

宇宙環境での  $\dot{V}O_{2max}$  低下を抑制するための運動プログラム

松尾知明\*・田中喜代次\*\*・山田 深\*・大島 博\*・向井千秋\*

An Exercise Program to Prevent Decreased  $\dot{V}O_{2max}$  during SpaceflightMATSUO Tomoaki\*, TANAKA Kiyoji\*\*, YAMADA Shin\*,  
OHSIMA Hiroshi\* and MUKAI Chiaki\*

## Abstract

In a microgravity environment, the volume load on the left ventricle is reduced, which leads to myocardial atrophy, cardiac hypofunction, and severely decreased  $\dot{V}O_{2max}$ . Under these circumstances, exercise such as cycling can be a useful countermeasure. Prolonged exercise in space, however, has a substantial impact on resources in terms of time, calorie use, water loss, and heat generation. Therefore, for long-term space missions, astronauts require low-volume, time-efficient exercise. The purpose of this study was to develop an original cycling protocol that could control the increase in energy expenditure and have a significant impact on  $\dot{V}O_{2max}$  through ground-based experiments. In a preliminary experiment, we devised two candidate cycling protocols, i.e., sprint interval training (SIT) and high-intensity interval aerobic training (HIAT). Subsequently, we conducted two experiments (experiment 1: comparing the exercise energy expenditures of SIT and HIAT with that of moderate-intensity continuous aerobic training (CAT), used on the international space station as the main cycling protocol; experiment 2: comparing the effects of SIT and HIAT on  $\dot{V}O_{2max}$  and left ventricular mass with that of the CAT. As a result, our study revealed that the impacts of HIAT on  $\dot{V}O_{2max}$  and cardiomyocyte exceeded the impacts of the CAT despite the HIAT being performed with a far lower volume and in far less time than the CAT. We anticipate that the study will help in proposing means of exercise training for astronauts as well as sedentary adults in public health.

**Key words:** Maximal oxygen consumption, Cardiac mass, Astronauts, Microgravity environment

## 1. はじめに

National Aeronautics and Space Administration (NASA) が掲げる「将来の長期宇宙滞在プロジェクト（有人火星探査など）に向けて解決すべき重要課題」の一つに、“最大酸素摂取量（maximal oxygen consumption:  $\dot{V}O_{2max}$ ）の低下による身体パフォーマンスの低下”が挙げられている（図1）。宇宙飛行士を対象とした微小重力環境下での実験や、それを模擬したベッドレスト実験により、 $\dot{V}O_{2max}$  は数週間～数ヶ月間で20～30%低下することが明らかとなっている<sup>5,18</sup>。これを日本人の年齢

別  $\dot{V}O_{2max}$  基準値<sup>37</sup>と照合すると、30%の  $\dot{V}O_{2max}$  低下は30年分程度の加齢に伴う体力低下に匹敵する（40歳であれば70歳の水準にまで低下する）。実際、McGuire et al.<sup>24,25</sup>は、3週間のベッドレストによる  $\dot{V}O_{2max}$  低下と30年分の加齢に伴う  $\dot{V}O_{2max}$  低下と同程度であったことを、ベッドレスト実験後30年経過時の追跡調査で明らかにしている。さらに彼らは、ベッドレスト実験後40年経過時の追跡調査もおこない、ベッドレストの影響が40年分の体力低下と同等であったことも報告している<sup>23</sup>。火星探査など将来の長期滞在プロジェクトでは、宇宙滞在中

\* 宇宙航空研究開発機構 宇宙医学生物学研究室  
Space Biomedical Research Office, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

\*\* 筑波大学体育系  
Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

**☒ Risk of Reduced Physical Performance Capabilities Due to Reduced Aerobic Capacity**

**Short Title:** Aerobic  
**Element:** Human Health Countermeasures  
**Evidence:** Report  
**RMAT:** RMAT Report Not Available  
**Risk Master Logic Diagram:** Diagram  
**Point of Contact:** Steve Platts

Criticalities	
Lunar Outpost	Acceptable
Near Earth Asteroid	Acceptable
Mars	Unacceptable

**☒ Risk Statement**  
 Given the condition of reduced aerobic capacity as measured by  $\dot{V}O_{2max}$ , there is a possibility of reduced physical performance.

図1 NASA websiteに掲載されている $\dot{V}O_{2max}$ に関する記述  
 将来の有人火星探査プロジェクトに向けての課題の一つに「 $\dot{V}O_{2max}$ の低下による身体パフォーマンスの低下」が挙げられている（NASA websiteより引用）

の飛行士に強い身体活動を伴う作業（船外活動）を定常的に求める場面も少なからず想定される。また、月・火星での活動時や地球帰還時に、飛行士の生命が危険に曝される事態が万が一にも生じた場合、“あと30m走ることができれば・・・”などの事態を避けるためにも、宇宙滞在中の体力は一定レベル以上に維持しておかなければならない。 $\dot{V}O_{2max}$ の低下をいかに防ぐかは、今後の長期滞在プロジェクトの成功に向けた重要課題の一つとなる。

微小重力環境で $\dot{V}O_{2max}$ が低下する主な要因として、微小重力環境下で生じる心機能の低下が挙げられる。微小重力環境下では、体液減少、自重負荷軽減、身体不活動などの影響により心臓への負荷が軽減するため、心活動が慢性的に低下し、心機能が低下する<sup>17</sup>。また、心臓への負荷軽減は心臓形態そのものの変化（心筋萎縮）に繋がる<sup>30</sup>。心筋萎縮は帰還後の飛行士に認められた不整脈に関与している可能性もあり、心筋萎縮をいかに防止するかも、今後の長期滞在プロジェクトに向けては重要な課題となる。

運動（エクササイズ）による心臓への負荷増大は、微小重力環境下での $\dot{V}O_{2max}$ 低下を抑制するだけでなく、心筋萎縮の予防策としても有効である<sup>6</sup>。しかし、最近、長期宇宙滞在による飛行士の体重減少が問題視されている<sup>19</sup>。この体重減少の詳細な機序

