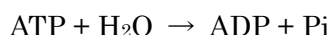


2 生体のエネルギー

ヒトは呼吸が停止すると容易に死に至る。しかし、水分さえ供給されれば一週間や10日は絶食しても死ぬことは無い。そもそも死に至る根本的な要因は、細胞の事故死をもたらすような物理的な破壊が無いとすれば、エネルギー供給が途絶えることである。ヒトは活動していればもちろんのこと、なにもせずに安静にしているでも体内の各部はエネルギーを必要とする。寝ているときでも心臓は動き続けているし、意識せずとも血液や骨、体をつくるタンパク質は作られている。脳は活動を続けるためには電気伝導を維持しなければならない。すなわちエネルギーは常に消費され続けている。エネルギー保存則が成り立つ以上、体にはどこからかエネルギーが供給されなければならない。

2-1 エネルギー源

ヒトに限らず、全ての生き物では生きている状態を維持するためのエネルギーとして **ATP** (アデノシン三リン酸) から得るエネルギーが使われる。反応の全体をみると、ATP と水との反応によって **ADP** (アデノシン二リン酸) とリン酸になる過程で発生するエネルギーが消費される。



ATP は以下のようにリン酸部分が高エネルギー結合をしたものである。つまり、図の～で描かれた部分は高いエネルギーを与えてその結合が作られたもので、逆にこれを切り離す時には高いエネルギーが発生する。つまり ATP が ADP になるときに 1 モルあたり 7.3 kcal のエネルギーが発生すると言われている。

リン酸とは 5 酸化リンが種々の程度に水と結合して生じる一連の酸の総称であり、一般的な化学式は $m\text{P}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ と書ける。HPO₃: メタリン酸、H₃PO₄: オルトリン酸、H₄P₂O₇: ピロリン酸であるが、オルトリン酸を単にリン酸ということが多い。

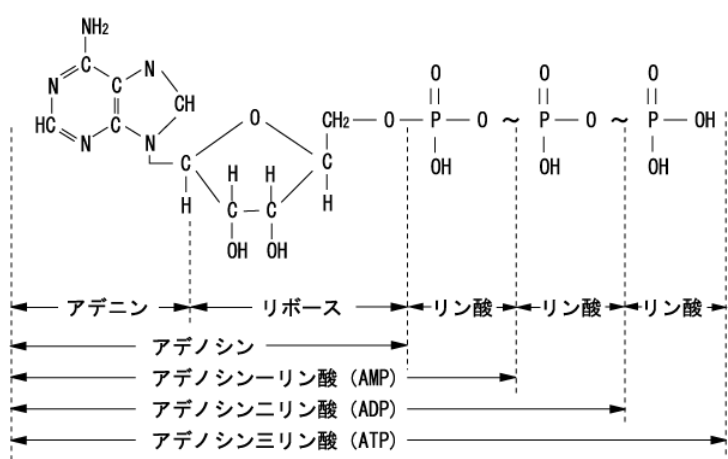


図 1-1

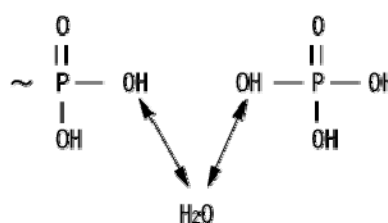


図 1-2

ADP ⇌ ATP の反応

タンパク質の合成、筋肉運動、生物電気作用など体が必要とするエネルギーのすべては ATP ⇒ ADP の反応によって生じるエネルギーが使われるが、エネルギーの供給はこの逆の過程をとり、ADP ⇒ ATP の反応で準備される。このときにはエネルギー消費とは逆に呼吸や、発酵によって 7.3 kcal のエネルギーを供給することによって、1 モルの ADP を 1 モルの ATP に変えてエネルギー消費の準備が行われる訳である。すなわち生体においては常に ADP ⇌

ATP の反応が起きている。

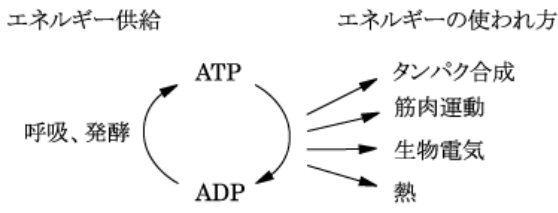
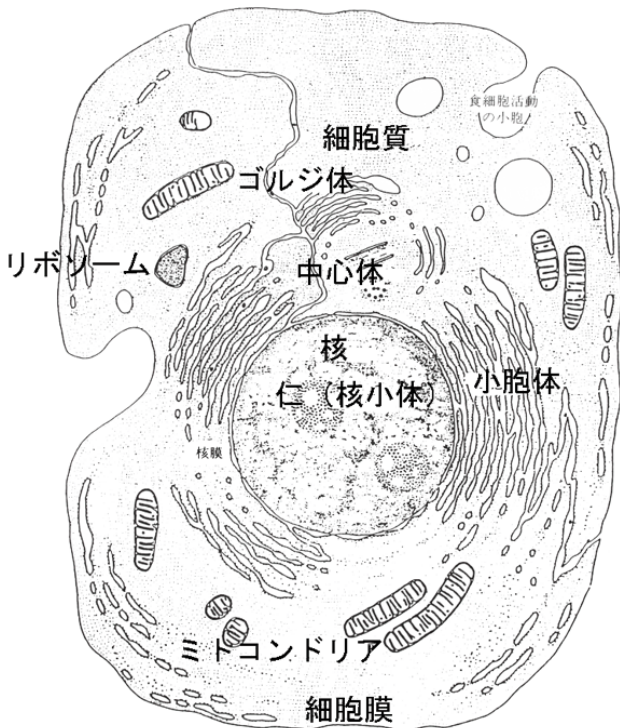


