

## スポーツ栄養学からヒトのエネルギー代謝を考える

細見 亮太\*

### Human Energy Metabolism and Exercise in Sport Nutrition

Ryota HOSOMI

#### 1. はじめに

ここ数年、週末になるとおしゃれなウェアに身を包んだ若者がランニングで汗を流していたり、近所の路地を必死の形相で走るおっちゃんに出会ったりする。一説には東京マラソンをきっかけとしたランニングブームが影響しているようで、これ以降から各地でマラソン大会が行われるようになったようだ。また東京マラソンが開催された翌年に特定健康診査（メタボ健診）が始まり健康意識の高まったことや、リーマンショックによる不景気によってお金のかからないランニングに人気が出たなど、理由はそれぞれあるだろうが、このように多くの世代で日常的に運動を行う人が増えてきている。

これまで、スポーツに科学的な知識・技術が取り入れられることは少なく、私が中学・高校の時は真夏の炎天下での練習においてもこまめな水分補給はさせてもらえず、「気合いと根性」で乗り切れという指導であった（約20年前）。しかし、現在ではこのような指導は間違っていたことが明らかになり、水分補給、コンディショニングやトレーニングなどに科学が取り入れられるようになった。本解説はスポーツに栄養学や代謝生化学といった学問を取り入れた「スポーツ栄養学」をもとに、運動が身体に及ぼす影響、特にエネルギー代謝について解説する。

#### 2. 日本人のエネルギー摂取量

日本人の健康意識が高まってきている一方、年々肥

満者が増加している背景がある。わが国の1人1日あたりのエネルギー摂取量は、1975年をピークに減少し始め、2012年の国民健康・栄養調査報告では1874 kcalとなっている<sup>[1]</sup>。食事からのエネルギー摂取量は年々低下しているにも関わらず肥満者が増加しているのは、肉体労働者の減少や交通手段の発達による消費エネルギー量の減少によって慢性的なエネルギー摂取過剰状態になっていることがあげられる。エネルギー過剰摂取によって引き起こされるお腹周りの白色脂肪組織の肥大は、高血糖、脂質異常、高血圧などの生活習慣病が引き起こされやすい状態になることが明らかになっている。それぞれが重複した場合は動脈硬化を進行させ、心筋梗塞や脳血管疾患といった命にかかわる病気を招くことから、メタボリックシンドローム（内臓脂肪症候群）と呼び、警鐘を鳴らしている。厚生労働省では、このような生活習慣病の対策として「1に運動、2に食事、しっかり禁煙、最後にクスリ」をスローガンに、運動習慣や生活習慣改善の徹底を求めている<sup>[2]</sup>。

#### 3. 体内でのアデノシン三リン酸（ATP）産生

私たちの摂取エネルギー量はどのようにして考えられているのだろうか。動物は生命活動を維持するためにエネルギーが必要であり、食物からそのエネルギーを獲得している。食物に含まれる成分の中で、ヒトは三大栄養素である糖質、脂質、たんぱく質をエネルギー源としている。生体で利用可能となる各栄養素のエネルギー値は、1 gあたり糖質が4 kcal、脂質が9 kcal、たんぱく質が4 kcalと定められている（アトウォーター係数）。栄養素間のエネルギー値の違いは、消化吸収率の違いや物理的燃焼熱値が影響している。

日本ではエネルギー単位にカロリー (cal) がよく用いられており、1 kcalは1気圧で1 kgの水を1℃上昇させるのに必要なエネルギー量と定義されている。国際的にはジュール (J) の使用が推奨されているために、今後変更になる可能性があり、1 kcalは4.184 kJで換算できる。

