

【綜 説】

高 齢 者 の 筋 特 性 と 筋 力 ト レ ニ ン グ

久 野 譜 也 村 上 晴 香 馬 場 紫 乃
金 俊 東 上 岡 方 士

EFFECT OF STRENGTH TRAINING ON AGING MUSCLES OF ELDERLY PEOPLE

SHINYA KUNO, HARUKA MURAKAMI, SHINO BABA, JUNDONG KIM and MASASHI KAMIOKA

Abstract

The ability to walk is just as important for the elderly as it is for young people. In fact, in the elderly, decreased mobility limits function in daily life and can lead to more serious situations (e.g., becoming bedridden). The elderly population has increased over the last decade, and many researchers have studied the mobility of the elderly. However, the focus of most studies has been to facilitate recovery of bedridden individuals and prevent the elderly from becoming bedridden, and particularly to prevent fall-induced fractures, which often cause the elderly to become bedridden. However, about 70-80% of the elderly population do not require care, and it is necessary to conduct research on the maintenance of activities of daily living to make it possible for the elderly to work or volunteer. From this perspective, mobility is an important physical factor. Mobility is dependent on muscle activity and it has long been known that aging reduces muscle mass. Therefore, it is feasible to assume that reduced muscle mass leads to decreased ability to walk, and we have proven that there is a close correlation between the two. When presenting the idea of strength training to the elderly, it is appropriate to focus on the maintenance and improvement of mobility, not on the training itself. The results of our research can be summarized as follows :

Muscle mass decreases with age, with the legs being affected to a greater degree than the arms. Moreover, muscle atrophy is dependent on weakening of muscle fibers, especially fast-twitch (Type II) fibers. Reduced lower limb muscle mass increases the risk of falling and can decrease walking ability to a degree that can affect daily living activities.

In order to improve reduced muscle mass in aging, it is important to use an exercise program that is designed to strengthen fast-twitch fibers, which can be followed even by the elderly. Since walking therapy mostly mobilizes slow twitch fibers, it is not effective in preventing and improving muscle atrophy. It is important to have an exercise program that is designed to mobilize fast-twitch fibers.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2003, 52 Suppl : 17~30)

key word : aging, muscle mass, fast-twitch fiber, atrophy, strength training

は じ め に

高齢になっても歩けることの重要性は、若年者と比べてほとんど同じである。むしろ高齢者の場合には、歩行能力の制限が生活機能の制限につながり、よりクリティカルな場合(寝たきりなど)に結びつく可能性が高い。ここ10年来、高齢化社会

に向かって多くの研究者が、高齢者の歩行能力に着目してきた。しかしながら、それらの研究における視点の多くは、寝たきりからの回復や寝たきり予防、とくに寝たきりに結びつきやすい転倒による骨折予防という点にあった。しかしながら、柴田(1998年)が示すように、高齢者の75%は介護等を必要としない層であることを考慮すると(図

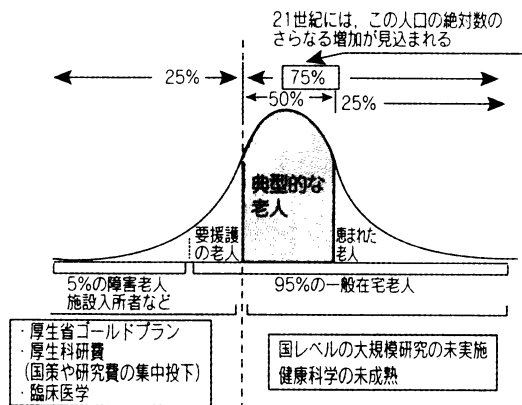


図1. 高齢者(65歳以上)人口の75%は介護を必要としない¹⁾

1), 一定の就労やボランティア活動などの社会生活をも可能とする生活機能の維持という新しい視点が必要となると考えられる。そのような視点の中で、歩行能力は重要な体力的要因とみなすことができる。

ところで歩行動作は、筋の活動によってなされることは明白である。一方、加齢により筋の量が明らかに減少することも古くから知られている老化現象である。したがって、筋量の低下が歩行能力の制限につながることは十分に予想されるが、これに関して我々が明確な知見を示したのは、つい最近のことである。そこで本稿では、歩行能力

の制限につながる筋量の減少と老化の関係及びその改善策を考えるための基礎的研究を概説した上で、我々が明らかにした具体的な歩行能力向上法を概説する。

A. 老化と筋量の関係を理解するために知っておきたいこと

1) 何歳から筋力は低下するのか？

これまでの欧米の研究では一般的に筋力は30歳代から徐々に低下し始め、50代からその低下の割合が高くなっていき、30歳代から80歳代までで約30~50%低下することが示されている。一方、我々の日本人に関するデータでは、すでに60歳代男性で脚筋力の低下が45~50%にも達している(表1)。

2) 筋力の低下と筋量における変化との関係

加齢による筋力低下を引き起こす要因を骨格筋側より考えると、1) 筋線維組成の遅筋化、2) 筋量の減少、があげられる。Larsson らの研究を除いて、速筋、遅筋の線維数の割合を示す筋線維組成においては、速筋線維の選択的な萎縮は認められるにもかかわらず、若齢群と高齢群における差は認められていない。一方、高齢になると筋線維の横断面積は前述したように速筋線維に顕著な萎縮が認められるのに対し、遅筋線維は加齢の影

表1. 大洋村プロジェクトにおける各年齢群の脚筋力(n=129)²⁾

		膝伸展力(Nm)		膝屈曲力(Nm)	
		60°/秒	300°/秒	60°/秒	300°/秒
男性	20歳代(n=25)	211	95	108	64
	40歳代(n=8)	153(-27.5)	71(-25.3)	98(-9.3)	53(-17.2)
	50歳代(n=8)	160(-24.2)	69(-27.4)	99(-8.4)	46(-28.2)
	60歳代(n=23)	114(-46.0)	49(-48.5)	70(-35.2)	37(-42.2)
	70歳代(n=8)	93(-55.9)	38(-60.0)	52(-51.9)	25(-60.1)
	80歳代(n=1)	78(-64.1)	33(-65.3)	56(-48.2)	19(-70.4)
	K.I.(84歳)*	111(-47.4)	49(-48.5)	92(-14.9)	57(-11.0)
女性	20歳代(n=7)	110	44	60	30
	40歳代(n=6)	103(-6.4)	44(±0)	52(-13.4)	27(-10.0)
	50歳代(n=14)	93(-15.5)	41(-6.9)	53(-11.7)	29(-13.4)
	60歳代(n=21)	78(-29.1)	33(-25.0)	42(-30.0)	22(-26.7)
	70歳代(n=7)	72(-35.6)	30(-31.9)	37(-38.4)	20(-33.4)
	80歳代(n=1)	59(-46.4)	27(-48.7)	38(-36.7)	17(-43.4)

