1 問題

《ATP 1》

次の文章を読み，**問 1** ～**問 5** に答えよ。 (25 点)

(a)呼吸は，材料（呼吸基質）の炭水化物（糖類），脂肪，タンパク質を酸化分解することにより，エネルギーを得る反応ということができる。呼吸基質としては主に炭水化物，とくにグルコース（ブドウ糖，$C_6H_{12}O_6$）が利用され，獲得されたエネルギーは，大半が ATP の形で生体内に蓄えられる。生物は，必要に応じて ATP を分解してエネルギーを取り出し，さまざまな生命活動に利用している。

1918 年，マイヤーホフは，筋収縮にともなって(b)筋肉中に乳酸が生じることから，乳酸の発生が筋収縮のエネルギー供給に関係すると提唱した。しかし，1930 年，ルンズゴールは，無酸素条件下で解糖阻害剤中に浸しておいた筋肉でも筋収縮が起こることを実証し，マイヤーホフの考えを否定した。さらに，この筋収縮が起こらなくなったときにクレアチンリン酸含有量がゼロになることから，この物質が筋収縮のエネルギー源であると考えた。1929 年，ローマンは ATP を発見し，さらに 1934 年，ADP とクレアチンリン酸の間でリン酸をやりとりするクレアチンキナーゼという酵素を発見した。1939 年，エンゲリガルトは筋肉中のタンパク質 [1] が ATP 分解酵素（ATP アーゼ）としての作用をもつことを示した。1941 年，リップマンは細胞内のエネルギー転移機構についての一般的な仮説を導き出した。すなわち，すべての細胞に共通する ATP は [2] 結合をもち，これによって細胞内のエネルギー生成機能とエネルギー消費機能を結びつけていると提唱した。この仮説は直ちに支持された。しかし，(c)筋収縮にともなう ATP の消費を実験的に示すことは簡単ではなかった。1962 年になってやっと，(d)ある阻害剤を用いた実験により筋収縮にともなう ATP の消費が実証された。このとき，筋肉 1.0 g を 1 回収縮させるのに 6.0×10^{-7} mol の ATP が ADP に分解され，筋肉は 1.25×10^{-2} J 分の仕事を行うことが測定された。この測定結果から，筋肉が高いエネルギー変換効率をもつことも示されたのである。一方，1954 年にはハンソンとハクスリーによって筋収縮の仕組みに関する新しい仮説である [3] 説が提唱された。これは電子顕微鏡写真と X 線回折法によって裏打ちされた仮説であった。思いもよらぬ説であるとともに，直感的にその正しさが理解できるものであったため大きな反響をよんだ。

ここでの「エネルギー変換効率」とは，ATP の化学エネルギーが仕事の運動エネルギーに変換される効率のことをいう。

問 1 文中の空欄 1 ～ 3 に入る最も適当な語を答えよ。 (6 点)

問 2 下線部(a)に関連して，細胞内には解糖系やクエン酸回路における脱水素反応で生じる水素イオンと電子を受け取る補酵素が存在する。補酵素には還元型と酸化型があり，水素イオンと電子を受け取ることで還元型補酵素となる。一方，電子伝達系で水素イオンと電子を放出した補酵素は，再び水素イオンと電子を受け取ることができる酸化型補酵素となる。なお，細胞内で酸化型補酵素が不足すると，脱水素反応が進まなくなる。これについて，次の(1)，(2)の問いに答えよ。

(1) 呼吸の中で酸素が直接関わるのは電子伝達系だけだが，酸素がない状態では，電子伝達系だけではなくクエン酸回路も進まなくなる。この理由を，電子伝達系で起こる反応を踏まえて説明せよ。 (3 点)

(2) 発酵など酸素を用いない代謝系においてグルコースが分解される際にも，還元型補酵素が生じる。代謝の際に酸素を用いない（電子伝達系をもたない）生物ではどのようにして還元型補酵素を再び酸化型補酵素に戻しているか。乳酸発酵を行う乳酸菌を例に挙げて，簡潔に述べよ。 (3 点)

問 3 下線部(b)について，この乳酸はどのような反応により生じたか。反応名やもととなる物質名を挙げて，簡潔に述べよ。 (3 点)

問 4 下線部(c)，(d)について，次の(1)，(2)の問いに答えよ。

(1) 下線部(c)について，「ATP 含有量自体が少ないこと」以外にも，筋肉に備わったある仕組みのために筋収縮にともなう ATP の消費は実証されにくかった。それはどのような仕組みか。リード文の内容を踏まえ，簡潔に述べよ。 (3 点)

(2) (1)より，下線部(d)で用いた阻害剤はどのような作用をもつと考えられるか。簡潔に述べよ。 (3 点)

問 5 1.0 mol の ATP が ADP に分解されると，30.5kJ のエネルギーが放出される。このことと，リード文中の数値をもとに，筋肉 1.0g が 1 回収縮したときのエネルギー変換効率 (%) を求め，計算式とともに示せ。なお，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 位まで求めること。 (4 点)

