

## 食品, 代謝, そして生命 生活工学のための熱力学序論 VII

### Foods, Metabolism, and Life

#### Introduction to Thermodynamics for Human Environmental Engineering VII

妹尾 学

Manabu SENO

(東京大学 名誉教授)

## 1 はじめに

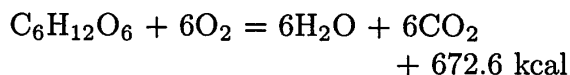
18世紀の後半, Lavoisier は燃焼を正しく解釈し, 化学革命への道を拓いた. そして動物の呼吸に基づく物質代謝も燃焼であり, 体内での有機物の燃焼が動物の生命の源であると考えた. 続く Liebig は生体をつくる有機物が主として C, H, O の3元素よりなることを知り, これらの元素を定量する方法を確立した. これにより生体の物質論の基礎が固まり, 以後生体の化学は急速に発展した.

一方, 1840年ドイツの医師 Mayer はオランダ船の船医としてジャワに向かい, そこで患者の静脈血が鮮やかな赤色をもつことを観察し, 生体内の酸化反応が高温の熱帯では寒冷地ほど進まず, 静脈血が動脈血に近い赤味を保持すると判断した. そして, 体内で食物が呼吸で入る酸素によりゆっくりと燃焼するという Lavoisier の考えを大幅に進め, 熱が常に一定の割合で力学的仕事に変るという着想を得て, エネルギー保存の原理に到達した.

このように古くから生体は外部から食物を取入れ, これを燃料として仕事をするシステムと考えられ, この考えは現在に致るまで, なお尾を引いているように思われる. 本稿ではこの問題を論じよう.

## 2 物質代謝

生命を維持し活動するためには食物をとらなければならない. 生命はエネルギーを必要とし, エネルギーは食物から供給される. たとえばグルコースを食べると水と二酸化炭素として排出されるので, グルコースの酸化反応(燃焼)によって発生する熱が生命活動に使われると考えるのは, むしろ当然であろう. 熱化学方程式で表せば



となり, 定圧での反応熱  $\Delta H = -672.6 \text{ kcal/mol}$  が, グルコースの栄養価(エネルギー価)とされた. 実際の食品の場合には消化・吸収される割合を考慮しなければならない.

1930年代頃まで, 生体での物質代謝は体が摂取したものと排出したものとを調べて, その経路を推定するという方法が主流であった. たとえば O. Folin はたんぱく質が尿素あるいはクレアチン, クレアチニンとして尿中に排泄されることから, たんぱく質には生体構成たんぱく質の摩耗した分を修復するのに使われる内因性部分と燃料として使われる外因性部分とがあり, 前者はクレアチニンとして, 後者は尿素として排泄されると考えた.

自動販売機になぞらえてペニー・ガム法と酷評されたこのような事情を大きく変えたのは, 同位体による分子標識トレーサー法の開発であった. その前触れは, 1931年 Urey による重水素の発見である. 新しい水として重水が出現しその威力が期待されたが, 生体にとって重水はむしろ毒となることが明らかとなり, そのブームは去ったが, 少量の重水を含む水を飲むことによって, 生体内の水は数日から十数日のうちにすっかり入替わることが見出された. そして1935年, D 標識したアマニ油を用いて, R. Schoenheimer による画期的な研究が行われた<sup>1)</sup>. 当時の常識では摂取された脂肪酸の大部分は燃焼し, 僅かの部分が体内に留まると予想されたが, 結果は予想に反し大部分が体内に蓄積された. 1937年には, <sup>15</sup>N で標識したアミノ酸も利用できるようになり, これを摂取するとほとんどすべてが生体器官に沈積することが確かめられたが, いったん沈積した <sup>15</sup>N はやがて体外に排出されていく. これらの結果は, 生体を構成する物質は新たに摂取された物質と原子・分子レベルで常に動的状態にあることを明らかに示している.

