

総説

アスリートにおける
総エネルギー消費量の推定

田中 茂穂

(独)国立健康・栄養研究所 健康増進研究部 エネルギー代謝研究室

【連絡責任者】田中 茂穂 〒162-8636 新宿区戸山 1-23-1

TEL : 03-3203-5603 FAX : 03-3204-1761 E-mail : tanakas@nih.go.jp

1. 総エネルギー消費量

(total energy expenditure ; TEE) の内訳
一日当たりのエネルギー消費量である TEE は、以下のような構成要素に分けられる。

TEE = 基礎代謝量 + 食事誘発性体熱産生 + 活動時代謝量

1) 基礎代謝量 (basal metabolic rate ; BMR)

覚醒時における最小限のエネルギーである BMR [1,2] は、以下の条件で測定される。

- ・約 12 時間以上の絶食
- ・安静仰臥位で、筋の緊張を最小限にした状態
- ・快適な室温 (25 前後) で、心身ともにストレスの少ない覚醒状態

BMR は測定前日から、測定実施場所に宿泊して測定をするという記述もしばしば見受けられる。しかし、国内外における BMR の推定式作成に利用された測定の多くでは、当日の朝、測定実施場所に移動し、十分な安静 (30 分以上) を保った後に測定されている。

BMR は、筋肉の緊張を最小限にした状態で測定される。そのため、除脂肪組織の約半分を占める筋肉が BMR 測定時に消費するエネルギーは 20% 程度で、その他、脳、肝臓、心臓、腎臓等の内臓も大きな割合を占めている [3] (表 1)。したがって、体重、中でも除脂肪量がわかれば、BMR をより高精度で推定することが可能となる。BMR は、一般に女性より男性、高齢者より若年者の方が大きい。これも、除脂肪量や除脂肪の構成比の違いでおよそ説明がつく [2]。BMR の個人間差は非常に大きく、TEE の個人間差の最大の原因であるが、体格などから、 $\pm 100 \sim 150 \text{ kcal/日}$ (標準偏差相当) 程度の誤差で推定が可能である。

ちなみに、表 1 からすると、骨格筋量を 1kg 増やしても、BMR は 13 kcal/日 しか増えないという計算になる。しかし、実際は、筋力トレーニングによって、除脂肪量が 1kg 増えると、報告間の差は大きいものの、およそ $40 \sim 50 \text{ kcal}$ 程度の変化が生じることが一般的である [4]。その原因はまだ明らかになっていないが、除脂肪量の大きい者 (骨格筋量の大きい者) では肝臓や腎臓の重量も大きく [5]、組織・臓器の重量と、一般健常人から得られた各組織・臓器の重量当たりのエネルギー消費量 (kcal/kg/日) から力士の基礎代謝量も説明できること [6] からすると、骨格筋以外の、エネルギー代謝の高い組織・臓器 (肝臓など) も増加している可能性が考えられる [7]。

2) 食事誘発性体熱産生

食後に、主として食物を消化・吸収・運搬するためにみられる熱産生は、たんぱく質を摂取した後に顕著である (摂取したエネルギーの約 $20 \sim 30\%$)。そのため、長年「特異動的作用 (specific dynamic action)」と呼ばれてきた。しかし、糖質や脂質を摂取した場合

表 1 安静時における臓器別エネルギー消費量
(欧米人男性の標準値 [3])

	重量 (kg)	代謝率 (kcal/kg/日)	代謝量の割合 (%)
骨格筋	28	13	21.6
肝臓	1.8	200	21.3
脳	1.4	240	19.9
心臓	0.33	440	8.6
腎臓	0.31	440	8.1
脂肪組織	15	5	4.0
その他	23.16	12	16.5
計	70		100.0

にも観察される(それぞれ5 ~ 10%、~ 5%)。最近は「食事誘発性熱産生(diet-induced thermogenesis: DITあるいはthermic effect of food(meal): TEF(TEM))」と呼ばれることが多い。食事誘発性熱産生の要因はいくつか考えられているものの、エネルギー摂取量とPFCバランスでかなり決定される。エネルギー摂取量のおよそ6 ~ 10%程度が食事誘発性熱産生として消費され则认为されている[8]。

