

呼吸と筋収縮で捉える「ATP」

到達目標

- ATPの合成・消費について具体的な現象の流れを言語化できる。
- 他の題材との複合問題として出題されたときに、必要な知識を引き出し、考えることができる。

知識力確認問題 1

Point

まずは、呼吸の際の「ATP」の合成についておさらいします。各反応で合成されるATP量と、反応式では相殺されて見えない水素などの動きに注目することがポイントです。

解答欄はありません。専用ノートを用意して、覚えるまで何度も解くことをおすすめします！

問題

次の(1)~(3)の文中の空欄1~17に最も適当な語句または数字を入れよ。

- (1) ATPを合成する代謝反応は、有機物の分解に酸素を用いる呼吸と、酸素を用いない [1] に大きく分けられる。[1] には、酵母が行う [2]、乳酸菌が行う [3] などがある。また、酸素の供給が不十分になった筋肉で行われる [4] は [3] と同じ経路で反応が進む。[1] ではグルコース ($C_6H_{12}O_6$) を呼吸基質とした場合、反応中間物として [5] が生成され、その過程でATPが合成される。これに対し、呼吸では [1] と同じ反応である [6] に続き、[7] や電子伝達系でもATPが合成される。
- (2) 電子伝達系では、[6] と [7] の脱水素酵素によって、水素イオン (H^+) と電子 (e^-) が [8] の内膜に運ばれる。そして、内膜上にあるシトクロムなどのタンパク質が e^- を伝達し、膜間腔 (内膜と外膜の間の腔所) に H^+ をくみ出すと、膜間腔とマトリックスの間で H^+ の濃度勾配が生じる。膜間腔にたまった H^+ が濃度勾配に従ってマトリックス側に移動するときに、[9] を通ることでATPが合成される。
- (3) タンパク質が呼吸基質となる場合、まず消化酵素によってアミノ酸まで分解される。アミノ酸はアミノ基転移酵素の働きを受け、アミノ基を [10] として遊離する [11] 反応によって有機酸となる。生じた有機酸は呼吸経路に入り、遊離した [10] は肝臓で [12] 回路によって毒性の低い [12] に変えられて腎臓から排出される。一方、脂肪が呼吸基質となる場合、まず消化酵素によって [13] と脂肪酸に分解される。脂肪酸は [14] とよばれる過程を経て [7] に入り、[13] は反応中間物として [6] に入る。呼吸商は、呼吸基質が炭水化物のときは約 [15]、タンパク質のときは約 [16]、脂肪のときは約 [17] となる。

解答

- (1) 1…発酵 2…アルコール発酵 3…乳酸発酵 4…解糖 5…ピルビン酸
6…解糖系 7…クエン酸回路
- (2) 8…ミトコンドリア 9…ATP合成酵素
- (3) 10…アンモニア 11…脱アミノ 12…尿素 13…モノグリセリド 14… β 酸化
15…1.0 16…0.8 17…0.7

解説&要点

(1)・(2) 発酵, 解糖

酸素を用いずに有機物を分解して ATP を合成する代謝反応を**発酵**という。高校生物では、嫌気条件下における代謝反応として、エタノールを最終産物とする**アルコール発酵**と、乳酸を最終産物とする**乳酸発酵, 解糖**について主に学習する。

	行う生物 (場所)	化学反応式	ATP 合成
アルコール発酵	酵母	$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$ (グルコース) (エタノール)	2ATP
乳酸発酵 解糖	乳酸菌 筋肉	$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_3H_6O_3$ (グルコース) (乳酸)	2ATP

呼吸

呼吸の過程は大きく分けて、細胞質基質で行われる**解糖系**, ミトコンドリアのマトリックスで行われる**クエン酸回路**, ミトコンドリアの内膜で行われる**電子伝達系**の3つからなる。

