

運動生理学入門

運動と栄養の基礎科学

～なぜ考えてから食べるのか？～

身体運動を実現すること

- 骨と骨の連結＝関節
- 関節をまたいで連結する骨格筋と腱と靭帯（骨に付着する）
- 拮抗筋と協働筋（屈曲-伸展と関節固定）
- セグメント（節）としての頭部-体幹-上肢-下肢などをまとめて動かす
「マリオネット（糸操り人形）」とはちがう方法・・・
- 全身運動としての「基本的運動形態」
歩・走・跳・投・這う・匍匐・泳などが「ひと纏まり」の運動司令で実現される？
- 実際の運動実現は「フィールド」で行われ、状況に対応する

まずは「骨の役割」から・・・

- 脊索動物(ホヤ)から脊椎動物(魚類)へ
- 「軟骨魚類」から「(硬)骨魚類」へ(サメは軟骨魚類に戻った?)
- 河川(淡水魚)や地上進出(両生類)に伴う体の安定性確保?
- 地上進出にともない「カルシウムの貯蔵器官」に?

カルシウムは生命活動に必須(神経伝達や筋収縮に関与)

骨粗しょう症状態・・・

最新科学が明らかにする
身近な“骨”の意外なパワー!

骨のメッセージが他の臓器を若く保つ

若さを司る臓器“骨”
驚異のマイクロワールド



そして骨・関節と筋
の連携で運動が生
まれる

- 「拮抗筋」と「協働筋」の働き
 - 拮抗筋同士が「同時収縮」すると関節が固定される
- 「鎖」と「棒」の使い分け・・・
「キネティックチェーン」という考え方

図2 キネティックチェーン(運動連鎖)

投球動作の場合



セグメント同士の「固定や解放のタイミング」が重要となる

まずは筋の種類と構造

随意筋 ⇒ 骨格筋 ⇒ 横紋筋
 ⇩ ⇩
 心筋 ⇩
 不随意筋 ⇒ 内臓筋 ⇒ 平滑筋

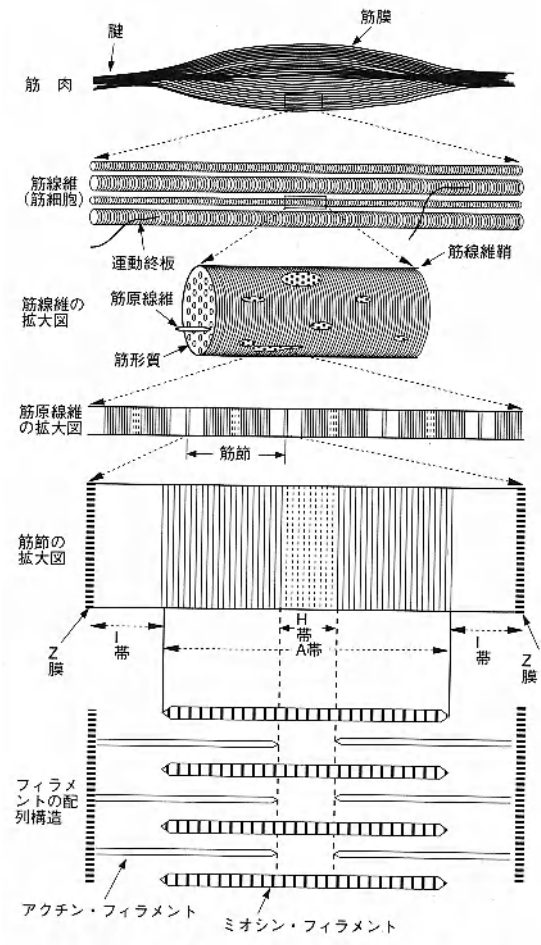
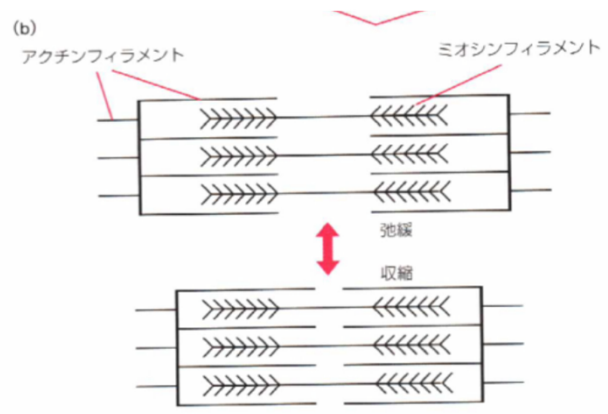
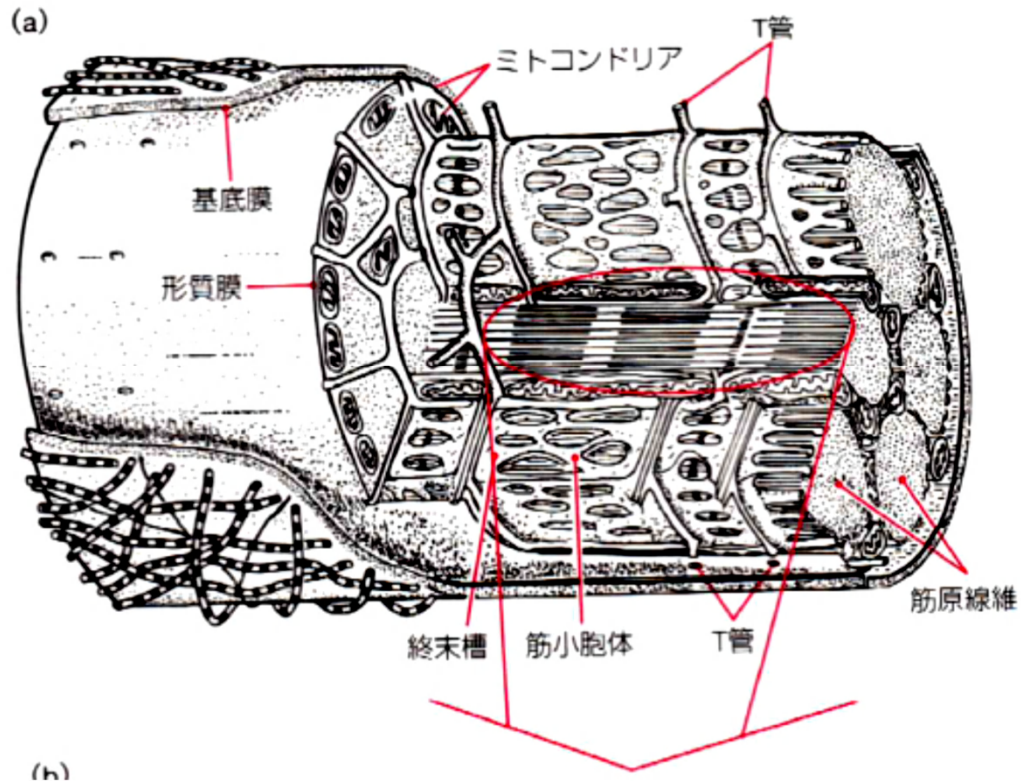


図3-4 骨格筋の内部構造 (ハックスレー, 1958)

骨格筋の種類と構造



収縮要素

筋原線維

筋形質

筋小胞体

非収縮要素

横行小管

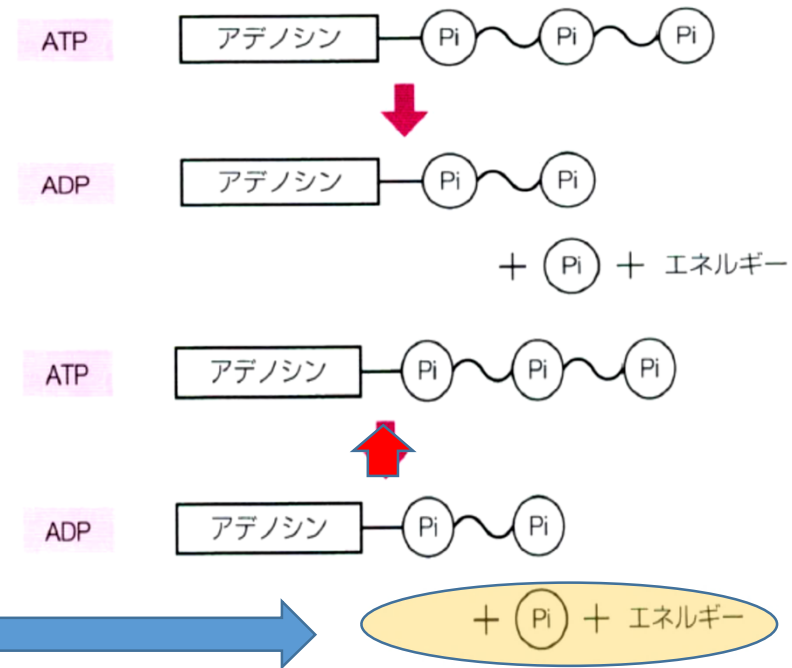
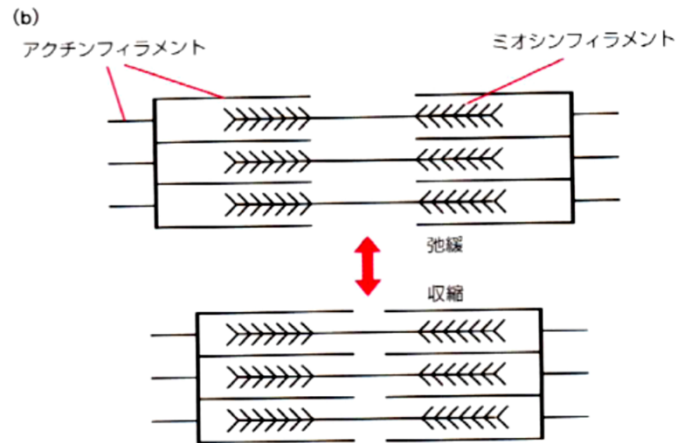
ミトコンドリア