*陸上競技世界マスターズ大会 10 種目競技 3 位。()内は 20 歳代の値を基準とした増減率。

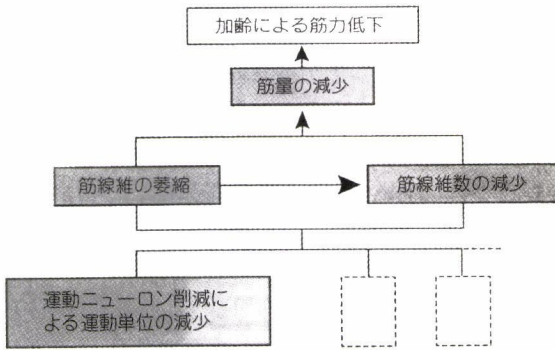


図2. 加齢による筋力低下の仕組み²⁾

響を比較的受けない。したがって、速筋線維の選択的な萎縮は、筋量の低下に大きな影響を及ぼす。一方、60歳以降に一つの筋肉の総筋線維数に減少がみられることが明らかにされている。したがって、加齢による筋量の減少は、速筋線維の選択的萎縮(遅筋線維も速筋に比べると割合は小さいが萎縮する)と筋線維数の減少の相乗効果によって主にもたらされると考えられる。そこで、加齢による筋力低下の仕組みのフローチャートを図2に示した。筋力低下を引き起こす最大要因が筋量の低下であることは間違いがないであろう。なぜならば、筋力は筋の横断面積と比例関係にあることから、筋量の低下は筋力の低下を導くためである。また、動物実験の結果から運動などで活動量が増加しても加齢にともなう筋線維数の減少を抑制することは困難であることが示されているので、老化抑制という立場に立つならば、加齢や不活動に

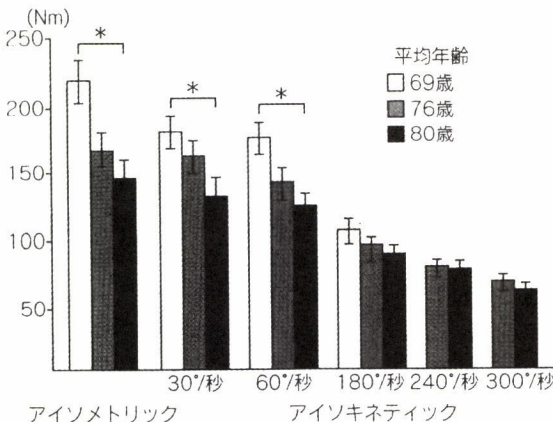


図3. 高・高齢者の筋力(9名の縦断的データ)

ともなう筋線維の萎縮のメカニズムやその抑制方法の解明が重要となる。

3) 後期高齢者(75歳以上)の筋力発揮の特徴

図3には、69歳から80歳までの同一人を対象に筋力の縦断的变化の様相を示した。筋量に大きく依存するアイソメトリックや低速度での等速性筋力発揮において、80歳では70歳時に比べて明らかに低値を示す。一方、筋量の依存度が比較的低く、筋線維組成や神経系の要因の影響をより強く受ける高速での筋力発揮において、70歳から80歳にかけての筋力低下度はアイソメトリックや低速での筋力発揮に比べて非常に小さいのが特徴的である。我々のデータによれば、大腿部伸筋群の場合、70歳代から80歳代にかけて男女とも約10%の筋横断面積の低下がみられる。このような筋量の低下が、さらなる筋力低下を導くことになる。一般的に日常生活では、より低速での筋力発揮をする機会が多い。したがって、低速での筋力低下を抑制することは、高齢者の生活機能を維持・増進していくための重要な課題といえる。

4) 部位による筋力低下に相違がみられるか?

よく老化は足からという言葉に耳にするが、加齢にともなう筋力の低下度は上肢と下肢とは異なる。図4には、加齢による上肢と下肢の筋力変化を示した。上肢と下肢では、下肢の方が約10~15%低下率が高くなっている。この差が生じる

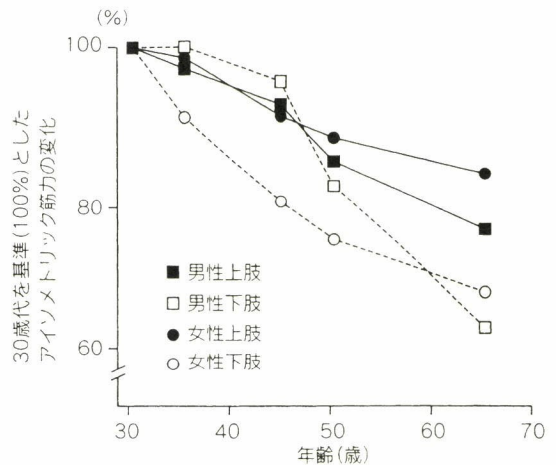


図4. 加齢に伴う上肢と下肢の筋力変化³⁾

明確な根拠は現在のところまで示されていない。使用頻度(活動量)が上肢の方が高いため低下率が小さいとの説明もなされているが、実証はされていない。上肢と下肢ではこのように筋力の低下度が異なるため、高齢者の筋機能を評価する場合少なくとも両方の評価が必要であることが示唆される。

5) 加齢による筋力低下とライフスタイルとの関係

ここまでに加齢による筋力低下の原因になると考えられる生理的要因について中心にレビューを行ってきた。しかしながら、最も重要な要因の一つであり、外的な要因である筋量とライフスタイルとの関わりについての詳細な検討はほとんどなされていないのが実状である。そこで我々は、高齢者の下肢筋量とライフスタイルとの関係について検討を行った³³⁾。その結果、65歳以上の群で平均より多い筋量(平均の1SD以上)を維持していた被検者は全て農業従事者であった。しかしながら、全員が日常的な運動習慣を持ってはなかった。これに対し65歳以下群では、平均より多い筋量を維持していた被検者における職業の傾向に特徴は認められなかったものの、過去及び現在において運動・スポーツを日常生活の中に取り入れている者がほとんどであった。

6) ウォーキングなどの持続的運動により筋力や筋量の低下抑制が可能か?

