筋力増強の理論

Theory of Muscle Strengthening

津田英一*

Eiichi Tsuda

Key words : 骨格筋／筋力／筋力増強

要旨

骨格筋は身体運動を行うための最終的な出力器官としての役割を担っている。その最小単位は筋原線維を構成する筋節であり、収縮タンパク質であるミオシンとアクチン間で滑走が生じることで筋は収縮する。筋に発生する張力はその生理的断面積と、筋収縮速度はその筋長と相関し、筋の基本的な機能的特性を決定づける。臨床的に測定される筋力は、関節運動によって発生するモーメントによって提示されることが多く、筋張力以外にも関節の構造や屈曲角度の影響を受ける。筋力増強にはさまざまな原則や特異性が存在するため、それらを十分理解したうえで処方することが効率よく増強効果を得るために必要である。

はじめに

医学の祖 Hippocrates は、重い物を持ち上げると力がつき体が逞しくなるとし、古代より筋力増強訓練が治療として用いられてきた。現代では、多くの基礎研究によりそのメカニズムが科学的に解明され、リハビリテーションにおいても欠かすことのできない要素として広く行われている。本稿では、筋力増強訓練を理解するうえで基本となる骨格筋の構造から筋収縮のメカニズム・様式、筋力やその増強効果に影響する因子について解説する。

骨格筋の構造

筋は筋細胞あるいは筋線維と呼ばれる細胞により構成される (図 1)。骨格筋の筋細胞は筋鞘と呼ばれる細胞膜で覆われ、さらにその外周を基底膜

が覆っている。基底膜と細胞膜の間には単核の衛星細胞が存在し、骨格筋の発達や再生に関係している。筋細胞は複数の核を有し、細胞質内には筋原線維、T 管、筋小胞体、ミトコンドリアなどが含まれる。筋原線維は筋の機能である筋収縮を担う最も重要な構成体である。筋原線維は主に太いフィラメントを形成するミオシンと、細いフィラメントを形成するアクチンの 2 種類の収縮タンパク質からなる。筋収縮の最小単位は筋節 (サルコメア) と呼ばれ、両端にある Z 膜にはアクチンが、中央にある M 線にミオシンが連結している。筋原線

図 1 骨格筋の構造

* 弘前大学大学院医学研究科
リハビリテーション医学講座
(〒036-8562 青森県弘前市在府町 5)
E-mail : eiichi@hirosaki-u.ac.jp

維を光学顕微鏡で観察すると、暗く見える A 帯と明るく見える I 帯が規則的に配列した縞模様が確認される。A 帯はミオシンとアクチンが重なっている部分であり、筋収縮下では I 帯の長さが短縮する。T 管は細胞膜が陥没して筋線維の内部に落ち込んだもので、活動電位を筋細胞内部へと伝える機能がある。筋小胞体は内腔にカルシウム (Ca) イオンを貯蔵しており、これが筋細胞内に放出されることにより筋収縮が生じる。ミトコンドリアは内包する各種酵素の作用により、細胞のエネルギー源であるアデノシン三リン酸 (ATP) を産生する。多数の筋線維が集まり筋周膜によって束ねられ筋束となり、さらに多数の筋束が筋上膜と線維性結合組織からなる筋膜により囲まれ筋を形成する。

骨格筋は筋の作用方向、つまり長軸方向と筋線維の配列方向から平行筋 (紡錘筋) と羽状筋の 2 つに分類される。平行筋ではその名の通り筋線維が筋の長軸方向に一致して配列している。これに対して羽状筋では、筋線維は長軸方向に対して一定の角度をもって配列する。羽状筋には 2 本の表層腱膜間に筋線維が配列する単羽状筋と、中央の腱膜から両側の表層腱膜に向かって筋線維が配列する両羽状筋がある。それぞれ後述するような筋出力の特徴を有している。