ミオグロビン

グリコーゲン

脂肪 など

すべての筋収縮は



ただし繰り返して収縮するためには
エネルギーを補填してATPに戻す

筋の構造と収縮タンパク

筋肉は2～3週目で極端に
小さくなりはじめ—

カルシウムの役割

再生



無重力で筋収縮がないと・・・



骨粗しょう症状態が起こると・・・

解明! 若さを生み出すカギ
“骨”を強くする物質

ドレイヤーさんの主治医

ハーマン・ハメルズマさん

筋収縮を継続するにはエネルギーが必要

ATP産生の3つのルート

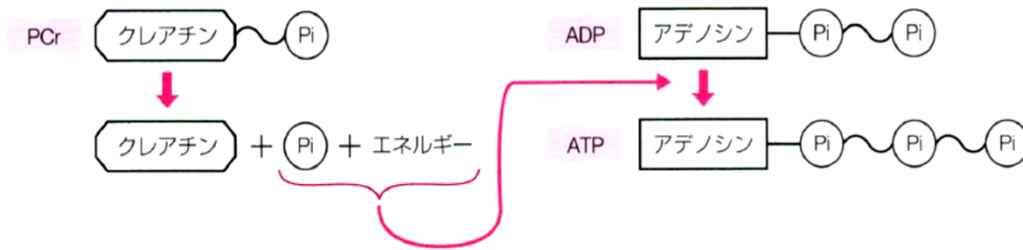


図 1.10 クレアチンリン酸による ATP の再合成
クレアチンリン酸 (PCr) が、クレアチンと Pi に分解される時に放出されるエネルギーを用いて、ATP が再合成される。

👉 ハイパワー系 (ATP-PCr系: クレアチンリン酸)

ミドルパワー系 (解糖系: グリコーゲン) ⇒

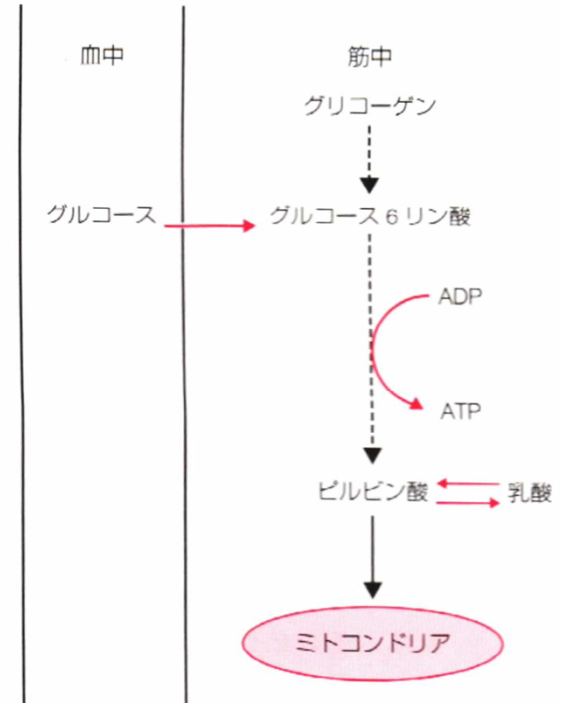


図 1.11 解糖系経路の概略
糖質 (グリコーゲンあるいはグルコース) がピルビン酸にまで代謝される過程で、ATP が再合成される。

糖質と脂質とタンパク質

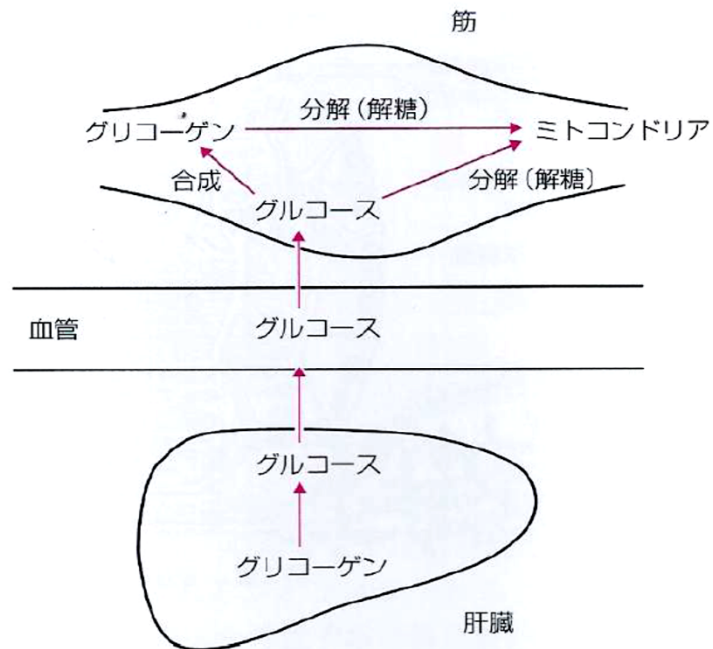


図 1.6 糖質の代謝

肝臓から放出されたグルコースは、筋に取り込まれる。

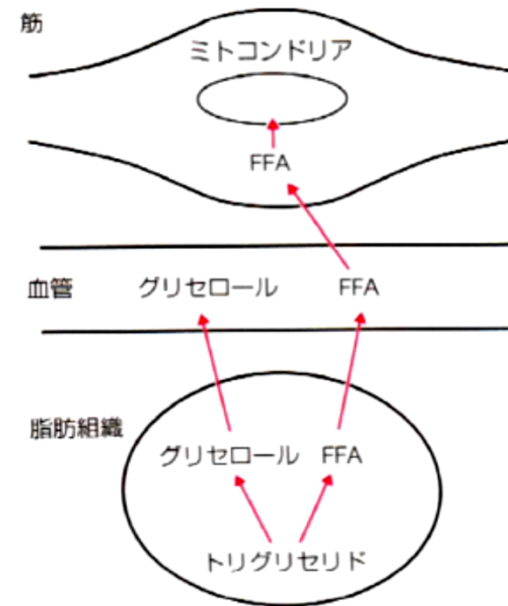


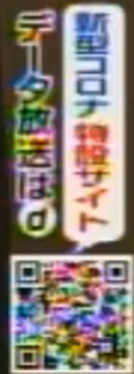
図 1.7 脂質の代謝

脂肪組織から放出された遊離脂肪酸 (FFA) は、筋に取り込まれ、ミトコンドリアまで運ばれる。

TOKIOとタイムトラベル!

ミトコンドリアの取り込み?

Origin of FOOD



長瀬さんがタイムトラベル!

