

## 特集 第4回日本ディサースリア学術集会

運動機能を改善させるために必要な  
運動生理学

## —筋力向上の観点から—

総説▶

大藏倫博

Tomohiro Okura

**要旨** ディサースリア分野におけるリハビリテーションでは筋力に対する理解を深めておくことが不可欠である。本稿では、まず骨格筋系に関する運動生理学の観点から、骨格筋のはたらきや階層構造、筋の神経支配、筋線維タイプによる機能やはたらきの違い、さらには労作性筋肥大と廃用性筋萎縮について概説する。そして、レジスタンストレーニングにより筋力向上を得るために必要な知識として、トレーニングの原理・原則、安全限界と有効限界、トレーニングの種類（動的・静的トレーニング）およびそれらの基本処方と効果、さらには安全面への配慮にも言及する。

**キーワード**▶ 骨格筋, 筋線維, 運動単位, レジスタンストレーニング, トレーニングの原理・原則

## I. はじめに

運動機能は身体的能力と言い換えることができ、狭義の体力を指す。表1に“体力”の構造を示した<sup>1)</sup>。体力とは、広義には身体的能力と精神的能力の両方を含めた全人間の能力と捉えることができる一方で、一般には、精神的能力を除いた身体的能力に限定することの方が理解しやすいかもしれない。特に、本稿で焦点を当てた筋力は、身体的能力の中でも行動体力に含まれ、さらに機能の一つに分類される。

本稿において筋力向上に焦点を当てた理由は、ディサースリア分野におけるリハビリテーションでは筋力の重要性が最も高いと考えられたためである。リハビリテーションにおける筋力向上のためには、骨格筋に対する正しい運動生理学的知識と的確なトレーニングノウハウが必要である。そこで、本稿では筋力向上の観点から、骨格筋に対する基本的理論に加え、主たるトレーニング法であるレジスタンストレーニングの理論および実践方法について概説することを目的とした。

## II. 骨格筋系の運動生理学

## 1. 骨格筋のはたらき

骨格筋は意識によってその運動を調節できるため随意筋

に属し、日常動作からスポーツ動作まで、ヒトのすべての身体運動の動力源としてはたらいっている。また、筋線維内には糖や脂質を分解してエネルギーに変換する仕組みとして代謝系が内在しているだけでなく、体温維持としても重要な役割があり、体熱生産の約60%を担っている。これらのことから、骨格筋の機能を維持・向上させることは、スポーツ能力の向上のみならず、生体恒常性の維持や日常生活を活性化するうえでも意義がある。つまり、レジスタンストレーニングの目的の一つは、骨格筋の力学的、代謝的機能を高めるとともに、その活動を調節する神経系の機能を改善することにあると言える。

2. 骨格筋の階層構造 (図1)<sup>2)</sup>

骨格筋は筋組織、結合組織、神経、血管からなる器官である。筋のなかで能動的に張力を発揮したり、短縮したりするのは筋線維であり、直径50~100 $\mu$ mの細長い細胞である。個々の筋線維は、筋内膜と呼ばれる結合組織の膜でできた鞘(さや)のような構造に覆われている。さらに、多数の筋線維が集まって束をつくり、その周囲を筋周膜という結合組織性の膜が覆っている。この筋線維の束を筋線維束(筋束)と呼ぶ。筋線維束と筋線維束の間の空間には、線維性の結合組織や血管がある。多数の筋束が集まり、筋外膜という結合組織の膜に覆われ、筋を構成している。

## 3. 筋の神経支配

筋線維の活動は運動神経からの指令によって起こる。運動神経は1個の細胞体と枝分かれした多数の軸索からなり、

筑波大学体育系・高細精医療イノベーション研究コア

[連絡先] 大藏倫博：筑波大学体育系 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1)

