

第1章

運動とコンディショニング

概要

人の体は約 60 兆個の細胞から構成されており、様々な環境の変化に対して柔軟に対応して生命活動を維持している。このような仕組みを生体の恒常性（ホメオスタシス）とよぶ。この章では、体の構成要素やそのはたらきなどについて理解し、運動・栄養・休養のバランスの大切さと心身の状態を整えるためのコンディショニングの重要性について学ぶ。

1-1. 生体の恒常性

1-1-1. 人体の構成要素

人の体は約 60 兆個の細胞 (cell) からできており、人体を構成する基本的単位は細胞である。細胞の大きさは、直径 5 ~ 30 μm (マイクロメートル)程度であり、その役割によって異なった形をしているが、共通の特徴をもっている。通常、どの細胞も細胞の内部は核と細胞質からなり、細胞膜で包まれている。細胞内にはいろいろな役割を果たしている小器官があり、これらを細胞内小器官という (図 1-1)。

同じ種類の細胞が集まり、一定のはたらきをもった組織 (tissue) がつくられ、異なる組織が組み合わさった集合体が器官 (organ) である。さらに、特定の目的のために複数の器官が連絡し、それらのはたらきにより 1 つの機能が営まれる。これを器官系 (系: システム) という。例えば、呼吸器系においては肺だけでなく、ガス交換が行われる肺胞、空気の通り道である気管や気管支、肺を拡大させる横隔膜など様々な器官が連携することによって呼吸ができる。このように、生体の各器官系は独立した機能を分担するが、完全に独立したものではなく、それぞれに相互の連絡がある。人体の機能は、各器官系のはたらきが統合されて高次の生命活動を維持することができる。

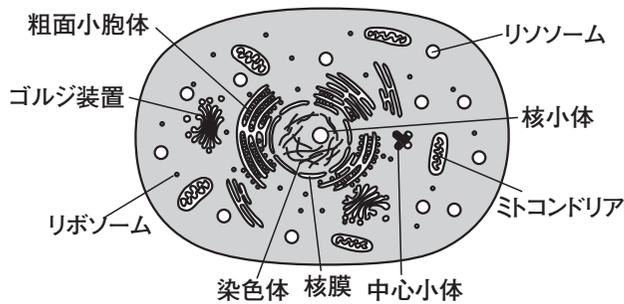


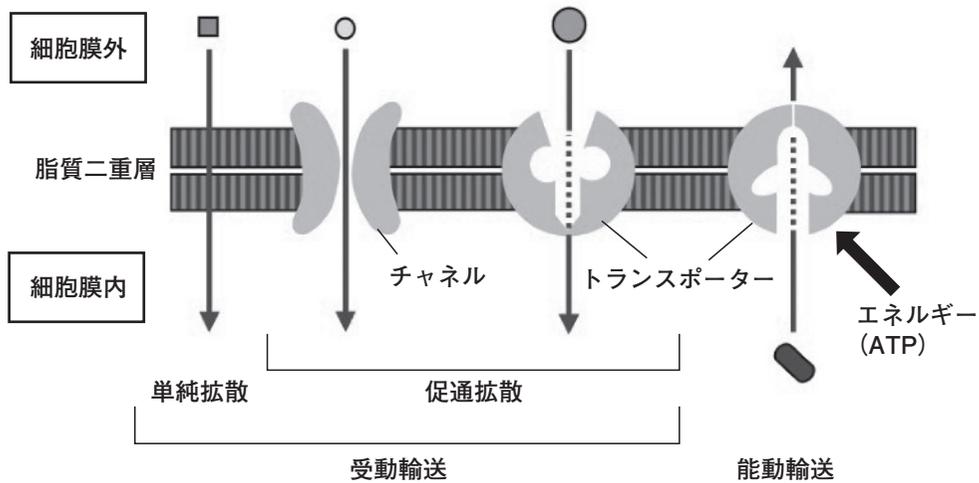
図 1-1 細胞の構造と細胞内小器官

1-1-2. 細胞膜と物質の移動

(1) 細胞膜の構造と性質

細胞膜は、細胞質と外界とを隔てている厚さ約 10nm (ナノメートル) の薄い二重の半透膜*であり、その主な構成成分は脂質である (脂質二重層) (図 1-2)。細胞膜には選択的透過性があり、脂溶性 (疎水性) 物質は通過しやすいが、イオンやグルコース、アミノ酸など水溶性 (親水性) 物質は自由に通過することができない。

*半透膜
一定の大きさ以下の分子
またはイオンのみを通過
させ、それ以外の大きい
分子を通過させない膜



出典) 桑名俊一ら, 新版生理学, p7, 図 1-7, 理工図書, 2019 より引用改変

図 1-2 細胞膜を介した物質の輸送

(2) 細胞膜を介した物質の輸送

細胞膜を介した物質の移動には、**受動輸送** (passive transport) と **能動輸送** (active transport) がある。

受動輸送は、濃度勾配にしたがって高濃度側から低濃度側へ物質 (溶質) が移動する **拡散** (diffusion) による輸送であるため、エネルギーである **アデノシン 3 リン酸** (adenosine triphosphate: ATP) を必要としない。酸素 (O_2) や二酸化炭素 (CO_2) などのガス体や脂溶性物質は自由に細胞膜を通過できるが、イオンやグルコース、アミノ酸など分子量の大きい物質は、細胞膜の **膜輸送タンパク** (チャネル, トランスポーター) などを介して細胞の内外を出入りする。このような膜輸送タンパクを介して輸送される受動輸送を **促進拡散** という (図 1-2)。水もイオンやグルコースと同じく脂溶性でないため、細胞膜を自由に通過することができないが、水チャネル (アクアポリン) を介して自由に通過することができる。

能動輸送とは、濃度勾配に逆らって低濃度側から高濃度側へ物質が移動する輸送であり、生体のエネルギーである ATP が必要である。この輸送の代表例として、細胞膜にある輸送タンパクである **ナトリウム-カリウムポンプ** (Na^+K^+ ATPase) がある。生体の細胞の内外は、表 1-1 に示すようにイオン濃度が大きく異なっている。この濃度差を維持するために ATP を消費し、細胞膜にあるイオンポンプを介して、濃度勾配に逆らって細胞内のナトリウムイオン (Na^+) を細胞外に汲み出し (図 1-3 の①, ②), 細胞外のカリウムイオン (K^+) を細胞内に汲み入れている (図 1-3 の③, ④)。そのため、**細胞内液**には K^+ が多く、**細胞外液**には Na^+ が多く含まれている (図 1-4)。

