

特集1 言語聴覚士に必要な運動生理学

レジスタンストレーニングの基礎理論

総説▶

谷口匡史

Masashi Taniguchi

市橋則明

Noriaki Ichihashi

要旨 レジスタンストレーニングは、骨格筋機能の維持・向上に不可欠である。安全かつ効果的なトレーニング処方には、まず筋力発揮の構成要素である骨格筋の構造的・神経的要因について理解する必要がある。また、筋力増強や筋肥大のためのトレーニング原則や原理が存在するため、これらの理解を深めることでトレーニング効果を最大限に引き出すことが可能となる。定量的な筋力・筋量測定法を活用し、トレーニング効果をモニタリングすることで対象者の状態把握やトレーニングプロトコルの変更に有効である。高齢者に対するトレーニングでは、低負荷高頻度による運動処方が推奨され、栄養療法との併用に高い効果が期待できる。

キーワード▶ 骨格筋, 筋力発揮, トレーニング

I. はじめに

全身の骨格筋は、人体の中で最も大きい臓器であり、可塑性に富む器官としても知られている。この骨格筋機能の維持・向上には、レジスタンストレーニング（以下、トレーニング）が必要不可欠であり、アスリートだけではなく中高齢者に対する健康増進においても中核的な運動プログラムの一つとなっている。本稿では、まず筋力発揮に影響を及ぼす因子について述べるとともに、トレーニングの原則・原理について整理する。また、トレーニング効果の評価方法について概説し、高齢者に対する筋力増強・筋肥大を目的としたトレーニング処方の実際について紹介したい。

II. 筋張力に影響する形態的・神経的要因

1. 形態的要因

骨格筋が発揮する最大筋力は、筋横断面積と正の相関関係を認める。当然ながら、大きな筋量を持つ骨格筋は、筋力発揮に優れていることになる。筋横断面積は、筋線維の配列方向により解剖学的断面積と生理学的断面積に分類される。解剖学的断面積（anatomical cross-sectional area：ACSA）は筋の長軸方向に直交する面、生理学的断面積（physiological cross-sectional area：PCSA）は筋線維の走行方向に直交する面を指す（図1）。紡錘筋では、筋の長軸方向と筋線維の走行方向が一致するため、ACSAとPCSAは等しい面積を持つ。一方、羽状筋では、筋線維が筋の長

軸方向に対して一定の角度（羽状角）をもって走行するため、PCSAはACSAよりも大きな断面積を持つことになる。すなわち、ACSAが同じであっても、羽状筋は紡錘筋よりも大きなPCSAを有するため、筋力発揮に対して有利な構造を持つ筋であるといえる。それに対して、紡錘筋は羽状筋よりも長い筋線維長を持つことが特徴である。筋線維は、筋収縮の最小単位である筋節（サルコメア）が連結した構造であり、筋節数に比例して筋線維長が長くなる。筋収縮時には、これらの筋節間が同時に短縮するため、筋線維長の長い筋ほど単位時間当たりの筋収縮速度が速くなる。つまり、羽状筋に比べて筋線維長の長い紡錘筋は、筋収縮速度に優れた構造を持つ筋であるといえる。図2に膝関節周囲筋におけるPCSAおよび筋線維長を示す。代表的な羽状筋である外側広筋は、PCSAが大きく筋線維長が短い、紡錘筋である縫工筋はPCSAが小さいものの筋線維長が長いという特徴を持つことがわかる¹⁾。

2. 神経学的要因

筋収縮の発現およびその調整は、運動ニューロンからの支配を受け、運動単位の動員や発火頻度、運動単位の活動時相といった3つの要因に依存する（図3）。一本の筋線維は、活動閾値以上の刺激によって収縮する「全か無かの法則」に従い、動員させる運動単位数を増加させることで筋張力を増大させる（recruitment）。この調整機構では、小さな運動単位から順に動員され、筋張力を増大させるために大きな運動単位の活動が必要となる。これはサイズの原理と呼ばれる。筋線維組成についての詳細は割愛するが、一般に知られる遅筋線維（Type I）は運動単位が小さく、

