

第4章 筋量・筋力の変化に対する抵抗トレーニングの有用性の検証

川島紫乃¹、水野 康¹、渡辺友紀子²、大島 博¹

1. 緒言（はじめに）

国際宇宙ステーション計画の進捗に伴い、3～6 ヶ月間の長期宇宙滞在が定常的に開始された。ヒトが宇宙滞在をする際の医学・生理学的問題点の一つとして、筋萎縮、筋線維特性の変化およびそれらに伴う筋機能の低下がある^{2,11,14,19,27,32,40}。有人宇宙飛行においてこれら筋の変化は、帰還時における宇宙飛行士の緊急脱出能力を低下させることや、帰還後の日常生活における歩行障害や転倒など、数多くの問題を引き起こす可能性を有している。このため、実際の国際宇宙ステーション滞在中には、筋萎縮や骨量減少抑制を主目的として、週に5～6回の有酸素性運動および抵抗運動を行っている。このような対策法開発の一環として、微小重力環境下における筋機能変化の機序解明や具体的な対策法の検討など、今日まで種々の研究が行われてきた。このうち、ヒトを対象とした研究では、宇宙飛行前後の医学データ取得、地上における微小重力を模擬したベッドレスト研究、および人為的に廃用性萎縮を引き起こすギブス固定を行う研究などがある^{2-9, 11-15, 17-29, 32-40}。これらはいずれも数少ない飛行機会や多大な労力を要する地上実験によるものであり、これらから得られた限られた情報を基に実際の宇宙滞在時の対策法を策定しているのが現状である。またベッドレストは、ヒトを対象とした地上模擬実験手法として最もよく用いられているが、今日までのほとんどのベッドレスト実験が1～1.5 ヶ月以下の期間で行われている^{3-5,7,12,13,15,17,18,34-38}。すなわち、既に数ヶ月の長期宇宙滞在が開始されているにもかかわらず、これに相当する期間の地上模擬実験はほとんど行われていない。今回、JAXA、ESA、および CNES によって共同で国際宇宙ステーションにおける長期宇宙滞在時を想定したベッドレスト実験が実施された。本研究では、運動機能を支える上で極めて重要な要素である下肢および体幹の筋について、筋横断面積と筋力を評価し、長期宇宙滞在を想定した地上基礎データの取得、および実施された運動対策法の有効性について検討することとした。

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙医学グループ² (株)エイ・イー・エス

2. 方法

2. 1 倫理的な審査、被験者の選抜、ベッドレストの実施概要

倫理的な審査は日本及びフランス両国にて行われ承認された。被験者は26~45歳のヨーロッパ国籍を有する健康成人男性25名であり、年齢、身長、および体重に群間の差が生じないように配慮して、対照群9名、運動群9名および薬物投与群7名の3群に分類した。全被験者は、6度ヘッドダウンさせたベッドにて90日間の安静臥床（以下、ベッドレスト）を実施した。運動群はベッドレスト中にESAが開発した、微小重力下でも使用可能な運動機器である「Fly-Wheel(以下、FW)運動器」を用いて最大努力にて1回/3日の頻度で抵抗トレーニングを実施した。薬剤投与群は、90日間のベッドレスト前に骨量減少予防薬を静注投与させた。ベッドレスト中、被験者は食事、洗面、排泄、入浴その他すべての日常生活をベッドレスト条件下で行った。なお、倫理的な審査、被験者の選抜、ベッドレストの実施条件の詳細（栄養条件を含む）は第1章に記載する。

2. 2 除脂肪量計測

除脂肪量の測定は、二重エネルギーX線骨塩測定法（Dual-energy X-ray Absorptiometry法; DXA法）により、Hologic QDR-4500（Hologic Inc., Bedford, MA）を用い、右下肢について行った。測定時期はベッドレスト前(ベースライン期)、ベッドレスト90日目（Head Down Tilt 90 ; HDT90）および回復13（Recovery13;R+13）,45（R+45）,および90日後（R+90）の計5回行われた。

2. 3 筋横断面積の測定

2. 3. 1 筋横断像の撮像

磁気共鳴画像法（Magnetic Resonance Imaging; MRI）により、右下肢と体幹を撮像した。下肢については、ベースライン期、ベッドレスト29日目（HDT29）、ベッドレスト89日目（HDT89）、回復13日後（R+13）、および回復90日後（R+90）の計5回、体幹については、実施上の問題により第1セッションの被験者（14名）ではベースライン期、HDT89 および R+13、第2セッションの被験者（11名）ではベースライン期、HDT89 および R+90 のそれぞれ計3回行った。

下肢の撮像は、仰臥位・膝関節伸展位にて行った。まず縦断像を撮像し、その後に上前腸骨棘から足関節までスライス厚10mm およびスライス間隔0mm で連続的に横断像を撮像した。

体幹（腰部傍脊柱筋群および大腰筋）の撮像は、第1腰椎から仙骨付近までの縦断像を撮像し、その画像から、椎体および椎間板毎に（Axial）スライス厚5mm およびスライス間隔10mm で横断像を撮像した。使用した機器は1.0T（Siemens SA medical division）のMRI装置であり、撮像時のパルスシーケンスは、SE法（Spin Echo）、TR（Time to Repetition）600msec、TE（Time to Echo）22msec、マトリックス256×256、積算回数1回であり、画像データはCD-ROMに保存された。

2. 3. 2 筋横断面積の算出

筋横断面積の解析は、大腿、下腿、および体幹部の MRI 横断像から各筋群を代表すると考えられる 1 枚の横断像について行った。大腿部については大転子上端から外側顆間結節に至るまでの中央位を、下腿部は脛骨上端から脛骨外果に至るまでの中央位における筋横断面積を採用し、ベースライン期、HDT29、HDT89、R+13、および R+90 の計 5 回の測定時期について解析した。体幹については第 4/5 腰椎椎間板中心を通る位置の横断像について筋横断面積を求め、ベースライン期、HDT89、R+13、および R+90 の計 4 回の測定時期の解析を行った。

解析対象とした筋群は、図 1 に示す膝関節伸展筋群（内側広筋・大腿直筋・外側広筋・中間広筋）および屈曲筋群（大腿二頭筋短頭・長頭・半腱様筋・半膜様筋・内転筋）、図 2 に示す足関節背屈筋（前脛骨筋）および足関節底屈筋群（腓腹筋・ひらめ筋）、図 3 に示す腰部傍脊柱筋群（多裂筋、最長筋、腰肋筋）および大腰筋とした。

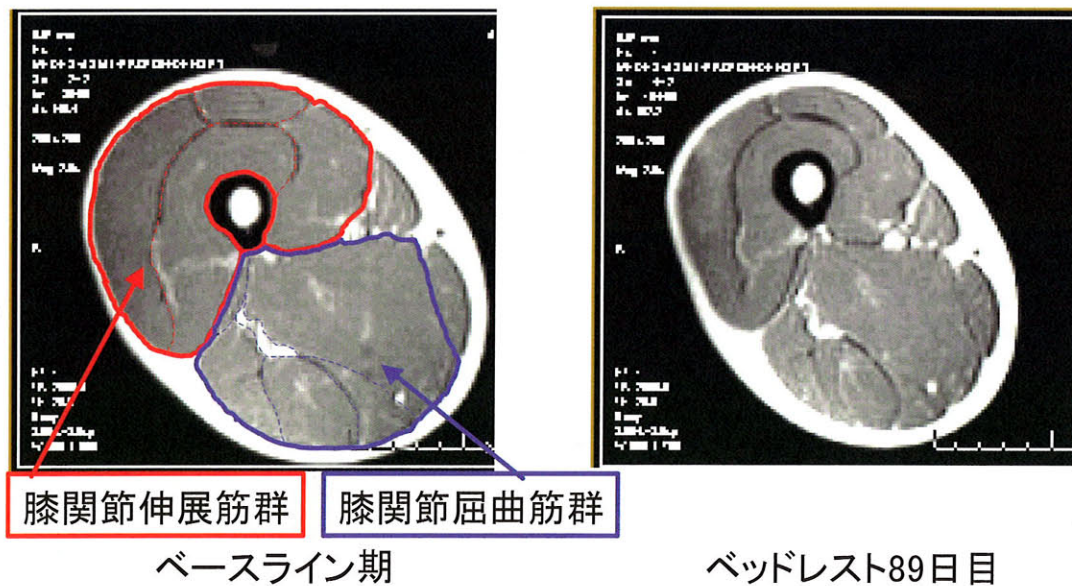


図1 ベッドレスト前後の大腿中央部位MRI画像

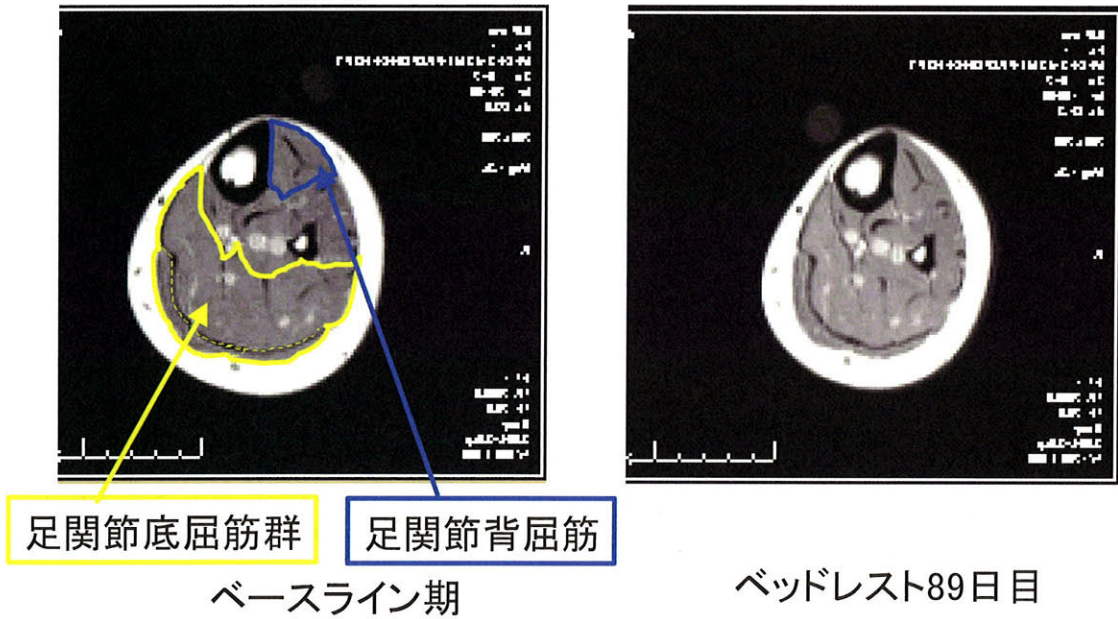


図2 ベッドレスト前後の下腿中央部位MRI画像

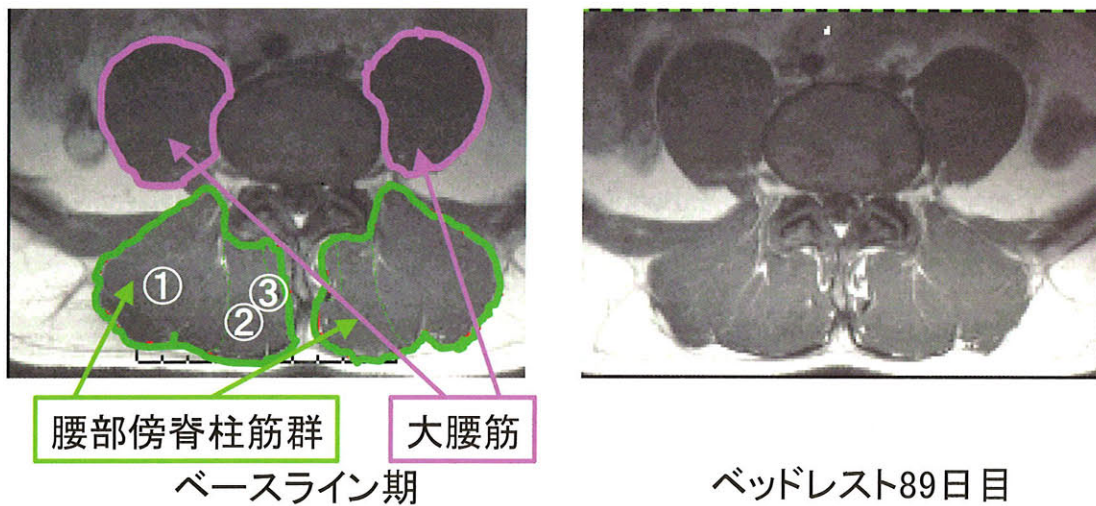


図3 ベッドレスト前後の腰部MRI画像
(L4/5椎間板部位における横断像)