表 1-1 哺乳動物の細胞内液と間質液の主なイオン組成

主なイオン	細胞内 (mmol)	細胞外 (mmol)
ナトリウムイオン	15	150
カリウムイオン	100	5
塩化物イオン	13	150

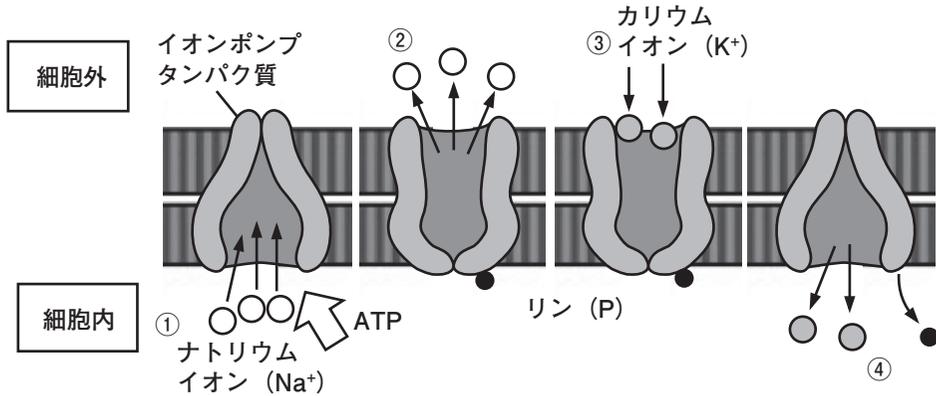


図 1-3 ナトリウム-カリウムポンプ

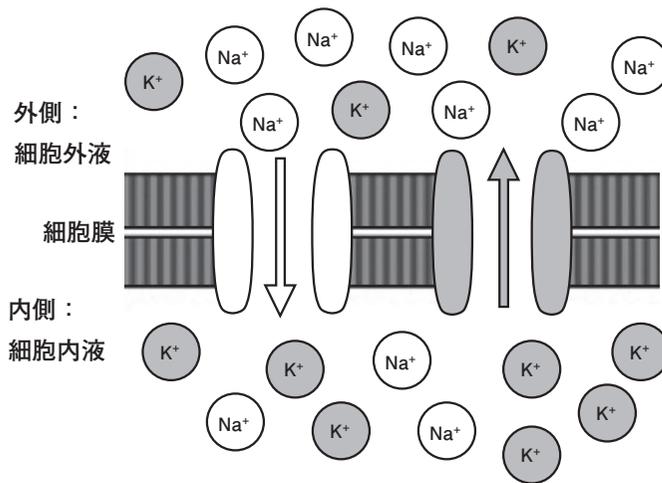


図 1-4 細胞の内外のナトリウムとカリウムの組成比

1-1-3. 人の体は水でできている

人の体の約 60%は、水分で成り立っており、残りの 40%がタンパク質、脂質、無機質などの固形成分から構成されている。この体を構成している水分を**体液**という。体液は、体重のほぼ 60%を占め、細胞内液 (40%)

と細胞外液(20%)に分類される(図 1-5)。細胞外液はさらに血管内の血漿、さらに細胞と細胞の間にある間質液(組織間液)に分けられる。

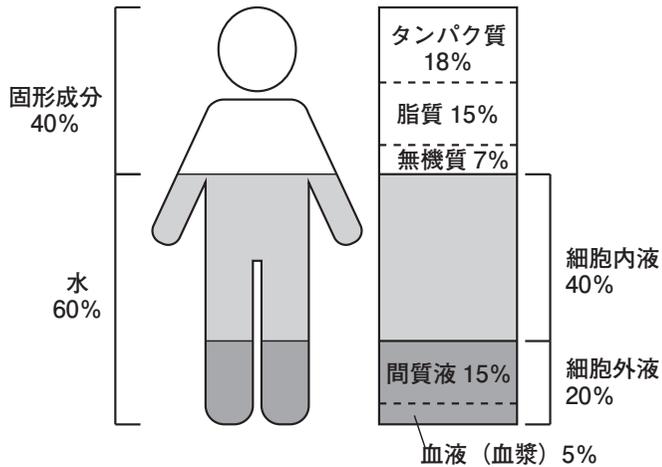


図 1-5 体の構成成分

1-1-4. 体液の恒常性

体を構成している細胞の中で、外界の空気や水と直接接しているのは、皮膚や粘膜の細胞であり、その他の細胞は細胞外液と接している。すべての細胞は細胞外液から酸素や栄養を取り込み、二酸化炭素や老廃物を細胞外液に排出する。体の外の環境を外部環境とよぶのに対して、細胞外液は内部環境とよばれ、内部環境が最適な状態に保たれることを生体の恒常性(ホメオスタシス: homeostasis)とよぶ。

成人が1日に摂取する水分は約2.5Lであり、これは尿や発汗として失われる水分量とバランスが保たれている(水バランス)(図 1-6)。体が獲得する水は、飲水、食物中の水、体内で代謝の結果生じる水が主である。

一方、失われる体液は、尿、糞便、呼吸、皮膚からのものである。水バランスが崩れると、体液の量とイオン組成に変動が生じる。例えば、大量の発汗や嘔吐、下痢の際には、体内から水分とともに電解質^{*}も失われるので、適切な量の水分と電解質を補わなければ、生体の内部環境が破綻し、重篤な状態を招くことになる。

^{*}電解質
溶媒(水)に溶けると、イオンになる物質であり、主な電解質にはナトリウム、カリウム、マグネシウム、カルシウムなどがある。

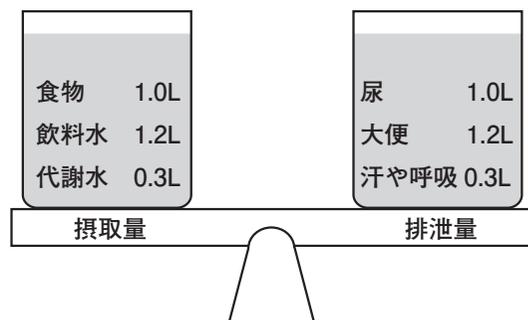


図 1-6 健康成人の1日あたりの水分摂取量と排泄量

1-2. 体液・血液の量と組成

1-2-1. 体液量は変化する

体液量の割合は、年齢、性別、脂肪量などにより変化する。小児はその割合が高く70%を超え、体液量は加齢とともに減少する。また、男女差もあり、女性は男性より5～10%程度少ない。これは、体組成の脂肪が多いことに起因していると考えられている（図1-7）。

