

1. 筋の構造

1) 筋の構造

筋の構造は図4-1に示す。筋肉(muscle)は筋束(muscle bundle)の集合体である。筋束は太さ0.1 mm、長さ数cm～数10 cmの筋線維(muscle fiber)の集合体である。筋線維の表面は細胞膜(筋鞘: sarcolemma)で包まれている。筋線維は筋原線維(myofibril)とそのあいだを満たしている筋形質(sarcoplasm)より構成されている。筋原線維は長さ1～3 μmの筋フィラメント(myofilament)から成り、この筋フィラメントは太いフィラメント(thick filament: myosin filament)と細いフィラメント(thin filament: actin filament)の2種のフィラメントより構成されている。筋線維を顕微鏡で観察すると明暗の縞がみられる。明るいところを明帯(I帯)、暗いところを暗帯(A帯)という。I帯の中央には隔壁がみられ、これをZ膜という。Z膜で囲まれた単位を筋節 sarcomere といい、長さは約2 μmである。I帯(明帯)はアクチンフィラメントのみで中央にZ膜があり、収縮により短縮する。A帯(暗帯)はミオシンフィラメントとアクチンフィラメントが重なり、中央にH帯がある。A帯は収縮により長さが増える。

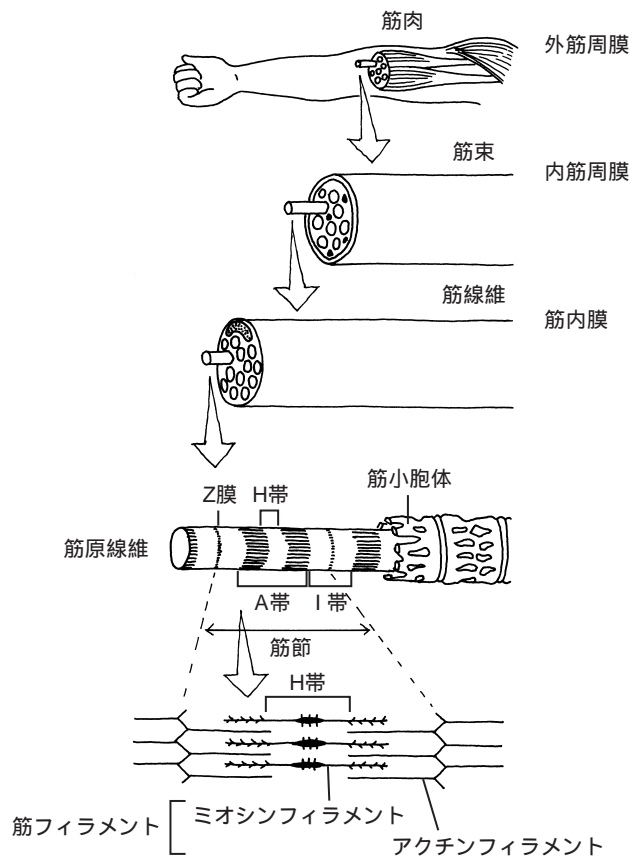


図4-1 筋の構造

2 筋の分類

筋の分類には形態学的分類、運動による分類、筋線維による分類、運動単位による分類がある(表4-1)。

(1) 形態学的分類

筋の形態学的分類としては、筋の形状、筋の色、および関与している関節数による分類がある。形状としては筋の形状、筋頭、筋腹の数によって分類される。筋の色調による分類では赤筋と白筋があるが、これは筋線維の分類で述べる。

(2) 運動による分類

運動による分類では運動の働き、作用、運動方向、収縮速度による分類などがあげられる。運動の働きとして以下のものがある。

主動筋 (agonist) : 求心性収縮時に主に関節運動を起こす筋

補助筋 (assistant mover) : 主動筋による関節運動を補助する筋

拮抗筋 (antagonist) : 主動筋と逆の運動を起こす筋

固定筋 (fixator) (安定筋 (stabilizer)) : 関節の固定、支持のために静止性収縮を起こす筋

共同筋 (synergist) : 1つの運動に参加する全ての筋

運動の方向による筋の分類は基本的には6方向であるが、各関節により固有の名称が用いられる(運動方向に関しては、関節の障害の第2章を参照)。

表4-1 筋の分類

1. 形態学的分類
筋の形状: 紡錘状筋、羽状筋 半羽状筋 鋸筋 輪状筋
筋頭の数 二頭筋 三頭筋 四頭筋
筋腹の数 二腹筋 多腹筋
関節の数 単関節筋 二関節筋 多関節筋
筋の色による分類: 赤筋 白筋
筋の大きさ: 大筋 小筋
2. 運動学的分類
働きによる分類: 主動筋 共同筋 拮抗筋 補助筋 固定筋 安定筋
作用分類: 拳筋 下制筋 括約筋
関節の運動方向: 屈筋 伸筋 外転筋 内転筋 回内筋 回外筋 内旋筋 外旋筋 対立筋
収縮速度による分類: 速筋 遅筋
その他: shunt muscle spurt muscle
3. 筋線維による分類(組織学的分類)
組織学的: 横紋筋(骨格筋 心筋) 平滑筋
ミオグロビン量による分類: 赤筋 白筋
染色による分類: type I type II
代謝と収縮による分類: SO FG FOG
4. 運動単位からの分類
収縮速度と疲労からみた分類: S FR FF

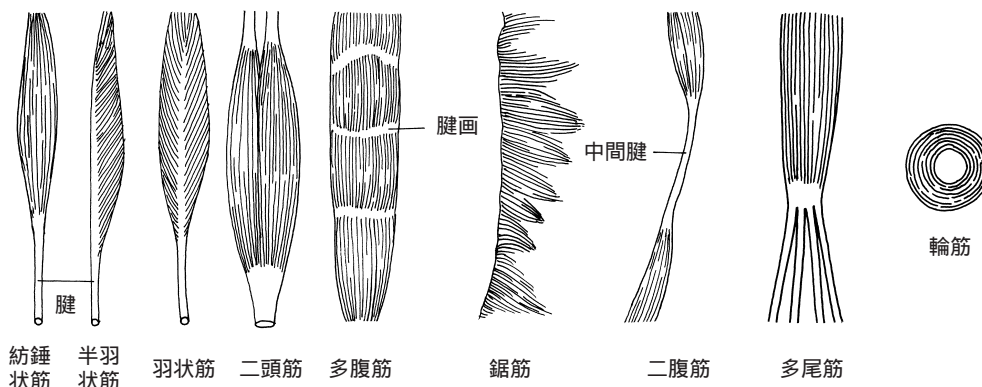


図4-2 筋の形状

(3) 筋線維の種類 (組織学的分類)

筋線維の組織学的分類として、横紋筋と平滑筋がある。横紋筋には骨格筋と心筋がある。骨格筋には横紋がみられ、運動神経の支配を受け、随意的に筋収縮を生じることができる。心筋は横紋筋であるが、自律神経支配であり、随意的な収縮が不可能で、合胞体を形成し自律的な収縮を示す。平滑筋は内臓筋で、自律神経支配で自律的な収縮を示す (表4-2)。

筋線維内にあるミオグロビン (myoglobin : 酸素運搬蛋白) 量により、赤筋と白筋に分類できる。赤筋はミオグロビンが多く存在し、また毛細管が密である。鳥類などでは筋全体を白筋または赤筋に分けることができるが、人間の場合は両方の線維が混在しており、各筋によって、赤筋と白筋の比率が異なる。人間で赤筋の線維が多い筋はヒラメ筋、白筋の線維が多いのは腓腹筋が代表的である。

組織生化学的染色による分類として、type I と type II がある。type I はミトコンドリア酵素活性が高く、解糖系の酵素活性が低い。type II は反対にミトコンドリア酵素活性が低く、解糖系の酵素活性が高い。type II は筋線維の直径が小さく、色調から赤筋、収縮速度から遅筋とも言われる。type II は直径は大きく、色調から白筋、収縮速度から速筋とも言われる。なお、type の特徴については表4-3 に示す。

表4-2 筋の種類と特徴

	骨格筋	心筋	平滑筋
主な動き	関節の動き	心臓ポンプ	内臓筋の運動
筋フィラメント	大小2種 (横紋)	大小2種 (横紋)	大小2種 (不規則に配列)
筋小胞体	多い	少ない	非常に少ない
細胞間興奮伝導	絶縁伝導	全体に広がる (合胞体)	全体に広がる (ある方面に広がる)
神経支配	運動神経	自律神経	自律神経
随意性	随意運動	不随意運動	不随意運動
自動性	なし	洞房結節にあり	歩調とり細胞にあり
静止電位	- 70 ~ - 90 mV	- 80 ~ - 115 mV	- 30 ~ - 50 mV (測定の度に動揺)
活動電位	120 ~ 140 mV	110 ~ 150 mV	30 ~ 60 mV
電気刺激閾値	低い	中等	高い
時値	0.3 msec	3 msec	100 msec
伝導速度	3 ~ 4 m/sec	20 ~ 30 cm/sec	2 ~ 3 cm/sec
絶対不応期	1 ~ 2 msec	100 ~ 200 msec	50 ~ 100 msec
単収縮の持続	0.1 sec	0.5 sec	数秒
加重	有	無	有 (顕著)
強縮 / 単収縮	3 ~ 5	1	非常に大きい
緊張	神経による	神経による	筋自体にある
粘性	小	大	大
疲労	しやすい	し難い	し難い

表4-3 筋線維の分類と特徴

	赤筋	中間	白筋
筋線維のタイプ	type I 遅筋 SO S	type IIa 速筋 FOG FR	type IIb 速筋 FG FF
特徴	局在	深部	表在
	毛細管	密	粗
	色調	赤	白
	筋線維径	小	大
	ミトコンドリア量	多	少
	ミオグロビン量	高	低
	グリコーゲン含有量	低	高
	解糖系酵素活性	低	高
	ATPの供給	酸化的リン酸化	酸化的リン酸化
	ミオシンATPase活性	低	高
	疲労	遅	速
	収縮速度	遅	速
	筋張力	小	大
	筋線維径	小	大

筋線維の単収縮の性質と代謝の相違による分類として、SO(slow twitch oxidative fiber)、FOG(fast twitch oxidative glycolytic fiber)、FG (fast twitch glycolytic fiber)がある。各線維のタイプ別の特徴は表 4-3 に示す。SO が遅筋、赤筋、type Iと同種で、FGが速筋、白筋、type IIと同種である。

(4) 運動単位からの分類

運動単位 (motor unit: MU、別名：神経筋単位)とは1個の運動ニューロンとそれに支配される筋線維群をいう。その運動神経は筋線維の種類によって異なった形状、性質がある。収縮速度と疲労の関係から、S(slow twitch)、FR(fast twitch, fatigue resistant)、FF(fast twitch, fatigable)に分類される。Sでは収縮速度は遅いが、疲労はしにくく、筋張力は小さい。FFでは収縮速度は早いが、疲労しやすく、筋張力は大きい。FRは両者の中間である(図4-3)。筋線維のタイプであるSO、FOG、FGとS、FR、FFとはほぼ一致した性質を示す。

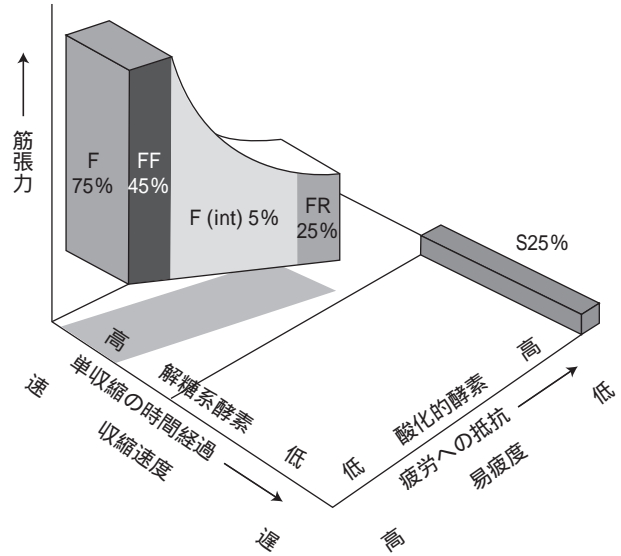


図 4-3 運動単位の性質による分類

2. 筋の機能

筋の作用は主に力学的作用(すなわち運動の出現、支持、保護作用)である。他に、発熱作用、血流の還流促進作用なども筋収縮の二次的作用として生じる。

1) 筋の収縮

(1) 収縮機序

筋の収縮は筋節内にある細いフィラメント(アクチン)が太いフィラメント(ミオシン)の間に入り込むことにより、筋節が短縮することである(表4-4、図4-4)。これを滑走説(sliding theory)という。生化学的变化として、収縮、弛緩を制御しているのはCaイオンである。筋小胞体よりCaイオンが放出されると筋収縮が起こり、Caイオンが筋小胞体に取り込まれると筋は弛緩する。Caイオンを取り込む時にATP(アデノシン三リン酸)のエネルギーを利用する。