三大栄養素を利用して体内で産生されたエネルギーは、アデノシン三リン酸 (ATP) の化学エネルギーに移される。すなわち、ヒトの体内ではATPをアデノシン二リン酸 (ADP) に変換する際に放出される化学エネルギーを利用している。ATPは筋肉の収縮や化学反応などのために消費される一方、消費されたATPを補うべく、産生も同時に行っている。日本人のエネルギー摂取割合の約60%を占める糖質を利用したATP産生は、(1)解糖系、(2)クエン酸回路、(3)電子伝達系の3つの過程で成り立っている (図1)。解糖系はグルコースからピルビン酸に生合成されるまで指し、1分子のグルコースから2分子のピルビン酸が生合成される過程で、2分子のATPを合成し、2水素が放出される (水素については後述)。この代謝系は酸素を必要とせず、無酸素運動下においてもATPを合成でき、その際はピルビン酸から乳酸へと代謝される。酸素が十分にある場合は、ピルビン酸はアセチル CoA を経て、クエン酸回路へと進む。解糖系で生合成された2分子のピルビン酸は、クエン酸回

路で二酸化炭素まで完全に分解され、独自に2分子のATPと10水素が放出される。しかし、解糖系とクエン酸回路でのATP産生量は少なく、この代謝経路で生成した水素を利用する電子伝達系でより多くのATPが産生される。水素は単独では電子伝達系に移動することが出来ないために、水溶性ビタミンに分類されるナイアシン (ビタミンB<sub>3</sub>) とリボフラビン (ビタミンB<sub>2</sub>) に結合してミトコンドリア内部の電子伝達系へと運ばれていく。電子伝達系をわかりやすく説明すると、3つの水車があり、水車が1回転するとATPが1つ産生されるとイメージして欲しい。ナイアシンに結合した水素は、3つの水車を回すことが出来るので3つのATPを産生できる。またリボフラビンに結合した水素は、2つの水車を回すことが出来るので2つのATPを産生できる。ここで上記の内容を一度整理してみたい。1分子のグルコースが解糖系とクエン酸回路で代謝される過程で、4分子のATPと12水素が産生する。水素は電子伝達系に移動するために、10水素はナイアシンと結合し、2水素はリボフラビンと結合する。ナイアシンと結合した水素を利用し、30分子のATP、リボフラビンと結合した水素からは4分子のATPが産生されるため、理論上38分子のATPが産生されることになる。しかし、実際には水素運搬で一定の損失あり、1グルコースから計32ATP程度の産生量になっていると考えられている。

