



運動生理学

見本

編集 越中敬一

Exercise physiology

見本

執筆者一覧

編者

こしなかけいいち
越中敬一／新潟医療福祉大学

執筆者（掲載順）

<small>こしなかけいいち</small> 越中敬一／前出	第1章・第2章・第3章・第5章
<small>たかはしひでゆき</small> 高橋英幸／筑波大学	第1章コラム
<small>きとうあきこ</small> 佐藤晶子／新潟医療福祉大学	第4章
<small>さわのちはる</small> 澤野千春／株式会社ワコール女子陸上競技部スパークエンジェルス	
	第4章コラム
<small>たかはしひであき</small> 高橋英明／新潟医療福祉大学	第6章
<small>たまきひろゆき</small> 田巻弘之／鹿屋体育大学	第6章コラム
<small>ふじもとともみ</small> 藤本知臣／新潟医療福祉大学	第7章・第8章・第9章
<small>どばしこうへい</small> 土橋康平／北海道教育大学	第7章コラム
<small>やましろこうや</small> 山代幸哉／新潟医療福祉大学	第10章・第11章
<small>きだてつお</small> 木田哲夫／愛知県医療療育総合センター発達障害研究所	第10章コラム
<small>おちげんた</small> 越智元太／新潟医療福祉大学	第12章・第13章
<small>かわたゆうき</small> 川田裕樹／國學院大學	第12章コラム

はじめに

見本

東京オリンピック・パラリンピックは昨年閉会を迎えましたが、現代社会においてスポーツが担う役割はますます高まっており、ゴールテープを切ることなく進み続けております。これまで走り続けてきたランナーも、これから靴紐を結ぶランナーも、特に抑圧されたコロナ禍においては運動生理学に関連した書籍を求めた方も多いのではないのでしょうか。

運動生理学は生理学や医学のほか、生物学・生化学を学術的な背景として発展した学問であり、その意味でとらえれば中学・高校でも一部を学んできたと考えることができます。また、部活動などで実践的に学んできた部分も多いかと思います。しかし、それでも全体像をとらえきれない運動生理学の奥の深さは専門書の中で鮮やかに表現されてきました。運動生理学の素晴らしい専門書はすでに多数存在しています。私もそれらによって多くを学んできており、現在においてもそれら良書を読むことによる新たな気づきも少なくありません。しかしながら、大学教育に携わっている中で、入門編とされる運動生理学の書籍においてもその内容は解釈の難しい概念も多く、学生が内容の消化不良を起こしている現状を感じておりました。

この度、各研究分野でご活躍しておられる先生方に執筆をお引き受けいただきまして、本書を上梓するに至りました。目指したところは“可能な限りのわかりやすさ”です。並列的な関係にある語句群においてもすべてを単純列挙するのではなく、それぞれの重要性を鑑み、重要なほうから適切な量の情報を整えて“食べきれぬ”小気味のよいメニューを用意いたしました。また、平易な説明によって、必ずしも生理学領域の知識的背景がなくても理解できる、“消化のよさ”も提供いたします。本書は、競技のためのスポーツや健康のためのスポーツを行う方々、また、それらを指導する方々など、特にこれから運動生理学を一から学び始める方々の入門書として、皆様にご一読いただけますと幸いです。

最後に、本書の出版に関しまして、多大なご尽力とご配慮をいただきました株式会社みらいの編集部諸氏に心より感謝を申し上げます。

2022年12月

編者 越中敬一

はじめに

第1章 骨格筋の筋収縮と運動能力

1	骨格筋の基本構造と筋収縮のしくみ	11
1	筋肉の種類	11
2	骨格筋の構造	12
3	筋線維の内側の構造	13
4	筋原線維	14
2	筋線維の種類と運動能力	15
1	筋線維の種類	15
2	筋線維組成とスポーツ種目	16
3	筋線維組成とトレーニング	18
4	筋線維の肥大	18
5	筋肥大や筋損傷を修復する際の作用機序	19
column	骨格筋を可視化して定量する	21

第2章 エネルギー代謝

1	エネルギー源の貯蔵とエネルギー代謝の流れ	23
1	エネルギー代謝とは	23
2	エネルギー源の貯蔵	24
3	骨格筋への糖質の供給	25
4	骨格筋への脂質の供給	26
2	ATPの消費と再合成のための経路	27
1	生命活動の直接のエネルギー源：ATP	27
2	ATPの貯蔵量と再合成	28
3	ATP再合成のためのエネルギー	28
3	エネルギー源の利用割合の変化	32
1	有酸素運動と無酸素運動	32
2	運動による糖質と脂質の利用割合	33
3	乳酸の産生	34
4	エネルギー源としての蛋白質	36
4	エネルギー代謝と疲労	37
1	持久運動	37
2	全力運動	38

