

筋力トレーニングによる中高年女性の筋力増加とその要因としての 筋の動員と筋肥大の経時的変化

衣 笠 竜 太¹⁾ 川 島 紫 乃²⁾ 増 田 和 実³⁾
鯨 坂 隆 一⁴⁾ 松 田 光 生⁴⁾ 久 野 譜 也^{2,4)}

THE TIME COURSE OF STRENGTH GAIN DUE TO MUSCLE RECRUITMENT AND HYPERTROPHIC FACTORS IN MIDDLE-AGED AND ELDERLY WOMEN

RYUTA KINUGASA, SHINO KAWASHIMA, KAZUMI MASUDA, RYUICHI AJISAKA,
MITSUO MATSUDA and SHINYA KUNO

Abstract

It has been documented that the adaptive response in muscle force production capabilities is determined by neural activation (recruitment and discharge frequency of motor units) and morphological alternation (hypertrophy). To date, however, accumulation of this information with respect to middle-aged and elderly women has been limited. Thus, the purpose of this study was to investigate the physiological mechanisms underlying the time course change in muscle strength gain with respect to the relative contributions of both neural, especially muscle recruitment, and muscle hypertrophic factors in middle-aged and elderly women using magnetic resonance imaging (MRI) and its transverse relaxation time (T2) variable. Eight middle-aged and elderly women (range : 59-70 years old) and six young women (range : 22-29 years old) performed isokinetic knee and hip extension/flexion training twice a week for 8 weeks at an angular velocity of 60°/sec (5 repetitions/set : 2 sets/day), 240°/sec (10 repetitions/set : 2 sets/day) and 120°/sec (5 repetitions/set : 2 sets/day) using isokinetic dynamometer. The maximum voluntary strength was determined as the one repetition maximum for isotonic knee extension exercise. MRI was used to determine the muscle volume of quadriceps femoris (QF) muscles. As an index of muscle recruitment, relative activated cross-sectional area (%-actCSA) of the QF muscles, which represented an area greater than the resting T2 + 1 SD in MRI pixels, was calculated at rest and immediately after knee extension exercise based on T2-weighted MR images. The isotonic strength, muscle volume, and %-actCSA of QF muscles were measured before and after 2, 4, 6, and 8 weeks of resistance training. Multiple regression analysis was performed to determine which factors (recruitment or hypertrophy) contributed to strength gain at the measured each period. As a result, the muscle recruitment factor played a major role in strength gain in the early phase of resistance training in both groups and then the muscle hypertrophic factor gradually dominated over the muscle recruitment factor in the contribution to the strength gain in both groups. In middle-aged and elderly women, however, the time course of muscle hypertrophic factor domination over the muscle recruitment factor was more delayed than that in young women. These results suggest that a longer period of resistance training allowed the muscle to hypertrophy in middle-aged and elderly women, thus physiological determinants (muscle recruitment / hypertrophic factor) that have been altered by aging affect the course of resistance training.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2003, 52 Suppl : 105~118)

key word : resistance training, T2, muscle volume, MRI, skeletal muscle

¹⁾ 日本体育大学

〒158-8508 東京都世田谷区深沢7-1-1

²⁾ 筑波大学先端学際領域研究センター

〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1

³⁾ 金沢大学教育学部

〒920-1192 石川県金沢市角間町

⁴⁾ 筑波大学体育科学系

〒305-8575 茨城県つくば市天王台1-1-1

Nippon Sport Science University, 7-1-1 Fukasawa, Setagaya, Tokyo 158-8508, Japan

Center for Tsukuba Advanced Research Alliance, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba city, Ibaraki 305-8577, Japan

Faculty of Education, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa city, Ishikawa, 920-1192, Japan

Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba city, Ibaraki 305-8574, Japan

I. 緒 言

加齢にともない筋力が低下することはよく知られた事実である^{3,27)}。中高年者の筋力低下は、転倒²⁶⁾や骨折⁵⁾などの危険性を高め、特に中高年女性は男性と比較して骨折を起こす割合が高いことが示されている(埼玉県小鹿野町保健センターと埼玉県立大学保健医療福祉学部調べ)。これらは寝たきりにつながる可能性があることから、中高年者、とりわけ中高年女性に対する筋力低下の防止法を策定することは、意義のある課題である。

筋力トレーニング(以下:W-Tr とする)は、中高年者の筋力を増加させることから^{14,16,36)}、中高年者における筋力低下の予防のための有効手段として考えられている。W-Tr による筋力増加は、運動単位の動員数の増加やインパルスの発火頻度の増加などを含めた神経-筋の機能的変化と筋線維の肥大を含む筋の形態変化の2つの主要因(以下:神経的要因と筋肥大とする)に依存している^{9,17,28)}。これまで中高年者を対象として、W-Tr による筋力増加とその要因としての神経的要因と筋肥大の貢献度について検討した研究は、Moritani & deVries²⁹⁾の男性のみの報告にとどまっている。Moritani & deVries²⁹⁾は、高年男性に上肢のW-Trを8週間実施し、筋電図積分値(integrated electromyogram:iEMG)と皮脂厚から推定した筋断面積(cross-sectional area:CSA)を用いて筋力増加をもたらす要因を経時的に検討した。その結果、高年男性の筋力増加には、W-Tr を通じて神経的要因の貢献度が高いのに対して、筋肥大の貢献度は低いことを明らかにした。

W-Tr にともなう中高年者の神経的要因と筋肥大の変化を各々に検討した研究は多い。Knight & Kamen²⁰⁾は、高年者と若年者に対して下肢のW-Trを6週間実施し、表面筋電図を用いて最大随意筋力発揮時の膝伸筋群の筋活動レベルの変化を検討した。その結果、W-Tr による筋活動レベルの変化率は両者で変わらないことを明らかにした。一方、W-Tr による筋形態の変化に関しては、多くの先行研究がW-Tr による中高年者の筋肥

大を認めている。例えば、Kraemer たち²¹⁾は10週間の上下肢のW-Trを実施し、磁気共鳴画像法(magnetic resonance imaging:MRI)を用いて大腿中央部のCSAの変化を検討した。その結果、CSAの変化率は、高年者の方が若年者よりも小さいものの、高年者でも筋の肥大が生じていることを明らかにした。またW-Trによる高年者の筋肥大は男性だけでなく、女性においても生じることが報告されている^{11,19,33,40)}。このことより、W-Trによる高年者の筋力増加に貢献する要因には、少なくとも神経的要因だけでなく、筋肥大も関与していることが予想され、このことは、Moritani & deVries²⁹⁾の研究結果と矛盾する。しかしながら、中高年女性に関する筋力増加の経時的变化とそれを支える神経的要因と筋肥大の2大要因との関連性について十分な知見がない。中高年女性の筋力増加をもたらす要因の経時的变化を明らかにすることは、筋力増加の要因の改善を目的としたW-Trプログラムを至適時期に提供することが可能となり、引いては中高年者に対して効果的に筋力を増加させたり、加齢にともなう筋力低下の抑制策につながると考えられる。

MRIは解剖学的な情報^{6,12)}や代謝的な情報^{23~25)}の他、横緩和時間(transverse relaxation time:T2)を加えることによって、筋の機能的な情報を得ることが可能である。運動後に得られたMRIのT2値は、iEMG¹⁾、電気刺激誘発性の等尺性筋力²⁾、あるいは運動強度¹⁰⁾との間に密接な関連性が認められている。大腿四頭筋や上腕二頭筋などの大きな筋群においては、神経的要因の中の運動単位の動員がインパルスの発火頻度よりも筋力発揮に関与していることが示されている^{7,22)}。このことから、大筋群に対してT2値を用いることで、筋力発揮時の筋の動員様相を評価でき^{1,2,4,10,31)}、W-Trによる筋力増加をもたらす神経的要因の中の動員に関する情報を観察可能と思われる。MRIは、表面筋電図法や単収縮挿入法では測定不可能な筋の深層部の情報や3次元的情報も得られることから、筋全体の動員様相や筋形態に関する情報を取得可能としているところが大きな特徴である。したがって、筋の動員の指

