

Spaceport ～有人宇宙施設を作る～

石川県立金沢泉丘高等学校理数科

青木 花怜 可西 永佳 多田 心美 西田 楓 道下 航生

要旨

近年、宇宙旅行や宇宙開発が世界的に一般的になりつつある。私たちは人工衛星や宇宙船などが宇宙に行くための地球と宇宙の中継地点かつ一般の人々にとってのアミューズメント施設となる有人宇宙施設をスペースポートと呼称した。その建築方法や、低重力環境及び宇宙放射線による健康問題の解決、どの材料が宇宙放射線の遮蔽に適しているかの計算を行った。その結果として、宇宙放射線の遮蔽には「バイオマスシールド」、形は切頂二十面体型、骨量減少を防ぐためには超音波治療と疑似重力による治療を採用することとした。

1. 研究背景・目的

近年、宇宙探査や宇宙旅行がより身近になりつつある。たとえば火星の生息可能性の探索をする NASA の Perseverance や、日本の民間人で初めての前澤友作氏の宇宙旅行が話題となった。宇宙開発の発展が私たちにもたらす影響は大きく、人類がより宇宙に行きやすくなれば、私たちの生活はより豊かになると考えられる。そこで私たちは、宇宙への容易な旅を可能にするために、宇宙と地球の架け橋となる中継点としての施設があればよいと考え、その有人宇宙施設をスペースポートと名付けた。しかし、現段階では宇宙があまりにも過酷な環境であることは間違いない。

そこで、私たちの研究の目的は、宇宙の過酷な環境に対応し、このスペースポートを実現することである。今回の研究では、解決すべき過酷な宇宙環境の中で、宇宙放射線と骨量の減少への対策と、形やスペースポートの場所などの建築面の3つの観点に注目した。

2. 宇宙放射線

2-1. 宇宙放射線とは

宇宙放射線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線のことである。その組成は約 90 % が陽子、約 9 % がアルファ粒子、残りがリチウム、ベリリウム、ホウ素、鉄などの原子核である。総被曝量が 100 mSv を超えると、放射線が DNA を傷つけることによって癌の発生確率が上がるなどの臨床症状が確認されている。地表では、宇

宙放射線を 20 % 含む自然放射線の被曝量が世界平均で年間約 2.4 mSv であるのに対して、地上約 400 km 地点にある国際宇宙ステーション (ISS) では平均すると年間約 200 mSv となるので宇宙での被曝量は地球での 100 倍近くにもなっていることがわかる。したがって、人体にとって有害な宇宙放射線を遮蔽することは有人宇宙施設を作るにおいて重要なことである。

2-2. 宇宙放射線の遮蔽物の提案

私たちは宇宙放射線を遮蔽するために、オリジナルのアイデアとして「バイオマスシールド」(図 1) というものを提案する。このシールドは宇宙で循環型社会を形成するために、シールドの取り替えと取り替えたシールドの材料の再利用を前提として考える。材料には、ミドリムシ、水、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) を用い、PEEK で作った水槽の中に水とミドリムシを入れる。これらの材料を使用する理由はそれぞれ以下の通りだ。ミドリムシは、宇宙で循環型社会を形成するにあたり、宇宙食やバイオ燃料として利用でき、光合成によって酸素量を増やすことができ、条件を整えば一日で総数が 2 倍になるという特性をもつためである。水は、陽子を主成分とする宇宙線の遮蔽に非常に優れており、このミドリムシを培養するのに不可欠であるためである。そして PEEK は、その遮蔽効果は従来の宇宙船や ISS 国際宇宙ステーション (ISS) に使われているアルミニウムよりも、同じ厚さであれば 2 割程度高いことが明ら

かになっており⁵⁾、さらに樹脂であるので、後述する 3D プリンタを利用した建築方法とも親和性が高いと考えたためである。

さらにバイオマスシールドは、宇宙放射線遮蔽のみならず、人間にとって重要な水やバイオ燃料や宇宙食として便利なミドリムシを保管する場所の節約ができるという面でも優れている。

