

Newsletter

Sports Medicine Research Center, Keio Univ.

No. 40

慶應義塾大学スポーツ医学研究センター
ニューズレター 第40号
[2022年3月発行]

特集



研究紹介

エネルギー吸収率を考え直す

慶應義塾大学スポーツ医学研究センター研究員

西田優紀

はじめに

「やせたい!」「太りたい!」、そんな願望を持つ方たちは、普段から食べ物のエネルギー（俗にいうカロリー）を気にしながら生活されているのではないだろうか。最近では、お店に並んでいる全ての食品にエネルギーが表示されているが、実はこのエネルギーの表示が義務付けられたのは2015年4月に食品表示法が施行されてからの話で、意外と最近の出来事である。

カロリーとはそもそもエネルギーの単位のことであり、1カロリーは「1気圧のもとで水1グラムの温度を14.5℃から15.5℃まで上げるのに必要なエネルギー」を意味する。ここで皆さんに質問ですが、私たちが普段目にする食品のエネルギーは、その食品そのものが持つエネルギーを指すでしょうか？— 答えはNOである。これがどういう意味かという、食品に記載されているエネルギーは、消化吸収率を加味した値、つまり消化吸収されずに糞便尿中へ損失される分を差し引いたエネルギーを指している。食品そのものが持つエネルギーから、消化吸収率を加味したエネルギーに変換する係数のことを“エネルギー換算係数”と呼ぶ。日本では国内で検証された試験の結果を基に定められていた係数もあったが、組成成分（アミノ酸、

脂肪酸、単糖・二糖類、食物繊維等）ごとの換算係数の使用を推奨する近年の国際的な動向を受けて、最新の日本食品標準成分表2020年版（八訂）では国際連合食糧農業機関（FAO）が提唱する換算係数が用いられることになった。国民健康・栄養調査で得られたエネルギー摂取量の結果を最新の成分表を基に再計算した結果、これまで用いられてきた成分表2015年版により計算したエネルギーよりも、約8%近く低くなってしまっている¹⁾。

消化吸収率なんて生理学の基礎的な話なのに、何故今になって基準が改正されるのか疑問に思われる方もいるかもしれないが、その測定はかなり大変で、未だにわかっていないこともたくさんあるのが現状である。前置きが長くなってしまったが、本稿ではエネルギーの吸収率に着目し、その基本的な話や歴史について、さらには今後求められる研究内容について解説していく。

エネルギー吸収率の計算方法

食事から得られるエネルギーは、エネルギー摂取量（energy intake）と表現されるが、吸収率を考えていく際には3種類のエネルギー摂取量を知っておく必要がある（図1）。まず、食



図1 3種類のエネルギー摂取量

表 1 Atwater の試験の限界

1. 対象者の活動パターンや食事内容の代表性に偏りがある。
2. 実験の期間が短い。
3. 吸収された各栄養素と糞便尿の残留物が厳密に対応しているかは不明。
4. 試験期間中に窒素出納が保たれていたか不明。
5. 多くの試験が予備試験なしに行われている。
6. 測定に影響を与える実験手順に関する詳細がほとんどない。
7. 多くの仮説や単純化を経て、研究が進められている。

出典：Sanchez-Peña MJ, et al. Nutr Rev. 2017 から引用

事そのものが持つエネルギーのことは、「総体の、全体の」という意味の“gross”を先頭につけて“gross energy intake (GEI)”と呼ばれる。次に、GEI から消化吸収されずに糞便中に損失されたエネルギーを差し引いた値のことを、消化可能なエネルギー“digestible energy intake (DEI)”と呼ぶ。さらに、DEI から尿中へのエネルギー損失を差し引いた値が、実際に吸収されたエネルギー“metabolized energy intake (MEI)”であり、我々が普通の生活で目にする食品に記載されているエネルギーはこの MEI のことである。エネルギー吸収率の計算では GEI と MEI を用いて下記のような式で表される。

$$\text{エネルギー吸収率 (\%)} = \text{MEI} \div \text{GEI} \times 100$$

ただし、研究によっては分子の値に DEI が用いられているケースもあるため、論文を読む際には尿中のエネルギー損失が差し引かれている値なのかどうかに注意していただきたい。

