

第8章 代謝概論

講義用補助資料

8.1 はじめに

代謝 (metabolism): _____
 栄養素→生体成分の構築、_____の獲得

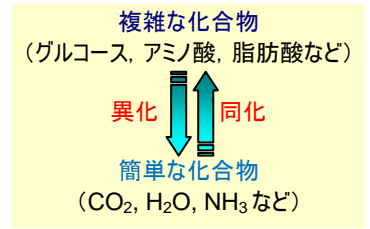


図1 異化と同化

8.2 異化と同化

異化 (catabolism): 外界から取り込んだ物質(食物)を分解し、より簡単な化合物に変え、エネルギーを取り出す過程。発生するエネルギーで、ATP がつくられる。

(例) $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O \quad \Delta G^\circ = -2870 \text{ kJ}$

同化 (anabolism): カルボン酸・アミノ酸・二酸化炭素などの簡単な化合物から、より複雑な化合物をつくる過程。(例) 植物や光合成細菌の光合成。

8.3 物質代謝とエネルギー

化学反応における自由エネルギー変化 (ΔG):

$\Delta G = \Delta G_{\text{生成物}} - \Delta G_{\text{反応物}} = \Delta G^\circ + RT \ln ([\text{生成物}]/[\text{反応物}])$
 ΔG° , 標準自由エネルギー変化 (25°C, 1 気圧, 濃度は 1 M)

生体系では、水素イオン濃度 $[H^+] = 1 \text{ M}$ (pH=0) の代わりに、pH=7.0 ($[H^+] = 10^{-7} \text{ M}$) を**生化学的標準状態**と定め、 ΔG° の代わりに $\Delta G^{\circ'}$ を用いる。

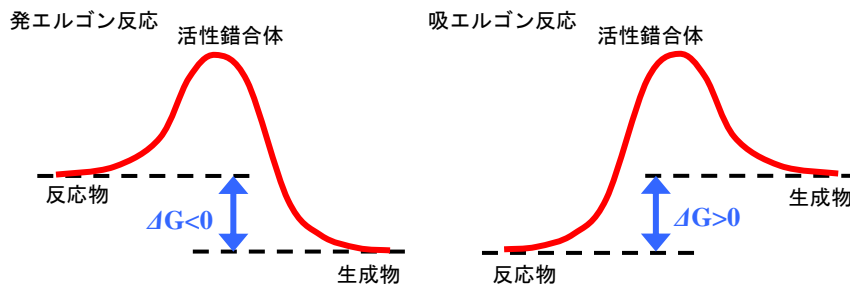
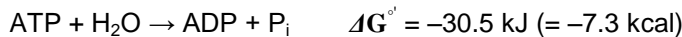


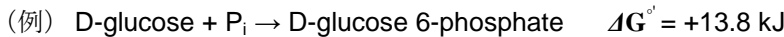
図2 発エルゴン反応と吸エルゴン反応

・**発エルゴン反応:** ΔG° が負の反応。放出される自由エネルギー⇒種々の仕事に利用。

細胞内で最も重要な発エルゴン反応の1つは ATP の加水分解反応である。

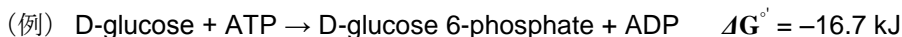


・**吸エルゴン反応:** ΔG° が正の反応。ひとりでは起きにくく、外からの仕事(エネルギー)が必要。



・エネルギー的に不利な反応をどうする？

発エルゴン反応と同時にを行うことで吸エルゴン反応を進行させることができる(これを**反応の_____**という)。



8.4 アデノシン三リン酸

●**高エネルギー化合物:** _____ する化合物のこと。そのような結合を_____結合という。

ATP は「全ての生物の**高エネルギー通貨**」と呼ばれる。ATP は「貯蔵用のエネルギー」ではない。これに対して、グリコーゲンやトリグリセリド(脂肪)は「エネルギーの貯蔵物質」 ∴ 異化代謝で ATP を再生できる。

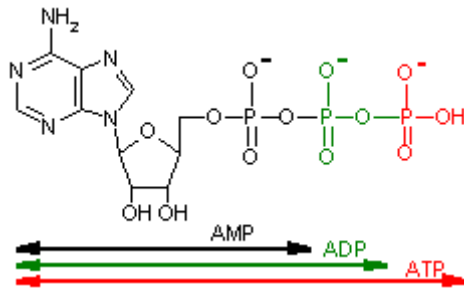


図3 ATP の構造

●エネルギー代謝でつくられる ATP の利用

- ①運動: _____
- ②化学反応の推進: _____
- ③物質やイオンの輸送: _____

表1 高エネルギー化合物

化合物	ΔG° (kJ/mol)
ホスホエノールピルビン酸	-61.9
1,3-ビスホスホグリセリン酸	-49.4
アセチルリン酸	-43.1
ホスホクレアチン	-43.1
ATP/AMP	-32.2
ATP/ADP	-30.5
グルコース 1-リン酸	-20.9
フルクトース 6-リン酸	-13.8
グルコース 6-リン酸	-13.8
グリセロール 3-リン酸	-9.2

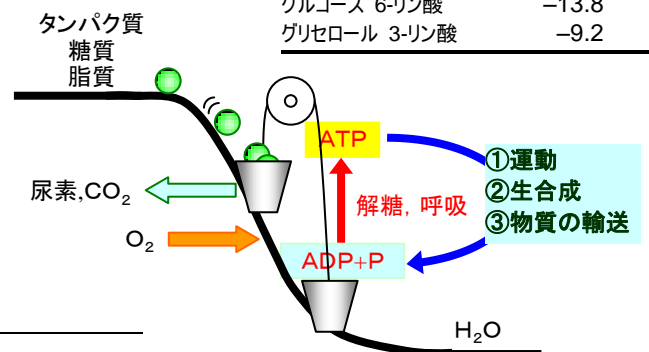


図4 エネルギー代謝

●基礎代謝(basal metabolism, BM)

基礎代謝量は「生きていくのに最低限必要なカロリー」のこと。活動をしなない＝寝ている状態。基礎代謝⇒筋肉の緊張や各臓器が働くために必要なエネルギー。

基礎代謝量 ÷ 0.6 = 1日に必要なカロリー

体重 50 kg の女性…2100 kcal 必要。もし、1日に消費されるエネルギーがすべて ATP として供給されるとしたら、ATP の合成量は 152 kg にもなる。

$$\frac{2100 \times 507}{7.3} = 152,000 \text{ g}$$

表2 性・年齢階層別基礎代謝基準値

年齢	男		女	
	基準体重	kcal/kg /日	基準体重	kcal/kg /日
1~2	11.5	61.0	11.5	59.7
3~5	16.4	54.8	16.4	52.2
6~8	24.6	44.3	23.9	41.9
9~11	34.6	37.4	33.8	34.8
12~14	47.9	31.0	45.3	29.6
15~17	59.8	27.0	51.4	25.3
18~29	64.7	24.0	51.2	23.6
30~49	67.0	22.3	54.2	21.7
50~69	62.5	21.5	53.8	20.7
70以上	56.7	21.5	48.7	20.7

8.5 異化代謝と ATP 獲得

ATP の獲得手段

- ①発酵: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 \text{ 乳酸} + 238 \text{ kJ}$ (基質レベルのリン酸化)
- ②呼吸: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2870 \text{ kJ}$ (酸化的リン酸化)
- ③光合成: 太陽の光エネルギー (光リン酸化)
- ④化学合成: $2NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2HNO_2 + 2H_2O + 331 \text{ kJ}$

8.6 生体酸化—呼吸と酸化的リン酸化

8.6.1 生体酸化分解の原理

●ミトコンドリア(mitochondria)

- ・マトリックス(matrix): **TCA 回路**, 脂肪酸のβ酸化, 尿素回路の一部の酵素(肝), ミトコンドリア DNA, tRNA, リボソームなどが存在。
- ・膜間腔(intermembrane space): **ヌクレオチドをリン酸化する酵素やシトクロム c**などが存在。
- ・内膜(inner membrane): 折りたたまれてクリステ(cristae)を形成。ほとんどのイオンはこの膜を通過できない。呼吸鎖の電子伝達系酵素群, ATP 合成酵素, マトリックス内外への物質輸送を調節するタンパク質などが存在。

●ミトコンドリアでの炭素の燃焼

ミトコンドリアはアセチル-CoA を酸化してエネルギーを生み出す。

- ①アセチル-CoA の炭素を **TCA 回路**で燃やして二酸化炭素にする。
 - ②水素を **NADH** や **FADH₂** の形で補酵素に捕捉する。
 - ③**呼吸鎖**で NADH や FADH₂ を酸化して水にする。
- この過程で、ATP がつくられる。

ATP 合成の駆動力は、ミトコンドリア内膜をはさんで形成される**プロトン濃度勾配と電荷勾配**。

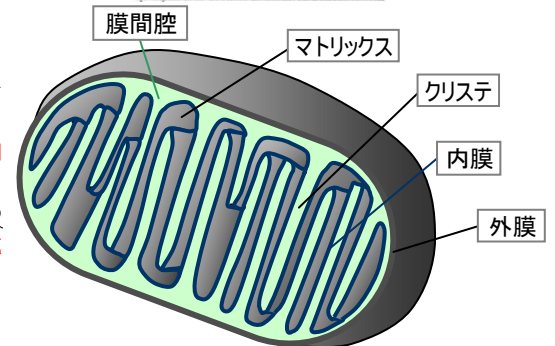
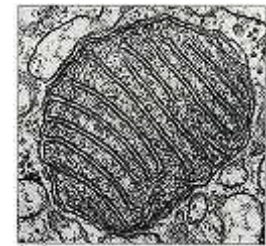