京都大学大学院医学研究科人間健康科学系専攻

[連絡先] 谷口匡史：京都大学大学院医学研究科人間健康科学系専攻（〒606-8507 京都府京都市左京区聖護院川原町53）

TEL：075-751-3964 FAX：075-751-3964 E-mail：taniguchi.masashi.7a@kyoto-u.ac.jp

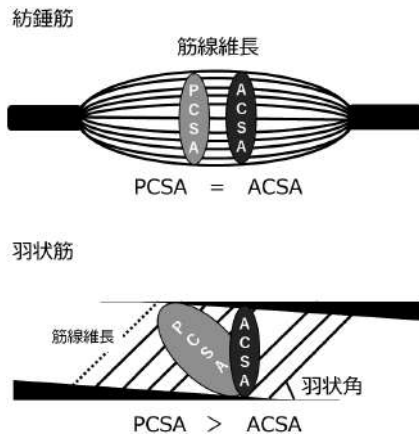


図1 解剖学的断面積と生理学的断面積

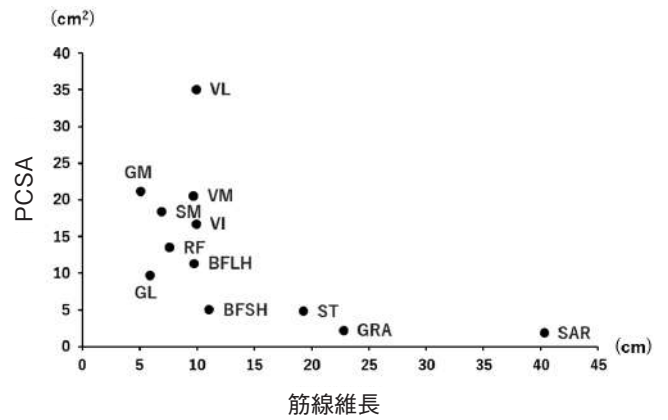
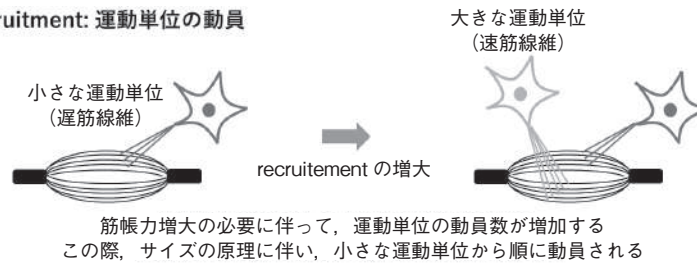


図2 膝関節に作用する筋群における生理学的断面積(PCSA)と筋線維長

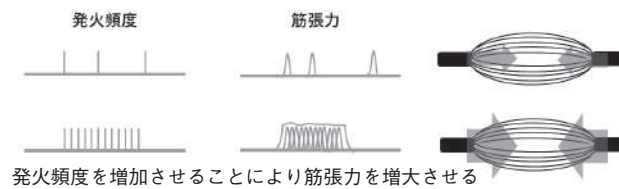
RF: 大腿直筋, VL: 外側広筋, VI: 中間広筋, VM: 内側広筋, SM: 半膜様筋, ST: 半腱様筋, BFLH: 大腿二頭筋長頭, BFSH: 大腿二頭筋短頭, GRA: 薄筋, SAR: 縫工筋, GM: 腓腹筋内側頭, GL: 腓腹筋外側頭

(文献1)より作図

① recruitment: 運動単位の動員



② rate coding: 運動ニューロンの発火頻度



③ synchronization: 運動単位の活動タイミングの同期化・非同期化

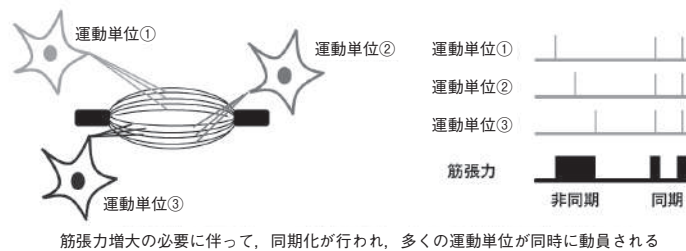


図3 神経系の要因—運動ニューロンによる調整機序—

速筋線維 (Type II) は大きな運動単位を有するため、遅筋線維は持久性、速筋線維は大きな筋張力の発揮に優れた特徴を持つことを意味している。また、筋張力は運動ニューロンからの刺激頻度、つまり発火頻度 (rate coding) の増減によって調整される。発火頻度を増加させることにより単収縮後の弛緩が生じる前に次の収縮が生じるため、強縮

と呼ばれる大きな筋張力を起こすことが可能となる。さらに、これらの運動単位の活動タイミングが同期化 (synchronization) されることによって大きな筋張力の発揮を可能にする。重量物を挙上させた際に腕が震えるのはこのためであり、筋張力の発揮に有利である反面、筋疲労が生じやすい欠点がある。そのため、大きな筋張力を必要とし

表1 膝関節屈筋群におけるトルク寄与率

	PCSA (cm ²)	モーメントアーム (cm)	固有筋力指数 (kg/cm ²)	発揮トルク (Nm)	寄与率 (%)
半腱様筋	4.8	4.1	5.0	9.7	9.2
半膜様筋	18.4	3.8	5.0	34.3	32.5
大腿二頭筋長頭	11.3	2.5	5.0	13.9	13.2
大腿二頭筋短頭	5.1	1.8	5.0	4.5	4.2
縫工筋	1.9	2.1	5.0	1.9	1.8
薄筋	2.2	3.1	5.0	3.4	3.2
腓腹筋内側頭	21.1	2.5	5.0	25.9	24.6
腓腹筋外側頭	9.7	2.5	5.0	11.9	11.3