5 エネルギー代謝とトレーニング	40
1 エネルギー貯蔵量とトレーニング.....	40
2 エネルギー基質の利用とトレーニング.....	40
3 骨格筋への酸素や栄養素の供給に与えるトレーニングの影響.....	41
4 ミトコンドリアとトレーニング.....	42

第3章 運動と栄養

1 食べること・生きること	45
1 栄養と栄養素.....	45
2 食物の確保と身体の進化.....	45
2 糖質	46
1 糖質（概要）.....	46
2 血糖値の維持と運動.....	47
3 糖質の種類と筋グリコーゲンの回復速度.....	48
4 糖質を摂取するタイミングと筋グリコーゲンの回復速度.....	49
5 筋グリコーゲンを食事のみで増やす方法.....	49
3 脂質	50
1 脂質（概要）.....	50
2 脂肪酸の種類.....	51
3 ファットアダプテーション.....	51
4 蛋白質	52
1 蛋白質（概要）.....	52
2 蛋白質の質.....	53
3 蛋白質の摂取量.....	54
4 蛋白質を摂取するタイミング.....	54
5 ビタミンとミネラル	55
1 ビタミンとミネラル（概要）.....	55
2 ビタミンと運動.....	56
3 ミネラルと運動.....	57

第4章 エネルギー消費量、身体組成と食事の実際

1 消費エネルギー	61
1 エネルギーを推定する.....	61
2 エネルギー消費量を測定する.....	63
2 体重と身体組成	66
1 体重.....	66
2 身体組成.....	67

3 アスリートの食事	70
1 基本の食事.....	70
2 試合期の食事.....	73
3 オフ期の食事.....	75
column スポーツ現場での栄養補給の考え方.....	77

第5章 運動とホルモン

1 ホルモンの種類と内分泌腺	79
1 ホルモンとは.....	79
2 作用の調節.....	79
3 ホルモンの種類.....	80
4 内分泌腺.....	80
2 インスリンと運動・トレーニング	81
1 インスリン（概要）.....	81
2 インスリンと一過性の運動.....	82
3 インスリン作用とトレーニング.....	83
4 インスリン作用とグリコーゲンの回復.....	84
3 ストレスホルモンと運動・トレーニング	85
1 ストレスホルモン.....	85
2 生物におけるストレス.....	85
3 ストレスホルモンの作用.....	86
4 ストレスホルモンと一過性の運動.....	87
5 ストレスホルモンとトレーニング.....	88
4 性ホルモンと運動・トレーニング	89
1 性ホルモン.....	89
2 男性ホルモンと一過性の運動およびトレーニング.....	89
3 女性ホルモンと一過性の運動およびトレーニング.....	90

第6章 運動と骨

1 骨の解剖学と生理学	93
1 骨の解剖.....	93
2 骨の役割.....	94
2 骨強度と栄養	96
1 骨の強さを規定する因子.....	96
2 骨をつくるための栄養素.....	98
3 骨折と骨代謝	99
1 骨折.....	99
2 骨の建築現場 —つくる人・壊す人・指示する人—.....	101

4 骨とメカニカルストレス	104
1 運動条件と骨の変化.....	104
2 運動効果の持続性.....	106
3 高地トレーニング.....	107
column 骨は利他の心で生きている—骨を鍛えて全身を元気に—.....	109

第7章 運動と循環

1 心臓循環系の概要と心臓の基本構造	111
1 心臓循環系とは.....	111
2 心臓循環系の構造.....	112
3 心臓の構造.....	112
2 心臓の拍動と血液の拍出	113
1 心臓の収縮のしくみと心拍数.....	113
2 心臓の収縮・弛緩と1回拍出量.....	114
3 血管の構造と血圧	115
1 血管の種類と構造.....	115
2 血圧.....	116
4 循環調節のしくみと運動による適応	117
1 心臓循環系における循環調節.....	117
2 循環する血液の配分と運動時の血流再配分.....	118
3 中心循環における運動時の循環調節.....	119
4 末梢循環における運動時の循環調節.....	122
5 トレーニングと心臓循環系の適応.....	122
column 運動後のクラクラや失神の原因は？—運動後低血圧と二酸化炭素—.....	125

第8章 運動と呼吸

1 呼吸器系の基本構造と換気	127
1 呼吸とは.....	127
2 呼吸器の構造と肺でのガス交換.....	127
3 換気のしくみとその様相.....	128
2 ガス交換と呼吸の調節	129
1 気体の分圧と体内におけるガス交換.....	129
2 酸素飽和度と酸素供給.....	130
3 呼吸の調節と運動による呼吸の変化.....	131
3 酸素摂取量と運動中の代謝	133
1 酸素摂取量.....	133
2 最大酸素摂取量.....	134
3 運動時の酸素摂取量の測定とエネルギー源の推定.....	136

