

## ＜論壇＞

# 月面基地における医療インフラストラクチャの設計と実装 —Artemis 計画を背景とした 1000 人規模コミュニティの体制構築— Design and Implementation of Medical Infrastructure at Lunar Bases —Establishing Systems for a 1,000-Person Community in the Context of the Artemis Program—

瀧澤玲央<sup>\*†</sup>

Reo Takizawa

## I. 序論 — Artemis 計画と宇宙医療の重要性

21 世紀の宇宙開発は、政府主導の探査から民間の技術革新を取り込んだ商業化へと確実に移行している。NASA は Artemis 計画の下、次の有人月周回飛行である Artemis II を 2026 年に実施する方針を示し、その後の月面着陸ミッションである Artemis III を 2027 年に予定している<sup>1)</sup>。これは半世紀ぶりの有人月探査再開に向けた重要な節目であり、国際協調と民間企業参加を含む持続的ロードマップの中核を担っている。

こうした政府計画の進展に並行して、SpaceX や Blue Origin をはじめとする民間宇宙企業は再使用型ロケットを実用化し、打ち上げコストの削減と安全性の向上を実現しつつある。米国連邦航空局 (FAA) は商業打ち上げや再突入活動を監督する制度を整備し、商業宇宙輸送の安全と効率の確保を推進している<sup>2)</sup>。その結果、長期的な宇宙ミッションの経済性と柔軟性は確実に高まりつつある。

Artemis 計画は単なる往復探査ではなく、持続的な月面活動の確立を目的としている。NASA は「Artemis Base Camp」構想に基づき、居住モジュールや与圧ローバなどを段階的に配備し、最長約 2 か月の表面滞在を可能とするシナリオを描いている<sup>3,4)</sup>。これにより、月面南極域を中心とした長期的プレゼンスの実現が現実味を帯びている。

しかし、このような長期居住を可能とするには宇宙医療の確立が不可欠である。低重力環境は人体の恒常性に深刻な影響を及ぼし、体重支持骨の骨密度は無重力下で 1 か月あたり約 1～1.5% 低下することが報告されている<sup>5,6)</sup>。筋萎縮も併発し、運動機能の低下は長期ミッション遂行能力に直結するリスクとなる。さらに、月面は地球の大気や磁場による防護がないため宇宙放射線被曝のリスクが増大し、発がん、循環器疾患、中枢神経系への影響が懸念されている<sup>7)</sup>。加えて、鋭利で反応性の高い月塵は呼吸器や眼、皮膚に有害影響を与える可能性があることがアポロ計画以降の研究で繰り返し指摘されている<sup>8)</sup>。

したがって、月面基地の医療インフラ設計は地球上の医療をそのまま移植するのでは不十分であり、低重力、宇宙放射線、閉鎖環境、資源循環、さらには月塵曝露といった特有の条件を

<sup>\*</sup> 東京慈恵会医科大学細胞生理学講座宇宙航空医学研究室

<sup>†</sup> 国際医療福祉大学宇宙医学研究会

考慮した、宇宙環境に最適化された新たな医療体系を構築することが求められている。

## II. 文献レビュー

### 1. 宇宙医学の歴史的発展

宇宙医学は1961年のガガーリン飛行を嚆矢として、スカイラブ、ソ連／ロシアのサリユート・ミール、そして1998年以降の国際宇宙ステーション（ISS）に至る長期滞在実験の蓄積によって、微小重力下の生理・病態理解を大きく進展させてきた。ISSは2000年の常時有人化以降、第三の十年期に入って研究利用が成熟し、人間の長期宇宙滞在に関する医学的知見と対策研究を加速させている。NASAの“Benefits for Humanity”は、長期微小重力研究の成果が人類の健康や将来の探査に波及していることを総覧しており、同機関のHuman Research Programは長期滞在中で顕在化する健康・パフォーマンスリスクの特定と低減に焦点化した研究計画を提示している<sup>9,10)</sup>。

### 2. 隔絶環境医療の研究動向

月面基地の医療設計に関しては、地球上の隔絶・極地環境での医療提供から得られた知見が示唆的である。米国科学財団（NSF）監督下の米南極計画において最大の拠点であるマクマード基地は、夏季におよそ800～1000人、冬季に120～200人規模の人口を支える運用がなされ、限られた資源・人員・搬送能力のもとで一次医療から安定化・後方搬送までを担う体制が構築されてきた<sup>11)</sup>。診療実績の比較研究は、限界資源下でも統計的に有意な外来受診や外傷・環境関連疾患のプロファイルが現れることを示し、プレホスピタルから後送判断までの一貫した運用がアウトカムに寄与する可能性を示唆する<sup>12)</sup>。また、離島医療においても小笠原諸島や沖縄県離島部での体制が報告されており、月面基地医療のモデルとして注目されている<sup>13)</sup>。

### 3. 遠隔医療技術の進歩

近年の通信・センシング・計算資源の発達は、遠隔医療の即応性と適用範囲を拡大した。ISSでは、遠隔指導により非専門家でも診断レベルの超音波画像を取得する実証が積み重ねられ、探査級ミッションに向けて通信遅延やブラックアウトを想定した自律度の高いプロトコル設計が議論されている<sup>14)</sup>。さらに、ホログラムを用いた三次元通信技術の実証は、離在環境での医師・乗員間インタラクションの質を高める有望技術として位置づけられている<sup>15)</sup>。これらの成果は、高解像度映像伝送、バイタルのリアルタイム監視、画像・音声・生体波形に対するAI支援を統合することで、現地の限られた医療要員と地上専門医の協調診療を実装しうることを示している。