これまでの一般的な中高年者に対する運動処方では、有酸素的な運動を中心に構成されるのが一般的である。したがって、高齢者の筋力や筋量に及ぼす持続的トレーニングの影響を検討しておくことは重要と考えられる。我々は、高齢者の大会(マスターズ)に出場するために日常的に激しい持続的トレーニングを積んでいる高齢ランナーと日常的に運動習慣を持たない同年代被検者の比較を行った³⁴⁾。高齢ランナー群は、平均で月間234kmものトレーニングを実施しているが、加齢にともなう速筋線維の萎縮率はコントロール群と同様な値であった。これは歩行やジョギングなどの持続的な運動では、加齢にともなう速筋線維の萎縮に対する抑制には、あまり貢献しないことを示唆し

ている。したがって、健康増進のための運動として、歩行やジョギングなどの有酸素的運動のみを推奨することは、筋萎縮抑制の観点からみると問題になるということになる。

7) 高齢者の筋力トレーニングの効果

これまで高齢者の筋力アップがもたらされる要因として、筋線維の肥大よりも筋-神経系改善の貢献度の高いことが示されてきた。しかしながら、最近では筋-神経系改善に加えて、高齢者においても若年者と同様に筋肥大による筋力アップが多く研究者によって認められている。最も高齢者を用いた研究では、90歳を対象に約15%の筋横断面積の増大を報告している。

これらの研究により、筋力トレーニングのような高強度の運動であれば、人は何歳になっても、筋量増加のトレナビリティを有していると結論できる。しかしながら、いずれの報告も実験として特別な支援体制の基でコントロールして行われた結果であり、このトレーニング内容をいきなり現場での運動指導に应用することは安全面から行っても無理があると考えられる。また、全ての研究報告は、高齢者であっても筋の肥大がみられるかどうかという点にスコープを当てており、安全という観点から相対的に低い強度でもトレーニング効果が見られるか?といったより実際的なトレーニング方法に関する検討はみられない。そこで我々は、60歳以上の高齢者に対して、筋力トレーニングとしては運動の強度を20%程度低めに設定し、1年間にわたってトレーニングを継続させた。週あたりの筋力トレーニングを実施する頻度は、週1回もしくは2回とし、運動の実施頻度についても併せて検討した。その結果、筋力トレーニング非実施群は、1年間で筋量の減少が認められたのに対し、1回実施群は1年前とほぼ同様なレベルを維持し、2回実施群は1年前より高い数値を示した(表2)。これらの結果は、筋力トレーニングとしての強度を従来から示されている基準より低く設定しても、トレーニング期間が長期にわたれば、効果が得られることを示唆している。

表2. 高齢者における筋力トレーニングの頻度と筋横断面積⁴⁾

グループ	トレーニング前	→	トレーニング後	
週2回群(65.2歳, n = 12)	10.5±1.5	→	12.1±2.6	p<0.05
週1回群(67.1歳, n = 19)	11.7±2.3	→	11.5±2.8	ns
非実施群(68.0歳, n = 16)	10.3±2.0	→	9.5±2.0	p<0.05

平均値±標準誤差.

B. 高齢者の筋力トレーニング実施の限界因子

1) 加齢による限界

加齢によって筋力は低下する⁵⁾. 加齢による最大筋力の低下は20歳代を基準値にすると, 90歳代のアイソメトリックおよびコンセントリック筋力が45%, エキセントリック筋力が35%も減少するとされている(図5). 表3には加齢による大腿四頭筋の筋線維の減少率⁵⁾を示した. いずれの研究報告も速筋線維(type II 線維)の減少率が遅筋線維(type I 線維)よりも大きいことが分かる⁶⁻⁹⁾. Lexell⁸⁾たちは健常者の外側広筋の筋線維数を調べ, 80歳代の筋線維数は20歳代のおよそ39%にまで減少すると報告している(図6). このような加齢による筋線維数の減少は筋力トレーニングによ

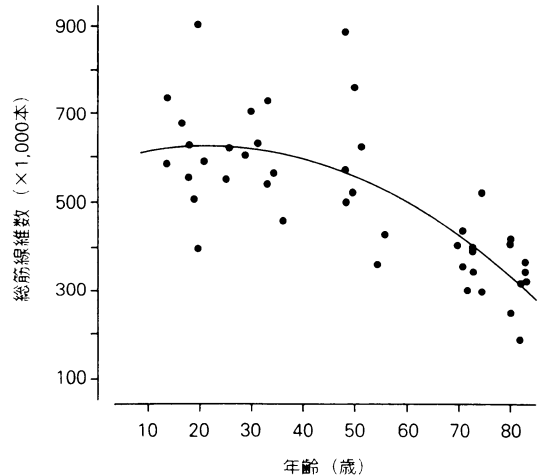


図6. 加齢による総筋線維数の減少⁵⁾

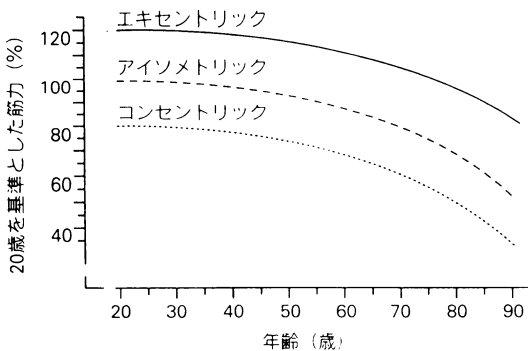


図5. アイソメトリック筋力を100%としたときの加齢による最大筋力の低下⁵⁾

表3. 加齢による大腿四頭筋の筋線維の減少率(久野,上岡 2003年)

研究者	性	年齢	筋線維の減少率 (%)	
			タイプI	タイプII
larsson ³⁾	男	22-65	1	25
Essen-Gustavsson ⁴⁾	男	20-70	15	19
	女	20-70	25	45
Lexell ⁵⁾	男	15-83	1	29
Hakkinen ⁶⁾	男	29-61	+8	10

り防止できるが, ヒトは何歳まで筋力トレーニングによる筋の適応が起るのだろうか. 対象者の年齢が最も高い研究報告は, Fiatarone たち¹⁰⁾の平均年齢90歳(年齢幅; 86-96歳)である. この研究に参加した高齢者は1RMの筋力が平均値で174%も増大し, 筋の横断面積も15%増加したとされている. この研究結果から, ヒトは90歳を越えても特異的な筋力トレーニングを実施することで筋力や筋量を増大することができる. しかし, 筋力トレーニングを実施したときの高齢者の筋量の増加は, 若年者と比べると低値を示す. その要因は, 筋線維の蛋白合成速度が加齢によって遅くなる^{11,12)}ことが挙げられる^{11,12)}. Welle たち¹¹⁾は, 高齢者と若年者の筋線維の蛋白合成速度を筋力トレーニング前後で調べている(図7). 高齢者の筋力トレーニング前後における筋線維合成速度は若年者と比べて有意に遅いとされている. 高齢者の筋力トレーニングの加齢による限界因子には, 筋線維の再生能

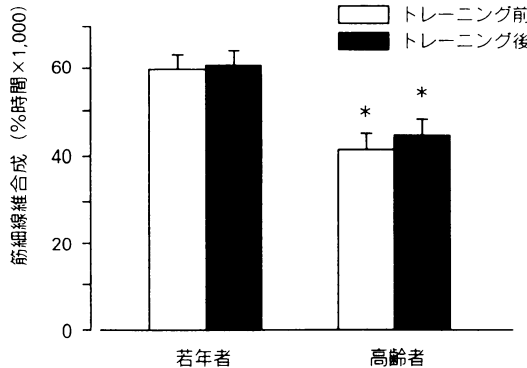


図7. 若年者と高齢者のトレーニング前後の筋線維合成速度の比較⁷⁾

* $p < 0.05$ (若年者と高齢者のトレーニング前後の比較)

