

Structure and Function of Body Systems

身体の構造と機能

N. Travis Triplett, PhD

▶ 本章を終えると

- 筋と骨の全体構造から微細構造までを説明することができる。
- 筋収縮の「滑走説」を説明することができる。
- 筋線維タイプごとの形態的・機能的特徴と、スポーツ競技との関連を説明することができる。
- 心臓血管系と呼吸器系の解剖学的、生理学的な特性について説明することができる。

著者は、本章の執筆にあたって多大な貢献をいただいた Robert T. Harris と Gary R. Hunter に対し、ここに感謝の意を表します。

身体運動やスポーツのパフォーマンスを遂行するには、効果的で目的的な身体のさまざまな動作が必要である。

このときのさまざまな動作は、さまざまな筋の活動で生産された力によって生み出され、その力は身体のさまざまな部位で形成される骨格の作用によって生産される。このような作用を起こす骨格筋は脳皮質の制御下にあり、末梢神経系の運動神経を介して骨格筋細胞や骨格筋線維を賦活させる。これら一連の神経筋の作用を継続的に維持するためには、活動している組織に継続的に酸素や栄養素を供給しながら、その一方で二酸化炭素や副産物の除去を行う心臓血管系や呼吸器系の働きが必要である。

科学的な知識を可能な限り活用して、競技者向けの効果的なトレーニングプログラムを構成するために、ストレングス&コンディショニング専門職に求められるのは、単に筋骨格系の機能だけでなく、エクササイズを行う際の筋活動を直接的に支えている心臓血管系、呼吸器系も含めた身体に備わるシステムについて理解を深めることである。こうしたことから、本章では、筋力および筋パワーの維持向上の基礎をなす筋骨格系、神経筋系、心臓血管系、呼吸器系の構造や機能について解説する。

筋骨格系

筋骨格系はヒトの身体活動に特有の、非常に多様な動作ができるようにつくられている骨、関節、筋、腱で構成される。ここでは、筋骨格系のさまざまな構成要素についてそれぞれを個別に解説するとともに、それぞれの構成要素同士がどのように関連するかについて解説する。

骨格

筋は外部の物体や地面に直接力を加えるような働

きはしない。筋の停止側の骨を引き寄せて、関節に回転を与えて運動を起こすことにより、そこで生産された力を外界に伝達するという手順を踏む。筋の機能は「引く」ことのみであり、「押す」ことはできない。しかし、骨で形成されるこの作用により、筋の「引く」力を外界の物体を引く力だけでなく押す力にも用いることができる。

個人差はあるが、一般に身体には206の骨が存在するとされている。この比較的軽量で強靱な構造が、てこ、支持、保護の機能をつくり出している(図1.1)。頭蓋骨、脊柱(C1から尾骨まで)、肋骨、胸骨により形成されるものを**体幹骨格**(体軸性骨格)と呼ぶ。肩甲帯(肩甲骨と鎖骨)、腕や手首、手部の骨(上腕骨、橈骨、尺骨、手根骨、中手骨、指節骨)、下肢帯(寛骨)、脚や足首、足部の骨(大腿骨、膝蓋骨、脛骨、腓骨、足根骨、中足骨、趾節骨)で形成されるものを**体肢骨格**と呼ぶ。

骨と骨が連結しているところを関節と呼ぶ。関節のなかでも**線維性連結**(頭蓋骨の縫合など)はほとんど関節運動を起こさない。**軟骨性連結**(椎間板など)はある程度の運動が可能である。**滑膜性連結**(肘や膝など)においてはかなり大きい可動域を持つ。スポーツ競技やエクササイズで表現される運動の大部分は滑膜性連結の部分で起こるが、その最も重要な特徴は摩擦が小さく大きな可動域を持つということである。関節をつくる骨同士の端(関節面)は滑らかな**硝子軟骨**で覆われ、関節全体は、**滑液**で満たされた関節包で包まれている。多くの関節には靭帯と軟骨による支持構造がある(13)。

事実上ほとんどすべての関節の運動は、ある点または軸を中心とした回転運動と捉えることができる。関節は、その回転軸の数によって分類される。**単軸関節**、たとえば肘関節などは、1つの回転軸で蝶番のように動く。膝関節を蝶番関節に分類する場合が少なくないが、関節の可動域内を動く際のいずれの

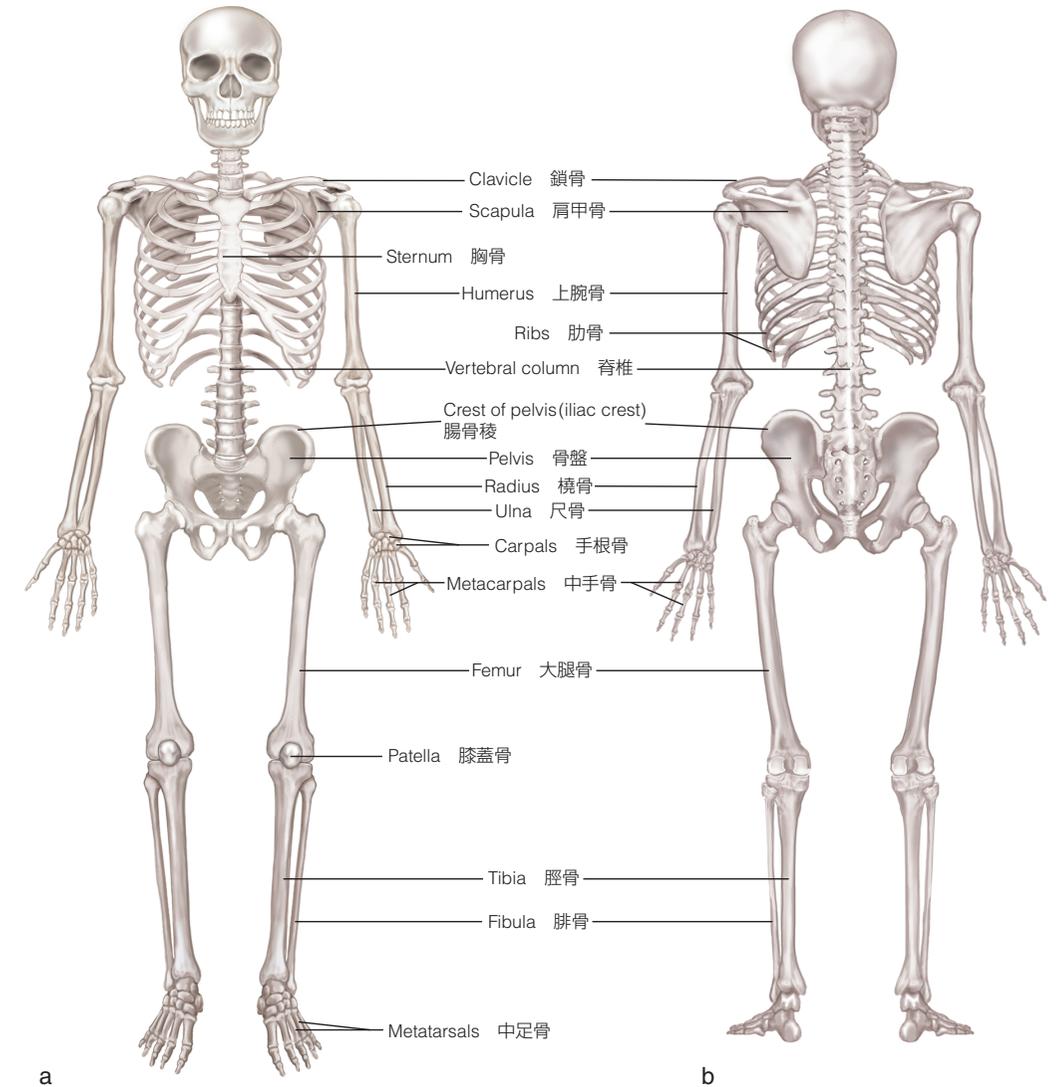


図1.1 ヒトの男性の骨格を(a)前方から見たものと、(b)後方から見たもの

局面でも運動軸が変わるため、純粋な蝶番関節とはいえない。**二軸関節**、たとえば手関節や足関節では、直交する2つの軸に沿って運動が起こる。**多軸関節**、たとえば肩関節や股関節などの球関節(臼関節)は直交する3つの軸で規定される動作平面に沿って運動が可能である。

脊柱は柔軟性のある椎間板で区切られた椎骨から成り立ち、この構造がさまざまな動作を可能にしている。脊柱は、頸部の7個の頸椎、上背部の12個の胸椎、下背部の5個の腰椎、癒合して骨盤の後部を構成する5個の仙椎、骨盤から下方に伸びた3～5個の尾椎(これは内部に残った尾の痕跡と考えられる)、の5つの部分に分けることができる。

骨格筋

骨格を動かすことを可能にしている筋群を図1.2に示した。骨と骨が連結する部分が関節であり、骨格筋の両端は関節をまたいでそれぞれの骨に付着している。このように配置されていないと、動かすことはできない。

骨格筋の全体構造と微細構造

骨格筋とは、筋組織、結合組織、神経、血管を含んだ器官である。身体に430以上ある骨格筋は、筋**外膜**と呼ばれる線維性結合組織に覆われている。筋外膜は筋の両端で腱に移行する(図1.3)。**腱**は**骨膜**(骨を覆う結合組織)に付着しているので、筋の収