## III. 月面基地医療システムの設計要件

### 1. 環境的制約要因

月面基地における医療システム設計には、地球環境とは根本的に異なる物理的および化学的

制約が存在する。第一に、月面重力は地球の約 6 分の 1 であり、この低重力環境は循環器系、筋骨格系、前庭系に長期的影響を及ぼすことが知られている<sup>5,6)</sup>。第二に、月面には大気が存在せず、宇宙放射線および微小隕石からの直接的脅威に曝露されるため、防護を考慮した医療施設設計が必須となる<sup>7,8)</sup>。第三に、地球との通信には最低 2.6 秒の片道遅延が生じ、リアルタイムの遠隔診療や緊急時の即応指示に制約が課される<sup>16)</sup>。

このような条件を踏まえ、月面医療システムは完全密閉環境下において安全に医療を提供できる構造を備え、放射線防護の観点から適切な遮蔽材や配置設計を組み込み、低重力環境でも安定して作動可能な医療機器を確保する必要がある。また、補給が限られるため医薬品や消耗品の効率的な在庫管理体制が求められ、さらに致死的外傷や重篤疾患が発生した場合には、地球帰還による後送を含めた緊急搬送計画を予め策定しておくことが不可欠である。

## 2. 人口動態と医療需要予測

月面における医療需要の予測には、基地の人口規模、年齢構成、職業分布を考慮した疫学的分析が必要となる。初期段階では 20 歳から 50 歳の健康な成人労働者が主体となることが想定されるが、基地が成熟するに従い家族帯同が進み、小児科や産科領域の需要が高まる可能性がある。さらに高齢化が進展すれば老年医学的ケアも求められるだろう。

同時に、月面という特殊環境は地球上では稀な健康リスクを顕在化させる。低重力による骨粗鬆症や筋萎縮は長期居住者に普遍的な問題となりうる<sup>5,6)</sup>。宇宙放射線への慢性的曝露は、がんや循環器系疾患のリスクを増加させる<sup>7)</sup>。さらに、閉鎖空間での長期生活は心理的負担を増大させ、不安障害や抑うつ、閉所恐怖症の発症率上昇が予想されており、ISS や南極越冬隊の経験からもそのリスクが示唆されている<sup>17)</sup>。これらの要因を複合的に考慮し、医療システムは基礎診療、精神的健康支援、慢性疾患予防、急性疾患対応のすべてを包含する柔軟な設計が必要である。

## IV. 医療人員配置の分析

### 1. 国際比較による配置基準

月面基地における適切な医療人員配置を検討する際には、まず地球上における標準的な医療従事者密度を参照することが有用である。OECD の統計によれば、加盟国における人口 1000 人あたりの医師数は平均 3.4 人、看護師数は 9.4 人、薬剤師数は 0.8 人である<sup>18)</sup>。日本では医師数が 2.5 人と OECD 平均を下回る一方、看護師数は 11.8 人と平均を上回り、薬剤師数も 1.9 人と高い。ドイツでは医師 4.5 人、看護師 12.0 人といずれも豊富であり、米国では医師 2.6 人、看護師 12.0 人、薬剤師 1.0 人とバランスのとれた人員配置を示している。

これらのデータを基準に、月面基地のような隔絶環境で医療の自立性を高めるためには、地球上よりも高密度の人員配置が望ましいと考えられる。1000 人規模の基地においては、医師を 5.0 人、看護師を 15.0 人、薬剤師を 1.0 人とする推奨値が導かれる。この数値は、限られた人員で 24 時間体制の救急対応を可能にし、さらに慢性疾患管理や予防医学的介入を維持することを

目的としたものである。南極基地や原子力潜水艦などの隔絶環境医療に関する既往研究も、冗長性を確保した多職種配置の必要性を指摘しており<sup>11,12,19)</sup>、宇宙基地においてもこれを参考にすべきである。Figure 1: Medical Personnel Allocation Model per 1000 Population

Table 1: Comparison of Medical Personnel between OECD Countries and Lunar Base (Proposed)

## 2. 専門領域別配置計画

1000人規模の月面基地を想定した場合、5名の医師配置は以下の専門分野を網羅する必要がある。まず、救急・外傷外科医を2名配置し、船外活動（EVA）中の事故や与圧服トラブルといった急性期外傷に即応できる体制を構築する。次に、内科・総合診療医を2名置き、慢性疾患管理や一般診療を担わせる。最後に、麻酔・集中治療医を1名配置し、手術麻酔および集中治療室（ICU）の管理を行う<sup>20)</sup>。このような配置は、限られた医療人員で多様な疾患に対応するための最小限かつ効率的な分布といえる。

さらに、看護師は15名配置されることが望ましい。内訳として、ICU専従看護師を4名とし、重症患者への24時間対応を可能とする。手術室看護師を3名配置し、緊急手術にも即応できる体制を整える。病棟看護師6名は日常診療と入院患者のケアを担い、外来・健康管理担当の2名は健康診断、予防接種、生活習慣管理を含むプライマリケアを中心に活動する<sup>18,20)</sup>。薬剤師は1名とし、限られた医薬品・消耗品を効率的に管理し、調剤業務のみならず感染管理や抗菌薬適正使用の指導役割も担う。

このような専門領域別配置は、地球上の大規模病院や隔絶環境の医療提供体制を基盤にしつつ、月面環境という特殊条件を加味して再設計したものである。限られた人員を多能工化し、遠隔医療やAI支援診断<sup>14,15)</sup>を併用することで、地球から隔絶された状況下でも包括的かつ持続可能な医療サービスを実現できると考えられる。