遺著 “The Dynamic State of Body Constituents” (1942) の中で, Schoenheimer は次のように述べている.<sup>2)</sup>

“特定の官能基が絶えず移動するとともに, 急速な分子状再生が起こっていることは, 密接

に連結する化学反応サイクルの存在を示している。この結果は、生体を内燃機関と対比する考えや互いに独立な外因型・内因型の代謝理論とはあいられない。内燃機関との対比は燃料が生体内を定常的に流れ、燃焼し変換されて排出されることを描く。ここで得られた新しい結果は、燃料ばかりでなく構成材料もまた定常的な流れの中にあることを意味する。古典的な見方は生体構造の動的状態を考慮したものに変革されなければならない。”

Schoenheimer の急死のこともあって彼の業績はあまり注目されることもなかったが、その頃から生体内での物質代謝の化学は急速に進み、糖質、脂質、たんぱく質の代謝経路が次々と明らかにされていった。生体をつくるすべての細胞の化学成分、すなわちたんぱく質や脂質分子は絶えずつくられ、こわされ、動的定常状態にある。そしてこの代謝回転の速さは、体内での部位によりまた物質の種類により大きく変る。たとえばラットの肝細胞で、グリコーゲンの半減期（半分が変換するのに要する時間）は6時間であるのに対し、リン脂質では7日、たんぱく質では12日である。表1に、ラットの種々の組織におけるたんぱく質の代謝回転の半減期を示すが、組織によって変化し、同じ組織でも代謝の早い部分と遅い部分がある。またこれとは別に急速に変動するたんぱくプールがあり、総窒素の1%程度を占め、体組織の分解により生じたアミノ酸は新たに摂取されたものと区別されることなく、たんぱくプールに入る。

### 3 エネルギー代謝

生体のエネルギー収支についても詳細な研究が続けられてきた。歴史的には、氷熱量計を用いた J. Black の弟子 A. Crawford (1778) が動物の産生熱を測定した初めての人といわれる。Lavoisier (1780) も動物用の熱量計を組立て、モルモットが10時間で29.6 kcal の熱を発生したと記録している。1899年になって W. O. Atwater, E. B. Rosa によって精確な動物用呼吸熱量計がつくられ、産生熱とともに呼吸などによる H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> の発生量が同時に測定できるようになった。これによりヒトについてもエネルギー保存則が十分の精度で成り立つことが確かめられた。また、M. Rubner は動物の産生熱が生体内で消費された化合物の燃焼熱から尿中に排泄された尿素の燃焼熱を差引くことによって求められることを実証した。これは Hess の総熱量不変の法則に相当

するもので、体内で消費された物質がもつ熱量から生体の産生熱を間接的に求めることができることを示したものであり、この間接熱量測定法はエネルギー代謝の測定に広く用いられるようになった。

栄養素は体内の代謝で O<sub>2</sub> を消費し、CO<sub>2</sub> を発生する。間接法でエネルギー導出の基礎となる数値を表2に示す。O<sub>2</sub> の1 l の消費で約5 kcal の熱を発生する。より詳しくは呼吸商 (respiration quotient, RQ) と呼ばれる消費 O<sub>2</sub> 量に対する発生 CO<sub>2</sub> 量の比から、糖質と脂質の燃焼比率を求め、それぞれの熱量の和をとる。多くの場合たんぱく質の寄与は無視するが、これを求めるためには尿中の窒素を求め、窒素1 g あたり消費 O<sub>2</sub> 5.92 l (8.45 g)、生成 CO<sub>2</sub> 4.75 l (9.35 g) として熱量を算出する。

