

宇 宙 医 学 分 野
研 究 シ ナ リ 才

第4版：平成14年3月
初 版：平成11年10月

宇 宙 環 境 利 用 研 究 委 員 会
宇 宙 医 学 専 門 委 員

- 目次 -

1. はじめに	1
2. 宇宙医学研究の歴史、現状及び課題	2
2.1 宇宙医学研究の歴史	2
2.1.1 宇宙医学研究の始まり	2
2.1.2 アメリカ、ロシアにおける宇宙医学研究の発展	2
2.1.3 日本における宇宙医学研究	3
2.2 日本の宇宙医学の現状	3
2.2.1 宇宙環境利用による日本の宇宙医学研究の現状	3
2.2.2 高まる宇宙医学の研究機会	3
2.3 宇宙医学研究の課題	4
2.3.1 宇宙医学研究の特殊性	4
2.3.2 実験装置の整備	4
2.3.3 地上における実験手段	4
2.3.4 実験運用技術の整備	5
2.4 研究成果について	5
3. 日本の宇宙医学研究シナリオ	5
3.1 日本の宇宙医学研究の目標	5
3.2 NASDA の宇宙医学研究シナリオ構築に対する基本的な考え方	6
3.3 三つのフェーズに分けた戦略計画の作成	6
3.4 各フェーズにおける研究シナリオの要素案	6
4. 基礎宇宙医学研究	7
4.1 基礎宇宙医学分野の概念	7
4.2 重点研究課題の提示	7
4.2.1 骨分野の重点課題	7
4.2.2 筋肉分野の重点課題	8
4.2.3 循環器分野の重点課題	8
4.2.4 神経科学分野の重点課題	8
4.2.5 血液、免疫分野の重点課題	8
4.2.6 放射線医学分野の重点課題	8
4.2.7 生体リズム分野の重点課題	8
4.2.8 ヒューマンファクター分野の重点課題	8
4.2.9 代謝・内分泌分野の重点課題	9
4.2.10 上記以外の分野の重点課題	9
4.3 プロジェクト研究についての論議	9
4.4 分野別の研究シナリオと次期共通実験装置に関する検討	9
4.4.1 骨カルシウム分野の検討	9
4.4.2 筋肉分野の検討	11
4.4.3 循環器分野の検討	12
4.4.4 神経科学分野の検討	14

4.4.5 上記以外の分野の検討	16
4.4.6 ヒューマンファクター研究分野の検討	19
4.4.7 平成 11 年度以降の次期宇宙実験装置に関する検討結果	21
5. 臨床宇宙医学	23
5.1 臨床宇宙医学の概念	23
5.2 臨床宇宙医学の対象範囲	23
5.3 臨床宇宙医学の研究手順	23
5.4 解決すべき課題案の提示	23
5.5 今後の検討課題	24
6. 宇宙医学分野における重点研究領域について	24
7. 宇宙医学研究に参考となる文献および関連 web site	26
7.1 宇宙医学研究に参考となる文献	26
7.2 ロシアにおける医学研究成果	26
7.3 関連 web site	27
7.4 宇宙医学に関する代表的な参考書	27
宇宙医学専門委員会 平成 10～13 年度の活動報告	28

宇宙医学分野研究シナリオ

1. はじめに

国際宇宙ステーション（International Space Station：ISS）の建設が1998年より始まり、2000年11月からは宇宙飛行士の滞在も行われている。日本初の軌道上実験モジュール（Japanese Experimental Module：JEM＝「きぼう」）が数年後に運用開始となり、日本の宇宙医学研究が軌道上で展開され、独創的で有意義な成果をあげることが期待されている。宇宙医学研究に参画する研究者の裾野を広げ、トップレベルの研究者の参加を得た国をあげての研究推進が望まれる。

日本の宇宙医学研究推進戦略を協議し必要な提言を行うことを目的として平成10年度に宇宙環境利用研究委員会／宇宙医学専門委員会が創設され、宇宙医学研究シナリオ、重点研究領域、および次期共通実験装置に関して、一般の研究者を交えて検討を進めてきた。その内容を中間報告として国際宇宙ステーション利用計画ワークショップやインターネットを利用して公開し、一般研究者からの意見を求めた後、この研究シナリオが作成された。

本研究シナリオは今後「公募地上研究における重点研究課題の設定」、「ライフサイエンス国際公募」、および「次期共通実験装置候補の選定」等に反映される予定である。また、研究者からの要望および研究の進捗状況を考慮しながら、必要に応じて改訂作業を行うものである。

最初に、本研究シナリオと、「ライフサイエンス分野」研究シナリオ、公募地上研究における「宇宙医学」、「バイオメディカル」、「生物科学」の各評価パネル、及び宇宙開発事業団 宇宙医学研究開発室の実施するプロジェクト等の関連について、解説する。

本シナリオの第4章「基礎宇宙医学」は、公募地上研究における、「バイオメディカル」と「宇宙医学」の両パネルを対象としている（「バイオメディカル」は生物科学と医学の複合領域であり、生物科学の観点からの研究については「ライフサイエンス分野」研究シナリオを参照して頂きたい）。以下、本シナリオにおける、「バイオメディカル」と「宇宙医学」の考え方を記す。

「バイオメディカル」

基礎科学的な側面を重視した基礎医学関連を中心とした研究、及び人間の生物学に関連する生命科学研究

宇宙環境の影響に対する生体応答のメカニズムの解明が主体。宇宙環境を利用した、基礎医学研究も含む。

主な研究課題例

- ・細胞や動物を用いた、分子生物学的手法による基礎医学研究。
骨、筋肉、神経、免疫、等
- ・テレメトリー、近赤外線等を用いた、長時間、低侵襲、無拘束システムによる、生理学的データ取得。

「宇宙医学」

臨床応用を視野に入れた、医学研究。

人体の、宇宙環境への適応や、宇宙から地上に帰還した際の再適応を支援する研究が中心の課題。

主な研究課題例

- ・ヒトを対象とした、個体レベルの研究：起立耐性低下の対策に関する研究
- ・骨量減少に対する薬剤の開発に関する研究

尚、本シナリオの第5章で記載されている「臨床宇宙医学」では、宇宙開発事業団 宇宙医学研究開発室の行う、宇宙飛行士の健康管理に直結する研究を対象としている(例：長期宇宙滞在に適した飛行士選抜：尿路結石を生じやすい人の判別法)。

この分野は、公募研究の対象ではないが、今後、宇宙医学研究開発室が独自に公募研究を行うことも有り得る。また、公募研究の中で、健康管理に意義のある研究テーマを宇宙医学研究開発室が取り入れることも検討中である。

本シナリオでは第3章に基礎および臨床宇宙医学研究に共通する研究シナリオの基本方針、第4章に基礎宇宙医学研究、第5章に臨床宇宙医学研究、第6章に平成13年度に検討された宇宙医学分野における重点研究領域について記述した。また、実際の公募研究への応募に当たり「宇宙医学」、「バイオメディカル」、及び「生物学」に該当する研究テーマについては、公募の案内に記載されているテーマ分類表を参照されたい。

2. 宇宙医学研究の歴史、現状及び課題

2.1 宇宙医学研究の歴史

2.1.1 宇宙医学研究の始まり

第2次世界大戦終了後の1940年代後半ころより、宇宙を制するものは世界を制するという発想から米ソの宇宙開発競争が始まり、それとともに有人宇宙飛行の実現に向けてその基礎となる宇宙医学の研究が開始された。初期にはサルを使った弾道飛行実験などの動物実験が主として行われ、さらに航空医学を発展させた研究や風船などを用いた高高度飛行の実験などにより環境制御・生命維持装置の開発が行われた。1960年代には宇宙で生命を維持できる必要最小限の状態での人類の宇宙飛行が実現し、宇宙飛行にともなう人体への影響がいくつか同定されるようになった。

2.1.2 アメリカ、ロシアにおける宇宙医学研究の発展

これらの現象をさらに具体的に捉えようと企画された飛行が1972～1973年のスカイラブ計画であった。この計画では宇宙飛行による人体への影響が研究され、宇宙医学の問題点が体系的に整理されるようになった。その後、アメリカはスペースシャトルによる飛行により、ロシアでは長期宇宙滞在技術の確立に向けた飛行により、宇宙飛行が人体へ及ぼす影響と対策法の開発に向けた研究が行われて

いる。しかしながら、有人研究はクルーが実験に専念できる時間、技術的課題及び費用上の制約から実験機会が少なく、人体への影響のメカニズムの解明は遅々として進んでいない。

2.1.3 日本における宇宙医学研究

日本における宇宙医学研究は、日本人初の宇宙飛行士の選抜をきっかけに1980年ころから開始された。NASAが主体となって、欧米の宇宙医学研究の動向調査及び長期宇宙滞在の実績を持つロシアの医学研究調査を行った。さらにベッドレスト実験、パラボリックフライト実験及び閉鎖環境試験などに関する国内及び国外研究機関との共同研究が実施された。