①: 腰肋筋、②: 最長筋、③: 多裂筋

解析は、Windows コンピューター上の画像編集ソフト（e-film medical 社製 e-film および adobe 社製 photoshop 6.0）に画像を取り込み、タブレット（WACOM 社製 intuos 2 i420）を用いて対象となる筋群をトレースした。ただし、大腰筋については横断面積の絶対値が小さく、コンピューター画面上では精度が不十分であったため、画像をプリンター（CANON 社製 LASER SHOT LBP1820）で紙出力し、トレーシングペーパーを用いて筋の輪郭をトレースした後に、スキャナー（EPSON 社製 GT-9300UF）にて輪郭を取りこむこととした。これらトレースした各筋群の横断面積を画像解析ソフト（adobe 社製 Scion Image 1.62）を用いて算出した。

2. 4 筋力測定

筋力測定は等速性筋力測定装置（Cybex 社製 Cybex6000）を用いて筋力を測定した。筋力測定の測定部位および角速度は、右下肢における膝関節伸展・屈曲筋力では 0（関節角度 90 度）、30、180 deg/sec、足関節底屈・背屈筋力では 0（関節角度：底屈では 90 度、背屈では 120 度）、60 deg/sec、および体幹伸展・屈曲筋力では 60 deg/sec とした。被験者は、ストレッチおよびウォームアップを行った後に、各角速度にて随意最大筋力発揮を 3~4 回反復し、発揮されたピークトルク（Nm）の最大値を採用した。測定は、ベースライン期、R+1、R+10 および R+90 の計 4 回行われた。

2. 5 筋力測定結果に基づいた G-P 解析

90 日間のベッドレスト直後における筋横断面積と筋力の変化では、筋横断面積の低下率に比して筋力の低下率に極めて大きな個人差が認められた。そこで、ベースライン値から R+1 への各筋力低下率の軽微な被験者 25%（Good 群）と顕著な被験者 25%（Poor 群）を抽出し、特定の筋力低下との関連が想定される他の測定指標について群間比較（G-P 解析）を行った。表 1 に、Good 群と Poor 群を抽出した筋力測定部位と群間比較を行った測定指標を記す。なお、膝関節屈曲筋群 180deg/sec は解析可能なデータが 13 名と少なかったため、Good 群と Poor 群を抽出する対象から除外した。

表1 G-P解析の比較項目

Good 群と Poor 群の抽出	G-P 解析を実施した測定指標
(ベッドレスト終了時における下記部位それぞれの筋力低下率から抽出)	
各部位の各角速度	ベースライン期における同部位・同角速度の筋力絶対値、各筋力に対応する部位の筋横断面積、および、単位断面積あたりの筋力
各部位の各角速度	ベッドレスト終了時 (HDT89 および R+1) における、各筋力に対応する部位の筋横断面積と単位断面積あたりの筋力のベースライン値に対する変化率
各部位の各角速度	回復期の各測定時期 (R+10~13、R+45、R+90) における、同部位・同角速度の筋力、各筋力に対応する部位の筋横断面積、および単位断面積あたりの筋力それぞれのベースライン値に対する変化率
膝関節伸展・屈曲筋力	足関節背屈・底屈筋力のベースラインからベッドレスト終了時 (R+1) への変化率
膝関節伸展筋力	膝関節伸展筋力と同じ角速度で測定した膝関節屈曲筋力のベースラインからベッドレスト終了時 (R+1) への変化率
足関節底屈筋力	足関節底屈筋力と同じ角速度で測定した足関節背屈筋力のベースラインからベッドレスト終了時 (R+1) への変化率
30deg/sec で測定した膝関節伸展・屈曲筋力	180deg/sec で測定した膝関節伸展・屈曲筋力のベースラインからベッドレスト終了時 (R+1) への変化率

2. 6 統計処理

全ての統計量は、ベースライン値に対する低下率を平均値±標準誤差として示した。まず、各測定項目のベースライン値について、群間の差異の検討を一元配置分散分析で行った。ベースライン期から回復期までの平均値の差の検定について、実験群および測定時期を要因とする反復測定分散分析を行った。なお、腰部傍脊柱筋群と大腰筋筋横断面積については、ベッドレスト期間から回復期にかけて十分な例数のデータを取得できたのがHDT89のみであったため、その際の低下率について、実験群を要因とする一元配置分散分析を用いて検定した。有意水準は危険率5%未満とし、実験群ないしは測定時期の有意な影響が認められた場合には多重比較（Bonferroni）を行った。

G-P解析における群間の比較には対応のない t 検定を用い、危険率5%未満をもって有意水準とした。

3. 結果

3. 1 実験群間のベースライン値の比較

各筋横断面積および筋力のベースライン値では、いずれの項目からも群間の有意差は認められなかった。

3. 2 ベッドレスト期間および回復期における下肢除脂肪量の推移

図4にベースライン期からR+90に至る右下肢の除脂肪量について、ベースライン値に対する変化率を示した。測定時期と実験群の主効果に有意性が認められた ($p < 0.001$)。HDT89では、全実験群からベースライン値に対する有意な萎縮が認められたが、対照群の萎縮は約13%であったのに対して運動群の萎縮率は約5%と少なく、両群間に有意差が認められた ($p < 0.001$)。対照群と薬剤投与群は、全ての測定時期に渡ってほぼ同様な推移を示した。回復期のR+13では、全実験群でベースライン値の96~98%まで急速に回復し、R+45では、ほぼベースライン値と同様の水準まで回復した。

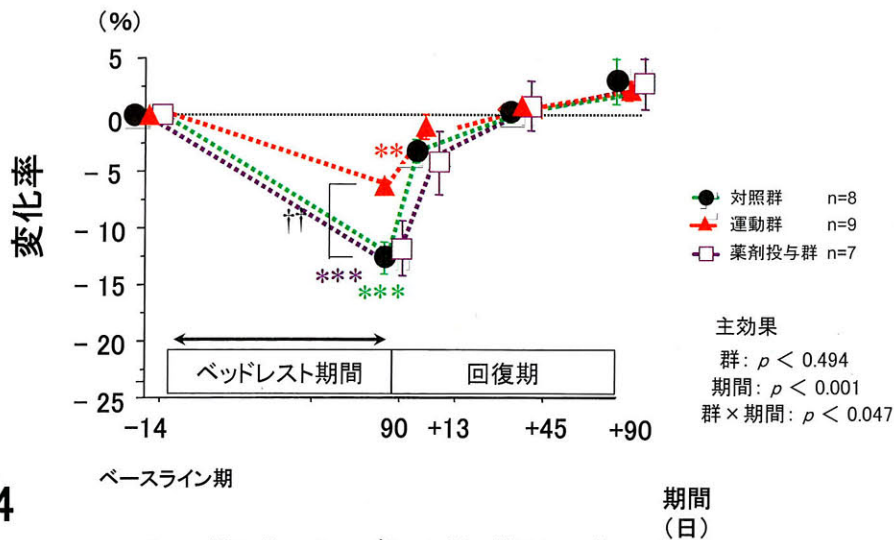


図4 ベースライン期および回復期における右下肢除脂肪量の推移

平均値±標準誤差

*** : $p < 0.001$ vs. ベースライン値
 ** : $p < 0.01$ vs. ベースライン値
 †† : $p < 0.01$ vs. 同時期における対照群

3. 3 ベッドレスト期間および回復期における筋横断面積の変化

3. 3. 1 大腿部中央位

ベッドレスト中および回復期における大腿中央部筋横断面積の変化率を図5に示した。膝関節伸展筋群の変化率は、測定時期と実験群の主効果に有意性 ($p < 0.001$) が認められた。一方、膝関節屈曲筋群の変化率は、測定時期の主効果には有意性 ($p < 0.001$) が認められたものの、実験群間に有意差は認められなかった。

膝関節伸展筋群では、ベッドレスト期間中、対照群および薬剤投与群でほぼ同様な変化の推移を示し、ベースライン値に比して HDT89 では約 17%と有意な筋横断面積の低下が認められた ($p < 0.001$)。これに対し、運動群ではベッドレスト期間中の筋横断面積の低下は約 4%であり、ベースライン値との有意差は認められなかった。また HDT89 における運動群と他の実験群との間にも有意差が認められた ($p < 0.001$)。一方、膝関節屈曲筋群では、伸展筋群のような群間の差異は認められず、ベースライン値に対する変化率は HDT89 で約-10%であり、膝関節伸展筋群に比較し筋萎縮の程度は少なかった。

ベッドレスト終了後の回復過程では、伸展および屈曲の両筋群とも R+13 において HDT89 で認められた筋横断面積低下の半分程度までの回復を示し、R+90 ではベースライン値と同等な水準まで回復していた。

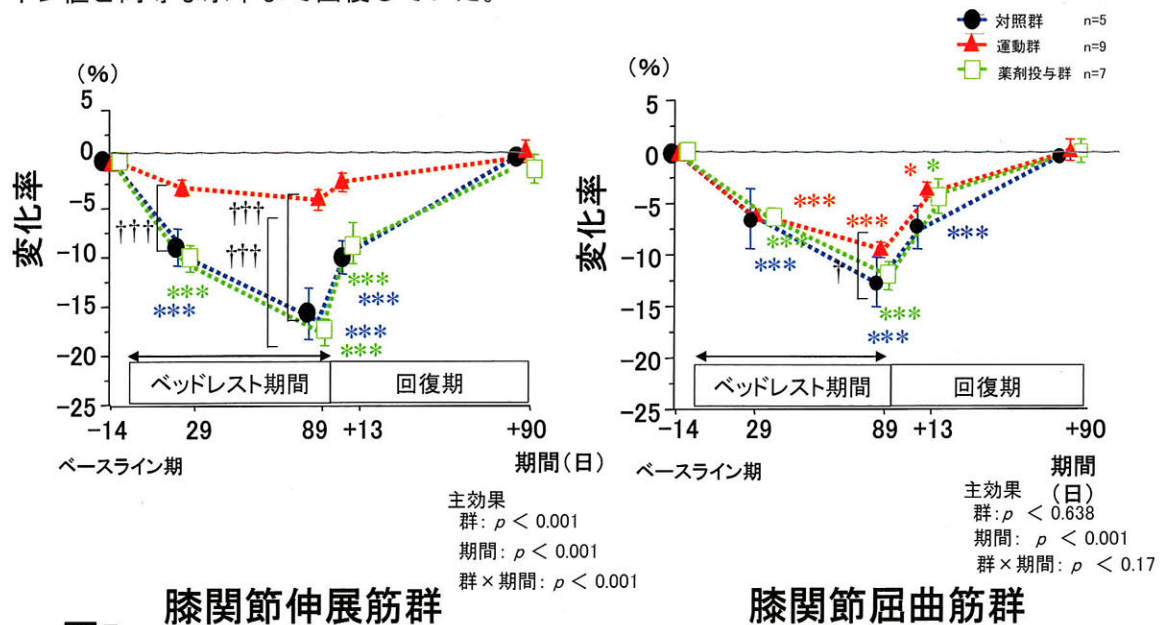


図5

ベースライン期から回復期における大腿筋群筋横断面積の推移

平均値±標準誤差

*** : $p < 0.001$ vs. ベースライン値

* : $p < 0.05$ vs. ベースライン値

††† : $p < 0.001$ vs. 同時期における対照群

3. 3. 2 下腿部中央位

ベッドレスト中および回復期における下腿中央部における筋横断面積の変化率を図6に示した。足関節背屈および底屈筋群の変化率は、測定時期および実験群の主効果について共に有意性が認められた ($p < 0.001$)。

足関節背屈筋群では萎縮率には差があるものの、HDT29には3群ともベースライン値から有意 ($p < 0.001$) に低下し、HDT89ではさらに若干低下して約10~14%の低下率 ($p < 0.001$) に達した。足関節底屈筋群では、HDT29における低下は背屈筋群とほぼ同程度 ($p < 0.001$) であったが、その後HDT89にはさらに低下が顕著となり、対照群および薬剤投与群では約23%の有意な低下を示した ($p < 0.001$)。一方、運動群の低下率は他の2群に比して軽微であり、HDT89における低下率は有意 ($p < 0.001$) ではあるものの約12%で他の2群との有意差が認められた ($p < 0.01$)。

回復期では、R+90には両筋群ともベースライン値まで回復していたが、R+13における両筋群の回復状態は異なるものとなった。すなわち、R+13では足関節背屈筋群の回復はわずかであったのに対し、足関節底屈筋群ではHDT89からR+90に認められた回復の約半分~2/3の回復を示した。