## V. 医療施設・設備の計画

### 1. 施設規模と病床配置

月面基地における医療施設は、孤立した環境で長期にわたり包括的医療を提供できる、小規模総合病院に匹敵する機能を有する必要がある。病床数の設定にあたっては、OECD諸国の統計を基準とした。すなわち、日本では人口1000人あたり約13床、ドイツでは8床、米国では2.8床が整備されている<sup>18)</sup>。これらを参考にしつつ、月面特有の外傷リスク、放射線曝露、慢性疾患の増加傾向を考慮した結果、10床/1000人が妥当と判断される。

具体的には、一般病床を6床とし、日常的な内科・外科疾患に対応する。集中治療室（ICU）は2床を確保し、重症外傷や呼吸循環管理が必要な症例を収容できるようにする。感染症のアウトブレイクや免疫低下患者の管理を想定して隔離病室を1床設ける。Figure 2: Hospital Bed Configuration また、軽症外傷や一時的観察を目的とする観察病床を1床整備する。これらの配分は、南極基地や潜水艦など限られた空間資源で運営されてきた隔絶環境医療の経験知を反映している<sup>19,21)</sup>。Figure 3: Conceptual Layout of Lunar Base Medical Facility

## 2. 診断・治療設備

### （１）画像診断装置

限られたスペースと電力環境の中でも、迅速かつ高精度の診断を行うために最低限の画像診断装置が必要である。デジタル X 線装置は骨折や肺炎の診断に不可欠であり、放射線量を抑えつつ繰り返し使用可能である。超音波診断装置は小型・低消費電力であり、腹部臓器や心臓、産科領域まで幅広い応用が可能である<sup>14)</sup>。さらに、外傷や脳神経系疾患の評価には 16 列程度のコンパクト CT スキャナーが望ましい。既に ISS ではポータブル超音波診断が遠隔指導のもとで成功しており<sup>14)</sup>、これを月面医療に拡張することは現実的といえる。

### （２）治療設備

手術室は完全な無菌環境を保持し、麻酔器や人工呼吸器を備えることが必須である。ICU には多項目モニター、除細動器、さらには重症心肺不全に対応するための ECMO（体外式膜型人工肺）を配置する。加えて、EVA 作業や居住区内減圧事故を想定し、高気圧酸素治療室を設置することが重要である。これは減圧症や一酸化炭素中毒に対応可能であり、宇宙飛行士の活動リスクに直結する要素である<sup>20,22)</sup>。

### （３）検査設備

臨床検査室には血液・生化学自動分析装置を配備し、救急から慢性疾患管理までの迅速検査を可能にする。微生物検査室では培養・同定システムを用いて感染症対策を実施する必要がある。隔離環境における院内感染制御に直結する。さらに病理検査室を整備し、組織診断用顕微鏡システムを備えることで、悪性腫瘍や炎症性疾患の診断精度を維持することができる。近年では、ラボオンチップや AI 支援顕微鏡診断など省スペースかつ高効率の検査技術が登場しており、月面医療施設に最適化可能である<sup>23)</sup>。

## VI. 遠隔医療とテクノロジーの統合

### 1. 通信インフラストラクチャ

月面基地と地球間の医療通信には、高帯域かつ安定した通信インフラが不可欠である。現在、NASA および国際パートナーは Lunar Gateway や月周回通信衛星コンステレーションの整備を計画しており、最大 100 Mbps のデータ伝送速度と約 2.6 秒の片道通信遅延が実現される見込みである<sup>16,24)</sup>。これにより、高解像度の医用画像伝送やリアルタイムの生体情報モニタリングが可能となり、地球上の専門医が遠隔で診療支援を行う体制が現実化する。ISS で実施された遠隔超音波診断やホログラム通信の実証<sup>14,15)</sup>は、月面通信網の確立によりより高度かつ安定した医療支援へ拡張できることを示している。

### 2. AI 支援診断システム

月面基地における最大の制約は、限られた人的資源で幅広い疾患に対応しなければならない点にある。その補完策として、人工知能を活用した診断支援システムの導入が注目されている。IBM Watson for Oncology などの既存の臨床意思決定支援システムは、症状入力や検査所見から鑑別診断を提示し、治療推奨を生成する機能を備えている<sup>25)</sup>。これを月面環境に適用することで、非専門医であっても高度な診療判断を下す一助となる。さらに、AI による画像診断支援は X 線や CT 画像の自動読影を可能にし、異常所見を迅速に検出することで、地球の放射線科医による最終確認までの時間を短縮できる。近年は深層学習アルゴリズムを用いた放射線画像診断 AI の性能が人間の専門医に匹敵する水準に達しており<sup>23,26)</sup>、月面医療においても有用性が高いと考えられる。Figure 4: Integration Flow of Telemedicine and AI-Assisted Diagnosis

### 3. ロボット手術システム

将来的な展望として、遠隔操作ロボット手術システムの導入により、地球にいる外科医が月面で手術を実施することが技術的に可能となる。しかし、通信には片道 2.6 秒の遅延が伴うため、従来型のマスタースレーブ方式では精密操作に大きな制約が生じる。この課題を克服するためには、ロボットシステムに自律的な制御機能や部分的自動化機能を持たせる必要がある<sup>27)</sup>。すでに地上では遠隔ロボット手術が複数の臨床試験で実施されており、通信遅延に対するアルゴリズム補正技術も開発されている。これらの技術的進展は、将来の月面外科医療の実現可能性を高めるものであり、探査ミッションの安全性向上に寄与するだろう。