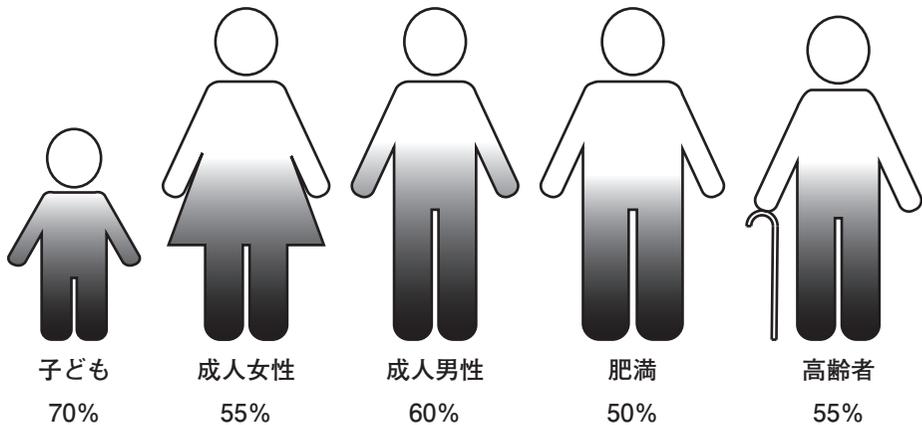


図1-7 各年代別の体内水分量

1-2-2. 血液の主な成分

血液は血管内を循環する流動性の組織であり、各組織をくまなく還流し、その間に血液中にある種々の物質は血管外および組織細胞内の液状成分との間に盛んな物質交換を行い、それによって体の内部環境を恒常に保っている（ホメオスタシス）。

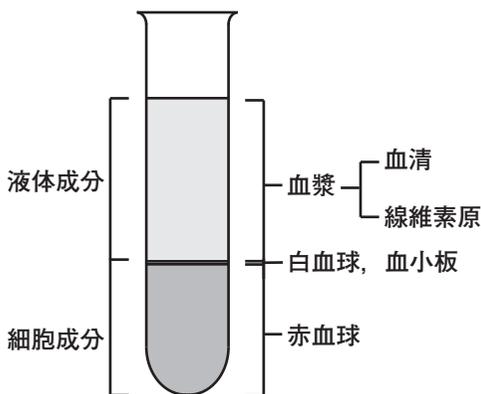


図1-8 血液成分

血液の約45%は細胞成分であり、55%は液体成分である（図1-8）。細胞成分には赤血球、白血球、血小板、液体成分は血漿がある。血液を体外に取り出し、試験管に入れて放置すれば約10分で凝固する。凝固は水溶性のタンパク質である線維素原（フィブリノーゲン）が不溶性の線維素（フィブリン）に変化する現象である。さらに放置して時間が経過すると、線維素および細胞成分は退縮して、透明な液状成分の血清が分離する（表1-2）。

表 1-2 各血液成分の主な機能

出典) 真島英信, 生理学, p.290, 文光堂, 2016 より引用改変

成分	主な機能
赤血球	酸素運搬, 二酸化炭素の運搬, pH 調節
白血球	感染防御, 異物処理, 抗体産生
血小板	血液凝固 (止血)
血漿	物質運搬, 血圧調節, 体温調節
無機塩類 (電解質)	浸透圧調節, pH 調節, 二酸化炭素の運搬
有機物	栄養物および代謝産物, 膠質浸透圧
線維素原 (フィブリノーゲン)	血液凝固

(1) 血漿

90%は水であるが, 血漿タンパク質, グルコースなどの栄養素, 無機塩類, 老廃物, ホルモンなど重要な物質を多く含む。血漿タンパク質には, 膠質浸透圧^{*}の維持, 免疫グロブリン^{*}, 緩衝作用^{*}, 担体輸送^{*}, 血液凝固^{*}などの生理作用をもつ。

(2) 赤血球

赤血球には核がなく, その内容の大部分を占めるヘモグロビン (血色素, Hb) の作用により主として酸素の運搬を行う。その他, 炭酸脱水酵素を含み, 二酸化炭素の運搬や pH 調節にも関与する。

赤血球の形状は円盤状で中央がくぼんでいる。形は固定ではなく, 膜の弾性により変形する (変形能)。成人男性では約 500 万 /mm³, 女性では約 450 万 /mm³ ある。血液の容積に対する細胞成分の相対的容積をヘマトクリット値という。正常値は男性 45%, 女性 40%である。

(3) ヘモグロビン

ヘモグロビンは, 赤血球内にある鉄を含んだ色素タンパク質であり, 正常値は男性 16g/dL, 女性 14g/dL である。ヘモグロビンの主な役割は酸素を運搬することである。酸素と結合すると酸化ヘモグロビン (オキシヘモグロビン) となり, 酸素濃度の高い動脈血は鮮紅色にみえる。一方, 肺でオキシヘモグロビンとなった赤血球は各組織で酸素を離して, 還元型ヘモグロビン (デオキシヘモグロビン) となる。したがって, 酸素濃度の低い静脈血は暗紅色にみえる。ヘモグロビン 1g あたり 1.34mL の酸素と結合することができる。つまり, ヘモグロビン濃度が高ければより多くの酸素を組織に供給することが可能となる。しかし, ヘモグロビン濃度が低下すると, 酸素供給能も低下するため, 疲れやすくなる。ヘモグロビン量が少ないと, 組織への酸素供給が不十分となり, 貧血となる。貧血の原因は, 赤血球の産生不足や多量の出血などである。

※膠質浸透圧

濃度の異なる 2 つの溶液が半透膜を境に接したとき, 低濃度の溶媒が高濃度側の溶液に移動しようとする現象を浸透といい, その圧力を浸透圧という。血漿タンパク質のアルブミンによって生じる浸透圧が膠質浸透圧であり, 毛細血管から漏出した血漿成分が, 毛細血管内に再吸収される際にはたらく力。

※免疫グロブリン

免疫反応の抗体として重要な役割を担う血中タンパク質。

※緩衝作用

体液や血液の水素イオン濃度 (pH) の変化を防ぐことを緩衝作用という。全血漿タンパク質の約 60% を占めるアルブミンを中心に pH の維持を行う。

※担体輸送

特定の物質と結合し, その物質を輸送することである。アルブミンは脂肪酸を運搬し, トランスフェリンは鉄イオンを運搬する。

※血液凝固

血液を固まらせる凝固反応は, 血小板が中心となる。血漿タンパク質のフィブリノーゲンも血液凝固因子であり, フィブリンとなって線維化する。

(4) 白血球

白血球は核をもった球形の細胞であり、顆粒球（好中球、好酸球、好塩基球）、単球ならびにリンパ球より成る。白血球数は通常、約 7,000 個/mm³ であるが、感染症でその数が増加する。白血球は、ウイルス、細菌、寄生虫の感染に対する防御の役割を担い、組織への細菌侵入により発せられたシグナル、走化性因子を感知して、その部位を流れる血管の内皮細胞の間をくぐりぬけて組織へ侵入し、殺菌する。

