

月に人類社会をつくる
リファレンスモデル
検討報告書



2025年3月

月惑星に社会を作るための勉強会
リファレンスモデル検討ワーキンググループ

月に人類社会をつくる

リファレンスモデル検討報告書

目次

1. はじめに・・・月勉強会とリファレンスモデル議論の経過	1
2. リファレンスモデル検討の意義	2
3. 月に社会をつくる・・・ムーンビレッジのリファレンスモデルという思考実験	4
3-1. 月に社会をつくるとは？	4
3-2. リファレンスモデルの動機と問題の設定	8
3-3. 5つのテーマへの取り組みとリファレンスモデルの仮の前提	16
4. 各分科会の検討結果	18
4-1. アーキテクチャ分科会	18
4-2. ビジネス分科会	36
4-3. 社会科学分科会	56
4-4. ライフサイエンス・医学分科会	73
4-5. 人文科学分科会	97
5. あとがき・・・リファレンスモデル議論の取り敢えずの総括	108
6. 付属 1 リファレンスモデル検討参加メンバー及び執筆者リスト	111

1. はじめに・・・月勉強会とリファレンスモデル研究の経過

「月惑星に社会を作るための勉強会(略称:ムーンビレッジ勉強会)」のルーツは、2019 年度に活動した「探査の将来を考える勉強会(以下、「探査勉強会」という。)」にある。探査勉強会は、同年、6 回の会合を継続して行い、毎回話題提供者を招いて、月惑星上に人類社会を構築するという大きなコンセプトのもとに、課題の抽出やアプローチの方法などについて議論した。また、同年 12 月、Moon Village Association (MVA)の「第 3 回ムーンビレッジ国際ワークショップ(the 3rd International Moon Village Workshop & Symposium)」を日本で開催することし、過去の開催に比べ最大の参加者を得て、月を巡る内外の国や民間の活動紹介と意見交換を行った。勉強会のメンバーは、このワークショップ開催の LOC(地元開催委員会)としても活動した。

「探査勉強会」および「第3回ムーンビレッジ国際ワークショップ LOC」の理念を引継ぎ発展させる形で、「月惑星に社会を作るための勉強会(略称:ムーンビレッジ勉強会)」として、月や太陽系への人類の進出を視野に入れ、新しい世界の構築に想像力を逞しくして考え議論するプラットフォームとして活動を開始した。折しもコロナ禍の中で勉強会的な活動や集会の姿が激変する中で、ウェブ開催も利用して 2020 年 7 月、第 1 回ムーンビレッジ勉強会にて、人類の宇宙活動が行われている状況を宇宙に作るであろう持続的な社会、としてイメージし、このあり様を考える思考実験として、月での人類の活動の「リファレンスモデル」の議論を始めた。

これらの議論の結果をまとめて 2023 年 12 月、「第 7 回ムーンビレッジ国際ワークショップ @倉敷」で各ワーキンググループから活動の概要を報告した。本報告書は、この時点までの活動と議論の結果をまとめたものである。勉強会での議論や各分科会での議論に参加された多くの方々やご意見をいただいた方々にお礼を申し上げたい。

なお、この勉強会の運営や国際学会の日本誘致と運営、リファレンスモデルの議論および報告書の執筆や編集などは全て、参加者の自主的な活動としてボランティアベースで行われたことを記しておく。一緒に活動いただいた皆さん、また、ご支援をいただいた多くの皆さんや団体に深甚の謝意を表する次第である。

2. リファレンスモデル検討の意義

50 年近く前に「ロケットも、気象衛星や通信衛星の開発も行きがけの駄賃でやっているのであって、宇宙開発の目的は「人類の宇宙への展開だ」とおっしゃったお偉方がいた。私もそうだと思って宇宙をやってきた。それが今、夢物語ではなく具体的に議論することができるところまできた。「人類の宇宙への展開」とは「宇宙に社会を作る」、あるいは「宇宙に社会ができる」と同義だろう。

それではどんな社会か。想像してみたいし、できれば自分たちで構想してみたい。理工学的な手法で概念を構築することができないわけではないが、人文社会科学の要素を考慮するとそんなに簡単なものではない。とりあえず参考になる何かモデルをえいやあと描いてみることにしたらどうか。それがリファレンスモデルである。

(リファレンスモデルとは)

リファレンス、つまり参考例である。これからできるあるいはつくる社会を論理的にかつシステムティックに緻密に構築するにはあまりにも不確定要素が多いし、検討のための様々な条件を設定するにはよくわからないことも多々ある。そもそも社会とは何か、の定義から議論しなければならない。

そこで何か議論や課題を抽出するために、また本質的なことをあぶりだすことを目指して議論に参加するメンバー間で共有できる、当たらずとも遠からずと言えそうな例示を描いてみようというのがリファレンスモデル作成の意図である。そのようなものを作成することでより具体的に議論や課題の検討がしやすくなるし、次の段階に進むことが容易になるのではないかというのが目論見である。

したがってあまり精密な論理的整合性を最初は追及しないこととする。社会がどんなものかイメージが出来、関係者で共有できて、主要な課題や要件等が抽出できればいい。一つのモデルに固執することなく必要に応じて修正し、議論、検討、構築を繰り返すことを前提にする。

(リファレンスモデルを作ってその先は)

とりあえず一つ場合によっては複数のモデルを作り、それを基に議論をする。そして様々な矛盾や要検討事項を抽出し次の段階に進むことを想定する。

重要な課題や、問題点、気づき事項を抽出することがこの段階の重要な目的であり成果である。その成果を基に次の段階を議論すればよい。

(方法論について)

これまで人文社会学的な視点を取り込まないスペースコロニーや月基地の検討が数多くなされている。その延長線上で月社会を構想することはそれなりの価値があるが、ここではその方法論とは違ったやり方も試みたいし、挑戦したい。ロードマップや長期ビジョン検討の、これまでの将来構想検討手法にこだわることはない。いやむしろ無視し新しいやり方を創り出すくらいの意気込みの方がいいのではないか。

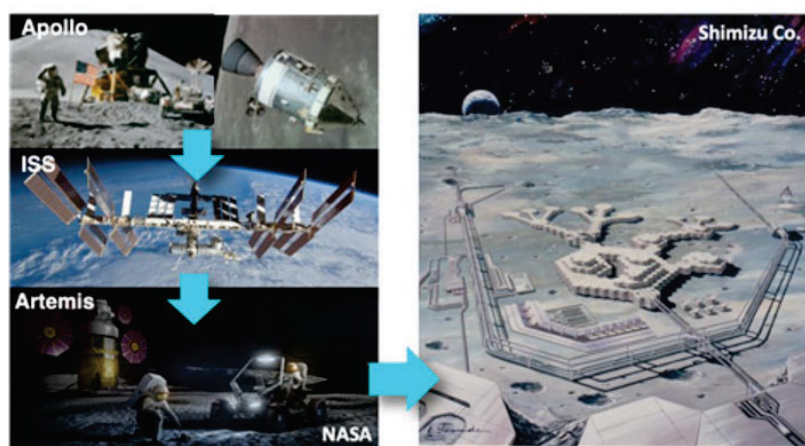
5つの分科会(アーキテクチャ、ビジネス、社会制度、ライフサイエンス、人文社会)を組織して、人類社会のあらゆる要素を包含した検討を並行して相互に関わりあって進んでいくことを目論んでいる。このような研究や検討はこれまであまり例がない。新しい試みとして方法論を作り出すことも必要であり、この勉強会の重要な試みである。

3. 月に社会をつくる・・・ムーンビレッジのリファレンスモデルという思考実験

3-1. 月に社会をつくるとは？

人類の宇宙活動は、1950年代の冷戦の時代に西側と東側の陣営すなわち米ソの競争の論理で有人宇宙飛行から始められ、その後アポロの月着陸からスペースシャトルの運行開始、ISS宇宙ステーションの運用へと進みました。この中では極めて限られた「宇宙飛行士」という特別な人たちが職業として地球周回軌道上に持続的滞在をする状態までに進化し、さらにISSの次はアルテミス計画として同じく国際協力で月での持続的有人活動を次の目標として進めようという所まで来ている。ロシアや中国、さらにはインドの有人宇宙活動がこの先の近い将来、月をめぐる展開される話もある。

また21世紀になってから現在までの最近の25年くらいの時間では、動機は様々であるが、かつての冷戦の論理でなく、国の行う宇宙開発でもなく、民間の力あるいはビジネスの論理で行う宇宙活動が活性化する状況も作られつつあり、民間の人も誰でもとは言えないが、お金を払えば宇宙に行けるという時代にもなって来て、国が宇宙飛行の機会を独占していた時代から大きなゲームチェンジが行われようとしている状況もある。



人類の宇宙活動の進歩？

ここでもう少し思考を前に進めて、もっと宇宙活動が一般化または大衆化して、例えば持続的な有人活動の次のゴールとして「月に社会を作る」などと言うところまで考えると、どういうことを考えておいたらよいだろうか？少なくとも、社会ということの意味するところは、現在のISSのような宇宙活動よりもっと大きな規模の人間の集団？かつての新大陸志向のような移民という集団の延長？あるいは様々な職業や役割の人はいるが、さりとて自然発生的に生み出される人間の集団？経済的にも自立したり複数の人の集団の単位での相互依存の人類の活動単位？などというようなイメージだろうか。また、社会というものができたら、そこでは何か人類の活

動を律するためのルールのようなものが出来て運営されているだろう。月という宇宙全体の意味では極めて地球には近いが、さりとて地球上とは全く異なる、そもそも人類の住めない環境で人類が生活するには、それなりの工夫やいろいろなアーキテクチャの成熟が必要なことは言うまでもない。科学技術の進歩のお陰で経済合理性を無視すればそれは出来ることかも知れないが、持続的に存在し続けると言うことは、その営みでは経済的にも自立した活動のスタイルを作らなければ長続きはしない、とは必定だろう。

国際宇宙ステーション ISS は 2010 年ごろに完成して、持続的に人類が地球周回軌道上で持続的に活動できる施設として作られた。持続的とは10年とか20年とかでなくもっと長い時間を期待したいところだが、現実には建設が終了して運用が始まってしばらくしたら、さてこれはいつまでやるんだ？という議論が出ていることも事実である。これはなぜかと言えば、この持続的な施設が生み出す広義の価値が、投資や維持するためのコストを上回っている状況があれば、誰もそういうことは言わないのだろう。生み出す価値は多様でいろいろあってよいのだが、人類の宇宙進出の踏むべきステップとしてこれは極めて意義深いという類の価値もある一方で、投資とリターンというお金のメジャーで、結局これは儲かる話になっているのかね？という素朴かつ直裁的な問いになかなか答えづらいのも事実である。お金の勝負になって、ISS の建設のための投資額の10兆円という規模のリターンを生み出せとなったら、なかなかそれは難しい・・・などということは宇宙の仕事ではよくあることだが、世の中が容認するかと考えると、それはやはりその投資の規模にもよるのだろう。

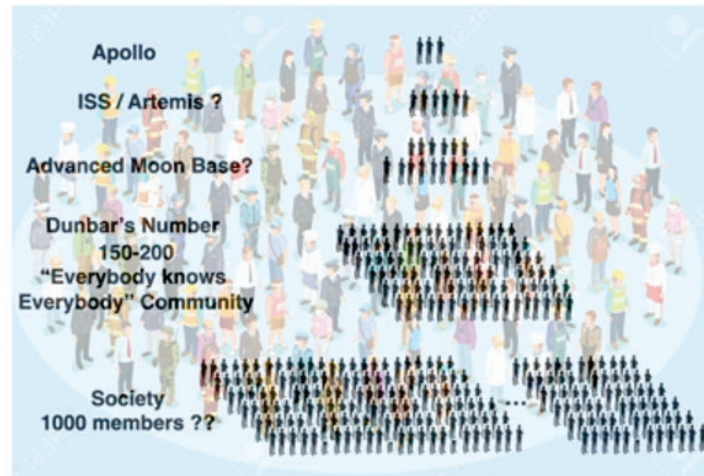
なぜ人類の持続的宇宙滞在や宇宙活動を目指すのかは実は自明ではない。いろいろな動機が考えられるのだが、ひとつは、そもそも人類は地球を離れて活動領域を拡大することは運命づけられているのであるから、ISS の次は月で、その次は火星の持続的有人活動と進めるのに理由はいらないという主張もあるかもしれない。これでは一部の人の賛同は得られても、ISS では西側各国がそれぞれ GDP のコンマ何パーセントという規模のお金を出したのであるが、人類全体でそれ以上の大きな投資を宇宙活動に向けてすることに同意を得るのは今の世の中ではなかなか難しそうである。

次はそのくびきを逃れるために期待されるのが、民間投資による宇宙における経済活動で、人類の楽しみや活動範囲の拡大のためにする宇宙旅行のようなビジネスや、地球の資源が枯渇する、または人類の将来にとって大事な資源が宇宙にあるのでこれを利用する、というようなリターンを意識する動機である。資源はいろいろな可能性があって、高価で希少な金属のような資源や今日の石油のようなエネルギー源やあるいは発電衛星のような地球の環境維持のためのエネルギーソースというもののまで含むだろう。ここでもリターンと投資とのバランスの話であるが、税金のみを頼りにするのに比べたら大きな投資を得る可能性はあるのだろう。

次は人類のサバイバルの動機である。この先の極めて長い時間の後には地球はおろか太陽系にも住めなくなることは物理の教えるところで、いずれ間違いなく起きることである。そのときに備える、というのであれば、地球の周回軌道上や月や火星に住めないようでは、その先はさらにおぼつかないだろう。従って、宇宙規模で起きるいろいろな人類にとっての困難を乗り越えて、人類が生き残る(サバイブする)ことを考えるのであれば月の上で社会をつくるくらいのことはたやすいことにしておかないと人類に未来はない、との論も成り立つ。その第一歩として、月での社会の構築と言うことを考えてみよう、と想像力をたくましくしていろいろな思考実験をしてみることは、ちょうどよいくらいの例題と言えるだろうか。一方でこの動機では、それでは明日から始めようと主張するのではやや弱くて、「もうちょっと先で考えましょうか」となってしまうのも事実だろう。

ここで考えるような月での持続的滞在から社会の構築というような規模のことを考えると、少なくともその社会を構成する人の数は今の宇宙船で運べる人数や ISS での常時滞在人数の5人とか10人とかよりはるかに多い人数の人の集団とその営みを考えるのであろう。この集団の構成員の数とは50人だろうか100人だろうかあるいはもっと多い人数だろうか？社会というもの、あるいは何人の集団から社会というのかの定義は難しいのだが、少なくともここでは何か社会という人間の集団を運営するためにルールか仕組みが必要で、これは月の上でどういう活動をするのかということと無縁ではない、と考えるのだろう。

Dunbar 数という概念があつて、これは類人猿の集団の大きさの考察などから得られる概念だそうで、その集団の構成員のみんなが全員のことを知っていて、あるいは直接のコミュニケーションを通じてその集団を運営できる(運営の定義も必要だがあまり堅苦しく考えない)というような概念の様で、類人猿や人間のように高度な知能があれば100とか200とかいう個体数の程度ということらしい。逆にいうとこの数を超えるとこの集団の運営になんらかのルールや規則や仕組みが必要になる、と考える。これをもって社会の定義とするところまでやってよいのか不明だが、なんらかの集団の定義として、社会という運営の仕掛けが必要という程度の集団の構成員の数というのはありうる決め方である、と考えてもよいだろう。ここでの思考実験としては、これより多い数の人の集団というのが社会というべき集団の人数の決め方としてはどうか？ということである。



有人宇宙飛行と社会を構成する人の数？

月における社会がどんなものをイメージするのに地上での例で何か相似性があるかと考えてみるのも一つの方法だろう。下の図は、地球の上で人里離れた場所になんらかの人間の集団を作る例、および、ある種の価値を生み出す事業のために作られている人の集団という例などである。科学の目的、アミューズメント、資源、エネルギーなどいろいろだが、これらの例はいずれも民間が運営しているものである。それぞれ目的や人数や事業の規模は異なり、後の議論で出てくるように、それが生み出す価値の内容や金額も様々である。何かの目的のために作られた活動のベースあるいは人間の集団という意味で、ここで考える月に作られる社会または人間の活動というものと、ある種の相似性をみることはやってもよいのだと考えよう。また、宇宙計画の経費との対比でその生み出すお金を比較できるものもあり、中でもエネルギーのビジネスは他と比べて極めて巨大だなどと分かる。いずれにせよ、この後の議論ではこれらの例を踏まえて、月の社会における活動の具体的なイメージと考えたい。

極地科学基地	クルーズライナー	与論島
		
Ny Alesund, Norway 北緯79度 研究者=100人+運営=30人	乗客= 3000人 運用クルー=1000人	人口=5000人,観光客=15万人 年間総生産=130億円
	Vale: ブラジルの鉄鉱石採掘 鉄, 非鉄資源採掘 年間生産額=4000億円	 Mirny: ロシアのダイヤモンド鉱山 年間生産額 =数千億円
エネルギービジネス(石油・LNG) いわゆるスーパーメジャー(世界に10社以上) 年間生産額(1社当たり)=10兆円の規模 ISSやArtemisなど建設費・運用費に比べても巨大		
		

地球の上での孤立した場所での人間の活動や事業の例

3-2. リファレンスモデルの動機と問題の設定

未来に向けて、いわゆる探査という概念を超えて月での持続的な人類の活動、さらには経済活動や社会構築とか言う議論されている。これらの未来の議論自身は、それはそれで前向きで良いのだが、多くの議論では実行可能性の意味で現実と非現実が錯綜していたり、国家のプログラムの話をするのか、ビジネスの議論をするのか、夢だけを語っておればよいのかさえもはっきりしない、などと言う批判もあることも事実だろう。この辺りをぼんやりしたまま話を続けるのも悪くはないが、それぞれイメージがバラバラではきれいな絵は描けても具体的に話を進める議論にはなかなか入っていけないのも事実である。

本報告書で行う思考実験では、議論の土俵である前提条件を整えて物事を具体化・定量化し、月での社会構築というものをどのようにしたら実行できるのか、何が課題で何を解決すれば現実のことになるのか、などという状況を作ることを考えたい。そういうふうに議論を前に進めるために「リファレンスモデル」という形で月での持続的有人滞在をする集団やその活動のモデルを考え、月における社会とでもいうほどの規模の人間の集団やその営みについて、その姿を明らかにしたり、克服すべき課題をイメージしておくことは有意義なことだと考えた。以下ではこの報告書で抽出した視点や課題と、「リファレンスモデル」によって明らかにしたいこと、および、その取り組みの考え方について述べる。

3-2-1. 課題の設定と5つのテーマ

月での持続的な有人活動から社会の構築といったときに思いつく、いろいろな視点や疑問は以下のようなものが挙げられるだろう。

- 社会とはどんなものか？社会の目的は？そもそも目的は必要か？
- 持続的に滞在できる仕掛けとはどんなものか？技術的・経済的に可能なのか？
- 月でどのような活動をするのか？どのような価値を生み出すのか？
- 社会の規模や人数は？どれくらいの長期間？それは仕事？出張？移住？永住？家族は？
- 社会運営のルールは？地球との関係は？
- 人間の体や精神(これらの定義も必要だろう)は長期間の持続的宇宙滞在に適応できるのか？
- 月で世代を継ぐ？新しい人類？などというところまで考えるのか？

すでに述べたように、これらは技術的あるいは経済合理性の観点ですぐに実現するのは難しい課題も多いことと、社会の構築という面でもなかなか簡単に答えの出ない問題も数多くある

だろう。これらの極めて多様かつ答えを出しにくい課題に、難しい課題であるが故に前向きかつ未来思考で想像力を逞しくして議論することが大事である、と考えたい。

このような動機で、以下の5つのテーマに大別して、この先の議論をしてみたらどうかと整理してみた。

- 技術的に成り立つにはどうするのかを考える課題
- 社会において経済活動や価値を創造する課題
- 社会という仕組みや運営の方法に関する課題
- 長期の人体影響や環境適合などライフサイエンス・医学の課題
- 持続的有人宇宙活動の人文科学・文化人類学の課題

議論すべきことや明らかにしたいことは極めて広範囲に及び簡単に答えが出せないことも多いのはいうまでもないが、上に掲げた 5 つの課題それぞれについて考えるべきことはこんなことではないか？あるいはこんなことを議論したら面白いのではないか？と思うことを、以下の各節に書いたように提起してみた。このあたりの議論は大いに主観も入るところなので、読者の皆さんに批判していただき、是非とも一緒に考えたいところである。

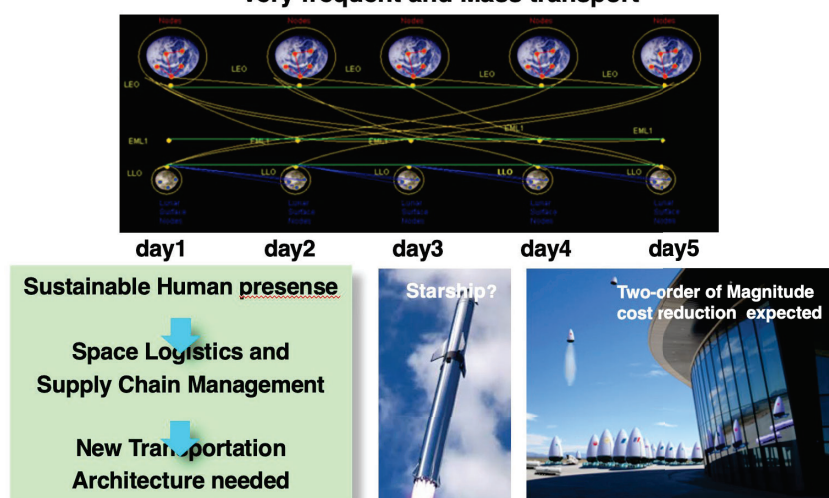
以上が、ここで議論するリファレンスモデルを考えるための我々の動機であり問題意識であると理解していただきたいと考える次第である。

3-2-2. アーキテクチャの議論・・・技術の課題を抽出してみる

ISS の次に同じ枠組みの西側中心の国際協力で行うことを考えている、いわゆるアルテミス計画は、ISS と同程度の数の人を月の周回軌道上や月面上に完全な常時滞在ではなく、時々月に降りてアポロよりは長い時間滞在する、これをある頻度で継続する、という計画である。地球周回軌道を超えて、いわゆる深宇宙のホンの入り口である月に行くだけ、および滞在するだけでも、現在人類の持っている地上から宇宙への輸送手段や滞在の仕掛けでは、ISS の程度の持続的滞在でもこれは大変なことである、というのが現実である。

ここで考えたいのは、先ほどのような大きな数の人の集団が月の上に持続的に滞在し、生活をし、後でいうなんらかの活動をし、そのために必要ないわゆるリソースを ISS への補給や人の往復のように地球から運ぶのか、あるいは現地で調達したり生産したりするのか、などを考えることになる。

Routine Access to & from the Moon = Earth-Moon Traffic networking Very frequent and Mass transport

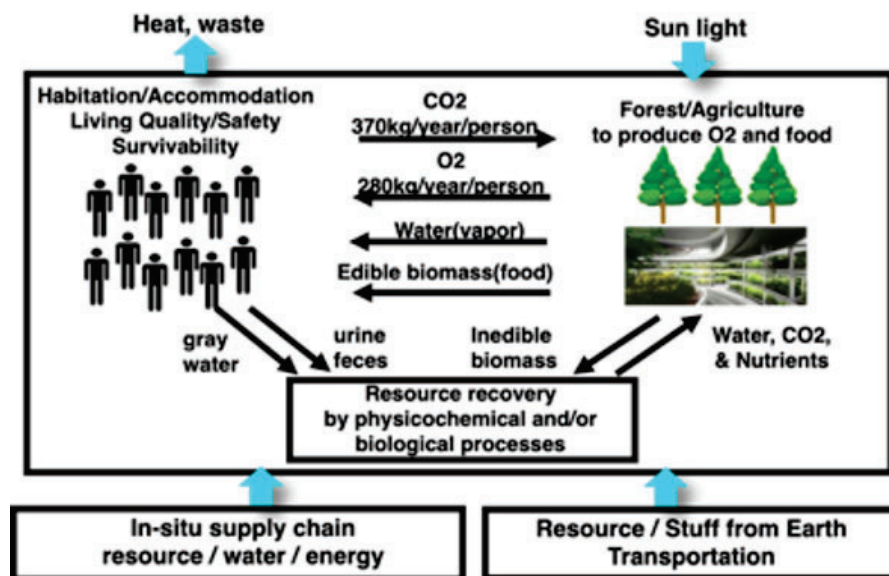


月への高頻度大量の輸送体系をどう構築するか？

今の輸送コストでは大変なことになる

先ほどのアルテミス計画の話では、SLS という一発何千億円もすると言われる巨大ロケットで、この滞在施設を月の軌道上や月面上まで運ぶし、行った人は帰ってこないといけなから、往復するための輸送の仕掛けが必要で、実はここが大きな意味でのボトルネックとなっているのである。宇宙ステーションでは先ほどのような6人の常時滞在のために、米欧日のロケットや輸送機で年に何回かの交代の要員や物資を運ぶと言うロジスティクス的な運用が定常的にされる状況が作られた。この ISS との比較で言うと、やはり月は遠くて、さらにこの上にもっと多くの人数と言うことになると、この輸送の仕掛けや、これの負担を軽くするためには可能な限り運ぶ量を減らす、運ばないで済むようにする、すなわち現地で使えるものは現地で調達するという、いわゆる ISRU (in-situ resource utilization) という概念で持続的なリソースの調達を現地でやるべきだ、と言う話になる。

また、月にある資源では、実は地上と違って一番困るのは水素、炭素、窒素などの生命の維持に不可欠な元素がほとんどないと言われていることである。最近では水が氷の形で月の極域に存在しているという話があつて、これが使えと色々なことがとてもやりやすくなるということが話題となっている。こういう資源活用も含めたアーキテクチャは、今の ISS におけるものからかなり技術的な進化が必要なことは直感的にも理解できるのだが、さてそれでは技術的にどう言う仕掛けをどの程度の規模感でどのように維持していくのか、また、ISRU の求めと先ほどの輸送に対する求めとの間で、どういう仕掛けを作ったら良いのかと言うことを、定量的にあぶり出しておくことや、これを経済的に成り立つ様に行うするには、さてどのくらいのお金がかかるものであるのか考えておくことは、技術の次の目標を明らかにすると言う意味で有意義なことであろう。



月の上で人間が生活するために必要な物資を現地調達できるか？

ISRU(In-situ Resource Utilization)

3-2-3. 価値を生み出す。何をして経済活動とするのか？ビジネスの議論

次は先ほど述べた課題の中で「価値を生み出す」話である。地球に住めなくなるとかいう長い時間のスケールでは、そのために必要な営みには無条件で価値がある、との論はもちろん成り立つ。ただし、それはいつか？いつから始めないといけないか？今日か明日か？と言う議論になると、人類にはその前に解決しておかないといけない問題が山ほどあって、この人類のサバイバルの論理で、今の宇宙活動から月での社会構築というような大きな投資が得られるかというと少なくとも西側のある意味で成熟した社会ではこのような大規模な宇宙開発にかかる投資へのインセンティブは残念ながら今は働かないのだろう。すなわち、国の仕事として税金を使ってやる宇宙開発の規模と先ほどの人類の未来のための価値の創造のための投資ではペイしない、ということなのである。

それではどうするのかとここで考えるのは、経済活動あるいはビジネスが展開できる状況を作って、リターンが定量化され、経済合理性の世界で宇宙活動への投資がおこなわれる、という循環を作ること、すなわち、いわゆるビジネスの論理である。素朴かつ直裁的な言い方では、結局は「儲かる期待」があれば投資は行われるという単純な図式である。

さて何を具体的にビジネスのタネと考えるかについてはいろいろな議論があり、先ほどの ISRU のための月の資源、その採掘と利用、輸送、それを使って行う人や物資の移動のサービス、すなわち観光業や輸送業、月の非日常的環境を楽しむ体験やアミューズメントの類の仕事、教育、地上からのテレオペレーションなどのエンターテインメント、セメタリーサービス・・・などなどいろいろな種類のビジネスの候補が考えられる。ここで知りたいのは、どれほどのリターンを生み出す仕掛けを作るにはどれ程の投資がいるのか？果たしてそれを持続的に行う仕掛けはどうすればよいのか？というようなことである。このあたりを先ほどのアーキテクチャの議論でも触れたのだが、資源の利用や輸送の課題も兼ねて人の動きや旅行や観光などという切り口で具体的な例題を考えて定量化してみることがよいだろう。

3-2-4. 社会を運営するあるいは社会の活動を律するルールはどうする

この議論の初めの方で、これまでの宇宙活動で経験したことのないほどの多くの数の人の集団という話をした。地球の上では村や町や都市という規模間は、まあ千人、1万人、10万人、百万人、それ以上といろいろ考えられるが、いずれにせよ、このような大きな数の人間の集団が滞在したり生活したり仕事をしたりということでは、なんらかの社会の仕組みのようなことが必要となるだろう。むしろ、そういう仕組みの様なことが必要な集団の数をあえて考えてみようということを経験したことを社会の規模や人数のところで述べた。

今我々が地上で住んでいる村や町や都市では、いわゆる自治体のような体制があつて、公共という概念の、みんなが社会を維持するコストを負担して公共サービスを行うボディがあつて、運営するという仕組みがつくられている。そこでの運営のルールは、長年人類が培ってきた税とかサービスとかいう概念で、民主的に運営される仕組みが作られてきた。そもそも社会の始まりとはどういうことから始まるかというと、生きるためだけか経済活動を行うためかいろいろな動機はあるが、そこになんらかの活動をする場があつて、そこに人が集まり運営する仕組みが作られていくということだろう。

さて、月ではどうかというと、自然発生的に人が集まるというのは少し違って、もう少し何か目的を持った集団として作られていくことになるのだろう。また、先ほどの価値を生み出す仕掛けやビジネスを行う場を作るということは、何らかの投資や売上や利益やらが生み出され、経済活動に伴う課税や許認可などの仕組みも必要となっていくのだろう。そのような仕組みを月の上の社会とでもいふべき人の集団でどのように運営したら良いのか、あるいはそれは月の上で閉じて行われるのか、または地球との関係でその出先機関的に行われるのか、などということも考えておくのだろう。

さらには地上の経済活動や、今の地上ではいわゆる国という概念さらには地上の地政学的力学の働く世界があって、そういうことの反映が「月の上で作る社会」にどう反映されるのか、もっと言えば、地球から離れて、ある意味独立した経済活動や独立した社会などというところまで行くのか、などと思案は広がっていく。さてどのあたりまでを考えるのか、最初に作る社会的な営みの世界の規模感を決めたり、あるいは最初から完成した社会というものができるといよりも、何か段階的に発展していくプロセスを考えるのか、などといった課題について考えることは有意義なことだろう。

3-2-5. 生命体としての人類の持続的宇宙活動の課題・ライフサイエンスとその拡張の議論

宇宙に人類が長期間滞在するとき生き物としての人間が暮らしていく上で問題となるのは、大気圏外の弾道飛行や宇宙空間を飛行しているとき、および、月や惑星上で重力環境が地上と異なることがひとつで、これは運動機能や体の成長などに影響を及ぼすと言われている。もう一つの重大な問題は、いわゆる放射線の被曝で、宇宙環境では地上では地球の磁場や大気存在のおかげで気にしなくても良いのに比べて、遥かに大量の被曝を受け、その人体影響は極めてシリアスなものになるという話で、太陽フレアが起きたらどうするか、若い人や子供を産むなどということに大きな制約になる、などという話である。

これら二つの課題はシリアスではあるが、ある意味で既に議論されていて、現実的な対策は結構大変な面もあるのだが、技術の進歩によって、これらを防ぐ、あるいは、カウンターメジャーを考えることができるという話ではある。このような状況で人間の健康を保つというような意味で、ライフサイエンスというか医療という概念で人の健康を維持するという課題が導かれるだろう。ある意味では生身の人間をどう守るかという話であって、それらシリアスな人体への影響を防ぐという受動的な方法での対策をいろいろと考えておくことだとも言えるだろう。

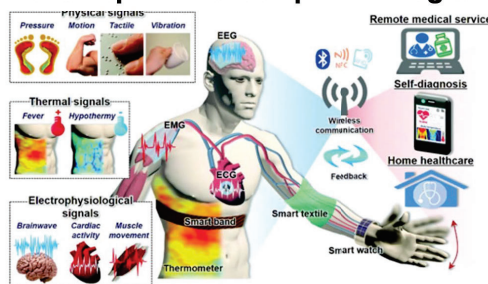
他方で、もう少し長い時間の人類の宇宙環境への適合という概念で言うと、例えば地球の上でサルからヒトへと言うのは変化する環境への適合と知能の進化によってある種の淘汰のプロセスを経てきたのであるが、宇宙空間あるいは月面や惑星の上での人類の持続的存在や進化という概念で捉えれば、むしろ積極的に新たな環境への適合という概念で捉えられるだろう。これまでの人類が経験してきたようなダーウィンのように適合していくのかというと、現在の生命工学や生体工学といういわゆる技術の力で適合させていくという方が一般的になるだろう、との論もある。いわゆる技術による人間の能力の拡大やエンハンスメント／オーギュメンテーションなどという概念である。

長らく月で生活をして世代を経た人類を考えると、果たして地球と同じ環境を作り続けることで、人体を変えることなく過ごすことに力を注ぐのか、あるいは積極的に新たな環境に適合し

て、場合によっては地球に帰るとき(実はこれはもう帰ると言わず「地球に行く」というのだろう)に何か特別なことをする、あるいは、帰らなくても良いとするようなことまでを考えるのだろうか。さて、これを進化なのか適合なのか、エンハンスメントなのか？新たな人類の登場なのか？などということである。

ライフサイエンスの拡張として生命を扱う技術がどんどん進むとき、どういう世界を描くのかは興味深い話となるだろう。今の宇宙活動のように特別に訓練を受けた宇宙飛行士が半年ほどの時間宇宙に滞在し生涯で何回か行くのがせいぜいという世界から、100年の持続的滞在への転換という話では、3代とか4代にわたって世代を継ぐ時間となる。月面社会での人類の持続的活動から、世代を継いで宇宙で生まれる世代などという議論は、こういうことの入り口でもあるとも言えるのかもしれない。宇宙での重力の変化への対応や放射線の防御というような現在の課題や医療の課題を超えて、このような人類の宇宙進出にかかる本質的な話題も視野に入れての議論はとても興味深いことである。

Beyond Life-Science Sustainable human presence in Space & Augmented human ??



