

# 運動生理学

# 筋肉はどっつやっつて動くの？

## 身体運動を実現するもの

新日本スポーツ連盟・スポーツリーダー養成講座  
第5課「人間の体とトレーニング・栄養」より

当たり前のことですが、スポーツは、筋肉を動かすことで成り立ちます。それでは、筋肉はどういう仕組みで動いているんでしょうか？今回は、運動生理学を研究している山崎健先生のお話から筋肉についての「最新情報」を紹介します。

構成||編集部 イラスト||堀口初美

## 速筋系にも2種類ある!?

筋肉の分類について、昔は「速筋と遅筋」という程度しか私たちは習いませんでしたが、今は3種類の筋線維があると言われています(図1)。

遅筋はマグロと同じように赤い筋肉で、収縮速度は遅いが持久力に優れています。一方、速筋は白身魚のように速く動く筋肉です。同じ速筋系でも、その中間的な筋肉は、収縮速度がやや遅くて、やや長持ちするという性質を持っています。

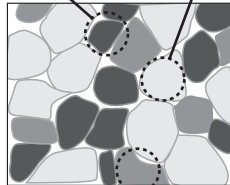
速筋と遅筋の割合は人によってさまざまで、その比率は一生変わらないと言われています。長距離選手の手背筋では遅筋系が8割を占めますが、短距離選手は3割ほどしかないそうです。

ただし、短距離選手でもマラソンの練習をすると、そこそこ走れるようになります。長距離選手も、速筋系を持っていますのでトレーニングすれば速く走れます。

図1 3種類の筋線維

### ●遅筋 (SO系)

筋力・スピードはあまりないが持久力がある



### ●速筋 (FG系)

筋力・スピードはあるが持久力はない



### ●速筋 (FOG系)

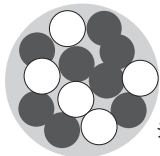
筋力・スピードも持久力もそこそこある

図2 トレーニングの効果

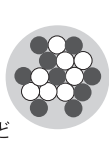
生まれ持った速筋、遅筋の割合を変えることはできないが、それぞれの筋肉に適したトレーニングを行うことで、個々の筋線維を強く太くすることができる

遅筋の太さ up = 持久力 up

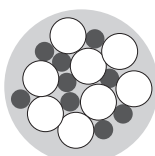
速筋の太さ up = 瞬発力 up



ジョギングなど



筋トレなど



「図解スポーツトレーニングの基礎理論」(西東社)より

### 山崎 健 先生

やまざき・けん  
新潟大学教育学部・保健体育スポーツ科学講座教授。体育・スポーツ科学における運動生理学を中心とした研究を行う。日本運動生理学会理事・評議員。新潟大学陸上競技部部長兼コーチ兼トレーナー。自ら市民ランナー(マスターズM60三段跳選手)でもある。

筋肉はどうやって動くの？

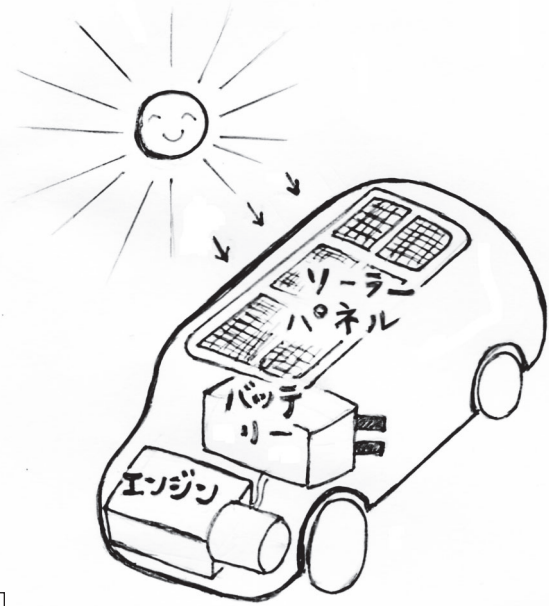
筋線維は3種類あると述べましたが、筋肉の細胞でエネルギーを作り出すシステムも3種類あります。私は、人間のエネルギーの作り方を「ソーラーパネル付ハイブリッド自動車」と名づけています(図3)。