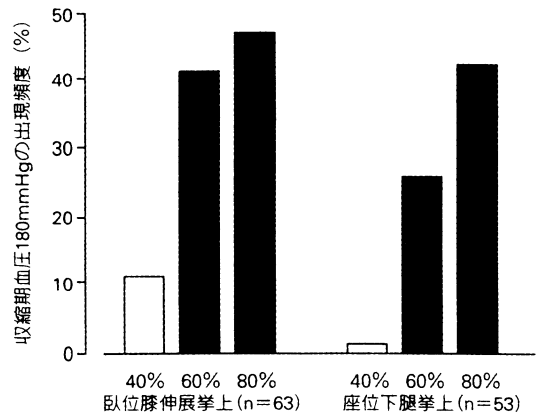


図8. 高齢者におけるレジスタンス運動による高度の血圧上昇¹⁰⁾

力の低下が大きく貢献すると考えられる。

2) トレーニング強度および頻度の限界

高齢者の筋力トレーニングでは、最大筋力(1RM)の65~80%を發揮する運動強度を一般的に高強度とし、最大筋力(1RM)の50%以下を低強度としている。高齢者の筋力や筋量の増大を目的とした筋力トレーニングでは強度が高いほど効果が期待できることが、これまで多くの研究結果から推測される。しかし、トレーニング強度が高くなると、血圧の上昇を招くという別の課題が生まれる。高齢者の筋力トレーニング時の血圧の限界を測定するのは不可能であるが、運動負荷試験の中止基準では収縮期血圧 > 260 mmHg, 拡張期血圧 > 115 mmHgとされている¹³⁾。運動時の血圧上昇の原因の1つは息こらえによるバルサルバ効果が考えられる。鯉坂¹⁴⁾は、高齢者のレジスタンス運動時の血圧上昇の出現頻度を調べている(図8)。それによると、最大筋力(1RM)の80%の臥

位膝伸展および座位下腿挙上運動では、収縮期血圧180 mmHg以上の高度の血圧上昇が40%以上の頻度で生じると報告している。高齢者の筋力トレーニングの強度の限界因子は、運動中の血圧上昇によって決められるであろう。

アメリカスポーツ医学会の指針¹³⁾では、高齢者の筋力トレーニングの頻度は少なくとも週2回、48時間以上の休憩をあけて行うとされている。筋力トレーニングによる最大筋力(1RM)の増大が100%を超える研究報告では、週3回のトレーニング頻度を採用している(表4)。Rothたち¹⁵⁾は、週3回の高強度筋力トレーニングを9週間にわたり7名の若年者と8名の高齢者に実施し、脚の筋線維のダメージを調べている。筋力トレーニングによる高齢者の脚の筋線維のダメージは、トレーニング前後の比較で若年者および高齢者でそれぞれ7.1%と5.6%の有意な増加が報告されている。しかし、両者の筋線維のダメージには有意差

表4. 高齢者の大腿部筋力トレーニングによる最大筋力100%以上の増大の報告(久野, 金岡2003年)

研究者	発表年	例数	性	年齢	期間	頻度	1RM 筋力
Frontera ¹⁴⁾	1988	12	男	60~72	12週	3日/週	膝伸展力↑107% 膝屈曲力↑227%
Fiatarone ¹⁾	1990	9	男女	90±1	12週	3日/週	膝伸展力↑174%
Charette ¹⁸⁾	1991	13	女	69±1	12週	3日/週	膝伸展力↑93% 膝屈曲力↑115%
Lexell ⁵⁾	1995	16	6男 10女	70~77	11週	3日/週	膝伸展力↑166% 膝屈曲力↑159%

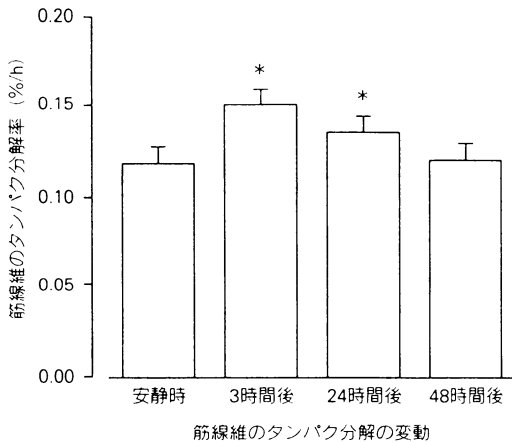


図9. 一過性のレジスタンストレーニングによる筋線維のタンパク分解の変動¹²⁾
*p<0.05(安静時レベルと3時間, 24時間, 48時間の比較)

はなかったとしている。Phillips たち¹⁶⁾は、一過性の高強度筋力トレーニングを若年者に負荷し、筋線維の蛋白合成と分解を48時間にわたり調べている。筋線維の蛋白分解は24時間後も18%の有意な増加を示し、48時間後に安静時のレベルに回復している(図9)。筋力トレーニングによる筋線維のダメージの増加や筋線維の蛋白分解の回復時間から、週4回以上の高強度筋力トレーニングの実施はトレーニング頻度の限界であると考えられる。

C. 高齢者における筋力トレーニングのトレーニングナビリティの限界因子

1) 筋力の限界

一般的に筋力の増大は、トレーニングの初期段階では神経系の要因が改善され、その後に筋肥大をとまなう筋力の増加¹⁷⁾がみられることが示されている(図10)。筋力のトレーニングナビリティの限界は、すなわち筋肥大の限界ということに置き換えることができる。高齢者においても筋力のトレーニングナビリティは、非常に高いことを示す報告もいくつかみられる(表4)。高齢者の下肢筋力のトレーニングナビリティの最大値は、Frontera たち¹⁸⁾が報告した膝屈曲力227%の増大であり、大腿四頭筋断面積と大腿部の全筋断面積はそれぞれ9%と11%