3) 活動時代謝量

身体活動によるエネルギー消費量(活動時代謝量)には、歩行や運動はもちろん、家事や仕事等における動作や姿勢の保持(座位を保つための筋の緊張なども含まれる)など、様々な筋活動を伴う広義の身体活動によるエネルギー消費量が含まれる。

TEEをBMRで割った身体活動レベル(physical activity level: PAL)は、1.4 ~ 2.2前後の広い範囲に分布する。BMRを1400kcal/日、食事誘発性熱産生をTEEの10%とすると、このPALのパラツキによる活動時代謝量の幅は、およそ350kcal/日 ~ 1400kcal/日に相当する。スポーツなどの運動は、せいぜい300kcal/日前後か、多くの場合それ以下であると考えられるので、運動以外の身体活動量(nonexercise activity thermogenesis: NEAT)のパラツキも大きく貢献していると考えられる[9]。

2. エネルギー代謝の測定法

エネルギーの単位はkJ(仕事の単位)またはkcal(熱量の単位)であり、エネルギーを評価するには仕事あるいは熱量を直接測る必要がある。しかし、装置が大がかりで制約が多いため、酸素摂取量と二酸化炭素産生量から推定する、いわゆる“間接法”を基準とすることがほとんどである。

三大栄養素からエネルギーを生み出す際、食物からとりこんだ栄養素が酸素と反応(酸素摂取)し、二酸化炭素を産生する。これらの化学式に基づいて、多くの場合1%程度かそれ以下の誤差で、エネルギー消費量が推定できる。例えば、最もよく利用されるWeir[10]の式は、三大栄養素それぞれのRQと酸素1L当たりのエネルギーから、以下のような式が得られている。
$$EE(kcal) = 3.941 \times \text{酸素摂取量} + 1.106 \times \text{二酸化炭素産生量} - 2.17 \times \text{尿中窒素排泄量}$$

また、三大栄養素のうち、摂取エネルギーに占めるたんぱく質の割合は比較的安定している。そこで、たんぱく質の占める割合を12.5%と仮定すると、先のWeirの式は以下になる。

$$EE(kcal) = 3.9 \times \text{酸素摂取量} + 1.1 \times \text{二酸化炭素産生量}$$
たんぱく質の占める割合が20%を大きく越えるような極端に偏った食事であったり、激しい運動中に限定したりしなければ、尿中窒素排泄量を考慮しないことによる誤差の影響は1%未満であり、呼気分析だけでも十分に正確に測定することができる。

間接法は、直接法と比べて簡便に実施できる上に、ズレの小さい仮定に基づいており、直接法による測定と非常によく一致する。しかも、エネルギー基質の評価が可能である。したがって、しっかりとした呼気分析が行われるのであれば、非常に正確かつ有用な方法である。

3. TEEの推定法

日常生活におけるTEEの推定法としては、以下があげられる。

- ・二重標識水(Doubly labeled water: DLW)法
- ・心拍数法
- ・加速度計法
- ・生活活動記録法

これらのうち、DLW法は、日常生活におけるTEEを推定する上でベストの方法と考えられる[11]が、費用や、経時的な変化を追うことができないといった点から、実施しづらい。そこで、それ以外の3つの方法について、実用上の問題を中心に、特徴や問題点・注意点などについてふれる。なお、これらの方法に関する詳細については、別稿[12]を参照されたい。

1) 心拍数法

心拍数は、特に中 ~ 高強度の活動において、エネルギー消費量と正の相関がみられる。そこで、小型の心拍計モニターを使って1日以上にわたって心拍数を測定し、あらかじめ個人別に作成しておいたエネルギー消費量と心拍数との関係式を用いて1日のエネルギー消費量を推定することができる。FAO/WHO/UNUのエネルギー必要量[13]でも、心拍数法はDLW法に次いで正確とされており、DLW法とともに、一部で結果が採用されている。アスリートにおいて、