表 4-4 筋の収縮メカニズム

活動電位	
筋小胞体膜の電位変化	筋小胞体は筋形質の一部(T管)
筋小胞体からCa ⁺⁺ 放出	
トロポニンとCa ⁺⁺ 結合	Ca ⁺⁺ イオンはトロポニンの作用を抑制
アクチンとミオシン反応	ミオシンの連結橋(クロスブリッジ)の頭振り運動
滑走(トロポミオシンが作用)	

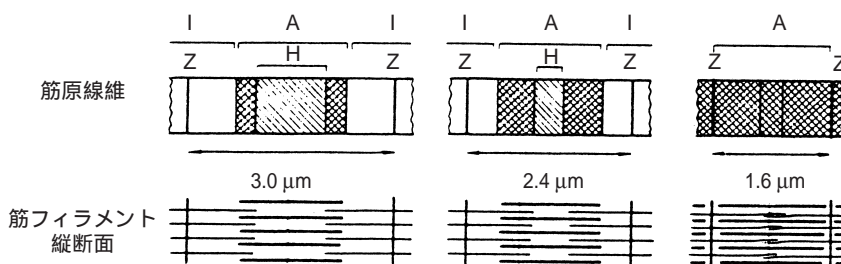


図 4-4 筋収縮の機序

(2) 収縮の基礎的性質(力学)

単収縮 twitch とは筋や神経筋標本に単一刺激を加えた時には1回だけ生じる早い経過の収縮をいう。強縮 tetanus とは反復刺激の頻度を高くすると、加重、融合して生じる単収縮時より大きな張力をいう。日常の筋活動は強縮である。遅筋では刺激頻度が多くなると、加重による融合が生じる。速筋では大きな張力を発生するが、頻度が多少高い刺激でも加重は生じない。しかし、より高い頻度で断続的に刺激すると張力の低下(疲労)が生じる(図4-5)。

骨格筋の力学模型を図4-6に示す。これには収縮要素 CC (contractile component)、直列弾性要素 SEC (series elastic component)、並列弾性要素 PEC (parallel elastic component) がある。収縮要素は筋線維、直列弾性要素は腱、並列弾性要素は筋膜などが想定できるが、これらの要素はモデルとして、機能的に解釈するために求めたもので、実際の要素との対比は困難である。

筋収縮における特性を以下に示す。

張力 - 長さ関係 (tension length curve)

力 - 速度関係 (force speed curve)

負荷 - 伸展関係 (load extension curve)

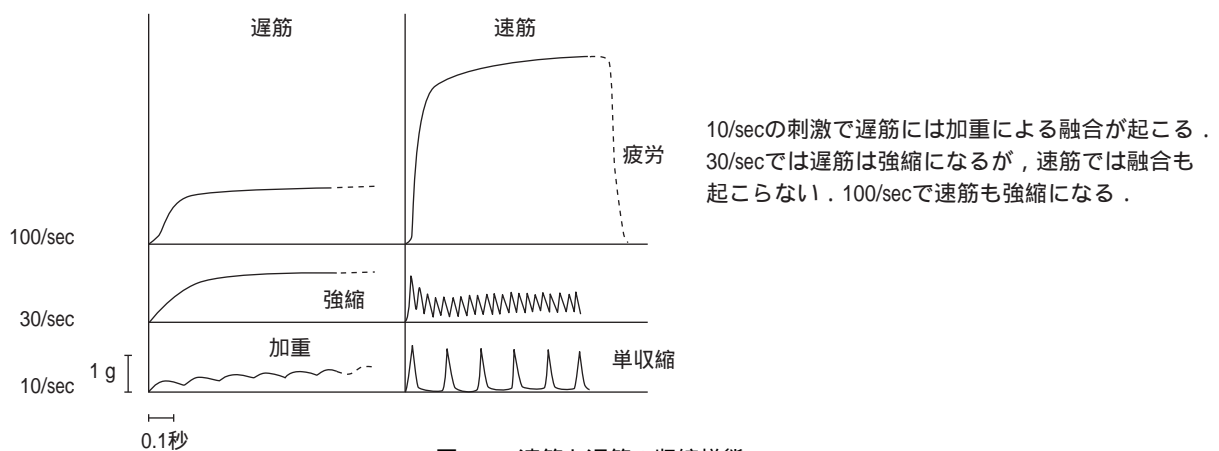


図4-5 速筋と遅筋の収縮様態

張力 - 長さ関係では、筋の長さ(アクチンとミオシンフィラメントの重なり具合)により、筋の出力する張力が異なる。静止時の長さが最も張力が大きい(図4-7)。この場合は等尺性収縮時である。実際の生体内では関節角度の変化により筋の長さは変化を示すが、関節角度が変化することで、腱付着部の張力方向が異なってくるので補正が必要となる。

力 - 速度関係では、筋の短縮速度により、力(張力)の発揮が変化する。短縮速度が早いほど、力は小さく、短縮速度が遅いほど大きくなる(図4-6: 右上)。短縮速度が0の場合(等尺性収縮)ではより大きくなり、反対に伸張される場合では最大になる。

負荷 - 伸展関係では、他動的に筋を引き延ばしていくと、並列弾性要素で静止張力が大きくなる。すなわち、伸張させるためにはより多くの負荷量(静止張力)が必要となり、負荷量と伸展量は非直線的になる(図4-6: 右下)。負荷 - 伸展関係と張力 - 長さ関係から、全張力は等尺性収縮時の張力と静止張力を合わせたものである(図4-8)。

以上の張力、長さ、速度の関係は相互に依存しており、それらの関係を3次元の図に示す(図4-9)。

(3) 収縮様態

筋の収縮様態には基本的には表4-5に示したように求心性収縮 concentric contraction (短縮性 shortening)、遠心性収縮 eccentric contraction (伸張性 lengthening)、静止性収縮 static contraction (等尺性収縮 isometric) がある。求心性収縮は筋が短縮する収縮で、遠心性収縮は筋が伸張される収縮である。特殊な収縮状態として、等張性収縮 isotonic がある。これは張力が一定である収縮で、求心性、遠心性、静止性収縮時にみられる。等尺性収縮でも張力が一定の場合もある。ただし、等張性収縮は一般的に張力が一定ではなく、求心性、遠心性収縮を含んだ(等尺性収縮以外)ものとして誤用されている場合が多い。等速性収縮 uniform velocity contraction は求心性、遠心性収縮時の特殊状態であり、筋線維の収縮速度が一定である。筋長が一定である収縮は等尺性収縮といい、静止性収縮と全く同一概念である。

他に、等速性運動と等運動性運動 (isokinetic exercise) とは別である。等運動性運動は関節運動が一定の角速度を示す運動であり、筋収縮速度は一定でない。収縮速度が速い求心性収縮、遠心性収縮のことを相動性収縮ともいうが、一般的には求心性収縮時に多くみられる。

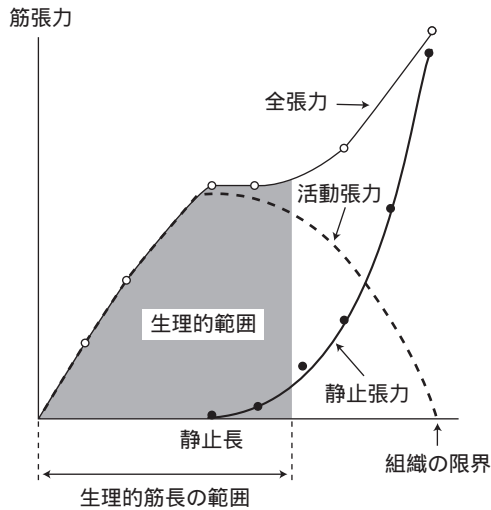


図 4-8 筋の活動，静止張力の関係 (中村ら³⁷⁾)

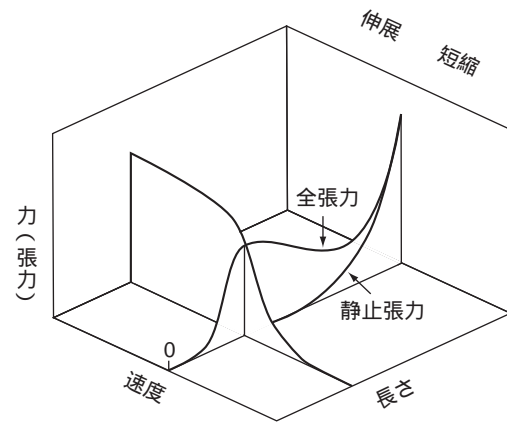


図 4-9 筋の張力，長さ，速度の相互関係 (中村ら³⁷⁾)

表 4-5 筋収縮様態

基本的分類 (筋線維の動き)	求心性収縮 短縮性収縮	遠心性収縮 伸張性収縮	静止性収縮 等尺性収縮		
	(筋長一定)				
特殊な状態の場合	張力 一定	等張性収縮	等張性収縮	等張性収縮	等張性収縮
	速度 一定	等速性収縮	等速性収縮	等速性収縮	-
	速い	相動性収縮	相動性収縮	相動性収縮	-

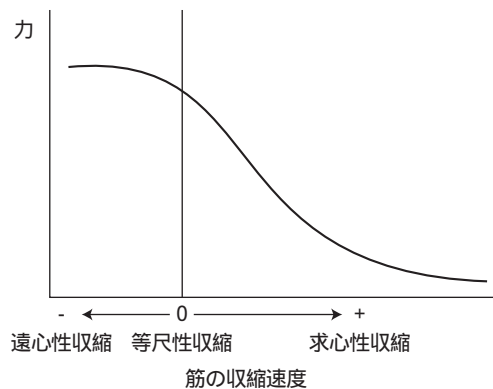


図 4-10 力と速度の関係

2 筋力

(1) 筋力 (muscular strength, muscle force) とは

筋の収縮力の程度は運動単位の発射頻度(時間的要素)、数(空間的要素)、およびタイミングの一致(同期化)によって変化する¹⁾。

筋力には静的筋力と動的筋力がある。筋力の基本的概念である力とは質量と加速度を掛けたものである。力には重力単位と絶対単位の2つの概念がある。重力単位は1 kgの質量(m)に対して、地球の引力(重力加速度: 9.8 m/sec²)を1 kgw (= 9.8 kgm/sec²)としたものである。絶対単位では質量と加速度の積($F = m\alpha$)で、単位はN(ニュートン)である。実際の筋力は重力単位で測定される。筋力を測定する場合、運動軸と外力(抵抗または測定部位)の距離によって影響を受ける。これを標準化するためにも、トルク(力×距離)で求める場合が多い。

(2)筋パワー (muscular power) とは
パワーは以下の式で表わすことができる。

$$\text{パワー} = \text{仕事} / \text{時間} = \text{力} \times \text{距離} / \text{時間} = \text{力} \times \text{速度}$$

筋パワーの定義はCuretonによれば、“非常に爆発的な努力をし、最大努力で急速に全身を動かす能力である。物理的には力×速度で表わされる”となる。瞬発力の定義は、“最大努力のもとで、(筋活動により)爆発的に発揮される機械的パワーないし、短時間内に多くの機械的エネルギーを発揮する能力である。”であり、低水準のパワーを持続的に発生するような筋活動(等尺性収縮も含む)は除外している。このことから、筋パワーと筋瞬発力とはほぼ同一語として用いられているが、物理的なパワーとして捉えた場合、持続的な運動にも広く適応できる。

(3)筋持久力 (muscular endurance) とは

筋持久力とは、筋肉がいかに長時間運動を続けることができるかという能力である。これには、関節運動が伴わない静的筋持久力と、関節運動が伴う動的筋持久力がある。持久力を規定する因子として以下に示すものがある。

- 筋に貯蔵されるエネルギー源
- 筋への酸素運搬能力
- 筋での酸素利用能力
- 筋を支配する神経

以上から、猪飼らは筋力と速度、持久力の関係を三次元の展開図で表わしている(図4-11)⁵⁾。筋力と速度の象限がパワーで、持久力は力の持久力と速度の持久力とがある。