生体のエネルギー代謝量を表すものとして、以前から基礎代謝量 (basal metabolism, BM) が基準として用いられてきた。これは飢餓・安静時生命を維持するために必要な最小エネルギーとして定義されるもので、正常時の消費エネルギーから筋肉の仕事、食物の消化吸收、体温調節など活動時のエネルギー消費を差引いたものである。BM は性別、年齢、体重に依存し、また個人差がかなり大きい。以前、BM は体表面積に比例するとみなされてきた。熱の放射量が体の表面積に比例することを根拠とするようであるが、その後の研究ではこの関係は一般に成り立たず、むしろ体重  $W$  の  $3/4$  乗に比例することが知られてきた。たとえば、Brody Procter (1932) により

$$BM = 70.5 W^{0.734} \quad (1)$$

が提出されている。わが国において長く用いられてきた性別、年齢に分類された基礎代謝量を表3に示しておく。<sup>3)</sup>

活動時にはより多くのエネルギーが必要になる。主要なものとして一つは食物の消化吸收に要するエネルギーで、Rubner (1962) により特殊動的効果 (specific dynamic effect, SPD) と名付けられた。SPD によるエネルギー増加比は、全エネルギー所要量に対して糖質で7%、脂質で4%、たんぱく質で30%程度で、平均して10%である。もう一つは筋肉労働によるエネルギー増加で、活動代謝量という。活動代謝量と基礎代謝量の比として生活活動指数  $x$  が定義される。生活活動指数  $x$  は一般事務など軽い労務で0.35、通常の労務で0.50、農業などや、重い労働で0.75の程度である。これらを考慮して1日あたりのエネル

ギー所要量  $E$  は,

$$E = \frac{(1+x)BM}{0.9} \quad (2)$$

となる。  $x = 0.3 \sim 0.5$  とおいて、標準的なエネルギー所要量を表3に並記した。

これらのエネルギーが具体的にどのように使われるかについて、表4に示す推定値がある。一方、人体から外部への熱エネルギー放散量は表5のように見積られる。体表からの熱放射と水の蒸散による部分が最も多い。

表3に示した基礎代謝基準値は1969年(昭44)に策定されて以来大幅に変更されることなく30年間用いられてきたが、2000年(平成12)になって見直され大幅に改定された。<sup>4)</sup> 基礎代謝は1920年代に考えられた概念で、精神的、肉体的に安静な状態で産生される最小のエネルギー代謝とされ、具体的には前日の夕食を摂取後なにも食べず、翌朝の覚醒時に20°Cの室内で安静仰臥の状態測定されるエネルギー代謝量である。しかし、睡眠中のエネルギー代謝量がこれよりさらに10%低いことがあり、また正常な精神活動や食物の消化・代謝は生命の最低条件の一つであり、基礎代謝に加えるべきであるといった意見が強く、第六次改訂「日本人の栄養所要量」では、基礎代謝は改めて、“身体的、精神的に安静な状態で代謝される生きていくために必要な最小のエネルギー代謝量”と定義された。なおこの定義も暫定的なものとしてされている。

ここで定められた基礎代謝基準値は安静時エネルギー消費量 (resting energy expenditure, REE) に基づくものである。REEは携帯用簡易熱量計で比較的容易に測定され、多数のデータが蓄積されている。測定値は年齢、体重が同じであっても、かなりの個人差があることに留意する必要がある。REEの測定値に基づいて基礎代謝基準値が kcal / kg / day の単位で定められる。これには食事によって亢進するエネルギー SDE を含んでいる。SDE は国際的には diet - induced thermogenesis, DIT あるいは thermic effect of food, TEF とよばれている。これまで SDE を基礎代謝と区別して算定していたが、今回これを基礎代謝に含めたことは当然の処置であろう。また、睡眠中のエネルギー消費は基礎代謝量と同じとみなされている。これまで就床時のエネルギー代謝は基礎代謝の10%減とみなされることもあったが、これも SDA と関連すると考えられる。すなわち食事摂食後の SDA は食後12時間位まで続き、この間エネルギー代謝は約10%増となる。こ

