

## 第6章 「JAXA 宇宙医学生物学研究的取り組み」

宇宙航空研究開発機構 宇宙医学生物学研究室  
泉 龍太郎

### Space Biomedical Research in JAXA

Space Biomedical Research Office, Japan Aerospace Exploration Agency  
Ryutaro Izumi

**Abstract: This paper introduces the activity of the newly launched JAXA Space Biomedical Research Office, including ongoing clinical space medicine research. This paper also explains its goal, policy, criteria for prioritizing the disciplines of research, process for conducting research, and some topics of space biomedical research.**

#### 1. はじめに

国際宇宙ステーション (International Space Station、以下「ISS」) は、1998 年より組み立てが開始され、2000 年 11 月より宇宙飛行士の滞在が始まり、2008 年 2 月現在では第 16 次のクルーが、長期滞在を行っている。また日本では 2008 年初旬より、3 回に亘って日本の宇宙ステーションモジュール「きぼう」が打ち上げられ、それに伴って日本人宇宙飛行士の飛行も予定されている。特に 2008 年末より、若田光一宇宙飛行士による、日本人初の長期宇宙滞在が行われる予定である。このような状況の下に、2007 年 4 月に設立された、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency、以下「JAXA」) 有人宇宙環境利用プログラムグループ 宇宙医学生物学研究室の取り組みについて紹介する。

#### 2. JAXA における宇宙医学研究の経緯と考え方

##### 2.1. 宇宙医学研究の経緯

宇宙医学研究には、宇宙飛行士の健康管理技術の向上、および宇宙環境を利用した医学研究の 2 つの側面があるが、宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan、以下「NASDA」) の時期を含め、前者は主として宇宙医学研究開発室が、後者は主として宇宙環境利用センターが担って来た。宇宙医学研究開発室では、宇宙飛行士の健康管理を行うと同時に、主としてヒトを対象とした研究を個別の課題毎に、例えば日本人宇宙飛行士の宇宙飛行時の健康管理データの取得、骨量減少・尿路結石予防薬のベッドレスト研究 (長期間寝たきりで行う実験) による地上検証<sup>1)</sup>、精神心理支援を目的としたロシア長期閉鎖実験への参加<sup>2)</sup>等を、行って来た。一方、宇宙環境を利用した医学研究

としては、1995年度からのフロンティア共同研究(有人宇宙技術研究分野)、さらに1997年度から9回に亘る公募地上研究制度<sup>3)</sup>を通じ、多くの研究者の参画による研究活動を行って来ている。また1999年には、日本として宇宙医学研究をどのように取り組むべきかを目的として、宇宙環境利用研究推進委員会の下に「宇宙医学研究シナリオ」を作成し、宇宙医学研究の指針とした(第4版を2002年に改訂)<sup>4)</sup>。ただ残念なことに、2003年のスペースシャトル「コロンビア」号の事故等の影響で、実際の宇宙実験の機会が非常に限られたことから、これらの研究活動が宇宙実験に結び付いたケースは、あまり無かったのが実情である。

2003年10月の組織改組により、NASDAがJAXAとなったのを機に、宇宙医学研究を体系的に取り組むことを目的として「宇宙医学研究の進め方と最重要課題」を2005年6月に制定し、臨床医学的な研究活動を実施している(表1)。日本の宇宙ステーション「きぼう」の打ち上げを控え、さらに基礎医学的な研究活動にも取り組むことを目的とし、2007年4月に宇宙医学研究開発室より、宇宙医学生物学研究室が分離・独立して設置された。

表1 宇宙臨床医学領域における研究活動への取り組み(2005年度～)