(5) 血小板

損傷を受けた血管は収縮し、傷の箇所に血小板が集まって、粘着性をもつようになった血小板と傷の周囲のコラーゲンとで塊をつくる。これを血小板血栓という。血小板血栓の周りに線維素（フィブリン）の網が形成され、最終的な血栓が形成される。この過程が血液凝固である。

コラム：アスリートの貧血

アスリートに特有の貧血（anemia）を運動性貧血という。鉄欠乏性貧血は鉄分、タンパク質などの摂取不足や消化管などの慢性的な出血、月経による出血などによる鉄不足が原因である。また、運動時の着地や物理的衝撃などで赤血球が破壊される溶血性貧血もあり、これら2つの貧血は持久力の低下の原因となる。

1-3. 運動と体液成分

運動時の発汗によって著しい体液の脱水（体重の2%相当）が生じると、血液濃縮が生じ、血液の流動性が低下する。体液の脱水によるパフォーマンスへの影響は大きく、体重の2～3%の水分が失われると、有酸素性作業能力が低下し、体重の5%相当の水分の損失は、無酸素性パワーや筋力、筋持久力の低下がみられる。そのため、適切な水分補給が必要である。どの競技においても開始30分前までに250～500mLの水分を取り、競技中は15分ごとに150～200mLずつ摂取することが理想である。一度に多くの水分を取りすぎると、胃内に水分が停滞し、胃が重く感じるので注意が必要である。

1-4. コンディショニング

コンディショニングとは、心身の状態をよりよい方向に整えることを指す。スポーツ選手にとってのコンディショニングは、フィットネス、スキル、メディカル、メンタル、栄養、用具、環境など様々な要因が考えられる。選手が最高の力を発揮し、よりよいパフォーマンスを生み出すために必要となるすべてのものがコンディション要因となり、目標とする試合で結果を出すためにそれらの要因を整えることがコンディショニングである。

トレーニングとコンディショニングの違いは、トレーニングが心身の状態をあるレベルからより高いレベルに引き上げることを目的としているのに対して、コンディショニングは心身の状態を最高の状態に整えることを目的にしている点である。心身の状態を把握する際、基礎的な情報として心拍数、血液性状、疲労感、睡眠、体重変化などの指標が用いられる。

1-5. 運動・栄養・休養のバランス

1-5-1. 健康の3原則と超回復

健康の3原則は、「**運動・栄養・休養**」である。これら3つのトータルバランスがとれていることが健康であると考えることができる。運動によって体を鍛え、栄養と休養をしっかりとすることでスキルだけでなく体力も免疫力も向上する（図1-9）。

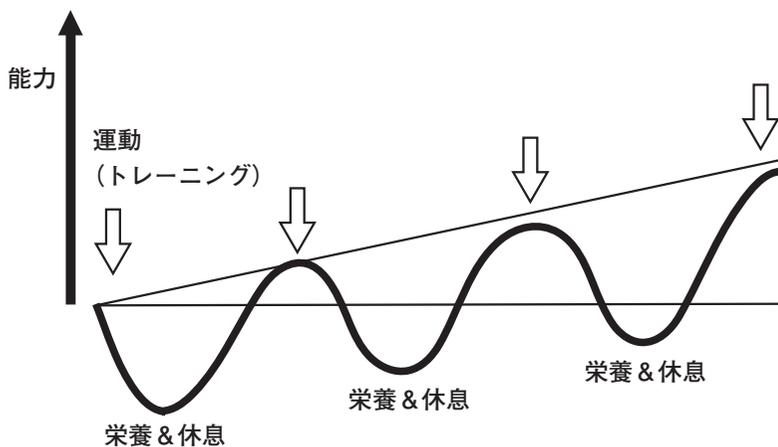


図1-9 トレーニングに伴う身体諸機能の向上

超回復は、運動や筋力トレーニングによって筋グリコーゲンの減少、筋線維などタンパク質の分解・損傷などが生じ、一時的に体力や筋力が低下するが、十分な休養と適切な栄養補給により運動・トレーニング前の状態を超えて回復することである。

運動には効果（功）と弊害（罪）の両面があり、諸刃の剣でもある。効果としては、健康の保持増進、体力向上、社会復帰に向けたリハビリテーション（運動療法）などがある。一方、弊害としては、スポーツ障害や過度の運動によるオーバートレーニングなどがあげられる。

1-5-2. オーバートレーニング症候群

適切な栄養と休養をとらないまま高負荷強度トレーニングを継続すると、ダメージが修復されず疲労が蓄積し、慢性疲労の状態になりやすい。これは、一般的に運動（スポーツ）の実施により生じた生理的な疲労が、十分に回復の過程をとられることなく積み重ねられた結果として生じたと考えられている（図 1-10）。

症候には軽症から重症まであり、初期には原因不明の競技成績の低下を訴えることが多い。進行すると易疲労感、全身倦怠感、睡眠障害、食欲不振、体重減少および集中力の欠如などを訴えるようになる。そして最悪の場合には、うつ状態に類似した精神異常を示すようになる（図 1-11）。

オーバートレーニング症候群の予防のためには、トレーニングを含めた日常生活での変化（起床時心拍数、運動トレーニングに対する心拍数変動、体重変動、食欲低下、自覚症状など）に関して注意深く観察することが重要である。