まずは、スタートダッシュなど瞬発的な動きに使われるバッテリー部分(ATP-CP系)。ここでは、酸素を使いません。乳酸も出ません。とにかくバッテリーの力だけで、ボンといきます。ただし、このバッテリーが持続できる時間は7秒ぐらいと言われています。

次に、グリコーゲンという糖を分解してエネルギーを生み出すガソリンエンジンに相当する部分(解糖系)があります。このエンジン部分でエネルギーを供給できる時間は33秒。その間に乳酸が生成されます。よく「乳酸=疲労物質」と言われますが、それは間違っていると言われています。乳酸は、筋肉にたまるとやや酸性になって運動しにくくなりますが、実は非常に使いやすいエネルギー源だということがわ

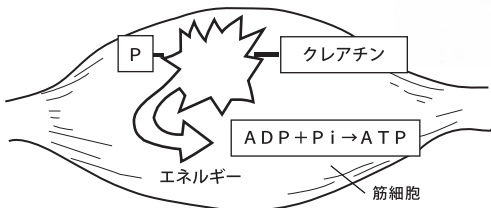
# 3つのエネルギー生産システム

図3 ソーラーパネル付ハイブリッド自動車



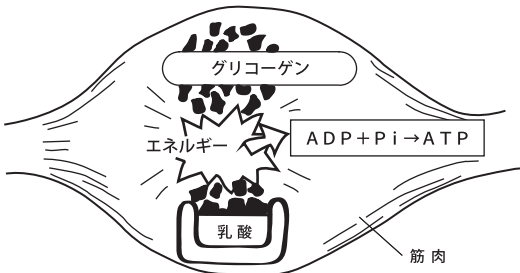
かってきています。そして、もう一つのシステムがソーラーパネル(酸化系)です。細胞内のミトコンドリアが酸素を使って、炭水化物や脂肪を燃やしエネルギーをつくり出します。これは、ノロノロといつまでも続けることができます。エンジン部分で出された乳酸は、ここで使われます。

● バッテリー部分の仕組み (ATP-CP系)

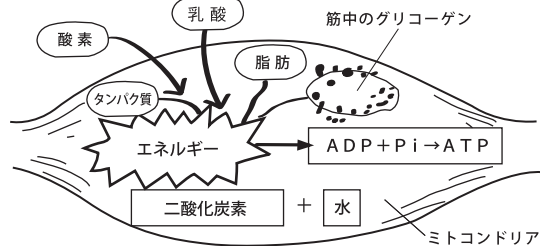


- ① バッテリー=すべての基本…でも7秒で終わり (電池駆動)
- ② ガソリンエンジン=快適走行も制限時間付き? (33秒でおしまい)
- ③ ソーラーパネル=のろのろ でも いつまでも

● ガソリンエンジン部分の仕組み (解糖系)



● ソーラーパネル部分の仕組み (酸化系)



「スポーツ選手のためのからだづくりの基礎知識」(山海堂)より

### 図4 3 by 3 システム

1つの筋肉の中に3種類の筋線維と3種類のエネルギーの作り方がある

|          | 速筋 (FG系) | 速筋 (FOG系) | 遅筋 (SO系) |
|----------|----------|-----------|----------|
| バッテリー    |          |           |          |
| ガソリンエンジン |          |           |          |
| ソーラーパネル  |          |           |          |

※ 単一システムに依存しては破綻する  
 100mは「持久走？」(by 末續慎吾)  
 ⇒スピード曲線は60m以降低下する  
 フルマラソンも「速筋系」が重要  
 ⇒スピードとランニングスキルの維持

バッテリーやエンジン部分のように酸素を使わないでエネルギーを作り出すシステムは、瞬間的に大きな力を出すことができるけれど、40秒ぐらいしか持ちません。一方、ソーラーパネルのほうは、スピードやパワーはないけれど長時間の運動を続けることができます。そうすると、「速筋IIバッテリー+エンジン」「遅筋IIソーラーパネル」という役割分担がされているのかなと考えられそうですが、実