図 1-3

細胞は生命の最小単位であり、その活動を支えるためには全ての細胞で ATP の産生が行われる。この生体特有の化学工場のはたらきは、細胞内の主に**ミトコンドリア**で起きている。ATP から取得されるエネルギーはあらゆる生命活動のエネルギー源として利用されるが、ATP は貯蔵されない。そのために生命維持のためには ATP の産生は常に休みなく行われなければならない。通常の細胞では ATP は 1 分以内に消費される。すなわち、ATP 産生が滞れば細胞

は 1 分以内に死に至るということを意味する。ヒトの脳には約 2g の ATP が存在するといわれるが、脳での ATP 合成が停止すれば 20 秒で ATP は枯渇してしまう。ATP の産生には後述するように酸素が必要であり、従って無酸素状態の密室に入れば数分以内に意識を失い死亡する。

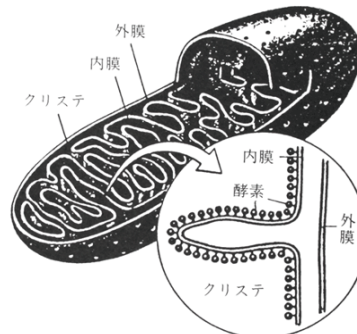


電子顕微鏡による細胞の写真を観察すると細胞膜に囲まれた細胞質中に細胞膜から派生したと考えられている小胞体、ゴルジ体(装置)、ミトコンドリアなどの小器官およびリボソーム、核膜、核小体などが認められる。小胞体には小顆粒に囲まれた粗面小胞体と顆粒のない滑面小胞体とがある。

小野功一 呼吸と代謝 より

図 1-4

細胞の外に吐き出す。



ミトコンドリアは呼吸に関係する多くの呼吸酵素を含み、細胞の呼吸の場である。長さ 0.5~2 μm の粒状または棒状の小体で、内外 2 層の膜よりなる。内膜は内側に多くのくし状のひだ(クリステ)をつくっている。このクリステの表面に呼吸酵素を含む小粒が規則正しく並ぶ。この酵素は水素伝達系の機能を触媒する。クリステの内側の液体は TCA サイクルに関与する酵素が含まれている。

小野功一 呼吸と代謝 より

図 1-5

細胞内ではミトコンドリアからのエネルギーを利用してさまざまな活動が行われる。

細胞内の主な構成物による以下のような働きが知られている。リボソームでは体を構成するタンパク質の合成が行われ、ゴルジ装置では更にそれを目的の形に構成する。小胞体は細胞内物質の輸送を行いライソゾームは不要になった物質を取り込み、

2-2 ATP 産生のしくみ

ATP の産生には摂食によって得られた栄養と酸素が必要である。まず、食物摂取による ATP 産生の材料供給についてみてみよう。

【摂食と消化】

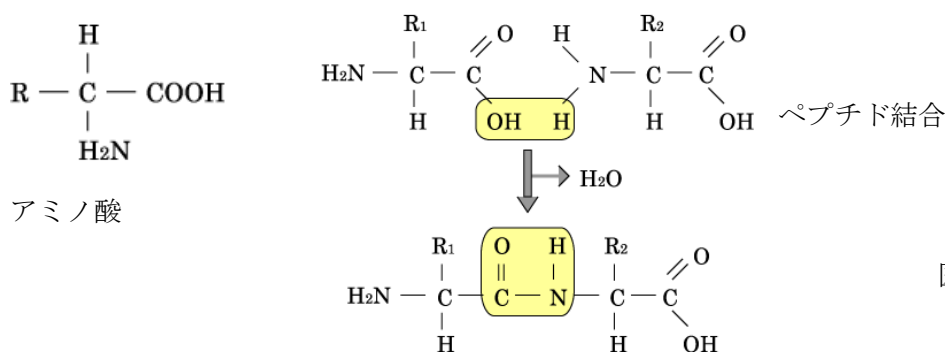
3 大栄養素といわれるタンパク質、炭水化物、脂質とは以下のようなものである。

タンパク質	含窒素有機化合物 20 種類のアミノ酸が ペプチド結合 (—CO—NH—) により多数縮合したポリペプチド
炭水化物	$C_nH_{2m}O_m$ の分子式をもつ化合物 水素と酸素の割合が水の組成と合い、糖類、澱粉、セルロースなど動植物体の構成物質
脂質	長鎖脂肪酸やその誘導体・類似体で生体由来のものを一般にさす。 かなり広範囲の多様な物質の総称

摂食によって得られた食物は酵素によって触媒され、まず胃で細かく砕かれた後に以下のように分解され、小腸から吸収される。

タンパク質	→	アミノ酸に加水分解される
多糖類 (炭水化物)	→	単糖 に加水分解される
中性脂肪	→	グリセリン、脂肪酸に加水分解される

アミノ酸は以下の構造をもち、R の種類によって天然には約 80 種類が知られているが、タンパク質を構成するのは 20 種類である。そのうち 9 種類は体内では生産することができないもので、かならず体外から摂取しなければならず、必須アミノ酸と呼ばれる。平均的なタンパク質はアミノ酸が 500 個程度並んでいる。今、500 のアミノ酸から成るたんぱく質の種類を考えると、 $20^{500}=10^{650}$ 種となり、ヒトのタンパク質が 10 万種類程度であることを考えると無限大といって良い。