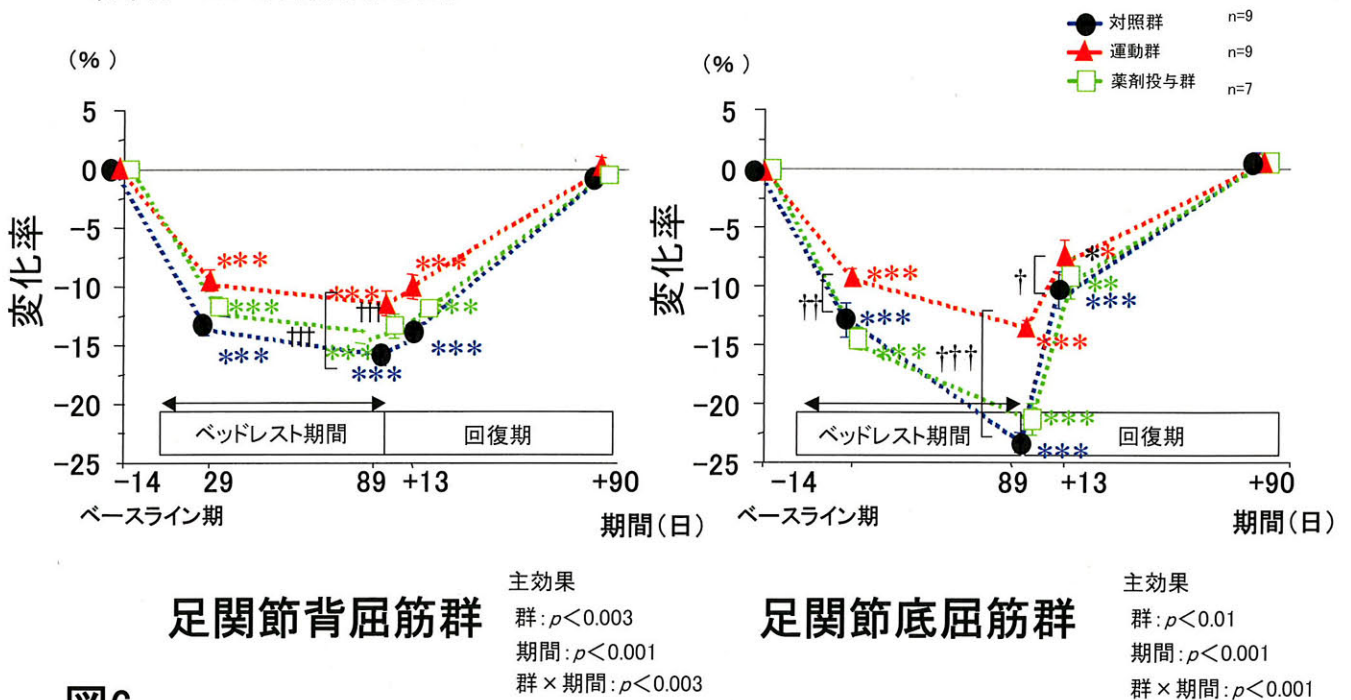


図6

ベースライン期から回復期における下腿筋群筋横断面積の推移

平均値±標準誤差

- *** : $p < 0.001$ vs. ベースライン値
- ††† : $p < 0.001$ vs. 同時期における対照群
- †† : $p < 0.01$ vs. 同時期における対照群
- † : $p < 0.05$ vs. 同時期における対照群

3. 3. 3 体幹 (第4/5腰椎椎間板中心線位)

図7にHDT89に測定した体幹筋群(腰部傍脊柱筋群および大腰筋)筋横断面積のベースライン値に対する低下率を示した ($n=24$)。腰部傍脊柱筋群はHDT89に対照群および薬剤投与群で約10~13%の減少を示したが、運動群では約5%の減少となり、他の2群と有意差が認められた。 ($p < 0.01$: 運動群 vs. 対照群、 $p < 0.001$: 運動群 vs. 薬剤投与

群)。一方、大腰筋では、どの群も低下率は平均5%未満であり、群間の差異も認められなかった。

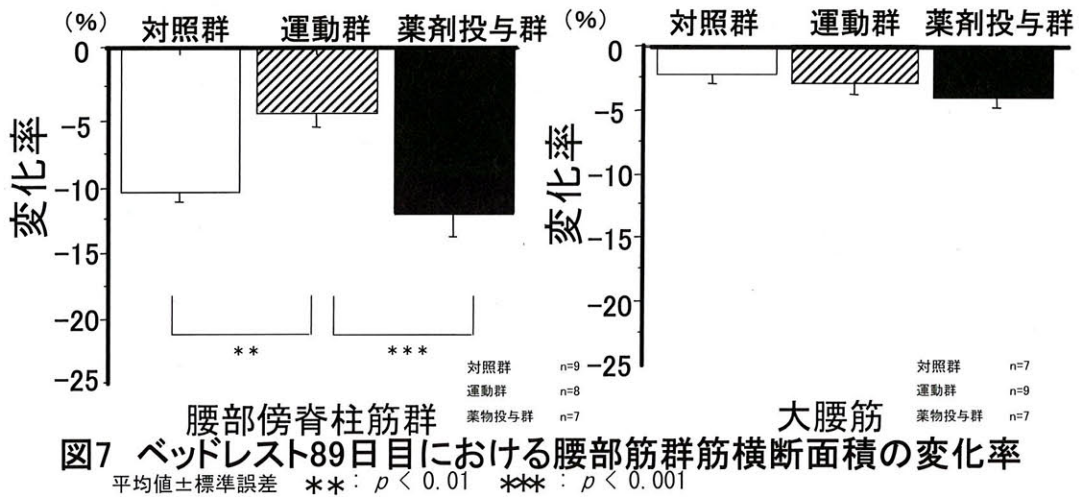
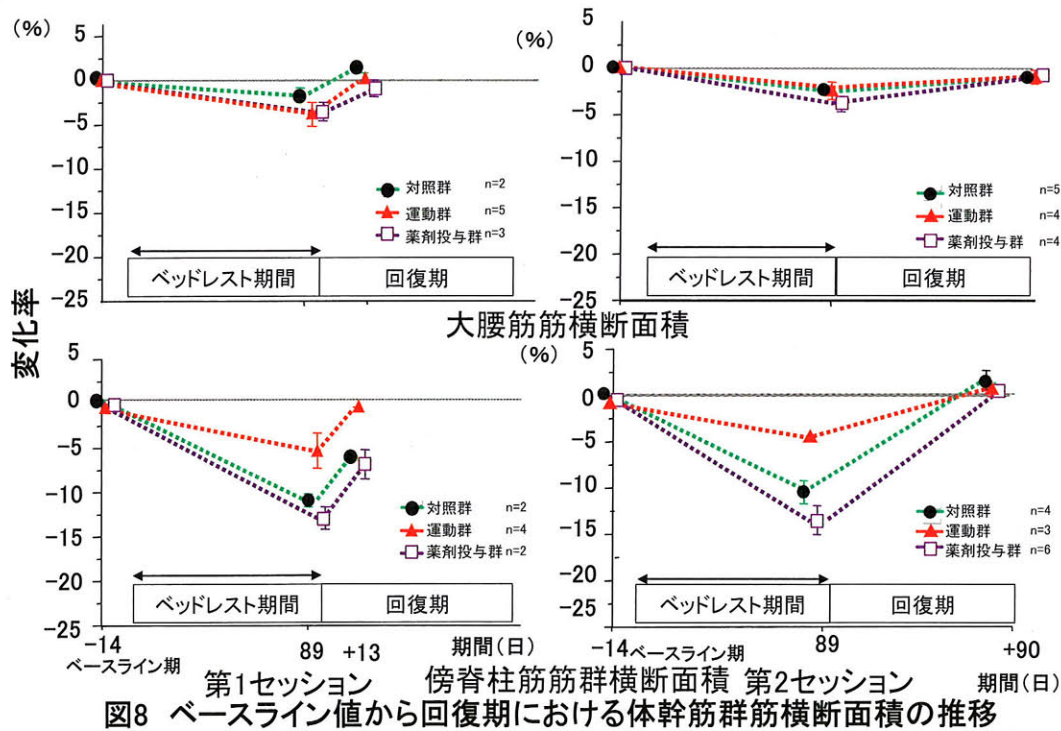


図8には、回復期における体幹筋群筋横断面積の変化を示した。傍脊柱筋群は、運動群ではR+13(4人)とR+90(3人)の両測定時期とも、ベースライン値とほぼ同値を示した。一方、対照群および薬剤投与群では、R+13(対照群2人、薬剤投与群2人)における回復はベッドレスト終了時の低下から1/2程度であり、R+90(対照群4人、薬剤投与群6人)にはベースライン値とほぼ同水準まで回復していた。また大腰筋ではHDT89における萎縮の程度が約5%未満であり、R+13およびR+90にはベースライン値とほぼ同値を示した。



実験上の問題により第1セッションの被験者(14名)についてはベッドレスト前、HDT89およびR+13に測定し、第2セッションの被験者(11名)についてはベッドレスト前、HDT89およびR+90に測定した。

3. 4 回復期における筋力の変化：

3. 4. 1 膝関節伸展・屈曲筋力の推移

回復期の膝関節伸展・屈曲における等尺性・等速性筋力の変化率を図9、10に示した。全ての角速度とも測定時期の主効果に有意性 ($p < 0.001$) が認められたが、実験群の主効果に有意性は認められなかった。

膝関節伸展筋力では、全群でほぼ同様の経時的推移を示した(図9)。R+1では最低値を示し、全群でベースライン値に対する有意差を認めた ($p < 0.01$)。筋力低下が最も顕著であったのは対照群であり、ベースライン値に対する低下率は約60%にも達した。これに対し、運動群では約30%の低下率に留まり、この2群間には有意差が認められた ($p < 0.05$)。R+90では全実験群でベースライン値に対し5~25%の低下率を示したものの、ベースライン値に対する有意差は認められなかった。

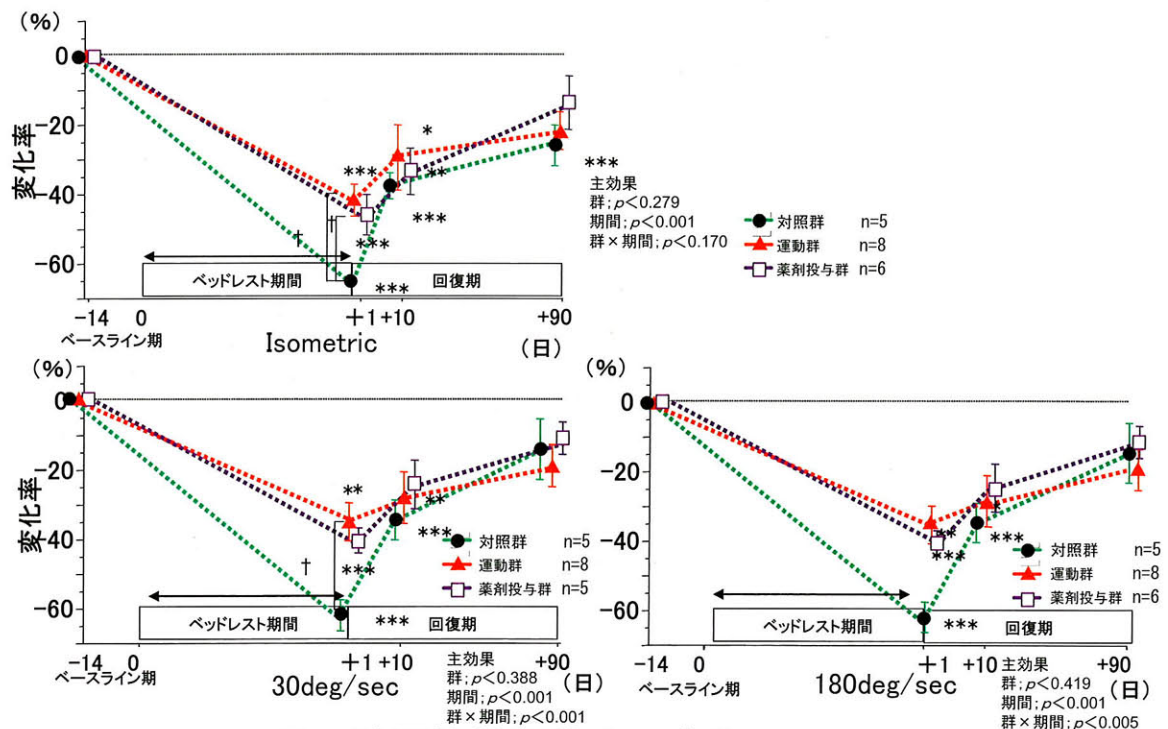
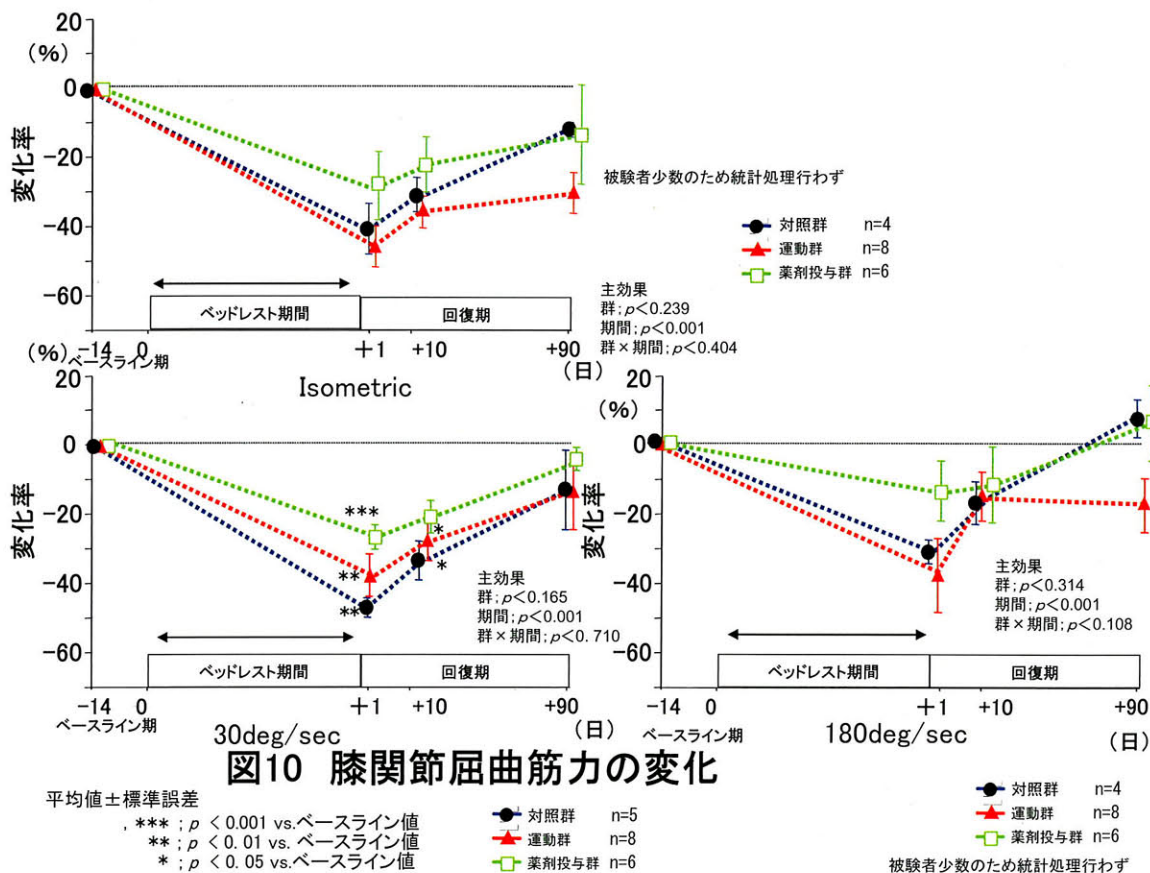