## VII. 地球上類似環境からの教訓

### 1. 南極基地医療の事例分析

極地での医療提供は、月面基地における医療システム設計にとって最も有益なアナロジーの一つである。米国 McMurdo 基地は夏季人口約 1000 人を擁し、月面基地と同規模の集団医療を行う実例として特に参考となる。同基地では、医師 2 名、看護師や救急医療技術者を含むスタッフ 4 名の計 6 名で医療を担当しており、6 床の入院設備と基本的な手術能力を有している<sup>11,28)</sup>。しかしながら、重症患者の治療は基本的に自己完結せず、天候条件が許す限りニュージーランドまたはチリへの空路搬送を前提とした運用が行われている。

この点で、月面基地の医療はより高い自己完結能力を備える必要がある。特に外科的介入能力を拡張し、腹部外科、整形外科、脳神経外科といった多領域の手術を可能とすることが重要である。さらに、集中治療体制を 24 時間継続的に維持し、長期入院患者の管理能力を備えることが求められる。これらの要求は、隔絶環境医療に関する過去の南極越冬隊研究においても繰り返し指摘されており<sup>19,21,29)</sup>、地球からの迅速な後送が不可能な月面では不可欠の要件である。

### 2. 離島医療からの知見

日本の小笠原村診療所（父島、人口約 2000 人、本土まで船で 24 時間）は、地理的に隔絶さ

れた環境下で包括的な医療を提供する事例として注目される。同診療所では常勤医師3名が内科、外科、小児科、産婦人科を網羅し、CTスキャナーや手術室を備えて島内でほぼ完結可能な診療体制を実践している<sup>13,30)</sup>。耳鼻咽喉科や眼科などの専門領域については年数回の派遣専門医によって補完し、緊急時には海上保安庁による搬送で本土の医療機関と接続している。

この事例から導かれる月面基地医療への応用可能な教訓は多い。第一に、限られた人数の医師が複数診療科をカバーする総合診療能力を持つことの重要性である。第二に、専門医を定期的に派遣あるいは遠隔で参加させるシステムを構築する必要がある。第三に、住民に対する健康教育や予防医療を充実させることが疾病負荷の低減につながる。第四に、隔絶環境で勤務する医療従事者自身のメンタルヘルスを適切に管理することが、組織としての持続性を高める上で必須である<sup>17,19,30)</sup>。

## VIII. 実装における課題と提言

### 1. 技術的課題

#### （1）医療機器の月面適応

月面における医療システム実装の最大の技術的障壁は、既存の医療機器が地球環境を前提に設計されている点である。重力に依存する輸液システムは、地球上では静水圧差によって自然流下が可能であるが、月面の低重力環境ではその性能が大幅に変化することが予想される<sup>31)</sup>。また、保温機器の多くは空気対流を利用するが、月面の密閉モジュール内では対流効率が異なるため再設計が必要となる。呼吸器や人工肺など大気圧を前提とする機器も、減圧・再加圧に対応できる設計改良が求められる。

#### （2）医薬品の長期保存

補給が不定期で長期化する月面では、医薬品の安定保存が不可欠である。放射線は分子構造を破壊し、薬剤の有効成分を劣化させる。さらに、温度変動は薬効低下や物理的変性を引き起こす<sup>32)</sup>。そのため、放射線遮蔽を施した冷蔵・冷凍設備、温度変動に強い新規剤形の開発、さらには現地合成技術（オンサイト・ファーマシー）の導入が検討されている。

### 2. 人的資源の課題

月面基地で勤務する医療従事者には、従来の地上型医学教育だけでは習得が困難なスキルセットが求められる。まず、複数の診療科を横断できる幅広い知識と技能が必須である。これは、外科、内科、小児科、産科など多様な診療を少人数で担うためである<sup>13,19)</sup>。次に、限られた医療機器や消耗品のもとで高度な診療を継続できる適応力が必要である。加えて、隔絶・閉鎖環境における強い心理的ストレスを自己管理する能力も不可欠であり、宇宙医学や行動科学の知見が教育に統合される必要がある<sup>17,29)</sup>。

### 3. 政策・制度的課題

国際協力のもとで建設・運用される月面基地では、各国の異なる医療従事者免許制度や薬事法規を調整する仕組みが求められる。また、月面で発生した医療事故に関する法的責任の所在、患者の人権保護、診療記録やバイオデータのプライバシー保護など、現行の国際宇宙法では十分に規定されていない課題が多い<sup>33)</sup>。ISSの運用では多国間合意に基づく暫定的な対応が行われてきたが、月面拠点においてはより包括的かつ明確な国際的法的枠組みが必須となる。

#### 4. 実装戦略の提言

以上の技術的・人的・制度的課題を踏まえ、月面基地医療システムの段階的な実装戦略を提案する。

第1段階（2030–2035年）では、救急・外傷医療の確立を最優先とし、基本的な診断・治療設備を整備する。同時に、遠隔医療システムを導入して地球の専門医の支援を受ける体制を構築する。

第2段階（2035–2040年）では、専門診療科を拡充し、手術および集中治療能力を強化する。さらに、予防医療や精神的健康支援を含めた健康管理システムを充実させることで、疾病の早期発見・重症化予防を可能にする。

第3段階（2040年以降）では、完全自立型の医療システムを完成させる。高度専門医療の現地実施、医療従事者の現地養成、さらには月面独自の医学研究拠点化によって、地球からの補助に依存しない持続的医療体系を実現する<sup>34)</sup>。この段階的な実装モデルは、過去の宇宙探査ミッションの漸進的進展や隔絶環境医療の発展史に基づく現実的なロードマップと考えられる。