分野	最重要課題	現状・概要等
生理的 対策	薬剤を用いた宇宙飛行中の骨量減少・尿路結石予防対策に関する研究	ビスフォスフォネート剤投与実験(米国チームと共同実験)を2008年の初旬から開始の予定(宇宙飛行士の同意取得待ち)。
	微小重力による効果的な運動器具・トレーニング法に関する研究	小型トレーニング機器の軌道上検証について実施を検討中。
精神心理 支援	長期閉鎖隔離環境滞在に対する精神的な適応の評価方法に関する研究	産業技術総合研究所、日本大学と研究実施中(ストレスを自己評価/モニタリングする手法の開発研究)。
	多文化環境に対する多文化適応訓練の研究	宇宙飛行士の訓練の中で実施中。
放射線 被曝管理	次世代受動型個人線量計に関する研究	検討中(アクティブ型、リアルタイム型)。線量計測は医学運用で実施中。
	バイオドシメトリに関する研究	放射線医学総合研究所、ロシア生物医学問題研究所と共同で実施中。
軌道上医 療システ ム	軌道上における簡易型生体機能モニター機器の研究	小型医療機器を、軌道上検証に向けて検証中(ホルター心電計等)。
	自動診断機能のある搭載用医療機器の研究	検討中(軌道上での自動診断)。
宇宙船内 環境	船内空気環境汚染による健康障害に対する、モニタリングシステムの研究	船内環境基準を検討。北里大学と有毒ガスモニタリングシステムの研究実施中。

## 2.2 . 宇宙医学研究の取り組みに関する考え方

前述のように、宇宙医学研究には、宇宙飛行士の健康管理技術の向上、および宇宙環境を利用した医学研究の2つの側面があり、JAXAでは2つのセクションがそれぞれの役割を担っているが、実際にはこの2つの側面は車の両輪のように不可分な要素と考えられる。前者の宇宙飛行士の健康管理技術の向上は、宇宙飛行士の長期宇宙滞在を実施するに当たって、宇宙機関であるJAXAの責任として実施しなければならない課題であり、後述するように長期宇宙滞に伴う医学的な課題のリスク分析に基づき、トップダウン的に研究課題を設定するという考え方を取っている。ただし、このようなリスク分析、および個々の医学的課題に対する対応策（すなわち、個々の研究課題）への取り組みについては、現在の科学技術の動向を踏まえることが必要で、それはJAXA単独で実施出来ることではなく、研究コミュニティからのボトムアップ的なアプローチと連携することが必要不可欠である。

## 2.3 . 長期宇宙滞に伴う医学的な課題について

1961年、ガガーリンが人類で初めて宇宙飛行を行ってから宇宙に滞在した飛行士の数はのべで約500名、1ヶ月以上長期間宇宙に滞在した飛行士も約100名を数える。また、これまでの最長の宇宙滞在記録は、1回の滞在としては1995年にロシアのポリャコフ宇宙飛行士が達成した437日、複数回の場合は、同じくロシアのクリカレフ飛行士が6回に亘る飛行で達成した803日である。ではこれでヒトの長期宇宙滞在が安全で確実なものであることが証明されたかと言うと、決してそうではない。上記の滞在期間も、ヒトの寿命を70歳と考えればほんの2~3%程度の時間に過ぎない。またこれまでの宇宙滞在は、健康で選抜された飛行士が、厳しい訓練を長期間受けた上で行われている。

宇宙環境が人体に与える影響の要因は、大別すると、微小重力と宇宙放射線の2つである。また、宇宙空間では、高真空、過酷な温度環境からそのままではヒト（およびほとんどの生命体）は生存することが出来ず、必然的に地球環境を維持した閉鎖環境（宇宙船・宇宙服）が必要となる。そして、そこから閉鎖環境に由来する様々な課題が派生する。長期宇宙滞在が人体に与える影響について、部位別に表したものを図1に示す。宇宙は過酷な環境であり、長期間の宇宙滞在、特に地球周回軌道を離れた月面、あるいはそれ以遠の宇宙活動については、まだまだ数多くの医学的な課題が横たわっていると看做しても過言では無い。なお、個別の具体的な課題については、第6項で紹介する。