TEL029-853-2733 FAX029-853-6507 Email: okura.tomohiro.gp@u.tsukuba.ac.jp

表1 “体力”の構造<sup>1)</sup>

・体力
—身体的能力
・行動体力
—形態：身長，体重，BMI(kg/m <sup>2</sup> )，体組成(体脂肪量，筋肉量，骨量等)，形態項目(腹囲，胸囲等)
—機能：全身持続力，筋力，筋持久力，瞬発力(パワー)，柔軟性，調整力(敏捷性，平衡性，緻密性)
・防衛体力
—構造：器官・組織の構造
—機能：体温調節，免疫，適応(身体的ストレスに対する抵抗力)
—精神的能力
・行動体力
—意思，判断，意欲等
・防衛体力
—精神的ストレスに対する抵抗力

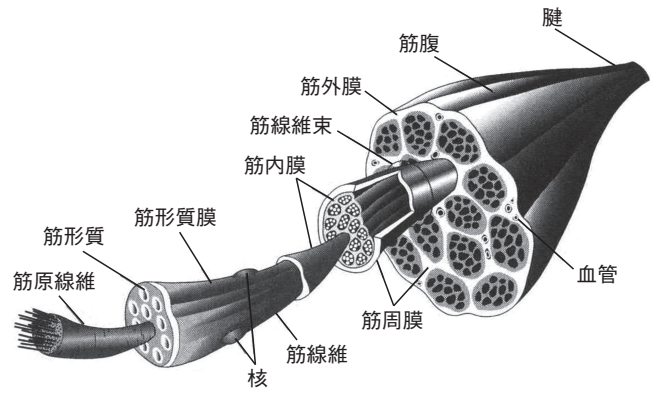


図1 骨格筋の階層構造<sup>2)</sup>

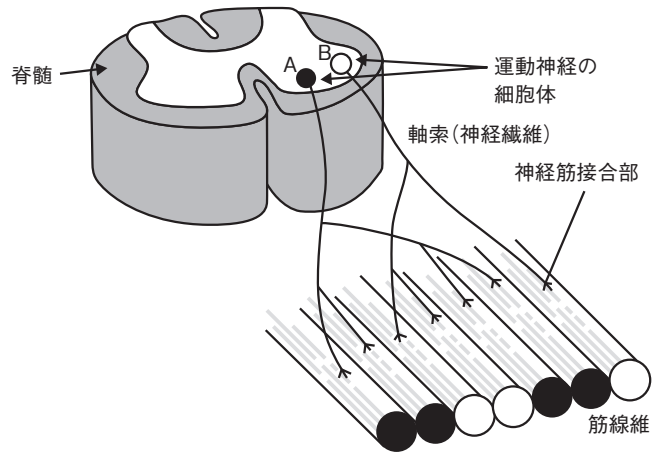


図2 運動単位の様式図<sup>3)</sup>

それが支配する筋線維の集団を運動単位 (motor unit) と呼ぶ (図2)<sup>3)</sup>。運動単位は「全か無の法則」に従うため、同じ運動単位に属する筋線維のうち、あるものは活動し、他は活動しないということは起こらない。

一つの運動単位に含まれる筋線維の数を神経支配比という。多くの運動単位では神経支配比は100~200であるが、精緻な運動調節が必要な表情筋や手のひらの筋では小さく(10~100)、逆に一気に大筋力を発揮するようなタイプの下肢筋では1,000以上にもなる。

#### 4. 筋線維タイプ

筋線維を大別すると速筋線維 (fast-twitch fiber : FT 線維) と遅筋線維 (slow-twitch fiber : ST 線維) に分類される。FT 線維は収縮速度が速く、その張力も大きい。ST 線維は収縮速度が遅く、その張力は小さい。一方、ST 線維は有酸素性代謝能力が高く、持久力に優れている。赤色の色素たんぱく質を多量に含有するため外観上赤みを帯びて見え、赤筋線維とも呼ばれる。FT 線維はこれらの色素たんぱく質が少なく白筋線維と呼ばれる。最も一般的な標記法では遅筋線維をタイプI線維、速筋線維をタイプII線維と記載する。なお、筋線維タイプの組成(全筋線維数に対する各筋線維タイプの数の割合)は、アスリートのタレント発掘に活用されることがある。一流のマラソンランナーの筋線維タイプ組成を調べると、ST 線維がその大部分を占めていることが多く、反対に一流短距離走選手の場合はFT 線維が多くを占めるケースが頻りにみられる (図3)。