図7 ミトコンドリアの写真(上)と構造

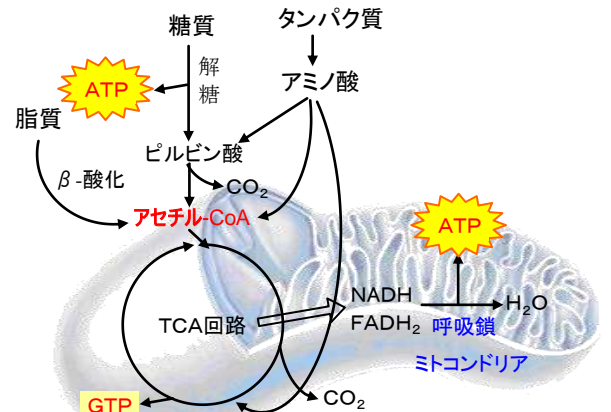


図5 生体酸化分解の原理

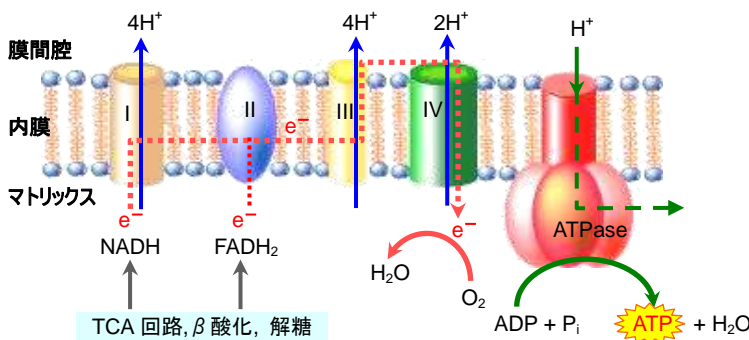


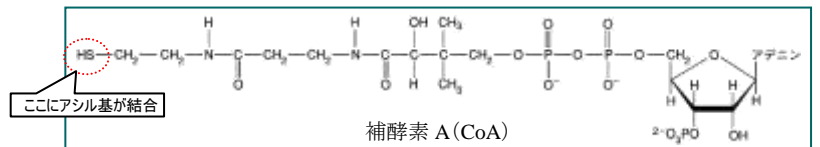
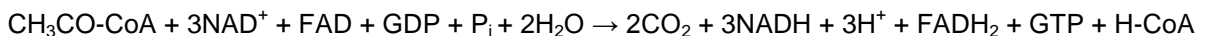
図6 呼吸鎖と電子伝達

8.6.2 TCA 回路(クエン酸回路)

●TCA 回路の目的

- (1)アセチル基の炭素を酸化→_____に変換する。(反応④と⑤)
- (2)アセチル基の水素→還元型の補酵素_____と_____に変換。(反応④～⑦, ⑨)
- (3)アミノ酸代謝、_____回路、糖新生など、他の多くの経路の仲立ちをする〔代謝の交差点〕

TCA 回路の正味の反応式(呼吸鎖を勉強してから ATP の分子数を記入しよう)



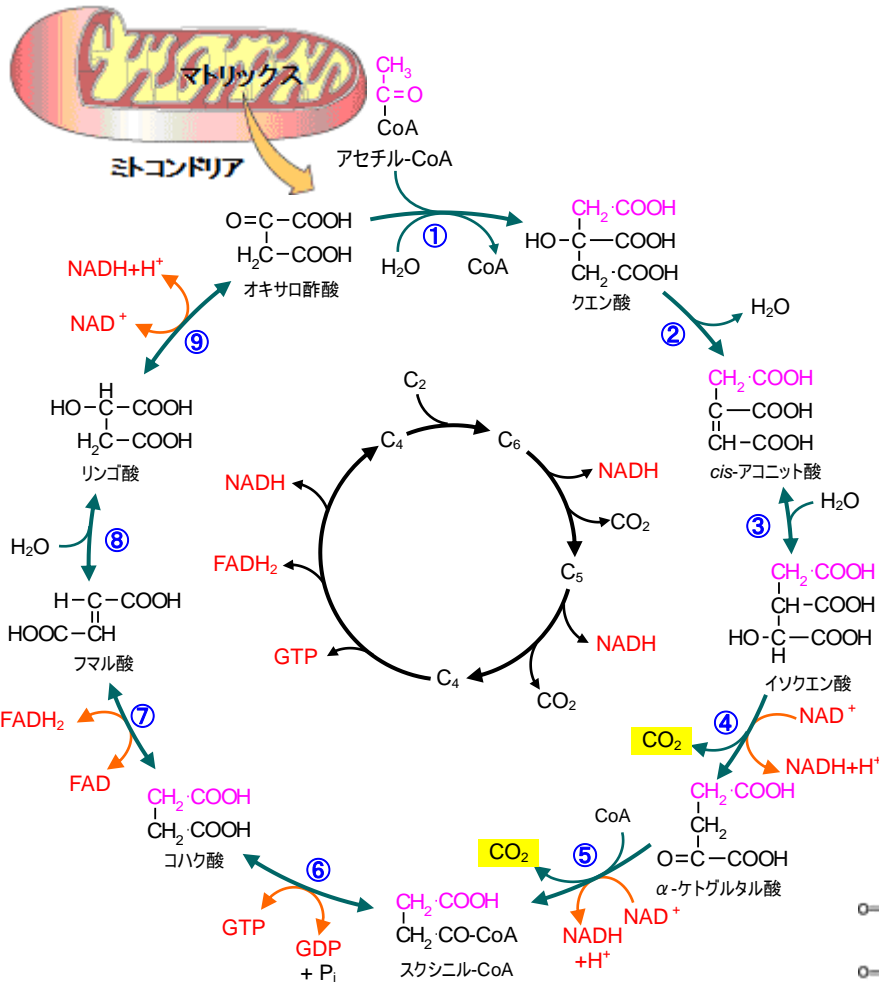


図8 TCA(クエン酸)回路

[目的(1)]①~⑤

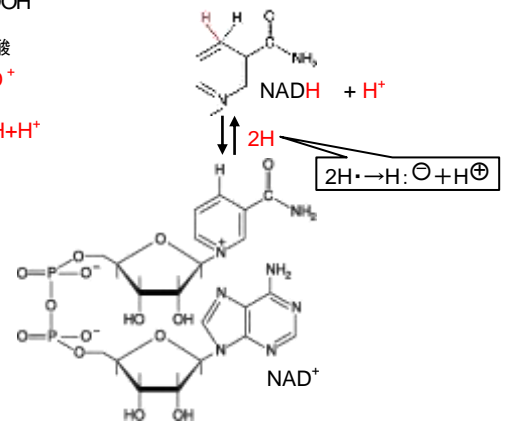
アセチル基の C-C 結合を直接切断するのは困難である。そこで、TCA 回路の最初の反応でアセチル-CoA をオキサロ酢酸と縮合させて C6 化合物(クエン酸)に変え、その後、1 つずつ CO₂ を切り離して C4 化合物にする。結果として、アセチル基を完全に分解したことになる。

[目的(2)]④~⑦, ⑨

8 つの水素原子は3分子の NADH(+ H⁺)と1分子の FADH₂に変えられる。また、GTP 1分子も生じる。

[目的(3)]

オキサロ酢酸, α-ケトグルタル酸, スクシニル-CoA, フマル酸, リンゴ酸が種々の代謝経路と密接に関連している。



8.6.3 呼吸鎖と電子伝達系

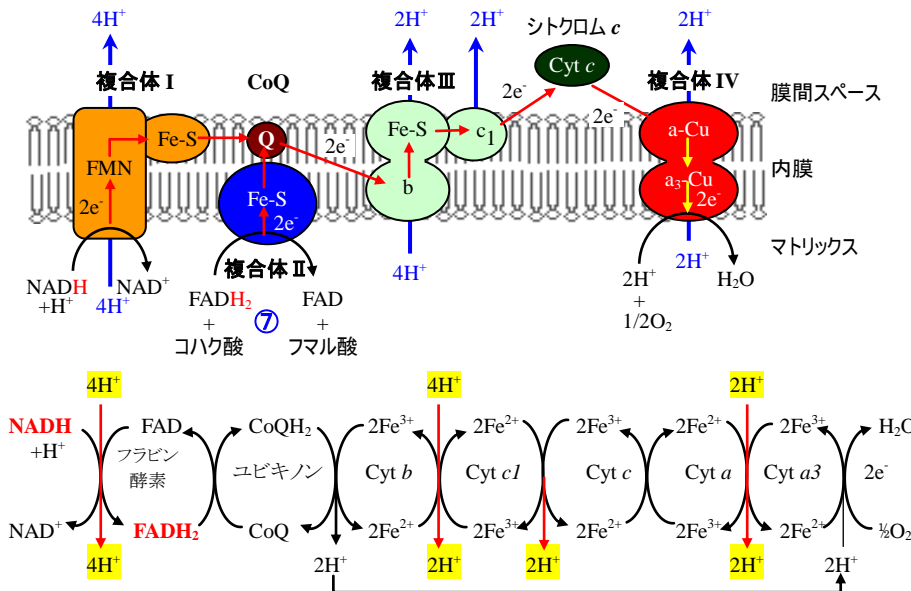


図9 電子伝達系の全体像(上)と反応(電子が2個移動した時)