図9 膝関節伸展筋力の変化

平均値±標準誤差

*** ; $p < 0.001$ vs. ベースライン値
 ** ; $p < 0.01$ vs. ベースライン値
 * ; $p < 0.05$ vs. ベースライン値
 † ; $p < 0.01, 0.001$ vs. 同時期における 対照群

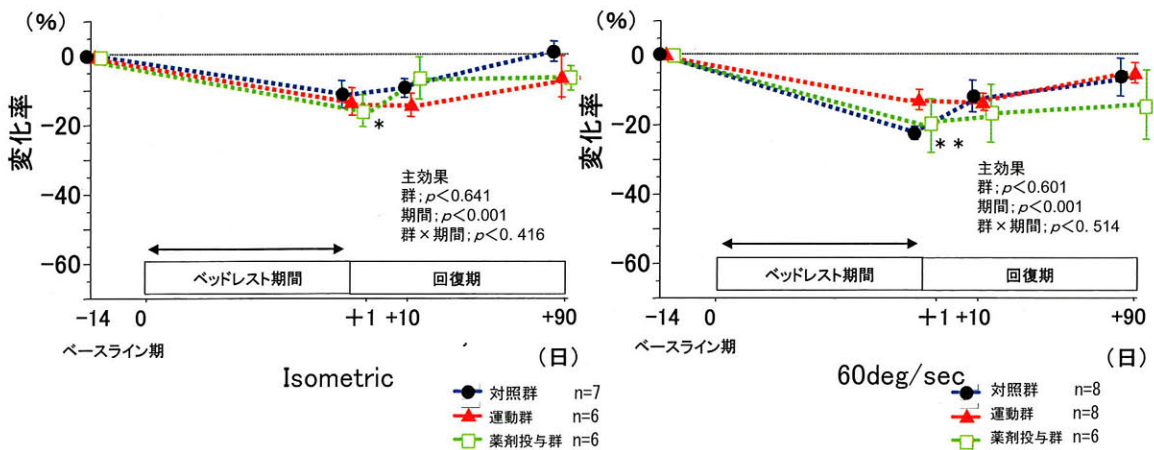
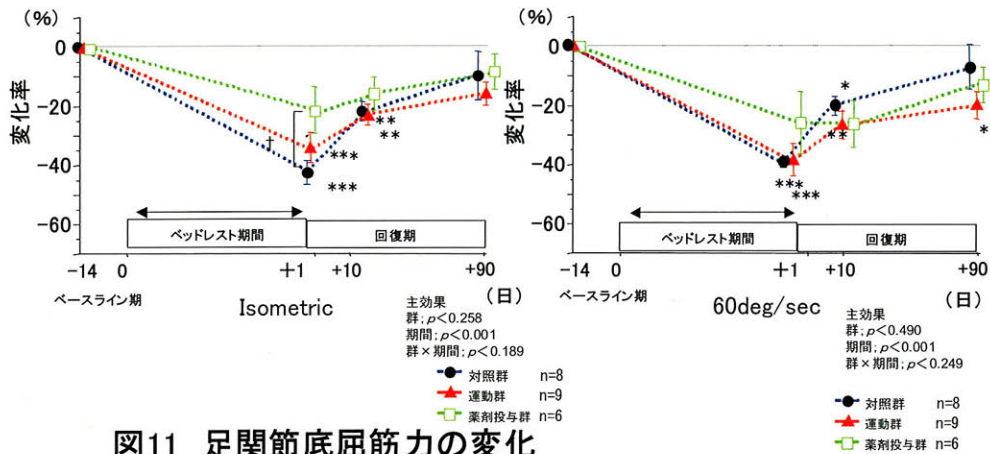
一方、膝関節屈曲筋力におけるベッドレスト後の回復過程は角速度により異なる結果となった。30deg/secでは、全実験群がR+1で25~45%、R+10で20~35%の顕著な低下率を示し、その後R+90では5~15%の低下率まで回復した。一方、0および180deg/secではR+1の低下率が群間で異なる傾向を示し、運動群および対照群では30~50%の有意な低下を示したのに対し、薬剤投与群の低下率は10~25%となり、ベースライン値に対する有意差も認められなかった。



3. 4. 2 足関節底屈・背屈筋力の推移

回復期における足関節底屈・背屈筋力の変化率を図 11、12 に示した。足関節底屈・背屈の 0 および 60deg/sec の両角速度から測定時期の主効果に有意性 ($p < 0.001$) が認められたが、実験群の主効果に有意性は認められなかった。

足関節底屈筋力では両角速度とも類似した傾向を示し、R+1 における低下率は、運動群および対照群では約 40% ($p < 0.001$) であったのに対し、薬剤投与群では 15~20%に留まり、ベースライン値に対する有意差も認められなかった。その後、R+90 にかけて全実験群が回復傾向を示したが、運動群では R+90 でも 15~20%の低下率が認められた。これに対し、足関節背屈筋力の低下率は底屈筋力よりも少ないものとなり、運動群における 60deg/sec を除いて R+1 の低下率は 15~20%であった。その後、R+10 と R+90 における変化では、実験群、期間、および角速度などを特徴とする明らかな傾向は認められなかった。



3. 4. 3 体幹筋力の推移

回復期における体幹伸展・屈曲筋力の変化率を図13に示した。伸展・屈曲の両筋力とも測定時期の主効果に有意性が認められたが ($p < 0.001$)、実験群の有意な影響は認められなかった。

体幹伸展筋力は R+1 で最低値を示し、全ての実験群でベースライン値から約 25%~35%の低下が認められた。その後、薬剤投与群では R+10 に回復傾向を示し、R+90 ではベースライン値とほぼ同値を示した。一方、薬剤投与群以外の2群では、R+10 でも R+1 とほぼ同等の低下を示し、R+90 でも平均約 15%の低値にあった。体幹伸展筋力に比して、屈曲筋力の低下率は少なく、全ての群で R+1 および R+10 の低下率は 10%~20%に留まった。

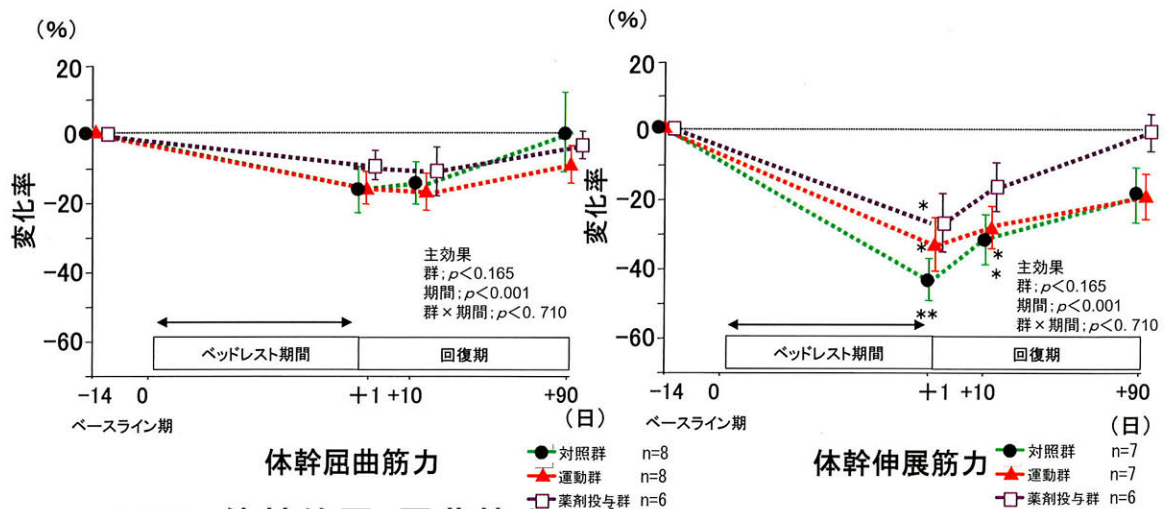


図13 体幹伸展・屈曲筋力の変化
 平均値±標準誤差 ** ; $p < 0.01$ vs. ベースライン値 * ; $p < 0.05$ vs. ベースライン値

3. 4. 4 G-P 解析

表2には、ベッドレスト終了時の各筋力変化率の Good 群および Poor 群におけるベースライン期に測定した①同部位・同角速度の筋力、②同部位の筋力発揮に動員する筋横断面積、および③単位断面積あたりの筋力を示した。群間の有意差が認められたのは、膝関節屈曲筋力 (30deg/sec) の Good 群と Poor 群における膝関節屈曲筋横断面積のみであり、Good 群は Poor 群に比してベースライン期の筋横断面積は有意に低値を示した。その他の筋力・筋横断面積のベースライン値では Poor 群が高値傾向を示したものの有意差は認められなかった。また、単位断面積あたりの筋力については Good 群と Poor 群ともほぼ同値を示した。

表2

ベッドレスト終了時の各筋力変化率の G-P 群に対する①同部位・同各速度の筋力絶対値、②同部位の筋力発揮に動員される筋横断面積、および、③同部位の単位断面積あたりの筋力それぞれのベースライン値 (絶対値) における解析結果【ベースライン値との関係】

		膝関節伸展Isometric筋力変化率		p 値
		Good群	Poor群	
①膝関節伸展Isometric筋力	(Nm)	222.8 ± 9.9	262.0 ± 17.8	0.090
ベースライン値				
②膝関節伸展筋横断面積	(cm ²)	64.3 ± 3.3	70.0 ± 4.0	
ベースライン値				
③膝関節伸展単位断面積あたりのIsometric筋力	(Nm/cm ²)	3.5 ± 0.2	3.7 ± 0.2	0.436
ベースライン値				
		膝関節伸展筋力 30deg/sec変化率		
		Good群	Poor群	
①膝関節伸展30deg/sec筋力	(Nm)	195.2 ± 6.9	213.8 ± 10.9	0.187
ベースライン値				
②膝関節伸展筋横断面積	(cm ²)	65.2 ± 1.9	66.4 ± 2.1	
ベースライン値				
③膝関節伸展単位断面積あたりの30deg/sec筋力	(Nm/cm ²)	3.0 ± 0.2	3.2 ± 0.2	0.415
ベースライン値				
		膝関節伸展筋力 180deg/sec変化率		
		Good群	Poor群	
①膝関節伸展180deg/sec筋力	(Nm)	132.6 ± 3.9	130.4 ± 6.5	0.778
ベースライン値				
②膝関節伸展筋横断面積	(cm ²)	69.0 ± 2.4	63.8 ± 2.8	
ベースライン値				
③膝関節伸展単位断面積あたりの180deg/sec筋力	(Nm/cm ²)	1.9 ± 0.1	2.1 ± 0.1	0.143
ベースライン値				
		膝関節屈曲筋力 Isometric変化率		
		Good群	Poor群	
①膝関節屈曲Isometric筋力	(Nm)	77.8 ± 7.0	74.2 ± 7.7	0.739
ベースライン値				
②膝関節屈曲筋横断面積	(cm ²)	52.5 ± 4.2	59.0 ± 2.1	
ベースライン値				
③膝関節屈曲単位断面積あたりのIsometric筋力	(Nm/cm ²)	1.5 ± 0.1	1.3 ± 0.1	0.302
ベースライン値				