Ha, et al. *J. Mater. Chem. B*, 2018, 6, 4043-4064



環境を人間に合わせるのか、人間を環境に合わせるのか？

技術の進歩で人間の能力を Enhance する、Augment することができるだろう

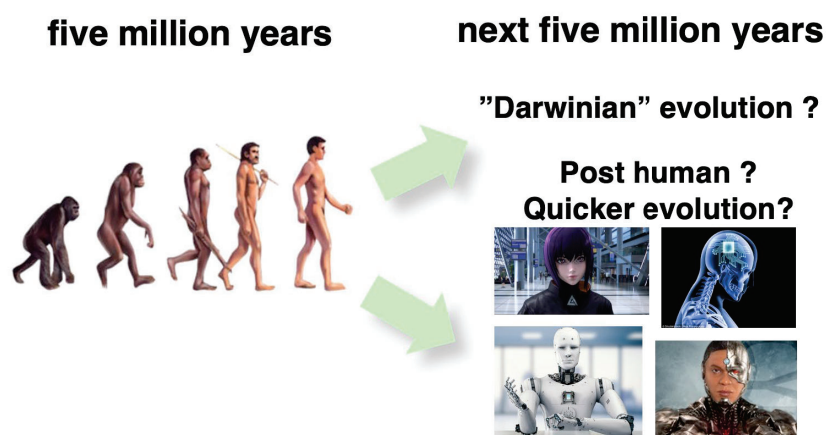
3-2-6. 人文科学・文化人類学的な議論・・・宇宙に進出する人類の課題を考えておく

ここで議論するような宇宙での人類の持続的活動が本格化するとき、その中で人が生きて社会を構成する上では、制度や社会の運営方法などといった社会科学的課題に加え、いわゆるヒューマニティ、あるいは、人文科学的、文化人類学的な視点での考察は極めて重要かつ本質的なことである。地上における持続的な社会では、その営みの大きな役目として、人類

はその社会におけるさまざまな役目や経済活動の一部を担い、その上で世代を継いでゆく。要するに生まれて育てられ、教育を受けて成人し、仕事をして社会に何らかの貢献をして、老いて死んでいく。好むと好まざるとに拘らず、社会の構成員とはそういうものだろう。

強権的でなく自由で成熟した社会では、その社会の構成員のそれぞれの個々人には多様なあり方を許す寛容なものでありたい、ということは望まれるのであろう。現在の宇宙活動を支える極めて少数の、職業として訓練された宇宙飛行士が仕事をする場としての宇宙空間ではなく、そこで生活し、生まれて死ぬというようなサイクルを繰り返すような社会としての営みをする上での人間の活動やその方法や考え方についてのさまざまな考察が必要となる所以である。

前のライフサイエンスの課題で述べたように、地球の上に終始生活の場を置くようなこれまでの人類の在り方から、宇宙空間や月面または惑星表面上で持続的に生活することが常態化し、さらには、そこで世代を継ぐというような環境では、さて人類は地球の環境や生活のスタイルを守り抜くのか、あるいは、新たな環境に適合していくのか、どちらなのだろうか？あるいは、むしろ環境に適合するようになっていくとき、さてそれは人体の適応能力に委ねるのか、積極的に技術の力によって適合またはエンハンスしていくのか、というような話題も優れて人類学的な話題なのでしょう。そういう技術も含めた新しい状況に直面したとき、そもそもそういうことは許すとか許さないのかの議論に馴染むのか、あるいは許すならどういうルールや仕組みで行うのか、あるいは、個人の動機に委ねるのか規制するのかなどということに人類学的観点から議論しておくことも有意義なことだろう。これらの課題は人類の未来にとって極めて大きなテーマであるといえる。



長い間の人類の進化はこの先どういうことになるのだろうか？
社会的存在となった人類はこれまでと同じように淘汰や環境に適応して進化する？
技術で適合させる？これは新しい人類なのか？さて宇宙進出との関係は？

3-3. 5つのテーマへの取り組みとリファレンスモデルの仮の前提

以上述べたような極めて広範囲でかつ多様な課題をはじめとする我々の動機や問題意識に対して、月における社会構築のリファレンスモデルとしては、その規模やどういう社会の構成とするのかを仮でも良いのでまずは決めてみる。その上で、これらを様々な定量化や議論を深めるための前提条件とするのがよいと言うふうに考えた。

一方で、このリファレンスモデルを考えるための前提としては、あまりその前提に根拠や合理性があるかどうかを考えすぎても話が前に進まないのも事実である。前提や仮定の置き方と設定の仕方については多くの議論があることは理解した上で、ここでは敢えて、半ば感覚的に以下のようにしてみることでどうかと考えた。

その仮定の置き方とした理由を少し述べておくと、今の技術の延長で明日やあさって、あるいは、この先10年というよりも、「もう少し先」で期待される技術の進歩などを少々楽観的に考えられるくらいだが、なおかつ非現実的にはならない、という程度が、未来思考の設定としては良いであろうということを、まずひとつ目の考えとした。「もう少し先」をどの程度と考えるのかについては後で述べる。

これまでも述べたように、現在の宇宙活動や有人活動のすぐ次の発展やエクステンションということが大事ではあるが、ここではそういうことは宇宙ステーションの今後やアルテミス計画で考えれば良いこととする。ここでの考察はむしろ、将来の人類の本格的宇宙進出や、究極的には宇宙的な時間スケールの中での人類のサバイバルというような、かなり先ではあるが人類の未来のためには必ず直面するであろう世界を視野に入れて物事を考えたい。そういう次の世界への入り口に差し掛かったときに、さて今考えようとしている月の社会では何をしておいたら良いのだろうかを考える。そういう思索を巡らすのにふさわしい仮定や前提は如何なるものか考えてみようと言うのが二つ目の考えというかむしろ動機である。

以上のような考えで、次ページに列記するような仮置きや数字や前提としてみた。思考実験としては、ひとつの前提にせず複数の可能性について考えてみることもあり得ると、そういうことも含めた。いろいろと批判はあることは理解の上で、ここで述べたような考え方をご理解いただければ幸いである。このような形で仮定や前提を置いて、上に述べた5つの分野で第2節に述べたような各分野における知りたいことやその動機あるいは問題意識に照らして、さまざまな議論や考察をしてもらいたいというのが、ここでのリファレンスモデル思考実験の動機である。

- 何人の規模の社会を想定？……1000人
この規模の持続的有人活動の社会運営のための様々な課題を抽出してみる
- 滞在している人は、仕事集団、訪問者、住人、定住移住者なのか？
…以下のような場合を考えて見ることにする
 - A. 1000人のワーカー(30代–50代)……滞在1年？
 - B. ワーカーとその家族(ワーカー、家族(配偶者、子供、親?)数年の赴任
 - C. 定常的社会:年齢構成と持続的人口ピラミッド？
- 価値を生み出す営みとしてビジネスの成立性を考える
まずは資源と観光ビジネスの事業内容や規模とサービスなどを定量化してみる
- 年間10000人のビジター(=地球からの観光客)
毎日30人 * 10日 = 300人の滞在施設、輸送システムとセットで考える
- 居住・生活の質は？
アポロ級、ISS級、ホテルルーム級、アパートメント、マンション、一軒家？

以下第4章で述べる各課題における具体的な議論の進め方としては、とりあえず、これらの前提で出発するが、これらはあくまで目安や希望であって必ずしもそれを守る必要はなく、それぞれの分野の独自の考えで前提や考える対象は自由に変えて新たな設定をしてもらいたいとした。また、考え方の議論で「もう少し先」という話があったが、これは20年、50年、22世紀？あるいはそれ以上、もっともっと先…と幅広く考えてよいものとした。その意味で、それぞれの分野での議論では、その達成時期をいつにするかという議論や、何十年先には何ができるなどと言う、いわゆる未来予測のようなことでは全くなく、各分野の自由な発想の議論を妨げることのないように時期については自由に設定されたいこと、さらには、分野間でこれらの整合を取る必要はないことというくらいの自由さでやっていただきたいということで、各分野の議論をしていただいた。

以上が、月の上に社会を作るとしたときに考えたい「リファレンスモデルという思考実験」のイントロダクションである。5つの分野の相互のインタラクションも含め、これらの前提のもとで月の社会とはどういう風なものになると考えられるか？あるいは社会として運営するにはどんな方法があるのか？また、ここで掲げたような前提は適切だったか？もっとよい前提があるのではないかなどなどと各分野の専門家みなさんに考えていただいた。議論した結果で、さらに新しい課題が見出されることも期待するなど、それぞれの分野でのまとめ方も当然のことながら一様ではない。むしろそれは歓迎すべきことで、この思考実験の次への発展の方向を示すものでもあるのだろう。

4. 分科会の検討結果

4-1. アーキテクチャ分科会

4-1-1. 検討概要

4-1-1-1. ムーンビレッジの役割

ムーンビレッジが持続的に発展するためには、人類が月面を開発する目的が必要と考える。人類にとって月面が果たす役割としては、「資源探査」や「観光」等が考えられる。例えば、観光都市「月面」の役割は、「観光客にこの場所ならではの体験をさせる」ということである。また、その役割を担うために必要な従業員に「安全かつ豊かな暮らし」を提供することも必要である。よって、観光都市「月面」はこの二つの役割を担える都市となる。

また、資源都市「月面」の役割は、①宇宙で燃料や物資（食料なども含め）が欲しい、宇宙機のメンテナンスがしたいという人に燃料供給やサービスを行うこと、②月面・小惑星の資源を採掘し、地球では入手しにくい資源を地球に運ぶことである。また、その役割を担うために必要な従業員に「安全で働きやすい暮らし」の提供や、一時滞在者に「安全な滞在」を提供することも必要である。よって、資源都市「月面」はこれらの役割を担える都市となる。本検討では、まずは観光に重点を置いた検討を行った。なお、下記検討では、項目ごとに異なる定量化が含まれる点に留意いただきたい。

4-1-1-2. 観光都市であるムーンビレッジに行って人類が実現したいこと

分科会及び勉強会のアンケートで得られたモチベーションを下記に示す。

- 地球外という秘境中の秘境に行ってみたい
- 無重力、低重力という非現実的な環境を体験したい
- 地球を外から見てみたい。
- 研究者として働きたい
- 人類の可能性を広げたい
- さらなる外惑星への足掛かりを作りたい
- 映画やアニメでしかなかった世界を体験してみたい

4-1-1-3. 都市の成り立ち

ここでは、観光都市であるムーンビレッジがどのように発展するかを仮定する。観光都市「月面」はプロフェッショナルによる開発が進み、月面での従業者が 10 名程度になったところから一般人の宇宙旅行先として利用可能となる。開発当初は有人ローバのような施設、モジュールへの短期滞在が可能となる。この時、年 100 名程度の往来がある。

その後、モジュールが集まり、モジュール間が連携(与圧通路で繋がったりする)したキャンプ地のようなことで、月面でやってみたいことが多様化していく。旅行希望者も増加していく、定住者が観光施設の拠点となる月面ホテル建設や、その周辺にやってみたいことを実現するための施設づくりが始まるため、月面での従事者は 100 名程度まで増加する。建設段階では、観光客用のモジュールとは別に建設を行う作業者の滞在モジュールがあり、建設現場の観光ツアーも一時的に開催している。週一回以上の月面との定期運航が実現し、年 1,000 名程度まで往来が増加する。

さらに、月面ホテルや観光施設を中心とした「観光都市」として成熟すると、1,000 人規模の人が定住して働くこととなり、月面観光の需要も年 10,000 人程度まで増加する。都市が建設される場所は、水資源が採掘・利用できる極域となり、建設当初は有人ローバのような小規模のものが月面上に集まったものとなり、徐々に大型施設が建設される。様々な体験ができるよう複数の大型施設が繋がった都市となり、長期滞在している従業員を守るうえでも、都市構造は地下まで延びて形成される。

4-1-1-4. 成熟期における都市の概要

都市は大きく、観光施設と従業員の居住施設に分かれており、各施設間はエアロックのついた与圧通路で繋がり、日々の生活の中では宇宙服を着て外に出ることはない。

観光施設では、観光客の滞在のためのホテル、地球や天体を眺めるための展望台、低重力環境を用いたアクティビティ、月面という秘境を探索するための探検ツアーを行えるような施設・設備がある。また、ホテル内では、月面水を太陽光で沸かした天然？温水等のプール、大浴場などもあり、遊ぶだけでなくゆったりとリフレッシュもできるようになっている(カジノもやれる)。さらには、観光施設は都市の玄関口にもなるため、スペースポートと接続されており、玄関口周りにはお土産屋さんも並んでいる。

また、観光客が消費する食料は地球から持参する+都市内で製造されたものを組み合わせ、シェフによる豪華メニューが振舞われる。なお、従業員もプライベートでお金を出すことで観光施設を利用することは可能である。

居住施設では、従業員の住居(マンション形式)、食堂、健康維持のためのジム、病院、生活雑貨店などがあり、プライベートをそこで過ごしている。また、日々の憩いの場として植物も植えられた公園、スポーツなどの趣味が行えるような共有スペースも存在する。このような環境の中で、従業員は人工的に昼夜が作られた 1 日(地球と同じ 24 時間)間隔で生活しており、

毎日居住施設から観光施設へは与圧通路を通り、歩き(または動く歩道)で行き来している。住居や生活に必要な家電などについては、備え付けのモノを使うことになり、故障した場合は都市の中で修理・交換がされる。それ以外の趣味等のモノは入居時に定められた範囲で持ちこみ可能と共に、一定量であれば輸送費は特例で免除されたうえで後から地球に持ち込める。更に居住施設の地下には、都市内の物質循環装置、農場プラントがあり、完全リサイクル都市として、ごみゼロにしつつ食料の自給自足を行う設備が整っている。

「観光施設」と「居住施設」を維持させるための循環装置(水・大気)は互いの施設内に設置されており、万が一の場合には正常な方に退避可能となる。また、これらの施設の外側には発電や、資源採掘/精錬施設があり、一部の住民は都市の維持・発展のためのインフラ会社、ゼネコン会社にて働いている。このインフラ会社、ゼネコン会社に勤める人は居住施設や観光施設の地下にある各設備や地下通路で繋がっている発電設備、資源関連の設備に移動し、工場勤務している。

以降では、1,000 人規模まで成熟した社会を想定して検討する。

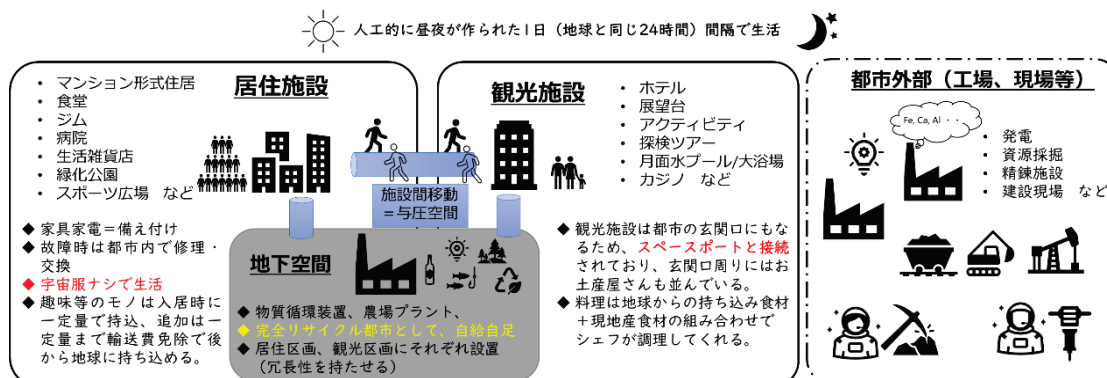


図 4-1-1 成熟期の都市のイメージ

4-1-2. 月面インフラの機能と産業

ここでは、成熟期(定住者 1,000 人/旅行者 10,000 人)における月面インフラの機能と必要となる人数の推算を行う。アーキテクチャ分科会の議論で挙げた想定される都市機能・産業について整理し、主に日本国内の統計データ等を用いて、各機能・産業の維持に必要な従業者数を大まかに検討・算定した。なお、本検討では、居住スペースは、低層住宅地程度の人口密度となると想定し、0-25 km² つまり 500 m 四方程度が必要であると仮定した。想定される産業とそれぞれに必要な人数を表 4-1-1 に示す。

大きく、都市の機能・産業は2つに分けられる。月面居住者向けの機能・産業である、循環・都市インフラ、資源・製造、運輸、生活サービスに対しては、680 人が従事する。一方地球向

けの機能・産業である、観光や研究開発には 140 人が従事する。また、このほかに月面従事者の家族など、非就労者が 180 人月面に滞在する。

以上の検討を見ると、ムーンビレッジの意義創出にかかわる観光や研究開発に割ける人員は 15%程度であり、より省人化可能な都市構造を構築する必要性が示された。

表 4-1-1 ムーンビレッジで想定される産業とそれぞれに必要な人数*

業種	産業	概要	人数 (想定)
循環 インフラ系	農業プラント&自然環境エリア管理	エリアの環境維持、農作物の栽培、食品加工、循環促進設備の運用管理	50
	水・空気成分循環管理	都市の大気・水循環状況の監視、プラント・システムの管理運用	60
	資源循環管理	廃棄資源の回収、リサイクルプラント・資源循環システムの管理運用	30
	電力管理	発電所・送電システム・燃料電池の運用管理	10
都市 インフラ系	都市・プラント建設	都市・プラントの建設、建設資材・設備の調達、建設用機材の維持管理	80
	土木インフラ、建築物維持管理	道路・インフラ共同溝・居住スペース等建物の維持管理	
	通信インフラ管理	通信基地・設備等の運用管理	10
資源・製造系	資源採掘・精製	月面での資源採掘、運搬、精製プラントの運用管理	90
	宇宙機器等工業製品製造	工場ライン・リサイクルプラントの運用管理	60
	日用品製造	工場ラインの運用管理	30
運輸系	都市内モビリティサービス	シェアモビリティの運用管理	10
	都市内物流サービス	製造品・商品・郵便物の都市内運搬、運搬用モビリティの管理	25
	地球・月間運輸サービス	製造品・商品・郵便物の地球・月間運搬、宇宙機の維持管理	50
	スペースポート運用	スペースポートの運用、管制、検疫、持込/持出物検査	80
生活 サービス系	小売サービス	居住者・滞在者への販売、在庫の仕入・管理	一
	病院・トレーニングジム	居住者・滞在者の健康管理、診察、治療、医療機器・マシンの維持管理	80
	行政サービス	コミュニティ運営、中央監視(消防、警察)	15
その他	観光	ホテル運営、ツアーガイド・インストラクター、アクティビティ提供	80
	研究開発	実験施設の運営・実験代行	60

* 詳細な検討は本項末の付属資料を参照のこと。

4-1-3. 居住空間

居住空間には都市を運営する上で必要な約 1,000 人が居住する空間(以下、居住施設)と旅行者または短期滞在者が滞在する月面ホテルとしての空間(以下、月面ホテル)が存在する。この両者の月面滞在の目的は異なり、生活リズムも異なるため、空間としては分けることを想定している。居住施設と月面ホテルは機能の類似性から、建造物としては低層建造物、高層建造物などコンセプトは同じとすることで、技術開発を最低限に抑えることができると思われる。その場合、快適性等の観光サービスを追求している月面ホテルがどのような建造物となるかがカギとなる。また、空間は膜構造をしたドーム型の構造物とするか、ビル/マンションのような梁構造をした構造物とするかは技術的にどこまで月面に建設できるかに依存していると考えられるが、以下では月面重力が地球の 1/6 であること、地震が地球上よりも小さいことが想定されていることから、地球上相当の建造物は建築可能という前提で議論を進める。

都市の建設では放射線対策のため、月レゴリスの覆土が必要と考えられるが、都市の規模を考えると、レゴリスを焼結するなどして、レンガ/ブロックにして全体を覆う必要があると思われる。また、大きな都市建設のために大規模な基礎工事が必要と考えられることから、クレーター内、または地下に都市を建設することは規模感が適当ではないと思われるため、比較的平らな土地に建設することを前提とする。

なお、以上の前提は「リファレンス」として設定したものであり、今後のトレード検討の結果、変更する可能性は十分にある。また、変更した場合、下記で示すリファレンスにおいても大きな変更が必要になる。

4-1-3-1. 居住者の暮らし

月面のインフラ運営は 24H 運用が必要である。また、インフラを損失することは即都市の崩壊に直結するため、その重要度は高い。したがって、居住者は心身の健康管理が非常に重要である。24H のインフラ監視のため、1 日 8H の労働時間を前提とし、3 交代制にするのが良いと考えられる。月面居住者は地球上で言えば、海外駐在者と似ており、永住者もいれば、長期駐在者もいると考えられる。すなわち、居住者もいずれは地球に戻る前提のシステムであることが好ましく、1/6 重力による身体の衰えを防ぐため、1 日最大 2H 程度のトレーニングが必要となる。居住施設はトレーニングルームがあり、日々運動を行っている。また、健康管理のため、栄養摂取面においても管理された状態である。閉鎖された環境で健康管理されている居住者の精神的な安定のために、「癒し」の空間があり、休日・休憩時間等はこの「癒し」の空間で過ごすことが可能である。

居住者は単身、夫婦が基本である。何歳から月面居住が可能なのかはライフサイエンスの観点から十分な議論や知見が必要であるので、成長途上である子供が月面で長期滞在することは現状想定していない。(ただし、この場合月面にて妊娠した場合は地上に帰還しなければならないという制約になるため、子供も長期滞在可能になるよう期待したい。)

ゴミの資源化が大切である月面では、居室のごみもできる限り回収したい。その観点から、日々清掃業者(ロボットで良い。)による清掃をしてくれるビジネスホテルのようなシステムとする。居住者は居室をあえて清掃するという手間は省ける。ただし、それゆえにロボットの清掃がしやすいように部屋の間取りはおよそどの部屋も同じである。ベッドメイキングもロボットができると仮定している。

4-1-3-2. 居住施設

居住施設を複数設ける場合、一つにまとめる場合について検討を行った。一つにまとめた方がシステムとしては簡略化でき、コントロールもしやすい。一方、居住施設を複数設ける場合は異常が起き居住施設が使用不可になった場合、他の居住施設が冗長として機能できる。また、3交代制の観点から、生活リズムが大きく3つに分かれることが想定され、3居住施設を設ければ、生活リズムがそれぞれ異なる居住施設とできる。

リファレンスモデルとしては、1,000人居住のためには建物1棟で十分であること、居住施設以外にも人間が生活できる施設は存在するため、居住施設のシステムで冗長にする必要が必ずしもないことから居住施設は1つを前提として議論を進める。

前項で述べた通り、居住者は日々運動を行っており、また、健康管理のため、栄養摂取面においても管理された状態であることから、トレーニングルームやレストラン・食堂は共有スペースに設置される。

居住者は単身、夫婦が基本であること、居住者は心身の健康が大事であることを考えると居住スペースは(地上における)必要最低限ではなく、比較的広い空間が必要であると考え。月面において土地の制約がないことからまずはリファレンスとして地上ホテルのスイートルームの最低ランクの75m²程度を前提において居住施設を検討していく。

4-1-4. 持続的な有人活動を支える技術

4-1-4-1. 大気・推進薬製造

人類が月面上で生活するにあたって、空気と水は最も重要な物質となる。ここでは、過去に、月面ビジネスを目指す研究会ならびにコンサルティング会社が試算した月面上でのインフラコスト試算に向けた原単位の仮定値ならびに地上における原単価等を流用し、ムーンビレッジにおける空気の循環維持にかかる費用の推算と、ロケットに用いる燃料生産にかかる費用の推算を行う。

本検討ではそれぞれ以下の仮定値を用いて検討を行う。ただし下記の仮定値は、月面上で実際に発生したコストではなく、空気循環ならびにロケットの推進に係る費用を算出するために設定した数値である。何れも将来の技術革新の必要性を考慮して、現時点での現実的な数値よりも低コストな評価値を採用している。

(ア) 水資源コスト (月の資源)

200,000 円/L (PwC 試算値から MVA ビジネスモデル G での仮定を採用)

※参考: 地上では 0.022 円/L (東京都上水単価)

(イ) 電力コスト (月での発電を想定)

22,000 円/kWh (2020 年フロンティアビジネス研究会 居住 WG 試算値)

※参考: 地上では約 12 円/kWh (TEPCO 系統電源)

21.3 円/kWh (再エネ電源 - 2020 年)

(ウ) 月面輸送コスト (地球から月への輸送)

100 百万円/kg (2020 年フロンティアビジネス研究会 居住 WG 試算値)

(エ) 水電解装置 原単位

5.0 kWh/Nm³-H₂ (国内仕様、補器動力は含まない、尚 水電解装置の水素に転換する電解効率は 98% とする。一般的な水電解装置の製造効率)

(オ) 純水製造効率

40% (一般的な純水装置の再生効率)

(カ) 月面での居住空間 (有人一人当たりの必要容積)

60 m³/人 (4-1-2 での検討から $25000 \times 2.4 / 1000 = 60 \text{ m}^3/\text{人}$)

(キ) 一人当たりの必要換気量 20 m³/h/人 (空気調和衛生工学会より)

以上の前提条件を踏まえ、①空気循環維持に係る費用と②ロケットに用いる燃料生産に係る費用を推算する。

① 空気循環維持に係る費用の推算

i) 月面上で酸素・水素を生成するに必要なコスト

- H_2O の物質質量：55・33 mol・ H_2O
- 水 1L から生成される酸素の量： $((55\cdot33 \text{ mol} \times 22\cdot4 \text{ L/mol} \times 1/2 \times 98\% \times 40\%)/1000) = 0\cdot24 \text{ m}^3\cdot\text{O}_2$
- 水 1L から生成される水素の量： $((55\cdot33 \text{ mol} \times 22\cdot4 \text{ L/mol} \times 98\% \times 40\%)/1000) = 0\cdot49 \text{ m}^3\cdot\text{H}_2$
- 月面上で酸素 1 m^3 を生成するのに必要な水コスト：1 L/0・24 $\text{m}^3\cdot\text{O}_2 \times 200 \text{ 千円/L} = 824 \text{ 千円/m}^3\cdot\text{O}_2$
- 月面上で酸素 1 m^3 を生成するのに必要な電力コスト：10 kWh/N $\text{m}^3 \times 22 \text{ 千円/kWh} = 220 \text{ 千円/m}^3\cdot\text{O}_2$

⇒ 月面上で酸素 1 m^3 を生成するに必要なコスト：824 千円/ $\text{m}^3\cdot\text{O}_2 + 220 \text{ 千円 } \text{m}^3/\text{O}_2 = 1,04\cdot2 \text{ 千円/m}^3\cdot\text{O}_2$ (約 1,000 千円/ m^3)

- 月面上で水素 1 m^3 を生成するのに必要な水コスト：1 L/0・49 $\text{m}^3\cdot\text{H}_2 \times 200 \text{ 千円/L} = 412 \text{ 千円/m}^3\cdot\text{H}_2$
- 月面上で水素 1 m^3 を生成するのに必要な電力コスト：5・0 kWh/N $\text{m}^3 \times 22 \text{ 千円/kWh} = 110 \text{ 千円/m}^3\cdot\text{H}_2$

⇒ 月面上で水素 1 m^3 を生成するに必要なコスト：412 千円/ $\text{m}^3\cdot\text{H}_2 + 110 \text{ 千円 } \text{m}^3/\text{H}_2 = 522 \text{ 千円/m}^3\cdot\text{H}_2$ (約 600 千円/ m^3)

ii) 月面上で 1,000 人の居住空間の構築に必要な空気生成コスト

- 1,000 人が居住する居住空間の室容積：1,000 人 $\times 60 \text{ m}^3/\text{人} = 60,000 \text{ m}^3$
- 月面上で窒素 1 m^3 を充填するコスト：
- N_2 物質質量 0・028 kg/mol/0・0224 $\text{m}^3/\text{mol} \times 100 \text{ 百万円/kg} = 125 \text{ 百万円/m}^3\cdot\text{N}_2$ (地上から月までのキャリア)
- 1,000 人の居住空間に N_2 を初期充填するコスト：60,000 $\text{m}^3 \times 79\% = 47,400 \text{ m}^3\cdot\text{N}_2 \times 125 \text{ 百万円/m}^3\cdot\text{N}_2 = 5,925,000 \text{ 百万円}$ (約 5・93 兆円)
- 1,000 人の居住空間に O_2 を初期充填するコスト：60,000 $\text{m}^3 \times 21\% = 12,600 \text{ m}^3\cdot\text{O}_2 \times 1,04\cdot2 \text{ 千円/m}^3\cdot\text{O}_2 = 13,154 \text{ 百万円}$ (約 132 億円)

⇒ 1,000 人の居住空間の構築に必要な空気生成コスト：5,925,000 百万円 + 13,154 百万円 = 5・94 兆円

② ロケットに用いる燃料生産に係る費用の推算

i) 液化水素プラント建設コスト

- 液化水素建設コスト原単位（地上－エネルギー総合工学研究所－水素のコスト評価より）：1,400 百万円/ton/day

- 月面水素生成量：8.3 ton/年（JAXA シナリオ）⇒ 0.02 ton/day

⇒ 地上での液化水素プラント建設コスト：0.02 ton/day × 1,400 百万円/ton/day = 32.3 百万円

⇒⇒ 月面建設費N値＝1,000と仮定（地上の1,000倍と仮定するも明確な根拠はなし）し、月面での液化水素プラント建設コスト：32,278 百万円（約 323 億円）

ii) 液化酸素プラント建設コスト

- 液化酸素建設コスト原単位（地上－ガスメーカーへの聞き込み調査より）：1,550 百万円/ton/day

- 月面酸素生成量：49.3 ton/年（JAXA シナリオ）⇒ 0.14 ton/day

⇒ 地上での液化酸素プラント建設コスト：0.14 ton/day × 1,550 百万円/ton/day = 212.3 百万円

⇒⇒ 月面建設費N値＝1,000と仮定（地上の1,000倍と仮定するも明確な根拠はなし）し、月面での液化酸素プラント建設コスト：212,264 百万円（約 2,100 億円）

iii) 推薬生成量（10年間のプラント運用と仮定）

- 液化酸素 LOX：49.3 ton/年 × 10 年 = 493 ton (=493*1,000*1,000 / (32 g/mol)*22.4 L/mol / 1,000 = 34.1,100 Nm³-O₂)

- 液化水素 LH₂：8.3 ton/年 × 10 年 = 83 ton (=83*1,000*1,000 / (2 g/mol)*22.4 L/mol / 1,000 = 929,600 Nm³)

iv) ロケットに用いる燃料生産に係る建設・運用コスト

- 酸素側コスト：2,100 億円 / 34.1,100 Nm³-O₂ + 酸素液化原単位 0.8 kWh/Nm³(NEDO 高効率酸素製造装置の開発より) × 22 千円/kWh + 酸素生成コスト 1,000 千円/m³ = 1.63 百万円 / Nm³

・・・ 1.141 百万円/kg(LOX) @ 1.429 kg/m³

- 水素側コスト：323 億円 / 929,600 Nm³ + 水素液化原単位 1.2 kWh/Nm³(METI 冷却用タービン等の要素技術より) × 22 千円/kWh + 水素生成コスト 600 千円/m³ = 0.661 百万円 / Nm³

・・・ 7.43 百万円/kg(LH₂) @ 0.0899 kg/m³

以上の結果から、仮に有人月着陸機の推進薬量を 36.8 ton(LOX/LH2=31.5 ton/5.3 ton)とすると一回の推進薬補給に約 753 億円かかる計算となる。このように月面の水利用を楽観的な仮定の下に進めても、推進薬や空気源として活用するには莫大な費用が掛かることが示された。また、窒素は月面に存在しておらず、地球からの輸送に頼らざるを得ない。現時点の試算では、輸送コストが支配的となっており、1,000 人の居住空間の構築に必要な空気生成コストが約 6 兆円と高額である。これらは、観光客や付帯設備が増えればその分必要になる初期投資コストが増大するため、輸送の低コスト化の重要性も示された。従来の概念にとられない抜本的な資源活用法の開発が重要であることが示された。

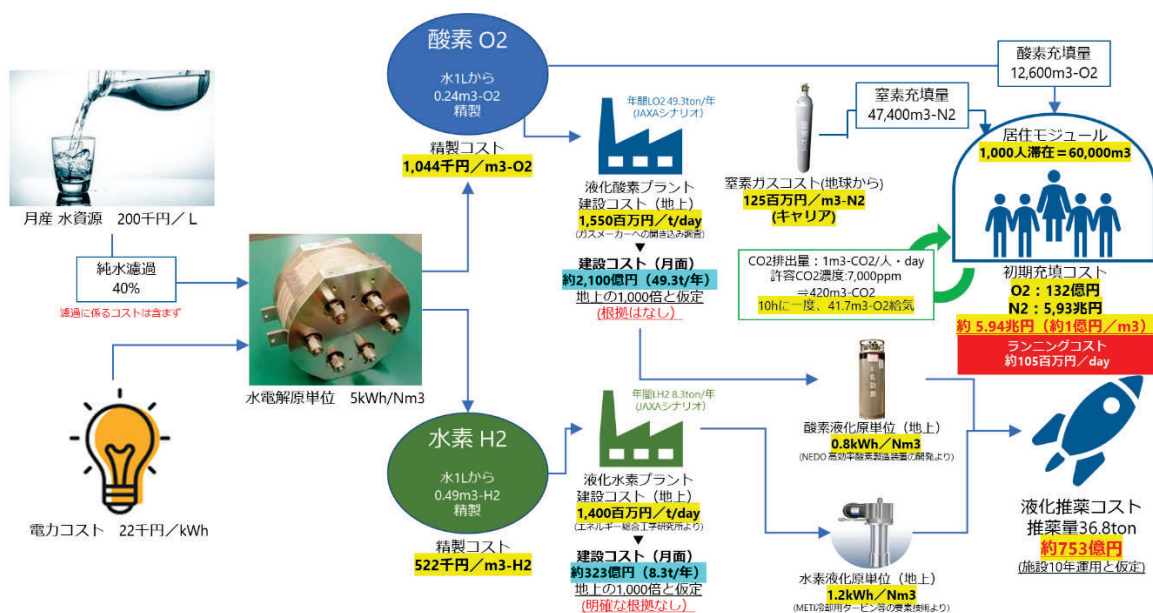


図 4-1-2 エネルギー・空気・推進薬製造にかかわるコスト試算結果

4-1-4-2. 食料生産

食料の確保は水・空気と同様に重要である。月面の限られた資源の中での食料生産のため、現時点では地球上での農業と同等の環境を確保するのは困難と考えており、まずは中央管理された人工環境下での大規模な農場を仮定した検討を行った。人間の通常生活には、1 日に食料(乾物)が 618g、水 3077g、酸素 836g が必要となる。併せて 2,500kcal のエネルギーを摂取する必要がある。また排泄物として、乾物 109g、水 3422g、二酸化炭素 1,000g が生成される。これらをうまく循環させるようなシステムが必要である。月面農場に最適な食物として、

