

筋音図によるレジスタンストレーニング効果の分析と評価

東京大学 篠原 稔
(共同研究者) 同 神崎 素樹
日本女子体育大学 市之瀬 慈歩
東京大学 福永 哲夫

Analysis of the Efficacy of Resistance Training by Mechanomyography

by

Minoru Shinohara, Motoki Kouzaki

The University of Tokyo

Yoshiho Ichinose

Japan Women's College of Physical Education

Tetsuo Fukunaga

The University of Tokyo

ABSTRACT

To investigate the applicability of mechanomyography (MMG) for the evaluation of efficacy of resistance training on maximal voluntary contraction (MVC), nine subjects underwent resistance training in the form of isometric elbow flexion by each subject's left arm. The training consisted of 5 seconds of isometric MVC for 5 times with 1-minute interval in between each contraction. The training was completed 3 times per week for 2 weeks. There were no differences between the limbs nor between pre- and post- training in the morphological measurements such as muscle thickness of elbow flexors, adipose tissue thickness and circumference of upper arm. The gain in the MVC torque achieved by the resistance training in the trained limb amounted to 11 % ($p < 0.01$), which eliminated the initially observed

difference in the MVC torque between the limbs. Integrated MMG (iMMG) of biceps brachii muscle in the trained limb was significantly increased after training ($p < 0.05$), although the concomitant increase in integrated electromyogram of biceps brachii muscle did not reach statistical significance. Median frequency of MMG did not change after the training. The results suggest that the amount of changes in iMMG can be used for evaluating the efficacy of resistance training.

要 旨

レジスタンストレーニングが随意最大筋力発揮時の神経性要因に与える効果について、筋音図法によって評価する可能性を検討することを目的として、等尺性肘屈曲運動トレーニングを9名の被検者が左腕のみ行った。トレーニングは5秒間の随意最大筋力発揮を1分間隔で5回行うものであり、1週間に3回、2週間行った。上腕囲、上腕前部皮下脂肪厚、および上腕肘屈筋群の筋厚には両腕間の差、トレーニングによる差は認められなかった。トレーニング前は左腕の随意最大筋力は右腕よりも有意に低かったが、トレーニングによって左腕の随意最大筋力は約11%増加し ($p < 0.01$) 左右差は消失した。随意最大筋力の増加に伴う上腕二頭筋の筋電図積分値の増加は有意ではなかったが、筋音図積分値の増加は有意であった ($p < 0.05$)。筋音図周波数中央値にはトレーニングによる変化が認められなかった。筋音図積分値の増加によって、レジスタンストレーニングの効果を評価できる可能性が高いことが示唆された。

緒 言

レジスタンストレーニングによって得られる筋力増加は、神経性要因（筋活動の変化）と形態的要因（筋肥大）によるものであり、トレーニング開始当初は前者の神経性要因の影響が大きく、その後には後者の形態的要因の影響が生じるとされている¹⁻³⁾。筋活動においては筋の電氣的興奮が機械的収縮を生じさせ、その結果として筋力が発揮

されるが、トレーニングによる神経性要因の検討には筋の電氣的興奮を反映する信号である筋電図 (electromyogram, EMG) が古くから用いられている。

一方、筋の機械的収縮を反映する信号である筋音図 (mechanomyogram, MMG) による筋活動の評価が近年検討されてきている^{4-6, 8)}。筋音図は筋収縮の際に生じる筋線維の側方変形由来の振動を皮膚表面からとらえたものであり⁴⁾、筋音図センサーを目的とする筋の皮膚表面に固定するだけで信号が得られるために、電極間距離や皮膚抵抗などに注意が必要な筋電図法と比べて測定が非常に容易である。また、筋音図の周波数成分は筋線維の収縮頻度を主に反映すると考えられているため⁵⁾、筋電図法以上に多くの情報を抽出できる可能性が高い。

本研究では、神経性要因の効果の大きいとされる短期間の高強度レジスタンストレーニングを用い、その効果を筋音図法によって評価する可能性について検討することを目的とした。

