

# 栄養代謝学

金行孝雄著



# **栄養代謝学**

**金行孝雄著**

**理工図書**

---

## はじめに

今日、ヒトの健康問題は疾患の治療から予防に向けての取り組みが重要視されてきている。栄養の原則もまた、特定の栄養素の欠乏状態よりも、過剰摂取に起因する内臓脂肪蓄積型肥満によるメタボリックシンドロームのリスクが増大し、生活習慣病といわれる糖尿病、高血圧、脂質異常症などが社会的に大きな問題になっている。このことは、栄養素による急性疾患よりもむしろ慢性疾患の影響が重要であることが分かる。生活習慣は食生活に関するものが主体であるので、これは当然、栄養学の守備範囲であり、生活習慣病は予防が重要であり、このことは新しい栄養学の1つの任務である。栄養学は人間を対象とするものであり、生命科学の一分野で基礎栄養学、臨床栄養学、応用栄養学、栄養代謝学や栄養管理などに細分化されることもある。

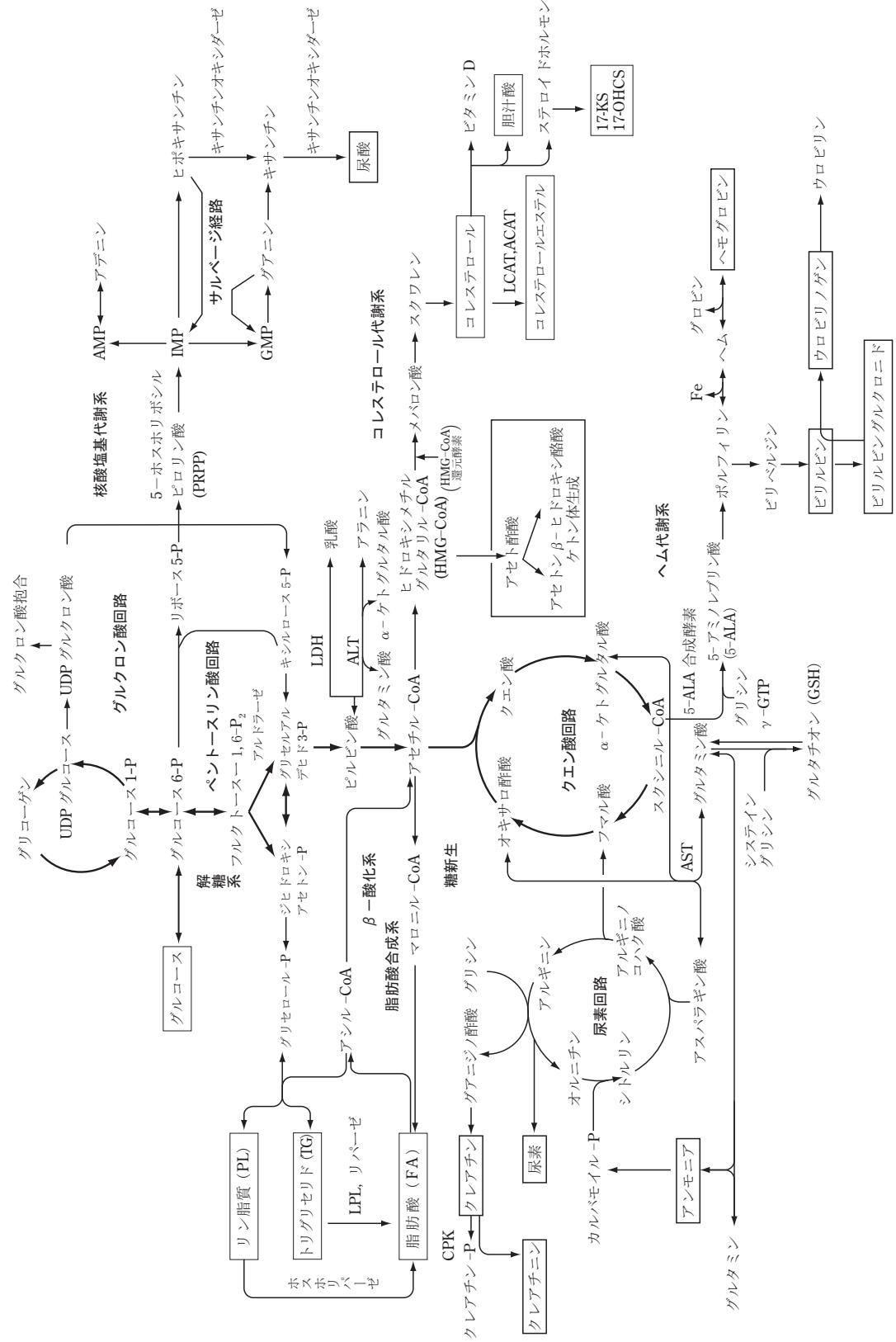
栄養代謝学の重要なテーマとしてエネルギー収支バランスがある。長期的にはエネルギー摂取量、エネルギー消費量、体重が互いに連動して変化することで調節される。エネルギー摂取量がエネルギー消費量を上回ると体重が増加して肥満につながる。エネルギー摂取量は、種々の因子によって影響を受ける。なかでも食事中の栄養素である糖質、脂肪、たんぱく質、食物繊維は生体でエネルギー源として利用され、それらの代謝と意義について理解ができるように、栄養素の消化・吸収、生体内での代謝と生理機能について記述した。エタノールは7.1 kcal/g のエネルギーを産生することからエネルギー収支に影響する。また、特に高齢者は低栄養から虚弱、筋肉減少を来すので、健康寿命の延伸や介護予防に関連するとされる栄養素を取り上げた。水は生命活動を維持するために必要量をとることは他の栄養素をとること以上に重要であることから記載した。

本書は健康について学ぶ学生の教科書としてのみならず、現場担当者や一般市民に参考書として使われることを期待して執筆した。最後に、本書を出版するに当たり、絶えずご支援をいただきました理工図書（株）編集部の諸氏に感謝いたします。

平成28年4月27日

金行孝雄

# 主要な物質代謝系



# 目 次

## 第 1 章 エネルギー代謝

1

- 1 生体で利用できるエネルギー／2
- 2 エネルギーの交代／2
- 3 生体エネルギーと代謝／2
- 4 自由エネルギー／2
- 5 ATP の役割／4
- 6 ATP の生成／4
- 7 ATP の消費／5
  - 7.1 生体構成成分の合成／5
  - 7.2 細胞運動／5
  - 7.3 能動輸送／5
  - 7.4 細胞内シグナル伝達系／6

## 第 2 章 糖質の代謝

7

- 1 糖質の消化・吸収／8
- 2 グルコースの主な代謝系／9
- 3 グルコースの分解／10
  - 3.1 解糖系／10
  - 3.2 クエン酸回路 (TCA 回路)／10
  - 3.3 電子伝達系と酸化的リン酸化／10
  - 3.4 グルコースから生じる ATP の数／11
- 4 グリコーゲンの代謝／13
  - 4.1 グリコーゲンの合成／13
  - 4.2 グリコーゲンの分解／13
  - 4.3 グリコーゲン代謝の調節／14
- 5 糖新生／15
  - 5.1 糖新生の反応／16
  - 5.2 糖新生の原料／17
- 6 糖の相互転換と新生／18
  - 6.1 ペントースリン酸回路／18

6.2 グルクロン酸経路／18	
6.3 フルクトースの代謝／18	
6.4 ガラクトースの代謝／19	
<b>7 血糖値の調節／19</b>	
<b>8 グリコーゲンと脂肪酸の合成／20</b>	
<b>9 解糖系と糖新生系の調節／21</b>	
<b>10 グルコースの毒性／21</b>	
<b>11 食物纖維／22</b>	
11.1 難消化性オリゴ糖と糖アルコールの機能／22	
11.2 食物纖維の種類／23	
11.3 食物纖維の種類と生理作用／23	
<b>12 アルコール（エタノール）／24</b>	
12.1 アルコール代謝／24	
12.2 アルコールのエネルギー代謝／25	
12.3 チアミン／25	
12.4 酒の功罪／26	
<b>第3章 脂質の代謝</b>	
27	
<b>1 脂肪の消化・吸収／28</b>	
<b>2 脂質の輸送と蓄積／29</b>	
<b>3 脂肪酸／31</b>	
<b>4 脂肪酸の酸化経路／32</b>	
4.1 脂肪酸の遊離／32	
4.2 脂肪酸のミトコンドリアマトリックスへの移行／32	
4.3 脂肪酸の $\beta$ 酸化／33	
4.4 $\beta$ 酸化反応によるATPの産生／33	
<b>5 ケトン体生成と利用／34</b>	
<b>6 脂肪酸の生合成／35</b>	
6.1 細胞質ゾルへのアセチルCoAの供給／35	
6.2 パルミチン酸の合成／36	
6.3 脂肪酸鎖の伸長／38	
<b>7 トリグリセリドの合成／38</b>	
<b>8 コレステロールの生合成と代謝／38</b>	
<b>9 コレステロールからつくられる化合物／39</b>	

9.1	胆汁酸の生成と腸肝循環／39
9.2	ビタミンD <sub>3</sub> の生合成／39
9.3	ステロイドホルモンの合成／40
<b>10</b>	<b>エイコサノイドの生合成／40</b>
<b>11</b>	<b>褐色脂肪組織の役割／41</b>
<b>12</b>	<b>トランス脂肪酸／42</b>

## 第4章 たんぱく質とアミノ酸の代謝

43

<b>1</b>	<b>たんぱく質とアミノ酸／44</b>
1.1	1日のたんぱく質代謝量とアミノ酸代謝量／44
<b>2</b>	<b>たんぱく質とアミノ酸の役割／44</b>
<b>3</b>	<b>たんぱく質の合成／44</b>
3.1	転写／45
3.2	翻訳／45
<b>4</b>	<b>たんぱく質の構造／47</b>
<b>5</b>	<b>体たんぱく質の代謝回転／47</b>
<b>6</b>	<b>たんぱく質の栄養価／47</b>
6.1	必須アミノ酸／47
6.2	生物的評価法／48
6.3	化学的評価法／48
6.4	アミノ酸の補足効果／48
<b>7</b>	<b>食物中のたんぱく質の消化と吸収／49</b>
7.1	たんぱく質の消化／49
7.2	たんぱく質消化物の吸収／49
<b>8</b>	<b>たんぱく質の分解／50</b>
8.1	たんぱく質の分解（リソソーム系）／50
8.2	たんぱく質の分解（ユビキチン-プロテアソーム系）／51
<b>9</b>	<b>アミノ酸／52</b>
<b>10</b>	<b>アミノ酸の窒素の代謝／53</b>
10.1	アミノ基転移反応／53
<b>11</b>	<b>糖原性アミノ酸とケト原性アミノ酸／53</b>
<b>12</b>	<b>アンモニアの処理と尿素回路／54</b>
12.1	アンモニアの生成／54
12.2	尿素回路によるアンモニアの処理／54

