

## 4 馬にみられる病気

### 競走馬の筋組織と筋疾患 その3

軽種馬育成調教センター 調査役 吉原 豊彦

これまで競走馬の筋肉に関する基本的な事柄について2回にわたり解説し、筋肉がどのようなものかお分かりいただけたと思います。今号では、馬が運動することによって生じる骨格筋の疲労について解説します。

#### 1 . 骨格筋と運動による筋疲労

皆さんは短距離の全力疾走や長距離マラソンなどの様々な運動を行った際、筋痛を起こした経験があることと思います。運動により筋細胞が休むことなく繰り返し刺激されると筋の収縮力は低下し、筋疲労を起こします。激しい運動が繰り返されると筋の収縮力はどんどん低下していき、最終的に筋は収縮能を消失してしまいます(図1)。例年1月2・3日に開催される恒例の箱根駅伝(正式名は東京箱根間往復大学駅伝競走です)では、順調に走っていた選手が筋疲労により突然走ることができなくなり、倒れこむ光景を目にすることがあります。これには、様々な原因の中で脚の筋肉が収縮能を失ってしまったことによるものがあると思われます。

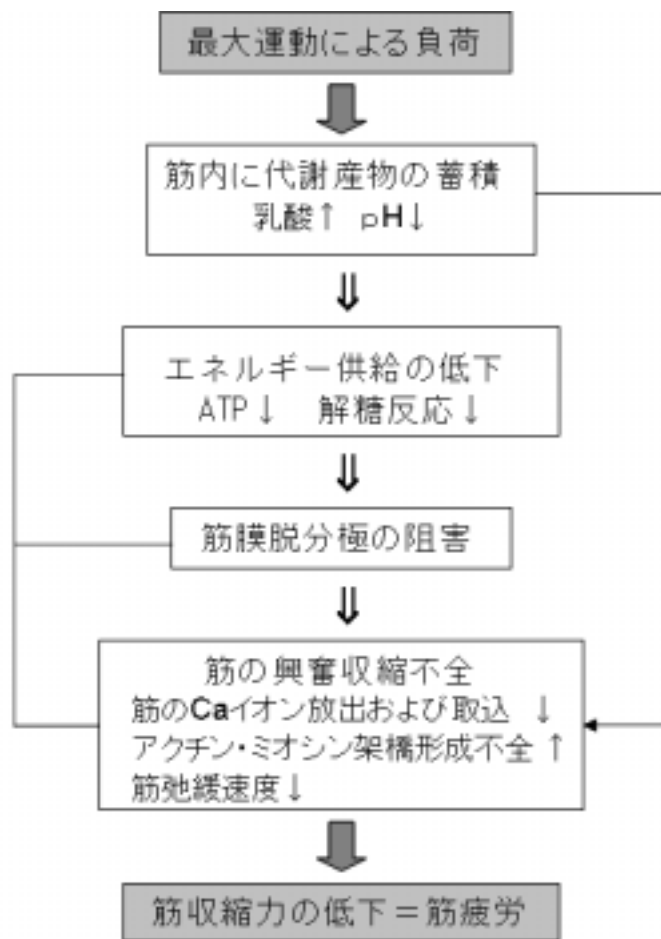


図1 最大運動時の筋疲労の相互関係（模式図）

競走馬は優れた運動能力を持っていますが、激しい運動を持続するとついには疲労し、運動能力は低下します。筋疲労は要求された運動を継続することができなくなる状態をいいます。筋疲労の誘因としては中枢性と末梢性によるものがあると考えられますが、馬の場合は疲れたという自覚症状を表現することができないため、中枢性疲労の評価は困難であることから、末梢性疲労として筋疲労に限って検討されてきました。生理的限界に迫る運動を余儀なくされる競走馬にとって、疲労は重要な問題です。

馬や人が運動を続ければ筋疲労を起こすことから、筋の疲労に関する研究は数多くありますが、疲労そのものが科学的にあいまいで定義も明確でなく、その本態は不明な点が少なくありません。ここでは、疲労についてこれまでに明らかにされていることについて概略を説明します。

## 1．疲労の分類

疲労に関しては様々な角度から検討されており、疲労は、1) 肉体的疲労と精神的疲労、2) 全身性疲労と局所性疲労、3) 急性疲労と慢性疲労、4) 中枢性疲労と末梢性疲労、5) 生理的疲労と病的疲労などに分類することができます。ここでは筋肉に関する疲労が中心ですので、幅広い疲労についての詳細は省略します。

## 2．疲労の原因

疲労の原因には様々な説があります。主なものは、1) 疲労物質蓄積説、2) エネルギー源枯渇説、3) 中枢神経機能消失説、4) 内分泌機能消失説、5) 物理化学的変調説などです。そこで、これらの説について少し説明を加えたいと思います。