4	酸素借と酸素負債	137
5	無酸素性作業閾値	138
6	トレーニングによるエネルギー供給能力の向上と運動パフォーマンス	139

第9章 運動と体温

1	ヒトの体温変化と体温調節	143
1	ヒトの体温と恒常性	143
2	熱の出納と体温	144
3	身体と外部環境の熱の移動	144
4	体温調節中枢と体温調節の種類	145
2	運動中の体温と運動パフォーマンス	147
1	運動による熱産生と体温上昇	147
2	運動中の発汗とその部位差	148
3	暑熱環境下での運動時の生理応答と運動パフォーマンス	149
4	寒冷環境下での運動時の生理応答と運動パフォーマンス	150
3	運動環境と体温にかかわる疾患	151
1	運動環境の選択	151
2	体温にかかわる疾患	152
4	トレーニングや暑熱暴露による適応	155
1	トレーニングによる体温調節反応の適応	155
2	暑熱順化トレーニングによる暑熱下運動パフォーマンスの変化	155

第10章 脳と脊髄

1	神経系とは	159
1	神経細胞と神経膠細胞	159
2	神経系の役割	162
2	脳と脊髄	164
1	大脳	164
2	小脳	166
3	間脳（視床と視床下部）	167
4	脳幹（中脳、橋、延髄）	167
5	脊髄と脊椎	168
column 注意ってなんだ!?—脳のさまざまな情報処理を調節する大事な働き—		171

第11章 運動と脳・神経系

1	運動関連領野と脳の可塑性	173
1	運動関連領野と運動の関係	173

2	運動の制御方式	174
3	トレーニングによって生じる脳機能の変化	175
2	脊髄を介した運動とさまざまな反射	177
1	錐体路と錐体外路	177
2	筋肉を制御する脊髄の α 運動ニューロン	178
3	無意識的な運動を誘発するさまざまな反射	179
4	神経筋接合部の興奮伝達	181
3	運動単位と筋収縮の原理	182
1	運動単位とその動員パターン	182
2	トレーニングによる筋力増大のメカニズム	184

第12章 加齢と身体変化

1	加齢にともなう末梢組織の変化	189
1	加齢にともなう呼吸循環系の変化	189
2	加齢にともなう神経・筋の変化	191
3	加齢にともなう骨の変化	191
2	加齢にともなう中枢組織の変化	192
1	加齢にともなう脳の変化	192
2	脳構造の変化	193
3	脳機能の変化	193
4	脳機能低下とストレス	194
column	理想的なBMIは本当に22なの!?—加齢と体格—	197

第13章 運動と健康

1	運動が末梢組織に与える影響	199
1	有酸素能力に対する運動効果	199
2	筋・関節・骨量に対する運動の効果	200
2	運動が中枢組織に与える影響	201
1	脳の構造、機能に対する運動効果	201
2	メンタルヘルスに対する運動効果	202
3	運動が脳機能・メンタルヘルスに悪影響を与える条件	203

学びの確認（解答） 207

索引 209

第
1
章

骨格筋の筋収縮と運動能力

見本



なぜこの章を学ぶのですか？

中学・高校の理科や生物の授業で学んだ“動物の細胞”のことを覚えていますか？ 細胞の話は単に顕微鏡の中だけの話ではなく受験勉強のためだけの話でもありません。たとえば骨格筋細胞には種類があり、細胞の中身の違いは、アスリートの競技能力やトレーニング効果に多大な影響を与える要因になるのです。



第1章の学びのポイントは何ですか？

骨格筋細胞（筋線維）の基本構造を理解します。筋線維は速筋線維と遅筋線維に大別され、それぞれの特徴を有しています。それぞれの筋線維を保有する割合は個人によって異なるため、得意とするスポーツ種目に違いが生じてきます。



考えてみよう

1

マラソン選手は疲れ知らず。彼らの持久能力はなぜ高い？

2

トレーニングで筋肉モリモリ！
そのとき骨格筋細胞は増える？ 太くなる？

1 骨格筋の基本構造と筋収縮のしくみ

見本

骨格筋は横紋構造を有する随意筋である。活動電位の到達によって細胞内のカルシウム濃度が上昇すると筋収縮が生じる。筋収縮の際、収縮蛋白質であるミオシンとアクチンの相互作用が生じ、ATPの化学的エネルギーから力学的エネルギーへの変換がなされることになる。

1 筋肉の種類

私たちが筋肉と呼んでいる収縮性をもつ細胞の集合体には3つの種類があり、それぞれ平滑筋、心筋、骨格筋に分類される。平滑筋は血管の壁に存在し、血液の通る穴を囲むように存在している。収縮すると血管の径を細くし、弛緩すると血管の径が太くなるので、**血圧**や**血流**の調節に機能する。また、胃や小腸などにも存在し、摂取した食物を消化管の中で移動させる**蠕動運動**にも機能する。心筋は心臓の筋肉であり、心臓の大部分を構成する。収縮することによって血液を全身に向けて押し出し、弛緩することによって全身からの血液を迎える。骨格筋とはいわゆる“筋肉”（上腕二頭筋や上腕三頭筋など）のことであり、全身に約400種存在していて運動の遂行のほか、姿勢の維持・関節の安定・体温の維持にも機能する。