1. 方 法

1. 1 概要と被検者

実験は、2週間のレジスタンストレーニングとトレーニング前後の測定により構成され、トレーニング前後の測定では形態計測と力発揮テストが行われた。力発揮の様式はテスト、トレーニング共に等尺性肘屈曲運動であり、片腕のみをトレーニング肢とした。筋力トレーニングの習慣を持たない健常男女9名（男子3名、女子6名）を被検

者として用いた。8名の被検者は右利きであり、1名（女子）の被検者は左利きであった。被検者の身体的特性の平均値（SD）は年齢 28.4（3.4）歳、身長 161.9（6.8）cm、体重 57.2（7.6）kgであった。実験開始に先立ち、各被検者に対して実験内容に関する説明を行い、実験参加同意書に署名を受けた。

1. 2 形態計測

トレーニング前後に上腕囲、上腕前部皮下脂肪厚、上腕肘屈筋群の筋厚を両腕について測定した。上腕前部皮下脂肪厚と上腕肘屈筋群筋厚の測定にはBモード超音波測定装置（SSD-2000, Aloka, Japan）を用いた。被検者は立位姿勢をとり、肘関節を伸展し、前腕を回外した状態を保ち、上肢に力を入れないようにした。肩峰点から橈側上顆までを上腕長として計測し、遠位 60%の皮膚面において、メジャーにより周径囲を測定し上腕囲とした。同位置の上腕前面皮膚上に超音波の探触子（発振周波数; 7.5MHz）を当て、圧迫による筋の変形が生じないように配慮して超音波横断画像を得た。測定は少なくとも左右それぞれ3回ずつ行い、それぞれの画像上にて皮下脂肪厚と肘屈筋群の筋厚を計測し（図1）、3回の平均値を計測値とした。

1. 3 筋力発揮テスト

トレーニング前後には、以下に示す等尺性肘屈曲の随意最大収縮（Maximal Voluntary Contraction, MVC）テストおよび最大下収縮テストを片腕ずつ、両腕について行った。等尺性肘屈曲運動は、肘屈曲トルク測定装置（VINE社製）を用い、肘関節角度を90度に固定して座位で行った。まず、3秒間程度のMVC発揮を4～5回行い、各試行について力が一定となった1秒間の平均発揮トルクを計測した。そして計測された発揮トルクの大きい上位3試行の平均値をMVCトルクとして決定した。次に、各被検者のMVCトルクの30～80%のトルクを10%間隔で計算し、オシロスコープ上に示されたそれぞれの強度をターゲットとして、最大下収縮を行った。最大下収縮は1強度に関して3秒間、3回ずつ行い、強度の順番はランダムになるように配慮するとともに、各試行間には十分な休息時間を挟んで筋疲労が生じないようにした。トレーニング後には、同様な手順でMVCテストおよび最大下収縮テストを行い、最大下収縮テストの基準となるMVCトルクはトレーニング後の値を用いた。また、トレーニング後のテストではMVCトルクの90%強度の試行も加えて行った。