日本の宇宙医学研究の推進をはかる目的で、1994年からは科学技術庁とNASAが中心となってフロンティア共同研究が実施され、宇宙医学の各分野における研究の活性化と研究者コミュニティの育成が図られた。しかし、委員会に参加できない研究者の不満も生じ、1997年からは誰でも応募可能な公募地上研究制度に引き継がれた。

一方、軌道上実験については、FMPT(STS-47/1992)、IML-2(STS-65/1994)、NeuroLab(STS-90/1998)およびSTS-95(1998)において日本人研究者が参加し、軌道上での宇宙医学研究の実施とそれに伴う宇宙実験技術(宇宙実験装置の開発、運用、宇宙飛行士の訓練など)を蓄積しつつある。

2.2 日本の宇宙医学の現状

2.2.1 宇宙環境利用による日本の宇宙医学研究の現状

日本の宇宙医学研究の実状は、有人宇宙飛行の経験豊富なアメリカやロシアと比べると日本人研究者が関与した宇宙実験は極端に少なく、いくつかの宇宙実験ミッションにおいて限定された研究テーマの実績があるだけである。これらのミッションを通じて宇宙実験に関わる技術を蓄積したが、研究の計画、実施に関する情報が一般の研究者に十分に提供されている状況とはいえない。

一方、フロンティア共同研究から誰でも応募可能な公募地上研究制度に移行して6年目の現在、研究者のすそ野の拡大と研究レベルの向上が徐々に図られつつある。

2.2.2 高まる宇宙医学の研究機会

これまでの国内の各研究機関における独自の研究に加えて、NASAと国内研究機関との共同研究、フロンティア共同研究プロジェクト及び公募地上研究制度などの研究推進制度により、宇宙医学研究のポテンシャルは高まりつつある。1998年からは日本もISSにおける軌道上研究を目的としたライフサイエンス国際公募に参加し、第2～4回の公募を通じて、日本の研究者の提案したテーマのうち、11件が採択され、宇宙実験に向けての準備が進められている。「きぼう」の実運用を数年後にひかえ、日本が得意とする研究分野で独創的な研究成果をあげることが期待されている。

2.3 宇宙医学研究の課題

2.3.1 宇宙医学研究の特殊性

宇宙実験に興味を持つ研究者は多いが、一般の研究者にとって宇宙実験への参加は容易ではない。その理由としては、実験機会が少ないこと、応募から実施までに要する時間が長いこと、経費が莫大で、海外出張などの人的負担も大きいことなど、地上の研究と比べて特殊な研究と認識されてきたからではないかと推察される。

また、宇宙飛行士の医学データ取得はミッション運用との関連で制限されうること、宇宙飛行士個人の医学データはプライバシーと宇宙飛行士としての資格認定との密接な関連から容易に公開されないことなど、根本的に困難な問題も内在している。ヒトを被験者とする研究実施に際しては、研究の必要性和重要性を宇宙飛行士に説明し理解と同意を得る必要があることも一般の宇宙生物学実験と異なる点である。

2.3.2 実験装置の整備

「きぼう」における日本の宇宙医学研究を促進するために、地上で使用している実験器具を小型化し微小重力環境下で使用するための改良、セントリフュージ関連装置の整備、将来的にはヒトを対象とした人工重力発生装置の開発等、多くの実験装置に関する要望が挙げられている。

軌道上で使用する実験装置は安全性や搭載性の基準を満たさなくてはならないため、その開発にはかなりの費用と年月を要する。従って、実験装置の開発を計画する場合、重点研究領域であり、成果を期待できる研究者の要求に合う装置を整備すること、数年単位で見直しを行うことが基本的に重要である。

宇宙医学の実験装置は搭乗員の操作が必要となることも多いが、次々と交代する搭乗員の技量の問題や時間的な制約から、搭乗員に多くを期待できないことも予想される。特に搭乗員の作業時間が、最も大きな制約事項である。さらに、輸送、冷凍・冷蔵庫の容量/電力量も限られていることから、可能であればサンプルの解析は、軌道上で行うことが適切である場合もある。このように厳しい制約条件の中で確実に実験を遂行するためには、装置の自動化や地上からコントロールするテレサイエンス等の技術を取り入れることが重要である。これに関連する装置・システムは地上の研究開発の進展も早く、それを適宜取り入れた宇宙医学実験システムの整備が望まれる。

2.3.3 地上における実験手段

地上で宇宙環境を模擬する実験として、ラットやマウスの尾部懸垂実験、クリノスタット、航空機や落下塔を用いた短時間微小重力実験、ベッドレスト研究及び閉鎖環境試験等がこれまで実施されてきた。これらの中で、パラボリックフライト、ベッドレスト研究や閉鎖実験はかなりの費用と支援人員の確保が必要となる。これらの施設、体制を整備する場合、研究戦略との関係および費用対成果を

考慮して進めることも重要である。

2.3.4 実験運用技術の整備

宇宙実験では、サンプルの運搬から搭載、軌道上実験、サンプルの回収まで、通常の実験室では経験しえない状況で実験を実施する。このため、装置に関する技術、宇宙実験運用中の変化に対する対応、試料に対する前・後処理、コントロール実験の実施など、宇宙実験としての特殊な問題を解決する必要がある。実験運用技術に関する経験の蓄積と、研究支援体制の整備が望まれる。

実験対象がヒトであれ動物であれ、宇宙実験ではn数が非常に限られる場合が多い。このため、限られたn数から有意差のあるデータを取得する実験系を検討すると同時に、データ取得するパラメーターを明確にし、地上実験等で事前の検証を十分に行っておくことが重要である。

2.4 研究成果について

1995～1997年に実施されたフロンティア共同研究の成果は、既に成果報告集としてまとめられている。公募地上研究は、1997年に公募が開始されてから5回目を数えるが、研究が終了したテーマについては、一般公開の形で成果報告会が行われ、また成果報告書も、今後整備される予定である。

宇宙医学研究のデータについては、国内外を問わず、得られた研究成果を整理し、データベース化しておく必要がある。

また、研究結果については、英語論文として査読のある雑誌に発表しておくことが必要である。

3. 日本の宇宙医学研究シナリオ

3.1 日本の宇宙医学研究の目標

ISSにおける宇宙医学分野での研究目標として、以下の2つが挙げられる。

(1) 「宇宙環境を利用した日本の医科学研究の推進」

日本の優れた医学研究の実績、成果を踏まえ、我が国初の軌道上実験室となる「きぼう」を有効に活用し、新たな宇宙医科学分野を開拓・推進する。

宇宙は微小重力や放射線など地上と異なる環境を有している。進化の過程で獲得した重力環境への生体の適応や放射線被曝に対する影響についての理解を深めることは生命の基本的メカニズムを解明する上で重要である。

宇宙環境を利用した研究成果を早期に創出し、地上の医学研究活動に還元することも大切である。

(2) 「宇宙環境が人間の生理や精神心理に与える影響の解明と対策の構築」

ISSでは日本人宇宙飛行士が約3～6か月間の長期の宇宙滞在をすることが計画されている。人体の宇宙環境への適応及び地球帰還時の再適応と影響についての実態を把握し、そのメカニズムを解明し、さらに宇宙飛行士の健康とパフ

パフォーマンスを維持するための対策の構築が緊急の課題となっている。
これらの対策や技術開発の成果を、人間の well-being や地上の医療活動へ還元する視点も重要である。

3.2 NASDA の宇宙医学研究シナリオ構築に対する基本的な考え方

経験と実績の乏しい日本の宇宙医学研究が国民に支持されうる研究成果をあげるためには、宇宙医学研究シナリオ構築に対する以下の3つの基本的な考え方が重要と考えられる。

- (1) 日本が世界的にリードし、あるいは独創性が発揮される研究が軌道上研究として展開され、国際的に評価されること。
- (2) ヒトの宇宙滞在のために必要な医学研究課題の解決に貢献し、その成果を地上の医療活動へ還元すること。
- (3) 今後の有人宇宙活動の推進に貢献すること。

3.3 三つのフェーズに分けた戦略計画の作成

発展途上にある日本の宇宙医学研究シナリオを策定するに当たり、10 数年間の ISS 運用期間を3～4年単位に分け、目標を明確にして戦略計画を策定すること、数年単位で計画を改訂することは有用である。現時点で考える三つのフェーズごとの目標は以下の通りである。

- フェーズ（初期）：国際的にポテンシャルの高い研究分野を推進し、成果を早期に創出
- フェーズ（中期）：重点研究として実施すべき医学研究課題の推進
- フェーズ（後期）：宇宙医学研究の高度化、および ISS 計画後のプロジェクト(惑星間飛行等)を踏まえた宇宙医学研究の推進