平滑筋や心筋は、私たちがどのように動かすかを考えなくても主に**自律神経**の働きによって無意識（不随意）のうちに最適な収縮が調節されている。たとえば、運動をすれば意識をしなくても勝手に心拍数は上昇し血圧も上昇する。このような筋肉を**不随意筋**と呼ぶ。一方、骨格筋は主に**運動神経**によって支配されており、筋肉をいつ、どれくらいの力で、どのくらいの速さで動かすかを意識的に決定して収縮させる。このような筋肉を**随意筋**と呼ぶ。

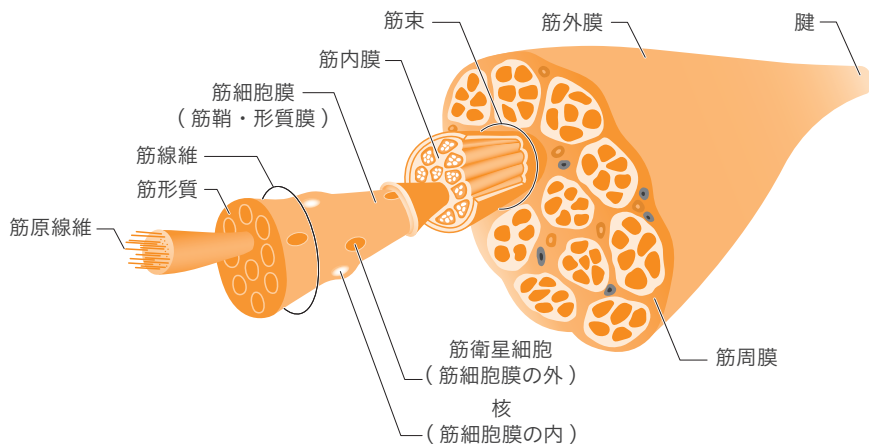
さらに、心筋と骨格筋を顕微鏡によって観察すると、細胞に横縞模様を確認することができる。これは骨格筋細胞内の収縮装置の構造に由来しており（後述）、このような筋肉を**横紋筋**と呼ぶ。なお、平滑筋は横紋構造を示さない。

2 骨格筋の構造

骨格筋を詳細に観察した図を示す（**図1-1**）。骨格筋細胞は**筋線維**と呼ばれており、**筋細胞膜**（または**筋鞘・形質膜**）によって細胞質である**筋形質**が区分けされて存在している。一般的に“細胞”とは小さな構造物の代表者として描かれることが多く、筋線維の直径は10～100 μm程度である。しかしながら、筋線維の長さは基本的に筋肉の長さほどあるので、長い筋肉においては1つの筋線維が30 cm程度に至る極めて細長い形状の細胞である。骨格筋細胞は1つの細胞に多くの核を含む**多核細胞**であるが、多核である理由の1つは、この長さゆえに1つの核が担当する空間領域を狭くするためと考えられている。また、筋細胞膜の外には、将来細胞内に入って核となる運命をもつ**筋衛星細胞**が存在している（後述）。筋線維は**筋束**として一旦束ねられ、さらに筋束が束ねられると“筋肉”としての形状になる。1つの骨格筋に含まれる筋線維の数は一定ではなく、骨格筋ごとに異なる。

1つ1つの筋線維は**筋内膜**が結合組織のように包んで筋束とし、また、筋束と筋束は**筋周膜**が束ねる。そして、筋肉の表面は**筋外膜**が覆う。これらの膜は**腱**と一体化しながら最終的に**骨**に付着しており、筋線維が収縮することによって腱を介して骨を動かすことになる。

図1-1 骨格筋の構造



見本

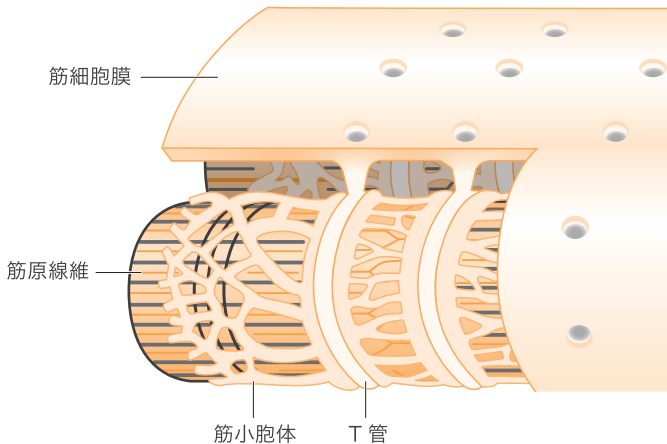
3 筋線維の内側の構造

筋線維をより詳細に観察した図を示す（図1-2）。筋形質は筋細胞内における液性の部分であり、酵素などの多くの蛋白質が大量に溶解している。溶解している物質は基本的に見えない。この筋形質の領域には、ミトコンドリアなどの小器官が存在しており、さらに筋収縮に不可欠な**T管**（Tチューブ）・**筋小胞体**・**筋原線維**を確認することができる。