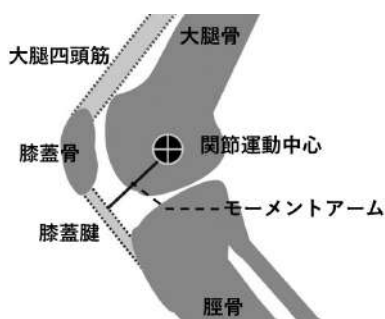


図4 関節構造とモーメントアーム

膝関節におけるモーメントアームは、大腿骨内の関節運動中心から大腿四頭筋腱に対する垂線までの距離として定義される。

ない場合には、運動単位の活動タイミングをずらすこと（非同期化）により、滑らかに一定の筋張力を発揮し続けるように調整されている。

Ⅲ. 関節トルクに影響する要因

筋力とは、関節運動として生じる回転モーメント、すなわち関節トルクの大きさを評価する指標である。この関節トルクは、形態的・神経的要因によって発揮される筋張力とモーメントアームの積によって決定される。モーメントアームは、回転運動の支点となる関節運動中心から筋または腱の張力作用線までの距離として定義される（図4）。図5に、膝関節屈曲30度、内外旋中間位における膝関節周囲筋のモーメントアームの大きさを示した²⁾。膝関節屈曲モーメント作用を持つ筋の中では、半腱様筋が最も大きなモーメントアームを持つことが確認できる。つまり、膝関節屈曲トルクを発揮するためには、構造上、半腱様筋が最も効率的な筋であるといえる。しかしながら、上述の通り、発揮トルクは、筋張力（構造的・神経的要因）とモーメントアームの積で求められるため、各筋の筋張力を考慮する必要がある。例えば、膝関節屈曲に作用する共同筋のうち、各筋がそれぞれの程度、発揮トルクに貢献しているかを考えてみたい。先行研究を参考に筆者らが独自に各筋の

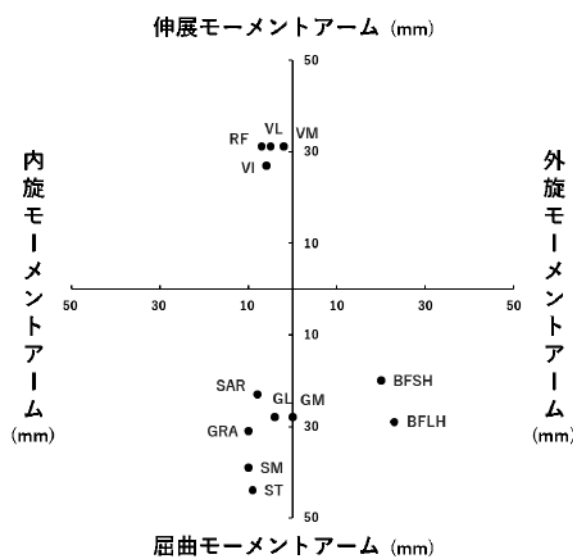


図5 膝関節に作用する筋群のモーメントアーム

膝関節屈曲30度位、内外旋中間位のモーメントアーム。

RF：大腿直筋，VL：外側広筋，VI：中間広筋，VM：内側広筋，SM：半膜様筋，ST：半腱様筋，BFLH：大腿二頭筋長頭，BFSH：大腿二頭筋短頭，GRA：薄筋，SAR：縫工筋，GM：腓腹筋内側頭，GL：腓腹筋外側頭

(文献2)より改変引用)

PCSA と固有筋力指数（神経的要因の指標）、モーメントアームの積を算出し、関節トルクを100%とした場合に各筋がどの程度、関節トルクに貢献しているのかを示す寄与率を求めた（表1）。その結果、膝関節屈曲30度位から最大屈曲トルクを発揮した際には、半膜様筋の寄与率が約32%を占め、膝関節屈筋群の中で発揮トルクに最も貢献しており、半腱様筋は約9%の寄与率しか持たないことがわかる。このように発揮される関節トルク（筋力）を考えるうえで、筋張力に関わる要因とモーメントアームの両方を考える必要がある。ただし、モーメントアームは、関節角度とともに変化するため、これらの寄与率は関節角度によって異なることに注意が必要である。

