

短期間の寝たきり生活は青年の筋特性に どのような変化を引き起こすか

東京大学大学院 川 上 泰 雄
(共同研究者) 同 久 保 啓太郎
同 深 代 千 之
同 金 久 博 昭

Effects of Short-term Bed Rest on Skeletal Muscle Properties in Young Men

by

Yasuo Kawakami, Keitaro Kubo,
Senshi Fukashiro, Hiroaki Kanehisa
*Department of Life Sciences (Sports Sciences) ,
Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo*

ABSTRACT

Fourteen healthy men (18-28 yr) carried out head-down bed rest (BR) for 20 days. The subjects were divided into three groups: five subjects who performed unilateral dynamic knee extension exercise, five subjects who performed bilateral isometric leg extension exercise, and four subjects who acted as control. The first two groups trained every day at their maximal effort. Before and after BR, physiological cross-sectional areas (PCSA) of the quadriceps muscles were determined from a series cross-sectional MRI scans of the thigh. In the latter two groups, maximal isometric knee extension force was measured and neural activation was assessed by a supramaximal twitch interpolated over voluntary contraction. PCSA decreased by ~10 % in the control subjects and control limbs, but the decrease was much smaller in the trained legs. Decrease in muscle force after BR was greater than that of PCSA in the control subjects, who showed a decrease in

neural activation. Pennation angles of the vastus lateralis, determined by ultrasonography, did not show significant changes in any groups. The results suggest that reduction of muscle strength by BR is affected both by a decreased muscle mass and reduced ability to activate motor units, both of which can be retained by resistance training. It was also shown that static and dynamic exercises are similarly effective as countermeasure against muscle atrophy.

要 旨

健康な青年男性14名(18~28歳)が安静臥床(ベッドレスト)を20日間行ったときの膝関節伸展筋群の筋量(生理学的筋横断面積), 筋形状(羽状角)および膝関節伸展筋力と神経系の興奮水準の変化について検討した。ベッドレスト中に行うトレーニングの種類によって被験者を3群(片脚動的トレーニング群, 両脚静的トレーニング群, コントロール群)に分けた。ベッドレストによって筋量・筋力ともに低下したが, その程度は非トレーニング肢・群が顕著で, トレーニングを行った実験群では生理学的筋横断面積の低下や筋力の低下が抑えられた。筋形状はどの群においても有意な変化を示さず, 20日間のベッドレストでは筋形状は変化しないことが示唆された。ベッドレストによる筋力低下は生理学的筋横断面積の低下を上回り, 筋横断面積当たりの筋力が低下するが, これは神経系の興奮水準の低下に関係していることが明らかとなった。また, ベッドレスト中のトレーニング効果の対側への効果やトレーニングの形態の影響などについての知見も得られた。

緒 言

加齢に伴い, 筋力・筋パワーに代表される筋機能が低下する。これは, 加齢によって筋線維, とくに速筋線維が顕著に萎縮するためであるといわれている(Larssonら, 1979)。また, 運動単

位数の減少や運動単位の動員能力の低下も指摘されている(McComas, 1991)。高齢者の日常動作の遂行が困難になるのは, これらの変化のために, すばやく, 力強い筋力発揮能力が低下するためであると考えられる。

加齢に伴う筋肉の萎縮や筋機能の低下は, 筋の老化現象に加えて身体活動量の低下が影響する。身体活動量の低下した高齢者の筋力低下が顕著であること(Rantanenら, 1998), 高齢者でもトレーニングによって筋量・筋力双方の増加が得られること(Romanら, 1993)は, 高齢者において身体活動量の減少によって筋機能の低下が加速度的に進行することを示している。高齢化社会の現在, 中高年における身体運動の必要性が叫ばれているのはこのためである。

身体不活動は青年期においても筋量や筋機能を低下させる。例えば, 病気やケガなどによって寝たきりを余儀なくされた場合, 青年においても筋萎縮や筋力低下が生じることは経験的に知られている。ところが, 筋のこのマイナス方向への変化のメカニズムは, トレーニングによる筋力増加に代表されるプラス方向への変化に比べて不明な点が多いのが現状である。