H⁺は複合体の隙間を通して膜間スペースへ運ばれる。

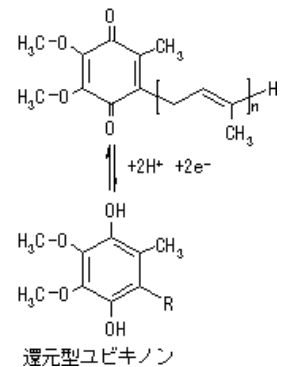
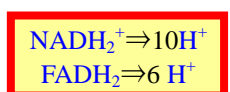


図10 補酵素 Q (CoQ)



- NADH や FADH₂ を水にする過程で、ミトコンドリア内膜にあるタンパク質複合体 I, III, IV は、ミトコンドリアのマトリックスから膜間腔にプロトン(H⁺)を汲み出す。(つまり、複合体 I, III, IV は _____)
- 膜間腔の高濃度のプロトンはミトコンドリア内膜にある ATP 合成酵素(ATPase)の中を通過してマトリックスに戻ってくる。このとき、ADP とリン酸から ATP がつくられる(後述)。
ADP + リン酸 → ATP + H₂O

●電子伝達系複合体の構成と ATP 合成

- 【複合体 I】NADH デヒドロゲナーゼ or NADH-CoQ レダクター)

$$\text{NADH} + \text{H}^+ + \text{CoQ} \rightleftharpoons \text{NAD}^+ + \text{CoQH}_2 \quad \Delta G^\circ = -71 \text{ kJ/mol}$$
 複合体 I を電子が通過すると、**4 つの H⁺**が膜間腔へ運ばれる。
- 【複合体 II】コハク酸デヒドロゲナーゼ or コハク酸 CoQ レダクターゼ

$$\text{FADH}_2 + \text{コハク酸} + \text{CoQ} \rightleftharpoons \text{FAD} + \text{CoQH}_2 + \text{フマル酸} \quad \Delta G^\circ = -2.9 \text{ kJ/mol}$$
- 【複合体 III】(シトクロム bc₁ または CoQ-シトクロム c レダクターゼ)

$$\text{CoQH}_2 + 2 \text{ cyt c}(\text{Fe}^{3+}) \rightleftharpoons \text{CoQ} + 2 \text{ cyt c}(\text{Fe}^{2+}) + 2\text{H}^+ \quad \Delta G^\circ = -41 \text{ kJ/mol}$$
 電子が複合体を通過する間に、**4 つの H⁺**が膜間腔へ運ばれる。
- 【シトクロム c】
 内膜の表在タンパク質。複合体 III のシトクロム c₁ と複合体 IV に交互に結合し 1 つずつ電子を運ぶ。
- 【複合体 IV】シトクロム c オキシダーゼ
 シトクロム c からの電子は複合体 IV を経て、最終受容体である酸素(O₂)に渡され、水が生じる。

$$4 \text{ cyt c}(\text{Fe}^{2+}) + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightleftharpoons 4 \text{ cyt c}(\text{Fe}^{3+}) + 2\text{H}_2\text{O} \quad \Delta G^\circ = -110 \text{ kJ/mol}$$
 電子が複合体を通過する間に、**2 つの H⁺**が膜間腔へ運ばれる。

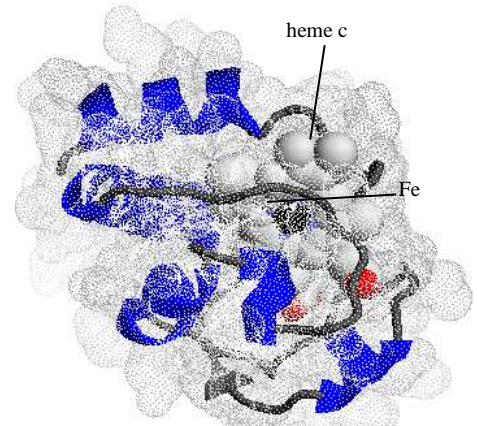


図 11 シトクロム c の構造

●酸化リン酸化(Oxidative phosphorylation)

【酸化リン酸化の化学浸透説】 P. Mitchell(1961 年)提唱
 電子伝達系の過程でマトリックス側から膜間スペースへ H⁺の移動⇒ミトコンドリア内膜を隔てて H⁺の_____が形成される。電子伝達で放出されたエネルギーは電気化学的ポテンシャル(Δμ_{H⁺})として蓄えられることになる。このΔμ_{H⁺}による H⁺の流れが ATP 合成に利用される。このような ATP 合成の仕組みを_____リン酸化という。

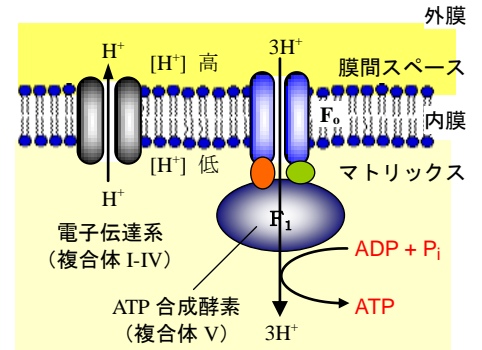


図 12 酸化リン酸化(ATP 合成)の仕組み

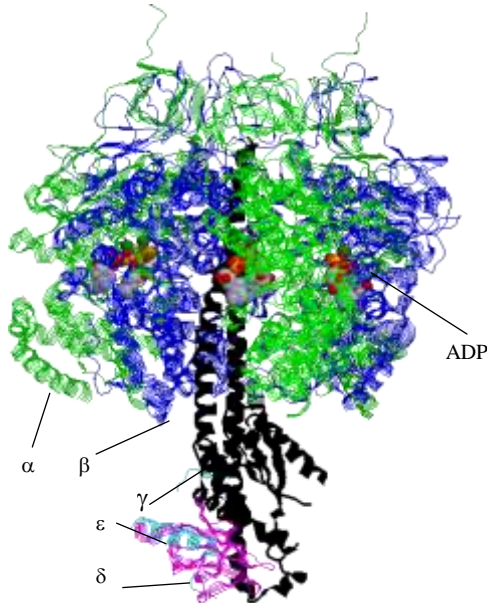
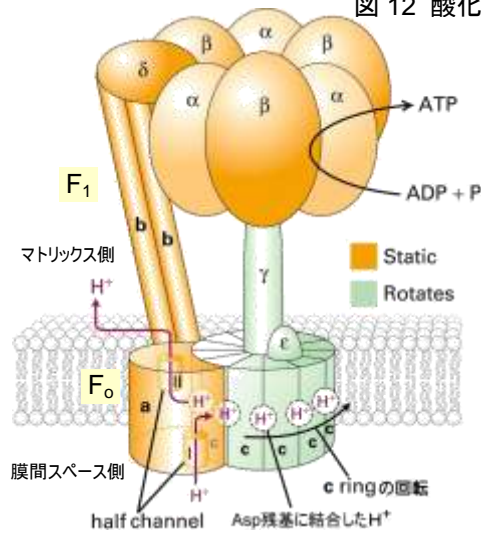


図 13 ウシ心筋ミトコンドリアの F₁



ATPase は回転触媒!

1 個の H⁺の移動で 120°回転する→_____個の H⁺の移動で 1 回転し、ATP を 1 分子つくる。
 $\text{NADH}_2 \Rightarrow 10\text{H}^+ \Rightarrow \underline{\hspace{1cm}} \text{ATP}$
 $\text{FADH}_2 \Rightarrow 6 \text{H}^+ \Rightarrow \underline{\hspace{1cm}} \text{ATP}$

図 14 呼吸鎖の複合体 V (ATP 合成酵素, H⁺-ATPase) のモデル
 膜貫通部 F₀ はサブユニット a, b, c から成り、ab₂c₁₂ の構成をとる。a は H⁺チャネルを形成。a, b は膜に固定されているが、c は膜内を自由に回転できる。F₁ 部の γ 鎖はサブユニット c と結合しており、c が回転すると γ 鎖も回転する。

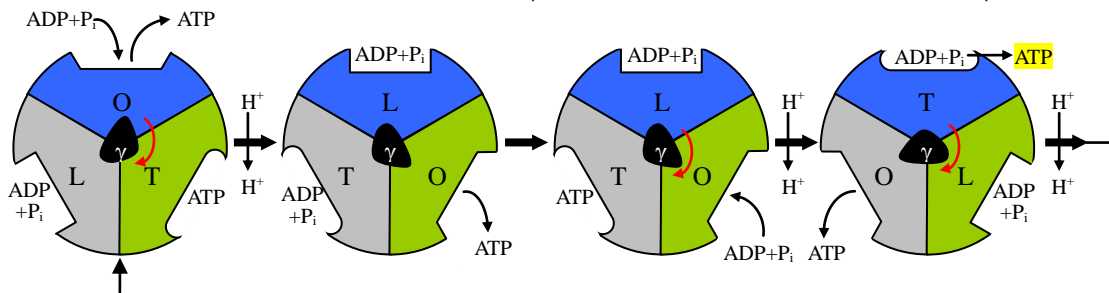


図 15 ATP 合成のしくみ

【解説】

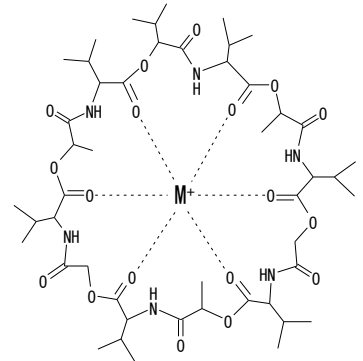
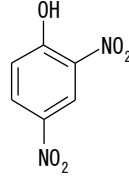
H⁺がチャネルを通過するとサブユニット c が回転⇒c と結合している γ 鎖が回転⇒γ 鎖は非対称的であるため固定された β 鎖と衝突⇒β 鎖の立体構造を変化させる。β 鎖は ADP や ATP に対する親和性が異なる 3 つの立体構造をとる。
 ①O(オープン)、基質と結合しない状態、②L(ルース)、基質と弱く結合する状態、③T(タイト)、基質と強く結合する状態
 β 鎖はこれらの構造を交互にとりながら、ADP + P_i を ATP に変える。1 個の H⁺がマトリックス側へ移動する毎に γ 鎖は 120°回転。それにつれて、β 鎖の立体構造は 1 つの状態から次の状態に変化。3 個の H⁺が移動して γ 鎖が 1 回転する毎に、1 分子の ATP がつくられる。このような触媒を、**回転触媒**という。