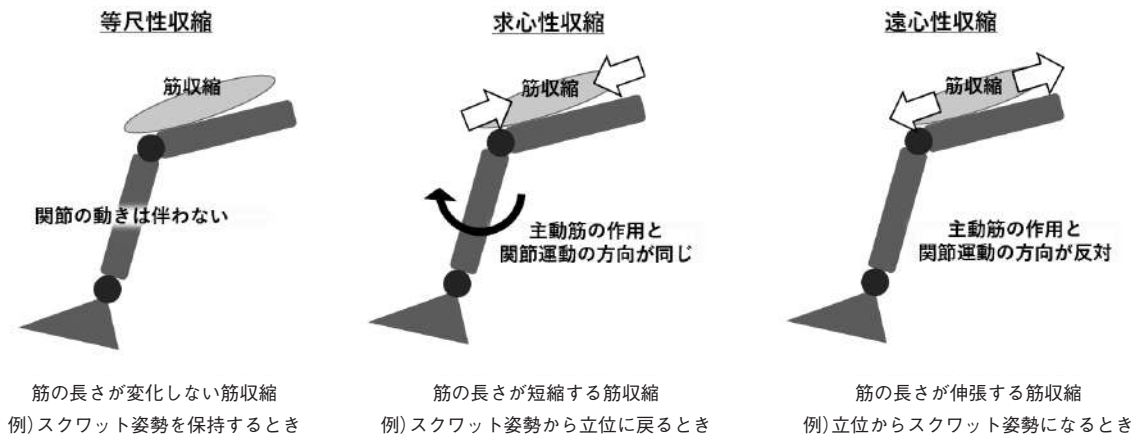


図6 筋収縮様式の種類

表2 トレーニングを構成する10要素

① Muscle action (収縮様式)
② Loading (負荷強度)
③ Volume (運動量)
④ Exercise selection (運動様式)
⑤ Exercise order (運動順序)
⑥ Rest periods (休息時間)
⑦ Repetition speed (運動速度)
⑧ Frequency (頻度)
⑨ Muscle failure (限界点)
⑩ Free weight and machines (フリーウェイトかマシンか)

(文献3, 4)より引用)

IV. トレーニングにおける原則と原理

1. 過負荷の原則

過負荷の原則とは、トレーニング強度が通常用いている負荷よりも強くなければ、筋力増強効果を期待できないという原則である。トレーニングを処方するための構成要素として10個に分類されているが(表2)^{3, 4)}、その中でも負荷強度や運動量、頻度は過負荷の原則を満たすための必要条件となる重要な要素である。まず、負荷強度は最大挙上重量(1-repetition maximum; 1-RM)の60%以上の高負荷設定が推奨されている³⁾。高負荷トレーニングでは、8~12回の繰り返しを1セットとし、それ以上の回数を反復できる場合には負荷強度を漸増させる。トレーニング(筋力増強)が進むにつれ、適宜、強い負荷強度へ変更しなければ、過負荷の原則に従っていないことになる。また、トレーニング早期では、1回のトレーニング当たり3セット程度の実施が推奨されている。運動量の指標として、トレーニング時の負荷強度と反復回数の積算をセット数の累計で算出するトレーニングボリュームがある。例えば、80% 1-RMにて10回の反復回数、3セットで構成された高

負荷低頻度トレーニングと40% 1-RMにて20回の反復回数、3セットに設定した低負荷高頻度トレーニングでは、同じトレーニングボリュームを持つことになる。近年、低負荷強度であっても反復回数を増やすことにより過負荷の原則を満たすことで、高負荷低頻度トレーニングと同等の筋力増強・筋肥大効果を認めることが報告されている⁵⁾。また、運動頻度について、週2~3回の実施が推奨されている。トレーニングによる疲労回復の期間が必要であり、必ずしも運動頻度を増加させることがトレーニング効果を最大化する訳ではない。Schoenfeldら⁶⁾は、1日のセット数と1週間当たりのトレーニング日数を組み合わせた週間セット数が9セットを満たせば、高い筋肥大効果が得られることを示している。このように負荷強度や運動量、頻度といったトレーニング構成要素を考慮し、過負荷の原則を満たすトレーニング条件を設定することでトレーニング効果を最大限に引き出すことが可能となる。

2. 特異性の原則

特異性の原則とは、ある種的能力は同類の運動を用いたトレーニングによって効果的に向上させることができるという原則である。トレーニングを構成する要素のうち、収縮様式や運動様式、運動速度がこれに該当する。筋の収縮様式として、等尺性・求心性(短縮性)・遠心性(伸張性)収縮がある(図6)。一定の収縮様式でのみトレーニングを実施した場合、その収縮様式での筋力増加率は他の収縮様式に比べて高い増加率を示す。これが収縮様式による特異性の原則である。例えば、等尺性トレーニングは、関節運動を伴わないトレーニング方法であるが、日常生活場面では求心性または遠心性収縮による動作が多いため、特異性の原則の観点から考えると、等尺性トレーニングによる効果は生活への汎化には不向きともいえる。また、ジャンプ高を向上させたい場合を考えると、ジャンプ練習を繰り返すトレーニングは、筋力トレーニング単独の効果よりも高くなる。これが動作様式による特異性の原則であり、ある