は不明（現在、欧州宇宙機関が飛行士を対象とした実験を進行中）であるが、帰還した飛行士の主観的感想として「宇宙滞在中は食事時の満腹感を（地上時より）早い段階で感じた」という興味深いコメントが残されている。実際、宇宙滞在時の飛行士の食事摂取量の平均値が必要量（推奨量）の80%以下であったこと<sup>35</sup>や、ベッドレスト状況下では運動量が多いと食事摂取量が必要量を下回る傾向にあること<sup>2</sup>が先行研究で示されている。そのため最近では、エネルギー消費量（energy expenditure: EE）を増大させる、つまり、体重減少を促進させる内容の運動プログラムは、今後の長期滞在プロジェクトではマイナス要因となる可能性が指摘されている<sup>2,19,34-36</sup>。また、将来の有人火星探査プロジェクトでは、飛行士の生命維持に必要なとされる食糧だけでも輸送コストは膨大となる。運動によるEEの増大は体重減少を促進させるだけでなく、食糧搭載量を増加させ、輸送コストを圧迫する。

運動によるEEを軽減させることは運動時間の短縮にも繋がる。現在、国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）では、週6日、1日約2時間半の運動時間（準備等の時間も含まれるため実質は1時間半～2時間）が宇宙飛行士に義務付けられているが<sup>26</sup>、宇宙での限られた時間を有効活用するためにも、運動時間は可能な限り短縮させた

い。そのため今後の長期滞在プロジェクトに向けては、効率的、効果的に体力低下を防止できる運動プログラムがこれまで以上に必要となる。

ISSに宇宙飛行士が滞在するようになって十数年、この間に運動装置の改良が重ねられ、現在では、ISS内（微小重力環境）でも十分な運動ができる環境が整えられている。以前の運動装置の最大の問題は“運動負荷が十分掛けられない”という点であったが、最近になってようやく、心肺持久系、筋力系ともに、地上と同程度の十分な負荷が掛けられる装置の運用に至っている（図2）。こういった事情を背景に、宇宙医学研究における体力科学分野の研究者の議論の焦点は、以前の「微小重力環境下でいかに運動をおこなうか」から、将来の長期滞在プロジェクトを見据えて、「長期宇宙滞在中の飛行士がおこなうべき運動プログラムはいかにあるべきか」に移行しつつある。現在ISSに滞在中の宇宙飛行士がおこなっている運動プログラムは、個々で多少異なるものの、基本的には地上で一般人が健康増進のためにおこなう普遍的なプロトコルを主体に構成されている。つまり现阶段では、宇宙に長期間滞在する飛行士のために精査された特別な運動プロトコルは存在しない。宇宙滞在中も快適に運動がおこなえる特殊装置の運用が可能となった昨今、宇宙開発への貢献を志す体力科学分野の研究者が果たすべき今後の役割は、宇宙環境での運動の真の効果とその限界を精査した上で、長期間宇宙に滞在する飛行士に適した運動プログラムを具体的にし、提案することであろう。最近になり、宇宙飛行士の運動プログラムの時間短縮やEE削減に向けた研究の成果が報告され始めており<sup>4,7</sup>、世界各国でこの課題に取り組む機運が高まりつつある。

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)はこの課題に取り組むため、2010年11月より筑波大学と協力体制を組み、共同研究「長期宇宙滞在中の心機能低下を予防する運動療法に関する研究」に着手している。宇宙飛行士の運動プログラムを国内外で提案するためには、地上実験でその成果が示されている必要がある。JAXAと筑波大学の共同研究は、運動の時間とEEを減少させ、且つ、 $\dot{V}O_{2max}$ 低下や心筋萎縮の予防に効果のある自転車運動のプロトコルを考案し、その効果をまずは地上実験で検証することを目的としている。

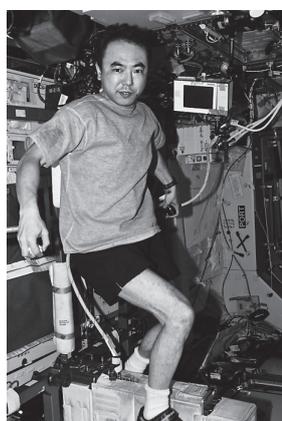
一方、微小重力環境で体力を低下させた宇宙飛行士が、日常的に無理なく、且つ、短時間で実践できる運動は、忙しく運動不足になりがちな現代人にも適用できる。本研究の成果は、宇宙飛行士の運動プログラムの提案だけでなく、生活習慣病の問題を抱える現代人の健康増進、体力向上に貢献できる。

本稿では、JAXAと筑波大学が取り組んでいる共同研究のこれまでの成果を報告する。

## 2. 研究方法

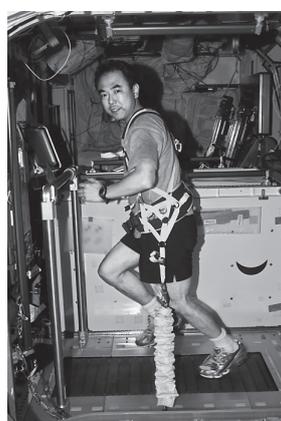
### 2.1 予備実験：JAXA プロトコルの決定

$\dot{V}O_{2max}$ を向上させるトレーニングとしては中強度での持続性トレーニング（continuous aerobic training: CAT）より高強度インターバルトレーニング（高強度運動の合間に低～中強度運動を絡めるトレーニング法）が有効である<sup>13,14</sup>。高強度インターバルトレーニングには2つのタイプ（①スプリント系（sprint interval training: SIT）、②有酸素系（high-intensity interval aerobic training: HIAT））がある。先行研究<sup>9,41</sup>によると、SITは末梢（筋）の酸素利用能の改善によって、HIATは中枢（心肺）の呼吸循



自転車エルゴメータ

(CEVIS)



トレッドミル

(T2)



筋カトレーニング

(ARED)

図2 国際宇宙ステーションに設置されている運動トレーニング装置（写真：JAXA）

環能の改善によって $\dot{V}O_{2max}$ が向上するとされている。SITの代表的なプロトコルには、最も短時間で $\dot{V}O_{2max}$ を向上させるものとして著名なTABATAプロトコル<sup>38</sup>などが、HIATの代表的なプロトコルには、最近多くの研究で活用されている4×4プロトコル<sup>42</sup>などがある。しかし、これらのプロトコルは強度が著しく高く、微小重力環境下で体力が顕著に低下した宇宙飛行士の“日常のトレーニング”としては馴染まない側面がある。予備実験では、このような事情を勘案した上で、いくつかのプロトコルを立案、試行し、宇宙飛行士に適用可能なSIT、HIATそれぞれのプロトコル案（JAXAプロトコル）を定める。