	行う場所	化学反応式	ATP 合成
解糖系	細胞質基質	$C_6H_{12}O_6 + 2NAD^+ \longrightarrow 2C_3H_4O_3 + 2(NADH + H^+)$	2ATP
クエン酸回路	ミトコンドリアのマトリックス	$2C_3H_4O_3 + 6H_2O + 8NAD^+ + 2FAD \longrightarrow 6CO_2 + 8(NADH + H^+) + 2FADH_2$	2ATP
電子伝達系	ミトコンドリアの内膜	$10(NADH + H^+) + 2FADH_2 + 6O_2 \longrightarrow 12H_2O + 10NAD^+ + 2FAD$	34ATP (最大)
反応全体		$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 12H_2O$	38ATP (最大)

(3) 呼吸商

呼吸基質として炭水化物 (グルコース), タンパク質 (アミノ酸のロイシン), 脂肪 (トリスチアリン) が分解されたときの化学反応式と呼吸商は次のようになる。

呼吸基質	化学反応式	呼吸商
炭水化物	$C_6H_{12}O_6$ (グルコース) + $6H_2O$ + $6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 12H_2O$	$6 \div 6 = 1.0$
タンパク質 (アミノ酸)	$2C_6H_{13}O_2N$ (ロイシン) + $15O_2 \longrightarrow 12CO_2 + 10H_2O + 2NH_3$	$12 \div 15 = 0.8$
脂肪	$2C_{57}H_{110}O_6$ (トリスチアリン) + $163O_2 \longrightarrow 114CO_2 + 110H_2O$	$114 \div 163 \approx 0.7$

☑ 覚えておきたい

解糖は、基質に筋肉中のグリコーゲンや血液中のグルコースが用いられ、乳酸発酵と同様の反応経路をたどる。

🔍 発想の鍵

これらの生物が代謝を行うのは、最終産物を得るためではない。ピルビン酸を最終産物に変えることで、ATP の合成に必要な NAD^+ を再生するためである。

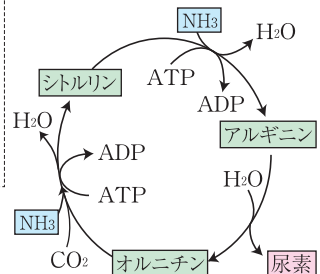
🔍 発想の鍵

水素イオン, 二酸化炭素, 酸素の出入りに注目しよう。

水素イオン	二酸化炭素	酸素
出: $4H^+$		
出: $20H^+$	出: $6CO_2$	
入: $24H^+$		入: $6O_2$
	出: $6CO_2$	入: $6O_2$

☑ 覚えておきたい

アンモニアを取り込んで、尿素を生成する回路反応を**尿素回路** (オルニチン回路) という。



知識力確認問題 2

Point

次は、筋収縮の際の「ATP」の消費についておさらいします。『知識力確認問題 1』で学習した原理によって合成された ATP が、どのように消費されるのかをイメージしながら解いてみましょう。