成人の骨格の成長に影響を与える要因は何か？

成人の骨格によい影響を与え得ることはさまざまあるが、その多くは筋を働かせた結果によるものである。身体に高負荷がかけられたとき(肉體労働やレジスタンストレーニング)、骨の骨密度やミネラル含有量は増加する。衝撃を伴う爆発的な動作を行った場合にも同様のことが起こり得る。高強度あるいはハイパワーの発揮が求められ、強い衝撃を伴う着地が含まれる体操競技などの活動に携わっている人の間では、骨密度が高いことがよく見られる(11)。骨の適応に影響を及ぼすそれ以外の要因は、体軸性骨格に負荷がかかっているか否かと、どのくらいの頻度で負荷がかかるか、である。骨の適応期間は、骨格筋の適応期間よりも長いので、刺激の頻度や強度、種類に変化をつけることが重要である。

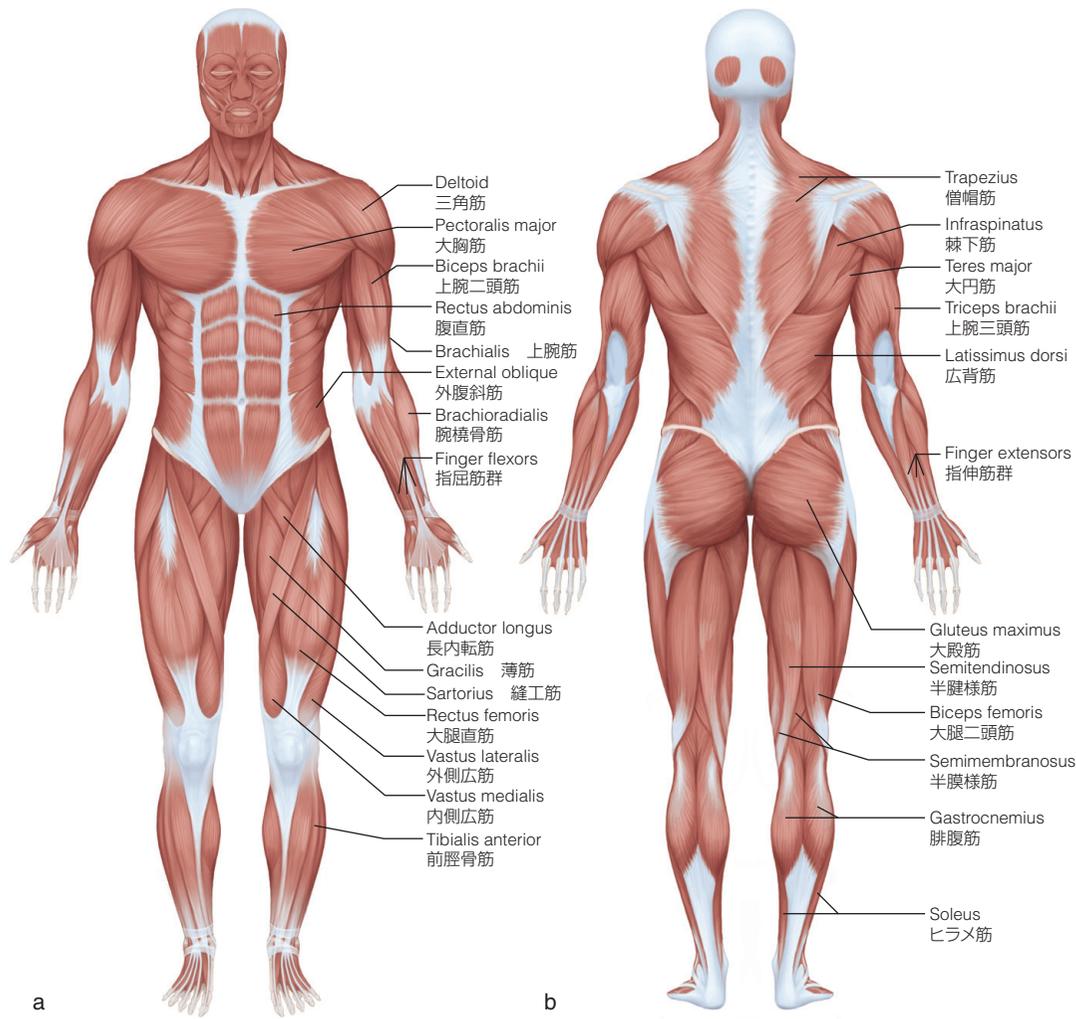


図1.2 男性の人の骨格筋系の (a) 前方から見た図、(b) 後方から見た図

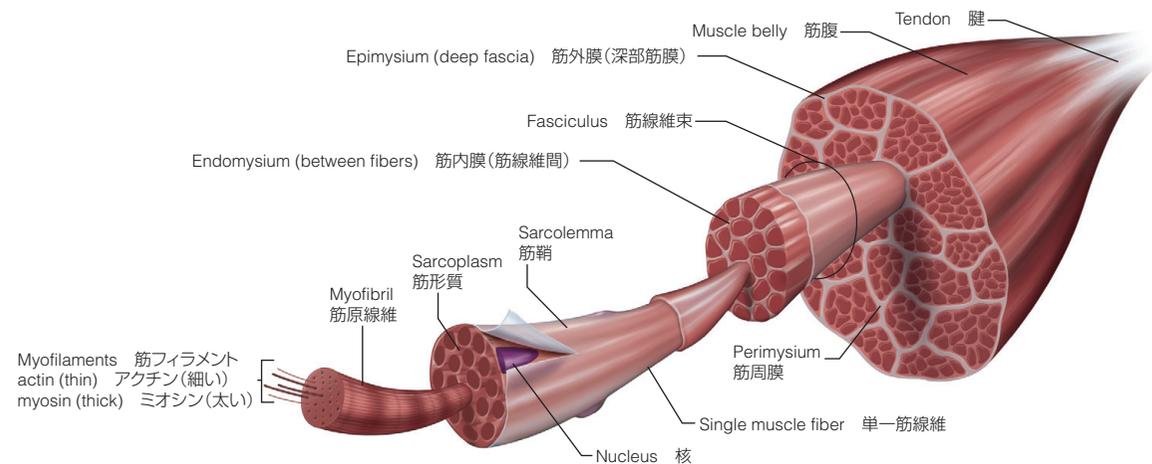


図1.3 3種類の結合組織の模式図。筋外膜（外側）、筋周膜（筋線維束という筋線維のまとまりを包む）、筋内膜（個々の筋線維を包む）

縮は腱を介して骨を引き寄せる力となる。四肢の筋が付着している2つの場所は、**近位**（体幹に近い）と**遠位**（体幹から遠い）と呼ぶ。体幹の筋が骨に付着する2カ所の部位は、**上位**（頭に近いほう）と**下位**（足に近いほう）と呼ぶ。

筋細胞の多くは、**筋線維**と呼ばれる直径50～100 μm（ヒトの髪の毛の直径程度）の長い円柱状の細胞（中には筋の全長に及ぶものも存在する）である。筋細胞の表面には多数の核が存在し、低倍率の拡大でも縞模様が観察される。筋外膜の内部では、150もの筋線維がまとまって**筋線維束**を形成し、**筋周膜**と呼ばれる結合組織に包まれている。また、個々の筋線維の周囲を結合組織性の筋内膜が包んでおり、**筋鞘**（筋線維の細胞膜）に隣接している（13）。筋外膜、筋周膜、筋内膜など、これらすべての結合組織がまとまって腱に連結することにより、個々の筋線維で発生した張力が腱に伝達されるのである（図1.3）。

運動神経（神経細胞）とその支配下にある筋線維

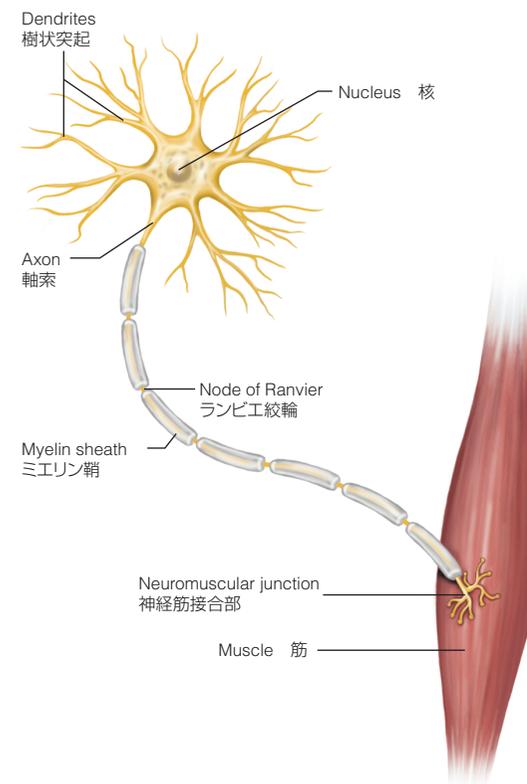


図1.4 運動単位。運動単位は、1本の運動神経とこれによって支配される筋線維で構成される。多くの場合、1つの運動単位は数百本の筋線維を支配する。

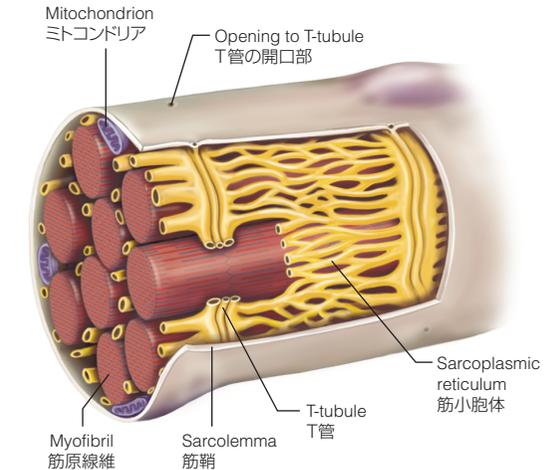


図1.5 筋線維の断面図

との接合部を、運動終板あるいは**神経筋接合部**という（図1.4）。各筋線維に存在する神経筋接合部は1カ所のみであるが、1本の運動神経は、多数の筋線維（数百あるいは数千に至る場合もある）を支配している。1本の運動神経とその神経により支配される筋線維を**運動単位**と呼ぶ。1つの運動単位に含まれる筋線維は、これを支配する神経が刺激されるとそのすべてが収縮する。