単糖 ($C_6H_{12}O_6$) とは **グルコース (ブドウ糖)** 等で、これ以上分解できない糖類の総称である。後に示すように ATP の産生にはグルコースや脂肪が利用される。

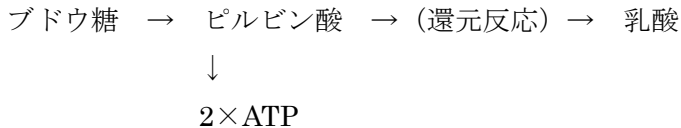
小腸で吸収された栄養素は静脈から門脈を通り肝臓に移送される。肝臓は必要に応じてグルコースを血液中に放出し、グルコースは肝静脈を経由して血液循環によって全身に供給され、エネルギーを必要とする身体各部の細胞に渡されそこで消費される。このとき余分なグルコースは **グリコーゲン** の形で肝臓内に蓄積される。また、筋肉細胞にもグリコーゲンとして蓄積する機能が備わっている。

【ATP の産生】

細胞がグルコースを利用して ATP を産生する仕組みには解糖と呼ばれる嫌気的反応と酸素を必要とする好气的反応がある。

【嫌気的反応（解糖）】

1 分子のブドウ糖は**解糖**によって 2 分子の ATP を生成する。これは以下のような化学反応で、酸素を必要とせず、乳酸発酵をするものである。

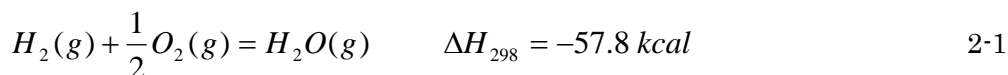


この反応には酸素は関与しないため、**嫌気的反応**と呼ばれる。

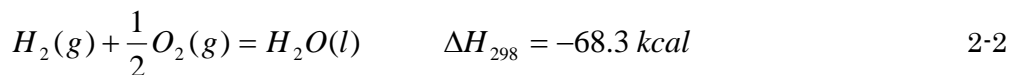
【好气的反応】

嫌気的反応に対して酸素を必要とする反応を**好气的反応**とよぶ。

酸素を必要とする反応では ADP を ATP に変化させるためのエネルギー源として、酸素と水素の反応エネルギーが使われる。



(g)は気体であることを表す。1 モルの H_2 (気体)が完全燃焼して水蒸気になるときに、 57.8 kcal の熱が発生する。 H はエンタルピーと呼ばれる量で、物質のもつエネルギーを表している。 ΔH_{298} とは添え字の温度 ($25^\circ\text{C}=298\text{K}$) における生成物のエンタルピーの総和から反応物のエンタルピーの総和を差し引いたものである。この場合、生成物である H_2O のほうが熱エネルギーが小さいために ΔH_{298} は負になるが、これは反応によって熱が発生することを示している。また、液体として取るときには以下になる。



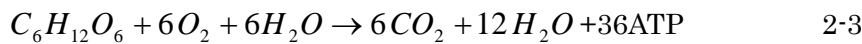
この差 $68.3-57.8=10.5(\text{kcal})$ が水のモル蒸発熱、すなわち 1 モルの水が蒸発するときに吸収する熱量である。

酸素は呼吸によって供給されるが、水素は外部から直接取り込まれることはないので、細胞内で生成されなければならない。**代謝**とは細胞内の化学反応で産生された水素 H が酸素 O と結合するときに発生するエネルギーを利用して ADP を ATP に変化させる機構であると言える。

【水素原子の生成】

1分子のブドウ糖は前述したように解糖の過程で2分子のATPを産生する。このとき同時に水素原子4H、そしてピルビン酸2分子を作る。

ピルビン酸は補酵素アセチルCoAを経由してクエン酸回路に渡される。この過程で水素2Hを発生し、更にクエン酸回路を通じて、8Hを発生する。すなわち1分子のブドウ糖からクエン酸回路によって生成される水素原子は2×(2+8)=20となる。解糖の過程で生成されるものと合わせると1分子のブドウ糖によって24Hの水素原子が生成されることになる。2Hの水素原子からは3分子のATPを作ることができる。すなわち、好気的の反応(Hを利用した反応)によって36分子(24×3/2)のATPが生成される。24Hの水素原子と結びつく酸素原子は12であるから、酸素分子(O₂)6分子によって36分子のATPが作られることになる。このとき反応を全体で見ると、以下のようにCO₂6分子が発生する。



ヒトが呼吸によって酸素を取り入れ、不要物として二酸化炭素を排出するのはこの作用を満たすためである。これをまとめると、1モルのグルコースを利用して、呼吸によって取り込まれた6モルの酸素分子O₂から36モルのATPが産生され、このとき6モルの二酸化炭素CO₂が排出されることになる。これにより36×7.3kcalのエネルギーが供給されることを意味する。