青年期に筋特性(筋量・筋力)が低レベルであることは, 老後の筋特性の低下をさらに加速する可能性がある。したがって, 中高年に対する具体的な運動処方を確立するためには, まず, 身体不活動が筋特性をどのように変化させるのかについて, 青年を対象とした実験的研究を通

じて検討することが必要であると考えられる。本研究の目的は、1) 短期間の寝たきり生活が青年の筋特性にどのような影響を及ぼすかを縦断的測定を通じて明らかにすること、2) 寝たきり生活の間の身体運動の有効性を検証すること、である。この目的のために、短期間の安静臥床（ベッドレスト）を行い、そのときの筋特性を詳細に検討した。また、ベッドレスト中に種々の方法でトレーニングを行う条件と行わない条件を設け、筋特性の変化を通じてトレーニングの有効性について調べた。

1. 研究方法

1. 1 被験者

被験者は14名の健常な男性であった（年齢18～28歳，身長 172.0 ± 4.3 cm，体重 68.4 ± 10.6 kg）。どの被験者も、整形外科的・神経学的疾患を有していなかった。各被験者にはあらかじめ本研究の目的・方法などについて説明し、実験参加に対する同意を得た。

1. 2 ベッドレスト実験

被験者は20日間のベッドレストを行った。頭部を6°低くした姿勢に保つことで、体液分布を身体内で均一にするように配慮した（LeBlancら，1992）。移動は検者が臥床状態の被験者をストレッチャーに乗せることにより、被験者が立ったり座ったりすることのないようにした。被験者は同室をカーテンを隔てて共有し、抑うつ感が起こらないようにした。スタッフが24時間体制で常駐し、移動、トイレ、シャワー（双方ともに臥床状態のまま行った）、食事の配給などの被験者サポートを行った。食事はエネルギー量や栄養バランスに配慮した。

ベッドレスト中に行うトレーニングの種類によって被験者を以下の3群に分けた。

第1群（5名） 片脚トレーニング群

第2群（5名） 両脚トレーニング群

第3群（4名） コントロール群

第1群は、ベッドレスト期間中に片脚のレジスタンストレーニングを行った。トレーニングは等速性筋力計（サイベックスII⁺，サイベックス社製）を用いた膝関節伸展運動（右肢のみ）であり、60°/秒の速度で10回、180°/秒の速度で50回の運動を最大努力で、毎日行った。対側（左肢）は運動を行わず、コントロール側とした。第2群は、両脚を用いた最大努力の等尺性脚伸展運動（VR-400，サイベックス社製）を、股関節角度70°，膝関節角度90°にて、3秒収縮－3秒弛緩のリズムで30回、毎日行った。第3群はベッドレストのみで、運動は行わなかった。

2. 測定項目

筋量の指標として、以下の方法で生理学的筋横断面積（PCSA）を求めた。大腿部の連続組織横断像をMRIを用いて撮像（スライス厚10mm）し、これより大腿四頭筋（外側広筋，内側広筋，中間広筋，大腿直筋）をトレースし、解剖学的筋横断面積を求めた。これを筋長（各筋の筋腹が確認できる画像の両端間の距離）の全長にわたって行い、筋体積を求めた。筋体積を、先行研究で報告されている筋線維長／筋長比（Wickiewiczら，1983）に筋長を乗じて求めた筋線維長で除すことによって各筋のPCSAを計算した。各筋のPCSAを合計することによって、大腿四頭筋のPCSAを求めた。また、筋の形状特性の指標として、羽状角（pennation angle）を超音波法を用いて外側広筋について測定した。Kawakamiら（1993）にならい、外側広筋の筋腹中央において深部腱膜と筋束のなす角度を羽状角とした。PCSA，羽状角の測定精度については既に検討済みである（Kawakamiら，1993，1994，1995）。なお、PCSAの測定は第1群の両肢，第2群・第3群の右肢について行った。