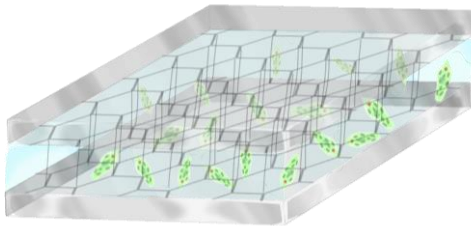


図1 バイオマスシールドのイメージ
PEEK の水槽に水とミドリムシを入れる。

2-3. 遮蔽物の効果の検証

2-3-1. 阻止能と破碎が起こる断面積

バイオマスシールドがどれだけの宇宙線を遮蔽するかを定量的に検証する。遮蔽効果を考えるにあたって重要なのは、阻止能と、原子核との破碎が起こる断面積(確率)の値である。阻止能とは、物質中での荷電粒子の止まりやすさを示す物理量のことで、大きいほど遮蔽効果が高いと言える。また、破碎とは、宇宙放射線に含まれる中で人への影響が多い粒子である重い荷電粒子から、比較的影響が小さい粒子である軽い荷電粒子へと変化することを言う。この破碎が起こる確率が大きいほど遮蔽物として適していると言える。素材による阻止能と断面積の相対的な違いは次の式から計算できる。

$$S_{UM} \propto \frac{Z_t}{A_t} \quad (1)$$

$$\sigma_{UM} \propto c A_t^{-\frac{1}{3}} \quad (2)$$

S_{UM} : 阻止能

Z_t : 素材の原子番号の平均値

A_t : 素材の原子量の平均値

σ_{UM} : 破碎が起こる断面積

c : パラメータ

計算する材料として、従来の宇宙船や ISS に使われているアルミニウムを基準にするために、アルミニウム、そしてバ

イオマスシールドの材料である水と、ミドリムシのみが細胞内に生成する多糖類であるパラミロンを選んだ。

2-3-2. 計算結果

図2

物質	原子番号	原子量	阻止能	断面積
Al	13.000	26.982	0.482	0.333
H ₂ O	3.333	6.005	0.555	0.550
パラミロン	4.553	8.643	0.527	0.487

阻止能・断面積の比

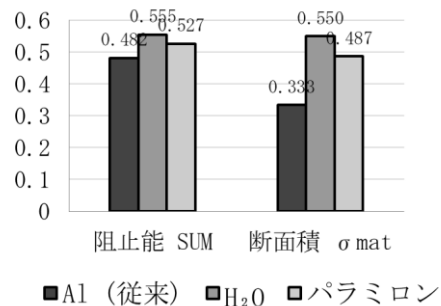


図3 阻止能・断面積の比

2-3-3. 考察

従来の宇宙船に使われているアルミニウムより、水とパラミロンの方が阻止能、断面積ともに大きな値を示した。よって、宇宙線の遮蔽物としてバイオマスシールドはアルミニウムよりも優れていると考える。

2-4. 今後の展望

バイオマスシールドは今研究で遮蔽物としては有効だが、強度やコストの面では優れているかはまだわからない。今後はこれらのことについて考えていきたい。

3. 建築

3-1. 宇宙建築とは

宇宙建築とは、地球の外に存在する、人間が快適に暮らすための構造物またはその理論のことである。実現しているものとしては、国際宇宙ステーション (ISS) などがあり、構想上のもものでは宇宙ホテルなどがあげられる。私たちは、宇宙空間においてのスペースポート建設を想定し、建築物の

形や建設方法などを考察する。

3-2. スペースポートの形の提案

3-2-1. 静止軌道上において

まず、スペースポートの全体(図 4)の中でも、静止軌道上でのスペースポート建設を考える。静止軌道とは、地球の自転周期と一致する軌道周期をもつ地球周回軌道のことで、それ自身の重力と遠心力がつりあっているため、無重量のように感じられる。重力に影響される地球上では、建築する建物の上下が必然的に決まり、建物自身を支える柱や梁が必要となる。これに対して、静止軌道上では重力を考える必要はなく、自由な建築を行うことができる。