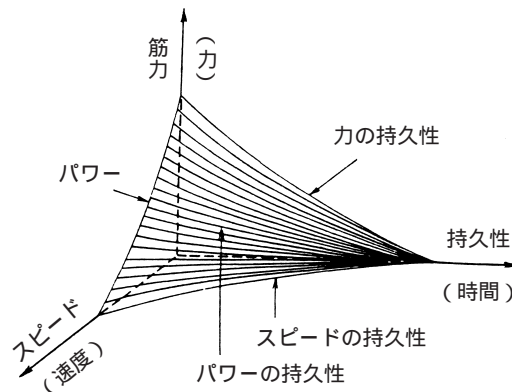


図4-11 筋力，スピード，持久力の関係 (猪飼⁵⁾)

3 筋力の測定法

(1)静的筋力の測定法

静的筋力の測定は握力、背筋力、脚筋力(大腿四頭筋)、屈腕筋(上腕二頭筋)を代表的な筋力として、体力測定時に行われている。他の関節運動に関係する筋力を測定することは診断、治療効果などを判定する場合に必要である。

力の測定方法から分類すると、スプリング方式の力量計(dynamometer)、ケーブルテンシオメーター、ひずみ計が代表的である。スプリング方式の代表例は握力計、背筋力計およびバネ秤がある。これらは張力の変化により、変位(歪)を生じ易く、特にバネ秤では変位が大きいため望ましくない。スプリング方式より歪が少ないものとして、ケーブルテンシオメーターがある。また、ストレンゲージおよび半導体歪ゲージでできているロードセルの筋力計は歪がなく、その張力の瞬時の変化を捉えることも可能である。

以下、代表的な筋の出力の適法とその正常値を示す^{46,48)}。

握力の測定法

測定装置：一般的にはSmedley型握力計が多く用いられているが、Collin型握力計、電子握力計などもある。

方法：直立姿勢で、腕を自然に下げ、握力計または手が身体に接触しないようにする。指の第2関節が直角になるように握り幅を調整する。握力計を振り回さないで力いっぱい握りしめる。

記録：左右交互に2回ずつ測定し、良い方の値をとり、その平均値を求める。

正常値：正常値は図4-12に示す。患者などでは左右3回ずつ測定し、その各3回の平均値、または最大値を右または左の代表値とする。

背筋力の測定法

測定装置：背筋力計を用いる。

方法：背筋力計の上に足を15cm位はなして、直立位をとる。把手を順手で握り、上体を30°前方に傾ける。

上体を徐々に起すように力をいれ、全力で引き上げる。腕や膝が曲がらないように、また体幹を後方へ倒さないようにする。

記録：2回測定し、よい方の値をとる。

注意：椎間板ヘルニアの人は禁忌である。

正常値：正常値は図4-13に示す。

脚筋力の測定法

測定装置：歪計または握力計、背筋力計を応用する。

方 法：片脚力または両脚力、測定肢位が水平式、垂直式などがあり、統一されていない。多くの場合は水平式片脚力、垂直式両脚力の方法が用いられている。水平式片脚力は背臥位で下腿を測定台の端に垂下させ、膝が屈曲 90° になるようにする。足首にカフを巻きつけて、徐々に膝伸展に力を入れる（図 4-14）。

記 録：左右、交互に 2 回づつ測定し、それぞれの最大値を採用する。

正常値：正常値を図 4-15 に示す。患者などでは片脚力は垂直式測定が容易に行われている。

屈腕筋の測定法

測定装置：握力計、歪計などを用いる。

方 法：椅子坐位にて、肩関節 90° 屈曲し、テーブルの上に上腕を置く。肘関節を 90° で、手首にカフをつけて、徐々に肘の屈曲に力を入れる。

記 録：左右、交互に 2 回づつ測定し、最大値を採用する。

正常値：正常値は図 4-16 に示す。

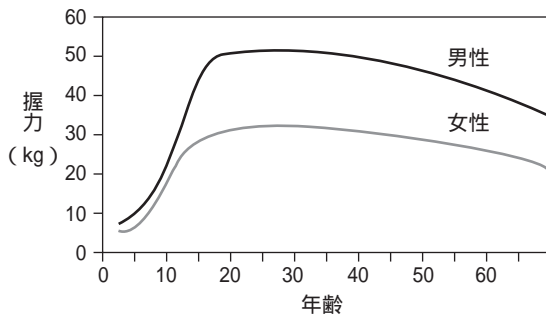


図 4-12 握力の正常値

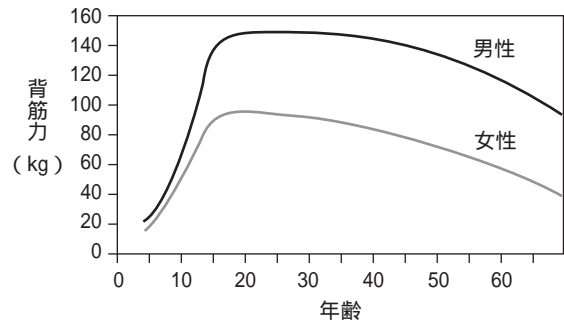


図 4-13 背筋力の正常値

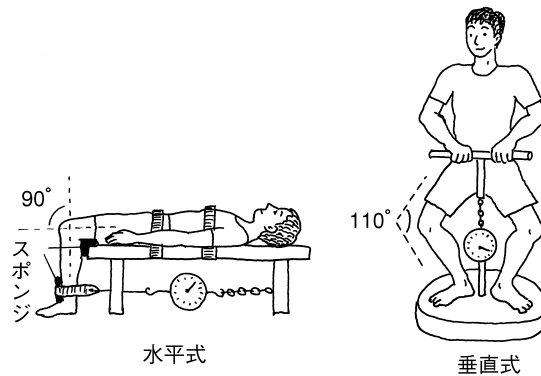


図 4-14 脚力の測定

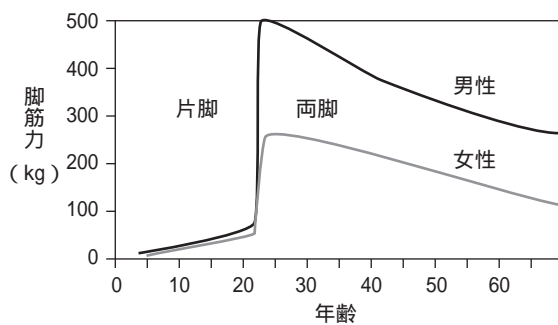


図 4-15 脚力の正常値

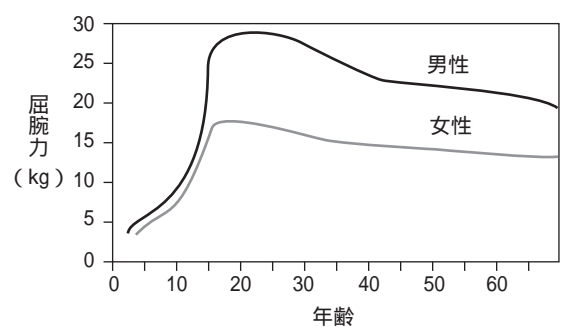


図 4-16 屈腕筋の正常値

徒手筋力テスト (MMT: manual muscle test)

MMTは各筋の筋力を容易に測定が出来ることから、臨床上、診断、治療効果の判定などに用いられている。筋力の段階づけは重力と徒手抵抗により評価を行う。段階としては表4-6に示すように0 - 5の6段階である³⁷⁾。各筋によって、姿勢、抵抗をかける場所、固定部位などが規定されている。

徒手では主観的なところもあるため、現在、用手力量計が用いられており、その信頼性、妥当性などの検討も行われている⁴⁰⁾。これはMMTと同じ要領で容易にできることから今後臨床上多く用いられると思われる。テストの方法としては、抵抗のかけ方によりmake testとbreak testがある。make testは検者に加える外力に対して力を発揮させてる方法で、break testは被験者の収縮させる力に対してそれに打ち勝つ力を加える方法である²⁾。

(2) 動的筋力の測定方法

動的筋力の測定は現在、等速運動装置にて測定が容易に可能となっている。等速度で、関節運動の角速度は0 ~ 300 %secの範囲で設定でき、その時のトルクの変化が全運動範囲内で出力される。各社の特徴は色々あるが、原則的には角速度が一定で、運動時のトルクが求められる(図4-17)。また、他には、筋の持久力、静的筋力(0 %sec)も測定ができる。測定部位は以前では膝の屈伸であったが、現在は体幹をはじめ他の多くの関節でも測定が可能である。

(3) 筋パワーの測定方法

一般的な体力テストにおける筋パワー、筋瞬発力は垂直跳(ジャンプ)で代表される。これにはサージェントジャンプとチョークジャンプがある。両者ともほぼ同じである。チョークジャンプの測定方法を以下に示す。

壁の側方に向いて、壁から20 cm離れて立つ。壁側の指にチョークを付け、その場でできるだけ高く飛び上がり、最高時点で壁(測定用紙)に指先で印を付ける。2回実施し、その高い方の値と、立位で測定上肢をできるだけ上に伸ばして指先で印を付け、その差を測定する。その正常値を図4-18に示す。

その他、筋パワーは力と速度を測定し、その両者を掛け合わせて求めることができる。

表 4-6 徒手筋力検査における筋力の表示法と判定基準

表 示 法					判 定 基 準
正常	Normal	N	5	100 (%)	重力と十分な抵抗に抗して肢位を保持する。または全可動域動く。ほとんど5に近い。
		N ⁻	5 ⁻	95	
優	Good	G ⁺	4 ⁺	90	Gよりさらに強い抵抗に抗し得る。重力と中等度の抵抗に抗して肢位を保持する。または全可動域動く。重力とわずかな抵抗に抗して肢位を保持する。または全可動域動く。
		G	4	80	
		G ⁻	4 ⁻	70	
良	Fair	F ⁺	3 ⁺	60	Fよりわずかに強い。重力に抗して肢位を保持する。または全可動域動く。重力に抗してほぼ全可動域動く。
		F	3	50	
		F ⁻	3 ⁻	40	
可	Poor	P ⁺	2 ⁺	30	重力を除き、わずかの抵抗に抗して全可動域動く。重力、摩擦を除くと全可動域動く。重力、摩擦を除くとわずかの可動域動く。
		P	2	20	
		P ⁻	2 ⁻	10	
不可	Trace	T	1	5	筋の収縮は認められるが、運動は起らない。
ゼロ	Zero	0	0	0	筋収縮が認められない。

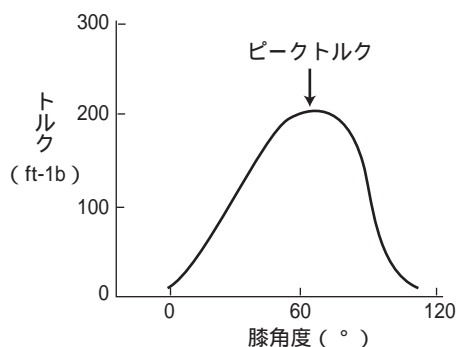


図 4-17 等速運動時のトルクの変化 (模式図)

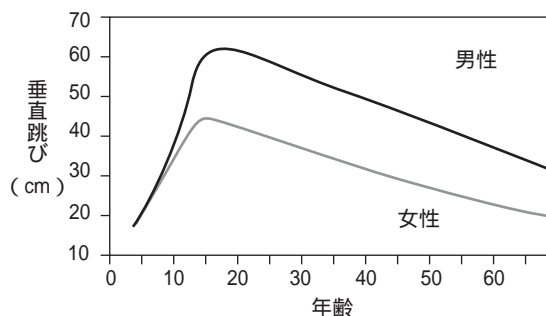


図 4-18 垂直跳びの正常値

(4) 筋持久力の測定方法

筋持久力には静的持久力と動的持久力がある。両者とも、測定筋、負荷量、関節の位置または運動範囲、中止時期の決定を規定する必要がある。

静的持久力の測定

負荷量として最大筋力の1/3に相当する重りを与え、保持可能な最大持続時間を測定する。上肢の場合は、坐位で、肘を支持台にのせ、肘関節が90°屈曲位になるようにする。手首にカフをまき、最大筋力を2回測定し、その最大値の1/3を負荷量とする。その負荷量を与え、肘関節を90°で保持させる。角度が3°ずれたら注意を与え、90°に戻す。3回目に3°のずれが生じたときまでの時間、または保持が困難になるまでの時間を測定する。

