がりが見られている。2022 年には第 122 回日本外科学会定期学術集会で、「ムーンショットが拓く 2050 年の医療とは？」企画内にて「宇宙世紀に向けて～宇宙での医療の現状と展望～」が発表され、2023 年には第 87 回日本循環器学会学術集会で「宇宙医学×循環器学」が会長企画シンポジウムとして行われた。

その中で、若手も宇宙医学分野で存在感を示しており、宇宙医学に関心のある学生コミュニティである Space Medicine Japan Youth Community（SMJYC）や国際医療福祉大学の宇宙医学研究

会を中心に、多くの学生たちが、2023 年の第 69 回日本宇宙航空環境医学会大会に参加した。実際に、11 の学生演題が発表され、別途学生セッションも行われた。

長らく、日本の宇宙医学分野では基礎研究が主流であったが、学生たちの中で宇宙医学の臨床的な側面に対する注目が高まっており、SMJYC では「宇宙での臨床医療を考える会」が有志で行われている。ただし、国内においては宇宙医学の臨床分野の専門家がほとんど存在しておらず、国内で、宇宙医学の臨床分野に取り組むことは簡単なことではない。しかし、現在の専門家が知識を独占するのではなく、より多くの人、企業が宇宙医学へ参画していくことをサポートすることが日本の宇宙医学の持続可能な発展に不可欠だと考える。当社もその一翼を担い、宇宙医学の進展に積極的に貢献していきたい。

4. 宇宙マウス実験と老化研究の将来

「老化」は、癌や糖尿病などの疾患のリスクファクターである。DNA の損傷が起こると、その修復過程で DNA の修飾変化やシグナル伝達が生じ、細胞が不可逆的に分裂できなくなった状態である細胞老化に陥ることが知られている [9]。細胞老化を起こした細胞が個体内に蓄積されると、臓器の機能不全や免疫力の低下といった個体老化が進むことが示唆されている [10]。地上で行われている遺伝子改変マウスを使った実験を通じて、老化メカニズムが解明されつつある。

老化メカニズム解明に宇宙空間の特異的環境が注目されている。宇宙空間は、宇宙放射線による DNA 損傷と微小重力環境による機械的な負荷の軽減が起こる影響から、地上に比べて老化が加速すると考えられている [11]。1970 年代には、長期間の宇宙飛行を行なった宇宙飛行士の体内で、骨密度の減少、筋萎縮、血液の変化、代謝異常などの高齢者に見られる症状が引き起こされることが報告された [12]。ISS では、哺乳類の老化に関する研究をモデル生物であるマウスを用いて行われている。

近年、遺伝子欠損マウスを使用した宇宙実験が成功し、遺伝子の発現に着目した研究が進展している。2018 年には、酸化ストレスに関連する遺伝子 Nrf2 が宇宙空間で活性化することが判明した [13]。老齢マウスにおいて高い発現が認められている遺伝子であり、老化が加速していることの実験的な証拠となっている。また、2020 年に行われた実験では、微小重力環境下でマウス骨髄幹細胞にて細胞老化マーカー遺伝子の 1 つである p21(Cdkn1a)の発現の上昇が示された [14]。さらに、2024 年 2 月現在、古川聡宇宙飛行士が参加するミッションにおいて、微小重力空間における肝臓の代謝異常に関する実験が進行中である [15]。

今後、アルテミス計画による月面探査が予定されており、深宇宙でのマウス実験も期待される。宇宙マウス実験から得られる洞察は、将来の月や火星への探査や移住に向けての人間の生存と健康の維持に不可欠な知識と技術を提供している。加えて、人類が地球上でより健康で長生きするための道を開くことに繋がるだろう。

5. 微小重力環境での筋萎縮・骨萎縮

微小重力環境では、重力による筋、骨への負荷が無くなることにより、廃用と同じような筋と

骨の萎縮が起きる。筋、骨の萎縮により、骨折リスクの上昇や、地球帰還後の運動機能低下といった問題がある。また、元の量に戻るには筋で約 6 週間、骨は数年間の期間が必要であり [16]、宇宙飛行士の宇宙滞在中と帰還後の健康維持のために重要な課題である。

この問題への対策は、現状では毎日 2 時間の運動である。国際宇宙ステーションでは、筋力トレーニング 1 時間、有酸素運動 1 時間の合計 2 時間の運動を毎日行い、筋、骨萎縮の予防を行っている。長期の宇宙滞在では筋量は 10～20%程減少するが、現在の運動プログラムによって 5%程度の減少へと抑えられる [17]。しかし、筋、骨の維持のために 1 日 2 時間もの運動時間が必要であり、時間的負担が大きい。現在のところ、骨萎縮に対しては薬剤による対策の可能性がある。骨粗しょう症の治療薬として用いられるビスフォスフォネート製剤が宇宙でも骨萎縮の予防に効果があるという報告がある [18]。一方、筋委縮を抑える薬剤は未だ研究段階である。筋の合成、分解調節に関わる遺伝子や、その発現経路に関与する Cbl-b[19]のようなタンパク質等の研究が進んでおり、運動しなくても筋量の維持を可能とする薬剤開発が期待される。こういった筋萎縮の予防薬は、長期宇宙滞在のためだけでなく、高齢者の健康維持のためにも開発が望まれる。