宇宙医学研究シナリオの策定に当たっては、宇宙開発事業団理事長の外部諮問委員会（宇宙医学専門委員会など）と NASDA が協議し、必要に応じて高い実績を有する研究者からの意見を聴取しながら研究シナリオを策定することが重要である。

3.4 各フェーズにおける研究シナリオの要素案

現時点で考えられる各フェーズにおけるシナリオ要素案を示す。これらは国内外の研究情勢の変化、戦略的体系的な研究推進に対する論議を通じて、より実際的な内容に修正される予定である。

- (1) フェーズ（初期）: 国際的にポテンシャルの高い研究分野を推進し、成果を早期に創出
 - ・宇宙医学研究に必用な情報（実験装置、過去の実験データ）の整備
 - ・重点課題の設定（基礎宇宙医学）と解決すべき課題の提示（臨床宇宙医学）
 - ・日本の独創性が発揮され国際的に競争力の高い研究、軌道上研究の成果がす

ぐに地上の研究に期待される研究への支援の検討

- ・宇宙医学研究の推進に必用な実験環境整備（次期共通実験装置、地上設備）

(2) フェーズ（中期）：重点研究として実施すべき医学研究課題の推進

- ・初期フェーズの成果・評価を踏まえた重点研究、解決すべき課題の見直し
- ・新たな重点課題、解決すべき課題の推進と推進体制の見直し
- ・日本が得意とする研究、技術開発の推進
- ・国際宇宙機関との共同研究の推進

(3) フェーズ（後期）：宇宙医学研究の高度化、およびISS計画後のプログラム（惑星間飛行等）を踏まえた宇宙医学研究の推進

- ・初期、中期の研究成果を踏まえ、より高いレベルの重点課題の設定と実施
- ・ISS計画後のプログラム（月面滞在や惑星間飛行）を想定した課題の設定
- ・日本が得意とする研究、技術開発の推進
- ・国際宇宙機関との共同研究の推進

4. 基礎宇宙医学研究

4.1 基礎宇宙医学分野の概念

ここで用いる基礎宇宙医学の概念は「宇宙環境を利用した医科学研究の推進」を目指すものである。すなわち、提案者の独創的な発想にもとづいて研究テーマが応募され、科学的な成果を重視して研究が選定・実施・評価され、国際宇宙ステーションを活用した日本の医科学研究の発展に貢献するものである。このように、宇宙環境を利用した医科学の基礎的解明と科学的成果がより重視された概念であるが、それはまた、宇宙飛行士の健康管理上の課題解決に貢献する臨床宇宙医学にも役立つことが期待される。

4.2 重点研究課題の提示

基礎宇宙医学分野における重点研究課題を提示することは、宇宙医学研究の戦略的、体系的な推進のために重要である。ここでは平成10年度の宇宙医学専門委員会の中で討議された内容をもとに、各分野別の重点研究課題を提示する。平成11年度以降の宇宙医学専門委員会では、重点医学研究課題の絞り込みの議論を行い、日本の研究ポテンシャルが早期に軌道上で展開されることに役立てる。

4.2.1 骨分野の重点課題

- (1) 微小重力における骨量減少のメカニズム
- (2) 軌道上における生体情報モニター法
- (3) 小動物を用いた臓器別集学的解析
- (4) 骨量減少予防薬

4.2.2 筋肉分野の重点課題

- (1) 微小重力における筋萎縮のメカニズム
- (2) 萎縮筋再生のメカニズム
- (3) 筋組成の個体差と、萎縮・再生の関連

4.2.3 循環器分野の重点課題

- (1) 微小重力における循環調節機構（小動物を対象）
- (2) 宇宙飛行に伴う循環動態のモニターと循環調節機構（ヒトを対象）

4.2.4 神経科学分野の重点課題

- (1) 重力環境変化が神経系に及ぼす影響の経時的解析
- (2) 姿勢、行動、眼球運動等の解析による空間識の動態
- (3) Virtual Reality を用いた神経情報処理機構解析
- (4) 前庭自律神経反射
- (5) 各種 imaging 手法、脳磁図などを用いた高次脳神経機能解析

4.2.5 血液、免疫分野の重点課題

- (1) 宇宙環境と血液
- (2) 宇宙環境と免疫機能

4.2.6 放射線医学分野の重点課題

- (1) 宇宙放射線の影響解析（分子、遺伝子、細胞、臓器レベル）
- (2) 宇宙放射線による発癌、および次世代への影響

4.2.7 生体リズム分野の重点課題

- (1) 宇宙滞在が生体リズム・睡眠に及ぼす影響
- (2) 宇宙滞在における生体リズム・睡眠の制御法

4.2.8 ヒューマンファクター分野の重点課題

- (1) (宇宙飛行士における)危機回避を目的とした手法の検討
- (2) ヒューマンファクターに関連する各種の評価・対処方法に対する妥当性・有効性の検討
- (3) 日本人の特性に関する研究

4.2.9 代謝・内分泌分野の重点課題

- (1) 宇宙環境におけるエネルギー代謝
- (2) 宇宙滞在と内分泌系

4.2.10 上記以外の分野の重点課題

- (1) 生理機能を維持するために必要な最小重力レベル
- (2) 宇宙環境と呼吸器系、消化器系
- (3) 宇宙滞在における衛生管理
例えば、微生物相、特に紫外線・放射線耐性菌の探索・同定と解析
- (4) 宇宙と生殖機能

4.3 プロジェクト研究についての論議

宇宙医学の研究推進体制としては研究者が指定されたフロンティア共同研究制度から、誰でも優れた研究テーマを応募可能な公募地上研究制度（および軌道上研究の国際公募）に移行し、研究者のすそ野を広げるオープンな研究助成体制が進められている。

一方、特定の課題を抽出し、異なる技術と経験を有する研究者からなるプロジェクトグループを形成し、研究を先導的・戦略的に推進する体制を整備すべきだとの要望もあり、その実施の可能性、体制も含めて今後の課題として検討されている。

公募地上研究では、研究終了後の成果報告会を一般公開で行っており、研究成果の公表と、研究者の交流の場と位置付けている。また、類似の研究テーマ、課題等については「研究コミュニティ」という名の研究会を開催し、相互に研究成果や課題について議論すると同時に、今後の共同研究等の可能性につながるものと期待している。これまで、細胞内情報伝達（シグナルトランスダクション：平成12年3月1日）、宇宙実験へのアプローチ（平成12年11月28日）等をテーマとして研究コミュニティが開催されている。しかしながら、実際の宇宙実験のプロジェクト化には至っておらず、今後の検討課題である。

4.4 分野別の研究シナリオと次期共通実験装置に関する検討

ISSにおける研究を有効に促進するためには、日本からの研究要望にそった共通実験装置を整備する必要がある。平成10年度の宇宙医学専門委員会では公募地上研究制度から研究助成を受けている研究者からの意見を聴取しながら分野別の検討（現状分析、重点研究項目、開発すべき装置、および期待される成果）がなされた。

4.4.1 骨カルシウム分野の検討

4.4.1.1 研究の必要性和現状分析

- (1) 骨の成長、維持、改変は重力と密接な関係があり、微小重力における骨萎縮

や尿路結石の問題は人類が宇宙に滞在を行う上で最も重要な解決すべき課題の一つである。

- (2) 日本の骨代謝研究は世界をリードする研究実績をあげている。例えば、骨代謝に関連した種々のホルモン、そのレセプター、サイトカイン等のノックアウトマウスやトランスジェニックマウスを日本で独自に開発しており、それらを用いることで、重力影響の鍵となる因子の解明や、微小重力の影響を模擬した実験動物の開発が期待される。また、骨代謝マーカー、骨代謝遺伝子解析についても、日本独自の技術と成果を有している。
- (3) 医学関連機器（画像診断装置、モニター技術、分析機器）の開発技術力は世界的レベルにあり、地上の装置を小型化し、複数の機能をコンパクトにまとめて軌道上で応用化できる能力がある。

4.4.1.2 重点研究として推進すべき項目

(1) 微小重力における骨量減少のメカニズムに関する研究

- 1) 骨代謝に関係ある動物実験（ノックアウトマウス、トランスジェニックマウス等の利用）
- 2) 微小重力における骨形成と骨吸収の体系的解析（マーカー、遺伝子解析、骨形態計測、病理学的解析等）

(2) 軌道上における生体情報モニター法の開発

- 1) 軌道上骨密度解析装置、骨画像診断装置の開発
 - a) 高分解能、非（低）侵襲の骨密度解析装置（軌道上の変化に比べて誤差が小さい、非侵襲、操作が簡単、小型化が要求される超音波骨密度装置等）
 - b) 骨画像診断装置（小型、低被曝のX線透視・撮影装置）
- 2) 超微量生体（血液、尿、唾液、糞便）試料による生体機能解析法の開発