T管は筋細胞膜に起因したチューブ状の構造物であり、細胞膜上に空いた穴から筋線維内に入る“落ち込み”である。筋収縮の刺激は筋細胞膜を**活動電位**が伝わることに起因するが、T管はその活動電位が筋細胞内の奥深くにまで伝わるように機能する。

筋小胞体は**カルシウム**を貯蔵している“袋”であり、筋原線維の周辺にまとわりつくように存在している。筋収縮時には細胞内のカルシウムイオン濃度が上昇する必要があるが（後述）、常にカルシウムイオン濃度が高い状態であると筋収縮が上手く誘発されない。そのため、通常はカルシウムイオンをこの袋に詰めることによって隔離し、細胞内のカルシウムイオン濃度が低くなるように機能している。活動電位が筋小胞体に作用するとカルシウムイオンを**放出**し、細胞内のカルシウムイオン濃度が100倍程度にまで上昇する。このことが筋収縮を起こす直接的なきっかけであり、必須の条件となる。

図1-2 筋線維の中の構造

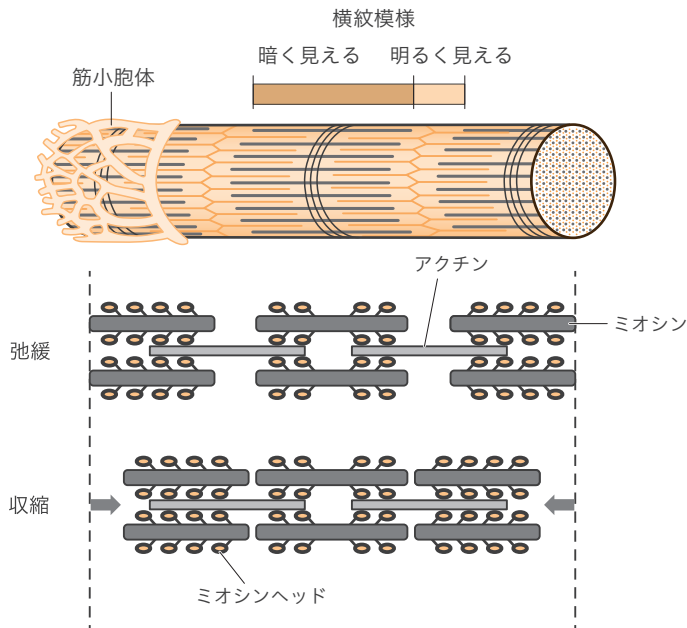


4 筋原線維

筋原線維は骨格筋細胞に含まれる総蛋白質量の約 2/3 以上を占める主要な構造物であり、筋収縮の物理的な力を発揮する部分である。筋原線維は、薄いフィラメントである**アクチン**と太いフィラメントである**ミオシン**が平行かつ重なるように整然と配置されていることによって横紋模様を横紋筋に描く（**図 1-3**）。

ミオシンは駆動蛋白質と呼ばれており、筋収縮のための“モーター”として働く。**ミオシンの**ミオシンヘッドと呼ばれる部位に存在する**ATPase(ATP エース)**と呼ばれる酵素が**アデノシン三リン酸(ATP)**を分解し（後述）、その際に生じる化学的エネルギーを力学的エネルギーに変換することで筋収縮が生じる。また、**アクチン**上には**カルシウムイオン**が結合する部位と筋収縮を始めるための“スイッチ”が存在し、筋小胞体から放出されたカルシウムイオンが結合すると筋収縮のためのスイッチが露出する。そのスイッチにミオシンが触れるとフィラメントの“たぐりよせ”が始まって筋収縮が生じる。たぐりよせの際、ミオシンやアクチン自体が縮むのではなく、ミオシンとアクチンが重なっている部分が多くなることによって細胞を縮ませる（**図 1-3**）。

図 1-3 筋原線維の中の構造



見本

活動電位によって細胞内で上昇していたカルシウムイオンはその後筋小胞体に回収され始め、アクチンの結合部位からカルシウムが外れると両フィラメントはもとの位置に戻ろうとして筋弛緩が生じる。

2 筋線維の種類と運動能力

筋線維は速筋線維と遅筋線維に大別され、それぞれに特異的な性質を有する。速筋線維は瞬発的な能力が優れており、遅筋線維は持久的な能力に優れる。

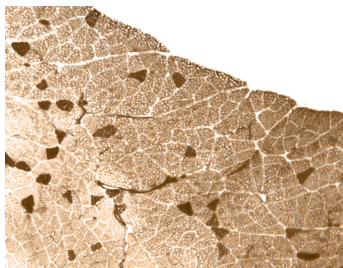
1 筋線維の種類

筋線維には複数の種類が確認されており、その構成比率は骨格筋の部位や個人によって異なる（**図 1-4**）。古くから、筋線維の種類によって代謝特性と収縮特性が大きく異なることが知られており、さらに分析方法の発展にもない多くの分類方法がなされるようになった（**表 1-1**）。

