《総 説》

宇宙飛行による骨・筋への影響と宇宙飛行士の運動プログラム

大島 博* 水野 康* 川島 紫乃*

Effects of Space Flight on Bone and Muscle, and Astronaut Exercise Program

Hiroshi OHSHIMA,* Koh MIZUNO,* Shino KAWASHIMA*

Abstract : Bone loss and muscle weakness are important medical concerns observed in astronauts after space flight. Even after a short-duration space flight, muscle atrophy and muscle weakness were observed in back, quadriceps and soleus-gastrocnemius muscles. The primary preventive measure against muscle weakness on the ISS has been exercise. The ISS houses a treadmill, a cycle ergometer, and a resistive exercise device. Individualized preflight exercise programs are planned for crew members based on fitness assessments, mission-specific tasks, and the maintenance of optimal health. A preflight exercise program is scheduled for a minimum of two hours a day, three days a week. Inflight exercise prescription will take into consideration available inflight exercise equipment and the specific needs of the individual crew member. Each inflight exercise program shall include components of cardiovascular, resistive and flexibility exercise. A program is scheduled for a minimum of 2.5 hours a day, six days a week. Postflight rehabilitation activities begin when a crew member returns from space flight. The goal of the rehabilitation program is to provide a planned program of recovery that will prevent additional injury, provide progressive improvement in fitness, and enable a full return to the preflight baseline level. A postflight rehabilitation program may include scheduled rest, assisted walking, swimming pool exercise and traditional exercise. Therapeutic massage, whirlpool, heat/ice and passive stretching also may be incorporated.

Key words : 骨量減少 (bone loss), 筋肉萎縮 (muscle atrophy), 宇宙飛行 (space flight), 運動プログラム (exercise program), リハビリテーションプログラム (rehabilitation program)

はじめに

有人宇宙飛行の歴史はガガーリンの宇宙初飛行 (1961 年) に始まり, アポロ 11 号の月面着陸 (1969 年) を経て, 2000 年から国際宇宙ステーション (International Space Station, 以下 ISS) での長期宇宙滞在が開始された。ISS はアメリカ, ロシア, 欧州, カナダ, 日本など世界 15 カ国が地上約 400 km 上空に建設し, 国際共同で運営する有人宇宙滞在施設である。日本が提供する実験

棟“きぼう”が ISS に取り付けられると, 日本人宇宙飛行士の 3 ~ 6 カ月間の宇宙滞在が開始される。宇宙飛行士の健康管理は, 国際共同の医療チームで運用され, 我々は日本人宇宙飛行士の長期宇宙滞在に向けた準備を進めている。

病気やけがによる長期の寝たきり (身体不活動) では廃用症候群が生じるので, 予防対策とリハビリテーション (以下, リハ) プログラムが必要である¹⁾。宇宙飛行による微小重力環境では, 厳重な医学検査をパスした健康な宇宙飛行士であっても, 骨量減少・尿路結石, 筋萎縮・筋力低下など

2005 年 11 月 2 日受稿

*宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部 宇宙医学グループ/〒 305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

Space Medicine Group, Human Space Technology and Astronauts Department, Japan Aerospace Exploration Agency

E-mail: ohshima. hiroshi@jaxa. jp

地上の廃用症候群に似た身体変化が生じる。有効な対策を講じないと、帰還時の緊急脱出や、帰還後の社会生活復帰に影響する。本稿では、まず宇宙飛行が骨・筋などに及ぼす影響を解説し、その対策としてISS内で使用されている運動機器とこれらを用いた運動処方、および帰還後のリハビリプログラムなどについて紹介する。

宇宙飛行による骨・筋などへの影響

ヒトは進化の過程で、地球の重力環境に適した構造と機能を獲得してきたので、微小重力の宇宙環境では、様々な人体への影響が生じる²⁾。今日まで宇宙飛行経験者は既に400人を超えているが、宇宙飛行士の年齢・運動量・飛行期間・ミッションの優先事項が異なることや、解析可能な対象者数が少ないことなどの理由のため、人体への影響に関する科学論文は多くない³⁾。これまで、米ロの関係者から入手した論文や情報をもとに、1～2週間の短期宇宙滞在（米国のスペースシャトル）と、3～14カ月間の長期宇宙滞在（ロシアのミール宇宙船やISS）における骨・筋などへの影響の概要を述べる。