(3) 微小重力が小動物の生体に与える影響の臓器別、集学的解析

複数の専門家（生理学、病理学、分子生物学等）からなる日本を代表する病態解析プロジェクトチームを結成し、ラットやマウス等の小動物を一定期間微小重力下に暴露させ、臓器別に生体への影響を検証する。

(4) 骨量減少予防薬の検討

上記のような、微小重力環境における骨吸収促進、骨形成低下のメカニズムに関する研究成果に基づいた、骨量減少予防薬の検討と開発。

4.4.1.3 優先して開発すべき次期実験装置

- (1) ビデオカメラモニター付小動物飼育装置、サンプル保存用冷凍庫
- (2) 軌道上の骨密度等解析装置（超音波等） 画像診断（X線透視・撮影）装置
- (3) 超微量生体（血液、尿、唾液）試料による生体機能解析装置

4.4.1.4 期待される研究成果と今後の展望

- (1) 重力が骨代謝に果たす役割を解明する。微小重力における骨形成および骨吸収のメカニズムが解明されれば、高齢者に多く発生する骨粗しょう症や骨軟化症等その他の骨代謝に関連する疾患の治療法の開発に将来貢献しうる。
- (2) 簡便で正確な骨密度解析法の開発は日本や世界の医療の現場にすぐにも活用されうる。超微量生体試料による生体機能解析法の開発は未熟児の診断や治療、またはスクリーニングとして活用され、地上の医療に貢献しうる可能性がある。

4.4.2 筋肉分野の検討

4.4.2.1 研究の必要性和現状分析

- (1) 宇宙滞在により傍脊柱筋や下肢のヒラメ筋においてその萎縮は著明にあらわれる。これらの変化は宇宙飛行士が地上への帰還後に筋力や体力の低下を来し、健康管理上大きな問題である。
- (2) 宇宙医学に関連した筋肉分野の研究は、ごく限られた一部の研究者によりなされてきており、しかもその内容は筋萎縮の現象の把握とそのメカニズムの解明に焦点を当てるといふ非常に狭い研究領域においてなされてきた。
- (3) 地上での筋研究に際してはヒトではベッドレスト、ラットでは尾部懸垂など無重量状態の模擬実験方法として用いられているが、これらには限界がある。

4.4.2.2 重点研究として推進すべき項目

- (1) 微小重力における筋萎縮のメカニズムに関する研究

日本には筋構造蛋白の基礎研究者が多いので、生化学的、分子生物学的なアプローチが可能である。基礎生物学者に研究参加を呼びかけることで世界をリードできる。

- (2) 萎縮筋再生のメカニズムに関する研究

この分野での研究は少ない。恒久的な筋の変化を来さないように再生促進について研究を進めるべきである。特に筋衛星細胞を活動化させる遺伝子（MyoD, myogenin） growth factors についての研究が重要である。

(3) 筋組成の個体差と、萎縮・再生の関連性に関する研究

筋肉の組成には個体差があるが、それが萎縮と再生に及ぼす影響のメカニズムについての研究を行う。この研究は、各個人に対するトレーニングやリハビリのプログラムを作成する際に、有用と考えられる。

4.4.2.3 優先して開発すべき次期実験装置

(1) 近赤外線装置

小型で再現性があり、測定が容易なもの。筋の血流状態を知るのに最もよい。

(2) エコー機器

現在のエコーは大型で、また筋量の測定は容易ではない。小型でかつ再現性ある記録を残すことができる安定した装置を開発すべきである。

4.4.2.4 期待される研究成果と今後の展望

(1) 宇宙関連の筋肉研究領域における研究の質の向上が図られ、多くのトップレベルの研究者の参加が期待される。

(2) 地上模擬実験技術や宇宙実験技術手法の改善が図れる。

(3) 筋ジストロフィーなどの筋萎縮を来す疾患の原因究明の足がかりやそれらの対策法の開発につながる可能性がある。また同時に高齢化による筋萎縮の対策法への応用の可能性もある。

(4) 寝たきり老人や長期臥床患者などの人たちへの効果的なりハビリテーション技術の開発につながる。

以上を通して今後より多くの研究者の参加により筋関連の研究の裾野を広げ、より広範かつ詳細な知識を取得して宇宙での筋萎縮のメカニズムの解明、その対策法の開発を行うことができると考えられる。一方、宇宙医学のみならず、これら得られたデータから老年医学 など地上の臨床医学への貢献にも十分に寄与できると考えられる。

4.4.3 循環器分野の検討

4.4.3.1 研究の必要性和現状分析

(1) 微小重力下における循環器系のデコンディショニングのメカニズムの解明は、微小重力がヒトに及ぼす影響の中でも、重要な研究課題である。循環動態の変化を自律神経調節機能、内分泌・代謝機能、体液・体温調節機能、運動機能（筋ポンプ作用）などと共に総合的、経時的に研究し、その対策法を確立することが望まれる。しかしながら、ヒトを対象とする研究はクルーが被験

者となるため運用上の制約を受けやすく、簡便で非（低）侵襲的な手段を駆使する研究を計画する必要がある。

- (2) ヒトでは実現不可能な検査、観血的処置を要する研究などには、小動物を用いた研究が重要となる。国際宇宙ステーションではクルーが交代で実験することを考慮すると、あらかじめ測定装置を埋め込んだ動物を作成し、計測データはテレメトリーで取得するようなシステムを構築することも重要である。すでに公募地上研究の助成を受けてテレメトリーの試作器として開発中のものもあり、これをもとに軌道上の汎用共通実験装置として展開すべきである。
- (3) 日本が開発し ISS に搭載するセントリフュージを有効に活用し、重力変化と生理機構との関係に関する動物を用いた研究を戦略的に推進すべきである。

4.4.3.2 重点研究として推進すべき項目

- (1) 微小重力下における循環調節機構の総合的解明（小動物を対象）
（循環動態、自律神経機能、内分泌機能・体液調節、微小循環、血管内皮細胞・受容体機能などの面から総合的に検討する。）
- (2) 非（低）侵襲的方法による軌道上での循環動態の変化および地上への帰還後の起立性低血圧のメカニズムの解明（ヒトを対象）
（循環動態、自律神経機能、内分泌・代謝機能、体液・体温調節機能、運動機能などの面から総合的に検討する。）

4.4.3.3 優先して開発すべき次期実験装置

- (1) 小動物用テレメトリーシステム（循環動態、自律神経活動などのテレメトリーシステム）
- (2) セントリフュージの研究に必要な機器の整備（X線装置、モニター付きビデオカメラを用いた小動物飼育装置など）
- (3) 軌道上の脳循環、筋血流、皮膚血流・発汗量測定装置、体液分布測定装置（赤外線吸光スペクトロスコーピー、脳および筋肉血流量測定装置、皮膚血流・発汗測定装置、簡易プレティスモグラフィ、バイオインピーダンス測定装置など）

4.4.3.4 期待される研究成果と今後の展望

- (1) 軌道上の小動物用のテレメトリーシステムを構築できれば、多様な種々の測定装置を埋め込むことにより、循環病態の機序を系統的かつ体系的に研究することが可能となる。
- (2) 日本が開発するセントリフュージを最大限に活用することにより、重力が生

体に及ぼす影響を系統的かつ戦略的に研究することが可能となる。また、人工重力に関連した研究を推進することにより、将来、日本の研究が世界に先導的な役割を果たす素地ができる。ヒトを対象とする人工重力負荷装置を開発する上での基礎的研究としても役立つことも期待される。

- (3) 非（低）侵襲的かつ簡便に脳循環、筋肉血流量、皮膚血流・発汗量あるいは体液分布を測定し得る装置が実用化すれば、臨床医学、とくに救急医療現場における診断や移植・再建手術における利用、リハビリテーション医学、スポーツ医学、老年医学、麻酔・蘇生学などの分野にも貢献できる可能性がある。

4.4.4 神経科学分野の検討

4.4.4.1 研究の必要性と現状分析

ヒトが異重力環境間を移動（例えば1 G からマイクロG）した場合やマイクロG環境に長期滞在した場合、それが3次元空間識に及ぼす影響とか、行動学つまり頭頸部の動きなども含む姿勢制御や精細な行動のあり方、そして更に眼球運動機能、これらの適応の動態、限界、そしてその恒常性の維持に関連する、末梢感覚器レベルから広域の高次脳神経レベルに及ぶ研究は、ヒトが国際宇宙ステーション内で、又、帰還後に最も desirable な方式で行動しうるために、そして又宇宙飛行士の訓練のあり方などにとって極めて重要である。姿勢平衡維持のための入力及び出力の解析や、行動 strategy の変化、そして動眼機能の変化の解析を通じて、神経系各部の機能分担の追求が可能になる。