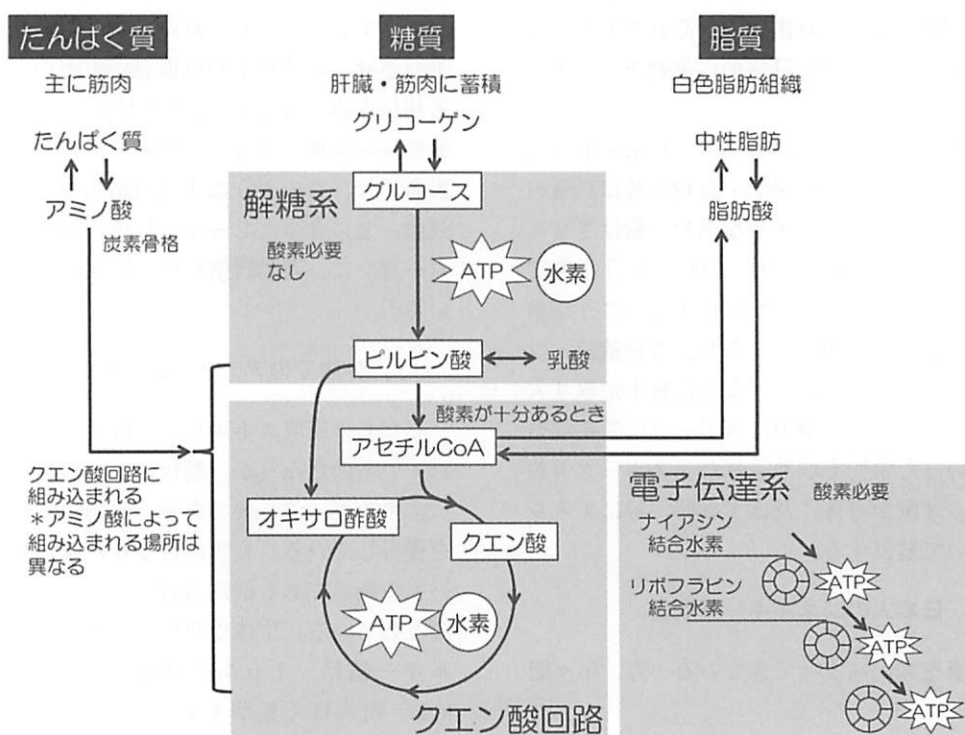


図1. エネルギー代謝の概略図

たんぱく質をエネルギー源として利用する際には、アミノ酸の炭素骨格部分のみを利用する。アミノ基は尿素として排泄される。炭素骨格はアミノ酸の種類によってクエン酸回路の代謝物質としてクエン酸回路に入り、ATP産生に関わる。アミノ酸をエネルギーとする時は、飢餓状態や運動中で糖質のエネルギーが不足している時に限られる。

脂質から得られた脂肪酸は、 $\beta$ 酸化によってアセチルCoAとなり、クエン酸回路で代謝される。しかし、アセチルCoAをクエン酸回路で代謝するためには、オキサロ酢酸も必要である。そのために、解糖系で産生されたピルビン酸からオキサロ酢酸に変換・補充することになる。つまり、脂質だけではATPが産生出来ないということになる。脂質は1gあたりのエネルギー量は高いが、利用しにくい性質がある。エネルギーが欠乏すると、まず筋肉が分解され、たんぱく質をエネルギーとして利用する。次に脂肪がエネルギーとして利用され始める。そのために体内に蓄積した脂肪はエネルギーとして利用されにくいために、一度太るとなかなか痩せられないのである。

#### 4. 体内でのエネルギーの消費

獲得したエネルギーは3種類の方法によって消費し、生命維持や生活に役立てている。一つ目は「基礎代謝」と呼び、体温の維持や呼吸など生きていくために最低限必要なエネルギーである。体格の大きさや筋肉量に比例し、基礎代謝量は高くなる。二つ目は「食事誘発性熱産生(DIT)」と呼び、食事の後に消化や吸収のために消費されるエネルギーである。食事をした後に体が熱くなり汗をかく人がいると思うが、まさにこの現象である。この二つの消費エネルギーは、毎日決まった量を消費していると考えられている。三つ目は仕事や家事、スポーツなどで消費する活動エネルギーのことを指す。活動強度によって消費量が大きく変化するため、エネルギー消費量増大のために運動が推奨されている。このように痩せるか太るか、食物からの摂取エネルギー量と体内での消費エネルギー量の総和のどちらが大きいかで決まる(エネルギー出納)。エネルギー出納が正、すなわちエネルギー消費量よりもエネルギー摂取量の方が大きい場合には、過剰に摂取したエネルギーは中性脂肪となり体内に蓄積される。またエネルギー出納が負の場合、足りないエネルギーを供給するために体内に蓄積していたグリコーゲン、筋肉たんぱく質や中性脂肪を利用する。体重を増やしたいと思っている人よりも、痩せるために運動を行っている人が多いだろう。よって、次に活動量を増やして体重を減少させる例について考えていき