目 次	————
13 アミノ酸からの含窒素化合物の合成／55	
13.1 ホスホクレアチンの合成／55	
13.2 ポルフィリンの生合成と分解／56	
13.3 プリン塩基とピリミジン塩基／57	
13.4 生理活性アミンの合成／57	
13.5 グルタチオンの合成／57	
13.6 一酸化窒素の合成／57	
第5章 ビタミン	59
1 ビタミンA／60	
1.1 ホルモン様作用／62	
1.2 抗酸化作用／62	
2 ビタミンD／62	
3 ビタミンE／63	
4 ビタミンK／64	
5 ビタミンB <sub>1</sub> ／65	
6 ビタミンB <sub>2</sub> ／65	
7 ビタミンB <sub>6</sub> ／66	
8 ビタミンB <sub>12</sub> ／67	
9 ナイアシン／68	
10 パントテン酸／69	
11 葉酸／70	
12 ビオチン／71	
13 ビタミンC／71	
第6章 無機質	73
1 無機質の栄養／74	
2 生体成分の構成素としての無機質／74	
2.1 カルシウム／74	
2.2 リン／75	
2.3 マグネシウム／75	
3 無機質と電解質／76	
3.1 ナトリウム／76	
3.2 カリウム／77	

3.3 塩素／77

**4 鉄代謝と栄養／78**

**5 酵素反応への賦活作用／79**

5.1 銅／79

5.2 亜鉛／79

5.3 セレン／80

5.4 マンガン／80

5.5 モリブデン／80

**6 その他の無機質／81**

6.1 クロム／81

6.2 ヨウ素／81

6.3 硫黄／82

**第7章 水の代謝**

83

**1 水分の調節／84**

1.1 アルドステロンによる水代謝の調節／85

1.2 バソプレッシンによる水代謝の調節／85

1.3 心房性ナトリウム利尿ペプチド（ANP）による水代謝の調節／85

**2 電解質の代謝／85**

**3 酸塩基平衡／86**

**第8章 成人期から高齢期の栄養**

87

**1 更年期と栄養／88**

**2 生活習慣病／88**

2.1 肥満／88

2.2 糖尿病／90

2.3 高血圧／90

2.4 脂質異常症、動脈硬化／90

2.5 骨粗鬆症／91

**3 高齢者／91**

3.1 栄養関連機能の加齢変化／91

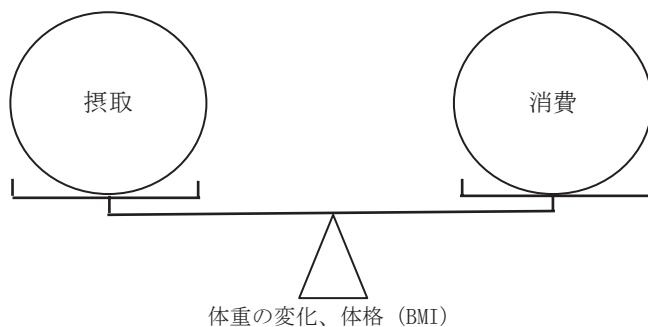
3.2 低栄養／92

**4 フレイルティおよびサルコペニアの病態と栄養／93**

4.1 たんぱく質の関与／93

4.2 ビタミンDの関与／94
4.3 抗酸化作用と関連のある栄養素／94
<b>5 ロコモティブシンドロームと栄養／95</b>
<b>6 認知機能低下と栄養／95</b>
6.1 抗酸化と関連するビタミン／95
6.2 ホモシステイン／95
6.3 ビタミンD／95
6.4 多価不飽和脂肪酸／96
<b>7 体水分の調節障害／96</b>
<b>索引／99</b>

# 第1章 エネルギー代謝



エネルギー摂取量とエネルギー消費量が等しいとき、体重の変化はなく、健康的な体格（BMI）が保たれる。エネルギー摂取量がエネルギー消費量を上回ると体重は増加し、肥満につながる。エネルギー消費量がエネルギー摂取量を上回ると体重は減少し、やせにつながる。

出典) 厚生労働省「日本人の食事摂取基準（2015年版）」

**エネルギー収支バランスの基本概念**

食物は生命維持のための諸活動に必要なエネルギーを供給する燃料として必要なものである。ヒトは生きていくために、絶えず外界から種々の物質を取り入れ、体内で変化させ、その一部を身体の構造物質として利用する。一方で体内の物質を分解して生命現象を営むためのエネルギーを产生し、不要となった物質を体外に排出している。このように生物は生命の維持、活動、繁殖のために必要な物質を外部から取り入れ、それを利用している。食物は生命を維持するための燃料として必要であり、それが生命を支える。

## 1 生体で利用できるエネルギー

食物に含まれているエネルギー源となる物質は植物によって太陽エネルギーを化学的エネルギーとして蓄えたものである。すなわち、植物における光合成によって二酸化炭素と水からグルコースがつくられ、これがさらに高分子化合物につくりかえられたものである。動物は太陽エネルギーを直接には化学的エネルギーとして貯蔵する能力は持っていない。したがって、植物が光合成によって貯蔵したエネルギーを利用して生体に必要な物質をつくっている。この再合成の過程ではその素材となる物質が持っている自由エネルギーは常に減少する。

## 2 エネルギーの交代

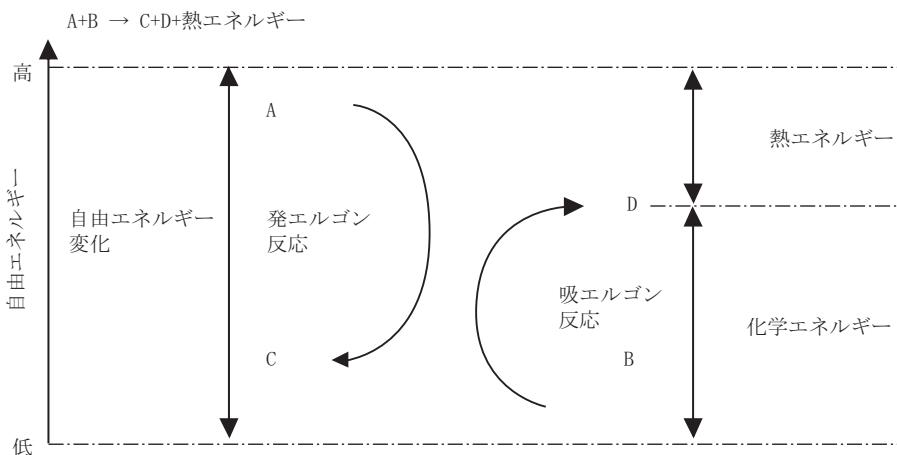
生体は外界から絶えず物質を取り入れ、これを生体に必要な物質につくりかえている。生体が取り入れた物質を生体に必要な物質につくりかえる過程を同化といい、同化した物質からより簡単な物質に分解する過程を異化という。このとき、エネルギーの交代が行われる。同化や異化のような生体内における物質の変換を物質代謝という。

## 3 生体エネルギーと代謝

生化学反応は反応する系がより高いエネルギーから、より低いエネルギーへ移行するときにエネルギー放出を伴う。このとき、エネルギーは熱として放出されることが多い。生物系以外では熱エネルギーは機械的エネルギー、電気的エネルギー、化学的エネルギーなどに変換することができる。しかし、生物系は原則的に等温系であるので、生体内で放出した熱エネルギーは生命現象を営むために必要なエネルギーとして再利用することはできない。このため、生体成分の合成、筋肉の収縮、物質の輸送などに必要なエネルギーは化学的連鎖や酸化反応への共役によって獲得している。

## 4 自由エネルギー

自由エネルギーの変化 ( $\Delta G$ ) は、反応系における全エネルギー変化のうち仕事に利用



自由エネルギーの大きな物質（A）が小さな物質（C）に変化することを発エルゴン反応という。発エルゴン反応は自発的に進み、自由エネルギー変化に相当するエネルギーが放出される。また、自由エネルギーの小さな物質（B）が大きな物質（D）へ変化する反応のことを吸エルゴン反応という。吸エルゴン反応を起こすためには化学エネルギーが必要である。化学エネルギーは、発エルゴン反応のときにエネルギーを利用できる。このことを共役という。その際自由エネルギー変化をすべて化学エネルギーに利用することはできず、一部は熱エネルギーとして喪失する。

図1-1 発エルゴン反応と吸エルゴン反応

することが可能なエネルギーをいい、化学系においては化学ポテンシャルとして知られている。生化学反応が進行する場合には、発エルゴン反応と吸エルゴン反応が共役して進むので、自由エネルギーは熱として喪失する。このとき、発エルゴン反応に際して高エネルギー化合物を合成し、これを吸エルゴン反応に組み入れ、自由エネルギーを発エルゴン過程から吸エルゴン過程に移行する（図1-1）。

生体では、ATPで代表されるような高エネルギーリン酸化合物の加水分解反応が共役している。表1-1に示すように、ATPの水解の $\Delta G^0'$ は約7.3 kcalでこの値は種々のリン酸化合物中ではほぼ中間に位置している。ATPは表1-1のATPより下部に位置する化合物に対し高エネルギーリン酸の供与体となることができる。同様にADPは表1-1のATPより上にある化合物から高エネルギーリン酸を受け取りATPを生成できる。リン酸塩の他にも高エネルギー化合物には、チオエステル結合を持つ化合物（アセチルCoAなど）やS-アデノシルメチオニンがある。

表1-1 細胞内に存在する種々のリン酸化合物の加水分解の標準自由エネルギー

リン酸化合物	$\Delta G^0'$ (kcal/mol)
ホスホエノールピルビン酸 (PEP)	-14.8
カルバモイルリン酸	-12.3
1,3-ビスホスホグリセリン酸	-11.8
クレアチニン酸	-10.3
ATP ( $\gamma$ )	-7.3
ADP ( $\beta$ )	-6.6
ピロリン酸	-6.6
グルコース1-リン酸 (G1P)	-5.0
フルクトース6-リン酸 (F6P)	-3.8
AMP	-3.4
グルコース6-リン酸 (G6P)	-3.3
グリセロール3-リン酸	-2.2

## 5 ATP の役割

ヒトの体を構成する細胞は他の生物と同じように自分でATP（アデノシン三リン酸）を合成し、それを分解していろいろな仕事をする。生きている細胞は、絶え間なく呼吸する。食物に含まれる糖質、脂質、たんぱく質がエネルギー源となるのはその代謝過程においてATPが生成されるからである。

ATPはアデノシンにリン酸基3個が結合した高エネルギー化合物で図1-2に示す基本構造を持っている。ATPアーゼ(ATPase)が働くと、加水分解されてADPとリン酸が生成される。