図7 徒手筋力計による等尺性筋力の測定

下腿遠位部に徒手筋力計を置き、ベルトで固定する。対象者は、床に足底が接しないように座位を取り、膝関節屈曲90度位となるように肢位を調整する。また、最大筋力発揮時には、徐々に最大筋力となるように声掛けを行い、体幹による代償がないように注意することで正確な筋力測定が可能である。

動作の能力を増加させたいければ、その動作でのトレーニングが最も効率的であることを意味する。運動速度においても同様であり、速い速度での筋力向上が必要であれば、それ相応の速さでのトレーニング設定が効果的である。

3. バリエーションの原則

バリエーションの原則とは、トレーニング効果をより向上させるために経時的にトレーニングの構成要素を変化させる必要があることをいう。一般的なトレーニングプログラムの変更として、負荷強度や運動量を期間毎に変化させるピリオダイゼーションがある。ピリオダイゼーションには数種類のプログラム設定があり、線形・リバース形、波状が代表的である。古典的な線形ピリオダイゼーションは、初期に低負荷高頻度トレーニングを行い、徐々に高負荷低頻度トレーニングへ移行するプログラムであり、リバース形はその逆を指す。一般的に線形はパワー系、リバース形は筋持久力に対する筋力増強効果が高い。波形ピリオダイゼーションは、さまざまな負荷強度をランダムな順番で繰り返すプログラムであり、他の手法に比べて高い有効性が報告されている⁷⁾。これらのエビデンスは、筋機能のトレーニングプログラムに対する適応が比較的短期間で生じて

いることを示唆しており、運動順序や休息时间の変更などさまざまな視点からプログラムを構成することが望ましい。

V. 筋力・筋量の評価方法とトレーニング効果

1. 最大筋力の評価方法

臨床場面において最も使用される筋力評価法は徒手筋力テスト (manual muscle testing : MMT) である。筋収縮がみられない場合を0、最大抵抗に抗うことができる場合を5とした6段階で評価するスケールである。MMT 0から、重力に抗して関節の挙上保持が可能な状態を示すMMT 3までの判定基準は明確であり、信頼性が高い一方、4以上の評価は検査者の主観に委ねられる部分があり、信頼性に乏しい。この問題に対して、徒手筋力計 (hand held dynamometer : HHD) は安価で定量的な測定が可能な機器である。一般的にHHDは等尺性筋力の測定に用いられ、機器を十分に固定した状態での測定再現性は高い(図7)。測定値はkgまたはN(ニュートン)として表示されるが、 $1\text{ kg}=9.8\text{ N}$ であるため、換算可能である。また、筋力測定の際、必ず測定位置(HHDを当てる位置)から関節中心までの距離(アーム長)を計測しておく。筋力、つまり関節トルクは、Nmとして表記するため、測定値(N)にアーム長の積算を求め、さらに体格の影響を補正するために体重で除することでNm/kgに換算する必要がある。これにより、対象者間の筋力を比較することが可能となる。

2. 骨格筋量の評価方法

筋力評価は、上述の通り、形態的・神経的要因や関節角度などさまざまな要因の影響を受ける。その中でも筋形態は主要な決定因子であるため、トレーニング効果の評価指標とされることが多い。また、筋力測定時に疼痛を有することの多い高齢者や有疾患患者でも、安全に評価できる利点がある。骨格筋評価の主流は画像法であり、磁気共鳴画像法(magnetic resonance imaging : MRI)やコンピュータ断層撮影(computed tomography : CT)、二重エネルギーX線吸収測定法(dual energy X-ray absorptiometry : DXA)のほか、超音波Bモード画像法が使用される。また、生体電気インピーダンス法(bioelectrical impedance analysis : BIA)は、体内に微弱な電流を流した際に生じる電気抵抗値を計測することによって体組成を推定する方法であり、BIA法もまた臨床現場に普及している筋量評価法の一つである。ここでは、非侵襲的かつ簡便な測定方法として、超音波法とBIA法の評価方法について紹介したい。

超音波法では、超音波画像診断装置のB(brightness)モード法より得られた画像から筋厚を計測することができる。図8は大腿中央部の筋厚を示しており、皮下脂肪と区別して筋膜から大腿骨までの距離を大腿直筋と中間広筋の和を