ローパワー系(有酸素系): 主役はミトコンドリア

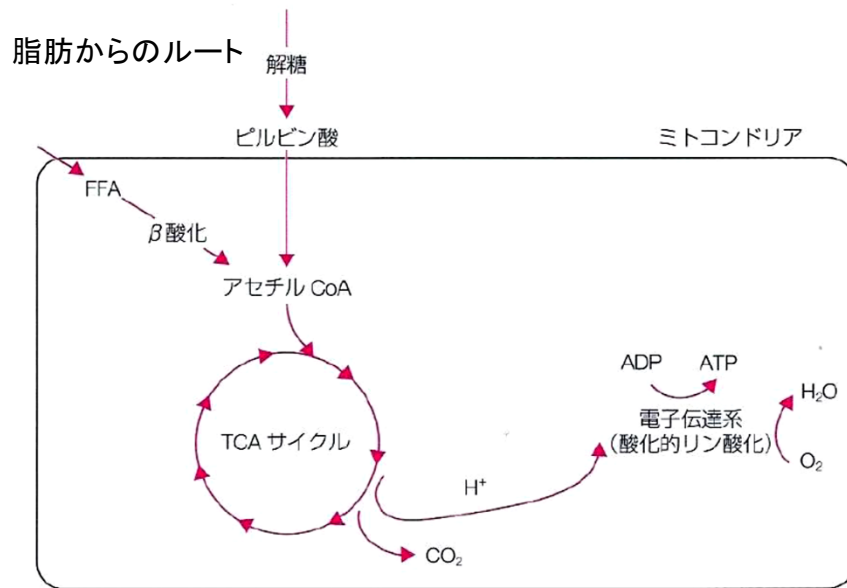
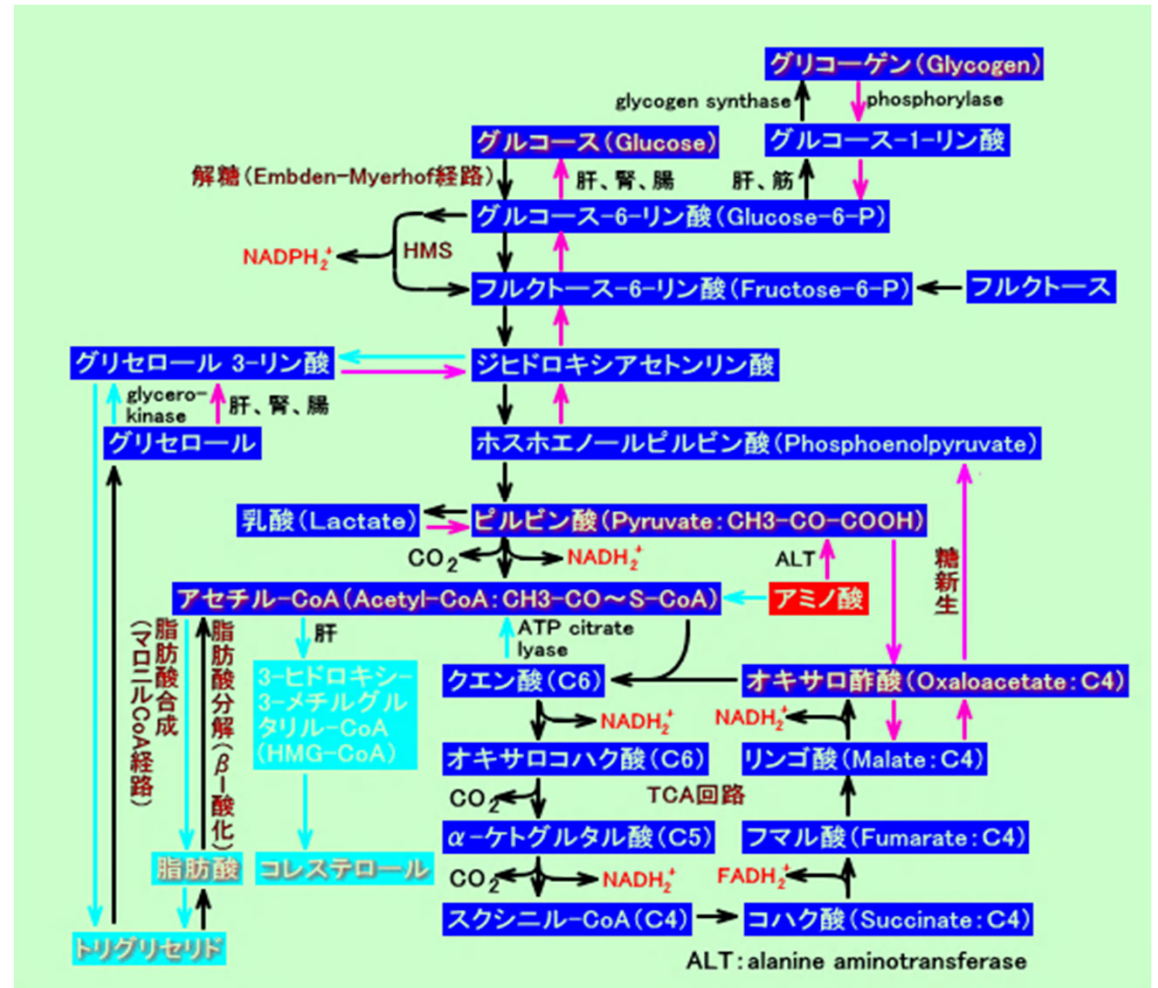
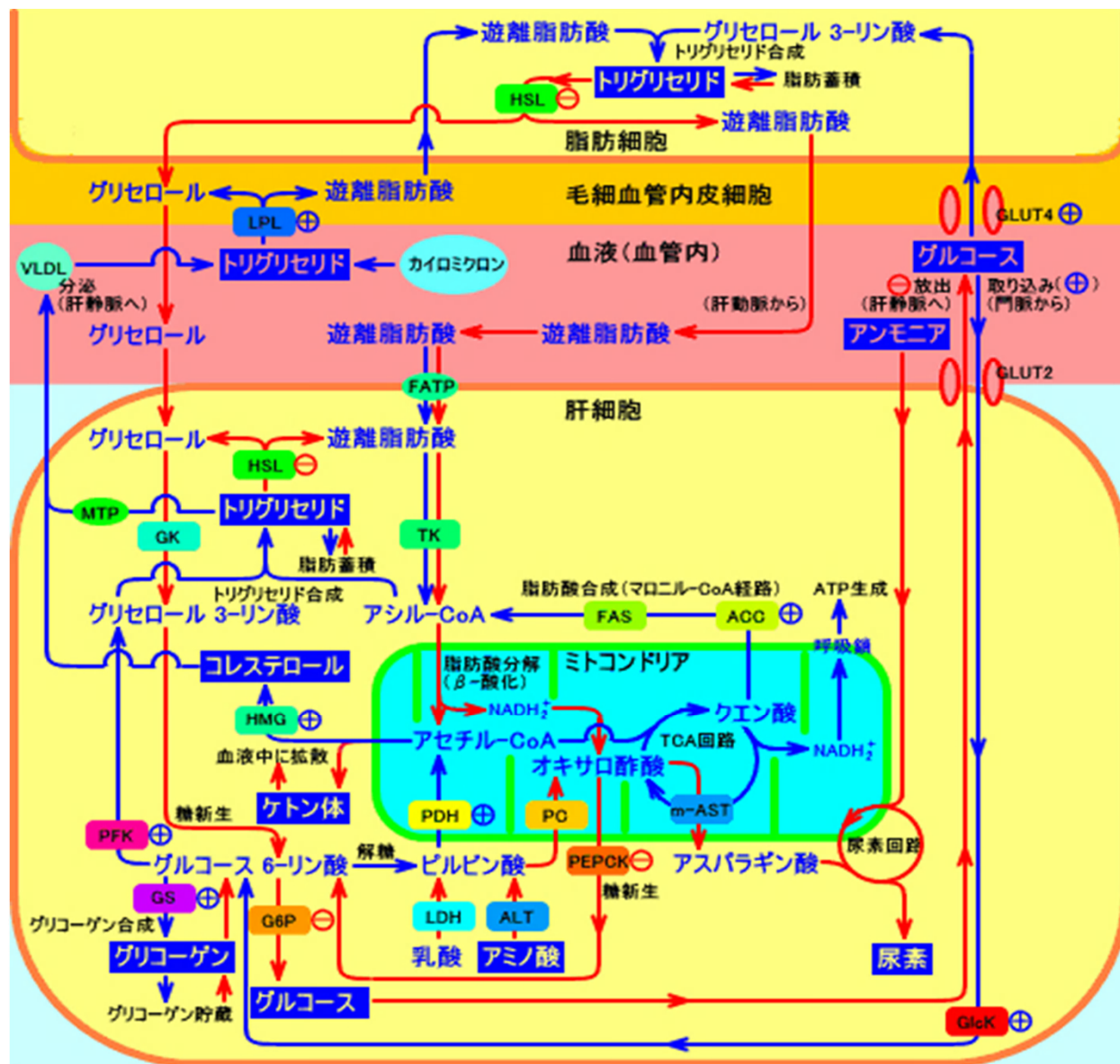


図 1.13 有酸素系経路の概略

電子伝達系は、TCA サイクルで発生した水素から電子を受け取って、ATP を再合成する。この反応は、ミトコンドリアの中で酸素を用いて進行する。





肝臓と脂肪組織の代謝

- ⊕: インスリンにより促進
- ⊖: インスリンにより抑制
- ←: 食事摂取時
- : 運動時、絶食時
- ACC: アセチル-CoAカルボキシラーゼ
- ALT: アラニンアミノトランスフェラーゼ
- m-AST: アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ
- FAS: 脂肪酸合成酵素
- FATP: 脂肪酸輸送蛋白
- GK: グリセロキナーゼ
- GlcK: グルコキナーゼ
- GLUT2: 糖輸送体2
- G6P: グルコース 6-ホスファターゼ
- GS: グリコーゲン合成酵素
- HMG: HMG-CoA還元酵素
- HSL: ホルモン感受性リパーゼ
- LDH: 乳酸脱水素酵素
- LPL: リポ蛋白リパーゼ
- MTP: ミクロソームトリグリセリド転送蛋白
- PC: ビルビン酸カルボキシラーゼ
- PDH: ビルビン酸デヒドロゲナーゼ複合体
- PEPCK: ホスホエノールビルビン酸カルボキラーゼ
- PFK: ホスホフルクトキナーゼ
- TK: チオキナーゼ (Thiokinase)