筋線維の内部構造を図1.5に示す。筋線維の細胞質である**筋形質**には、線維性タンパク質からなる収縮要素、その他のタンパク質、貯蔵グリコーゲン、脂肪粒、酵素、ミトコンドリア、筋小胞体といった特別な働きを持つ細胞小器官が含まれている。

そのうち細胞質の大部分を占めているのは数百の**筋原線維**で、直径は1 μm（髪の毛の直径の約100分の1）である。筋原線維には筋線維を収縮させる仕組みがあり、それを構成するのは主に**ミオシン**フィラメントと**アクチン**フィラメントという2種の**筋フィラメント**である。ミオシンフィラメント（太いフィラメント：直径16nm。髪の毛の直径の約1万分の1）は200個のミオシン分子で構成されている。ミオシンフィラメントは球状の頭部、ヒンジ（蝶番）部分、線維状の尾部からなる。球形の頭部がミオシンフィラメントから一定の間隔で突き出ており、この頭部が左右で**クロスブリッジ**を形成し、アクチンと相互作用する。アクチンフィラメント（細いフィラメント：直径約6 nm）は、2本の筋線維が互いに巻きつくように伸びる二重らせん構造を形成している。このミオシンフィラメントとアクチンフィラメ

Biomechanics of Resistance Exercise

レジスタンスエクササイズ の バイオメカニクス

Jeffrey M. McBride, PhD

▶ 本章を終えると

- 骨格筋の主な構成要素を明確にすることができる。
- 筋骨格系のものでこの種類を区別することができる。
- スポーツ活動中や運動中の主な解剖学的な動きを明確にすることができる。
- 並進運動と回転運動における仕事とパワーを算出することができる。
- 人間の筋力とパワーに関連する諸要素について説明することができる。
- トレーニング機器の抵抗とパワーのパターンの違いを評価することができる。
- 運動時の関節のバイオメカニクスの重要な要素について示すことができる。

著者は、本章の執筆にあたって多大な貢献をいただいた Everett Harman に対し、ここに感謝の意を表します。

バイオメカニクスの知識は、スポーツや運動を含めた身体の動きを理解するうえで重要である。**バイオメカニクス**は、筋骨格系の構成要素が相互作用して動きを生み出すメカニズムを考えるものである。どのように身体の動作が起こり、動作において筋骨格系にどのようにストレスが加わるかについて洞察を持っていることで、より安全で効果的なレジスタンストレーニングのプログラムをデザインすることができる。

本章では、最初に骨格筋と身体のマカニクス（力学）について概略を述べる。次に筋力およびパワーの発揮に関連するバイオメカニクスの原理について解説する。そして、トレーニング機器の抵抗として用いられる重力や慣性、摩擦、流体抵抗、弾性などの特性について述べ、その後、肩、腰、膝を中心に、レジスタンストレーニング時の関節のバイオメカニクスを解説する。

骨格筋

動作を起こしたり、外部の物体に力を伝えたりするうえで、骨格筋の両端が結合組織を介して骨に付着していることが必要となる。解剖学上の本来の定義としては、**近位**（身体の中心に近い側）の付着部を**起始**とし、**遠位**（身体の中心から遠い側）の付着部を**停止**としている。動きの小さい側の付着部を起始、大きい側を停止とする定義もあるが、この定義では起始と停止が逆になることがあり、混乱を招く可能性がある。腸骨筋を例にとると、ストレートレッグ・シットアップでは、動きの小さい大腿骨側が起始となり、動きの大きい骨盤側が停止となる。ところがレッグレイズでは、骨盤は動かないため、骨盤への付着部が起始となり、動きの起こる大腿骨側が停止となる。これと比べて本来の定義では起始、停止が一貫している。

筋が骨に付着する方法は様々である。**筋性付着**は筋の起始に多くみられ、筋線維が直接広範囲の骨に付着して、力が分散されやすい構造となっている。**線維性付着**は、腱などが混じり合うようにして、筋鞘と骨を取り巻く結合組織の両方をつないでいる。骨自体にも線維が伸びており、結合をより強固なものにしている。

身体のあらゆる運動において、実質的に複数の筋

の動作が関与するが、ある動きについて、最も直接的に動作を起こす筋を**主働筋**と呼び、その動作速度を緩めたり止めたりする筋を**拮抗筋**と呼ぶ。拮抗筋は、関節を安定させたり、素早い動作の最後に四肢を止めるのを助けたりする働きをしており、これによって関節構造（靭帯や軟骨による**軟骨性連結**)を保護している。たとえば投動作では、上腕三頭筋が主働筋として働き、肘を伸展させて、ボールを加速する。肘が完全な伸展に近づくにつれて、上腕二頭筋が拮抗筋として肘の伸展を遅くして動きを止めるように働き、これによって肘の構造を内的な衝撃から保護する。

ある関節運動において、動作を間接的に補助する筋を**協働筋**という。たとえば肩甲骨を安定させる筋は、上腕の動作中に協働筋として作用する。協働筋が働かない場合、上腕の運動を起こす筋の多くは肩甲骨に起始を持つため、効率的に作用できない。また、2つの関節をまたいでいる筋（二関節筋）が主働筋である場合に、身体の動きをコントロールするのも協働筋の作用である。たとえば、大腿直筋は股関節と膝関節をまたいでおり、収縮することで股関節の屈曲と膝関節の伸展を担う二関節筋である。深くしゃがみ込んだ状態から立ち上がる時には、股関節の伸展と膝関節の伸展が行われる。体幹を前傾させずに立ち上がろうとすると、大腿直筋が収縮して膝伸展に作用すると、同時に股関節の屈曲にも作用するため、これを打ち消すために大殿筋などの股関節伸筋が協働筋として収縮する必要がある。

筋骨格系のでこ

身体には、顔、舌、心臓、血管平滑筋、括約筋などでこを通じた作用をしない筋も多数あるが、スポーツ競技や運動に直接関わる身体運動は、主に骨格によるてこを通じて起こる。そういった身体の動作がどのように起こるかを理解するには、てこについての基本的な知識が必要である。基本用語の定義を以下に示す。

第一種のでこ——筋力と抗力が支点をはさんで反対側に作用するてこ（図2.2）。

支点——てこの軸となる点。

てこ——剛体または半剛体でできている物体で、力（作用線が支点を通らない）が加えられた際に、

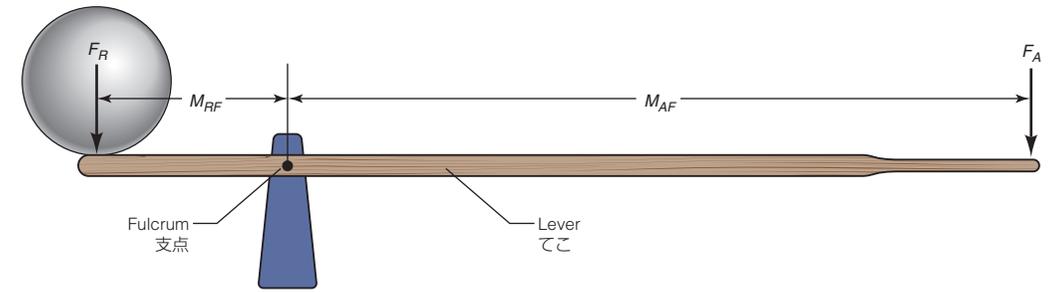


図2.1 てこ。てこは、ある一点に加えられた力のうち、回転弧の接線方向の分力を反対側へと伝達する。 F_A = てこに加えられた力。 M_{AF} = 加えられた力のモーメントアーム。 F_R = てこの回転に対する抗力。 M_{RF} = 抗力のモーメントアーム。てこがつりあった状態では、物体に対して加えられた力は、 F_R と等しく、方向は反対となっている。

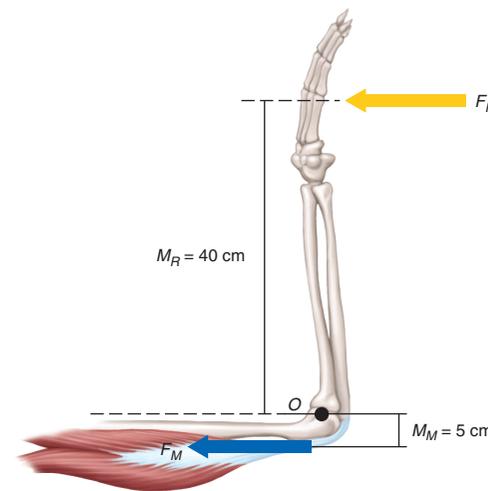


図2.2 第一種のでこ（前腕）。抵抗に対して肘を伸展している（例：トライセップスエクステンション）。O = 支点。 F_M = 筋力。 F_R = 抗力。 M_M = 筋力のモーメントアーム。 M_R = 抗力のモーメントアーム。力学的有効性 = $M_M/M_R = 5\text{cm}/40\text{cm} = 0.125$ であり、1.0より小さいため、一般的には不利な条件である。