DLW 法を基準として、TEE の値が比較的一致しているという報告もある一方で[14]「集団の平均値はある程度とれるが、個々人における誤差は大きい」という報告が、いくつかみられる[15,16,17]。中でも、高校野球選手を対象とした報告[17]によると、心拍数法では、実測値と推定値に大きな差がみられ、相関も弱かった。後者は、TEE が大きい個人と小さい個人の区別もつかなかったことを示している(表2)。

実際のところ、日常生活の大部分を占める低強度の活動時においては、エネルギー消費量と心拍数の相関はそれほど強くないため、推定誤差が生じる。また、常に電極を装着し小型のモニターを腰部のベルトなどに携帯することによる不快感や、活動を多少制限する可能性があるという問題もある。分析にもかなりの手間を要する。

2) 加速度計法

歩数あるいは加速度の大きさはエネルギー消費量と正の相関があることを利用して、エネルギー消費量を推定する方法である。一般に腰部に装着し、その

多くは数十g なので、不快感は少ない。歩数計の一部および活動量計の多くは上下方向だけ(1次元)の加速度計であるが、3次元の加速度計もある。ただし、比較的低強度の活動をはじめ、重い物を持ってじっと立っている場合、坂道を昇り降りする場合など、加速度の大きさや加速度の振動の速さは、必ずしもエネルギー消費量と対応しないことがある。そのため、活動量を相対的に評価するには有効な手段となるが、一般に1日のエネルギー消費量を過小評価する傾向にある[18]。

どちらかと言えば、3次元の加速度計の方が1次元よりは、様々な活動をとらえられる傾向にある。しかし、歩行と歩行以外の活動で、加速度とエネルギー・強度との関係式は大きく異なる。そのため、1次元か3次元かの違いよりは、歩行と歩行以外の活動かを判別し、それによって推定式が異なるかどうか重要である。表3では、
・歩行を中心に推定式を作成した1次元の加速度計(スズケン：ライフコーダ)

表2 高校野球選手における簡便法の妥当性[17]

	DLW 法との差(推定値 - DLW 法: %)		DLW 法との相関係数
	平均	標準偏差	
心拍数法	31.6	23.9	0.21
加速度計法(ライフコーダ)	-35.3	3.6	0.73
生活活動記録法	-13.9	6.5	0.71

表3 加速度計による様々な活動の推定誤差[19]

身体活動	実測メッツ値		推定メッツ値					
	平均	SD	ライフコーダ		アクティマーカー		アクティブトレーサー	
			平均	%dif	平均	%dif	平均	%dif
デスクワーク	1.1	0.1	1.4	23.2	1.0	-8.0	1.3	11.3
掃除機かけ	2.9	0.7	1.6	-44.0	2.3	-20.0	2.7	-2.3
洗濯物干し	2.3	0.4	1.5	-32.6	2.6	16.7	2.5	11.7
皿洗い	1.8	0.4	1.4	-20.3	1.6	-12.0	1.8	0.2
5kgの物を移動する	4.4	0.7	1.9	-55.6	3.5	-19.4	4.2	-11.0
階段降り	3.2	0.5	3.4	9.6	3.3	8.6	3.0	-3.2
階段昇り	7.6	0.8	2.5	-66.4	2.7	-64.5	2.8	-63.8
ゆっくり歩行	3.1	0.4	2.7	-12.7	2.8	-9.0	2.8	-11.3
ふつう歩行	3.6	0.5	3.2	-10.5	3.3	-8.0	3.3	-7.3
速歩	4.6	0.7	4.0	-12.9	4.0	-11.7	4.2	-9.1
バッグを持って歩く	4.2	0.6	3.5	-16.1	3.6	-14.5	3.7	-12.8
ジョギング	9.5	1.1	6.8	-25.7	8.1	-10.7	9.0	-4.0

SD: 標準偏差、%dif: 推定誤差 ÷ 実測値 × 100

- ・歩行と歩行以外を区別せずに推定式を作成した3次元の加速度計(パナソニック電工:アクティマーカー)
- ・3次元の加速度計(ジー・エム・エス:アクティブトレーサー)を使って、歩行と歩行以外を判別し、それぞれについて推定式を作成した場合