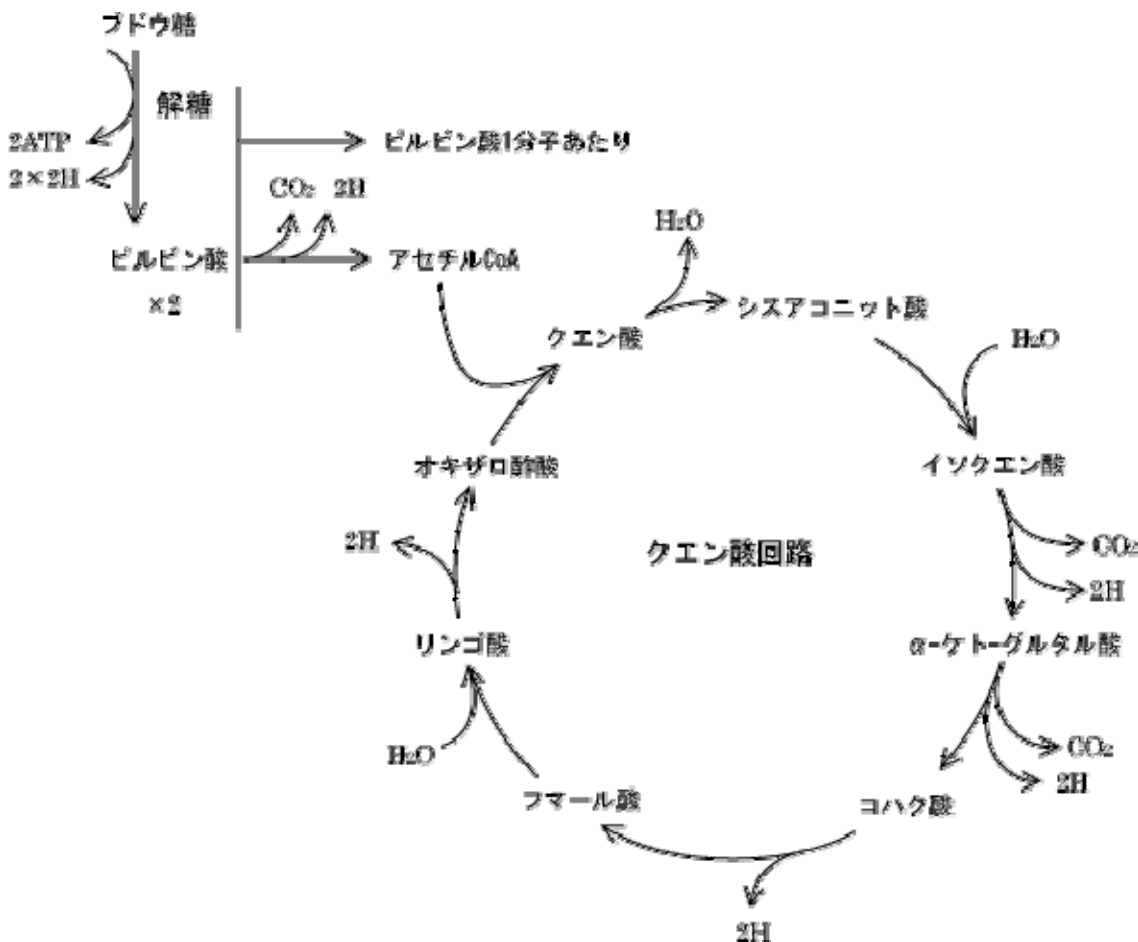


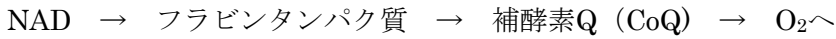
図 2-2 クエン酸回路=TCA (トリカルボン酸) 回路=クレブス回路

好気的の反応に解糖によるATP2分子と合わせると、ブドウ糖1分子から38分子のATPが産生されることになる。

【電子伝達系、酸化リソ酸化】

生命維持のためのATP産生は解糖だけでは不十分であり、好氣的反応が必要である。ここでクエン酸回路を通じて水素原子 (H)が産生し、最終的にはこれが分子状酸素 (O₂)と結合して水 (H₂O)になるのであるが、生体においては特有な酸化様式がとられている。

水素原子(H)は細胞内にある補酵素であるNAD (ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド) やFAD (フラビンアデニンジヌクレオチド) に結びつき、NAD・H₂やFAD・H₂の形で蓄積される。水素原子は順次以下のように渡されて最終的に酸素分子に渡される。



結局は



このように補酵素によって行われる水素原子の授受を電子伝達系という。

このときのエネルギーを利用してADP ⇒ATPの反応が起おり、エネルギー消費の準備がされる。



この反応を酸化リソ酸化という。このとき1モルのATPを生成するのに7.3kcalのエネルギーが必要になる。

前述したように水素原子 2H で3分子のATPが産生される。つまり、酸素 1/2 分子から3分子のATPが産生されることになる。すなわち電子伝達系によって



ということになる。3ADP⇒3ATPの過程で3H₂Oが出るから右辺は4H₂Oになる。

ATP⇒ADPの反応で産生するエネルギーを1モルあたり7.3kcalとすると、水素分子1モルと酸素分子1/2モルによって蓄積されるエネルギーは



ということになる。水素と酸素の反応エネルギー (ΔH = -57,8 kcal) と比較してミトコンドリアの燃料電池としての発電効率を算出すると

$$\frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{21.9}{57.8} = 0.38 \quad 2-8$$

となり、約40%である。これは極めて高い発電効率と考えられる。(後述)

電源から取り出さる電力の最大値は電源が持つ潜在的電力の半分である。つまり1/2を超える発電効率はあり得ないから、これは逆に58kcalのエネルギーからはΔG = 7.3 kcalであれば3モルのADP⇒ATP反応しか起き得ないと解釈できる。

補足：

酵素とは、細胞が作る、生体内の化学反応を触媒するたんぱく質の総称である。分子の一部に活性部分を持ち、作用を受ける基質がこの部位で酵素と結合して酵素-基質複合体を作ることによって作用する。