1. 骨への影響

宇宙の微小重力環境では、骨への荷重負荷が減少し、骨からカルシウムが溶出し、骨量減少や尿路結石のリスクは高まる。高齢者の骨粗鬆症では腰椎や大腿骨の骨密度は1年間に約1.0～1.5%減少するが、ISSの宇宙飛行士の検討では、1カ月間に腰椎で平均0.9%、大腿骨頸部で1.4%骨密度は減少し、骨量減少速度は約10倍となる⁴⁾。最近の定量的CT法（quantitative computed tomography: QCT）を用いた検討によれば、大腿骨頸部の海綿骨では1カ月間に2.5%、同皮質骨では0.5%の骨量減少が報告された⁵⁾。カルシウムの出納は、飛行前はバランスがとれている（日本人は毎日約600mgのカルシウムを摂取し同量排出）が、飛行中は毎日250mgのマイナスバランスとなる。この骨量減少は、毎日2時間の軌道上の運動では、防ぐことはできない。

近年、骨粗鬆症治療薬である骨吸収抑制剤（ビスフォスフォネート）が、骨密度増加と骨折発生率低下に効果があることが臨床研究で確かめられた。宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency, 以下JAXA）は、90日間のベッドレスト研究で、本薬剤を事前に注射することにより、長期臥床による骨量減少・尿路結石に対して予防効果があることを確かめた⁶⁾。この結果をふまえ、長期宇宙滞在を予定する宇宙飛行士の骨量減少対策の1つとして、骨吸収抑制剤による骨量減少・尿路結石予防を検討している。

2. 筋量変化

スペースシャトルによる7日間の宇宙滞在中の毛利宇宙飛行士を図1左に示す。微小重力の宇宙では、重力に抗して体を支える必要はなく、物の重さに対する筋肉の抵抗負荷はほとんどなくなるので、廃用性筋萎縮が進む。宇宙飛行による筋萎縮では、地上で姿勢保持と歩行を担う体幹筋、大腿四頭筋、および下腿三頭筋の筋萎縮が特に著しい。数カ月間の宇宙滞在後地上に帰還した宇宙飛行士を図1右に示す。長期宇宙滞在から帰還直後の宇宙飛行士は、抗重力筋をはじめとした骨格筋の筋萎縮に加えて、心・循環系の機能低下に起因する起立性低血圧、および微小重力から地上の重力環境への移行時に現れる平衡機能失調などの要因も加わり、自力での立位と歩行は容易でなく、転倒のリスクが高まる。

筋量変化の実態を把握するために、8日間のスペースシャトルの飛行前後で、MRI（磁気共鳴映像法）による下腿筋横断面積が検討された。筋横断面積の減少率は、飛行前と比較して腰部背筋10.3%が最も著しく、ハムストリング8.3%、下腿三頭筋（ヒラメ筋・腓腹筋）6.0%、大腿四頭筋6.0%の順であった⁷⁾。同様な研究はJAXAも実施しており、10日～2週間前後のスペースシャトル飛行中における下腿三頭筋の筋横断面は、宇宙飛行1日あたり約1.0%細くなるという結果であった⁸⁾。これは、20日間のベッドレスト研究による結果（臥床1日あたり約0.5%細くなる）の約2倍に相当し、地上では起こり得ない顕著な萎

図1 宇宙飛行中と帰還直後の宇宙飛行士（写真提供 JAXA, IBMP）

スペースシャトルによる7日間の宇宙滞在中の毛利宇宙飛行士（左）、長期宇宙飛行から帰還直後の宇宙飛行士（右）。

縮が進行することを示している。

この萎縮速度で数カ月間宇宙滞在すると、極めて深刻な事態に陥ることが心配されるが、一般に不活動による筋萎縮は最初の1週間で最も著しく、その後筋萎縮速度は徐々に軽減するといわれている^{9,10)}。実際のISSにおける長期宇宙滞在では、筋萎縮を予防するために抵抗運動を1日に45分間、週6日行っている。具体的には、ワイヤーを牽引すると抵抗力を発生する装置（後述する抵抗運動機器）を用いて、ワイヤーの先のリングを手首やくるぶしにかけて上肢や下肢を前後に牽引したり、肩ハーネスで足底に向かう牽引力を加えながらスクワット運動などが行われている。