筋線維の分類

骨格筋の筋線維は酵素活性の違いから大きく 3 種類に分類される。解糖系酵素活性が低く酸化系酵素活性が高いタイプ I (SO) 線維、逆に解糖系酵素活性が高く酸化系酵素活性が低いタイプ IIB (FG) 線維、両方の酵素活性とも高いタイプ IIA (FOG) 線維である。収縮速度が遅いタイプ I 線維は遅筋 (slow twitch muscle)、収縮速度が早いタイプ IIA およびタイプ IIB 線維は速筋 (fast twitch muscle) と呼ばれる。タイプ I 線維は持久性に優れ、タイプ IIB 線維は瞬発性に優れ、タイプ IIA 線

維は両方の性質を兼ね備えている。

筋収縮のメカニズム

運動への意思はさまざまな経路を通り大脳皮質の一次運動野に伝えられ、身体各部位の随意運動を制御している上位運動ニューロンの興奮を引き起こす。上位運動ニューロンは内包後脚、中脳大脳脚、橋と延髄の腹側を通り延髄下部で交叉し、反対側の皮質脊髄路 (側索) を下行し脊髄前角に到達する (錐体路)。脊髄前角では上位運動ニューロンの興奮が、前角細胞に始まる下位運動ニューロンに伝達される。前角細胞の軸索は脊椎神経となり末梢の骨格筋に至り、筋内で枝分かれし複数の筋線維に達する。これを運動単位と呼び、骨格筋収縮の最小機能単位となる。1 個の下位運動ニューロンが支配する筋線維の数を神経支配比といい、粗大運動が中心の筋では大きく、巧緻運動を担う筋では小さい。軸索と筋は神経筋接合部を介して連結しており、神経終末から放出されたアセチルコリンが筋線維膜のレセプターに結合することにより終板電位が発生し、筋線維に活動電位が生じる。

一般的に骨格筋の収縮機序は Huxley によって提唱された sliding filament theory によって説明される (図 2)^{1, 2)}。アクチンフィラメントの表面にはトロポニンと結合したトロポミオシンが存在し、筋弛緩時にはミオシン頭部がアクチンに結合するのを立体的にブロックしている。活動電位が生じた筋線維では筋小胞体から Ca イオンが放出され、これがトロポニンに結合することにより構造が変化しトロポミオシンが移動し、ミオシン頭部とアクチンの結合が可能となる。結合が完成するとミオシン頭部にある ATP が分解され、ミオシンが首振り運動を行いアクチンフィラメントを引き込み、筋節が短縮することにより筋の収縮が生じる。消費された ATP はミトコンドリアより供給されるため、

図2 Sliding filament theory

a : 活動電位が生じた筋線維では筋小胞体から Ca^{2+} イオンが放出され、これがトロポニンに結合する。構造変化によりトロポミオシンが移動する。

b : ミオシン頭部とアクチンが結合する。

c : ミオシン頭部にある ATP が分解され、ミオシンが首振り運動を行いアクチンフィラメントを引き込む。

連続した筋収縮が可能となる。

筋の収縮様式

筋の収縮様式には、筋の長さに変化が生じない静的収縮と変化が生じる動的収縮がある。前者は筋長が一定に保たれるため関節運動を伴わず、等尺性収縮と呼ばれる。一方後者には、筋が短縮しながら収縮する求心性（短縮性）収縮と、筋が伸張しながら収縮する遠心性（伸張性）収縮がある。また、動的収縮には一定の張力で収縮する等張性収縮と、一定の速度で筋が収縮する等速性収縮がある。実際は厳密な筋の等張性収縮や等速性収縮を再現することは難しく、前者は一定の重量物を持ち上げる運動、後者は一定の角速度での関節運動の際に生じる収縮を指すことが多い。

筋力に影響する因子

1. 筋断面積

骨格筋が発揮する最大筋張力と筋断面積には正の相関があると報告されている。単位断面積あたりの最大筋力は、個々の筋や個体差などから報告者によって異なるが、約 $4\sim 6 \text{ kg/cm}^2$ とされている³⁾。