解答欄はありません。専用ノートを使って、覚えるまで何度も解くことをおすすめします！

問題

次の(1)~(3)の文中の空欄 1 ~ 14 に最も適当な語句を入れよ。

- (1) 筋肉は [1] とよばれる細胞が束になってできており、その中には [2] とよばれる繊維状の構造が多数並んでいる。[2] は筋小胞体やミトコンドリアに取り囲まれている。そして [2] には、太さの異なる 2 種類のフィラメントが含まれていて、細い方を [3] フィラメント、太い方を [4] フィラメントという。骨格筋には横縞がみられるが、それは、これらのフィラメントが規則正しく整列しており、細い [3] フィラメントのみからなる部分は明るく見え、太い [4] フィラメントのある部分は暗く見えるためである。明るい部分は [5]、暗い部分は [6] という。[5] の中央には [7] とよばれる仕切りがあって、[7] から [7] までをサルコメア（筋節）という。サルコメアは筋収縮の単位となる。
- (2) 筋収縮は、[3] フィラメントが [4] フィラメントの間に滑り込むことで起こると考えられている。これを [8] 説という。運動神経から神経伝達物質（アセチルコリン）が放出され、[1] の細胞膜が興奮すると、その興奮が [9] とよばれる細い管によって筋小胞体に伝わり、筋小胞体からカルシウムイオン (Ca^{2+}) が放出される。 Ca^{2+} が [10] に結合すると、[3] フィラメントと [4] フィラメントの結合を妨害している [11] が移動し、[3] フィラメントと [4] フィラメントが結合できるようになる。[4] フィラメントが ATP のエネルギーを用いて [3] フィラメントをたぐり寄せる結果、サルコメアの幅が短くなり、筋肉が収縮する。
- (3) 運動をする場合、筋収縮に必要な ATP は [12] とよばれる物質と ADP から合成される。さらに、運動が持続すると、[13] や解糖によって ATP が供給される。また、運動を行っていない安静時には、[14] と ATP から再び [12] が合成され、エネルギーが蓄えられる。このような仕組みによって、筋肉では ATP が枯渇しにくいようになっている。

解答

- (1) 1…筋繊維（筋細胞） 2…筋原繊維 3…アクチン 4…ミオシン 5…明帯
6…暗帯 7…Z 膜
- (2) 8…滑り 9…T 管 10…トロポニン 11…トロポミオシン
- (3) 12…クレアチンリン酸 13…呼吸 14…クレアチン

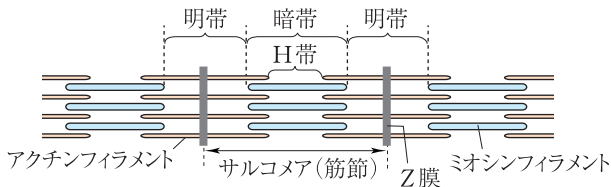
解説&要点

(1) 筋肉の構造

筋肉は、収縮性をもつ繊維状の細胞である**筋繊維**（筋細胞）からなり、筋繊維の細胞質には、筋小胞体に包まれた多数の**筋原繊維**とよばれる構造が束になって存在する。

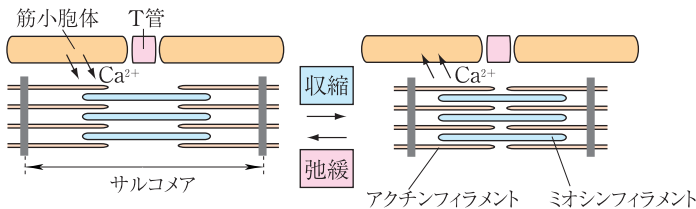
筋原繊維では、細い**アクチンフィラメント**と太い**ミオシンフィラメント**という2種類の繊維状の構造が、**Z膜**によって仕切られた単位で規則正しく配列している。この単位を**サルコメア**（筋節）とよぶ。

ミオシンフィラメントがある部分は顕微鏡で見ると暗く見えるので**暗帯**、ない部分は明るく見えるので**明帯**とよぶ。また、暗帯のうち、ミオシンフィラメントのみからなる部分を**H帯**とよぶ。



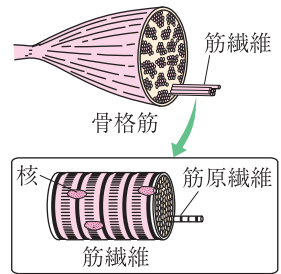
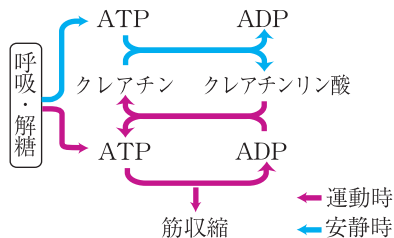
(2) 筋収縮の仕組み

筋収縮は、ミオシンフィラメントやアクチンフィラメント自体が縮むのではなく、それらの長さは変わらないまま、アクチンフィラメントがミオシンフィラメントの間に滑り込むことで起こると考えられている（**滑り説**）。