## 2.2 実験1：JAXAプロトコルのEEに関する実験

ある運動によるEEを検討する場合は、運動そのものによるEEだけでなく、運動後の酸素摂取量の増加分（excess post-exercise oxygen consumption：EPOC）も含めて考えなければならない。EPOCにより運動終了後のEEは安静レベルよりも著しく増加する（excess post-exercise EE: EPEE）。EPEEには運動の強度と時間が影響するが、特に強度の影響が著しい<sup>3,16</sup>。本研究では、JAXAプロトコル（SIT、HIAT）の運動時間を、ISSで主としておこなわれているプロトコル（CAT）の運動時間よりも顕著に短く設定するため、JAXAプロトコルの運動そのもののEEはCATのEEよりも少なくなるが、強度をCATより高く設定するJAXAプロトコルはEPEE

が増大し、運動中と運動後のEE合計値が予想よりも高くなる可能性が考えられる。そこで実験1では、クロスオーバー比較実験により、3つのトレーニングプロトコル（SIT, HIAT, CAT）の運動中と運動後3時間のEEを比較する。

## 2.3 実験2：JAXAプロトコルが $\dot{V}O_{2max}$ 、心筋重量に及ぼす効果に関する実験

実験2では、対象者に対して週5回×8週間のトレーニング介入をおこない、3つのトレーニングプロトコル（SIT, HIAT, CAT）が $\dot{V}O_{2max}$ や心筋重量に及ぼす効果を、無作為割付比較試験（randomized controlled trial: RCT）により検証する。

## 3. これまでの成果

### 3.1 予備実験：JAXAプロトコルの決定

現在ISSでは、心肺持久系の運動トレーニングとして1日45分程度の時間が割り当てられており、CATがその代表的なプロトコルとして実践されている。そこで我々はSITとHIATの各プロトコル考案にあたり、この「45分間のCAT」を基準とした上で、1) HIATはCATの半分程度、SITはCATの4分の1程度の所要時間となること、2) 運動習慣のない健康成人（微小重力環境で体力が低下した宇宙飛行士を想定）が“長期間、日常的”に実践できる内容であること、の2点を優先条件とし、各プロトコルの詳細を定めるための実験をおこなった。前述したようにSITの代表的なプロトコルには

表1 予備実験で決定した3つの自転車運動のプロトコル（文献20～22から引用）

	Program	Total time
Sprint Interval Training (SIT)	2 min (30 W, 60 rpm)	} Repeat 7 times (no rest at 7 <sup>th</sup> ) 10 min
	30 sec (120% $\dot{V}O_{2max}$ , over 85 rpm)	
	15 sec (rest)	
	3 min (30 W, 40 ~ 60 rpm)	
High-intensity Interval Aerobic Training (HIAT)	2 min (30 W, 60 rpm)	18 min
	3 min (85~90% $\dot{V}O_{2max}$ , 70 ~ 80 rpm)	
	2 min (50% $\dot{V}O_{2max}$ , 60 rpm)	
	3 min (85~90% $\dot{V}O_{2max}$ , 70 ~ 80 rpm)	
	2 min (50% $\dot{V}O_{2max}$ , 60 rpm)	
	3 min (80~85% $\dot{V}O_{2max}$ , 70 ~ 80 rpm)	
	3 min (30 W, 40 ~ 60 rpm)	
Continuous Aerobic Training (CAT)	2 min (30 W, 60 rpm)	45 min
	40 min (60~65% $\dot{V}O_{2max}$ , 60 rpm)	
	3 min (30 W, 40 ~ 60 rpm)	

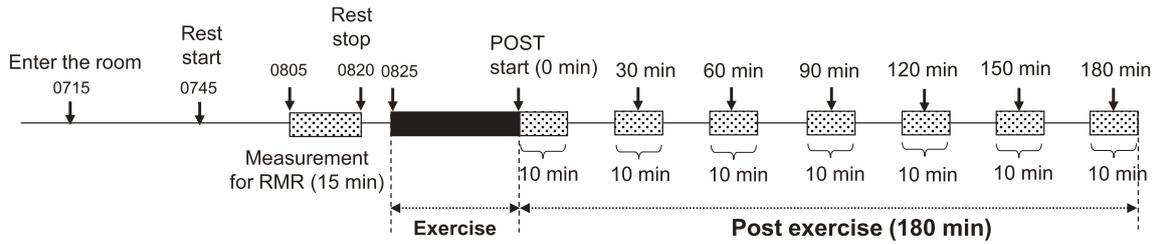


図3 測定の流れ（実験1）（文献20から引用）

TABATA プロトコル<sup>38</sup> ( $\dot{V}O_{2max}$  時の 1.7 倍程度に相当する負荷での 20 秒間の自転車運動を 10 秒間の休息期を挟んで計 7～8 回) や Gibala らのグループ<sup>9</sup> が推奨するプロトコル (30 秒間の all-out 自転車運動 (Wingate test、実質負荷量は体重の 7.5% など) を 4 分間の休息期を挟んで計 4～7 回) が、HIAT の代表的なプロトコルには 4 × 4 プロトコル<sup>42</sup> (最高心拍数の 90% に相当する負荷での 4 分間の自転車運動を最高心拍数の 70% に相当する負荷での 3 分間の休息期を挟んで計 4 回) や 2 × 5 プロトコル<sup>27</sup> (最高心拍数の 95% に相当する負荷での 2 分間の自転車運動を 1 分間の休息期を挟んで計 5 回) がある。これら先行研究のプロトコルを我々自身 (数名の実験協力者含む) が実践したところ、そのいずれのプロトコルも強度や所要時間の面で宇宙飛行士や低体力者の“日常のトレーニング”には適さない面があると感じられた。そこで我々は、SIT、HIAT の各インターバルトレーニングについて、運動期、休息期それぞれの運動強度と時間を変えたいくつかのプロトコルを立案しては試行する作業を 1 ヶ月間ほど繰り返し、上述した 2 つの条件を満たすプロトコルを探索した。この取り組みの結果として定めた SIT、HIAT およびそれらと比較する CAT のプロトコルの詳細を表 1 に示す。特に HIAT については、プロトコルを定めた後、運動習慣のない 2 名の健康成人男性を対象に、運動中と運動後 3 時間の EE の測定および週 5 回、2 週間のトレーニング介入実験をおこない、EPEE はそれほど増大しないこと、トレーニング介入により  $\dot{V}O_{2max}$  が増加することを確認した<sup>22</sup>。