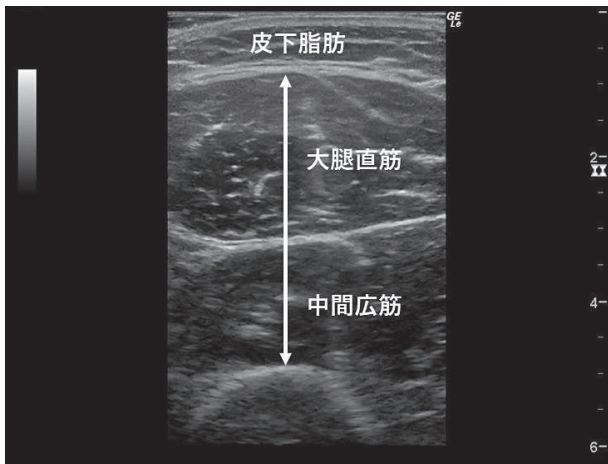


図8 大腿中央部における筋厚測定

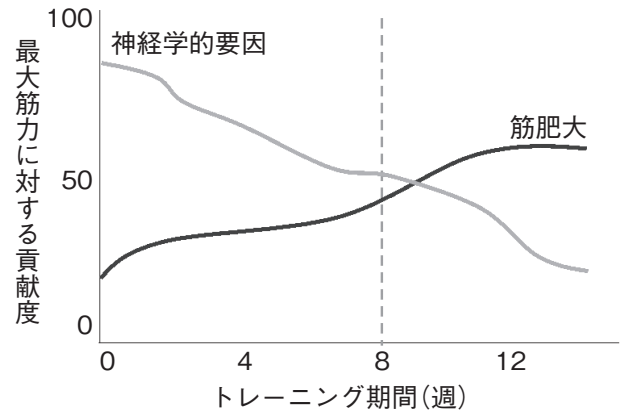


図10 最大筋力の向上に対する構造的・神経的要因の経時的変化
トレーニング開始直後には、まず神経系の適応が起こり、最大筋力の増加に寄与する。その後、長期のトレーニングによって、筋肥大といった筋の形態的变化による貢献度が増加する。

(文献9)より改変引用)

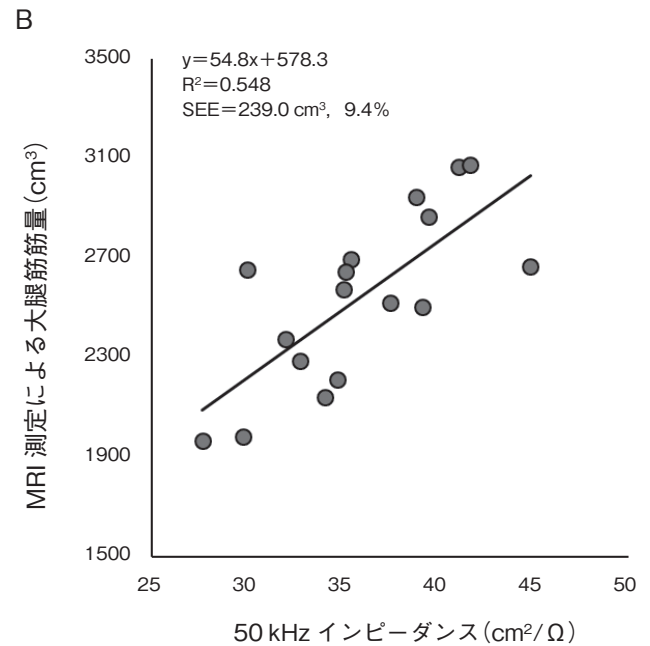
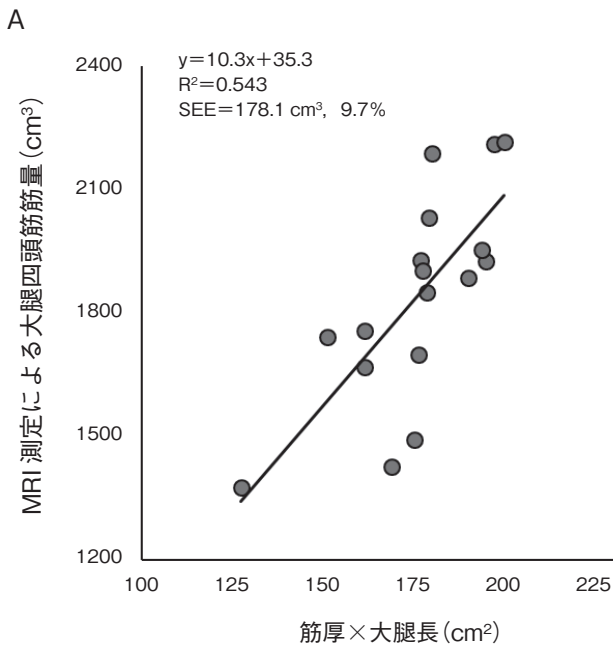


図9 筋厚およびBIA法による筋量推定

A：筋厚による大腿四頭筋筋量の推定式，B：BIA法による大腿筋量の推定式

※ SEE；standard error of estimation (標準推定誤差)

大腿四頭筋の筋厚として計測することが多い。この筋厚と大腿長を乗じた筋厚指数は、MRIより算出された大腿四頭筋の筋量と高い関連性を認めている(図9-A)。また、BIA法は、多周波数帯の生体電気インピーダンスから体組成を推定するものが主流となり、50 kHzといった単周波BIAに比べて筋量の推定精度が向上している。近年、限局部位に対するBIA法も確立されつつあり、四肢だけでなく、大腿部や下腿部といったセグメント毎の筋量評価が可能となっている。筆者ら⁸⁾は、BIA法を用いて計測したインピーダンス指標がMRIで計測した大腿筋量を高い精度で推定できることを検証している(図9-B)。超音波法では、個別