2. 筋線維の配列方向

上記の筋断面積には、筋の長軸方向に直交する面となる解剖学的断面積と、筋線維の走行方向に直交する面となる生理学的断面積がある（図3）。平行筋では筋の長軸方向と筋線維の走行方向はほぼ一致するため、解剖学的断面積と生理学的断面積は等しくなる。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で配列するため、生

図3 解剖学的断面積と生理学的断面積

理学的断面積は解剖学的断面積よりも大きくなる。したがって、同じ解剖学的断面積をもつ平行筋と羽状筋を比較すると、より多くの筋線維を配置できる羽状筋のほうが大きな筋張力を発揮するのに有利といえる。

3. 筋長

筋線維は収縮の最小単位である筋節が繰り返す構造であるため、筋線維が長い筋ほど多くの筋節で構成されている。筋全体の収縮距離は筋節の収縮距離の加算となるため、筋節が同時に収縮を起こすと筋線維長が長い筋ほど単位時間あたりの収縮距離は長くなる（筋収縮速度が速くなる）。したがって、筋収縮速度の点では、筋線維長を長くできる平行筋が羽状筋よりも有利である。

筋が発揮する張力は、筋に生じる長さ変化の影響を受ける⁴⁾。筋収縮によって生じる活動張力は、筋が生体内にあるときの長さである自然長において最大となる。自然長より長さが減じると活動張

力は徐々に減少し、自然長の60%以下では活動張力を発揮できなくなる。逆に自然長より伸張されても活動張力は減少するが、筋を構成する結合組織に発生する静止張力が加わるため、筋全体の張力（全張力）は増大する。

4. 関節の構造・屈曲角度

実際の臨床の場面では、筋収縮による関節運動が発揮するモーメント（関節トルク）を筋力として測定している。関節トルクは筋の収縮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⁵⁾。したがって、筋の付着部が関節の回転中心から遠い関節ではモーメントアームは大きくなり、同じ筋張力でも大きな関節トルクを発生することができる。また、関節の屈曲角度が変化することでモーメントアームと筋長がともに変化するため、関節トルクも屈曲角度の影響を受ける。

5. 神経系

筋収縮によって生じる筋張力は、当然それを支配する神経系の影響を受ける⁶⁾。筋に単一の短い刺激が加わると、単収縮と呼ばれる一過性の筋収縮が生じる。1つの筋線維は「全か無かの法則」に従い、閾値以下の刺激には反応せず閾値以上の刺激には最大収縮を起こす。刺激の強度を上げると収縮する筋線維が増加するため筋張力は増大するが、生体内では興奮する前角細胞の数が増えることにより動員される運動単位の数が増加する (recruitment)。また、刺激の頻度を増加させると、単収縮が弛緩する前に次の収縮が生じ、強縮と呼ばれる状態が生じる。生体内でも運動ニューロンの発火頻度が増加することにより大きな筋張力が発生する (rate coding)。さらに運動単位の動員が同期化される、つまり活動時相が一致することにより大きな筋張力を得ることができる (synchronization)。

6. 心理的要因

筋力にはその構造的要素によって決定される生理的限界がある。通常は高位中枢からの抑制により、最大努力下においても生理的限界まで筋力を発揮することはなく、これを心理的限界と呼び生理的限界の70~80%とされている⁷⁾。

筋力増強の機序

1. 神経性要因

筋力増強訓練が適切な条件下で継続されれば、発揮される最大筋力は経時的に増加する。訓練開始から約4週間以内の初期にみられる最大筋力の増加は、筋肥大を伴わないことが報告されており、結果として単位断面積あたりの筋力が増加する⁸⁾。その機序としては主に中枢神経系要因の改善によってもたらされるとされている。つまり運動単位数の増加、発火頻度の増加・同期化、拮抗筋の抑