標としての MRI の T2 値と筋形態の指標として筋容積(muscle volume: MV)に着目することで, W-Tr による筋力増加をもたらす要因に関する新しい知見が得られると思われる。

そこで本研究では, MRI の画像情報に T2 値を加味することによって, 中高年女性を対象とした W-Tr 中の筋力増加とその要因としての筋の動員と筋肥大との相対的貢献度を経時的に明らかにすることを目的とした。

II. 方 法

A. 被検者

被検者には, 健康な中高年女性 8 名(年齢: 61 歳~69 歳)と若年女性 6 名(年齢: 22 歳~29 歳)を対象にした。被検者の身体特性は, 以下の通りである: 中高年群(年齢: 64.3 ± 3.4 歳, 身長: 151.0 ± 4.1 cm, 体重: 54.0 ± 5.2 kg), 若年群(年齢: 26.2 ± 3.0 歳, 身長: 162.4 ± 5.4 cm, 体重: 53.4 ± 6.8 kg)。実験に先立ち, 実験の主旨, 内容および危険性について被検者へ説明し, 実験参加の同意書を得た。また本研究は, 東京大学大学院総合文化研究科倫理審査委員会の承認を受けて実施した。

B. 筋力トレーニングプロトコール

W-Tr は, 等速性筋力測定器(Biodex; Biodex Medical System, USA)を用いて, 右脚のみの等速性膝関節伸展・屈曲動作($60^\circ/\text{sec}$: 5 回×2 セット, $240^\circ/\text{sec}$: 10 回×2 セット)と等速性股関節伸展・屈曲動作($120^\circ/\text{sec}$: 5 回×2 セット)を行った。セット間休息は 30 秒間とした。W-Tr の期間は 8 週間とし, 週に 2 回の頻度で W-Tr を実施した。

C. 測定項目および測定方法

1. 等張性膝伸展力

等張性膝伸展力は右脚での膝伸展動作による最大挙上重量とした。等張性膝伸展力の測定には, 等張性筋力測定器(FL-100 Leg Extension; Paramount, USA)を用いた。被検者は測定器の椅子に座り, 背もたれと足関節のパッドの位置を調節

した。測定の前には, 準備運動として最大挙上重量の約 30% の負荷で 5~10 回の膝伸展動作を行った。最大重量を等張性膝伸展力の判定は, 膝関節を完全に伸展した状態を 0° として, 膝関節を 0° から 10° の範囲で 2 秒間保持できた場合とした。

等張性膝伸展力の再現性を検討するため, 本実験と同様な条件で, 4 名の右脚の等張性膝伸展力を異なる日に測定したところ, 1 回目の値(F_0)と 2 回目の値(F_1)との間には有意な相関関係($r=0.96$, $p<0.05$)が認められ, 1 回目の値と 2 回目の値との誤差率 $[(F_1-F_0)/F_0 \cdot 100]$ は 9.0% であった。この場合, 1 回目と 2 回目の平均値との間には有意差は認められなかった。

2. 筋断面積および筋容積

CSA の測定には, 永久磁石型 MR 装置(AIRIS mate; Hitachi Medical, Japan)を用いた。被検者は MR 室内のベッドに仰臥位となり, 膝関節をベッドと水平になるよう伸展させ, 脚が動かないように専用ベルトで固定した。撮影部位は右脚の大腿中央部とし, プラスチック製の定規を用いて大転子と外側顆間結節間との距離から大腿中央部を同定した。MR の撮影は, 大腿中央部より近位および遠位方向にそれぞれスライス厚 10 mm, スライス間隔 30 mm の設定で行い, 計 5 枚の横断像を得た。得られた横断像はフィルムに現像し, 大腿部を構成する全ての筋の CSA をブラインド法でトレースした。トレースした画像は, スキャナを用いてパーソナルコンピュータ(Power Macintosh G4; Apple, Japan)に取り込み, 画像処理ソフトウェア(NIH image ver. 1.62; National Institutes of Health, USA)により CSA を算出した。MV は 5 箇所の CSA にスライス厚およびスライス間隔を用いて, 以下の式より算出した。

$$MV = 30 \cdot \sum_{k=1}^n CSA_k$$

[CSA; k 番目の CSA, n; 1 から 5 まで]

5 箇所の CSA より算出した MV の妥当性テストを行うため, 大腿部全体の MV との関係について検討したところ($n=6$), 両者の間に有意な相関関係($r=0.92$, $p<0.01$)が認められた。以上

のことより, 5箇所 の CSA より算出した MV は, 大腿部全体の MV を反映しているものと判断した。

また, CSA と MV の再現性を検討するため, 本実験と同様な条件で, 8名の CSA と MV を異なる日に測定したところ, 1回目の値と2回目の値との間には有意な相関関係(CSA : $r=0.95$, $p<0.01$, MV : $r=0.97$, $p<0.01$)が認められ, 1回目の値と2回目の値との誤差率は, CSA で 1.9%, MV で 1.0%であった。この場合, CSA と MV のいずれについても, 1回目と2回目の平均値との間には有意差は認められなかった。

3. T2 値および % activated CSA

T2 値の測定には, CSA の測定と同じ MR 装置を用いた。MR 画像は右脚の大腿中央部を起点として, 大腿中央部より近位および遠位方向に計 5 枚の横断像を得た(SE 法, TR 1500 ms, TE 30/60 ms, FOV 320 mm, スライス厚 10 mm, スライス間隔 30 mm, matrix 256×180, NSA 2 回, 撮像時間 5 : 18)。MR の撮影は, 椅子座位による 10 分間の安静の後と膝伸展動作の直後に行った。膝伸展動作は, 上記の等張性筋力測定器を用いて, 最大挙上重量の 30% の負荷で 10 回を 4 セット(セット間休息 60 秒)行った。なお, 膝伸展動作の反復回数と休息時間は, T2 値を用いた先行研究⁴⁾に基づいた。膝伸展動作の負荷は 2 週間毎に測定した最大挙上重量に基づいて相対的に同一とした。

MR 画像のデータは, 上記のパーソナルコンピュータに転送した。T2 値は, NIH image を用いて大腿四頭筋全体に含まれる全ての画素の平均値から算出した。なお T2 値の分析は, 脂肪, 血管あるいは腱を含まないように行った。さらに本研究では, Adams たち²⁾と同様の方法を用いて, 安静時の平均 T2+1SD より高値を示した画素を運動により動員された部分とみなし, 運動により動員された相対面積(% activated CSA : %actCSA)を筋の動員の指標とした。この %actCSA は, T2 値よりも運動時の筋の動員様相をより反映した指標であることが認められている³¹⁾。なお, %actCSA は得られた 5 枚全ての横断像の平均値

とした。

T2 値と %actCSA の再現性について検討するため, 本実験と同様な条件で, 11名の T2 値と %actCSA を異なる日に測定した結果, 1回目の値と2回目の値との間には有意な相関関係(T2 値 : $r=0.85$, $p<0.01$, %actCSA : $r=0.90$, $p<0.01$)が認められ, 1回目の値と2回目の値との誤差率は T2 値で 1.6%, %actCSA で 0.3%であった。この場合, T2 値と %actCSA のいずれについても, 1回目と2回目の平均値との間には有意差は認められなかった。