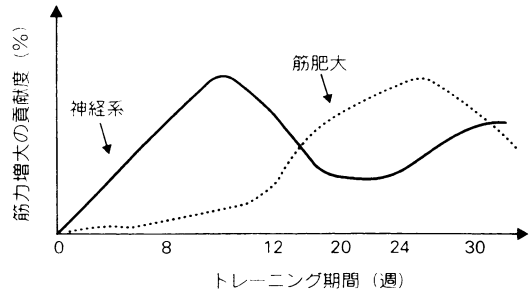


図10. 筋力トレーニング期間中の神経系要因と筋肥大要因の相互作用¹³⁾

ずつ筋肥大している。Ivey たち¹⁹⁾は、若年者と高齢者を対象に9週間にわたる大腿部の筋力トレーニングを週3回の頻度で実施した。この研究では、若年者と高齢者における筋肥大には、有意な差はみられなかった。一方、Welle たち²⁰⁾の報告では、若年者の膝屈曲筋群の筋肥大は、高齢者に比べて有意に高値を示している。しかしながら、膝伸展筋群の筋肥大に有意差は認めていない。これらの報告のトレーニング期間はそれぞれ9および12週間と、比較的短期間である。それに対して Morganti たち²¹⁾は、女性高齢者に1年間(52週間)にわたる長期の筋力トレーニングを週2回の頻度で実施し、6ヶ月と12ヶ月目の筋力を調べている。6ヶ月目と12ヶ月目の筋力の増大は、1RMの膝伸展力においてそれぞれ66%と74%であることを示している。このことは、間接的ながら筋力トレーニングを継続していくことは、高齢者であっても筋肥大のトレーニングナビリティを長期間有していることを示唆している。高齢者における筋力のトレーニングナビリティの限界は、若年者と同一である可能性があり、トレーニングの強度、期間および頻度による考えられる。

2) 筋線維タイプ別における筋肥大の限界

高齢者における筋力の低下は、とくに速筋線維の選択的な萎縮が大きな影響を及ぼしている。それゆえ、選択的に速筋線維が萎縮するのであれば、筋力トレーニングを実施して速筋線維を肥大させることが必要となる。高齢者の筋力トレーニングによる大腿部の筋線維タイプ別における増大率の変化を表5に示した。大腿部の遅筋線維および速

表5. 高齢者の高強度筋力トレーニングによる高齢者・大腿部の筋線維タイプ別における増大率(久野, 金岡2003年)

研究者	発表年	例数	性	筋線維タイプの増大	
				Type I	Type II
Larsson ¹⁹⁾	1982	6	男	↑ 39%	↑ 52%
Frontera ¹⁴⁾	1988	12	男	↑ 34%	↑ 28%
Charette ¹⁸⁾	1991	13	女	変化なし	↑ 20%
Taaffe ²⁰⁾	1997	11	男	↑ 17%	↑ 26%
Hikida ²¹⁾	2000	9	男	↑ 46%	II A: ↑ 34% II B: ↑ 52%

筋線維の増大は、筋力トレーニングをしたにもかかわらず変化がみられないとする Charette たち²²⁾の報告もみられる。しかしながら、その他の報告^{18, 23~25)}では、運動線維の増加が確認されている。Hikida たち²⁵⁾は、16週間の筋力トレーニングを不活動な高齢男性に週2回の頻度で実施した。トレーニング種目は、膝伸展、ダブルレッグプレス、ハーフスクワットであり、これらを6~8回×3セット行った。その結果、Type II A (34%)およびType II B(52%)線維が顕著な増加を示した。このように、高齢者においても筋力トレーニングは、筋線維の増加を引き起こす。Williamson たち²⁶⁾は、筋力トレーニングによる筋線維タイプの移行を調べた(図11)。この研究では、高齢男性7名に12週間の筋力トレーニングを週3回の頻度で、膝伸展運動を最大筋力(1RM)80%の負荷で3セット行った。その結果、筋線維タイプの有意な移行はみられなかった。したがって、高齢者の筋力トレーニングの効果における限界因子には、筋力トレーニングにともなう筋線維タイプ

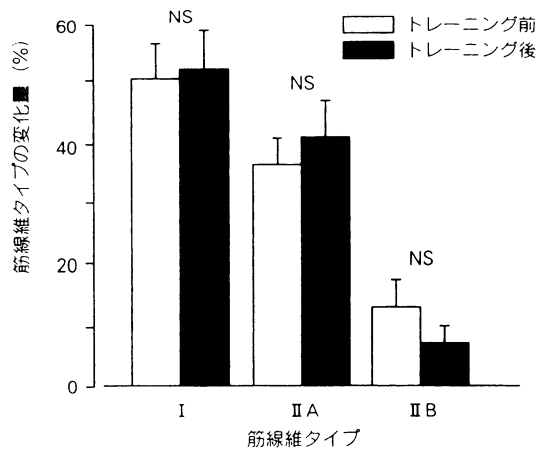


図11. 筋力トレーニングによる筋線維タイプの移行
NS: トレーニング前後の変化量に有意差なし²⁶⁾

の移行による貢献度は小さいと考えられる。

D. 遺伝的要因によるトレーナビリティの限界

1) 遺伝子多型の違いによる筋力の差

運動能力や筋力に遺伝的要因が関与しているこ

表6. 筋力と有意な関係を示した候補遺伝子(久野, 金岡2003年)

研究者	発表年	例数	性	年齢	遺伝子名	筋力測定	p 値
Seibert ²⁴⁾	2001	286	女	70~79	GDF8 マイオスタチン	股関節屈曲力 膝関節屈曲力	0.01 < 0.01
Roth ²⁵⁾	2001	494	男女	20~90	CNTF 神経栄養因子	コンセントリック 膝伸展/膝屈曲力 エキセントリック 膝伸展/膝屈曲力	< 0.05 < 0.05
Geusens ²⁶⁾	1997	501	女	70<	VDR ビタミンD受容器	握力 大腿四頭筋力	< 0.01 < 0.01
Van Pottelbergh ²⁷⁾	2001	273	男	71~86	COL1A1 タイプ1コラーゲンα1	握力 上腕二頭筋力	0.03 0.04
Folland ²⁸⁾	2001	33	男	18~30	ACE アンギオテンシン変換酵素	アイソメトリック 大腿部筋力の増加率	< 0.05

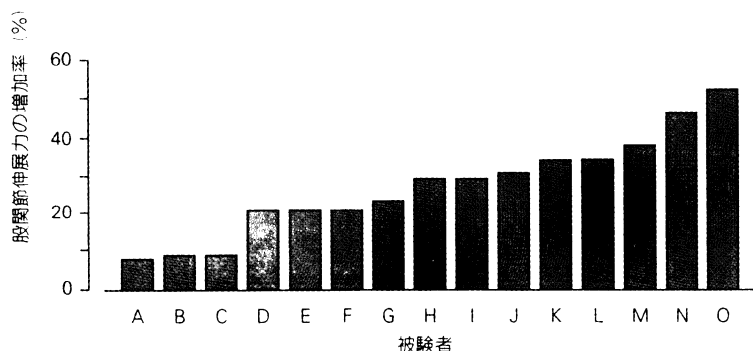


図12. 高齢者における筋力トレーニングによる股関節伸展力のトレーナビリティ(筆者ら, 未発表資料)