ボンブ熱量計によるエネルギーの測定

エネルギー吸収率を計算するためには、食事と糞便尿のエネルギーを測定する必要がある。エネルギーの測定には、ボンブ熱量計という古典的な装置が用いられ、同装置は 19 世紀にフランスの化学者 Berthelot 博士 (1827-1907) により発明された。その仕組み自体は現代になっても大きく変わっておらず、ボンベ中の試料を燃焼させた際の外部の水温上昇を測定することにより発熱量 (エネルギー) を測定するという手法である。

エネルギー吸収率の測定スケジュールは非常に大変であり、正確な測定結果を求めるのであれば、3～4 日間の食事とそれに対応する糞便尿を全て回収する必要がある。さらに、ボンブ熱量計で燃焼できる量はたった 1 g のため (私もこれには驚いた)、試料をミキサーなどでしっかりと攪拌させた後、凍結乾燥機により試料の水分を飛ばして、実際に燃焼させるという流れを何度も繰り返す必要がある。一人の測定を終えるだけでも検者はかなりの労力を費やすことになるが、被験者にとっても研究施設などに数日間宿泊して糞便尿を全て回収する作業は、かなりの負担であると想像できる。そのこともあってか、先行研究では食事や糞便尿の回収が容易な病院の入院患者を対象とした研究の方が比較的多いように感じる。

このように、エネルギー吸収率の測定は検者・被験者の両者にとって負担がかなり大きいため、基本的な内容ではあるが、

その実験を検証した研究は意外にも少ないのである。

エネルギー換算係数の歴史

前述のようなハードな測定を初めて実施したのが、栄養学分野では有名な Wilbur Olin Atwater 博士 (1844-1907) である。ボンブ熱量計により測定した、たんぱく質、脂質、炭水化物の物理的エネルギーはそれぞれ 5.7 kcal/g、9.4 kcal/g、4.1 kcal/g であったが、Atwater 博士の実施した吸収率の実験結果を基に、実際に体内に吸収されて代謝可能なエネルギーはたんぱく質 = 4 kcal/g、脂質 = 9 kcal/g、炭水化物 = 4 kcal/g と定められた。この代謝可能なエネルギーの値が、現代でも知られている Atwater の換算係数のことである。

100 年以上も前に提案されたこの Atwater の換算係数は間違いなく現代の栄養学においても礎となっているが、当時の測定環境の問題などから Atwater 博士はいくつか研究の限界を述べていたようである。Atwater 博士の実施した試験の限界については、2017 年に報告された総説論文²⁾の中でまとめられている (表 1)。これらの限界もあって、Atwater の換算係数に関する論争は頻繁に生じているが、代替案が提案されるまでには至らず、最近まで慣習的に用いられていたというのが実際のところである。

一方で、国内ではエネルギー吸収率の検証が独自に行われていたようで³⁾⁻⁶⁾、日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂) の時点では食品ごとにエネルギー換算係数が細かく分けられていた。しかし、2002 年に FAO が新たな換算係数を提唱したことに加え、国内で実施された検証内容に関する詳細が不透明であったなどの理由から、2020 年版では組成成分ごとのエネルギー換算係数が採用される運びとなった。この一連の流れからわかることは、普段目にする食品のエネルギーの値は、基準の改定によって変動しうる曖昧な側面を持つということである。そのため、基準が変更されたからといって新しい値を絶対的なものだと信じ込むのではなく、やはり目の前の患者さんの体重変化などに応じて、食事の提供量を柔軟に変化させていくことが重要である。