筋収縮と3つのエネルギー供給系

表 1.2 エネルギー供給系とスポーツ種目との関係

運動時間	主たるエネルギー供給系	スポーツ種目の例
30秒以内	ATP-PCr系	砲丸投げ, 100~200m走, 盗塁, ゴルフやテニスのスイング, 50m競泳, フットボールのランニングプレイ, サッカーのゴールキーパー
30秒~1分30秒	ATP-PCr系と解糖系	400m走, 500~1,000mスピードスケート, 100m競泳
1分30秒~3分	解糖系と有酸素系	800m走, 200m競泳, 体操種目, ボクシング, レスリング
3分以上	有酸素系	球技系種目, マラソン, 1,500~10,000m走, 400~1,500m競泳, クロスカントリースキー, 自転車ロードレース, トライアスロン

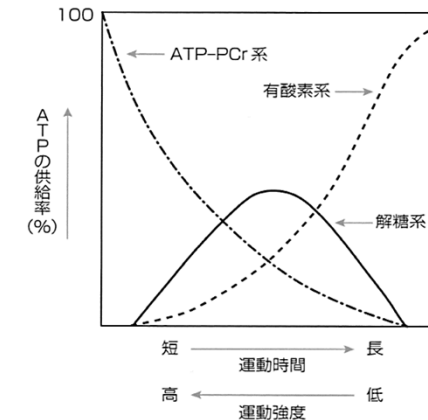


図 1.14 運動時間とエネルギー供給系の関係 (Fox, 1982) 運動強度が高く運動の継続時間が短い時は, ATPは主としてATP-PCr系から供給される。運動時間が長くなるにつれ, 有酸素系の関与が大きくなる。

クレアチンリン酸(ATP-PCr)系

クレアチンからリン酸基の遊離

解糖系

筋グリコーゲンからの無酸素性解糖

+ 乳酸性生成

有酸素系

細胞内ミトコンドリアでのエネルギー生産

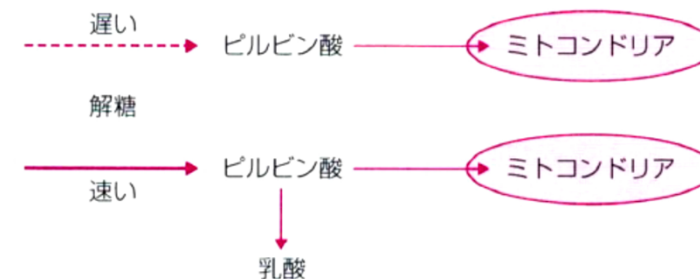


図 1.12 解糖系による乳酸の生成
解糖系の反応が速いと, ピルビン酸の一部は乳酸に変換される。

筋線維の種類とその特徴

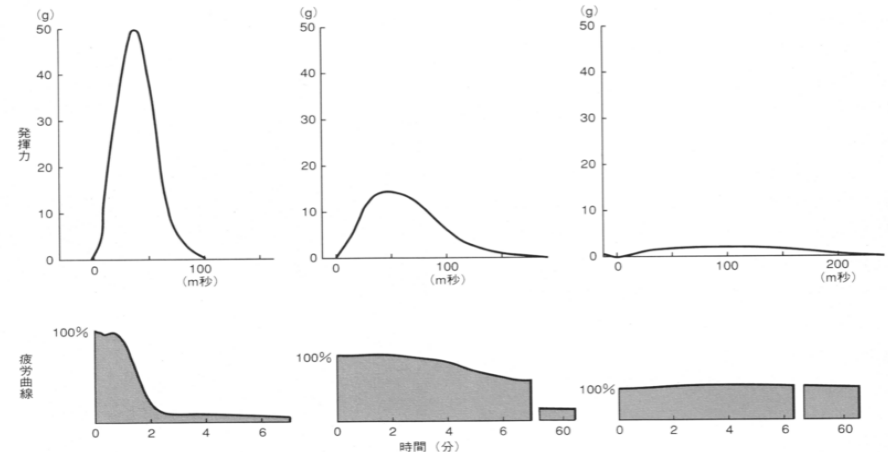
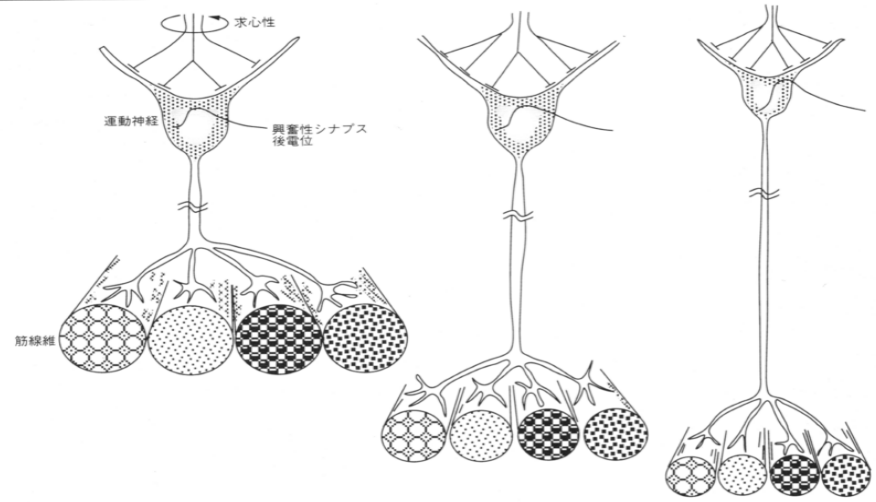
- 筋線維の種類は3種類
 - 2つの「速筋系」と「遅筋系」
 - Type II a,b と Type I
 - FTa, FTb と ST
 - Tは収縮: Twitch
 - FG、FOG と SO
 - Gは解糖能: Glycolysis
 - Oは酸化能: Oxidative

表 2.1 筋線維の分類と特性

	筋線維				
	ST type I		FTa type II a		FTb type II b
収縮速度	遅い	《	速い	=	速い
酸化能力	高い	》	中間	>	低い
解糖能力	低い	《	高い	=	高い
疲労耐性	高い	》	中間	>	低い

》は大きな差異があることを, >は差異があることを, =はほとんど差異がないことを示す。

運動単位のタイプ	FF	FR	S
筋線維のタイプ	FG	FOG	SO



運動単位は、その短縮特性から以下の3タイプに分類できる。

- FF (速い短縮で疲労しやすい)
- FR (速い短縮で疲労しにくい)
- S (遅い短縮)

この短縮特性と各筋線維の組織化学的特性の間には対応関係がある。

- FF → FG (速い短縮で解糖)
- FR → FOG (速い短縮で酸化と解糖)
- S → SO (遅い短縮で酸化)

図5-3 運動単位のタイプと活動特性 (バークとエジャートン, 1975年 一部改変)

三種類の筋線維

FG: スーパー速筋
 FOG: トレーニングでFGへ
 SO: 長距離選手の腓腹筋では80%を占める

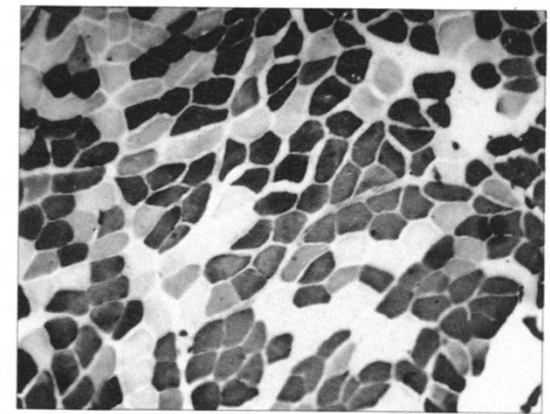
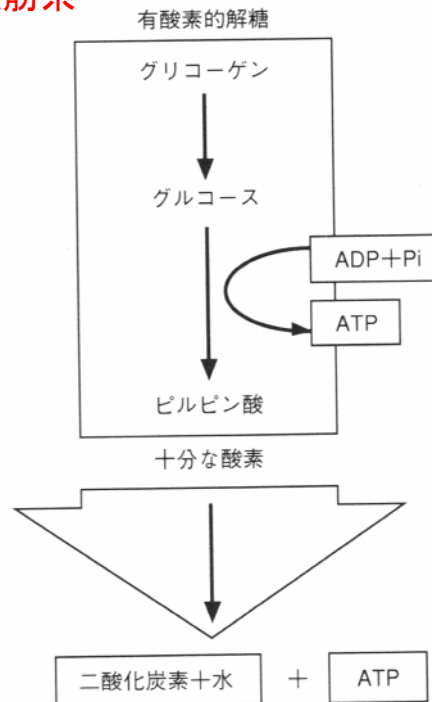