### 3.2 実験 1：JAXA プロトコルの EE に関する実験

#### 実験デザイン：クロスオーバー比較実験

実験手順：運動習慣のない健康成人男性 10 名 (年齢:  $24.0 \pm 3.3$  歳; BMI:  $21.2 \pm 1.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) の安静時、運動中、運動後 3 時間の EE を呼気ガス分析装置により測定した。(酸素消費量と二酸化炭素産生量を測定し、それらの値から EE を算出した<sup>40</sup>)。運動

プロトコルは 3 種類 (SIT、HIAT、CAT) あるため、対象者 1 人が 3 パタンの実験 (半日 × 3 日) をおこなうこととした。運動時間以外の実験中の行動は 3 パタン全て同様とした。対象者の 1 回の測定の流れを図 3 に示した。統計解析は SAS 9.2 Windows 版を用いておこない、3 群間の平均値の比較には分散分析を用いた。

仮説：EPEE の影響は少なく、運動中と運動後 3 時間の EE の合計値は、CAT > HIAT > SIT の順に大きい。

#### 結果と考察（実験 1）

運動中の EE は、CAT ( $349 \pm 49 \text{ kcal}$ )、HIAT ( $161 \pm 20 \text{ kcal}$ )、SIT ( $77 \pm 8 \text{ kcal}$ ) の順で大きかった (図 4-①)。EPEE は、それぞれ  $13 \pm 13 \text{ kcal}$ 、 $21 \pm 16 \text{ kcal}$ 、 $32 \pm 19 \text{ kcal}$  であり、SIT は CAT より有意に大きかった (図 4-②)。EPEE は運動強度が高いほど大きかったものの、運動中と運動後 3 時間の EE の合計値は、CAT > HIAT > SIT であり (図 4-③)、EPEE が総 EE に占める割合は大きくなかった (仮説が支持された)。実験 1 により、JAXA プロトコル (SIT、HIAT) は、現在 ISS で主として実践されているプロトコル (CAT) よりも運動時間を短縮し、EE を抑制できるプロトコルであることが確認された。

JAXA プロトコルと CAT の EE の差は 180～250 kcal であった。この差は、ISS の宇宙食 100～200 g に相当する (例：レトルトポークカレー、222 kcal、200 g)。これを MARS 500 プロジェクト (6 人の被験者が地上の隔離施設で 520 日間生活する、有人火星探査を想定した国際協力研究) にあてはめて試算すると、運動による EE の差は 270～540 kg の食糧搭載量に相当することとなる ( $100 \sim 200 \text{ g} \times \text{週} 6 \text{ 回} \times \text{運動} \times 75 \text{ 週} \times 6 \text{ 名}$ )。数値の算出はあくまで概算であり、実際の運用には様々な状況を想定した詳細な計算が必要となるが、この実験の結果は、宇宙滞在中の運動プロトコルの選択が輸送コスト削減に通じ得ることを示している。実験 1 の詳細を学術誌に報告した<sup>20</sup>。

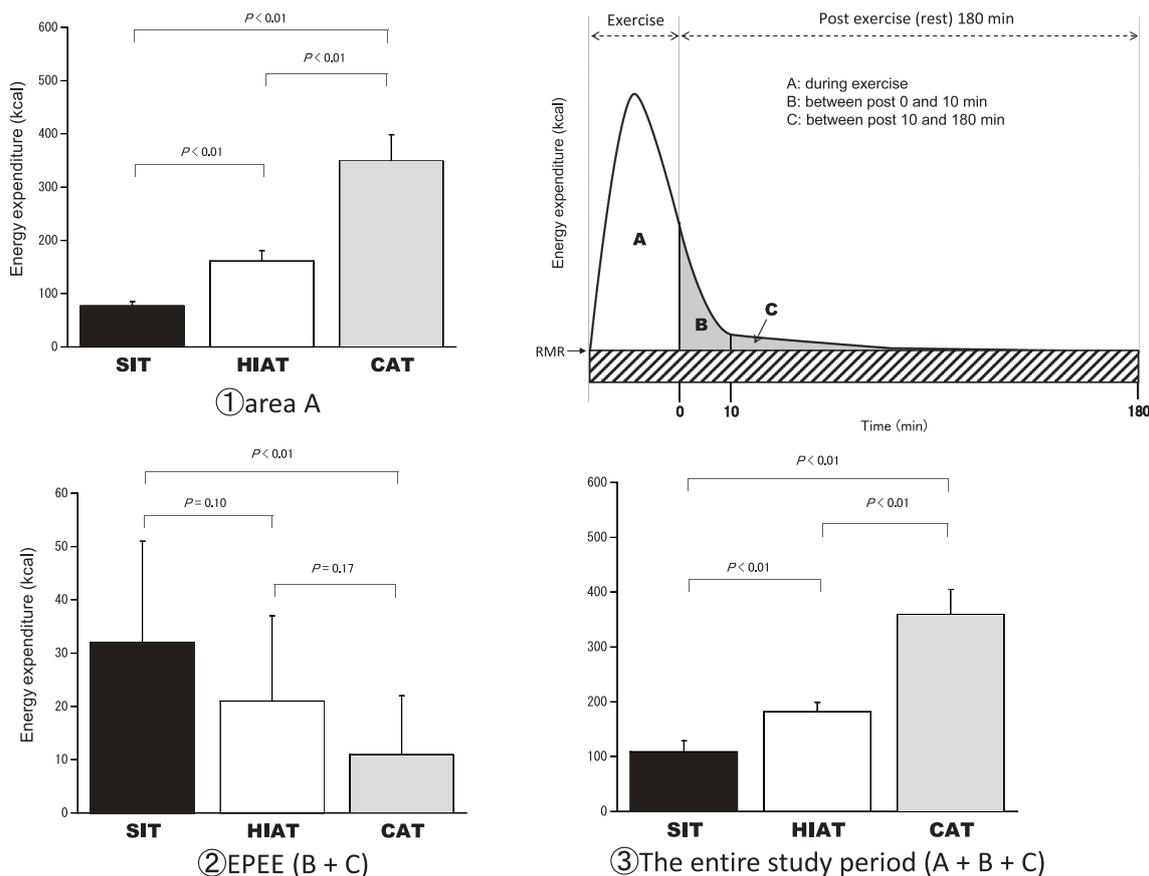


図4 エネルギー消費量の比較 (実験1) (文献20から引用)