とは、双生児の研究などから明らかにされている。筋力と遺伝子多型の研究は1990年代から報告され始め、筋力と有意な関係がみられる候補遺伝子²⁷⁾の存在が確認されている²⁸⁻³²⁾(表6)。筋力トレーニングによる効果に個人差が生じることは、よく知られた事実である。図12に示すように、高齢者の筋力トレーニングにおいても個人差は表れる。筋力トレーニングのトレーナビリティとACE(アンギオテンシン変換酵素)遺伝子多型をFolland たち³²⁾は検討している。この研究では、18~30歳の健康な男子33名を対象に週3回の頻度で9週間にわたり筋力トレーニングを実施し、大腿四頭筋の増加率とACE 遺伝子多型との関係を調べている(図13)。その結果、アイソメトリック筋力の増加率とACE 遺伝子多型との間に有意な関係がみられたと報告している。このように、個人の筋力トレーニングのトレーナビリティは遺伝子多型に影響を受ける。遺伝子多型のタイプは一生変化するしないので、高齢者においても筋力トレーニングの限界因子の1つになると考えられる。

2) 遺伝子型の違いによる筋量の差

筋力トレーニングによる筋肥大と遺伝子多型との関係では、筋の成長の負の制御因子であるマイオスタチン遺伝子を検討した報告がある¹⁹⁾。この報告では、5名のマイオスタチン遺伝子(Lys153Arg; A/G)多型と9名のマイオスタチン遺伝子(A/A)多型を保有する高齢女性を対象に、筋力トレーニングによる大腿部の筋量の変化について検討している。筋力トレーニングの種目は膝

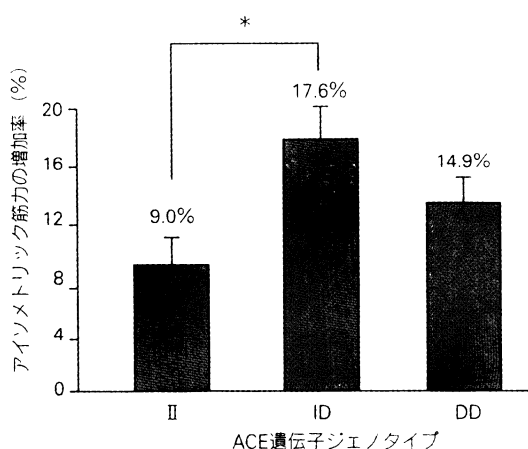


図13. 筋力トレーニングによる筋力の増加率とACE 遺伝子ジェノタイプの関係²⁸⁾
*p<0.05(ACE 遺伝子 II と ID の筋力の増加量の比較)

伸展運動であり、9週間にわたり週3回の頻度で、利き脚のトレーニングを実施している。その結果、マイオスタチン遺伝子の欠損(A/G)多型を保有する女性では68%もの筋肥大が生じ、A/A 多型の保有者と比べて明らかに有意な増加を示した。このように、筋力トレーニングに影響を及ぼす遺伝的な要因についても報告されはじめており、今後さらなる研究の進展が待たれている。

E. 高齢者の歩行能力を維持するための具体策

1) 加齢と大腰筋の筋量との関係

図14には、大洋村で共同で実施している運動教室に参加している高齢者(女性)の腹部MRIを示した。同年齢であっても、過去及び現在の生活習

慣(職業や運動歴)により, 退行性萎縮を予防できることが示されている。加齢による大腰筋横断面積の変化は, 男子では50歳代で初めて20歳代に比べて統計的に有意に減少し(20歳代31.2±4.1, 50歳代25.4±1.9, $p < 0.01$), さらにそれは60歳代でさらに進む傾向を示した(表7)。しかし興味深いことに, 60歳代前半, 後半および70歳代前半においては, 年代間の横断面積に統計的な差は認められなかった。しかしながら, 75歳以上では横断面積の低下がそれらの3群と比較して統計的に有意に低値を示した($p < 0.05$, 表2)。女性におい

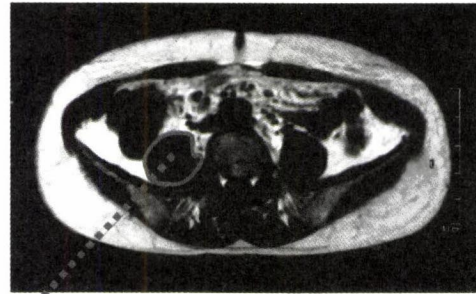
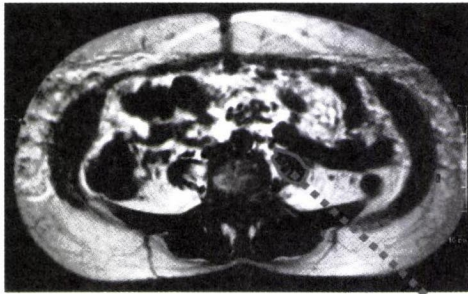
ても50歳代において20歳代に比べて統計的に有意に減少した(20歳代17.4±2.8, 50歳代12.9±2.9, $p < 0.01$)。その後も加齢にともない大腰筋横断面積は低下傾向を示した。なお, この大腰筋横断面積における低下率における性差はほとんどみられない傾向にあった。

2) 大腰筋の横断面積と歩行能力の関係

我々が大腰筋にとくに着目したのは, 大腰筋が歩行動作の主働筋の一つであるためである。大腰筋の減少率(20歳代に対して)は, 歩行に関する他の筋群, 例えば大腿部の筋群と比べてみると,

運動習慣なし

いきいき教室参加者



被験者 O (70歳)
大腰筋: 3.9 cm²
皮下脂肪: 270.2 cm²

大腰筋

被験者 I (70歳)
大腰筋: 18.28 cm²
皮下脂肪: 182.1 cm²

図14. 高齢者における筋力トレーニング実施習慣の有無と大腰筋 MRI⁴⁾

表7. 各年代および性別の股関節・大腰筋横断面積の値⁴⁾

男 性					女 性				
年齢 (歳)	n	筋断面積 (cm ²)	標準偏差	減少率 (%)	年齢 (歳)	n	筋断面積 (cm ²)	標準偏差	減少率 (%)
20~29	14	30.8	4.4	0	20~29	9	17.5	3.1	0
30~39	9	33.3	6	8.1	30~39	1	16.7		-4.6
40~49	6	25.2	6.4	-18.2	40~49	13	13.8	2	-21.1
50~59	15	21.0**	7	-31.8	50~59	97	11.4**	2.6	-34.9
60~64	27	19.1**	5.1	-38.0	60~64	140	11.0**	2.7	-37.1
65~69	75	18.3**	3.5	-40.6	65~69	131	11.1**	2.8	-36.6
70~74	79	16.1**	4.4	-47.7	70~74	87	10.3**	3.1	-41.1
75~79	11	14.9**	4	-51.6	75~79	44	8.5**	2.6	-51.4
80~	9	13.8**	3.2	-55.2	80~	10	8.9**	1.1	-49.1
合計	245				合計	532			