たい。

エネルギー摂取量は変化させないと仮定し、1日で体脂肪を1kg減少させるためには、通常の消費エネルギーに加えて約7000kcalのエネルギーを余分に消費させなくてはならない。なぜ約7000kcalかという、お腹周りに蓄積されている白色脂肪組織は約75~80%が中性脂肪であるので、 $9\text{ kcal} \times 750\sim 800\text{ g} = 6750\sim 7200\text{ kcal/kg}$ だからである。体重60kgの人が1時間ランニングすると、消費エネルギーは約440kcalになる(計算方法は後述する)。すなわち、7000kcal消費するためには約16時間休まずにランニングする必要がある。計算上はこのように考えられるが、まず誰も16時間連続して走る続けることは肉体的・精神的に無理であろう。夏期に行われている24時間、27時間テレビのマラソンランナーも一日中は走り続けておらず、休み休み走っている。このように大きな体重の増減は1日で起きることはなく、数日以上エネルギー出納が影響する。間違った例としては銭湯に行った際、入浴前後の体重を測定してみると体重が減少していることがほとんどである。しかし、これは痩せたのではなく、体内の水分が汗となって排出されただけである。入浴後のビール(未成年はフルーツ牛乳)がおいしくなることは間違いがないが、体内の水分量が元に戻ると体重も戻ることから、体重の増減に大きな影響はない。またTVや新聞記事で毎日のように紹介されている健康食品の中には、「○○○を食べるだけで痩せる」というようなセンセーショナルな謳い文句を見かけることがある。しかし、これもほとんどがまやかしであるといっていだらう。上記に記述したように、人が痩せる時はエネルギー消費量が摂取量を上回っている状態を何日も継続している時である。

#### 5. エネルギー消費量の算出

ダイエットなどの体重減少を考える際には、自分が1日にどの程度のエネルギーを消費しているのかを理解する必要がある。次に各エネルギー消費量の算出方法をみていきたい。まず基礎代謝の測定は、食物摂取、身体活動、温度環境などのさまざまな因子をできるだけ排除して測定するため、個人ごとに実測するのはとても難しい。だが体格によっておおそ決定されるので、体重などを用いた推定式が簡便である。推定式は、 $\text{基礎代謝量(kcal/日)} = \text{基礎代謝基準値(kcal/kg/日)} \times \text{基準体重(kg)}$ となっている(表1)。例えば、20歳、体重60kgの男性の基礎代謝量は、 $24.0\text{ (kcal/kg/日)} \times 60\text{ kg} = 1440\text{ kcal/日}$ となる。この推定式は、基準から大きく外れた体位では推定誤差が大きくなるために注意が必要である。この理由として臓器

表1 基礎代謝基準値

年齢区分 (歳)	男性 (kcal/kg/日)	女性 (kcal/kg/日)
1~2	61.0	59.7
3~5	54.8	52.2
6~7	44.3	41.9
8~9	40.8	38.3
10~11	37.4	34.8
12~14	31.0	29.6
15~17	27.0	25.3
18~29	24.0	22.1
30~49	22.3	21.7
50~69	21.5	20.7
70以上	21.5	20.7

厚生労働省(2014)日本人の食事摂取基準[2015年版], 第一出版, 東京: pp. 59-87.

によってエネルギー消費量が異なることが挙げられ、骨格筋であれば1 kgあたり13 kcal/日であり、白色脂肪組織は1 kgあたり4.5 kcal/日である。このように骨格筋と白色脂肪組織では単位重量あたりのエネルギー消費量が大きく異なるために、体内に脂肪を多く蓄えている肥満者は必然的に体重あたりの基礎代謝量は低くなる。

食事誘発性熱産生は、エネルギー源となる栄養素によって産生量が異なり、糖質のみ摂取した場合は摂取エネルギーの約6%、脂質のみでは約4%、たんぱく質の場合は約30%が食事誘発性熱産生に利用される。日本人の食事内容では、総エネルギー量の約60%が糖質、約15%がたんぱく質、残りが脂質由来であるので、1日の摂取エネルギーの約10%が使われていると考えられている。ちなみに朝食を欠食し昼と晩にまとめて食べる時と、朝昼晩と3食に分けて食べる時を比べた場合では、3食に分けて食べる方が1日の食事誘発性熱産生量が多くなることが報告されている<sup>[3]</sup>。