動的持久力の測定

負荷量は最大筋力の1/3に相当する負荷量で、肘関節の120°から90°までの屈伸を、1分間に60回のテンポで繰り返す。規定のテンポに3回以上遅れたとき、作業を中止させ、作業回数を記録する。

4 筋力に関する諸因子

(1) 筋の断面積および組成

筋力は性別、体格、スポーツ歴などにより異なる。しかし、筋の単位断面積当りでは性別、体格、年齢などによる差はみられない。生理的断面積1cm²当り4 - 8kgの力を発揮する。

筋線維のタイプで比較すると、FG線維の張力が大きい。

(2) 筋の収縮様式および収縮速度、関節角度の影響

筋の収縮様式である延長性と短縮性収縮ではその発揮する筋力が異なることは筋張力、長さ、速度関係から理解できる。また、等尺性において、最大受動収縮時の筋力は能動収縮時の筋力に比べ30%多い³⁶⁾。make testとbreak testも同様で、その筋力の測定値がbreak testの方が約30%程度多い²⁾。

関節角度による影響は筋の長さ(筋付着部位とその力の方向)の変化に伴い生じる⁴⁵⁾。静的筋力である握力でも手関節の角度により握力が異なる。また、筋力を発揮する筋と直接に関係ない関節、筋線維の長さ(筋長、方向、姿勢)によっても筋力は異なる。

(3) 性別と年齢

男性の筋力は当然女性より大きく、男性の2/3が女性の値となる。その比率は図4-19に示すように、20歳以前では、男女差は少ない。20歳以後の握力と垂直跳びは年齢による比率の差(低下)は少ないが、背筋力と脚力は加齢とともに低下を示す。男性に対する女性の握力は約60%、背筋力は約50 - 60%、脚力は約45 - 55%、筋パワーである垂直跳は約65%である。

筋力は20歳までは増加を示すが、20歳以後では加齢とともに低下を示す。静的筋力の低下状態を20歳を100%としてその割合をみると、男女とも10年で6%の低下、脚力では10年で12%の低下で、握力(上肢)に比べ、下肢の筋力低下は著しいことがわかる。

動的筋力に関しても加齢とともに低下を示す。等尺性筋力では加齢により26%の低下を示すが、等速性筋力は38%の低下を示す。また、等速性運動の速度が早いほど低下が著しい²⁰⁾。

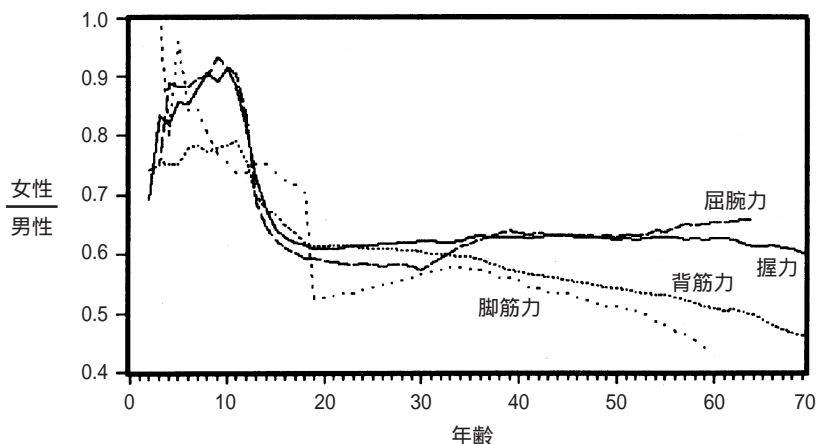


図4-19 筋力の男女差

(4) 各部位による筋力の関係

上肢は巧緻運動が主目的で、下肢は体重の支持、移動が主目的であるため、筋力の絶対値は当然異なる。各部位による筋力の関係はTornvall⁵²⁾は正常成人の多くの筋力を測定した結果、拮抗筋、共同筋、同じ領域に存在する筋の間では高い相関を報告している。また、Bohannon³⁾は伸筋と屈筋、上肢と下肢の間に高い相関を報告している。Larson²⁸⁾は加齢により上肢よりも下肢の方(大腿四頭筋)が低下が著しいことを報告している。加齢による握力と脚力の相対的变化(前述)からも当然理解できる。これらのことは、部位により筋力の関係は年齢を考慮しなければいけないが、その他にも、職業、スポーツ歴および種類などにより影響がみられる。

(5) 筋長と筋線維長

筋長は起始停止部の間または腱間で決定される。筋線維長と筋長がほぼ等しいものは紡錘状筋である。筋長が長く、筋線維長が短い筋は羽状筋であり、この筋は力を発揮するのに適している。

(6) 心理的な影響⁵³⁾

筋力は心理的な影響を受け易い。催眠(暗示)、かけ声、動機づけなどにより、筋力は最大随意収縮より20 - 30%多くなる。猪飼は解剖学的構造とこれに由来する生理的条件に規定される能力(生理的限界)と大脳皮質や中枢神経系の興奮水準の程度による心理適条件に規定される能力(心理的限界)があることを報告している。この生理学的限界の筋力は心理的限界をこえることはない。この生理的限界の測定としては電気刺激法が用いられる。最大随意収縮による筋力を100%とするならば、電気刺激では131%となり、31%増の筋力が出力される。現在これが生理的限界の最大筋力とされている。しかし、実際場面での最大筋力は最大随意収縮時の筋力を用いる場合が多い。筋の単位面積当りの筋力は4 - 9 kg/cm²とばらついていることから大脳の興奮水準などの中枢性因子に依存することが大きいためと考えられる。

3. 筋電図

筋電図とは筋の収縮時に発生する活動電位を導出したものである。

1 筋電図の構成

筋電図の基本的な構成要素は電極、増幅器、モニター、記録器である。現在はモニター、記録器はコンピュータ(パソコン)で代用している。パソコンがモニター、記録器、その他の処理(分析)などを行っている。運動動作分析を行う場合、有線では困難な場合が多いため、テレメータ方式で筋電図を記録している場合が多い。

電極は表面電極、針電極、ワイヤー電極があるが、動作分析の研究などでは表面電極が一般的である。表面電極は皿電極(ペーストを付けて使用)と使い捨て電極(ディスク電極)がある。電極の大きさは直径1 cm以内のものがよい。

増幅器は差動増幅器が用いられている。筋の活動電位は数 μ Vから数mVであるから、増幅器の特性としては、ゲインが110 - 130 dB(約 10^6)、2 - 2000 Hzの周波数を一様に増幅($\pm 10\%$ 以内)できること、高い弁別比(-80 dB)が必要である。また、増幅器と同時にフィルタは、時定数が0.03 sec(5.3 Hz)、上限が10 kHzまたはそれ以上が用いられる。較正信号(キャリブレーション)は0.5 mVまたは1 mVが付加されている。

モニターはオシロスコープが用いられ、トリガー機能が付加されているものがよい。トリガー機能があれば、筋電図の分析処理でよく行われる加算処理が容易となる。

記録器はコンピュータの記憶以外に、オシログラフ(ペンレコーダー)、紫外線記録装置などがある。また、生のデータをそのまま保存し、後日、分析などに用いることができるデータレコーダがある。

2 筋電図の測定の実際

測定する筋腹の中央に筋の走行に沿って電極を2 - 3 cmの間隔をおいて、2個添付する。他に不関電極(アース用)を運動時に移動が生じないような所に添付する。

実際の測定上、ノイズ対策が大変重要である。ノイズ対策の1つとして、電極間抵抗を低くすることが必要である(30 k以下)、より精度を要する場合は電極抵抗を5 k以下におさえる必要がある。電極間抵抗は各電極の間をテスターで計れば容易に求められる(ただし、これは直流の抵抗値である)。電極間抵抗を低くするために、電極を添付する場所をアルコールで清拭、サンドペーパーでみがき、または針で軽く擦ると容易に抵抗が低くなる。特に、老人では皮膚が乾燥し角質層が厚くなっているため、十分な配慮が必要である。ノイズは一般的に電源の周波数に一致した周波数のノ

イズが多い。そのため、50または60 Hzのみをカットするフィルタ(ハムフィルタ)を用いるとよい。運動が激しい場合などでは電極のリード線がゆれたりするとノイズの原因となるので、絆創膏などで止めておく。以前では、シールドルームが用いられていたが、高精度を要求しない測定の場合では必要がなくなっている。

3 筋電図の処理と分析方法

筋電図の処理としては全波整流、整流平滑化処理、積分処理、加算平均処理がある。筋電図の生波形は正負の変化を示す。その負のデータを正の値に変換して合成したものが全波整流である(図4-20)。これにより、活動状態の把握がより明白となる。積分値を求める場合では、全波整流した波形、または、平滑化の処理後の波形から積分値を求める。平滑化はフィルタ(20 Hzの高域遮断濾過)で行われる。加算処理は同じ試行を多く行い、それを時間軸を合わせて加算する。これは、信号成分とノイズ成分との区別が困難な場合などに用いられ、より信号成分を検出し易くする方法である。

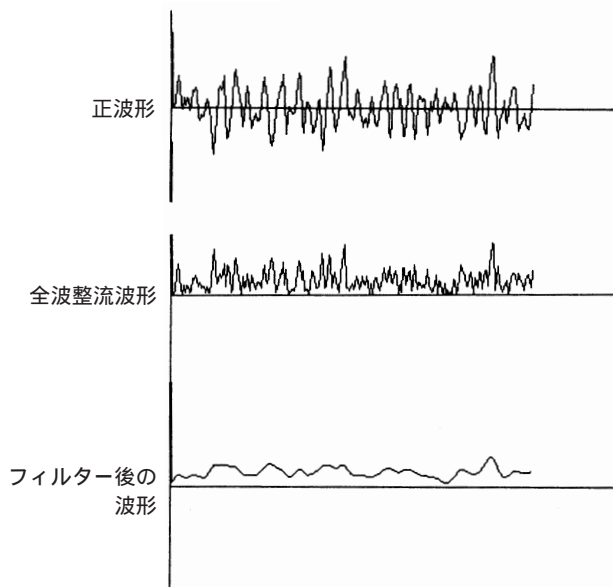


図 4-20 筋電図波形

分析方法には定性的分析(筋活動の有無、波形分析)、定量的分析がある。定性的分析である筋活動の有無をみることは、ノイズなどの問題で困難である。そのため筋活動の有無ではなく、ある一定以上の筋活動があるか、ないかを判定する。波形分析では生波形に対して周波数分析(高速フーリエ変換:FFT)を行う。周波数成分は200 Hz以内でよいが、収縮の仕方、障害がある場合などは多少異なる。サンプリング周期は1 msec以下がよい。周波数分析を定量的にみるために、周波数帯の各領域を区分(低:45 Hz以下、中:46 - 80 Hz、高周波部分:81 Hz以上)し、その面積を求め、比較すること、または平均パワー周波数の変化を比較することなどがある。

定量的な方法としては、全波整流した波形の積分値が多く用いられる。なお、積分値は筋、個人によって異なるため、相対値で比較が行われる。相対値とは随意最大収縮時の筋活動の積分値に対する比率である。他に、定量的な方法として、スパイク頻度の測定がある。