** $p < 0.01$, vs 20 ~ 29 歳

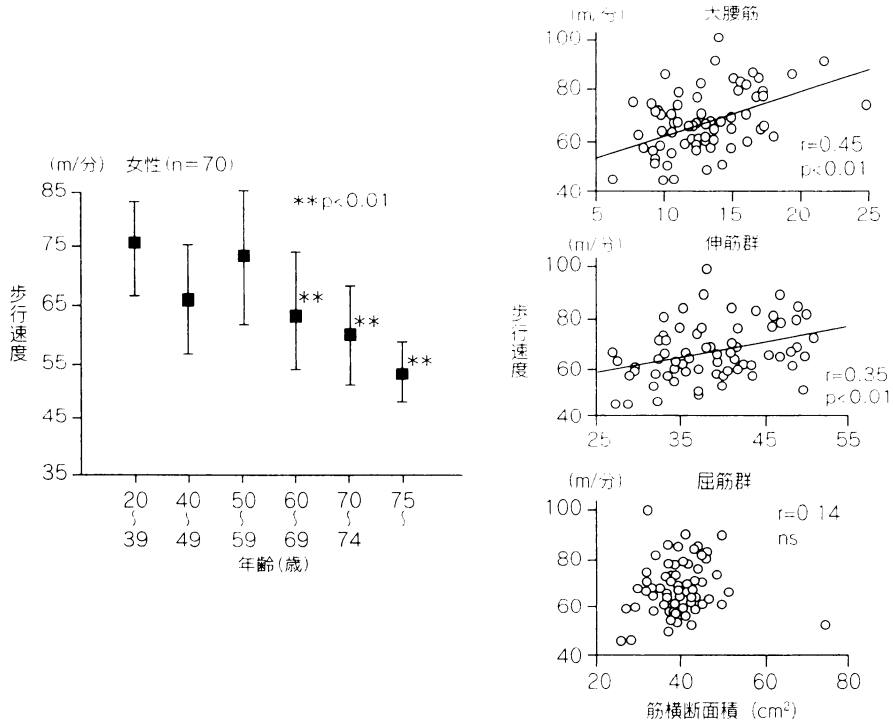


図15. 加齢による歩行速度の低下と下肢筋量との関係³⁵⁾

大腿部が70～80歳代で30～40%であることが報告されていることを考慮すると、加齢による低下度がより大きいことが分かる。とくに女性の70歳代前半では48.3%，70歳代後半では46.6%と20歳代に比べてほぼ半減に近い状態を示していた。したがって、大腰筋は加齢による影響を他の筋群に比べてもより強く受けるので、この筋量を維持することは、歩行能力に大きな影響を与えることを示唆するものである。さらに最近、仮説を支持する

データを我々は得ている。図15に示したように、大腰筋筋横断面積は大腰伸筋群とともに他の下肢筋群に比べてより強い関係を歩行速度との間に認め、この筋横断面積が大きいほど歩行速度が速い傾向にあるという結論が導き出された。これは、歩行速度が加齢に伴い減少するが、この減少は速度が歩幅と歩調(step rate)の積で得られるとすると、ほとんど歩幅の減少に依存するため、歩行速度の減少は歩幅の減少に依存すると結論できる。

表8. これまでの職業(ライフスタイル)と大腰筋横断面積との関係における典型別³³⁾

年齢(歳)	性別	大腰筋面積 (cm ²)	職業	職業の身体強度	期間(歳)	現在の身体活動状況
79	男	20.2	農業	高	30～63	特になし
78	男	23.1	営業	低	36～60	散歩 60～78歳週7回 20～30分
78	男	20.3	農業	高	24～60	クロッケー 60～78歳週7回 30分、散歩週7回 40分
53	女	9	主婦	低	現存まで	社交ダンス 42～53歳週1回 120分
55	女	14	製造業	高	38～54	水泳 50～55歳週2回 30分
69	女	5.5	内職	低	23～56	特になし
69	女	14.8	農業	高	19～68	水泳 68～69歳週3回 60分
82	女	9.3	営業	低	49～71	自転車 71～82歳週6回 60分
80	女	13.2	農業	高	22～50	クロッケー 65～75歳週2回、散歩週5回 60分

したがって、我々の結果は大腰筋及び大腿部伸筋群における筋量の低下がこの歩幅の減少をもたらしていることを明らかにしたことになる。そして、とくに大腰筋における筋量の維持が歩幅の維持に大きく貢献する。これは大腰筋の歩行中における役割が、脚を引き上げながら前方への押し出しであることから明白である。そして、加齢による筋の萎縮がより進行する高齢者の特徴として知られるいわゆる「すり足」の状態になることも予想される。さらに我々は、この仮説を横断的な研究により検証し、確認をしている³⁶⁾。この研究では、80歳以上の陸上などの高齢者アスリートを同年齢コントロールと比較した。高齢者アスリート群は、歩行速度における優位性をコントロール群に対して示したが、その優位性は歩幅の大きさで説明でき、その歩幅の優位性は大腰筋横断面積がより大きいことで説明が可能となった(図16)。

ここまでの結果を総括すると、生活機能と密接な関係にある歩行能力を、老化により低下させないために、あるいは低下したものを回復させるためには、股関節や大腿部、とくに大腰筋の筋量を増加させるような運動が必要となることが示唆された。残念ながら、ウォーキングではこの目的には適さないことが示唆されているので、股関節及び大腿部を刺激する筋力トレーニングが必要であ