(3) 筋収縮のエネルギー

筋収縮のエネルギーとしては、呼吸や解糖で合成されるATP以外に、**クレアチンリン酸**と**ADP**から合成されるATPが用いられる。安静にしていると、クレアチンとATPからクレアチンリン酸が合成され、エネルギーが蓄積される。



覚えておきたい

ミオシンの頭部は**ATP分解酵素**として働く。ミオシンは、ATPを分解するときに頭部の構造を変化させることで、アクチンフィラメントをたぐり寄せることができる。

発想の鍵

筋収縮時のATPの供給経路には、**クレアチンリン酸とADPの反応**、**呼吸**、**解糖**の3種類がある。

記述力・考察力確認問題

Point

次は、『知識力確認問題1・2』を踏まえて取り組む問題です。それぞれの問題で取り上げられている反応について、ATPの収支はプラス（合成）なのかマイナス（消費）なのかを考えながら解いてみましょう。

解答欄はありません。専用ノートを使って、記述力・考察力を向上させましょう！

問題

次の文1, 2を読み、問1～問4に答えよ。

[文1] 生物は、炭水化物（糖類）やタンパク質などの複雑な化合物を分解することにより、生命活動に必要なエネルギーを得ている。この反応は異化とよばれ、大きく2種類に分けられる。1つは酸素を使わないアルコール発酵や乳酸発酵などで、もう1つは酸素を使う呼吸である。グルコース（ $C_6H_{12}O_6$ ）を呼吸基質とした場合、これらの代謝系では、ピルビン酸（ $C_3H_4O_3$ ）を生成するまでの過程（解糖系）は共通であり、いずれもATPという生命活動で使い得るエネルギーを蓄えた物質を合成する。

問1 呼吸について、次の(1)～(3)の問いに答えよ。

- (1) 呼吸は、解糖系の他に2段階の過程からなる。反応順に、その2段階の過程の名称を答えよ。
- (2) 真核生物の細胞内において、(1)で答えた2段階の過程が行われる細胞小器官の断面図を描け。また、その細胞小器官のうち、(1)で答えた2段階の過程が行われる場所はどこか。過程の名称と行われる場所の名称をそれぞれ図に書き込め。
- (3) グルコース1分子を呼吸基質とした場合の、呼吸全体の化学反応式を示せ。なお、生じるATPが最大何分子であるかもわかるように書くこと。

問2 アルコール発酵、呼吸において、それぞれグルコース1.8gを分解して生じるATPは最大何gか。グルコースの分子量を180、ATPの分子量を507として計算し、計算過程も示すこと。

[文2] カエルからふくらはぎの筋肉（骨格筋）を摘出し、低温においた50%グリセリン溶液に長時間浸した。このような処理を行った筋肉をグリセリン筋という。グリセリン筋は細胞膜などの膜構造が破壊されており、ATPやクレアチンリン酸、および水溶性のタンパク質などは流失しているが、アクチンフィラメントやミオシンフィラメントなど筋収縮に必要な構造は残っている。グリセリン筋に対し、摘出しただけの筋肉（50%グリセリン溶液に浸していない筋肉）を、ここでは生筋とよぶこととする。

生筋に電気刺激を与えると収縮するが、ATP水溶液あるいはクレアチンリン酸水溶液を滴下しても収縮しなかった。これに対し、グリセリン筋にATP水溶液を滴下すると収縮した。

問3 グリセリン筋に次の(a), (b)の操作を施した場合, それぞれどうなると考えられるか。収縮する場合は○, 収縮しない場合は×で答えよ。

(a)…電気刺激を与える。 (b)…クレアチンリン酸水溶液を滴下する。

問4 アクチンフィラメントとミオシンフィラメント, およびアクチンフィラメントが結合したZ膜の位置関係が図1のようなものだったとする。これについて, 次の(1)~(3)の問いに答えよ。