このとき標準自由エネルギーはATP1mol当たり約7.3 Kcalのエネルギーを放出する。

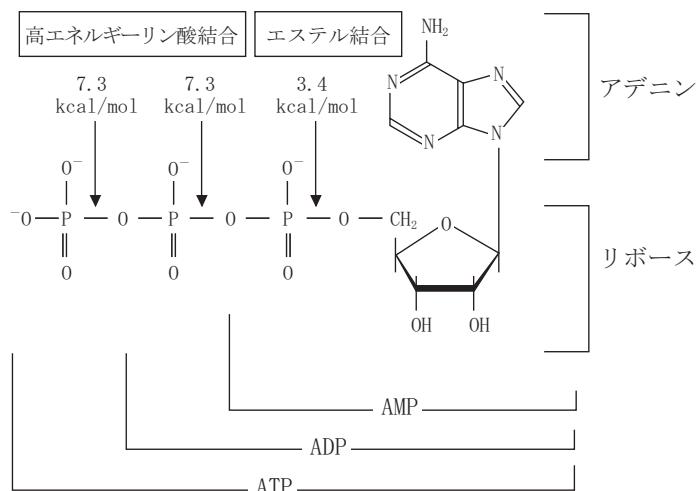


図1-2 ATPの構造とATPサイクル

## 6 ATPの生成

高エネルギー化合物の生成経路のうち解糖系で2カ所とクエン酸回路で1カ所に、ADPまたはGDPに高エネルギー化合物の加水分解時のエネルギーが直接取り入れられ、ATPまたはGTPが合成される。これが基質準位のリン酸化である。

これに対して、基質の酸化によって遊離した水素が電子伝達系を経て分子状酸素と結合して水を生成する過程で、電子伝達の自由エネルギー変化によってATPを合成する一連の反応系を酸化的リン酸化という。生体におけるATPの生成は、大部分が電子伝達系に伴って起こる酸化的リン酸化によって行われる。

人工的な機械ではエネルギーは外部から供給されるのが普通であるが、細胞ではエネルギーはすべて同一細胞内で自給される。エネルギーの供給とは ATP の合成であるが、細胞内には大量の ATP を蓄積することができないので仕事をしている細胞は ATP の合成と分解が同時に進行している。ATP は細胞内のエネルギー担体であり、正常に生きている細胞ではその合成量と消費量は等しいことになる。

## 7 ATP の消費

ATP の消費系は生体成分の合成、筋肉の運動、神経活動、栄養吸収などのため、多くの種類の細胞が多様な仕事をしている。

### 7.1 生体構成成分の合成

細胞は、それ自身を構成する物質（たんぱく質、核酸、多糖類のような種々の高分子を含む）を単純な化合物から合成しなければならない。この合成には必ず ATP が関与する。直接の反応には UTP (ウリジン三リン酸)、GTP (グアノシン三リン酸)、CTP (シトシン三リン酸) などの類似化合物が用いられることがあるが、これらの化合物は直接 ATP のリン酸が転移して合成されるものである。

### 7.2 細胞運動

筋肉の収縮は、筋原線維を構成するアクチン線維とミオシン線維の ATP 分解に伴う滑走によって起こる。ATP を分解する作用はミオシン分子にある。筋肉の収縮はヒトの体の最大の ATP 消費系である。ミオシン ATP アーゼによる筋収縮の仕事（エネルギー転換）の効率は50%以下である。激しい運動をすると大量の熱が発生する。実際の筋収縮ではミオシン ATP アーゼが ATP を消費する以外に、その約半分の ATP を  $\text{Na}^+$  および  $\text{Ca}^{2+}$  ポンプが消費する。

### 7.3 能動輸送

生物は絶えず特定の陽イオンを細胞の中から外に輸送している。その結果、細胞内外にそのイオンの濃度差が生じ、細胞は内側がマイナスの電池になる。このイオン輸送は濃度勾配に逆らう方向になされるので、能動輸送とよばれ、ATP の加水分解を伴う特定の輸送酵素によって媒介される。これらの酵素は能動輸送酵素あるいは ATP アーゼとよばれる。

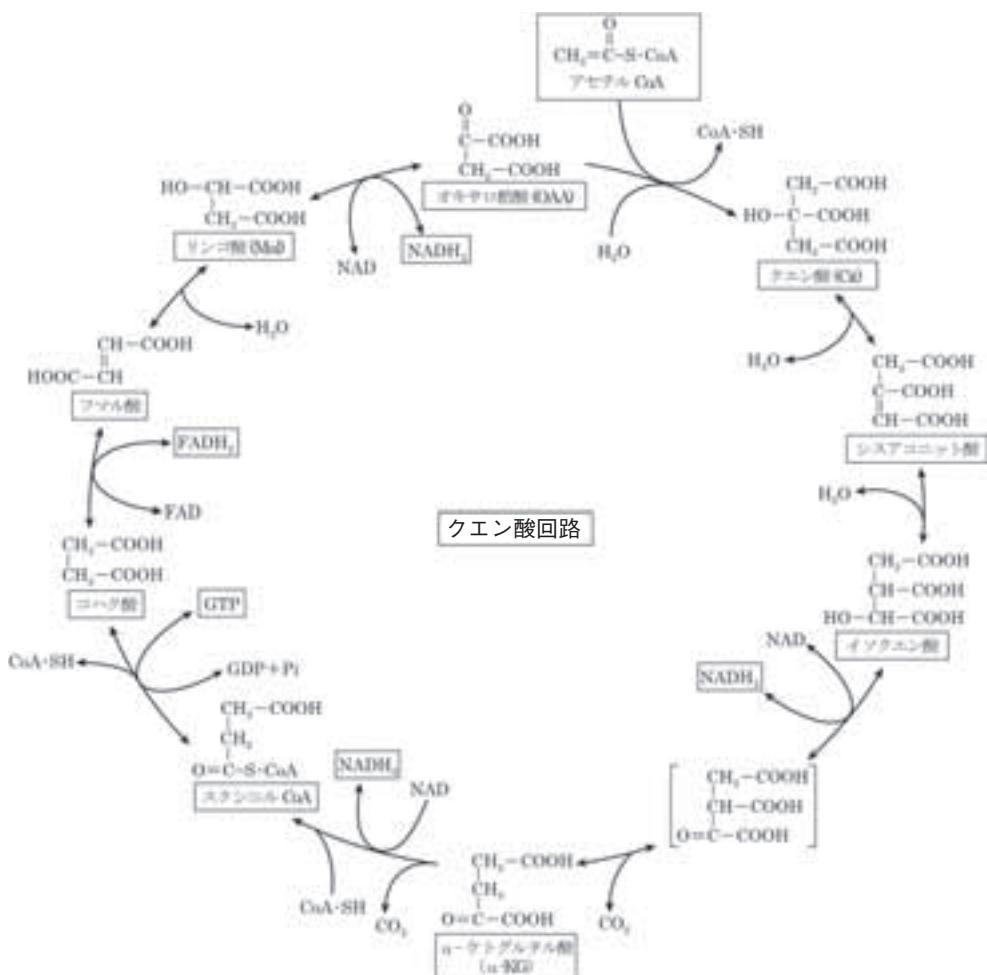
動物を特徴づけているのは、 $\text{Na}^+$  を能動輸送する  $\text{Na}^+$ -ATP アーゼである。この酵素の別名はナトリウムポンプである。この酵素は細胞の中から絶えず濃度勾配に逆らって  $\text{Na}^+$  を外部に輸送すると同時に  $\text{K}^+$  を内部に輸送するので  $\text{Na}^+, \text{K}^+$ -ATP アーゼともよばれる。ナトリウムポンプはヒトのすべての細胞に存在しており、すべての細胞における栄養物質の能動輸送のエネルギーになっている。

#### 7.4 細胞内シグナル伝達系

ヒトの体で ATP 消費の99%以上が化学合成、能動輸送および細胞運動で占められている。しかし、量的には非常に微量であるが細胞にとって極めて重要なシグナル伝達系と細胞内の代謝調節の多くの反応に ATP 分解が関与している。

細胞内のシグナル伝達の最終段階は標的たんぱく質の ATP によるリン酸化反応であり、たんぱく質の活性化・不活性化の切り替えスイッチである。

## 第2章 糖質の代謝



日本人のエネルギー摂取量に対する糖質のエネルギー比率は約60%を占めている。食品中の主な糖質はデンプンおよび二糖（スクロース、ラクトースなど）である。デンプンは消化管でグルコースに分解され、血液により全身の組織に運ばれる。食後、肝臓はグルコースをグリコーゲンとして貯蔵し、空腹時に血糖値が低下すると、これをグルコースに分解して血中に放出する。また、乳酸、アミノ酸やグリセロールから糖新生を行い血糖値を一定に維持する。脳神経系、赤血球や酸素不足時の骨格筋などのエネルギー源は糖質である。

## 1 糖質の消化・吸収

糖質の中でデンプンは管腔内消化と膜消化の2段階の消化によりグルコースまで消化される。デンプンはグルコースが連なった $\alpha$ -グルコシド鎖の重合体で、その主成分は分枝を持たないらせん構造のアミロースと分枝を持つアミロペクチンの混合物である。アミロースは多数のグルコースが $\alpha$ -1,4グルコシド結合により直線状につながっている。アミロペクチンは、多数のグルコースが $\alpha$ -1,4グルコシド結合により直線状につながったアミロースから、グルコースが $\alpha$ -1,6グルコシド結合で枝分かれした構造になっている（図2-1）。

摂取したデンプンは、唾液と胰液中のエンド型酵素である $\alpha$ -アミラーゼによる管腔内消化により加水分解されて、マルトース、マルトリオース、および $\alpha$ -限界デキストリン

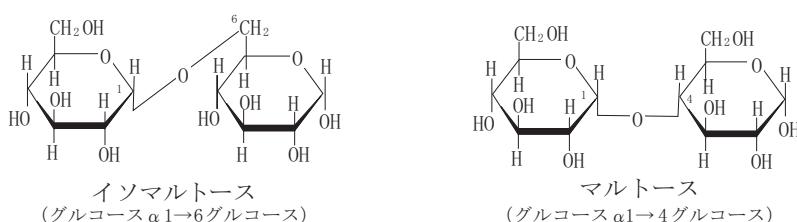
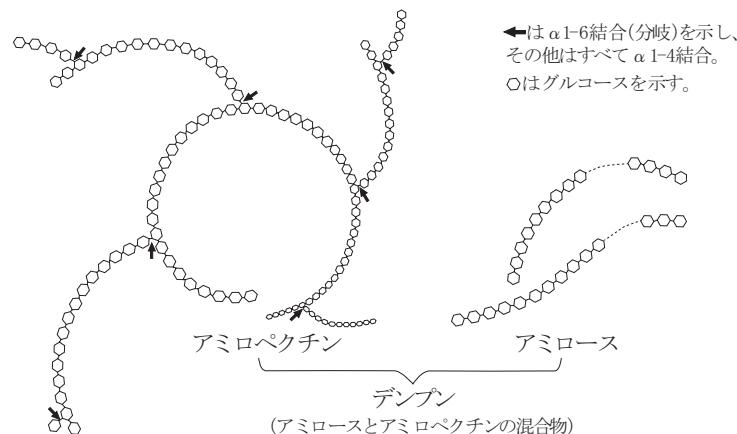