### IX. 結論

本研究により、1000人規模の月面基地における医療インフラストラクチャの設計要件と実装戦略が体系的に整理された。その主要な結論は次の通りである。

第一に、月面基地では地球上の先進国平均を上回る医療従事者配置密度が必要である。具体的には、人口1000人あたり医師5名、看護師15名を配置することが推奨される<sup>18,20)</sup>。これは、地球への緊急搬送が困難な環境において、包括的かつ自己完結型の医療提供能力を確保するための最低条件と考えられる。

第二に、10床規模の小規模総合病院に相当する医療施設が不可欠である。その中でも、集中治療室（ICU）機能と緊急手術能力を維持することが極めて重要である。診断設備については、X線、超音波、16列CTスキャナーを組み合わせることで、外傷、循環器疾患、産科診療を含む幅広い診断ニーズに対応可能である<sup>14,21,23)</sup>。

第三に、遠隔医療システムとAI支援診断の統合により、限られた専門医リソースを最大限に活用できることが示された。ISSでの遠隔超音波実証やホログラム通信の試みはその有効性を裏付けており<sup>14,15)</sup>、深層学習を用いた画像診断AIの精度は既に専門医に匹敵する水準に達している<sup>26)</sup>。ただし、通信遅延は完全なリアルタイム診療に制約を与えるため、部分的な自律性を備えたロボット支援システムの開発が不可欠である<sup>27)</sup>。



第四に、地球上の隔絶環境医療の知見は月面基地設計において有用である。南極基地では小規模人員で包括的診療を維持する運用モデルが確立されており<sup>11,28,29)</sup>、離島医療の経験は総合診療能力と専門医ネットワークの併用が有効であることを示している<sup>13,30)</sup>。しかし、月面環境特有の低重力、宇宙放射線、完全隔離といった因子を考慮すれば、これらの地球上の事例を単純に移植するだけでは不十分であり、追加的対策が必須である。

以上の結論は、将来の月面基地建設における医療システム設計の基礎資料として活用されるものであり、宇宙居住の安全性と持続性の向上に寄与すると期待される。今後の研究課題として、第一に、月面環境における医療機器の性能検証と新規設計の実装、第二に、宇宙医学専門医の養成プログラムの体系化、第三に、国際的な医療法制度の整備が挙げられる<sup>31-34)</sup>。さらに、宇宙医学の知見は地上医療にもフィードバックされ、高齢化社会や僻地医療に対する応用可能性を秘めている<sup>35)</sup>。

人類の宇宙進出が現実味を帯びる中で、医療安全保障の確立は持続可能な宇宙文明構築の基盤である。本研究が、その実現に向けて学術的・実践的な貢献を果たすことを願っている。

## 文献

1. NASA. NASA Updates Astronaut Assignments for Artemis II Moon Mission. NASA; 2024.
2. Federal Aviation Administration. Commercial Space Transportation 2023 Year in Review. FAA; 2023.
3. NASA. Artemis Base Camp: Human Landing System Concept of Operations. NASA; 2020.
4. NASA. Moon to Mars Architecture Concept Review. NASA; 2023.
5. LeBlanc A, Schneider V, Shackelford L, West S, Oganov V, Bakulin A, et al. Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. 2000;1(2):157–160.
6. Vico L, Hargens A. Skeletal changes during and after spaceflight. *Nat Rev Rheumatol*. 2018;14:229–245.
7. Chancellor JC, Scott GB, Sutton JP. Space radiation: The number one risk to astronaut health beyond low Earth orbit. *Life*. 2014;4(3):491–510.
8. Cain J, McKay D, Thompson D. Lunar dust and human health risks. *Earth Moon Planets*. 2010;107:107–125.
9. NASA. Benefits for Humanity. NASA; 2022.
10. NASA Human Research Program. Human Research Roadmap. NASA; 2023.
11. Lugg DJ. Antarctic medicine. *J R Soc Med*. 2005;98(12):540–546.
12. Nicholas J, Green N, Pollett W, et al. Medical care at the Amundsen-Scott South Pole Station: a 10-year review. *Wilderness Environ Med*. 2018;29(3):273–280.
13. Takahashi R, Nishida H, Ogasawara K, et al. Health care delivery and referral system in remote islands of Japan: implications for space medicine. *J Rural Med*. 2020;15(2):67–73.
14. Otto C, Sheehan J, Field J, et al. The evaluation of tele-ultrasound for supporting medical care in