筋機能の指標として、膝関節伸展動作の等尺

性最大筋力を特別に作製した筋力計を用いて測定した。膝関節角度は90°に設定し、足首の部分で測定される力をもって筋力とした。なお、筋力測定は第2群および第3群の右肢について行った。また、最大の力が発揮されているかどうかを調べるために、筋力発揮中に超最大強度の単収縮を電気刺激 (SEN-3301, 日本光電社製) によって誘発した。電気刺激は、鼠径部の大腿神経上および大腿四頭筋筋腹部に貼付した表面電極 (4×7 cm) によって行った。電気刺激によって随意筋力以上に単収縮トルクが発揮された場合、トルクの増加分を計測した。筋力発揮直後の安静時にも同様の刺激を行い、このときの単収縮トルクと筋力発揮中の単収縮トルク増加分の比から、以下の式によって神経系の興奮レベルを推定した (twitch interpolation, BelangerとMcComas, 1981)。

神経系の興奮レベル (% Activation)

$$= (1 - \text{随意収縮中の単収縮トルク増加分} / \text{安静時の単収縮トルク}) \times 100 (\%)$$

3. 統計処理

ベッドレスト前後の測定値の変化は各実験群について対のある t 検定を用いて検討した。第2群と第3群における筋力の変化とPCSAおよび神経系の興奮レベルの変化との間の関係は相関分

析を用いて検討した。いずれの場合も、危険率5%未満をもって有意と判断した。

4. 実験結果

図1と図2に、それぞれ第1群におけるトレーニング脚とコントロール脚の連続MRI画像を示す。これより求めたPCSAの結果は表1に示した通りである。第1群ではトレーニング群、コントロール群ともにベッドレスト後にPCSAが減少したが、減少の程度はコントロール群 (-10%) がトレーニング群 (-5%) の2倍であった。第2群については、PCSAはベッドレスト後に減少傾向を示したものの有意な変化は認められなかった。第3群のPCSAはベッドレスト後に減少した (-8%)。

図3に、第1群におけるトレーニング肢とコントロール肢の超音波画像 (外側広筋、横断および縦断) を示す。縦断画像から外側広筋の羽状角を求めた。第1群～第3群ともに、ベッドレスト前後で羽状角に有意な変化は生じなかった (表2)。なお、横断像から求めた外側広筋の筋厚も、ベッドレスト前後で有意な変化を示さなかった (トレーニング肢、コントロール肢ともに)。

膝伸展筋力は第2群がベッドレスト前後でそれぞれ $732 \pm 157\text{N}$ (平均値±標準偏差, 以下同じ), $738 \pm 189\text{N}$ となり、有意な変化はみられなかった。一方、第3群は $608 \pm 340\text{N}$ から $546 \pm 352\text{N}$ へと

表1 生理学的筋横断面積の変化

		ベッドレスト前	ベッドレスト後
第1群	右肢 (トレーニング側)	220.9 (33.8)	209.5 (34.1) *
	左肢 (コントロール側)	203.8 (42.7)	183.8 (45.1) *
第2群		296.8 (13.8)	285.3 (12.3)
第3群		268.2 (33.5)	247.2 (30.9) *