の寄与がなくなった後での就床時エネルギー消費はそれまでの10%減となることが予想されるからである。

表6にこのようにして定められた基礎代謝基準値および基礎代謝量を示した。表3と比較すると今回の改訂の意味が明らかであろう。

活動時にはそれによるエネルギー消費が加わる。生活活動強度も今回の改訂で新しい4段階に区分され、I (低い), II (やや低い), III (適度), IV (高い) とし、活動強度は基礎代謝の倍率で示され、それぞれ1.3, 1.5, 1.7, および1.9である。表7に生活活動強度別に生活動作の1日あたりの時間の目安を例示した。より詳細には各生活動作に動作強度 (activity factor) が定められており、これに動作時間を乗じ、全体を加えて生活活動強度が求められる。基礎代謝量に生活活動による分を加えて1日のエネルギー所要量が求められる。表6に活動強度IIおよびIIIの場合のエネルギー所要量を付記した。

16才までの成長期では、成長に伴う体重増加のために必要なエネルギーが加わる。男では12~14才がピークで体重増加14.0 g/day に伴い37 kcal/day のエネルギーが、女では9~11才がピークで12.8 g/day の重量増加に伴い34 kcal/day のエネルギーが余分に必要となる。

## 4 代謝の熱力学

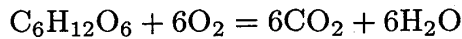
所要エネルギーは食物として摂取される。栄養素として食品は大きく3つに分類される。

- |   |        |                      |
|---|--------|----------------------|
| 1 | エネルギー源 | 糖質 (炭化水素), 脂質, たんぱく質 |
| 2 | 構成成分   | たんぱく質, 脂質            |
| 3 | 代謝調節など | ミネラル, ビタミン, 食物繊維     |

エネルギー源を中心とした1日の食物摂取量の1例を表8に示す。現在推奨されている栄養成分は炭化水素が全エネルギーの60%, 脂質が20~25%, たんぱく質が55~70 g であり、その外カルシウム600 mg, 鉄10 mg (男), 12 mg (女), 食物繊維20~25 g, そして塩分10 g 未満とされている。

以上述べてきた栄養学の成果を熱力学の立場から検討してみよう。エネルギー所要量などというときのエネルギーは必ずしも厳密に定義されていないようであるが、食品のエネルギー価

として、慣例的に食品の燃焼（酸化）で発生する定圧反応熱を表すエンタルピー変化  $\Delta H$  が用いられている。たとえば、グルコースの酸化反応

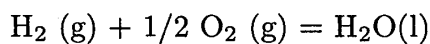


に伴う熱力学状態量の変化量

$$\begin{aligned}\Delta G &= -686.88 \text{ kcal/mol,} \\ \Delta H &= -672.60 \text{ kcal/mol} \\ T\Delta S &= 14.28 \text{ kcal/mol,} \\ \Delta S &= 47.9 \text{ cal/K} \cdot \text{mol}\end{aligned}$$

から、グルコースのエネルギー（燃焼価）は 1 g 当りに換算して、 $\Delta H = -3.733 \text{ kcal/g}$  となる。 $\Delta H$  を用いるのはグルコースが定圧で燃焼するとき発生する熱というイメージであり、生体を熱機関になぞらえる思想の表現であろう。しかし生体は食品のエネルギーを熱として利用しているわけではない。エネルギーは一般に仕事をしうる能力と考えられるが、仕事をしうる能力は単位時間当りの仕事率を表す動力（power）で測られ、熱は必ずしも動力にはならない。温度差があつてはじめて動力となり、カルノーの定理が示すように、温度差が小さいとき仕事への変換効率は非常に低い。

生体は定温定圧の条件でもっともよく機能する。この条件で動力として利用できるのはギブズ（自由）エネルギー変化  $\Delta G$  である。したがつて食品のエネルギー価は生体内代謝における自由エネルギー変化  $\Delta G$  で表されるべきである。グルコースでは、 $\Delta G = -3.812 \text{ kcal/g}$  である。生体は熱機関よりも燃料電池に似ている。たとえば水素燃料電池では水素が燃料として用いられ、その酸化反応



に対して、 $\Delta G = -237.1 \text{ kJ}$ ,  $\Delta H = -285.8 \text{ kJ}$ ,  $\Delta S = -163 \text{ J/K}$  である。 $\Delta G$  は電気エネルギーに変換され、その熱効率は最大で  $\Delta G/\Delta H = 0.829$  になり、熱機関に比べ非常に高い。生体では  $\Delta G$  は生命の維持など生体活動に使われ、その熱効率も高く、グルコースでは最大  $\Delta G/\Delta H = 1.02$  に達する。効率が 100% を超えるのは外部からエネルギー（熱）を吸収するからである。