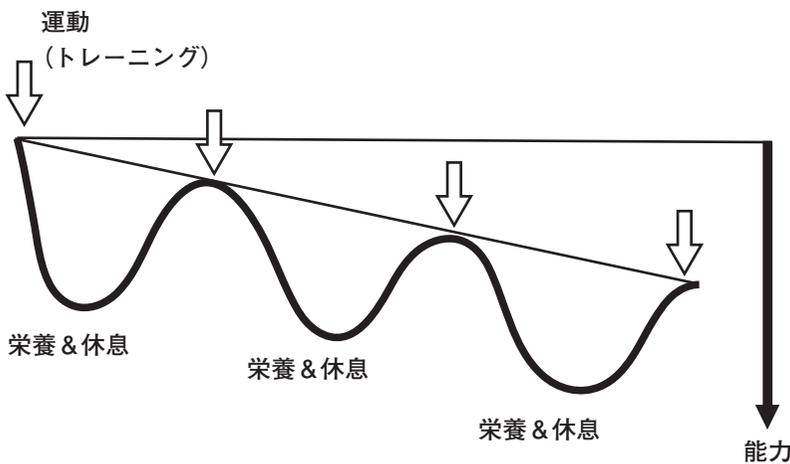


図 1-10 オーバートレーニングのメカニズム

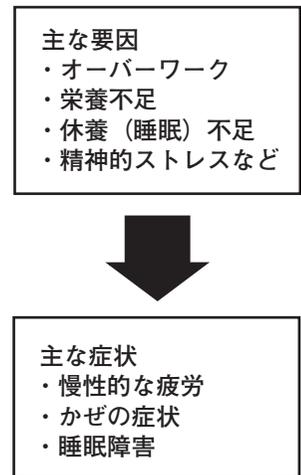


図 1-11 オーバートレーニングの症状と要因

1-5-3. 運動・食事・睡眠のタイミング

高負荷強度のトレーニングによって体の細胞・組織にダメージが生じ、血液中に細胞内物質が漏出する。特に、筋線維の損傷やコラーゲンの分解などが生じ、そのダメージの修復には、約1～2日（24～48時間）かかるといわれている。ダメージの修復には、成長ホルモンが不可欠であり、この分泌促進には食事と睡眠が重要である（図1-12）。

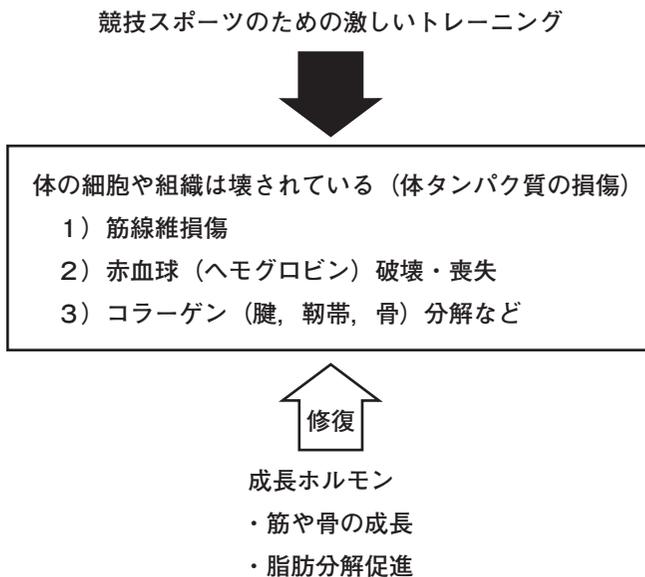


図1-12 ダメージの修復に必要な成長ホルモン

(1) 睡眠と成長ホルモン

成長ホルモンは、筋力トレーニングなどの高負荷強度トレーニング直後やノンレム睡眠*時に分泌が促進される。成長ホルモン分泌が促進される時間帯をうまく利用すると超回復によるトレーニング効果を高めることが期待される。

※ノンレム睡眠
眠り始めてから最初の3～4時間に出現する眼球が動かない眠りであり、浅い眠りから深い熟睡まで4段階に分けられる。

(2) 運動後のタンパク質と糖質の摂取

トレーニング終了後には、体タンパク質合成を活性化し、迅速なダメージの修復とエネルギー物質の再合成・補充が必要である。また、トレーニングによって体内エネルギー代謝が最大に動員されると、特定の物質の消耗が促され、グリコーゲンなどが消費・枯渇する。さらに、高負荷強度のトレーニングによって体内に特定の物質（乳酸など）が産生・蓄積される。

そこで、トレーニング終了後できるだけ早期（30分～1時間以内）にタンパク質と糖質を摂取するのが効果的である。トレーニング直後、筋のタンパク質合成と分解が最大に達しており、このタイミングでタンパク質

を摂取することは筋肉づくりに最も適した栄養摂取となる。つまり、トレーニング直後にインスリン分泌刺激作用のある糖質を摂取することは、タンパク質の分解を抑制することに有効である（図 1-13）。

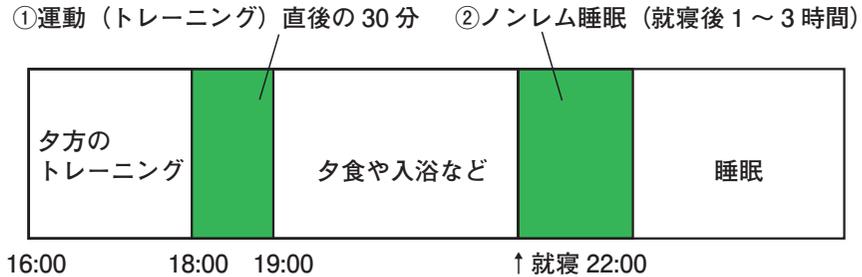


図 1-13 成長ホルモン分泌を促す運動・食事・睡眠のタイミング

確認問題

問 1 人体の構成要素（成分）について、誤っているのはどれか。2つ選べ。

- 人体を構成する基本的単位は、細胞である。
- 細胞膜の主な構成成分は、糖質である。
- 細胞外液には、 Na^+ が多く、細胞内液には K^+ が多い。
- 人の体重の約 60%は、水分である。
- 体脂肪率が高いと、体に含まれる水分量は多い。

問 2 細胞膜を介した物質の移動と輸送について、正しいのはどれか。

- 水溶性物質は、細胞膜を自由に通過する。
- 拡散では、低濃度から高濃度の側に物質（溶質）が移動する。
- 高濃度の溶媒が低濃度側の溶媒に移動する現象を浸透という。
- 酸素や二酸化炭素は、拡散によって細胞膜を通過できる。
- 能動輸送は、エネルギーを必要としない。

問 3 コンディショニングについて、誤っているのはどれか。2つ選べ。

- 起床時心拍数は、体調の変化を知る指標となる。
- 運動・栄養・休養のバランスが重要である。
- 超回復は、疲労－回復－超回復の 3 段階の過程をたどる。
- 筋力トレーニングによって筋線維には、微細な損傷が生じている。
- オーバートレーニング症候群は、突然発生する。

参考文献

- 1)河田光博, 樋口 隆 (編): シンプル解剖生理学, 南江堂, 2003.
- 2)桑名俊一, 荒田晶子 (編): 新版生理学, 理工図書, 2019.
- 3)小山勝弘, 安藤大輔 (編著): 運動生理学, 三共出版, 2013.
- 4)鈴木正成: 実践的スポーツ栄養学, 文光堂, 2015.
- 5)トレーニング科学研究会 (編): トレーニング科学ハンドブック, 朝倉書店, 2003.
- 6)中里浩一, 岡本 孝信, 須永 美歌子: 1 から学ぶスポーツ生理学, ナップ, 2016.
- 7)富樫健二 (編): スポーツ生理学, 化学同人, 2015.
- 8)本郷利憲, 廣重力, 豊田順一 (監修): 標準生理学, 第6版, 医学書院, 2007.
- 9)真島英信: 生理学, 文光堂, 2016.