#### 5. 運動強度と運動単位の動員様式

一般にST 線維を支配する運動神経はその細胞体が小さく、興奮の閾値が低く、神経支配比が小さい(運動単位のサイズが小さい)という特徴を有する。一方、FT 線維を

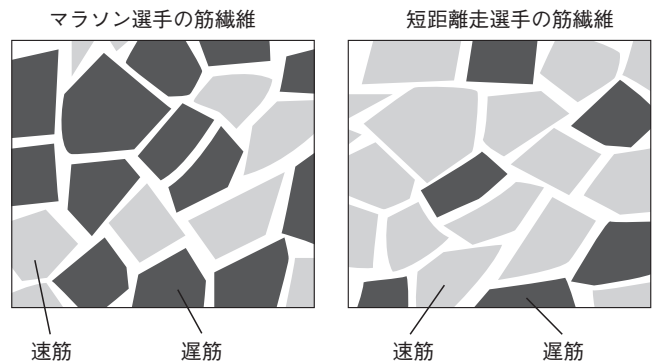


図3 アスリートの筋繊維タイプの組成

支配する運動神経はその細胞体が大きく、興奮の閾値が高く、神経支配比は大きい(運動単位のサイズが大きい)傾向にある。徐々に筋力を高めていくような筋力発揮を行った場合、まずサイズが小さく動員閾値が低いST 線維の運動単位が優先的に動員される。筋力発揮レベルの高まりとともに、サイズの大きな、FT 線維の運動単位が付加的に動員されるようになる (図4)。これを「サイズの原理」と呼ぶ。トレーニングにおける筋線維の動員様式も基本的に

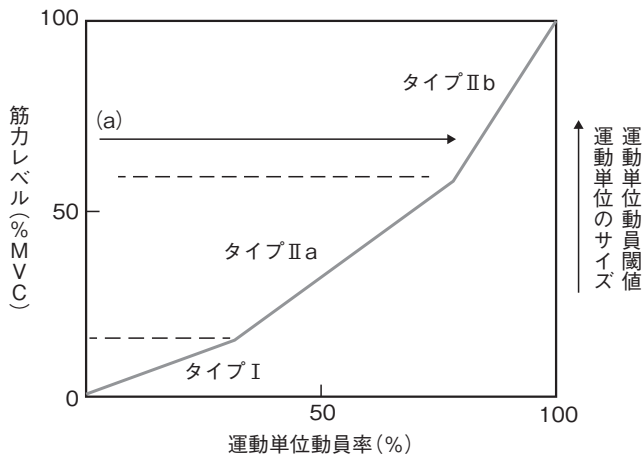


図4 筋肉発揮レベルと運動単位動員閾値の関係(模式図)

通常の筋力発揮における運動単位の動員順序(サイズの原理)を模式的に表したグラフ。(a)は筋肥大や筋力増加に必要なとされる負荷強度に相当する筋力レベルを示す。

はサイズの原理に従うことから、トレーニング効果が大きいFT線維を十分に動員するには最大筋力の50%以上の筋力発揮が必要である。一方、瞬発的な筋力発揮の場合には、サイズの原理に反してFT線維から優先的に動員されることもある。