筋線維は**速筋**（FT：fast-twitch）**線維**と**遅筋**（ST：slow-twitch）**線維**に大分され、さらに速筋線維は代謝特性と収縮特性において両筋線維の中間的な存在を示す線維が存在している。

収縮速度において、速筋線維は遅筋線維に比べて約2倍の速度を示す。この理由は、速筋線維に含まれるミオシンATPase蛋白質の種類が速筋タイプであり、ATPを分解してエネルギーを取り出す速度が**速い**ことが関係している。速筋線維は素速く最大の張力を発揮することができるが、その力を長い間持続することは苦手であり、遅筋線維は得意である。代謝特性において、速筋線維は糖質を無酸素的に利用する**解糖能力**（後述）が高く、その

図 1-4 筋肉の中の骨格筋細胞



ヒラメ筋



腓腹筋

白色：遅筋線維
黒色：速筋線維

ラットのヒラメ筋と腓腹筋を光学顕微鏡で調べてみると、1つの筋肉内には複数の種類の骨格筋細胞が混在していることを確認できる（筆者撮影）。

表 1-1 筋線維の種類（筋線維タイプ）

	遅筋線維	速筋線維	
	ST 線維 赤筋 TYPE I 線維	FT 線維 白筋 TYPE II 線維	
	ST 線維 TYPE I 線維 SO 線維	FT a 線維 TYPE IIA 線維 FOG 線維	FT b 線維 TYPE IIX 線維 FG 線維
収縮速度	+	+++	+++
疲労耐性	+++	++	+
グリコーゲン量	+	++	++
ミトコンドリア量	+++	++	+
有酸素能力	+++	++	+
解糖能力	+	++	+++

SO: slow-twitch oxidative FG: fast-twitch glycolytic FOG: fast-twitch oxidative glycolytic

エネルギー源となる**筋グリコーゲン**を多く貯蔵している。一方、遅筋線維は**有酸素能力**が高く、その“エネルギー工場”となる**ミトコンドリア**を多く含んでいる。

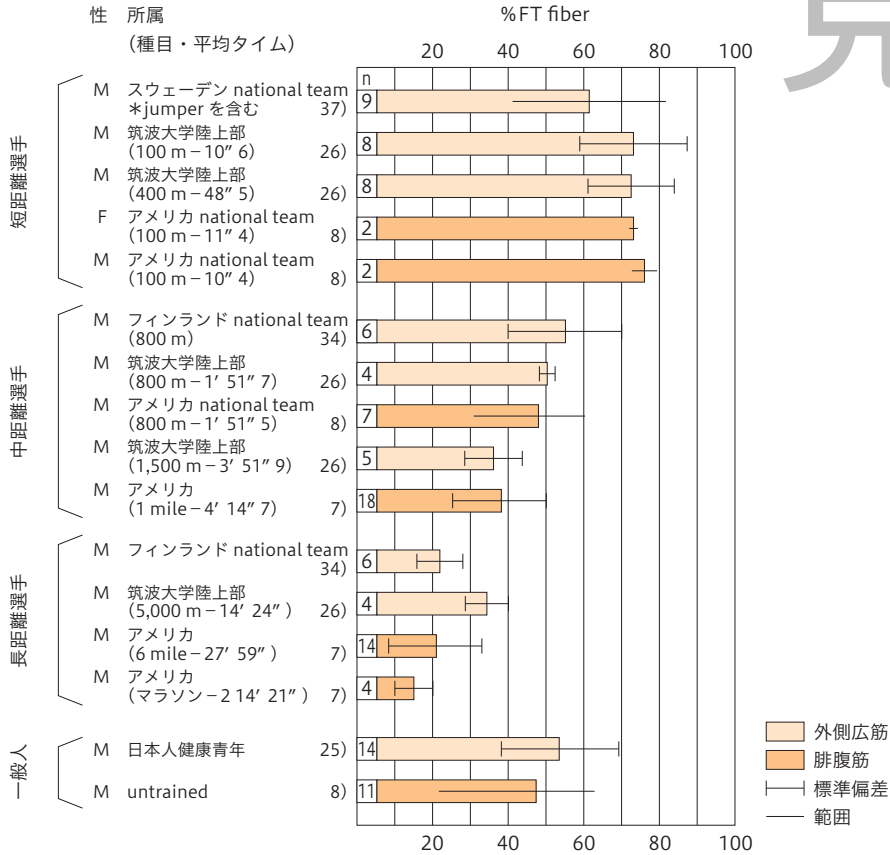
2 筋線維組成とスポーツ種目

外側広筋や腓腹筋を構成している速筋線維と遅筋線維の比率を調べてみると、これら筋線維の割合は男女とも約 50 : 50 である。しかしながら、ヒトによってその比率は異なり、一方に偏った比率で筋線維を有しているヒトが存在する。