4. % activated MV, 筋容積当たりの筋力, % activated MV 当たりの筋力

等張性膝伸展力, MV, および %actCSA の値から, MV と %actCSA との積である % activated MV(%actMV), 等張性膝伸展力を MV で除した MV 当たりの筋力, および MV と %actCSA との積に対する等張性膝伸展筋力の比(%actMV 当たりの筋力)をそれぞれ算出した。

D. 統計処理

統計量は全て平均値±標準誤差で示した。両群における各測定値の時期毎の比較には, 反復測定による一元配置の分散分析を行い, 分散に有意差が認められた場合には, post-hoc test として Student Newman keuls の有意差検定を行った。また, 群間の比較には, unpaired Student t-test を行った。さらに各測定値の初期値と変化率との関係には, Pearson の相関係数を算出した。有意水準は 5 %未満とした。

筋力増加の要因としての筋の動員と筋肥大との相対的貢献度を算出するため, W-Tr 前の値を基準化した等張性膝伸展力の変化率と, 大腿四頭筋の %actCSA および MV の変化率との単相関係数をそれぞれ求めた。また, 等張性膝伸展力の変化率を従属変数, %actCSA と MV の変化率を独立変数として重回帰分析を行い, 各説明変数の標準回帰係数を求めた。さらに, 各説明変数における単相関係数に標準回帰係数を乗じ, これに 100 を乗じたものを筋力増加の貢献度とした。

Ⅲ. 結 果

A. 等張性膝伸展力

Figure 1(A)には、W-Tr 前の値を基準化した場合の等張性膝伸展力の変化率を示した。中高年群における等張性膝伸展力の変化率は、W-Tr 前と比較して、W-Tr 開始後 4 週目に9.4%の有意な増加が認められた($p < 0.01$)。また6週目の等張性膝伸展力の変化率は、4週目のものと比べて有意な高値を示したものの($p < 0.05$)、6週目と8週目の等張性膝伸展力の変化率との間には有意差は認められなかった。一方、若年群における等張性膝伸展力の変化率は、W-Tr 前と比較して、4週目に8.3%の有意な増加が認められ($p < 0.05$)、6週目の等張性膝伸展力の変化率は、4週目のものと比べて有意な高値を示した($p < 0.05$)。等張性膝伸展力の変化率は、全ての週において、両群間に有意差を認めなかった。

Table 1 には、W-Tr にともなう等張性膝伸展力の実測値の変化を示した。中高年群の等張性膝伸展力は、全ての週において、若年群のものよりも有意な低値を示した($p < 0.01 \sim 0.05$)。中高年

群における W-Tr 前の等張性膝伸展力の初期値と8週目の等張性膝伸展力の変化率との間には有意な負の相関関係($r = -0.75$, $p < 0.05$)が認められた。一方、若年群における W-Tr 前の等張性膝伸展力の初期値と全ての週の等張性膝伸展力の変化率との間には有意な相関関係は認められなかった。

B. 大腿四頭筋の筋容積

Figure 1(B)には、大腿四頭筋の MV の変化率を示した。中高年群における MV の変化率は、W-Tr 前と比較して、W-Tr 開始後6週目まで変化を示さなかったが、8週目には3.1%の有意な増加を示した($p < 0.01$)。さらに、8週目の MV の変化率は、6週目のものと比較して有意な高値を示した($p < 0.01$)。一方、若年群における MV の変化率は、W-Tr 前と比較して、6週目に4.7%の有意な増加を示し($p < 0.01$)、8週目の MV の変化率は、6週目のものと比べて有意な高値を示した($p < 0.01$)。MV の変化率は、4週目まで両群間に有意差を認めなかったが、6週目と8週目において、中高年群の変化率は若年群のも

Table 1. Absolute value of the isotonic strength, muscle volume, %-actCSA, %-actMV and strength to muscle volume ratio, strength to %-actMV ratio of quadriceps femoris muscles during 8 weeks resistance training.

| | 0 wk | | 2 wk | | 4 wk | | 6 wk | | 8 wk | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | elderly | young | elderly | young | elderly | young | elderly | young | elderly | young |
| Isotonic strength (ft-lbs) | 44.1 * | 67.1 | 45.6 ** | 70.0 | 48.1 * | 72.1 | 50.6 * | 77.1 | 51.6 ** | 79.2 |
| | 4.1 | 7.4 | 12.1 | 15.2 | 12.7 | 17.5 | 11.8 | 21.0 | 11.3 | 18.3 |
| Muscle volume (cm ³) | 761.4 * | 938.2 | 762.7 * | 943.4 | 760.8 * | 948.3 | 768.9 * | 982.2 | 784.3 * | 1005.6 |
| | 135.1 | 137.8 | 135.1 | 139.1 | 135.1 | 137.0 | 130.5 | 145.6 | 134.5 | 143.0 |
| %-actCSA (%) | 60.1 | 54.6 | 61.7 * | 55.4 | 64.5 * | 57.1 | 66.5 ** | 55.2 | 67.6 ** | 53.5 |
| | 5.7 | 3.4 | 6.2 | 3.5 | 5.2 | 3.6 | 5.7 | 3.6 | 5.3 | 4.2 |
| %-actMV (cm ³) | 45642.6 | 51141.0 | 46764.2 | 52128.6 | 48847.0 | 54110.7 | 50934.0 | 54309.0 | 52943.0 | 53670.5 |
| | 8570.4 | 7778.7 | 7897.8 | 7514.4 | 8220.3 | 8018.4 | 8424.5 | 9315.8 | 9894.6 | 7574.0 |
| Isotonic strength / MV (ft-lbs / cm ³) | 5.8 | 7.1 | 6.0 * | 7.4 | 6.3 | 7.5 | 6.6 | 7.7 | 6.6 * | 7.8 |
| | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 0.7 | 1.2 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.0 | 0.9 |
| Isotonic strength / %-actMV (ft-lbs / cm ³) | 9.7 * | 13.0 | 9.7 ** | 13.4 | 9.8 * | 13.3 | 10.0 ** | 14.1 | 9.8 ** | 14.7 |
| | 0.8 | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 1.0 | 0.7 | 1.0 |

Values are means and SE. elderly (middle-aged and elderly): $n=8$, young: $n=6$. %-actCSA: percent activated cross-sectional area, %-actMV: percent activated muscle volume (multiplied the muscle volume by the %-actCSA). Asterisks represent differences from the value of the young (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$).

のよりも有意に低値であった($p < 0.01$).

Table 1 には, W-Tr にともなう大腿四頭筋の MV の実測値の変化を示した. 中高年群の MV は, 全ての週において, 若年群のものよりも有意な低値を示した($p < 0.05$). W-Tr 前の MV の初期値と全ての週の MV の変化率との間には, 両群ともに有意な相関関係は認められなかった.

C. 大腿四頭筋の % activated CSA

Figure 2 には, 中高年群における同一被検者の安静時と膝伸展動作後に撮影した大腿中央部の MR 画像を画像処理(二値化)したものを示した. 膝伸展動作後の MR 画像では, 大腿四頭筋の周辺が白くなり, 特に大腿直筋の白色化が観察された.

Figure 1(C)には, 大腿四頭筋の %-actCSA の

変化率を示した. 中高年群の %-actCSA の変化率は, W-Tr 前と比較して, W-Tr 開始後4週目に7.5%の有意な増加を示し, その後は有意な変化を認めなかった. 一方, 若年群における %-actCSA の変化率は, W-Tr 前と比較して, 4週目に4.7%の有意な増加を示したものの, 8週目の %-actCSA の変化率は, 4週目のものと比べて有意な低値を示した($p < 0.01$). %-actCSA の変化率は, 4週目まで両群間に有意差を認めなかったが, 6週目と8週目において, 中高年群の変化率は若年群のものよりも有意に高値であった($p < 0.01$).