補酵素とは、酵素の活性部位がタンパク質以外の低分子構造になり、解離が比較的自由になったものを指す。NAD、FADなどは水素の運搬を行う補酵素である。

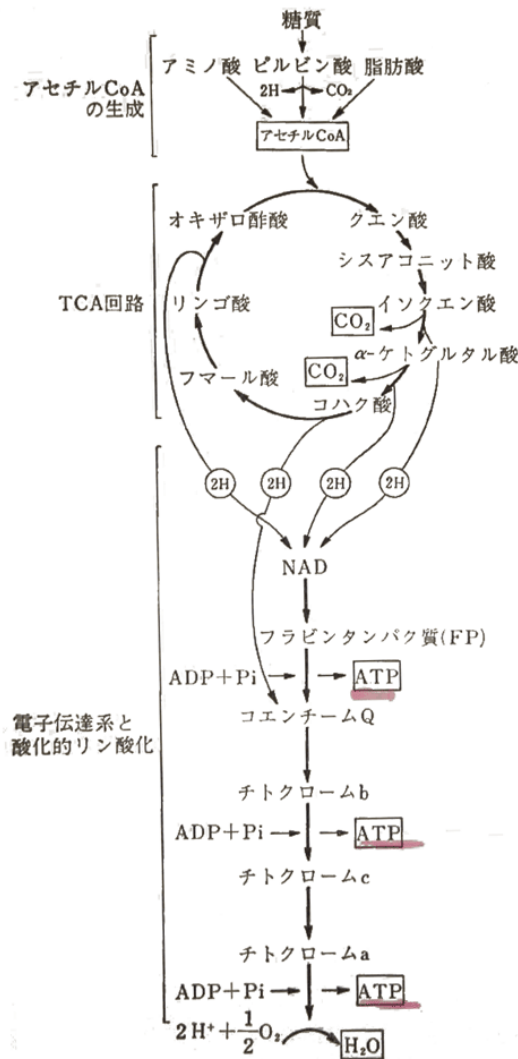


図 2-3 織田秀実 他 生物学 より

ここで、エネルギー供給源の視点をブドウ糖に移してみよう。

ブドウ糖から生成されるエネルギー効率を計算してみる。ブドウ糖 1 グラムが完全に酸化されると 4kcal の熱量が発生する。従って 1 モルのブドウ糖 (180g) では

$$4(kcal/g) \times 180(g) = 720(kcal)$$

の熱量が発生する。

前述のように 1 モルのブドウ糖からは 38 モルの ATP が産生され、1 モルの ATP の加水分解エネルギーは 7.3kcal/mol であるとする、

$$7.3(kcal/mol) \times 38(mol) = 277(kcal)$$

となる。エネルギー効率的には

$$277 \div 720 = 0.38$$

ここでもおよそ 38% のエネルギー効率は発電効率を考えると極めて高い値である。生体内において栄養素から取り出すエネルギーは熱機関などと比べても非常に効率がよいものであると言える。

補足：

ブドウ糖：C₆H₁₂O₆

原子量は C：12.01、H：1.008、O：16

だから、ブドウ糖の分子量は

$$12 \times 6 + 1 \times 12 + 16 \times 6 = 180$$

従って 1 モルのブドウ糖は 180g ということになる。

2-3 エネルギーの消費

ATP は長期貯蔵ができない。また、ATP の産生も消費も個々の細胞内で行われるものであり、他の細胞で作られた ATP を利用することはできない。つまり、ATP 産生の原料であるブドウ糖と酸素は常に全身の細胞に供給され続けなければならない。この供給には血液循環が使われる。すなわちブドウ糖も酸素も血液によって全身に運ばれている。

【酸素の供給】

酸素は肺でヘモグロビンの酸化によって吸着され、細胞に運ばれると二酸化炭素とガス交換される。そのために呼吸が停止すると酸素の供給がただちに停止し、全身の細胞において好氣的反応ができなくなりエネルギー不足の状態を生じる。脳細胞においてはこの影響は特に敏感で脳細胞の機能停止は意識混濁から昏睡状態に陥り、ほどなく死に至る。呼吸停止によって極めて短時間のうちにヒトが死に至るのはこのためである。これは酸素が水には溶けにくいという性質ゆえに、常時細胞内に蓄積しておくことができず、なんらかの方法で運搬し続けなければならないという事情に起因する。もしも、ヒトの生命維持に十分な量の酸素が水に溶けうるものであるとしたら、長時間呼吸停止しても細胞内に溶け込んだ酸素を利用することでただちに死に至るといった状況は避けられるのかも知れない。

【ブドウ糖の供給】

ブドウ糖は摂食され消化、分解された炭水化物が肝臓でグリコーゲンとして貯蔵され、グリコーゲンからグルコース（ブドウ糖）に分解されて血液中に供給される。

筋肉細胞や脂肪細胞にはグリコーゲンの貯蔵機能があり、短時間であればこれを解糖してエネルギー供給が可能であるが、神経細胞（脳を含む）、赤血球にはグリコーゲンの貯蔵機能がなく、血液からのグルコース供給に完全に依存する。そのため血液中のブドウ糖濃度すなわち**血糖濃度**が一定値に保たれなければ、脳においては酸素欠乏と同様な結果をもたらすことになる。つまり、低血糖も呼吸停止と同様に脳細胞の機能停止、意識混濁、昏睡状態から死を招く。

血流の途絶はここでもエネルギー産生の停止を意味し、細胞の壊死に至ることになる。また、逆に血糖濃度が高くなりすぎると、

高血糖 → 大量の糖が細胞内に入る → 糖尿病に見られる合併症を引き起こす
(網膜症、腎症、動脈硬化、神経障害)