#### 6. 労作性筋肥大と廃用性筋萎縮

高強度のレジスタンストレーニングを継続すると骨格筋は肥大し、筋横断面積の増大が起こる。こうした適応を一般に労作性筋肥大と呼ぶ。一方、不活動、除負荷、ギプス固定などにより筋の活動が低減したり、筋にかかる力学的負荷が低下したりする筋の萎縮が起こる。これを廃用性筋萎縮と呼ぶ。動物を用いた実験モデルやヒトを対象とした研究(ベッドレスト、宇宙飛行、ギプス固定など)から、遅筋線維を多く含み、姿勢維持などのために日常的に活動する抗重力筋で著しく起こることが示されている。

レジスタンストレーニングによる筋肥大は、トレーニング未実施者の場合、標準的なトレーニングにより3カ月で5~10%程度の筋肥大(横断面積の増加)が起こる<sup>4)</sup>。

廃用性萎縮の場合、その萎縮速度はトレーニングによる肥大速度より大きく、ベッドレストやギプス固定の場合には1日あたり0.5~1.0%に達する。

#### 7. 加齢に伴う筋萎縮

通常の日常生活を続けていても30歳以降になると加齢に伴って骨格筋は萎縮し、筋力も低下する。筋萎縮と筋機能の低下が正常なレベルを超えて進行した場合をサルコペニアと呼ぶ。加齢に伴う筋萎縮は特に下肢と体幹の筋群において顕著であり、大腿四頭筋では1年間あたり0.5~1.0%の割合で萎縮すると言われている<sup>5)</sup>。筋線維レベルの変化では、40歳以降に速筋線維の横断面積が減少し、全体の筋線維数に対する速筋線維数の割合も減少する。この理由

として、まず速筋線維を支配していた運動神経が脱落し、それが支配していた速筋線維に遅筋線維を支配していた別の運動神経が再支配するために、速筋線維の遅筋線維化が起こることが考えられる。

また、サルコペニアのメカニズムには、加齢そのものに起因する部分(筋組織の老化)と、加齢に伴う不活動による部分(廃用性萎縮)の2つの要因があると言える。速筋線維に著しい萎縮が起こるという点では、単なる廃用性萎縮とは異なる特徴がある。

### Ⅲ. レジスタンストレーニングの理論

#### 1. トレーニングの原理

レジスタンストレーニングにより筋肥大および筋力向上の効果を得るためには、トレーニング効果の原理(過負荷の原理、特異性の原理、可逆性の原理)を踏まえたトレーニングを行う必要がある。

##### 1) 過負荷の原理

トレーニング未実施者ならば日常生活で受ける負荷を超えるように、また、トレーニング実施者であれば、ふだん行うトレーニング強度よりも高い強度で行わなければ効果は得られない。

##### 2) 特異性の原理

特異性の原理とは、トレーニングで刺激した機能や体力にのみ効果が現れることである。この原理には、(a)部位特異性、(b)エネルギー特異性、(c)速度特異性がある。

##### (a) 部位特異性

例えば、レジスタンストレーニングを行った場合、トレーニング時に動員された(活動した)部位の筋においてのみ効果が現れる。したがって、機能が低下してしまい、機能を高めなければならない筋がある場合、その筋が活動するようなトレーニングを行わなければならない。

##### (b) エネルギー特異性

ヒトのエネルギー産生機構には、有酸素性エネルギー供給系と無酸素性エネルギー供給系がある。有酸素性エネルギー供給系のトレーニングにより負荷をかけると有酸素性エネルギー供給系の指標である最大酸素摂取量が増加し、無酸素性エネルギー供給系に負荷をかけると無酸素性エネルギー供給系の指標である最大酸素借が増加する。

##### (c) 速度特異性

トレーニングを行った速度においてのみ、効果が現れる現象を指す。機能を高めたい動作や活動がある場合、その動作や活動に必要な速さでトレーニングを行うことが求められる。