さらに小動物を用いて機能検査に直結した神経化学物質、レセプターや蛋白、遺伝子などの変化がどのように起こるかを検討することにより、神経系の適応の実態の把握が可能となる。

4.4.4.2 重点研究として推進すべき項目

- (1) 重力環境変化が神経系に及ぼす影響の経時的解析（機能的、神経化学的、分子生物学的）

長期宇宙滞在中、或いはマイクロG環境より地球へ帰還の後での神経系の経時変化が実際にどこで、どのように起こっているかを確認するには、小動物実験が必要である。Behavior にもとづく機能計測、また、耳石入力に関連する前庭系ニューロン（例えば前庭核ニューロン）活動の長期継続記録、そして脳各部（例えば前庭核、小脳虫部、海馬、視床下部）よりサンプルを経時的に（例えば micro-dialysis で）取り出し、神経化学物質の動態を把握したり、レセプターを、遺伝子(mRNA)発現として分子生物学的に解析したりしてゆくことで、何がどこでいつ大切かという実態を確認する。これらのアプローチを用いた地上実験の基盤にのって宇宙実験をデザインすることは極めて重要である。

(2) 姿勢、行動、眼球運動等の解析に基づく空間識の動態の研究

1 G及びマイクロG下での運動入出力系の機能と高次中枢などからの制御にもとづく姿勢平衡維持や精細な行動の strategy の解析（ヒト及び動物）は、身体各部につけた加速度計や各種センサーにより pick - up され、適切な program を通して解析される(X, Y, Z 3 軸)。将来的には更に直接的な記録、解析法が用いられる。同時に3軸眼球運動を video - camera 法や search-coil 法にて記録、そして解析する。脊髄運動系と眼球運動系の対比を行うことにより、長期宇宙滞在を含む異G環境下での各系及び各軸の平衡維持への寄与度、重要度の変化を経時的に比較し把握しうる。地上研究での基礎が重要。

(3) Virtual Reality を用いた、神経情報処理機構の研究

Virtual Reality を用いることでヒトの視覚、前庭覚、体性覚からの入力を別個にコントロールすることも可能となるので、各系間の依存度の比較検討（例えば視覚情報への依存の増強）が経時的に可能となる。更に依存度の増減の意義の研究や、耳石入力の変化に伴って体性覚入力の亢進をはかったりすることは、宇宙飛行士の訓練や長期滞在時の対策にも役立つ。

(4) 前庭自律神経反射の研究

前庭自律神経反射の研究は、身体平衡系と他の全身系、例えば心循環器系などとのつながりを追求することになり、他系との相関の見地から重要と考えられる。

(5) 各種 imaging 手法、脳磁図などを用いた高次脳神経機能の解析

高次脳神経機能に関連して半定量が可能な imaging technology は、f.MRI を含めてすでに臨床で視覚や聴覚入力と関連して用いられている。更に脳磁図、他の手法を含めた感覚入力の変動に伴う高次脳神経各部の機能の検査は、特に帰還後の脳機能を知る上で直接的意義を持っている。

4.4.4.3 優先して開発すべき次期実験装置

- (1) 3次元行動・姿勢解析装置（加速度計、ビデオカメラ、磁気センサー、解析用ソフト）
3次元眼球運動解析装置（ビデオカメラ、解析用ソフト、代替用サーチコイルシステム - 検討中）
- (2) Virtual reality 訓練装置（多 modality 訓練装置）
（視覚情報を Virtual reality で、他 modality は別個または連動）
- (3) 視運動性刺激用の大型スクリーンの開発が必須（狭小型では不十分）
Eccentric rotation 可能な回転イス（NeuroLab で使用）
- (4) Centrifuge、tele-medicine 等については他分野と同じ。

4.4.4.4 期待される研究成果と今後の展望

身体平衡系、前庭神経系、行動系の宇宙適応、そして1G再適応の動態、限界、維持の研究は各種 modality 入力を積分化して機能するこれらの系に発生する疾患（例えば、内耳疾患）の診断や治療に直接的に貢献している。宇宙適応の研究により得られた多くの情報は1G下の平衡代償に大きく寄与している。これは耳科学、眼科学のみならず、神経内科学、脳神経外科学、整形外科（例えば、鞭打ち症の後）、リハビリ医学、老年医学、スポーツ医学等ヒトの姿勢や行動に関連しての“QOL”に極めて重要な貢献をしている。

4.4.5 上記以外の分野の検討

4.4.5.1 研究の必要性和現状分析

骨、筋肉、循環器、神経科学以外でも重要な分野が多いが、これらの領域における公募地上研究の助成を受けている研究者の数が少ないために、平成10年度の宇宙医学専門委員会における研究者からの意見交換はまとめて協議された。

(1) 感染症・血液・免疫・アレルギー

長期宇宙滞在においては、免疫能が低下すると言われているが、その機序や、定量的な評価については、データが乏しく、実体を把握しているとは言い難い。一方、少人数で長期間滞在する環境においては、一度感染症が発生すれば、それが重大な問題となるのは、明らかである。閉鎖環境では、アレルギーが発症すれば、致命的な問題に成りかねない。また、微生物の宇宙環境での変異、宇宙放射線やストレスの影響等、関連する問題も多い。長期宇宙滞在を迎えるに当たり、この分野の研究は必須である。

(2) 宇宙放射線の影響に関する研究

ヒトの宇宙滞在において、宇宙放射線被曝に対する影響の解明と対策の構築は最重要の課題であり、健康管理上の問題としても取り組まれている。基礎医学研究の観点からは、宇宙放射線の影響について、分子・遺伝子・細胞レベルでの解析、各臓器に対する影響、発癌のリスクや遺伝的影響等、取り組むべき課題は、まだまだ多いと考えられる。

(3) 生体リズムの研究

宇宙滞在では生体リズムの乱れが指摘されており、特に長期滞在においてはクルーのパフォーマンスに影響を及ぼす重要な因子と考えられ、そのメカニズムの解明は重要な課題である。

(4) 上記以外の研究課題

- a) 宇宙環境における代謝・内分泌系の変化に関する研究
- b) 生理機能を維持するために必要な最小の重力レベルの検討
- c) 宇宙環境の呼吸器系、消化器系への影響
- d) 宇宙と生殖機能

4.4.5.2 重点研究として推進すべき項目

感染症・血液・アレルギーと宇宙放射線の影響の分野では、研究手法としては共通する部分が多い。近年の細胞分子生物学の急速な発達を考慮すると、遺伝子や分子レベルの解析が重要と考えられる。以下の短・中期の影響としての分子・遺伝子レベルでの影響と長期の影響としての細胞、生体への影響が検討されるべきと考える。

(1) 短・中期宇宙環境下における分子・遺伝子レベルでの細胞・生体の変化の解析

宇宙環境下で短～中期の間での変化を、分子・遺伝子レベルで解析する。宇宙ステーション初期では、簡便性の点から、微生物、培養細胞、ヒトリンパ球、及び腸内細菌が、サンプル候補である。

(2) 長期宇宙環境下による細胞・生体の可塑性の有無、及び遺伝的影響

宇宙環境が生体に及ぼす長期的な影響の指標として、細胞・生体の可塑性の有無、及び遺伝的影響の解析を行う。サンプルとしては、微生物、培養細胞、腸内細菌がステーション初期の候補として考えられる。また、実際にフライトを経験した宇宙飛行士を長期間フォローするのも、有用なデータとなる。宇宙で動植物を継代飼育することも重要であるが、装置の点から、次期の研究になると考えられる。

(3) 宇宙滞在が生体リズム・睡眠に及ぼす影響

宇宙滞在における睡眠・生体リズム・行動特性を検証し、そのメカニズムに関する研究を行う。特にアクチグラム（加速度から活動度を検出する機器）は、既に宇宙でも用いられている簡便な装置であり、宇宙飛行士全員に装着することにより、有用なデータの蓄積が望める。

4.4.5.3 優先して開発すべき次期実験装置

(1) 動物飼育装置、及び細胞培養を含む分子生物学的実験設備

研究課題はいくつかに分かれているが、動物飼育、及び細胞培養を含む分子生物学的な実験設備の要求が高かった。すなわち、これらの設備は、現在の医

学・生物学研究を実施する上で、基本的なインフラストラクチャーと言える。

(2) その他装置

宇宙医学専門委員会ではそれぞれ1名の研究者からしか提案が無かったが、特に重要度が高いもの、及び現在開発・検討中の装置とスペックが共通しているものとして、以下の装置が上げられた。なお、4.3.5.2.(2)で上げられたアクチグラムは既に完成した機器で、宇宙利用の実績もあるため、特に次期開発装置としてのリストには入れていない。