の3つについて、家事のような比較的低強度の活動を含む様々な身体活動の推定精度を比較した[19]。歩行に特化したライフコーダと比べ、3次元の加速度計の方が、家事等(表3の上部)の強度の推定誤差は小さいが、それでも平均20%程度の誤差があり、歩行と比べて推定誤差はかなり大きい。それに対し、歩行とそれ以外の活動の判別に基づいたアクティブトレーサーの方が、全体に推定誤差が小さくなっている。最近では、こうした点を考慮した加速度計も市販されている[20,21]。

このように、加速度計の種類によって推定の方法、ひいては推定精度に大きな違いがある。そのため、使用する際には、どのような活動をどの程度正確にとらえることができるのか確認しておく必要がある。

3) 生活活動記録法

この方法は、活動内容を本人または観察者が記録し、それぞれの活動時のエネルギー消費量を、メッツ値[22](座位安静時代謝量の倍数で表わした身体活動強度の指標)などを用いて推定し、それらを加算することによって、長時間におけるエネルギー消費量を推定する方法である。生活内容に関する情報さえあれば利用できることから、エネルギー消費量・必要量の推定などに、幅広く利用されてきた。ただし、一般に集団の平均値には大きな誤差はないものの、個人における推定誤差はかなり大きいことに留意する必要がある[23,24]。

なお、ACSMによると、メッツの個人間変動は7%(標準偏差相当)とされている[25]。正規分布に従う場合、平均±標準偏差×2の範囲に95%が入るので、4メッツの速歩の場合、 $4 \pm (4 \times 0.07 \times 2)$ すなわち3.45～4.55メッツにほとんどの人が含まれるということになる。逆に言えば、平均4メッツの速歩でも、人によっては3.5メッツあるいは4.5メッツという、ある程度の個人間差があることを受け入れる必要がある。しかも、歩行や走行などより自由度の大きい活動においては、実際にはもっと大きな個人間差があることも予想できる。

実際、我々が掃除機かけの測定を実施した際、平均は約3メッツだったが、全体としては、およそ2～4メッツの間に分布した[21]。なお、メッツ値表は、約10年ぶりに改訂が行われ、821の活動(前回より約220の活動を追加)について値が提示されたところである[22]。

4. アスリートにおける BMR の推定法

競技種目により、アスリートの体格にはかなり大きな違いがみられる。また、体重だけではなく、身体組成の違いも大きい。その点から、体重だけでなく、除脂肪量などを含めた式が考案されている。

最近、Taguchi et al.[26]は、女性アスリートを対象に、

$$\text{BMR (kcal/日)} = 26.9 \times \text{除脂肪量 (kg)} + 36$$

という推定式を得た。それを、JISS式[27] $\text{BMR} = 28.5 \times \text{除脂肪量}$ や国立健康・栄養研究所の式[28]などと比較したところ、系統誤差もなく、相対的に最も正確な推定値が得られた[29]。推定値と実測値の差は、 $\pm 17 \pm 134 \text{ kcal/日}$ であった。

ただし、除脂肪量には、測定に用いる機種による違い(DXA法とインピーダンス法による体脂肪計など、測定原理の異なる方法間の値の相違、体脂肪計の業者間の差など)がみられる。そのため、論文と異なる機種を用いた測定では、推定の誤差が大きくなることが予想される点には注意したい。

5. アスリートにおける PAL

DLW法およびBMRの実測値から得られたPALは、アスリートにおいて、一般健常人と比べてより幅広い値が報告されている。

エネルギーバランスを保つことが可能な習慣的なPALの上限の目安としては、2.5程度であろうと考えられ[30]、アスリートにおけるPALの代表値としては2.2程度ではないかと考えられている[31]。しかし、クロスカントリースキーのナショナルチームの選手におけるトレーニングキャンプ中や、ツール・ド・フランスの競技中などにおいて、3.4～5.0程度の非常に高いPALの平均値が報告されている[30,31]。その間、それらの対象者は、エネルギーバランスのとれた状態(エネルギー摂取量=エネルギー消費量)をほぼ維持していた。クロスカントリースキーのナショナルチー