NASA（National Aeronautics and Space Administration）とロシアが共同で、ミール宇宙船に115日間の宇宙滞在し（ISSとほぼ同様の運動を実施）した3人の宇宙飛行士を検討した結果によれば、地球帰還後には腰部背筋、下腿三頭筋、大腿四頭筋の筋横断面積の平均減少率は、18%、18%、12%であったと報告されている¹¹⁾。

3. 筋力低下

宇宙から帰還直後の宇宙飛行士は、「紙1枚でも重さを感じる」「歩行時下肢が重い」「前屈した腰が、すっと戻らない」「階段昇降がきつい」な

ど、再び重力のある地球に戻った際の感想を述べている。1～2週間の宇宙飛行後の筋力低下率は、飛行前と比較すると腰部背屈筋が23%と最も大きく、膝関節伸展筋で12%、腰部前屈筋（腹筋）で10%、足関節背屈筋で8%、膝関節屈筋で6%であった¹²⁾。筋持久力を飛行前と比較すると、大腿四頭筋で15%、ハムストリングで12%低下していた¹²⁾。帰還後1～2週で筋力は回復傾向を示すが、背筋の回復には数週を要するという。ところで、宇宙飛行の地上模擬実験として行われるベッドレスト実験では、このような顕著な背筋の筋力低下は認められないこともある。実際、ベッドレスト研究の際には、腹臥位で食事や読書をする事が多く、腰部の背屈筋の運動負荷は少ない。

数カ月間の長期宇宙滞在では、一般に軌道上で1日2時間、週6日間の運動が行われている。ISSで6カ月間宇宙滞在した宇宙飛行士の筋力の検討が行われつつあるが、これまでの検討によれば、帰還直後の筋力低下率は13～51%であり、個人差が大きい¹³⁾。

4. その他の変化

骨格筋の筋線維は、持久性にすぐれた遅筋線維（赤筋、タイプI線維）と、スピードにすぐれた

速筋線維（白筋，タイプⅡ線維）からなる．筋線維の廃用性萎縮は，タイプⅠ線維とタイプⅡ線維の両方に生じるが，それぞれの萎縮の程度は生物種や，実験に用いる条件により異なる．ラットを用いた実験では，一般にギプス固定，腱切除，尾部懸垂など重量負荷運動が取り除かれた場合，タイプⅠ線維の方が相対的に萎縮率が多く，除神経など神経-筋調節に障害のある場合，タイプⅡ線維の萎縮率が大きくなるといわれている¹⁰⁾．ラットによる宇宙飛行実験では，遅筋線維の萎縮（ヒラメ筋のタイプⅠ線維の筋横断面積の萎縮率は24%）が速筋線維の萎縮より大きく，遅筋線維の速筋化も認められた¹⁴⁾．一方，スペースシャトル飛行におけるヒトの外側広筋の筋生検では，タイプⅡ線維，タイプⅠ線維の萎縮率は，22%，16%であり，むしろタイプⅡ線維の萎縮率の方が大きいこと，および遅筋線維の速筋化などが報告されている^{12,15)}．

地上で立位時に下肢に貯留している体液は，微小重力の宇宙では頭部方向に移動し（体液シフト），心臓への静脈還流増加・顔面浮腫などが生じる．心房伸展が刺激となって心房性ナトリウム利尿ペプチドの作用により利尿が促進され数日をかけて体液量は減少し，顔面浮腫・頭重感などの症状は軽減する．この一連の応答により循環血液量は1.5～2リットル減少すること，および心臓のポンプ機能の低下などにより，有酸素性能力は低下する．スペースシャトルによる1～2週間の宇宙飛行前後で，有酸素性能力の代表的な指標である最大酸素摂取量が検討された．宇宙で全く運動しない場合や自転車エルゴメーター運動の場合，最大酸素摂取量は約13%低下するが，トレッドミル運動（60% HR_{max}，70% HR_{max}，80% HR_{max}の3つの強度を各10分間ずつ，あるいは65% HR_{max}4分と50% HR_{max}2分の組み合わせを5セット）を毎日継続した場合，最大酸素摂取量の減少率は3%に留まったことが報告されている¹²⁾．一方，宇宙飛行中に自転車エルゴメーターを用いて運動頻度・時間・強度と酸素摂取量を検討した研究によれば，週に3日以上，1回20分以上，70% HR_{max}以上の運動実施により，自転車