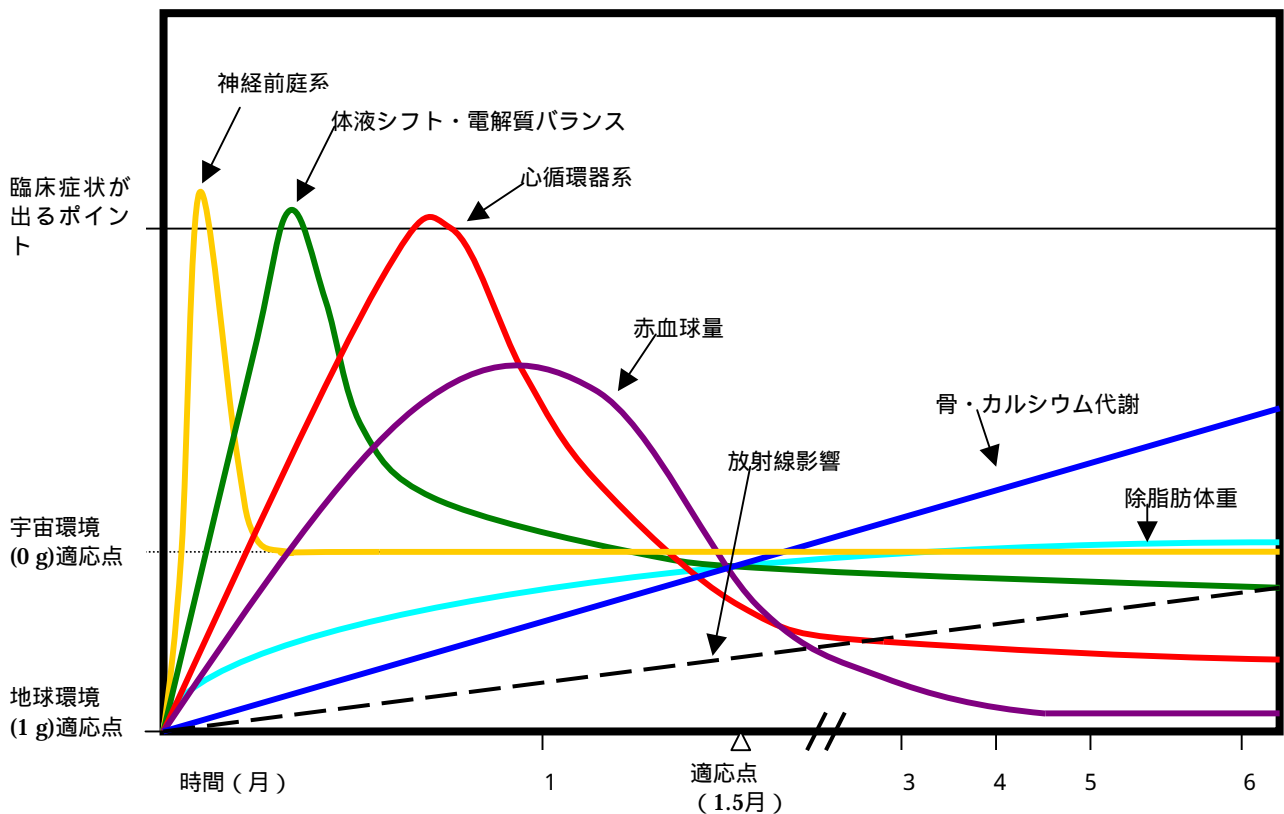


図1. 宇宙環境が人体に及ぼす影響<sup>9)</sup>

### 3. JAXA 宇宙医学生物学研究の在り方

#### 3.1. 目的

現在の JAXA 宇宙医学生物学研究室の取り組む研究では、日本人宇宙飛行士の、ISS での 6 ヶ月程度の長期宇宙滞在における医学的課題のリスク軽減を図り、より安全でより効率的な滞在を実現させることを最優先の目的としつつ、近い将来に想定されるより長期間の有人宇宙活動にも直結する成果も得られる研究となるよう、努めることとしている。

#### 3.2. 研究の範囲

宇宙医学生物学研究の範囲は、上記の目的を達成出来るよう、宇宙飛行士の長期宇宙滞在時の健康管理に必要な医学基準、健康管理計画、健康管理要員の技術への反映、またはこれらに科学的根拠を与えることを目標として実施するものと考えている。

なお「宇宙医学」については、その研究内容により、「宇宙臨床医学」と「宇宙基礎医学」の 2 分野に大別し、「宇宙臨床医学」領域においては、宇宙環境による影響等への対策として人体に直接に実施される医学的対策や健康管理に関連する研究を行い、「宇宙基礎医学」領域においては、宇宙環境による生体影響や健康影響の根源的メカニズム等を基礎医学や生物学的手法（研究内容によっては、ヒトを実験対象とすることもある）を用いて解明することにより、「宇宙臨床医学」の信頼性を向上させ、課題解決の支援を目指す研究を行うものと整理している。