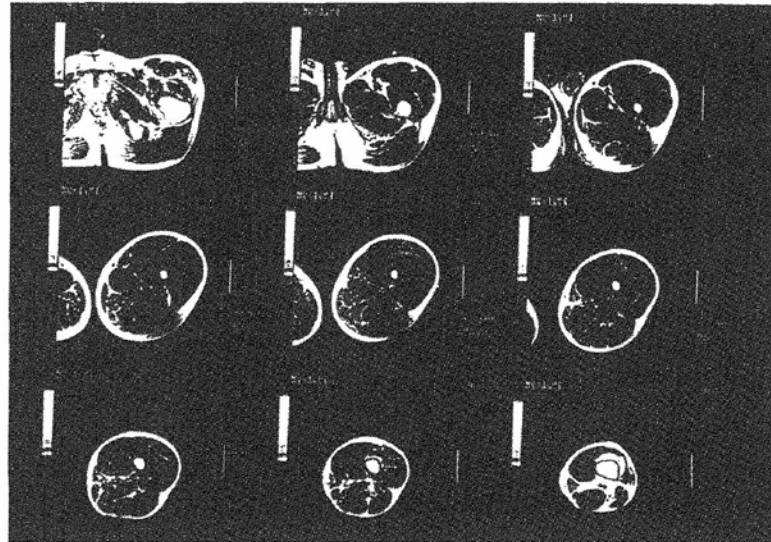
平均値 (標準偏差), 単位は cm^2 , * ベッドレスト前後で有意差あり

表2 外側広筋羽状角の変化

		ベッドレスト前	ベッドレスト後
第1群	右肢 (トレーニング側)	15.0 (2.3)	15.6 (2.3)
	左肢 (コントロール側)	14.8 (2.4)	13.9 (2.6)
第2群		17.7 (2.3)	17.6 (1.8)
第3群		19.8 (3.9)	19.5 (4.1)

平均値 (標準偏差), 単位はmm

Trained Limb, Before Bed Rest



Trained Limb, After Bed Rest

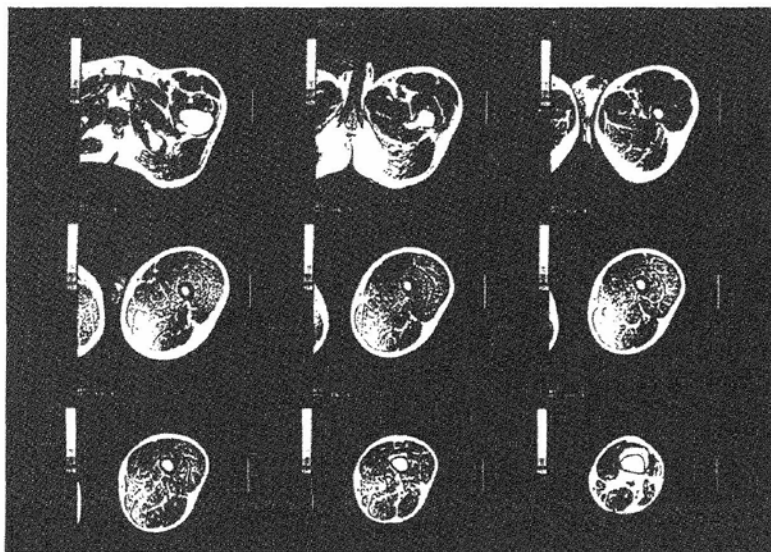
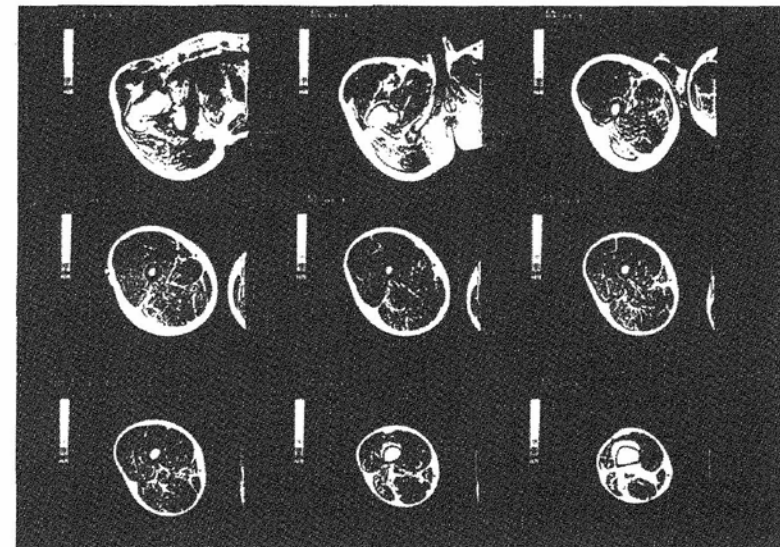


図1 第1群のトレーニング肢の連続MRI画像の例。ベッドレスト前（上）およびベッドレスト後（下）を示す。左上より右下へ、股関節から膝関節までを示す。実際のスライス間隔は10mmであった。