● 1分子のアセチル-CoA から TCA 回路→呼吸鎖で何分子の ATP がつくられる？

8.6.2 の TCA 回路の正味の反応式の下の方欄に ATP 分子数を記入せよ。

● 脱共役剤(アンカップラー, uncoupler)

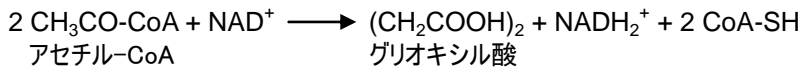
- ・電子伝達系と酸化リン酸化は、それぞれ独立の機能単位。
- ・2,4-ジニトロフェノールやバリノマイシンは、_____には影響を与えずに、**酸化リン酸化だけを阻害**。
- ・2,4-ジニトロフェノールは疎水性の弱酸で、H⁺運搬体として膜を通過し、H⁺勾配を解消。バリノマイシンは陽イオン運搬体として同様の作用をする。このような薬物を_____という。



バリノマイシン
図 16 脱共役剤

8.6.4 グリオキシル酸回路

植物と一部の微生物にだけ存在する経路。発芽中の植物種子には**グリオキシソーム**(glyoxysome)と呼ばれる小器官があり、グリオキシル酸回路はその中で行われる。アセチル-CoA がグリオキシル酸回路に入ると、通常の TCA 回路ならば 2 分子の CO₂ が放出される経路を迂回し、イソクエン酸からリンゴ酸とコハク酸を生成するため、**炭素数の減少を伴わない**でオキサロ酢酸に至ることができる。従って、グリオキシル酸回路は_____代謝経路ではなく、**特殊化した_____代謝経路**として利用される。グリオキシル酸回路全体の反応は次のようになる。



イソクエン酸の開裂によって生じるコハク酸はグリオキシソームでは代謝されず、ミトコンドリアに運ばれて TCA 回路でオキサロ酢酸に変えられる。オキサロ酢酸は糖新生の出発物質である。

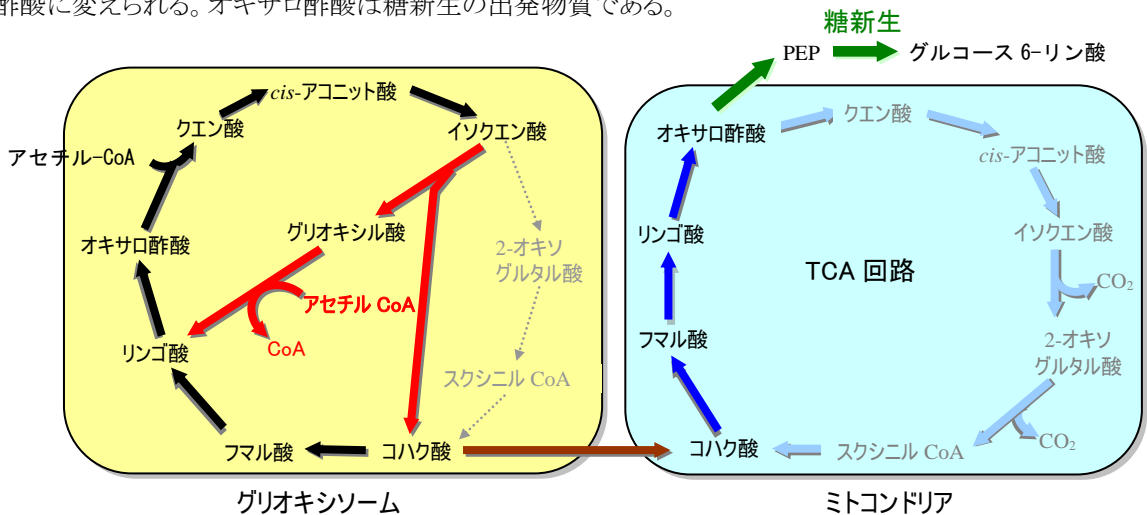


図 17 グリオキシル酸回路の模式図

赤で示す部分がこの回路の特徴である。2-オキシグルタル酸とスクシニル CoA の生成段階(ともに、CO₂ が放出され炭素数が減少する段階)がバイパスされている。この回路に入ったアセチル CoA は全て炭素数の増加につながる事に着目せよ。

● 食べ過ぎた食物の行方

脂肪からはグルコースをつくれな!

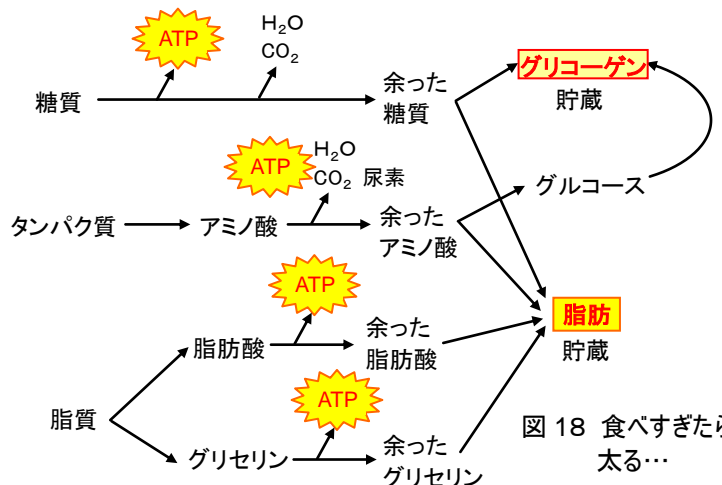
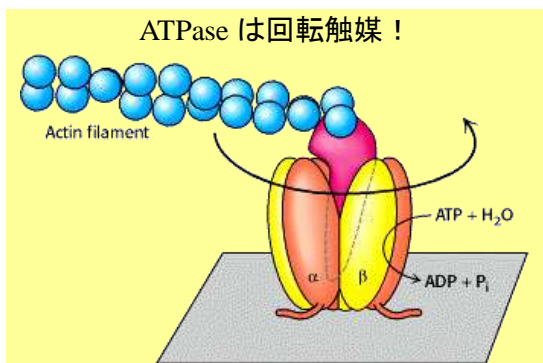


図 18 食べすぎたら太る...

9.2.2 グルコースの完全酸化

酸素が十分にある条件(的條件)では、グルコースは二酸化炭素と水になる。

- (1)(解糖)グルコース→2ピルビン酸+2ATP+2NADH+2H⁺
 (2)2ピルビン酸→2アセチル-CoA+2NADH+2H⁺

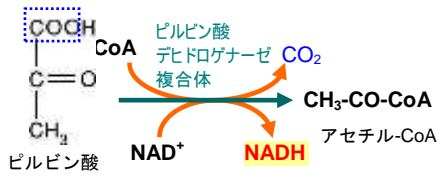


図3 ピルビン酸の脱炭酸

- (3)(TCA回路)2アセチル-CoA→4CO₂+6NADH+6H⁺+2FADH₂+2GTP
 2GTP⇒2ATP
 (4)(呼吸鎖)
 6NADH+6H⁺の酸化⇒6×3ATP
 2FADH₂の酸化⇒2×2ATP

1分子のアセチル-CoA
 →TCA回路+呼吸鎖⇒12ATP

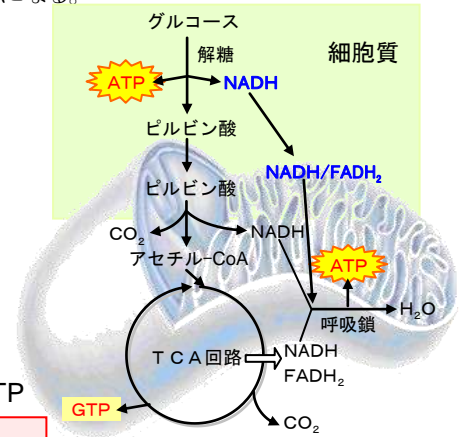
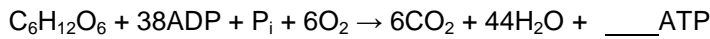


図2 グルコースの完全酸化

(1)は細胞質, (2)~(4)はミトコンドリア内で行われる。合計すると、



●細胞質で生じたNADHのミトコンドリアへの輸送 (ミトコンドリアへの入り方に2つある)