ムのトレーニングキャンプ中の場合[32] 摂取したエネルギーの16%、糖質の25%が、糖質を豊富に含む栄養剤から摂られていたことが報告されている。また、国内でも、高校野球選手において、2.66 という非常に高いPALの平均値が報告されている[17]

ただし、同じ対象集団でも、シーズンによって大きな違いがあり得る。例えば、日本や韓国のプロサッカー選手において、試合期のPALの平均値は2.2前後であったのに対し、プレシーズン合宿中の日本プロサッカー選手の値は 2.52 ± 0.18 であったという[33,34]。また、一部のアスリートの集団では、2.0前後かそれ以下の平均値も報告されており、スポーツ選手で必ずしもPALが非常に高いとは限らない。

おわりに

実際のところ、スポーツ活動中のエネルギー消費量を正確に推定することは、日常生活におけるエネルギー消費量の推定と同様、容易ではなく、推定値は、あくまで目安と考えるべきである。日常生活のエネルギー消費量が加速度計法などにより比較的正確に推定できれば、運動中のエネルギー消費量を心拍数法あるいは生活活動記録法で推定することにより、従来より正確にアスリートのTEEを推定することができるようになるかもしれない。こうした点については、今後の検討が待たれる。

<参考文献>

- [1] 柏崎浩. エネルギー所要量の歴史と現状. 小林修平編著. 栄養所要量・基準量と食生活ガイドライン. 東京: 建帛社; 1997. pp.61-125.
- [2] 田中茂穂. 人の基礎代謝量. 実験医学. 2009; 27(増刊 肥満・糖尿病の病態を解明するエネルギー代謝の最前線):1058-1062.
- [3] Gallagher D, Belmonte D, Deurenberg P, Wang Z, Krasnow N, Pi-Sunyer FX, Heymsfield SB. Organ-tissue mass measurement allows modeling of REE and metabolically active tissue mass. *Am J Physiol*. 1998;275:E249-E258.
- [4] 緑川泰史, 安部孝. 中高齢者のエネルギー・バランスと体重コントロール. 体育の科学. 53:179-184, 2003
- [5] Midorikawa T, Sekiguchi O, Beekley MD, Bembien MG, Abe T. A comparison of organ-tissue level body composition between college-age male athletes and nonathletes. *Int J Sports Med*. 2007;28:100-105.
- [6] Midorikawa T, Kondo M, Beekley MD, Koizumi K, Abe T. High REE in Sumo wrestlers attributed to large organ-tissue mass. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39:688-693.
- [7] 児島康介, 緑川泰史, 安部孝. 6ヶ月間のレジスタンス・トレーニングが骨格筋量と臓器重量に及ぼす効果. トレーニング科学. 2005;17:211-217.
- [8] Westerterp KR. Diet induced thermogenesis. *Nutr Metab*. 2004;1:5.
- [9] 田中茂穂. 日常生活における生活活動評価の重要性. 日本公衛誌 2008;55:474-477.
- [10] Weir JBV. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 1949;109:1-9.
- [11] 高田和子. 二重標識水法を用いたエネルギー摂取量評価への応用. 臨床スポーツ医学. 2009;26:1097-1102.
- [12] 高田和子, 田中茂穂. 適切なエネルギー消費量評価. 臨床スポーツ医学臨時増刊号. 2009;26:226-233.
- [13] FAO. Human energy requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. FAO Food and Nutrition Technical Report Series No. 1. Rome:FAO;2004.
- [14] Ekelund U, Yngve A, Westerterp K, Sjöström M. Energy expenditure assessed by heart rate and doubly labeled water in young athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1360-1366.
- [15] 海老根直之, 島田恵美子, 田中宏暁, 西牟田守, 吉武裕, 齊藤慎一, Jones PJH. 二重標識水法を用いた簡易エネルギー消費量推定法の評価 - 生活時間調査法, 心拍数法, 加速度計法について -. 体力科学. 2002;51:151-164.
- [16] Rafamantanantsoa HH, Ebine N, Yoshioka M, Higuchi H, Yoshitake Y, Tanaka H, Saitoh S, Jones PJ. Validation of three alternative methods to measure total energy expenditure against the doubly labeled water method for older Japanese men. *J Nutr Sci Vitaminol*. 2002;48:517-523.