活動エネルギーは各個人の生活習慣が大きく関わっており、労働や運動の強度判定を行うことでエネルギー量を推定できる。その際、活動エネルギー量の目安はメッツ (METs) を参考にする。メッツとは運動時の酸素消費量を、安静座位時の酸素消費量 (3.5 mL/kg/min) で割った数値で、運動の強さの指標としている。身体活動のエネルギー消費量は、エネルギー消費量 (kcal) = 1.05 × 体重 (kg) × メッツ × 運動時間 (hour) で求めることができる (\*アメリカスポーツ医学会を中心に、近年では計算の煩雑さを無くすために1.05の係数を用いないで算出して良いとされてきている<sup>[4]</sup>)。表2に各活動内容のメッツを示した。1メッツは安静状態を維持するために必要な酸素量を

性別や体重に関わらずに3.5 mL/kg/分を1単位とする。酸素1.0 Lの消費で5.0 kcalのエネルギーを消費するため、 $1.05 = 1 \text{ メッツ} \times 3.5 \text{ mL}/1000 \text{ mL} \times 1 \text{ kg} \times 60 \text{ 分} \times 5 \text{ kcal}$  となるので、1.05にメッツと運動時間 (hour) を乗じることによって活動エネルギー量が算出できる。例えば、体重60 kgの人がバレーボールを3時間行ったとすると、 $1.05 \times 3.0 \text{ (メッツ)} \times 3 \text{ (hour)} \times 60 \text{ (kg)} = 567 \text{ kcal}$  となる。1日の活動エネルギー消費量を算定する方法として、1日に行った諸活動を時間的に追跡し算定する方法 (時間調査法) によって求めることができる。しかし、私たちの生活は日によって異なるのが当たり前であるので、計算によって得られたエネルギー消費量は、調査した日のエネルギー量を算定したに過ぎないことを注意したい。

## 6. エネルギー摂取量の制限

ここまでの内容を理解せずとも、なにも苦しい運動をしなくてもエネルギー摂取量を減らせば痩せられることがわかるだろう。近くの本屋をのぞいてみれば、いかに楽をして痩せるかを競うように、さまざまなダイエット本が並んでいる。少しだけエネルギー摂取量を制限した場合の危険性を記述しておく。過度なダイエットによる弊害として、ホルモンバランスの乱れによる疲労、栄養素摂取不足による栄養失調など様々な症状が現れる。私の知り合いで165 cmで体重が90 kgの男性がいるのだが、友達に太っていることでいじられるのが嫌になり、エネルギー摂取量を制限するダイエットを始めたが、約2週間で栄養失調になり病院に運ばれた。この出来事は、太っているのでエネルギーの蓄積は十分ではあるが、知識もなくエネルギー摂取制限を行うと危険であるということ認識させてくれた。悲しいことに友人は栄養失調にまでなったが、見た目はあまり変わらなかった。

また2015年6月には、俳優の榎木孝明氏が30日間飲み物以外は摂取しない“不食”生活を行ったことがニュースになった。ヒトは水分を摂取するだけで30日間ほどは生きながらえることは可能ではあるが、筋肉の減少、不整脈や意識障害が生じる危険性がある。この不食生活は医師指導の下、病院内で行われており、血糖値や塩分対策として数度あめ玉を補給したようである。また3日間に1回は血液および尿検査で健康状態をチェックしていたとのことである。それだけ食事を摂らないということは危険であることを教えてくれたニュースだったと思う。