ということになり、血糖濃度におけるホメオスタシスは生命維持に極めて重要である。

血糖濃度のホメオスタシスにはインスリン、グルカゴンというホルモンが作用している。

摂食された炭水化物は単糖に分解され、小腸で吸収され門脈を經由して肝臓に運ばれる。摂食刺激によってすい臓ではインスリンが産生される。インスリンは糖分を細胞に取り込む作用をし、肝臓ではインスリンの増加によって余分な糖分がグリコーゲンに変えられて蓄えられる。

食後 1 時間ぐらいいは消化管から吸収された糖により血糖値は少し上昇するが、インスリンの作用によって 2 時間後には食前の状態に戻る。逆に外界からの糖の供給が減るとすい臓ではグルカゴンが作られ、グルカゴンの増加によって肝臓はグリコーゲンをグルコースに変え（**糖新生**）血中に放出する。食事をしていない間は糖新生によってつくられたグルコースによって血糖濃度が維持される。

長期の絶食では、グルカゴンの働きで糖新生が行われるために、血糖濃度が維持されることになる。糖新生にはグリコーゲン ⇒ グルコース以外にも、乳酸 ⇒ グルコース、脂肪 ⇒ グルコース のようにグリコーゲン以外のものからもグルコースが生産される。しばらく絶食しても、グリコーゲンや脂肪をグルコースにしている間は血糖値が維持され生命は保たれる。しかし、筋肉のタンパク質が分解されて出来た アミノ酸 ⇒ グルコース は最終段階でタンパク質が分解されてくるともはや生命を維持できない状況に陥ってしまう。

2-4 膵臓の働き

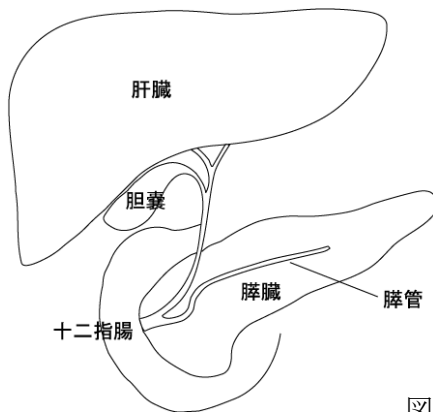


図 4-1

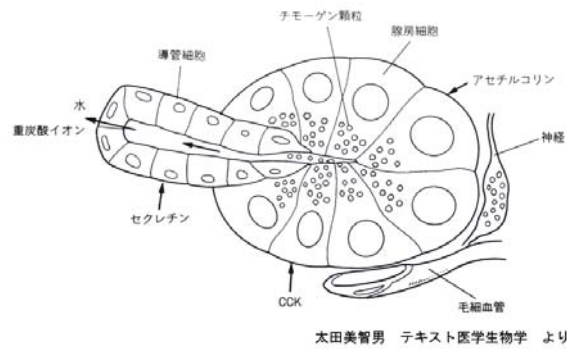


図 4-2

【膵臓の機能】

膵臓は長さ約 15cm で胃の後ろ側にある。

90%は膵液の産生を行う。

膵液とは：消化酵素で、**重炭酸イオン** (HCO_3^-) を含んでおり、膵管を経て十二指腸へ放出される。

5%はホルモン (**インスリン**、**グルカゴン**) の産生を行う。

胃液に含まれる塩酸によって十二指腸では pH が低下するが、重炭酸イオンが膵酵素に適した pH(8.0~8.4) に中和する。膵酵素は栄養を分解し吸収される状態にする。

インスリンは膵島 (ランゲルハンス島) と呼ばれる細胞集団で作られる。

インスリン、グルカゴンは十二指腸には流れずに、直接血液に乗って肝臓に運ばれる。

ホルモンとは：

特定の組織または器官から分泌され、体液と共に体内を循環し、特定の組織の機能に極めて微量で一定の変化を与える物質の総称である。

小腸から血液に分泌されるセクレチンは 1905 年に最初に発見されたホルモンで、すい臓に供給されて膵液分泌を促す作用をする。ホルモンによる情報伝達は神経系を介さずに制御が行える情報伝達機構であるといえる。脳神経系による制御を中央集中制御 (CPU などによる) 機構であるとするれば、ホルモンによる制御は部門システム内部における制御ということもできる。特定のホルモンは特定の部位における特定の機能を促進または抑制するといった制御が行われる。

2-5 肝臓の働き

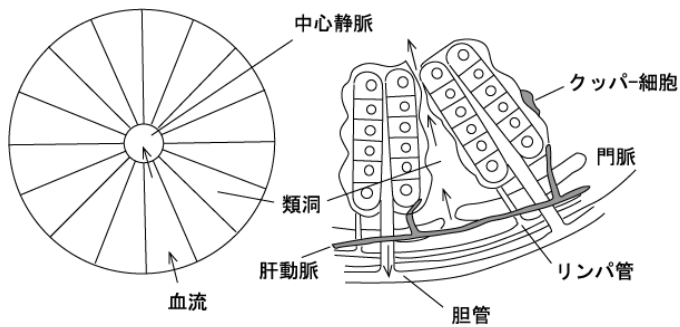


図 5-1

肝小葉の構造

- ・肝臓は重量 1.2~1.6 kg で人体では最大の臓器である。
- ・5~10 万個の直径数 mm の小葉 (肝小葉) という基本構造から成る。
- ・類洞と静脈に 450 ml の血液が留まる。これは出血時の緊急の血液として利用される。

肝臓へは動脈系から肝動脈を通過して類洞に至る経路と、消化管の静脈から門脈を通過して類洞に至る経路がある。類洞からは肝静脈を通過して心臓の右心房に至る。

- ・肝動脈は動脈から供給され、350 ml/min 程度の動脈血液が流れ、これは肝臓自身の栄養を供給する。
- ・門脈は消化管の静脈から流れ込む血液で、腸で吸収された栄養素が含まれた血液が 1100 ml/min 程度流れ込む。小腸の粘膜から吸収される全ての栄養素は門脈を通過して一度肝臓に入る。