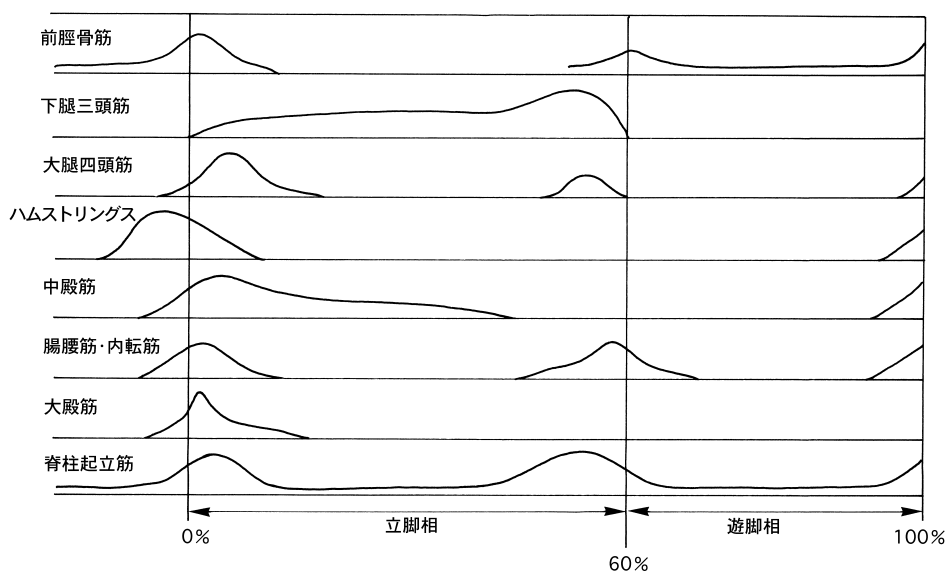


図 4-21 歩行時の筋活動

4 筋電図と運動

(1) 動作パターン

動作時の筋電活動のパターンは空間的分布と時間的な順序が必要である。例えば、歩行時の筋活動は図4-21に示すように、各筋の活動が時間的(歩行の周期)に決定されている⁴⁴⁾。幼児から老人までの歩行時の筋電図活動は時間的、空間的に変化を示す。幼児での特徴は多くの筋が関与し、下肢筋の同時放電がみられる(図4-22)³⁹⁾。歩行の習熟により筋活動が減少し、7歳で成人と同様なパターンになる。老人では筋の活動量が多いことと、活動持続時間が長いことに特徴がある¹⁶⁾。リハビリテーション分野においても、動作分析で筋電図を用いる場合が多い。歩行のみではなく、各々の動作パターン時の筋電活動を観察し、正常と異常の相違を検討することから、理学療法への応用が可能となる。

(2) 筋力との関係

筋電図の積分値(面積)から筋力を推定しようとする試みが以前より行われている²⁹⁾。等尺性収縮では、発生する張力は活動している運動単位の数と発射頻度に比例することから、積分値から筋力を推定することが可能である(図4-23)。しかし、個体間、筋肉間、電極の位置によって当然異なる。また、同じ筋で同場所に電極を再度添付した場合では、電極間抵抗などが異なるため、比較が困難である。同一筋、同一の電極であっても、疲労により、積分値と筋力との関係は異なってくる。同じ張力であっても、疲労により積分値の増大(振幅の増大、頻度の低下、群化傾向)を示す。同じ張力に対して延長性収縮と短縮性収縮時の筋電図の積分量では延長性収縮の方が低値を示す。

(3) 反応時間測定

筋電図を用いた反応時間測定として、筋電図反応時間がある。これは premotor time (PMT: 刺激から筋電図が活動するまでの潜時) motor time (MT: 筋電図活動から運動開始までの潜時)などを測定する(図4-24)。PMTは入力から中枢処理過程を反映する時間で、運動開始前緊張、運動パターン、姿勢、中枢覚醒、注意等の要因により影響を受ける。MTは末梢の要因である外部負荷量、筋張力発生率との関係で決まり、運動単位の時間的、空間的参加等の要因の影響を受ける⁴²⁾。これらの指標を用いた研究は中枢の情報処理過程の影響などを調べる目的で行われる。

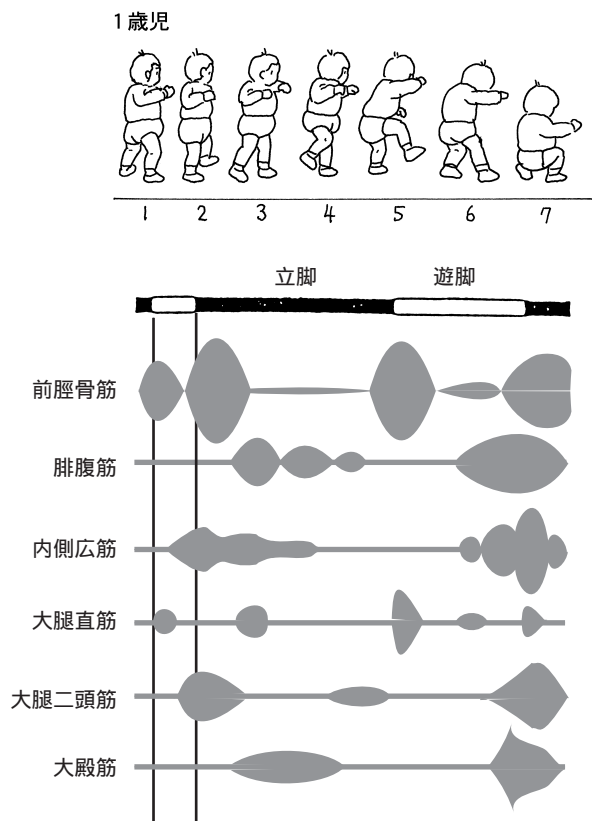


図4-22 1歳児の歩行時の筋電図 (岡本³⁹⁾一部改編)

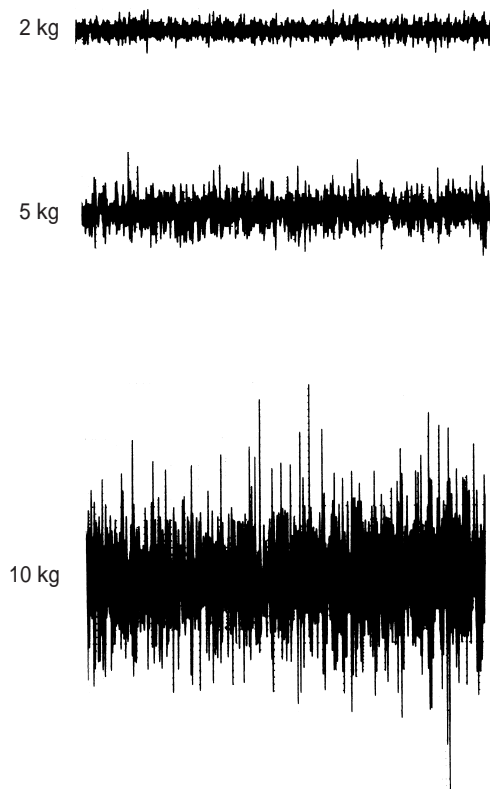


図4-23 筋力と筋電図(上腕二頭筋)

(4) 筋の活動順位

姿勢保持の神経機構において、筋の活動順位の研究が行われている。立位姿勢で足部の台が上下に傾くと、下肢の筋活動は遠位部より生じ(前脛骨筋等) 近位部(大腿四頭筋等)へと波及する(図4-25)³⁸⁾。この筋活動パターンはプログラムされたものである。この反応は応答潜時が100 - 120 msecとやや長いことから、long-loop responseといわれている。起き上がり動作時においても、頸部、腹部、下肢の筋電図の活動順位を測定した結果、正常者と脳卒中患者では差がなく、一定した傾向が報告されている⁸⁾。以上のことから、筋の活動順位の研究は運動プログラムなどとの関係で行われている。

(5) 筋電図と酸素摂取量

筋の活動は当然エネルギーを消費する。この筋活動量とエネルギー消費量(酸素摂取量)には直線関係がある。自転車エルゴメータ駆動において、最大酸素摂取量の相対的負荷量とその時の筋電積分値との間には直線関係がみられる(図4-26)¹³⁾。

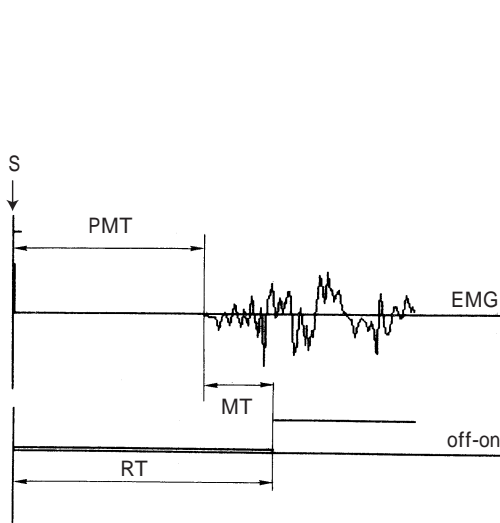


図4-24 筋電図反応時間

MT: motor time PMT: premotor time RT: reaction time

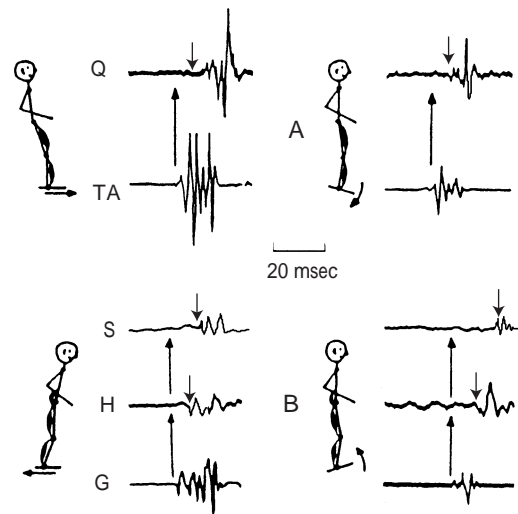


図4-25 姿勢保持機序(筋活動順位)(Nashner³⁸⁾一部改編)

TA: 前脛骨筋, Q: 大腿四頭筋, G: 腓腹筋,
H: ハムストリングス, S: 脊柱起立筋

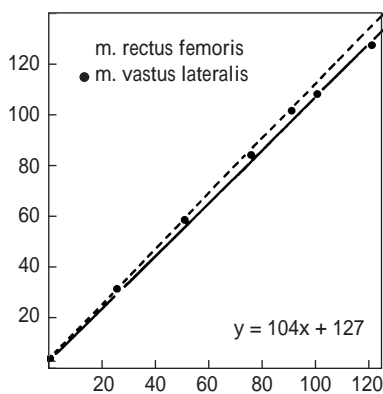


図4-26 酸素摂取量と筋電図の関係 (Henriksson¹³⁾)

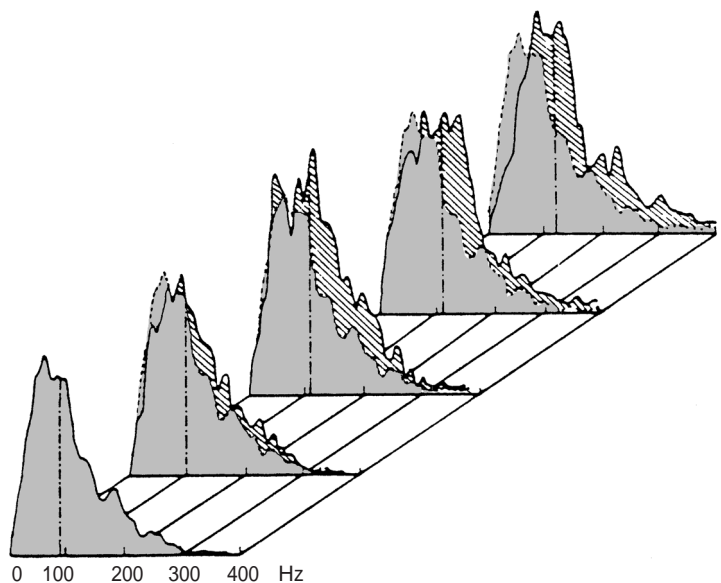


図4-27 パワースペクトル(%MVC毎)(永田³⁶⁾一部改編)

(6) 筋線維と筋電図

筋線維の違いにより、筋電図波形が異なる。表面電極を用いた場合では筋活動時のパワースペクトル波形を分析することで、特徴を見いだすことができる。FFタイプでは高周波成分が多く、反対にSタイプでは低周波成分が多い。また、等尺性収縮の収縮力の強さを増加させることにより(%MVCの増加)、高周波成分が多くなる(図4-27)³⁶⁾。当然、平均パワー周波数(パワースペクトルの面積を平均した周波数:この周波数を境にして左右の面積が等しいところ)も高い周波数へ移行していく。これはFFタイプの筋線維の参加程度が多くなることを示す。

4. 筋の障害

1) 筋の病的状態

筋の病的状態は、筋肥大、筋萎縮、筋変性、筋拘縮である。

筋肥大

筋肥大は筋トレーニングによって、筋原線維が増加することによる筋線維の肥大である。病的な状態としては、筋ジストロフィーでは筋の間に脂肪組織が蓄積し、肥大する。これを仮性肥大という。