回転を妨げるような物体に対して力を発揮するように働く（図2.1）。

力学的有効性——てこに加えられた力のモーメントアームと、抗力のモーメントアームの比（図2.1）。加えられた力のトルクと抗力のトルクとが釣り合うためには、「筋力×筋力のモーメントアーム」が「抗力×抗力のモーメントアーム」と等しくなければならない。力学的有効性が1.0を超えていれば、抗力より小さい筋力で等しいトルクが生み出せることになる。逆に力学的有効性が1.0未満の場合、存在する抗力よりもより大きい力（筋力の発揮）が必要となることを示しており、筋肉にとっては明らかに不利である。

モーメントアーム（またはフォースアーム、レバーアーム、トルクアーム）：——支点から力の作用線までの垂直距離。作用線とは、力の作用点を通り、力の発揮されている方向に無限にのびる直線をいう。

筋の張力——生化学的な活動（筋収縮）、あるいは非収縮性組織が伸張されることにより生み出され、筋の両端を互いに引き寄せようとする力。

抗力——身体の外外部で発生し、筋の張力と逆に作用する力（例：重力や慣性、摩擦）。

第二種のでこ——筋力と抗力が支点からみて同じ側に作用し、筋力のモーメントアームのほうが長いてこ。ふくらはぎの筋を作用させて背伸びをする動作がその例であり、母趾球が支点となる（図2.3）。筋力のモーメントアームのほうが長く力学的有効性が高いため、発揮する筋力は抗力（つまり体重）以下でよい。

第三種のでこ——筋力と抗力が支点からみて同じ側に作用し、筋力のモーメントアームのほうが短いてこ（図2.4）。力学的有効性は1.0未満で、そのため、抗力のトルクと等しいトルクを生み出すために、抗力以上の筋力の発揮が必要となる。

トルク（またはモーメント）——支点を中心として物体を回転させようとする力の大きさ。モーメントアームの長さ×力の大きさの積と定義されている。

図2.2は、第一種のでこを示している。なぜなら、筋力と抗力が支点をはさんで反対側に作用するからである。アイソメトリック（等尺性）あるいは一定のスピードの関節運動中は、 $F_M \times M_R = F_R \times M_M$ である。 M_M は M_R より小さいため、 F_M は F_R よりも大きくな

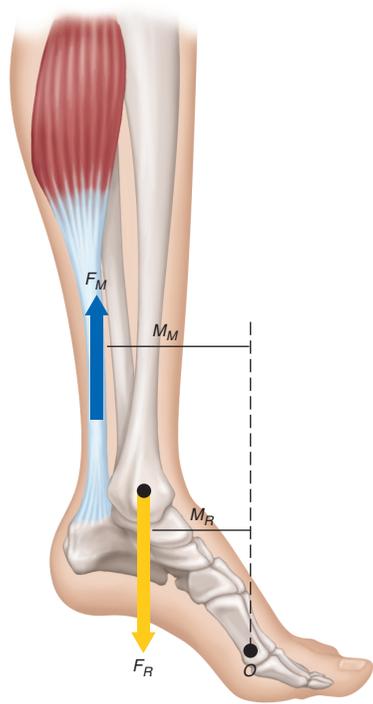


図2.3 第二種のとこ（足部）。抵抗に対して足関節を底屈している（例：スタンディング・ヒールレイズ）。 F_M ＝筋力。 F_R ＝抗力。 M_M ＝筋力のモーメントアーム。 M_R ＝抗力のモーメントアーム。身体を挙上する際、母指球が足部の回転の中心となり、支点（O）となる。 M_M は M_R より大きいため、 F_M は F_R よりも小さくなる。

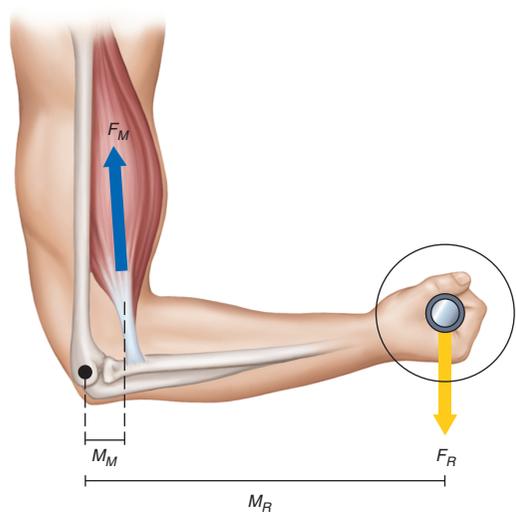


図2.4 第三種のとこ（前腕）。抵抗に対して肘関節を屈曲している（例：バイセップスカール）。 F_M ＝筋力。 F_R ＝抗力。 M_M ＝筋力のモーメントアーム。 M_R ＝抗力のモーメントアーム。 M_M は M_R より小さいため、 F_M は F_R よりも大きくななければならない。

なければならない。このことはこの並びの不利になる特性を示している（たとえば、相対的に小さな外的な抵抗に対して、より大きな筋力が必要となる）。

四肢に関節まわりの回転運動を起こす筋は、ほとんどが力学的有効性が1.0より小さいため、外界の物体に対して作用する力よりもはるかに大きな筋力が発揮されている。たとえば図2.2において、抗力のモーメントアームは筋力のモーメントアームの8倍であるため、筋力は抗力の8倍となる。このように筋や腱に生じる内力はきわめて大きく、こうした組織に傷害が生じる大きな原因となる。実際の運動中においては、支点の位置をどこにするかの違いによって、第一種、第二種、第三種のうち、どのてこに分類されるかが変わるため、この分類ができることよりも、力学的有効性について理解していることのほうがより重要である。

現実世界の運動においては、力学的有効性が連続的に変化することがしばしばある。以下がその例である。

- 膝関節は真の蝶番関節でないため、膝の伸展・屈曲運動では回転軸が可動域全体で連続的に変化し、大腿四頭筋やハムストリングスが作用する際のモーメントアームの長さも変化する。膝の伸展では、膝蓋骨（いわゆる膝のお皿）によって大腿四頭筋腱が回転軸に近づきすぎないように保たれ、大腿四頭筋の力学的有効性の大幅な変化を防いでいる（図2.5）。
- 肘の伸展や屈曲では、膝蓋骨のように回転軸と腱の力の作用線との垂直距離を一定に保つための構造はない（図2.6）。
- フリーウェイトを用いたレジスタンストレーニングでは、ウェイトによる抗力のモーメントアームの長さは、バーベルあるいはダンベルの中心を通る線から、回転運動の起こっている関節までの水平距離で、ウェイトの挙上に伴って変化する（図2.7）。

骨格筋の多くは、体内におけるこの配置と、身体が抵抗する外力との関係により力学的有効性がかなり低い状態で働いている。このため、スポーツ競技やほかの身体活動では、手足が外部の物体や地面に及ぼす力よりもかなり大きな力が、筋や腱に加えられている。

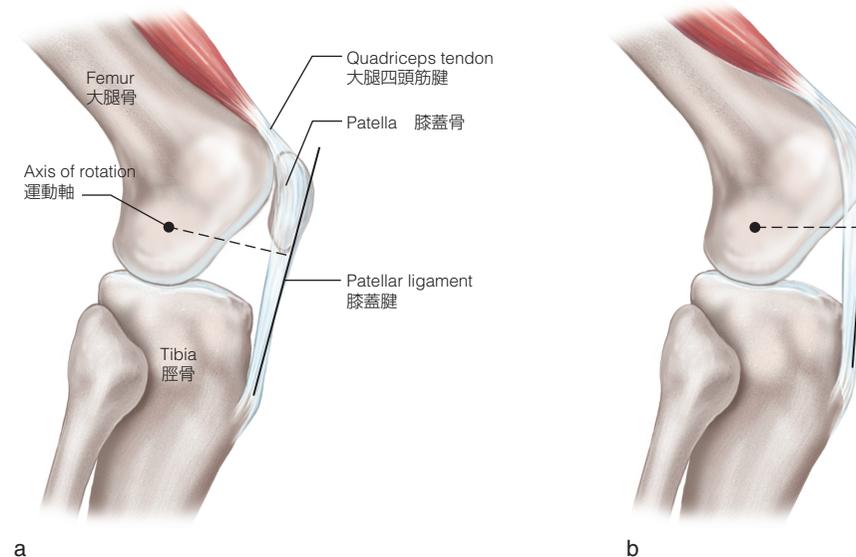


図2.5 (a) 膝蓋骨は膝の回転軸からの距離を保つことによって、大腿四頭筋の力学的有効性を高くする。(b) 膝蓋骨がなければ、大腿四頭筋の腱が膝の回転軸に近づき、筋力の作用する際のモーメントアームが短くなり、筋の力学的有効性が低下する。Gowitzke and Milner, 1988 (12) より許可を得て転載。

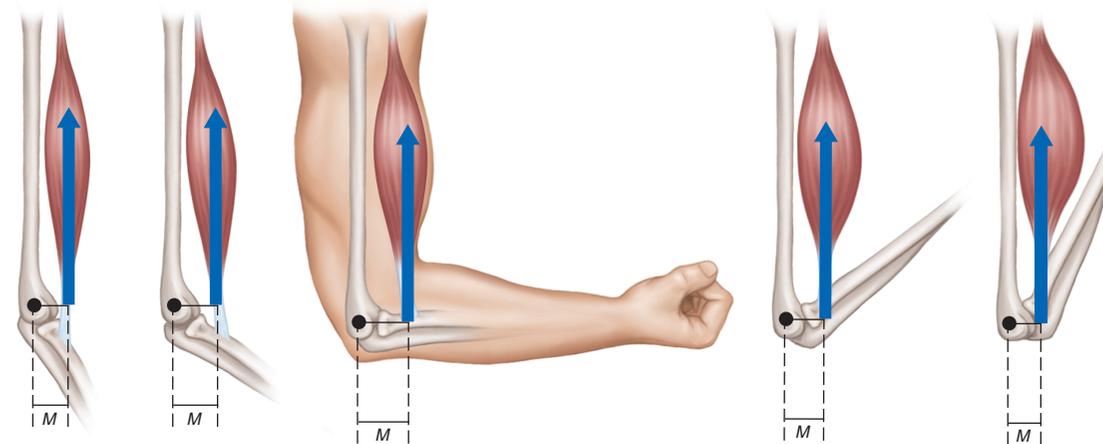


図2.6 上腕二頭筋の収縮により肘関節の屈曲が起こると、関節可動域を通じて回転軸から上腕二頭筋腱の作用線までの垂直距離が変化する。モーメントアーム（M）が短いと、力学的有効性が小さくなる。