カロリーや繁殖の観点で、サツマイモを選定した¹。サツマイモはイモの部分のみならず、葉や茎も食べることができる栄養価の高い食物であり、延べ面積 54m² の栽培面積があれば持続的に一人の生存が可能となる。栽培面(3×3m²)を 3 次元的に 6 段に配する場合、3×3×3m³の空間があればよい。これを 1,000 人規模に拡張する場合、作業空間も含めて、75×35×12m³の空間で達成することができる。付属設備を合わせる、100×50×15 m³の建屋でこれを実現可能である。実際には、植物の光合成能力とヒトの食料消費速度のバランスや、低重力における空気循環の効果等の影響を加味した検討が必要となる。また、植物残差やヒトの排泄物などの有機廃棄物の処理と資源循環型食料生産を両立する必要があり、衛生的にかつ最大限に資源を活用することが重要である。例えば、有機廃棄物をメタン発酵させて、バイオガスを生成し電気、熱、CO₂ を食料生産システムに再配分することが考えられる。また、窒素やリン、カリウムといった植物の成長に必須な無機元素を発酵消化液から栽培肥料溶液として再配分することが可能となる。

さらに、動物性たんぱく質源として、ティラピアやドジョウなどの魚類養殖を追加した動植物生産システムも考えられる²。この場合、を肥料として、また植物残渣やメタン発酵後の固形物残差を餌料として循環利用することができる。

このほか、アンケートでも要望のあった月面でのアルコール醸造についても検討をおこなった。サツマイモの副産物のうち、人が消化できないセルロースなどを糸状菌など微生物由来のセルラーゼで糖化、エタノール発酵させることで、アルコールが生成可能と考える。

また、上記の検討では、魚以外の肉類、調味料類、嗜好品類は、当面は地球からの物資輸送に頼らざるを得ない。アンケートでは豊富な種類の食事を期待する回答が多く、ムーンビレッジの発展とともに種類の拡充、もしくはサツマイモ、豆類、さらには微細藻類を原料とした代替肉や人工培養肉のような技術発展も検討の余地があると考ええる。

4-1-4-3. レゴリス活用

ムーンビレッジを開発するにあたり、すべてを地球から輸送するのは難しい。そこで、月面のレゴリスを最大限活用し、月面での構造物や燃料などを精製する必要がある。レゴリスに含まれる有用成分の配分を図 4-1-3 に示す。電解によってレゴリスを分解すると、陰極上で太陽光

¹ Kitaya, Y-, Higashi, K-, Shibuya, T-, Endo, R-, 2021, Fundamental study on plant-based regenerative life-support systems with sweetpotato culture in space, Trans-JSASS Aerospace Tech- Japan, 19(6), 889-891-

² 北宅善昭・和田光生・遠藤雅人、2022、野菜水耕栽培と組み合わせた循環型養殖システム「アクアポニックス」の構築、「スマート養殖技術(小林透監修)」、エヌ・ティー・エス、P153-164-

パネル用のシリコン、構造材料等に使用できる鉄やチタン等の金属が製造可能である。陰極上では酸素が生成され、ロケット等の燃料や呼吸源として利用が可能である(図 4-1-4)。

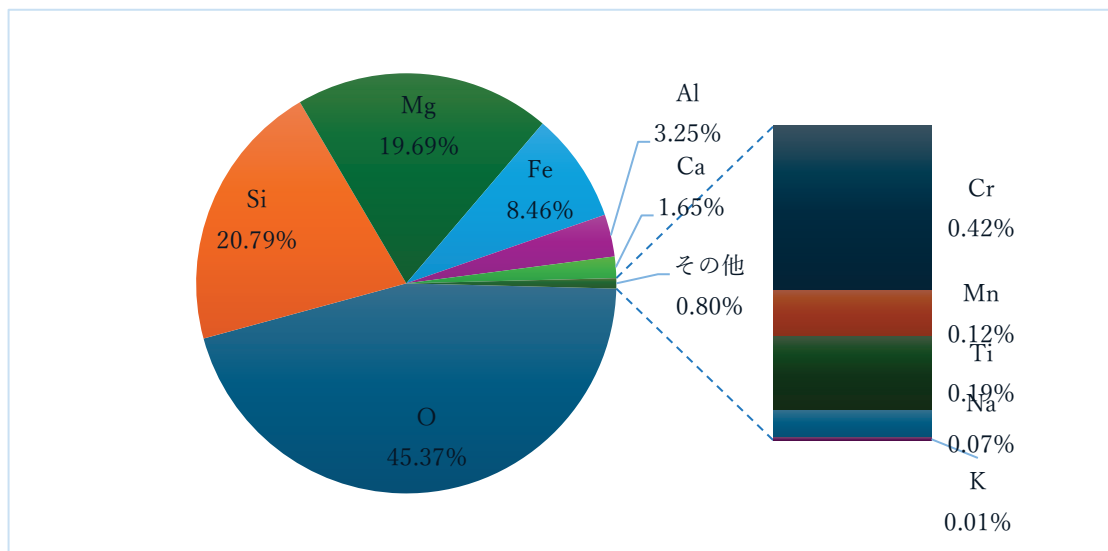


図 4-1-3 レゴリスに含まれる有用成分の配分³

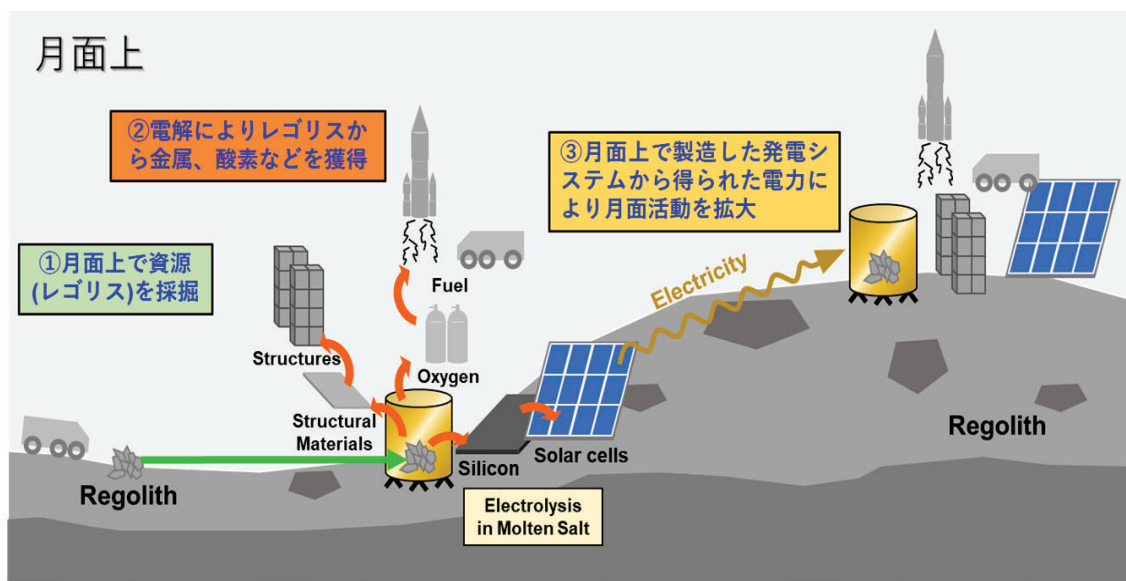


図 4-1-4 月面レゴリスの活用

レゴリス成分から Si、鉄、アルミ回収および酸素回収に必要な電力試算を行った。ここでは電気分解法として熔融塩電解法で検討した(図 4-1-5)。また、電気分解であるため、酸化物の理論分解電圧、電気炉エネルギー等も大雑把に考慮している。この結果、それぞれの物質を 1ton 生成するのに必要なエネルギーは下記のように見積もられた。

³ Stuart R- Taylor (1992)- Solar system evolution- Cambridge Univ- Press- p- 307 pp

- 酸素 20,000 ～25,000 kWh
- シリコン 7,000～9,000 kWh
- 鉄 4,000～6,000 kWh
- アルミニウム 8,000～10,000 kWh

以上の結果より、例えば鉄を 1ton 生成しようとする、電気コストを 2,2000 円/kWh とするとき 1 億円程度の金額が必要となる。一方で、仮に 1kg の荷物を 10 万円で運べるようになったとしても 1ton の輸送には 1 億円を要することからその場の資源活用の有用性が再確認された。

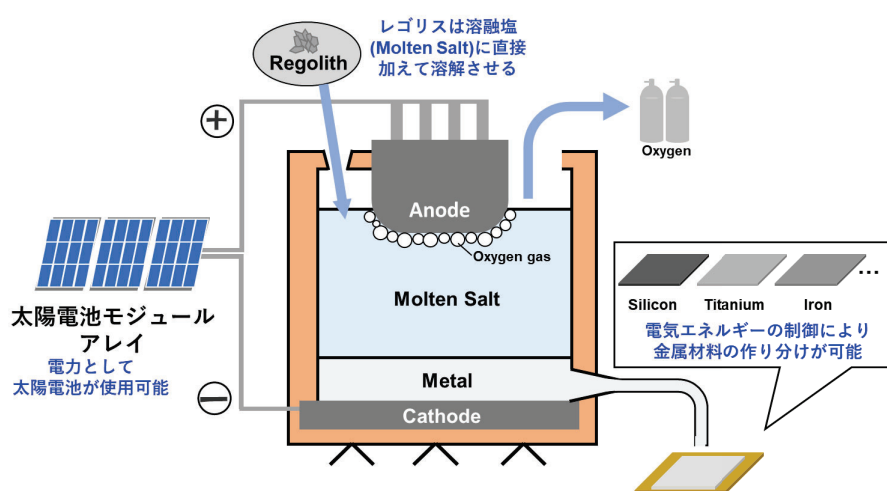


図 4-1-5 熔融塩電解法による酸素・無機物回収

4-1-4-4. 地球-月輸送

元来、輸送サービスの需要は派生的なもの、すなわち、輸送先の経済活動の中で発生する本質的需要から副次的に派生する需要である。そのため、地球-月間の輸送であっても、その輸送サービスの詳細は月面における経済活動に大きく影響を受けると想像できる。一方、現状の宇宙輸送ではロケット打ち上げにかかる費用が、一般的に地球上で展開される輸送サービス費（航空/船舶/鉄道/トラック等の輸送）と比較して莫大であり、物流/人流によって生じる価値の輸送が運賃に対して小さく、特に民間企業による市場自由競争が起こりにくい状態であろう。

実際に Moon Village 勉強会でのアンケートでは、1,000 人規模の社会が形成された場合、1 人当たりの地球-月間運賃（輸送サービス込）は 1,000 万円オーダーを望む声が多いという結果が得られた。現状の地球上の輸送網を使用した運賃とロケット打ち上げコストの差分、

月面に訪れる価値とのバランスでこの希望運賃が得られたと想像できる。航空運賃と比較しても十分高額であるが、そうであっても現在のロケット打ち上げコストを考えると、抜本的なロケット技術革新のみならず、まずは地球周回軌道を舞台に市場競争を起こし、輸送コスト低減を促進する必要がある。

要求されるコスト競争を考えると、ロケット輸送市場の自由競争に任せていると埋没費用（サンクコスト）が大きくなるため、他の分科会と連携した今後の検討テーマとして、1,000 人規模の Moon Village 形成およびその経済活動の価値を地球－月間輸送産業の観点から評価し、輸送市場競争への公的介入の程度を提案することも有効であろう。地球・月間輸送全体を考えると、サンクコストにも大きく関わるのが地球からのロケット打ち上げコストだけではなく、地球・月軌道間輸送を行う軌道間輸送機（OTV）や月から離発着する輸送機、そしてそれら輸送機の運用を支えるスペースポートや燃料補給網など輸送ロジスティクスである。

今回、アーキテクチャ分科会として具体的には、地上燃料単価・月面燃料単価・機体運用費・地球軌道上での補給の有無をパラメータに輸送コストを評価した。ここで、機体再使用による効果などは運用費にすべて含まれると仮定し、燃料搭載量は必要 ΔV に依存とした。

検討に使用したパラメータは以下に示すとおりである。

（ア） 価格

- 機体使用料 大型機（荷物 100 ton/構造 400 ton）：1/50 億円/回
 小型機（荷物 5 ton/構造 20 ton）：0-1/5 億円/回
- 地上での推進薬価格 10/50/100 万円/ton
- LEO での推進薬価格 0-07/0-3/1 億円/ton
- 月面での推進薬価格 0-1/5/10 億円/ton

（イ） 必要増速度 ΔV

- 地球～地球低軌道：10,546 m/s
- 地球低軌道～月低軌道：7,980 m/s
- 月低軌道～月：3,360 m/s
- 地球～月：13,580 m/s

検討の結果、直行便の場合、5ton の輸送に必要な金額は、最も楽観的な試算においても 121 億円かかることが分かった。25 人乗りを定員としても一人 5 億円程度必要なことが示された。一方で、月面および地球低軌道で燃料補給を行う場合、大幅な低コスト化が見込まれるこ

とが分かった。楽観的な試算によれば、27 億円であり、一人当たり 1 億円程度までの低価格化が見込まれる。

もちろん本試算は、定常的な輸送機の運用及び輸送需要があると仮定した上での経路比較であり、これらを元に必要な輸送ロジスティクス全体の初期開発/整備費用を検討することが重要である。

輸送経路によって登場する輸送機の規模やコストが大きく変化することが分かった本検討を礎に、今後はサックコストや月面輸送需要などの観点から、地球－月輸送に関する我が国の開発戦略提言などに繋がることを期待したい。



図 4-1-6 月-地球間輸送価格の評価

4-1-5. 検討のまとめと今後の展望

以上の通り 1,000 人の定住者、年 10,000 人の観光客が月面に存在する社会を想定して検討を進めた。1,000 人の定住者を想定すると、ムーンビレッジの意義創出にかかわる観光や研究開発に割ける人員は 15%程度であり、より省人化可能な都市構造を構築する、もしくはより大きな人口の必要性が示された。一方で、ムーンビレッジを維持するために必要な空気製造コストや、輸送コストは楽観的な仮定をおいてもなお、非常に大きく現実的な解を見つけるのは困難である。以上のように、抜本的な低コスト化が喫緊の課題であり、たとえ小規模でも技術革新を進めることが必要であることが示された。

今回の検討では、個別の技術を深掘したわけではなく、今後はより詳細な技術検討と定量化が必要であるとする。一方で定量化した結果が現実的な想定から大きく乖離することも想定され、分野を横断した問題解決方法の提案など、既存の枠にとられない検討が重要であるとする。

付属 アーキテクチャ分科会参考資料

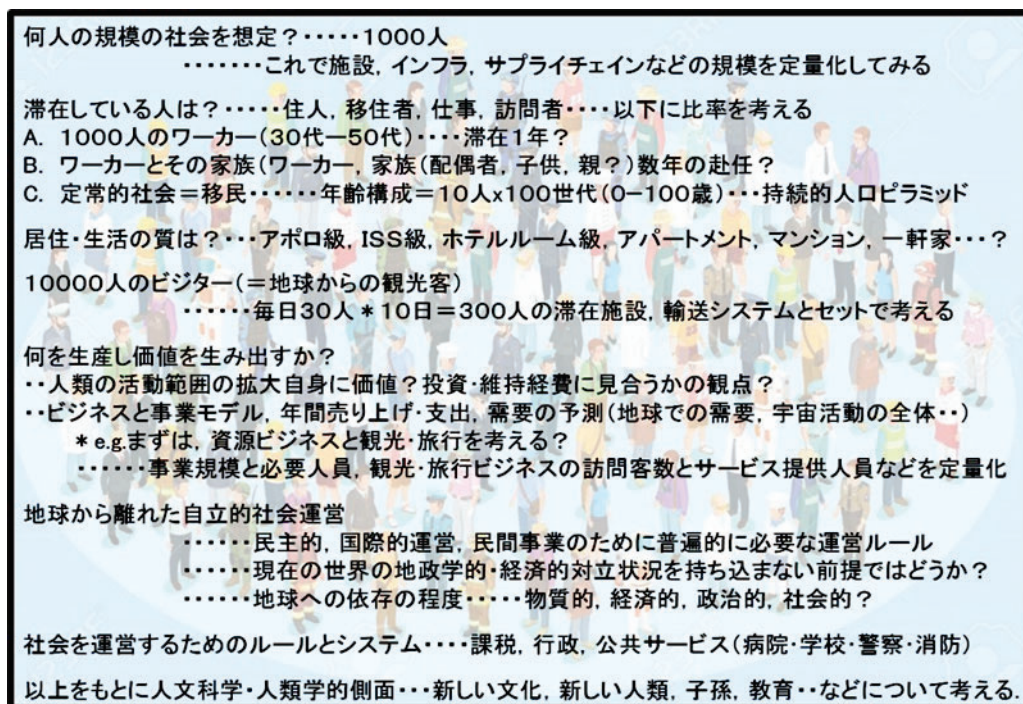
	産業	概要	人数 (想定)	算定過程	想定
※ 前提条件				・居住区画のサイズ DID（人口集中地区）人口密度の下限：4000人/km² 1000人/4000=0.25 km²=25万 m² 500m四方程度と想定	居住スペースは集合住宅のように縦に積まなず、低層住宅地程度の人口密度となると想定
循環インフラ系	農業プラント &自然環境工 リア管理	エリアの環境維持、農作物の栽培、食品加工、循環促進設備の運用管理	50名	・大規模施設園芸・植物工場実態調査・事例調査より https://jgha.com/wp-content/uploads/2020/04/31bessatsu1.pdf平均通年雇用者数（人工光型）： 19.7名 ・経産省工業統計表より https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2.html 野菜缶詰・果実缶詰・農産保存食料品製造業 1事業所当たり従業員数29名 (2018)	地球上における植物工場の一般的な機能に加えて、植物の育成環境をコントロールする設備や、収穫した植物を食品加工する工場を併設。これも運用。 栽培する植物のバリエーションにより、必要な機能および人数も変化する。
	水・空気成分 循環管理	都市の大気・水循環状況の監視、プラント・システムの管理運用	60名	・水道 大和総研レポートより https://www.dir.co.jp/report/research/policy-analysis/regionaleconomy/20130311_006920.pdf上水道事業 1事業当たり職員数23.2名 下水道事業 1事業当たり職員数 8.5名 合計31.7名 ・空気成分管理も同程度と想定	都市内には共同溝が張り巡らされており、上下水道ネットワーク・大気循環システムは、資源循環システム、送電システムや通信ケーブルとともに共同溝内に設置される。これにより維持管理や施工の簡素化・省人化を図ることが可能。 また、この共同溝の総延長ができるだけ短くなるように各区画を配置することで、より維持管理が効率的な都市とすることが出来る（コンパクトシティ）
	資源循環管理	廃棄資源の回収、リサイクルプラント・資源循環システムの管理運用	30名	- リサイクル産業実態調査 https://www.meti.go.jp/statistics/kan/recycle/toukeihyo.pdfより ・収集運搬 企業あたりリサイクル関連部門従業員数 4739名/837件=5.7名 ・中間処理 企業あたりリサイクル関連部門従業員数 6877名	

	産業	概要	人数 (想定)	算定過程	想定
				/589件=11.7名 ・再資源化 企業あたりリ サイクル関連 部門従業員数 4538名/309 件=14.7名合 計=32.1名	
	電力管理	発電所・送電システム・燃料電池の運用管理	10名	常時監視および定期点検に若干名×24時間体制・3交代制を想定	必要な電力は基本的に太陽光発電にてまかなうことを想定。太陽光発電・送電システム・燃料電池の運用は自動化されている。さらなる都市拡大が行われた場合は太陽光だけでは賄いきれず、原子力など他の発電方法を検討する必要がある。
都市インフラ系	都市・プラント建設	都市・プラントの建設、建設資材・設備の調達、建設用機材の維持管理	80名～	・建設・インフラ・データ集より http://www.rice.or.jp/other_report/pdf/kenketsu%20data%20trai%201809.pdf 建築投資額（2018）31.0兆円、建築着工床面積（2017）133百万㎡百万円あたり投入就労者（2015）8.46人日/百万円より よって平米あたり投入就労者：1.97人日/㎡ ・年間10000㎡の建設工事を想定 10000㎡×1.97人日/㎡÷250日=78.8名	自動化した重機の活用やモジュール化により、省人化が可能。具体的な施工方法・手順や、什器などこれまで地球から入手するかあるいは月面で製作するかなど、検討が必要。
	土木インフラ、建築物維持管理	道路・インフラ共同溝・居住スペース等建物の維持管理	—	※都市・プラント建設と合わせて算出	ドローンやセンサーから得られるデータを用いた定期検査の実施。必要に応じて職員が派遣され、精密検査・補修等を行う。改修工事は都市・プラント建設事業者により行われる。
	通信インフラ管理	通信基地・設備等の運用管理	10名	通信基地局等は無人・遠隔管理、常時監視および定期点検に若干名×24時間体制・3交代制を想定	

4-2. ビジネス分科会

4-2-1. はじめに

リファレンスモデル検討の共通の前提条件として、以下が設定されている。



何人の規模の社会を想定？……1000人
………これで施設、インフラ、サプライチェーンなどの規模を定量化してみる

滞在している人は？……住人、移住者、仕事、訪問者……以下に比率を考える
A. 1000人のワーカー(30代—50代)……滞在1年？
B. ワーカーとその家族(ワーカー、家族(配偶者、子供、親?)数年の赴任？
C. 定常的社会=移民………年齢構成=10人x100世代(0—100歳)……持続的人口ピラミッド

居住・生活の質は？……アポロ級、ISS級、ホテルルーム級、アパートメント、マンション、一軒家……？
10000人のビジター(=地球からの観光客)
………毎日30人 * 10日=300人の滞在施設、輸送システムとセットで考える

何を生産し価値を生み出すか？
…人類の活動範囲の拡大自身に価値？投資・維持経費に見合うかの観点？
…ビジネスと事業モデル、年間売り上げ・支出、需要の予測(地球での需要、宇宙活動の全体…)
* e.g. まずは、資源ビジネスと観光・旅行を考える？
………事業規模と必要人員、観光・旅行ビジネスの訪問客数とサービス提供人員などを定量化

地球から離れた自立的社会運営
………民主的、国際的運営、民間事業のために普遍的に必要な運営ルール
………現在の世界の地政学的・経済的対立状況を持ち込まない前提ではどうか？
………地球への依存の程度………物質的、経済的、政治的、社会的？

社会を運営するためのルールとシステム……課税、行政、公共サービス(病院・学校・警察・消防)
以上をもとに人文科学・人類学的側面……新しい文化、新しい人類、子孫、教育……などについて考える。

この前提の下、ビジネス分科会として取り組むべき問題設定・課題は以下の3点と整理した。

- このような社会が構築されたときに、どういうビジネスモデルがあり得るのか？
- 社会を作るのに必要な投資に見合うだけのリターンはあるのか？それは期待できるのか？
- 税金で国の仕事として実行出来る部分との棲み分けはどうするのか？

これらはいずれも重要な問題設定・課題であるが、いきなりすべての問いに回答することは不可能なことから、最初のステップとしてどういうビジネス(モデル)があり得るのか、に取り組むこととした。そして、分科会の活動として、ビジネスの具体的な姿や規模(オーダー感)を描くことにより、その他の問いや今後の議論への参考となることを目指した。

具体的な検討を行う対象としては、月面上のビジネスとして最も有望視されている「(水)資源ビジネス」と一般に最も馴染みが深く、分かりやすい「観光・旅行ビジネス」の2つとした。

なお、両ビジネスの検討にあたってはリファレンスモデルの前提として設定されている「月面上に1,000人の社会が構築され、10,000人が地球から月を訪問する」という前提を踏襲した。

以降において、資源ビジネスと観光・旅行ビジネスの検討結果をそれぞれ述べる。なお、ビジネス規模の試算にあたっては一定の前提をおき、オーダー感をつかむことを最優先に“ラフな”試算を行った。今後は、議論の活性化のために、定量化 → 議論 → 見直し → 議論とインタラクティブに議論を進めるとともに、科学探査等の進捗により具体的な条件設定が可能となった際には、より精緻な試算を再度行うことが期待される。

4-2-2. 資源ビジネス

4-2-2-1. 検討の前提条件

(1) 2040 年に月面に 1,000 人が居住

検討の前提条件として、居住者の増加傾向がキーポイントとなる。過去の人類史を振り返ると、図 4-2-2-1 に示すようにロングイェールビーン(北極に一番近い 2000 人の街)における発展が参考になると考えた。ロングイェールビーンは炭鉱(=資源開発)の町であり、資源開発が産業の中心であった町がどのように拡大していったかという点は月面社会を検討するうえで重要な観点である。また過酷な環境下でどういった産業がベースになって発展してきたかという点も重要な点となる。図 4-2-2-2 にロングイェールビーンの人口変遷を基に推定した月面における居住人口の変遷イメージを示す。与えられた前提条件である「2040 年に 1,000 人が月面で暮らす」という前提を念頭に、2040 年後半にかけて増加率が高まるという想定で試算した。

参考となる地球上での都市: ロングイェールビーン(北極に一番近い2000人の街)



ノルウェー領スヴァールバル諸島にある町。スピッツベルゲン島西部のイース・フィヨルド南岸に面している。人口は2040人(2008年)でスヴァールバル諸島人口の大半を占め、1000人以上の人口を有する町の中では、世界で最も北にある。かつては炭鉱町だったが、現在では観光・教育・研究にも重点が置かれている。

歴史

1901年 - John M. Longyear 初めてスヴァールバルを訪問
1904年 - John M. Longyear と共同経営者の Frederic Ayer が Trondheim Spitsbergen Coal Company を買収する
1905年 - Adventalen での試掘開始
1906年 - 第1炭鉱開採、Longyear City ができ始める。
1908年 - スピッツベルゲン島の船が沈没
1909年 - 第1炭鉱での初産出により26名が犠牲に。内国は運搬が子供の難
1911年 - John Gierike, Basse 等がスヴァールバル居留に就任
1911年 - 住民開拓
1913年 - 町長 Schramm による開拓
1914年 - Nydalen での開拓
1915年 - Svalbard Posten の創刊号が雙新聞として発行される
1916年 - 本土との電話回線開通
1917年 - 本土との電話回線開通
1918年 - 第1炭鉱での初産出により26名が犠牲に。
1919年 - 第1炭鉱開採
1920年 - 最初の産出量がある
1921年 - 第2炭鉱開採開始、スヴァールバル地域連合会できる
1924年 - 最初の空港ができる (開港は翌年)
1925年 - 国が SNSK の株式を取得
1926年 - 本土との航空回線開通
1927年 - 本土との航空回線開通
1928年 - 本土の自治体スヴァールバルに併合、スヴァールバル市庁舎できる。
1929年 - NRK のテレビが直接放送される
1930年 - ローグーラップとライオンズクラブによる夜間チャーター機が就航
1931年 - 住民登録制度はじまる
1932年 - 日SCATスヴァールバルレーダー開設、第3炭鉱開採。
2002年 - Longyearbyen 地域行政政府が成立
2003年 - 本土との航空サービスが開始される
2006年 - Svalbard research park 開設
2007年 - Svalbard 空港に新ターミナルができる

町の成り立ち

ロングイェールは、1901年炭鉱とともスピッツベルゲン島西部のイース・フィヨルド南岸に面している。人口は2040人(2008年)でスヴァールバル諸島人口の大半を占め、1000人以上の人口を有する町の中では、世界で最も北にある。かつては炭鉱町だったが、現在では観光・教育・研究にも重点が置かれている。

②

通信拠点

スヴァールバル衛星通信局 (SvalSat) はロングイェールビーン(北極に一番近い2000人の街)の西側、スヴァールバル空港を見下ろす台地にある世界最北の衛星地上局で、極軌道衛星の制御やデータ受信を行っている。Kongsberg 衛星サービスと EUMETSAT のアンテナがベースで、NASA と NOAA が1基ずつ、計6基のアンテナがある。またこの通信局は、南極のドロンニング・モッド・ランドにある TrollSat 衛星通信局との組み合わせにより、世界で唯一極軌道衛星と毎周回接続できる衛星通信局となっている。

③

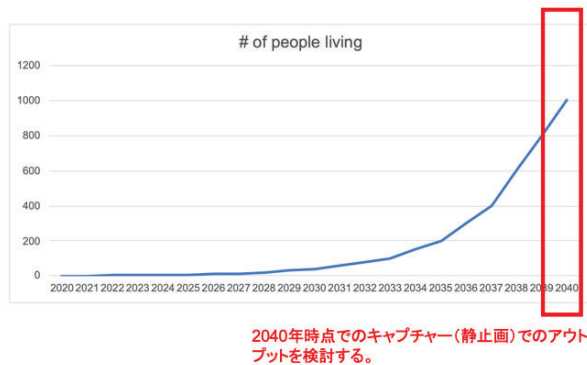
①行政機関からの承認 ②魅力的な賃金 ③地理的特性を生かしたビジネス

図 4-2-2-1 ロングイェールビーンの概要

出所) 分科会発表資料より抜粋

<月面人口1000名居住の内訳> (想定値)

Years	# of people living
2020	0
2021	2
2022	3
2023	4
2024	6
2025	8
2026	10
2027	15
2028	20
2029	30
2030	40
2031	60
2032	80
2033	100
2034	150
2035	200
2036	300
2037	400
2038	600
2039	800
2040	1000



PWC試算数値に基づいて、フロンティアビジネス研究会資源WGIにて加工
2021-2029年までは 推定値に設定。

2

図 4-2-2-2 月面における居住人口の変遷イメージ

出所) ispace 作成

(2) 2040 年までのステップにおける環境の前提

各年代では外部環境として以下に示すような条件が想定される。

(ア) 行政機関からの承認

- ① 月面居住に向けて国際組織もしくはアルテミス合意国間で、月面の民間資源利用についてのガイドラインおよび、居住について合意がされる必要がある。
- ② 初期月面宇宙開発においては、宇宙機関による有人探査が中心になる。民間の宇宙旅行等が活性化することで、民間月面滞在時におけるライフラインのサービス提供が発生している状態となる。

(イ) 魅力的な賃金・マーケット構築

- ① 月面において民間宇宙飛行士や、民間月面開拓者・旅行者が、個人としても法人としても参入しやすい環境が整っており、地球における資本が流入しやすい環境が整っている必要がある。
- ② 月面における必要物資および、外惑星へ到達するために補給可能な資源へのニーズが発生する。エネルギー保存の視点で、地球の重力を振り切り、月周回軌道に入るまでのエネルギーコストよりも、月面で生産するためにかかる初期コストが、一定の投資期間を経た場合に経済合理性が保たれる場合、投資対象となりえる。

(ウ) 地理的特性を生かしたビジネス

- ① 国際協調の中で、各国の月面ビジネスが特に月という地理的特性に沿った形でそれぞれ需要と供給を満たすような関係が構築されている必要がある。
- ② 科学的な視点において、位置的な特性を活用した通信中継地点や、1/6 重力環境および、真空という環境を活用できる月面天文台など、月面が開拓されることによって得られるビジネスが広がる可能性がある。

(3) 居住者の内訳

図 4-2-2-3 に月面における居住者の内訳を示す。1,000 人の居住者の内訳を想定するにあたって、通常の都市における職種のバランスと比較し、エッセンシャルワーカーにあたる職種と、科学・研究に関わる職種について通常の都市形成における割合よりも高く見積もっている。

南極における職種を見ても分かる通り、観測を主にする職種と、設営に関わる職種と一定の偏りが起こることが想定できるが、衣食住以外の QOL(生活の質)を高める職種についても少し幅広く検討を実施している。そうすることで、資源開発・観測研究という視点に加えて、地球上では通常起こりうる観光的な視点、定住を前提としたスポーツ・娯楽やサービス視点での経済圏の拡大についての検証が広がると見込んでいる。

<1000名居住の内訳(仮設定)> 年間10,000人が往復

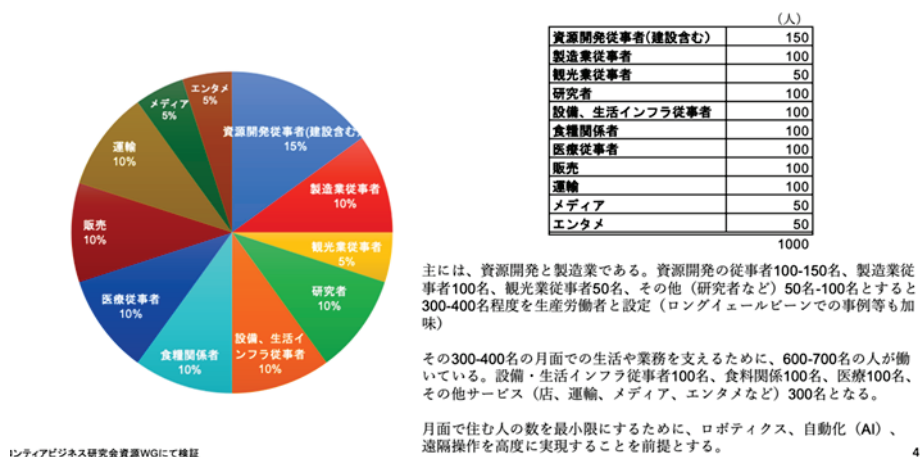


図 4-2-2-3 月面における居住者の内訳

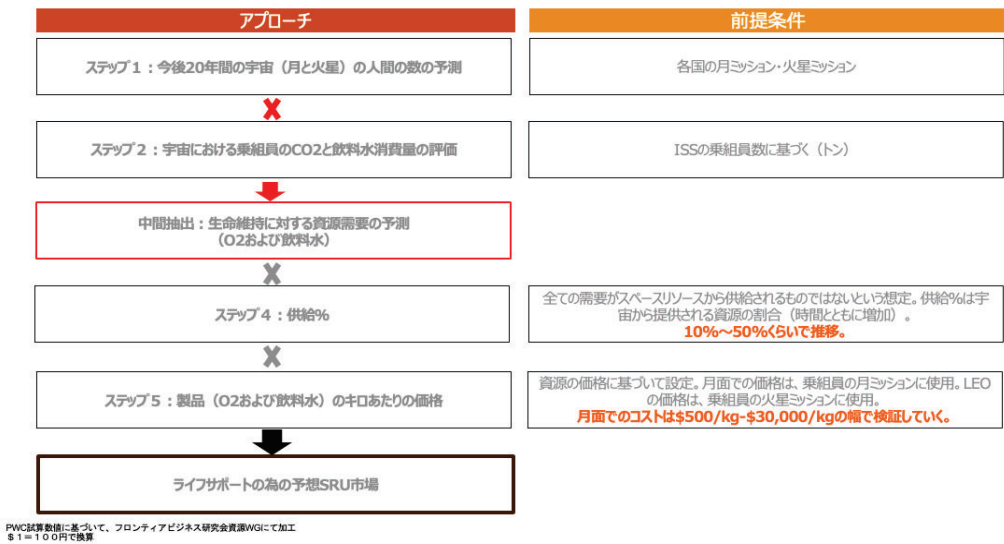
出所) 国立極地研究所, 62 次隊 隊員紹介, <https://www.nipr.ac.jp/antarctic/jare/member62.html>