筋の評価に適しているのに対し、BIA法では、大腿部や下腿部といった部位毎の筋萎縮や筋肥大の評価に有用であるため、評価対象となる筋や部位によって適切な測定手段を選択すると良い。

3. トレーニングによる構造的・神経的要因に対する効果

筋力増強を目的とした高負荷のトレーニングを行うことにより開始後から最大筋力が向上していく。トレーニング初期における筋力増強効果は、神経性要因による影響が大きいことが知られている(図10)。これは神経系の賦活により単位断面積当たりの筋力が増加していることに起因し、筋肥大といった構造的変化はそれに続いて生じる⁹⁾。最近

のレビュー論文においても¹⁰⁾、筋肥大効果を得るためには最低6週間以上のトレーニング期間が必要とされていることから、それまでの間は神経適応による貢献度が高いと考えられる。

VI. 高齢者に対するトレーニングの実際

1. 高齢者の筋力低下と筋萎縮

加齢に伴う進行性かつ全身性の身体機能低下および筋量が減少した状態をサルコペニアとして定義される。サルコペニアは、生命予後悪化のリスクファクターともされているため¹¹⁾、高齢者の筋力低下や筋萎縮に対する予防・改善の取り組みは非常に重要である。高齢期の筋力低下は1年間で2.5~4%低下、筋量は0.5~1%低下するとされ¹²⁾、これらは上肢筋よりも下肢筋においてその変化が大きい。一方、下肢筋における筋萎縮の進行程度は異なり、大腿四頭筋の筋萎縮が著しい¹³⁾。とりわけ、大腿四頭筋の筋力や筋量は、歩行機能や日常生活機能に大きく影響するため、高齢者が重点的に維持向上を図る必要性の高い筋といえる。

2. 低負荷高頻度トレーニング

高齢者における高負荷低頻度トレーニングと低負荷高頻度トレーニングの筋力や筋肥大効果を比較したシステムティックレビューでは、同程度の効果を有することが示されている¹⁴⁾。低負荷高頻度トレーニングは、高齢期に多い心血管系障害や関節障害を有するものであっても安全に実施できる点において有用な点であるといえる。本研究室では、低負荷高頻度トレーニングの処方例として、大腿四頭筋に対する30% 1RMの負荷強度、8回12セット、週3回、8週間のトレーニング介入は、高負荷低頻度トレーニング(80% 1RM、8回3セット)と同程度の筋力増強・筋肥大効果を認めることを報告している¹⁵⁾。また、筆者らは1回のトレーニング直後に生じる一過性筋腫脹の程度が6週間後に生じた筋肥大の程度を予測することを明らかにした¹⁶⁾。この結果は、トレーニング後に生じる筋腫脹は筋肥大のための必要条件であることを示しており、トレーニングには筋腫脹が生じる以上の負荷設定が必要といえる。この筋腫脹は、トレーニングによる筋へのメカニカルストレスや代謝ストレスによる変化を反映するため¹⁷⁾、筋肥大に必要なバイオマーカーとされている¹⁰⁾。しかしながら、高齢者を対象として、最大筋力の10%に当たる低負荷強度でトレーニング介入を行った自験データは、12週間後の筋肥大効果を認めなかった¹⁸⁾。現在のところ、高齢者においてトレーニングによる筋肥大効果をもたらすための必要最低条件は、30% 1RM以上の負荷強度かつ筋腫脹が生じる負荷量を想定している。

3. トレーニングと栄養療法の併用効果

加齢による筋量低下の予防・改善には、タンパク質摂取

が必須であることは周知の事実であり、高齢期のタンパク質摂取量は1.0~1.5 g/kg/日が推奨される¹⁹⁾。ただし、タンパク質の摂取に加えてトレーニングを併用しなければ、筋力増強・筋肥大効果を得ることができない²⁰⁾。また、筋細胞や神経細胞に受容体が存在するビタミンDは、加齢とともに紫外線による皮膚での産生能力が低下し、結果的に筋線維径の減少を引き起こす。実際、ビタミンDの摂取とトレーニングの併用による筋力増強・筋肥大効果もまた確認されている²¹⁾。それゆえ、高齢期には、タンパク質とビタミンDの摂取に加え、低負荷高頻度トレーニングとの併用により効果的な筋力増強・筋肥大効果をもたらすことが期待される。

VII. おわりに

筋力発揮の構成要素である骨格筋の構造的・神経的要因およびトレーニング原則・原理の理解は、効率的な筋力増強・筋肥大効果のためのトレーニング処方に必要な不可欠である。また、定量的な筋力・筋量測定法を活用し、トレーニングによる効果を確認することは、対象者の状態把握やトレーニングプロトコルの変更に有効である。最後に、本稿が日常診療で対象にすることの多いであろう高齢者に対するトレーニング処方のための一助となれば幸いである。