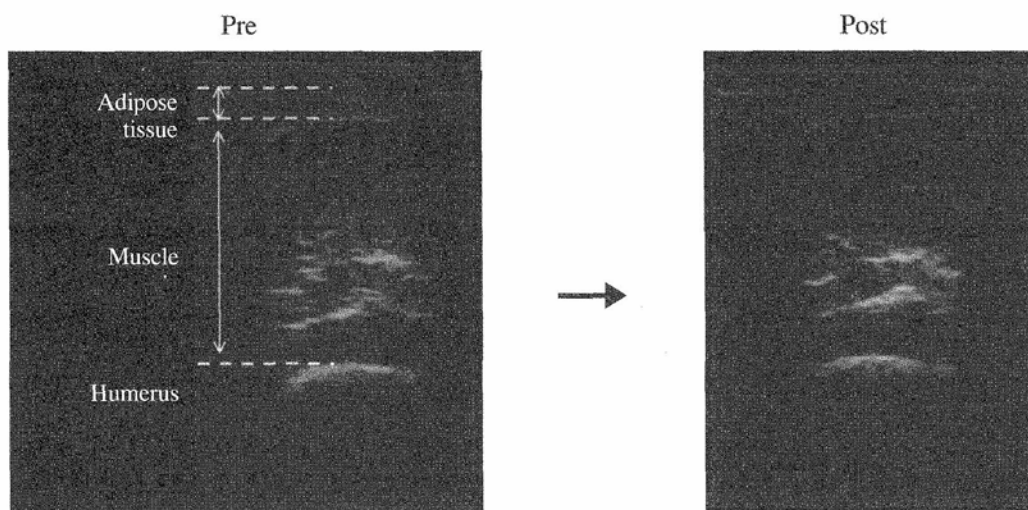


図1 超音波Bモード画像による上腕屈筋群筋厚と皮下脂肪厚の測定（例）

筋力発揮テスト中、上腕二頭筋よりEMG信号およびMMG信号を皮膚表面より導出した。EMGはAg/AgCl電極を用い電極間距離2cmの双極誘導とし、生体信号増幅器(1253A, NECメディカルシステムズ社製)によって時定数0.03秒、高周波遮断周波数1kHzで増幅された。MMGはピエゾ素子のコンタクトセンサー(21050A, ヒューレットパッカー社製)を用い、生体信号増幅器(1253A, NECメディカルシステムズ社製)によって時定数0.1秒、高周波遮断周波数300Hzで増幅された。EMG信号とMMG信号は、肘屈曲トルク信号と共にA/D変換器(Lab-PC+, ナショナルインスツルメンツ社製)によってデジタル信号に変換され、サンプリング周波数500Hzでコンピュータ内に取り込まれ、その後の分析に供された。

1. 4 レジスタンストレーニング

左利きの被検者(1名)のトレーニング前測定値(上腕囲, 上腕前部皮下脂肪厚, 上腕肘屈筋群の筋厚, MVCトルク)の左右差は無視できるほど小さかったため、全被検者について左腕をトレーニング肢, 右腕をコントロール肢とした。被検者は筋力発揮テストと同一の装置, 姿勢で、左腕による等尺性肘屈曲のMVC発揮トレーニングを1週間に3回, 2週間行った。1回のトレーニングは5秒間のMVC発揮を1分間隔で5回行うものであった。トレーニング期間中の総収縮回数は30回であった。

1. 5 データ分析

トレーニング前後の筋力発揮テストで行われた全試行について、安定したトルクが得られた1.5

秒間(MVCは1秒間)に関して、発揮トルク平均値, EMG積分値(iEMG), MMG積分値(iMMG), MMG周波数中央値を算出した。1強度について3試行分の平均値を当該強度の代表値とした。なお発揮トルク平均値, iEMG, およびiMMGは、各被検者のトレーニング前のMVCトルクを基準として相対化し、全被検者の平均値とSEを表した(図2上を除く)。有意差検定には対応のあるt-testを用い、 $p < 0.05$ を有意差とした。

2. 結果

2. 1 形態

トレーニング前後の形態測定の結果を表1に示した。上腕囲, 上腕前部皮下脂肪厚, 上腕肘屈筋群の筋厚すべてにおいて、トレーニング前値の左右肢差, トレーニング前後の有意差は認められなかった。

2. 2 随意最大収縮発揮トルク(図2)

トレーニング前後のMVCトルクはトレーニング肢の方が約3.2Nm強く、左右差は有意であった($p < 0.01$)。トレーニングによってトレーニング肢のMVCトルクは約3.3Nm(11%)増加したが、コントロール肢のMVCトルクは不変であったため、トレーニング後のMVCトルクには左右差が認められなかった。