(閲覧日: 2022 年 7 月 10 日) を基に ispace 作成

4-2-2-2. 検討の方針

図 4-2-2-4 に示すように、月面市場算出のために必要な要素として以下に示す5つのステップについて検討した。

- ステップ 1 今後 20 年間の月・火星で暮らす人口予測
- ステップ 2 月・火星に滞在する人口が消費する酸素と飲料水の算出
- ステップ 3 生命維持に対する資源需要予測
- ステップ 4 酸素および飲料水の供給割合の算出(地球から一定の割合は持ち出すという前提で計算する)
- ステップ 5 酸素・飲料水・および燃料の質量あたり単価の仮設定



A: ライフサポートの有人月ミッションと火星ミッションのニーズの計算手法

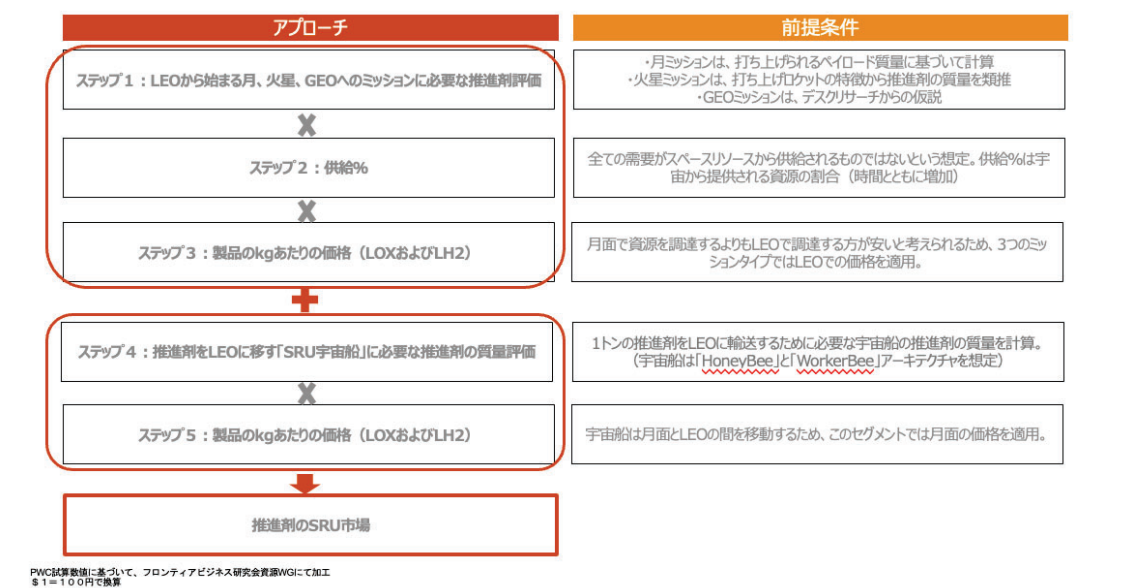


図 4-2-2-4 ライフサポートの有人月ミッションと火星ミッションのニーズ計算手法

出所)ispace 作成

図 4-2-2-5 に示すように、推進剤の要件については以下に示す5つのステップについて検討した。

- ステップ1 地球周回軌道を前提として、月、火星含めた既存計画ミッションの洗い出し
- ステップ2 供給割合についての割合設定
- ステップ3 単位質量あたりの価格設定
- ステップ4 地球周回軌道に乗るために必要な燃料の評価
- ステップ5 単位質量あたりの価格設定



B: 推進剤要件は、3つの異なるミッションタイプ(月、火星、GEO)について選定&評価

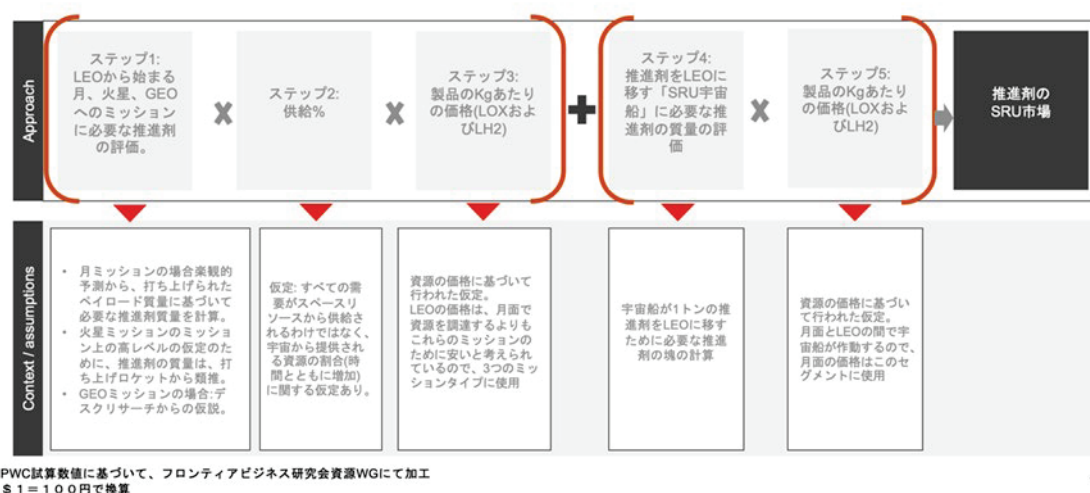


図 4-2-2-5 推進剤要件

出所)ispace 作成

4-2-2-3. 市場規模の推定

2040 年代に立ち上がる月面事業として以下に示す5つのカテゴリーを設定した。なお、2030 年代から立ち上がる主要な事業としてはインフラ事業がベースになると想定している。今回検討した 2020 年代から 2040 年代までの市場遷移イメージを図 4-2-2-6 に示す。また、図 4-2-2-7 にライフサポートと推進剤の供給予測イメージを示す。

(1) 資源・エネルギー領域

飲料水および酸素を中心とした人間のライフラインとなる部分と、外惑星および地球への帰還、月面での活動に利用される燃料(エネルギー)領域が主になる。それぞれのサブシステム、アーキテクチャがバリューチェーンを形成するという点、月の緯度、経度、地形、日照条件等によって大きくその仕組みが異なるため、前提条件として南極、平地、日照条件が7割、越夜手法をどうするか、などの条件の設定が必要になる。

(2) 通信・測位領域

2020 年代後半からも必要になる通信測位領域は、2040 年代に向けては、ある程度細分化された産業としての役割を担う可能性がある。設計寿命や、ユーザーについても顕在化した状態の中で、よりコストパフォーマンスの高い選択肢や利便性も加味されたうえで月のどの地形で探査や掘削等が行われているかの需要と連携する可能性が高いと考えられる。

(3) 月面輸送領域

月面における基地の数や活動領域に依存するカテゴリーになる。より多くの入植者や研究者が居住することで、ライフラインや地球からの到着、地球への帰還、探査・掘削に必要な物資によって、この領域は変動すると考えられる。初期的には、無人輸送と有人輸送のどちらも可能性としては考えられる可能性がある。国を中心とした表面輸送において、すでに技術的なハードルが解消されているか、民間によって成功確度が上がっているミッションについては、繰り返し輸送が2拠点間で行われる可能性がある。

(4) 月面建設

有人探査が始まり、① 地球から持ち込んだシステムを統合させて基地等を建設するケースと、②地球から一定の建設材を持ち込み、月面の資源を利用して構築するフェーズになってくるプロセスが考えられる。①の場合のマーケットは、国の宇宙機関を中心とした発想で行われることが想定され、②の場合は、月面におけるレイバーコスト含めて一定のマーケットが形成されることが予想される。

(5) 月面農場

月面農場については、月面の閉鎖環境下にてクローズドループで循環型システムが ISS と同様に形成されることが想定される。一方で生産者と受益者の関係が経済合理的に成立するかがキーになるものの、初期的な基地建設においては、国や宇宙機関からの補助が前提となつて月面での食糧生産が構築されると考えられる。一方で、農場に従事する人員においては、地上からの遠隔農業という視点や、代替的に構築される技術等を中心に、培養技術等で一定のマーケットが形成されると想定される。

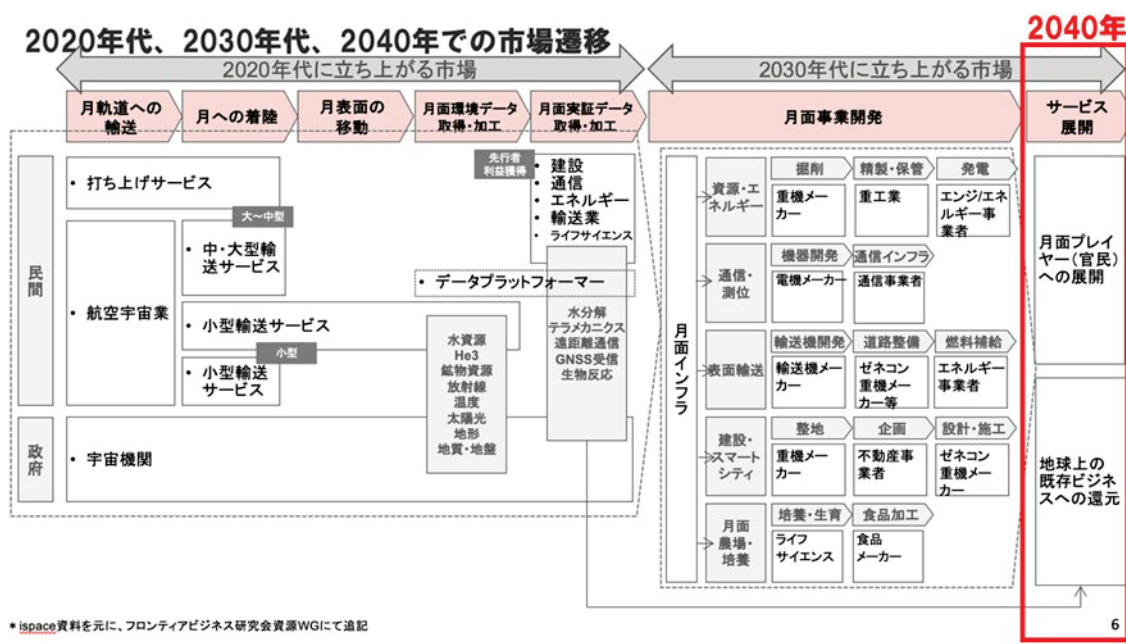


図 4-2-2-6 2020 年代から 2040 年代までの市場遷移イメージ

出所) ispace 作成

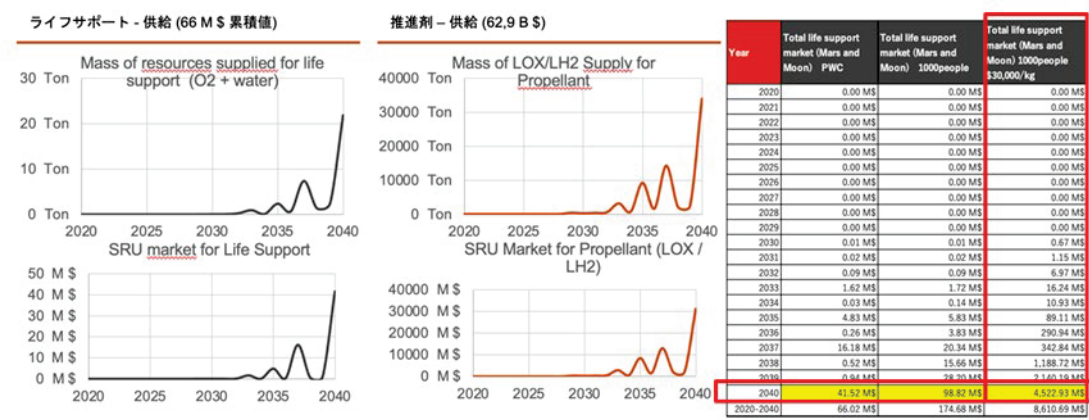


図 4-2-2-7 ライフサポートと推進剤の供給予測イメージ

出所) ispace 作成

4-2-2-4. 分析と考察

試算の結果、2020 年から 2040 年における ISRU(現地資源利用)市場は累積で\$63B 程度、ライフサポートはそのうち\$41M 程度を占めることが分かった。2040 年における居住人口 1,000 人を考慮すると、2040 年に\$98M まで成長することが分かった(\$500/kg)。また月面水資源価格が\$30,000/kg まで上昇した場合の市場規模は\$4-1B まで増加することが分かった。また検討の過程で、以下の点が明らかになった。

- 月面ビジネスに必要な点は、一定の経済合理性の上で成り立つ、地理的特性を最大限生かした、未来史ストーリー構築である。
- 月面資源市場において最も支配的な市場は推進剤の市場である。既に顕在化している計画から逆算し、どの程度月面水資源が投入できるかによって規模は変動する。
- 地理的特性を考慮すると、火星ミッションへの燃料補給という視点と月面上でのライフサポートという視点で、月面の水氷の資源価格を局地的な合理性の成立をベースに単価の変動(\$500/kg~\$30,000/kg)を見込むと、初期投資のリターンの設計が必要になる。

今後のステップとして検討が必要な点は以下と設定した。

- 月面の精緻な 3D データ
- 採掘コスト算出に向けた水氷資源の様々なデータ
- 氷の組成データ他の割合による採掘、生成に必要な機器（およびそれに伴うコスト）の変化
- 採掘後の資源保管コストの算出
- 月産月消するために必要な、ライフサポート装置の耐用年数と初期コストなど

4-2-3. 観光ビジネス

4-2-3-1. 検討の前提条件と方針

観光ビジネスの試算ではリファレンスモデル検討の前提条件である、年間滞在人数 1,000 人及び訪問者数 10,000 人をベースに検討を行ったが、観光がテーマであることから検討に用いるのは訪問者数のみとした。

4-2-3-2. 検討の方針

月面観光が可能となつてからそれほど年数が経っていない時期であることから、訪問者の旅行形態としては個人旅行ではなく 10 日間滞在するパッケージ旅行を想定した。具体的には、パッケージに含まれるコンテンツを想定し、例えば、月面上の施設やローバ等の、その実現にかかる費用を調査・検討した。その後、各費用を束ねることで一人あたりのパッケージ費用を見積もる方針とした。

4-2-3-3. 月観光・旅行基本パッケージ

(1) パッケージの内容の検討

まず月観光・旅行の基本となるパッケージプランの内容について検討した。現在、米国を中心とした有人月探査計画であるアルテミス計画が進められており、2025 年の有人月面着陸を皮切りに月面での有人活動が活発化していくと考えられる。また JAXA が 2022 年 4 月に発表した「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021⁴」では図 4-2-3-1 に示すように 2030 年代中盤以降は長期滞在可能な拠点が構築される可能性についても述べられている。さらに月面天文台等の科学観測拠点の構築についてもあわせて検討されている。拠点の構築に加えて、図 4-2-3-2 に示すように中距離や広域探査のための移動手段として暴露型/与圧型のローバやホッパーの利用についても検討されている。

これらの動向から、少なくとも 2040 年頃には月面での施設建設技術やローバ等のモビリティ運用技術が実装されている可能性が高く、観光分野でも専用の居住施設やローバ等のモビリティを活用した移動サービスの提供が可能であると想定した。

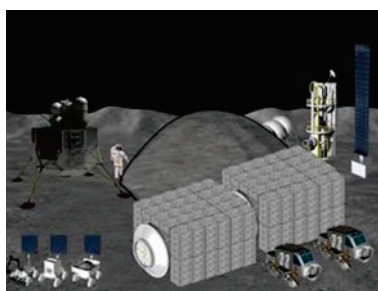


図 4-2-3-1 2035 年以降の月面拠点イメージ

出所) JAXA, 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021(公開版), <https://www-exploration-jaxa-jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021-pdf>

(閲覧日:2022 年 5 月 27 日)

⁴ JAXA, 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021(公開版), <https://www-exploration-jaxa-jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021-pdf>(閲覧日:2022 年 5 月 27 日)

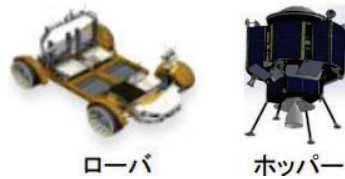


図 4-2-3-2 ローバ及びホッパーのイメージ図

出所) JAXA, 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021(公開版), <https://www-exploration-jaxa-jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021-pdf>

(閲覧日:2022年5月27日)

上述の動向などをふまえた検討の結果、2040年頃の月面上には居住施設や科学観測拠点のほか、スポーツ施設などのエンタメ施設や月面農場などが建設される想定とし、月面ローバ等のモビリティを用いて複数の観光施設やアポロ等の着陸地点を周遊するようなモデルプランを検討することとした。

今回検討した月観光・旅行パッケージの基本プランを図 4-2-3-3 に示す。パッケージは主に以下に示す 5 つの期間に区分される。

- 地上滞在期間（出発前）：出発までの 1 年間程度
- 地球から月への移動期間：打ち上げから月面着陸までの 5 日間
- 月面滞在期間：10 日間
- 月から地球への移動期間：月出発から地球帰還までの 5 日間
- 地上滞在期間（帰還後）：月から地球への移動期間を含む、最大 5 日間程度

以上の期間の中で多様なサービスが提供されることを想定した。例えば出発前の地上滞在期間では健康診断や訓練、スペースポートでのアクティビティなどを想定した。往路での移動期間では出発式や船内でのアクティビティなどを想定した。月面滞在期間では宿泊施設でのアクティビティや観光拠点の訪問などを想定した。また月面滞在の際はオプションとしてローバでの遠方への移動や月面遊泳などのアクティビティを想定した。地球への帰還では往路と類似したサービスが提供されると想定し、帰還後は健康診断やリハビリ等のフォローアップサービスを想定した。



図 4-2-3-3 月観光・旅行パッケージの基本プラン

(2) パッケージの基本料金

ここでは図 4-2-3-3 に示したパッケージの内容について、費用を検討した。現時点では月の観光・旅行に対して直接参考となるサービスが存在しないことから、宇宙ステーションへの旅行等、類似と思われるサービスを参考に費用を設定する方針とした。

一般に1回の宿泊旅行に必要な費用のうち約60%以上を宿泊費や交通費が占める⁵。特にパック旅行の場合は70%近くを宿泊費と交通費を含むパック費が占めることから、今回の検討では宿泊費(月面での滞在費)と交通費(地球・月間の輸送費)に絞って検討した。

(ア) 月面での滞在費の検討

月面での滞在費については、現在既に提供されている宇宙空間での観光サービスとして「国際宇宙ステーションにおける滞在費」を参考に設定することとした。また高額な旅行商品との比較として、地球上に存在するホテルの最高額についても参考価格とした。

- 国際宇宙ステーションでの滞在費：1人あたり\$35,000/泊程度⁶
- 世界最高額ホテル：1人あたり\$60,000/泊程度⁷

⁵ リクルート、じゃらん宿泊旅行調査 2021、<https://jrc-jalan-net/wp-content/uploads/2021/07/3d4d4785511ef636342d74-1314-29a4b2-pdf>(閲覧日:2022年6月28日)

⁶ Reuters, Got \$50 million for a vacation? NASA to open space station to private citizens, <https://www-reuters-com/article/us-space-exploration-nasa-idUSKCN1T81U6>(閲覧日:2022年5月27日)

⁷ たびハック、世界で最も高級なホテルランキング TOP15 最新版|ご1泊いくら?、<https://tabihack-jp/expensive-hotels-world/#i-6>(閲覧日:2022年5月27日)

以上の参考価格より、月面での滞在費の費用としては\$10,0000(\$0-1M)/泊程度、10日間で\$0-9M程度と設定した。

(イ) 地球-月間の輸送費の検討

輸送費についても地球から月面着陸までの費用を直接参照できるサービスが現状存在しないことから、月の周回軌道を旅行する「dearMoon(SpaceX社が開発するStarshipによる前澤友作氏の旅行計画)の輸送費」を基に検討した。また、現在既に提供されている宇宙空間でのサービスとして「国際宇宙ステーションへの輸送費」を参考にした。

① dearMoonの輸送費

dearMoonの総費用は1,000億円程度(\$1B程度)⁸と報道されている。dearMoonでは、前澤氏のほか、8名程度が参加する計画なことから1人あたりの費用は\$100Mと推定した。このうち大半が輸送費と思われることから1人あたりの輸送費は\$100M程度とした。

③ 国際宇宙ステーションへの輸送費

国際宇宙ステーションへのツアー価格は\$55M⁹とされている。滞在費は上述のように1泊\$35,000であることからツアー価格÷輸送費と想像され、月より距離が近い地球近傍への\$1人あたりの輸送費は55Mと考えられた。

以上より、初期の段階における月への輸送費の金額は最低でも\$100M程度と設定した。

なお、検討対象は月面観光であることから、本来はdearMoonのような月近傍への到着だけでなく月着陸にかかる費用も勘案すべきであるが、現時点では参考とできる情報が存在しないことから今回の検討では本方針とした。

以上の価格設定を基に、滞在費(約\$1M)と輸送費(約\$100M)を比較すると、輸送費がパッケージ価格のほぼすべて(90%以上)を占める支配的な要素であると判明したことから、以降の検討では1人当たりの月観光・旅行パッケージの基本料金÷輸送費として設定する方針とした。

⁸ mynavi, 前澤友作氏と一緒に月旅行へ！「dearMoon」の全貌を担当者に聞いてみた!! , <https://news-mynavi.jp/techplus/article/20210312-1799847/>(閲覧日:2022年5月27日)

⁹ The Guardian, First all-private crew returns from International Space Station, <https://www.theguardian.com/science/2022/apr/29/first-all-private-space-crew-axiom-returns-international-space-station>(閲覧日:2022年5月27日)

4-2-3-4. 市場規模の試算

(1) 市場規模の試算方法

月の観光分野における市場規模は、以下の式に示すように、1人あたりのパッケージの基本料金に年間訪問者数をかけることで算出する方針とした。

$$\text{観光分野における市場規模} = (\text{基本パッケージ料金} (\div \text{輸送費})) / 1 \text{人} \times \text{年間訪問者数}$$

また、輸送費及び年間訪問者数はそれぞれ初期(2020年代後半)、中期(2030年代)、後期(2040年代)の3つの年代ごとに異なるという前提を置き、最終的に検討の前提条件である「後期の段階で年間10,000人が月に訪問する」状況を達成するように設定した。

(2) 輸送費と年間訪問者数の設定

(ア) 輸送費

まず市場規模試算時に必要となる年代別(初期、中期、後期)の輸送費を検討した。設定にあたっては、現状の参考価格から想定される「現状の延長パターン」と輸送費に価格破壊が生じ、費用のオーダー感が1桁分下がるような状況を想定した「輸送価格破壊パターン」の2パターンを検討した。なお、将来的に輸送費が低減した場合においても輸送費がパッケージ費用全体に対して支配的である状況は変わらないと想定されることから、年代に係らず月観光・旅行パッケージの基本料金 $\div$ 輸送費としている。

図4-2-3-4に今回設定した年代別1人当たりの基本パッケージ料金を示す。まず両パターンとも初期段階では\$100M程度とし、段階的に価格が低下するものとした。また、最終的な2040年代における価格のオーダー感として、現状の延長パターンでは初期の1/5程度である\$20Mと設定した。輸送価格破壊パターンでは費用のオーダー感が1桁落ちた\$5M程度とした。中期の価格については初期と後期の間の中間的な価格とした。

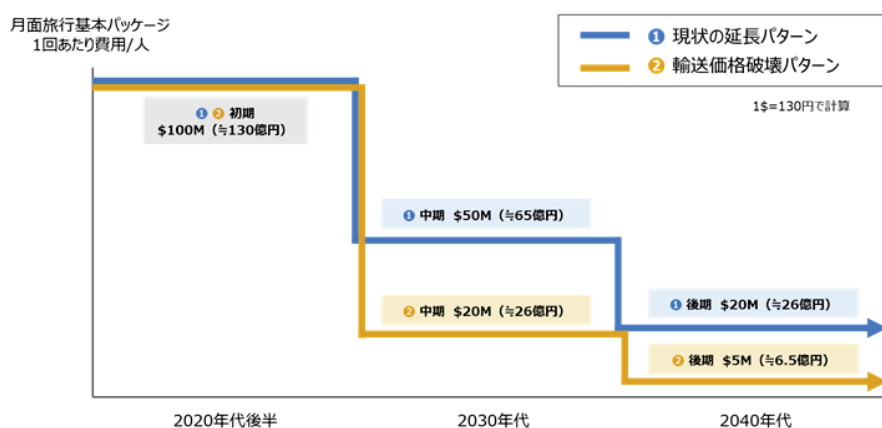


図 4-2-3-4 年代別1人当たりの基本パッケージ料金

(イ) 年間訪問者数

年間訪問者数についても3つの年代別に設定しました。前提条件である2040年の段階で年間10,000人が訪問者する状況を想定した場合、現状で計画されている中で最も輸送能力が高いStarshipの利用(最大100人/機¹⁰)を前提に検討を進めることが妥当と想定されることから、Starshipの搭乗者数及びミッション数を仮定して訪問者数を設定した。

図4-2-3-5に今回設定した年代別年間訪問者数を示す。初期ではStarship1機あたり10人が搭乗する(dearMoonと同程度)とし、年間4ミッション程度を想定した。中期ではStarshipの輸送能力の向上が期待されることから、1機あたり50人が搭乗するとし、年間30ミッション程度を想定した。後期ではさらに輸送能力が向上し、Starship1機あたり100人が搭乗する(Starshipの計画上の最大輸送人数)とし、年間100ミッション程度を想定した。

以上より、月への年間の訪問者数は初期では40人/年、中期では1,500人/年、後期では10,000人/年と設定した。

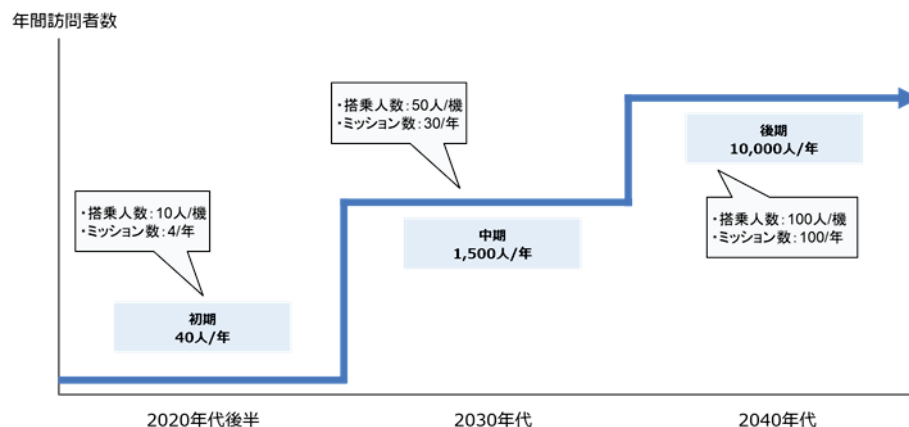


図 4-2-3-5 年代別年間訪問者数

(3) 市場規模の試算結果

(1)、(2)で設定した数値を基に試算した年代別の月の観光分野における市場規模を図4-2-3-6に示す。輸送費の項目で示したとおり、それぞれ現状の延長パターンと輸送価格破壊パターンの2パターンについて試算している。

¹⁰ SpaceX, STARSHIP USERS GUIDE Revision 1-0, https://www.spacex.com/media/starship_users_guide_v1.pdf(閲覧日:2022年6月28日)

年間市場規模は初期では\$4・2B 程度の規模ですが、後期では現状の延長パターンでは\$200B 程度、輸送価格破壊パターンでは\$50B 程度の規模になるとの結果となった。

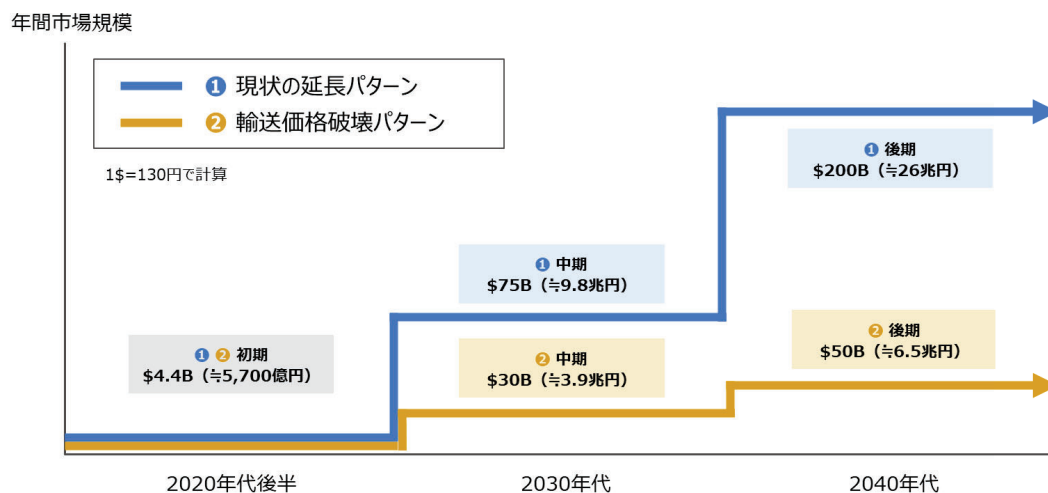


図 4-2-3-6 年代別月の観光分野における市場規模

4-2-3-5. 分析と考察

ここでは、試算した月の観光分野における市場規模の妥当性を評価するために類似の既存市場との比較を実施した。具体的には、宇宙旅行の市場規模と極限地域への観光という観点から南極観光旅行の市場規模を参考値とすることとした。既存データを基に 2040 年における宇宙旅行の市場規模及び南極旅行の市場規模を試算し、月の観光分野の試算結果と比較することで、その金額オーダー感について考察した。

(1) 宇宙旅行市場との比較

図 4-2-3-7 に示すように、宇宙旅行市場は 2031 年時点で年間市場規模は\$3・5B 程度まで成長すると予測されている¹¹。2021 年から 2031 年までの宇宙旅行市場の CAGR (Compound Annual Growth Rate: 年平均成長率)は約 17%となっていることから、2040 年までに同様の成長率で継続して成長すると仮定した場合、2040 年における宇宙旅行の市場規模は\$14B 程度と計算される。

一方で、宇宙旅行市場のうち月観光が含まれる「Beyond Earth」に注目すると、2031 年の Beyond Earth の市場規模は約\$1・3B であり、市場全体に対しては 4 割弱のシェアを占めて

¹¹ 文部科学省 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会 資料 4-2-2, NSR, Space Tourism and Travel Market より抜粋, https://www-mext-go-jp/kaigisiryō/content/20210118-mxt_uchukai01-0000124-21_5-pdf(閲覧日:2022 年 5 月 27 日)

いる。2040 年も同様のシェアとなっていると仮定すると、2040 年における Beyond Earth の市場規模は\$5-2B 程度と計算される。ただし、宇宙旅行市場は既に立ち上がりつつある Orbital や Suborbital も含め、今後成長していく市場であり、市場全体に占めるシェアは変動することが予測されることから、参考値として用いる数値は\$14B を採用することとした。

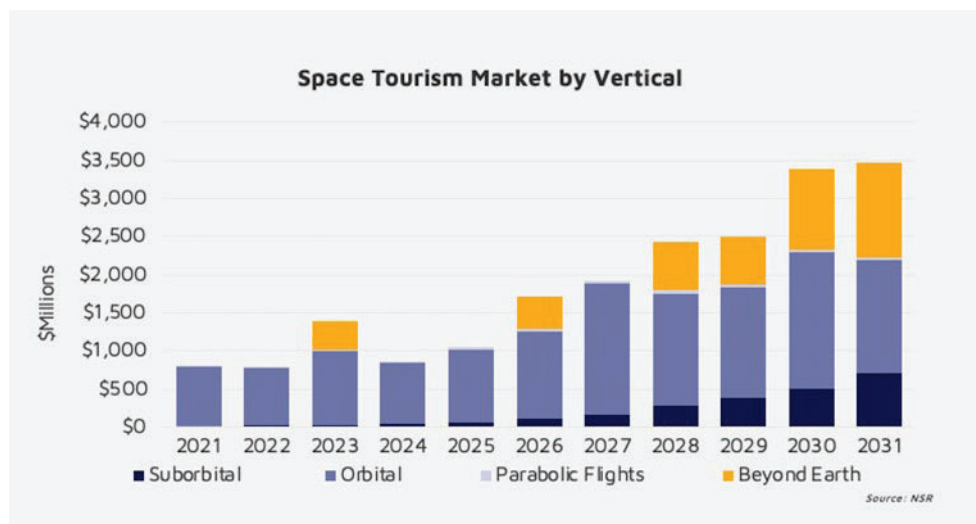


図 4-2-3-7 2021 年から 2031 年までの宇宙旅行市場予測

出所) NSR, SPACE TOURISM AND TRAVEL MARKETS, 3RD EDITION, <https://www-nsr.com/?research=space-tourism-and-travel-markets-3rd-edition>

(閲覧日:2022 年 6 月 28 日)

(2) 南極旅行市場との比較

2020 年における南極観光の市場規模についてのデータは存在しなかったことから、南極における旅行平均予算額と年間訪問者数から試算する方針とした。また、市場の成長率については観光市場全体の数値を活用することとした。

まず、南極観光の市場規模であるが、南極旅行の平均予算額は1人当たり\$8,500 程度であり¹²、2019 年から 2020 年の年間訪問者数は図 1 8 に示すとおり約 56,000 人であったことから、2020 年における南極における観光市場は\$476M 程度であると見積もった。