図2-1 デンプンの構造

となる。デンプン消化物および食物中の二糖は小腸粘膜上皮細胞の細胞膜にあるグルコアミラーゼ、イソマルターゼ、マルターゼ、スクラーゼやラクトーゼなどのエキソ型膜酵素によって、グルコースおよびその他の単糖に分解され、小腸から吸収される。

グルコースとガラクトースは微絨毛膜に発現している輸送担体 SGLT1(sodium glucose transnsporter1)により小腸上皮細胞内に取り込まれる。そして、GLUT2 (グルコース輸送体2) により促進拡散で側低膜から細胞外に出て、毛細血管に入る。また、 $\text{Na}^+$ 非依存性の促進輸送体 GLUT5によりグルコース、ガラクトースとフルクトースはその濃度勾配に従った輸送を受ける。フルクトースの細胞からの排出はグルコースとガラクトースと同様に GLUT2により促進拡散で側低膜から細胞外に出て、毛細血管に入る (図2-2)。

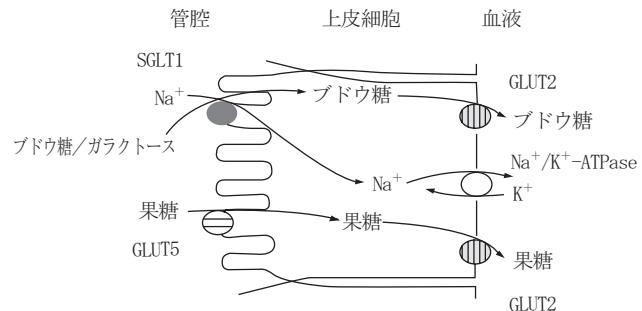


図2-2 小腸における単糖の輸送機構

## 2 グルコースの主な代謝系

グルコースの代謝に関与する反応経路は3つの群に大別される。1つ目はグルコースを分解してATPを産生する経路で、解糖系・ケエン酸回路・電子伝達系からなる。2つ目は糖新生系である。3つ目はペントースリン酸回路とグリコーゲン合成・分解経路である (図2-3)。

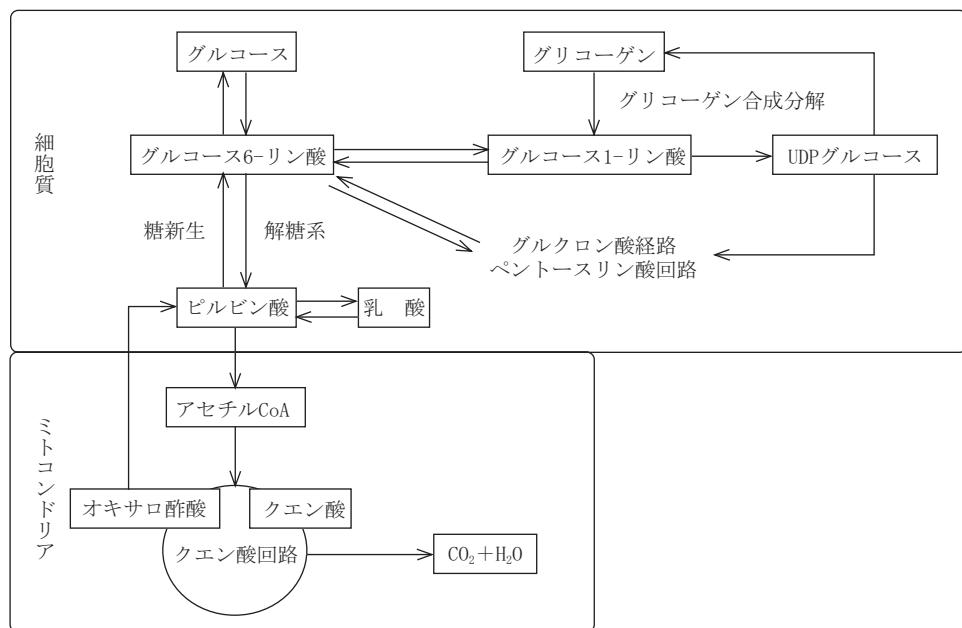


図2-3 糖代謝の概要

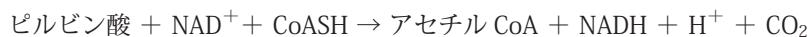
### 3 グルコースの分解

#### 3.1 解糖系

グルコースは細胞質ゾルにある解糖系において、10段階の反応を経て2モルのピルビン酸に分解される。ミトコンドリアを持たない赤血球や無酸素状態（激しい運動中の筋肉のように酸素が不足している状態）の細胞では、グルコース1モルは解糖系で2モルの乳酸になり、その乳酸は細胞外へ出していくので、解糖系ではグルコース代謝はそれで終わる。この場合は、グルコース1モルから4モルのATPが産生され、2モルのATPが消費されるので正味2モルのATPが利用できる。無酸素状態において解糖系で產生されたNADHは乳酸の生成のために酸化されてNADになるか、好気的条件下でミトコンドリア内でATPに変換される。なお、細胞外へ出た乳酸の大部分は、血中を経て肝臓や腎臓に取り込まれ、糖新生経路によってグルコースに再生される。

#### 3.2 クエン酸回路（TCA回路）

解糖系によって生じたピルビン酸は好気的条件下では、細胞質からミトコンドリアマトリックスに輸送される。ピルビン酸は脱炭酸され、アセチル基をCoASHに渡しアセチルCoAに変換される。



この反応を触媒する酵素はピルビン酸デヒドロゲナーゼ複合体である。

ついでアセチルCoAはクエン酸回路で8つの酵素からなる反応系で代謝され、その過程で、2モルのピルビン酸から6モルのNADH、2モルのFADH<sub>2</sub>、および2モルのGTPを生じる。

#### 3.3 電子伝達系と酸化的リン酸化

細胞内のATPの产生は、主にミトコンドリアで行われる。細胞内で解糖系やクエン酸回路によって放出される自由エネルギーのほとんどは、還元型の補酵素であるNADHやFADH<sub>2</sub>の中に移行し蓄積される。これらの分子に蓄えられた電子を、連続的な酸化還元反応によって段階的に伝達する。この過程を電子伝達系（呼吸鎖）という。

電子伝達系はミトコンドリア内膜上に存在する複合体I、II、III、IV、ユビキノンとシトクロムcという分子群によって行われる。ミトコンドリアのマトリックス内で產生されたNADHが複合体Iを介して電子をユビキノンに受け渡す。その後、電子はユビキノンから複合体IIIを介して、シトクロムc、複合体IVに受け渡され、最終的に酸素に受け渡される連続的な酸化還元反応により、水を生成する。一方、複合体IIからの電子伝達では、クエン酸回路におけるコハク酸のフマル酸への変換に伴い生じたFADH<sub>2</sub>からの電子がユ

ビキノンを介して複合体Ⅲ、シトクロムc、そして複合体Ⅳへと受け渡していく。

電子伝達系の過程で得られた大きな自由エネルギーを用いて、ADPからATPを產生することを酸化的リン酸化という。電子伝達系によって、複合体I、Ⅲ、ⅣからH<sup>+</sup>がマトリックスから膜間腔に出されてくる。するとミトコンドリア内膜の内側(マトリックス側)と外側(膜間腔側)との間にH<sup>+</sup>の勾配が生ずる。膜間腔のH<sup>+</sup>が内膜にあるATP合成酵素が持つプロトンチャネルを通ってマトリックスに流入する際、ADPからATPがつくられる(図2-4)。

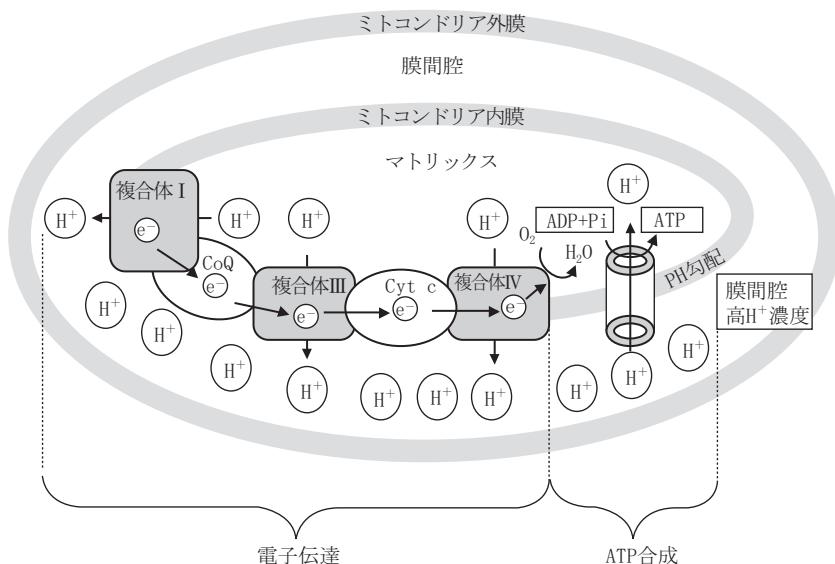
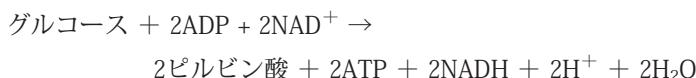


図2-4 酸化的リン酸化と化学浸透圧説によるATPの生成

NADHから電子伝達が行われる場合は、複合体I、Ⅲ、ⅣでH<sup>+</sup>のくみ出しが行われるとともに、2.5モルのATPが生成される。一方、コハク酸の脱水素に伴って生ずるFADH<sub>2</sub>から電子伝達が起こる場合は、複合体Ⅲ、ⅣでのみH<sup>+</sup>がくみ出され、1.5モルのATPがつくられる。

### 3.4 グルコースから生じるATPの数

1モルのグルコースが好気的条件下でCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oに分解されると、29.5または31モルのATPを生じることになる。その際、解糖系ではグルコース1モルは2モルのピルビン酸、2モルのATPと2モルのNADHを生じる。



解糖系でのATPの生成は基質準位のリン酸化によるもので、高エネルギーリン酸化合物の加水分解に伴って放出されるエネルギーでADPをリン酸化する反応で、解糖系にお

ける1,3-ビスホスホグリセリン酸あるいはホスホエノールピルビン酸の加水分解に伴うATPの生成がある。また、クエン酸回路におけるスクシニルCoAの加水分解に伴うGDPのリン酸化によるGTPの生成も、基質準位のリン酸化である。このGTPはATPに変換される。

解糖系で生じた2モルのNADHは、グリセロールリン酸シャトルあるいはリンゴ酸ーアスパラギン酸シャトルにより3モルまたは4.5モルのATPを生じる。細胞によって、どちらか一方あるいは両方の仕組みが働く。ピルビン酸はミトコンドリアに入ってアセチルCoAへ変えられるとともに、2モルのNADHを生じる。次いでアセチルCoAはクエン酸回路で代謝され、その過程で2モルのピルビン酸から6モルのNADH、2モルのFADH<sub>2</sub>および2モルのGTPを生じる。結局、1モルのグルコースが好気的条件下でCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oまで完全に分解されると29.5または31モルのATPを生じることになる（表2-1）。