腱の付着部位のバリエーション（変異）

腱の骨への付着部位には、人体のほかの構造と同じくかなりの解剖学的な個人差がある。関節の中心から遠い位置に腱が付着している人は、モーメントアームが長く、大きなトルクを関節まわりに発揮できるため、より高重量のウェイトを挙上する能力がある（図2.6において腱の付着部位が図の位置よりも関節から離れている場合、モーメントアーム [M] は増加する）。ところが、腱が関節から遠いところに付着していることは、運動に必ずしも有利に作用するとは限らない（トレードオフの関係にある）と

認識することは重要である。腱の付着が関節中心から遠いことで力学的有効性が大きくなるものの、最大スピードは失われる。なぜなら、同じ可動域の関節運動を起こすために、筋はより短縮しなければならないからである。つまり、筋の短縮が同じであっても、身体セグメント（前腕や上腕などの部位）の関節における回転角度が減少するため、動作スピードの減少となる。

図2.8aには、仮にある長さの筋の短縮が起こった場合、37°の回転が起こることを示している。しかし、腱の付着部位が関節における回転の中心から遠い図

Bioenergetics of Exercise and Training

運動とトレーニングの 生体エネルギー論

Trent J. Herda, PhD, and Joel T. Cramer, PhD

▶ 本章を終えると

- ヒトの骨格筋でATPを供給する基本的なエネルギー機構について説明することができる。
- 乳酸蓄積や、代謝によるアシドーシス、細胞における疲労の発現について理解することができる。
- さまざまな運動強度における基質の枯渇と充足のパターンを明らかにすることができる。
- パフォーマンスを制限する生体エネルギー的因子について述べることができる。
- トレーニングの代謝特性を考慮したトレーニングプログラムを作成することができる。
- インターバルトレーニングや高強度インターバルトレーニング、コンビネーショントレーニングにおける代謝的な要求と回復について説明でき、作業／休息比を最適化することができる。

運動やトレーニングの**代謝における特異性**を明らかにするためには、生体におけるエネルギー変換を理解する必要がある。効率的で有意義なトレーニングのプログラムをデザインするには、運動様式に応じてどのようにエネルギーを利用可能にしているか、またトレーニングのタイプに応じてエネルギー変換にどのように変化が生じるかについて理解することが重要である。本章では、生体エネルギー論の基本用語を定義し、アデノシン三リン酸（ATP）の役割を解説した後、骨格筋にATPを補充する3種類のエネルギー供給機構について論じる。さらに、エネルギー基質の枯渇および充足、とくに疲労や回復との関係における枯渇および充足、またパフォーマンスを制限する生体エネルギー要因、酸素摂取における有酸素性・無酸素性要素の関与についてみていく。最後に、トレーニングの代謝特性について述べる。

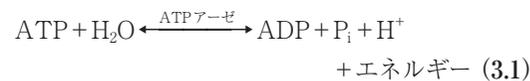
基本用語

生体エネルギー論は、生体内における**エネルギー**の流れを扱う学問であり、主に炭水化物（糖質）、タンパク質、脂質など化学エネルギーを持つ主要栄養素（三大栄養素）から、生体内で利用可能なエネルギー形態への変換について扱うものである。生物学的な仕事を行うのに必要なエネルギーは、こうした主要栄養素の化学結合を分解することにより供給される。

大きな分子を小さな分子に分解することを**異化作用**と呼び、これに伴ってエネルギーが放出される。逆に、小さい分子から大きい分子を合成することを**同化作用**といい、このとき異化作用により放出されたエネルギーが利用される。タンパク質をアミノ酸（複数）に分解するのは異化作用の例であり、複数のアミノ酸からタンパク質を合成するのは同化作用の例である。**発エルゴン反応**はエネルギーを放出する反応であり、一般に異化である。これに対し、**吸エルゴン反応**はエネルギーを必要とし、これには同化の過程や筋収縮が含まれる。生命システムにおける異化と同化、発エルゴン反応と吸エルゴン反応のすべてを、**代謝**という。異化作用（発エルゴン反応）由来のエネルギーは、中間分子である**アデノシン三リン酸（ATP）**を介して同化作用（吸エルゴン反応）の促進に用いられる。つまり、ATPが発エルゴン

反応から吸エルゴン反応へのエネルギー変換を可能にしている。ATPが十分に供給されなければ、筋の活動も成長も起こらない。したがって、ストレングス&コンディショニングの専門職がトレーニングプログラムをデザインする際には、運動がATPの加水分解・再合成に対してどのような影響を及ぼすかについての基礎的な理解が必要なことは明らかである。

アデノシン三リン酸は、アデノシンと3つのリン酸基で構成されている（図3.1）。アデノシンは、アデニン（窒素を含む塩基）とリボース（五炭糖）によって構成されている。1分子のATPを分解してエネルギーを供給する反応には、水1分子が必要で、**加水分解**と呼ばれる。ATPの加水分解は、**アデノシン三リン酸分解酵素（ATPアーゼ）**と呼ばれる酵素の存在により促進される。ATPアーゼは複数存在するが、これらのうち、とくに**ミオシンATPアーゼ**はクロスブリッジを形成する際にATPの加水分解を促進する。また、その他の場所でATPを加水分解する酵素として、カルシウムATPアーゼとナトリウム-カリウムATPアーゼが挙げられる。**カルシウムATPアーゼ**は細胞質にあるカルシウムを筋小胞体に戻し、**ナトリウム-カリウムATPアーゼ**は脱分極後に、筋鞘内外の濃度勾配を維持する働きがある（59）。以下の式はATPの加水分解における反応物（左）、酵素（中央）、そして生成物（右）を示している。



ここでADPは**アデノシン二リン酸**（リン酸基を2つだけ含む、図3.1）、 P_i は**無機リン酸**、 H^+ は水素イオン（プロトン）を示す。ADPがさらに加水分解されると、2つ目のリン酸基が離れ、**アデノシン一リン酸（AMP）**が作られる。生物学的な仕事におけるエネルギー放出は、最初にATPの加水分解、次にADPの加水分解によって行われる。

ATPは、末端の2つのリン酸基の化学結合に多量のエネルギーが貯蔵されているため、高エネルギー分子に分類される。筋活動のエネルギーを得るうえでATPが継続的に必要となるが、筋細胞内にはATPが少量しか貯蔵されていないため、ATPの産

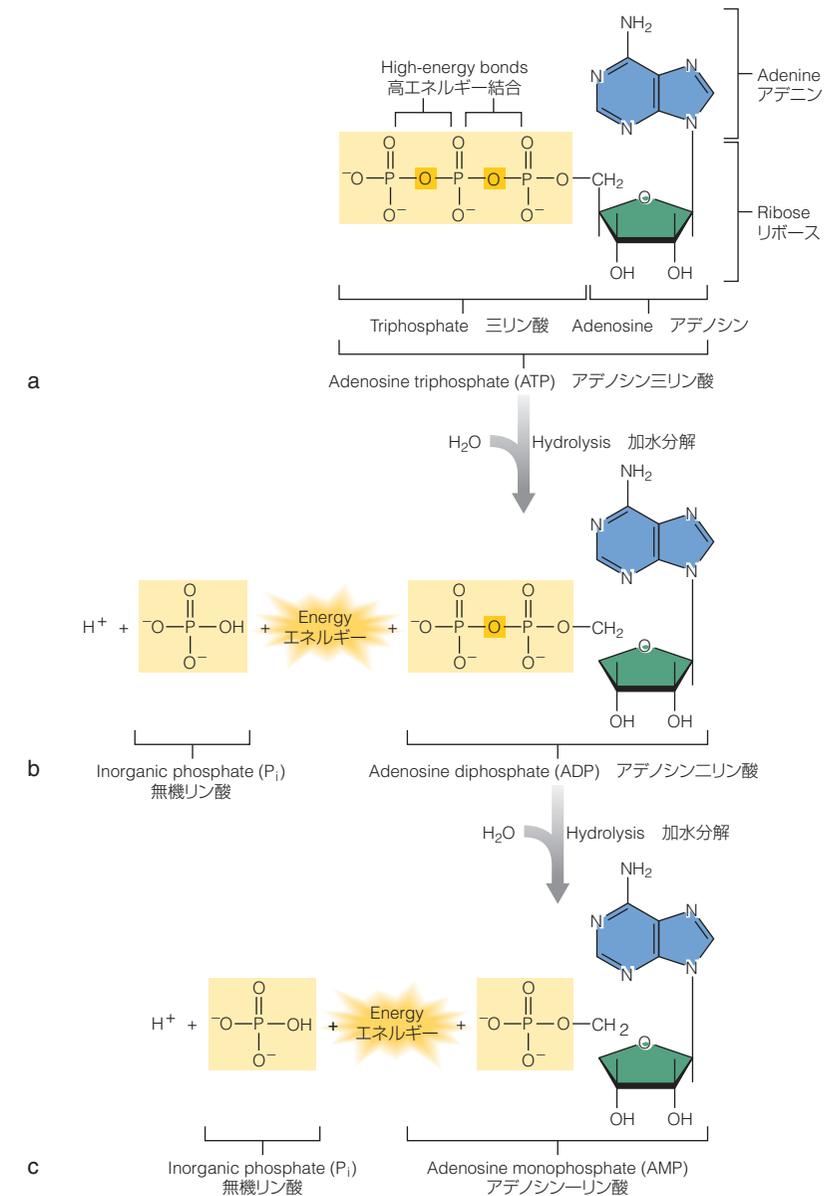


図3.1 (a) ATP分子の構造。アデノシン（アデニン+リボース）、3つのリン酸基、高エネルギー化学結合の場所を示している。(b) ATPが加水分解されることによって末端の化学結合が外れ、エネルギーを放出し、ADP、無機リン酸（ P_i ）、水素イオン（ H^+ ）となる。(c) ADPが加水分解されることによって末端の化学結合が外れ、エネルギーを放出し、AMP、無機リン酸、水素イオンとなる。

