

## 5 馬にみられる病気

### 競走馬の筋組織と筋疾患 その2

軽種馬育成調教センター 調査役 吉原 豊彦

前号では、競走馬の筋肉に関する基本的な事柄について解説しました。今号では、その続きとして骨格筋の組成と分類、筋におけるエネルギー供給機構および運動による筋の変化について取り上げます。

#### 1 . 骨格筋の組成と分類について

動物の骨格筋は、外観の色調により赤筋と白筋に分けられることが17世紀にすでに報告されています。この古典的分類である赤筋と白筋という呼称は、主に筋細胞中に含まれるミオグロブリン（筋ヘモグロビンとも呼ばれる）という筋色素の量的な差による色調の違いをもとに判別されたものです。筋は血液中のヘモグロビンと同じように赤い色をしており、その量が多い場合には血液のように赤いことから赤筋と呼ばれ、反対に少なければ白っぽく見えるため白筋と呼ばれます。これはマグロの刺身の赤身やヒラメのような白身の魚の切り身を思い浮かべればお分かりいただけると思います。

赤筋と白筋は、別名としてそれぞれ遅筋線維（Type 線維または slow-twitch fiber : ST 線維）および速筋線維（Type 線維または fast-twitch fiber : FT 線維）と呼ばれます。

筋を観察してみると、各々の筋ごとに赤筋と白筋が明確に分かれているわけではありません。骨格筋組織を構成する筋線維は均一ではなく、その断面をみると性質の異なる線維がモザイク状に分布しています（図1）。また、一つの筋肉内でも筋の表層部には白筋が多く、深層部には赤筋が多い傾向があるといわれています。

#### 1 . 馬の骨格筋線維のタイプ分類

動物種によって走りや動きの速いものや遅いものがあり、骨格筋の構造や機能は異なると考えられますが、ここでは主に馬の骨格筋線維の特性について説明します。

これまで人や動物の骨格筋線維タイプの分類には、形態学的、組織化学的、生理学および生化学的方法などが用いられています。形態学的方法では、肉眼的にみた色調や顕微鏡観察による微細構造の相違によってタイプが分類されます。組織化学的方法は、染色により酵素の多少を判別する方法で、広く酵素組織化学的染色を用いています。生理学的方法は、収縮特性および疲労に対する抵抗性の相違により筋線維を分類します。また、生化学的方法は、酵素活性や基質の量の多寡で分類するものです。実際、最もよく用いられているのは、組織化学的方法です。

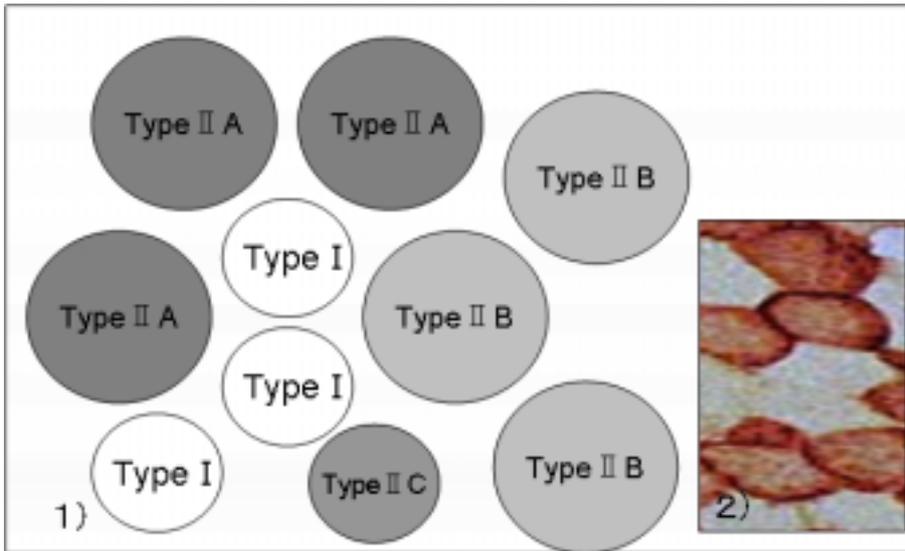


図1 骨格筋線維の分類の模式図(1)と組織化学的染色像(2)

1) 図で、Type I : 遅筋線維、Type II : 速筋線維 Type II はさらに A, B および C に区別される。Type I と Type II A および B のそれぞれは、約 1/3 の割合で分布しており、Type II C はわずかである