Table 1 には, W-Tr にともなう大腿四頭筋の %-actCSA の実測値の変化を示した. 中高年群の %-actCSA は, 2週目以降において, 若年群のものよりも有意な高値を示した($p < 0.01 \sim 0.05$).

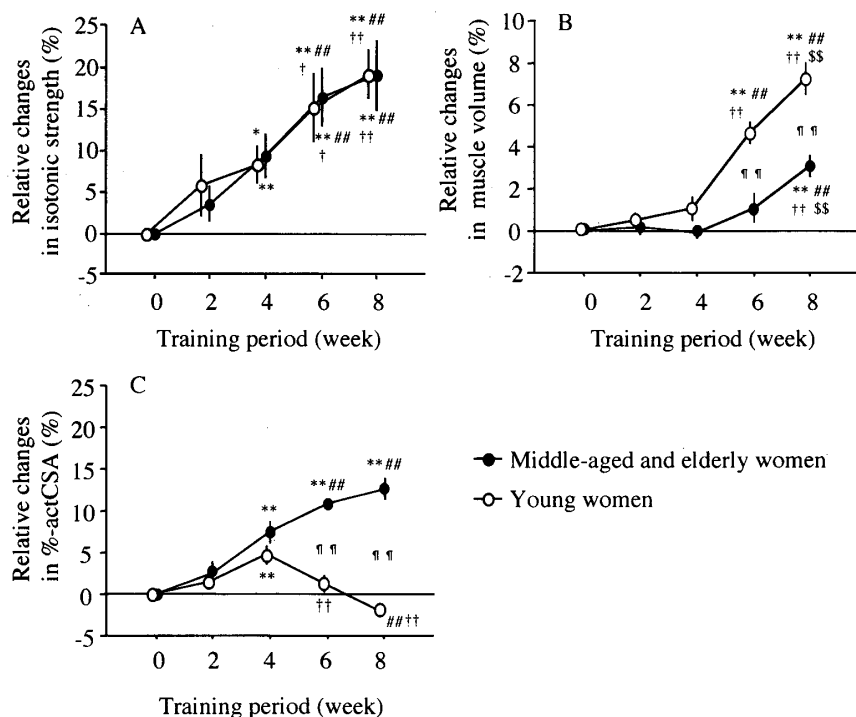


Figure 1. The time course of relative changes in the isotonic strength (A), muscle volume (B), and percent activated cross-sectional area (%-actCSA) of quadriceps femoris muscles (C) in the middle-aged and elderly women (●) and young women (○) during 8 weeks resistance training. The relative value was expressed as percent change with respects to the initial value. *, **: Significantly different from 0 week ($p < 0.05$, $p < 0.01$, respectively). ##: Significantly different from 2 week ($p < 0.01$). †, ††: Significantly different from 4 week ($p < 0.05$, $p < 0.01$, respectively). \$\$\$: Significantly different from 6 week ($p < 0.01$). ¶¶: Significantly different between middle-aged and elderly women and young women ($p < 0.01$). Values are means \pm SE.

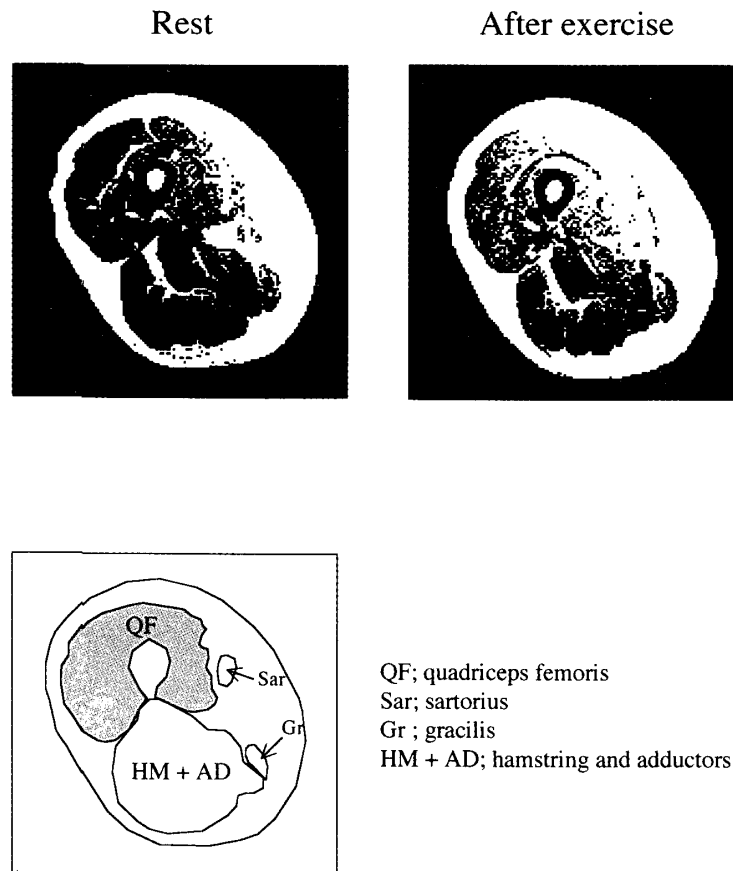


Figure 2. Representative examples of thresholded magnetic resonance images from one middle-aged and elderly women at rest and after knee extension exercise with four sets of 10 repetitions at a load equal to 30% of their one repetitions maximum. In quadriceps femoris muscles, white portion after exercise image is considered to be activated due to muscle contraction.

W-Tr 前の %actCSA の初期値と全ての週の %actCSA の変化率との間には、両群ともに有意な相関関係は認められなかった。

D. 筋力増加に対する筋の動員と筋肥大との相対的貢献度

Figure 3 には、筋力増加の要因としての筋の動員と筋肥大との相対的貢献度の変化を示した。中高年群の筋力増加に対する筋の動員の貢献度は、W-Tr 開始後 2 週目、4 週目および 6 週目にはそれぞれ 72.9, 64.0 および 61.2% であり、いずれも筋肥大の貢献度よりも高値であった。しかしながら、8 週目には、筋の動員の貢献度は 3.2% に留まり、筋肥大の貢献 (33.3%) が筋の動員のものよりも高値を示した。一方、若年群の 2 週目と 4 週目における筋の動員の貢献度は筋肥大のものより

も大きく、それぞれ 73.7 と 50.9% であった。6 週目と 8 週目における筋の動員の貢献度はそれぞれ 8.4% と 7.1% であったのに対して、筋肥大の貢献度はそれぞれ 32.0 と 47.1% であり、筋肥大の方が筋の動員の貢献度よりも高値を示した。

E. 大腿四頭筋の % activated MV

Figure 4 には、大腿四頭筋の %actMV の変化率を示した。中高年群における %actMV の変化率は、W-Tr 前と比較して、W-Tr 開始後 4 週目に 7.4% の有意な増加が認められた ($p < 0.01$)。また 6 週目の %actMV の変化率は、4 週目のものと比べて有意な高値を示し ($p < 0.01$)、さらに 8 週目の %actMV の変化率は、6 週目のものと比較して有意に高値であった ($p < 0.05$)。一方、若年群における %actMV の変化率は、W-Tr 前と