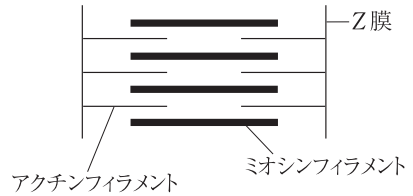


図 1

- (1) あるZ膜と隣接するZ膜の間の構造は, 筋収縮を行う構造単位といえる。この構造単位のことを何というか。名称を答えよ。
- (2) 筋肉が収縮していないときの模式図が図1のようなものだったとして, 収縮しているときの様子を図1に倣って図示せよ。
- (3) グリセリン筋から一部を切除し, その長さを調べたところ18 mmだった。ATPを滴下すると収縮してその長さは11 mmに変化した。この長さの変化にかかった時間が0.04秒, 収縮していないときの(1)の構造単位の幅(長さ)が2.2 μmであると仮定して, ミオシンフィラメントがアクチンフィラメントをたぐり寄せる速度(単位: μm/秒)を計算せよ。なお, 計算式(計算過程)も示し, 答が割り切れない場合は小数第2位を四捨五入して小数第1位まで答えること。

解 答

問1 (1) 1段階目: クエン酸回路 2段階目: 電子伝達系

(2) 右図

(3) $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$



問2 アルコール発酵…グルコース1分子の分解でATPは2分子生じるので

$$1.8/180 \times 2 \times 507 = 10.14 \quad \text{答} \quad 10.14 \text{ g}$$

呼吸…グルコース1分子の分解でATPは最大38分子生じるので

$$1.8/180 \times 38 \times 507 = 192.66 \quad \text{答} \quad 192.66 \text{ g}$$

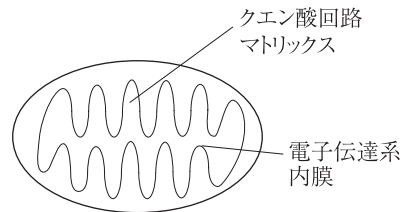
問3 (a)…× (b)…×

問4 (1) サルコメア (筋節)

(2) 右図

$$(3) \{ (18 - 11) \times 10^3 \div (18 \times 10^3 \div 2.2) \div 2 \} \div 0.04$$

$$= 10.69 \dots \approx 10.7 \quad \text{答} \quad 10.7 \mu\text{m/秒}$$



解説&要点

📍のつけどころ

〔文1〕は、ミトコンドリアでの「ATP」の合成について書かれている。呼吸の各段階の内容とそれらの起こる場所、合成されるATPの量を押さえておきたい。

一方、〔文2〕は、筋肉での「ATP」の供給と消費について書かれている。クレアチンリン酸が関わるATPの供給方法や、サルコメアの収縮時と弛緩時の様子をイメージできるとよい。

問1 (1)・(2) クエン酸回路

ミトコンドリアのマトリックスで行われる反応。クエン酸回路という名称は、ピルビン酸からつくられたアセチル CoA が回路に入ると、まずクエン酸となることから名づけられた。

電子伝達系

ミトコンドリアの内膜で行われる反応。呼吸の過程の中で、最も多くのATPが生成されることがポイントである。

(3) 「解答」参照。生物の問題で呼吸の化学反応式を求められたときは、両辺の水 (H_2O) を省略せずに書いた方がよい。

問2 ATP量の計算

この問では、グルコース 1.8 g が分解される。よって、分解されたグルコースは $(1.8/180)\text{mol}$ である。アルコール発酵では、グルコース 1 分子の分解でATPが2分子生じるので、グルコース 1.8 g を分解したときに生じるATPは $(1.8/180 \times 2)\text{mol}$ である。よって、ATPの質量 [g] は

