

# 宇宙惑星居住に伴う人体の変化と健康維持

田中邦彦（岐阜医科・院）

## Physiological changes and countermeasure during planetary habitation

Kunihiko Tanaka

Gifu Univ Med Sci., Seki, Gifu 501-3892

E-Mail: ktanaka@u-gifu-ms.ac.jp

**Abstract:** During spaceflight or staying in other astral body, the load on the musculoskeletal system and hydrostatic pressure difference is decreased. Thus, the skeletal muscle, particularly that in the lower limbs, is atrophied, and bone minerals are lost via urinary excretion. In addition, the heart is atrophied, and the plasma volume is decreased, which may induce orthostatic intolerance. The vestibular-related control is also declined; in particular, the otolith organs are more susceptible to exposure to microgravity than the semicircular canals. Advanced resistive exercise device with administration of bisphosphonate is an effective countermeasure against bone deconditioning. However, atrophy of the heart has not been completely prevented. Further ingenuity is needed against cardiovascular, and vestibular dysfunctions. For advanced human space exploration, extravehicular activity suit with higher mobility and inner pressure, which make pre-breathing unnecessary.

**Key words;** gravity, hydrostatic pressure, musculoskeletal system, countermeasure, space suit

### 1. はじめに

宇宙空間あるいは他の天体で生活をする、身体にかかる重力が減少する、気圧が低下する、放射線量が增大するなど環境変化の影響を受ける。ここでは特に重力と気圧変化に対する人体への影響とその対抗策について述べる

### 2. 重力変化

国際宇宙ステーション(International Space Station; ISS)では0G、月では1/6G、火星では1/3Gとなる。したがって体重を支えるための筋・骨といった運動器系、静水圧の影響を受ける心臓・血液循環器系、重力感知機構である内耳前庭器官とその関連する調節系に変化が起こる。

#### i) 運動器系

微小重力状態では姿勢を維持する脊柱起立筋やヒラメ筋といった抗重力筋において顕著な萎縮が認められる。また筋線維のうちヒラメ筋などの抗重力筋に多い持久力に富む遅筋(Type I)と瞬発力に富む速筋(Type II)では遅筋の方が大きく萎縮するため全体に速筋線維の比率が高くなる<sup>1)</sup> (図1)。

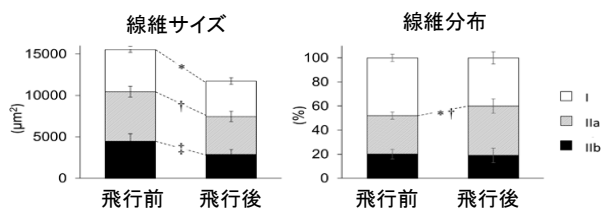


図1. 11日間の飛行による線維サイズと分布の変化

また骨格においては下肢を中心に脱灰が進行する(図2)。地上では体重を支えていない肋骨や頭蓋骨では逆に骨密度が増加するという報告もあるが<sup>2)</sup>、全体として地上での骨粗鬆症患者の18倍もの速度で進行する<sup>3)</sup>。

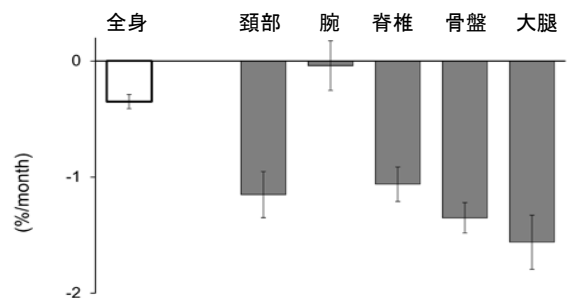


図2: 4~14.4か月の骨密度変化速度

これらの運動器系の機能低下に対して古くからエルゴメーター(Cycle Ergometer with Vibration Isolation and Stabilization System; CEVIS)が用いられてきたが、体重を下肢で支える必要がない微小重力下では膝関節を稼働させる大腿の筋群のみに負荷がかかり立位・歩行に重要な下腿筋群に負荷がかかりにくい。またトレッドミル(Treadmill with Vibration Isolation and Stabilization System; TVIS) 走行では下腿筋群にも負荷がかかるが、足底に対して地上での体重の70%程度しか負荷をかけられない。そこで体全体に、器械的に負荷をかけることのできる運動装置(Advanced Resistive Exercise Device)をISSでは使用している。骨に対しては骨粗鬆症治療薬であるビスフォスフォネートを投与している。AREDとビスフォスフォネートの併用

で、その進行はほぼ完全に抑制されている<sup>4)</sup>(図3)

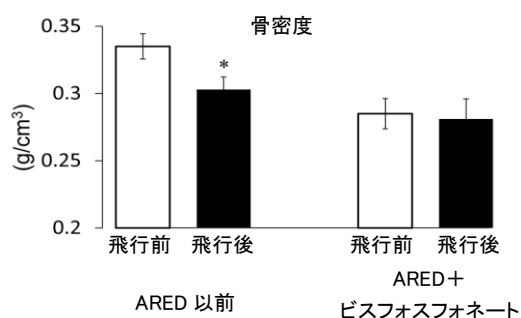


図3: 4.5~6.2 か月の飛行による骨密度変化

## ii) 心・血管系

微小重力下では血液を主とした体液の、身体長軸方向に地上では存在した静水圧が消失する。地上では下肢に多く貯留傾向にある血液は、頭部方向に多くシフトする。この状況に順応したのち、地上に帰還すると多くの宇宙飛行士が起立性低血圧を経験する。これまで順応の過程で圧受容器を介した血圧調節系の調節力が変化していると考えられていたが、自律神経を介した、その調節力は変化していないことが次第に証明されている。一方で、心萎縮や循環血漿量の低下が主たる原因ではないかと考えられている<sup>5)</sup> (図4)。