(表2 続き)

		膝関節屈曲筋力 30deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
①膝関節屈曲30deg/sec筋力 ベースライン値	(Nm)	113.4 ± 12.9	126.8 ± 10.5	0.445
②膝関節屈曲 筋横断面積 ベースライン値	(cm ²)	49.3 ± 1.8	58.8 ± 2.1	0.009
③膝関節屈曲 単位断面積あたりの 30deg/sec 筋力ベースライン値	(Nm/cm ²)	2.1 ± 0.3	2.1 ± 0.2	>0.9999
		足関節背屈筋力 Isometric変化率		p値
		Good群	Poor群	
①足関節背屈Isometric筋力 ベースライン値	(Nm)	110.5 ± 11.7	110.5 ± 9.4	>0.999
②足関節背屈 筋横断面積 ベースライン値	(cm ²)	5.6 ± 0.3	5.7 ± 0.5	0.917
③足関節背屈 単位断面積あたりのIsometric 筋力ベースライン値	(Nm/cm ²)	6.3 ± 0.5	6.9 ± 0.8	0.553
		足関節背屈筋力 60deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
①足関節背屈60deg/sec筋力 ベースライン値	(Nm)	26.8 ± 5.6	21.2 ± 0.7	0.349
②足関節背屈 筋横断面積 ベースライン値	(cm ²)	6.1 ± 0.3	5.5 ± 0.1	0.172
③足関節背屈 単位断面積あたりの 60deg/sec 筋力ベースライン値	(Nm/cm ²)	0.1 ± 0.2	0.1 ± 0.0	0.389
		足関節底屈筋力Isometric変化率		p値
		Good群	Poor群	
①足関節底屈Isometric筋力 ベースライン値	(Nm)	36.2 ± 3.1	39.0 ± 2.9	0.528
②足関節底屈 筋横断面積 ベースライン値	(cm ²)	28.2 ± 2.0	27.3 ± 1.6	0.780
③足関節底屈 単位断面積あたりのIsometric 筋力ベースライン値	(Nm/cm ²)	4.0 ± 0.4	4.1 ± 0.4	0.762
		足関節底屈筋力 60deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
①足関節底屈60deg/sec筋力 ベースライン値	(Nm)	70.8 ± 11.0	64.0 ± 7.4	0.637
②足関節底屈 筋横断面積 ベースライン値	(cm ²)	26.6 ± 2.3	28.4 ± 2.8	0.636
③足関節底屈 単位断面積あたりの 60deg/sec 筋力ベースライン値	(Nm/cm ²)	2.6 ± 0.3	2.8 ± 0.6	0.817

表3には、ベッドレスト終了時の各筋力変化率の Good 群および Poor 群における同時期（HDT89 および R+1）の対応する④各筋横断面積および⑤単位断面積あたりの筋力のベースライン値に対する変化率の解析結果を示した。筋横断面積では、膝関節伸展筋力の全ての角速度、および足関節底屈 Isometric 筋力における Good 群と Poor 群で対応する筋横断面積低下率に有意差（ $p < 0.05$ ）が認められた。単位断面積あたりの筋力では、足関節背屈筋力 60deg/sec 以外の全ての部位、角速度で群間の有意差が認められ、Good 群に比して Poor 群で平均-40~-50%の大きな低下率が認められた（ $p < 0.01$ ）。

表3

ベッドレスト終了時（HDT89 および R+1）における④同部位の筋力発揮に動員される筋横断面積と ⑤同部位・同角速度における単位断面積あたりの筋力のベースライン値に対する変化率の解析結果【同時期の筋横断面積および単位断面積あたりの筋力への影響】

		膝関節伸展Isometric筋力変化率		p値
		Good群	Poor群	
④膝関節伸展筋横断面積 HDT89 (%)	(%)	-7.6 ± 2.7	-18.5 ± 2.7	0.020
⑤膝関節伸展単位断面積あたりのIsometric筋力 R+1 (%)	(%)	-25.0 ± 2.5	-57.4 ± 1.3	<0.0001
		膝関節伸展筋力 30deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
④膝関節伸展筋横断面積 HDT89 (%)	(%)	-3.2 ± 1.3	-14.0 ± 4.2	0.063
⑤膝関節伸展単位断面積あたりの30deg/sec筋力 R+1 (%)	(%)	-22.0 ± 1.9	-57.6 ± 3.7	<0.0001
		膝関節伸展筋力 180deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
④膝関節伸展筋横断面積 HDT89 (%)	(%)	-6.4 ± 3.1	-16.9 ± 2.5	0.030
⑤膝関節伸展単位断面積あたりの180deg/sec筋力 R+1 (%)	(%)	-12.1 ± 3.2	-47.5 ± 6.1	0.001
		膝関節屈曲Isometric筋力変化率		p値
		Good群	Poor群	
④膝関節屈曲筋横断面積 HDT89 (%)	(%)	-12.2 ± 2.5	-10.7 ± 2.2	0.657
⑤膝関節屈曲単位断面積あたりのIsometric筋力 R+1 (%)	(%)	-0.7 ± 4.8	-54.1 ± 4.0	<0.0001

(表3 続き)

		膝関節屈曲筋力 30deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
④	膝関節屈曲筋横断面積 HDT89 (%)	-9.0 ± 1.1	-10.1 ± 1.3	0.513
⑤	膝関節屈曲単位断面積あたりの30deg/sec筋力 R+1 (%)	-10.3 ± 3.6	-48.2 ± 2.2	<0.0001
		足関節底屈Isometric筋力変化率		p値
		Good群	Poor群	
④	足関節底屈筋横断面積 HDT89 (%)	-18.6 ± 1.8	-24.8 ± 0.8	0.029
⑤	足関節底屈単位断面積あたりのIsometric筋力 R+1 (%)	9.9 ± 4.6	-40.0 ± 4.4	<0.0001
		足関節底屈筋力 60deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
④	足関節底屈筋横断面積 HDT89 (%)	-17.4 ± 2.1	-16.5 ± 2.1	0.780
⑤	足関節底屈単位断面積あたりの60deg/sec筋力 R+1 (%)	7.0 ± 6.8	-45.0 ± 4.1	<0.0001
		足関節背屈Isometric筋力変化率		p値
		Good群	Poor群	
④	足関節背屈筋横断面積 HDT89 (%)	-14.9 ± 1.5	-13.5 ± 1.3	0.542
⑤	足関節背屈単位断面積あたりのIsometric筋力 R+1 (%)	15.2 ± 3.8	-15.2 ± 2.0	<0.0001
		足関節背屈筋力 60deg/sec変化率		p値
		Good群	Poor群	
④	足関節背屈筋横断面積 HDT89 (%)	-11.5 ± 0.7	-14.6 ± 1.7	0.100
⑤	足関節背屈単位断面積あたりの60deg/sec筋力 R+1 (%)	18.6 ± 20.9	-18.6 ± 5.0	0.091

表4には、ベッドレスト終了時の各筋力変化率の Good 群および Poor 群における回復期の各測定時期の (R+10~13、R+90) ⑥同部位・同角速度の筋力、⑦各筋力に対応する筋横断面積、および⑧単位断面積あたりの筋力それぞれのベースライン値に対する変化率の解析結果を示した。筋力の回復過程では、膝関節屈曲 Isometric 筋力において R+10、R+45、および R+90 の全ての回復期で Poor 群は Good 群よりも有意に低値を示した ($p<0.05$)。一方、膝関節伸展 Isometric 筋力では、R+10 では Poor 群が Good 群よりも有意に低値を示したが ($p<0.05$)、R+45 以後では群間の有意差が消失した。足関節および体幹の筋力では、足関節背屈筋力 (Isometric と角速度 60 deg/sec) の各 R+90 と R+10、足関節底屈 Isometric 筋力の R+10、および体幹伸展筋力の R+90 と屈曲筋力の R+10 で群間の有意差が認められ ($p<0.05$)、いずれも Poor 群が低値を示した。

筋横断面積の回復過程では、R+13 における膝関節伸展筋群横断面積の回復が膝関節伸展 Isometric 筋力の Poor 群において Good 群よりも有意に少ない結果となった ($p=0.003$)。筋横断面積の回復過程に関するそれ以外の項目では、いずれからも群間の有意差は検出されなかった。次に単位断面積あたりの筋力の回復過程では、筋力でも群間の有意差の認められた膝関節屈曲 Isometric 筋力の R+10 および R+90 において、Poor 群は Good 群よりも有意に低値を示した ($p<0.05$)。また膝関節伸展筋力でも筋力に群間の有意差が認められた R+10 において Isometric および角速度 30 deg/sec の両者から有意差が認められ、Poor 群が Good 群よりも有意に低値を示した ($p<0.05$)。足関節底屈および背屈筋群では、底屈筋群の R+10 および背屈筋群の R+90 において、いずれも Isometric で Poor 群が Good 群よりも有意に低値を示した ($p<0.05$)。

表4

ベッドレスト終了時の各筋力変化率の G-P 群における回復期の各測定時期 (R+10~13、R+90) における⑥同部位・同角速度の筋力、⑦同部位における筋力発揮に動員される筋横断面積、および⑧同部位・同各速度における単位断面積あたりの筋力それぞれのベースライン値に対する変化率の解析結果【回復期との関係】

	膝関節伸展Isometric筋力変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥膝関節伸展 Isometric筋力 (%) R+10	-14.1 ± 6.4	-38.8 ± 4.4	0.013
⑥膝関節伸展 Isometric筋力 (%) R+90	-9.7 ± 5.9	-26.0 ± 5.7	0.083
⑦膝関節伸展 筋横断面積 (%) R+13	-2.3 ± 0.7	-10.0 ± 1.8	0.003
⑦膝関節伸展 筋横断面積 (%) R+90	2.0 ± 1.4	-0.6 ± 1.1	0.446
⑧膝関節伸展 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+10 (%)	-12.2 ± 6.1	-32.2 ± 3.8	0.023
⑧膝関節伸展 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+90 (%)	-11.6 ± 5.5	-26.6 ± 5.4	0.086

(表4 続き)

	膝関節伸展筋力 30eg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥膝関節伸展 30eg/sec筋力 R+10 (%)	-15.7 ± 5.4	-37.7 ± 6.6	0.033
⑥膝関節伸展 30eg/sec筋力 R+90 (%)	-8.6 ± 3.9	-20.9 ± 10.5	0.302
⑦膝関節伸展 筋横断面積 R+13 (%)	-1.1 ± 0.8	-7.4 ± 2.8	0.066
⑦膝関節伸展 筋横断面積 R+90 (%)	-0.2 ± 0.7	1.0 ± 1.0	0.417
⑧膝関節伸展 単位断面積あたり の30eg/sec筋力 R+10 (%)	-9.7 ± 4.8	-32.5 ± 7.0	0.040
⑧膝関節伸展 単位断面積あたり の30eg/sec筋力 R+90 (%)	-8.5 ± 4.1	-21.7 ± 10.2	0.264
	膝関節伸展筋力 180eg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥膝関節伸展 180eg/sec筋力 R+10 (%)	-27.2 ± 12.3	-31.4 ± 6.0	0.771
⑥膝関節伸展 180eg/sec筋力 R+90 (%)	-4.9 ± 9.5	-12.6 ± 6.5	0.521
⑦膝関節伸展 筋横断面積 R+13 (%)	-5.9 ± 3.0	-10.6 ± 1.5	0.183
⑦膝関節伸展 筋横断面積 R+90 (%)	-1.7 ± 0.9	1.2 ± 0.9	0.057
⑧膝関節伸展 単位断面積あたり の180eg/sec筋力 R+10 (%)	-35.2 ± 20.6	-23.4 ± 6.0	0.595
⑧膝関節伸展 単位断面積あたり の180eg/sec筋力 R+90 (%)	-3.1 ± 10.1	-13.7 ± 6.1	0.393

(表4 続き)