肝動脈と門脈を合わせた 1450 ml/min の血液は心臓から拍出される血液 5 l/min の約 1/3 にも達する。

門脈血液には栄養素以外にも、化学薬品、アルコール、細菌、アンモニア、毒素などが含まれる。

門脈の血液は 小葉間 → 隔壁 → 類洞 → 中心静脈 → 肝静脈 へと流れる

【肝臓の機能】

肝臓の機能としては、糖質代謝、脂質代謝、タンパク質代謝、血液の処理があげられる。

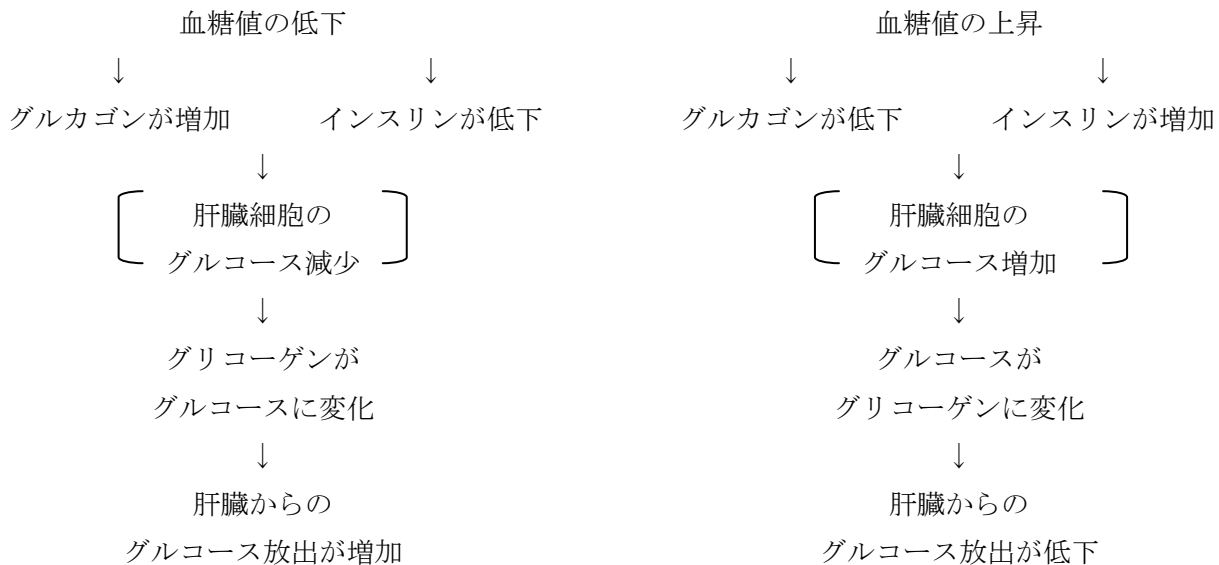
1) 糖質代謝

- 食餌刺激を受けると
 - 膵島でのインスリン分泌が促進される
 - 門脈血からのブドウ糖の取り込みが刺激される
 - 血糖濃度上昇が抑制される
 - ブドウ糖をグリコーゲンとして蓄積する

筋肉や脂肪組織にもグリコーゲン貯蔵機能はあるが、脳にはない

- 血糖濃度が低下すると
 - 膵島でのグルカゴン分泌が促進される
 - グリコーゲンが分解され、グルコースに変化する (糖新生)
(グリコーゲン、乳酸やアミノ酸からブドウ糖を作る)
 - 血液中にグルコースを放出する

血糖値におけるホメオスタシス



2) 脂質の代謝

エネルギー源としての脂質の分解を行う

コレステロールの合成を行う

合成されたコレステロールの 80%は胆汁として消化管へ分泌され、界面活性作用によって脂肪の分解を助ける

コレステロールとは：

細胞膜の構成成分であり、脳・神経組織・脊髄などに多く含まれる。

性ホルモン、副腎皮質ホルモン、胆汁酸などの生理活性物質の原料である。

3) タンパク質の代謝

アミノ酸からタンパク質を合成する。

(ガンマグロブリン以外の) 血液中のタンパク質の 90%は肝臓で合成される)

余分なアミノ酸は炭水化物や脂肪に変換され、エネルギー源として使われる。アミノ酸からアミノ基を除く作用は肝臓のみに存在し、このときに生成される大量のアンモニアを肝臓は尿素に変換する。

必須アミノ酸以外のアミノ酸を合成する。

4) 血液の処理

寿命のきた赤血球を分解し、クッパー細胞の貪食機能によって細菌などの異物処理を行う。

2-6 筋肉のエネルギー利用

筋肉はその性質から白筋と赤筋に分けられる。白筋は短筋とも呼ばれ、瞬発的な動作に優れ、赤筋は長筋とも呼ばれ、持続性に優れている。

白筋：グリコーゲン、クレアチンリン酸に富み、嫌氣的解糖によってエネルギーが得られる。

赤筋：ミオグロビン、ミトコンドリアに富み、酸化的リン酸化でエネルギーを得る。

ヒトでは白筋と赤筋は入り混じっていて区別はつきにくい、一般には上肢筋は白筋繊維の割合が多く、下肢筋は赤筋繊維の割合が多い。

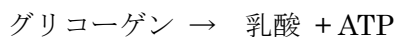
【ランニングにおけるエネルギー学】

◎短距離走

始めの数秒間は筋肉細胞内にあるクレアチンリン酸 (CrP) が使われる



その後グリコーゲンが使われるが解糖によるものであり、乳酸が発生する



乳酸は蓄積すると筋肉が酸性化し痛みを感じる。短距離走による筋肉の痛みは乳酸蓄積によるものである。その後乳酸は血中に放出され肝臓で捕捉される。

肝臓では糖新生によって 乳酸 → グルコース の反応が起こるが、これにはミトコンドリアの酸化的リン酸化によるエネルギーが利用されることになる。したがって運動後に呼吸が亢進するのは、乳酸処理に大量のエネルギーが必要となるためである。