- remote environments. *Telemed J E Health*. 2015;21(6):443–449.
15. Alexander D, Chu B, White R, et al. Holoportation across space: evaluation of mixed-reality communication in analog spaceflight conditions. *NPJ Microgravity*. 2023;9(1):20.
16. NASA. Artemis Human Exploration Architecture: Lunar Surface Mission Concepts. NASA; 2021.
17. Kanas N, Manzey D. Space psychology and psychiatry. 2nd ed. Springer; 2008.
18. OECD. Health at a Glance 2023: OECD Indicators. OECD Publishing; 2023.
19. Harrison AA, Clearwater YA, McKay CP. From Antarctica to Outer Space: Life in Isolation and Confinement. Springer; 1991.
20. Kirkpatrick AW, Campbell M, Novinkov O, et al. Trauma and resuscitation in space: microgravity care of the ill and injured astronaut. *Trauma Surg Acute Care Open*. 2020;5(1):e000552.
21. Pagel JF, Choukèr A. Biomedical results from Skylab, Salyut, Mir, and ISS: lessons for future exploration missions. *Acta Astronaut*. 2016;129:461–467.
22. Conkin J, Wessel JH. Critique of the US Navy treatment tables for decompression sickness. *Undersea Hyperb Med*. 2008;35(5):357–370.
23. McSharry PE, Tarassenko L, Clifford GD. Machine learning in clinical laboratory medicine: opportunities for the space environment. *Clin Chem*. 2020;66(4):575–583.
24. NASA. Lunar Communications and Navigation Architecture. NASA; 2022.
25. Somashekhar SP, Sepúlveda MJ, Puglielli S, et al. Watson for Oncology and breast cancer treatment recommendations: utility, concordance, and future prospects. *Oncologist*. 2018;23(4):369–375.
26. McKinney SM, Sieniek M, Godbole V, et al. International evaluation of an AI system for breast cancer screening. *Nature*. 2020;577:89–94.
27. Anvari M, Broderick TJ, Stein H, et al. The impact of latency on surgical precision and task completion during robotic telesurgery. *Surg Endosc*. 2005;19(3):350–356.
28. Zafren K, Giesbrecht GG, Danzl DF, et al. Medical aspects of cold weather operations. *Wilderness Environ Med*. 2014;25(4 Suppl):S122–S137.
29. Hrebien L, Pagel JF, Choukèr A. Medical lessons from Antarctic overwintering missions: implications for space exploration. *Aviat Space Environ Med*. 2013;84(3):230–235.
30. Ogasawara Village Government. Annual Health and Medical Report of Ogasawara Medical Center. Ogasawara; 2023.
31. Campbell MR, Billica RD, Johnston SL, et al. Medical issues associated with long-duration space flight: a review. *Aviat Space Environ Med*. 1996;67(11):1093–1104.
32. Du B, Daniels VR, Vaksman Z, et al. Evaluation of physical and chemical changes in pharmaceuticals flown on space missions. *AAPS J*. 2011;13(2):299–308.
33. Tronchetti F. The Exploitation of Natural Resources of the Moon and Other Celestial Bodies: A Proposal for a Legal Regime. Brill; 2009.

34. Cermignani M, Mermel LA. Roadmap for healthcare in space exploration. Lancet Reg Health Am. 2022;12:100285.
35. Garrett-Bakelman FE, Darshi M, Green SJ, et al. The NASA Twins Study: a multidimensional analysis of a year-long human spaceflight. Science. 2019;364(6436):eaau8650.

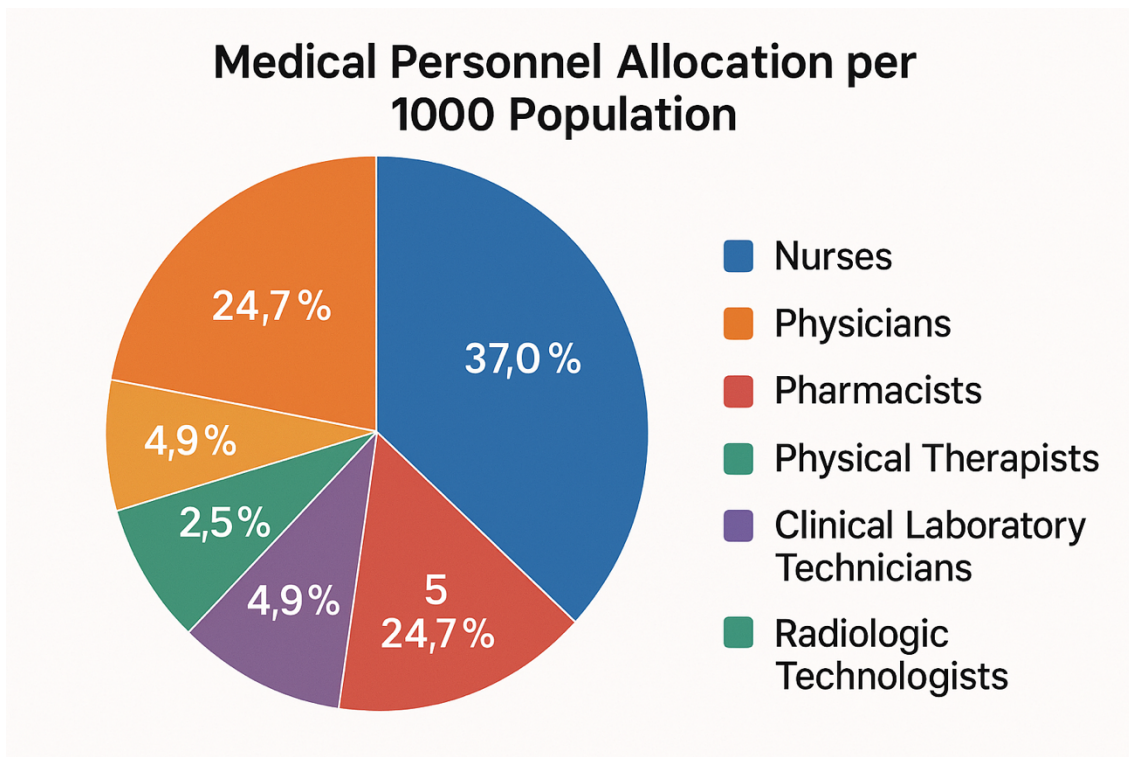


Figure 1: Medical Personnel Allocation Model per 1000 Population (筆者作成)