生過程が細胞内で行われる必要がある。

• 酸化機構

生物学的エネルギー機構

哺乳類の筋細胞には、ATP補充のメカニズムとして3つのエネルギー機構がある（85,122）。

- ホスファゲン機構
- 解糖

運動に関連する生体エネルギー論では、**無酸素的代謝**や**有酸素的代謝**という言葉がしばしば用いられる。**無酸素性**の代謝過程では酸素を必要とせず、一方で**有酸素性**の代謝過程では酸素を必要とする。**ホスファゲン機構**と**解糖**は無酸素性機構であり、筋細胞の筋形質で起こる。**クレブス回路**や電子伝達系、**酸化機構**のその他の部分は有酸素性機構であり、筋

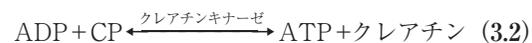
細胞のミトコンドリアで起こり、最終電子受容体として酸素を必要とする。

食物に含まれる主要栄養素（炭水化物、タンパク質、脂質）のうち、炭水化物だけは、酸素が直接関与しなくてもエネルギー代謝が可能である(21)。したがって、無酸素性代謝には炭水化物が重要である。常に3つのエネルギー機構すべてが活動しているが、それぞれの占める割合は第一に運動強度、第二に運動の継続時間によって決まる(45,85)。

筋の活動には、アデノシン三リン酸(ATP)の化学結合に貯蔵されているエネルギーが使われる。ヒトの骨格筋では、(1)ホスファゲン機構、(2)解糖、(3)酸化機構、の3つの基本的なエネルギー機構によりATPが補充される。

ホスファゲン機構

ホスファゲン機構は、主に短時間かつ高強度の運動(たとえばレジスタンストレーニングや短距離走)においてATPを供給するとともに、強度に関係なくすべての運動の開始時に大きく働く(62,70,153)。このエネルギー機構は、ATPの加水分解(式2.1)と、もう1つの高エネルギーリン酸分子であるクレアチンリン酸(PC、フォスフォクレアチン[PCr]とも呼ばれる)の分解に依存する。クレアチンキナーゼは、下記の反応においてクレアチンリン酸とADPからATPの合成を触媒する酵素である。



クレアチンリン酸がリン酸基を供給し、これがADPと結合することによってATPを補充する。クレアチンキナーゼの反応は高速度でエネルギーを供給するものの、筋に貯蔵されているクレアチンリン酸は少量であるため、ホスファゲン機構は持続的な長時間の運動では主たるエネルギー供給機構にはなり得ない(30)。

ATPの貯蔵

体内には常に約80～100gのATPが貯蔵されているが、これは運動のためのエネルギーの蓄えとして十分ではない(107)。加えて、貯蔵されたATPは基本的な細胞の機能維持に必要なため、完全に枯渇させることはできない。実際に、実験的に引き起

こした筋疲労により、ATP濃度は運動前の50～60%まで減少する(34,71,100,143)。したがって、ホスファゲン機構はクレアチンキナーゼ反応(式3.2)を用いてATP濃度を維持する。平常時において、骨格筋におけるクレアチンリン酸の濃度は、ATPより4倍から6倍高い(107)。したがって、ホスファゲン機構はクレアチンリン酸とクレアチンキナーゼの反応を通じ、急速なATP補充のためのエネルギー貯蔵の役割を担う。さらに、タイプII線維(速筋)ではタイプI線維(遅筋)よりもクレアチンリン酸の濃度が高い(95,132)。したがって無酸素性の爆発的な運動中、タイプII線維の割合が高い人はホスファゲン機構を通じATPを早く補充できる可能性がある。

ATPを急速に補充できる1つの酵素による反応として、このほかにアデニル酸キナーゼ反応(ミオキナーゼ反応)がある。



この反応が重要なのは、アデニル酸キナーゼ(ミオキナーゼ)反応の生成物であるアデノシンリン酸(AMP)が解糖の反応を強力に促すためである(22,28)。

ホスファゲン機構の制御

ホスファゲン機構の反応(しばしば式3.1、3.2、3.3にて示される)は、質量作用の法則(もしくは質量作用の影響)により強くコントロールされている(107)。質量作用の法則とは、溶液中の反応物あるいは生成物(もしくは両方)の濃度が、その反応の方向を決定するというものである。ホスファゲン機構の反応のように酵素が介在する反応では、生成物の形成速度は反応物の濃度に大きく影響を受ける。これを示しているのが、式3.1、3.2、3.3の反応物と生成物の間の双方向の矢印である。たとえば、ATPが運動に必要なエネルギーを生成するために加水分解されるのに伴って(式3.1)、筋鞘におけるADP濃度が一時的に増加する(P_i 濃度も同様)。これによって、クレアチンキナーゼとアデニル酸キナーゼ反応(式3.2および3.3)の速度が増加し、ATPの供給を補充する。この過程は、(a)運動を中止する、または(b)貯蔵クレアチンリン酸が枯渇しない程

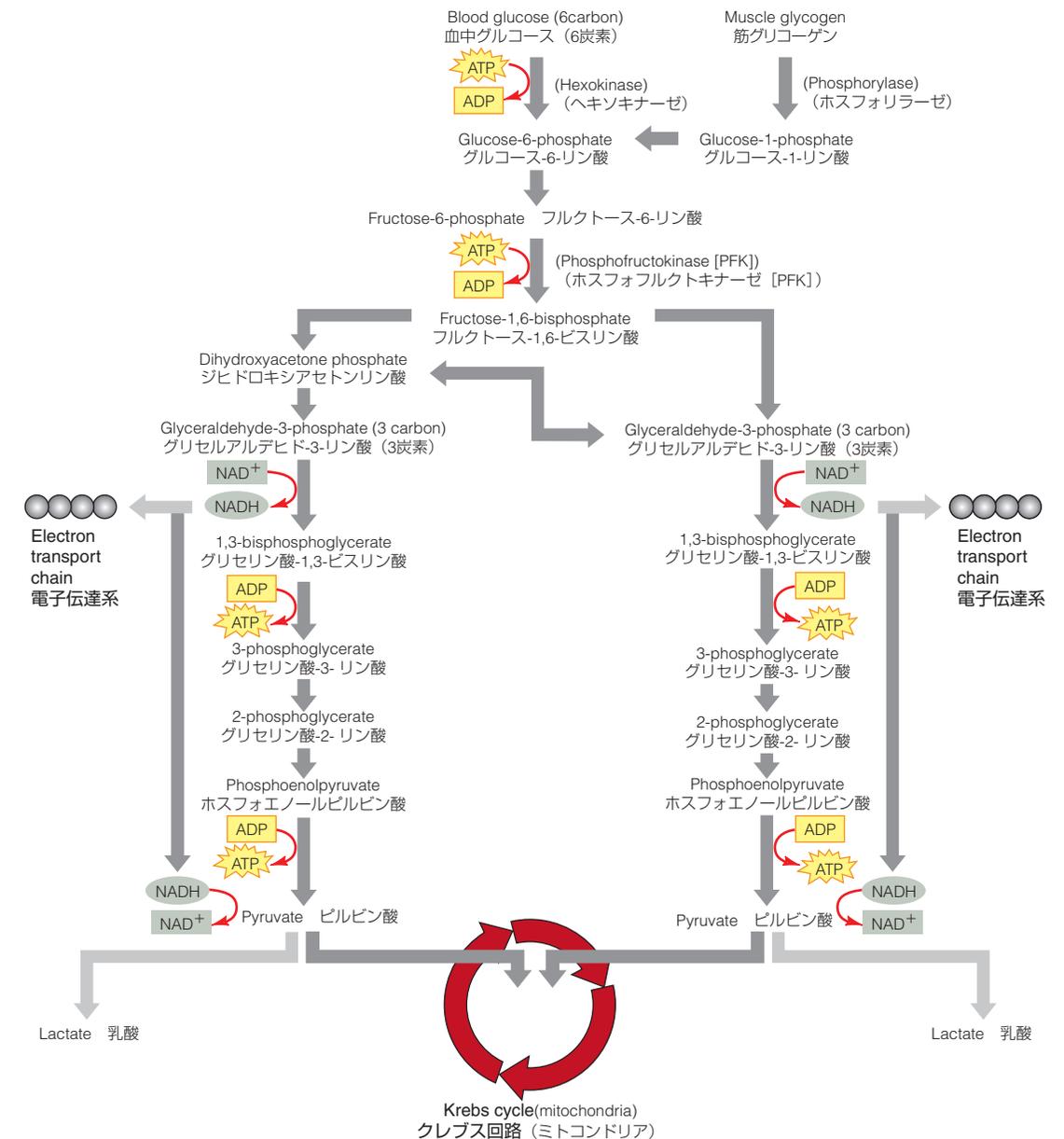


図3.2 解糖。ADP=アデノシン二リン酸。ATP=アデノシン三リン酸。NAD⁺、NADH=ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド。