##### 3) 可逆性の原理

トレーニングで獲得された体力や運動能力は、トレーニング負荷を低下させたり、まったくトレーニングをやめて



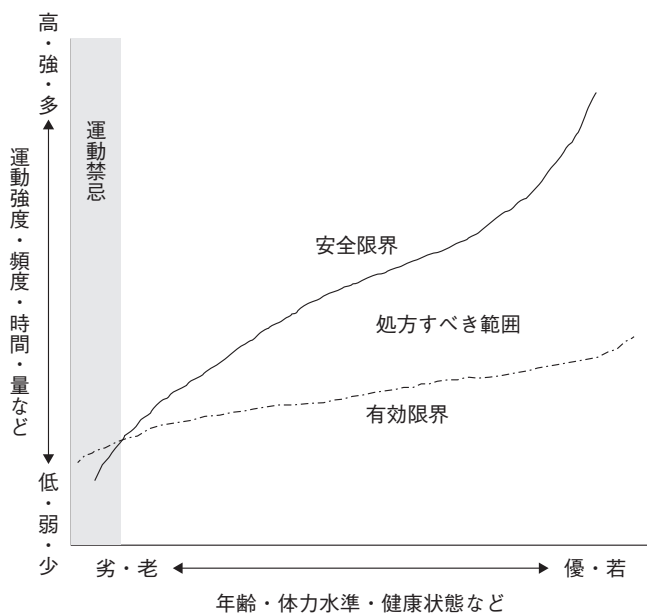


図5 安全限界と有効限界<sup>6)</sup>

しまったりすれば、その効果（体力や能力）は徐々に失われていく。トレーニング効果は可逆性であることを認識してトレーニング計画を立てることは重要である。

## 2. トレーニングの原則

先述したトレーニングの原理に加えて、以下に示すようなトレーニングの原則を守ることで、安全性とトレーニング効果を更に高めることができる。

### 1) 全面性の原則

特定の身体活動やトレーニングを行うと、特定の器官だけが発達し、偏った身体づくりになってしまう。そこで、健康と関係の深い器官・臓器をまんべんなく向上させ、バランスのとれた身体をつくるような身体活動、トレーニングが必要である。

### 2) 個別性の原則

実施者の性、年齢、体力、生活環境、性格、運動の嗜好など、個人の資質を考慮し、特に個人の健康状態と体力レベルおよび特性に応じてトレーニングを行うことが重要である。

### 3) 意識性の原則

トレーニングの目的を明確にし、自覚をもってトレーニングを行う必要がある。そのためには、指導者自身がトレーニングの目的や方法を確実に把握したうえで、実施者に伝える能力が求められる。

### 4) 漸進性の原則

トレーニングを安全かつ効果的に行うためには、トレーニングにおける運動負荷（強度、時間、頻度）を徐々に高めていく必要がある。

### 5) 反復性の原則

トレーニングを行い、健康増進や競技力向上に一定の効

果を得るためには、規則的かつ、ある一定の期間くり返しトレーニングを行う必要がある。

## 3. 安全限界と有効限界（図5）<sup>6)</sup>

安全限界とは、安全にトレーニングを行うことができる処方すべき運動負荷の上限値を指し、有効限界とはトレーニング効果を得ることができる運動負荷の下限値を指す。例えば、年齢が若く、体力に優れ、健康状態が良好である人の場合には、運動負荷の有効限界はやや高めとなるが、安全限界値がかなり高くなることから、処方すべき運動負荷の範囲は広い。一方、高齢で、体力が低下し、健康状態も悪化しているような場合には、特に安全限界が大きく低下するため、処方すべき範囲は狭まる。有効限界が安全限界を上回る場合のことを運動禁忌という。

## 4. 筋力・筋量の増強とレジスタンストレーニング

骨格筋は環境に対する高度な適応（可塑性）をもつ器官であり、一般に大きな力学的負荷に対する適応として肥大し、除負荷や不活動によって萎縮する。筋の適応能を利用して筋力の増強や筋量の増大を図るトレーニングがレジスタンストレーニングである。従来、筋力トレーニングという表現が使われてきたが、近年では様々な様式の負荷抵抗を用いて筋機能の向上を図るトレーニングが出現したことから、これらをレジスタンストレーニングと総称するようになった。その対象は、スポーツアスリートのみならず、子どもから高齢者、虚弱者、障がい者に至るまで、あらゆるタイプの人々に適用が可能である。