Control Limb, Before Bed Rest



Control Limb, After Bed Rest

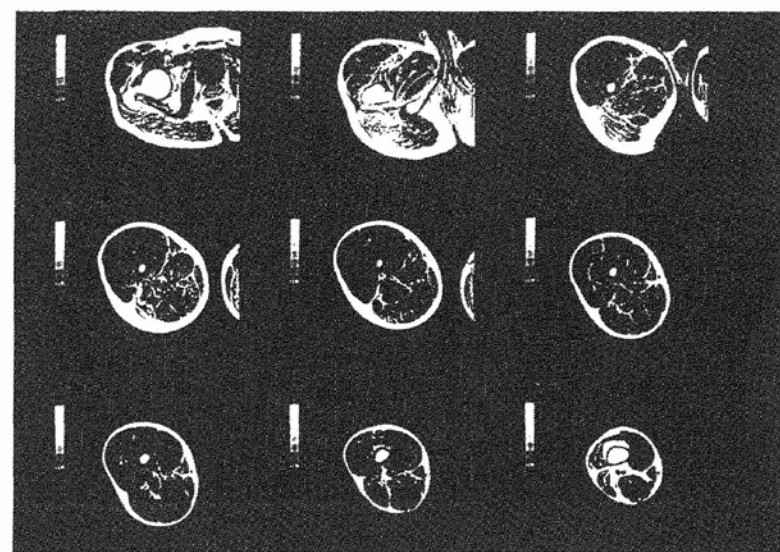


図2 第1群のコントロール肢の連続MRI画像の例（図1と同一被験者）。画像の並び方は図1と同様。

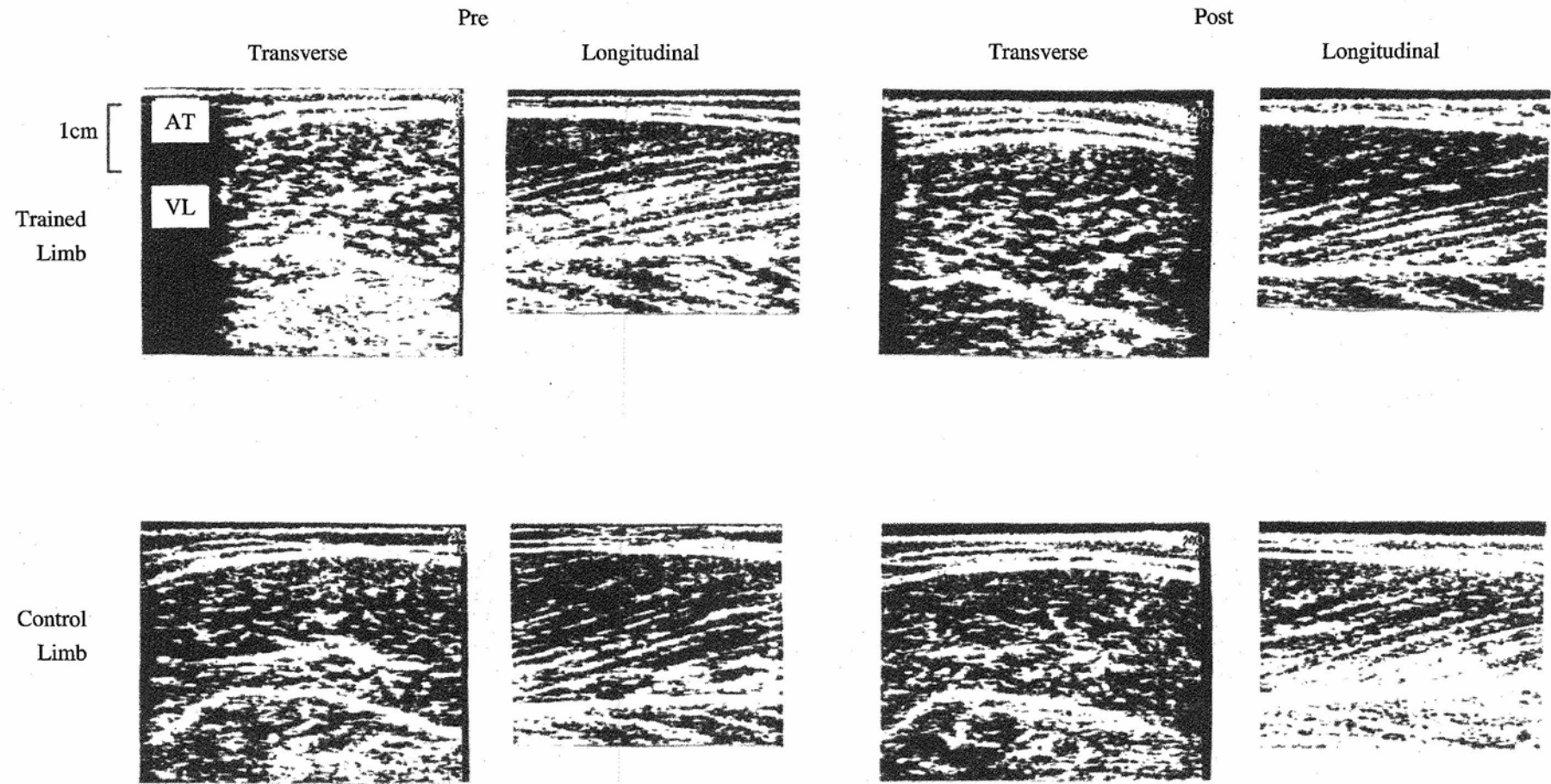


図3 第1群のトレーニング肢（上，Trained Limb）とコントロール肢（下，Control Limb）の外側広筋の超音波横断（左，Transverse）および縦断（右，Longitudinal）画像の例。ベッドレスト前（左，Pre）およびベッドレスト後（右，Post）を示す。

有意な低下 (-11%) を示した。神経系の興奮水準は第2群がベッドレスト前後で $92 \pm 4\%$ から $92 \pm 4\%$ というように、同レベルを維持していたが、第3群はベッドレスト前に $86 \pm 5\%$ であったものがベッドレスト後には $80 \pm 2\%$ にまで有意に低下した。

5. 考 察

これまでに、ベッドレストは宇宙飛行のモデルとして調べられている。これらの先行研究はベッドレストは骨格筋量を低下させることを示しており、本研究の結果もこれを支持する。