2. 3 筋電図および筋音図

発揮トルク-iEMG関係は、トレーニング前後とも両腕において直線的な関係であった(図3)。トレーニング肢におけるMVC発揮時のiEMGは、トレーニングによって6.5(SE 10.3)%の増加傾

表1 上腕囲, 上腕前面皮下脂肪厚, 上腕屈筋群筋厚の変化

		Trained Arm		Untrained Arm	
		mean	SD	mean	SD
Upper arm circumference (cm)	pre	26.13	2.83	26.20	2.76
	post	26.22	2.77	26.29	2.69
Adipose tissue thickness (mm)	pre	3.81	2.09	3.56	1.81
	post	3.76	2.05	3.43	1.84
Muscle thickness (mm)	pre	27.32	2.82	28.68	4.39
	post	27.67	2.71	28.63	4.25

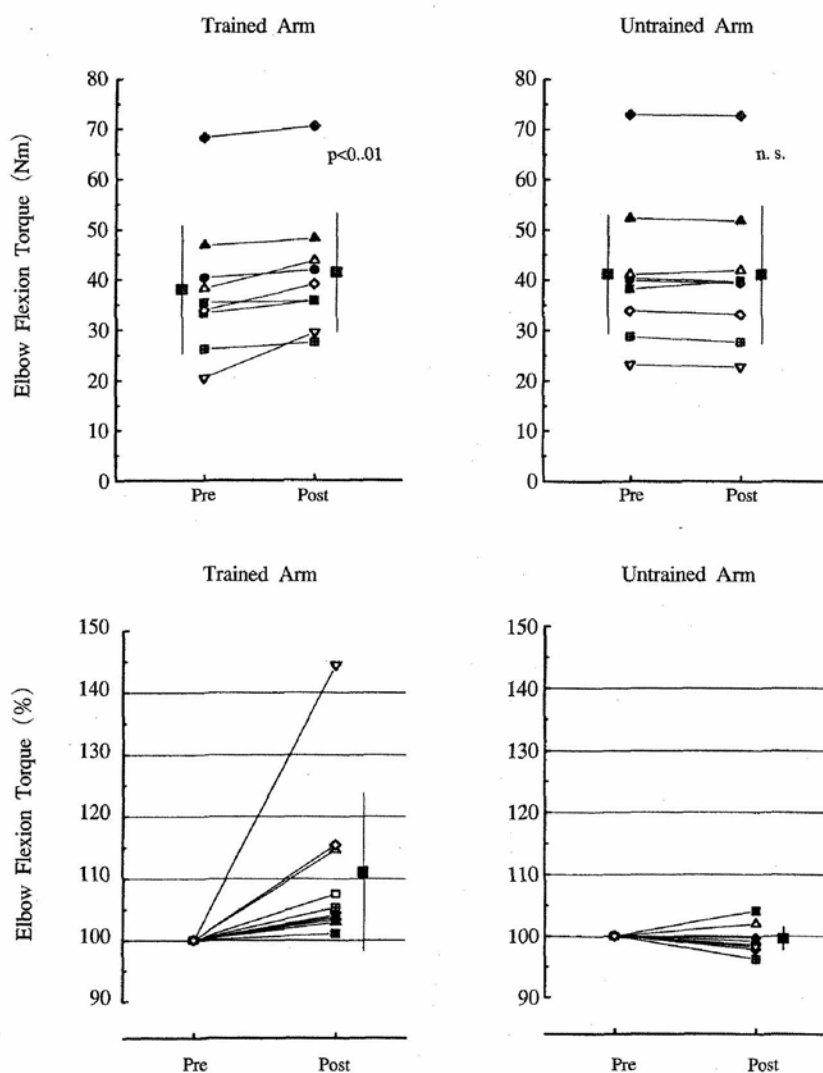


図2 随意最大収縮トルクの変化。個人値および平均値 (SD)。

向が認められたが、トレーニング前との差は統計的に有意ではなかった。発揮トルク-iMMG関係は、トレーニング前後とも両腕において直線的な関係であった(図4)。トレーニング肢におけるMVC発揮時のiMMGは、トレーニングによって32.8(13.5)%増加し、トレーニング前との差は統計的に有意であった($p<0.05$)。MMGの周波数中央値は80%MVCまでは増加し、それより高い強度では低下する傾向にあった(図5)。iMMGの変化率とMVCトルクの変化率(両腕)の間には有意な相関関係が認められ($r=0.719, p<0.001$)、直線回帰の結果、iMMGの増加率1%がMVCトルクの増加率0.228%に相当することが示された(図6)。