さらには「痩せている女性が美しい」という現代社会の風潮が食べることを忌避させ、拒食症になる女性も存在している。ファッション大国フランスにおいて

表2 さまざまな身体活動におけるメッツ

メッツ	活動内容
1.8	立位 (会話、電話、読書)、皿洗い
2.0	ゆっくりした歩行 (平地、非常に遅い=53m/分未満、散歩または家の中)、料理や食材の準備 (立位、座位)、洗濯、子どもを抱えながら立つ、洗車・ワックスがけ
2.2	子どもと遊ぶ (座位、軽度)
2.3	ガーデニング (コンテナを使用する)、動物の世話、ピアノの演奏
2.5	植物への水やり、子どもの世話、仕立て作業
3.0	普通歩行 (平地、67m/分、犬を連れて)、電動アシスト付き自転車に乗る、台所の手伝い、ギター演奏 (立位) ボウリング、バレーボール、社交ダンス (ワルツ、サンバ、タンゴ)、ピラティス、太極拳
3.5	歩行 (平地、75~85m/分、ほどほどの速さ、散歩など)、楽に自転車に乗る (8.9km/時)、階段を下りる、軽い荷物運び、自体重を使った軽い筋力トレーニング (軽・中等度)、体操 (家で、軽・中等度)、ゴルフ (手引きカートを使って)、カヌー
4.0	自転車に乗る (≒16km/時未満、通勤)、階段を上る (ゆっくり)、動物と遊ぶ (歩く/走る、中強度)、卓球、ラジオ体操第1
4.5	耕作、家の修繕、テニス (ダブルス)*、水中歩行 (中等度)、ラジオ体操第2
5.0	かなり速歩 (平地、速く=107m/分)、野球、ソフトボール、バレエ (モダン、ジャズ)
5.5	バドミントン
6.0	ゆっくりとしたジョギング、ウェイトトレーニング (高強度、パワーリフティング、ボディビル)、バスケットボール、水泳 (のんびり泳ぐ)
6.5	山を登る (0~4.1kgの荷物を持って)
7.0	ジョギング、サッカー、スキー、スケート、ハンドボール*
7.3	エアロビクス、テニス (シングルス)*、山を登る (約4.5~9.0kgの荷物を持って)
8.0	サイクリング (約20km/時)
9.0	ランニング (139m/分)
10.0	水泳 (クロール、速い、69m/分)

\*試合の場合

厚生労働省 (2013) 健康づくりのための身体活動基準 2013 を参照し作成。

は拒食症患者が約4万人程度おり、拒食症患者の増加を抑えるために、痩せすぎのモデル (BMIが18未満) を雇用した事務所に罰金を与える法案が賛成多数で可決された。ちなみにBMIは体重(kg)÷身長(m)×身長(m)で求められ、標準体重は22とされている。このように痩せているのが第一とするのではなく、健康的に美しいモデルを起用するきっかけになり、この風潮が一般市民にも浸透することを期待している。このように何の知識もなく自己流での過剰なエネルギー摂取制限を行うことは大変危険である。

## 7. おわりに

スポーツ栄養学をもとにして、エネルギー代謝の仕組みやエネルギー消費量のことについて解説した。私たち人類は飢えとの戦いのもと、長い年月をかけてエネルギーを効率よく蓄積できる遺伝子を獲得した (肥満遺伝子)。そのため人類は現代まで種を存続することができたが、十分な食事を得ることが出来るようになった現代においては厄介な存在になっている。すなわち必要以上に摂取したエネルギーは、最大限脂肪として蓄積するような仕組みが備わっているのである。そのため肥満をはじめとする生活習慣病を予防するためには、適当な食事と適度な運動が第一である。

また近年インターネットの普及により、様々な情報

が簡単に手に入れることができるようになったが、その情報が正しいのかどうかの確証が得られにくくなった。特に食品や健康の分野は怪しい情報が氾濫しているように感じる。本稿を読んでもくれた学生諸君には、すべての情報が正しいと鵜呑みにするのではなく、自らの知識を使って正しい情報を精査する力を養って欲しいと願っている。

## 参考文献

- [1] 厚生労働省 (2015) 平成24年国民健康・栄養調査報告、<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyuu/h24-houkoku.html> : pp. 54-106, 2015年6月12日アクセス。
- [2] 厚生労働省 (2015) <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/metabo02/yobou/> : 2015年6月12日アクセス。
- [3] 永井成美、坂根直樹、森谷敏夫 (2005) 糖尿病 48 : 761-770。
- [4] 厚生労働省 (2013) 健康づくりのための身体活動基準2013、<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple.html> : 2015年6月12日アクセス。