### 3.3 . 研究分野の整理・分類

研究分野は、これまでの JAXA における医学研究・運用の蓄積、および既に米口を中心に実施されている ISS の医学運用上の課題を踏まえ、長期宇宙滞在の健康管理に必要な観点で、生理的対策、精神心理支援、宇宙放射線被曝管理、軌道上医療システム、および宇宙船内環境の 5 つの分野に整理・分類した。この考え方により、長期宇宙滞在に伴う医学的課題をほぼ網羅し、かつ体系的に分類・整理出来たと考えている。

### 4 . 研究課題の優先順位の考え方 (図 2)

5 つの研究分野における長期宇宙滞在に伴う医学的課題に対する対策法 (= 研究課題) について、医学的リスク、日本や他国における取り組みの状況、実現可能性、および JAXA として取り組む必要性の 4 つの観点から評価し、研究課題の優先順位付けを行っている。それぞれの考え方を、以下に記す。

#### 医学的リスクに関する評価

これまでのスペースシャトルやミールプロジェクト、および ISS 運用で識別されている医学的リスクについて、宇宙滞中に伴う医学的課題の発生頻度、宇宙飛行士の健康やミッションへの影響、および対策法の処置状況等を踏まえつつ、今後の宇宙滞在中がより一層長期化し、宇宙環境への曝露が大きくなることへ対処する視点から評価を行っている。

なお、リスクの評価に当たっては、NASA の手法 (Bioastronautics Critical Path Roadmap [BCPR])<sup>5)</sup>を参考にしている。

#### 日本や他国の取り組み状況に関する評価

JAXA 独自の取り組みを推進するとの視点から、宇宙・地上の両方について日本や他国の研究開発状況 (特に米口の現状) を踏まえる必要があり、対処すべき医学的課題への取り組み状況を評価する。