ここで熱力学の理論を必要な範囲で要約しておこう。問題とする系の全エネルギー（内部エネルギー） $U$  は熱  $Q$  および仕事  $W$  として外界

と交換されるが、エネルギーの総量は保存される（熱力学第一法則）。微小変化に対して

$$dU = dQ + dW \quad (3)$$

また、系の状態量の一つであるエントロピー  $S$  は外界との熱の交換によって増減するが、それとは別に系内で不可逆的な変化が起こると、それに伴い増大する（熱力学第二法則）。すなわち、

$$dS \geq dQ/T \quad (4)$$

$T$  は絶対温度で、等号は可逆変化、不等号は不可逆変化の場合である。第二法則はすべての自発変化は不可逆であることを教える。

仕事を体積変化の仕事  $-pdV$  ( $p$  圧力,  $V$  体積) と有効仕事  $W'$  の和と考える。可逆変化に対して、

$$dU = TdS - pdV + dW' \quad (5)$$

ここで新たに熱力学状態量としてエンタルピー  $H$ , およびギブズ（自由）エネルギー  $G$  を、

$$H = U + pV \quad (6)$$

$$G = H - TS \quad (7)$$

で定義すると、可逆過程では

$$dG = Vdp - SdT + dW' \quad (8)$$

となり、定温定圧ではギブズエネルギーの変化量が有効仕事に等しいことが分かる。

不可逆過程では、T. de Donder, I. Prigogine にしたがつて非補性熱  $Q'$  を導入して、不等式 (4) を等式

$$dS = (dQ + dQ')/T = d_e S + d_i S \quad (9)$$

で書き換えると、定温定圧で

$$dG = dW' - dQ' \quad (10)$$

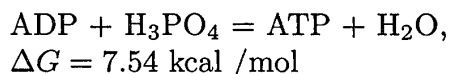
となり、有効仕事の一部は非補性熱として散逸されることを示す。有効仕事が生体内に残らないとき ( $dW' = 0$ ) ,

$$dG/dt = -dQ'/dt = -Td_i S/dt \quad (11)$$

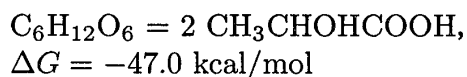
となり、ギブズエネルギーは自発変化によってエントロピーとして散逸されることになる。なおこれらの式で、 $d_e S = dQ/T$  はエントロピー輸送、 $d_i S = dQ'/T$  はエントロピー生成で、エントロピー生成は必ず正の値を取る。

話をもとに戻して、エネルギー源としての食物がもつ栄養価は、代謝の過程で有効仕事として使われるギブズ (自由) エネルギーで評価される。この実体は食物をつくる分子内に化学結合エネルギーなどとして蓄えられている内部エネルギーが主体で、代謝過程を定温定圧に維持するためのエネルギーを補正したものである。これは化学エネルギーとよぶこともできるが、決して熱エネルギーではない。体内での物質代謝は自発的に進むので、全体として自由エネルギーが減少する方向に進む。代謝の過程で、グリコーゲンやリン脂質、種々のたんぱく質、DNA などの化学合成、能動輸送や筋収縮など、自由エネルギーを消費する変化、いわゆる吸エルゴン反応が起こるが、これはグルコースや種々の脂肪酸の酸化反応、いわゆる発エルゴン反応とカップリングして起こる。カップリングはアデノシン二リン酸 ADP - アデノシン三リン酸 ATP を代表とする高エネルギーリン酸化化合物を媒介として起こることは、現在ではよく知られるようになった。