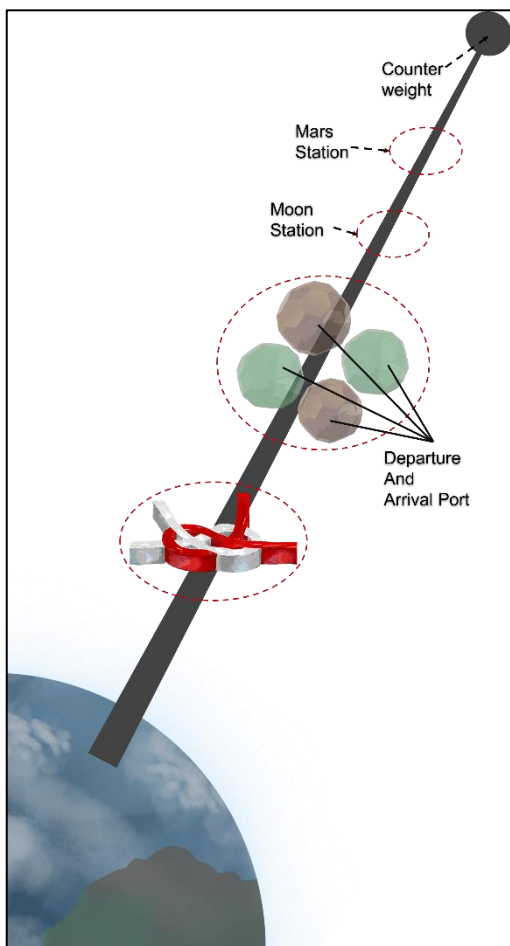


図 4 スペースポート全体図

3-2-2. 切頂二十面体型スペースポート

私たちは、切頂二十面体型のスペースポートを提案する。切頂二十面体とは、

正二十面体の各頂点を切り落とした立体(図 5)である。一般的なサッカーボールは、この立体に空気をいれて球に近づけたものである。また、面の数は 32 面(正五角形 12 面、正六角形 20 面)、辺の数は 90 本、頂点の数は 60 個である。

私たちが、この形を提案する理由は主に 4 つある。1 つ目は、自然界に存在するフラレン C₆₀ がこのサッカーボール型の分子であり、安定な構造をなしているからだ。2 つ目は、拡張性が高いという点である。スペースポートでは、利用者が増加したり施設の拡充を図ったりする時などのスペースの拡張が必要になる場合も想定されるため、複雑な構造ではなく、比較的拡張が容易であるものが適していると考えた。さらに、施設はそれぞれ独立しているよりも、施設同士が連結している方が設備面で経済的である上、人間の動線がスムーズになる。3 つ目は、故障した際に取り替えが容易であるという点である。経年劣化によって危険性が生じる可能性があるため、ある一定の期間を設けてこのスペースポートの点検や設備の交換を行う必要がある。切頂二十面体は平面によって構成されているため、交換を効率的に短時間で行うことができる。4 つ目は、機械でも制作が容易であるという点である。建設方法と関連しているため後述する。



図 5 切頂二十面体型スペースポート (fusion360 で作成)

3-3. スペースポートの建設方法

3-3-1. 建築方法

完成したスペースポートを地上から宇

宇宙空間に打ち上げるのではなく、ある程度の組み立てた部分を打ち上げて宇宙空間で残りの工程を行うという方法を取る。宇宙空間での組み立ての際には、3D プリンタを利用するという事を視野に入れている。