エルゴメーターの運動でも有酸素性能力低下が軽減したとの報告もある¹²⁾．

H反射は，感覚神経（GⅠa線維）を電気刺激し，脊髄のα運動神経を経て筋を収縮させる単シナプス反射である．ISSでH反射を検討したところ，H波は35%低下し，微小重力環境では，筋萎縮や筋力低下のみならず，脊髄を介する神経-筋応答も低下していることが，示唆された¹³⁾．

ISSの運動機器

ISSで使用されている軌道上の運動機器としては，トレッドミル，自転車エルゴメーター，抵抗運動機器などがある．軌道上で利用するために，1)トレッドミルでは肩と腰を固定するハーネスとバネを用いて体重相当の長軸負荷を身体に加える，2)運動に伴う振動やエルゴメーターの車輪の慣性力を宇宙船に伝えないように船壁との間に緩衝装置を付加する，3)重量のない宇宙空間で筋肉へ負荷を与える抵抗負荷発生装置などの特殊な工夫が必要となる．

1. トレッドミル（図2）

ベルトコンベア上での歩行・走行装置で，歩行に必要な神経-筋活動，骨への長軸荷重，および有酸素能力の維持が主な目的である．肩バンドと腰バンドを飛行士に装着し，バネを用いて負荷を調節しながら体重に相当する荷重を走行面に向かって加えながら走行する．振動を周囲に伝えないために，トレッドミルは床面と直接接触することなく数本のワイヤーで連結し，トレッドミルの底に組み込まれたジャイロスコープなどを用いて走行面を安定させている．走行スピードは0～10 mph（16 km/h），身体への荷重は100 kgf（220 lbf）まで調節可能である．歩行・走行の速度，運動時間と距離，および心拍数などの情報は機器内に記録・保存されるが，現在，これらデータをリアルタイムで地上から確認できるようなシステムの開発が進められている．この装置が使用できないと，帰還の際に緊急自力脱出が困難となり，転倒のリスクが高まる．

図2 トレッドミル (写真提供 NASA)

肩バンドと腰バンドとバネを用いて、体重に相当する身体負荷を加えて走る (左)。
周囲に振動を与えないために、床面と隔離してワイヤーで連結し、ジャイロスコ
ープで走行面を安定させる (右)。

図3 自転車エルゴメーター (写真提供 JAXA, NASA)

自転車運動中の毛利宇宙飛行士 (左)。ワイヤー連結器を用いて運動の振動や
車輪の慣性力を隔離し、宇宙船に振動を与えないようにする (右)。

2. 自転車エルゴメーター (図3)

自転車運動により、有酸素能力、無酸素能力、筋力および持久力を維持向上させる。下肢の運動のみならず、船外活動にそなえて上肢のペダリング運動も行われる。運動負荷は25～300 W 回転

速度は30～120 rpm まで可能である。自転車エルゴメーターは軌道上での体力評価にも用いられる。運動の振動や車輪の慣性を周囲の実験機器に及ぼさないために、床面とは振動を隔離するワイヤーで連結する。

3. 抵抗運動機器 (図 4)

重量のない宇宙空間で筋肉へ抵抗負荷を与え、筋萎縮を予防する抵抗運動に用いられる運動機器。ワイヤーを牽引すると抵抗運動機器内の円盤が回転し、円盤内のゴム状の弾性体が回転に抗する抵抗力を発生させる。図 4 に示すようなスクワット運動のための肩パッドハーネス、上肢の運動用の棒 (ワイヤーを棒の両端に連結する)、ワイヤーに連結する取っ手などの付属の器具が準備されており、様々な種類の抵抗運動を行うことができる。抵抗力は最大 136 kgf (300 lbf) まで可能である。この装置が使用できないと、骨格筋の筋力が低下し、体幹への軸圧荷重が加わらなくなる。

4. その他

この他に、ロシアが提供する運動機器として、大腿のカフ (下肢から頭部への体液移動を制限)、ペンギンスーツ (弾力バンドがついたスーツ) (図 5)、および電気刺激装置などがある。ロシアの宇宙飛行士はこれらを使用しているが、科学的な裏づけが必ずしも十分とはいえず、米国の宇宙飛行士は使用していない。