ADP から ATP の合成は吸エルゴン反応で、



グルコースなどをエネルギー源として起こる。たとえば嫌気性条件では解糖反応



とカップリングして2分子の ATP が合成される。このエネルギー効率、 $2 \times 7.54 / 47 = 0.32$  である。嫌気性細胞では乳酸がグルコース代謝の廃物になるので、グルコースがもつエネルギーの7%しか使われていない。一方呼吸鎖を持つ好気性生物ではグルコースの完全酸化が進み、38分子の ATP が合成される。完全酸化では、 $\Delta G = -686 \text{ kcal/mol}$  であり、ATP 合成のエネルギー効率は  $38 \times 7.54 / 686 = 0.42$  になる。このように生体がエネルギーを獲得するのは酸化反応に限らないが、一般に酸化反応はエネルギー利用の最も効率的な方法である。

ATP は様々な生体活動のエネルギー源として利用されるが、これらのエネルギー変換の過程で徐々にエントロピーとして散逸され、やがては食物の形で摂取した自由エネルギーのすべてはエントロピーとして体外に放出される。エントロピーの形をとるエネルギーは熱とみなすこともできるので、生体が入れた自由エネ

ルギーは廃物 (水や二酸化炭素) が担う分を除いて究極的には熱として放出されることになる。これが生体の所要エネルギーを熱として測ることができる理由であるが、熱は生体が利用するエネルギーではなく、利用し終って排出するときのエネルギーの形態である。

## 5 生命とは何か

1943年、E. Schrödinger はダブリンのトリニティカレッジで、“生命とは何か”と題して講演した。<sup>5)</sup>そこで生体が“秩序から秩序”，そして“無秩序から秩序”という2つの基本プロセスを包含することに注目した。秩序から秩序を生み出すのは遺伝子であり、その実体は10年後にWatsonとCrickによってDNAの二重らせんとして明らかにされた。

無秩序から秩序について、Schrödinger は次のように考えを進めた。熱力学第二法則は自然はより無秩序な状態へ、すなわちエントロピーの増大する方向へ自発的に変化することを主張する。当然、生体もこの運命の下にあるはずであるが、生体の著しい特性として生体のもつ高い秩序性を維持することがある。このことは生体では無秩序への変化に抗するなにかが働いていることを、明らかに示している。

“過ぎ去った頃、私達はエネルギーを食べて生きていたのだと教えられてきた。しかし、成人ではエネルギー含量は一定である。食物に含まれていて、私達の生命を維持する貴重なものとは何であろうか。……生きていた限りエントロピーは絶えず増大し、エントロピー最大という危険な状態に近づく傾向がある。このようにならないために、まわりの環境から負のエントロピー (negative entropy) を絶えず取り入れることが必要である。物質代謝の本質は生体が絶えずつくり出すエントロピーを外へ出すことにある。”

この論議はその後議論的となり、なかにはエントロピーは正の値しかとらないので、負のエントロピーなどナンセンスであるといった、ピントのはずれた批判もあったが、大勢において“負のエントロピー”の実体を解明しようという努力が進められている。生体は絶えることのない物質やエネルギーの流れをもつ開いた系であり、自由エネルギーの熱への散逸が常に起こっている系である。生体の熱力学的解析には伝統的な平衡系の熱力学ではなく、動的過程を正しく評価する散逸系の熱力学が必要である。この問題はPrigogineらによって熱心に解

明が進められ、まず平衡に比較的近い線形領域では、定常状態はエントロピー生成速度が極小値をもつことが明らかにされ、次いで平衡から遠く離れた非線形領域では、エントロピー生成速度を不連続的に減少させる形で、動的秩序構造をもつ散逸構造 (dissipative structure) が形成されることが示された<sup>6)</sup>。具体的な例として Belousov-Zhabotinskii 反応系があり、この系では非線形の化学反応がつくる濃度勾配のために、ゆらぎが引金となって濃度の振動や空間的なパターン形成が起こる。この組織化構造を維持するのは、化学反応の自由エネルギーの散逸過程である。レベルは違うが、生命もこのような散逸構造の一つと考えることもできるので、生命現象の理解のための第一歩とみなすこともできるかもしれない。しかしその道程はなお遠く、Schrödinger が指摘した、“食物に含まれていて生命を維持する貴重なもの”という負のエントロピーがもつ役割を十分に解明するには至っていない<sup>7)</sup>。