度まで運動強度が低下し、解糖または酸化機構によって必要なATPを供給できるようになり、遊離クレアチンが再リン酸化される(式3.2)まで継続する(37)。この時点で筋筋質のATP濃度は一定あるいは上昇し、その結果、クレアチンキナーゼ反応およびアデニル酸キナーゼ反応は低下、または逆に進む。結果として、式3.1、3.2、3.3は平衡に近い反応と呼ばれる反応となり、質量作用の法則に基づき反応物の濃度によって決められた方向に進む。

解糖

解糖とは、炭水化物(筋に貯蔵されているグリコーゲン、血中に運搬されてきたグルコース)を分解し、ATPを再合成することである(22,143)。解糖の過程には、酵素が触媒する複数の反応が関係する(図3.2)。結果として、解糖におけるATPの再合成速度はホスファゲン機構ほど速くはないものの、グリコーゲンおよびグルコースの供給がクレアチンリン酸と比べてはるかに多いことにより、ATP供給

Endocrine Responses to Resistance Exercise

レジスタンスエクササイズに対する内分泌系の応答

William J. Kraemer, PhD, Jakob L. Wingren, PhD, and Barry A. Spiering, PhD

▶ 本章を終えると

- ホルモンとは何か、それらがどのように相互作用するのか、標的組織にどのような影響を与えるのかなど、内分泌学の基本概念を理解することができる。
- 同化ホルモンの生理学的役割について説明することができる。
- レジスタンスエクササイズに対するホルモン応答を説明することができる。
- ヒトの内分泌応答を理解していることを示すトレーニングプログラムを作成することができる。

内分泌系は、身体の恒常性を正常に維持し、外的な刺激に対する身体の応答を助ける。これは運動による需要や回復を変化させたり手助けするのに影響を及ぼす、人体における複雑な情報伝達系の一部である。ストレングス&コンディショニングの分野における内分泌系の重要性は、トレーニングのピリオダイゼーション理論の発展において、この系が重要な役割を果たしたことから明らかである(43)。副腎とストレスホルモンがディストレス(苦痛)や疲労、病気に対する適応においてどのような役割を果たすかについて、Hans Selye(カナダ人の内分泌学者)による研究が、図らずもピリオダイゼーションの理論的基盤となったのである。

旧東欧圏のスポーツ科学者や医師は、競技選手に起こるトレーニングへの応答パターンと、Selyeが観察したストレスのパターンとの間に類似性を見出した。Selyeは、有害な刺激(ストレッサー)に対して副腎が反応するかを説明するために、**汎適応症候群**という言葉をつくった(164,165)。この反応は、最初に機能低下を含む初期警告反応が起こり、続いて、ストレスに抵抗して、以前のベースラインの機能を上回るようになる。このようにストレスに抵抗して増加することを**適応**と呼び、もしストレッサーが運動であるならば、トレーニング**適応**と呼ばれる。ストレスに対して有用な適応を継続するためには、生体機能が回復できるように、適したタイミングで刺激(例:運動)を取り除き、それから増加させたストレスを再度かけること(段階的な過負荷)が鍵となる。

ストレングス&コンディショニング専門職は、レジスタンスエクササイズに対するホルモン応答の基礎知識を持つことが重要である。ホルモンによるシグナル(内分泌的信号)は、同化(合成する)から、異化(分解する)に至るまで、さまざまな種類のメカニズムにおいて役割を果たす。血液における循環応答の変化を理解することは重要であるが、観察可能な変化は、レジスタンストレーニングプログラムが代謝的な課題(負荷)によって生み出される。高負荷のプログラム(例:1回挙上できる、1RMという強度で2または3セット、セット間の休息は5~7分間)によりアンドロゲン受容体が上方制御(アップレギュレーション ※各章の初出時にカッコ内でカタカナを併記し、以下は漢字のみとする)を受

け、血中濃度に変化のないまま、利用可能な同化ホルモンを用いて同化の反応を観察することができる。内分泌的信号が信号伝達に関わっている間、血中濃度の変化はわずかであり、受容体のレベルを観察すべきである。運動処方によって内分泌系がどのように相互作用するかについて洞察や知識を得ることににより、ストレングス&コンディショニング専門職は、どのようにして、レジスタンストレーニングに対する適切な適応をホルモンが仲介するのを手助けするかをより理解できる(93,96)。レジスタンストレーニングは、除脂肪組織量を劇的に増加させる(つまり筋肥大)唯一の自然な刺激であるが、どれほど筋や結合組織の大きさを増加させることができるかについては、レジスタンストレーニングプログラムにより顕著な差が存在する(44,128,189)。レジスタンスエクササイズのセッションにおいて、プログラム変数(強度、セット数、エクササイズの順番、休息時間の長さ、エクササイズ種目の選択)の中から各セッションに何を選擇するかは、内分泌系の応答の現れ方とその程度に大きな役割を果たす。重要なのは、組織の適応は、運動後の血中ホルモン濃度の変化に影響を受ける(10,12,14,47,62,98,171)ということであり、また、各セッションのプログラム変数の適切な選擇を通した内分泌系の自然な操作によって、標的組織の成長を促進し、パフォーマンスを改善することができる(78,158)。したがって、運動中や運動後に競技選手の体内で起こるこの自然な同化作用を理解することが、疲労回復や、身体の適応、プログラムデザイン、トレーニングの進行、最終的な競技パフォーマンスを成功に導く土台となる(42-44, 93,94,101,103)。

ホルモンの合成、貯蔵、分泌

ホルモンとは、**内分泌腺**(分泌のための器官)やその他の特定の細胞によって合成・貯蔵され、血液中に放出される化学伝達物質(シグナル分子)である(図4.1、表4.1)。同様に、神経細胞もホルモンのような作用を持つ神経伝達物質を合成・貯蔵・分泌する。**神経内分泌学**は比較的新しい用語で、神経系と内分泌系の相互作用についての学問を意味する。一般的に内分泌腺は、その内分泌腺の受容体が受け取った化学的信号、もしくは直接的な神経の刺激に

より、ホルモンを放出する。たとえば、副腎髄質(副腎の中心部)は、脳からの神経の刺激によってエピネフリンというホルモンを放出する(91,104,112,182)。副腎皮質(副腎の辺縁部)は、下垂体から放出された副腎皮質刺激ホルモンの刺激によってコルチゾールというホルモンを合成し、分泌する(110,111,116)。刺激を受けると内分泌腺から血液中にホルモンが放出され、血液がホルモン(とその情報)を、標的組織の細胞にある各ホルモンに特異的な受容体に運ぶ。ペプチドホルモンの受容体は**標的組織細胞**の表面に、**ステロイドホルモン**と**甲状腺ホルモン**の受容体は標的組織の細胞質基質にある(6-8,11,37, 61)。

内分泌機能は、血液中への放出を経由するものだけでなく、イントラクリン(細胞内分泌)、オートクリン(自己分泌)、パラクリン(傍分泌)などの分泌メカニズムによって機能するホルモンがある。ホルモンのイントラクリンおよびオートクリン分泌とは、細胞が細胞内に結合された受容体や細胞膜受容体を経由して、自らの細胞内にホルモンを放出することである。外からの刺激(他のホルモンなど)によってホルモンが分泌されることはあるが、その

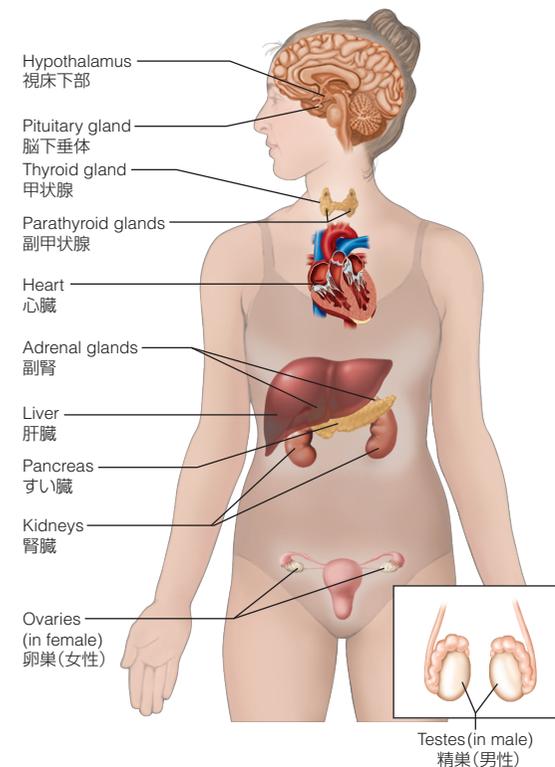


図4.1 身体の主な内分泌腺と、ホルモンを分泌するその他の腺

分泌されたホルモンは血流に入ることはない。たとえば、インスリン様成長因子 I (IGF-I) は、力学的な力の発揮による刺激、または成長ホルモンの筋細胞との相互作用によって、筋線維内に生産される可能性がある。一方、ホルモンのパラクリン分泌では、分泌したホルモンが相互作用するのは隣接した細胞であり、血液循環へと移動することはない。このような仕組みは、1つの標的細胞に相互作用するうえで、さまざまなホルモンが複数の役割を果たすことができることを示している。