宇宙飛行士の運動・リハビリプログラム運動

1. 飛行前の運動プログラム

宇宙飛行士は健康人であり、運動プログラムも一般人のそれと大きく変わる所は無い。しかし、宇宙滞在中に生じる筋・骨萎縮、および有酸素性能力の低下を考慮して、飛行前にあらかじめこれらを向上させておくことを目的に運動プログラムを個別に計画する¹⁶⁾。スペースシャトルによる約 2 週間の飛行の場合には、体力トレーニングは推奨されるが、実行は宇宙飛行士に委ねられる。ISS の長期飛行では、飛行が決定すると、打ち上げ 1 年前から訓練の一環として体力トレーニングを計画する。飛行前の運動プログラムは、基本的に週 3 回、1 回 2 時間で、内容は有酸素運動と抵抗運動の両者を含み、球技などが取り入れられる場合もある。ISS の建設や修理のために真空の宇宙で船外活動を予定する場合、純酸素で 1/3 気圧に加圧された宇宙服を着用して作業する。船外活動で最も負担のかかる部位は上肢の筋肉である。船外活動を予定する宇宙飛行士には、上肢の運動 (例えば、ロッククライミング運動、鉄棒、上肢

図 4 抵抗運動機器 (写真提供 NASA)

肩パッドハーネスをつけた、スクワット運動 (左)。抵抗運動機器の内部構造。ワイヤーを牽引すると、キャニスターの中にある円盤に負荷が加わり、抵抗力が発生する (右)。

図5 ペンギンスーツ (写真提供 IBMP)

スーツに弾力バンドをつけ張力負荷を与える。ロシアの宇宙飛行士が使用している。

によるペダリング運動)を飛行前運動プログラムに取り入れる。

2. 飛行中の運動プログラム

ミッション担当のトレーナーと医師が、飛行前運動プログラムの結果や、軌道上の運動機器の制約などをもとに、飛行中の運動プログラムを計画する¹⁶⁾。スケジュール上は、週6日、1日あたり2.5時間(準備・ストレッチ30分、心循環器運動45分間、抵抗運動45分間、かたづけ・着替え30分)の時間が運動に割り当てられる。運動機器の不具合やスケジュール変更など、必ずしも計画通りにいかない場合も時々あり、状況変化に応じて適切に運動を継続するかが重要になる。図6には宇宙飛行士の1日の基本スケジュール(睡眠8.5時間、仕事6.5時間、その他生活時間)を示す。この中で運動時間はかなりの割合を占めており、宇宙飛行士の健康やQOL(生活の質)を維持するために、運動の重要性が認識されている。より効果的で、時間を短縮できる運動対策が望まれている。

表1に、軌道上の運動プログラム例(1週間のサンプル)を示す。毎日のトレーニングは、有酸素運動と抵抗運動から構成され、単調にならない

よう変化を持たせる。有酸素運動としては、トレッドミルや自転車エルゴメーターを用いて、85% HR_{max} 以下の運動強度で、定常トレーニング(20分以上一定の強度で走行)、あるいはインターバルトレーニング(強い負荷と軽い負荷の運動の繰り返し)を行う。抵抗運動としては、抵抗運動機器を用いて、腰、背部、胸、肩、上腕二頭筋、上腕三頭筋、大腿、下腿などから数種を選び、1セット約10回、各数セット行う。実施した運動内容はコンピューターに記録され、1日1回地上へと送られる。

ISSで飛行中は飛行2週間目を第1回とし、以後、月1回の頻度で体力検査が行われる。検査内容は自転車エルゴメーターによる負荷漸増最大下運動負荷試験であり、血圧と心拍数が測定される。その他、必要に応じて筋力測定も実施されるが、これらの結果や日々のトレーニング記録から、運動プログラムの内容を再調整する。このような体力検査は、船外活動の1週間前、および地球帰還の2週間前にも行われる。

3. 飛行後のリハプログラム(表2)

帰還後リハは宇宙飛行士の最優先実施事項とされ、帰還後45日後まで毎日2時間を確保し、帰

図6 宇宙飛行士の1日のスケジュール

表1 軌道上の運動プログラム (1週間のサンプル)