### 3.3 実験2: JAXA プロトコルが $\dot{V}O_{2max}$ 、心筋重量に及ぼす効果に関する実験

実験デザイン: RCTによる介入実験 (3群比較)

実験手順: SIT (14名)、HIAT (14名)、CAT (14名)の3群に分けられた運動習慣のない健康成人男性42名 (年齢:  $26.5 \pm 6.2$  歳; BMI:  $21.3 \pm 1.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) が、各群それぞれのプロトコルによるトレーニングを週5回、8週間おこなった。介入前後に、 $\dot{V}O_{2max}$  と心筋重量 (MRI) を測定した。統計解析は SAS 9.2 Windows 版を用いておこなった。同一群内の各測定項目の平均値の比較 (トレーニング前後の数値比較) には対応のある t 検定を、3群間の平均値の比較には分散分析を用いた。分散分析で有意差が認められた場合、post hoc test として Tukey-Kramer's 法を適用した。

仮説:  $\dot{V}O_{2max}$  の増加は SIT、HIAT が CAT よりも大きい。心筋重量への影響は HIAT が最も大きい。

#### 結果と考察 (実験2)

介入前の年齢 (SIT,  $26.4 \pm 6.5$  歳; HIAT,  $27.2 \pm 6.4$  歳; CAT,  $25.9 \pm 6.0$  歳)、BMI (SIT,  $21.3 \pm 1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ; HIAT,  $21.4 \pm 1.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ; CAT,  $21.2 \pm 2.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )、 $\dot{V}O_{2max}$  (SIT,  $43.9 \pm 6.7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ; HIAT,  $41.9 \pm 5.6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ; CAT,  $42.0 \pm 6.8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ )、心筋重量

(SIT,  $103 \pm 14 \text{ g}$ ; HIAT,  $102 \pm 15 \text{ g}$ ; CAT,  $110 \pm 17 \text{ g}$ ) の数値に3群間で有意差はみとめられなかった。トレーニング期間中の対象者の参加率は、SIT:  $96.1 \pm 5.7\%$ 、HIAT:  $97.6 \pm 4.3\%$ 、CAT:  $95.9 \pm 7.3\%$  であり、3群間に有意差はなかった (コンプライアンスは各群とも高く、群間差はなかった)。また、3群ともドロップアウト者はゼロで、全42名が8週間のトレーニングを完遂した。これらの結果は、3つのプロトコル全てが、運動習慣がなく体力レベルが低い対象者の日常の運動トレーニングとして適用可能であることを、また、微小重力環境で体力レベルが低下した宇宙飛行士の日常の運動トレーニングとしても適用できる可能性を示すものであった。

図5が実験2の主な結果である。介入により全ての群で  $\dot{V}O_{2max}$  は有意に増加した (SIT, 17%; HIAT, 23%; CAT, 10%) が、HIATの増加率はCATの増加率より有意に高かった。また、SITとHIATでは心筋重量が有意に増加したが、CATでは有意な増加はみとめられなかった。これらの結果を国際学術会議で報告した<sup>21</sup> (詳細な結果を学術誌に投稿中)。

この分野の研究を精力的におこなっているテキサス大学のLevineらの研究グループの2001年の研究<sup>29</sup>を見ると、微小重力環境での心筋萎縮を予防

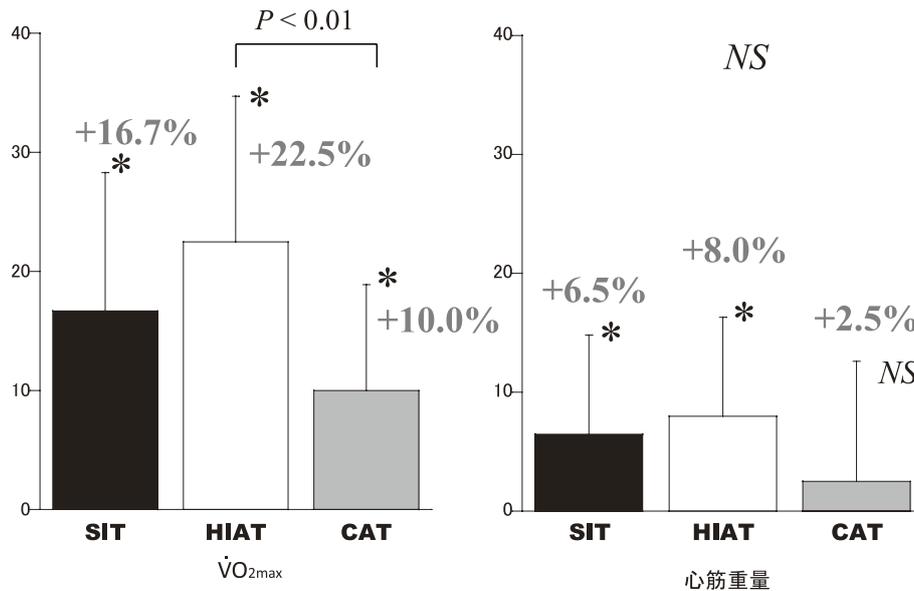


図5 運動トレーニング介入による  $\dot{V}O_{2max}$  と心筋重量の変化率の比較 (実験2) (文献21から引用)  
 同一群内のトレーニング前後の数値比較 (Paired Student's t test) の結果と分散分析による3群比較の結果を示した。  
 \*:  $P < 0.05$  (Paired Student's t test)、NS: not significant