	膝関節屈曲Isometric筋力変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥膝関節屈曲 Isometric筋力 (%) R+10	-13.6 ± 5.3	-40.2 ± 5.6	0.009
⑥膝関節屈曲 Isometric筋力 (%) R+90	4.8 ± 7.0	-38.5 ± 9.5	0.007
⑦膝関節屈曲 筋横断面積 (%) R+13	-5.9 ± 2.9	-2.8 ± 1.2	0.403
⑦膝関節屈曲 筋横断面積 (%) R+90	1.3 ± 1.6	0.2 ± 1.0	0.577
⑧膝関節屈曲 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+10 (%)	-8.4 ± 3.9	-35.2 ± 6.1	0.006
⑧膝関節屈曲 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+90 (%)	3.7 ± 7.9	-38.5 ± 9.5	0.009
	膝関節屈曲筋力 30deg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥膝関節屈曲 30deg/sec筋力 (%) R+10	-15.0 ± 3.3	-31.3 ± 8.1	0.099
⑥膝関節屈曲 30deg/sec筋力 (%) R+90	-3.2 ± 1.9	-15.1 ± 15.9	0.479
⑦膝関節屈曲 筋横断面積 (%) R+13	-3.9 ± 1.7	-3.9 ± 1.2	0.985
⑦膝関節屈曲 筋横断面積 (%) R+90	0.1 ± 0.9	-0.2 ± 0.8	0.863
⑧膝関節屈曲 単位断面積あたり の30deg/sec筋力 R+10 (%)	-11.5 ± 2.9	-28.8 ± 7.7	0.067
⑧膝関節屈曲 単位断面積あたり の30deg/sec筋力 R+90 (%)	-3.2 ± 2.6	-14.9 ± 16.2	0.498

(表4 続き)

	足関節背屈Isometric筋力変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥足関節背屈 Isometric筋力 (%) R+10	-5.2 ± 9.3	-20.0 ± 2.0	0.127
⑥足関節背屈 Isometric筋力 (%) R+90	8.4 ± 1.6	-8.9 ± 2.2	0.001
⑦足関節背屈 筋横断面積 (%) R+13	-13.0 ± 1.8	-13.0 ± 1.7	0.865
⑦足関節背屈 筋横断面積 (%) R+90	0.1 ± 0.5	-1.9 ± 1.4	0.152
⑧足関節背屈 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+10 (%)	11.2 ± 9.4	-7.3 ± 2.7	0.100
⑧足関節背屈 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+90 (%)	8.5 ± 2.1	-8.9 ± 2.2	0.001

	足関節背屈筋力 60deg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥足関節背屈 60deg/sec筋力 (%) R+10	-7.7 ± 4.9	-20.0 ± 2.2	0.038
⑥足関節背屈 60deg/sec筋力 (%) R+90	6.1 ± 9.3	-9.6 ± 5.2	0.154
⑦足関節背屈 筋横断面積 (%) R+13	-10.8 ± 1.8	-11.7 ± 1.4	0.693
⑦足関節背屈 筋横断面積 (%) R+90	0.5 ± 0.7	1.3 ± 0.6	0.449
⑧足関節背屈 単位断面積あたり の60deg/sec筋力 R+10 (%)	8.2 ± 9.5	-9.6 ± 7.6	0.180
⑧足関節背屈 単位断面積あたり の60deg/sec筋力 R+90 (%)	20.5 ± 22.0	-14.6 ± 8.0	0.118

(表4 続き)

	足関節底屈Isometric筋力変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥足関節底屈 Isometric筋力 (%) R+10	-17.0 ± 8.8	-19.0 ± 4.1	0.839
⑥足関節底屈 Isometric筋力 (%) R+90	-5.7 ± 5.3	-25.3 ± 18.3	0.329
⑦足関節底屈 筋横断面積 (%) R+13	-7.3 ± 2.1	-11.6 ± 0.3	0.201
⑦足関節底屈 筋横断面積 (%) R+90	-0.5 ± 0.8	-0.8 ± 1.8	0.825
⑧足関節底屈 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+10 (%)	-4.1 ± 4.7	-20.0 ± 3.9	0.028
⑧足関節底屈 単位断面積あたり のIsometric筋力 R+90 (%)	-5.2 ± 5.5	-24.4 ± 18.9	0.352
	足関節底屈筋力 60deg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑥足関節底屈 60deg/sec筋力 (%) R+10	-16.1 ± 2.8	-30.0 ± 7.5	0.112
⑥足関節底屈 60deg/sec筋力 (%) R+90	-9.4 ± 3.5	-24.6 ± 5.9	0.051
⑦足関節底屈 筋横断面積 (%) R+13	-9.1 ± 1.4	-8.8 ± 3.1	0.924
⑦足関節底屈 筋横断面積 (%) R+90	-0.6 ± 0.8	-1.1 ± 0.8	0.690
⑧足関節底屈 単位断面積あたり の60deg/sec筋力 R+10 (%)	-7.6 ± 3.6	-24.6 ± 8.5	0.095
⑧足関節底屈 単位断面積あたり の60deg/sec筋力 R+90 (%)	-8.8 ± 3.5	-24.6 ± 6.5	0.059

表 5-1 には、ベッドレスト終了時の膝関節伸展・屈曲筋力変化率の Good 群および Poor 群における R+1 に測定した⑨足関節底屈・⑩背屈筋力のベースライン値に対する変化率を示した。足関節底屈・背屈筋力のいずれから群間の有意差は認められなかった。

表 5-1

ベッドレスト終了時の膝関節（伸展・屈曲）筋力変化率の G-P 群に対する足関節（⑨底屈・⑩背屈）筋力変化率の解析結果

【異なる部位の筋力との関係】

	膝関節伸展Isometric筋力変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑨足関節背屈筋力 Isometric変化率 (%)	-16.9 ± 7.0	-13.2 ± 1.6	0.586
⑩足関節底屈筋力 Isometric変化率 (%)	-31.5 ± 9.5	-30.6 ± 6.1	0.938

	膝関節伸展筋力 30deg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑨足関節背屈筋力 60deg/sec変化率 (%)	-7.3 ± 7.6	-21.5 ± 4.9	0.152
⑩足関節底屈筋力 60deg/sec変化率 (%)	-32.0 ± 8.2	-42.8 ± 5.0	0.292

	膝関節伸展筋力 180deg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑨足関節背屈筋力 60deg/sec変化率 (%)	-31.3 ± 8.2	-42.7 ± 5.3	0.276
⑩足関節底屈筋力 60deg/sec変化率 (%)	-18.2 ± 12.0	-25.9 ± 3.0	0.551

	膝関節屈曲Isometric筋力変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑨足関節背屈筋力 Isometric変化率 (%)	-20.2 ± 9.6	-8.6 ± 4.1	0.241
⑩足関節底屈筋力 Isometric変化率 (%)	-33.3 ± 8.3	-30.0 ± 8.7	0.789

	膝関節屈曲筋力 30deg/sec変化率		p値
	Good群	Poor群	
⑨足関節背屈筋力 60deg/sec変化率 (%)	-32.0 ± 10.0	-43.2 ± 8.6	0.424
⑩足関節底屈筋力 60deg/sec変化率 (%)	-21.7 ± 9.5	-12.2 ± 3.3	0.375

表 5-2 には、ベッドレスト終了時の膝関節伸展筋力と足関節底屈筋力変化率の Good 群および Poor 群における同時期に測定したそれぞれの拮抗筋（膝関節屈曲筋力および足関節背屈筋力）のベースライン値に対する変化率を示した。いずれの筋力も群間の有意差を示さなかった。

表 5-2

ベッドレスト終了時の膝関節伸展筋力と足関節底屈筋力変化率の G-P 群に対するそれぞれの拮抗筋筋力変化率の解析結果【拮抗筋との関係】

	膝関節伸展筋力 Isometric 変化率		p 値
	Good 群	Poor 群	
膝関節屈曲 Isometric 筋力変化率 (%)	-21.2 ± 9.6	-40.3 ± 5.6	0.126
	膝関節伸展筋力 30deg/sec 変化率		p 値
	Good 群	Poor 群	
膝関節屈曲筋力 30deg/sec 変化率 (%)	-34.0 ± 9.3	-48.0 ± 3.0	0.191
	足関節底屈 Isometric 筋力変化率		p 値
	Good 群	Poor 群	
足関節背屈 Isometric 筋力変化率 (%)	-15.4 ± 6.1	-13.3 ± 5.8	0.814
	足関節底屈筋力 60deg/sec 変化率		p 値
	Good 群	Poor 群	
足関節背屈筋力 60deg/sec 変化率 (%)	-17.6 ± 3.9	-14.1 ± 4.7	0.574

表 6 には、ベッドレスト終了時の膝関節伸展 30deg/sec の Good 群および Poor 群における同時期に測定した同部位 180deg/sec のベースライン値に対する変化率を示した。群間の有意差 ($p < 0.01$) が認められ、Poor 群は Good 群に比して倍以上の変化率を示した。

表 6

ベッドレスト終了時の膝関節 30deg/sec 筋力変化率の G-P 群に対する同部位 180deg/sec の変化率の解析結果【同部位の異なる角速度との関係】

	膝関節伸展筋力 30deg/sec 変化率		p 値
	Good 群	Poor 群	
膝関節伸展筋力 180deg/sec 変化率 (%)	-22.4 ± 5.2	-47.6 ± 2.4	0.002

4. 考察

長期宇宙滞在に伴う筋萎縮および筋機能の低下は、骨量減少や心循環系機能の低下とともに宇宙飛行士の健康や帰還後の QOL に大きな影響を及ぼす可能性のある生理的变化である。本研究は、現在遂行中の国際宇宙ステーション滞在を視野に入れた研究であり、ベッドレスト期間も実際の国際宇宙ステーションにおける滞在期間に近い 90 日とされた。また被験者数も 1 群が 7~9 人、合計 25 人を動員して十分な統計学的解析を可能なものとし、ベッドレスト終了後についても 90 日後まで定期的に測定した。さらに筋量・筋力の評価部位についても体幹、大腿、および下腿と多部位について実施した。このような実験規模および測定内容のそれぞれが、ほとんどの先行研究^{3,12,13,17,20,34)}を大きく上回るものであり、本報告書は、これらから得られた結果を包括的に記したものである。

90 日のベッドレスト終了時における対照群の各筋群の萎縮の程度は、足関節底屈筋群と膝関節伸展筋群で最も顕著であり、次いで足関節背屈筋群、膝関節屈曲筋群、および腰部傍脊柱筋群となり、最も萎縮の少なかったのが大腰筋であった。この下肢および体幹における筋横断面積低下の部位特異性は筋力低下にも概ね反映され、最も低下した部位は膝関節伸展筋力と足関節底屈筋力（対照群でそれぞれ平均約 60%および 40%の低下）、最も低下が僅かであった部位は大腰筋が関与する体幹屈曲筋力であった。この原因として、ベッドレスト前の生活における各筋の活動状態が影響すると考えられ、日常生活において活動頻度の高い足関節底屈筋と膝関節伸展筋では、ベッドレストによる不活動の影響がより大きく現れた可能性が考えられる。一方、大腰筋の萎縮はベッドレスト後 5%未満、筋力は約 7%と他の筋群に比して僅かであったが、実際の宇宙滞在時にはより顕著な萎縮が報告されている。8 日間の宇宙滞在後に筋横断面積の測定を行った LeBlanc ら²⁷⁾の報告では、脊柱起立筋の萎縮は下肢筋を上回り、10.3%の横断面積低下が認められている。この結果の相違は、両条件下における大腰筋の活動状態が異なるためと推察され、ベッドレスト実験では臥床中の伏臥位での動作によって大腰筋が宇宙滞在時より活動し、その結果、実際の宇宙滞在時よりも筋萎縮および筋機能の低下が抑制されることが考えられる。体幹の筋群は地上では立位姿勢の維持に関与するが、長期宇宙滞在時には、姿勢を維持するための筋力を必要としないため、これら筋群の萎縮および筋機能の低下がさらに進行する可能性も考えられる。この点についてベッドレスト実験の結果をそのまま長期宇宙滞在に応用することは危険であり、宇宙滞在中の運動処方や帰還後のリハビリ対策立案には特にこの点について留意することが重要と考えられる。

ベッドレストによる筋横断面積の変化を検討した先行研究では、ほとんどがベッドレスト期間を 20~40 日とし、歩行等の運動に必要な膝関節伸展筋群の横断面積を評価している。これらの報告では、約 1 ヶ月のベッドレスト後には約 10%の萎縮^{3,4,6,17,34)}、42 日間のベッドレスト後では 14~16%の萎縮¹³⁾を認めている。LeBlanc ら²⁹⁾は、被験者数は少ないものの本研究の期間を上回る 119 日間のベッドレスト研究を行っており、膝関節伸