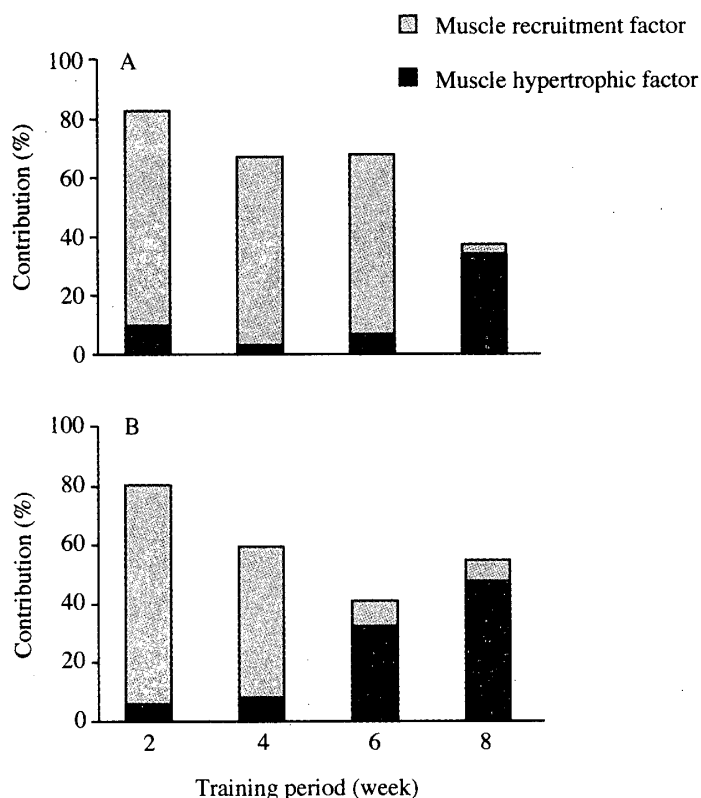


Figure 3. The time course of strength gain show the relative contributions of muscle recruitment (gray) and muscle hypertrophic factors (black) in the middle-aged and elderly women (A) and young women (B) during 8 weeks resistance training.

比較して, 4週目に5.9%の有意な増加を示し($p < 0.01$), その後は有意な変化を認めなかった. %actMV の変化率は, 4週目まで両群間に有意差を認めなかったが, 6週目と8週目において, 中高年群の変化率は若年群のものよりも有意に高値であった(6週目: $p < 0.05$, 8週目: $p < 0.01$).

Table 1 には, W-Tr にともなう %actMV の実測値の変化を示した. %actMV は, 全ての週において, 両群間に有意差を認めなかった. W-Tr 前の %actMV の初期値と全ての週の %actMV の変化率との間には, 両群ともに有意な相関関係は認められなかった.

F. 筋容積当たりの筋力

Figure 5 には, 膝伸展における MV 当たりの筋力の変化率を示した. 中高年群における MV 当たりの筋力の変化率は, W-Tr 前と比較して, W-Tr 開始後4週目に9.5%($p < 0.01$), 8週目に

15.5%($p < 0.01$)の有意な増加を示した. 一方, 若年群における MV 当たりの筋力の変化率は, W-Tr 前と比較して, 4週目以降に7.1%以上の有意な増加を示した($p < 0.05$). MV 当たりの筋力の変化率は, 全ての週において, 両群間に有意差を認めなかった.

Table 1 には, W-Tr にともなう MV 当たりの筋力の実測値の変化を示した. 中高年群の MV 当たりの筋力は, 2週目と8週目において, 若年群のものよりも有意な低値を示した($p < 0.05$). W-Tr 前の MV 当たりの筋力の初期値と全ての週の MV 当たりの筋力の変化率との間には, 両群ともに有意な相関関係は認められなかった.

G. % activated MV 当たりの筋力

Figure 6 には, %actMV 当たりの筋力の変化率を示した. 中高年群における %actMV 当たりの筋力の変化率は, 全ての週において, 有意な変化を示さなかった. 一方, 若年群における %

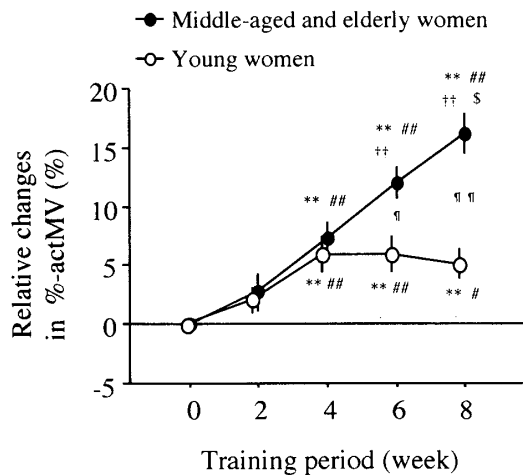


Figure 4. The time course of relative changes in the percent activated muscle volume (multiplied the muscle volume by the %-actCSA) of quadriceps femoris muscles in the middle-aged and elderly women (●) and young women (○) during 8 weeks resistance training. The relative value was expressed as percent change with respects to the initial value. *: Significantly different from 0 week ($p < 0.05$). **: Significantly different from 0 week ($p < 0.01$). #: Significantly different from 2 week ($p < 0.05$). ##: Significantly different from 2 week ($p < 0.01$, respectively). †: Significantly different from 4 week ($p < 0.05$). ††: Significantly different from 4 week ($p < 0.01$). §: Significantly different from 6 week ($p < 0.05$). ¶, ¶¶: Significantly different between middle-aged and elderly women and young women ($p < 0.05$, $p < 0.01$, respectively). Values are means \pm SE.

actMV 当たりの筋力の変化率は、W-Tr 前と比較して、6 週目以降に 8.8% 以上の有意な増加を示した ($p < 0.01$)。中高年群の %-actMV 当たりの筋力の変化率は、8 週目において、若年群のものよりも有意に低値であった ($p < 0.05$)。

Table 1 には、W-Tr にともなう %-actMV 当たりの筋力の実測値の変化を示した。中高年群の %-actMV 当たりの筋力は、全ての週において、若年群のものよりも有意な低値を示した ($p < 0.01 \sim 0.05$)。W-Tr 前の %-actMV 当たりの筋力の初期値と全ての週の %-actMV 当たりの筋力の変化率との間には、両群ともに有意な相関関係は認められなかった。

Ⅳ. 考 察

本研究では、W-Tr による中高年女性の筋力増加とその説明要因としての筋の動員と筋肥大との

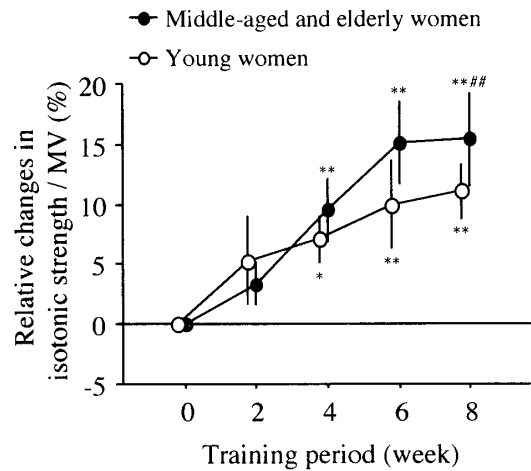


Figure 5. The time course of relative changes in the ratio of isotonic strength to muscle volume (MV) of quadriceps femoris muscles in the middle-aged and elderly women (●) and young women (○) during 8 weeks resistance training. The relative value was expressed as percent change with respects to the initial value. *: Significantly different from 0 week ($p < 0.05$). **: Significantly different from 0 week ($p < 0.01$, respectively). #: Significantly different from 2 week ($p < 0.05$). ##: Significantly different from 2 week ($p < 0.01$). Values are means \pm SE.