するためには、週7回、1日90分間の中～高強度(最高心拍数の75%程度)での運動(cycling)が必要であるとの見解が示されている(2010年の彼らの研究<sup>33</sup>でもこの方法が採用されている)。しかし宇宙飛行士の運動時間に係る昨今の国際情勢のもと、彼らも運動時間の短縮化を試みており、2012年の研究<sup>12</sup>では、運動群のトレーニング内容は“週6回、1日30～45分の運動(rowing)”で構成されている(cyclingよりも心筋に及ぼす影響が大きい可能性があるという理由により、この実験ではrowingが採用されている)。この研究<sup>12</sup>では、5週間のベッドレストにより運動をおこなわない群(コントロール群)では  $\dot{V}O_{2max}$  が22%程低下し、心筋重量は8%程減少している。一方、運動群の  $\dot{V}O_{2max}$  低下は2%程、心筋重量に関しては8%程の増加であった。今回の我々の実験によると、HIAT群の  $\dot{V}O_{2max}$  は23%増加し、心筋重量は8%増加した。ベッドレスト実験による体力低下の数値と、通常環境下での実験による体力向上の数値を直接比較することは適切でないが、我々の実験で得られたHIATの顕著なトレーニング効果は、微小重力環境での  $\dot{V}O_{2max}$  低下と心筋萎縮を予防する運動プログラムとしてHIATが有効であることを期待させるものであった。

実験2で明らかとなったもう一つの重要な結果は、現在、ISSで主としておこなわれているCATに関するものである。CAT群では、 $\dot{V}O_{2max}$  の向上には一定の効果が見られたものの、心筋へのインパクトが大きくなかった。体力科学の分野でAT

(anaerobic threshold) トレーニングやニコニコペーストレーニングとして知られるCATは、体力向上に効果があり、且つ、効率良くエネルギーを消費できるトレーニング法として活用されている。肥満者や心疾患などの運動療法や運動非習慣者の体力向上策として、医師やフィットネストレーナーが自転車運動を対象者に勧める際、ほぼ全てのケースでCATが採用されていると言っても過言ではない。しかし、長期宇宙滞在中の宇宙飛行士の運動トレーニング法としては、CATはEEを増大させ体重減少を促進するうえ、 $\dot{V}O_{2max}$  や心筋に及ぼすインパクトは必ずしも大きくないことから、“時間効率の悪いプロトコル”に位置づけられるかもしれない。宇宙滞在中に飛行士がおこなう運動トレーニングとしては、①「体力低下防止のために全ての飛行士が最低限おこなうべき運動」と②「趣味やリラクゼーションの一環として個人の任意でおこなわれる運動」の2タイプに分けて捉える必要がある。その観点で考えると、“宇宙滞在中に最低限おこなうべき運動”としては、CATは適していない。

#### 4. 体力科学研究における本研究の意義

##### 【実験1】

運動のプロトコルの違いがEPOCやEPEEに及ぼす影響を検討したこれまでの研究では、運動の時間や強度がEPOCやEPEEに及ぼす影響を明らかにするため、比較するプロトコルの運動量(EE)は等価とするのが慣例である<sup>31,32</sup>。これらの先行研究で

EPOC や EPEE には運動時間よりも運動強度が強く影響することが明らかにされている。本研究では、研究目的の都合上、高強度インターバルトレーニングの運動時間と運動中の EE を中強度持続性トレーニングよりも顕著に少なく設定した。その結果、高強度インターバルトレーニング（特にスプリント系）の運動量が中強度持続性トレーニングの運動量のわずか 20%程度であっても、EPEE は高強度インターバルトレーニングで有意に大きくなることが示された（図 4-②）。Gore and Withers<sup>10</sup> は EPOC への影響の割合は運動強度が 46%程度、運動時間が 9%程度であったと報告している。実験 1 の結果はそのような見解を支持するものであり、EPOC や EPEE には運動時間より運動強度が強く影響することを改めて示すものであった。

一方、実験 1 では、EPEE の全体量は小さくなく、総 EE に占める割合は小さいことも明らかとなった。身体活動が肥満やメタボリックシンドロームの改善に及ぼす効果を検討する観点から、総 EE の増加に EPEE が大きく貢献することを示した研究<sup>15</sup>がある中、それに異議を唱え、EPEE による貢献は限定されることを示した研究<sup>28</sup>もある。総 EE に占める EPEE の割合が小さいことが示された実験 1 の結果は、後者の見解を支持するものであった。

## 【実験 2】

アスリートの  $\dot{V}O_{2max}$  を向上させるトレーニングとしては中強度持続性トレーニングより高強度インターバルトレーニングが優れていることについては学術的なコンセンサスが得られている。一方、疾病の治療や予防を目的とした運動療法の分野では、運動強度が高く設定されるインターバルトレーニングはリスク回避の観点から敬遠され、ニコニコペースなどとして知られる中強度持続性トレーニングが有効とされてきた。しかし近年、CHD（coronary heart disease）患者<sup>42</sup>、COPD（chronic obstructive pulmonary disease）患者<sup>1</sup>、メタボリックシンドローム該当者<sup>39</sup>、心筋梗塞後のリハビリ患者<sup>11</sup>など、体力レベルの低い者に対しても高強度インターバルトレーニングが有効であることを示す研究成果が相次いで報告されている。最近の数篇の総説論文<sup>9,41</sup>では、高強度インターバルトレーニングがアスリートだけのものだけでなく、医療分野での新しい運動療法として、あるいは忙しい現代社会人の時間節約型の運動方法として期待できることについて述べられている。

これまでの研究では、心臓への影響が著しいのはスプリント系インターバルトレーニング（SIT）で

はなく、有酸素系インターバルトレーニング（HIAT）であるとされている。本研究では、MRI を用いて心筋重量を測定し、自転車運動の 3 つのプロトコル（SIT, HIAT, CAT）が心筋重量に及ぼす影響を比較した。心筋重量の測定には心臓エコー法より心臓 MRI 法が適している<sup>8</sup>とされる中、プロトコルの違いが心筋重量に及ぼす影響を MRI 法によって比較したデータはこれまで報告されていない。本研究の結果、運動量が多くても、中強度持続性運動が心筋に及ぼす影響は大きくないこと、一方、運動量が少なくても、高強度インターバルトレーニングでは、HIAT だけでなく SIT であっても、心筋に著しい影響を及ぼすことが明らかとなった。3 つのプロトコルの  $\dot{V}O_{2max}$  向上の差には心筋に及ぼす効力の差が影響したものと考えられる。