続いて成長率であるが、世界の観光市場全体の規模は 2026 年時点で\$8-9T 程度であり、2021 年から 2026 年までの CAGR は 3-1%程度と予測されている¹³。これを基に南極旅行市場も同様の成長率で成長すると仮定した場合、2040 年には\$877M (\$0-9B) 程度と計算さ

¹² Adventure life, Antarctica Cruises, Ships & Tours, <https://www-adventure-life-com/antarctica#:~:text=The%20average%20cost%20is%20around,the%20most%20affordable%20departures%20ports-> (閲覧日:2022 年 5 月 27 日)

¹³ Industry ARC, Travel and Tourism Market - Forecast(2022 - 2027), <https://www-industryarc-com/Report/19632/travel-and-tourism-market.html#> (閲覧日:2022 年 6 月 28 日)

れる。なお、このとき 2040 年の観光市場全体の市場規模は\$13・6T 程度であり、南極旅行市場が占める割合はおよそ 0・006%程度となっている。

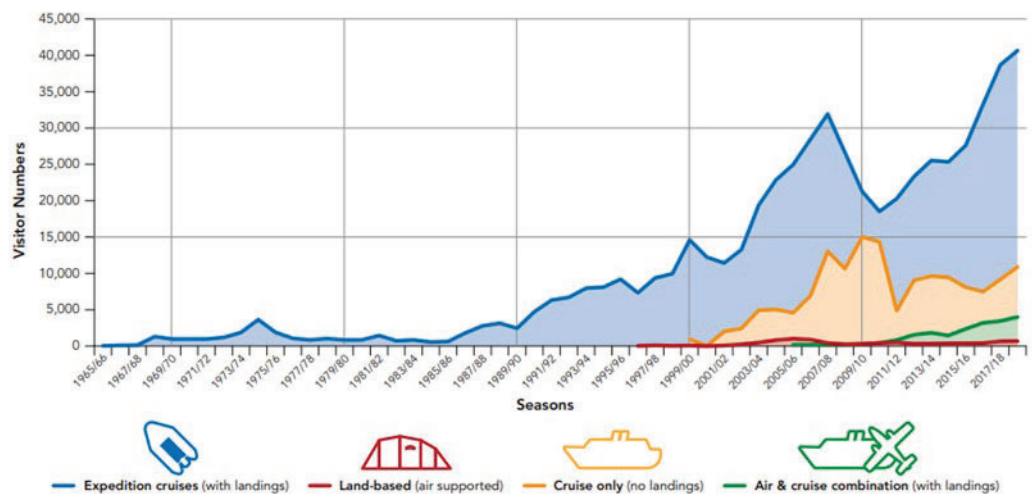


図 4-2-3-8 南極の年間訪問者数と訪問手段

出所) IATTO HP, <https://iaato.org/information-resources/data-statistics/> (閲覧日: 2022 年 5 月 27 日)

(3) 市場規模の比較と考察

今回試算した月の観光分野における 2040 年の市場規模を表 4-2-3-1 に示す。また、宇宙旅行と南極旅行の市場規模を表 4-2-3-2 に示す。まず、宇宙旅行と南極旅行を見ると南極が 1 桁ほど小さい結果となった。ただし、両者の市場の算出方法や対象としている範囲が異なる点に注意が必要である。次に月の観光市場と比較すると、今回試算した月の観光市場がかなり大きい結果となった。特に、現状の延長パターンでは年間\$200B と試算されたが、2021 年における宇宙市場全体(\$386B)¹⁴と比較してもその半分以上を占める大きさであることから、月の観光市場の試算結果はやや過大となっている可能性が示唆された。

表 4-2-3-1 2040 年における月の観光市場試算結果

市場	月の観光市場	
	現状の延長パターン	輸送価格破壊パターン
2040年における市場規模試算結果	\$200B(26兆円)	\$50B(6.5兆円)

¹⁴ SIA, State of the Satellite Industry Report 2022, <https://sia-org/news-resources/state-of-the-satellite-industry-report/> (閲覧日: 2022 年 7 月 4 日)

表 4-2-3-2 各市場の試算結果比較

市場	宇宙旅行市場	南極旅行市場
2040年における 市場規模試算結果	\$14B(1.8兆円)	\$0.88B(0.11兆円)

以上より、今回の市場規模試算および妥当性の確認結果から以下のような示唆が得られた。

- ii) 2040 年における訪問者数（10,000 人）が過大な条件となっている可能性
 - 今回の前提条件ではあるが、輸送費が\$5M～\$20M という設定で年間 10,000 人が訪問するような状況は想定されにくく、輸送費がさらに下がるもう少し後の年代で 10,000 人規模に至るのではないか。
- iii) 2040 年における輸送費が過大な条件となっている可能性
 - 年間 10,000 人が訪問する前提とした場合、もう少し輸送費が安くなっている前提とされるべきではないか。
 - 今回は現状の輸送費からの価格低減を想定したため、最安値でも\$5M としましたが、例えば年間 5-6 万人が訪問する南極旅行の 1 人当たりの平均予算額は\$8,500 程度であり、月の特殊性・特殊な価値を考慮しても輸送価格破壊パターンの\$5M でも年間 10,000 人も訪問する状況には至らないのではないか。

4-2-4. ビジネス分科会のまとめと今後の課題

ビジネス分科会では、月面上での資源ビジネスと観光ビジネスに着目し、市場規模の試算を行った。なお、本節の冒頭でも述べたが、今回の検討ではビジネスの具体的な姿や規模（オーダー感）を描くことにより、今後の議論への参考となることを目指し、一定の前提条件を置いてラフな試算を行った。そのため、本試算結果を確定的な数値として扱うのではなく、各分野での議論・検討の結果や科学探査等の進捗により具体的な条件設定が可能となった際には、より精緻な試算を再度行うことが必要と考えている。

また、今回の対象は“月面上“での代表的な 2 つのビジネスとしたが、ムーンビレッジが実現する頃には、地球と月が一体となった循環型の社会経済が構築されていることが期待されている。例えば、月面産業ビジョン協議会では、「月面産業ビジョン-Planet 6-0 時代に向けて-」において、「輸送分野（地球・月、月面）」、「情報・通信分野」、「メディア・コンテンツ分野」、「資源・エネルギー分野」、「建設・インフラ分野」、「食料・バイオ分野」、「金融・保険分野」、「観光分野」の 8 つの分野でビジネスが展開されると述べている。これらをヒントに今回の対象とした

2分野以外の分野についても検討を行うことが必要と考える。さらに、月面上のビジネスだけではなく、地球上あるいは月近傍空間を活用したビジネスについても検討を深めていくことも期待される。

4-3. 社会科学分科会

4-3-1. はじめに

4-3-1-1. 検討課題

社会科学分科会においては、月面コミュニティについて、以下に掲げる問題意識を前提に検討を行った。

- 月面コミュニティと地球との関係はどのようなになるのか。
- 月面コミュニティ内部のルールはどのようなになるのか。
- 月面コミュニティ同士のルールはどのようなになるのか。
- 資源開発に関するルールはどのようなになるのか。

4-3-1-2. 検討方法

月面社会におけるルール形成は、段階に応じて異なるものと考えられるため、社会科学分科会においては、以下の3段階で発展していくものと仮定して検討を行った。

第1段階：月面コミュニティ数・人口数は少なく、各コミュニティにて社会生活が完結していて、コミュニティ間でのやりとりはほぼない。

第2段階：月面コミュニティ数・人口数が増え、コミュニティ間のやりとりも増加している。

第3段階：月面コミュニティ数・人口数がかなり増え、月面社会にてほぼ完結している。

4-3-2. 第1段階

4-3-2-1. 前提条件

第1段階においては、以下を前提条件としている。

- 月面コミュニティ数・人口数は少なく、各コミュニティにて社会生活が完結していて、コミュニティ間でのやりとりはほぼない。
- 月面コミュニティとしては、①アメリカを中心とするアルテミス合意参加国グループ（以下「アルテミスグループ」という。）、②中国・ロシア（以下「中ログループ」という。）を想定している。なお、以下では、日本は、アルテミスグループに属することを前提に検討を行った。
- 各コミュニティにおける滞在人数は、約100人である。
- 月面コミュニティと地球との間では、人・物資の行き来がある程度の頻度であり、各人の月面滞在期間は、数年程度である。

4-3-2-2. 月面コミュニティと地球との関係

月面コミュニティと地球との関係は、どのようなものとなるのか。これについては、大きく分けて、以下の3パターンが考えられる。

① 国家として捉える考え方

これは、文字どおり、月面コミュニティを1つの国家として捉える考え方である。その帰結として、月面コミュニティに対しては、地球上の国家主権や管轄などは及ばないことになる。

もともと、この考え方をとる場合には、地球上の各国が、月面コミュニティを独立国家として承認する必要がある点に留意する必要がある。しかし、歴史的にみて、国家が独立するにあたっては、各国の利害が衝突し、独立戦争などの軍事的衝突が生じる可能性が高い。

② 自治権を認める考え方

これは、基本原則・基本理念は地球上で決めたうえで、地球とは異なる独自のルールを認めるなど、月面コミュニティにある程度広範な自治権(裁量)を与える考え方である。

もともと、基本原則・基本理念をどう決めるかによって、自治権(裁量)の範囲が変わる点には留意する必要がある。

③ 地球の延長として考え方

これは、ISSのように、月面コミュニティでどのような作業をするかについて、地球上で管理する考え方である。

もともと、月面において緊急状況になったとしてもすぐに地球上に帰還できるわけではないため、ISS以上に、現場に裁量がある必要がある点には留意する必要がある。

上記の点について、まず、①(国家として捉える考え方)については、独立国家として持続するためには、地球に依存せずに月面において生活を営むことができる必要となるが、約100人のコミュニティを前提とした場合には、この条件を満たすことは、困難であると思われるため、現実的ではないと思われる。

次に、②(自治権を認める考え方)については、約100人のコミュニティではその段階にまでは至っていないと考えられるため、現実的ではない。

そこで、社会科学分科会では、第1段階においては、③(地球の延長として考え方)がより問題点が少なく現実的であると考えたため、以下では③(地球の延長として考え方)によることを前提とする。

4-3-2-3. 月面コミュニティ内部のルール

(1) 基本原則・基本理念

上述のとおり、③(地球の延長として考え方)による場合、基本原則・基本理念をどう決めるかが重要となる。

まず、①(国家として捉える考え方)や②(自治権を認める考え方)ではないことから、月面コミュニティには、国家としての権限や自治権までは認められず、基本的には、地球におけるルールが適用される。

もともと、ISS 以上には、現場に裁量を与える必要があるため、地球からの指示としては、月面コミュニティにおいて実施すべきミッションを年間単位などで指定するにとどまり、そのやり方については現場である月面コミュニティに委ねるべきと考えられる。

また、犯罪等のトラブルが発生した場合、最終的な処分(裁判等)は地球上で行うものの、地球に帰還するまでの間は、月面コミュニティにて適切に対応する裁量を認めるなどが必要となる。

(2) 意思決定に関するルール

月面コミュニティにおける意思決定は、誰がどのように行うか。この点については、以下のよう考えられる。

まず、アルテミスグループのように月面コミュニティが複数国により形成され、それぞれが実施すべきミッションが決まっている場合には、ミッションに関する事項については、当該ミッションについて責任を負う国のリーダーの意思決定に従うことになる。

他方で、ミッションを超えた、月面コミュニティ全体に関わる事項(生活に関する事項など)については、各国のリーダー同士による話し合いにより決定することが妥当と思われる。

(3) 運営に関するルール

月面コミュニティの運営は、どのように行うことになるか。この点については、以下のよう考えられる。

まず、前述のとおり、アルテミスグループのように月面コミュニティが複数国により形成され、それぞれが実施すべきミッションが決まっている場合には、ミッションごとに指揮命令系統を決めておき、それに従うことになる。

他方で、ミッションを超える、月面コミュニティ全体に関わる事項(生活に関わる事項など)については、月面コミュニティ全体での指揮命令系統を決めておき、それに従うことになる。

(4) 管轄

月面コミュニティ内で何かトラブルが発生した場合には、どこの国の法律を適用して、どのように解決することになるか。

(ア)「管轄権」の多義性

まず、「管轄権」という用語は、国家の作用に対応して、次の3つの意味を有することから、それらを区別して議論する必要がある点に留意する必要がある。

① 執行管轄権

裁判所や行政機関が、逮捕、強制捜査、押収などの物理的な手段によって国内法を執行する権能をいう。

② 裁判管轄権

司法機関が国内法を解釈適用して具体的な事案を審理し判決を出す権能をいう。

③ 立法管轄権

立法機関や行政機関が国内法を制定して、一定の事象についてその合法性を判断する基準を設ける権能をいう。

(イ) 執行管轄権について

宇宙条約8条において用いられている”jurisdiction”(管轄権)がいずれを指すのかは明確ではないが、最も狭く解した場合には、執行管轄権を意味すると考えられる。宇宙条約8条は、月面においても妥当するため、月面において登録された宇宙物体の登録国は、その物体及びその乗員に対して、少なくとも執行管轄権を有することになる。

また、宇宙空間はいかなる国の領域でもないため(宇宙条約2条)、宇宙での活動に国内法を適用するためには、宇宙空間に存在する物体及びその中の人員に対して国内法を適用する仕組みが考えられる。この点に関して、アルテミスグループは、アメリカを中心とした、ISS計画の参加国が多数を占めることが想定されるところ、ISS計画におけるルールである Intergovernmental Agreement(以下「IGA」という。)の規定が、ISS協力に対して数十年に渡り改訂することなく柔軟に適用されてきた実績を踏まえると、ルールとしてはIGAと同様のものになると考えられる。この考え方によれば、宇宙物体登録条約2条に定める手続きに従い、構成要素を提供する参加国は、当該構成要素について宇宙物体登録を行い、登録した構成要素と構成要素全体内の自国民に対して、(執行)管轄権を有することになる(IGA5条2項参照)。

もっとも、宇宙条約 8 条や IGA5 条 2 項は、人が、宇宙物体内(又はそのすぐ近く)にいることを想定しているが、月面においては、宇宙物体(施設)外における活動も当然に想定されるため、その際はどう考えるべきか。

この点に関して、まず、ローバ等の乗り物を宇宙物体として登録することで、宇宙物体(施設)外の活動であっても、ローバ等に乗っている間の活動については、当該ローバ等の登録国が(執行)管轄権を有することになると思われる。

では、さらに進んで、ローバ等から降りて、文字通りの月面での活動している場合については、どう考えるべきか。この点については、以下のような考え方があり得る。

①施設の登録国が(執行)管轄権を有するとする考え方

宇宙条約 8 条において、“A State Party to the Treaty on whose registry an object launched into outer space is carried shall retain jurisdiction and control over such object, and over any personnel thereof, while in outer space or on a celestial body-”とあるように、“therein”ではなく“thereof”が用いられていることから、宇宙物体(施設)の登録国は、宇宙物体(施設)内に対してだけでなく、宇宙物体(施設)外においても、当該宇宙物体(施設)の人員に対して、(執行)管轄権を有する、という考え方である。もっとも、宇宙条約 8 条は、宇宙物体外といっても、すぐ近くにいることを想定していたが、月面では、宇宙物体(施設)から遠く離れることも想定されるという点が、検討課題である。また、この考え方は、人が、いずれかの宇宙物体(施設)に所属していることが前提となっているため、いずれの宇宙物体(施設)に所属しているのかを明示する一種の住民票のような制度を設けることも考えられる。

②宇宙服の登録国が(執行)管轄権を有するとする考え方

端的に宇宙服を宇宙物体として登録することで、当該宇宙服の登録国が(執行)管轄権を有する、という考え方である。この考え方に関しては、宇宙条約 8 条において登録対象となる物体は“an object launched into outer space”とされているのみであり特段の限定がないこと、宇宙服が「小さな宇宙船」とも呼ばれ、宇宙空間において内部の人間の生命機能を維持しつつ活動を可能とする点でローバ等と差異がないことなどをもって肯定的に考える立場もあれば、地上において船舶や飛行機などの乗り物については特別なルールが認められているが衣服についての特別なルールは存在しないことから、宇宙服をローバ等の乗り物と同様に扱ってよいかについては慎重に考えるべきであるとする立場もあり、議論が必要である。

(ウ) 裁判管轄権について

① 刑事裁判権について

IGA と同様の考え方を採用するのであれば、まず、参加国は、構成要素全体内の人員であって自国民である者について、刑事裁判権を行使することができることになる（IGA22 条 1 項参照）。また、当該行為によって影響を受けた参加国は、自国民が容疑者である参加国と協議した結果、一定の条件が満たされる場合には、刑事裁判権を行使することができることになる（IGA21 条 2 項参照）。

なお、前述のとおり、IGA22 条 1 項は、人が、宇宙物体内（又はそのすぐ近く）にいることを想定していたが、月面においては、宇宙物体（施設）外における活動も想定されるため、その際はどうか考えるべきか。この点に関して、各国は一定の政策に基づき、刑事罰の対象となる行為を明示することで、反対に、（刑事罰を科されることがなく）自由に行える一定の行為を定めている。そのため、その国において自由とされている行為については、それが月面上であったとしても、自由に行うことができる状態を確保することが、その国の国家的利益となる。そのため、一般国際法の考え方に従うと、刑事裁判権については、原則として、加害者の国籍国が管轄権を有することになる。

もっとも、このような考え方を前提とした場合には、例えば、月面において、他国民から襲撃を受けて月面コミュニティを破壊されたようなときであっても、加害者の国籍国のみが刑事裁判権を有し、被害者の国籍国は刑事裁判権を有さないことになる。そのため、(i)加害者の国籍国のみが刑事裁判権を有するとの原則を維持するのであれば、併せて、最小限の行動規範を確立する必要がある。しかし、この点に関して、宇宙条約では、「協議」という手続きを定めているのみであるため（宇宙条約 9 条）、より踏み込んだ議論が必要になると思われる。または、(ii)被害者が自国民であることを理由として、一定の犯罪については、被害者の国籍国も刑事裁判権を有するとの考え方（消極的属人主義）を採用することも考えられる。しかし、どの範囲の犯罪についてこの考え方を適用するかについて統一的な国家実行は確立されておらず、やはり議論が必要になると思われる。

② 民事裁判権（国際裁判管轄）について

ある民事訴訟事件についてある国の裁判所が審理権限を有するかの問題（国際裁判管轄）については、国際法では規律されておらず、各国がそれぞれの国内法において独自の規律を行っている。日本においては、例えば、不法行為責任については、不法行為地（加害行為地又は結果発生地）が日本国内である場合に日本が国際裁判管轄を有するとしている（民事訴訟法 3 条の 3 第 8 号）。しかし、月面はいずれの

国の領土でもないため（宇宙条約 2 条）、月面において日本人が被害者となったとしても同号に基づいて日本に国際裁判管轄を認めることはできない。もっとも、被害者の救済に関しては、被害者の国籍国が一定の利益を有することから、条理により、被害者の国籍国が管轄権を有するとして、被害者が日本人である場合には日本に国際裁判管轄が認められる余地はあるかと思われる。

また、契約責任については、私的自治の原則が妥当し、当該契約関係についてのどの国の裁判所が国際裁判管轄を有するかについては当事者が合意により定めることができるため、多くの場合には、契約書の定めに従うことになる（そして、多くの場合には仲裁になると思われる。）。もし、契約書の定めのみでは解決できない場合には、日本においては、義務履行地が日本国内である場合に日本が国際裁判管轄を有するとしているが（民事訴訟法 3 条の 3 第 1 号）、上記同様に、月面はいずれの国の領土でもないため（宇宙条約 2 条）、契約上の義務履行地が月面である場合には、日本人又は日本法人が契約当事者であったとしても、同号に基づいて日本に国際裁判管轄を認めることはできない。もっとも、月面コミュニティに参加する国の合意により国際裁判管轄のルールを定めることは考えられ、その際には、例えば、当該ミッションに対して責任を負う国が管轄権を有するとするルールを設けることなどが考えられるが、「当該ミッションに対して責任を負う国」はどこかという点が検討課題となる。

(5) 知的所有権

月面コミュニティにおいても、各種の実験や観測等での利用に伴い、知的所有権の帰属が問題となりうる。この点について、IGA と同様の考え方を採用するのであれば、知的所有権に係る法律を適用するにあたっては、特定の構成要素上において行われる活動は、当該構成要素の登録国の領域においてのみ行われたものとみなされる（IGA21 条 2 項参照）。なお、この規定は、各構成要素の登録国がその立法管轄権に基づき、自国の知的財産法を月面コミュニティに適用する権限を付与しているに過ぎず、実際にその国内法を適用させるためには、国内法自身の適用範囲を拡大する必要があるが、日本では、特段の立法措置は講じていないため、かかる規定を設けたとしても、月面コミュニティには日本の知的財産法の適用は及ばない可能性がある点には留意する必要がある。

(6) 公共サービス等

意思決定や運営はミッションごとになること、各コミュニティにおける滞在人数は 100 人程度であることに鑑みると、専門職を置くのではなく、ISS のように、各自で分担する形が現実的であると思われる。もっとも、医療については、専門職を置くことが考えられる。

資源(水、空気、電気(エネルギー))については、インフラとしての側面もあることから、正当な理由なく他者の利用を拒否できないようにする必要があるため、法的拘束力のある合意(条約・契約)が必要となる。また、資源の有限性・希少性から、資源を守るための警備機能のほか、アクセス権限を限定するなどのセキュリティ対策も必要となる。

(7) その他

(ア) 技術移転・技術流出

月面において施設を建設し、運用するにあたっては、各国間において技術データやハードウェアのやりとりが必要となるため、これらの情報・物品を保護するためのメカニズムが必要となる。この点について、IGAと同様の考え方を採用するのであれば、必要な技術データ及び物品の移転にあたっては、提供者側において、対象物に表示(マーキング)を行うこと等により特別の指定を行うこととし、受領者側において、受領した技術データ及び物品が指定された条件に従って取り扱われることを確保することになる(IGA19条参照)。

(イ) 関税等

物品の移転に際して、各国が徴収する関税等について、IGAと同様の考え方を採用するのであれば、ISS計画の実施のために必要となる物品及びソフトウェアに関して、自国の領域へ輸出されるもの、又は、自国の領域から輸出されるものについては、関税等は免除することになる(IGA18条参照)。

(ウ) クロス・ウェーバー

参加国間において損害が生じた場合の民事責任の取扱いについて、IGAと同様の考え方を採用するのであれば、クロス・ウェーバーの考え方を採用することになる。すなわち、参加国は、当該月面コミュニティに係る計画の実施のための活動から生じた損害については、損害賠償請求権を相互に放棄する(IGA16条参照)。これは、宇宙分野における活動はリスクが高いものであることを踏まえ、自らの過失による不法行為や債務不履行について損害賠償請求が行われないことを確保するとともに、その裏返しとして、他者の過失による損害について損害賠償請求を行わないとするものであり、自損自弁の原則を採用したものである。もともと、例外として、身体の傷害その他の健康の障害又は死亡についての請求、悪意によって引き起こされた損害についての請求、知的所有権に係る請求等については、クロス・ウェーバーは適用されない。

(エ) 紛争解決

参加国間において紛争が生じた場合には、IGAと同様の考え方を採用するのであれば、まずは国家間での協議による解決を目指し、それにもかかわらず協議による解決が不調に終わった場合には、合意された紛争解決手続に付託することになる(IGA23条参照)。

4-3-2-4. 月面コミュニティ同士のルール

月面コミュニティ同士において何かトラブルが発生した場合には、どこ国の法律を適用して、どのように解決することになるか。

まず、月面コミュニティ間でのやりとりがほぼないことを前提とすると、月面コミュニティ間でのルールは、まだほとんど形成されていないと考えられる。そのため、多くの場合、国際法の一般的ルールに従って処理することになる。

(1) 執行管轄権について

まず、いずれかの月面コミュニティ施設内でトラブルが発生した場合には、当該施設の登録国が、その物体及びその乗員に対して、少なくとも執行管轄権を有することになる（宇宙条約8条）。

宇宙物体（施設）外における活動については、まず、ローバ等の乗り物を宇宙物体として登録することで、宇宙物体（施設）外の活動であっても、ローバ等に乗っている間の活動については、当該ローバ等の登録国が（執行）管轄権を有することになると思われる。

また、ローバ等から降りて、文字通りの月面での活動している場合については、前述のとおり、施設の登録国が（執行）管轄権を有するとする考え方や、宇宙服の登録国が（執行）管轄権を有するとする考え方などがあり得るが、今後の検討課題である。

(2) 裁判管轄権について

前述のとおり、宇宙条約8条において用いられている”jurisdiction”（管轄権）が裁判管轄権までもを含むかは明確ではないが、裁判管轄権までも含むと考えた場合には、月面コミュニティ間（当該コミュニティが帰属する国家間）において別途の合意がない限り、上記(1)と同様の結論となる。

他方で、裁判管轄権までは含まないと考えた場合には、4-2-2-3(4)(ウ)における議論が妥当すると考えられる。

4-3-2-5. 宇宙資源に関するルール

月面社会においては、資源ビジネスが中心産業となると想定されることから、以下では、宇宙資源に関するルールについて検討を行った。

(1) 宇宙資源に対する所有権

まず、資源ビジネスの大前提として、採掘した資源については、採掘した人(企業)に所有権を認める必要がある。なお、アルテミスグループのうち、アメリカ、ルクセンブルク、アラブ首長国連邦、日本においては、宇宙資源に対する所有権を認める旨の国内法が成立している。

また、宇宙資源の取引の相手国においても、宇宙資源に対する所有権が認められていることが必要となる(なお、制定法がなくとも、解釈や運用で認められる国もあるかもしれない。)。仮にこれが認められていない場合には、当該宇宙資源の所有権の所在が不明確となり、法的安定性を欠くことになる。

(2) 採掘活動前

宇宙資源の採掘にあたっては、採掘場所が競合することが考えられるため、その調整が必要となる。これについては、第 1 段階においては、当事国が少ないことから、国家間で調整することが現実的であると考えられる。

また、調整の前提として、採掘をしようとする者に対し、事前に、情報開示を行うことを義務付けることが考えられる。調整項目としては、範囲(場所)、期限(時間)、採掘量が中心になる。

なお、宇宙資源の採掘にあたっては、宇宙先進国による「早い者勝ち」とならないよう、宇宙後進国に対しても一定の配慮をする必要があると思われる。この点については、必ずしも宇宙資源そのものを分配する必要ではなく、技術移転や教育、データ提供などが考えられる(スペース・ベネフィット宣言参照)。

(3) 採掘活動中

宇宙条約 9 条に従い、採掘活動中は、資源採掘のために月面を一定期間・一定範囲にて利用する必要があるため、他者はこれを妨害してはならないものとする。なお、宇宙条約 2 条との関係もあり、一定区域内での活動を妨害されないことを積極的な「権利」として扱う必要性はないと思われる。

(4) 採掘活動後

採掘活動後について、本来であれば、採掘施設の完全収去が望ましいが、現実的ではないため、少なくとも他者が利用する際に支障が生じないよう、最低限の収去義務を課すことが考えられる。採掘施設の所有権を譲渡することも、収去義務の履行の一内容とも考えられるだろう。

4-3-3. 第2段階

4-3-3-1. 前提条件

第2段階においては、以下を前提条件としている。

- 月面コミュニティ数・人口数が増え、コミュニティ間のやりとりも増加している。
- 第1段階における、各コミュニティにて社会生活を完結させる方式では、不都合や非効率が生じており、それゆえにルールの共通化が進んでいる。
- 各コミュニティにおける滞在人数は、約1,000人である。
- 月面コミュニティと地球との間では、人・物資の行き来は依然としてあるが、各コミュニティ間での物資のやりとりが増えており、各人の月面滞在期間は、10～20年程度である。

4-3-3-2. 月面コミュニティと地球との関係

第2段階においては、月面コミュニティと地球との関係は、どのようなものになるか。

まず、①(国家として捉える考え方)については、独立国家として持続するためには、地球に依存せずに月面において生活を営むことができる必要となるが、第2段階においても地球から自立した段階までには至っていないことに鑑みると、現実的ではないと思われる。

他方で、第1段階のように各コミュニティにて社会生活を完結させる方式では不都合や非効率が生じていることに鑑みると、③(地球の延長として考え方)では対応が難しい状況に至っていると考えられる。

そのため、第2段階においては、②(自治権を認める考え方)が妥当であると考えられる。

4-3-3-3. 月面コミュニティ内部のルール

(1) 基本原則・基本理念

第2段階における基本原則・基本理念については、以下のように考えられる。

まず、①(国家として捉える考え方)ではないため、月面コミュニティには国家としての権限までは認めず、あくまでも自治権を認めるにとどめる。ただし、第1段階(③(地球の延長として考え方))と異なり、月面コミュニティには、独自ルールを認めるなどのある程度広範な自治権(裁量)を認めることになる。例えば、犯罪等のトラブルが発生した場合には、軽微な事項に関する最終的な処分(裁判等)は、月面コミュニティに委ねることも考えられる。

もっとも、自治権は認めるものの、基本的人権の尊重など、地球上においても基本的な価値とされているものは、月面コミュニティにおいても適用すべきである。また、独立戦争を含め、宇宙空間における軍事衝突を避けることも基本的な価値に含まれると考えられるため、地球から月面への武器の持ち込みや月面における武器製造は禁止する(宇宙条約 4 条、IGA1 条参照)。

さらに、持続的な社会の実現を見据えて、原則として、ゴミは出さないように運用すべきである(宇宙条約 9 条)。

(2) 意思決定に関するルール

②(自治権を認める考え方)による場合、誰がどのように意思決定を行うか。これについては、大きく分けて、以下の 3 パターンが考えられる。

① 全員による意思決定

これは、月面コミュニティに滞在する全員による多数決で決める方法である。もっとも、この方法の場合には、機動的な意思決定ができないという問題点がある。また、月面に定住しているのではなく、10～20 年程度で地球に帰還するであろうことを考えると、各人が月面コミュニティの将来のことまできちんと考えて行動できない可能性がある。

② 代表者 1 名による意思決定

これは、月面コミュニティにおける意思決定を、代表者 1 名が行う方法である。なお、代表者の選定方法については、地球上で決める方法と、月面コミュニティで決める方法とが考えられる。この方法のメリットとしては、最も機動的な意思決定が可能となる点がある。他方で、この方法のデメリットとしては、当該代表者 1 名が、合理的・公平的に意思決定できれば問題ないものの、私情を持ち込んだ場合などには不合理・不公平が生じるおそれがある。また、究極的には、月面コミュニティを乗っ取られるおそれもある。また、任期制とすることが考えられるが、任期が長すぎると上記デメリットが顕在化する可能性が高くなる反面、任期が短すぎると効率的な意思決定ができなくなるという問題点がある。

③ 代表者数名による意思決定

これは、月面コミュニティにおける意思決定を、代表者数名(例えば 5 名)が行う方法である。なお、代表者の選定方法については、地球上で決める方法と、月面コミュニティで決める方法とが考えられる。この方法は、①(全員による意思決定)及び②(代表者 1 名による意思決定)の折衷案ともいえる。また、上記②同様に、任期制とすることが考えられるが、任期が長すぎると上記デメリットが顕在化する可能性が高くなる反面、任期が短すぎると効率的な意思決定ができなくなるという問題点がある。

社会科学分科会では、第 2 段階においては、③(代表者数名による意思決定)がより問題点が少なく現実的であると考えたため、以下では③(代表者数名による意思決定)によることを前提とする。なお、代表者の選定方法については、月面コミュニティにある程度広範な自治権(裁量)を認める観点から、月面コミュニティにおいて決める方法としている。

(3) 運営に関するルール

第 2 段階における運営に関するルールとしては、以下のように考えられる。
まず、各コミュニティにおける滞在人数は約 1,000 人であり、人的リソースは依然として制約されることから、上記意思決定を受け、月面コミュニティにいる全員が運営主体となると思われる。

また、意思決定や運営において、不正がないかをチェックする役職も設置する必要がある。これに加え、月面コミュニティで決定した事項等については、定期的に地球に報告し、地球からもモニターすべきである。

そして、月面コミュニティの指揮官には、航空機の機長と同様に、非常時における月面コミュニティ内の秩序維持のための身体拘束を含む広範な権限を付与する。

(4) 管轄

第 2 段階においても、月面コミュニティに広範な自治権(裁量)を認めるとはいえ、国家ではないため、国(地球)の管轄権を及ぼすことになる。

執行管轄権については、月面コミュニティが、特定の一国により運営されているのであれば当該国の管轄権に服するものとし、複数国により運営されているのであれば第 1 段階と同様に個々の要素を各提供国の管轄権に服する方法とすべきと考えられる。

また、裁判管轄権については、第 1 段階においては、刑事裁判権について特別な規定を置き、属人主義を採用していたが、第 2 段階においては、よりシンプルな仕組みとするために、そのような特別な規定は置かずに、宇宙物体登録に基づく管轄権(≒属地主義)のみとすることが考えられる。

なお、第 1 段階においては、月面コミュニティ施設外でトラブルが生じた場合のルールが明確ではないという問題が存在することから、第 2 段階においては、何らかのルールが確立しているものと思われる。

(5) 知的財産権

第1段階における考え方では、月面コミュニティのいずれの構成要素においても自らの知的財産権の保護を受けるためには、当該月面コミュニティを構成する構成要素の登録国すべてにおいて出願し、権利を取得する必要がある。しかし、この方法による場合には、維持管理コストが相当かかってしまうという問題がある。

また、第2段階においては、月面コミュニティ同士でのやりとりが増え、施設(構成要素)外における活動も増えることを想定しているため、施設(構成要素)外における知的財産権の侵害が生じることも考えられるが、その場合には、宇宙物体登録を介しての管轄権が認められないという問題が生じる。

いずれも、知的財産権の考え方においては属地主義が採用されていることに由来する問題であるが、月面コミュニティにおける特殊性に鑑みて、何らかの特別ルールを設けるべきかは、今後の検討課題と思われる。

(6) 公共サービス等

各コミュニティにおける滞在人数が約1,000人と仮定した場合には、一定の分野(医療、警察、消防など)については、専門職を置くことが考えられる。また、月面コミュニティの維持のため、各コミュニティ独自のルールとして、プール金(≒税金)を創設することも考えられる。

資源(水、空気、電気(エネルギー))については、インフラとしての側面もあることから、正当な理由なく他者の利用を拒否できないようにする必要があるため、法的拘束力のある合意(条約・契約)が必要となる。また、資源の有限性・希少性から、資源を守るための警備機能のほか、アクセス権限を限定するなどのセキュリティ対策も必要となる。なお、月面コミュニティでの取引に用いられる通貨は、当該コミュニティ参加国のうちの一国の通貨(事実上、米ドルになると思われる。)とすべきである。