第2章

運動とエネルギー供給機構

概要

食物は、動くためのエネルギーになったり、体をつくる材料になったり、それを円滑に行うための役割を果たしたりする。本章では、体内に入った食物がどのような過程を経て運動に必要なエネルギーとなるのかを学習する。

2-1. 生体のエネルギー

2-1-1. 栄養素とエネルギー

食物中に含まれる栄養素のうち、**炭水化物（糖質）**、**脂質（脂肪）**、**タンパク質**を**三大栄養素（熱源栄養素）**という。このうち、炭水化物や脂肪は熱産生や活動のためのエネルギーを産生し、タンパク質は体づくりには欠かせない栄養素である。その他の**ミネラル（無機質）類**や**ビタミン類（微量栄養素）**、**水**や**食物繊維**も体内環境の維持に重要な役割をもっている。これらの栄養素は、消化吸収され、代謝過程によって生命維持や運動に必要なエネルギーや体構成成分に変換されていく（表 2-1）。

表 2-1 エネルギー基質とエネルギー供給特性

熱源栄養素	エネルギー基質	エネルギーの供給特性	主要な供給経路
炭水化物	筋グリコーゲン	エネルギーの生成速度は速い～遅い 貯蔵量少なく短時間の供給	筋細胞内貯蔵 血中グルコースを取り込み、筋細胞で合成
	血中グルコース	エネルギーの生成速度は速い～遅い 肝臓からの供給である程度持続的	食物中炭水化物の消化吸収 肝臓からの供給（肝グリコーゲンの分解、糖新生による合成）
脂肪	筋中トリグリセリド	エネルギーの供給速度は遅い 酸素の供給が必要不可欠	筋肉内細胞組織貯蔵 筋細胞内貯蔵
	血中遊離脂肪酸	エネルギーの供給速度は遅い 脂肪組織からの供給により永続的 酸素の供給が必要不可欠	脂肪組織や肝臓のトリグリセリドの分解
タンパク質	筋中アミノ酸	エネルギーの供給量は少ない 一部のアミノ酸は直接分解される	血中アミノ酸の取組み 筋肉内タンパク質の分解
	血中アミノ酸	エネルギーの供給量は少ない 筋肉への供給 肝臓への運搬後に代謝（糖新生など）される	食物中タンパク質の消化吸収 体タンパク質の分解

2-1-2. アデノシン 3 リン酸（ATP）

摂取された栄養素は、代謝過程によってエネルギーや体構成成分に変換されていくが、筋収縮に必要なエネルギー源は、**ATP（adenosine triphosphate）**である。ATPはアデノシンと3つのリン酸が**高エネルギーリン酸結合**した形であり、ATPase（ATP分解酵素）により末端のリン酸が1つ離れてADP（adenosine diphosphate）になるときにエネルギー（ATP 1molあたり 7.3kcal）を生じる。このエネルギーによって筋が収縮し運動が生じる（図 2-1）。

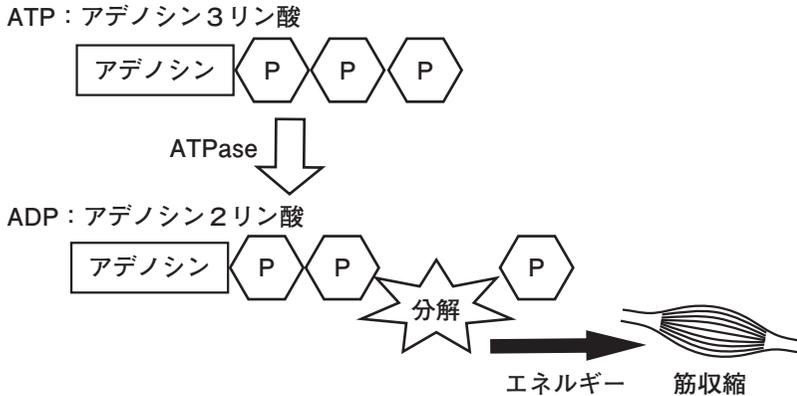
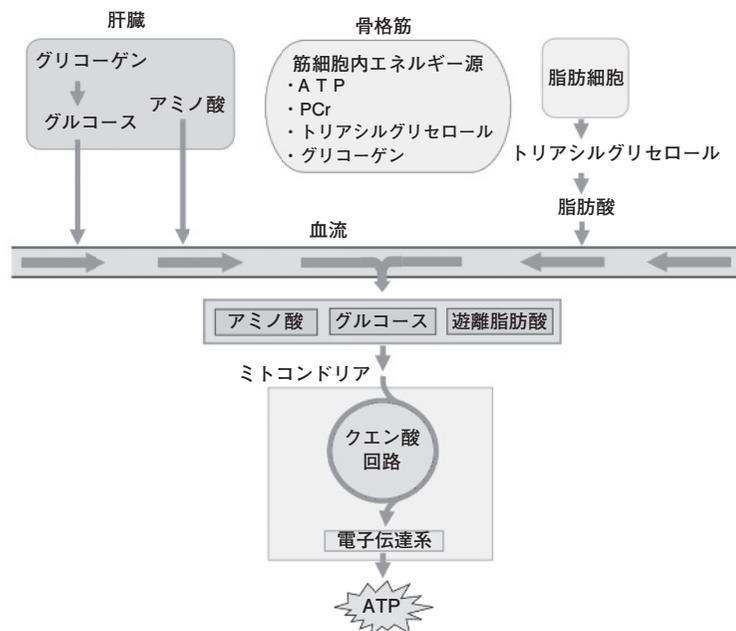


図 2-1 筋収縮のエネルギー源

2-1-3. エネルギー代謝と ATP 供給機構

骨格筋内に含まれている ATP は、高強度の運動を数秒間続けられる程度の量（骨格筋 1g あたり 3～8 μ mol）しかない。運動を続けるためには、ATP を筋線維内で合成する必要がある。ATP は、食事によって摂取された糖質、脂質、タンパク質が筋グリコーゲン、血中のグルコース（血糖）、トリグリセリド（脂質）、遊離脂肪酸、アミノ酸などのエネルギー