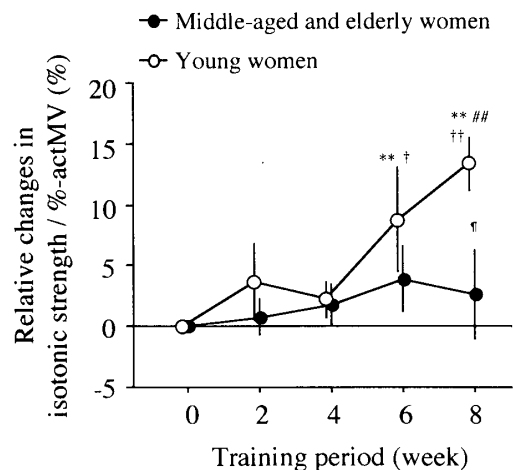


Figure 6. The time course of relative changes in the ratio of isotonic strength to the percent activated muscle volume (%-actMV) of quadriceps femoris muscles in the middle-aged and elderly women (●) and young women (○) during 8 weeks resistance training. The relative value was expressed as percent change with respects to the initial value. *: Significantly different from 0 week ($p < 0.05$). **: Significantly different from 0 week ($p < 0.01$). #: Significantly different from 2 week ($p < 0.05$). ##: Significantly different from 2 week ($p < 0.01$, respectively). †, ††: Significantly different from 4 week ($p < 0.05$, $p < 0.01$, respectively). ¶: Significantly different between middle-aged and elderly women and young women ($p < 0.05$). Values are means \pm SE.

相対的貢献度を経時的に明らかにすることを目的とした。その結果, W-Tr による筋力増加の割合は中高年女性と若年女性ともに同程度であり, W-Tr 中の筋力増加をもたらす要因は, 年齢に関わらず筋の動員から筋肥大に移行するものの, 筋力増加に対する筋肥大の貢献度が筋の動員のものよりも高くなる時期は, 中高年女性の方が若年女性よりも遅く, 筋力増加をもたらす2要因の経時的变化に年齢間の相違が認められた。

8週間の下肢の W-Tr を実施した本研究の結果, 中高年女性と若年女性ともに, W-Tr 初期の筋力増加には, 筋の動員の貢献度が筋肥大のものよりも高かったが, W-Tr 後期の筋力増加には, 筋の動員よりも筋肥大の貢献度の方が高く, 筋力増加の要因が年齢に関わらず W-Tr 中に筋の動員から筋肥大に移行することを示した。Moritani & deVries²⁹⁾ は, W-Tr にともなう若年男性の筋力増加をもたらす要因として, W-Tr 初期には神経的要因の貢献度が高く, その後筋肥大の貢献度が神経的要因のものよりも高くなるものの, 高年男性における筋力増加の要因には, 8週間の W-Tr 中の終始にわたって神経的要因の貢献度が筋肥大のものよりも高く, 筋力増加をもたらす神経的要因と筋肥大の経時的变化には, 年齢間に相違があることを明らかにした。このような本研究と先行研究の結果との相違をもたらす原因の一つに筋肥大に対する性差の影響が考えられる。Roth たち³³⁾ は, 高年男性と高年女性に上下肢の W-Tr を実施し, MRI を用いて大腿部の CSA の変化について検討した。その結果, W-Tr による CSA の変化率は, 高年女性の方が高年男性よりも高値を示す傾向にあることを明らかにした。また Hakkinen たち¹⁵⁾ も高年男性と高年女性に対して24週間の上下肢の W-Tr を実施し, 超音波を用いて大腿部の CSA の変化を検討したところ, Roth たち³³⁾ と同様の結果を示した。このような筋肥大に対する性差の原因は明らかではないが, 中高年女性では男性と比べて W-Tr 後にサテライト細胞が顕著に増加すること³⁴⁾, 筋損傷レベルが高いこと³²⁾ などが関与しているかもしれない。また筋形態の評価法の違いも本研究と先行研

究の結果との相違に影響している可能性がある。本研究では MRI を用いて大腿部の筋形態を3次元で評価し, W-Tr にともなう MV の変化を検討した。一方, Moritani & deVries²⁹⁾ は筋形態を実測することなく, 皮脂厚から CSA を推定し, 大腿部の筋形態を2次元的に評価している。W-Tr 8週目の高年者における筋形態の変化率について, 本研究と Moritani & deVries²⁹⁾ の値を比較すると, 彼らの報告した CSA の変化率の値は本研究の値の45%であった。W-Tr による筋肥大の程度は筋の長軸方向で異なることが報告されている³⁰⁾。このことは, 本研究において W-Tr による筋形態の変化の差異が顕著になった理由の一つと考えられる。すなわち, 本研究のように, MRI などの画像分析装置を使用して筋形態を3次元で評価することは, W-Tr による形態的变化を精査することに重要であると考えられる。

本研究では, 中高年女性と若年女性ともに, 筋力増加をもたらす要因が W-Tr 中に筋の動員から筋肥大に移行したが, 筋力増加に対する筋肥大の貢献度が筋の動員のものよりも高くなる時期は, 中高年女性の方が若年女性よりも遅いことを示した。これには W-Tr による筋肥大に対する加齢の影響が考えられる。W-Tr による CSA の変化の割合は, 若年女性よりも高年女性の方が低いことが先行研究で示されている^{15,33)}。このような W-Tr による筋肥大に対する加齢の影響には, 加齢にともなう安静時のテストステロン, 成長ホルモン(GH), インスリン様成長因子, あるいはコルチゾール濃度の低下³⁵⁾, W-Tr によるタンパク合成速度³⁹⁾, 安静時のテストステロン濃度²¹⁾ や GH 分泌に対する反応性の年齢差⁸⁾ などが考えられる。

本研究の %actCSA は, 中高年女性と若年女性ともに W-Tr 開始後4週目まで増加したが, 4週目以降, 中高年女性の %actCSA は増加を示さなかったものの, 若年女性では有意な低下を示した。また W-Tr 後期における %actCSA の変化率は, 中高年女性の方が若年女性よりも高く, W-Tr にともなう %actCSA の経時的变化には年齢間の相違が認められた。Moritani & de-

Vries²⁹⁾は、高年者に対する8週間のW-Trによる上腕二頭筋のiEMGの変化を経時的に検討した。その結果、W-Tr前の値を0%と基準化した場合、高年者のiEMGの変化率はW-Tr初期に増加を示すものの、W-Tr後期には頭打ちがみられた。またW-TrによるiEMGの変化率は、高年者の方が若年者よりも大きく、これらは本研究の%-actCSAの結果を支持するものである。本研究におけるW-Tr前の%-actCSAの初期値と%-actCSAの変化率との間には、中高年女性と若年女性ともに一定の関係が認められなかったことから、W-Trによる%-actCSAの変化率にみられた年齢差は初期値に依存するものではないと考えられる。Moritani & deVries²⁹⁾は、W-TrによるiEMGの変化率にみられた年齢差について、W-Tr初期における高年者の心理的要因による筋力発揮を抑制する作用が、W-Trを通じて、徐々に緩和されたことによる可能性を示唆している。一方、本研究の若年女性では、W-Tr 4週目以降に%-actCSAの低下が認められた。Hakkinen たち¹³⁾は、W-Trにともなう膝伸展動作時の大腿直筋、外側広筋および内側広筋のiEMGの変化を経時的に検討した。その結果、W-Tr初期には3つの筋のiEMGが増加したのに対して、W-Tr後期には3つの筋のiEMGが低下することを明らかにし、これは本研究の結果を支持するものである。Widrick たち⁴¹⁾たちは、12週間のW-Trにより若年者の外側広筋における単一筋線維の発揮張力が増加することを示した。また本研究の若年女性の%-actMV当たりの筋力(筋の動員と筋肥大以外に筋力増加に関与する要因)とMV当たりの筋力は、W-Tr 4週目以降に増加したことから、本研究の若年女性にはWidrick たちの示すような単一筋線維の発揮張力の増加も生じていたかもしれない。さらに本研究では、若年女性の筋力増加に対する筋の動員の貢献度は、W-Trを通じて小さくなったのに対して、筋肥大の貢献度は徐々に大きくなった。したがって、本研究のW-Trにより若年女性の筋力が増加したのに対して、W-Tr 4週目以降に若年女性の%-actCSAが低下したのは、W-Trにより筋を動員する能力の