写真5-2 筋線維の分布 (武藤ら, 1983年)
 黒く見えるのは遅筋線維 (タイプI)、白っぽく見えるのは速筋線維 (タイプII aとII b)。

有酸素的解糖と無酸素的解糖

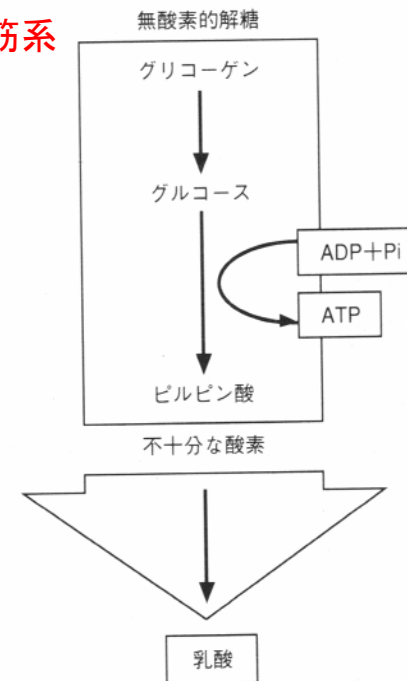
この時には
運び屋の
MCT1が必要
= 低強度×
長時間トレ
ーニング

遅筋系



この時には
運び屋**MCT4**
が必要
= 高強度×
短時間ト
レーニング

速筋系

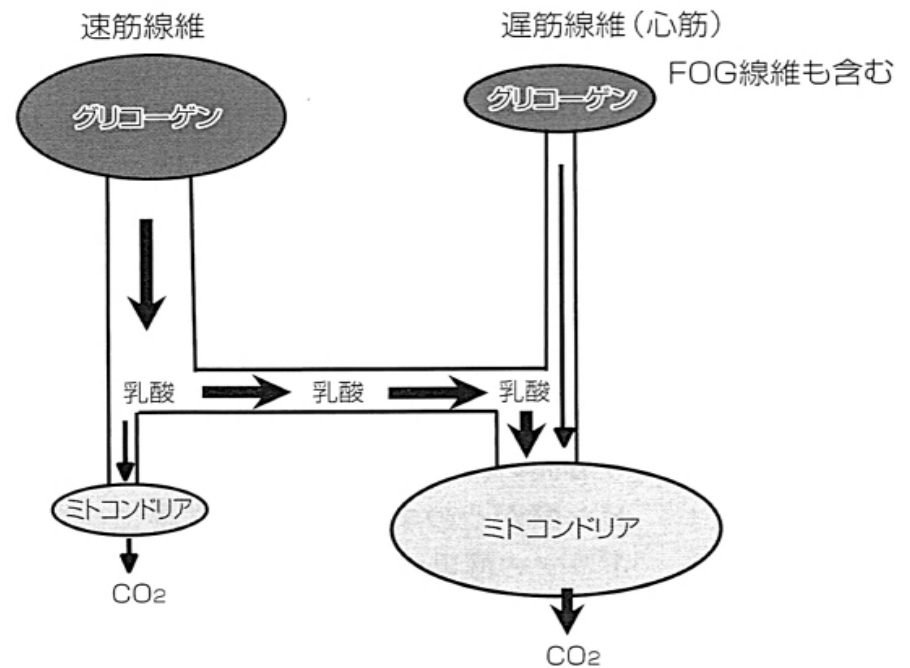


フォックスとマティウズ(1981)

「乳酸シャトル」の意味するもの・・・

筋線維タイプ	遅筋線維		速筋線維	
	タイプ(SO)	タイプIIa(FOG)	タイプIIb(FG)	タイプIIB(FG)
ミオシンATPアーゼ活性	●		●	
代謝酵素				
解糖系酵素	●	●	●	●
酸化系酵素	●	●	●	●
代謝基質				
グリコーゲン	●	●	●	●
中性脂肪	●	●	●	●
毛細血管密度	●	●	●	●

図6-1 筋線維の代謝 (定本ら, 1987)
 ○内の色合いが濃いほど、各項目の活性や濃度が高いことを示す。



実は筋ごとに筋線維組成が異なる

各関節ごとの動作（役割）の違い
各個人ごとの筋組成の違い
「ヒラメ筋」は何故共通性が高いのか？

スキルを支える
速筋系線維

⇒ 主要な張力発揮と運動方向を決定？

遅筋系線維

⇒ 補完的張力発揮とミトコンドリアによる乳酸利用？

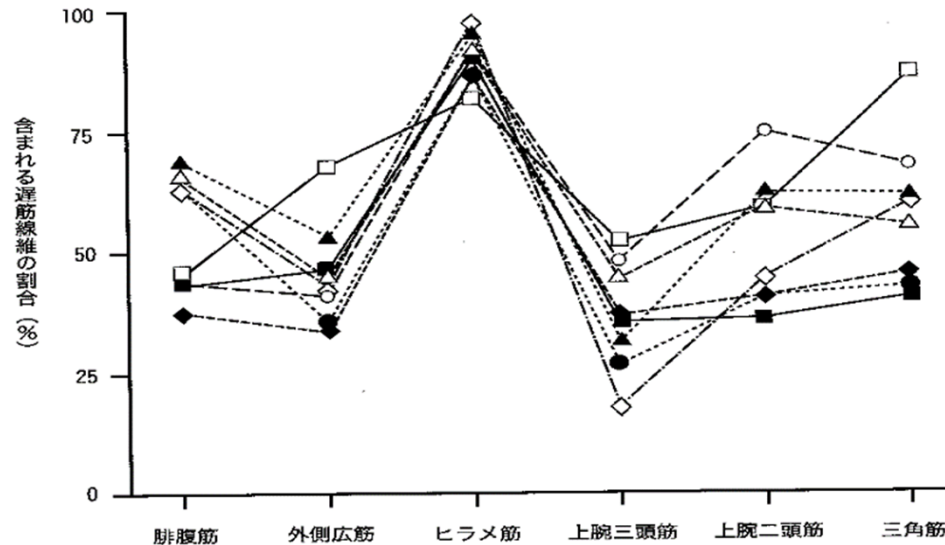


図 4-11 ヒト骨格筋の筋線維組成

3 × 3システムによる動作の発現

筋線維間 ⇒ 動きを作り出すシステム

筋線維内 ⇒ エネルギーを作り出すシステム

動きをつくり出すシステム

		Type I	Type II a	Type II b
エネルギーをつくり出すシステム	ATP-PCr系	△	○	◎
	解糖系	○	◎	◎
	有酸素系	◎	○	△

定本ら(1987年)の図を山崎が改変

マルチレイアシステム

動きをつくり出すシステム

		Type I	Type II a	Type II b
エネルギーをつくり出すシステム	ATP-PCr系	△	○	◎
	解糖系	○	◎	◎
	有酸素系	◎	○	△

上腕二頭筋(屈筋側)
F/T線維比 54:46

肘関節周りの拮抗筋

上腕三頭筋(伸筋側) エネルギーをつくり出すシステム
F/T線維比 68:32

動きをつくり出すシステム

		Type I	Type II a	Type II b
エネルギーをつくり出すシステム	ATP-PCr系	△	○	◎
	解糖系	○	◎	◎
	有酸素系	◎	○	△

筋線維組成は遺伝子で決まる？

金メダル遺伝子

グラスゴー大学

ヤニス・ピツラディス 教授

検査される遺伝子

- NR3C1: ジャンプカに関与(垂直跳び型?)
- IGF2: 筋の萎縮を抑える
- IL15RA: 筋の再生を促す
- ACTN3: α アクチニン3の発現に関与?

その他

- ACE: 血圧調整に関与?
- PPARGC1A: PGC-1 α タンパク質のミトコンドリアでの増殖に関与?
持久性トレーニングへのスーパーレスポonderとノンレスポonder

筋組成と遺伝子検査：金メダル遺伝子を探る

先天因子(遺伝)
後天因子(トレーニング)

朝原宣治選手の遺伝子検査結果

顕発系運動能力に関連した遺伝子

遺伝子名	機能	表現型詳細	表現型に関連した多型	判定	スコア
1 IL15	筋再生	1回最大舉上重量	TT/TA	TA	2
2 CNTF	神経栄養因子	ピークトルク(筋力)	GG/GA	GA	2
3 FST	筋の成長促進	除脂肪体重(筋量)	Group 1 (ハプロタイプ)	Group 1	2
4 IGF2	筋成長	除脂肪体重(筋量)	GG/GA	GG	2
5 IL15RA	筋再生	筋量	AA	AA	2
6 IL15RA	筋再生	筋量	AA/AC	AA	2
7 TNF	蛋白の異化作用	胸の筋量	TT	TT	2
8 NR3C1	蛋白の異化作用	ジャンプ力	TT/CT	CC	0
9 CNTFR	神経栄養因子	除脂肪体重(筋量)	TT/TC	TC	2
10 PPARA	エネルギー代謝	筋力	CC	GG	0
11 ACTN3	筋構造の維持	スプリント能力	CC/CT (RR/RX)	CC	2