- [17] 引原有輝, 齊藤 慎一, 吉武 裕. 高校野球選手における簡易エネルギー消費量測定法の妥当性の検討. 体力科学. 2005;54:363-372.
- [18] 田中茂穂. 身体活動レベル(PAL)とエネルギー必要量. 臨床スポーツ医学. 2007;24:847-853.
- [19] Hikiyama Y, Tanaka S, Ohkawara K, Ishikawa-Takata K, Tabata I. Validation and comparison of three accelerometers for measuring physical activity intensity during nonlocomotive activities and locomotive movements. *J Phys Act Health*, in press.
- [20] Oshima Y, Kawaguchi K, Tanaka S, Ohkawara K, Hikiyama Y, Ishikawa-Takata K, Tabata I. Classifying household and locomotive activities using a triaxial accelerometer. *Gait Posture*. 2010;31:370-374.
- [21] Ohkawara K, Oshima Y, Hikiyama Y, Ishikawa-Takata K, Tabata I, Tanaka S. Real time estimation of daily physical activity intensity by triaxial accelerometer and a gravity-removal classification algorithm. *Br J Nutr*. 2011;105:1681-1691.
- [22] Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, Meckes N, Bassett DR Jr, Tudor-Locke C, Greer JL, Vezina J, Whitt-Glover MC, Leon AS. 2011 Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43:1575-1581.
- [23] 山村千晶, 田中茂穂, 柏崎浩. 身体活動量に関する質問票の妥当性について. 栄養学雑誌. 2002;60:265-276.
- [24] Neilson HK, Robson PJ, Friedenreich CM, Csizmadia I. Estimating activity energy expenditure: how valid are physical activity questionnaires? *Am J Clin Nutr*. 2008;87:279-291.
- [25] Glass S, Dwyer GB. ACSM's metabolic calculations handbook.;2007/大野秀樹, 長澤純一監訳. ACSMメタボリック・カリキュレーション・ハンドブック - 運動時代謝の計算法 -. 東京: NAP;2008.
- [26] Taguchi M, Ishikawa-Takata K, Tatsuta W, Katsuragi C, Usui C, Sakamoto S, Higuchi M. Resting energy expenditure can be assessed by fat-free mass in female athletes regardless of body size. *J Nutr Sci Vitaminol*. 2011;57:22-29.
- [27] 小清水孝子, 柳沢香絵, 樋口満. スポーツ選手の推定エネルギー必要量. トレーニング科学. 2005;17:245-250.
- [28] 田中茂穂. 総論 エネルギー消費量とその測定法. 静脈経腸栄養. 2009;24:1013-1019.
- [29] 田口素子, 高田和子, 大内志織, 樋口満. 除脂肪量をを用いた女性競技者の基礎代謝量推定式の妥当性. 体力科学. 2011;60:423-432.
- [30] Westerterp KR. Limits to sustainable human metabolic rate. *J Exp Biol*. 2001;204:3183-3187.
- [31] 海老根直之. 二重標識水法を用いたスポーツ選手の代謝測定. 体育の科学. 2011;61:569-575.
- [32] Sjödin AM, Andersson AB, Högberg JM, Westerterp KR. Energy balance in cross-country skiers: a study using doubly labeled water. *Med Sci Sports Exerc*. 1994;26:720-724.
- [33] Ebine N, Rafamantanantsoa HH, Nayuki Y, Yamanaka K, Tashima K, Ono T, Saitoh S, Jones PJ. Measurement of total energy expenditure by the doubly labelled water method in professional soccer players. *J Sports Sci*. 2002;20:391-397.
- [34] 金亨烈, 李相直, 朴鍾薫, 海老根直之, 山中邦夫, 田嶋幸三, 齊藤 慎一. 試合期の韓国プロサッカー選手の二重標識水法による総エネルギー消費量測定. 体育学研究. 2003;48:717-723.

(受理日: 2011年11月23日、採択日: 2011年12月9日)