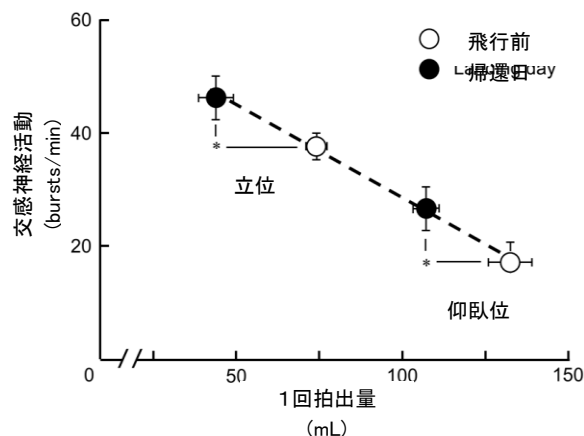


図4: 16 日間の飛行前後における1 回拍出量と交感神経活動の関係

この循環器系の変化に対する対抗策としては下半身陰圧負荷(Lower Body Negative Pressure; LBNP)が用いられてきた。下半身をチャンバー内に設置し、内圧を下げることで血液を下半身に移動させる方式であるが、現在 ISS では使用されていない。筆者らはLBNP 下でトレッドミル運動を併用させる対抗策を検証してきた。この方式では循環器系に対する負荷とともに、上半身を固定することなく足底に、地上での体重の100%負荷をかけながら走行運動を行うことができる<sup>6)</sup>。

## iii) 内耳前庭系

重力感知器官である前庭系特に耳石器を介した調節系は、重力環境変化に順応する過程で宇宙酔い、帰還後の平衡機能障害等を引き起こす。これまで内耳前庭系機能のうち三半規管では、その機能あるいは関連した反射系の調節力は減弱していないといわれている。一方、耳石機能は、減弱しているといわれる。しかし、かつての検査においては体性感覚からの姿勢感覚が影響し、耳石機能低下を過小評価し、回復能力を過大評価している可能性がある。したがって現在、きぼう利用研究として長期宇宙滞在前後での耳石器の機能のみを評価している。現在内耳前庭系の変化に対する対抗措置はとられていないが筆者らは内耳前庭系電気刺激(Galvanic Vestibular Stimulation; GVS)の有用性を検証中である。

## 3. 気圧低下

宇宙空間・月では真空であり、大気が存在する火星でも地上の0.75%であり、しかも酸素はほとんど存在しない。したがって船外で活動するためには船外活動用宇宙服(Extravehicular Activity Suit; EVA suit)を着用することが必要となる。現在米国および日本の宇宙飛行士が着用しているEVA suit は、外部真空と内圧との格差を可能な限り小さくし、膨張による可動性低下を防止するため酸素のみで0.3 気圧に与圧している。生存するには十分な酸素分圧であるが、絶対圧として小さいため減圧症を発症する危険がある。宇宙飛行士はこれを防ぐため24 時間かけて予備呼吸を行う必要がある。現在筆者らは、グローブについて高い与圧で予備呼吸が必要でなく、かつ高い可動性を有するEVA suitを試作・検証した<sup>7)</sup>。現在全身の与圧下での可動性を検証すべく駆使中である(図5)。



図5: 予備呼吸不要なEVA suit (試作中)

#### 4. 結語

重力変化と気圧変化の人体への影響と現在の対抗策の概要を述べた。月・火星での滞在に際しては重力が存在するため、人体の応答は微小重力下とは異なることが考えられるが、長期の惑星居住に際して、これまでの知見の応用と柔軟な対応が望まれる。

#### 参考文献

- 1) LeBlanc, A. et al.: Muscle volume, MRI relaxation times (T2), and body composition after spaceflight. *J Appl Physiol.* 89: 2158-2164 (2000).
- 2) Miyamoto, A. et al.: Medical baseline data collection on bone and muscle change with space flight. *Bone.* 22: 79S-82S (1998).
- 3) 大 島 博 他: 宇宙飛行・長期臥床と骨代謝 *Clinical Calcium* 22: 1803-1812 (2012).
- 4) Leblanc, A. et al.: Bisphosphonates as a supplement to exercise to protect bone during long-duration spaceflight. *Osteoporos Int* 24: 2105-2114 (2013).
- 5) Levine, B.D. et al: Human muscle sympathetic neural and haemodynamic responses to tilt following spaceflight. *J Physiol* 538: 331-340 (2002).
- 6) Watenpaugh D.E. et al.: Lower body negative pressure exercise plus brief postexercise lower body negative pressure improve post-bed rest orthostatic tolerance. *J Appl Physiol.* 103:1964-1972 (2007).
- 7) Tanaka, K. at al.: Mobility of an elastic glove for extravehicular activity without prebreathing. *Aviation, Space, and Environmental Medicine.* 82: 909-912 (2011).