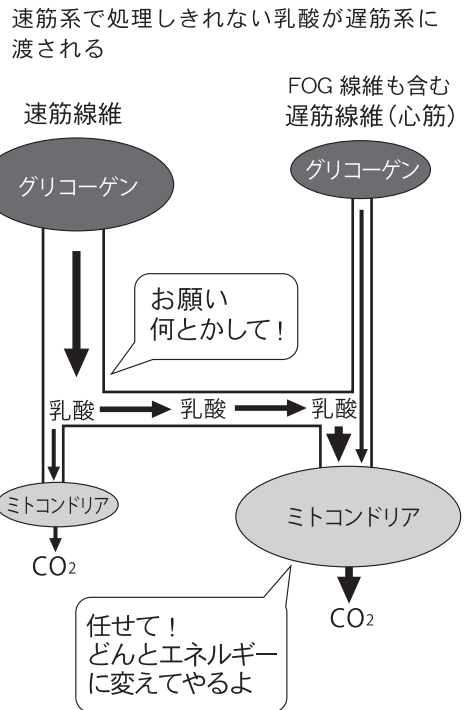
はそうではありません。不思議なことに速筋も遅筋も、その中間的な筋肉も、それぞれ3つのエネルギーシステムを持っています(図4)。遅筋は、酸素を使って長時間運動するのに都合がいい能力を持っていますが、バッテリーやエンジン部分もちよつと持っています。速筋も、バッテリーやガソリンエンジンに相当する部分を持ちながら、若干ソーラーパネルの部分も持っています。

## なぜ3種類×3種類なのか？

これを私なりに「スリー・バイ・スリーシステム」と言っています。このようにエネルギー生産システムがそれぞれの筋線維に混ざっているほうが、どうやら都合がいいようです。もしこれが単一システムだと、破綻するのではないかと思えます。例えば、100m走について考えてみますと、実際のスピードは60m以降低下しているんですね。末續慎吾選手が「100mは持久走です」と言うように、短距離でも遅筋の持久力が必要なんです。一方、マラソンでは速筋が非常に大切だと言ええます。

いま男子のトップ選手は1000m 17秒台、10000m 3分切っていますから、スピードが要ります。また、速筋は器用な筋肉、遅筋は器用な筋肉という性質があります。実は、上手に走るためのランニングスキルは、速筋によるものなのです。では、どうしてひとつの筋肉の中に3種類の筋線維と3種類のエネルギーの作り方があるのでしょうか。昔は、「速筋は、グリコーゲン(糖)を使って大きな力を出すけど、酸素が足りなくなると乳酸がたまるので動けなくなる。また遅筋は、

図5 乳酸シャトルの概念 (八田 2009年)



筋肉はどうやって動くの？

## 疲れると体が動かなくなるのはなぜ？

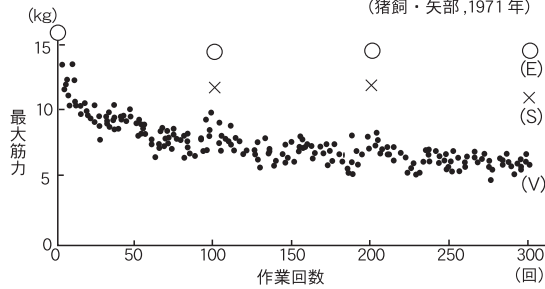
激しい運動をして体が動かなくなるのは、筋肉そのものが疲労していると思われがちですが、実は違うという研究があります。矢部先生による有名な実験ですが、手の指の運動を300回行うというものです(図6)。

疲れ果てるまでやると、指の筋力のパフォーマンスが落ちます。ところが、電気で刺激して筋肉を動かすと、本人の意思はもうダメだけど、筋肉自体には十分能力が残っているのです。

つまり、筋肉が疲労して動けないのではなく、脳が「もうあなたは頑張ったから休んでいいよ」と止めているんじゃないかと言われています。

図6 筋活動中の心理的境界と生理的境界

(猪飼・矢部,1971年)



- (E)：電気刺激による最大筋力
- × (S)：自発的なかけ声とともに発揮した意志による最大筋力
- (V)：意志による最大筋力



まだまだ動かせるぞ!