顕発系合計スコア 18

筋線維組成と運動種目

筋線維組成と遺伝

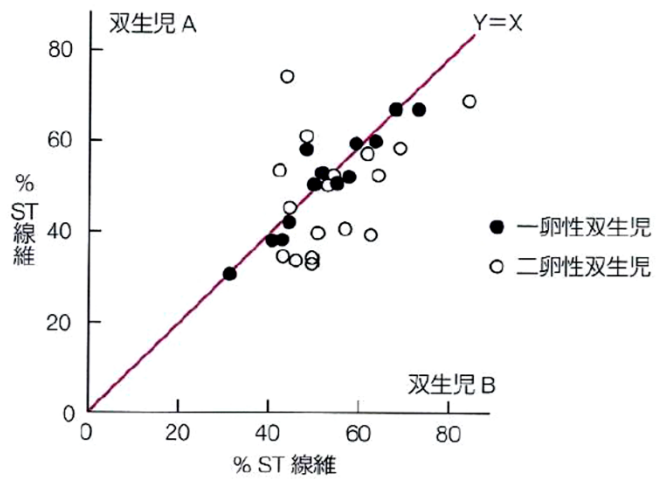


図 2.5 一卵性双生児と二卵性双生児のペア間の筋線維組成 (Komi と Karlsson, 1979)

二卵性双生児と比べ一卵性双生児の方が、ペア間の筋線維組成は似通っている。

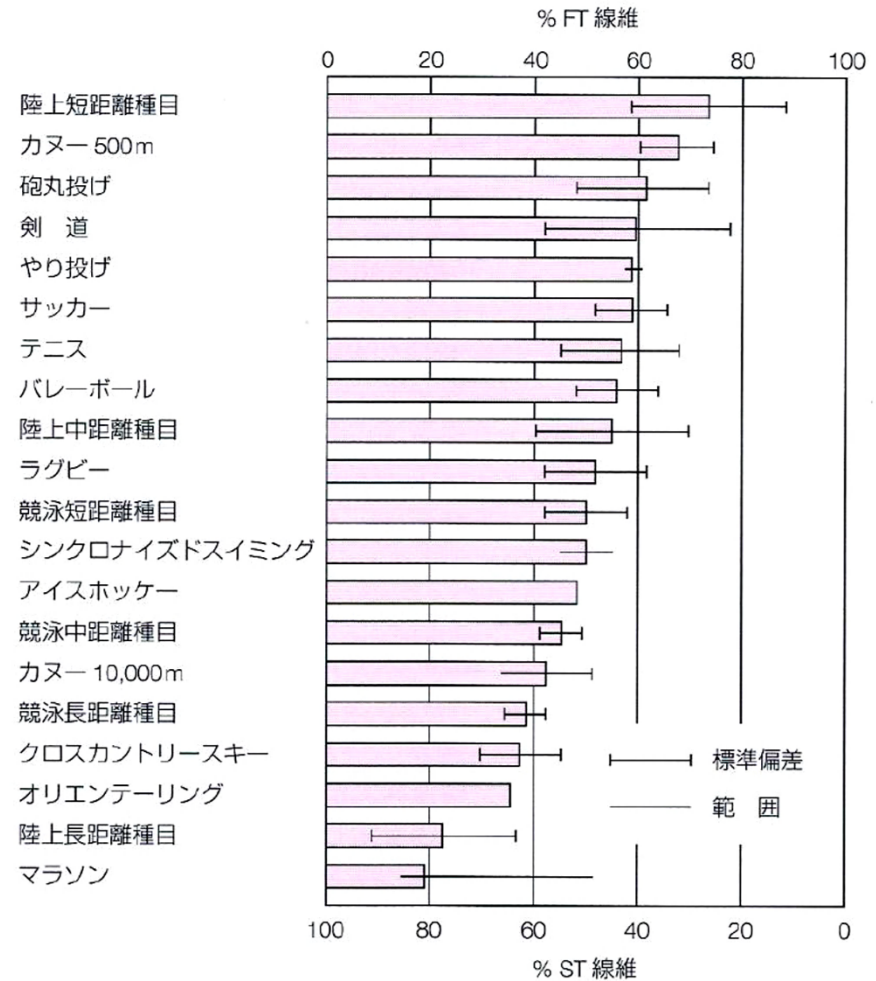


図 2.4 一流の競技スポーツ選手の筋線維組成

大部分の一流スポーツ選手の筋では、各々のスポーツ種目の競技特性に応じた筋線維組成が認められる。

筋線維組成の推定

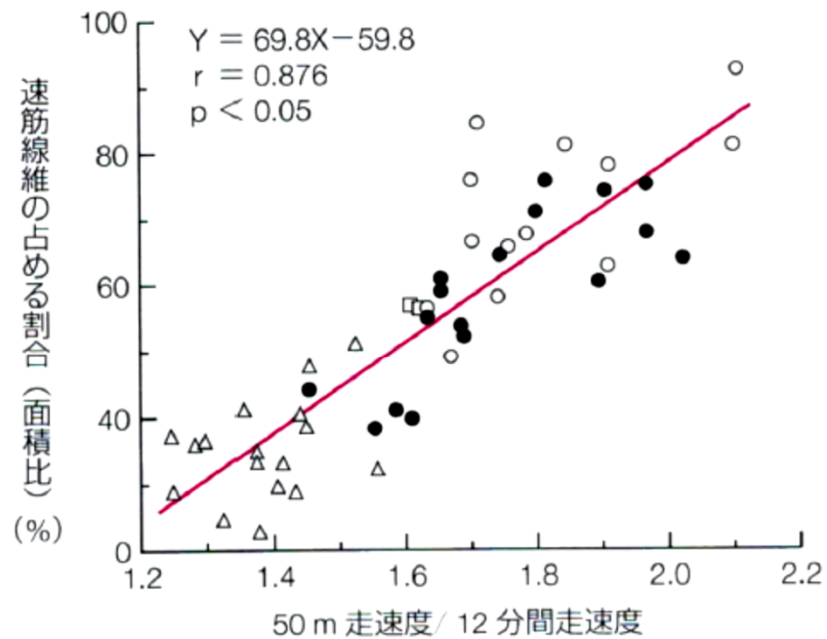


図 2.9 50m 走および 12 分間走の速度比と筋線維組成の関係 (勝田ら, 1989)

○：スプリンター、△：長距離ランナー、□：球技選手、●：非運動選手。

50m走

6~8秒程度の継続時間

12分間走

最大酸素摂取量(持久力の指標)と関連が深い

50mの秒速

Vs 12分間走の秒速

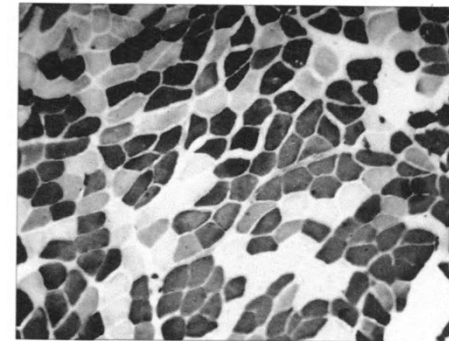


写真 5-2 筋線維の分布 (武藤ら, 1983年)
 黒くみえるのは遅筋線維 (タイプ I)、白っぽくみえるのは速筋線維 (タイプ II a と II b)。

遺伝的要因とトレーニング

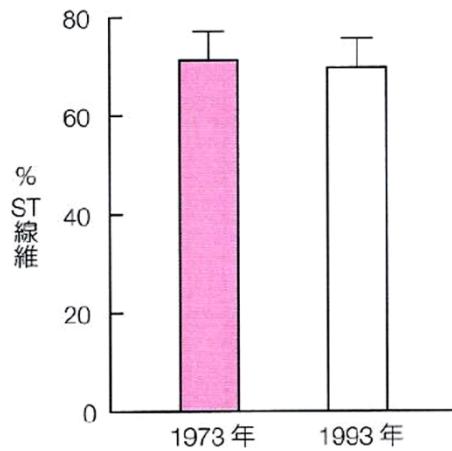


図 2.6 20年間持続性トレーニングを継続した陸上競技者の筋線維組成 (Trappe ら, 1995)

11人の競技者が20年間(1973年から1993年まで)トレーニングを継続して行ったが、下肢の腓腹筋のST線維の割合は変化しなかった。

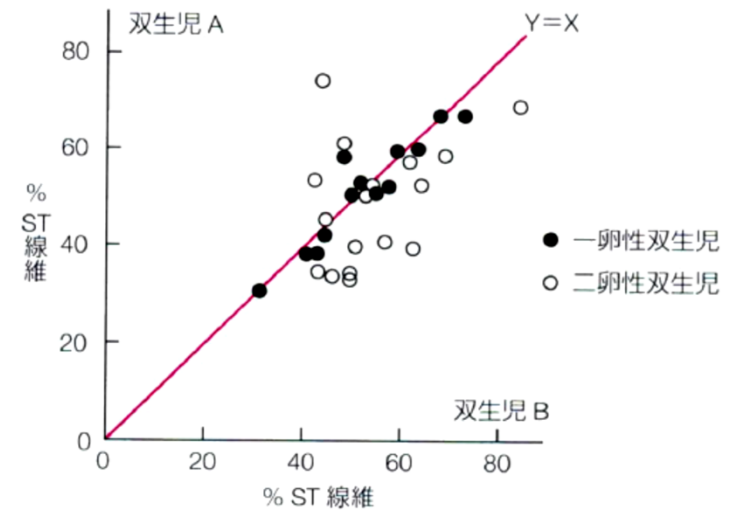


図 2.5 一卵性双生児と二卵性双生児のペア間の筋線維組成 (Komi と Karlsson, 1979)