#### 実現可能性に関する評価

研究を進める上で必要な医学生物学的研究手法や技術、研究体制等の現状を踏まえ、研究の実現の可能性、特に宇宙実験の実現性について評価する。

#### JAXA として取り組む必要性に関する評価

今後、JAXA の有人宇宙活動において予定、あるいは想定される将来計画との関連性を踏まえ、JAXA で研究を実施する必要性を評価する。

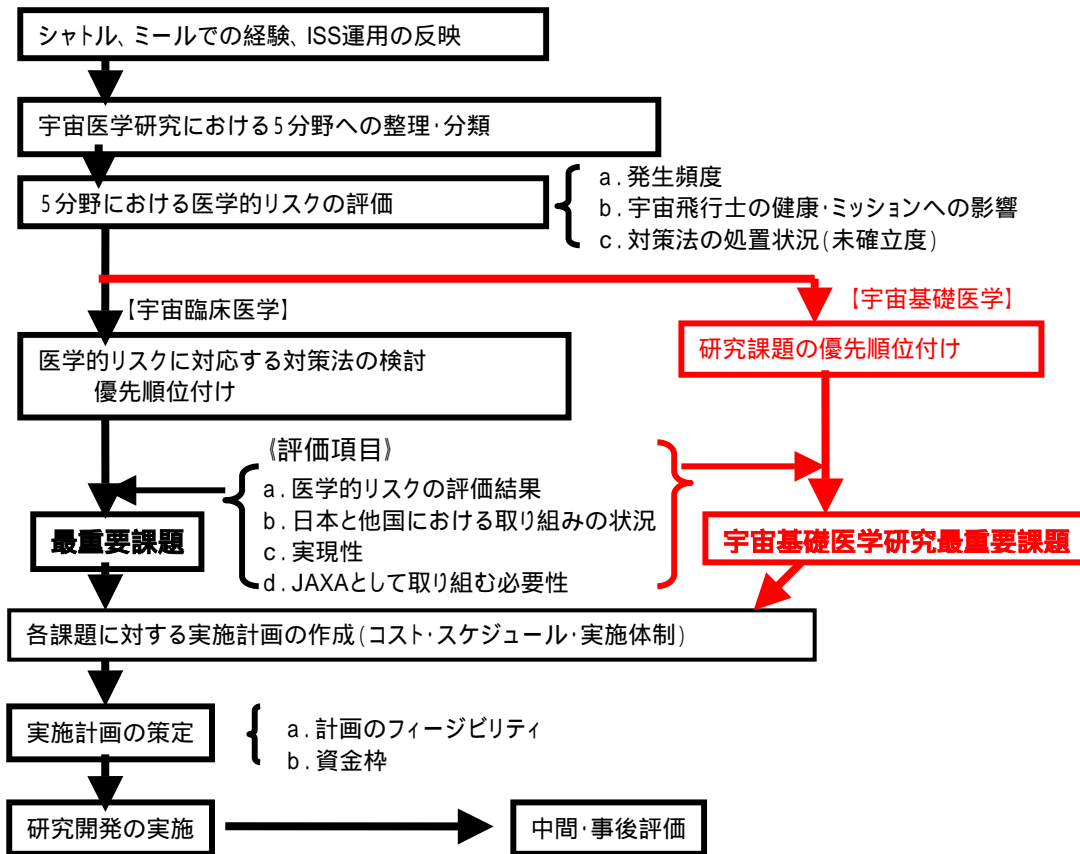


図2 JAXA 宇宙医学生物学研究室における研究課題の優先順位付けと実施プロセス

### 5. 取り組みの現状と今後の予定(図3)

宇宙臨床医学領域については、表1に示すように、2005年度より、既にいくつかの研究課題を実施している。宇宙基礎医学領域の課題、および宇宙臨床医学領域における新規の課題については、JAXA宇宙環境利用プログラムグループの外部諮問委員会での評価を踏まえ、課題の優先順位付けを行い、優先度の高い課題については、2008年度から研究に着手出来るよう、検討を進めている。

研究の実施に当たっては、JAXA単独で行うのではなく、課題毎に、適切な外部研究機関との連携の下で実施する考えである。一部の研究課題においては第1章で小山正人氏が紹介している「きぼう」第2期利用テーマとの連携も想定している。