$$1.8/180 \times 2 \times 507 = 10.14 \text{ [g]}$$

呼吸では、グルコース 1 分子の分解でATPが最大38分子生じるので、上の式の中の下線部「2」を「38」に変えるだけでよい。よって

$$1.8/180 \times 38 \times 507 = 192.66 \text{ [g]}$$

問3 生筋

生筋を構成する各細胞（筋繊維）には細胞膜をはじめとする膜構造が残っており、内部にはATPやクレアチンリン酸が存在する。また、これらの物質は細胞膜を透過できず、なおかつ外部から添加しても筋繊維を刺激することがないので、生筋にATPやクレアチンリン酸を添加しても収縮は起こらない。ただし、電気刺激を与えると、筋小胞体からカルシウムイオン (Ca^{2+}) が放出され、ミオシンフィラメントとアクチンフィラメントが相互作用できるようになり、ATPが分解されて収縮が起こる。

採点基準

問1(2)

ミトコンドリアの図示では、「2枚の膜からなる」こと、「内膜が深く折れ込んでひだ状の構造を形成している」ことを表せていれば正解。

🔍発想の鍵

グルコースの分子量は180なので、グルコース 1 mol は 180 g である。同様に、ATP 1 mol は 507 g である。

グリセリン筋

グリセリン筋はATPが流失しており、収縮に必要なエネルギーがないので、電気刺激を与えても収縮しない。また、クレアチンリン酸はADPをATPに変換するが、クレアチンリン酸そのものは筋収縮のエネルギーにはならないので、クレアチンリン酸水溶液を滴下してもグリセリン筋は収縮しない。

グリセリン筋はATP水溶液を滴下すれば収縮する。これに対し、生筋はその細胞内にATPが存在するにもかかわらず、電気刺激を与えない限り収縮しない。これは、生筋内の筋原繊維にはミオシンフィラメントとアクチンフィラメントの相互作用を阻害する仕組み（トロポニンやトロポミオシン）が存在するためである。

問4 収縮速度の計算

(1)・(2) 「解答」参照。

(3) 速度を求めるには、距離を時間で割ればよい。0.04秒という時間は与えられているので、このときミオシンフィラメントがアクチンフィラメントをたぐり寄せた距離を考えればよい。

1個のサルコメアが縮んだ距離を求めるには、まず18mm($18 \times 10^3 \mu\text{m}$)のグリセリン筋には何個のサルコメアがあるかを求める。収縮していないときのサルコメアの幅（長さ）は2.2 μm なので

$$\frac{18 \times 10^3}{2.2} \text{ [個]}$$

18mmのグリセリン筋が(18-11=)7mm($7.0 \times 10^3 \mu\text{m}$)縮んだので、1個のサルコメアが縮んだ距離は

$$(7.0 \times 10^3) \div \frac{18 \times 10^3}{2.2} = \frac{77}{90} \text{ [}\mu\text{m]}$$

アクチンフィラメントはサルコメアの両側からミオシンフィラメントの間に滑り込むので、0.04秒間にミオシンフィラメントがアクチンフィラメントをたぐり寄せる距離はその半分である。したがって、その速度は、次のような式で求められる。

$$\left(\frac{77}{90} \div 2 \right) \div 0.04 = 10.69 \dots \approx 10.7 \text{ [}\mu\text{m/秒]}$$

発想の鍵

グリセリン筋の場合、ADPも流失している。

発想の鍵

グリセリン筋は、トロポニンやトロポミオシンが失われているため、ATPさえ存在すれば収縮を起こす。

別解

18mmの筋肉が7mm収縮した。筋肉はサルコメアが多数重なってできており、1個のサルコメアの収縮の割合は、筋肉全体の収縮の割合と同じと考えてよい。したがって、1個のサルコメアが縮んだ距離は

$$2.2 \times \frac{7}{18} = \frac{77}{90} \text{ [}\mu\text{m]}$$

以降は「解説」と同じ。

間違えた箇所の解説を確認したら、次は添削問題に挑戦しましょう。

記述問題は完璧に書けなくてもまだ大丈夫。

キーワードを思い浮かべ、とにかく書き始めてみるのが大切です！

どうしても書き始められないときは、巻末のヒントを見ましょう。▶▶▶