4-3-3-4. 月面コミュニティ同士のルール

第1段階においては、月面コミュニティ間でのやりとりがほぼないことを前提としていたため、月面コミュニティ同士におけるルールはほとんど形成されていなかった。

もともと、第2段階になると、月面コミュニティ同士でのやりとりが増え、それに伴い、コミュニティごとにルールが異なっていると、不都合や非効率が生じてくるようになる。そのため、月面コミュニティにおけるルールの共通化が進むものと考えられる。そうすると、その共通ルールが適用されるため、いずれの国の法律を適用すべきかという問題は、適用場面が減少するものと思われる。

また、地球との間で、人・物資の行き来は依然としてあるものの、各コミュニティ間での物資のやりとりが増えていることに鑑みると、月面コミュニティにおいて何かトラブルがあった際には、地球に助けを求めるのではなく、他の月面コミュニティに助けを求める方が、合理的であると考えられる。そのため、各コミュニティ間において、有事の際の相互保障を行うようになると思われる。

4-3-3-5. 宇宙資源に関するルール

基本的には、第 1 段階と同様となるものと考えられる。もともと、第 2 段階においては、月面コミュニティ数・人口数が増えているため月面コミュニティの規模が大きくなっており、必要とされる資源量も増えていることに鑑みると、第 1 段階のように国家間で調整するにとどまらず、多国間フォーラムを設置して調整することが考えられる。この点に関連して、オランダのライデン大学国際航空宇宙法研究所を中心に設立されたハーグ・ワーキンググループは、2019 年 11 月に、宇宙資源の探査及び利用に係る国際的枠組みの発展に向けた提言（ハーグ・ビルディング・ブロック）を公表しており、参考になるだろう。加えて、2021 年 6 月には、国連の宇宙空間平和利用委員会（COPUOS）において、宇宙資源についてのワーキンググループが設立されており、今後の活動内容に注目が集まるところである。

また、第 2 段階に至ると、資源ビジネスもより本格化することから、資源ビジネスに対するファイナンスも進み、採掘施設に対する担保権設定なども行われるものと思われる。もともと、担保権の実行にあたっては、一般的には所在地法によることになるが、月面そのものはいずれの国の領域でもないため、どこの国の法律が適用されるのかについて困難な問題が発生する。ケープタウン条約宇宙資産議定書のような超国家的ルールが有効性を発揮するであろう。

4-3-4. 第 3 段階

4-3-4-1. 前提条件

第 3 段階においては、以下を前提条件としている。

- 月面コミュニティ数・人口数が増え、月面社会にてほぼ完結している。
- 第 1 段階における、各コミュニティにて社会生活を完結させる方式では、不都合や非効率が生じており、それゆえにルールの共通化が進んでいる。
- 各コミュニティにおける滞在人数は、約 10,000 人である。
- 月面コミュニティと地球との間では、人・物資の行き来は減少し、ほぼ各コミュニティ間での物資のやりとりで完結している。また、月に移住する人も出てきており、各

人の月面滞在期間は、30 年超程度となっているほか、月面で生まれた人や月面で生涯を終える人もいる。

4-3-4-2. 月面コミュニティと地球との関係

月に移住する人も出てきて、各人の月面滞在期間が 30 年超程度となっているほか、月面で出生する人や月面で生涯を終える人もいることにも鑑みると、国(地球)への帰属意識よりも、月面コミュニティ(月)への帰属意識の方が高くなるものと思われる。特に、月面で生まれ、一度も地球に行ったことがない人からすると、尚更である。このような状況を前提とした場合、いずれかのタイミングで、国(地球)からの管轄権を拒絶し、「月面国家」として独立を主張することも可能性として考えられる。

もともと、前述のとおり、「月面国家」が成立するためには、地球上の各国が、「月面国家」として承認する必要があるが、歴史的にみて、国家が独立するにあたっては、各国の利害が衝突し、独立戦争などの軍事的衝突が生じる可能性が高い点には留意する必要がある。

4-3-4-3. 月面コミュニティの内部のルール

仮に「月面国家」として考える場合には、地球上の国家主権や管轄などは及ばないことになり、これに紐づく国(地球)のルールも適用されないことになり、「月面国家」において当該ルールをすべて決める必要がある。

具体的には、憲法をはじめとする各種法律、刑罰、通貨、税金、国籍など様々な事項について、ルールを決める必要がある。特に、出自の異なる月面コミュニティが複数あることを想定すると、イデオロギーの相違も想定されるため、統一的なルールを形成するにあたっては非常に困難を伴うのではないかとと思われる。

4-3-4-4. 月面コミュニティ同士のルール

仮に「月面国家」として考える場合には、月面コミュニティ同士の関係は、いわば連邦州同士の関係のようになるのではないかとと思われる。この点は、上記において、「月面国家」がどの程度の地方自治を認めるのかに依存する。

4-3-4-5. 宇宙資源に関するルール

宇宙資源に関するルールについても、どのようなルールとするかについて、「月面国家」として決める必要がある。

もともと、第1段階・第2段階ともに、宇宙資源に対する所有権を認める立場であることから、大きく相違することはないかと思われる。

4-4. ライフサイエンス・医学分科会

4-4-1. 総論

4-4-1-1. 本報告書の背景

「月惑星に社会を作るための勉強会」(略称：Moon Village 勉強会、以下「月惑星社会」=「MV」)では、将来、月惑星に数百～1,000 人程度の社会が構成された時のライフレンスとなるモデルを作成することを目的とし、2019 年から宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency、以下「JAXA」)の宇宙科学研究所

(ISAS)のメンバーが中心となり、輸送・建築等のハード面だけでなく、法律、経済、人文社会等の社会科学的な側面も含め、検討を重ねて来ている。本報告書は、その中で、ライフサイエンス・医学分野の検討結果を報告するものである。

4-4-1-2. 本報告書の目的と方向性

MVにおけるライフサイエンス・医学分野の検討課題としては、大きく以下の2点を対象とする。

- ① 月惑星社会の環境がヒトの身心に与える影響と、その医学的対策（予防を含む）
- ② 人類・生物 進化の観点からの月惑星社会の意義の考察

一つ大きな課題として、ライフサイエンス・医学分野は、技術革新が非常に早いことが挙げられる。MVが構成されるのは、どんなに早く見積もっても50～100年後と想定されるが、その時期の医療技術の進歩を考慮しておく必要がある。過去を振り返っても、例えば遺伝子解析技術では、ヒトのゲノムが解読されたのは2003年であるが、それ以降、ゲノム解析技術は急速に進展し、今や国際宇宙ステーション

(International Space Station、以下「ISS」)上でもヒト、微生物等の遺伝子解析が簡単に行える時代である。もう一つの課題は、MVがどのような目的を持ち、どのような人員で構成される社会を想定するかで、それに応じて、必要とされる医療の内容を考えなければならない。また、経世代を含めた長期のヒトの宇宙滞在が実現するためには、単に現在の技術の延長線上で考えるのではなく、そのために解決されなければならない課題を取り上げる、いわばトップダウン的な考え方も必要とされる。そこで、本報告書では、以下2種類のMVを想定し、それに対応する医学的な課題を検討することとした(表4-4-1)。

表 4-4-1 月惑星社会に対する、ライフサイエンス・医学分野の検討における
2つの方向性

構成・目的	月面基地	宇宙移民
時期	50～100 年後（～2120 年頃）	未定（200 年後ぐらい？）
人数	100～1,000 名	数百～1,000 人程度？
人員構成	基地の維持・建設、観測、研究 開発等に関わる人員、観光業関 連 家族は一部同行	制限無し（家族、永住者を含 む）
滞在期間	1 回 1 年、生涯で最大 3 年程度 （宇宙放射線被ばく量に依存）	制限無し（経世代を含む）
社会のイメ ージ	ISS の延長線上、南極越冬隊に 近いイメージ	同人数の社会（離島など）
地球との関係	地球を母体とした社会 観光者は 10,000 人/年程度？	人員・物質等で地球との交流は 保たれていると仮定
医学的課題の 検討の方向性	現在の医療技術の延長線上で想 定	このような社会の構成に必要な 医学的課題のリストアップとそ の対応策の検討（宇宙放射線対 策、経世代を含む）

a) 50～100 年後ぐらいの、100～1,000 名程度の社会を想定。医学的課題への対応は、現在の技術の延長線上で考慮する。このカテゴリーは、更に以下の 3 つに分けて、検討する。

a-1) 50 年後、100 名程度の社会。主な業務は MV の建設、維持・管理、科学的観測等。南極越冬隊のイメージ。一時的な観光客は、1,000 名/年程度。

a-2) 100 年後、1,000 名程度の社会。主な業務は a-1) に加え、更なる資源開発、観光産業等。一時的な観光客は、10,000 名/年程度。

a-3) 数～数十名で、閉鎖隔離環境下での、少なくとも 1 年程度の共同生活社会。火星、またはその他の遠方の惑星への移動に際し、必要となる居住環境と医療体制を想定。

→ a-3) については、本報告書では取り扱わない。

b) 移民・永住を含めた MV、人数は最低でも数百名程度、時期は未定。世代の交代・継続を含め、このような社会を構成するために、解決しておくことが必要とされる医学的課題を取り上げる。基本的に医療活動はその社会で完結することを前提とする（地球には帰還しない）。但し、地球との人的・物質的交流は在り得るものとする。

Ⅱ項、各論の 1.1 項で述べるように、近い将来、人工知能（AI）とロボティクスの発達により、ヒトの能力を超えるロボットが実現すると予想される。その場合、宇宙

環境にはそのようなロボットが行くという選択肢も有り得る。しかしながら、本報告書では、あくまでヒトが宇宙に滞在することを前提として検討を行った。

また、ライフサイエンス・医学分野がカバーする領域は多岐に渡り、その全てを取り上げて詳細に検討することは、かなりの困難を伴う作業となる。そのため、本版においては①全体的な項目を洗い出して目次案として提示すること、及び②各項目においては、主として今後の方向性を示すこと、を基本としてまとめることとした。

4-4-2. 各論

4-4-2-1. 月惑星社会時代の技術的進歩

本節では、ライフサイエンス・医学分野を中心とした将来の技術予測について論ずる。一般的に、ある年代の技術の進歩を予測することは困難であり、大まかな方向性を示すことは可能であっても、予測の精度を上げること自体は、あまり意味があることとも思われない。そのため、各技術分野において、遠い将来（数百年後以降）の究極の技術の進歩を想定し、そこから逆算して、50年後なり、100年後の技術がどのようになっているか、というアプローチを取りたい。なお、本項で参考とした主たる文献は、ミチオ・カクの「2100年の科学ライフ」（2012）、「人類、宇宙に住む」

（2019）、ユヴァル・ノア・ハラリの「ホモ・デウス」（2018）、及びデイビット・クリスチャンの「未来とは何か」（2022）である。また、科学雑誌「Newton」の2025年1月号でも、本稿で記載する将来の科学技術が取り上げられている。

③ 人工知能とロボティクス

● 人工知能（artificial intelligence、以下「AI」）

2045年には、AIが人智を超えると予測されており、このポイントを超えると、AIがAIを開発するようになると言われている。AIが人智を超えた時、どのような状況になるかは、いろいろな議論があるが、本稿の主題ではないので、ここではこれ以上のことは触れないことにする。ただ、疾病の診断に関しては、既にAIが多くの役割りを担っているが、30～50年後には画像診断を含めた、ほとんどの診断をAIが担うと想定される（Moor, et al. 2023）。診断のみならず4.2項で触れるように身心のストレスレベルの判定を踏まえ、個人や集団レベルでの精神心理面のケアや介入に関しても、AIがそのほとんどの役割りを担うことが想定される（～50年後）。つまり人智が担っている医療活動の大部分をAIが担当することが想定され、その場合の人間の役割りが課題となると考えられる。

● AIとロボティクスの組み合わせ

100年後には、AIを搭載したロボットで、大半の外科手技が可能とも想定される。この場合のロボットとは、現在の手術用ロボット「ダ・ヴィンチ」のような型のもの

だけでなく、細胞レベルのマイクロ・ロボットも含む。小型のロボットによる医療が実用化されれば、宇宙や遠隔地での医療も、大きく変化することが想定される。

- 医療ロボティクスと遠隔医療

ロボット工学を応用した医療の利点の一つに遠隔医療が可能となることがあげられる。月や惑星での医療においては、医療施設や物資が不十分であることが想定されるため、遠隔医療の発展は重要である。地球上においても、遠隔医療の需要は高く、南極基地における遠隔医療や、重症患者の治療にあたる遠隔 ICU システム (tele-ICU) など、多くの分野で発展・普及している (Chen, et al. 2018)。宇宙における遠隔医療では、通信遮断や通信遅延が最大の課題の一つであり、通信手段の進歩が望まれる。

- ④ ヒトの思考・記憶パターンの解明

現在の脳科学の課題の一つに、ヒトの意識がどこに実在するのか、AI が意識を持つのか、持つとすればそれをどのように判定するのか、ということがある。神経ネットワークの解明に関する研究も精力的に取り組まれており、そう遠くない将来 (10 年以内?) には、ヒトの脳の神経ネットワークの大半も解明されることが期待されている。しかしながら、それが意識の実在の解明に直結するかどうかは分からない。ただ、ヒトの脳神経活動における論理思考や記憶パターンに関する研究も非常に力を入れて取り組まれている。このような研究の方向性とはまた少し趣を異にして、コンピューターのメモリーの増加を考慮すると、ある特定の個人の記憶や思考パターンをコンピューター上で再現することも、そう遠くない将来、実現可能かも知れない。ただ倫理的な観点を含め、コンピューター上で、ある個人の記憶と思考パターンを再現できた (と考えられる) 時、それが何を意味し、それから先にどのような発展があるのか、改めて考える必要があるのではないかと思われる。

- ⑤ センサー技術とヒトのモニタリング (集団を含む) (矢野 2018)

- 個人レベル ;

様々なパラメータ (心拍数等の生理データ、体動を含む日内リズム、各種行動パターン) をビッグデータ的に解析することで、ある特定の個人のストレスレベルを一元的に把握することが可能になる (10 年後?)。同時に、カウンセリング等、介入することも可能になる。

- 集団レベル

ある集団におけるいくつかのパラメータ (通信量、通信の内容、各個人のパフォーマンス) を解析することで、その集団全体としてのパフォーマンス、ストレスレベルが把握可能となる (20 年後?)。

現在、日本の企業等で行われているストレスチェック制度の発展型となる。但し、後述するように、情報の取得・管理に関する倫理面が課題となる。

- ヒトの考えの、外部からの読み取りと通信（50～100 年後）

あるヒトが考えていることを、脳波等の計測で外部から読み取ることが可能となることも予想されている。実際に筋委縮性側索硬化症（ALS）患者の意志の読み取りや、義手・義足を動かすための、生体信号の読み取りに関する研究開発が非常に進展しつつある。この技術が実現すれば、患者の訴えを、直接医療関係者に伝えることが出来るようになる。ただ、このような「思考の伝達」が、言語を介するの可否かは不明な点が多く、本稿ではこれ以上の深入りはしない。

- 本件に関わる倫理的課題；プライバシーとの兼ね合い

モニタリングは、勤務時間に限定、或いは危険な環境下では、生存を示す指標と位置情報は常時モニタリングすることが求められるのかも知れない。

思考の伝達に関しては伝えたくないことは、「考えなければ」伝わらないと推定されるが、これも技術が実現してみないと、断言はできない。

⑥ 遺伝子工学・生命科学技術

i) 生体再生技術

脳を除く、ほとんどの臓器が、以下のいずれか（或いは両方）で人工的に作成可能となる（50～100 年後？）。

a) クローン技術により、細胞レベルから作成

b) 工学的に作成（サイボーグ化）；マイクロレベルの技術を含む。

この技術により、がん治療、加齢対策、及び寿命の延伸が大きく改善することが予想される。脳に関しては、脳細胞の再生・移植により、認知症の改善の可能性も指摘されている。

ii) 遺伝子工学

遺伝子診断；遺伝子変異と疾患の関連性がほぼ確立される（50 年後？）。但し、長期宇宙滞在者に対し、遺伝子診断を用いてスクリーニングするためには、倫理的な課題の解決を必要とする。

遺伝子改変；

a) 特定の疾患を引き起こす遺伝子の改変

倫理的に許容範囲と考えられており、経世代に関わらない遺伝子では既に実施されている。経世代に関わる遺伝子でも、ミトコンドリア遺伝子変異疾患に対する、卵細胞における核移植は、既に倫理的には認められたケースもある。

b) 人体機能の向上を目的とした遺伝子改変 (human enhancement)

倫理的に許容されるかが課題。但し、技術的には a) と同様であり、実施は可能であり、技術的なハードルはどんどん下がることから、ユヴァル・ノア・ハラリが「ホモ・デウス」の中で述べているように、実行に移すヒトは必ず出て来ると思われる（既に実施されているかも知れない）。

iii) 疾患等への応用

a) 宇宙では放射線の影響で、がんの発生が増加すると予想されるが、定期的な検診で早期発見に務め、遺伝子治療を含めた治療法の発展により、がんによる生体の影響を最低限に抑えることも考えられている。

b) ヒトの放射線耐性化に関する検討も行われている。放射線耐性の薬剤に加え、遺伝子工学を応用し、遺伝子修復能の改良やがん化遺伝子の抑制等の方法が考えられる。ただ、ヒトレベルの個体となると、レベルとしては 1.X 倍程度かも知れない。

c) 既に ISS 上でもシーケンス技術は利用されており、診断のみならず、様々な生体物質を検出することも可能である。

d) それ以外にも、脳神経機能を含めた抗加齢医療や寿命の延伸、さらには不死化を目指した方向での技術開発も進められているが、宇宙滞在者への応用と利点に関しては、これからの議論と考えられる。

iv) 食品・薬剤の人工合成

食品：細胞・物質レベルから培養や 3D プリント技術等を用いて人工合成する。既に地上でも培養肉や精密発酵（特定の遺伝子だけ発現）による乳製品が販売されている。宇宙農場等との比較で課題となるのはそのコストとなる。

薬品類も、物質から人工合成が可能になると考えられる。

v) 3D プリント技術

医療機器は全てを地上から持ち運ぶのではなく、必要に応じて現地で作製することも提案されている。ISS 上において、3D プリント技術の実証実験も既に行われている。

vi) 高温(常温)超電導

高温(常温)超電導は 100 年以内に実用化されると言われている。これが実現すれば、少ない電力で強力な磁場を発生させることが可能となる。輸送系においても根本的にその方法とコストが激変すると言われているが、本稿では専門外のため、この点については触れないことにする。

ただ1点、述べておきたいのは、放射線防護対策としての、電磁気シールドの実用化が可能になることが想定されることである（長崎 2022、泉 2023）。この場合、輸送機、月面ローバ、或いは宇宙服単体のレベルでの電磁気シールドも可能かも知れない。その一方で課題としては、磁場の強度と、シールドで覆われる中の、人体や機器類への影響である。

また、医療系では、より小型で高性能MRIの実用化が可能になる。

vii)人工冬眠

人工冬眠は、医療や宇宙飛行などの分野での活用が期待される新技術である。宇宙居住や惑星間飛行など長期間宇宙に滞在する際、宇宙船内や宇宙基地内で人工冬眠をすることで、食料や酸素の消費量を減らし、宇宙での生活をより長く続けることが期待される。更に、冬眠により筋萎縮や骨量減少を抑制するだけでなく、宇宙で問題となる重粒子線被ばくから動物を保護するという報告がなされている（Puspitasari, et al. 2022）。また、重症患者を緊急搬送時（地球への帰還）する際に活用することも想定される。

人工冬眠技術に関してNASA（アメリカ航空宇宙局）やESA（欧州宇宙機関）、ロシアなどの宇宙機関を含め、様々な研究がなされている。冬眠の誘導に関して、冬眠しないげっ歯類に薬物を投与することにより誘導できることや（Dirkes, et al. 2015, Dugbartey, et al. 2015）、恐怖臭による人工冬眠や生命保護状態の誘導が報告されている（Matsuo, et al. 2021）。こういった薬物の詳細な効果や安全性に関する研究は殆どなされていないが、薬物の開発は遺伝子操作等に比べ容易な方法と考えられる。また、冬眠しないマウスの神経回路を刺激すると冬眠に似た状態に導くことが報告された（Takahashi, et al. 2020）。この神経回路はヒトを含む哺乳類全般にあることから、近い将来、ヒトに応用できるかも知れない。

人工冬眠技術が実現すれば、地上においても、重症患者の緊急搬送時等の救急医療への応用、地上における新薬の開発や高齢化社会での臨床や介護現場における廃用性筋萎縮や骨量減少の予防および改善、さらに老化予防などへ応用が期待できる。

ただ人工冬眠の人体への影響、特に寿命の延伸が可能かどうかは、ヒトの生涯を含めた観察データが必要となることもあり、健常人を対象とした実用化までには、数百年の時間を要することも想定される。

4-4-2-2. 宇宙環境の人体への影響とその対策

宇宙環境は重力、磁気、放射線等の物理的条件が地上とは異なる。宇宙空間では空気がほとんど存在せず、温度環境も太陽光が当たる場合はプラス120度、当たらない場合は極寒（マイナス150度）となり、ヒトを含めた地球上の生物の大部分は、空気・温湿度等で地球環境を保持した閉鎖環境の中でなければ、生命活動を維持できない。このことは必然的に閉鎖環境それ自体からの身心への影響も生じることになる。

このような宇宙環境の人体への影響に関しては、ガガーリンが最初に宇宙飛行を行ってから、既に 600 名程度の人員が宇宙飛行を経験しており、身心面への影響に関しては多くの知見が積み重ねられ、その対策も含め、NASA のデータベースとしてまとめられており（Human Research Roadmap、以下「HRR」、NASA）、数多くのテキストも出されている（Nicogossian, et al. 2016、藤田 2015）。JAXA も、有人宇宙活動における医学的な課題について、技術ギャップとして提示している（2020）。MV においても、宇宙環境が人体に及ぼす影響の構図が変わるわけではなく、その影響と対策については、HRR を基本的な方針として参照することが現実的である。本報告書では、宇宙環境の人体影響に関し、特に影響が大きく、研究課題として重点的に取り組む必要のある、以下の課題について、取り上げ、それ以外の課題に関しては、参考資料としてまとめる。将来的には、日本として取り組むべき宇宙医学研究の方針の整備に繋がることを期待したい。宇宙環境の影響因子と、人体への影響の時間的経過については、図 4-4-1、4-4-2 を参照。

- 宇宙放射線
- 重力影響：特に筋骨格系と体液バランスに伴う課題（眼を含む）
- 精神心理的な課題
- 月面ダスト（レゴリス）
- 環境因子（放射線、レゴリス以外）
- 宇宙での経世代に向けての課題



図 4-4-1 宇宙環境が人体に及ぼす影響要因

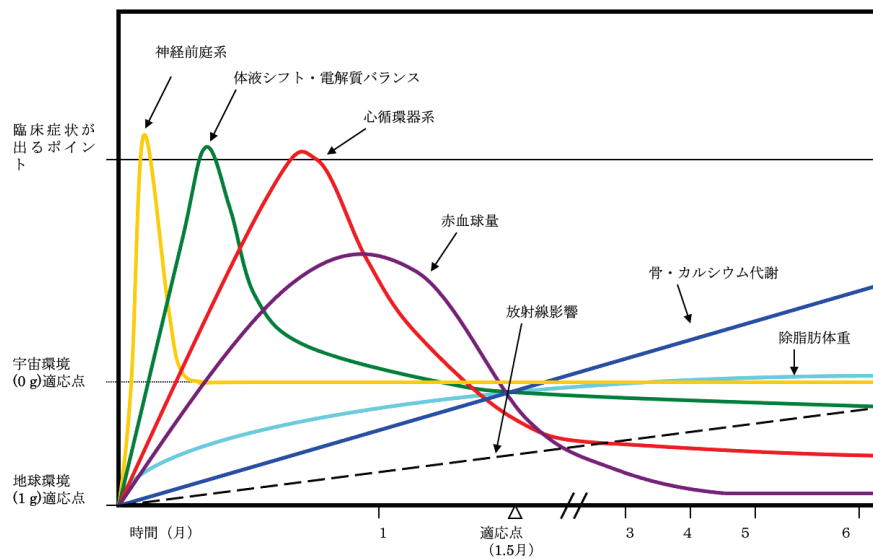


図 4-4-2 宇宙環境が人体に及ぼす影響の概略 Nicogossian らの図を元に一部改変

① 宇宙放射線について

ヒト、及び地球上の生命体が宇宙環境で生命活動を維持するのに、最大の課題が宇宙放射線と考えられる。将来、ヒトが世代を越えて宇宙に滞在する場合、少なくとも妊娠時を含め、成長期の放射線感受性は非常に高いと思われ、少なくともこの間に被ばくする放射線のレベルを、現在の地球上と同程度、少なくとも放射線業務従事者レベルに抑えることが必須と思われる。

宇宙放射線に関する研究開発要素としては、①計測、②生物影響、③予測、④シミュレーション、及び⑤防護に大きく分けて考えられるが、上記のように、世代交代を含めたヒトの長期宇宙滞在の実現のためには、⑤の「防護」をある程度のレベルで確立することが求められる。

i) 宇宙放射線量と質の計測および予測：

宇宙放射線の影響を正しく評価するための前提条件として、放射線の被ばく履歴（過去）、リアルタイムの計測（現在）、宇宙天気予報（未来）などの情報も重要である。宇宙放射線の計測に関しては、JAXA が中心となって実施している PADLES

（Passive Dosimeter for Lifescience Experiments in Space：受動積算型宇宙放射線線量計）について、「ISS 宇宙放射線環境計測 PADLES データベース」（参考文献の項）を参照されたい。

ii) 宇宙放射線の生物影響（生涯被ばく線量限度の再検討）：

この根拠となる値は、原爆被ばくによる人体影響を参照としている。原爆のように短い時間に高い線量を受ける場合に対して、低い線量を長時間にわたって受ける場合（低線量率の被ばく）のほうが、被ばくした総線量が同じでも影響のリスクは低くなるような傾向が、動物実験や培養細胞の実験研究で示されている。しかし、これまでの実験よりもさらに低線量率の宇宙での影響は十分に明らかにされていない。また、400人以上の宇宙飛行士を対象にした研究で、宇宙放射線が寿命に与える影響は強くはないという研究結果（Reynolds, et al. 2019）や、地上の自然放射線が強い地域でもガン発生率は有意に上がっていないという研究結果（Nair, et al. 2009）もある。

その上、地上と異なる重力との複合影響もわかっておらず、宇宙放射線のリスクは不確定なのが実情である（Durante & Cucinotta, 2008, Furukawa, et al. 2020）。今後、より長く、より多くの宇宙滞在者の追跡調査によって、限度値が明らかにされることが期待できる。また、閾値がないと仮定されている確率的影響の「がん」が、早期診断・治療により、完治が可能な世の中になれば、生涯の被ばく限度の引き上げも可能になり、宇宙惑星居住時代がさらに現実的なものになるであろう。さらに、幹細胞の欠失によって症状が表出するような閾値のある確定的影響については、バイオ 3D プリンターなどの再生医療技術の進歩によって克服することが期待される。但し、神経細胞の置換のためには、記憶や学習内容のバックアップ体制など、さらなる次元での科学の進歩が必要であろう。このような革新的な医療も、地上のみではなく、宇宙でも行えるようにするには、さらなる英知の結集が必要である。

iii) 宇宙放射線被ばくの防護：

防護法としてアクティブな磁場の活用、防護材としてパッシブな各種材料の遮蔽性能の検証が進められている。防護材の原子番号が大きいと生物学的効果比の高い中性子を含む二次粒子線が発生するため、原子番号が小さい水素リッチなものが理想である（Naito, et al. 2021）。宇宙飛行船では、船内物品（ウェットタオル）の利用などが考案されている（Kodaira, et al. 2014）。防護材に関しては、JAXA の軌道上実験としてポリエチレン、地上の加速器実験機器を用いて様々な材料（レゴリスシミュラントを含む）に対する実験が行われている（Nagamatsu, et al. 2015、永松 2017）。また、月や火星では、宇宙飛行船の最大積載量（容積および重量）の制限から地球から防護材を運び込むことは現実的ではない。レゴリスの利用、縦孔の活用は有効であろう（Sato, et al. 2018, Naito, et al. 2020）。防護薬の開発、防護遺伝子（Hashimoto & Kunieda, 2017）などを利用した生物学的な解決方法も提案されている。前述のように高温（常温）超電導技術が確立されれば、電磁気シールドの活用も期待される。

② 精神心理・人間工学・パフォーマンス

i) 将来像

技術予測の項で述べた通り、50～100年後の将来ではAIの発達により、ヒト個人、及び集団のパフォーマンス等は、モニタリング・介入・コントロールが可能になると予測される。

ii) 精神心理に関わる倫理的課題

その一方で、モニタリングに関する倫理的課題も生じる。現状では以下の2案が考えられる。

(ア) モニタリングは、基本的に勤務に関わる内容のみとする。

(イ) 生死に関わるパラメータ（心拍数等）と位置情報のみは、宇宙という過酷な環境で生活する間、当面は常時モニタリングする。

iii) 当面（～2070年）の対応

1項で述べた、AIによるモニタリングがある程度の精度を得られるまでは、現状の対応方法で対処する。即ち、①宇宙滞在に適した人員の選抜、②訓練、③地上・及び現地スタッフによるフォロー、④長期滞在者は、帰還前の教育訓練、⑤帰還後のフォロー・リハビリ。

特に長期に亘る過酷なミッションの場合は、①の適した人員の選抜は、常に考慮しておかなければならない。その一方で宇宙滞在の人員が増えるにつれ、必ずしも本人が望まなくても、業務上、宇宙滞在を求められるケースも想定され、その対策も考慮しておく必要がある。特に火星ミッションのように、数名程度の少人数で、長期間、閉鎖隔離環境への滞在が求められる場合への対応策は、ミッションの実現に際して必須となる。

ある程度の期間以上の長期滞在では、地上で日常生活に戻った後の、家族や近隣社会とのギャップが原因となって、しばしば社会的不適応が生じることが知られている。本件については、事前に本人や関係者に対し、情報を提供し、適宜フォローすることが求められる。

③ 重力影響

i) 筋骨格系

ISSのような微小重力環境下では、筋骨格系の萎縮が高確率で生じるが、現在、ある程度以上の強度の運動、栄養管理、場合により薬剤の使用、及び帰還後のリハビリ等で、その対応策は、かなり確立された状態と考えられる（山田 2021）。しかしながら、軌道上の運動処方、各個人にかなりの労力と時間を要する。また、必ずしも

全員が、運動を好む訳ではなく、宇宙での運動がストレスであったと明言する宇宙飛行士もいた (Lucid, 1998)。月・火星のような低重力環境下の影響は、ほとんど分かっていない。現時点で言えることは、微小重力に準じた、運動を含めた対策を実施し、長期滞在者の知見を積み重ねながら、その対応策の改訂（または軽減）が求められる。

微小・低重力対策の一つとして、人工重力装置が挙げられるが、回転半径を含め、そのスペックと効果は今後の検討課題である。それ以外にも、筋肉系への電気刺激や抵抗性のスーツ等のアイデアもあり、今後の研究開発が期待される。

ii) 体液シフトに伴う課題

体液シフトに伴う課題としては、神経前庭系も含め、重力変動後の宇宙酔いや、それに伴うデコンディショニング、特に起立耐性の低下が大きな問題であった。ただこのような課題は、上記の筋骨格系対策としての運動処方の実施や、重力変動前後の、体液バランスを維持するための対応策の検討も進み、状況はかなり改善されたと考えられる。

ISS など微小重力下における体液シフトに伴う長期的な人体影響、特に宇宙飛行関連神経眼症候群 (spaceflight-associated neuro-ocular syndrome, SANS) や脳内圧の変化に関しては、その原因や機序など知見が集積されつつあり (Lee, et al. 2020, Iwasaki, et al. 2021)、対策への研究もすすめられている (Nguyen, et al. 2025)。一方で月・火星のような低重力環境下の長期影響は未だ知見が乏しく、有人滞在とともに研究が必要である。

iii) 尿路結石

体液量の変化、血中（尿中）ミネラル成分の変化に伴い、微小重力下では高頻度で尿路結石が生じることが判明している。尿路結石に伴う疝痛発作が生じると、業務だけでなく、日常生活も著しく制限されることから、その対策は十分に考慮しておかなければならない。

iv) 重力変動時への対応

2.3.2 項で述べたように、重力変動時の体液シフトに伴うデコンディショニングに対しては、かなり対策が確立されたと考えられるが、それは職業宇宙飛行士の話しであり、今後、旅行者を含め、民間宇宙飛行士が増えた場合は、各人の身体的状況に応じた対応策を考慮する必要がある。宇宙船の操縦は、かなり自動化され、特に今後はその方向が一層進むと予想されるが、重力変動時のデコンディショニングの影響は、常に念頭に置いておく必要がある。長期間の微小・低重力環境に滞在した後の地上帰還

時は、筋骨格系の影響も大きいことから、トレーニングやリハビリを含めた対応策が求められる。

④ 月面ダスト（レゴリス）（森本、他 2010）

月面ダスト（レゴリス）は、その形状から、アスベストとの類似性が懸念されている。アスベストは呼吸器系を介し、人体内に取り込まれた場合、排出されることなく、数～数十年単位の時間を経て、中皮腫の発症等の原因となることが知られている。吸入量と疾患の発症には、ある程度の相関があると言われているが、その影響を生じさせる下限値は存在しないのではないかと、という見方もある。いずれにせよ、月面ダストの人体（生物）影響の解明と、その対策の確立が必須となる。また、月面ダストは帯磁しているとの報告もあり、前述の電磁気シールドを実施する際は、その影響も考慮の必要があると思われる。

⑤ 環境要因（放射線、レゴリス以外）

宇宙環境では、放射線、重力、レゴリス以外でも、以下の要因の影響とその対策を考慮しなければならない。

- 気圧（1気圧でない場合）、空気組成（酸素分圧、CO₂濃度、その他の有害ガスの有無）
- 減圧症対策；船外活動時、空気漏出に伴う急減圧
- 空気の温湿度
- 低温。太陽光が直射する場合は高温
- 室内の照度、明暗サイクル、それに伴う生体リズムへの影響
- 騒音、振動
- 飲用水
- 環境微生物
- 隕石、飛来物、宇宙デブリ等の外来因子
- 接触する化学物質
- 地球との通信遅延
- その他