3-3-2. 国際宇宙ステーション (ISS) の建設方法

ISS は、1998 年に最初のモジュールが打ち上げられ、その後、46 回に分けて打ち上げられたパーツを宇宙空間の地球周回軌道上で組み立てて、2011 年 7 月に完成した。このような前例も考慮に入れ、スペースポート建設に生かした。

3-3-3. 3D プリンタを利用した建築方法

3D プリンタは特に少量多品種生産を特徴とする航空宇宙産業において、ものづくりを革新する技術である。この技術によって、宇宙探査分野では宇宙空間での製造や探査先の材料を使った基地の建設等が実現できる可能性が高くなっている。さらに、NASA や民間宇宙企業では既に 3D プリンティング技術を活用した開発が進められ、宇宙産業と 3D プリンティング技術は密接な関係となってきている。人間の作業量が増加した場合、人間の危険度が増加し、生命維持に必要な食料、酸素、エネルギー等の管理も増大すると考えられるため、このような 3D プリンタの利用が必要不可欠であると考えられる。しかし、材料となる素材の限界や強度、耐久性、稼働の際に発生する熱の除去を検討する必要があると考える。

3-3-4. 3D プリンタ活用事例

3D プリンタの活用事例として、航空宇宙会社 Tethers Unlimited Inc の宇宙空間で使用する「SpiderFab」⁸⁾ プロジェクトがある。これは、独自のカーボン複合添加剤を利用した製造装置を開発するためのプロジェクトの一環である。この 3D プリンティングロボットは、地上から打ち上げられた後、宇宙空間内でワイヤフレームの構造体を建造する。地上から何度も部品供給を行う従来の建造方法とは異なり、プリント材料だけを供給し続

ければ、大きさや質量などの問題にとらわれることなく、構造物を生成し続けることができるようになる。

3-4. 今後の課題

スペースポート同士の接合の方法やスペースポートの固定の仕方、宇宙エレベータとのつなぎの箇所の検討などを具体的にしていく必要がある。さらに、実際に他の医療分野のアイデアや、宇宙放射線の設計を具体的に検討し、総合的に考えていく必要がある。

4. 医療

4-1. 骨量減少に関する現状

宇宙環境では破骨細胞が過剰に働くことが知られている。破骨細胞とは、古い骨を吸収し新陳代謝を促すものである。しかし活性化すると骨量減少が加速し、骨粗鬆症などの原因となる。

そのため宇宙飛行士は宇宙環境において、骨量維持に努めている。維持のための主な手法は、有酸素運動器具を用いた毎日二時間程度の運動である。また、破骨細胞の自然死を誘導する薬剤（ビスホスホネート）を投与している場合もある。

地球への帰還後に確認される骨量減少は著しく、微小重力下での維持には未だ問題が残されている。加えて、スペースポートへの一般人の来港を考える上で、現在の薬剤と運動のみでの対処は最適とは言い難い。そこで骨量を十分に、また効率よく増加させるための新たな方法の必要性が生まれた。

さらに、オービタル・アセンブリー社で考案されている宇宙ホテルのステーションは、フォン・ブラウン型（遠心力による擬似重力が宇宙空間での人体への影響を抑えることができる型）と呼ばれる型を成している（図 6）。