展筋群の横断面積では15~18%の萎縮を報告している。本研究の特色は、90日間のベッドレスト期間中にHDT29とHDT89の2回の測定機会を設けているが、運動群以外の2群における膝関節伸展筋群横断面積の低下率は、ベースラインからHDT29(平均約10%の低下)に比して、HDT29からHDT89(平均約8%の低下)の方がやや少ない傾向を示した。この傾向は本研究における他の下肢筋群でも同様であったが、上述した30日、42日、および119日のベッドレスト実験結果を総合すると、ベッドレスト30~40日あたりまでに比して、それ以後では筋萎縮の進行がより緩徐になることが推察される。一方、筋力の変化を検討した最長のベッドレスト実験は期間が120日²³⁾および119日²⁹⁾であり、それよりも期間の短いものは42日~20日^{3,7,9,15,17,18,20,21,38)}、最短で14日⁶⁾と、本研究とほぼ同等な期間の報告は無い。これらの結果を概観すると、42日以下のベッドレスト実験における膝関節伸展および足関節底屈筋力の低下は、ばらつきはあるものの概ね20~30%程度と報告されている。またベッドレスト期間が120日および119日と本研究よりも長い2つの報告では、足関節底屈筋力で平均45.5%²³⁾、膝関節伸展の等速性筋力で平均31%(角速度60度/秒)および18%(角速度180度/秒)の低下²⁹⁾が認められている。このように、本研究におけるベッドレスト後の筋力低下率は、平均値で評価すると先行研究に比してやや大きなものとなった。

ベッドレスト終了後の回復期には、筋横断面積の測定(HDT89、R+13、およびR+90)とほぼ対応する時期に筋力測定(R+1、R+10、およびR+90)が行われた。筋横断面積の回復過程では、足関節背屈筋とそれ以外の筋群で相違が認められ、R+13において前者では1~3%の僅かな回復しか認められなかったのに対し、後者ではHDT89で認められた萎縮率の1/2程度までの回復を示していた。この回復過程の相違は筋力においても認められ、足関節背屈筋力は、R+1における筋力低下率は他の下肢筋力に比して少ないものの、R+1からR+13への回復は他の筋群に比して最も少ない傾向を示した。足関節背屈筋の萎縮は高齢者の主たる転倒原因の一つとされており、このようなベッドレスト終了後における回復の遅延は、この時期における転倒の危険性を示唆するものである。よって、ベッドレストなどの下肢不活動からの回復過程初期には特に足関節背屈筋群のリハビリが重要であると思われる。

その他、回復過程における興味深い結果として、筋横断面積の回復の早さが挙げられる。抵抗トレーニングにより萎縮が抑制された運動群の膝関節伸展筋群を除き、いずれの下肢筋横断面積もR+13ではベースライン値より有意に低値を示したが、その次の測定機会であるR+90には、全ての下肢筋群がほぼベースライン値まで回復していた。本研究では、下肢の筋量を評価するその他の指標として、DXA法による下肢全体の除脂肪量測定をR+13、R+45およびR+90に実施しているが、その結果では、R+45で既にベースライン値とほぼ同水準の回復が示されている。また本研究よりもベッドレスト期間の長い119日間のベッドレスト実験²⁹⁾では、ベッドレストによる下肢除脂肪量の減少は、終了後わずか1週間でベースライン値近くまで回復している。このことから、長期ベッドレスト

により引き起こされた筋萎縮は、ベッドレスト終了後、比較的早期に回復することが考えられる。一方、筋力では R+10 から R+90 にかけて回復傾向を示すが、膝関節伸展筋力および足関節底屈筋力では R+90 においてもベースライン値の水準まで回復していなかった。上述した筋横断面積の結果では、これら筋群は R+90 にはベースライン値とほぼ同等まで回復しており、筋横断面積と筋力ではベッドレスト後における回復過程の異なることが考えられる。ベッドレスト後の筋横断面積・筋力の回復過程について本研究と比較できる先行研究は無く、本研究結果は長期ベッドレスト終了後に特別なりハビリテーションを実施しない場合の重要な対照データとみなすことができる。

本研究は総数 25 名もの多数の被験者からデータを取得したが、ベッドレスト後の筋力低下における特筆すべき事項として、極めて大きな個人差の認められたことが挙げられる。図 14 に各下肢筋群における筋横断面積の低下と筋力低下の関係を示すが、HDT89 における筋横断面積では全ての被験者が 0~30%の範囲内に分布するのに対し、ほぼ同時期である R+1 に測定した筋力は、ほとんど低下の見られない被験者から最大 70%近い低下を示す被験者まで広範な分布を示している。また大きな筋力低下を示す者の中に運動群の被験者が含まれていることも確認できる。これらの知見は、筋力低下の個人差を生じさせる何らかの要因、および筋力と関連する他の生理機能・状態における個人差の可能性を示唆するものである。本研究は、先行研究に比して被験者の総数が多く、かつ図 14 にも示すとおり、筋力低下では運動や薬剤投与の影響よりも個人差の方が大きいことが考えられた。そこで、新しい試みとして全被験者 25 名の中からベッドレスト終了時の筋力変化率

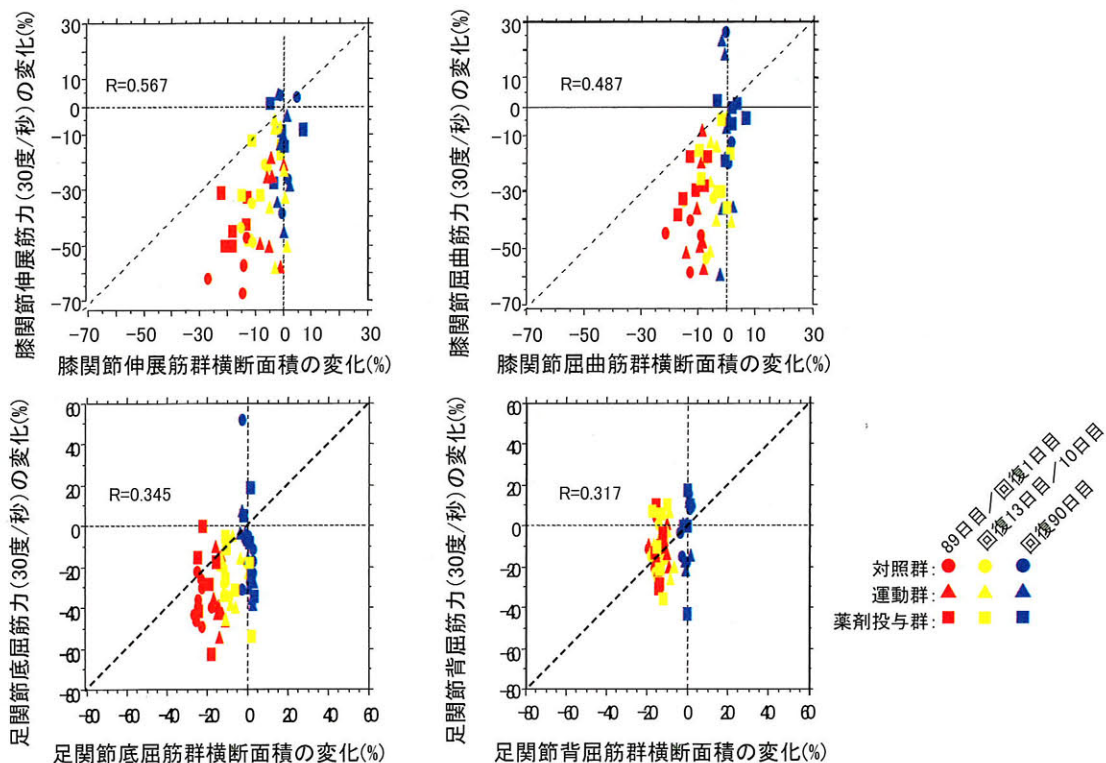


図14 下肢筋力および筋横断面積のベースライン値に対するベッドレスト後および回復期の変化率の比較

の軽微な被験者 25% (Good 群) と顕著な被験者 25% (Poor 群) を抽出し、両群を比較 (G-P 解析) することにより、群間の特徴抽出を行うこととした。

まずベッドレスト終了後の筋力低下の個人差における筋力、筋横断面積、および単位断面積あたりの筋力それぞれのベースライン値の影響を検討するために、Good 群と Poor 群のベースライン値を比較した (表 2)。有意差が認められたのは、膝関節屈曲筋力 (30deg/sec) の Good 群と Poor 群における膝関節屈曲筋横断面積のみであり、その他では有意差は認められなかった。一般に、筋は鍛錬度が高いほど脱トレーニング時における低下率も大きい (ベースライン値に依存している) といわれているが^{30, 31)}、20 日間のベッドレスト実験を行った Yamamoto ら³⁸⁾の報告では、脚筋力の低下率とベースライン値の関係は必ずしも依存していない。本研究の G-P 解析結果も、ベッドレストによる筋力低下が筋力のベースライン値に依存しないことを支持しており、ベースライン値の低い対象でも大きな筋力低下が引き起こされる危険性が懸念される。

筋力低下の個人差における同時期に測定したベッドレスト終了直後の筋横断面積および単位断面積あたりの筋力への影響について調べた結果 (表 3)、有意差が認められたのは筋横断面積で、膝関節伸展筋群および足関節底屈筋群のみであり、Poor 群が Good 群に比して大きな低下率を示した。一方、単位断面積あたりの筋力では、足関節背屈筋力 (60deg/sec) を除く全ての部位で Good 群に比して Poor 群の低下率が有意に大きなものとなった ($p < 0.01$)。これらの事実は、ベッドレスト終了時の筋力低下の個人差が膝関節伸展筋群および足関節底屈筋群では筋横断面積と単位断面積あたりの筋力の両者に反映されるのに対し、膝関節屈曲筋群および足関節背屈筋群では、単位断面積あたりの筋力低下のみに反映されることを意味している。すなわち、膝関節屈曲筋群および足関節背屈筋群における筋力低下が大きくても筋横断面積の低下が僅かである例が存在することが確認された。

ベッドレスト後の筋力低下の個人差における、筋力、筋横断面積および単位断面積あたりの筋力の回復過程への影響について検討の結果 (表 4)、特筆すべき事項としては、筋力の回復が挙げられる。ベッドレスト終了後 R+10 まで引き続き全測定部位の筋力で G-P 群間の有意差が認められた。特に膝関節屈曲筋力では R+90 においても依然として群間の有意差が認められた。この結果は筋力を筋横断面積で除した単位断面積あたりの筋力でも同様であった。これらのことは、ベッドレストに伴う筋力低下の個人差が、膝関節伸展および足関節底屈背屈筋力はベッドレスト終了後の R+10~R+90 の間に筋力が回復に伴って消失するのに対し、膝関節屈曲筋力では R+90 でも Poor 群が回復していないことを意味している。膝関節屈曲筋は全力疾走時に動員され、疾走速度を左右する重要な要因の一つであるが、通常の日常生活で動員される機会はほとんどない。本研究では、ベッドレスト終了後に特別なリハビリテーションを実施していないことから、Poor 群における膝関節屈曲筋力の回復過程を遅延させたとも考えられる。リハビリ期間中に行うこの部位の運動は重点的に実施する必要があるものと考えられる。

特定の筋力低下との関連が考えられる他の生理機能・状態を検討するとして、次の3つの項目について検討を行った；(1) 膝関節筋力低下の個人差における、足関節筋力低下率への影響(表 5-1)、(2) 膝関節と足関節筋力の低下の個人差におけるそれぞれの部位の拮抗筋への影響(表 5-2)、および(3) 膝関節筋力低下の個人差における、同部位の異なる角速度の筋力低下率への影響(表 6)。これらの中で有意差が認められなかったのは、(1) 膝関節筋力低下における、足関節筋力低下への影響および、(2) 膝関節と足関節筋力の低下における拮抗筋への影響であり、ある部位の筋力低下に大きな個人差が生じて、その個人差は他の関節部位や拮抗筋では必ずしも認められないことが示唆された。一方、膝関節筋力低下の個人差における、(3) 同部位の異なる角速度の筋力低下率への影響については有意差が認められ、ある部位の筋力低下率の個人差は動作速度に関係なく生じることが明らかにされた。Dudley ら¹⁰⁾、および Adams らは¹⁾、それぞれ30日のベッドレストおよび16日の下肢懸垂の前後で等速性筋力測定を行い、筋力低下に動作速度による特異性の無いことを報告している。本研究結果もこれらの報告と一致するものであり、廃用性の筋力低下では、ある動作速度の筋力低下が顕著な対象では、異なる動作速度の筋力低下も著しいことが確認された。