表2-1 グルコースが好気的条件下で酸化されて生じるATPの数

①解糖系でATPは2モル消費され4モル生じるので、正味2モルが生成する。	$4 - 2 \rightarrow 2\text{ATP}$
②解糖系で生じたNADHが、グリセロールリン酸シャトルを介して、ミトコンドリア内のFADH <sub>2</sub> にかわるか、あるいはリンゴ酸ーアスパラギン酸シャトルを介してミトコンドリア内のNADHにかわり、それらが電子伝達系で酸化される。	$2 \times 1.5^1) \rightarrow 3\text{ATP}$ $2 \times 2.25^2) \rightarrow 4.5\text{ATP}$
③ピルビン酸がアセチルCoAになる際に生じるNADHが電子伝達系で酸化される。	$2 \times 2.5 \rightarrow 5\text{ATP}$
④アセチルCoAがクエン酸回路で代謝される際に生じるNADHが電子伝達系で酸化される。	$2 \times 3 \times 2.5 \rightarrow 15\text{ATP}$
⑤アセチルCoAがクエン酸回路で代謝される際に生じるFADH <sub>2</sub> が電子伝達系で酸化される。	$2 \times 1.5 \rightarrow 3\text{ATP}$
⑥クエン酸回路で基質準位のリン酸化によって2モルのGTPが生じる。	$2\text{GTP} \rightarrow 1.5\text{ATP}^3)$ 合計29.5あるいは31ATP <sup>4)</sup>

- 1) FADH<sub>2</sub> 1モルから1.5モルのATPを生じる。
- 2) 通常はNADH 1モルから2.5モルのATPが産生されるが、リンゴ酸ーアスパラギン酸シャトルでは膜間腔からマトリックスへのH<sup>+</sup>の移動を伴い、膜間腔のH<sup>+</sup>が少し減るので、NADH 1モルから2.25モルしか生じない。
- 3) 2モルGTPが細胞質ゾルへ輸送される際に膜間腔からマトリックスへのH<sup>+</sup>の移動が起こり、グルコースの酸化で生じる総ATP数から0.5モルのATPが減ることとなるので、ここは1.5モルのATPとしてある。
- 4) グリセロールリン酸シャトルあるいはリンゴ酸ーアスパラギン酸シャトルのどちらが働くかによって、グルコース 1モルから生じるATPは29.5あるいは31モルとなる。

## 4 グリコーゲンの代謝

グリコーゲンは動物における主要な貯蔵物質であり、植物のデンプンに相当する。グリコーゲンは  $\alpha$ -D-グルコースの枝分かれした重合体で、主として肝臓と筋肉に存在する。筋肉グリコーゲンは筋肉が運動するときのエネルギー源として用いられるが、肝臓でのようにグルコースまで分解されて血中に放出されることはない。

### 4.1 グリコーゲンの合成

グルコースはリン酸化されてグルコース6-リン酸となる。筋肉ではヘキソキナーゼ、肝臓ではグルコキナーゼによって触媒される。次に、ホスホグルコムターゼによって異性化されグルコース1-リン酸となる。グルコース1-リン酸は、グルコース1-リン酸ウラシルトランスフェラーゼの作用により、グリコーゲンプライマーとグリコシド結合をつくり UDP を放出する。グリコーゲンシンターゼによりグルコースの鎖が11分子にまで伸びると、アミロ1,4 → 1,6-トランスグルコシダーゼ（分枝酵素）により直鎖状（ $\alpha$ -1,4結合）の一部を隣りあう鎖に  $\alpha$ -1,6鎖として転移させ枝分かれをつくる。その分枝点でさらに  $\alpha$ -1,4結合グルコース単位が付加されて枝が伸び、さらに次の分枝が生じる（図2-5）。

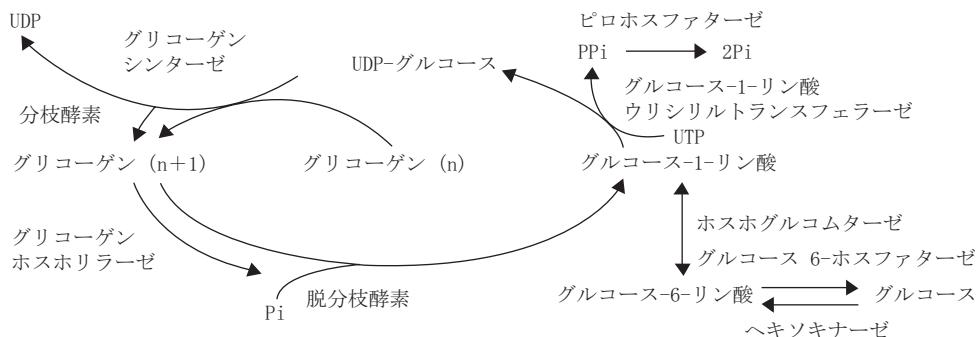


図2-5 グリコーゲンの合成と分解

### 4.2 グリコーゲンの分解

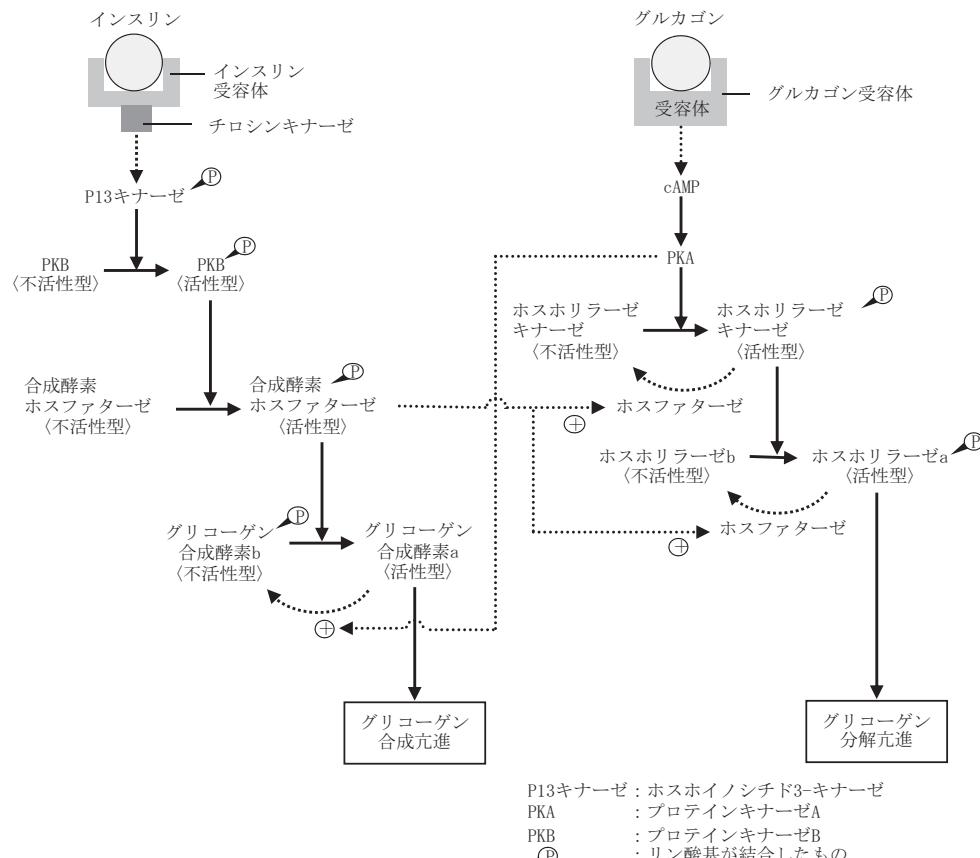
第1段階はグリコーゲンホスホリラーゼの作用により、無機リン酸を添加して  $\alpha$ -1,4グルコシド結合を切断する反応（加リン酸分解反応）を触媒し、グルコース1-リン酸を生成する。 $\alpha$ -1,6の分岐点から4グルコース残基の長さのところまで分解すると、この酵素はそれ以上作用しない。そこで、グルカン転移酵素が働き、 $\alpha$ -1,6結合している1残基だけ残して、3グルコース残基を隣の鎖に  $\alpha$ -1,4グルコシド結合で転移させる。残った  $\alpha$ -1,6結合は脱分枝酵素で切断され、グルコース1-リン酸はホスホグルコムターゼによってグルコース6-リン酸に変換される。枝分かれがなくなると再びホスホリラーゼが作用し、同じ

ようによりグリコーゲンの分解が進行する（図2-5）。肝臓や腎臓ではグルコース6-リン酸はグルコース6-ホスファターゼによってグルコースとなり血中に放出される。筋肉などの細胞ではグルコース6-ホスファターゼが存在しないのでグルコース6-リン酸は解糖系に入り分解される。

### 4.3 グリコーゲン代謝の調節

グリコーゲンの合成と分解は、グリコーゲンシンターゼとグリコーゲンホスホリラーゼのリン酸化・脱リン酸化によって調節されている。これらの酵素のリン酸化・脱リン酸化はホルモンが細胞膜受容体に結合することによって情報が細胞内に間接的に伝達され、カスケード反応によって増幅されて起こる（図2-6）。

食事をするとすみやかにインスリンが分泌され、それが肝臓のインスリン受容体に結合すると、チロシンキナーゼ活性が促進され、いくつかの過程を経てグリコーゲン合成酵素ホスファターゼがリン酸化されて活性型になる。この活性型グリコーゲン合成酵素ホス



ファターゼはグリコーゲン分解に関するホスフォリラーゼとホスフォリラーゼキナーゼを脱リン酸化して不活性型にする。これによりグリコーゲンの分解が抑制される。また、活性型のグリコーゲン合成ホスマターゼは、グリコーゲン合成酵素を脱リン酸化して活性型にする。これにより、グリコーゲン合成が亢進する。

空腹時などの血糖値低下状態ではグルカゴンやアドレナリンが分泌され、それらが肝臓に作用すると、アデニル酸シクラーゼが活性化されてATPからcAMPが産生される。cAMPがプロテインキナーゼAを活性化し、これがホスホリラーゼキナーゼをリン酸化して活性型にする。この活性型の酵素が不活性型のホスホリラーゼbをリン酸化して活性型のホスホリラーゼaに変え、グリコーゲンの分解が起きるようになる。

また、プロテインキナーゼAは活性型のグリコーゲン合成酵素aをリン酸化して、不活性型のグリコーゲン合成酵素bに変換することによって、グリコーゲンの合成を停止させる。