LeBlancら (1992) は、17週間のベッドレストで下肢筋群の体積に 16~18% の低下がみられたと報告している。本研究の結果、3週間のベッドレストで大腿四頭筋の PCSA (筋線維長は先行研究のデータを用いているために変化率は体積と等価である) は 8~10% の低下を示した (コントロール群もしくはコントロール肢)。また、6週間のベッドレストによって大腿四頭筋の横断面積に 14~16% の低下が生じることが示されている (Bergら, 1997; Hatherら, 1992)。これらの結果を合わせて考えると、ベッドレストによる筋萎縮ははじめの数週間が顕著で、その後は変化が少なくなることが示唆される。ベッドレスト開始 5~6 週間の筋萎縮率は $0.4 \sim 0.5\% / \text{日}$ と予想される。

第1群のコントロール肢のベッドレスト後の PCSA 低下率は -10% であり、第3群の PCSA の低下率 (-8%) と同等であった。このことは、ベッドレスト中の片方の体肢のトレーニングは反対側の体肢の筋萎縮のスピードを遅らせることができないことを示している。第1群の筋力を測定していないために、コントロール脚の筋力に対する反対側のトレーニングの効果については不明であるが、第2群および第3群の筋力および神経系の興奮水準の変化率の関係から、筋力に対しては交叉トレーニング効果が期待できる可能性が