## 6 おわりに

本稿ではエネルギーの単位としてこれまでとは違い、kcal を用いた。周知のように、現在基礎科学の分野では国際単位系が用いられ、エネルギーの単位は J で統一されている。栄養学の分野でも、1973 年 WHO/FAO の Energy and Protein Requirement に関する特別委員会で、J の使用が提案されて以来、国際機関では kJ が用いられるようになってきたが、わが国では引き続き kcal が用いられ、2000 年「日本人の栄養所要量」の第六次改訂においても kJ への移行は見送られた。本来、cal は熱量の単位として提案され長く用いられてきたものであるが、熱が仕事と同じくエネルギーであることが確認されているので、熱量をエネルギー単位で表すのは当然の処置である。エネルギーの単位として J が用いられるのは、国際単位系の SI 基本単位として、m (長さ)、kg (質量)、s (時間)、A (電流)、K (温度)、cd (光量)、mol (物質質量) の 6 つが選ばれたことから必然の結果であり、SI 誘導単位の一つとしてエネルギーの単位  $J = m^2 kg s^{-2}$  が定義された。なお、これまで用いられてきた単位のいくつかは暫定的な使用が容認され、その場合 SI 単位によって厳密に定義されたものとして取扱われ、熱化学カロリーもその一つとして、 $1 cal = 4.184 J$  と定義されている。

カロリーははもともと 1 g の水の温度を 1 °C

上げるために必要な熱量と定義されたもので、実測に基づき、厳密さに欠けるものであった。それにも拘らず、食品・栄養の関係でカロリーが好まれるのは、長い間の慣行といった外に、やはり食物が人間の活動に必要な熱源として使われているという考えが、なお根強く残っているためではないだろうか。人体におけるエネルギーの役割が正しく理解されるにしたがって、cal はやがて J におき変っていくと思われる。

生体を活動するデバイスとみるならば、より適切なのは仕事率を用いる表現であろう。仕事率は動力の単位でもあるが、その SI 誘導単位はワット  $W = J s^{-1}$  である。成人の 1 日のエネルギー所要量を 2200 kcal/day として換算すると、106.5 W となる。1 人の人間の存在は 100 W のランプが灯っているのと、エネルギー的には同等である。既に使われなくなったが、動力の単位として古いのは馬力 hp である。1 hp = 745.7 W という換算式を用いると、1 人の人間の動力は 0.143 hp になる。7 人集ってようやく馬 1 匹に相当するわけで、人間が動力源としていかに貧弱であるか分かる。

## 引用文献

- 1) R. Schoenheimer, D. Rittenberg, J. Biol. Chem., 111, 175 (1935).
- 2) 篠原兵庫, 生化学, 58, 1449 (1986).
- 3) 菅野道広ら, 栄養学総論, 朝倉書店 (1996).
- 4) 第六次改定 日本人の栄養所要量, 食事摂取基準, 第一出版 (2000).
- 5) E. Schrödinger, What is Life? Cambridge Univ. Press (1944); 岡小天, 鎮目恭夫 訳, 岩波新書 (1951).
- 6) G. Nicolis, I. Prigogine, Self - organization in Non - equilibrium Systems, John Wiley (1977); 小島陽之助, 相沢洋二 訳, 散逸構造, 岩波書店 (1980).
- 7) M. P. Murphy, L. A. O'Neill, What is Life? The Next Fifty Years. Cambridge Univ. Press (1995); 堀裕和, 吉岡京 訳, 培風館 (2001).