もう十分頑張ったから休んでいいよ

「キュー」とか掛け声をかけて筋肉を動かすと、パフォーマンスが上がる

酸素が十分にあるのでグリコーゲンをたくさん分解できる」と言われていました。

ところが、数年前に東京大学で乳酸を研究している八田秀雄先生が、新しい説を出しました。それが「乳酸シャトル」という考え方です(図5)。

速筋でも、酸化系のエネルギー生産を行うミトコンドリアを一応持っています。だから、それほど能力がありません。だから、遅筋が隣り合っていると都合がよく、「お願い、これを何とかして！」とたくさん出た乳酸を渡すことができます。

遅筋(や中間筋)にとって乳酸は、グリコーゲンから1回分解されて使いやすいエネルギーなので、ミトコンドリアでドンドン処理ができるというわけです。

これが、ひとつの筋肉に2種類の速筋と遅筋が隣り合っている理由だと思えます。速筋が「この乳酸をお願い！」と言うと、遅筋が「わかったよ。オレがどんとエネルギーに変えてやるから」ということで、スリー・バイ・スリーシステムになっているのではな

# 筋ごとに筋線維組成が違ふ

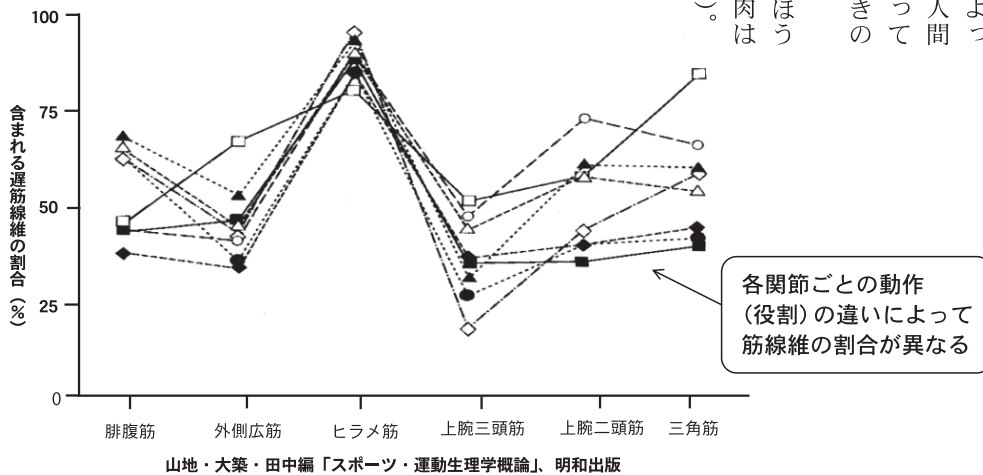
図7 ヒト骨格筋の筋線維組成

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？

速筋と遅筋の割合は、人によってそれぞれ異なりますが、同じ人間でも筋肉の部位によって変わってきます。これは、関節ごとに動きの役割が違うからです。

また、同じ筋肉でも、伸ばすほうの筋肉は速筋、縮むほうの筋肉は遅筋の割合が多いのです(図7)。

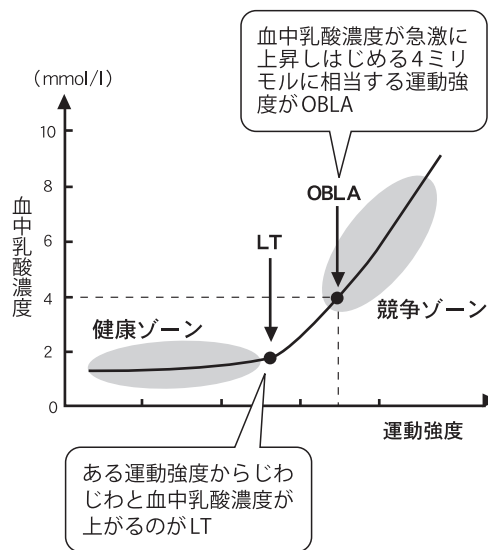


## ソーラーパネルだけでは運動した気がしない？

エネルギー生産システムの働きについて、運動の強さと乳酸濃度の関係から考えてみましょう(図8)。例えば、ゆっくり走っている時は、主にソーラーパネルが動いています。ところが、だんだんスピードを上げていくとソーラーパネルだけでは追いつかなくなってきます。そこで、ガソリンエンジンを使うようになると、糖が活発に使われて急に乳酸が増えます。この乳酸濃度が急に上がる運動レベル・速度(OBLA)は、人によって違います。