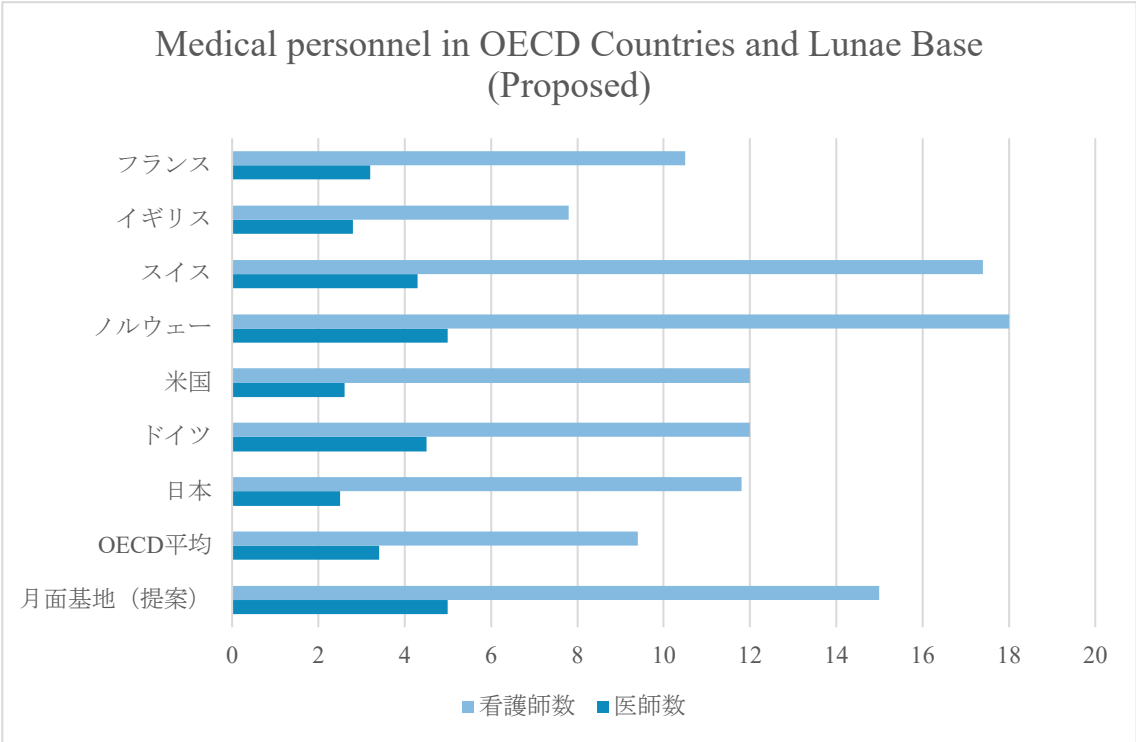


Table 1: Comparison of Medical Personnel between OECD Countries and Lunar Base (Proposed)

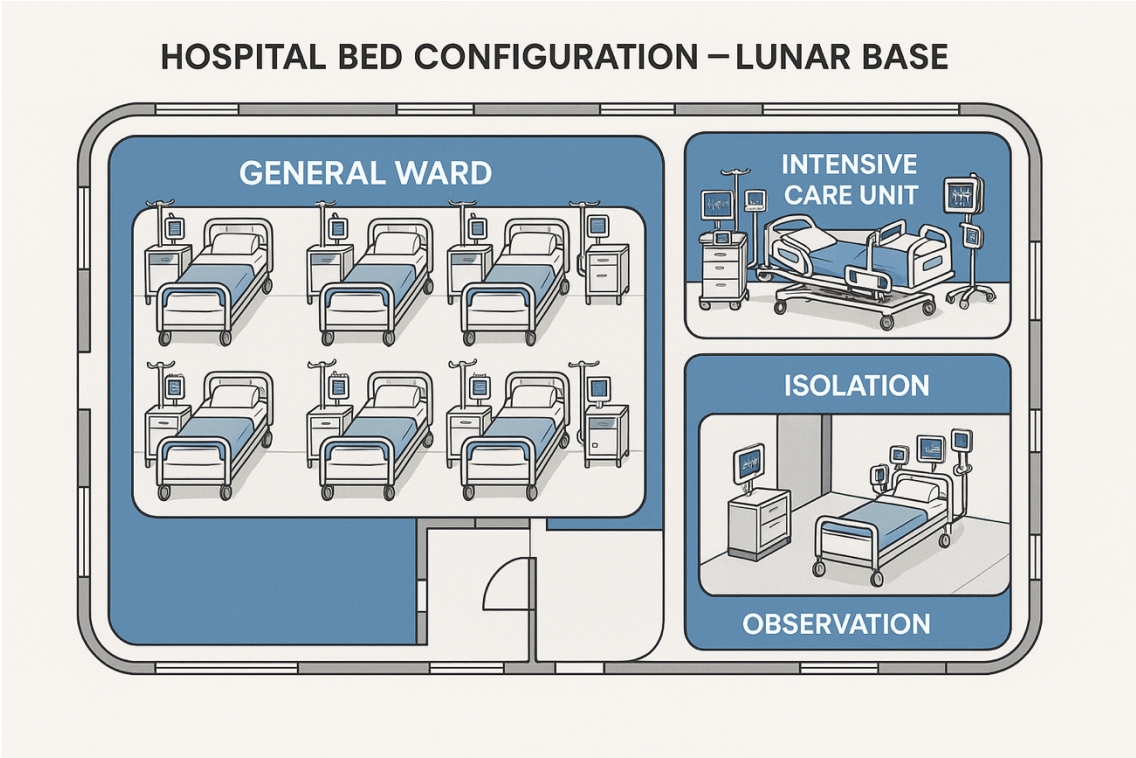


Figure 2: Hospital Bed Configuration : 6 General, 2 ICU, 1 Isolation, 1 Observation (筆者作成)