今のところ骨量減少による宇宙での骨折の報告はないが、月や火星といった惑星探査を進めることで、宇宙での骨折リスクが上昇する。月では地球の 6 分の 1、火星では地球の 3 分の 1 程度の重力があるが、火星のように到着までに時間がかかり、惑星着陸時に筋萎縮が予想される場合には、現地の重力環境に再適応するためのリハビリテーションプランを検討する必要があるだろう。さらに、今後宇宙旅行者の長期滞在が可能となれば、筋萎縮や骨萎縮は彼らの健康に対する課題となる。現在の解決策である 1 日 2 時間の運動は、宇宙飛行士でない一般の旅行者にはかなりの負担となる。手軽に、時間をかけずに骨量や筋量を維持する方法は、宇宙、地上どちらでも大きな需要がある。

Ⅲ．おわりに

以上、当社 Space Medical Accelerator が保持する知見から、宇宙での医療に関する動向の一端について解説した。現在、宇宙での医療分野は産業としてまだ黎明期であるが、2035 年には再生医療・バイオマニュファクチュアリングなどのライフサイエンス分野を含む「軌道上製造・研究開発」の市場規模は 25 億ドル、宇宙旅行は 33 億ドルの市場になるとの試算もあり [20]、大きな潜在性を秘めている。当社ではシンポジウムイベントや企業講演・セミナーといった啓発活動を行うことで本分野に対する社会的理解と気運を高めつつ、来るべき有人宇宙時代に日本の医療技術が多く宇宙へ展開されることを目標に、日々研究動向の集積とネットワーク構築に務めていきたい。

文献

1. Nanoracks. (2019, January 14). *Outpost: An In-Orbit Commercial Space Station Habitat Development Enabling Cost-Effective and Sustainable U.S. Presence in Low-Earth Orbit.* https://nanoracks.com/wp-content/uploads/NanoRacks-LEOCOM-Study-RELEASE.pdf

2. Kulu, E. (2023, October). *In-Space Economy in 2023-Statistical Overview and Trends. In 74th International Astronautical Congress (IAC 2023)*.
3. Redwire. (2022, June 23) *Redwire Opens New Commercial Market for In Space Production with First Sale of Space-Manufactured Optical Crystal.* https://redwirespace.com/newsroom/redwire-opens-new-commercial-market-for-in-space-production-with-first-sale-of-space-manufactured-optical-crystal/
4. エリヤフ・ゴールドラット. (2001). *ザ・ゴール*. ダイヤモンド社.
5. 大野耐一. (1978). *トヨタ生産方式*. ダイヤモンド社.
6. 田中正知. (2004). 時間軸を入れた収益性評価法の一考察--J コスト論. *IE レビュー: Official publication of the Japan Institute of Industrial Engineering/日本インダストリアル・エンジニアリング協会 [編]*, 45(1), 85-92.
7. 鈴木喜生. (2023, September 26). *増え続ける宇宙旅行者、6660 万円のツアーに 800 人待ち*. Forbes Japan. https://forbesjapan.com/articles/detail/66215
8. JAXA 宇宙航空研究開発機構. (2016, June 15). *精神心理支援*. https://iss.jaxa.jp/med/research/mental/
9. Rodier, F., Coppé, J. P., Patil, C. K., Hoeijmakers, W. A., Muñoz, D. P., Raza, S. R., ... & Campisi, J. (2009). Persistent DNA damage signalling triggers senescence-associated inflammatory cytokine secretion. *Nature cell biology*, 11(8), 973-979.
10. Baker, D. J., Childs, B. G., Durik, M., Wijers, M. E., Sieben, C. J., Zhong, J., ... & Van Deursen, J. M. (2016). Naturally occurring p16Ink4a-positive cells shorten healthy lifespan. *Nature*, 530(7589), 184-189.
11. Demontis, G. C., Germani, M. M., Caiani, E. G., Barravecchia, I., Passino, C., & Angeloni, D. (2017). Human pathophysiological adaptations to the space environment. *Frontiers in physiology*, 8, 197834.
12. Dietlein, L. F. (1977). Skylab: a beginning. *Biomedical results from Skylab*, 377, 408.
13. Uruno, A., Saigusa, D., Suzuki, T., Yumoto, A., Nakamura, T., Matsukawa, N., ... & Yamamoto, M. (2021). Nrf2 plays a critical role in the metabolic response during and after spaceflight. *Communications biology*, 4(1), 1381.
14. Juran, C. M., Zvirblyte, J., Cheng-Campbell, M., Blaber, E. A., & Almeida, E. A. (2021). Cdkn1a deletion or suppression by cyclic stretch enhance the osteogenic potential of bone marrow mesenchymal stem cell-derived cultures. *Stem cell research*, *56*, 102513.
15. Dominic Hart. (2023)., *'Space-Age' Research Looks to Provide New Human Health Insights*. NASA. https://www.nasa.gov/ames/space-biosciences/space-age-research-looks-to-provide-new-human-health-insights/
16. 藤田真敬（2019）. *宇宙航空医学入門 再版*. 鳳文書林出版販売.
17. Davis, J., Stepanak, J., Fogarty, J., & Blue, R. (2021). *Fundamentals of Aerospace Medicine.* Lippincott Williams & Wilkins.

18. Sibonga, J., Matsumoto, T., Jones, J., Shapiro, J., Lang, T., Shackelford, L., ... & LeBlanc, A. (2019). Resistive exercise in astronauts on prolonged spaceflights provides partial protection against spaceflight-induced bone loss. *Bone*, 128, 112037.
19. Ikeda, C., Abe, T., Sakai, A., Hirasaka, K., & Nikawa, T. (2012). Space flight/bedrest immobilization and bone. Space flight and bed rest-mediated muscle atrophy. *Clinical Calcium*, *22*(12), 1813-1820.
20. Deloitte. (2022). The Commercialization of Low Earth Orbit. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/public-sector/us-gps-the-commercialization-of-leo-vol-2-an-orbit-for-everyone.pdf