前にも述べましたが筋線維は大きく遅筋線維 (Type I 線維) と速筋線維 (Type II 線維) の2種類に分類されますが、速筋線維はさらにサブタイプとして、Type II A および Type II B 線維に分けられ、Type II C 線維を加えることもあります。この筋分類では ATP (adenosine triphosphate : アデノシン三リン酸) 加水分解酵素 (ミオシン ATPase) 染色が用いられ、異なる pH で処理すると異なる反応性を示すことが分かり、Type I 線維は、低い pH の範囲で組織化学的に同定されたミオシン ATPase の消失に対する抵抗性にもとづいて Type II A、Type II B および Type II C のサブタイプに分けられ、ミオシン ATPase 活性と筋の収縮速度の間に高い相関があることが示されました。また、ミオシン ATPase 染色に加え解糖系や酸化系酵素活性などを反映した染色による分類では、SO (slow-twitch, oxidative) 線維、FOG (fast-twitch, oxidative, glycolytic) 線維および FG (fast-twitch, glycolytic) 線維に分類され用いられています。研究者により方法に相違があり、分類や用語も異なるため、それらを整理しました (表1)。

表1 骨格筋線維の分類

分類			報告者	
赤筋	白筋		Lorenzini(1678)	
Type I 線維	Type II 線維		Dubowitz ら(1960)	
遅筋(ST)線維	Type II A	Type II B	Brooks ら(1970)	
遅筋(ST)線維	速筋(FT)線維		Gollnick ら(1972)	
SO線維	FOG線維	FG線維	Peter ら(1972)	
ST線維	FTH線維	FT線維	Lindholm ら(1974)	
遅筋(ST)線維	速筋(FTa)線維	速筋(FTb)線維	速筋(FTc)線維	Saltin ら(1977)
Type I 線維	Type II A 線維	Type II B 線維	Snow ら(1994)	
Type II 線維	Type II A 線維	Type II B 線維	Type II X 線維	DelGaudio ら(1995)

遅筋線維 (Type 線維) は収縮速度が遅いため、スピードに乏しいものの持久力に優れており、速筋線維 (Type 線維) は収縮速度が速くパワーの発揮に向いていますが、持久力に乏しいことが知られています。Type 線維はさらに前述の Type A、B および C のサブタイプに区分されますが、ほとんどがタイプ A とタイプ B で占められます。タイプ IIA 線維はスピードと持久力を兼ね備えたオールマイティーな筋線維ですが、タイプ IIB 線維はスピードに富むものの持久力に乏しいという特徴があります (表 2)。

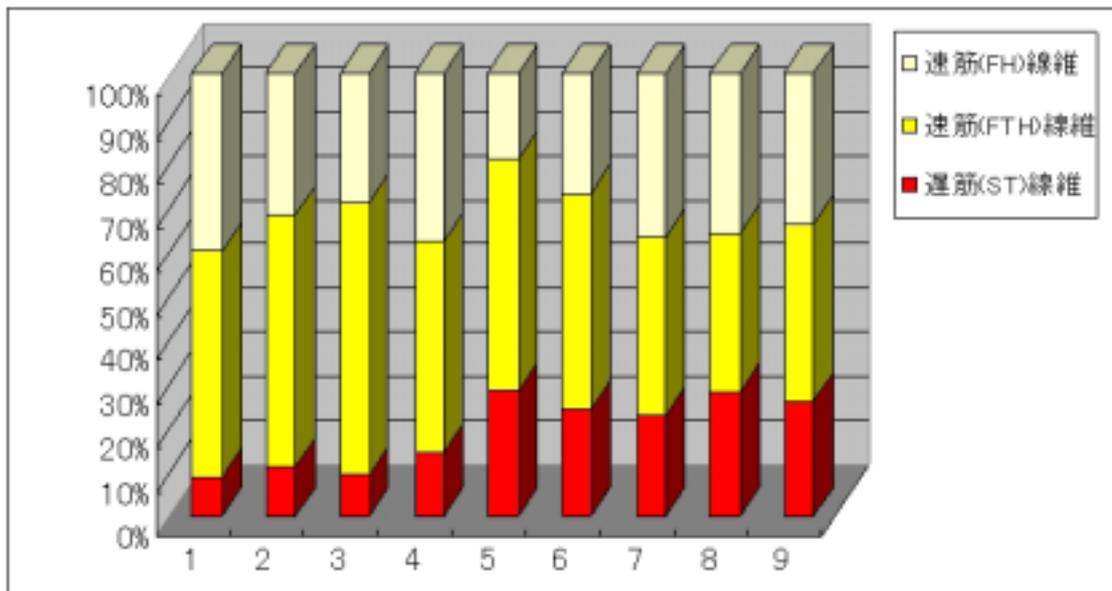
馬の骨格筋線維の分類に関する最初の報告は、スウェーデンの研究者 (Lindholm, A. ら 1974) によって行われました。スタンダードブレッド種の繋駕速歩馬の中臀筋から非常に小さな筋肉片を採取し、様々な酵素染色を行い、筋線維を ST (slow twitch) 線維、FTH (fast twitch and high oxidative) 線維および FT (fast twitch) 線維の 3 種類に分類しました。これは、その前に実験小動物の筋肉で調べられた分類 (Peter ら 1972) のそれぞれ SO 線維、FOG 線維および FG 線維に相当するといわれています。その後も馬の筋線維の分類に関する研究は進められており、最近ではミオシン ATPase の反応を用いた Type 線維、Type A および Type B 線維という分類が多く用いられています。