### 1) 疲労物質蓄積説

疲労物質として以前から主に乳酸が考えられてきました。特に無酸素運動において、筋疲労の程度と乳酸の蓄積に相関があることが明らかにされています。しかし、有酸素運動では乳酸が蓄積しなくても疲労が出現するので、乳酸測定が疲労の最適な指標にはなりません。しかも有酸素運動では乳酸はグリコーゲンに再合成されて再度エネルギー源として利用されます。乳酸以外の疲労関連物質にはケトン体、血糖、CPK (Creatine phosphokinase: クレアチンホスホキナーゼ) および尿蛋白などが知られています。なお、CPKは筋肉内に存在する酵素でクレアチンキナーゼ(CK)とも表現されますが、ここではCPKに統一して表示します。

### 2) エネルギー源枯渇説

エネルギー源となるグリコーゲンやグルコースなどの枯渇により、疲労するという考え方は、糖分が不足すると早く疲労することは明らかですが、無酸素運動で疲労の極限に達してもエネルギー源となる糖分や脂肪は生体に残っており、いくらエネルギーを供給しても運動を長時間続けていると疲労してくるため、これだけで疲労を説明するには無理があります。

### 3) 中枢神経機能消失説

筋運動は中枢神経系と密接な関係があり、疲れてくると脳の機能が低下し、反射に対する反応時間や感受性が低下する現象がみられるため、この説が提唱されるようになりました。

### 4) 内分泌機能消失説

生体は内分泌機能によって恒常性が保たれていますが、強いストレスを受けるとホルモン系に影響が及ぶことにより適応のバランスが崩れ、機能低下が生じることから疲労の原因となります。

### 5) 物理化学的変調説

様々な物理化学的変調 (pH、浸透圧、イオン濃度、水分・タンパク質濃度などの変化) が疲労の誘引となるという考え方は、激しい運動により産生された炭酸ガスの排泄が不十分なことにより生じる呼吸性アシドーシスでは疲労を起こします。

## 3. 運動単位活動の変化と筋疲労

本誌 78 号でもすでに説明しましたが、筋肉はたくさんの筋線維が集合してできており、その筋線維に運動の命令を伝えるのが運動ニューロンと呼ばれる神経です。1本の運動ニューロンはその支配下にある数十から数百本からなる筋線維群によって構成されています (図 2)。そしてそれぞれの枝は1本ずつの筋線維を支配し、数本から数百本の筋線維をまとめて同時に収縮させます。粗雑な動きをする筋は、1本の運動ニューロンが支配する筋線維の数が多く、繊細な運動をする筋は1本の運動ニューロンが支配する筋線維数が少なくなっています。1本の運動ニューロンと、それに支配される筋線維の集団を生理学用語で運動単位 (motor unit) と呼び、これは筋の収縮を起こすための最小機能単位です。正

常な状態では、ひとたび運動ニューロンが興奮すれば、その支配下の筋線維すべてが必ず興奮・収縮することと、個々の筋線維が単一の運動ニューロンによって支配されることにあります。この運動ニューロンと筋線維の切り離せない関係から**神経筋単位** (neuromuscular unit)とも呼ばれます。

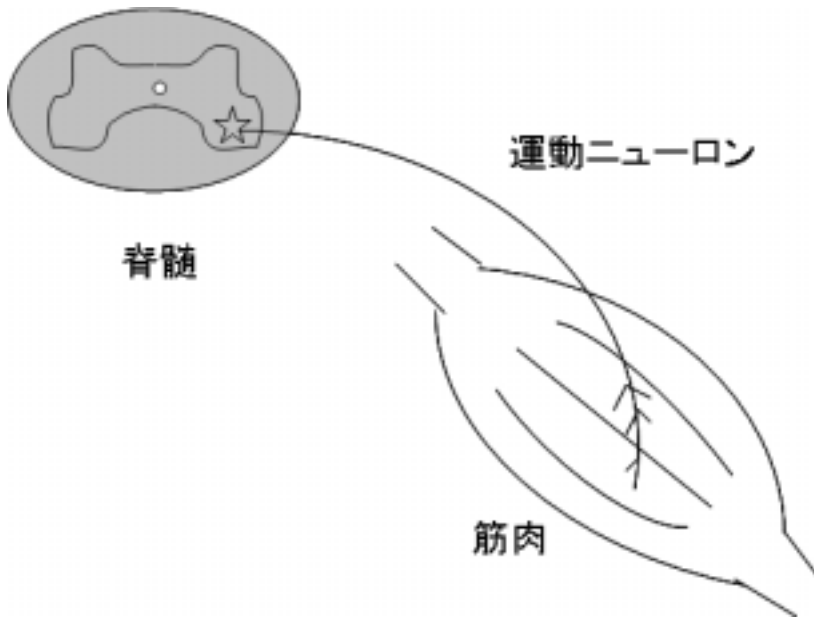


図2 中枢神経系と運動単位の模式図

運動の命令を伝える神経である運動ニューロンは、数十から数百本の筋線維を支配しています。1本の運動ニューロンとそれに支配される筋線維の集団は運動単位と呼ばれ、筋収縮の最小機能単位です。運動単位は、S型（収縮が遅くほとんど疲労しない）、FR型（収縮は速いが疲労しにくい）およびFF型（収縮が速くすぐ疲労する）の3種類があります。