- ・人体ファントム
- ・テレメーター・システム
- ・X線撮影装置
- ・(超)長期生体モニタリング・システム

4.4.5.4 期待される研究成果と今後の展望

- (1) 今日、医学・生物学的研究において、細胞分子生物学は、既に日常的な研究手法である。最新の医学・生物学の研究成果を取り入れるためには、最低限、細胞分子生物学の設備を整えることが必要条件である。それは必ずしも、宇宙ステーション上に完全な実験設備を要求することを意味する訳ではない。現在、細胞分子生物学関連の器具・装置は小型化が進んでおり、それ程大がかりな装置を準備しなくても、かなりのことが出来るようになって来ている。また、サンプルを適切に持ち帰るだけでも、大きな成果が期待される。重要なのは、進展著しい地上の科学技術を適宜取り入れ、宇宙ステーションで実験の意義のあることと実現可能な技術を整理し、実験環境を整備することである。また、この分野では日本が得意とする技術も多い。更に、細胞分子生物学関連の器具・装置の小型化、高機能化を推進することは、地上の研究設備に対しても貢献するところが大きいと考えられる。
- (2) 宇宙環境の影響の指標として、遺伝子レベルの変化、また長期的には遺伝的評価を考えるべきである。宇宙の環境は、様々な点で、地球とは大きく異なっている。代表的なものとして、微小重力と宇宙放射線が上げられるが、それ以外にも、閉鎖環境、ストレス、磁場、等様々である。これらの要因の一つ一つについての研究も大切ではあるが、現象と個々の要因の関連性を解析するのは容易では無く、またそれぞれの環境要因の積み重ねだけでは説明出来ないという意見もある。宇宙環境の影響を総合的に評価する指標が必要であるが、それは、遺伝子レベルの変化、長期的には遺伝的変異に帰着されると考えられる。これはストレスレベルを定量的に評価することにも関連しており、その手法が確立されれば、一般的に環境が生体に及ぼす影響を知る上で、非常に有用な手段になることが期待される。
- (3) 生体リズムについては、遺伝子レベルも含めて、進展著しい研究分野である。生体リズムの基礎的なメカニズムは、生命現象の基本原理に結び付いていると考えられており、この分野の研究の推進は、きわめて大きな意義を有する

と考えられる。また、宇宙飛行士のパフォーマンスの向上に対しても、大きな意味を持つことが期待される。

4.4.6 ヒューマンファクター研究分野の検討

4.4.6.1 研究の必要性と現状分析

本研究シナリオで対象とするヒューマンファクターは、主として医学・心理学・労働科学の観点から、宇宙環境におけるヒトの行動・精神心理特性を主題とし、それに基づいて宇宙飛行士の健康と安全も視野に入れた研究領域と考える。本研究分野では、人間の行動・精神心理特性に影響を及ぼす環境要因と、その環境に適応していく過程の両面から、基礎的な検討を積み重ねていくことが基本と考えられる。既に宇宙ステーションにおける長期宇宙滞在も開始されているが、1ヶ月以上の宇宙滞在の経験を有するのは、極めて少数の限られた飛行士のみであり、長期宇宙滞在が人間の行動・精神心理特性にどのように影響を及ぼすかは、あまり明らかにはなっていない。逆に宇宙でのこのような基礎研究を通じて、地球上においてヒトの特性を形成する上で必要な要因が明らかになることも期待される。ここで言う宇宙環境とは、微小重力、宇宙放射線等の物理要因だけでなく、限られた空間・環境・人員で、数ヶ月に及ぶ長期間、共同で作業・生活を共にする、衣食住に関わることも含む。

宇宙におけるヒューマンファクター研究のもう一つの目的として、ヒトの長期宇宙滞在に資することが挙げられる。宇宙飛行士の健康管理は宇宙開発事業団の本務であるが、上記の基礎研究を通じて、ヒューマンファクターに関わる各種の評価方法・対処法について、より多くの優れた研究成果を取り入れ、科学的なアプローチを推進することは極めて重要である。その際、完成後10年間の運用が予定されている国際宇宙ステーションの宇宙飛行士のみならず、それ以降の長期有人宇宙活動への応用も重要な課題と考えられる。また、実際の宇宙実験に当たっては、地上における長期閉鎖実験を含め、実験手法が地上において十分に検証されている必要があり、そのような地上実験も、本研究シナリオの視野に入っているものである。

本分野に関しては、既に長期宇宙滞在も開始されており、また宇宙開発事業団として、これまでロシアで行われた長期閉鎖実験への参加、1999年国際ワークショップの開催、文献調査等を行っていることから、これらの実績を踏まえた研究の立案が必要である。

4.4.6.2 重点研究として推進すべき項目

(1) (宇宙飛行士における)危機回避を目的とした手法の検討：

地球から離れた環境において、特に医学的・心理学的・労働科学的な観点からの破綻に基づく危機は、最も避けるべき、最重要課題である。そのため、破綻を事前に、あるいはその過程を正確にモニターする方法、回避を支援する手法、具体的にはパフォーマンス・精神心理・人間関係を対象とする各種の評価手法の妥当性、ストレス対処法、及び生体リズム・疲労のメカニズムとパフォーマンスに及ぼす影響等の研究課題が重要である。その際、宇宙飛行士という

人間集団が、宇宙という特殊な環境の中で、集団として適応し、葛藤し、問題解決を試みる、という現実の過程を念頭に置いておく必要がある。また、この課題は宇宙飛行士だけでなく、地上支援要員や宇宙飛行士の家族も視野に入れておくことが大切である。

重要研究課題

パフォーマンス計測手法に関する研究

宇宙環境において、精神心理面に影響を及ぼす要因の検証

宇宙環境で生じる精神心理的ストレスへの支援方法の検討

生体リズム・疲労がパフォーマンスに及ぼす影響の検討

小集団におけるグループダイナミクスに影響を及ぼす要因の検討

小集団が特殊環境に適応する過程の研究

宇宙環境で有効なストレス対処法に関する研究

- (2) ヒューマンファクターに関連する各種の評価・対処方法に対する妥当性・有効性の検討：

宇宙飛行士の選抜・訓練・支援で用いられている各種のパフォーマンス・精神心理に関連する評価方法、ストレス対処法等について、その妥当性・有効性をより客観的・科学的に検討することが重要である。例えば、精神心理評価については、評価基準として用いられている行動指標・心理指標に対して、神経生理・生化学的計測を含めた他の評価尺度との照らし合わせや、長期のフォロー等により、客観性を高めることを検討する、ストレス対処法では、そのメカニズムと効果について、科学的データの裏付けを積み重ねていくことが挙げられる。

重要研究課題

疲労と疲労回復のメカニズムと評価基準に関する研究

脳神経伝達物質とパーソナリティの関連性に関する研究

生体リズムの基礎的メカニズムと計測指標の妥当性に関する研究

- (3) 日本人の特性に関する研究：

日本人の特性と言った場合、異文化等、精神心理に関するものと、生体リズム・栄養代謝等、生理に関するものが考えられる。日本としてヒューマンファクター研究に取り組む上では、この両方の観点から、日本人特有の問題の有無とその対処法を明確にしておく必要がある。

重要研究課題

異文化への適応に関する研究

メンタルヘルスに関わる要因の研究

生体リズム・疲労に関する日本人の身体的・社会的特性について

4.4.6.3 重点課題より期待される研究成果

- (1) 上記のように医学的・心理学的・労働科学的な観点からの破綻に基づく危機は、宇宙滞在において最も避けるべき最重要課題であるが、そのような危機を招来する要因、及びそれを予測する指標が確立されれば、地上においても特に安全管理が要求される職種、例えば各種交通機関の運行に携わる業務等

において、非常に大きな成果が期待される。

- (2) 反復使用による学習効果や、意図的な回答を防ぐ、客観的なパフォーマンス・精神心理の評価手法が確立されることで、1)の危機回避を含め、航空機、原子力発電関連施設、深夜勤労働をはじめとする様々な場面での応用が期待できる。また、異なる文化背景を有するクルーに共通利用可能な標準的な評価尺度が確立できれば、国際化が進む現在、様々な応用面が考えられると同時に、3)の日本人の特性の検討にも繋がる。ストレス対処方法については、危機的状況下におけるストレスとストレス反応のメカニズム、ストレス対処のための訓練法や自己管理法、カウンセラー・精神科医の介入方法の研究が進展することで、宇宙環境滞在に類似した精神的負荷の高い職業などへの応用が期待できる。さらに神経科学・行動科学などの広い分野の展開に繋がることも期待される。
- (3) 交通・通信手段の発達による文明のグローバル化、日本文化の欧米化、また種々の医学基準の国際間での比較検討等が進む中で、日本人としての特性を科学的に明確にしておくことは重要で、またその意義も大きい。