## 5. 動的トレーニングの基本処方と効果

身体の動きをとまなうトレーニングを動的トレーニングと総称し、現在もっとも広く普及しているトレーニング法は、等張性（アイソトニック）トレーニングである。

### 1) 強度

一般健常者を対象とした場合、等張性トレーニングにおける負荷強度と効果の関係は表2のようになる<sup>7)</sup>。負荷強度は多くの場合、最大挙上負荷に対する割合（%）で決める。最大挙上負荷の90%を超える強度では、筋肥大よりも神経系の改善（運動単位の動員能力）に及ぼす効果の方が大きい。よって、このような高強度によるトレーニングでは、筋のサイズをあまり増やすことなく筋力を増大することが可能である。しかし、神経系の機能が十分に改善されると筋力も上限に達してしまうため、さらに筋力を増大させるには筋を肥大させることが必要となる。筋を効果的に肥大させるためには、最大負荷の70～85%くらいで行い、トレーニング量も増やす必要がある。

### 2) 量

筋力の増大や筋肥大を目的とする場合、一つの筋群当たり3～6セット（各セットは最大反復回数とすることが原則）を行う。一般に、大筋群ほどセット数は多くする必要がある。

表2 等張性トレーニングにおける強度、最大反復回数、主な効果の関係<sup>7)</sup>

強度 (% 1RM)	最大反復回数 (RM)	主観的強度	主効果
100	1	非常に重い	筋力(神経系) 筋力 (形態的要因) 筋肥大
95	2	かなり重い	
93	3		
90	4		
87	5		
85	6	重い	
80	8		
77	9		
75	10~12	やや重い	
70	12~15	軽い	
67	15~18		
65	18~20		
60	20~25		
50	~30		非常に軽い

### 3) セット間の休息時間

通常1~3分とすることが適当である。ただし、セット間の休息時間を短縮する方が筋肥大効果は高まるという報告が多い。

### 4) 頻度

週2~3回が望ましいとされるが、週1回であっても効果はみられる。現実を考えると、無理なく継続できる頻度が望ましいということになる。

## 6. 静的トレーニングの基本処方と効果

静的トレーニングは、動かない対象物に対して様々なレベルの筋力を発揮したり、拮抗筋との共収縮を利用したりするトレーニング法であり、筋腱複合体の長さを変わず、全体としては等尺性収縮となるため、等尺性(アイソメトリック)トレーニングと呼ばれる。特別な器具を用いずにトレーニングを行うことが可能であり、補助的なトレーニングとして用いられることが多い。また、運動強度はあくまで随意筋活動レベルであり、負荷の加減速に伴う急激な力発揮や偶発的な外力が作用しないため、外傷や障害の危険性は低い。一方、筋力発揮を維持するために筋内圧による末梢抵抗の上昇と圧反射により、血圧が上昇しやすいという欠点がある。したがって、筋力発揮中には呼吸を止めない、中高年者のトレーニングやリハビリテーションでは最大下の筋力発揮でのみ行うなどの注意が必要である。

### 1) 強度

一般的な筋の等尺性収縮では、最大負荷の約40%から速筋線維の動員が始まる。また、その強度で筋内圧の上昇による筋血流の低下、筋内の低酸素化も始まる。したがってこの強度(40%)が効果の分岐点と言える。

### 2) 量

トレーニング量は「筋力×筋力発揮時間」で表される。

表3 等尺性トレーニングにおける強度と運動時間の組み合わせ<sup>8)</sup>

運動強度 (最大筋力に対する%)	運動時間 (収縮持続時間, 秒)	
	最低限度	適正限度
40~50(%)	15~20(秒)	45~60(秒)
60~70	6~10	18~30
80~90	4~6	12~18
100	2~3	6~10