二卵性双生児と比べ一卵性双生児の方が、ペア間の筋線維組成は似通っている。

トレーニングの効果(筋力増加)

- 神経系の改善(初期)
- 筋線維自体の肥大

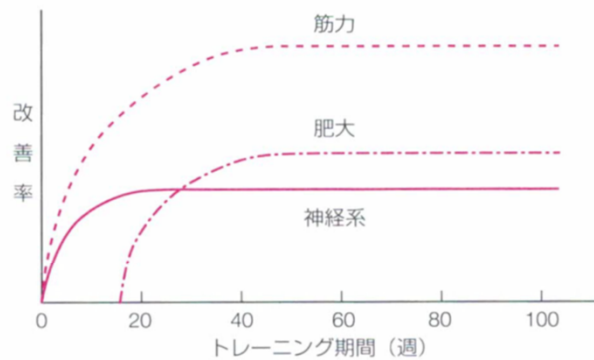


図 4.9 筋力トレーニングによる神経・筋の変化 (Wilmore と Costill, 1994)
筋力トレーニングを開始して初期のころの筋力の増加は、神経系が改善されることに原因がある。それに対して、長期にわたるトレーニングでは、筋が肥大することによって筋力は増す。

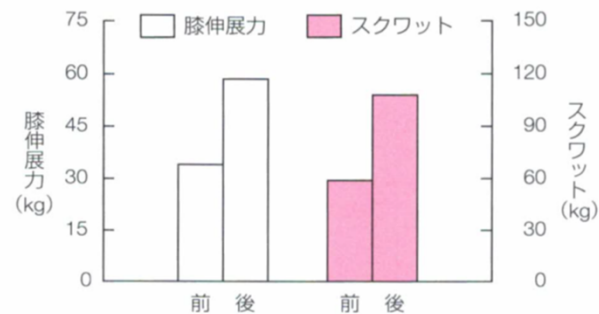


図 4.7 ウェイトトレーニングによる筋力の変化 (Staron ら, 1991 を改変)
20 週間ウェイトトレーニングを行った結果、80%以上も筋力が増加した。

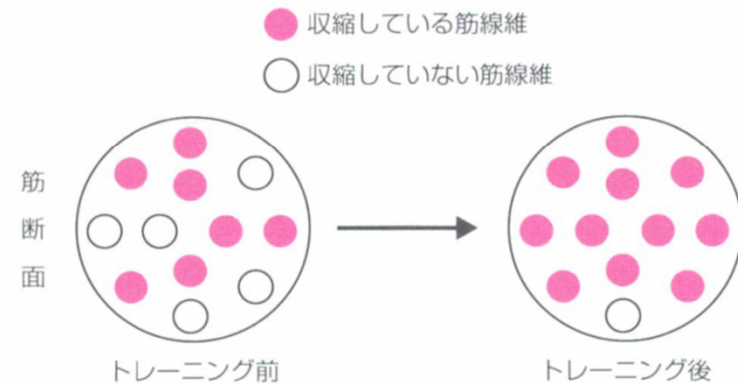


図 4.10 新たな筋線維の動員 (山田と福永, 1996)

速筋線維の優先的肥大？

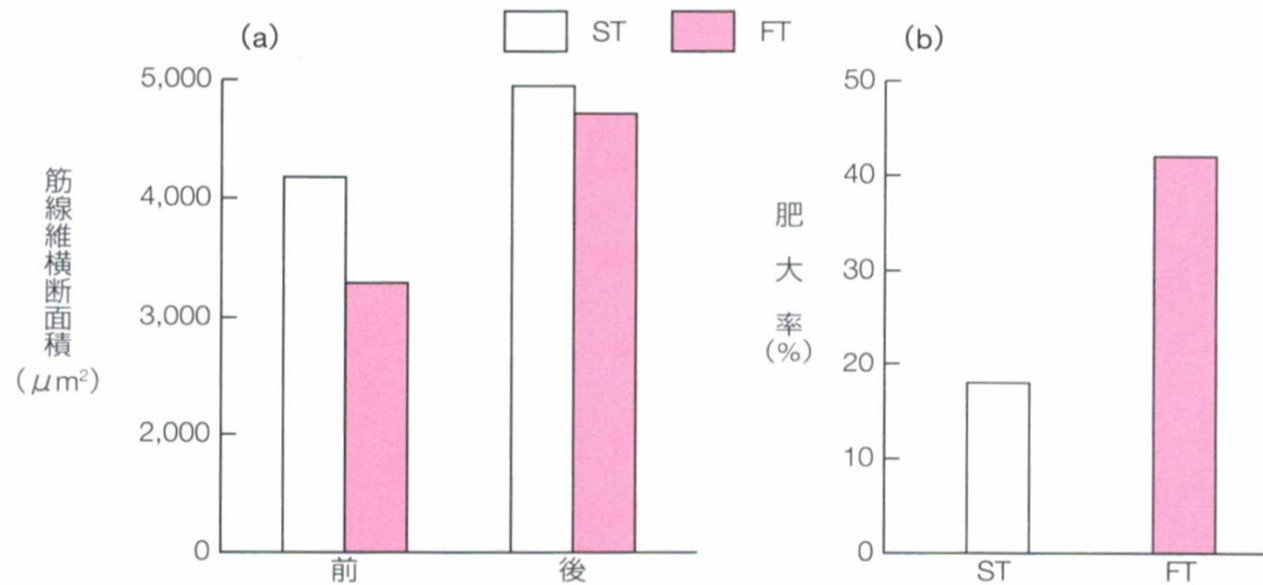


図 4.11 ウェイトトレーニングによる筋線維横断面積の変化 (Staron ら, 1991 を改変)
20 週間のウェイトトレーニングを行った結果, ST 線維と FT 線維の両方に肥大が起こった (a).
しかし, その肥大率は, FT 線維の方が大きい (b).

ネコでは筋線維数の増加も・・・

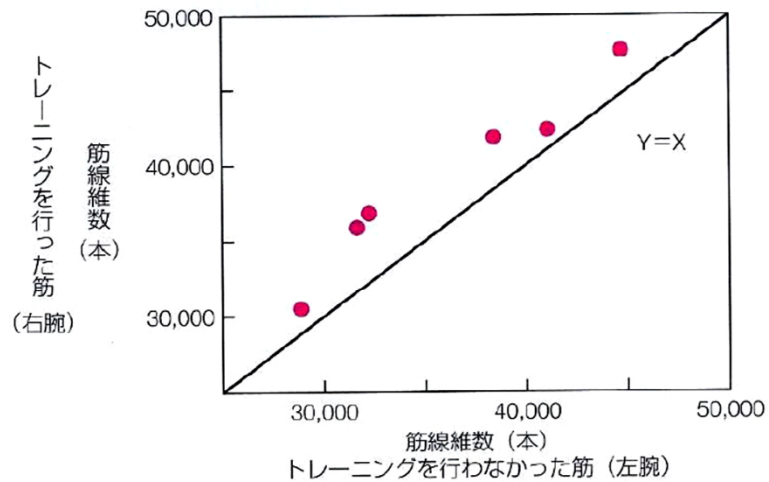


図 4.14 ウェイトトレーニングによる筋線維数の変化 (Gonyea ら, 1986)
ネコにウェイトトレーニングを 101 週間行わせたところ、数%の筋線維数の増加が起こった。

ところが加齢性の変容も・・・

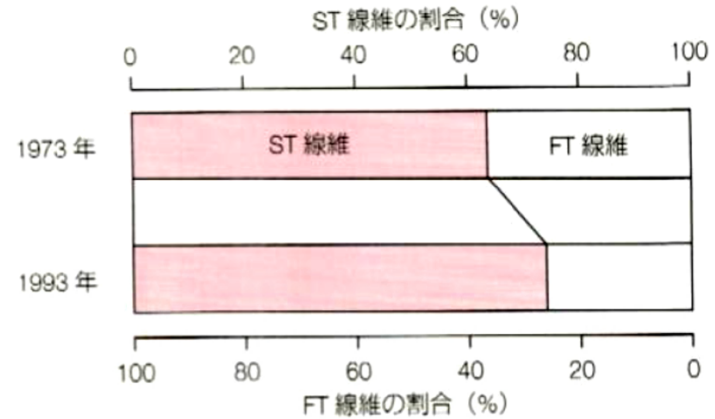


図 4.3 加齢に伴う筋線維組成の変化 (Trappe ら, 1995 を改変)
28 人について、20 年間の間隔をおいて腓腹筋の筋線維組成を調べたところ、20 年間で約 8%遅筋 (ST) 線維の割合が増加していることが認められた。

トレーニングによる筋線維組成の変化

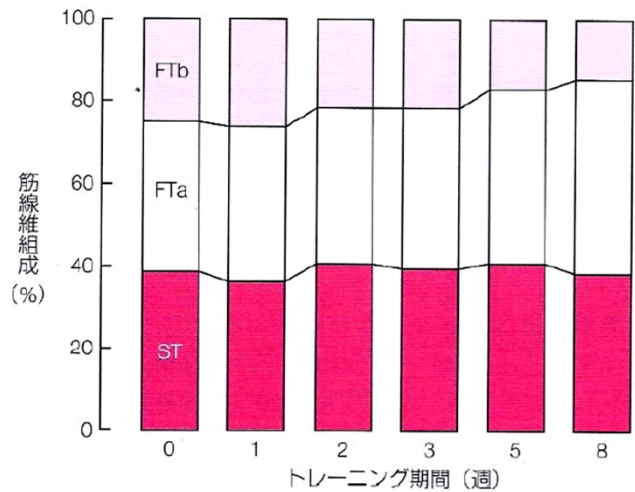


図 2.7 持久性トレーニングによる筋線維組成の変化 (Andersen と Henriksson, 1977 を改変)
 トレーニングの結果、FTb 線維が減少し FTa 線維が増加した。これは FTb 線維から FTa 線維へのタイプ移行が起こったためである。



図 2.8 トレーニングによる筋線維のタイプ移行

トレーニングを行うと、FTb 線維のいくつかは、FTa 線維へのタイプ移行が起きる。しかし、トレーニングを中止すると、再び FTb 線維へ戻ってしまう。

トレーニングの再開で...