制、運動プログラムの改善などが関与している。

2. 筋肥大のメカニズム

筋線維数の増加は胎生期までにほぼ終了するとされており⁹⁾、筋力増強訓練で生じる筋肥大は筋線維の断面積が増大したものである。筋線維の断面積増加は、それを構成する筋タンパクの合成が分解を上回った結果生じる。筋タンパク合成の制御には主にインスリン様増殖因子I (IGF-I) が重要な働きをしていることが知られている¹⁰⁾。血液中のIGF-Iが筋細胞膜の表面にあるレセプターに結合することにより、細胞内のシグナル分子が活性化されタンパク合成が促進される^{11, 12)}。筋力増強訓練によってもたらされる機械的ストレスは筋細胞膜上のメカノセンサーを活性化し、細胞膜のCaチャンネルを変化させる。流入したCaイオンは細胞内のCa依存性シグナル伝達を活発にして筋タンパク合成を促進する。

3. 筋力増強に影響する因子

過負荷の原則 (overload principle) は筋力増強訓練を行う際、最も重要な原則である。一般的に筋力増強効果を得るためには、最大筋力の2/3以上の負荷で訓練を行う必要がある¹³⁾。さらに、ある特定の条件で行われた筋力増強訓練で得られる効果は、同じ条件下における筋力において最も高いとする特異性の原則がある。これには筋の収縮様式による特異性 (等尺性、求心性、遠心性、等張性、等速性で行われた訓練は、同じ収縮様式において最も増強効果が高い)、負荷様式の特異性 (最大負荷では最大筋力、負荷なしでは最大収縮速度、負荷30%では最大パワーのへ効果が高い)、関節角度の特異性 (特定の角度で行われた訓練では、その角度における増強効果が最も高い) などがある。筋力増強訓練を行う場合には、これらの原則を考慮し、期待する増強効果に対して最も効率的

な訓練処方を検討する必要がある。

文 献

- 1) Huxley HE : The double array of filaments in cross-striated muscle. *J Biophys Biochem Cytol* 1957 ; **3** : 631-648
- 2) Huxley HE : The mechanism of muscular contraction. *Sci Am* 1965 ; **213** : 18-27
- 3) 小竹伴照 : 筋力増強訓練. 総合リハビリテーション 1991 ; **19** : 505-509
- 4) 真島英信 : 筋肉の構造と収縮機構. 医用電子と生体工学 1966 ; **4** : 2-11
- 5) 福永哲夫 : 運動生理 筋力「人間の発揮できる力—筋力—のとらえ方」体力を捉える 過去から未来へ. *Japanese Journal of Sports Sciences* 1994 ; **13** : 371-376
- 6) 古屋かおる : 筋収縮力の調節機構. 体育の科学 1988 ; **38** : 419-425
- 7) 猪飼道夫 : 筋力の生理的限界と心理的限界の筋電図学的研究. 体育学研究 1961 ; **5** : 154-166
- 8) 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—. 杏林書院, 東京, 1978
- 9) Stickland NC : Muscle development in the human fetus as exemplified by m. Sartorius : a quantitative study. *J Anat* 1981 ; **132** : 557-579
- 10) Sandri M, Sandri C, Gilbert A, Skurk C, Calabria E, Picard A, Walsh K, Schiaffino S, Lecker SH, Goldberg AL : Foxo transcription factors induce the atrophy-related ubiquitin ligase atrogin-1 and cause skeletal muscle atrophy. *Cell* 2004 ; **117** : 399-412
- 11) Liu J, Schrank B, Waterston RH : Interaction between a putative mechanosensory membrane channel and a collagen. *Science* 1996 ; **273** : 361-364
- 12) Gao M, Sotomayor M, Villa E, Lee EH, Schulten K : Molecular mechanisms of cellular mechanics. *Phys Chem Chem Phys* 2006 ; **8** : 3692-3706
- 13) 市橋則明 : 筋力トレーニングの基礎知識—筋力に影響する要因と筋力増加のメカニズム—. 京都大学医療技術短期大学部紀要, 別冊, 健康人間学 1997 ; **9** : 33-39