4.4.6.4 ヒューマンファクター研究分野全般により期待される成果

- (1) 宇宙ステーションにおけるヒューマンファクター研究に当たっては、地上からの交信、即ち遠隔支援が主体となる。テレメディスンは、地上でも研究が盛んであるが、医療に限らず、パフォーマンス、心理学まで含めた遠隔支援方法が確立されれば、そのニーズは大きい。
- (2) 近年、精神医学や心理カウンセリングにおいて、精神心理面で問題を抱えている人だけを対象とするのではなく、健康で一般的な人への支援、及び予防医学的な観点からのアプローチが重視されつつある。宇宙において、この分野の研究が推進されれば、より一層、地上における健常人、及び予防的な取り組みの確立に貢献することが期待される。
- (3) 既に長期宇宙滞在が実現しているが、このような時代を迎え、宇宙開発が人の認知・意識構造にどのような変化をもたらしているかは、未だあまり研究されていない。このような視点に立った研究は、有人宇宙開発の目的と意義を検証すると同時に、地球環境においてヒトの特性形成に関わる要因を明確にする上でも重要であり、またその科学的意義も大きいと考えられる。

4.4.7 平成 11 年度以降の次期宇宙実験装置に関する検討結果

平成 11 年度の宇宙医学専門委員会では NASDA の技術的評価、他国の開発状況の検討を踏まえて次期共通実験装置に関する要望の集約を行い、その優先度を検討した結果を表 1 に示す。

表1．宇宙医学研究分野における与圧部実験装置案

候補装置名	装置機能概要	選定理由	優先度
ポータブルX線撮影、デジタル解析装置	X線による撮影診断装置。CCDにて撮影、ラップトップコンピュータで処理し、画像解析が可能。	フィルム不要・現像不要の利点。海外に無く、国際的に開発が期待されている。	1
赤外線による非侵襲酸素モニター	皮膚の上から近赤外線により血液中の酸素量、血流量を計測。	宇宙滞在による筋萎縮を酸素消費量および血流量を指標として測定可能。	1
血液、尿、唾液等の採取・保存キット	搭乗員の生体試料を軌道上で採取保管し、帰還後に解析する。	宇宙医学の基本的な機材でありNASAも保有しているが、使用頻度も高く米国研究者が優先して使うので、購入も含めてNASDAで整備する必要あり。	2
小動物処置セット	ラットやマウスを軌道上で処置し、冷凍保存する。	小動物実験の基本的な機材でありNASAも保有しているが、使用頻度も高く米国研究者が優先して使うので、購入も含めてNASDAで整備する必要あり。	2
体脂肪計	全身の体脂肪率の測定装置	体脂肪を計測する装置がない。地上品の精度向上を検討する。	3

優先度1の装置としては、ポータブルX線装置/デジタル解析装置、赤外線による非侵襲酸素モニター装置が上げられたが、医学運用上の要求も高いことから、現在、ポータブルX線装置に焦点を当て、研究者や利用者からの要求の取りまとめや装置開発の可能性について、検討を進めている段階である。

一方、公募地上研究平成12年度選定テーマで、宇宙医学分野ではフェーズIIとして、小動物のテレメトリーシステムを用いた研究テーマが採択されている（国立循環器病センター 砂川賢二部長）。このテーマを基に、宇宙での小動物を対象としたテレメトリーシステムについて、NASDAの技術開発として開発を進めることを検討している。

ここに取り上げられなかった装置も、ISS搭載上の優先順位が低いために、装置としての重要性を否定するものではない。今後、ISS計画の進展に伴い、再度検討する機会もあるものと思われる。また2.3.2項で触れたように、実際の宇宙実験については各種の制約が大きいため、自動化・遠隔操作といった考え方が重要な鍵となる。さらにナノテクノロジーの進展により、装置の概念自体が根本的に変革する可能性も考えられるが、そのような地上の技術革新を踏まえつつ、今後の検討を進めることが重要である。

5. 臨床宇宙医学

5.1 臨床宇宙医学の概念

ここで用いる臨床宇宙医学の概念は「宇宙飛行士の健康管理上の課題解決に直接役立つ医学研究」を指す。国際宇宙ステーションでは日本人宇宙飛行士が約3 - 6か月間の長期宇宙滞在が計画されている。日本人宇宙飛行士の健康を確保し、パフォーマンスを最大限に引き出すためには、長期宇宙滞在に伴う身体的、精神的、放射線被曝、その他（衛生管理、軌道上の医療活動）における健康管理上の課題に対して、実用可能な対策の提案と検証が必要である。宇宙環境利用を目的とした科学的な成果を重視する基礎宇宙医学と比べて、実応用、臨床的な側面が重視される。

実際、「科学的な基準では選定の上位にはないが、実応用の観点から重要な研究テーマをどう扱うのか」の観点から臨床宇宙医学の議論が始まった。現在もなお、その取り扱いについては協議・調整中であるが、ここでは議論されている概要(案)を記す。

5.2 臨床宇宙医学の対象範囲

宇宙飛行士の健康管理は宇宙開発事業団宇宙医学研究開発室が実施している。日本人宇宙飛行士の健康管理を実施する上で必要とされる具体的な研究課題は宇宙開発事業団が中心となってあらかじめ提示されるべきである。

当面、健康管理に必用な解決すべき課題の対象範囲としては

- (1) ヒトの長期（当面3 - 6か月間）宇宙滞在を健康で安全に滞在するための対策に貢献し、リスク軽減の構築に役立つ
 - (2) 実応用が数年以内に期待される
- に限定されるべきである。

5.3 臨床宇宙医学の研究手順

健康管理上の課題解決をめざした研究・開発の手順（案）を以下に図示する。

健康管理上の解決すべき具体的な課題の提示

課題に対する実用的で有効な対策の提案

採用

地上における検証 無効 不採用

有効

軌道上における評価 無効 不採用

採用(有効で、実用的)

健康管理への取り込み

5.4 解決すべき課題案の提示

ここでは健康管理上解決すべき課題を例示（案）として提示する。公募等で実際

に課題提示を実施する場合には、課題に対する現状と過去のデータも併せて、提示されることが望ましい。また、数年ごとに取り組むべき課題を提示すべきである。

- (1) 長期宇宙滞在に適した飛行士選抜
例：尿路結石を生じやすい人の判別法
- (2) 軌道上の生体機能モニター
例：骨密度測定法
- (3) 軌道上、帰還後の生理的対策法
例：筋、骨萎縮に対する効果的な運動法、薬剤投与方法
- (4) 生体リズム・精神/心理支援法
例：生体リズムを制御するための対策、エラー防止対策
- (5) 放射線被曝管理、環境衛生
例：ISS内の細菌叢モニタリング、放射線モニタリング
- (6) その他

5.5 今後の検討課題

臨床宇宙医学は宇宙医学専門委員会におけるシナリオの論議、および公募地上研究における宇宙医学選定パネルの評価の中から議論されている新しい概念であり、公募地上研究における取り扱いを含めて、現在もなお各方面との議論・調整を実施中である。

6. 宇宙医学分野における重点研究領域について

平成14年度からの当面の宇宙医学研究分野における重点研究領域として、以下の課題を提示し、これらに関連する研究の推進に重点を置くものとする。

- 1) 基礎宇宙医学：宇宙環境におけるストレス応答メカニズムの解明
- 2) 臨床宇宙医学：長期宇宙滞在における人体の適応と対策
- 3) 新たな重点課題：長期宇宙飛行におけるヒューマンファクターの検討

1) 3)の重点課題は、公募研究を中心とした宇宙医学研究分野において、これまで培われてきた研究課題を基に、あるいは新たな視点を含めて、より体系的、かつ集中的に取り組むことを目的とするものである。今後、それぞれの課題において、問題点をより明確にすると同時に、実際の宇宙ステーション利用実験を計画立案し、実施して行くことも目標の一つである。また、これらの課題を通じて、臨床宇宙医学の観点からの重点課題「長期宇宙滞在における人体の適応と対策」にも資することも目的とする。

- (1) 宇宙環境におけるストレス応答メカニズムの解明
宇宙環境が人体に及ぼす影響について、より包括的・体系的に取り組むことを課題とする。骨、筋肉、神経等、個別の課題については、該当する分野で研究課題が提示されている(4.4項参照)。ここでは、それらの課題について、横

断的かつ体系的な研究課題を対象として考えるものである。その背景として、近年のゲノム科学・細胞生物学の進展により、異なる器官・組織であっても、細胞レベルでは生体のメカニズムとして共通する部分が多いことが明らかになりつつあること、また生体の反応は個々の器官のみに還元し得るものではなく、例えば筋骨格系、免疫系、神経系、循環器系等においても、その相互作用を考慮し、個体システムの反応として、とらえなければならないことが挙げられる。