## 5 糖新生

人体の多くの細胞の主なエネルギー源はグルコース、脂肪およびアミノ酸であり、グルコースが最も基本的で重要なエネルギー源である。特に、脳の神経細胞では脂肪酸が血液・脳門を通過できないことや成熟赤血球にはミトコンドリアが存在しないので脂肪酸が利用されないので、エネルギー源としてグルコースを使用する。また、嫌気的な環境にある網膜細胞や腎臓髓質または酸素不足時の骨格筋は解糖系に依存している。他の細胞も、グルコースがない状態で脂肪酸とアミノ酸だけをエネルギー源としたのでは生き延びられないで糖新生ができない場合には死に至る。また、低血糖は脳の機能を損ね、昏睡や死に至らしめる。

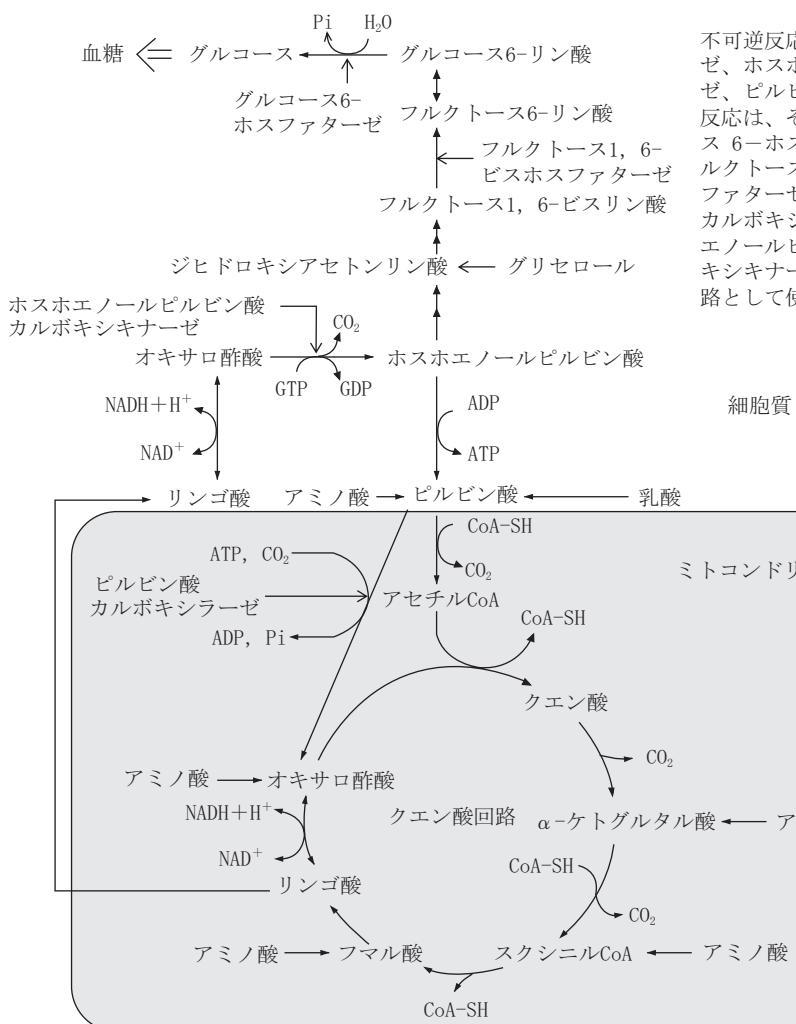
消化管から吸収されたグルコースは血液に流入する。血液はグルコースを全身に運搬するが貯蔵することはできない。食後、血中のグルコース濃度（血糖値）が上昇するとグルコースは肝臓と筋肉に取り込まれ、そこでグリコーゲンに合成されて貯蔵される。

筋肉のグリコーゲンは筋肉が運動するときのエネルギーとして利用される。筋肉中のグリコーゲンはグルコースとして血中に放出されることはない。血中のグルコース濃度は60～100 mg/dL（血清）と、一定に保たれている。この血糖値は食事後、消化管からのグルコースの吸収によって上昇すると、肝臓の細胞は血液からグルコースを取り込み、グリコーゲンを合成して貯蔵する。逆に下がると、肝臓の細胞は細胞内のグリコーゲンを分解してグルコースを血中に放出し、血糖値の低下を防ぐが、肝臓のグリコーゲンが減少すると血中のグルコースの供給が減少する。そのような状態になっても血糖値が低下しないようにするために、糖質以外の物質（アミノ酸、乳酸、グリセロール）を原料としてグルコースをつくる仕組みが働くようになる。その仕組みが糖新生であり、その反応系を糖新生経路という。糖新生は主に肝臓で行われる。

## 5.1 糖新生の反応

解糖と糖新生は同じ経路を用いる逆方向の反応であるが、解糖におけるヘキソキナーゼ、ホスホフルクトキナーゼおよびピルビン酸キナーゼで触媒される3つの不可逆反応は解糖系の単純な逆行によってグルコース合成が起こることを妨げている。したがって、ピルビン酸からグルコースを合成するための経路はこれらの不可逆反応をバイパスしていく必要がある。これら以外の反応は解糖系の逆反応で進行する（図2-7）。

乳酸やアミノ酸から生じるピルビン酸はミトコンドリア内でピルビン酸カルボキシラーゼによって触媒されオキサロ酢酸になる。この反応にはATPが必要であり、ビオチンが補酵素として働く。ビオチンは炭酸水素イオンから $\text{CO}_2$ を受け取ってカルボキシビオチンになり、その $\text{CO}_2$ をピルビン酸に渡す。オキサロ酢酸はミトコンドリア膜を通過できない



不可逆反応のヘキソキナーゼ、ホスホフルクトキナーゼ、ピルビン酸キナーゼの反応は、それぞれグルコース-6-ホスファターゼ、フルクトース1、6-ビスホスファターゼ及びピルビン酸カルボキシラーゼとホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼの反応が迂回路として使われる。

図2-7 糖新生

ので、還元されてリンゴ酸となりミトコンドリアからサイトゾルへと輸送され、そこでリンゴ酸は再酸化されてリンゴ酸デヒドロゲナーゼによって再びオキサロ酢酸となる。次に、オキサロ酢酸はホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼによって触媒され、ホスホエノールピルビン酸を生じる。この反応はリン酸供与体としてGTPを必要とする。

第2のバイパス反応はフルクトース1,6-二リン酸をフルクトース6-リン酸に加水分解する反応であり、フルクトース1,6-ビスホスファターゼが触媒する。第3の反応はグルコース6-リン酸からリン酸基が除かれグルコースになる反応でグルコース6-ホスファターゼが触媒する。この酵素は肝臓と腎臓に存在するが、筋肉や脂肪組織には存在しない。それ故に筋肉や脂肪組織ではグルコースを血中に放出できない。

## 5.2 糖新生の原料

空腹時には骨格筋からかなりの量のアラニンが放出される。その濃度は骨格筋たんぱく質の異化によるものと筋肉グリコーゲンの解糖によって生じたピルビン酸がアミノ基転移を受けたために生じたものである。アラニンは肝臓へ輸送され、そこでピルビン酸となり糖新生の基質になる。この経路をグルコースーアラニン回路という（図2-8）。

筋肉運動時に酸素の供給が間にあわない激しい運動や、ミトコンドリアを持たない赤血球で乳酸が生じる。血液中に多量の乳酸が存在すると、血液のpHが低下して乳酸アシドーシスを起こす。しかし、生理的環境では乳酸は肝臓および腎臓に運ばれたのち、再度グルコースに転換される。生じたグルコースは血液循環を通じて各組織に運ばれて利用される。この過程はコリ回路または乳酸回路という（図2-9）。

脂肪組織に貯蔵されたトリグリセリドはホルモン感受性リバーゼにより加水分解されてグリセロールを生じる。しかし、脂肪組織にはグリセロールキナーゼが発現していないので脂肪組織ではグリセロールをグルコースに変換することはできない。そこで、グリセロールは血中に放出され肝臓に運ばれ、グリセロール3-リン酸を経てジヒドロキシアセト

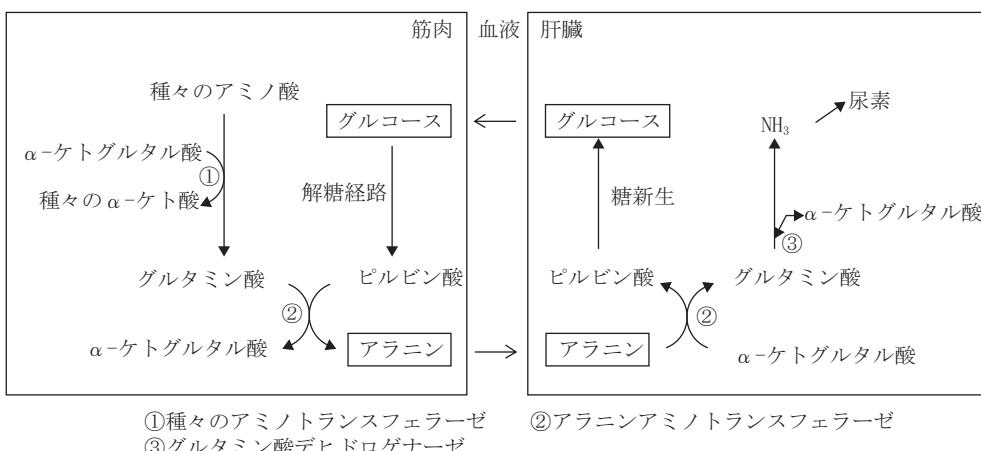


図2-8 グルコースーアラニン回路



# 索引

## 数字索引

- 1,2-ジアシルグリセロール ..... 38  
 $\alpha$ , 25-ジヒドロキシビタミン D ..... 40, 62  
 1型糖尿病 ..... 90  
 2-オキソ酸 ..... 44  
 2型糖尿病 ..... 90  
 2-モノグリセリド ..... 39  
 2-モノグリセロール ..... 38  
 2-モノグリセロール経路 ..... 38  
 3価クロム ..... 81  
 3-ヒドロキシ-3-メチルグルタリル CoA ..... 39  
 3-ヒドロキシ酪酸 ..... 34  
 4'-ホスホパンテイン ..... 69  
 5-アミノレブリン酸 ..... 56  
 6価クロム ..... 81  
 7-デヒドロコレステロール ..... 39, 62  
 9-cis-レチノイン酸 ..... 62  
 11-cis-レチナール ..... 60, 62  
 11-cis-レチノール ..... 60

## ギリシャ文字索引

- $\alpha$ -1,4グルコシド結合 ..... 8  
 $\alpha$ -1,6グルコシド結合 ..... 8  
 $\alpha$ -TTP ..... 63  
 $\alpha$ -アミラーゼ ..... 8  
 $\alpha$ -カロテン ..... 60  
 $\alpha$ -ケトグルタル酸 ..... 53  
 $\alpha$ -ケト酸 ..... 44, 53  
 $\alpha$ -トコフェロール ..... 63  
 $\alpha$ -トコフェロール輸送たんぱく質 ..... 63  
 $\alpha$ ヘリック ..... 47  
 $\alpha$ -リノレン酸 ..... 38, 41  
 $\beta$ アミロイド ..... 95  
 $\beta$ -カロテン ..... 60, 62  
 $\beta$ -クリプトキサンチン ..... 60  
 $\beta$ 構造 ..... 47  
 $\beta$ 酸化 ..... 33  
 $\beta$ 酸化系 ..... 66, 68, 69  
 $\gamma$ -アミノ酪酸 ..... 57, 78  
 $\gamma$ -カルボキシグルタミン酸 ..... 64  
 $\gamma$ -カルボキシグルタミン酸化 ..... 65