短距離におけるトレーニング目的は、エネルギー消費の仕組みを考慮すると以下のようなことになる。

- 骨格筋を肥大させ筋収縮力を増大させる
- グリコーゲン量とその利用効率を増大させる
- 乳酸蓄積による酸性化に耐えられるように筋肉の緩衝作用を高める

◎中距離走

血中からグルコースを取り込み、グリコーゲンを再合成して次の急激な運動に備える。

◎長距離走

筋肉のグリコーゲンは緩徐に消費され、好氣的酸化によってミトコンドリアで完全に酸化される。したがって乳酸の蓄積は起こらず、筋肉の痛みを避けた状態で長時間の運動が可能になる。

長距離におけるトレーニング目的は、好氣的反応を促進するようにしなければならず、

- 心臓と肺および呼吸筋の機能を高め、最大酸素摂取量を上昇させる。
- 毛細血管を発達させ筋肉への酸素供給を増やす
- 筋肉のミトコンドリアの数を増やし、酸化的リン酸化を高める

◎長時間の持続運動

・骨格筋のタンパク質は筋収縮のために必要であるから、血糖維持のために使い尽くすわけにはいかない。そこで長時間の持続運動のためには脂肪がエネルギー源として使われる。

脂肪によるエネルギー供給は以下の機序による。

脂肪組織ではアドレナリン（ホルモン）によって、脂肪はグリセリン（グリセロール）と脂肪酸に分解されて血中に放出される。

グリセリンは肝臓の糖新生系でグルコースになる。

脂肪酸は血中のアルブミン（血清タンパク）に結合し、肝臓に運ばれミトコンドリアの酸化系でアセチル CoA になる。

補足：

脂肪とは脂肪酸とグリセリンで構成されたエステルのことである。グリセリンは $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$ の構造をもつもので、脂肪酸はカルボキシル基ひとつを持つモノカルボン酸の総称であり以下のようなものがある。

低級脂肪酸（炭素が少ない）：ギ酸、酢酸

高級脂肪酸：パルミチン酸、ステアリン酸

高級不飽和脂肪酸：オレイン酸、リノール酸、リノレン酸

脂肪は糖新生と酸化的リン酸化を通じて H_2O と CO_2 に完全に分解される。

2-7 電力利用効率

電源電力の利用効率について考察しておく。下図に見るように電源電圧 E が内部抵抗 r_0 を通して負荷 R に結合しているものとする。

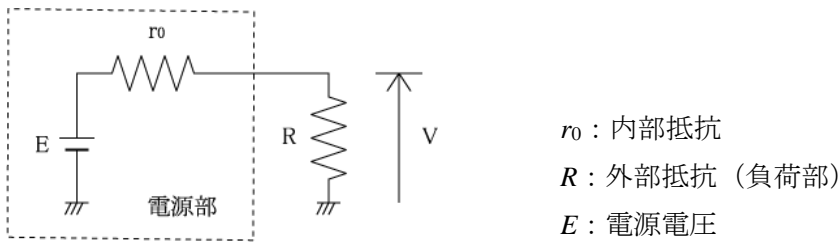


図 7-1

電流を i とすると

$$V = Ri = E - r_0 \cdot i \quad \text{従って} \quad i = \frac{E}{R + r_0} \quad 7-1$$

外部抵抗が消費する電力、つまり電源部から取り出せる電力は

$$W = V \cdot i = R \cdot i^2 = \frac{RE^2}{(R + r_0)^2} \quad 7-2$$

取り出し得る最大電力を求めてみる。7-2 式を R で微分する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial R} &= \frac{\partial}{\partial R} \left\{ \frac{RE^2}{(R + r_0)^2} \right\} = \frac{E^2}{(R + r_0)^2} - \frac{2RE^2}{(R + r_0)^3} = \frac{E^2(R + r_0) - 2RE^2}{(R + r_0)^3} \\ &= \frac{E^2(r_0 - R)}{(R + r_0)^3} \end{aligned} \quad 7-3$$

$\frac{\partial W}{\partial R} = 0$ として極大値を求めると、 $r_0 = R$ である。

従って

$$W_{\max} = \frac{RE^2}{(R + r_0)^2} = i \frac{RE}{R + r_0} = \frac{iE}{2} \quad 7-4$$

$$\therefore \frac{W_{\max}}{iE} = \frac{1}{2} \quad 7-5$$

電源 E が潜在的に持つ電力は iE であるが、ここから取り出し得る最大の電力 W_{\max} はその半分である。また、内部インピーダンスを考慮した場合、電力利用効率の最大値は $1/2$ であり、これは内部インピーダンスで負荷整合させた場合になる。

一般には負荷として消費する電力自体に興味があるのであって、電源の電力供給量を最大限に利用するような目的でシステムを設計することはない。ただし、電源の供給能力がクリティカルであって負荷が大きいような場合にはこのような考慮も必要になる。