基質に変換され、代謝過程を経て産生される。さらに、長時間の運動では、筋中や血中のエネルギー基質だけでは足りず、肝臓や脂肪組織などに貯蔵されているものが動員される。このように、エネルギー基質から ATP を産生することをエネルギー代謝といい、その代謝過程を ATP 供給機構という（表 2-1, 図 2-2）。このエネルギー代謝には、酸素を使わない嫌氣的代謝と、酸素を必要とする好氣的代謝がある。



出展）桑名俊一ら，新版生理学，p136，図 5.10，理工図書，2019 から引用改変

図 2-2 筋におけるエネルギー源獲得方法

2-2. 運動時のエネルギー供給系

嫌氣的代謝で行われる運動を**無酸素性運動**、好氣的代謝で行われる運動を**有酸素性運動**という。

2-2-1. 無酸素性運動

骨格筋における嫌氣的代謝には、骨格筋に貯蔵されている**クレアチンリン酸 (phosphocreatine)**の分解 (**ATP-PCr 系***)とブドウ糖 (糖質)の分解 (**解糖系**)とがある。

ATP-PCr 系は、ATPの分解によって生じたADPとクレアチンリン酸の分解で生じたリン酸とが結合し (ローマン反応)、ATPを合成する。この反応では、短時間でATPを産生できるが、生じるATPはごく少なく、数秒程度の運動で消費されてしまう。

解糖系は、筋細胞内に**グルコース輸送体**を介して糖質 (グリコーゲンやグルコース)を取り込み、**ピルビン酸**へと変化させていく過程でATPを産生する経路である。この経路では、解糖系酵素であるホスホフルクトキナーゼ (PFK)などが反応を促進し、グリコーゲン1molからATPは3molを産生する* (図2-3)。

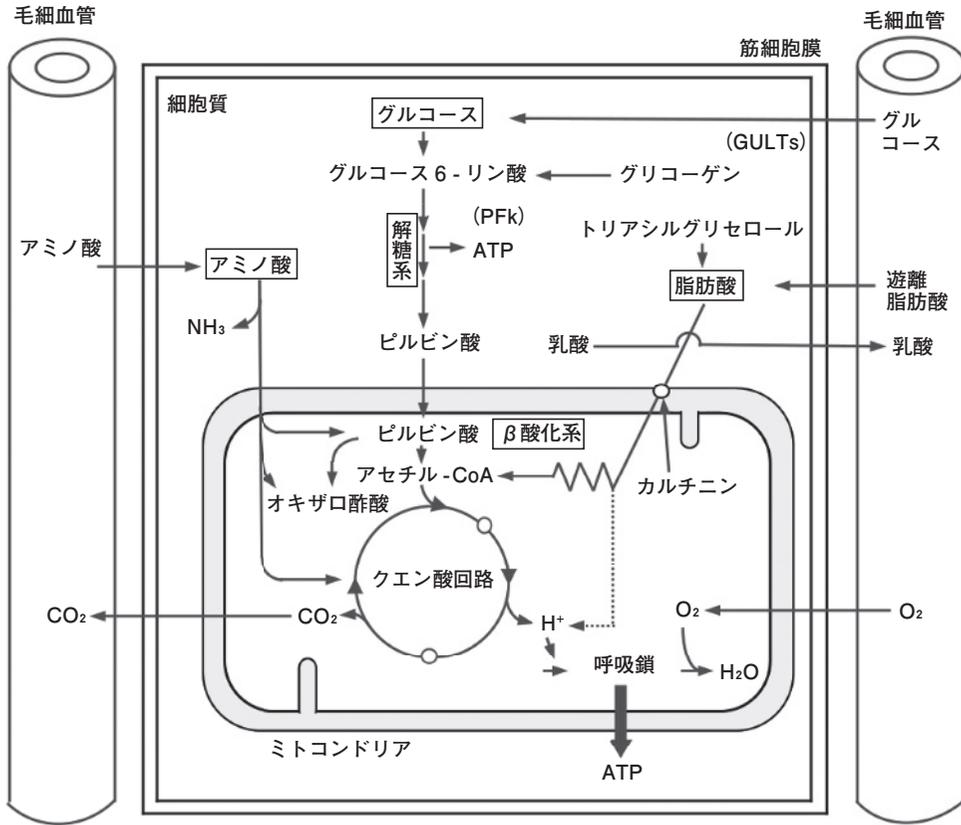
ATP-PCr系と解糖系の反応経路では酸素を必要とせず、細胞内で行われる比較的単純な化学反応であり、時間もかからないことから、短時間の激しい運動や短距離ダッシュなど、短い時間に大量のATPが必要なときに有利な代謝である。例えば、ATP-PCr系からエネルギーを供給できる時間は約8秒といわれ、陸上競技の100m走では、走るエネルギーの大部分を占める。また、解糖系によるエネルギー供給は約33秒といわれることから、ATP-PCr系の約8秒と解糖系からの約33秒の計41秒となり、陸上競技400m走の運動時間の大部分を占めることに相当する (図2-4)。このようにATP-PCr系と解糖系からエネルギーを供給される運動を**無酸素性運動**という。

さらに、このような短時間の激しい運動を行った際には、解糖系が亢進し、**ピルビン酸**が多量に生じ、**乳酸**と**H⁺** (水素イオン)が生成される。乳酸は、細胞に障害を及ぼすことから、血中に放出され**血中乳酸濃度**が高まる。血中の乳酸は肝細胞でピルビン酸に戻され、エネルギー産生のために再利用される (**糖新生^{とうしんせい}**)。また、H⁺は筋内環境を酸性にし、運動の継続を阻害する可能性があるが*、主に腎臓の炭酸水素イオン (HCO₃⁻)によって中和される。運動後のクールダウンは、筋への血流を促し、乳酸を肝臓に送り、炭酸水素イオンを筋肉中に送り込むための有効な手段である。

※ATP-CP系という表記もある。

※解糖系でのATP産生
解糖系では、グリコーゲン1molからATP4molが産生されるが、途中の反応で1molを使ってしまうため、産生されるATPは3molとなる。一方、グルコースから産生されるATPは、さらに途中の反応で1molを使い2molである。