アスリートの筋線維組成を調べてみると、持久系アスリートは**遅筋線維**を多く有しており、一流アスリートでは 90% 以上の比率を示すこともめずらしくない（**図 1-5**）¹⁾。一方、瞬発系アスリートは**速筋線維**を多く有しており、一流アスリートでは 80% 程度の速筋線維の比率を示す。これらアスリートにおける筋線維の比率は筋線維の有する特徴と競技特性に合致しており、筋線維の違いが競技成績に大きく関与していることを示している。なお、これら筋線維の分析は外科的な処置によって骨格筋を部分的に採取することによって行われるが、スポーツの現場で利用しやすい計算式も高い精度をもって考案されている（**図 1-6**）²⁾。このように競技能力に関係の強い筋線維ではあるが、それぞれの種目において、中間的な筋線維の比率ながら優れた成績を残すアスリートの存在も忘れてはならない。このことは、筋線維は競技成績を決める要因の 1 つであるが、十分な要因ではないことを示している。

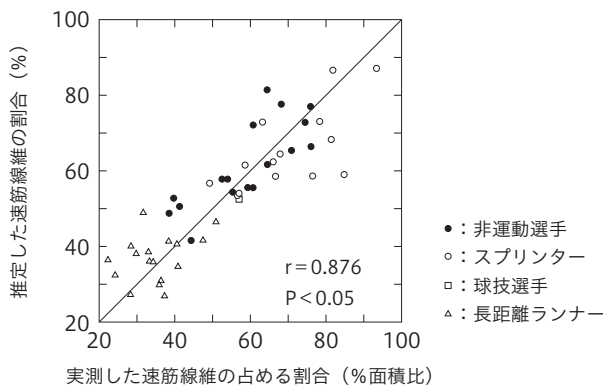
見本

図 1-5 スポーツの種目と筋線維組成



出典 勝田茂, 和田正信「筋線維組成と運動競技適性」『デサントスポーツ科学』7: 34-43,1986.
 競技能力の高い選手においては、種目特性に応じた筋線維を有していることが認められる。

図 1-6 筋線維組成の推定



Y (推定した速筋線維の割合) = $69.8X$ (速度比) - 59.8

速度比: A / B

A: 全力 50 m 走の 1 秒あたりの移動距離 (m/ 秒)

B: 全力 12 分間走の 1 秒あたりの移動距離 (m/ 秒)

出典 勝田茂, 高松薫, 田中守, 小泉順子, 久野謙也, 田淵健一「50m 走と 12 分間走の成績による外側広筋の筋線維組成の推定」『体育学研究』34(2):141-149,1989. を一部改変

3 筋線維組成とトレーニング

トレーニングは骨格筋のさまざまな能力を向上させるが、その効果に筋線維組成の変化は関与しているのだろうか。20年間にわたる持久トレーニングが筋線維組成に与える影響を検討した研究では、遅筋線維の割合は変化しなかったことを報告している³⁾。この研究からも、遅筋線維が速筋線維に変化する可能性は低いと考えられている。一方、速筋線維においては高強度の持久トレーニングによってFTb線維からFTa線維への移行が生じることが報告されている⁴⁾。興味深いことに、この変化はウェイトトレーニングやスプリントトレーニングによっても生じるので、トレーニングの様式に対応した適応ではないと推察できる。また、ヒトの骨格筋においてはそもそもFTb線維の割合は20%程度であり、FTa線維への移行の割合は10%程度であることや、トレーニングを中断すると移行がもとに戻ってしまうことを考慮すると、筋線維組成は運動能力に強く関係するが、トレーニングによる骨格筋の適応においては筋線維の移行による貢献は少ない、もしくはほとんどないと見積もることができる。

4 筋線維の肥大

生体内において、筋力の発揮には神経から力が発揮される角度までさまざまな要因が関与するが、筋線維の横断面積×筋線維数で表される骨格筋の横断面積の大きさは特に重要な要因の1つである。

基本的に骨格筋の横断面積の大きさは筋力の大きさに比例する。ウェイトトレーニングによって筋線維の横断面積が増加（肥大）することはよく知られている。速筋線維は遅筋線維に比べてトレーニングにより肥大がしやすく、また、同じ骨格筋の横断面積同士であれば速筋線維を多く含んでいるほうで筋力が高くなる。一方、トレーニングが筋線維数に与える影響に関しては、トレーニングによって筋線維数は増えない（増殖はしない）とする報告は多い。しかしながら、ボディビルダーを対象にした研究では筋線維数の増加を示唆している報告も存在し⁵⁾、動物実験によっても増殖を示す結果が存在している。これらの結果は、トレーニングの状況（様式や期間など）や対象によっては増殖も生じる可能性を示しているが、依然として明らかにはなっていない。