細胞質で生じたNADH(解糖反応⑥など)はミトコンドリア内膜を通れないので、その水素(2H)はシャトル系を利用してミトコンドリア内へ取り込まれる。

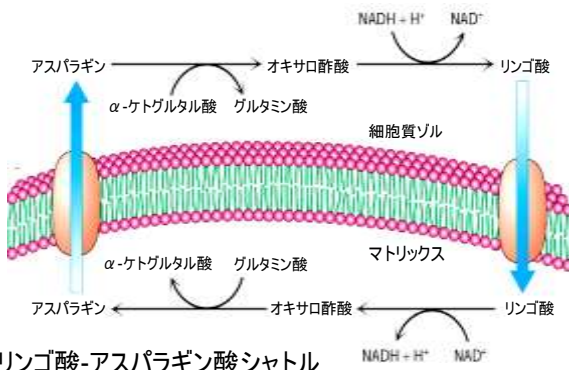


図4 リンゴ酸-アスパラギン酸シャトル

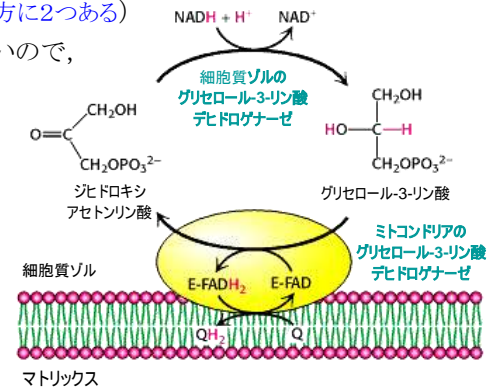
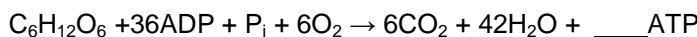


図5 グリセロールリン酸シャトル

この場合、NADHはFADH₂に置き換わる。
 E-FAD、酵素結合型補酵素 FAD

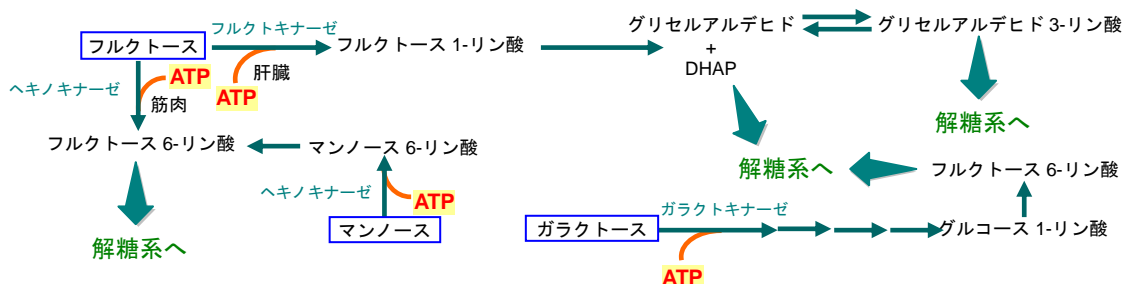
筋肉や脳ではグリセロールリン酸シャトルを使う。この場合、NADHはFADH₂に置き換わるので、呼吸鎖でATPを2分子しかつくり出せない。従って、グルコースの完全酸化の式は次のようになる。



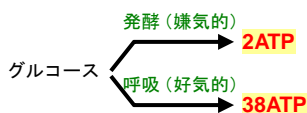
2×2ATP

①(解糖)の2NADHの目減り分

●グルコース以外の糖の代謝



●嫌氣的代謝はなぜ必要か？



嫌氣的代謝はグルコースの無駄使い？いいえ！

解糖系酵素は細胞質に高濃度に存在→ATP生産速度は、酸化的リン酸化よりも100倍も速い→短距離走ではもっぱら乳酸発酵でATPを供給。

筋線維

- (1) 速筋線維(白筋線維): 解糖に依存。ミトコンドリアが少ない。短距離ランナー、ニワトリ、ヒラメ。
- (2) 遅筋線維(赤筋線維): ミトコンドリアに富むので赤い。長距離ランナー、渡り鳥、マグロ。

9.2.3 ホスホグルコン酸経路(ペントースリン酸経路)

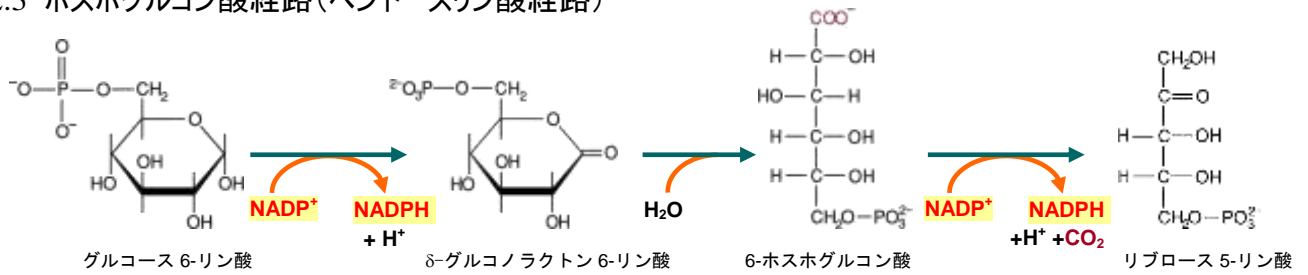
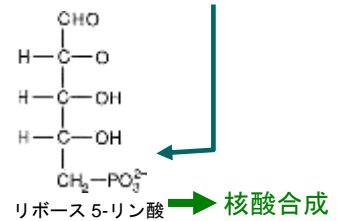
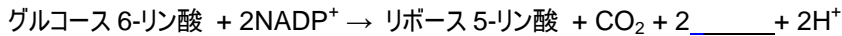


図7 ホスホグルコン酸経路(前半)

ホスホグルコン酸経路は、解糖のグルコース 6-リン酸から分岐した経路。経路の前半は、①生成用の還元型補酵素 NADPH の供給と、②核酸合成に必要なリボース 5-リン酸の合成が目的。



経路の後半は、③三炭糖～七炭糖の相互変換が目的。→NADPH は多量に必要だが、通常の細胞ではリボース 5-リン酸はそれほど必要ではない。そこで、リボース 5-リン酸を変換して解糖系に戻すのが目的。

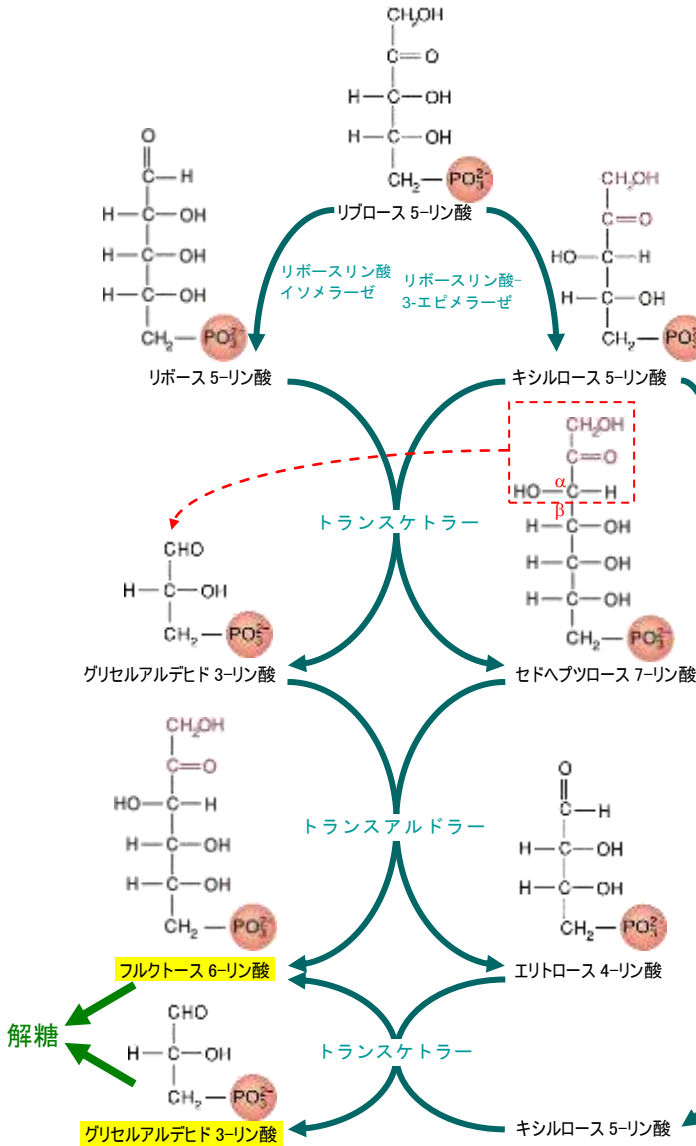


図8 ホスホグルコン酸経路(後半)