⑥ 宇宙でのヒトの経世代について

宇宙でのヒトの経世代（=世代交代）は、重力と放射線のレベルが、地球上と同じ程度に実現出来ていれば、問題無いと考えられる。課題は、月等での低重力下でのヒトの成育と、被ばく線量をどの程度抑えられるかである。これまでに得られている宇宙環境の人体に対する影響に関するデータは、全て成年期以降のヒトを対象として得られたものであり、妊娠・出産・成長期への影響に関しては、動物実験を含めたデータを集めるところから考えなければならない。小型水棲生物であるメダカでは、既に宇

宇宙環境での経世代が実証されている (Ijiri, et al. 1996)。哺乳類ではマウスの凍結精子に対する放射線の影響が調べられている (Wakayama, et al. 2021)。

被ばく線量のレベルを、ある程度以下に抑えられていれば、妊娠・出産までは、大きな問題は生じないのではないかと推測される。最大の課題は、出生した乳幼児が成長するまでの過程の、重力と放射線のレベルで、子供が低年齢であればあるほど、いずれの要素の影響も大きいものと想定される。妊娠・出産、及び子供の成長に応じた、重力と放射線被ばくの許容限界を、見積もる必要がある。

また、宇宙環境で生まれ育った子供は、自身が置かれた時空間が、自己が体験する環境となる。そのような子供 (= ヒト) が、自分の置かれた環境をどのように認知・解釈し、成長するにつれてどのような世界観を持つようになるかは、全く想像の域を出ない。後述するように、人類進化の一步となるのかも知れない。

4-4-2-3. 医療設備・体制

本項では、将来の月・惑星社会で必要とされる医療体制、健康維持のための設備について論じる。

① 医療体制

i) 50 年後、100 名程度の社会

- 現在の南極越冬隊のイメージ。医師は 100 名に対し、1 名 (少なくとも外科系)
- 医療補助者数名 (医用工学の専門家、精神心理面を含む)
- 医療設備；血液検査、生理学的検査、画像診断 (X 線、小型 MRI 等)
- 遠隔医療：地球の支援センターとの通信設備
- 地球への緊急帰還システム；病人が 1 人でも自動で生命活動を維持し、地上まで自動で帰還が可能な輸送システム

ii) 100 年後、1,000 名程度の社会 (旅行者；10,000 名/年)

- 医師は数名 (外科系、内科系)
- 精神科医、または精神心理の専門家
- 看護師、歯科医、薬剤師、医療機器工学士、その他医療関係の専門家
- 医療設備：診断・治療は、ほとんど自動化。医師は最後の判断、治療行為
- 精神心理面のフォロー、カウンセリングも基本は AI ロボットが対応
- 遠隔医療：地球の支援センターとの通信設備
- 地球への緊急帰還システム；病人が 1 人でも自動で生命活動を維持し、地上まで自動で帰還が可能な輸送システム

iii) ヒトが永住する社会（数百年後、数千名程度）

- 医療設備は、地球とは完全に独立して実施
- 検査・診断・治療は、ほとんどが自動化
- 精神心理面のモニタリングとケアも、ほとんど自動化
- 地球との人的・物的・情報面での交流は保たれる

iv) 少人数（10名程度）、数年単位の閉鎖隔離集団に必要な医療設備の検討

↑ 火星等へのミッションを想定

※月・惑星社会における医療設備の課題

- ・基地の一部破損、小惑星の衝突等で、医療関係者を含む、多数の人員が損傷を受けた場合の対応について

本件については、医療のみならず、宇宙基地全体として、どのような被害を想定し、その対策をどこまで求めるか、という全体的な課題であり、医療体制はその中の一つの位置付けとなる。いずれにしても、負傷者の数と、提供可能な医療資源のバランスを踏まえた上で、対応に当たることになる。

② 医療制度に関する課題

- 医療体制 → 法的根拠は？
運営の主体は？
⇒ 医療従事者の所属は？
- 宇宙環境が及ぼす有害事象
⇒ 業務での従事は雇用主
旅行者の場合は自己責任(?)
- 医療安全 → 医療事故への対応
- コスト負担；医療保険
- 死亡時の対応 → 死亡判定、検死 ← 法医学的検討
死体の処理 → 資源再利用(?)
- 人対象宇宙医学実験の倫理基準
- 多人数閉鎖環境での公衆衛生・感染症対策
- 妊娠・出産

4-4-2-4. 倫理に関する課題（Newton 誌 別冊「科学と倫理の交差点、2024」）

① 限られた医療資源の配分

→ 重傷者の治療

多数の受傷者が生じた場合 → トリアージ

帰還が困難な場合の対応

② プライバシーとモニタリングに関して

→ 危険な環境で、どこまでモニタリングするか

精神・心理的ストレスをどこまでモニタリングするか

③ 遺伝子技術に関する課題

長期宇宙滞在者に対する遺伝子診断の実施の是非

遺伝子改変；特に疾病と関わりの無い、身心機能の向上を目的とした遺伝子改変について

④ 危険な環境での業務・生活

本人への周知と理解 ← 責任の所在は？

長期滞在者 ← 事前の診断に遺伝子解析を含めるか？

帰還後のフォローとデータ取得

⑤ 社会制度との関連性

コスト負担

宗教等の価値観

食生活との関連性

⑥ 宇宙で死亡した場合の対応

死体の保管・帰還、宇宙葬

親族への連絡

⑦ カルネアデスの命題

長期宇宙滞在、特に惑星ミッション等の少人数での長期間閉鎖隔離環境では、6.1項の医療資源に限らず、空気・水、電力、食料等のリソースの不足から、全員の生存・帰還が不可と判断される状況が生じることが想定される。このような状況をどこまで想定し、対応策を考えておくのかは、実際にミッションに従事する人々（支援スタッフも含め）に委ねられるのかも知れない。

⑧ 倫理的問題の検討の場

上記のような倫理的課題を、誰がどのような場で議論し、関係者のコンセンサスを得るのか、法的な側面や、各国の価値観の違いも踏まえ、その検討体制を整備する必要がある。

4-4-2-5. 衣食住と生態系について

衣食住は、生活環境という観点から大きな課題であるが、各々の分野で専門性が高く、医学的な観点からの課題と対応策（特に「食・栄養」）以外では、本分科会の守備範囲を超えることから、必要に応じ、別途検討の場を設けることを提案したい。

宇宙居住環境において、地球の生態系をどこまで取り入れるのかも、大きな課題である（例えば動植物の飼育）。この課題は衣食住のみならず、ライフサイエンス・医学の全ての分野にも直結する。本件は、アーキテクチャ等の分科会を含め、ムーンビレッジの全体に関わる課題であるが、現状では将来の検討課題として、提起するに止めておきたい。

4-4-2-6. 人間工学的課題

- ヒトと機械系のインターフェース
- VR、メタバース等の環境
- AI とのインターフェース
- 船外宇宙服のデザイン
- 宇宙での生活環境に関する課題
- その他

4-4-3. 人類進化と将来を予測することの意義（オニール 1981）

4-4-3-1. 人類進化について

人類の宇宙進出は、生命体としての、進化のステップにあるのかも知れない。以下、3つの方向性が考えられる。

① 人類の次世代生命体の創出

人工知能の発達は一歩止まるところを知らず、近未来（2045年頃？）人智を越えるとの予測もある。この人工知能とロボティクスの組み合わせで、遅くとも100年後ぐらいには、現在の人類を越える生命体が出現している可能性が高い。その生命体は自己進化を進めることが予想され、そうなれば、次世代生命体は、更に進化を続けることになる。

② ヒト個人としての進化（‘kotoba’ 2021）

i) 遺伝子に依る変異・進化

- 宇宙に限らず、自然に生じる遺伝子変異の9割以上は、有害と考えられていたが、ゲノム解析が進展した現代では、新しく生じる遺伝子のほとんどは中立（有利でも不利でもない）、あるいはほぼ中立だと考えられている（斎藤、他 2009）。
- 人為的な遺伝子変異は、技術的には可能。遺伝子疾患治療は許容されると予測されるが、人体機能向上を目的とした遺伝子改変が許容されるか否かは不明（例：無・低重力下での筋骨格系萎縮の低減）。また、遺伝子と個体形質の関係性が十分に解明されていない現状では、実施した遺伝子改変が、予想外の形質改変を生じさせる可能性も考えられる（例：精神心理面への影響）。
- 長期宇宙滞在に伴う心身機能・構造の変化と、遺伝子変異の関連性の予測も困難（現状では、目的論的進化、即ち、生命体自身が、何らかの方向性に向けて進化していることは、科学的には認められていない。仮に実際に目的論的進化が存在したとしても、その機序は不明）。
- 現在、受け入れられている進化のメカニズムは、突然変異により、有害な突然変異は淘汰され、生存に有利となった形質、あるいは中立な形質、ほぼ中立な形質が、集団に定着するとされている。即ち突然変異は偶然の産物であり、目的を持ったものではない。この場合、生じた突然変異が集団に定着するには、数世代以上を要すると考えられている。
- 近年のISSにおけるライフサイエンス研究により、宇宙環境でのエピゲノムや遺伝子発現の変化が観察されており、エピジェネティック変化が進化に与える影響も考慮していく必要がある。

ii) 遺伝子以外の身体的変異・改造

- 各臓器の置換、ロボティクスとの組み合わせによる、身体のサイボーグ化
※ミクロ（＝細胞・分子）レベルでのサイボーグ化を含む
※神経刺激に依る脳機能・身体活動の活性化 例：筋萎縮の予防

iii) 精神心理面の進化

- ① 知的・計算能力、認知・作業処理能力の向上？ ← 可能か？
- ② 社会性の向上？ → 他者、社会構成員としての関係性の変化

④ ヒト集団としての進化

特に宇宙への移民に伴い、集団として、精神面・身体面で地球環境とは異なる進化を遂げる可能性が考えられる。上記のヒトの精神心理面での進化（変化？）が関連す

るか？ なお、太陽圏外の居住可能惑星への人類移住における、遺伝学的・文化的な進化に関しては、佐野が論文としてまとめている（2021、2022）。

④ ヒトの進化の方向性について

ここでは、1.1.の「次世代生命体」には触れず、生物学としてのヒト（ホモサピエンス）としての進化について、考察する。既に述べたように、既に遺伝子工学技術を手にした我々人類は、技術的にはヒトを構成する遺伝子を改変することは可能である。しかしながら、それが生物として良い方向に進むかどうかは、未知数の部分が多い。遺伝子の機能が十分に解明されておらず、特に精神心理面への影響は、不明の点が多い。仮に計算能力や記憶力の向上が可能だとした場合、それが人類社会の発展に繋がるのかどうかは分からない。むしろ、協調性や柔軟性等、社会性を向上させる方が、人類社会としては発展性が見込まれるのかも知れない。実際に動物を対象とした研究からは、そのような結果が報告されている。それ以前の課題として、そもそも我々人類は、人類社会を進化させることが出来るのか、「出来る」と考えた場合、それは良い方向に向かうのだろうか。或いは、「進化」という観点からは、何もしない方が良いのかも知れない。

近年、「社会進化」という言葉が示す通り、社会を構成する要因に注目し、各要因の影響を調べるような研究も報告されている（ウィルソン 2020）。現在でも各地で紛争が絶えないが、科学技術のある分野では、逆にこのような紛争や戦争により、技術が発展したという側面も否めない。そもそもアポロ計画を始め、宇宙開発が大きく発展したのは、米ソの対立に由来するところが大きく、各種の医療技術（例えば輸血や外傷の治療方法）も、戦闘により発展したことは良く知られているところである。或いは特定の価値観を共有する集団が、人類の次なる進化に繋がることも考えられる。

人類の宇宙進出が、この「人類進化」においてどのような位置付けであるのか、本報告書としては、「分からない」としか言いようがない。ただ「進化」という観点においても、新たなステップに踏み出すことは間違いなく、願わくは、それが良い方向に向かうことを期待したい。

4-4-3-2. 将来を予測することの意義

本項では、将来を予測することの意義について論じる。

特にライフサイエンス・医学分野で取り上げられているように、今後、50～100年のタイムスパンで考えただけでも、多くの技術的な革新が生ずることが予想される。単なる現在の科学技術の発展だけでなく、よく言われるように、我々が想像する、或いは望んでいることの多くが、実現可能となると考えられる。では、このような将来の技術予測を行うことには、どのような意義があるのであろうか。それは、我々人類

が、よりよき将来像を描き、それに向けて実現することを目指しているからだ、ということを主張したい。

2025年現在、各地で紛争が絶えず、貧困、格差、難民、疫病、環境問題等、人類が抱えている課題は、以前とたいして変わらないように思える。むしろ人口が増加し、科学技術が発展した分、悪化しているようにも見える。また、SFの世界では、近い将来、人智を凌駕すると予想される人工知能が、人類に対し、反乱を起こすストーリーも、数多く描かれている。しかしながら、本勉強会において将来を予測するのは、単に技術動向を想定するだけでなく、月・惑星社会を含め、我々人類の一人ひとりが、より幸福で豊かな生活を送るためには、どのような技術開発が望まれ、どのような社会を築けば良いのか、ということが最大の目的であることを、念頭に置いておきたい。さらに、全ての科学技術研究者は、自身の携わる研究開発分野において、その研究活動が、今後の人類社会の姿と発展にどのような意味を持ち、貢献するのか（或いは影響を持つのか）を語ることが責務であることを、本報告書を含め、明言しておく。

4-4-4. 結び

宇宙は非常に過酷な環境であり、そこで生存するためには、生命活動を維持するために必要な要件が全て問われる。これは空気・水等の物理的要因だけでなく、人口構成や社会組織体制等の社会的側面を含む。逆に言えば、何か一つでも欠けている点があれば、それが致命的になることを意味している。出典は不明であるが「地球環境をコントロールできない人間が、宇宙での環境を維持できる訳がない」という言葉が非常に印象に残っている。

宇宙に進出することで、改めて「ヒトとは何か？ 生きるためには何が必要か？」が問われることになる。宇宙環境で生命活動を継続出来た時、それだけでも人類は進化の新たな段階に進んだと言えるのかも知れない。

参考文献

- Chen J, et al. Clinical and Economic Outcomes of Telemedicine Programs in the Intensive Care Unit: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Intensive Care Med.* 33(7):383-393 2018
DOI: [10.1177/0885066617726942](https://doi.org/10.1177/0885066617726942)
- Dirkes MC, et al. The physiology of artificial hibernation. *J Clin Transl Res.* vol. 30, pp. 78-93, 2015
- Dugbartey GJ, et al. Induction of a torpor-like state by 5'-AMP does not depend on H2S production. *PLoS One*, vol.10, e0136113, 2015
- Durante M, and Cuccinotta FS. Heavy ion carcinogenesis and human space exploration. *Nat Rev Cancer*, vol.8, pp.465-472, 2008
- Erden YJ, and Brey PAE, Ethics guidelines for human enhancement R&D *Science* vol.378 pp 835-838, 2022
- Furukawa S, et al. Space Radiation Biology for "Living in Space". *Biomed Res Int*, vol.2020, p.4703286, 2020 doi.org/10.1155/2020/4703286
- Hashimoto T, and Kunieda T. DNA Protection protein, a novel mechanism of radiation tolerance: lessons from tardigrades. *Life*, vol.7, p.26, 2017
- Ijiri K, et al. Primordial germ cells in the embryos of Medaka fish. *Biol Sci Space*, vol.10, pp.156-157, 1996
- ISS 宇宙放射線環境計測 PADLES データベース
<https://humans-in-space.jaxa.jp/spacerad/NI010.html>
(2023 年 5 月 15 日参照)
- Iwasaki K, et al. Long-duration spaceflight alters estimated intracranial pressure and cerebral blood velocity. *J Physiol.* 599(4):1067-1081. 2021 doi: 10.1113/JP280318.
- Kodaira S, et al. Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters. *Adv Space Res*, vol.53, pp.1-7, 2014
- ‘kotoba’ 「人間拡張はネオ・ヒューマンを生むか？」 集英社 2021 年秋号
- Lee AG, et al. Spaceflight associated neuro-ocular syndrome (SANS) and the neuro-ophthalmologic effects of microgravity: a review and an update. *NPJ Microgravity* 7:6:7. 2020 doi: 10.1038/s41526-020-0097-9.
- Lucid S, Six months on Mir, *Scientific American*. May 1998
- Matsuo T, et al. Artificial hibernation/life-protective state induced by thiazoline-related innate fear odors. *Commun Biol*, vol.4, p.101, 2021
- Moor M, et al. Foundation models for generalist medical artificial intelligence. *Nature* vol.616 pp 259-265, 2023
- Nagamatsu A, et al. Space radiation dosimetry to evaluate the effect of polyethylene shielding in the Russian segment of the International Space Station. *Physics Procedia*, 80, 25-35 2015
- Nair RRR, et al. Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karanagappally cohort study. *Health Phys.* 96(1):55-66. 2009 doi: 10.1097/01.HP.0000327646.54923.11.
- Naito M, et al. Investigation of shielding material properties for effective space radiation protection. *Life Sci Space Res*, vol.26, pp.69-76, 2020

Naito M, et al. Applicability of composite materials for space radiation shielding of spacecraft. *Life Sci Space Res*, vol. 31, pp. 71-79, 2021

National Aeronautics and Space Administration (NASA : 米国国家航空宇宙局)、Human Research Roadmap <https://humanresearchroadmap.nasa.gov/>

「Newton」 2025 年 1 月号 (vol.45, No.1) ニュートンプレス 2025

「Newton 別冊 科学と倫理の交差点」 2024 年 12 月 ニュートンプレス 2024

Nicogossian AE, et al. *Space Physiology and Medicine: From Evidence to Practice*, 4th Ed. Springer, 2016

Nguyen T, et al. Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome (SANS) and Its Countermeasures. *Prog Retin Eye Research*. 101340. 2025
doi.org/10.1016/j.preteyeres.2025.101340

Puspitasari A, et al. Synthetic torpor protects rats from exposure to accelerated heavy ions. *Sci Rep*, vol.12, p.1640, 2022

Reynolds RJ, et al. Contrapositive logic suggests space radiation not having a strong impact on mortality of Us astronauts and soviet and Russian cosmonauts. *Scientific Reports* 9, Article number: 8583, 2019
doi.org/10.1038/s41598-019-44858-0

Sato T, et al. Comparison of cosmic-ray environments on earth, moon, mars and in spacecraft using PHITS. *Radiat Protect Dosimetry* vol.80, pp.146-149, 2018

Takahashi TM, et al. A discrete neuronal circuit induces a hibernation-like state in rodents. *Nature*, vol.583, pp.109-114, 2020

Wakayama S, et al. Evaluating the long-term effect of space radiation on the reproductive normality of mammalian sperm preserved on the International Space Station. *Sci Adv*. 7 : eabg5554, 2021 [doi: 10.1126/sciadv.abg5554](https://doi.org/10.1126/sciadv.abg5554)

デイビット・クリスチャン (水谷淳・鍛谷多恵子訳) 「未来とは何か」 ニューズピックス(株) 2022
原著 : Christian, David 'Future Stories; What's Next?' Little, Brown Spark 2022

デイヴィッド・スローン・ウィルソン (高橋洋訳) 「社会はどう進化するのか」 亜紀書房 2020
原著 : Wilson, DL, 'This View of Life: Completing the Darwinian Revolution' Pantheon Press, 2019

ジェラード K. オニール (小尾信弥訳) 「スペースコロニー 2081」 PHP 研究所 1981
原著 : O'Niell, JK, '2081:a hopeful view of the human future' Simon & Schuster 1981

ミチオ・カク (斉藤隆央訳) 「2100 年の科学ライフ」 NHK 出版 2012
原著 : Kaku, Michio 'Physics of the Future: How Science Will Shape Human Destiny and Our Daily Lives by the Year 2100' Doubleday, 2011

ミチオ・カク (斉藤隆央訳) 「人類、宇宙に住む : 実現への 3 つのステップ」 NHK 出版 2019
原著 : Kaku, Michio 'The Future of Humanity: Terraforming Mars, Interstellar Travel, Immortality, and Our Destiny Beyond Earth' New York, 2018

佐野 智 *Jour. British Interplanetary Soc.* 74, 243-251. (2021), 74, 419-426. (2021), 75, 118-126 (2022)

永松愛子 : 宇宙放射線に対する効果的な遮蔽材料と被ばく線量評価手法の確 : ISS におけるポリエチレンの遮蔽実験結果・科研費成果報告 (2017)

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-26506032/26506032seika.pdf>

日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 「将来有人宇宙活動に向けた宇宙医学/健康管理技術の技術ギャップ一覧 (第2版)」 2020

https://humans-in-space.jaxa.jp/library/item/med/200207_technical-gap.pdf

(2023年4月22日参照)

藤田 真敬 「宇宙航空医学入門」 鳳文書林出版 2015

泉 龍太郎 「高温超電導物質を用いた電磁気シールドの構築に関する一考察」 宇宙航空環境医学 60(1) 31, 2023

マルチェッロ・マッスイミーニ、ジュリオ・トノーニ (花本知子訳) 「意識はいつ生まれるのか」 亜紀書房 2015

原著; Giulio Tononi, Marcello Massimini 'Nulla di più grande' Baldini + Castoldi 2017

ユヴァル・ノア・ハラリ (柴田裕之訳) 「ホモ・デウス-テクノロジーとサピエンスの未来」 河出書房新社 2018

原著は2015年にヘブライ語で出版、日本語訳は2016年の英訳本より翻訳

英訳版: Harari, Yuval Noah 'Homo Deus: A Brief History of Tomorrow'. London: Harvill Secker. 2016

森本 泰夫 他、「宇宙環境における生体影響-月面粉じんレゴリスについて-」 日衛誌 vol.65 pp479-485, 2010

長崎 陽 「宇宙機搭載に向けた磁気クロークの多層化および磁気遮蔽能力の向上」 科学研究費助成事業 研究成果報告書 2022年5月

斎藤 成也、他 「斎藤成也教授が聞く 中立論の成りたちをたずねあがりを探る」 総研大ジャーナル vol.15 pp18-25, 2009

矢野 和男 「データの見えざる手」 草思社文庫 2018

山田 深 「長期宇宙滞在における運動とリハビリテーション」 Precision Medicine vol.4 pp824-827, 2021

本報告書の執筆には、以下の方々の協力を得た（敬称略、所属は 2025 年 2 月現在）

相羽 達弥 （JAXA）
石橋 拓真 （東京大学医学部）
井上 夏彦 （JAXA）
岩崎 賢一 （日本大学医学部）
大平 宇志 （近畿大学医学部）
大本 将之 （久留米大学医学部）
上垣内 茂樹 （APRIN）
勝部 孝則 （量研機構）
加藤 智一 （日本大学医学部）
倉住 拓弥 （日本大学医学部・福寿会病院）
榊 建二郎 （天使大学）
坂下 哲也 （JAXA）
笹原 信一郎 （筑波大学医学医療系）
武岡 元 （日本宇宙フォーラム）
田島 裕之 （久留米大学医学部）
立崎 英夫 （量研機構）
立花 正一 （平沢記念病院）
道喜 将太郎 （筑波大学医学医療系）
永松 愛子 （JAXA）
速水 聡 （JAXA）
暮地本 宙己 （東京慈恵会医科大学）
松崎 一葉 （筑波大学医学医療系）
水野 康 （東北福祉大学）
三丸 敦洋 （元 JAXA）
武者 篤 （群馬大学）
村上 敬司 （JAXA ; 故人）
保田 浩志 （広島大学）
山田 深 （杏林大学医学部）

4-5. 人文科学分科会

月にvillageをつくること＝文化人類学からのアプローチ

月に人類社会を作ること考える場合の 議論の出発点を以下のように考える

- Moon Village人文社会科学分野
.....二つの困難な課題(または期待)
 - (1) 短期間課題: 直近月コミュニティ社会・文化をどのように設計するか?
 - (2) 人類が月(宇宙)生活基盤を構築する際にどのような方向性・可能性があるか?
- 両者の間に横たわる現代社会の課題、閉塞感

宇宙と人類を知ることの意味とは?

D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?



現代宇宙探査目的(Global Exploration Strategy, 2007)

“Where did we come from?

What is our place in the universe?

What is our destiny?”

これらを踏まえて本章のコンテンツ

1. 宇宙研究と(文化)人類学

2. 長期的スパンでの人類の社会・文化の問題

3. どのようにビレッジをつくるか?

「月(宇宙)に村(組織・共同体・社会?)を作る」際に、検討するための分析枠組みと思考チャート

4. 地上の人類社会・文化の多様性と可能性

5. おわりに

1. 宇宙研究と(文化)人類学

↑

文化人類学者と宇宙

文化人類学: 人類の社会・文化に関する経験科学、実証主義的アプローチ

「想像(想像)の対象」とする「宇宙と人類の未来」について現実の社会文化的状況の具体例から検討する。

(1) 人類文化の多様性に関する民族誌的資料の活用

(2) 「異文化というレンズ」→自文化の対象化、客体化という人類学的手法、

→宇宙というレンズを通して現在を対象化し、未来を構想する。準拠枠としての「近代」「近代性」の相対化

文化人類学の一般的イメージ

非西欧社会を中心に「未開社会」「前近代社会」(発展途上国)を研究対象とし、フィールドワーク(現地での長期住み込み参与観察)によって、個別の文化の様態を明らかにする分野

なぜ、人類学者が宇宙なのか?

→人類学の問い: 個別の文化理解、人類文化の理解(人類とは何か?)

フィールドと理論との往還: 「経験科学」帰納的アプローチ
cf. 伊勢田・神崎・具羽『宇宙倫理学』昭和堂2018年

文化人類学における宇宙研究 (先行するUSA, Europeの宇宙研究)

- Olson, V. A. (2010). "American extreme: An ethnography of astronautical visions and ecologies." PhD diss.

In referring to space as an "extreme environment," interlocutors were not only signaling its categorical status as a limit-case, but also the extent to which "the extreme" is regarded as a vital site (a place or condition) in which essential truths and proofs emerge. (Olson 2010: 7)

- "Extreme: Humans at Home in the Cosmos"

(Anthropological Quarterly, 2012, Vol.85, No.4.)

宇宙飛行士のフィールドノート分析／科学人類学研究のフィールドワーク／地球外移住希望者、等。

- Michael P. Oman-Reagan, *Unfolding the Space Between Stars: Anthropology of the Interstellar*

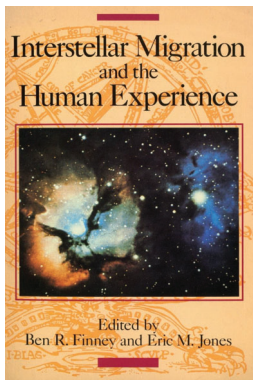
- Setha 2003 M. Low *The Anthropology of Space and Place* (Wiley Blackwell Readers in Anthropology), Wiley-Blackwell
- Pauline McKenzie Aucoin 2020 *Toward an Anthropological Understanding of Space and Place*, Concordia University(博士論文)・・・

- その他、宇宙関連施設と現地社会の関係、宇宙環境における社会・文化の問題(例:多文化状況など)、テーマは多様化。
- Cf.宇宙空間における「小社会」の成立:ガバナンスの問題、新しい価値の創造(木下2009:6-10)

→宇宙法学、宇宙政治学、(宇宙)心理学、宇宙社会学、宇宙考古学、宇宙芸術など、宇宙をフィールドに据えた研究は2000年代以降活発化
→多様な人文社会系分野の取り組み:19世紀末の状況:Anthropologie「人間学」の議論と類似(近代社会、科学技術との対話:人間とは何か)

06/24/10

Ben R. Finney: NASA projectへの参画



- James T. Struck Some Anthropology of Humans in Space. Can Human Stability Provide Some Support for Non-Evolutionary or Religious Concepts? Are we able to Speak of a Homo-Astronomicus or a Human Group Involved in Space Travel? What Happens to Humans in Space? (ID-0135) NASA
- 宇宙における人間の人類学。人間が(宇宙で)安定することは、「非進化」、「宗教」といった概念をある程度サポートできるのだろうか？宇宙旅行に携わるホモ・アストロノミクス(宇宙人類)や人間の集団について語る事はできるのだろうか？宇宙で人間に何が起こるのか？

<https://solarsystem.nasa.gov/studies/2/some-anthropology-of-humans-in-space-can-human-stability-provide-some-support-for-non-evolutionary-o>

(cf. 心理学) Suedfeld et al. (2010) 'Changes in the hierarchy of value references associated with flying in space,' *Journal of Personality*: 78(5).

06/24/10

ハンナ・アレント 人間の条件

「近代の入り口には三つの大きな出来事が並んでおり、それが近代の正確を決定している。すなわち、第一にアメリカの発見とそれに続く地球全体の探検、第二に宗教改革、第三に、望遠鏡の発明と地球の自然を宇宙の観点から考える新しい科学の発展」



「地球に縛り付けられている人間がようやく地球から脱出する第一歩」というこの発言が陳腐だからといって、それがそんなに異常なものかを見逃してはならない」

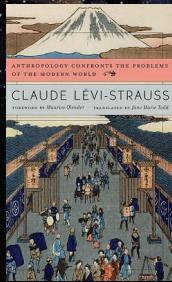
<http://www.natsume-books.com/natsumeblog/wp-content/uploads/2013/06/Hannah-Arendt.jpg>

(ハンナ・アレント 人間の条件)

機部洋明氏(京都府立大学の京大)による

レヴィ・ストロース講義

- That remoteness (to the exotic societies) reduces our perception to a few essential outlines. I would say that, in the social and human sciences as a whole, the anthropologist occupies a place comparable to that falling to the astronomer in the physical and natural sciences... the distance of the heavenly bodies allowed for a simplified view of them (Lévi-Strauss 2013, pp18-19)



レヴィ・ストロース講義 平凡社

磯部洋明氏(京都市立大学)の示唆による

未来学:宇宙と人類の多様性、技術と社会・文化の緊張関係

- 創造に満ちた偉大な時代とは、遠く離れたパートナーと刺激を与え合える程度に情報交換ができ、しかもその頻度と速度は、集団・個人間に不可欠の壁を小さくしすぎて交換が容易になり、画一化が進み多様性が見失われる程度に留まっていた時代

レヴィ・ストロース講義



今西錦司『民族文化などは、人間が意識的につくりあげようとしてできたものではなくて、自然にそうやってきたものでしょう。こういう文化と、**サピエンス**として人間が意識的に努力して作り出した文化とは、はっきり分ける必要がある』

梅棹忠夫『目的発想は自然的所与とちがってかなり自由度が高い。洋々たる可能性をはらんでいるとともに、一面**大変恐ろしいところ**がある』

磯部洋明氏(京都市立大学)の示唆による

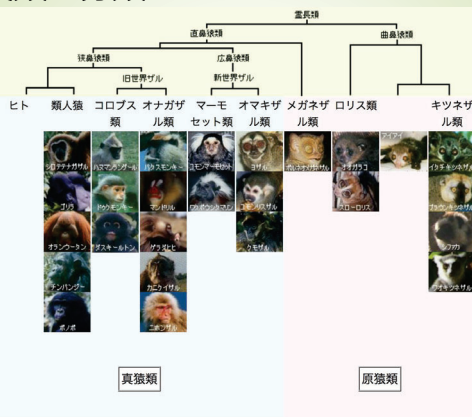
2. 長期的スパンでの人類の社会・文化の問題

霊長類の進化



- 霊長類様哺乳類の出現
- 白亜紀末期 (6500万年前)
- プレシアダピス類
- 始新世末に絶滅
- 現代型霊長類の出現
- 始新世末 (3500万年前)
- 北米からヨーロッパ

霊長類の分類



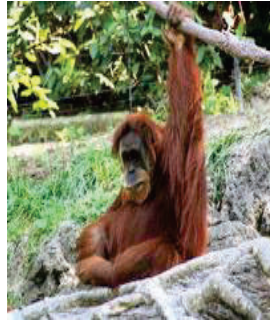
動物社会の母系 (ニホンザル)

- 文化人類学の母系とは少し異なる
- オスは青年期 (生殖年齢に達する前) になると群れから出て、他の群れに加わる
- インセスト (近親相姦) 回避のため
- 群れの中核をなすのはメス
- (参考: ハーレム: メスの間にだけ血縁関係がある繁殖期に、一頭のオスが多数のメスと繁殖を目的としてつくる一時的な群れのこと。本来は、アラビア語でイスラム社会における女性の居室を意味する。)



オランウータン科

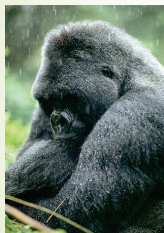
- オランウータン属
 - スマトラオランウータン (Pongo abelii)
 - ボルネオオランウータン (Pongo pygmaeus)
- ほぼ完全な樹上生活者
- 単独性が強い
- ただし、完全な単独性ではない
 - 3〜7頭が同時に同じ木で採食
 - 連れだって移動
 - 緩やかなつながりをもつ社会を形成



ヒト科

- チンパンジー亜科
 - ゴリラ属
 - ゴリラ
 - チンパンジー属
 - チンパンジー
 - ビグミーチンパンジー (ボノボ)
- ヒト亜科

ゴリラ



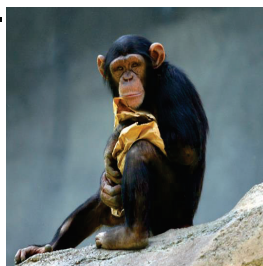
体長 1.2-1.8m
 体重 135-220kg

ゴリラ社会

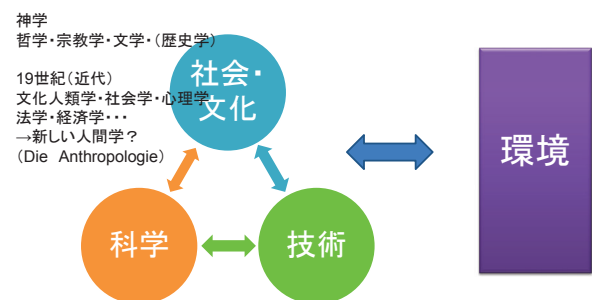
- 繊維性食物を中心とした雑食で、温和で繊細な動物
- 1頭のオスと複数のメスや子供たちから成る10頭前後の集団
- オスもメスも思春期に達すると生まれ育った集団を離れる
- メスだけが他の集団へ加入
- オスは顔見知りのメスを連れ出すか、単独生活をした後、他集団からメスを誘い出して自分の集団をつくる
- オスもメスも一生の間にさまざまな仲間と社会生活を組み替えていく
- ゴリラの集団はなわばりをもたず、多くの集団と多様な関係をもって暮らす

チンパンジー

- 主な食性は植物食
 - 主に果実食
 - 葉・種子・樹皮・堅果・根等
- 肉食もおこなう
 - 集団で狩猟をおこなう
 - 肉の分配をおこなう
- 20〜100頭程度の複雑な社会集団を形成
- メスは一般的に出産可能な年齢になると、生まれ育った集団を離れ、他の集団に移り、そこで子供を産む
- オスは出自群に留まり、大人のオス同士の強固な連帯を形成することで集団を維持する複雑な父系集団



文化人類学と技術・科学



06/24/10

二つの文化の区別

自然人類学、文化人類学でいう「文化」は一般的に使われている「文化」とは異なる広辞苑の説明では、

①文徳で民を教化すること。②世の中が開けて生活が便利になること。文明開化。③(culture)人間が自然に手を加えて形成してきた物心両面の成果。衣食住をはじめ科学・技術・学問・芸術・道徳・宗教・政治など生活形成の様式と内容とを含む。文明とほぼ同義に用いられることが多いが、西洋では人間の精神的な生活にかかわるものを文化と呼び、技術的発展のニュアンスが強い文明と区別する。→自然。

であり、一般的文化は①と②、文化人類学はやや③に近いが、より広く人類の精神的・知的な活動に関わり、人類の特徴の一つ。

2種類の文化

(1) 大文字の「文化」: CULTURE: 人類全体の特徴としての「文化」

(2) 小文字の「文化」: culture: 環境や歴史的過程で個別社会に生み出されたローカルな文化

自然人類学は(1)、文化人類学は(2)を通して(1)を考察しようという分野

人類社会の「転換期」

▶ 一般には、21世紀の宇宙への進出は、「大航海時代」に例えられる。

▶ しかし、人類史的に環境と社会・文化との関係で3つの大きな転換点がある

(1) 旧人類の「出アフリカ」(Great Journey)

→ 人類の特徴: Homo mobilitas, 社会・文化の多様性

(2) 農業革命

定住コミュニティ(共同体)、都市、国家の形成、環境への主体的関与

(3) 産業革命(「社会」の登場。近代化→グローバルゼーション)

環境への抜本的関与、文化社会の標準化

宇宙時代のコスモポリタンは近代・グローバル化の延長にあるのか?