表 2 各筋線維の持つ特徴

項目	遅筋線維 (ST, SO 線維)	速筋線維 (FT 線維)	
		FOG 線維	FG 線維
収縮速度	遅い	速い	速い
収縮力	弱い	強い	強い
線維の太さ	細い	中等度	太い
毛細血管の密度	高い	高い	低い
疲労性	疲労しにくい	やや疲労しやすい	疲労しやすい
有酸素運動能	高い	中等度	低い
特徴	ゆっくりした反応だが持久力がある	比較的速い反応でパワーも大きく、訓練で持久力を増す	瞬間的に速く大きなパワーを発生するが、持久力なし

## 2. 馬の品種や性別による骨格筋線維組成

一般に、馬は速筋線維の比率が高い (70 ~ 90%) 動物として知られています。馬の中でもスピードを要求される品種ほど速筋線維の比率が高く、持久力を必要とする品種では遅筋線維の比率が高くなっています。言い換えますと、速筋線維の比率と走能力には一定の関係が認められているようです。短距離走を行うクォーターホースでは速筋線維が非常に多い (90% 以上) のに対して遅筋線維が少なく、無酸素エネルギーの供給機構の働きが大きいといえます。スピードのみならず長距離を走り持久力も求められるサラブレッドでは、遅筋線維も増加しており、無酸素エネルギーのみならず有酸素エネルギー供給への依存も大きいことを示しています (図 2)。



注) 1:クォーターホース、2:サブレット、3:サブレット、4:アラブ、5:シェットランドポニー、6:スタッドブレッド、7:ポニー、8:ハター、9:叭

図2 馬の品種別による骨格筋線維組成  
速く走る馬の種類は速筋の比率が高い傾向にある

性別と筋線維の組成に関しては、Type 線維の割合には性別による差はありませんが、牝馬に比べ牡馬のほうがType Bに対するType Aの割合が高いことが報告されています。

## 2. 運動における筋のエネルギー供給の仕組み

自動車はエンジンが原動力となって動きますが、馬ではそれに相当するものは筋肉で、筋肉が動くことによって初めて走るすることができます。そのエネルギー源として、自動車の場合はガソリンですが、馬の場合にはガソリンに相当するものが体内や筋肉内にあります。それが前出の ATP (アデノシン三リン酸) で、これは微量ですが筋肉内に貯蔵されている高エネルギー化合物です。ATP は生体内で生合成、筋収縮、能動輸送など多彩なエネルギー要求反応に用いられていますが、ここでは、骨格筋の運動におけるエネルギー供給機構について説明します。

筋運動において、利用されるエネルギーは、運動の強度やそのときに使われる筋線維の種類によって異なります。前にも述べたように、骨格筋には収縮速度の速い速筋線維と収縮速度の遅い遅筋線維があります。速筋線維は、ADP (アデノシン二リン酸) を ATP に再合成する過程でクレアチンリン酸 (CP) や筋肉内に貯蔵されている筋グリコーゲンが無酸素的に分解して乳酸を産生し、短時間で高い強度の運動に使われます。一方、遅筋線維は、血液からグルコースの供給を受けて、十分な酸素の存在下でグルコースや筋グリコーゲンおよび脂肪などを燃焼するので、強度の低い持続的有酸素運動に用いられます。一方、短時間に大きなエネルギーを使う短距離走のような強い筋収縮が必要な運動では、無酸素系の速筋線維が使われ、時間の長い長距離走では有酸素系の遅筋線維が使われてエネルギーが消費されます。