●NADPH の利用
_____ や _____ の合成、
光合成、解毒(薬物代謝)などに必要。

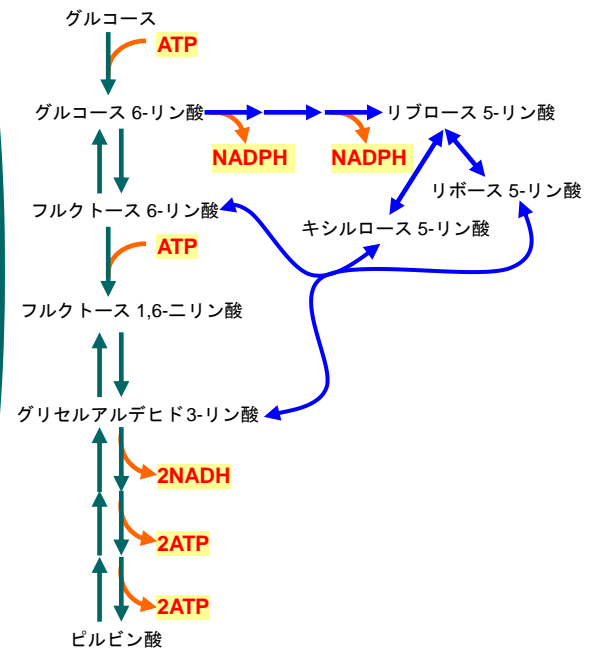
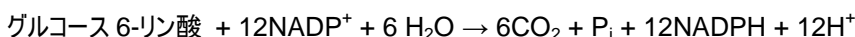


図9 解糖とホスホグルコン酸経路の関係

ホスホグルコン酸経路を全部で 6 回まわったときの全体の反応は、次のようになる。

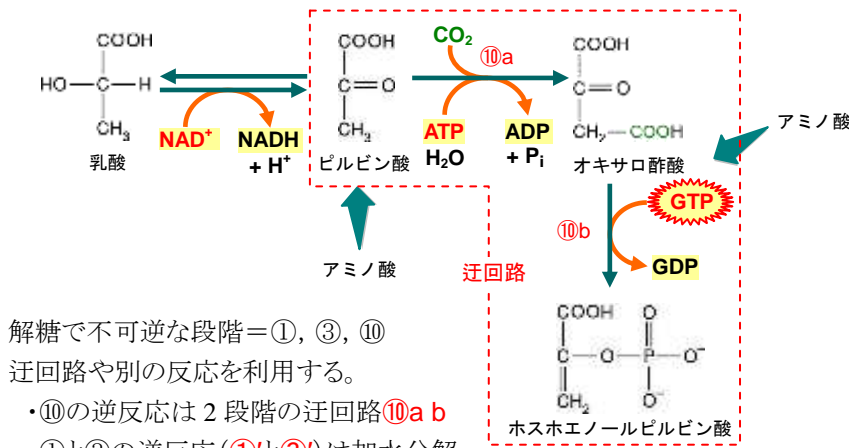


グルコース 1 分子から NADPH を 12 分子つくれる。また、グルコースの炭素は全て CO₂ に酸化されている！しかも、酸化剤は水！(燃やすのに酸素は不要。省エネシステム。)

9.3 糖の生合成

9.3.1 糖新生(glyconeogenesis)

アミノ酸, 乳酸, ピルビン酸, オキサロ酢酸, グリセリンなど→グルコースを生合成。この経路の大部分は解糖の逆反応。



解糖で不可逆な段階=①, ③, ⑩
迂回路や別の反応を利用する。

- ・⑩の逆反応は2段階の迂回路⑩a b
- ・①と③の逆反応(①'と③')は加水分解

酵素名:

- ⑩a, ピルビン酸カルボキシラーゼ
- ⑩b, ホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼ
- ③', フルクトースビスホスファターゼ
- ①', グルコース 6-ホスファターゼ

①'の酵素は、肝臓と腎臓にしか存在しない

糖新生は  で行われる!

●コリ回路

乳酸が過剰に筋肉に蓄積すると組織の pH を低下させ、いわゆる「疲れ」や「こり」といった現象を引き起こす。また、血液中の乳酸濃度が高くなると血液の緩衝力を超え、pH が低下する。コリ(Cori)回路はそれらを解消するためのもの。

運動で生じた乳酸は血流で肝臓へ運ばれ、糖新生でグルコースへ戻された後、再び血流で筋肉へ運ばれて利用(G. T. Cori 女史が提案した。1947年、ノーベル賞)。

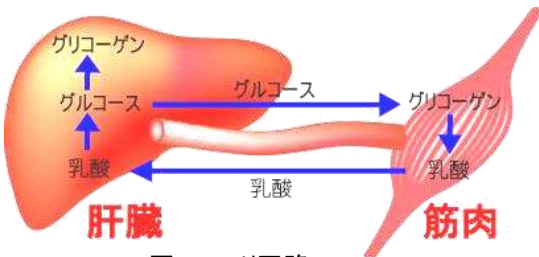


図 11 コリ回路

●グルコース-アラニン回路

「高脂肪食や飢餓時→体タンパク質の分解→糖新生」でグルコースを生産する。タンパク質の分解で生じたアミノ酸はアラニンに変えられ、血流で肝臓へ運ばれる。糖新生でグルコースへ戻された後、再び血流で筋肉へ(グルコース-アラニン回路)。

タンパク質 100g=グルコース 58g がつくれる。

脂肪酸から糖新生は起こらない。その理由は脂肪酸の代謝のところで勉強しよう。

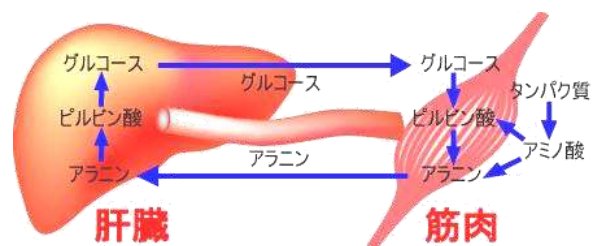


図 12 グルコース-アラニン回路

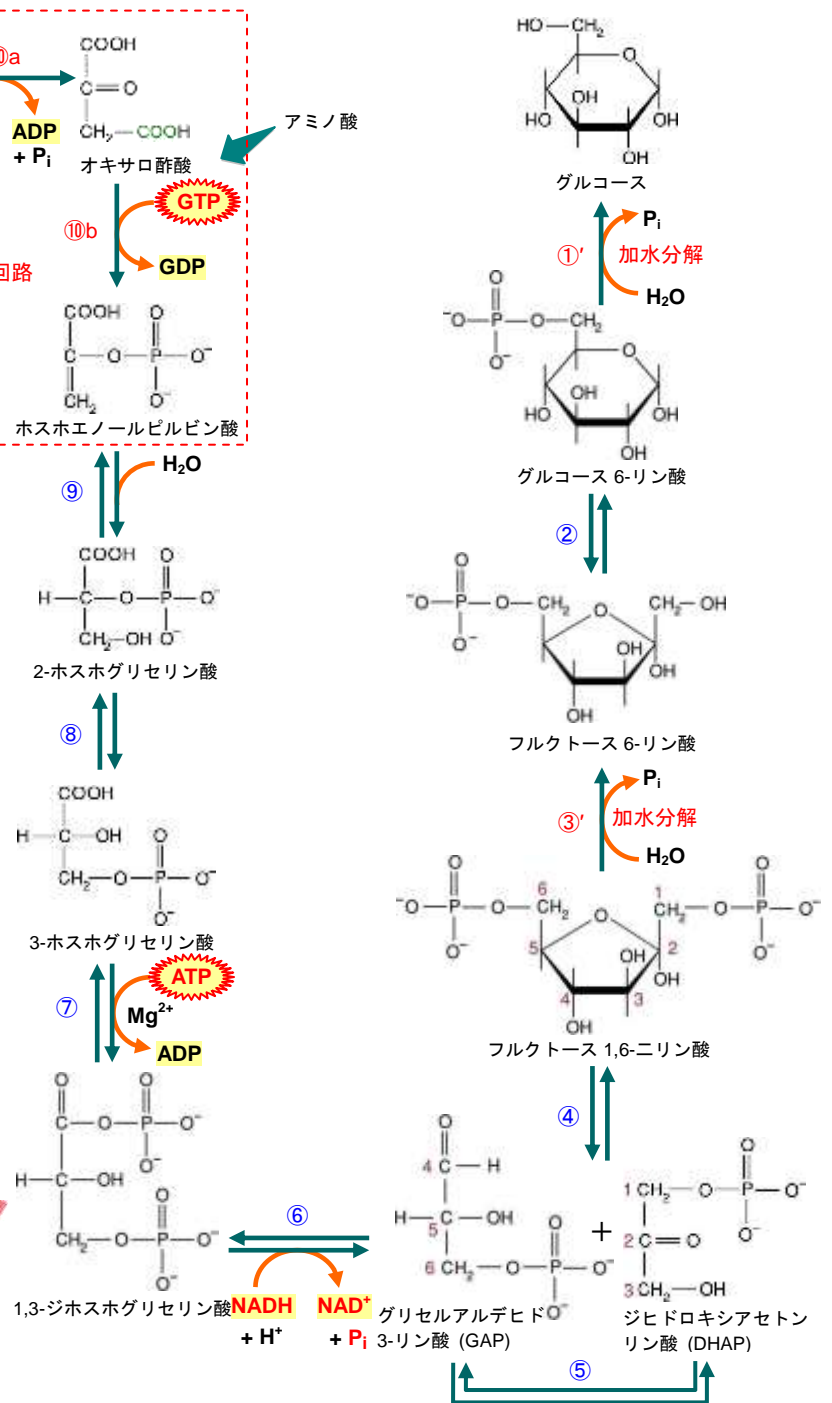
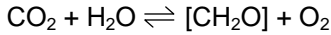


図 10 糖新生の経路

9.3.2 光合成(photosynthesis)