筋萎縮

筋萎縮は筋原線維の減少による筋線維の萎縮である。原因としては廃用性筋萎縮、脱神経性筋萎縮、阻血性筋萎縮があり、筋力低下を招く。

筋変性

筋細胞の異常で、空洞化と分節化が生じる。

筋拘縮

筋拘縮の原因は先天性筋拘縮、線維性筋拘縮(筋注により筋線維が破壊され、線維化)、神経性筋拘縮(痙性による)、不動性筋拘縮(固定、不動、廃用性)である。

筋の拘縮は2関節筋で生じやすい。その拘縮の有無および他筋との区別のテスト法が開発されている(表4-7)。

2) 筋力低下の病態生理学

筋力低下の原因には加齢、廃用性萎縮があるが、解剖学的なレベルでの筋原性、神経筋接合部、神経原性の障害により分類される(表4-8)⁴¹⁾。

筋力低下の病態生理学として、原因別に主に加齢による筋力低下と廃用性筋萎縮について力学的変化(筋力低下の特徴)、形態学的(組織学的)変化、生化学的变化、電気生理学的変化にわけて述べる。

表 4-7 筋拘縮のテスト法

腸腰筋	Thomas test、Patrick(Faber)test
大腿直筋	Ely tes(第2方法:尻上がり現象)、第1方法
大腿筋膜張筋	Ober test
ハムストリングス	第1方法、三脚徴候(第2方法)、SLR
薄筋と他の内転筋	
腓腹筋とヒラメ筋	

表 4-8 筋力低下の原因

1) 加齢	
2) 廃用性筋萎縮	不動性(固定性) 不働性(廃用性)
3) 筋原性	筋ジストロフィー 多発筋炎など
4) 神経筋接合部	重症筋無力症 筋無力症候群
5) 神経原性	末梢性 神経切断 ポリオ SPMA ALSなど 中枢性 脳血管障害 腫瘍 脳性麻痺など

(1) 加齢

a. 力学的変化

筋力には動的筋力と静的筋力がある。その静的筋力に対する加齢による影響を整理すると

- ・ 加齢とともに筋力は低下
- ・ 上肢と下肢を比較すると、下肢の方が早期に低下が出現、そして、相対量(最高値に対する割合、一般的には20歳代に対する割合)も低下
- ・ 下肢で中枢部と末梢部では中枢部の方が早期に低下
- ・ 性別の影響として握力の相対量の低下はほぼ同等であるが、女性の脚力の低下が顕著、しかも早期に低下が出現

以上である。

加齢による筋力の低下に関する研究報告は多くみられる。その筋力は一般的に握力で代表している場合が多い。握力の年齢的变化は都立大学体育学研究室編集の日本人の体力標準値⁴⁸⁾から算出すると、20歳時を基準にした相対的な筋力は70歳では男女とも30%の低下(10年で6%程度の低下)を示している(図4-28)。脚力は60歳で男性が48%、女性が56%の低下を示している(10年で12%以上、上肢に比べ2倍の低下)。以上のことは上肢と下肢の比較において、上肢の代表を握力、下肢の代表を脚力とした場合、脚力の低下が著しいことがわかる。また、Tomlinsonら⁴⁹⁾は加齢により上肢より下肢の筋が、すなわち大腿四頭筋の筋力が早期に低下することを報告している。大腿四頭筋の筋力は加齢により低下を示すが、体重との相関が有意であり、体重が重い人ほど筋力が大きいとの報告がある¹⁹⁾。理由として体重を支持するのに常に役立っているためである。

老化による動的な筋力の変化を以下に示す。

- ・ 等尺性と同様に加齢による動的筋力の低下、しかも相対量の低下も大きい。
- ・ 等速性運動の中でも、速度が早い方が低下が大きい。

膝伸展筋では等尺性筋力と同時に等速性筋力(動的筋力)も低下を示す。等尺性筋力では26%の低下にもかかわらず、速度が早い動的筋力では38%の低下を示す²⁶⁾。また、等速性運動の速度の相違により、低下率も異なる。速度が早いほど低下が著明である。蛭田²⁰⁾によれば速度60度/秒の膝伸展の等速性最大筋力は、60 - 64歳に比べて、80 - 84歳では36%の低下、180度/秒では49%の低下、300度/秒では50%の低下を示し、速度が早くなるにつれて、等速性最大筋力は低下が著しい(図4-29)。

b. 形態学的な変化(組織学的変化)

一般的に老化による筋力低下を生じる原因と思われる形態学的な特徴をまとめると以下の通りである。

- ・ 筋の質量の低下、筋の萎縮
- ・ type II 線維の萎縮が著明(線維径の縮小)
- ・ type I 線維は減数しない
- ・ type I と II の構成比が変化
- ・ 脊髄前角細胞の減少
- ・ 前根の有髄神経線維の減少
- ・ 軸索の変化(軸索流の停滞)

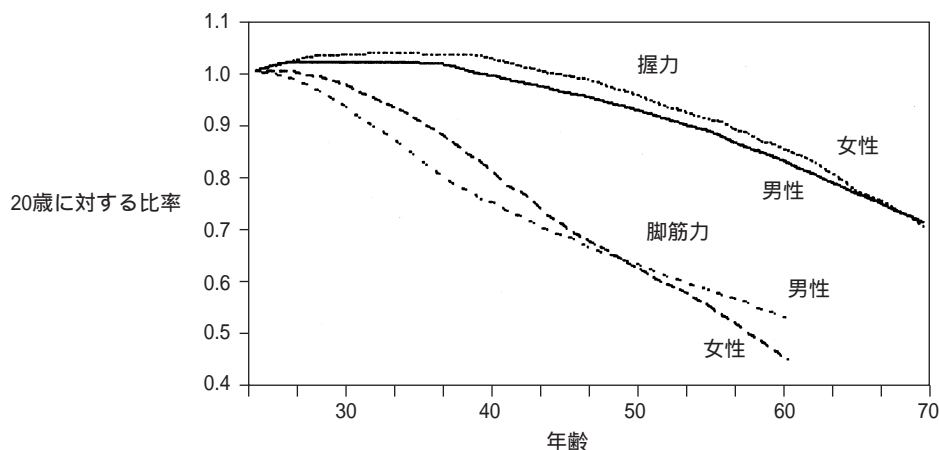


図4-28 20歳を基準とした筋力の変化

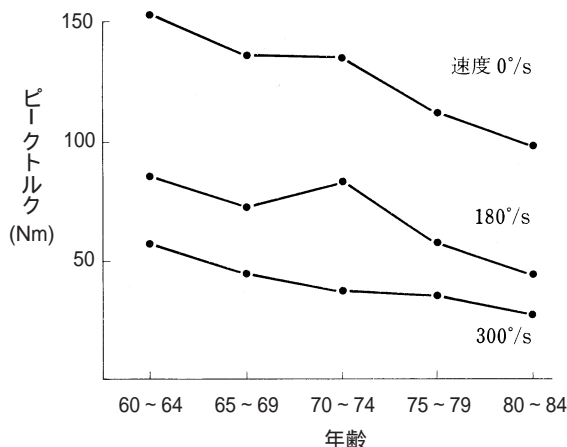


図 4-29 動的筋力の加齢変化

Inokuchi ら¹⁷⁾は事故死の男女 135 名(20 歳から 80 歳)の腹直筋の筋線維数および横断面積の変化について調査した結果、20 歳台に比べて 80 歳台では筋線維数が約 1/5 になり、横断面積は 60% に減少したと報告している。しかし、他の報告などによると、筋線維の数、断面積の変化は各筋によって減少率が異なる。

鼠の筋では老化により重量、容積が減少する。これらは筋線維の萎縮と減数によるもので、赤筋線維 (type II に相当) では筋線維の萎縮は認められず、顕著な減数がみられる。白筋線維 (type II に相当) では減数は認められず、顕著な萎縮がみられる⁵⁵⁾。

ヒトでは type II 線維の萎縮が顕著である。線維の径は type I および II とも減少を示すが、type II 線維径の減少がより顕著である。構成比は若年群では type II が 64% であったが、老人群では 50% となり、type I と II の比率が等しい。日常的に老人の運動が緩慢であることが、早い収縮を行う type II の萎縮から理解できる。下肢の遠位筋では神経原性変化 (group atrophy などの所見) が主体であり、近位筋では type II 線維の選択的な萎縮と筋原性変化 (中心核形成、壊死、間質増殖などの所見) が目立つ⁵⁰⁾。type II の選択的な萎縮の原因は廃用、栄養障害、脱神経支配などと考えられたが、現在では神経の筋に対する trophic factor の減少による機能的脱神経支配の説が有力である。軸索基部にフィラメントの蓄積および小胞体の増生がみられ、その部位での軸索流の停滞が考えられる。脊髄の前角細胞、特に大細胞は 40 歳以降減少することが報告されている⁵¹⁾。

動物実験であるが、F 型運動ニューロンの変性、除神経が強く、S 型運動ニューロンのほうが神経再支配が優つて、神経支配比が大きい S 型運動単位の出現を示唆している報告もある²¹⁾。

c. 生化学的变化¹²⁾

type II において、エネルギー供給および利用に関与する筋の酵素、特に、解糖反応に関係する酵素活性の低下が著しい。そのために物質を無酸素的に利用する能力が低下する。老化により、ミトコンドリアの酸素摂取能力、ピルビン酸脱水素酵素、ATP、クレアチン燐酸 (CP)、グリコーゲン、ATP / ADP 率の減少を示す。これらは筋収縮のエネルギー代謝に影響を及ぼす。

d. 電気生理学的変化

老人の萎縮筋の筋電図学的特徴は多相性活動電位の増加、持続時間の延長、低振幅活動電位などである。周波数分析では type I の相対的な増加により低周波成分の増加がみられる。

(2) 廃用性 (固定 = 不動 不動 = 廃用)

不動および不動状態により生じる 2 次的障害を廃用症候群 (disuse syndrome) といい、脳血管障害、心疾患などの疾患の際、安静を取らせることにより低運動となる為に生ずる障害である。この廃用症候群には

運動器障害として筋萎縮、関節拘縮、オステオポロシス
循環障害として起立性低血圧、静脈血栓症、沈下性肺炎、褥瘡
自律神経障害として便秘、尿失禁、大便失禁
精神障害として無為無欲、抑鬱、認知症 (痴呆)

その他：尿路結石、尿路感染

などがある。その中で筋萎縮および筋力低下は顕著に現れる。

不働性は筋の働きを生じることができないもの、すなわち神経の切断、筋の麻痺などである(神経原性)。不働性とは関節の固定などで、関節の可動域の運動が不可能なものをいい、固定中の筋収縮の有無とは無関係である。廃用性とは筋の収縮などが可能であるにも関わらず、筋の使用が少ないものである。

骨折などによる固定は不働性であり、しかも固定中に筋収縮(等尺性運動)を行わないと、廃用性萎縮になる。固定時の筋の伸縮状態により、筋萎縮などの発生状況が異なる報告が行われている。これは筋の収縮がない廃用性筋萎縮と異なるので区別しておく必要がある。

固定期間、固定時の筋長、固定中の筋収縮の有無(程度)、前治療、性別、年齢、スポーツ歴などにより筋力低下の力学的変化、形態学的変化、電気生理学的変化などが異なることが多いため、多くの研究論文を比較するときには考慮する必要がある¹⁾。

a. 力学的変化

廃用により筋力低下は当然出現する。最大筋力の20～30%の筋活動があれば、筋力は維持され、30%以上であれば、筋力は増強する。20%以下であれば筋力は低下を示すことが古くから報告されている³⁴⁾。筋活動がない場合は1日に3～6%、1ヶ月で50%の低下を示す。

b. 組織学的変化形態学的変化

廃用性筋萎縮の形態学および組織学的変化をまとめると以下の通りである。

- ・筋重量の低下
- ・筋線維径の低下
- ・筋の種類により type I、II の萎縮度が異なる
- ・関節の固定時の筋長により萎縮の程度が異なる

Herbisonら¹⁴⁾はラットのヒラメ筋と足底筋(深層、浅層)を用いて筋線維の type 別の萎縮程度について検討している。膝と足関節を中間位で6週間固定すると、筋重量はヒラメ筋では58%(42%減)に、足底筋では55%(45%減)になる。筋線維径はヒラメ筋の type I が42%減、type II が45%減、足底筋(赤筋)の type I が13%減、type II が32%減、足底筋(白筋)の type I が5%減、type II が41%減を示す。筋線維の構成比はヒラメ筋の type I が79.2%より70.9%へと8.3%の低下(type II は8.3%の増)、足底筋(赤筋)の type I が16.2%より13.9%へと2.3%の低下(type II は2.3%の増)、足底筋(白筋)の type I が3.8%より2.8%へと1%の低下(type II は1.5%の増)を示している。以上のように筋重量の低下率は同様であっても、type別の筋線維の萎縮度合は筋によって異なることを示している。