また課題の優先順位付け自体も、宇宙実験の実施状況・成果や、地上の研究・技術動向を踏まえ、定期的に見直す予定である。

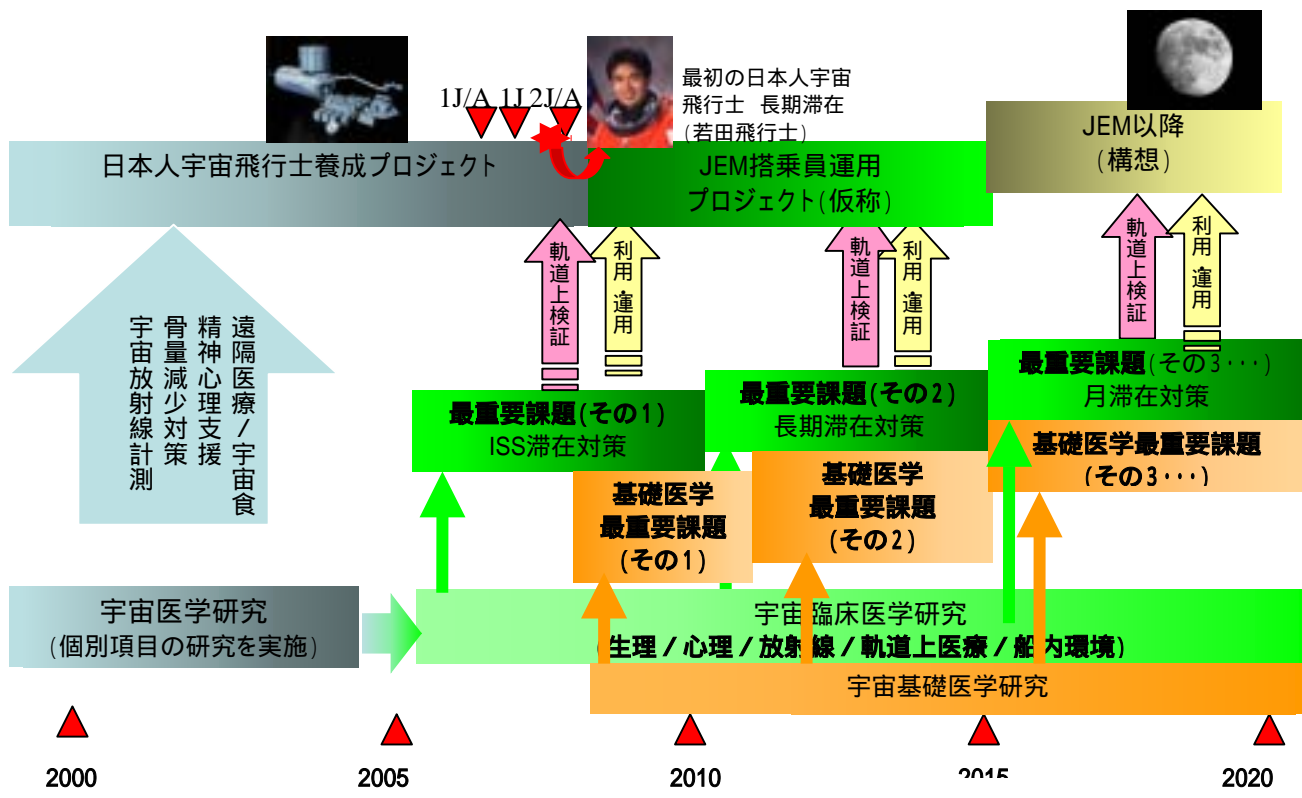


図3 宇宙医学生物学研究的戦略構想(重要5分野)

6. 長期宇宙滞在に伴う医学的課題の代表例

ここで長期宇宙滞に伴う医学的課題を、5つの研究分野それぞれについて、いくつか具体的に紹介したい。

6.1. 生理的対策分野

生理的対策分野で、未だに大きな問題として残っているのは、微小重力に伴う筋骨格系の萎縮である。これは、地上において寝たきりになったのと同じような状況と考えられている。例えば、これまでISSでの米国人宇宙飛行士の8例の解析から、1ヶ月で、腰椎で0.9%、大腿骨頭で1.4%の骨量が減少したことが報告されている<sup>6)</sup>。閉経後の女性が1年間に減る量が約1%と報告されており、如何に重要な問題であるか、ご理解頂けると思う。ISSで長期宇宙滞を行う飛行士は、1日2時間程度の運動(トレッドミル、抵抗運動等)を行うことになっているが、実際には、骨量減少には十分な効果が得られていないことを意味する。現在、JAXAでは臨床医学的なアプローチとして、地上で骨量減少薬として広く用いられているビスフォスフォネート剤の、宇宙飛行士への投与を、米国(NASA)と共同で計画している。この薬剤は同時に、尿路結石予防も期待される。より長期の宇宙滞在に当たっては、ヒト用の人工重力装置の必要性も提唱されており、日本も含め、これまで地上実験も行われて来た<sup>3)</sup>。基礎医学的なアプローチとしては、筋骨格系の萎縮のメカニズムの解明や、より根本的な薬剤・栄養素等の研究開発を目的として、実験動物等を用

いた研究が必要と考えられる。特に日本では、小型魚類を対象とした水棲生物実験装置を搭載する予定であるが、小型魚類の継世代を含む長期飼育により、宇宙放射線を含め、長期間の宇宙環境曝露が生体に及ぼす影響の解明が期待されている。

## 6.2 . 精神心理支援

ISS では空間的に非常に限られた宇宙船内で、2～3名のクルーが常時滞在している(2009年からは6名となる予定)。将来の有人宇宙活動においても、当面は限られた数のクルーが長期間、限られた空間内で生活を共にしなければならない状況は変わらない。また、宇宙は一步外に出れば、生存出来ない厳しい環境であり、その任務も、地上からの打上げ・帰還、補給船のドッキング、船外活動等は非常に緊張度も高い。一方、宇宙飛行士は医学面(特に精神心理面)で評価されることを嫌う傾向があり、ストレス状態を評価するのは困難な点が多い。そのため、現在 JAXA では産業技術総合研究所や日本大学と共同で、TV ゲームのような装置で、ストレス状態を自分自身で評価する機器や、心電図等の生理的データを基にストレス状態を評価出来るような機器の研究開発を行っている。