## 5. 今後の課題

これまでの（地上）研究で、JAXA プロトコル（特に HIAT）は、現在 ISS で主として実践されている自転車運動のプロトコル（CAT）よりも、運動時間と運動による EE を軽減でき、且つ  $\dot{V}O_{2max}$  や心筋に著しい効果を及ぼすことが確認できた。運動量（時間）を軽減させる方法としては、1 回あたりの運動時間を短縮させる方法と、週当たりの運動頻度を軽減させる方法とがある。週 5 回（8 週間）の HIAT が  $\dot{V}O_{2max}$  や心筋重量に及ぼす効果は予想以上に大きかった。そこで現在我々は、HIAT の週当たりのトレーニング頻度を減少させた場合の効果を検証する実験をおこなっている。

一方、本研究はその目的を“宇宙飛行士の運動プログラムの考案”としながら、宇宙飛行士を実験対象者としていない、という本質的な研究の限界を有している。地上で生活する運動非習慣者（低体力者）の  $\dot{V}O_{2max}$  向上に有効であったトレーニング法が、微小重力環境における宇宙飛行士の  $\dot{V}O_{2max}$  低下予防にも有効であるかは不明である。これを検証するためには、飛行士を対象とした ISS での実験（宇宙実験）や微小重力環境を模擬した環境での実験（ベッドレスト実験）が不可欠となる。それらを実現するには技術面、費用面での課題が多いが、今後も精力的に本テーマに取り組み、将来の有人火星探査プロジェクト、あるいは国民の健康増進策にその成果を役立てたい。

## 謝 辞

本研究にご協力いただいた参加者の皆様、JAXA 宇宙医学生物学研究室の皆様、筑波大学関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。また、筑波大学名誉教

授 (JAXA 嘱託) 太田敏子先生には、JAXA での研究活動全般において懇篤なご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。本研究は内閣府最先端研究開発支援プログラムの一環としておこなわれました (MRI 設備の利用)。また、本研究は JAXA 宇宙医学生物学研究室研究費を用いておこないました。

## 文 献

- 1) Beauchamp MK, Nonoyama M, Goldstein RS, Hill K, Dolmage TE, Mathur S, Brooks D (2010): Interval versus continuous training in individuals with chronic obstructive pulmonary disease a systematic review. *Thorax* 65:157-164.
- 2) Bergouignan A, Momken I, Schoeller DA, Normand S, Zahariev A, Lescure B, Simon C, Blanc S (2010): Regulation of energy balance during long-term physical inactivity induced by bed rest with and without exercise training. *J Clin Endocrinol Metab* 95:1045-1053.
- 3) Borsheim E, Bahr R (2003): Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption. *Sports Med* 33:1037-1060.
- 4) Caruso JF, Borgsmiller JA, Riner RD, Mason ML, Lutz BR, Nelson CC (2012): Net energy expenditure of gravity-independent high-speed resistive exercise done by women. *Aviat Space Environ Med* 83:111-117.
- 5) Convertino VA, Goldwater DJ, Sandler H (1986): Bedrest-induced peak  $VO_2$  reduction associated with age, gender, and aerobic capacity. *Aviat Space Environ Med* 57:17-22.
- 6) Dorfman TA, Levine BD, Tillery T, Peshock RM, Hastings JL, Schneider SM, Macias BR, Biolo G, Hargens AR (2007): Cardiac atrophy in women following bed rest. *J Appl Physiol* 103:8-16.
- 7) Gast U, John S, Runge M, Rawer R, Felsenberg D, Belavý DL (2012): Short-duration resistive exercise sustains neuromuscular function after bed rest. *Med Sci Sports Exerc* 44:1764-1772.
- 8) Germain P, Roul G, Kastler B, Mossard JM, Bareiss P, Sacrez A (1992): Inter-study variability in left ventricular mass measurement. Comparison between M-mode echography and MRI. *Eur Heart J* 13:1011-1019.
- 9) Gibala MJ, McGee SL (2008): Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exerc Sport Sci Rev* 36:58-63.
- 10) Gore CJ, Withers RT (1990): Effect of exercise intensity and duration on postexercise metabolism. *J Appl Physiol* 68:2362-2368.
- 11) Guiraud T, Nigam A, Gremeaux V, Meyer P, Juneau M, Bosquet L (2012): High-intensity interval training in cardiac rehabilitation. *Sports Med* 42:587-605.
- 12) Hastings JL, Krainski F, Snell PG, Pacini EL, Jain M, Bhella PS, Shibata S, Fu Q, Palmer MD, Levine BD (2012): Effect of rowing ergometry and oral volume loading on cardiovascular structure and function during bed rest. *J Appl Physiol* 112:1735-1743.
- 13) Helgerud J, Høydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, Simonsen T, Helgesen C, Hjørth N, Bach R, Hoff J (2007): Aerobic high-intensity intervals improve  $VO_{2max}$  more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc* 39:665-671.
- 14) Kemi OJ, Haram PM, Loennechen JP, Osnes JB, Skomedal T, Wisløff U, Ellingsen Ø (2005): Moderate vs. high exercise intensity: differential effects on aerobic fitness, cardiomyocyte contractility, and endothelial function. *Cardiovasc Res* 67:161-172.
- 15) Knab AM, Shanely RA, Corbin KD, Jin F, Sha W, Nieman DC (2011): A 45-minute vigorous exercise bout increases metabolic rate for 14 hours. *Med Sci Sports Exerc* 43:1643-1648.
- 16) LaForgia J, Withers RT, Gore CJ (2006): Effects of exercise intensity and duration on the excess post-exercise oxygen consumption. *J Sports Sci* 24:1247-1264.
- 17) Lee SM, Moore AD, Everett ME, Stenger MB, Platts SH (2010): Aerobic exercise deconditioning and countermeasures during bed rest. *Aviat Space Environ Med* 81:52-63.
- 18) Levine BD, Lane LD, Watenpugh DE, Gaffney FA, Buckley JC, Blomqvist CG (1996): Maximal exercise performance after adaptation to microgravity. *J Appl Physiol* 81:686-694.
- 19) Matsumoto A, Storch KJ, Stolfi A, Mohler SR, Frey MA, Stein TP (2011): Weight loss in humans in space. *Aviat Space Environ Med* 82:615-621.
- 20) Matsuo T, Ohkawara K, Seino S, Shimojo N, Yamada S, Ohshima H, Tanaka K, Mukai C (2012): An exercise protocol designed to control energy expenditure for long-term space missions. *Aviat Space Environ Med* 83:783-789.
- 21) Matsuo T, Saotome K, Seino S, Shimojo N, Matsu-shita A, Iemitsu M, Ohshima H, Tanaka K, Mukai C