ある。この点については今後の研究課題である。

先行研究において、筋肥大は筋量のみならず筋形状をも変化させ、羽状角が増加することが示されている (Kawakamiら, 1993, 1995)。筋形状の変化は筋力発揮特性にも影響をもつようである (Kawakamiら, 1995)。したがって、筋萎縮はこの逆の変化をもたらすのではないかと予想されたが、本研究の結果、少なくとも 10% 程度の筋萎縮は羽状角の変化をもたらさないことがわかった。羽状角の変化が測定精度 ($\pm 1^\circ$, Kawakamiら, 1993) よりも少ない範囲で生じた可能性もあるが、仮にそうであったとしても、その程度の変化は筋力発揮特性を変化させるほどではないであろう。

本研究の結果、ベッドレスト中のトレーニングは PCSA の減少を抑えるとともに、筋力低下をくい止める効果のあることが明らかになった。興味深いことに、トレーニング動作が単一の関節角度における静的運動 (第2群) でも、種々の速度を用いた動的な運動 (第1群) と同様もしくはそれ以上の効果をもつことがわかった。第2群における PCSA および筋力の維持がその証左である。このことは、寝たきりの生活を余儀なくされたとき、等速性筋力計のような運動器具が得られない場合にも、等尺性の運動を行うことによって筋特性を維持することが可能であることを意味する。このことは、寝たきり老人のコンディショニングにとっても有効な知見であると考えられる。

筋力は PCSA に比例することが動物実験や人間での実験によって確かめられている (Roy と Edgerton, 1992; Fukunagaら, 1996)。その一方で、人間の随意筋力発揮の場合、PCSA と筋力との関係にはばらつきが生じることも認められている (福永, 1978; Kawakamiら, 1994)。ばらつきの原因として、神経系の興奮レベル (最大随意収縮がどれだけ生理的限界に近い) に個人

差が存在することが示唆されている (Belangerと McComas, 1981). 人間の場合, 最大努力であっても随意収縮である限り筋の生理的限界までの力発揮を行うことができないという知見も得られている (Dowlingら, 1994). 本研究の結果をみても, 神経系の興奮レベルは100%を下回り, 90%前後であった. さらに, 第2群はベッドレスト前後で同一の興奮レベルを維持したが, 第3群ではベッドレスト後にレベルが低下した. 第3群の筋力低下率は-11%であり, PCSAの低下率は-8%であったことは, 筋力低下が筋萎縮の程度を上回ったことを示しており, 神経系の興奮レベルの低下によって生理学的筋横断面積当たりの筋力 (specific tension) が低下したことがわかる. これらの結果は, ベッドレストによって筋力発揮の心理的限界が低下することと, トレーニングによってその低下をくい止めることができることを意味している.

6. まとめ

健康な青年男性14名が被験者となり, 安静臥床 (ベッドレスト) を20日間行ったときの筋量 (生理学的筋横断面積), 筋形状 (羽状角), 筋力, および神経系の興奮水準の変化について検討した. 対象としたのは膝関節伸展筋群 (大腿四頭筋) であった. ベッドレスト中に行うトレーニングの種類によって被験者を3群 (第1群 [5名]: 片脚動的トレーニング群, 第2群 [5名]: 両脚静的トレーニング群, 第3群 [4名]: コントロール群) に分けた.

ベッドレストによって筋量・筋力ともに低下したが, その程度は第1群の非トレーニング肢および第3群が顕著で, トレーニングを行った実験群では生理学的筋横断面積の低下や筋力の低下が抑えられた. 筋形状はどの群においても有意な変化を示さず, 20日間のベッドレストでは筋形状は変化しないことが示唆された. 神経系の興奮水

準はコントロール群 (第3群) が低下し, トレーニング群 (第2群) では維持された. コントロール群の筋力低下は生理学的筋横断面積の低下を上回り, 神経系の興奮水準の低下が筋横断面積当たりの筋力の低下に結びついていることが示された.

本研究によって, 急激な身体不活動が筋特性に及ぼす影響が明らかとなり, また, 静的トレーニングの有効性に関する知見が得られた. これらの知見は, 中高年における筋特性の低下やその改善方法を確立するための基礎的資料となり, 現在社会問題となっている寝たきり老人を防止するために有効に利用され得ることが期待される.