運動単位には、収縮が遅く疲れにくいS型、収縮が速く疲れにくいFR型および収縮が速く疲れやすいFF型の3種類があることが明らかにされています。筋肉の収縮は、その中に含まれるたくさんの運動単位の活動の和として表れますが、これらの運動単位はすべてが同時に働いているわけではなく、活動（収縮）している運動単位と休止している運動単位があります。筋肉が収縮する際には、収縮の持続時間が長く疲れにくい運動単位から優先的に使用されます。最初にS型の運動単位が収縮し、弱い力で済むときにはS型の運動単位のみが収縮していますが、強い力が必要なときにはFR型の運動単位も収縮します。さらに強い力が必要なときにはFF型の運動単位も収縮します。収縮が弱まる際には、より疲れやすい運動単位から早く休止することが明らかになっています。疲れにくい運動単位は緩やかで持続的な収縮を行い、疲れやすい運動単位は強く短い収縮を行うとしばらく休止してしまうというわけです。

## 2 . 末梢性筋疲労について

運動時の筋疲労に関する生理学的メカニズムは複雑で、人では中枢性筋疲労が重要視されますが、動物ではその評価が難しいことから、ここでは**末梢性筋疲労**について述べます。末梢性筋疲労の発現には、エネルギー産生に必要な物質の枯渇、筋線維内の変化による工

エネルギー産生障害、筋小胞体によるカルシウムの取り込みまたは放出の変化による筋収縮力の低下、血流量の減少または筋温の過剰な上昇など多くの因子が関与していると考えられます。

安静時には筋細胞内に一定量のATP（アデノシン三リン酸）とCP（クレアチンリン酸）およびグリコーゲンが蓄えられています。最大運動時の筋疲労に関与する因子としては、ATPとCPの枯渇、乳酸の蓄積、細胞内pHの低下などがあると考えられます。最大運動時では、最初にCPが消費されて枯渇し、次いでATPが消費されてその濃度が低下します。筋細胞には代謝産物として乳酸、水素イオンなどが蓄積します。ATPが枯渇するような激しい運動時には、筋肉pHが安静時7.0前後であったものが6.4以下に低下し、さらに蓄積することにより解糖系の酵素活性を低下させ、必要量のATPの産生と供給ができなくなり、その結果として筋疲労が起こります（図1）。

運動に伴う筋収縮に必要なことから貯蔵されているATPは、運動が続けられるとだんだんと消費され、やがて枯渇してしまいます。したがって、さらに多くのATPの産生が必要になり、その産生のために酸素と栄養が急速に消費され、血流による酸素と栄養の供給能力を上回ります。酸素の供給量が低下すると筋細胞は酸素を必要としないエネルギー転換を図ります。すなわち、ここで有酸素運動から無酸素運動へ切り替わるというわけです。無酸素運動の過程では乳酸が産生され、これが運動後に起こる筋肉痛の原因となるわけです。

過度な運動を行うことにより生じる乳酸の蓄積を取り除くため、細胞内で起きる連続的な代謝増加として酸素負債があります。これによってエネルギーの枯渇が補充されます。激しい運動をして運動を止めたすぐ後に息が切れた状態になるのは、代謝に必要な酸素の負債を支払うために起こる現象です。この機構により生体は細胞のエネルギーと酸素の貯蔵を正常な状態に回復させます。

また、最大でなおかつ持久運動を行う時における筋疲労の原因としては、体液とイオン濃度バランスの変化、高体温および筋肉内の貯蔵グリコーゲンの枯渇などが考えられます。運動により産生されるエネルギーの約80%は熱で放出されるといわれています。馬は環境変化に対応する巧妙な代謝熱放散機能を持っています。しかし、運動中の発汗により大量の体液が失われ、補液しないと全水分量が減少すると同時に多量の電解質が喪失します。この体液と電解質の濃度バランスの変化により、運動能力は大きく低下することとなってしまいます。

筋肉内に貯蔵されたグリコーゲンの枯渇は、持久運動時の疲労原因であり、筋線維の筋力低下となります。運動によるグリコーゲンの枯渇は、初めは特定の筋線維に選択的に起こりますが、多くの筋線維が疲労困ぱいすると、最終的には全ての筋力の発生能力が低下し、運動強度の維持ができなくなります。