筋肉を使った様々な運動でも、運動の時間やそこで行われる運動の強度によって、使われるエネルギー供給機構が異なります。皆さん経験があると思いますが、短距離全力走のように速度が速いため長時間持続できない運動（無酸素運動）と、ジョギングのように速度が遅く酸素が十分に供給される運動（有酸素運動）とではエネルギー供給が異なるというわけです。筋におけるエネルギー供給機構は少し細かい話になりますが、次の3通りに区別することができます。

筋肉運動のエネルギー源となる ATP は、アデノシンにリン酸基が3つ結合しており、酵素の働きによって ATP が加水分解されるとリン酸基が一つはずれて ADP になり、その際にエネルギーが放出されます。このエネルギーを使って筋収縮が行われます。ATP は筋線維の中にはわずかな量しか蓄えられていないため、非常に激しい運動を行うと短時間（8秒程度）で枯渇します。したがって、運動を長時間続けるためには、ADP から ATP を再合成して供給し続ける必要があるわけです。このような仕組みをエネルギー産生機構と呼んでいます。その詳細は、酸素を必要としない無酸素性エネルギー産生機構と酸素を必要とする有酸素性エネルギー産生機構の2つに大別され、前者はさらに非乳酸性機構と乳酸性機構に分かれています（図3）。

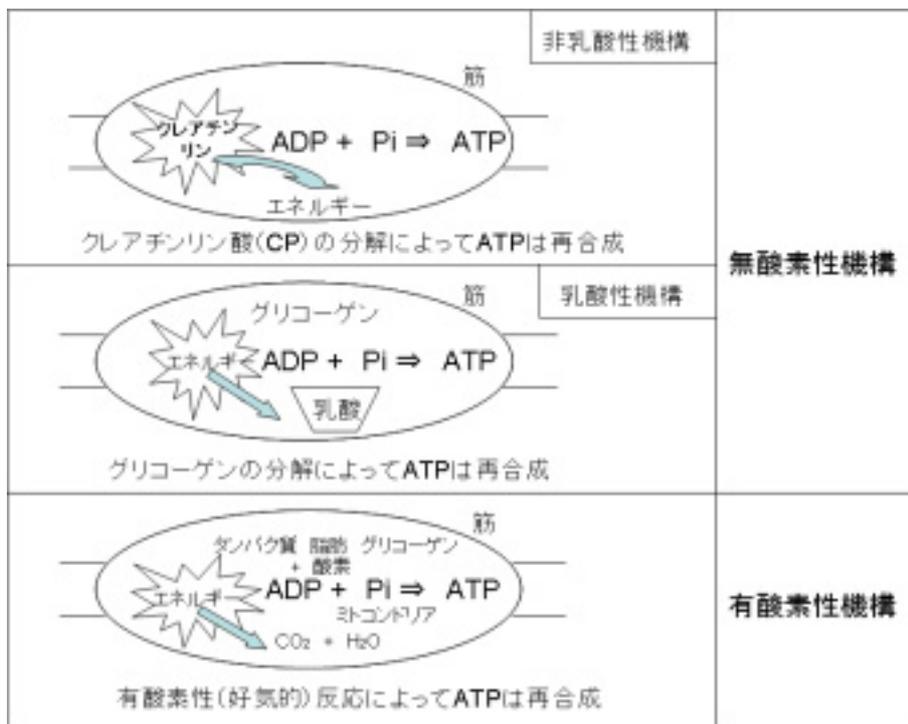


図3 筋におけるエネルギー供給機構（模式図）

運動時間が30秒未満の全力運動では大部分が無酸素的エネルギー、2分間程度の激しい運動では無酸素と有酸素的エネルギーの供給が半々くらいです。さらに長い10分間の運動では無酸素的エネルギー供給は約15%ですが、もっと運動時間が長くなればどんどん有酸素的エネルギーの比率が増えて、やがて大部分が有酸素的エネルギー供給になります。有酸素パワーでは、長時間運動が可能です。