3. 考 察

レジスタンストレーニングによるトレーニング肢でのMVCトルクの増加は、1名において約45%もの増加が見られたが、増加率が5%以下であった被検者が4名も含まれ、期待された程のトレーニング効果は得られなかった。肘屈曲運動自体が日常的に含まれる運動であること、被検者が若年であったことなどから、神経要因による変化が小さかったものと考えられる。結果的に平均約11%のMVCトルクの増加がトレーニング肢で認められたが($p<0.05$)、形態的な変化は伴わなかったため、本研究で用いたレジスタンストレーニングでは筋肥大は生じず、トレーニング肢での筋力増加は神経性要因によるものであると判断される。

神経性要因の評価に用いられてきたiEMGの変化がトレーニング肢において認められることが期待されたが、約6.5%の増加は統計的に有意ではなかった。トレーニングによる差が、測定部位や皮膚抵抗等の僅かな差が生む測定値の変動に埋もれてしまったのではないかと推察される。一方、iMMGはトレーニング肢において有意な増加が認められた($p<0.05$)。MMGは筋の機械的活動を反映し、多くの筋においてiMMGと発揮張力は直線関係を示すため^{4,8)}、これが上腕二頭筋においても反映されたようである。筋線維の収縮頻度を反映するとされるMMGの中央周波数はMVCトルクの増加に伴って増加することが期待されたが、実際には80%MVC以上では低下傾向がみられ、