文献

- 1) Ward SR, Eng CM, Smallwood LH, et al : Are current measurements of lower extremity muscle architecture accurate? Clin Orthop Relat Res, 467 : 1074-1082, 2009.
- 2) Buford WL Jr, Ivey FM Jr, Nakamura T, et al : Internal/external rotation moment arms of muscles at the knee : moment arms for the normal knee and the ACL-deficient knee. Knee, 8 : 293-303, 2001.
- 3) American College of Sports Medicine : American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. Med Sci Sports Exerc, 41 : 687-708, 2009.
- 4) Schoenfeld BJ : The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. J Strength Cond Res, 24 : 2857-2872, 2010.
- 5) Schoenfeld BJ, Grgic J, Ogborn D, et al : Strength and Hypertrophy Adaptations Between Low- vs. High-Load Resistance Training : A Systematic Review and Meta-analysis. J Strength Cond Res, 31 : 3508-3523, 2017.
- 6) Schoenfeld BJ, Ogborn D, Krieger JW : Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass : A systematic review and meta-analysis. J Sports Sci, 35 : 1073-1082, 2017.
- 7) Newton RU, Hakkinen K, Hakkinen A, et al : Mixed-methods resistance training increases power and strength of young and older men. Med Sci Sports Exerc, 34 : 1367-1375, 2002.
- 8) 谷口匡史, 山田陽介, 八木優英, 他 : 多周波生体電気インピーダンス法による大腿筋量および大腿四頭筋量の推定モ

デルの確立. 第 25 回基礎理学療法学会, 2020.

- 9) Kraemer WJ, Fleck SJ, Evans WJ : Strength and power training : physiological mechanisms of adaptation. *Exerc Sport Sci Rev*, 24 : 363-397, 1996.
- 10) Damas F, Libardi CA, Ugrinowitsch C : The development of skeletal muscle hypertrophy through resistance training : the role of muscle damage and muscle protein synthesis. *Eur J Appl Physiol*, 118 : 485-500, 2018.
- 11) Kelley GA, Kelley KS : Is sarcopenia associated with an increased risk of all-cause mortality and functional disability? *Exp Gerontol*, 96 : 100-103, 2017.
- 12) Mitchell WK, Williams J, Atherton P, et al : Sarcopenia, dynapenia, and the impact of advancing age on human skeletal muscle size and strength : a quantitative review. *Front Physiol*, 3 : 260, 2012.
- 13) Ikezoe T, Nakamura M, Shima H, et al : Association between walking ability and trunk and lower-limb muscle atrophy in institutionalized elderly women : a longitudinal pilot study. *J Physiol Anthropol*, 34 : 31, 2015.
- 14) Csapo R, Alegre LM : Effects of resistance training with moderate vs heavy loads on muscle mass and strength in the elderly : A meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*, 26 : 995-1006, 2016.
- 15) Ikezoe T, Kobayashi T, Nakamura M, et al : Effects of low-load, higher-repetition versus high-load, lower-repetition resistance training not performed to failure on muscle strength, mass, and echo intensity in healthy young men : a time-course study. *J Strength Cond Res*, 2017.
- 16) Hirono T, Ikezoe T, Taniguchi M, et al : Relationship Between Muscle Swelling and Hypertrophy Induced by Resistance Training. *J Strength Cond Res*, 2020.
- 17) Taniguchi M, Yamada Y, Ichihashi N : Acute effect of multiple sets of fatiguing resistance exercise on muscle thickness, echo intensity, and extracellular-to-intracellular water ratio. *Appl Physiol Nutr Metab*, 45 : 213-219, 2020.
- 18) 荒木浩二郎, 池添冬芽, 田中浩基, 他 : 最大等尺性筋力の 10% を負荷とした等張性低強度筋力トレーニングの介入効果 : 健常高齢者に対するランダム化比較試験. 第 52 回日本理学療法学会, 2017.
- 19) Van Elswyk ME, Weatherford CA, McNeill SH : A Systematic Review of Renal Health in Healthy Individuals Associated with Protein Intake above the US Recommended Daily Allowance in Randomized Controlled Trials and Observational Studies. *Adv Nutr*, 9 : 404-418, 2018.
- 20) Liao CD, Tsao JY, Wu YT, et al : Effects of protein supplementation combined with resistance exercise on body composition and physical function in older adults : a systematic review and meta-analysis. *Am J Clin Nutr*, 106 : 1078-1091, 2017.
- 21) Antoniak AE, Greig CA : The effect of combined resistance exercise training and vitamin D3 supplementation on musculoskeletal health and function in older adults : a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*, 7 : e014619, 2017.