改善がなくても、筋肥大や単一筋線維の発揮張力の増加などの貢献により筋力増加が可能であったためと推察される。

中高年女性の筋力増加に貢献する要因の経時的な変化に注目してみると、W-Tr開始後8週目における筋力増加は、筋の動員と筋肥大の2要因から36.5%しか説明することができない。このことは、8週目における筋力増加には、筋の動員と筋肥大のみならず、他の要因も貢献していた可能性が考えられる。Trappe たち³⁷⁾は、高年女性を対象に12週間のW-Trを実施し、外側広筋の単一筋線維の発揮張力が増加したことを報告している。この結果は、8週目の筋力増加に単一筋線維の発揮張力の増加が貢献していることを示唆するものであるが、本研究における中高年女性の%-actMV当たりの筋力は、W-Tr中ほとんど変化しなかった。このことから、Trappe たちの示唆する単一筋線維レベルの張力増加が筋力増加を引き起こしたとは考えにくい。Hakkinen たち¹⁶⁾は、W-Trにともなう高年女性の筋線維組成の変化を検討した結果、高年女性の筋線維組成はW-Trで変化しないことを明らかにしている。本研究の中高年女性の%-actMVとMV当たりの筋力はW-Tr後期に増加を示し、%-actMV当たりの筋力は変化しなかったことから、W-Tr後期にみられた筋力増加には少なくとも運動単位の動員やインパルスの発火頻度などを含めた神経的要因の改善が関与していることが推察される。本研究では、MRIから得られるT2値を用いて、神経的要因の一つである筋力発揮時の筋の動員を評価したが、W-Trにともなう神経的要因の改善には、動員数の増加のみならず、インパルスの発火頻度の増加¹⁸⁾や運動単位の同期化³⁸⁾なども報告されている。このことから、W-Trにともなう筋の動員以外の神経的要因の改善がW-Tr 8週目の筋力増加に貢献していたかもしれない。

V. ま と め

本研究では、中高年女性を対象にしたW-Tr中の筋力増加とその要因としての筋の動員と筋肥大との相対的貢献度を経時的に明らかにすること

を目的とした。

1. W-Tr による等張性膝伸展力の変化率は、両群ともに W-Tr 前と比較して、W-Tr 開始後 4 週目に有意な増加を示し、6 週目の等張性膝伸展力の変化率は、4 週目のものよりも有意な高値を示した。また等張性膝伸展力の変化率は、全ての週において、両群間に有意差を認めなかった。
2. W-Tr による大腿四頭筋の MV の変化率は、W-Tr 前と比較して、中高年群では W-Tr 開始後 8 週目、若年群では 6 週目以降に有意な増加を示した。中高年群における MV の変化率は、6 週目以降において若年群のものよりも有意な低値を示した。
3. W-Tr による大腿四頭筋の %actCSA の変化率は、W-Tr 前と比較して、両群ともに W-Tr 開始後 4 週目に有意な増加を示した。4 週目以降、中高年群の %actCSA の変化率は有意な変化を示さなかったものの、8 週目の若年群の %actCSA は 4 週目のものと比べて有意な低値を示した。中高年群の %actCSA の変化率は、6 週目以降において、若年群のものよりも有意な高値を示した。
4. 中高年群において、W-Tr 開始後 2, 4 および 6 週目の筋力増加は、筋の動員の貢献度が筋肥大のものよりも高値を示した。8 週目の筋力増加については、筋の動員よりも筋肥大の貢献度が高値を示した。若年群では 2, 4 週目の筋力増加は筋の動員の貢献度が筋肥大のものよりも高値を示したが、6, 8 週目の筋力増加は筋肥大の貢献度が筋の動員のものよりも高値を示した。
5. W-Tr による大腿四頭筋の %actMV の変化率は、W-Tr 前と比較して、中高年群では W-Tr 開始後 4 週目以降、若年群では 4 週目のみに有意な増加を示した。%actMV の変化率は、4 週目まで両群間に有意差を認めなかったが、6 週目と 8 週目において、中高年群の変化率は若年群のものよりも有意な高値を示した。
6. W-Tr による膝伸展の MV 当たりの筋力の変化率は、W-Tr 前と比較して、両群ともに

W-Tr 開始後 4 週目に有意な増加を示した。また MV 当たりの筋力の変化率は、全ての週において、両群間に有意差を認めなかった。

7. W-Tr による中高年群の %actMV 当たりの筋力の変化率は、W-Tr を通じて、有意な変化を示さなかった。若年群における %actMV 当たりの筋力の変化率は、W-Tr 前と比較して、6 週目以降に有意な増加を示した。中高年群の %actMV 当たりの筋力の変化率は、8 週目において、若年群のものよりも有意な低値を示した。

以上の結果から、年齢に関わらず、W-Tr 初期段階の筋力増加の主要因は筋の動員であり、W-Tr 後期の筋力増加の主要因は筋肥大であることが示された。しかしながら、筋力増加に対する筋肥大の貢献度が筋の動員のものよりも高くなる時期は中高年女性の方が若年女性よりも遅く、筋力増加をもたらす 2 要因の経時的变化が年齢により異なることが示された。

謝 辞

本研究は、筑波大学先端学際領域研究センター・TARA プロジェクト(代表：久野譜也)ならびに文部科学省・科学技術振興調整費(代表：村上和雄)による研究(SAT プロジェクト)の一部である。また貴重な資料を提供して頂いた埼玉県小鹿野町保健センターと埼玉県立大学保健医療福祉学部に感謝致します。

(受理日 平成15年2月26日)

参 考 文 献

- 1) Adams, G. R., Duvoisin, M. R., and Dudley, G. A. Magnetic resonance imaging and electromyography as indexes of muscle function. *J. Appl. Physiol.*, (1992), **73**, 1578-1583.
- 2) Adams, G. R., Harris, R. T., Woodard, D., and Dudley, G. A. Mapping of electrical muscle stimulation using MRI. *J. Appl. Physiol.*, (1993), **74**, 532-537.
- 3) Akima, H., Kano, Y., Enomoto, Y., Ishizu, M., Okada, M., Oishi, Y., Katsuta, S., and Kuno, S. Muscle function in 164 men and women aged 20-84 yr. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (2001), **33**, 220-226.
- 4) Akima, H., Foley, J. M., Prior, B. M., Dudley, G. A., and Meyer, R. A. Vastus lateralis fatigue alters recruitment of musculus quadriceps femoris in humans. *J. Appl. Physiol.*, (2002), **92**, 679-684.