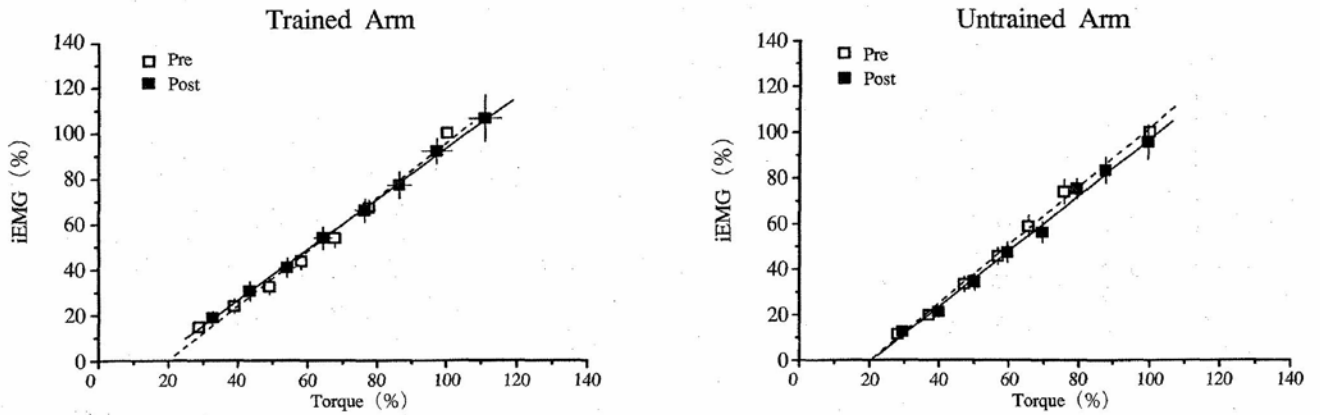


図3 筋電図積分値と発揮トルクの関係

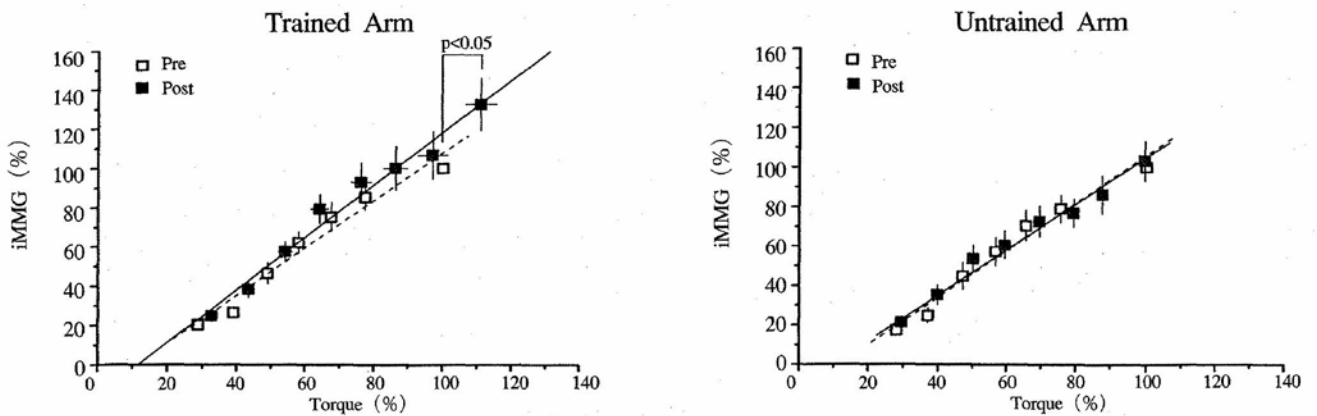


図4 筋音図積分値と発揮トルクの関係

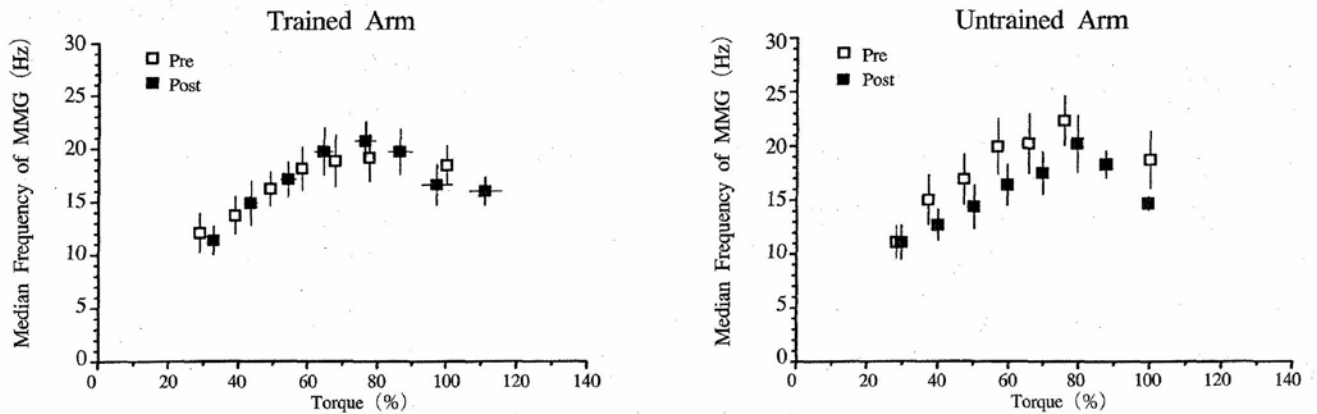


図5 筋音図周波数中央値と発揮トルクの関係

トレーニングによってもその傾向は変わらなかった。筋力発揮レベルが高くなると筋の stiffness が変化するために、それが MMG の周波数成分に影響した可能性が考えられる⁸⁾。したがって、MMG の周波数成分はレジスタンストレーニング効果の分析には用いることが難しいようである。