新人: 完成されたホモ・サピエンス

- ・ 3万年前から後の人類が新人
- ・ 世界中の多くの地域で化石が出土しているが、それらの形態特徴は現代人そのもの
- ・ 出土した化石はその地方の現代人とほぼ変わらない
- ・ 人口は、地球上の全グループを合計しても1000万人程度
- ・ 様々な集団の移動、拡散、接触が繰り返され、人類の分布域が拡大
- ・ 特筆すべきは、モンゴロイドによるシベリア、南北アメリカ、太平洋の島嶼部への拡散
- ・ 人類の分布しないところは、南極と高地だけとなる。

→ 文化による適応で拡大・増加してきた人類が宇宙に進出すると何が起きるか?

人類とは何か? 様々な人間観一

- ・ 人間の学名である「ホモ・サピエンス」Homo sapiensとは、ラテン語で「賢い人間」
- ・ 人間の様々な特徴から
 - ・ ホモ・ファバーHomo faber. 人間の本質は物をつくりおのれを形成する創造活動であるとして「作る人」(フランスの哲学者H. ベルクソン)
 - ・ ホモ・ルーデンスHomo ludens 人間のさまざまな活動の中に遊びの精神がいかに深く根付いているので「遊ぶ人間」(オランダの歴史学者ホイジンガ)

ホモ・モビリティスHomo mobilitas.

- ・ 人間ほど広い地域を動き回るものはいないので「動く人間」
- ・ 人類の歴史を見れば、アフリカに局在する熱帯動物から、南極と高地を除いた全地域で活動する動物へ進化
- ・ 二つの大きな拡散現象
 - ・ Out of Africa 100万年前のころアフリカから広くユーラシアに分布を広げた
 - ・ Out of Asia 7万年前の最終氷期に、東アジアからオーストラリア、ニューギニア、そして極北地方から南北アメリカ、最終段階で太平洋の島嶼に拡散

アジアからアメリカへ

- ・ アメリカ先住民の祖先はモンゴロイド
- ・ シベリアの最果てから、アメリカの西端であるアラスカを経由する陸上ルートで移動
- ・ ウェイスンシン氷期(7万5000年前~1万4000年前) 海退現象のため海面が低下し、ベーリング海峡はアジアからアメリカに広がる大平原ベーリングシア(ベーリング平原)
- ・ ベーリングシアは、マンモス、バイソン、トナカイ、ウマなどの大型哺乳類が豊富に生息する草原
- ・ 最初のアメリカ人は大型哺乳類を生活の糧とする「マンモス・ハンター」で、動物を求めてベーリングシアに移動と推定
- ・ 1万2000年前頃メキシコまで北米一帯に分布

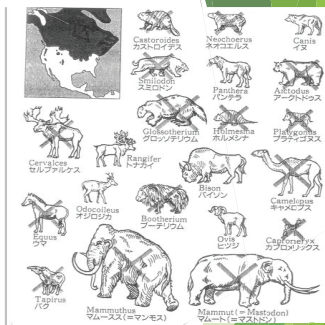
バタゴニア行きの超特急

- ・ 1万1000年~1万年前の遺跡がグアテマラからエクアドル、チリ、アルゼンチンの各地に点在
- ・ 南アメリカ最南端のバタゴニア地方のフエゴ島で1万5000年前の遺跡
- ・ モンゴロイドのグループは1000~1500年で南北アメリカ大陸を縦断して拡散



最初の自然破壊

- ▶ アメリカ大陸の大型哺乳類が、最初のモンゴロイドの拡散と同時期に大量に絶滅
 - ▶ この時期は激しい気候変動
 - ▶ 絶滅が気候要因か、人為的なものかは断定できない
 - ▶ ただ、当時の遺跡からはマンモスなどの絶滅種の遺骸が大量に発見される
 - ▶ 最初のアメリカ人の狩猟圧は、大型哺乳類の絶滅の一つの要因となったのは間違いない。
- Cf. 宇宙への進出は、宇宙の破壊をもたらす？（フリーマン・ダイソン）



Great Journeyがもたらした多様な社会と文化

環境に応じた文化的適応と多様な文化の派生
コミュニケーション能力の発達とコミュニケーションの多様化

一方で、農業革命以前は、小規模で誘導的な集団

第2の転換点

→ 農業革命以後の社会の多様化、複雑化、
→ 定住コミュニティ（共同体）の明確な形成と大規模化

第3の転換点：産業革命

- ▶ 環境への意識的介入・改編
- ▶ 生活様式の標準化と「再現」
- ▶ 「社会」の発明

近代的社会概念の創出

（17世紀中葉：近代化の急速な進展：科学技術のブレイクスルー、同時に戦争と革命の「機器の時代」）

→ 「新しい社会」の概念：ホッブズ・ロック、スピノザ、ルソー

ホッブズ、ロック：人間がその中に生まれる所としての社会→人間がある種の必然性によって形成する「一制度」、国家および社会は人間が意図的に形成する行為

近代的社会

考察の出発点は、事由で平等な個人、固有の権利としての自然権を有する個人の前提

社会の参照枠は、常に国家、社会は国家と同じ広がりを持つ存在として規定

「発明された社会」の「発見」18世紀

社会が国家や政府とは明確に区別される厚みを持つ空間。それを治め、秩序と平穏をもたらすことが重要なある種の具体的な「空間」として認識→社会概念の実体化

経済社会の実態化と発展、公共圏の拡充→市民社会の形成

二つの社会のベクトル：国家による管理と調整の対象としての社会（フーコー「統治性」）と、

国民各自が個人的な利益を追求、共同で善を実現する「共有の空間」としての社会

人類の社会・文化をめぐる「展開」から見た「Moon village」の問題点

▶ 錯綜する議論と多様な方向性の可能性

▶ Villageをどのようなレベルでとらえるのか

- (1) 集団（家族、群れ）
- (2) 共同体
- (3) 組織もしくはアソシエーション（下位会集団）
- (4) 社会（近代の社会概念）
- (5) ポスト近代社会（新しい社会の創造）

2. どのようにVillageをつくるか

「月（宇宙）村（組織・共同体・社会？）を作る際に検討する分析枠組み思考チャート

現段階の条件設定 (Moon village Project)

月面上に、1000名の「村」を建設する(仮定)。

→ 居住環境だけでなく、いかなるcommunity(社会)を設計し、そこでの「文化」を構想するか。

文化をめぐる二つの次元の区分

「CULTURE」: 大文字の文化(人類文化)

→ 生物学的適応を含む総合的、長期的適応の形式としての文化

「Culture」: 小文字の文化(localな文化)

ここでの「文化」とは、いわゆる芸術などの「High culture」ではなく、言語・非言語コミュニケーション、生活習慣、無意識の身体動作、価値観、行動規範など、人間を他の生物と分ち、社会を形成・存続するための、環境に対する独特の適応形式

→ 当面の環境に適応するための地域的、短期的適応としての文化

留保する条件

Human-machine interfaceの変化
あるいは
身体的変化、遺伝子的変化を含む生物学的適応
ロボット技術やサイボーグ技術や社会・文化の
枠組みを変えるような状況については、別の
思考実験とし、今回は取り扱わない。
いわゆるポストヒューマンの問題。

理念／実態

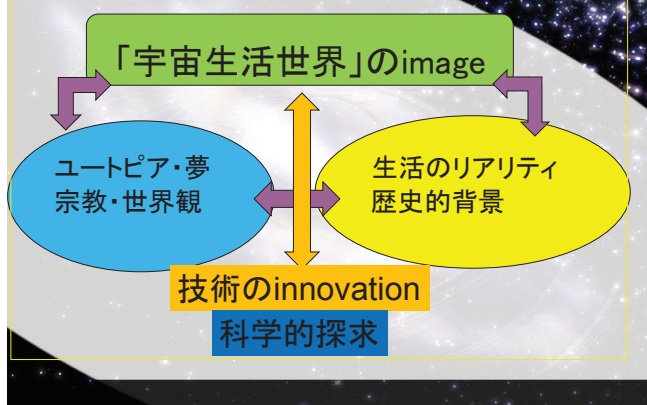
理念: イデオロギー、宗教、ユートピアからの「かくありたい」というイメージ→規範、ノルム、

↑
制度、法、文化的装置

技術(社会的も含む)

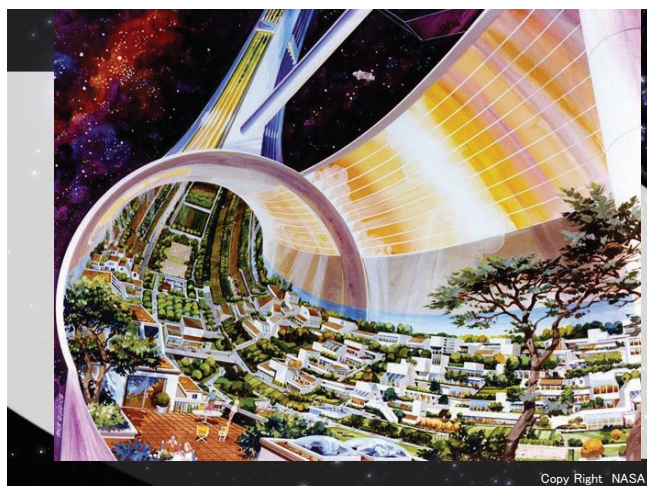
↓
実態: 現実の状況、環境でとらざるを得ない **実態**

宇宙という生活世界についてのイメージ



課題

- A. 地球上の生活を宇宙空間(具体的には月、火星)に再現しようとする、
1. 解決しなくてはならない技術的問題は何か?
 2. もし解決できない場合、どのような変化が起こりうるか?
- B. 地球上とはまったく異なるcommunityを宇宙空間に「創造」することは可能か?



Communityのイメージ

- ・地上の生活空間をそのまま移植し、再現版、ミニチュア版を月面上に再現するのか?
 - ・地上のローカルコミュニティの在り方をそのまま再現するのか (communityの多様性。日本社会におけるcommunityのイメージ?) の後
- 現実／理想・ユートピア・モデル
- cf. 宇宙船「地球号」のイメージの相違
- Cf. 東日本大震災の「復興」とポストコロナ、人新世
- SDG'sの問題

人類学的視点と時間軸

コミュニティ単位での社会・文化適応、発展を想定

(家族形態はコミュニティ(社会)との相互関係で形成される)

短期:コミュニティの再現

地上の機能的(目的的)組織・システムの再現

Human machine interfaceの組み込み

宇宙空間の環境操作

中期:コミュニティの構造化(システム化)

宇宙コミュニティにおける独自社会・文化形態

地上の多様な社会・文化の適用

長期:形質人類学(自然人類学)的变化

環境に適応した身体的変化と多様性の発生

→多様性を組み込んだ社会・文化への改編

→人類進化(Neo Homo sapiens)

前提となる検討条件

1. 1000名の「村」について1. その規模を維持しつづけるか
→プロトタイプとなるコミュニティの形成、これを基盤とした拡大
2. 規模だけでなく、拡大・発展を前提とするか
→拡大・発展を前提とする。
3. 当初設定から拡大・発展の条件を含むか
当初計画から拡大・発展の条件を含みつつ、段階的に拡充。

コミュニティ形成のプロセスとプロセスと最終目標 (1)

0. Action group:コミュニティのインフラ形成作業グループ
1. Action group:(単一の機能的・職能group)小グループの居住
(一時→継続的)
2. Action group→community:複数の機能が異なる小グループ
の併存(サポート、生活空間化)
世代を超えた継続への展開
3. Community:分化したsectionを備えた複雑な生活共同体(世代・
家族をない方)の形成、village(1,000名)
生活世界の形成と生活基盤の移動。
* 1000名規模は、地上での中規模の村レベル

発展Processと最終目標

1. (単一の機能的・職能group)小グループ:観光、資源開発、研究開発
2. 複数の小グループの併存(サポート、生活空間化)
3. 分化したsectionを備えた複雑なcommunity(世代・家族)の形成
village(1,000名) 生活世界の形成
* 1000名規模は、地上での中規模の村レベル
4. Town(10,000名)
火星や小惑星、アステロイド開発の基地化、ターミナル化
5. City level(100,000名)
地球から太陽系開発のHUB化
(環境の安定性から、やがては火星にHUBが移動?→外宇宙??)

生活空間としての完結性の設定

生活空間として完結することを目指す。

あるいは、完結性の程度や種類

生業の場/生活の場(衣食住、労働と余暇)

完結性の内容・条件

生活空間としての完結性

生活空間として完結することを目指す。

あるいは、完結性の程度や種類

生業の場/生活の場

Ex. 観光地、ニュータウン、自給自足

→こんなところにポツンと一軒家は家屋の所在地の在り
方にすぎない。完全に社会から孤立した一軒家は存在
する?

経済、社会、政治の自律性、

下位文化の形成

心理的「自律性」:アイデンティティの形成

Communityの性格

非自立性(非自律性)か、自立性(自律性)か
→政治的な単位としてではなく、経済的、社会的な自律性(自立性)とその程度

→これによって文化的自律性が大きく変わる。

バリエーション、理念

仮定を置いて整理する。

人類の知的能力の限界(脱地球化)を探る
地球との関係性(下位社会か、独立社会か)

居住形態変化のprocess

1. 一時的な居住(短期一時滞在)

2. 世代を超えない、交代居住(中期)
家族帯同?

3. 世代を超える長期居住

・生殖、家族の形成

・1世代20年を前提とした世代交代と
communityの連続性

「設計主義」か「ゆらぎ」か

近代建築・都市計画のモダニズム(設計主義)

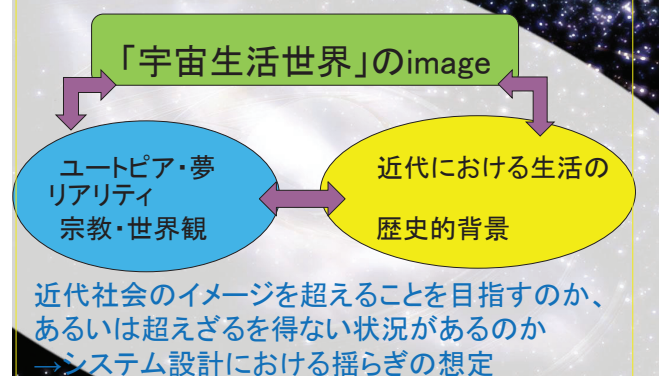
目的的功能集団(action group)・組織(corporate group, organization)から、
「コミュニティ」「社会」への展開には何が必要か

Cf.communityの生物学的アナロジー(類比)

19(20世紀)的有機生命体論から、20(21世紀)的生命システム論へ

「設計外」に対応できる「余白」の設計

宇宙という生活世界についてのイメージ



環境への関与 環境適合／環境改編

近代以前:

環境に適応する形でcommunityの在り方、それに対応した技術発展

近代以後

環境自体を改編、設計する思想。環境に作用し、改編する「技術」革新

→月環境の改編(テラフォーミングは困難だが、クレーターなどを利用した大規模な人工的環境形成)

帰納的(経験的)アプローチか、 演繹的アプローチか

実際のデータから組み立てる帰納的アプローチは現実的であるが、状況対応的であり、時として技術のインボリューション(退化)とガラパゴス化を招く可能性

技術的イノベーションや社会・文化の大規模な変化は、演繹的アプローチが出发点となる。

4. 地上の人類社会・文化の多様性と可能性

・あらたな文化相対主義の挑戦



近代社会(現代日本社会)を月(宇宙)に再現しようとすると、どのような問題が起きるか？

コミュニティレベルだけでなく、家族関係、社会関係においても、現代日本社会の「イメージ、理念」の再現は可能か？

→歴史的な地上のフロンティアに発生する多様性、多様性に対する受容(寛容)の問題



ヘヤー・インディアンの社会では、親は親、子は子という意識が強い。親子の繋がりは希薄で、「生まれた子を育てなければならない」という考えは強くない。夫婦の関係も同様に希薄である。

そのため、妻が夫以外の男と子どもを作り、生まれた子をためらく養子に出すということがよくあり、とがめられない。

なお、子どもがいると和む、という価値観があるため子どもは不可欠である。そのため、自分の子どもが大きくなると他に養子を取ったりする。

養子は生みの親をしっかりと認識している。このことは①近親相姦のタブー②子どもが生まれたら生みの親やきょうだいに知らせる義務があること③死者を埋めた人とその父母、きょうだい、配偶者は話してはならないということ、の3つの決まりから明白である。

ちなみに、養子ではなくとも家出は頻繁に見られる。ヘヤー・インディアンの価値観の根本には、人は守護霊との付き合いで生きている、というものがあるので、相互に強くは干渉しないので、これをとがめることはない。

ヘヤー・インディアンは移動民族であるが、大人たちの人間関係が嫌になると衝突が起こる前にあつて移動をする。その際、子どもたちの友人関係などは無視される。子どもは友達と離れたショックを受けるが、大人たちは外に連れ出すなどして癒す。

06/24/10

アラスカ ヘアーインディアン



北アサバスカン文化圏に属する諸部族の中で、彼らほどウサギに依存しているものはないようだ。ムースやカリブなどの大型獣がまわりの部族におけるほど豊富でないからである。しかも、このウサギの数が周期的に変動し、その周期の谷間の年には餓死者も出るという過酷な自然環境。

食料源の貧困ゆえに約9万平方キロ(日本の本州の四分の一弱)の地域に300ないし500人の人口を維持するのが限界。しかも乏しい食料を求めて、少グループに分かれて分散してキャンプし、常にテントの移動を余儀なくさせられる。そして、身軽に移動する要請から、ものを持たぬ生活に徹している。気温は、1月、2月がもっとも低く、氷点下40度から45度というのは普通で、ときには氷点下50度になる。そして、北西風によるブリザードのため外出不能となり、終日テントの中で過ごさねばならぬ日々も稀ではない。食料獲得のためのエネルギー効率ならびに餓死者や老人遺棄の発生頻度といった基準に基づけば、ヘアー・インディアンは、世界でもっとも過酷な生活、ないしは、極限の生活をしている民族。

原ひろ子 1989 『ヘアーインディアンとその世界』 平凡社

06/24/10

近代社会の想像力を超えて

- ・数万年を経て多様化した人類社会・文化の「財産」(人類学の民族資料Ethnographic data)の蓄積(消滅の危機にある言語、社会、文化の遺産)

- ・人類学、歴史学、民俗学的知



- ・地上の「近代社会」の再現を超えた宇宙での生活への想像力の基盤

06/24/10

歴史的に人類の重要な食料源であった 昆虫食→宇宙食



06/24/10

HRAF fileの応用

- Human Relation Area Files
- OCM(Outline of Cultural Material : 文化項目分類) と OWC (Outline of World Culture : 地域・民族分類)
- イェール大学が編集した人類学の資料。1949年開始。1976年第1版
- <https://hraf.yale.edu/>
- https://www.istage.ist.go.jp/article/jka/58/2/58_KJ000048417671.pdf

長期的アプローチ:宇宙環境居住

宇宙移住が人類にもたらす変化・進化の問題、人類の多様性
「拡張する人間の精神」(仮説)

認知人類学の成果:

人類の認知過程が個々の身体に閉じ込められているのではなく、道具や協力する人々、改変された環境を巻き込む人間／非人間のハイブリッドなネットワークとして成立

→多様な環境への適応を可能にする(ラトゥール1999, 2008)

→短期的にはhuman-machine interfaceの問題

→人類進化の上で重要な役割(認知技能の発達)

→人類の宇宙進出もこの延長上

cf. 「状況認知」(Lave2011)、「分散認知」(Huchins1996)「拡張した心」(Clerk1997)
大村敏一2014「未来の二つの顔—宇宙がもたらす生物・社会・文化多様性への扉」
岡田 ibid.14

累進的な文化進化を可能にした人類の創造能力

ベイトソンの学習進化モデルにおける人類の能力

「心の理論」(同種他個体に対し同様に意図や精神生を持っている者として理解する能力)(トマセロ2006)

(1)「模倣学習」,「教示による学習」,「共同作業による学習」能力

(2)文化(認知技能の様式)学習と創造

→文化の客体化:既存の世界理解、技能を意識化

→「習慣のくびきからの解放」:文化を操作、付加、変更

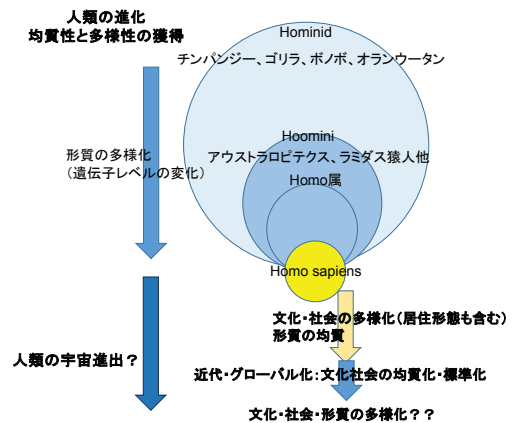
精神の拡張:

グローバル回路と脱着可能な複数の拡張回路

人類の文化進化の過程

人類全体の精神の拡張過程(さまざまなネットワークに接続可能)、グローバル化はその一つの帰結

環境条件に合わせた脱着可能なオプションとしての多様な回路(文化)



宇宙空間への進出(居住)と人類文化の多様化

- 新しい環境に適応した「精神の拡張」
- 身体自体の環境への変化の可能性(Massali, et al.)

↓

これまでのような社会・文化の多様性だけでなく、生物学的な多様性と、社会・文化の多様性が相乗的に複合した生物=社会・文化的な多様性への展開

自己(自者)と他者との差異、境界線の見直し

宇宙環境居住が長期的にもたらす 社会・文化の「二つの顔」

- 「多様な環境に局所的に適応していくことで生じる多様性という顔」
- 「多様性を超えて交通していく顔」

cf.(グローバル化の「二つの顔」との類似

5. あとがき・・・リファレンスモデル議論の取り敢えずの総括

月に社会を作るという命題に対して本報告書第3章のイントロダクションで議論の論点を提示したように、今後考えるべきさまざまな課題を抽出するため、ある種のリファレンス(参照例または叩き台)を与えるためのモデルについて考えた。第3-3項で述べたような、月に作ることを想定する社会の規模感や考える範囲についての条件などを仮に設定した出発点として、アーキテクチャ、ビジネス、制度、ライフサイエンス、および文化人類学的課題について、ワーキンググループ(分科会)を構成し、各グループでの議論や検討の状況や結果について述べた。各分科会で活動されたメンバーのリストは巻末に示した。

各分科会での議論は、各テーマ相互間の情報横通しやレベリングなどの意思疎通を図りつつの議論ではあったが、各ワーキンググループの自発的かつ自由な発想に基づいて議論することを優先し、相互のテーマ間での整合性や統一した条件での議論を強制することは敢えてしなかった。このため各テーマの議論や前提条件などはそれぞれで、やや独立したものとなっている部分も多い。それは、しかしながら、各分野の課題について制約なく考え、抽出するという意味では適切なことではあっただろう。

また、このリファレンスモデルの議論では、月の探査や開拓の文脈で、例えば「二千何十年代にはこういうことができているだろう」というような、ある種の未来予測的な検討をすることも敢えてしなかった。月で行われる多様な人類の活動という営みの動機や必要性や目標設定、および、実行可能性などについて議論する時、「こういうことをやりたければ、こういうことが課題として抽出されるだろう」、あるいは、「こういうことを克服すれば、こういう世界が作れるのではないか」などと提示することが良いだろうとの考えに基づく。すなわち、人類の宇宙進出や月での社会構築を実行可能なものにするために、考えるべき本質的なことは、こういうことではないか?というような提案や論点の提示をすることが、本報告書のような形で未来のことについて考える時に必要かつ本質的なことのだろうとの考えに基づく。

当然のことながら、月に社会を作るという営みは、これまでの宇宙開発のようなミッションを定義した上でシステムエンジニアリングの手法でプロジェクトを実行するなどという実施方法やスキームの延長上にあるのではなく、それらを超えて、人類の宇宙活動の新たな展開というスコープで考えるべきなのだろう。そのためには、宇宙プロジェクト立案と実行の場面で用いられる、いわゆるシステムエンジニアリングの手法でいうところの狭い意味の「ミッション定義」から始まるようなことではなく、より広い思考空間と時間スケールおよび多様な制約条件の中での新たな方法論の構築が求められるものであるだろう。また、持続的かつ未来にむけて開かれた形での発展的な、あるいは、村や都市や国の建設などといったことを前に進めるためには、段階的なゴール設定は必要なことではあろうが、ミッション定義に始まり最終的なプロジェクトゴール

設定をリジッドに定義して行うという始まりと終わりを定義して途中を規定するというような、いわゆる宇宙プロジェクトの実行方法やマネジメント方法とは本質的に異なった、重層的かつ時間発展的なものとして考えるべきだろう。

考えるべきことは、空間的、時間的な広がり\$scopeのみならず、人類の宇宙進出の動機や理論的裏付け、経済活動、および、エネルギー問題や人口問題、環境問題などなど地球の上でこれから起きるであろう、さまざまな人類的な課題から、さらには、究極的には人類のサバイバルまでを含む、極めて広範囲の動機に基づいて考えるという態度が本質的に重要であろう。当然のことながら技術的に克服すべき課題は極めて多岐にわたるのであるが、その広がりや困難さを超えて、長い時間の人類の未来をいかに考えるかという、技術論にとどまらない多くの命題への取り組みが重要で、むしろ技術論よりも技術以外の側面の諸課題をあぶり出していくことが、より本質的なことであることを実感させる。

これらの経過と状況認識の上で本報告では、アーキテクチャの議論では、そのリファレンスとして設定した規模感の人類の生存と活動を仮定し、これを支えるインフラと技術的課題の抽出、および、いわゆる **ISRU** (現地での資源調達と活用) の概念を実行するための仕掛けと規模感に根拠を与えるような検討を行なった。

ビジネス分科会では、序論で述べたような経済活動、あるいは、月の上で価値を生み出す活動について、月面資源の利用ビジネスと観光ビジネスの二つを具体例として取り上げ、これらについて議論し定量化を試みた。アーキテクチャおよびビジネスの考察の両方においては、地球-月間や月軌道と月面上の間の「輸送の進化」ということが重要なファクターであることが指摘された。

社会科学分科会では、社会の運営や制度面などの考察を行い、社会構築の段階的発展を意識し、各発展段階でどのような社会の状況が想定され、これを運営するための規範から税制、管轄権のルールなどについて議論がなされた。

ライフサイエンスの分科会では、月面や宇宙空間という地球と異なる環境の中で医療も含めた生命体としての人間の活動を如何に持続的におこない、単なるスポット的な有人宇宙活動という視点を超えて、これらの人々が世代を継ぎ、地球と同じ環境を作ること重要であるがこれに拘泥せず、環境に適合したり、進化するということまでのスコープで課題抽出を行なった。

最後の人文科学の分科会では、人類の進化のこれまでとこれからという時間スケールの中で、宇宙への進出とその第一歩としての月での社会構築という文脈で地球から離れた人間の集団というものをどのような規範や動機や相互依存の関係で社会という集団を作っていくので

あるか、技術論的・経済的のみならず人類学的な観点での慣習や文化や文明などという文脈で概観した。

どの議論も本来的に結論を導くとか議論が完結するなどという状況を作ることは困難であって、これを目指すこともせず、ある種の議論途上の考察を述べてあることも多いが、内容の性格からやむを得ないこととご理解いただきたい。

現在行われている月の探査や有人宇宙活動からの発展という意味では、この勉強会でのリファレンスモデルを描像してみるという活動が始まったと同時に、国内外において多くの月を巡る議論や検討やミッション計画などが始められた。民間やアカデミアの主導、および、国内においては国や JAXA の月探査の今後に向けた検討および国際共同のプログラムの進展などによって加速され、さらには民間企業の独自活動として一定のプロジェクト的活動が始まるなど、質や量ともに本勉強会のサロンの自由空間での議論を超えた議論や解析やシステムの描像などの活動が本格的に始められた。本報告書をもって、本勉強会のリファレンスモデルの議論は一段落という形をとるが、このスタディ以外に多くの活動が精力的、大規模かつ本格的に行われる状況のもとでは、本勉強会の活動の守備範囲やフォーカルポイントも、それらの多様な活動との補完関係や、この勉強会の活動としてふさわしいものに視点を移していくことを考えるべきだろう。今後の議論の方向性について、関係のみなさんのご意見もお伺いしたいところである。

ポスト ISS の地球周回軌道上における有人宇宙活動やその商業化、アルテミス計画その他の国際協働の月探査から火星に向けた有人活動の展開に向けた計画、または、日本独自の月や月以遠の探査や人類の宇宙進出に向けた具体的な計画が動く時、それらを実行するための動機や資金投入のインセンティブを与えるためにも、そもそも何のためにこのような大きな事業を行なっていくのであるかについて説明が必要な場面もあるだろう。一方で、宇宙への投資が無条件に行われることは、その規模が大きくなるにつれて困難になるだろう。

ここで議論した社会構築のためのリファレンスモデルの議論を通じて見えてきたことが未来に向けた人類の宇宙活動の描像や動機づけから、具体的な月惑星への人類の進出につながることを期待して、本報告書の結びとしたい。是非とも多方面からのご批判をいただきたいところである。ここで行なった月での人類社会の構築を巡る思考実験が、今後の有人宇宙活動の未来に向けた理解の増進と次の活動を前に進めることになんらかの方向性を示すなど、役に立つ情報となるのであれば誠に幸いである。

付属1 リファレンスモデル検討ワーキンググループメンバー及び執筆者リスト
(敬称略、リーダー以外は五十音順、所属は主に活動時)

<リファレンスモデル検討ワーキンググループメンバー>

リファレンスモデル全般

稲谷芳文(月惑星に社会を作るための勉強会 代表)
稲富裕弘(月惑星に社会を作るための勉強会 世話人、JAXA/ISAS)
樋口清司(月惑星に社会を作るための勉強会 世話人)

アーキテクチャ分科会

システム、輸送、エネルギー

坂本勇樹(JAXA/ISAS、日本ロケット協会)(分科会リーダー)
岩崎祥大(Yspace/ブルートレック)
小林弘明(JAXA/ISAS、日本ロケット協会)

インフラ建設居住、都市計画

鵜山尚大(清水建設)
田崎智之(清水建設)
福島渚(清水建設)

宇宙農業、ISRU

北宅善昭(大阪公立大学)
後藤琢也(同志社大学)
桜井誠人(JAXA)

月面居住システム

岡本有生(IHI)
齋藤晃央(IA)
笹山容資(IA)
宮嶋宏行(国際医療福祉大学)
森田 健(高砂熱学経営企画部)

ビジネス分科会

内田敦(MRI、フロンティアビジネス研究会)(分科会リーダー)
朝妻太郎(ispace)
大貫美鈴(SPARX)
間宮一誠(MRI、フロンティアビジネス研究会)

社会科学分科会

北村尚弘(GHRS 法律事務所) (分科会リーダー)

大段徹次(森・濱田松本法律事務所)

小塚荘一郎(学習院大学)

税所大輔(JAXA 国際宇宙探査センター)

笹村舞実(JAXA 広報部)

ライフサイエンス・医学分科会

泉龍太郎(日本大学) (分科会リーダー)

石岡憲昭(帝京大学/JAXA)

佐野智([株]国際社会経済研究所)

高橋昭久(群馬大学)

人文科学分科会

岡田浩樹(神戸大学) (分科会リーダー)

樋口清司(月惑星に社会を作るための勉強会 世話人)

三井雅美(JAXA 国際宇宙探査センター)

<執筆者リスト>

第1章 はじめに 稲谷芳文

第2章 リファレンスモデル検討の意義 樋口清司

第3章 月に社会をつくる・・・ムーンビレッジのリファレンスモデルという思考実験 稲谷芳文

第4章 各分科会の検討結果

4-1. アーキテクチャ分科会

坂本勇樹

4-2. ビジネス分科会

内田敦、朝妻太郎、大貫美鈴、間宮一誠

4-3. 社会科学分科会

北村尚弘、大段徹次

4-4. ライフサイエンス・医学分科会

泉龍太郎、佐野智、石岡憲昭、高橋昭久

4-5. 人文科学分科会

岡田浩樹

第5章 あとがき 稲谷芳文

「月惑星に社会を作るための勉強会」報告書

2025 年 4 月 1 日発行

編集兼発行者 「月惑星に社会を作るための勉強会」世話人会

世話人代表 稲谷 芳文

<https://www.jasma.info/moonvillagestudy/>

moonvillagestudy@jasma.info