- 5) Aniansson, A., Zetterberg, C., and Hedberg, M. Impaired muscle function with aging: a background factor in the incidence of fractures of the proximal end of the femur. *Clin. Orthop.*, (1984), **191**, 192-210.
- 6) 馬場紫乃, 衣笠竜太, 久野譜也. MRI による骨格筋 Map. *臨床スポーツ医学*, (2000), **17**, 20-32.
- 7) Conwit, R. A., Stashuk, D., Tracy, B., McHugh, M., Brown, W. F., and Metter, E. J. The relationship of motor unit size, firing rate and force. *Clin. Neurophysiol.*, (1999), **110**, 1270-1275.
- 8) Craig, B. W., Brown, R., and Everhart, J. Effects of progressive resistance training on growth hormone and testosterone levels in young and elderly subjects. *Mech. Ageing Dev.*, (1989), **49**, 159-169.
- 9) Enoka, R. M. Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports Med.*, (1988), **6**, 146-168.
- 10) Fisher, M. J., Meyer, R. A., Adams, G. R., Foley, J. M., and Potchen, E. J. Direct relationships between proton T2 and exercise intensity in skeletal muscle MR images. *Invest. Radiol.*, (1990), **25**, 480-485.
- 11) Frontera, W. R., Meredith, C. N., O'Reilly, K. P., Knuttgen, H. G., and Evans, W. J. Strength conditioning in older men: skeletal muscle hypertrophy and improved function. *J. Appl. Physiol.*, (1988), **64**, 1038-1044.
- 12) Fukunaga, T., Roy, R. R., Shellock, F. G., Hodgson, J. A., Day, M. K., Lee, P. L., Kwong-Fu, H., and Edgerton, V. R. Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *J. Orthop. Res.*, (1992), **10**, 928-934.
- 13) Hakkinen, K., Komi, P. V. Electromyographic changes during strength training and detraining. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1983), **15**, 455-460.
- 14) Hakkinen, K., Newton, R. U., Gordon, S. E., McCormick, M., Volek, J. S., Nindl, B. C., Gotshalk, L. A., Campbell, W. W., Evans, W. J., Hakkinen, A., Humphries, B. J., and Kraemer, W. J. Changes in muscle morphology, electromyographic activity, and force production characteristics during progressive strength training in young and older men. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, (1998-a), **53**, B415-B423.
- 15) Hakkinen, K., Kallinen, M., Izquierdo, M., Jokelainen, K., Lassila, H., Malkia, E., Kraemer, W. J., Newton, R. U., and Alen, M. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J. Appl. Physiol.*, (1998-b), **84**, 1341-1349.
- 16) Hakkinen, K., Kraemer, W. J., Newton, R. U., and Alen, M. Changes in electromyographic activity, muscle fibre and force production characteristics during heavy resistance/power strength training in middle-aged and older men and women. *Acta Physiol. Scand.*, (2001), **171**, 51-62.
- 17) Higbie, E. J., Cureton, K. J., Warren, G. L. 3rd., and Prior, B. M. Effects of concentric and eccentric training on muscle strength, cross-sectional area, and neural activation. *J. Appl. Physiol.*, (1996), **81**, 2173-2181.
- 18) Kamen, G., Knight, C. A., Laroche, D. P., and Asermely, D. G. Resistance training increases vastus lateralis motor unit firing rates in young and old adults. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1998), **30**, S337.
- 19) 金 俊東, 大島利夫, 馬場紫乃, 安田俊広, 足立和隆, 勝田 茂, 岡田守彦, 久野譜也. 長期間トレーニングを継続している高齢アスリートの筋量と歩行能力の特徴. *体力科学*, (2001), **50**, 149-158.
- 20) Knight, C. A., & Kamen, G. Adaptations in muscular activation of the knee extensor muscles with strength training in young and older adults. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, (2001), **11**, 405-412.
- 21) Kraemer, W. J., Hakkinen, K., Newton, R. U., Nindl, B. C., Volek, J. S., McCormick, M., Gotshalk, L. A., Gordon, S. E., Fleck, S. J., Campbell, W. W., Putukian, M., and Evans, W. J. Effects of heavy-resistance training on hormonal response patterns in younger vs. older men. *J. Appl. Physiol.*, (1999), **87**, 982-992.
- 22) Kukulka, C. G., & Clamann, H. P. Comparison of the recruitment and discharge properties of motor units in human brachial biceps and adductor pollicis during isometric contractions. *Brain Res.*, (1981), **219**, 45-55.
- 23) Kuno, S., Akisada, M., and Mitsumori, F. Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance study on the effects of endurance training in rat skeletal muscle. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, (1992), **65**, 1197-1201.
- 24) Kuno, S., Ogawa, T., Katsuta, S., and Itai, Y. In vivo human myocardial metabolism during aerobic exercise by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, (1994), **69**, 488-491.
- 25) Kuno, S., Takahashi, H., Fujimoto, K., Akima, H., Miyamaru, M., Nemoto, I., Itai, Y., and Katsuta, S. Muscle metabolism during exercise using phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy in adolescents. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, (1995), **70**, 301-304.
- 26) Lord, S. R., Ward, J. A., Williams, P., and Anstey, K. J. Physiological factors associated with falls in older community-dwelling women. *J. Am. Geriatr. Soc.*, (1994), **42**, 1110-1117.
- 27) Lynch, N. A., Metter, E. J., Lindle, R. S., Fozard, J. L., Tobin, J. D., Roy, T. A., Fleg, J. L., and Hurley, B. F. Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups. *J. Appl. Physiol.*, (1999), **86**, 188-194.
- 28) Moritani, T., & deVries, H. A. Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am. J. Phys. Med.*, (1979), **58**, 115-130.
- 29) Moritani, T., & deVries, H. A. Potential for gross muscle hypertrophy in older men. *J. Gerontol.*,

- (1980), **35**, 672-682.
- 30) Narici, M. V., Roi, G. S., Landoni, L., Minetti, A. E., and Cerretelli, P. Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, (1989), **59**, 310-319.
 - 31) Prior, B. M., Foley, J. M., Jayaraman, R. C., and Meyer, R. A. Pixel T2 distribution in functional magnetic resonance images of muscle. *J. Appl. Physiol.*, (1999), **87**, 2107-2114.
 - 32) Roth, S. M., Martel, G. F., Ivey, F. M., Lemmer, J. T., Metter, E. J., Hurley, B. F., and Rogers, M. A. High-volume, heavy-resistance strength training and muscle damage in young and older women. *J. Appl. Physiol.*, (2000), **88**, 1112-1118.
 - 33) Roth, S. M., Ivey, F. M., Martel, G. F., Lemmer, J. T., Hurlbut, D. E., Siegel, E. L., Metter, E. J., Fleg, J. L., Fozard, J. L., Kostek, M. C., Wernick, D. M., and Hurley, B. F. Muscle size responses to strength training in young and older men and women. *J. Am. Geriatr. Soc.*, (2001), **49**, 1428-1433.
 - 34) Roth, S. M., Martel, G. F., Ivey, F. M., Lemmer, J. T., Tracy, B. L., Metter, E. J., Hurley, B. F., and Rogers, M. A. Skeletal muscle satellite cell characteristics in young and older men and women after heavy resistance strength training. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, (2001), **56**, B240-B247.
 - 35) Rudman, D. Growth hormone, body composition, and aging. *J. Am. Geriatr. Soc.*, (1985), **33**, 800-807.
 - 36) Tracy, B. L., Ivey, F. M., Hurlbut, D., Martel, G. F., Lemmer, J. T., Siegel, E. L., Metter, E. J., Fozard, J. L., Fleg, J. L., and Hurley, B. F. Muscle quality. II. Effects of strength training in 65- to 75-yr-old men and women. *J. Appl. Physiol.*, (1999), **86**, 195-201.
 - 37) Trappe, S., Godard, M., Gallagher, P., Carroll, C., Rowden, G., and Porter, D. Resistance training improves single muscle fiber contractile function in older women. *Am. J. Physiol. Cell. Physiol.*, (2001), **281**, C398-C406.
 - 38) Tseng, B. S., Marsh, D. R., Hamilton, M. T., and Booth, F. W. Strength and aerobic training attenuate muscle wasting and improve resistance to the development of disability with aging. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, (1995), **50**, 113-119.
 - 39) Welle, S., Thornton, C., and Statt, M. Myofibrillar protein synthesis in young and old human subjects after three months of resistance training. *Am. J. Physiol.*, (1995), **268**, E422-E427.
 - 40) Welle, S., Totterman, S., and Thornton, C. Effect of age on muscle hypertrophy induced by resistance training. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, (1996), **51**, M270-M275.
 - 41) Widrick, J. J., Stelzer, J. E., Shoepe, T. C., Garner, D. P. Functional properties of human muscle fibers after short-term resistance exercise training. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, (2002), **283**, R408-416.