MVC トルクの増加に対応して増加した iMMG

に着目し、iMMG の増加率と MVC トルクの増加率の関係を検討した結果、iMMG の増加率 1% に対して MVC トルクの増加率が 0.228% であることが示された。MVC トルク増加率のばらつきに対して iMMG のばらつきが大きかったこと、大きい MVC 増加率が得られた被検者が少なかったこと、MVC 増加を伴わずに iMMG が増加した被検者が

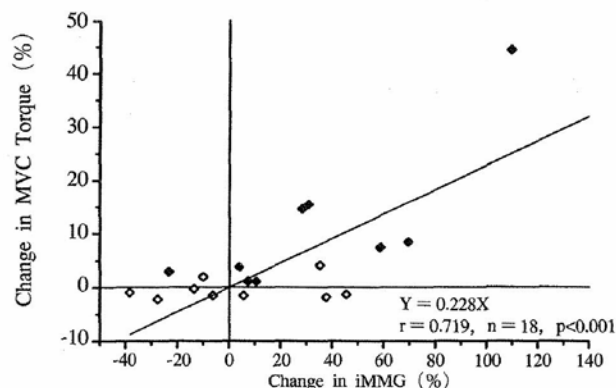


図6 筋音図積分値増加率と随意最大トルク増加率の関係. open symbol はコントロール肢, closed symbol はトレーニング肢を示す. 直線はすべてのデータの回帰直線.

いることなど、今後の研究で解決すべき課題も含まれるが、MVCトルクの増加率が比較的大きかった被検者においてはすべてiMMGが大きく増加していたことから、iMMGの増加率によってレジスタンストレーニングにおける神経性要因の変化を評価できる可能性が高いと考えられる。筋音図法は筋電図法よりも容易であるため、血流制限筋力トレーニング⁷⁾の利用など、より大きな神経性要因の変化を伴うさらなる研究の展開によって、レジスタンストレーニングの効果を筋音図法によって評価する方法が検討され、スポーツの現場で利用されることが期待される。

4. 結 語

2週間の高強度短期レジスタンストレーニングによって得られた随意最大筋力の向上は神経性要因によるものであり、それが筋音図積分値の増加によって評価できることが示唆された。

謝 辞

本研究に対して助成をいただいた(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝申し上げます。また、レジスタンストレーニングの内容に

関して貴重なご意見を下さった東京大学の金久博昭先生に感謝いたします。さらに、被検者参加やデータ分析実施等においてご協力いただいた東京大学身体運動科学研究室の方々、国立健康・栄養研究所の豊岡史さん、(株)カワイ楽器製作所の渡辺奈美枝さんに深く感謝いたします。

文 献

- 1) Ikai M., Fukunaga T.; A study on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurements, *Int. Z. Angew. Physiol.*, 28, 173-180 (1970)
- 2) Moritani T., deVries H.A.; Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain, *Am. J. Phys. Med.*, 58, 115-130 (1979)
- 3) Moritani T., deVries H.A.; Potential for gross muscle hypertrophy in older men, *J. Gerontol.*, 35, 672-682 (1980)
- 4) Orizio C.; Muscle sound: Bases for the introduction of a mechanomyographic signal in muscle studies, *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 21, 201-243 (1993)
- 5) Orizio C., Solomonow M., Baratta R., Veicsteinas A.; Influence of motor unit recruitment and firing rate on the soundmyogram and EMG characteristics in cat gastrocnemius, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 2, 232-241 (1993)
- 6) Shinohara M., Kouzaki M., Yoshihisa T., Fukunaga T.; Mechanomyography of the human quadriceps muscle during incremental cycle ergometry, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 76, 314-319 (1997)
- 7) Shinohara M., Kouzaki M., Yoshihisa T., Fukunaga T.; Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 77, 189-191 (1998)
- 8) Shinohara M., Kouzaki M., Yoshihisa T., Fukunaga T.; Mechanomyogram from the different heads of the quadriceps muscle during incremental knee extension, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 78, 289-295 (1998)