- (2012): Myocardial Mass Increases with both Sprint- and Aerobic-type Interval Exercise but not with a Traditional, Continuous Aerobic Exercise in Sedentary Adults: An 8-week Randomized Intervention Study. *Circulation* 126 (Meeting Abstracts) A10704.
- 22) Matsuo T, Seino S, Ohkawara K, Tanaka K, Yamada S, Ohshima H, Mukai C (2012): A Preliminary Exercise Study of Japanese Version of High-intensity Interval Aerobic Training (J-HIAT). *Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan* 10:Tp15-17.
- 23) McGavock JM, Hastings JL, Snell PG, McGuire DK, Pacini EL, Levine BD, Mitchell JH (2009): A forty-year follow-up of the Dallas Bed Rest and Training study: the effect of age on the cardiovascular response to exercise in men. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 64:293-299.
- 24) McGuire DK, Anstrom KJ, Peterson ED (2003): Influence of the Angioplasty Revascularization Investigation National Heart, Lung, and Blood Institute Diabetic Clinical Alert on practice patterns: results from the National Cardiovascular Network Database. *Circulation* 107:1864-1870.
- 25) McGuire DK, Levine BD, Williamson JW, Snell PG, Blomqvist CG, Saltin B, Mitchell JH (2003): A 30-year follow-up of the Dallas Bedrest and Training Study: II. Effect of age on cardiovascular adaptation to exercise training. *Circulation* 104:1358-1366.
- 26) Moore AD, Lee SMC, Stenger MB, Platts SH (2010): Cardiovascular exercise in the U.S. space program: Past, present and future. *Acta Astronautica* 66:974-988.
- 27) Nybo L, Sundstrup E, Jakobsen MD, Mohr M, Hornstrup T, Simonsen L, Bülow J, Randers MB, Nielsen JJ, Aagaard P, Krstrup P (2010): High-intensity training versus traditional exercise interventions for promoting health. *Med Sci Sports Exerc* 42:1951-1958.
- 28) Ohkawara K, Tanaka S, Ishikawa-Takata K, Tabata I (2008): Twenty-four-hour analysis of elevated energy expenditure after physical activity in a metabolic chamber: models of daily total energy expenditure. *Am J Clin Nutr* 87:1268-1276.
- 29) Palmer D, Perhonen M, Zuckerman JH, Witkowski S, Zhang R, Levine BD (2001): Prolonged exercise training during head-down tilt bedrest preserves upright exercise capacity. *Med Sci Sports Exerc* 33:S299.
- 30) Perhonen MA, Franco F, Lane LD, Buckey JC, Blomqvist CG, Zerwekh JE, Peshock RM, Weatherall PT, Levine BD (2001): Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight. *J Appl Physiol* 91:645-653.
- 31) Phelain JF, Reinke E, Harris MA, Melby CL (1997): Postexercise energy expenditure and substrate oxidation in young women resulting from exercise bouts of different intensity. *J Am Coll Nutr* 16:140-146.
- 32) Sedlock DA, Fissinger JA, Melby CL (1989): Effect of exercise intensity and duration on postexercise energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc* 21:662-666.
- 33) Shibata S, Perhonen M, Levine BD (2010): Supine cycling plus volume loading prevent cardiovascular deconditioning during bed rest. *J Appl Physiol* 108:1177-1186.
- 34) Stein TP (2000): The relationship between dietary intake, exercise, energy balance and the space craft environment. *Pflugers Arch* 441:R21-31.
- 35) Stein TP (2012): Weight, muscle and bone loss during space flight: another perspective. *Eur J Appl Physiol* (in press).
- 36) Stein TP, Leskiw MJ, Schluter MD, Hoyt RW, Lane HW, Gretebeck RE, LeBlanc AD (1999): Energy expenditure and balance during spaceflight on the space shuttle. *Am J Physiol* 276:R1739-1748.
- 37) 鈴木政登、田中喜代次、須藤美智子、澤田 亨、小田切優子 (2009) : 日本人の健康関連体力指標最大酸素摂取量の基準値. *デサントスポーツ科学* 30:3-14.
- 38) Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, Yamamoto K (1996): Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and  $VO_{2max}$ . *Med Sci Sports Exerc* 28:1327-1330.
- 39) Tjønnå AE, Lee SJ, Rognmo Ø, Stølen TO, Bye A, Haram PM, Loennechen JP, Al-Share QY, Skogvoll E, Slørdahl SA, Kemi OJ, Najjar SM, Wisløff U (2008): Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome: a pilot study. *Circulation* 118:346-354.
- 40) Weir JB (1949): New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109:1-9.
- 41) Wisløff U, Ellingsen O, Kemi OJ (2009): High-intensity interval training to maximize cardiac benefits

- of exercise training? *Exerc Sport Sci Rev* 37:139–146.
- 42) Wisløff U, Støylen A, Loennechen JP, Bruvold M, Rognmo Ø, Haram PM, Tjønnå AE, Helgerud J, Slørdahl SA, Lee SJ, Videm V, Bye A, Smith GL, Najjar SM, Ellingsen Ø, Skjaerpe T (2007): Superior cardiovascular effect of aerobic interval training versus moderate continuous training in heart failure patients: a randomized study. *Circulation*. 115:3086–3094.