高等植物や緑藻(青色細菌)が葉緑体(クロロプラスト)内で行う, 二酸化炭素の固定反応。



●葉緑体(chloroplast)の構造と光合成

外部境界膜と透過性の低い内部境界膜がある。内部は**ストロマ**と呼ばれ, 高濃度の酵素, 環状 DNA, リボソームが存在。ストロマには膜で包まれた**チラコイド**という構造物が存在。_____が光合成の場。光合成 2 つの段階に分けられる。

- ①明反応(light reaction): 光のエネルギーを利用して H_2O を酸素 O_2 にするとともに, CO_2 の還元に必要な _____ と _____ をつくる段階。
- ②暗反応(dark reaction): CO_2 から種々の _____ をつくる段階。

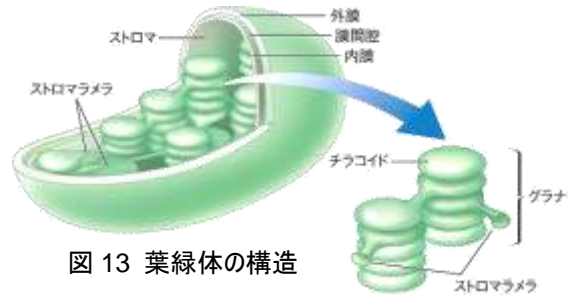
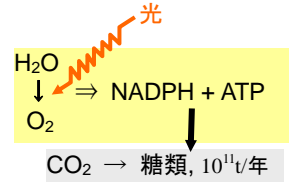
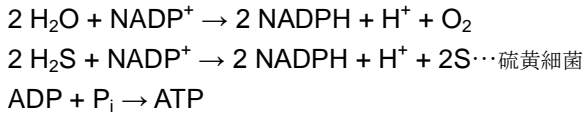


図 13 葉緑体の構造

●明反応(light reaction)

光合成で発生する酸素(O_2)は _____ に由来。



●光受容体と補助色素

光を受け取る受容体は, クロロフィル a, b という緑色の色素。中心に Mg^{2+} が配位。

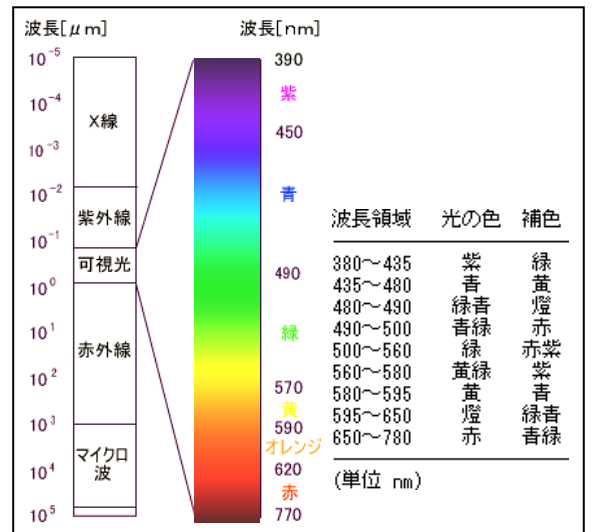
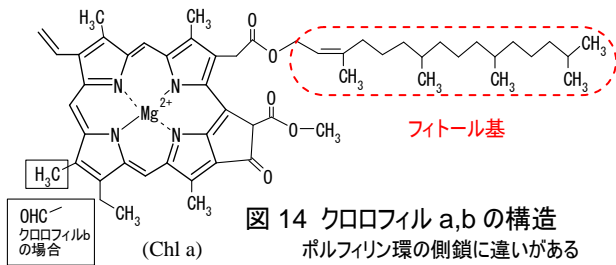


図 16 光の色と物の色(補色)

大部分のクロロフィルは光を集めるアンテナ。吸収された光子のエネルギーはアンテナクロロフィル間を励起エネルギーとして移動し*, 極めて励起エネルギーが低い**反応中心クロロフィル**に集められる。

*蛍光としては放出されない。

クロロフィルが吸収できない波長の光を集めるために, β -カロテンのようなカロテノイド類(黄~橙), フィコエリトリン中のフィコエリトロピリン(赤)やフィコシアニン中のフィコシアノピリン(青)のような別の色素も使われる。

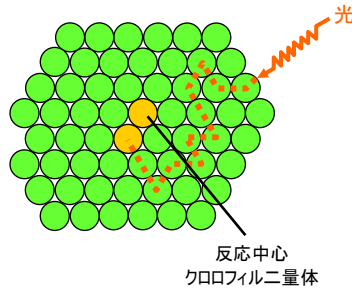


図 15 反応中心クロロフィルへのエネルギーの移動

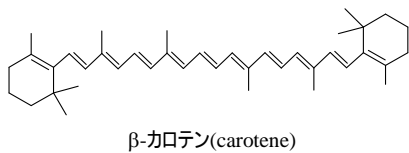


図 17 補助色素の構造

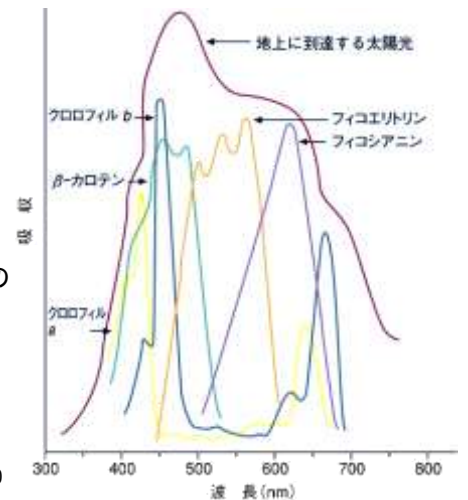
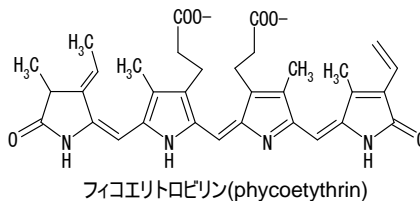
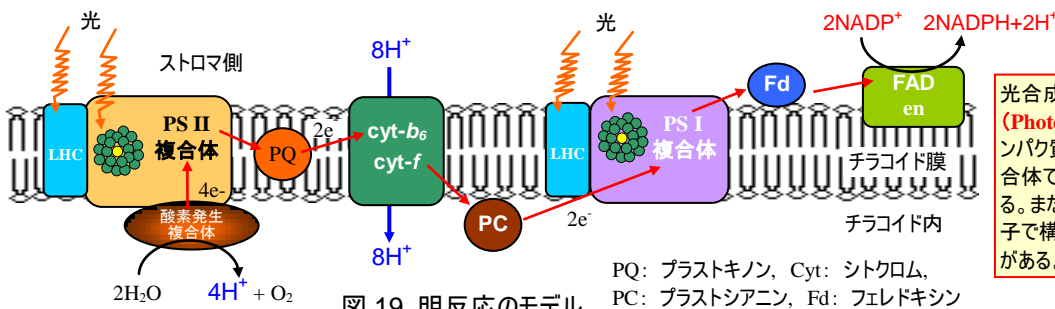


図 18 クロロフィル a, b および補助色素の吸収スペクトル

●明反応の光化学系(PS)複合体



光合成の機能単位は, **光化学系(Photosystem, PS) I, II**と呼ばれるタンパク質とクロロフィルや補助色素の複合体で, チラコイド膜に埋め込まれている。また, タンパク質と結合した色素分子で構成される集光性複合体(LHC)がある。

●光リン酸化 (photophosphorylation)

光化学系 II における水 2 分子の酸化 → $4H^+$ } 計 $12H^+$ がストロマからチラコイド
 シトクロム b_6-f 複合体 → $8H^+$ } 内に生成または取り込まれる → チラコイド膜を挟んでのプロトン濃度勾配形成
 (pH の差は 3.5 にも達する)

プロトン濃度勾配 (pH 勾配^{*}) を利用して、葉緑体 ATP 合成酵素 (H^+ 輸送 ATPase) が ADP とリン酸から 1 分子の ATP を合成する (ミトコンドリアにおける酸化リン酸化と同じ)。これを 光リン酸化 という。

^{*} チラコイド膜が Mg^{2+} や Cl^- を通すために電荷的中性は保たれている。従って、ATP 合成の駆動力は pH 勾配だけに依存する。

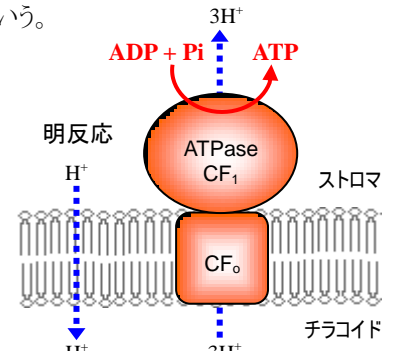
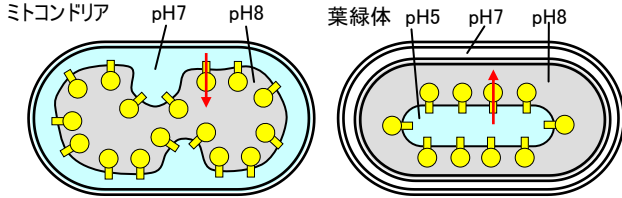