朝原引退から10年
衰えた体と向き合う

大会まで2か月半

筋の収縮様式と筋力

- 筋の収縮様式
- 各収縮様式の特徴
- トレーニングによる筋力の変化
- 神経系の改善
- 筋線維の肥大
- 筋線維数の変化

筋の収縮様式

Iso: 等しい

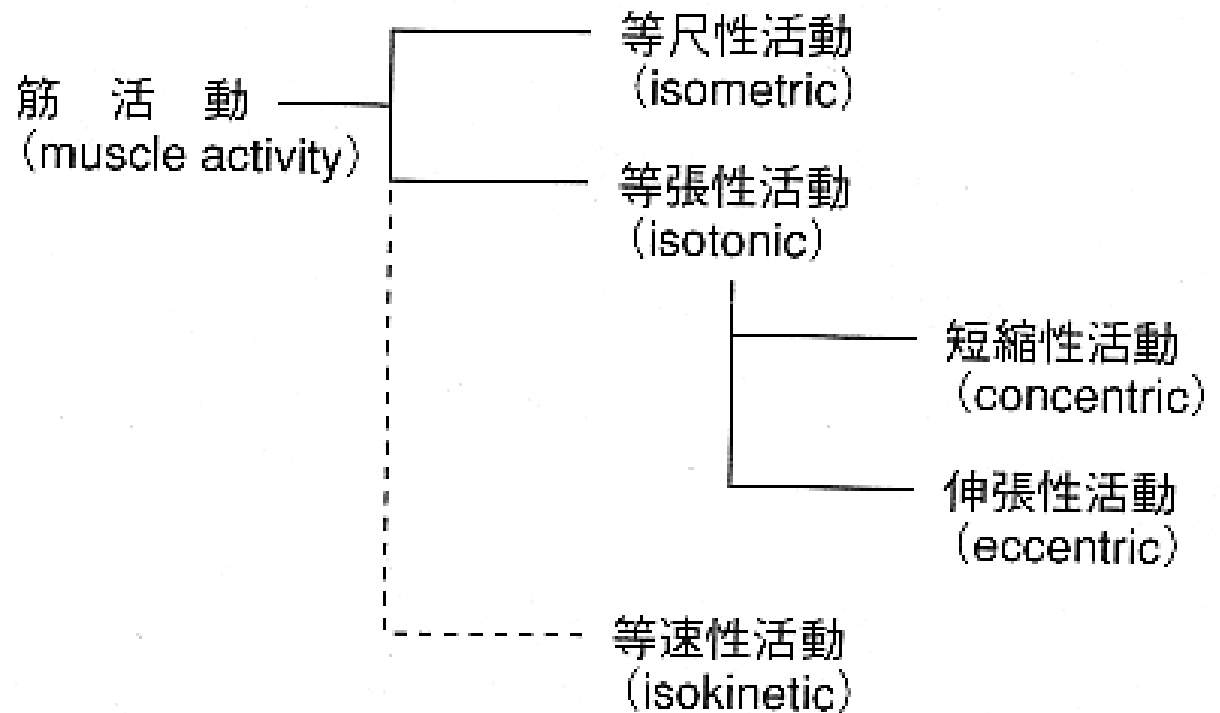
Metoric: 長さ

Tonic: 張力

Concentoric: 短縮

Eccentoric: 伸長

Kinetic: 速度



- 関節角度と発揮される力
 - 3種類にてこ(真の筋力と見かけの筋力)
 - クリティカル・ゾーン
- 筋活動の様式
 - 等尺性と等張性(短縮性と伸張性)
 - 等速性(コンピュータ制御による負荷様式)
- 筋活動の様式と力の大きさ
 - 等尺性と短縮性(速度-力曲線)
 - 伸張性はある速度までは大きな力発揮

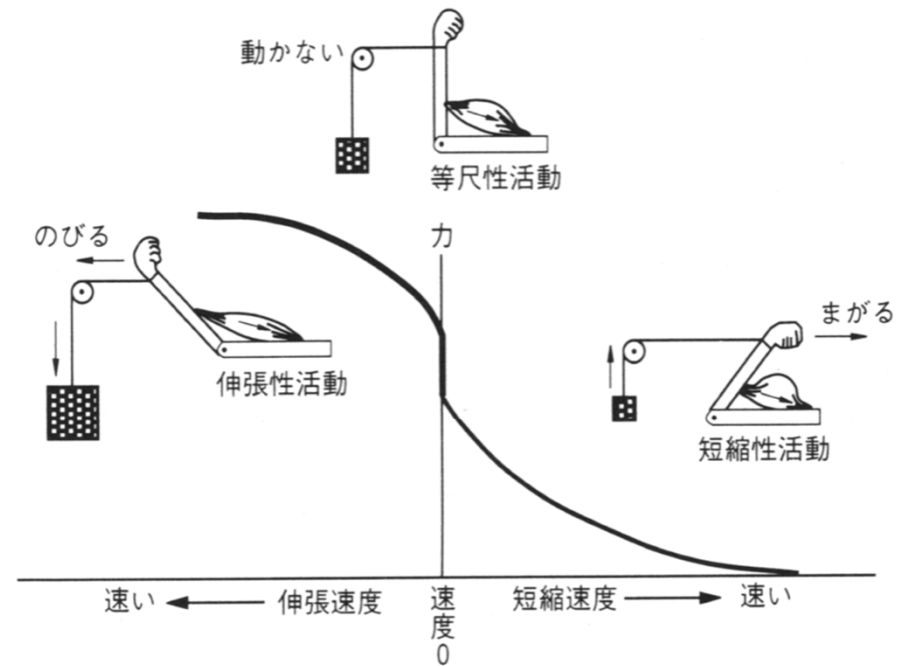


図3-9 筋活動の様式と発揮される力の大きさ (ヒル, 1951年)

トレーニングの名称

アイソニック・トレーニング
通常のフリーウェイト
“初動時”と“終動時”のみ

アイソメトリック・トレーニング
動きを伴わない難点が...

スロー・トレーニング
加圧式トレーニング

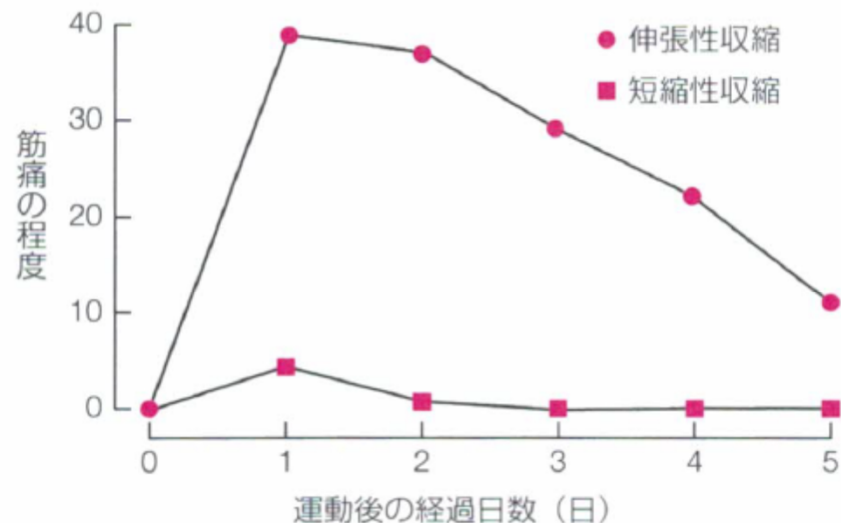


図 4.5 筋収縮の様式の違いによる筋痛の程度 (Lavender と Nosaka, 2006 を改変)

筋肉痛の原因は・・・“登り”よりも“降り”

アイソキネティック・マシン



室伏の認知動作型トレーニング





世界を越える
価値ある

724-10
魂
NHKG

イチローの初動負荷マシン