## 英文索引

- ACP ..... 69  
 ADH ..... 25, 85  
 AGEs ..... 21  
 ALDH ..... 25  
 AsA ..... 71  
 ATP ..... 4, 10, 34, 42, 54, 55  
 ATPase ..... 4  
 ATP アーゼ ..... 4, 5  
 ATP-クエン酸リアーゼ ..... 36  
 ATP 合成酵素 ..... 11  
 A 部位 ..... 46
- BGP ..... 65  
 BMI ..... 88  
 BV ..... 48
- cAMP ..... 21  
 CETP ..... 30  
 CoA ..... 69  
 CTP ..... 5  
 CVD ..... 90
- DAsA ..... 71  
 DBP ..... 62  
 DNA ..... 44, 45, 81
- FAD ..... 65  
 FADH<sub>2</sub> ..... 10, 33  
 FMN ..... 65
- GAGB ..... 78  
 Gla 化 ..... 65  
 GLUT2 ..... 9, 19  
 GLUT5 ..... 9  
 GSH ..... 57  
 GTP ..... 5, 12, 17, 46

## H

- HbA<sub>1C</sub> ..... 22

HC ..... 67

HC-ビタミン B<sub>12</sub>複合体 ..... 67

HDL ..... 29, 30

HDL コレステロール ..... 26

HMG-CoA ..... 39

HMG-CoA 還元酵素 ..... 39

## I

IDF ..... 23, 24

IDL ..... 29

IF ..... 67

IF-ビタミン B<sub>12</sub>複合体受容体 ..... 67

## L

LDL ..... 29

LDL コレステロール ..... 88

LDL 受容体 ..... 88

LPL ..... 29

LT ..... 41

LX ..... 41

L-アスコルビン酸 ..... 71

L-デヒドロアスコルビン酸 ..... 71

## M

MnSOD ..... 80

mRNA ..... 44, 45, 46

## N

n-3系 ..... 32

n-6系 ..... 32

n-6系多価不飽和脂肪酸 ..... 96

n-9系 ..... 32

Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>-ATP アーゼ ..... 5, 75, 77

NADH ..... 10, 33

NADPH ..... 18, 37

NEFA ..... 32, 35

NPU ..... 48

## P

PAI-1 ..... 90

PEM ..... 94

PFK1 ..... 21

PFK2 ..... 21

PG ..... 41

pH	86	アデノシン三リン酸	4
PIVKA II	65	アドレナリン	15, 19, 21, 32
PL	67	アボ坦んぱく質	29
PLP	67	アマドリ転移	21
PM	67	アミノアシル tRNA	46
PN	66	アミノ基	52
PTH	74, 75	アミノ基転移反応	53
P 部位	46	アミノ酸	16, 44, 52
		アミノ酸インバランス	49
<b>R</b>			
RAR	62	アミノ酸価	48
RNA	45, 81	アミノ酸スコア	48
RNA ポリメラーゼ	45	アミノ酸代謝	66, 69
<b>S</b>			
SDF	23, 24	アミノ酸の補足効果	48
SREBP	41	アミノ酸パターン	48
<b>T</b>			
TC II	67	アミロース	8
TCA 回路	10	アミロベクチン	8
TDP	65	アラキドン酸	38, 40, 41
TNF- $\alpha$	90	アラキドン酸カスケード	41
TPP	65	アラニン	17
tRNA	46	アラニンアミノ基転移酵素	54
TX	41	アルギナーゼ	55
<b>U</b>			
UCP	41	アルコール	24, 90
UTP	5	アルコール脱水素酵素	25
<b>V</b>			
VLDL	29	アルツハイマー	91, 96
<b>和文索引</b>			
<b>あ</b>			
亜鉛	79	い	
アクアポリン-2	85	硫黄	82
アシドーシス	25, 35	異化	2
アシル CoA	32, 33, 69	一次構造	47
アシル CoA 合成酵素	32	一次胆汁酸	39
アシルカルニチン	32	一重項酸素	62
アシルキャリアアミノ酸	69	一炭素単位	70
アセチル CoA	10, 28, 33, 35	一酸化窒素	57
アセチル CoA カルボキシラーゼ	36	飲作用	50
アセト酢酸	34	インスリン	14, 19, 21, 24, 34, 81
アセトン	34	インスリン感受性	90
アディポネクチン	89, 90	インスリン血症	90
アデノシルコバラミン	67	インスリン抵抗性	90
<b>う</b>			
ウエスト周囲径	89	ウエルニッケーコルサコフ症候群	25
ウミズクモ	23	う歯	23
ウリジン三リン酸	5	ウロビリノーゲン	57
運動器症候群	95		
<b>え</b>			
エイコサノイド	40, 41	エキソ型膜酵素	9
エイコサペンタエン酸	40	エキソペプチダーゼ	49
栄養価	47	液胞型 ATP アーゼ	50
栄養不良	24, 94	エストロゲン	40, 74, 88, 91
エタノール	24, 25	エルゴステロール	63
塩基性アミノ酸	53	嚥下困難	91
塩素	77, 78	エンド型酵素	8
エンドサイトーシス	50, 67	エンドソーム	50
エンドペプチダーゼ	49	エンドペプチダーゼ	49
<b>お</b>			
オートファージ	50, 51	オリゴ糖	22
オキサロ酢酸	16, 35	オルニチン	54, 55
オスティオカルシン	65		
オプシン	60, 61, 62		
オキソ型酵素	8		
オルニチン	54, 55		
<b>か</b>			
開始コドン	46		
解糖系	10, 19, 21, 68		
化学的評価法	47, 48		
過酸化水素	57		
カシン・ベック病	80		
加水分解酵素	80		
カタラーゼ	78, 80		
褐色脂肪細胞	41		
活性型ビタミン D	40, 62, 74, 75		
活性酸素種	94		
カテコールアミン	57		
ガラクトース	19		
カリウム	77		
カルシウム	74, 75, 95		

カルシトニン	74, 88	グルココルチコイド	19, 21, 32	骨折	91, 94
カルニチン	32	グルタチオン	57	骨粗鬆症	74, 88, 91, 92, 95
カルニチンアシル基転移酵素 I	32	グルタチオンペルオキシダーゼ	57, 80	骨密度	88, 91, 92
カルニチンアシル基転移酵素 II	32	グルタミナーゼ	54	骨量	74
カルバモイルリン酸	54	グルタミン合成酵素	54	コドン	46
カルボキシル基	52, 53	クレアチニン	55, 56	コバラミン	67
管腔内消化	8	クレアチニン	55	コリ回路	17
緩衝作用	86	クレアチニンリン酸	55, 56	コルチコステロン	40
杆体	60	クレチニン病	81	コルチゾール	40
冠動脈疾患	42, 90	クロム	81	コレカルシフェロール	62
含硫アミノ酸	82			コレステロール	24, 28, 38, 60
				コレステロールエステル	31
				コレステロールエステル転送たんぱく質	30

## き

キサンチンオキシダーゼ	81
基質準位のリン酸化	4, 11
機能鉄	78
キノリン酸	68
吸エルゴン反応	3
虚血性心疾患	90
虚弱	91, 92
キロミクロン	28, 29, 63
キロミクロンレムナント	29, 63
筋肉減少症	92

## く

グアノシン三リン酸	5
ケエン酸	35
ケエン酸回路	10, 35, 65, 68, 69
くも膜下出血	91
グリケーション	21
グリコーゲン	13, 15, 20
グリコーゲン合成	20
グリコーゲンシルターゼ	13
グリコーゲンプライマー	13
グリコーゲンホスホリラーゼ	13
グリココール酸	39
グリセロール-3-リン酸	38
グリセロール-3-リン酸経路	38
グリセロールリン酸シャトル	12
グルカゴン	15, 19, 21, 32
グルクロン酸経路	18
グルクロン酸抱合	18
グルコース	10, 13, 15, 21, 35
グルコース1-リン酸	13
グルコース6-ホスファターゼ	14, 17
グルコース6-リン酸	13
グルコース-アラニン回路	17
グルコース輸送体	20

## け

克山病	80
血圧	76
血液凝固	75
ケトアシドーシス	35
ケト原性アミノ酸	54
ケトン体	34
ケノデオキシコール酸	39
ゲノム	44

## こ

高エネルギーリン酸化合物	3, 75
光学異性体	52
口渴中枢	84
高カリウム血症	77
後期高齢者	88, 92
高血圧	90
高血圧症	77, 88
抗酸化作用	60, 64, 94
抗酸化物質	95
甲状腺	81
甲状腺機能亢進症	81
甲状腺腫	81
酵素前駆体	49
高尿酸血症	88
更年期	88
高年期	91
高密度リポタンパク質	29
抗利尿ホルモン	85, 96
高齢期	91
高齢者	88, 93
誤嚥	91
コエンザイム A	69
コール酸	39
呼吸鎖	10
骨格筋	92
骨格筋量	91, 92, 93
骨吸收	91

## さ

サーモゲニン	41
細胞外液	86
細胞情報伝達	75
細胞内液	84, 86
サルコペニア	91, 92, 93, 94, 95
酸塩基平衡	86
酸塩基平衡維持	84
酸化還元酵素	80
酸化的脱アミノ反応	53
酸化的リン酸化	4, 11
酸性アミノ酸	53
残存歯	91

## し

シアノコバラミン	67
視覚機能	60
シクロオキシゲナーゼ	41
脂質異常症	88, 90
脂質過酸化物	57
脂質ペルオキシラジカル	64
自食作用	51
シス型	31
ジスルフィド結合	82
実年期	88
シップ塩基	21
ショクロム C	10
ショクロム P-450	78
シトシン三リン酸	5
脂肪	28
脂肪肝	25, 28
脂肪合成	20
脂肪酸	20, 28, 31, 35
脂肪酸エロングーゼ系	38
脂肪酸合成酵素複合体	36
脂肪酸生合成経路	66, 68, 69