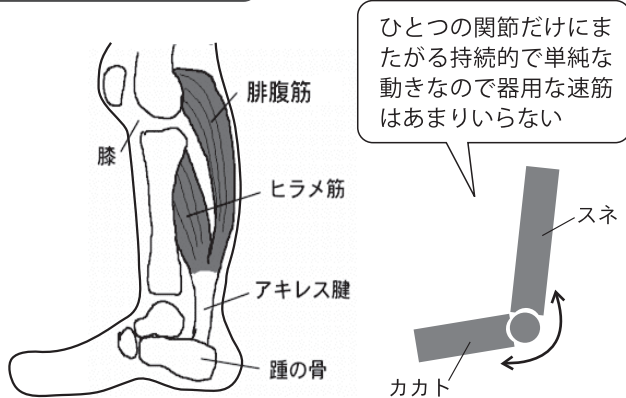
乳酸があまり増えないところは「健康ゾーン」、OBLAを超えると必死ですので「競争ゾーン」ですね。LTとOBLAのあたりの強度が「運動した気がする」ところ。乳酸が出るけど、処理もできる限界です。ここから先は、後のことは考えないで「アイツには絶対負けない」と必死で走っている状態です。

図8 運動強度と乳酸濃度



筋肉はどうやって動くの？

図9 ヒラメ筋の役割

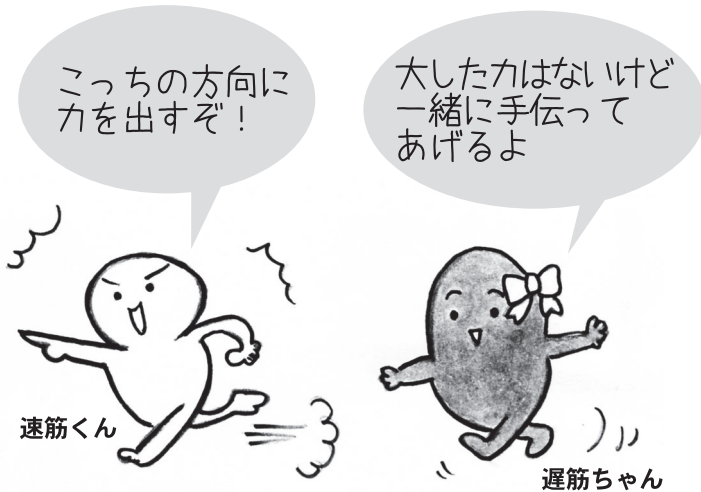


例えば「肘を伸ばす」場合、モノを投げる、何かを殴るなど速い動作が多いので、このときに使う筋肉は速筋が多いです。反対に「肘を曲げる」力こぶの筋肉（上腕二頭筋）は、腕でモノを保持し続けるときに大事なところなので遅筋が多いのかなと思います。

ヒラメ筋は、なぜ共通性が高いのでしょうか。この筋肉は「力カト

とスネの骨をつなぐ」役をしていますが、やることは一つしかないんですね。体重を支えること。だから、そんなに器用に動かす必要はないので、大部分が遅筋で占められているのではないかと思えます（図9）。

図10 速筋と遅筋の関係？



速筋を支える速筋系  
ついでに手伝う遅筋系

いま私が考えているのは、速筋がスキルを支え、遅筋がそれを補完的に手伝うというメカニズムになっているんじゃないかな、ということです（図10）。

器用な速筋は、動作する際の主

要な力も出しますし、運動の方向（どの方向に筋肉を伸縮させるか）を決定します。運動のスキルを支えているわけです。

一方、遅筋は、ミトコンドリアで乳酸を利用してエネルギーをつくりますが、速筋が決めた方向に力を補っているのではないかと思います。少ない力でも、正しい方向にうまく合わせれば大きな力にすることが出来ます。

例えば、1000m走は速筋だけが使われるかという決してそんなことはなく、全部動いているんですね。ただ、速筋が使われる割合が高いということ。短距離走でも、ハイピッチのスプリントではやや遅い筋繊維群も一緒にお手伝いしているのです。

昔は、「マラソンは遅筋だけで走っているんだよ」という考え方が求められる現在は、速筋も重要なんです。

ということを見ると、スリー・バイ・スリーシステムは、実にうまくできている仕組みではないかと思えます。