Maierら³⁰⁾はネコの腓腹筋の筋紡錘内筋を調べた結果、30日間の固定によって核袋線維は60%に、核鎖線維は70%に萎縮すると報告している。

c. 生化学的变化

廃用性筋萎縮の生化学的变化をまとめると以下の通りである。

- ・筋の総蛋白量は減少
- ・ミオグロビン含有量は不変(相対的には増加)
- ・ATP、糖質は減少

固定の仕方(収縮位または伸張位)により蛋白代謝の変化が異なる。ラットの後肢を収縮位に固定した場合(ヒラメ筋)蛋白分解率増加、蛋白合成が減少、伸張位に固定した場合(長指伸筋)蛋白合成が増加することが報告されている。ただし、これは廃用性筋萎縮の結果ではなく、伸張位による等尺性収縮や伸張性反射の影響とも考えられている¹⁸⁾。

d. 電気生理学的変化

廃用性萎縮筋の筋電図は一般的に正常である。廃用性により、収縮の特性に変化を示す報告がある。Mayerら³³⁾はネコの後肢が6ヶ月の長期固定により、ヒラメ筋の筋全体の最大収縮時間と1/2筋弛緩時間の短縮を報告している。

(3)筋原性

筋原性筋萎縮と神経原性筋萎縮の特徴を表4-9に示す⁴¹⁾。筋原性の筋力低下は主に、筋ジストロフィー、多発性筋炎などによる。筋力低下の特徴は各疾患により異なる。

a. 筋ジストロフィー(PMD)

筋ジストロフィー症の原因には血管説、神経説、筋原説などがあるが、現在最も有力なものは筋原説であり、その中でも膜に異常があるとする膜異常説である³⁵⁾。いずれにせよ、筋力低下を示す。筋力の低下を示す筋はPMDの病型により異なる。Duchene型は四肢近位部と躯幹、顔面肩甲上腕型は顔面と上腕の筋の萎縮と筋力低下

表 4-9 筋原性筋萎縮と神経原性筋萎縮の特徴 (斎藤⁴¹⁾)

	筋原性筋萎縮	神経原性筋萎縮
筋萎縮の分布	近位筋	遠位筋
線維束攣縮	-	- または +
感覚障害	-	- または +
深部反射	減弱・消失	減弱・消失・亢進
筋電図	低振幅 短持続時間 干渉波	高振幅 長持続時間 活動電位減少
CPK	上昇	正常
筋生検		
H・E染色	大小不同群性萎縮 変性, 再生線維 中心核増加 結合織の増生 炎症細胞浸潤	小角化線維
NADH-TR染色	central core moth-eaten type I線維萎縮	target fiber 筋線維タイプ群化
ATPase染色	type I線維優位 ヒストグラム一峰性分布	type II線維優位 ヒストグラム二峰性分布

を呈する。主病変は筋線維の壊死とそれに伴う貪食現象である。筋線維直径は大小不同となる。また、Duchene型のPMDでは、下腿の仮性肥大がみられ、これは筋線維の肥大よりも脂肪組織の増殖の影響が推定されている。

b. 多発性筋炎

多発性筋炎の筋力低下を示す部位は、主に四肢近位筋群、頸部屈曲筋群、咽頭・喉頭筋群である。副腎皮質ステロイド剤使用により筋力の改善がみられる。生化学的にはCPK(クレアチンフォスホキナーゼ)の上昇、組織学的には横紋筋の炎症・変性および再生像を呈する。電気生理学的には筋電図での筋原性変化(低振幅電位、短持続時間電位)がみられ、fasciculationはみられない)が特徴的である。

(4) 神経筋接合部

神経筋接合部における障害は重症筋無力症が代表的である。これは筋力の低下と言うよりも、筋の異常な疲労が特徴である。筋収縮の反復により筋力が低下するが、一定の休息後には回復を示す。筋電図所見ではwaning phenomenon(振幅漸減)がみられる。

筋無力症候群は肺癌に伴ってよくみられる筋無力症状で、易疲労性と脱力がみられ、筋萎縮を伴うこともある。筋無力症と異なり、反復運動により筋力の増強を呈する。筋電図の検査では10 Hz以上の反復刺激で活動電位は漸増する(waxing phenomenon)(図4-30)^{7,54)}。

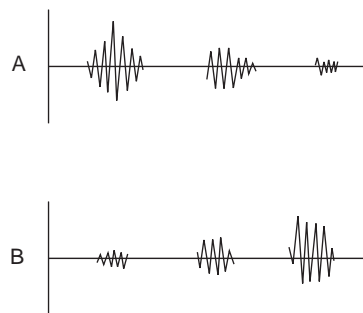


図 4-30 重症筋無力症のwaning phenomenon (A)と筋無力症候群のwaxing phenomenon (B)

(5) 神経原性

神経原性筋萎縮は運動単位ごとの筋線維が群となって小径化するが群化萎縮がみられるのが特徴である。神経原性は中枢性と末梢性に区別される。

a. 末梢性(前角細胞含む)

末梢性には神経断裂などの末梢神経損傷、脊髄前角細胞の障害であるポリオ、脊髄の変性疾患である筋萎縮性側索硬化症(ALS)、脊髄性進行性筋萎縮症(SPMA)、脊髄空洞症などがある。全体的な特徴は表4-8に示す。

神経切断後の筋萎縮は筋線維の種類によって異なる変化を示す。一般的にtype II線維の萎縮が強い。ヒラメ筋においては萎縮とtype変換が生じている²⁾。ラットの坐骨神経切断後、赤筋であるヒラメ筋と白筋である長指伸

筋を比較すると、ヒラメ筋の萎縮は長指伸筋より著明である。また、ヒラメ筋では脱分化と再分化が出現する。収縮時間と弛緩時間はヒラメ筋では短縮、長指伸筋では延長が認められる⁴⁷⁾。

ALSは運動ニューロン疾患で、下位ニューロン徴候(筋萎縮、筋力低下、線維束攣縮：特に上肢で遠位筋に出現)と上位ニューロン徴候(深部反射亢進、病的反射出現)を示す。上位ニューロンの変性としては外側及び前皮質脊髄路の変性があり、下位ニューロンの変性は頸髄と腰髄に多くみられる。前根の萎縮、軸索と髄鞘の変性、脱落がみられる。

b. 中枢性

中枢性には脳血管障害、脳性麻痺、小脳障害などの中枢神経障害が含まれる。中枢性の筋力低下は廃用性、不動性、不働性などによる影響がみられるため、中枢性独自の筋力低下およびその筋の変化を区別することは困難である。また、筋力低下についても、純粋な筋線維の萎縮の他に、運動制御が困難なために生じる、筋同時収縮および持続障害による筋力発揮困難がある。しかし、脳血管障害による片麻痺の筋萎縮は主にtype II線維の萎縮に加えて、type Iの小径化がみられたが、細胞浸潤や結合織の増生はなかったという報告がある⁶⁾。他にも、type II萎縮が主であるという報告があり、筋萎縮が単なる廃用性萎縮によるものではないことが明らかである。

5. 筋と理学療法

1) 筋トレーニング

(1) 筋トレーニングの原則

筋トレーニングの原則としてオーバーロードの原理がある(overload principle)。これはトレーニングの強さに関する原則で、過負荷でなければ、筋力増強は不可能である。しかし、オーバーロードのみではなく、トレーニングの条件としては、

- a. 強さ
- b. 時間
- c. 頻度
- d. 期間
- e. 筋収縮の様式

の5条件を考慮しなければならない。

以上の条件は筋トレーニングの目的により、処方される。例えば、静的筋力の増強では強負荷で短時間の負荷を、筋持久力の増強では低負荷で長時間の負荷を用いたトレーニングを行う。

a. 強さ

強さの考え方としては、最大筋力に対する割合(%)か、1 RM(最大1回挙上重量：repetition maximum)または10 RM(最大10回挙上重量)に対する割合を用いる場合が多い。

b. 時間

時間には筋収縮時間と運動時間がある。筋収縮時間は、特に、アイソメトリック法の場合、重要な要因である。収縮時間と収縮の強さの関係において、強さが強いほど収縮時間が短く、強さが弱いほど収縮時間が長くなる特徴がある。運動時間は1度のトレーニングに要する時間である。

c. 頻度

頻度には1度のトレーニング中に行う収縮回数(収縮頻度)と日、週、月当たりのトレーニング回数(トレーニング頻度)がある。

収縮頻度は収縮時間と休息時間の合計を運動時間で除したものである。トレーニング頻度に関しては、頻度が高いほど運動効果(筋力増加)がみられるが、原則的に週3日の頻度で十分な効果が得られるという報告もある。

d. 期間

期間はトレーニング効果との関係で重要な要因である。トレーニング開始、20日後に、筋力の増加を示したが、筋断面積の増加はみられず、40日後に筋断面積の増加がみられた報告がある。期間によりトレーニング効果を示す内容(影響)が異なることが伺える。

e. 筋収縮様式

筋トレーニングの要因として、筋収縮様式の相違が上げられる。収縮様式として、遠心性、求心性、等尺性収縮があり、これらの収縮様式の違いにより、トレーニング方法が異なる。

(2) トレーニング方法

トレーニングの方法としては、次の方法がある¹⁰⁾。

- a. アイソメトリック法
- b. ウェイト(アイソトニック)法
- c. アイソカイネティック法
- d. エクセントリック法
- e. プライオメトリック法

トレーニングの目的により、その方法が異なる。筋力の増強には、強い負荷で少ない回数の運動を、筋の持久力の増強には、軽度の負荷で多くの回数の運動を行うのが原則である。

a. アイソメトリック法

この方法は等尺性収縮による筋力強化方法である。この方法についてはHettingerとMuller³⁴⁾が、最大筋力の40 - 50%で最大効果が得られ、20 - 30%では効果が見られず、20%以下では筋力の低下がみられることを報告している。筋の収縮時間は4 - 6秒程度でよく、トレーニング頻度は1日1度でよいことが報告されている。

等尺性収縮による筋力は収縮しているときの関節角度における筋力である。筋力増強においても、ある関節角度のみの筋力強化であり、筋全体の筋力増強を表しているのではない。

b. ウェイト(アイソトニック)法

この方法は筋の求心性収縮による方法である。代表的な方法に、DeLomeの漸増抵抗運動がある。これは10 RM (10回だけ持ち上げられる最大負荷量)をもとめて、10 RMの1/2で10回、3/4で10回、10 RMで10回と漸増的に増加させる方法である。変法として、負荷量、回数などを変えて行う方法も多くある¹¹⁾。これらの場合は筋力の増強を目的としている。負荷量に関しては1 RMの70%以上でないと筋力増加がみられないという報告がある。運動の順序として、大筋群から小筋群へ移るような順序、特に発達させたい身体部分から始め、姿勢に関しても、同じ姿勢でトレーニングを行うのではなく姿勢を換えるなどの考慮が必要である¹²⁾。

c. アイソカイネティック法

アイソカイネティック(isokinetic)は等運動性で、原則的には等速性ではない。等速性では筋収縮の収縮速度は等速でないことが多い。等運動性とは関節の角速度が等速であり、それぞれの角度におけるトルクが変化する。

全可動域にわたって、規定された速度において最大限の力を発揮することが、他のトレーニングとの相違である。速度がいくつか選択が可能であることから、3種の筋線維全てが動員される。臨床的には、筋肉痛が生じないこと、傷害部位の動的筋出力の評価が可能である事から、評価、治療によく用いられている。

現在のトレーニングマシンはフェニックス、MYORET、CYBEX、BIODEX、HYDROMUSCULATOR等である。

d. エクセントリック法

遠心性収縮を用いたトレーニング法で、筋の出力は求心性収縮より大きく、筋力増強に適しているが、筋線維の損傷などに注意が必要である。トレーニングは求心性収縮によるトレーニングより有効であること、筋線維の種類であるtype IIbの選択的増加が生じることが報告されている。

問題点としてエクセントリック法のトレーニングにより、運動後1 - 2日経過後に疼痛が生じる(遅延性疼痛)ことがある。筋原線維に損傷がみられ、原因として、筋出力、疲労等に関係がある。

e. プライオメトリック法

プライオメトリックトレーニングは遠心性収縮から求心性収縮への切り換えに注目したトレーニング法である。遠心性収縮時に筋や腱に弾性エネルギーが貯えられ、そのエネルギーを利用してよりパワーを発揮するのに用いられる。実際の方法として、体重を利用したジャンプや、重量負荷による(プーリー)トレーニング等がある(図4-31)³⁾。パワーを発揮するには重量が多いものを用いるが、敏捷性の向上を目的にしたものは軽い重量で実施される。