なお、有酸素とか無酸素運動というと、運動中に息を吸ったり吐いたりすることや、息を止めることと誤解されやすいのですが、筋運動のエネルギー代謝の過程に酸素を必要と

するかしないかということです。

## 1．無酸素運動におけるエネルギー供給機構

### 1) 非乳酸性機構

強い運動では無酸素性エネルギーが使われ、クレアチンリン酸 (CP) がクレアチンと無機リンに分解され、その時出るエネルギーを使い、ADP は ATP に合成されます。速度の速い瞬発的な運動に適したエネルギー変換であり、乳酸の発生はありません。

### 2) 乳酸性機構

筋肉中のグリコーゲンが ATP 再合成のため嫌氣的に乳酸にまで分解され蓄積します。これによる全力運動では約 30 秒間でエネルギーは枯渇します。通常、筋肉中に生じた乳酸は絶えず分解除去されるため多量に蓄積されることは少ないのですが、運動強度が大きいと蓄積と分解のバランスが崩れ、筋肉中に乳酸が多量に蓄積されてしまいます。このバランスが保たれるまでの運動強度では持続運動が可能となります。ここでの乳酸の処理能力を高めることは持久力の向上につながると考えられます。

## 2．有酸素運動におけるエネルギー供給機構

血液中のヘモグロビンによって運搬される酸素を使い TCA (Tricarboxylic acid: クエン酸) サイクルによる好氣的な反応です。TCA サイクルとは、発見者の名前を取ってクレブス回路とも呼ばれます。そのサイクルのシステムをみると、体内の脂肪は糖やアミノ酸や脂肪などに分解され、細胞内でピルビン酸となってクエン酸回路へ取り込まれ、さらにさまざまな酸に変化し、最終的には炭酸ガスと水になりますが、その際にエネルギーが産生されます。エネルギー源となる糖質や脂質が体内に豊富にあり、酸素を十分に取り込むことが可能であれば長時間運動を続けることができます。筋パワーの発生は弱く瞬発力に欠けますが、持久力に富んでいるという特徴があります。

骨格筋を使った運動では、運動強度やその持続時間などの条件および馬体の状態により、筋におけるエネルギー供給機能が働きますが、3 つある機構にはそれぞれ特徴があり、短距離全力走あるいは長距離持久走など様々な運動形態に対応してエネルギー供給機構が切り替わって働いていることが理解いただけたいと思います。

運動後は ATP、CP を平常のレベルに回復させるため、また筋肉内に貯まった乳酸をすみやかに分解除去するために酸素が必要になります。そのため、運動後に十分な量の酸素が摂取できるように、時間をかけてクーリングダウンを行うことが馬体の健康に有益であると思います。

## 3．運動が骨格筋に及ぼす変化

骨格筋は運動に対応して変化します。規則正しい適度な運動は、筋の緊張をほぐし、心肺機能を高め、精神的にも気分がそう快になり、結果として疲労しにくくなります。しかし、全く筋肉を使わないでいると、筋はだんだんと細くなりやがて**廃用性萎縮** (disuse

atrophy：非活動性萎縮、無為萎縮）に陥り筋肉はやせ細ってきます。逆に、運動することにより筋は太くなりますが、これを筋肥大といいます。筋肥大は、大きな負荷をかけて筋を収縮するというような筋力トレーニングにより亢進します。このタイプのトレーニングは各筋線維内の筋原線維数を増やします。筋線維の数は変化しませんが、筋原線維の数が非常に増加して結果的に筋の太さが増すというわけです。

通常、持久力トレーニングすなわちエアロビクス（有酸素）運動では筋肥大を起こしません。この場合、筋の大きさは増さず、筋肉内の血管数を増やします。その結果、血流量は増大し、運動中の筋に酸素とグリコーゲンが効率よく供給されます。エアロビクストレーニングでは筋線維内のミトコンドリア数も増えます。これによりエネルギー源としてのATPがより多く産生されます。

一般に、遅筋線維（Type 線維）と速筋線維（Type 線維）の比率は遺伝で決まっています。動物実験では、持久的トレーニングを長期間持続すると速筋線維が遅筋線維に転換することが示されています。さらに、Type 線維の中でも Type A および B は、運動や環境の影響で変化することが明らかにされています。

今号では筋肉に関する基本的なことについて解説しました。次号以降では、運動に伴って発生する筋疲労や筋疾患などについて説明したいと思います。