※筋内環境の変化
筋内環境が酸性に傾くと、筋小胞体内Ca²⁺動態や酵素活性に影響し、筋の収縮機構がはたらくにくくなり、運動の継続を阻害する可能性がある。



出展) 桑名俊一ら, 新版生理学, p135, 図 5.9, 理工図書, 2019 から引用改変

図 2-3 共通代謝経路とエネルギー源の獲得

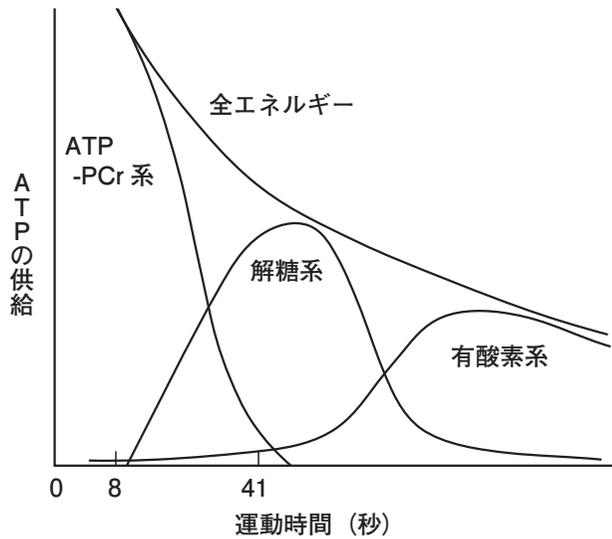


図 2-4 運動時間とエネルギー供給機構

2-2-2. 有酸素性運動

糖質（グリコーゲンやグルコース）をエネルギー基質とする解糖系で生じたピルビン酸は、運動強度が低く酸素の供給が十分であれば、ミトコンドリア内に入る。ミトコンドリアは二重膜構造であり、内膜は楕状のクリステを形成し、好氣的代謝（酸化系）の化学反応が行われている。ミトコンドリア内のピルビン酸は、アセチル-CoAに変換され、クレブス回路（クエン酸回路、TCA回路）とよばれる好氣的代謝の過程に入る。クレブス回路ではアセチル-CoA 1mol あたり 2mol の ATP が合成される。さらに、そこで生じた H^+ （水素イオン）と e^- （電子）は、電子伝達系の「酸化リン酸化」反応を経て、クレブス回路では 36mol の ATP と、水（ H_2O ）と二酸化炭素（ CO_2 ）とが産生される。この好氣的代謝には、コハク酸デヒドロゲナーゼ（SDH）などの酵素が関与し、化学反応のステップが多く、解糖系に比べて時間がかかるが、酸素が供給されていれば長時間のエネルギー産生が可能である（図 2-3）。

また、糖質とともに有効なエネルギー源となる脂質は、グリセロールと脂肪酸とに分解される。脂肪酸はミトコンドリア内の β -酸化によって生じたアセチル-CoA と H^+ がクレブス回路および電子伝達系の好氣的代謝の過程に入りエネルギーを産生することができる。例えば、脂肪酸の一種であるパルミチン酸 1mol からは ATP 129mol が合成される（図 2-3）。

さらに、長時間の有酸素性運動では、体に貯蔵された脂質（体脂肪）の分解も進み、グリセロールの一部は肝臓に運ばれ利用され、脂肪酸はエネルギー源となる（図 2-3）。なお、タンパク質は、主に体構成成分として利用され、エネルギー代謝に利用される量は少ない。

このように、酸素の供給が十分になされ、ATP を合成する基質があれば、無限に運動することが可能ということになる。

コラム：脂肪は運動開始 20 分後から利用される？

「脂肪は運動開始 20 分後から利用される」あるいは「脂肪は運動後 20 分たないと利用されない」といわれるが、血中にある脂肪酸は、常に利用されている。脂肪は、分解されミトコンドリアで利用されるまでに長い経路をたどるが、低強度の持久的な運動では、運動開始 20 分後ごろから、脂肪の分解が促進され血中の遊離脂肪酸濃度が上昇する。このことが、「脂肪は運動開始 20 分後から利用される」といわれる背景である。

確認問題

問1 筋活動のエネルギー供給について誤っているのはどれか。

- a. ATPは筋収縮の直接的なエネルギー源である。
- b. ATP-PCr系のエネルギー供給速度は速い。
- c. 解糖系の代謝産物として生成された乳酸の一部は、有酸素性運動で利用される。
- d. 解糖系のエネルギー供給速度は有酸素性運動時よりも速い。
- e. ATP産生量は、酸化系に比べ解糖系のエネルギー供給機構が多い。

問2 エネルギー供給系について誤っているのはどれか。

- a. 全力運動の場合、ATP-PCr系からは7～8秒間のエネルギーが供給できる。
- b. 解糖系で生じた乳酸の処理が間に合わない場合、乳酸はピルビン酸に変換される。
- c. 全力運動の場合、解糖系からは32～33秒間のエネルギーが供給できる。
- d. 酸化系エネルギー供給系では、糖質、脂質、酸素などが十分に供給される限り、無限にエネルギーを供給することができる。
- e. 酸化系では、脂肪酸も代謝されエネルギーを産生する。

問3 運動時のエネルギー供給系について正しいのはどれか。2つ選べ。

- a. 運動時のATP供給系において、ATP-PCr系が最も短時間でATPを合成できる。
- b. 筋組織内が無酸素状態になるような運動時には、乳酸からピルビン酸へと変換する代謝が亢進される。
- c. 運動により解糖系亢進すると筋細胞内 H^+ が蓄積し、筋内pHを低下させることが筋疲労の要因となる。
- d. 筋内ミトコンドリアでのエネルギー産生は、高強度・短時間運動で低強度・長時間運動より多い。
- e. タンパク質は、運動時に糖質や脂質よりも多くのATPを産生できる。

参考文献

- 1) 春日規克, 竹倉宏明 (編著): 運動生理学の基礎と発展 改訂版, フリースペース, 2010.
- 2) 桑名俊一, 荒田昌子 (編著): 生理学, 理工図書, 2016.
- 3) 桑名俊一, 荒田昌子 (編著): 新版生理学, 理工図書, 2019.
- 4) 須田和裕 (編): はじめて学ぶ健康・スポーツ科学シリーズ 生理学, 化学同人, 2015.
- 5) 八田秀雄: 乳酸と運動生理・生化学 - エネルギー代謝の仕組み -, 市村出版, 2009.
- 6) 村岡功 (編著): スポーツ指導者に必要な生理学と運動生理学の知識, 市村出版, 2013.
- 7) 和田正信, 三島隆章, 山田崇史: 筋収縮における乳酸の役割, 体育学研究 51, 229-239, 2006.