ベッドレスト期間中に実施した抵抗運動は、実施した運動の主動筋と考えられる膝関節伸展筋群において最も顕著な萎縮抑制効果を示しており、運動群の膝関節伸展筋群横断面積は、いずれの測定時期においてもベースライン値に対する有意差が認められなかった。膝関節伸展筋群以外の筋群では、運動群を含む全群で HDT29 と HDT89 の両測定時期ともにベースライン値よりも有意に低下したが、HDT89 では運動群の各筋横断面積低下率は対照群よりも有意に少なかった。本研究で用いられた運動は、ベッドレスト中の運動の効果を報告している先行研究(週 5~7 日の下肢抵抗運動^{3,4,16,17)} や実際の国際宇宙ステーションにおける長期宇宙滞在時の処方(週 6 日、1 日 90 分間の運動)に比して、短時間・低頻度(5 回/2 週間、1 回約 30 分)である。実際の宇宙滞在時には、多忙なスケジュールや運動機器の不具合の問題などから、できるだけ短時間かつ有効な対策法の開発が望まれている。今回、抵抗運動機器として用いられた FW 運動器の主たる特性として、バーベルやダンベル等と異なって実際の宇宙環境でも使用できること、および筋萎縮抑制効果が高いとされる筋の伸張性収縮が負荷されることの2点が挙げられる。今回の結果は、FW 運動器を使用することにより低頻度の抵抗トレーニングでも膝関節伸展筋群の萎縮を抑制できたとも解釈できる。しかし、他の下肢筋群は運動群でも有意に萎縮し、後述するベッドレスト終了後の筋力においても個人差が大きく、際立ったトレーニング効果は認められなかった。また共同研究者の大島により第7章に詳述されているとおり、腰痛発生の問題もあり、実際の軌道上の運動処方として応用するには、さらに工夫を重ねる必要があると考えられる。

以上、本研究は今後の長期宇宙ミッションおよび地上における長期臥床時の両者の基礎資料に足りうる重要なものであるが、主たる知見として、下肢筋横断面積の変化、用いた抵抗運動の筋萎縮予防効果、筋力低下の個人差の3者が挙げられる。このうち、筋横断面積の変化については、先行研究結果とも矛盾しない90日にも及ぶベッドレストの影響およびその回復過程の結果が得られたといえる。次にベッドレスト中に実施した抵抗運動の効果については、低頻度の影響から十分とは言えないまでも有意な筋萎縮効果が認めら

れた。今後、運動形式の工夫や他の何らかの対策案との組み合わせを検討することにより、実際の宇宙滞在時にも応用が可能になるかもしれない。最後に筋力低下の個人差であるが、宇宙滞在や長期臥床時には、筋萎縮という形態変化よりも実際の行動能力を支える筋力の方がより重要な問題となる。本研究および先行研究結果から、この個人差の原因として筋力のベースライン値以外の何らかの要因が考えられるが、この点については今後の検討が必要である。また同部位の筋力低下には動作速度による特異性はないが、大腿・下腿の各筋群では筋力低下の程度が個人間で異なる可能性も考えられる。これらの機序解明は、飛行中における効果的かつ効率的な対策案の作成や帰還後のリハビリプログラムの作成にテーラーメイドな視点から大きく貢献することが考えられ、今後の検討が強く望まれるものである。

5. 参考文献

1. Adams, G.R., Hather, B.M. and Dudley, G.A.: Effect of short-term unweighting on human skeletal muscle strength and size. *Aviat Space Environ Med* 65: 1116-1121, 1994.
2. Akima, H., Kawakami, Y., Kubo, K., Sekiguchi C., Ohshima, H., Miyamoto, A. and Fukunaga, T.: Effect of short-duration spaceflight on thigh and leg muscle volume. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1743-1747, 2000.
3. Akima, H., Kubo, K., Imai, M., Kanehisa, H., Suzuki, Y., Gunji, A. and Fukunaga, T.: Inactivity and muscle: effect of resistance training during bed rest on muscle size in the lower limb. *Acta Physiol Scand* 172: 269-278, 2001.
4. Akima, H., Kubo, K., Kanehisa, H., Suzuki, Y., Gunji, A. and Fukunaga, T.: Leg-press resistance training during 20 days of 6 degrees head-down-tilt bed rest prevents muscle deconditioning. *Eur J Appl Physiol* 82: 30-38, 2000.
5. Akima, H., Kuno, S., Suzuki, Y., Gunji, A. and Fukunaga, T.: Effects of 20 days of bed rest on physiological cross-sectional area of human thigh and leg muscles evaluated by magnetic resonance imaging. *J Gravit Physiol* 4: S15-21, 1997.
6. Bamman, M.M., Hunter, G.R., Stevens, B.R., Guilliams, M.E. and Greenisen, M. C.: Resistance exercise prevents plantar flexor deconditioning during bed rest. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1462-1468, 1997.
7. Berg, H.E., Larsson, L. and Tesch P. A.: Lower limb skeletal muscle function after 6 wk of bed rest. *J Appl Physiol* 82: 182-188, 1997.
8. Berg, H.E., Tedner, B. and Tesch P. A.: Changes in lower limb muscle cross-sectional area and tissue fluid volume after transition from standing to supine. *Acta Physiol Scand* 148: 379-385, 1993.
9. Dudley, G.A., Duvoisin, M.R., Adams, G.R., Meyer, R.A., Belew, A.H. and

- Buchanan, P.: Adaptations to unilateral lower limb suspension in humans. *Aviat Space Environ Med* 63: 678-683, 1992.
10. Dudley, G.A., Duvoisin, M.R., Convertino, V.A. and Buchanan P.: Alterations of the in vivo torque-velocity relationship of human skeletal muscle following 30 days exposure to simulated microgravity. *Aviat Space Environ Med* 60: 659-663, 1989.
 11. Edgerton, V.R., Zhou, M.Y., Ohira, Y., Klitgaard, H., Jiang, B., Bell, G., Harris, B., Saltin, B., Gollnick, P.D., Roy, R.R., et al.: Human fiber size and enzymatic properties after 5 and 11 days of spaceflight. *J Appl Physiol* 78: 1733-1739, 1995.
 12. Ellis, S., Kirby, L.C. and Greenleaf, J.E.: Lower extremity muscle thickness during 30-day 6 degrees head-down bed rest with isotonic and isokinetic exercise training. *Aviat Space Environ Med* 64: 1011-1015, 1993.
 13. Ferretti, G., Berg, H.E., Minetti, A.E., Moia, C., Rampichini, S., Narici, M.V.: Maximal instantaneous muscular power after prolonged bed rest in humans. *J Appl Physiol* 90: 431-435, 2001.
 14. Fitts, R.H., Riley, D.R. and Widrick, J.J.: Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle. *J Appl Physiol* 89: 823-839, 2000.
 15. Funato, K., Matsuo, A., Yata, H., Akima, H., Suzuki, Y., Gunji, A. and Fukunaga, T.: Changes in force-velocity and power output of upper and lower extremity musculature in young subjects following 20 days bed rest. *J Gravit Physiol* 4: S22-30, 1997.
 16. Germain, P., Guell, A. and Marini, J.F.: Muscle strength during bedrest with and without muscle exercise as a countermeasure. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 71: 342-348, 1995.
 17. Greenleaf, J.E., Bernauer, E.M., Ertl, A.C., Bulbulian, R. and Bond, M.: Isokinetic strength and endurance during 30-day 6 degrees head-down bed rest with isotonic and isokinetic exercise training. *Aviat Space Environ Med* 65: 45-50, 1994.
 18. Greenleaf, J.E., Bernauer, E.M., Ertl, A.C., Trowbridge, T.S. and Wade, C.E.: Work capacity during 30 days of bed rest with isotonic and isokinetic exercise training. *J Appl Physiol* 67: 1820-1826, 1989.
 19. Greenleaf, J.E., Bulbulian, R., Bernauer, E.M., Haskell, W.L. and Moore, T.: Exercise-training protocols for astronauts in microgravity. *J Appl Physiol* 67: 2191-2204, 1989.
 20. Kawakami, Y., Akima, H., Kubo, K., Muraoka, Y., Hasegawa, H., Kouzaki, M., Imai, M., Suzuki, Y., Gunji, A., Kanehisa, H. and Fukunaga, T.: Changes in muscle size, architecture, and neural activation after 20 days of bed rest with and without resistance exercise. *Eur J Appl Physiol* 84: 7-12, 2001.

21. Kawakami, Y., Muraoka, Y., Kubo, K., Suzuki, Y. and Fukunaga, T.: Changes in muscle size and architecture following 20 days of bed rest. *J Gravit Physiol* 7: 53-59, 2000.
22. Kinugasa, R., Akima, H., Ota, A., Ohta, A., Sugiura, K. and Kuno, S.Y.: Short-term creatine supplementation does not improve muscle activation or sprint performance in humans. *Eur J Appl Physiol* 91: 230-237, 2004.
23. Koryak, Y.: Effect of 120 days of bed-rest with and without countermeasures on the mechanical properties of the triceps surae muscle in young women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 78: 128-135, 1998.
24. Koryak, Y.: The effects of long-term simulated microgravity on neuromuscular performance in men and women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 79: 168-175, 1999.
25. Koryak, Y.: Electrical and contractile parameters of muscle in man: effects of 7-day "dry" water immersion. *Aviat Space Environ Med* 70: 459-464, 1999.
26. LeBlanc, A., Gogia, P., Schneider, V., Krebs, J., Schonfeld, E. and Evans, H.: Calf muscle area and strength changes after five weeks of horizontal bed rest. *Am J Sports Med* 16: 624-629, 1988.
27. LeBlanc, A., Rowe, R., Schneider, V., Evans, H. and Hedrick, T.: Regional muscle loss after short duration spaceflight. *Aviat Space Environ Med* 66: 1151-1154, 1995.
28. LeBlanc, A., Schneider, V., Spector, E., Evans, H., Rowe, R., Lane, H., Demers L., Lipton A.: Calcium absorption, endogenous excretion, and endocrine changes during and after long-term bed rest. *Bone* 16: 301S-304S, 1995.
29. LeBlanc, A.D., Schneider, V.S., Evans, H.J., Pientok, C., Rowe, R. and Spector, E.: Regional changes in muscle mass following 17 weeks of bed rest. *J Appl Physiol* 73: 2172-2178, 1992.
30. Mujika, I. and Padilla, S.: Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I: short term insufficient training stimulus. *Sports Med* 30: 79-87, 2000.
31. Mujika, I. and Padilla S.: Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part II: Long term insufficient training stimulus. *Sports Med* 30: 145-154, 2000.
32. Roy, R.R., Hodgson, J.A., Aragon, J., Day, M.K., Kozlovskaya, I. and Edgerton, V.R.: Recruitment of the Rhesus soleus and medial gastrocnemius before, during and after spaceflight. *J Gravit Physiol* 3: 11-15, 1996.
33. Semmler, J.G., Kutzscher, D.V. and Enoka, R.M.: Limb immobilization alters muscle activation patterns during a fatiguing isometric contraction. *Muscle Nerve*

- 23: 1381-1392, 2000.
34. Shinohara, M., Yoshitake, Y., Kouzaki, M., Fukuoka, H. and Fukunaga, T.: Strength training counteracts motor performance losses during bed rest. *J Appl Physiol* 95: 1485-1492, 2003.
35. Suzuki, Y., Iwamoto, S., Haruna, Y., Kuriyama, K., Kawakubo, K. and Gunji A.: Effects of 20 days horizontal bed rest on mechanical efficiency during steady state exercise at mild-moderate work intensities in young subjects. *J Gravit Physiol* 4: S46-52, 1997.
36. Suzuki, Y., Kashihara, H., Takenaka, K., Kawakubo, K., Makita, Y., Goto, S., Ikawa, S. and Gunji A.: Effects of daily mild supine exercise on physical performance after 20 days bed rest in young persons. *Acta Astronaut* 33: 101-111, 1994.
37. Widrick, J.J., Romatowski, J.G., Bain, J.L., Trappe, S.W., Trappe, T.A., Thompson, J. L., Costill, D.L., Riley, D.A. and Fitts R.H.: Effect of 17 days of bed rest on peak isometric force and unloaded shortening velocity of human soleus fibers. *Am J Physiol* 273: C1690-1699, 1997.
38. Yamamoto, T., Sekiya, N., Miyashita, S., Asada, H., Yano, Y., Morishima, K., Okamoto, Y., Goto, S., Suzuki, Y. and Gunji A.: Gender differences in effects of 20 days horizontal bed rest on muscle strength in young subjects. *J Gravit Physiol* 4: S31-36, 1997.
39. Zange, J., Muller, K., Schuber, M., Wackerhage, H., Hoffmann, U., Gunther, R.W., Adam, G., Neuerburg, J.M., Sinitsyn, V.E., Bacharev, A.O. and Belichenko, O.I.: Changes in calf muscle performance, energy metabolism, and muscle volume caused by long-term stay on space station MIR. *Int J Sports Med* 18 Suppl 4: S308-309, 1997.
40. Zhou, M.Y., Klitgaard, H., Saltin, B., Roy, R.R., Edgerton, V. R. and Gollnick, P.D.: Myosin heavy chain isoforms of human muscle after short-term spaceflight. *J Appl Physiol* 78: 1740-1744, 1995.