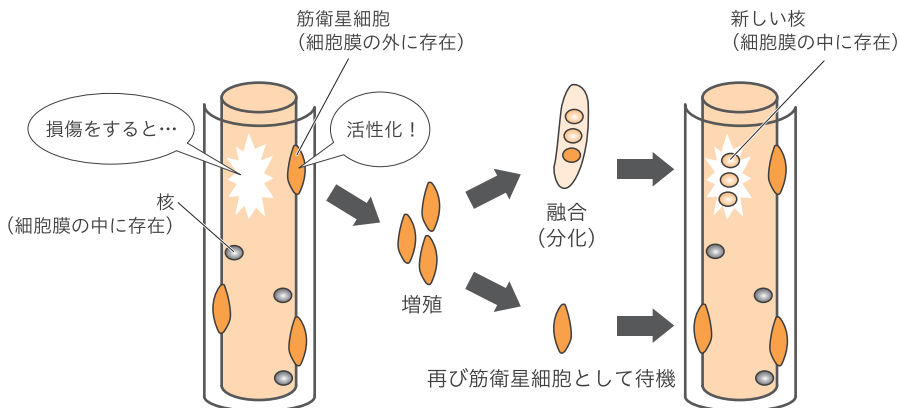
5 筋肥大や筋損傷を修復する際の作用機序

見本

トレーニングによって骨格筋が肥大したり筋損傷から回復をする際の作用機序に関しては現在も不明な点が多く、運動生理学の分野においては盛んな研究が続いている。ともに主要な作用機序の1つとされるのは、**筋衛星細胞**の活性化である。骨格筋細胞の外側には、筋細胞を取り囲むように筋衛星細胞と呼ばれる細胞が存在している。筋衛星細胞とは“将来筋細胞になる予定だが今は休憩をしている”細胞であり、筋細胞が運動や損傷などの刺激を感知すると活性化して増殖・融合し、既存の筋細胞に取り込まれる（**図1-7**）。肥大をした際や損傷から回復した際における筋細胞内の核数は**増加**するが、この増加は活性化した筋衛星細胞由来であると考えられており、筋肥大の誘発や再生能力の発揮に機能したとされている。

また、トレーニングによって正味の**筋蛋白質の合成**が促進することも作用機序の1つとして関与する。筋蛋白質は合成と分解のバランスによって正味の合成量（合成量－分解量）が決定するが、トレーニングによって合成の促進と分解の抑制の両方が生じる。この正味の合成量の促進には、トレーニングによるホルモン・神経・代謝・細胞にかかる機械的な負荷など、さまざまな要因が関与する。

図1-7 筋衛星細胞の活性化



損傷をすると、筋衛星細胞が活性化して増殖・融合し、もとの筋細胞に取り込まれて筋を修復する。また、肥大を誘発する運動を行うと、同様の過程を経てもとの筋細胞に取り込まれて筋を肥大させる。

引用文献

- 1) 勝田茂, 和田正信「筋線維組成と運動競技適性」『デサントスポーツ科学』7:34-43, 1986.
- 2) 勝田茂, 高松薫, 田中守, 小泉順子, 久野譜也, 田淵健一「50m 走と12分間走の成績による外側広筋の筋線維組成の推定」『体育学研究』34(2):141-149, 1989.
- 3) Trappe SW, Costill DL, Fink WJ, Pearson DR. Skeletal muscle characteristics among distance runners: a 20-yr follow-up study. *J Appl Physiol.* 78(3):823-829, 1995.
- 4) Andersen P, Henriksson J. Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man: adaptive response to exercise. *J Physiol.* 270:677-690, 1977.
- 5) Larsson L, Tesch PA. Motor unit fiber density in extremely hypertrophied skeletal muscles in man: Electrophysiological signs of muscle fiber hyperplasia. *Eur J Appl Physiol. Occup. Physiol.* 55(2):130-136, 1986.
- 6) Tesch PA, Karlsson J. Muscle fiber types and size in trained and untrained muscles of elite athletes. *J Appl Physiol.* 59(6):1716-1720, 1985.

学びの確認

() に入る言葉を考えてみよう。

- ①心筋と平滑筋は() 神経によって無意識のうちに制御されている。このような筋肉を() 筋と呼ぶ。
- ②筋線維は() として一旦束ねられ、さらにそれが束ねられると筋肉としての形状になる。
- ③筋小胞体は() を貯蔵しており、筋収縮の際に重要な役割を担う。
- ④骨格筋において、ミトコンドリアを多く含んでいるのは() 線維のほうである。
- ⑤骨格筋の横断面積は、筋線維1本の横断面積×筋線維の() で表すことができる。
- ⑥骨格筋の横断面積が同じであれば、() 線維を多く含んでいるほうで筋力が高くなる。
- ⑦肥大をした際や損傷から回復した際、筋細胞内の核数は() する。