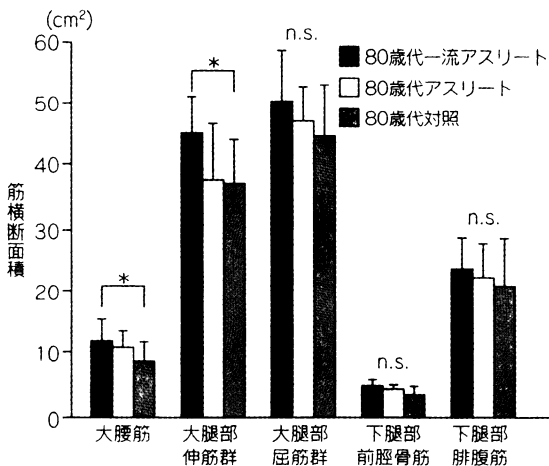


図16. 80歳代各群における大腰筋、大腿部および下腿部の筋横断面積³⁶⁾

* $p < 0.05$

ることが考えられる。この筋力トレーニングは、高齢者の場合週1回で筋量の現状維持が、週2回で筋量アップが期待される。

本総説に用いた研究成果の一部は、平成9～14年度にわたり実施された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)、平成11～16年度に実施される文部科学省科学技術振興調整費(代表 村上和雄)などにより実施されたものである。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 久野譜也. 高齢者の生活と運動. J Exerc Sci, (2000), **10**, 13-18.
- 2) 久野譜也. 筋力のエイジングの機構を探る, 山田茂他編, 骨格筋, NAP, (1997), 172-188.
- 3) Asmussen E. Environmental Physiology Elsevier Science. (1980), 419-428.
- 4) 久野譜也. 元気に歩くための筋肉の鍛え方. 岡田守彦他編, 高齢者の生活機能増進法—地域システムと具体的ガイドライン—, NAP, (2000), 46-55.
- 5) Vandervoort A A. Aging of the human neuromuscular system. Muscle Nerve, (2002), **25**, 17-25.
- 6) Larsson L, Sjodin B, and Karlsson J. Histochemical and biochemical changes in human skeletal muscle with age in sedentary males, age 22~65 years. Acta Physiol Scand, (1978), **103**, 31-39.
- 7) Essen-Gustavsson B, and Borges O. Histochemical and metabolic characteristics of human skeletal muscle in relation to age. Acta Physiol Scand, (1986), **126**, 107-114.
- 8) 5) Lexell J, Taylor C C, and Sjostrom M. What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. J Neurol Sci, (1988), **84**, 275-294.
- 9) 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), **53**, B415-423.
- 10) Fiatarone M A, Marks E C, Ryan N D, Meredith C N, Lipsitz L A, and Evans W J. High-intensity strength training in nonagenarians. Effects on skeletal muscle. JAMA, (1990), **13**, 3029-3034.
- 11) 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**, E422-427.
- 12) Yarasheski K E, Zachwieja J J, and Bier D M. Acute

- effects of resistance exercise on muscle protein synthesis rate in young and elderly men and women. *Am J Physiol.* (1993), **265**, E210-214.
- 13) Kenney W L. 運動処方指針第5版. 南光堂, (1997), **69**.
 - 14) 鯉坂隆一. 運動の安全基準. 松田光生他編. 地域における高齢者の健康づくりハンドブック. ナップ, (2001), 46-49.
 - 15) Roth S M, Martel G F, Ivey F M, Lemmer J T, Tracy B L, Hurlbut D E, Metter E J, Hurley B F, and Rogers M A. Ultrastructural muscle damage in young vs. older men after high-volume, heavy-resistance strength training. *J Appl Physiol.* (1999), **86**, 1833-40.
 - 16) Phillips S M, Tipton K D, Aarsland A, Wolf S E, and Wolfe R R. Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. *Am J Physiol.* (1997), **273**, E99-107.
 - 17) Deschenes M R, and Kraemer W J. Performance and physiologic adaptations to resistance training. *Am J Phys Med Rehabil.* (2002), **81**, S3-16.
 - 18) 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.
 - 19) Ivey F M, Roth S M, Ferrell R E, Tracy B L, Lemmer J T, Hurlbut D E, Martel G F, Siegel E L, Fozard J L, Metter E J, Fleg J L, and Hurley B F. Effects of age, gender, and myostatin genotype on the hypertrophic response to heavy resistance strength training. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* (2000), **55**, M641-648.
 - 20) 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**, M270-275.
 - 21) Morganti C M, Nelson M E, Fiatarone M A, Dallal G E, Economos C D, Crawford B M, and Evans W J. Strength improvements with 1 yr of progressive resistance training in older women. *Med Sci Sports Exerc.* (1995), **27**, 906-912.
 - 22) Charette S L, McEvoy L, Pyka G, Snow-Harter C, Guido D, Wiswell R A, and Marcus R. Muscle hypertrophy response to resistance training in older women. *J Appl Physiol.* (1991), **70**, 1912-1916.
 - 23) Larsson L. Physical training effects on muscle morphology in sedentary males at different ages. *Med Sci Sports Exerc.* (1982), **14**, 203-206.
 - 24) Taaffe D L, and Marcus R. Dynamic muscle strength alterations to detraining and retraining in elderly men. *Clin Physiol.* (1997), **17**, 311-324.
 - 25) Hikida R S, Staron R S, Hagerman F C, Walsh S, Kaiser E, Shell S, and Hervey S. Effects of high-intensity resistance training on untrained older men. II. Muscle fiber characteristics and nucleocytoplasmic relationships. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* (2000), **55**, B347-354.
 - 26) Williamson D L, Godard M P, Porter D A, Costill D L, and Trappe S W. resistance training reduces myosin heavy chain coexpression in single muscle fibers from older men. *J Appl Physiol.* (2000), **88**, 627-633.
 - 27) Rankinen T, Perusse L, Rauramaa R, Rivera M A, Wolfarth R B, and Bouchard C. The human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2001 update. *Med Sci Sports Exerc.* (2002), **34**, 1219-1233.
 - 28) Seibert M J, Xue Q, Fried L P, and Walston J D. Polymorphic variation in the human myostatin (GDF-8) gene and association with strength measures in the Women's Health and Aging Study II cohort. *J Am Geriatr Soc.* (2001), **49**, 1093-1096.
 - 29) Roth S M, Schragar M A, Fwrrell R E, Riechman S E, Metter E J, Lynch N A, Lindle R S, and Hurley B F. CNTF genotype is associated with muscular strength and quality in humans across the adult age span. *J Appl Physiol.* (2001), **90**, 1205-1210.
 - 30) Geusens P, Vandevyver C, Vanhoof J, Cassiman J, Boonen S, and Raus J. Quadriceps and grip strength are related to vitamin D receptor genotype in elderly nonobese women. *J Bone Miner Res.* (1997), **12**, 2082-2088.
 - 31) Van Pottelbergh I, Goemaere S, Nuytinck L, Paep A D, and Kaufman J M. Association of the type I collagen alpha1 S1 polymorphism, bone density and upper limb muscle strength in community-dwelling elderly men. *Osteoporos Int.* (2001), **12**, 895-901.
 - 32) Folland J, Leach B, Little T, Hawker K, Myerson S, Montgomery H, and Jones D. Angiotensin-converting enzyme genotype affects the response of human skeletal muscle to functional overload. *Exp Physiol.* (2000), **85**, 575-579.
 - 33) 久野譜也, 金 俊東, 石津政雄, 坂戸英樹, 西嶋尚彦, 松田光生, 勝田 茂, 岡田守彦: 加齢に伴う骨格筋萎縮とライフスタイルとの関係, *健康医科学*, (1998), **13**, 71-77.
 - 34) Kuno S, Itai Y and Katsuta S. Influence of endurance training on muscle metabolism during exercise in elderly men. *Adv Exerc Sports Physiol.* (1994), **1**, 51-56.
 - 35) 金 俊東, 久野譜也, 相馬りか, 増田和実, 足立和隆, 西嶋尚彦, 石津政雄, 岡田守彦. 加齢による下肢筋量の低下が歩行能力に及ぼす影響, *体力科学*, (2000), **49**, 589-596.
 - 36) 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.