曜日	有酸素トレーニング	抵抗トレーニング部位
月曜	定常トレーニング (トレッドミル)	腰・下肢, 肩
火曜	インターバルトレーニング (自転車)	胸, 上腕三頭筋
水曜	インターバルトレーニング (トレッドミル)	背, 上腕二頭筋
木曜	定常トレーニング (自転車)	腰・下肢, 肩
金曜	インターバルトレーニング (トレッドミル)	胸, 上腕三頭筋
土曜	インターバルトレーニング (自転車)	背, 上腕二頭筋
日曜	休み	休み

毎日のトレーニングは、心肺機能運動と抵抗運動から構成され、単調にならないよう変化を持たせる。

還当日や週末にも宇宙飛行士業務としてリハを計画する。各宇宙機関の生理的対策 (運動・リハ) 担当者は、主治医となるフライトサージャン (航空宇宙医師) と協議の上、帰還直後の転倒による骨折・捻挫を予防し、飛行前体力にすみやかに復帰させることを目標として、個々の宇宙飛行士のリハプログラムを作成する。

飛行後のリハプログラムは、帰還直後から3日後まで (第1フェーズ)、その後帰還2週間まで (第2フェーズ)、および帰還15日以後 (第3フェーズ) に分けて計画する¹⁷⁾。第1フェーズは、地上帰還後の影響 (筋力低下・起立性低血圧・平衡バランス障害) が最も顕著に現れ、転倒による骨折・捻挫のリスクが高まる時期である。障害予防に配慮したリハとして、介助付き歩行 (100歩～1マイル)、マッサージ、サウナ、バイブラバス、PNF (自己受容的神経筋促通) などが主に実施される。第2フェーズは、体力の回復が主たる目標となる。水中運動、歩行、チューブを用いた運動、背もたれ付き自転車エルゴメーター、マッ

表2 飛行後リハプログラムの例

第1フェーズ (帰還3日後まで)	介助付き歩行、バイブラバス、 マッサージ、ストレッチ
第2フェーズ (帰還2週間まで)	水中運動、歩行訓練、マッサージ、 ストレッチ、有酸素運動、抵抗運動
第3フェーズ (帰還2週以後)	個人にあわせた積極的なトレーニング

サージ/ストレッチング、PNFが行われる。第3フェーズは、より積極的・活動的なトレーニングが計画され、飛行前の体力水準まで回復をめざす。第2フェーズの運動に加えて、通常の有酸素運動や筋力強化運動や、敏捷性や協調性を高める運動 (例えば、曲がりくねった道で障害物を避けて歩く訓練や、屋外での走行) が行われる。筋力、最大酸素摂取量、敏捷性、協調運動テストの評価結果や、日常の体力の回復状況を勘案して、45日以後もリハを継続するかを検討する。

飛行後のリハでは、着陸地 (ロシアないしは米国) が母国でない宇宙飛行士を何時母国に帰国させるかが重要になる。これまで米口の飛行士の場合、それぞれの母国へ帰国する時期は第2フェーズ終了期が多い。リハプログラムの終了は、通常、帰還後45日目となるが、本人の希望や担当医師の指示により、期間は延長されることもある。長期宇宙滞在から帰還後の体力には個人差が大きく、その要因として年齢、飛行期間、軌道上における運動の量・質の差などが考えられる。実際、帰還1週後にフィットネスルームでの自力歩行が可能な飛行士がいた半面、飛行後約半年間にわたりリハが必要な飛行士も存在している。このような個人差に適切に対応し、効率的で安全なリハを計画するために、リハ技術の向上と経験の蓄積が

重要である。

おわりに

宇宙に数カ月滞在する ISS の宇宙飛行士は、週に 6 日間、1 日約 2 時間の運動を行っているのですが、これまでのところ、健康管理上後遺障害を生じるような問題は生じていない。しかし、現在の軌道上の運動機器と運動プログラムは、時間をかけている割に筋・骨の機能維持が十分ではなく、理想的なものとはいえない。より短時間で効率的な、楽しく継続できる軌道上運動プログラムが必要である。さらに、ISS の搭乗人数を現在の 2 人から 6 人へ増員する計画に備えて、小型・軽量で、容易にメンテナンスでき、運動の効果をフィードバックできる運動機器が必要とされている。