表1. ラット組織のたんぱく質の代謝回転

組織	代謝回転半減期 (day)		
	平均	早い部分	遅い部分 (割合)
血清	10~20	-	-
肝臓	10~20	12	140 (3%)
筋肉	60~80	16	100 (40%)
脳	-	16	150 (54%)
全組織	80	22	130 (47%)

表2. 栄養素の体内酸化による発生熱量

	糖質	脂質	たんぱく質
消費 O <sub>2</sub> // g	0.83	2.02	0.97
生成 CO <sub>2</sub> // g	0.83	1.43	0.77
発生熱量 kcal / g	4.18	9.45	4.32
呼吸商	1.00	1.70	0.80
発生熱量 kcal / O <sub>2</sub> l	5.05	4.69	4.49
// kcal / CO <sub>2</sub> l	5.50	6.63	5.57

表3. 基礎代謝量およびエネルギー所要量\*

年齢	男			女		
	基礎代謝基準値	基礎代謝量	エネルギー所要量	基礎代謝基準値	基礎代謝量	エネルギー所要量
	kcal / kg / day	kcal / day	kcal / day	kcal / kg / day	kcal / day	kcal / day
10	36.4	1249	2050	34.9	1193	1950
20~29	23.8	1540	2550	23.6	1209	2000
30~39	22.8	1516	2500	22.0	1190	2000
40~49	22.1	1463	2400	21.1	1171	1950
50~59	21.8	1391	2300	20.9	1125	1850
60~64	21.6	1320	2100	21.0	1075	1750
70~74	21.2	1217	1850	21.2	1011	1600

\*第六次改訂 日本人の栄養所要量 (1994) より

表4. 人体のエネルギー代謝

	エネルギー代謝 (kcal / day)
脳・神経系	180
肝臓 (物質代謝)	360
腎臓 (水代謝)	75
心臓 (血液循環)	60
肺 (呼吸)	50
筋緊張	800
(基礎代謝)	(小計) 1525
筋運動	600
消化器 (消化吸收)	150
(エネルギー所要量)	(合計) 2275

表5. 人体の熱放出

部位	エネルギー放出 (kcal / day)
皮膚 熱放射	1500
水蒸散	300
呼吸 空気 (11.5 m <sup>3</sup> ) 加温	60
水 (360 g) 蒸発	230
二酸化炭素 (800 g) 気化	90
摂取 (加温) 水 (1.5 l)	30
食物	15
合計	2225

表6. 基礎代謝量, 安静時エネルギー消費量およびエネルギー所要量\*

年齢	男					女				
	基礎代謝 基準値	基礎代謝量	安静時 エネルギー 消費量	エネルギー所要量		基礎代謝 基準値	基礎代謝量	安静時 エネルギー 消費量	エネルギー所要量	
	kcal・ kg・day	kcal・day	kcal・day	II	III	kcal・ kg・day	kcal・day	kcal・day	II	III
9~11	37.4	1290	1559	1950	2250	34.8	1180	1443	1750	2050
12~14	31.0	1480	1882	2200	2250	29.6	1340	1583	2000	2300
15~17	27.0	1610	1593	2400	2750	25.3	1300	1417	1950	2200
18~29	24.0	1550	1871	2300	2650	23.6	1210	1468	1800	2050
30~49	22.3	1500	1808	2250	2250	21.7	1170	1503	1750	2000
50~69	21.5	1350	1807	2000	2300	20.7	1100	1590	1650	1900
70~	21.5	1220	1757	1850	2050	20.7	1010	1331	1500	1700

\*第六次改訂 日本人の栄養所要量 による

表7. 生活活動強度の区別

強度	基礎代謝量 の倍数	日常生活活動				
		安静	立つ	歩く	速足	筋運動
I (低い)	1.3	12	11	1	0	0
II (やや低い)	1.5	10	9	5	0	0
III (適度)	1.7	9	8	6	1	0
IV (高い)	1.9	9	8	5	1	1

表8. 食品の摂取例

種別	エネルギー含量 (kcal / g)		摂取量 g / day	エネルギー kcal / day	エネルギー構成比 %
	理論値	実質値			
糖質 (炭化水素)	4.10	4.0	350	1400	61.8
脂質	9.45	9.0	65	585	25.8
たんぱく質	4.35	4.0	70	280	12.4
合計			485	2265	100