自由エネルギー	3, 10	前期高齢者	88	テトラヒドロ葉酸	70	
自由エネルギーの変化	2	セントラルドグマ	44	電解質	85	
ショウ酸	78	た			電解質組成	86
終止コドン	46	第一制限アミノ酸	49	電子伝達系	4, 10, 34, 35, 65	
小サブユニット	46	体液	84	転写	44, 45	
脂溶性ビタミン	60	体液緩衝作用	86	転写一次産物	45	
小腸粘膜上皮細胞	28, 39, 49	大サブユニット	46	転写因子ステロール調節エレメント		
正味たんぱく質利用率	48	代謝回転	47	ト結合たんぱく質	39	
食塩	76, 90	代謝水	84, 96	転倒	94	
食塩感受性	90	耐糖能異常	90	デンプン	8	
食塩摂取	90	第二制限アミノ酸	49	と		
食作用	50	タウロコール酸	39	銅	79	
食物繊維	23, 78	多価不飽和脂肪酸	96	糖アルコール	22	
食欲	92	脱共役たんぱく質	41	同化	2	
心筋梗塞	89	短鎖脂肪酸	22, 23, 31	糖原性アミノ酸	53	
ジンクフィンガー	80	炭酸固定反応	71	糖脂肪	28	
神経症	90	炭酸水素塩系	86	糖新生	8, 15, 16, 19, 21	
腎症	90	炭酸転移反応	71	糖新生系	20, 35	
新生児メレナ	65	胆汁	39	糖代謝異常	88	
心不全	90	胆汁酸	24, 28, 38, 39	糖尿病	35, 88, 90	
腎不全	90	タンニン	78	動脈硬化	90	
心房性ナトリウム利尿ペプチド	85	たんぱく質	44, 47	動脈硬化症	88	
		たんぱく質分解酵素	49	動脈硬化性疾患	90	
す				動脈硬化性粥腫	91	
肺液	49	ち			動脈硬化性心血管疾患	90
肺液リバーゼ	28	チアミン	25, 65	トコフェロールラジカル	64	
水酸化反応	72	チアミン二リン酸	65	突発性乳児ビタミンK欠乏症	65	
錐体	60	チアミンピロリン酸	65	トランス型	31	
錐体細胞	62	窒素出納法	48	トランスコバラミンⅡ	67	
水分含量	84	チモーゲン	49	トランス脂肪酸	42	
水分調節	84, 91	中間密度リポたんぱく質	29	トランスフェリン	78, 81, 80	
水溶性抗酸化物質	64	中鎖脂肪酸	31	トリアシルグリセグリセロール		
水溶性食物繊維	23, 24	中性アミノ酸	53	トリグリセリド	17, 28, 31, 38	
水溶性ビタミン	60	中性脂肪	28	トリプトファン	60, 68	
スーパーオキシドジスムターゼ	79, 80	腸肝循環	39	トリヨードチロニン	81	
スーパーオキシドラジカル	71	長鎖脂肪酸	31	トロンボキサン	41	
ステロイドホロモン	39, 40	超低密度リポたんぱく質	29	な		
せ			腸内細菌	60	ナイアシチン	68
生活習慣病	88	貯蔵鉄	78, 79	ナイアシノーゲン	68	
成熟 mRNA	45	チロキシン	81	ナイアシン	60, 68	
成長ホルモン	19	つ			内因子	67
生物価	48	痛風	88	内臓脂肪	88	
生物的評価法	47, 48	て			内臓脂肪型肥満	88
セミデヒドロアスコルビン酸	71	低栄養	91, 92, 93	ナトリウム	76	
セルロプラスミン	79	低カリウム血症	77	難消化性糖質	22	
セレノメチオニン	80	低密度リポたんぱく質	29	に		
セレン	80	デオキシコール酸	39	ニコチンアミド	68	
セロトニン	57	鉄	78			

ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド	68	ビタミン B <sub>1</sub>	65	不溶性食物繊維	23, 24
ニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリリン酸	68	ビタミン B <sub>2</sub>	65	ラジキニン	76
ニコチン酸	68	ビタミン B <sub>6</sub>	66, 95	フラビンアデニンジヌクレオチド	65
二次構造	47	ビタミン B <sub>12</sub>	67, 95	フラビンモノヌクレオチド	65
二次性高血圧	90	ビタミン C	71	プリン塩基	57
二次胆汁酸	39	ビタミン D	62, 94, 95	フルクトース	18
乳酸	10, 16, 17	ビタミン D <sub>3</sub>	39, 62	フレイルティ	92, 93, 94
乳酸アシドーシス	17	ビタミン D 結合たんぱく質	62	フレイルティ・サイクル	93
乳酸回路	17	ビタミン E	63	プレビタミン D	62
尿素	53, 55	ビタミン K	64, 65, 95	プレビタミン D <sub>2</sub>	63
尿素回路	44, 53, 55	ビタミン K <sub>1</sub>	64	プレビタミン D <sub>3</sub>	40
尿素サイクル	55	ビタミン K サイクル	64	プロ酵素	49
認知機能障害	96	必須アミノ酸	47, 52	プロスタグランジン	41
認知機能低下	91	必須脂肪酸	32, 38	プロセシング	45, 46
認知症	88, 96	非電解質	85	プロテアーゼ	49
<b>ぬ</b>		ヒドロキシアパタイト	65, 74, 75	プロテアソーム	51
ヌクレオチド	45	ヒドロキシラジカル	71	プロトヘム	56
<b>ね</b>		ピノサイトシス	50	プロトポルフィリン X	56
熱発生たんぱく質	41	非ヘム鉄	78	プロトロンビン	65
<b>の</b>		肥満	25, 28, 88, 90, 95	プロビタミン	60
脳アミロイド血管症	91	肥満症	88	プロビタミン A	60, 62
脳血管疾患	90	ピリドキサール	66	<b>へ</b>	
脳血管障害	90	ピリドキサルリン酸	66	ペプシノーゲン	49
脳血栓症	91	ピリドキサミン	66	ペプシン	49
脳梗塞	89	ピリドキシン	66	ペプチド結合	44, 46, 47
脳出血	90	ピリベルジン	56	ヘム	56
脳卒中	90	ピリミジン塩基	57	ヘムオキシゲナーゼ	56
能動輸送	5, 49	ピリルビン	56	ヘム鉄	78
<b>は</b>		ピルビン酸	10, 16, 17	ヘモグロビン	56, 78
肺炎	91	ピルビン酸カルボキシラーゼ		ヘモクロマトーシス	78
白色脂肪細胞	41	ピルビン酸脱水素酵素複合体	65	ヘモシデリン	78
バソプレッシン	85	ピルビン酸デヒドロゲナーゼ複合体	10	変形性膝関節症	95
発エルゴン反応	3	ふ		変形性腰椎症	95
ハプトコリン	67	ファゴサイトシス	50	ペントースリン酸回路	18, 37
パラトルモン	74	フィチン酸	78, 79	<b>ほ</b>	
パルミチン酸	34	フェリチン	78	補因子	79, 80, 81
パントテン酸	69	フェロキノン	64	傍系球体細胞	85
<b>ひ</b>		フェントン反応	78	飽和脂肪酸	31
ビオシチン	71	不感蒸泄	84	補欠分子族	71
ビオチン	71, 82	副甲状腺ホルモン	74, 88	補酵素	60, 66, 68, 69, 70, 75
皮下脂肪型肥満	88	複合体	10	補酵素 A	69, 82
ヒスタミン	57	複合体 II	10	ホスファチジン酸	38
ビタミン	60	複合体 III	10, 11	ホスホクレアチニン	55
ビタミン A	60	複合体 IV	11	ホスホパンテテイン	82
		不齊炭素原子	52	ホスホリパーゼ A2	41
		ブテロイルモノグルタミン酸	70	ホモシステイン	95
		不飽和脂肪酸	31	ポリアミン	57
				ポルフィリン	56

ポルフィリン環	56, 78	ヨードプシン	60, 62
ホルモン感受性リバーゼ	17, 32		
本態性高血圧	90		
翻訳	44, 45		
<b>ま</b>			
膜消化	8	リソソーム	50
マグネシウム	75	リソソーム系	50
マルチプルリスクファクター	88	リトコール酸	39
マロニル CoA	36, 37	リノール酸	38
マンガン	80	リボース5-リン酸	18
マンガンスーパーオキシドジスム		リボキシゲナーゼ	41
ターゼ	80	リボキシン	41
		リボソーム	45, 46
		リボたんぱく質	29
		リボたんぱく質リバーゼ	29
		リボフラビン	65
		リモデリング	74
ミオグロビン	78	両親媒性	29
水	84	両性電解質	52
水チャンネル	85	リン	75
ミセル	28	リンゴ酸	17
ミトコンドリア		リンゴ酸-アスパラギン酸シャト	
	11, 16, 17, 35, 41, 56	ル	12
		リン脂質	28
<b>む</b>			
無機質	74, 85	ルミナコイド	23
むし歯	23		
<b>め</b>			
明順応	62	レジスチン	90
メイラード反応	21	レチナール	60, 61
メタボリックシンドローム	89	レチノイド	60
メタロチオネイン	79	レチノイン酸	60
メチルコバラミン	67	レチノイン酸受容体	62
メチルサイクル	71	レチノール	60
メッセンジャー RNA	44	レニン	76, 85
メナキノン	64	レニン・アンギオテンシン・アル	
		ドステロン系	76
<b>も</b>			
網膜症	90	レブチン	89, 90
モリブデン	80, 81		
<b>ゆ</b>			
遊離脂肪酸	35	ロイコトリエン	41
ユビキチン	51	ロコモティブシンドローム	95
ユビキチン-プロテアーソーム系		ロドプシン	60, 61
	51		
ユビキノン	10		
<b>よ</b>			
葉酸	70, 95	ワルファリン	65
ヨウ素	81		
ヨウ素過剰症	81		

## 著者略歴

金行 孝雄 (かねゆき たかお)

1965 年 東京農業大学農学部農芸化学科卒業

1967 ~ 1993 年 岡山県立短期大学食物科教員

1993 ~ 2002 年 岡山県立大学保健福祉学部栄養学科助教授

2002 ~ 2013 年 くらしき作陽大学食文化学部栄養学科教授

1983 ~ 1998 年 岡山大学医学研究科非常勤講師

現在 姫路大学看護学部非常勤講師

岡山労災看護専門学校非常勤講師

専攻 栄養学・生化学 医学博士 (岡山大学)

## 栄養代謝学

2016 年 9 月 16 日 初版第 1 刷発行

著 者 金 行 孝 雄

検印省略

発 行 者 柴 山 斐 呂 子

〒102-0082 東京都千代田区一番町 27-2

電話 03 (3230) 0221 (代表)

FAX 03 (3262) 8247

振替口座 00180-3-36087 番

<http://www.rikohotosho.co.jp>

発行所 理工図書株式会社

© 金行孝雄 2016 Printed in Japan

ISBN978-4-8446-0849-3

印刷・製本 丸井工文社

〈日本複製権センター委託出版物〉

\*本書を無断で複写複製(コピー)することは、著作権法上の例外を除き、禁じられています。本書をコピーされる場合は、事前に日本複製権センター(電話:03-3401-2382)の許諾を受けてください。

\*本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

★自然科学書协会会员★工学書协会会员★土木・建築書协会会员

ISBN978-4-8446-0849-3

C3047 ￥1800 E



9784844608493

定価（本体 1800 円+税）



1923047018007

理工図書