謝 辞

ベッドレストの遂行に関して, 東京大学医学部保健管理学教室の協力を得た. ベッドレスト実施に際して中心となって協力していただいた郡司篤晃氏, 鈴木洋児氏に感謝する次第である. また, MRIの撮影に関しては, 東京大学大学院総合文化研究科 秋間 広氏の協力を得た. ここに記して謝意を表する. なお, 本研究の一部は (財) 日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プログラムの一環として行われた.

文 献

- 1) Belanger, A. Y., and A. J. McComas ; Extent of motor unit activation during effort, *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 51, 1131-1135 (1981)
- 2) Berg, H. E., L. Larsson, and P. A. Tesch ; Lower limb skeletal muscle function after 6 wk of bed rest, *J. Appl. Physiol.* 82, 182-188 (1997)
- 3) Dowling, J. J., E. Konert, P. Ljucovic, and D. M. Andrews ; Are humans able to voluntarily

- elicit maximum muscle force?, *Neurosci. Lett.* 179, 25-28 (1994)
- 4) 福永哲夫; ヒトの絶対筋力—超音波による体肢組成・筋力の分析—. 東京, 杏林書院 (1978)
- 5) Fukunaga, T., R. R. Roy, F. G. Shellock, J. A. Hodgson, and V. R. Edgerton ; Specific tension of human plantar flexors and dorsiflexors, *J. Appl. Physiol.* 80, 158-165 (1996)
- 6) Hather, B. M., G. R. Adams, P. A. Tesch, and G. A. Dudley ; Skeletal muscle responses to lower limb suspension in humans, *J. Appl. Physiol.* 72, 1493-1498 (1992)
- 7) Kawakami, Y., T. Abe, and T. Fukunaga ; Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles, *J. Appl. Physiol.* 74, 2740-2744 (1993)
- 8) Kawakami, Y., T. Abe, S. Kuno, and T. Fukunaga ; Training-induced changes in muscle architecture and specific tension, *Eur. J. Appl. Physiol.* 72, 37-43 (1995)
- 9) Kawakami, Y., K. Nakazawa, T. Fujimoto, D. Nozaki, M. Miyashita, and T. Fukunaga ; Specific tension of elbow flexor and extensor muscles based on magnetic resonance imaging, *Eur. J. Appl. Physiol.* 68, 139-147 (1994)
- 10) Larsson, L., G. Grimby, and J. Karlsson ; Muscle strength and speed of movement in relation to age and muscle morphology, *J. Appl. Physiol.* 46, 451-456 (1979)
- 11) LeBlanc, A. D., V. S. Schneider, H. J. Evans, C. Pientok, R. Rowe, and E. Spector ; Regional changes in muscle mass following 17 weeks of bed rest, *J. Appl. Physiol.* 73, 2172-2178 (1992)
- 12) McComas, A. J. Invited review: motor unit estimation: methods, results, and present status, *Muscle Nerve* 14, 585-597 (1991)
- 13) Rantanen, T., K. Masaki, D. Foley, G. Izmirlian, L. White, and J. M. Guralnik ; Grip strength changes over 27 yr in Japanese-American men, *J. Appl. Physiol.* 85, 2047-2053 (1998)
- 14) LeBlanc, A. D., V. S. Schneider, H. J. Evans, C. Pientok, R. Rowe, and E. Spector ; Regional changes in muscle mass following 17 weeks of bed rest, *J. Appl. Physiol.* 73, 2172-2178 (1992)
- 15) Roman, W. J., J. Fleckenstein, J. Stray-Gundersen, S. E. Alway, R. Peshock, and W. J. Gonyea ; Adaptations in the elbow flexors of elderly males after heavy-resistance training, *J. Appl. Physiol.* 74, 750-754 (1993)
- 16) Roy, R. R., and V. R. Edgerton ; Skeletal muscle architecture and performance. In: *Strength and Power in Sport*, edited by P. V. Komi. London: Blackwell Scientific Publication (1992, pp. 115-129)
- 17) Wickiewicz, T. L., R. R. Roy, P. L. Powell, and V. R. Edgerton ; Muscle architecture of the human lower limb, *Clin. Orthopaed. Rel. Res.* 179, 275-283 (1983)