ホルモンを運搬するさまざまな結合タンパク質が血液中に存在する(6,8)。ペプチドホルモン、ステロイドホルモンのどちらも、これらの多くの結合タンパク質によって運搬される。見方を変えれば、これらの結合タンパク質は、血液中でホルモンを貯蔵する役割を担い、ホルモンの分解を抑制して、その半減期を延ばしていることになる。ほとんどのホルモンは、それぞれ特定の結合タンパク質から解離(遊離、離れること)して初めて活性化される。しかし、ホルモンと結合するタンパク質の中には、それ自身で生物学的な作用を持つものもある。たとえば、性ホルモン結合グロブリン(SHBG)は、テストステロンやエストロゲンが結合するタンパク質であり、特定の膜受容体に結合して、サイクリックAMP依存性シグナル経路の活性化を初期化することができる(50)。したがって、結合タンパクは血中で循環しているか細胞の受容体と結合しているかにかかわらず、内分泌機能と制御において主要な役割を担っている。結合したホルモンと受容体の相互作用は、内分泌学の領域において認識され始めたばかりであり、最近の研究では、ホルモンと標的組織のより複雑な制御が存在することが示唆されている(135)。

多くのホルモンは、体内の複数の組織に作用する(1,3,82,84-86)。たとえば、テストステロンやその誘導体は体内のほぼすべての組織と相互作用する。ホルモンの相互作用の主な標的として本章では骨格筋組織を重点的に取り上げるが、レジスタンストレーニングがもたらす適応現象においては、骨や腎臓、肝臓のような他の多くの組織も同じく重要である。内分泌的信号を含めた生理学的現象のカスケード(訳注:カスケードは小さな滝が重なった流れのことで、一連の反応のことをこのように呼ぶ)は、運動単位が動作を生み出すために賦活した結果である

表4.1 内分泌腺とホルモン

内分泌腺	ホルモン	選択的な生理学的作用
脳下垂体前葉	成長ホルモン	肝臓からのIGF-Iの放出、タンパク質合成、成長、代謝を刺激する。その他の成長ホルモンの凝集体も生物学的機能を持ち、より複雑な成長ホルモンスーパーファミリーを形成する
	副腎皮質刺激ホルモン	副腎皮質における糖質コルチコイド放出を刺激する
	β エンドルフィン	鎮痛作用を促進する
	甲状腺刺激ホルモン	甲状腺からの甲状腺ホルモン分泌を刺激する
	卵巣刺激ホルモン	卵巣における卵胞、また精巣における精細管の成長を刺激する。卵および精子の形成を刺激する
	黄体形成ホルモン	排卵を刺激するとともに、性腺（卵巣や精巣）における性ホルモンの分泌を刺激する
	プロラクチン	乳腺における乳汁の産生を刺激する。黄体の維持およびプロゲステロン分泌
脳下垂体後葉	抗利尿ホルモン	平滑筋の収縮を刺激し、腎臓における水の再吸収を促進する
	オキシトシン	子宮収縮を刺激し、乳腺による乳汁分泌を刺激する
甲状腺	チロキシン（サイロキシン）	ミトコンドリアにおける酸化的代謝および細胞の成長を刺激する
	カルシトニン	血中カルシウムリン酸を減少させる
副甲状腺	副甲状腺ホルモン	血中カルシウム濃度を増加させる。血中リン酸濃度を減少させる。骨形成を刺激する。
すい臓	インスリン	細胞によるグルコース取り込みを促進することによって血中グルコース濃度を低下させる。グリコーゲンの貯蔵を促進する。脂肪の酸化と糖新生を抑制する。タンパク質合成に関与する
	グルカゴン	血中グルコース濃度を増加させる
副腎皮質	糖質コルチコイド（コルチゾール、コルチゾンなど）	タンパク質を分解し（異化作用）、アミノ酸を合成してタンパク質にするのを抑制する（抗同化作用）。タンパク質を炭水化物へと転換すること（糖新生）を刺激し、血中グルコース濃度を維持する。免疫細胞の機能抑制。脂質酸化の促進
	鉱質コルチコイド（アルドステロン、デオキシコルチコステロンなど）	ナトリウム・カリウムの保持により体液を増加させる
肝臓	インスリン様成長因子（IGF）	細胞内のタンパク質合成を増加させる
副腎髄質	エピネフリン	心拍出量を増加させる。血糖値およびグリコーゲン分解、脂質代謝を増加させる
	ノルエピネフリン	エピネフリンのような特性を持つ。血管を収縮させる
	プロエンケファリンフラグメント（例：ペプチドF）	免疫細胞の機能を亢進させる。鎮痛作用を促進する
卵巣	エストラジオール	女性的な身体的特徴（性徴）の発達を刺激する
	プロゲステロン	女性的な身体的特徴（性徴）および乳腺の発達を刺激する。妊娠を維持する
精巣	テストステロン	タンパク質を合成し（同化作用）、タンパク質をアミノ酸へと分解するのを抑制する（抗異化作用）。発育発達を刺激し、男性的な身体的特徴（性徴）の発達を刺激する
心臓（心房）	心房性ペプチド	ナトリウムやカリウム、体液量を調節する
腎臓	レニン	腎機能や透過性、溶質を調節する

（すなわちサイズの原理）。生理学的な反応の需要とその程度については、賦活された運動単位によって生み出されたこのニーズと関連している。筋組織が運動によってどの程度賦活されるかは、生理学的なシステムがどれほど必要とされているか、また運動中の力およびパワー発揮におけるホメオスタティック（恒常的）な需要や回復の需要に合致させるための関与の程度を示す。たとえば、1RMの80%の強度でスクワットのエクササイズを10回3セット、セット間に2分間の休息で行う場合、バイセップスカールを同じプロトコルで行う場合よりも、心拍数はより高くなるだろう。これら両方のエクササイズには、同じシステムが関わっているものの、筋組織の量がプロトコルの影響を受けることから、エクササイズプロトコルに違いが存在することになる。内分泌系は、特定のワークアウト時にストレスを受けるその他の標的組織や分泌腺も巻き込むのだが、それらのニーズは、繰り返しになるが、そのエクササイズに特異的な、自然な動員の需要と、動きをつくり出すときに関わるものによって決まる。したがって、5セットの5RMのワークアウトは、1セットの25RMワークアウトと比較して、運動単位の賦活や生理学的な援助と回復の必要性において、異なる需要がある。

ほとんどのホルモンは、複数の生理学的役割を担う。そうした役割には、生殖の調節や体内環境の維持（ホメオスタシス）、エネルギーの産生や利用、貯蔵、さらに成長や発達が含まれる。加えて、ホルモンは、複雑な方法で相互作用しあう。ある特定のホルモンが、何らかの生理学的メカニズムにおける役割に応じて、独自に働いたり、またはほかのホルモンに依存して機能したりする。このような複雑さや柔軟性を持つことで、内分泌系は、生理学的現象に対して適切な程度で応答することができ、また、多くの生理学的なシステム（系）や標的組織に対してそれぞれ異なる作用を同時にもたらすことができる。

ホルモン相互作用の標的組織としての筋

ホルモンのメカニズムは、レジスタンスエクササイズやトレーニングの結果として起こる、代謝や筋

における細胞のさまざまな過程の変化を仲介する統合された信号伝達システムの一部である。筋のリモデリングには、筋線維の断裂や損傷、炎症反応、損傷を受けたタンパク質の分解、ホルモンその他のシグナル（例：成長因子、サイトカイン）の相互作用、そして最終的に新しいタンパク質合成と、それを既存の、または新しいサルコメアに定期的に組み込む過程が含まれる（2,20）。炎症過程では、内分泌系の影響を受ける免疫系や免疫細胞（例：T細胞、B細胞）が関係する（51）。このような神経系、内分泌系、免疫系の関連を扱う学問分野は、**神経内分泌免疫学**と呼ばれる。この用語は、これら3つの系が相互に依存しており、筋のリモデリング過程が統合的な性質を持っていることを示している。私たちは、生物学的な過程について、考えを1つの系のみに限定することはできない。

ホルモンは、筋がレジスタンスエクササイズに適応する過程の一部である、タンパク質の合成と分解のメカニズムに密接に関係している。収縮タンパク質であるアクチンとミオシン、また構造タンパク質（例：デスミンやタイチン）の合成が起こり、これらのタンパク質が最終的にサルコメアに組み込まれると、分子レベルにおけるタンパク質合成過程が完了する。タンパク質合成のさまざまな過程で、インスリンやインスリン様成長因子（IGF）、テストステロン、成長ホルモンなどの**アナボリック（同化）ホルモン**（組織構築を促すホルモン）を含む数多くのホルモンが関与する。また、甲状腺ホルモンは、それ以外のホルモンの活性を発現させる重要なホルモンとして作用している（許容作用と呼ばれる）。組織構築におけるもう1つの重要な作用として、アナボリック（同化）ホルモンが、**カタボリック（異化）ホルモン**のタンパク質代謝に相反する作用を抑制することもあげられる。異化ホルモンとされるのはコルチゾール、プロゲステロンなどで、細胞のタンパク質の分解を進めることができる。コルチゾールが骨格筋に与える負の効果は、免疫細胞を非活性化する役割を果たすときや、mRNA翻訳開始に関わるAkt/mTOR経路にもみられる（Aktは、代謝に関わる酵素の一種。mTORは、メカニステックラパマイシン標的タンパク質）。ホルモンと筋線維、さらに運動後の筋線維の機能特性の変化の間の相互関係が、ホルモンが筋肥大における適応に与える影響