ISS 内は照度が低く(300ルクス以下)、生体リズムの乱れが懸念されている。また宇宙飛行士だけでなく、筑波宇宙センターでは「きぼう」の打ち上げに伴って、地上管制官が24時間3交代勤務を行うが、この管制要員の健康管理も重要な課題である。生体リズムの調節に当たっては、高照度光を用いた臨床医学的なアプローチ、あるいはメラトニンリズム等、生体リズムの基礎医学的なアプローチの両面が必要と考えている。

## 6.3 . 宇宙放射線被曝管理

ISS では、1日当たりの宇宙飛行士の被曝量は1 mSvであり、これは胸のレントゲン写真3枚分、また我々が地上で浴びる自然放射線の約半年分である。ただ、ISSの軌道は地球の高度約400 kmであるが、これは地球の磁場に守られた環境であり、今後の月探査や、それ以降の深宇宙ミッションに当たっては、宇宙放射線被曝管理は、非常に大きな医学的課題と考えられている。この分野で今後取り組むべき研究課題としては、放射線の計測と予測、放射線の生物影響に大別出来る。現在のISSでも放射線の計測は行われているが、地上でも計測困難な中性子や二次荷電粒子の混在する宇宙放射線が計測でき、より正確に、より小型の装置で、リアルタイムダウンリンクで計測を行うには、まだまだ装置面でも研究開発要素は大きい。さらに得られた物理的な計測値から、ヒトへの生物学的な影響の程度を考慮した被曝線量の算定・評価にも課題がある。月面の放射線環境は米国のアポロ計画以降実測されておらず、現在の宇宙放射線計測技術から評価すると、これらの値は過小評価となっている。今後の有人月面探査計画の実現に向けては、月面の放射線環境を正確に把握し、その対策を確立することが必須である。宇宙環境は、長期間の低線量の被曝となるが、このような場合のヒトへの影響については、地上での検証もあまり行われておらず、細胞やモデル生物を用いた基礎医学的な研究、すなわち細胞・遺伝子レベ



ルでの影響の解明が必要とされる。さらには、このような基礎医学的アプローチを通じて、医学生物学的な観点から、放射線影響を軽減する薬剤・サプリメント等の研究開発も期待される。

#### 6.4．軌道上医療システム

ISSにはある程度の医療機器が整備されている。ただ今後、ISSでは6人体制になること、またより長期の有人宇宙活動に向けては、医療機器・システムのより一層の充実が望まれる。ISSでは、緊急事態が発生した場合は、クルーが24時間以内に地上に帰還出来ることになっているが、月面・深宇宙ミッションでは、短時間で地上に帰還することが出来ず、より自立的な医療体制が必要とされる。この分野は、地上でも、各種医療機器の小型化・高機能化が著しく、このような研究開発動向を踏まえ、各宇宙機関で、小型・高性能の医療機器の搭載化を検討している。例えば、日本と米国でそれぞれ個別に、小型のホルター心電計の搭載を計画している。ISSは遠隔医療の一つのモデルと考えることが出来るが、日本では、現在搭載されているハイビジョンカメラを用いて、今後はリアルタイムでの遠隔診断を行うことも、検討中である。さらに、機器だけでなく、血液生化学、また後述する微生物等を簡便に検査出来るようなキットの搭載化も期待される。

#### 6.5．宇宙船内環境

ISSは非常に密閉された狭い空間であり、空気・水等の船内環境は安全に保つよう、万全の注意が払われている。例えば空気については、NASAではSpacecraft Maximum Allowable Concentrations (SMACs)という、ヒトに有害な物質に関する環境基準が定められている。JAXAではこのSMACsについて、日本の環境基準との整合性を検討し、さらにいくつかの物質について、リアルタイムでの計測を目的として、研究を進めている。ヒトが滞在する以上、ヒトにも常在する微生物も、宇宙環境で問題となる。例えば、宇宙環境ではサルモネラ菌の毒性が増すことが報告された<sup>7)</sup>。現在、宇宙船内の微生物は定期的に調べられているが、今後は、ヒトの体表面を含めた、より広範囲のモニタリング、及びその対策法の検討が必要と考えられる。必ずしも宇宙船内環境ではないが、月表面はレゴリスという、非常に微細なダスト(砂よりも小さい鉱物)に覆われている。地上での粉塵環境に近いと考えることが出来、月への有人探査に当たっては、その対策も必要と考えられている。