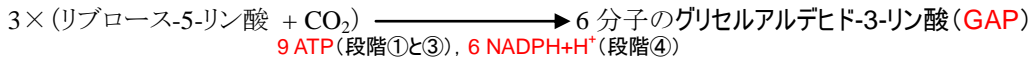
図 20 H^+ -ATPase による ATP 合成

クロロプラストが 8 光子を吸収 → 1 分子の O_2 と 2 分子の NADPH, $12H^+$ が移動 → $12H^+ = 4ATP$, $2NADPH = 6ATP$ (合計 10ATP)。1 光子の吸収 = 1.25ATP に相当。

●暗反応 (dark reaction) … Calvin サイクル, または還元的ペントースリン酸回路ともいう

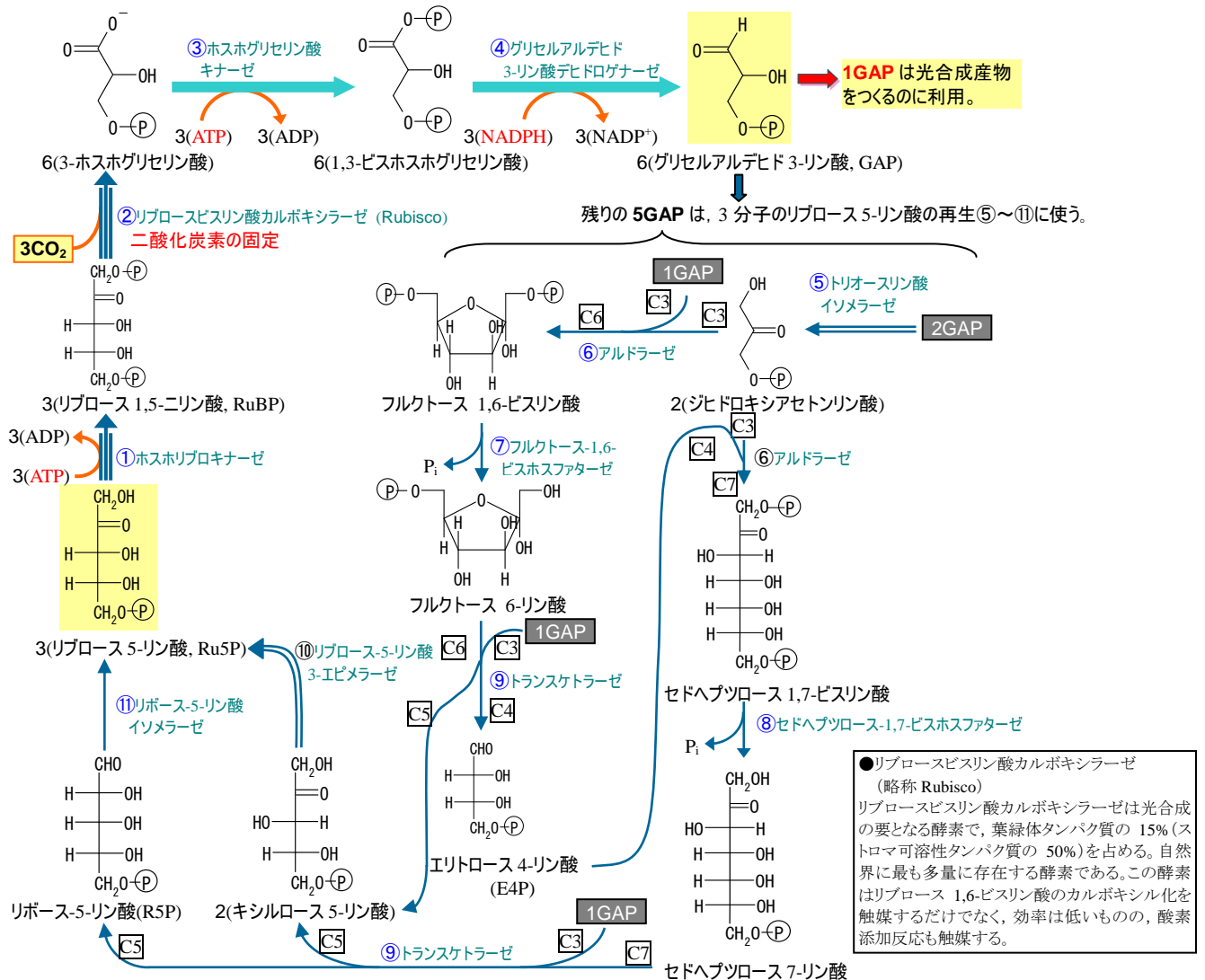
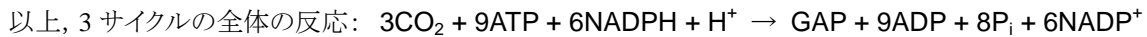
ATP と NADPH を用いて, CO_2 から糖質を合成する過程。暗反応は 2 段階に分けられる。

【還元的合成過程】 段階①~④ × 3 回 … この過程の後半は糖新生と同じ



【再生過程】 段階⑤~⑪ … この過程はホスホグルコン酸経路と大変良く似ている

1 分子の GAP → 糖の合成 (光合成生成物)。残りの 5 GAP → 糖の組み替え → 3 分子のリブローズ-5-リン酸を再生。

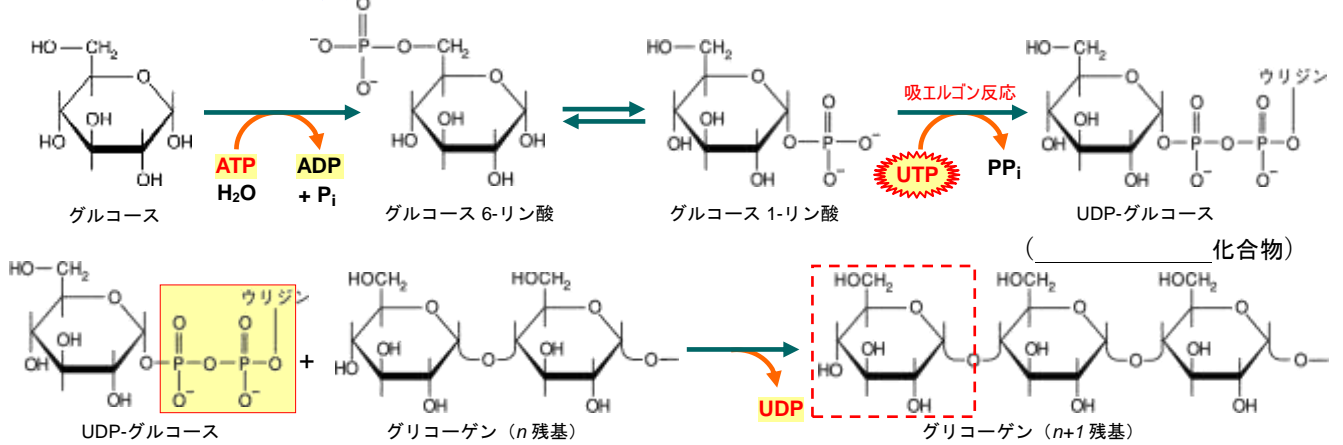


●リブローズビスリン酸カルボキシラーゼ (略称 Rubisco)
 リブローズビスリン酸カルボキシラーゼは光合成の要となる酵素で、葉緑体タンパク質の 15% (ストロマ可溶性タンパク質の 50%) を占める。自然界に最も多量に存在する酵素である。この酵素はリブローズ 1,6-ビスリン酸のカルボキシル化を触媒するだけでなく、効率は低いものの、酸素添加反応も触媒する。

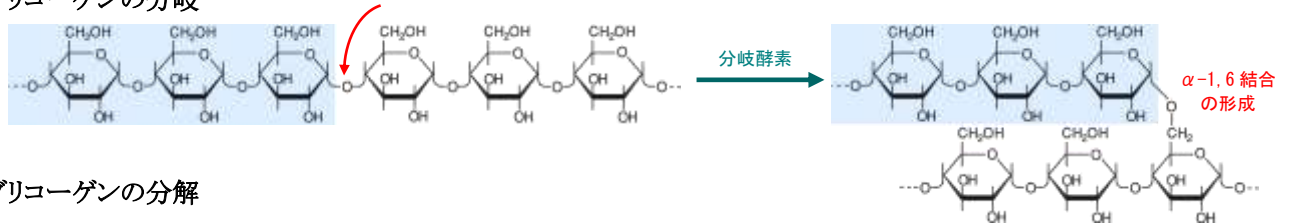
図 21 暗反応 (Calvin サイクル)

9.3.3 グリコーゲンおよびデンプンの合成

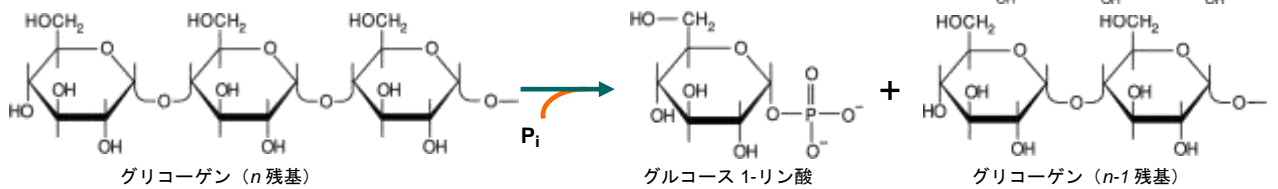
●グリコーゲンの合成 (鎖延長)



●グリコーゲンの分岐



●グリコーゲンの分解



●デンプンの合成 (植物)

基本的には上と同じ。ただし、UTP の代わりに **ATP** を用いる。