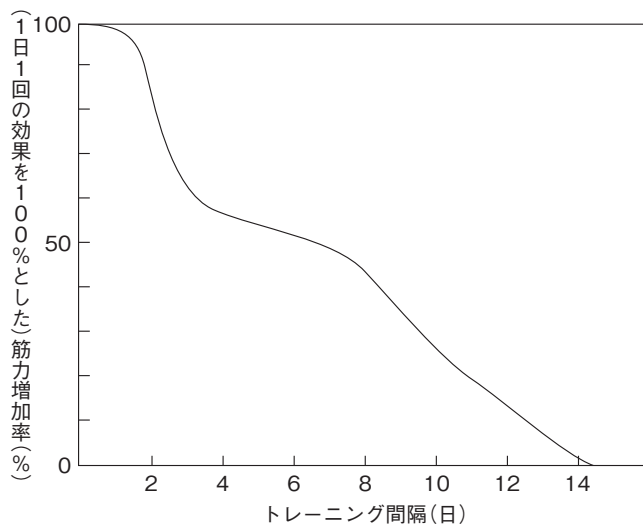


図6 等尺性トレーニングにおける頻度と筋力増強効果の関係<sup>8)</sup>

筋力増強のためには、表3に示すような組み合わせが必要であり、低強度ほど量を増加させなければならない<sup>8)</sup>。1回のトレーニングでのセット数は2~3セットが適当とされている。

### 3) 頻度

等尺性トレーニングは代謝刺激が弱く、伸張性収縮を伴わないため、筋自体に持続性疲労を生じにくい。そのため、動的トレーニング(等張性トレーニング)に比べると、より高頻度で行うことが望ましい。毎日行った場合に効果が最大化されるという報告もある(図6)<sup>8)</sup>。

## IV. 安全への配慮

虚弱な高齢者や有疾患者に対するトレーニングにおいては、効果を高めることよりも、安全に行うことを優先しなければならない。安全を確保するために留意すべき事項はいくつかあるが、少なくとも、準備運動と整理運動、トレーニング時の正しい姿勢、血圧上昇・転倒・熱中症の防止、実施者の過緊張の緩和、性格や当日のやる気、体調などを総合的に勘案してトレーニングに臨むことが重要である。加えて、指導者と実施者の信頼関係の構築は、科学的なト

レーニング処方理論と同等かそれ以上に重要であることを忘れてはならない。

## 文 献

- 1) 石川智亮：健康・体力・栄養の増進と体育局予算。(特集) 昭和46年度文教行政の展望。(編) 文部省. 文部事報. 47-52頁, 1971.
- 2) Hunter GR : Muscle physiology. Beachle TR, Earle RW (eds), Essentials of strength training and conditioning, Human Kinetics, Campaign, pp3-13, 2000.
- 3) 石原昭彦：運動と神経. 運動生理学 20 講. 勝田 茂 (編), 朝倉書店, 東京, 61-66 頁, 1993.
- 4) 大藏倫博, 角田憲治, 辻 大士, 他：サルコペニア予防のエビデンス—レジスタンストレーニングを中心として—. Geriatr Med 48 : 197-200, 2010.
- 5) 谷本芳美, 渡辺美鈴, 河野 令, 他：日本人筋肉量の加齢による特徴. 日本老年医学会雑誌, 47 : 52-57, 2010.
- 6) 池上晴夫：運動処方の考え方. 新版運動処方 —理論と実際—. 朝倉書店, 東京, 147 頁, 1990.
- 7) Ishii N : Factors involved in the resistance-exercise stimulus and their relations to muscular hypertrophy. Nose H, et al (eds), Exercise, Nutrition and environmental stress. Cooper, MI, 119-138, 2002.
- 8) Hettinger TH (著), 猪飼道夫, 松井秀治 (訳) : アイソメトリック・トレーニング. 大修館書店, 東京, 1970.