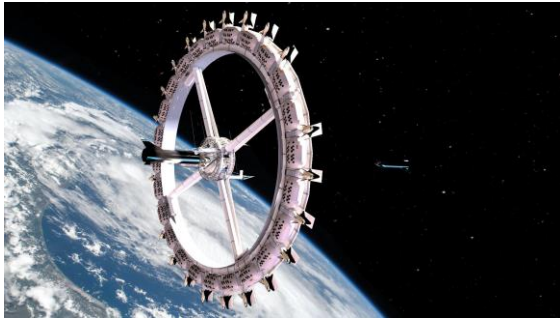


図6 フォン・ブラウン型ステーション⁹⁾

これを踏まえ、さらなる効率化を目的に、応用型として新たな施設開発に取り組んだ。これについては方法2で記述する。

4-2. 方法1

骨量減少の抑制に効果的とされている物理的刺激に着目した。具体的な例として、電気治療（骨粗鬆症の治療方法）や超音波治療法（骨折の治療方法）が物理的刺激をもたらすとされている。現在、ISSでは、これら2つの方法を用いた骨量維持は行われていない。そこで、これらの方法を用いて、骨量維持に必要な運動量を削減し、より宇宙での活動時間の拡大を目指すことにした。しかし、両者を比較したところ、電気治療では超音波治療とは違い、治療による痛みや違和感が伴う。そこで、超音波治療法のみ絞ることにした。考えた案は以下のとおりである。

超音波治療機を搭載したフィットネスバイクの使用を考える。それを漕ぐことで発生した電気を使い、超音波治療機を作動させて運動中の身体に流す。つまり、通常の運動による負荷と、超音波からの物理的刺激の2つを同時に加える仕組みである。

（超音波による刺激は、運動による身体的なきつさが感じられない。）そうすることで、単位時間あたりの骨への負荷が大きくなり、骨量維持の効率化が見込める。

4-3. 方法2

既存の円盤状の施設を回転させ擬似重力を生み出す方法に、新たな要素を加える。

まず、施設の稼働を滞在者の睡眠時間に絞る。睡眠時間、つまり活動外の時間を骨量維持にあてることで、滞在中の時間を最大限に利用することができる。また、必要以上の擬似重力の発生がなくなるため、余分なエネルギーの削減につながる。

さらに、円盤状の施設を複数設置し、それぞれが独立して稼働できるように改良する。これにより、従来よりも多様な人々の生活に適用できる。

5. 結論

宇宙放射線の対策として防壁にはポリエーテルエーテルケトンを用いる。ポリエーテルエーテルケトン水槽でハニカム構造を作り、中を水とミドリムシで満たすことにより防壁とする。3Dプリンタを用いてこの防壁で切頂二十面体を構成することで、逐次スペースポートを拡張することができる。骨量減少は、フィットネスバイクによる負荷、超音波及び睡眠時の疑似重力による骨への刺激で対策する。

6. 謝辞

本校の前田学先生には、温かいご指導をいただきました。心より感謝申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 高野敦. 堀内翔太. 佐藤浩彰. 3Dプリンタによる応力対応型トラス構造. 第30回宇宙構造・材料シンポジウム (2014年12月1日. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (JAXA) (ISAS)), 相模原市, 神奈川県 資料番号: SA6000043014 レポート番号: A13.
- 2) 堀秀輔. 宇宙開発における3Dプリンタの活用取組み. 「新しいものづくり」3Dプリンタ活用最前線. 2015, 221-227.

- 3) 石川洋二. 大林組の「宇宙エレベーター 建設構想」. 宇宙エレベーターの実現を目指して 特集 第2回. 2014, 62, 9, 305-309.
- 4) フリードリッヒ・ヒルツェブルッフ. 第2回日本数学会関孝和賞受賞講演-正多面体とサッカーボール. 数学 / 日本数学会 編. 49, 2, 173-181.
- 5) Masayuki Naito. Applicability of composite materials for space radiation shielding of spacecraft. Life Sciences in Space Research. 2021, vol. 31, p. 71-79.
- 6) 永井翔真, 小林稜平, 星之内菜生. 宇宙で暮らす-宇宙建築学サークル TNL. 連載 空と宇宙に学ぶ. 2019, 67, 8, 294-295.
- 7) 小田稔, 宇宙線[, 物理学選書 5], 裳華房[, 出版地], 1972 年[, 426].
- 8) Robert Hoyt, Jesse Cushing, Jeffrey Slostad. SpiderFab : Process for On-Orbit Construction of Kilometer-Scale Apertures. 2013, NNX12AR13G
- 9) Orbital Assembly.” Voyager Station”. Orbital Assembly. voyagerstation.com, (2022-02-09)