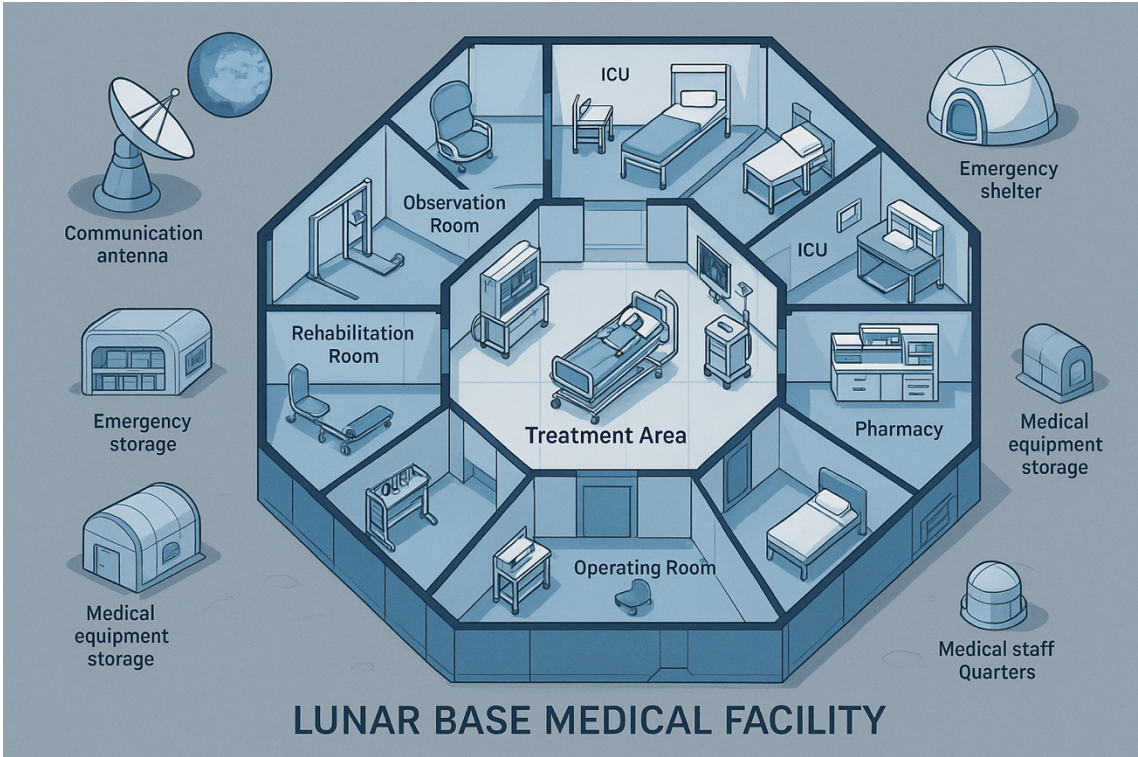


Figure 3: Conceptual Layout of Lunar Base Medical Facility (筆者作成)

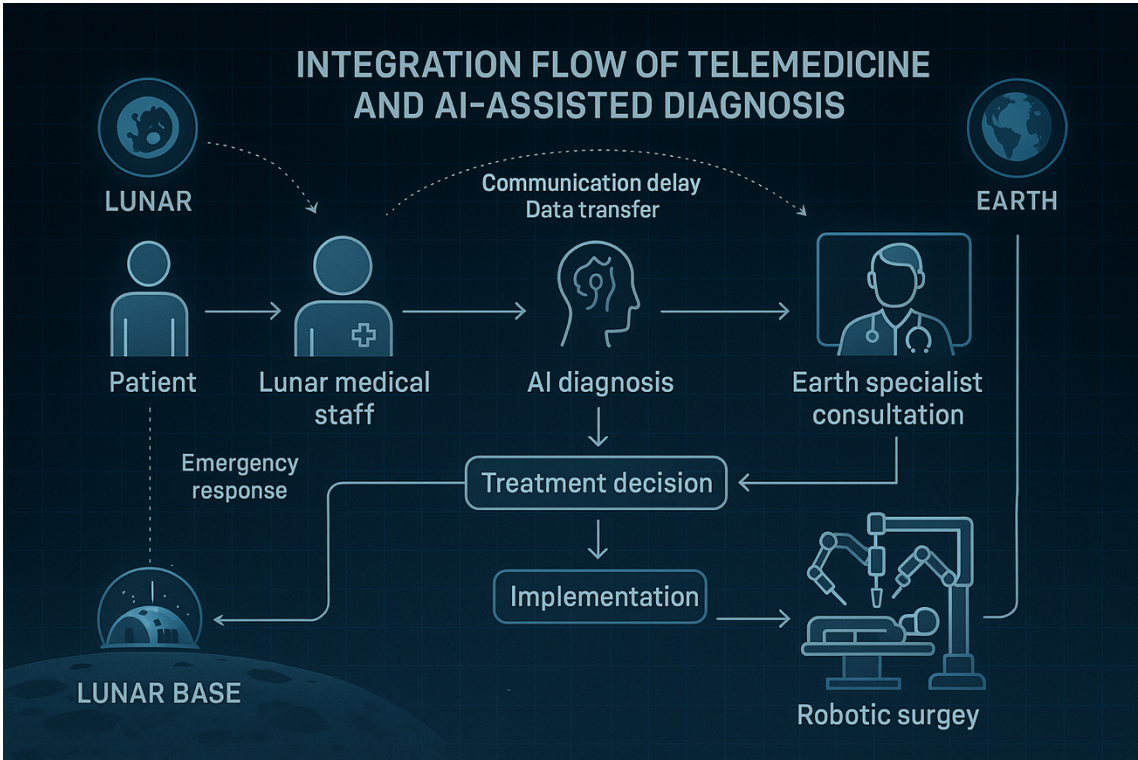


Figure 4: Integration Flow of Telemedicine and AI-Assisted Diagnosis (筆者作成)