ISS は、微小重力環境を利用して軌道上で科学実験を行うことと、月・火星時代に必要な有人宇宙技術の検証としての役割が期待されている。次世代に向けた運動機器や新たな運動・リハビリプログラムの技術検証の場としても、ISS は重要な機会を提供している。ISS における長期宇宙滞在の技術と経験の成果をもとに、月や火星飛行をめざす米国では、人工重力を含めた新たな運動機器に関する検討を始めている。JAXA は我が国の優れた運動やリハの先端技術（加圧運動¹⁸⁾、ハイブリッド電気刺激¹⁹⁾、その他）を、ISS や将来の有人宇宙開発に活用する可能性について、検討を開始している。

文 献

- 1) 林 泰史, 米本恭三, 江藤文夫, 石神重信: 廃用症候群の知識と対応. 日本医師会雑誌 2004 ; **132** : 1385-1396
- 2) 大島 博: 有人宇宙飛行と宇宙医学. 学術の動向 2005 ; **9** : 33-39
- 3) 宇宙開発事業団: 宇宙医学・人間科学等の研究動向に関する調査報告書 筋活動能力. 1992
- 4) LeBlanc A, Schneider V, Shackelford L, West S, Oganov V, Bakulin A, Voronin L : Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. J Musculoskeletal Neuronal Interact 2000 ; **1** : 157-160
- 5) Lang T, LeBlanc A, Evans H, Lu Y, Genant H, Yu A : Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. J Bone Miner Res 2004 ; **19** : 1006-1012
- 6) Watanabe Y, Ohshima H, Mizuno K, Sekiguchi C, Fukunaga M, Kohri K, Rittweger J, Felsenberg D, Matsumoto T, Nakamura T : Intravenous pamidronate prevents femoral bone loss and renal stone formation during 90-day bed rest. Bone Miner Res 2004 ; **19** : 1771-1778
- 7) LeBlanc A, Rowe R, Schneider V, Evans H, Hedrick T : Regional muscle loss after short duration spaceflight. Aviat Space Environ Med 1995 ; **66** : 1151-1154
- 8) Akima H, Kawakami Y, Kubo K, Sekiguchi C, Ohshima H, Miyamoto A, Fukunaga T : Effect of short-duration spaceflight on thigh and leg muscle volume. Med Sci Sports Exerc 2000 ; **32** : 1743-1747
- 9) Appell HJ : Muscular atrophy following immobilisation. A review. Sports Med 1990 ; **10** : 42-58
- 10) 高橋英幸: 不活動が骨格筋の構造に及ぼす影響. 骨格筋—運動による機能と形態の変化 (山田 茂, 福永哲夫 編). ナップ社, 東京, 1997 ; pp 1-213
- 11) Feedback DL, Shenkman BS, LeBlanc AD, Siconolfi SF : Morphological, histochemical, and ultrastructural characteristics of skeletal muscle in Shuttle/Mir final report. NASA, 1996
- 12) Greenisen MC, Hayes JC, Sinconofi SF, Moore AD : Functional performance evaluation. in Extended Duration Orbiter Medical Project Final Report 1989-1995 (ed by Sawin CF, Taylor GR, Smith WL). Vol 3, NASA, 1999 ; pp1-24
- 13) Rhatigan JL, Robinson JA, Sawin CF : Exploration-related research on ISS : Connecting Science Results to Future Missions NASA/TP 213166. NASA, 2005
- 14) Desplanches D, Mayet MH, Ilyina-Kakueva EI, Sempore B, Flandrois R : Skeletal muscle adaptation in rats flown on Cosmos 1667. J Appl Physiol 1990 ; **68** : 48-52
- 15) Edgerton VR, Zhou MY, Ohira Y, Klitgaard H, Jiang B, Bell G, Harris B, Saltin B, Gollnick PD, Roy RR : Human fiber size and enzymatic properties after 5 and 11 days of spaceflight. J Appl Physiol 1995 ; **78** : 1733-1739
- 16) Postflight Rehabilitation plan JSC # 27050. NASA, 1997
- 17) Astoronaut Exercise Program JSC # 27579. NASA, 1997
- 18) 石井直方: 筋血流制限とトレーニング. 体育の科学. 2003 ; **53** : 564-568
- 19) 志波直人, 田川善彦, 大島 博: スペースメディスン (航空宇宙医学) への応用が期待される電気刺激療法. 整形外科 2005 ; **8** : 1141-1148