この課題は、基礎医学研究としてライフサイエンス研究分野とも共通するものであるが、特にここでは個体レベルでのストレス応答メカニズムを中心課題と考える。より具体的には、微小重力、あるいはその模擬環境を負荷することにより、そのストレス応答状態を、各種の器官における遺伝子・タンパク発現、生理学的パラメーター等のデータを通じて、体系的、包括的に解析することなどが考えられる。

(2) 長期宇宙滞在における人体の適応と対策

NASDA が開発する日本の実験棟(JEM)が国際宇宙ステーション(ISS)に設置されるころより、日本人宇宙飛行士の長期(3~6 か月間)宇宙滞在が開始される。ISS 参加に伴う宇宙環境利用機会の増加は、我が国の有人宇宙開発・宇宙医学研究にとって大きなチャンス到来であるとともに、投資に見合う開発成果が求められている。

臨床宇宙医学としての「長期宇宙滞在における人体の適応と対策」は宇宙飛行士の健康管理技術への貢献や、地上の医療活動への研究成果の還元することが求められている。具体的には、宇宙環境における生体の適応と対策、宇宙環境における生体情報モニターと軌道上(遠隔)医療等、有人宇宙開発の基盤技術に役立つ研究が必要とされる。

(3) 長期宇宙飛行におけるヒューマンファクターの検討

宇宙医学研究分野では、宇宙滞在の長期化に伴い、ヒューマンファクターに関連する研究領域が、基礎/臨床応用の両側面から極めて重要と考えられ、新たな重点課題として取り上げられることとなった。なお、本研究シナリオにおけるヒューマンファクターの考え方や具体的な研究課題については、4.4.6 項を参照願いたい。

7. 宇宙医学研究に参考となる文献および関連 web site

7.1 宇宙医学研究に参考となる文献

International Space Life Science Working Group (各宇宙機関の医学・ライフサイエンス担当者間の協議機関) が各分野別にワークショップを開催し、これまでの宇宙実験の成果の overview と今後の課題についてまとめたもの。

- (1) Cardiovascular Research : Medicine & Science in Sports & Exercise, Vol 28, No. 10 (1996)
- (2) Plant Biology: Planta, Vol. 203, Suppl. (1997)
- (3) Muscle Research : Intl. Journal of Sports Medicine, Vol. 18, Suppl. 4 (1997)
- (4) Bone Research: Bone, Vol. 22, No. 5 (1998)
- (5) Neuroscience : Brain Research Reviews Vol. 28 (1998) 1-234 special issue
- (6) Radiation Biology : Mutation Research Vol.430, No.2 (1999)
- (7) Cell & Molecular Biology: FASEB Vol.13 Suppl. (1999), S1-S178
- (8) Integrative Physiology : European J. Physiology Vol.441 Suppl. No.2-3 (2000)
- (9) Human Factors : Aviation, Space and Environmental Medicine Vol.71, No.9, Section II, Suppl. (2000)
- (10) Developmental Biology : Workshop Summary(2000);
http://www.fundamentalbiology.arc.nasa.gov/ISLSWG_index.html

7.2 ロシアにおける医学研究成果

ロシア IBMP(Institute for BioMedical Problems)の医学研究成果を NASDA が契約にもとづいて入手し製本した。なお、平成10年3月に全国の各大学医学部の図書館宛に送付しています。

- (1) Present understanding and issue of muscle, bone, mineral metabolism and cardiovascular system in space medicine: Chapter 1, Muscle system
- (2) 同: Chapter 2, bone tissue
- (3) 同: Chapter 3, Mineral metabolism and its regulation
- (4) 同: Chapter 4, Findings on cardiovascular system

7.3 関連 web site

- (1) 宇宙開発事業団、<http://www.nasda.go.jp/>
- (2) 日本宇宙フォーラム、<http://www.homepage.co.jp/jsforum/>
- (3) 宇宙環境利用研究データベース、<http://srdp.tksc.nasda.go.jp/>
- (4) NASA の life science data archives、<http://lsda.jsc.nasa.gov/>
- (5) National Research Council、<http://www.nas.edu./ssb/csbsmenu.htm>
- (6) SPACELINE (a space life sciences bibliographic database) 、
<http://spaceline.usuhs.mil/>
- (7) Life Sciences Task Book (Information on all Life Sciences funded grants)、
- (8) http://peer1.idi.usra.edu/peer_review/taskbook/taskbook.html
- (9) NASA critical path roadmap、<http://criticalpath.jsc.nasa.gov/>
- (10) National Space Biomedical Research Institute、<http://www.nsbri.org/>

7.4 宇宙医学に関する代表的な参考書

- (1) Nicogossian AE, Huntoon CL, Pool SL, eds. Space Physiology and medicine: third edition. Lea & Febiger; 1994. (2002 年末に第 4 版が出版される予定)
- (2) Churchill SE, ed. Fundamentals of space life sciences: Krieger; 1997.
- (3) 関口、他。宇宙医学・生理学：社会保険出版社、1998
- (4) Committee on Space Biology and Medicine, Space Studies Board. A strategy for research in space biology and medicine in the new century. National Research Council 1998; <http://www.nas.edu./ssb/csbsmenu.htm>
- (5) Committee on Space Biology and Medicine, Space Studies Board. Review of NASA's Biomedical Research Program. National Research Council 2000; <http://www.nas.edu./ssb/biomedmenu.htm>
- (6) White RJ, Averner M. Humans in space. Nature 2001; 409: 1115.

宇宙医学専門委員会 平成10～13年度の活動報告

<平成10年度>

1. 委員会の目的

- (1) 国際宇宙ステーション(以下ISS)に搭載する次期共通実験装置を検討し、日本の宇宙医学研究シナリオを構築する
- (2) 日本の宇宙医学研究の推進戦略を協議し必要な提言を行う

2. 宇宙医学専門委員

	氏名	勤務先
委員長	黒川 清	東海大学 医学部 学部長
委員	尾形 悦郎	財団法人 癌研究会附属病院 院長
委員	五十嵐 眞	日本大学 総合科学研究所 前教授
委員	間野 忠明	東海中央病院 院長
委員	埜中 征哉	国立精神・神経センター 武蔵病院 院長

3. 平成10年度の活動内容

- 【第1回】平成10年4月22日： 公募地上研究で研究テーマが採択された研究者からの要望聴取しながら次期共通実験装置及び宇宙医学研究シナリオを検討する方針決定
- 【第2回】平成10年8月18日：骨の研究者からの意見聴取
- 【第3回】平成10年9月22日：筋肉の研究者からの意見聴取
- 【第4回】平成10年9月28日：循環器の研究者からの意見聴取
- 【第5回】平成10年10月2日：神経科学の研究者からの意見聴取
- 【第6回】平成10年12月14日： 上記以外の分野の研究者からの意見聴取
- 【第7回】平成11年1月18日：まとめ

4. 宇宙医学専門委員会 参加者数

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回
宇宙医学専門委員	5	4	2	4	2	5	5
公募から資金提供を受けている研究(発表者)		7	6	9	9	13	
専門家の立場からご意見を述べていただく研究者		5	5	5	6	5	
事務局(宇宙開発事業団)	7	8	7	6	5	6	7
参加人数	12	24	20	24	22	29	12

<平成11年度>

平成11年4月20日：【第8回】「宇宙医学研究シナリオ」の中間報告

6月2日：【第9回】宇宙ステーション利用計画ワークショップ準備

6月29日～7月1日：宇宙ステーション利用計画ワークショップ

研究シナリオ、利用戦略を配布し、公開討論

9月3日：宇宙開発事業団ホームページ上で、「宇宙医学研究シナリオ」の公開

9月27日：【第10回】研究シナリオに対する一般からの意見

臨床宇宙医学に関する討議

10月28日：第8回宇宙環境利用研究委員会

「宇宙医学研究シナリオ」初版の制定

平成12年1月14日：【第11回】バイオメディカル分野の考え方

2月29日：【第12回】「宇宙医学研究シナリオ」(改定案)を了承

3月28日：第9回宇宙環境利用研究委員会

「宇宙医学研究シナリオ」第2版の制定

<平成12年度>

平成12年5月9日：【第13回】宇宙実験装置の優先順位付けに関する議論

9月27日：【第14回】重点化に関する議論

平成13年2月9日：【第15回】「宇宙医学研究シナリオ」(第3版)を了承

宇宙実験装置検討の経緯、その他現状の反映

3月5日：第11回宇宙環境利用研究委員会

「宇宙医学研究シナリオ」(第3版)制定

<平成13年度>

平成13年5月25日：【第16回】重点化に関する議論

9月21日：【第17回】重点課題の設定

12月25日：第1回ヒューマンファクター検討ワーキンググループ

平成14年2月5日：第2回ヒューマンファクター検討ワーキンググループ

3月5日：【第18回】「宇宙医学研究シナリオ」改訂案の検討

3月20日：第13回宇宙環境利用研究委員会

「宇宙医学研究シナリオ」(第4版)制定