#### 7．情報拠点としての活動

JAXA宇宙医学生物学研究室では、日本の宇宙医学生物学研究の拠点として、我が国の宇宙医学生物学を総合的かつ計画的に推し進めるために必要な情報を収集・整理し発信することも活動目標の一つと考え、以下のような活動を検討している。

宇宙医学生物学の関連情報を網羅的に収集・整理する。原則として、得られた情報は

JAXA 内外から参照可能とする。

本宇宙医学生物学研究室の取り組み、研究活動および成果については、定期的に外部に発信する。

宇宙医学生物学研究の普及・啓発、研究者や学生等の裾野拡大、研究活動への参加を促進するために、シンポジウムやパネルを学会と共催するなど、関連学会と連携した活動を推進する。

## 8 . 今後の活動方針について

JAXA では 2005 年に長期ビジョンを発表し、そこでは 2025 年頃の、日本としての有人月面活動も、一つの方向性として取り上げられている<sup>8)</sup>。もちろん、有人月面活動は、日本単独で出来ることではないが、米国、ヨーロッパ、あるいは中国も同じくらいの時期での有人月面活動を視野に入れており、今後の一つの方向性と考えることが出来る。既に 6 項で述べたように、有人月面活動に当たっては、宇宙放射線環境、長期間の微小・低重力環境対策、さらには月面上のレゴリス等、考慮すべき医学的な課題は多い。もう一つの方向性として、地球周回軌道が主ではあるが、一般人の宇宙旅行も、民間企業が主体となって、本格化しようとしている。一般人の宇宙旅行については、長期宇宙滞在とはまた別の観点からの医学的な課題の考慮が必要と思われる。

この小論で取り上げた、宇宙環境における医学的な課題は、その一つ一つを取り上げれば、決して宇宙に特異的なものではなく、地上の医学の問題とも密接に関連している。例えば筋骨格系の萎縮は、老化、または高齢化に伴う身体的活動の低下と類似の現象であり、その対策法には共通するところが大きい。また医療機器・遠隔医療に代表されるよう、地上の医学の研究開発動向は非常に進展が早く、特に日本が得意とする分野について、その技術動向を的確に今後の有人宇宙開発に取り入れることは、日本が宇宙活動を推進し、また世界の有人宇宙開発へも貢献する上で、非常に重要なポイントになると考えられる。

上述のように、現在の JAXA 宇宙医学生物学研究室では、ヒトの長期宇宙滞在における医学的課題の軽減を目的とした、目的指向の研究が主体であるが、その実現のためには、日本、さらには他国の研究コミュニティや企業との連携が必要不可欠であり、7 項で取り上げた情報拠点としての活動を軸に、ISS・きぼうでの医学研究・実証を踏まえ、今後の宇宙医学生物学研究を推進することが我々の当面の役割と考えている。

### 【参考文献】

- 1) Y. Watanabe, et.al., Intravenous pamidronate prevents femoral bone loss and renal stone formation during 90-day bed rest. *J of Bone and Mineral Research*, 19(11), 1771-8, 2004.
- 2) 宇宙航空環境医学会誌、39(2)、2002
- 3) <http://www4.jsforum.or.jp/public/report/index.html>

- 4) <http://iss.jaxa.jp/utiliz/archive/>
- 5) Bioastronautics Critical Path Roadmap, 2004, NASA ( JSC 62577 ) ;  
<http://bioastroroadmap.nasa.gov/index.jsp>
- 6) T. Lang, et.al., Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. J of Bone and Mineral Research, 19(6), 1006-12, 2004.
- 7) JW. Wilson, et.al., Space flight alters bacterial gene expression and virulence and reveals a role for global regulator Hfq. Pro. Natl Acad Sci USA, 104(41), 16299-16304, 2007.
- 8) [http://www.jaxa.jp/about/2025/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/about/2025/index_j.html)
- 9) AE. Nicogossian, CL. Huntoon, SL. Pool Eds. Space Physiology and Medicine: third edition. (1994) Lea and Febiger.