その他に、トレーニングの分類としては負荷方法による分類と目的による分類がある。負荷方法による分類は最大筋力法、最大反復法、衝撃法、スピード法で、目的による分類は筋力増強、筋パワー増強、筋持久力、敏捷性、全身持久力法(サーキットトレーニング、インターバルトレーニング)などである。

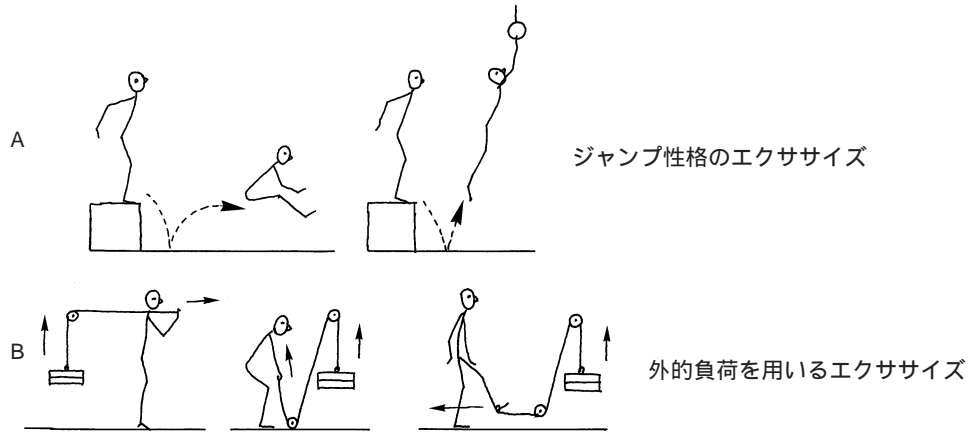


図 4-31 プライオメトリック法

(3) 生理学的変化(筋力増加のメカニズム)

筋力の増加の経過は、最初に神経原性筋力の増加を示し、その後、筋原性筋力増加を示す。神経原性筋力増加は絶対筋力の増加で、運動単位の発射頻度、発射数および同期化により生じたものであり、筋放電量の増加により説明ができる。筋原性筋力増加では筋原線維の数の増加により筋線維の肥大、即ち筋肥大を示す(図4-32)²³⁾。筋線維は数の増加に関しては多くの議論があるが、一般的には筋線維の数は増加せず(筋原線維は増加)筋線維の肥大を示すことで一致している。筋線維 type I、II の比率はトレーニングによって変化を示す。特に type II の FT 線維の選択的肥大が生じる。

老人の筋力増加は筋肥大の傾向を示すが、筋力増加の大部分は神経的要素による。これは老人では FT 線維が萎縮していることにより FT 線維の肥大が生じにくいことで説明できる¹⁵⁾。しかし、老人においてもトレーニングにより S 線維の肥大により、瞬発力や敏速性は欠けるが、持久力が維持および増加することから、トレーニングの重要性が示唆されている。

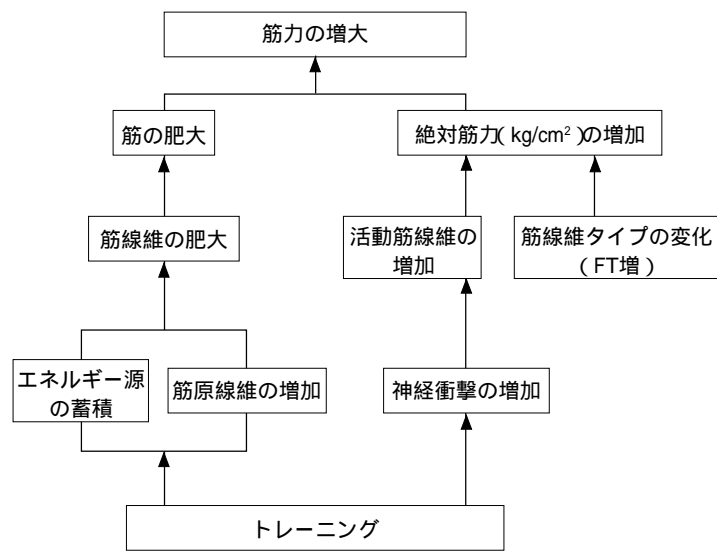


図 4-32 筋力増加のメカニズム(金子²³⁾)

(4) 障害者の筋力増強

障害者および傷害者に対する筋トレーニングは健常者のトレーニングをそのまま応用するには困難な場合が多い。

疼痛がある場合の筋力強化、中枢性疾患に対する筋強化、不動に対する筋力強化等、疾患により、特徴を理解した上で、筋力強化が必要である。例えば、水中での筋力強化法では水の特性と温熱的作用を利用して、効率の良い運動が行われる。また、老人では、筋力強化運動として直接筋にアプローチしても、理解、動機付け等の問題から困難な場合が多い。そのため、ADL練習の中で、筋力強化を考慮した方法を行うことも必要となる。固定された関節での運動は主にアイソメトリック法が主になるが、電気刺激による筋力増強法などもある¹⁶⁾。また、特殊な方法としてPNF (proprioceptive neuromuscular facilitation) を用いたアプローチ¹⁷⁾等がある。

引用・参考文献

- 1) Appell HJ: Skeletal muscle atrophy during immobilization. *Int J Sports Med* 7: 1-5, 1986.
- 2) Bohannon RW: Make tests and break tests of elbow flexor muscle strength. *Phys Ther* 68: 193-194, 1988.
- 3) Bohannon RW: Significant relationships exist between muscle group strength following stroke. *Clin Rehabil* 4: 27-31, 1990.
- 4) Brooks VA: The neural basis of motor control. Oxford University Press, 1986.
- 5) Burke RE: Motor Unit Types: Functional Specialization in Motor Control. *TINS* 3: 255-258, 1980.
- 6) Chokroverty S, et al.: Hemiplegic amyotrophy. *Arch Neurol* 33: 104-110, 1976.
- 7) Corbett JJ, et al.: Myasthenic syndrome as the sole manifestation of carcinoma. *Arch Phys Med Rehabil* 50: 86-90, 1969.
- 8) 江原皓吉・他：起き上がり動作における筋活動様態．東京都衛生局学会誌 74: 210-211, 1985．
- 9) 江上修代(訳)：ソビエトスポーツトレーニングの原理．白帝社，1985．
- 10) 江崎重昭・他：電気刺激による筋力増強法．理学療法ジャーナル 23(11): 770-775, 1989．
- 11) Goldspink DF: The influence on immobilization and stretch on protein turn over of rat skeletal muscle. *J Physiol (London)*, 264: 267-282, 1977.
- 12) Gutmann E: Muscle. In, Finch CC, et al. (eds.), *Handbook of the biology of aging*. 445-469, Van Nostrand Reinhold Com. 1977.
- 13) Henriksson J, et al.: Integrated electromyography of quadriceps femoris muscle at different exercise intensities. *J Appl Physiol* 36: 218-220, 1974.
- 14) Herbison GJ, et al.: Muscle fiber atrophy after cast immobilization in rat. *Arch Phys Med Rehabil* 59: 301-305, 1978.
- 15) 猪飼道夫：運動生理学入門．杏林書院，1969．
- 16) 猪飼哲夫・他：筋組織からみた筋力．PTジャーナル 23(11): 742-748, 1989．
- 17) Inokuchi S, et al.: Age-related changes in the histological composition of the rectus abdominal muscle of the adult human. *Human Biol* 47: 231-249, 1975.
- 18) 伊東 元・他：筋活動からみた膝関節機能．リハ医学 19: 159-164, 1982．
- 19) 伊東 元・他：大腿四頭筋機能と歩行能力の関係．リハ医学 22: 164-165, 1985．
- 20) 蛭田秀一・他：高齢者(60～80歳代)の等速性最大筋力．体力科学 35: 481, 1986．
- 21) Kanda K, et al.: The effects of aging on physiological properties of fast and slow twitch motor units in the rat gastrocnemius. *Neurosci Res* 3: 242-246, 1986.
- 22) 金久博昭：筋のトレーニング科学．高文堂出版，1989．
- 23) 金子公宥：パワーアップの科学．朝倉書店，1988．
- 24) 勝木保次・他(監修)：新生理科学大系「4. 筋肉の生理学」．医学書院，1986．
- 25) KNOTT M, et al.: Proprioceptive neuromuscular facilitation. Harper & Row, 1968.
- 26) 小林寛道：高齢者の筋力トレーニング．体育の科学 39(4): 300-304, 1989．
- 27) 窪田 登：ウェイトトレーニングの運動処方．コーチングクリニック 1(1): 20-22, 1987．
- 28) Larson L: Aging in mammalian skeletal muscle. In Mortimer, J.A., et al. (eds), *The aging motor system*. p.61-97, Praeger Publishers, 1982.
- 29) Lippold OJ: Relation between integrated action potentials in human muscle and its isometric tension. *J Physiol* 117: 492-499, 1952.
- 30) Maier A, et al.: The effects on spindles of muscle atrophy and hyperatrophy. *Exp Neurol* 37: 100-123, 1972.

- 31) 真島英信：生理学．文光堂，1984．
- 32) 丸山仁司：筋力低下の病態生理学．理学療法 7(4): 257-262, 1990．
- 33) Mayer RF: Structure and function of the motor unit. Effects of immobilization, monoparesis or paraplegia. *Contempt Clin Neurophysiol EEG Suppl* (34): 479-485, 1978.
- 34) Muller E: Influence of training and of inactivity on muscle strength. *Arch Phys Med Rehabil* 51: 449-462, 1970.
- 35) 村上慶郎・他：筋ジストロフィー症の病態生理．総合リハ 5: 1066-1074, 1977．
- 36) 永田 晟：筋と筋力の科学．不昧堂，1984．
- 37) 中村隆一・他：基礎運動学 第3版．医歯薬出版，1987．
- 38) Nashner LM: Fixed patterns of rapid postural responses among leg muscles during stance. *Exp Brain Res* 30: 13-24, 1977.
- 39) 岡本 勉：幼小児における歩行の習得，習熟過程の筋電図学的解析．臨床脳波 15: 145-154, 1980．
- 40) Rheault W, et al.: Intertester reliability of the handheld dynamometer for wrist flexion and extension. *Arch Phys Med Rehabil* 70: 907-910, 1989.
- 41) 斎藤 宏：神経筋疾患および加齢による筋力低下．理学療法 2: 13-22, 1985．
- 42) 佐直信彦・他：他動運動の反応時間への影響．臨床脳波 31: 285-288, 1989．
- 43) 砂原茂一(監訳)：運動療法の原理．医歯薬出版，1971．
- 44) 鈴木良平：下肢の筋動作学．日整会誌 46: 139-145, 1972．
- 45) 鈴木 徹・他：手関節部位と握力の関係について．理学療法学 13: 409-413, 1986．
- 46) 体育科教育研究会(編)：体育学実験実習概説．大修館，1983．
- 47) 高木昭夫：筋病学の研究；II生理学的側面．富田忠夫・他(編)．新生理科学大系4 筋肉の生理学．医学書院，1986．
- 48) 東京都立大学体育学研究室(編)：日本人の体力標準値 第4版．不昧堂，1989．
- 49) Tomlinson BE, et al.: The effects of aging and of cachexia upon skeletal muscle: a histopathological study. *J Neurol Sci* 9: 321-346, 1969.
- 50) Tomonaga M: Histochemical and ultrastructural changes in senile human skeletal muscle. *J Am Geriatr Soc* XXV: 125-131, 1977.
- 51) 朝長正徳：神経・筋細胞について．日老医誌 15: 121-127, 1978．
- 52) Tornvall G: Assessment of physical capabilities with special reference to the evaluation of maximal voluntary isometric muscle strength and maximal working capacity. *Acta Physiol Scand* 58 (suppl 201): 1-102, 1963.
- 53) 矢部京之助：人体筋出力の生理的限界と心理的限界．杏林書院，1980．
- 54) 吉川哲雄：重症筋無力症．上田英雄・他(編)，内科学．p.1511，朝倉書店，1989．
- 55) 吉岡照樹：筋組織の老性変性に関する微計測的研究．日老医誌 7: 351-363, 1970．