解 答

問 1 1…ミオシン　2…高エネルギーリン酸　3…滑り

問 2 (1) 酸素がないと，電子伝達系で還元型補酵素を酸化型補酵素に戻すことができない。そのため，細胞内で水素イオンと電子を受け取る物質が不足し，クエン酸回路での脱水素反応が進まなくなるから。

(2) ピルビン酸を還元して乳酸にすることで，還元型補酵素から水素イオンと電子を放出させる。

別解 還元型補酵素のもつ水素イオンと電子をピルビン酸と反応させ，乳酸にすることで酸化型補酵素に戻す。

問 3 解糖により，グルコースや筋肉中のグリコーゲンが分解されることで生じた。

問 4 (1) 筋収縮にともない ATP が分解されて生じた ADP とクレアチンリン酸から，直ちに ATP が再合成される仕組み。

(2) ADP とクレアチンリン酸から ATP が再合成されることを阻害する作用をもつ。

別解 クレアチンキナーゼを阻害する作用をもつ。

問 5 $\dfrac{1.25\times10^{-2}}{6.0\times10^{-7}\times30.5\times10^{3}}\times100=68.30\cdots\fallingdotseq68.3$　答 68.3 %

解　説

のつけどころ

問 1，**3** ～ **5** は，筋肉での ATP の供給と消費についてさまざまな角度から考える問題である。筋肉に ATP を供給する 3 つの経路であるクレアチンリン酸と ADP の反応，呼吸，解糖が，どのように補い合っているのかに注目しよう。『**導入**』でおさらいした，筋収縮のエネルギーについて思い出そう。

問 2 は，呼吸や発酵の際の水素イオンと電子の授受についての考察問題である。最終的な化学反応式だけではなく，途中で相殺される水素イオンと電子の動きや，二酸化炭素，酸素の動きも理解しておきたい。『**導入**』で確認した，各反応段階における物質の動きに関する知識を生かそう。

問 1　「**解答**」参照。

問 2　(1)　設問文の最後に「酸化型補酵素が不足すると脱水素反応が進まなくなる」とある。また，ここで考える「電子伝達系で起こる反応」とは，解糖系やクエン酸回路で生じた還元型補酵素を酸化型補酵素の状態に戻すことである。

酸化型補酵素は細胞内に無限に存在するわけではない。細胞内のすべての酸化型補酵素が水素イオンと電子と結合して還元型補酵素になると，「**解答**」に述べた理由により，呼吸全体の反応が止まってしまうのである。

(2)　酸素を用いない代謝系においても，1 分子のグルコースを 2 分子のピルビン酸に分解する過程で差し引き 2 分子の ATP が合成され，2 分子の還元型補酵素が生じる。このとき生じた還元型補酵素も，酸化型補酵素に戻さなければ，(1)で述べたように水素イオンと電子を受け取る物質が不足して反応が止まってしまう。そのため，乳酸菌はピルビン酸を乳酸へと還元することで，還元型補酵素を酸化型補酵素に戻しているのである。

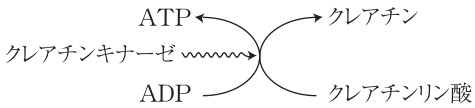
発想の鍵

酸素がないとクエン酸回路は進まないという問題を通して，各反応段階のつながりを意識しよう。

◀酵母がアルコール発酵を行う場合は，ピルビン酸から脱炭酸反応を経て生じたアセトアルデヒドをエタノールへと還元することで，還元型補酵素を酸化型補酵素に戻している。

問 3　筋肉でグルコースが乳酸に分解される過程を**解糖**という。動物細胞内には多数のグルコースが結合した**グリコーゲン**が顆粒の状態で蓄積されており，解糖では主にグリコーゲンが乳酸へと分解される。

問 4　筋繊維（筋細胞）内で ATP が消費されると，クレアチンキナーゼの作用によって，直ちに ADP とクレアチンリン酸から ATP が再合成され，消費された ATP が補填される。



そのため，酸素のない条件下で，なおかつ解糖を阻害する薬剤，およびクレアチンキナーゼを阻害する薬剤を添加した状態で筋肉を収縮させることにより，初めて筋収縮にともなう ATP の消費を測定することが可能になったのである。

問 5　ここでの「エネルギー変換効率」とは，放出される全（化学）エネルギーに対する，仕事に用いられる（運動）エネルギーの割合のことを指すと解釈できる。6.0×10^{-7} mol の ATP が分解される際に放出されるエネルギーは，$6.0\times10^{-7}\times30.5\times10^{3}$〔J〕，その際に仕事に用いられるエネルギーは 1.25×10^{-2}〔J〕であるので，「**解答**」のように計算すればよい。

プラスα

安静時の筋肉中には，ATP の 4 ～ 5 倍量のクレアチンリン酸が存在しており，ATP を少量消費した場合には，クレアチンリン酸と ADP から ATP が供給される。ATP を多量に消費した場合には，クレアチンリン酸と ADP からだけでは ATP の供給が追いつかないため，グリコーゲンの嫌気的な分解により ATP が合成される（解糖）。緩やかな運動の場合は，酸素の供給が間に合うため呼吸により ATP が合成されるが，激しい運動の場合は，酸素の供給が間に合わないため解糖により ATP が合成される。