健常成人のエネルギー吸収率に関する先行研究

ここまでの話でおわかりのように、エネルギー吸収率については現代になっても不透明な点が多い。そこで、筆者はエネルギー吸収率に関する知見を整理するために、現在スコーピングレビューを実施している。スコーピングレビューとは、「既存の知見を網羅的に概観（マッピング）および整理し、まだ研究されていない範囲を特定する」という文献レビューの一種であり、今回は「健常成人のエネルギー吸収率はどのくらいなのか？」というリサーチクエスチョンを解決するために検索を実施した。海外の文献データベースから1973年～2020年までに出版された論文を抽出したところ、健常成人を対象としてボンブ熱量計により食事と糞便尿のエネルギーを評価した文献の数は11件であった。その内、若年層～中年層を対象とした研究（9件）では、エネルギー吸収率の平均値は88.0～93.1%と報告されており、これは教科書に記載されている値と類似する結果であった。一方で、70代の高齢者を対象とした報告⁷⁾では、エネルギー吸収率の平均値は90%近くであったものの、標準偏差は10%以上と大きなばらつきが認められたため、対象者によっては80%を下回る者が存在したことが推測される。また、平均年齢66歳を対象とした報告⁸⁾ではエネルギー吸収率が計算されていなかったため、GEIと糞便尿によるエネルギー損失の平均値から筆者の方でエネルギー吸収率を再計算したところ、約76%という低い結果であった。ただし、いずれの研究も高齢者と若年者を同時に測定して比較したわけではないため、高齢になると吸収率が有意に低下するとは言いきれないことに注意が必要である。

そのほか、エネルギー吸収率に影響を与える要因についても、いくつか検討が行われている。食事を例に挙げると、食物繊維や種実類（クルミ、ピスタチオ、アーモンド）を多く含む場合は、エネルギー吸収率を低下させることがわかっている^{9)–11)}。また近年では、ペプチド系の抗生物質であるバンコマイシンを服用した場合にも、エネルギー吸収率が低下することが報告されている¹²⁾。一方で、運動の有無や季節の違いについてはエネルギー吸収率に影響を与えないことが示唆されている^{8),13)}。

今後の課題

1973年以降に出版されたエネルギー吸収率に関する論文を検索したところ、日本人を対象とした学術論文は国内外で報告されていなかった。報告書などは存在するため測定自体は実施されているのだろうが、手元に入手可能な資料は存在しないため、日本人を対象として測定の再検証が必要であろう。また、近年では高齢者のフレイルやサルコペニアなどが問題視されており、そのメカニズムの一つに加齢に伴う消化吸収率の低下が挙げられている。吸収率の低下を考慮して高齢者に適切な食事を提示するためにも、高齢者と若年者のエネルギー吸収率を比較して、加齢による影響を明らかにすることも重要である。

さいごに

Atwaterの換算係数が開発された1900年前後では、人々の平均寿命は50歳にも満たなかったことから、加齢とエネルギー吸収率の関係性については当時あまり議論にならなかったことが想像される。しかし、現代では人間の平均寿命は80歳を超えるようになり、食事内容も大きく異なっている。測定が行われた歴史的背景を知っていれば、慣習的に一つの予測式や推定係数を用いることはふさわしくなく、定期的に検証とアップデートを繰り返してエネルギー吸収率を考え直すことが必要であることをご理解いただけるのではないだろうか。

参考文献

- 1) 松本万里、渡邊智子、松本信二、他。食品のエネルギー値の算出方法についての検討：組成に基づく方法と従来法との比較、日本栄養・食糧学会誌、73、255–264、2020
- 2) Sánchez-Peña MJ, Márquez-Sandoval F, Ramírez-Anguiano AC, et al. Calculating the metabolizable energy of macronutrients: a critical review of Atwater's results. *Nutr Rev*. Jan; 75(1): 37–48. 2017
- 3) 科学技術庁資源調査会編、日本食品標準成分表の改訂に関する調査資料—日本人における大豆及び大豆製品の利用エネルギー測定調査結果—、科学技術庁資源調査所資料第70号、1979
- 4) 科学技術庁資源調査会編、日本食品標準成分表の改訂に関する調査資料—日本人における動物性食品の利用エネルギー測定調査結果—、科学技術庁資源調査所資料第73号、1980
- 5) 科学技術庁資源調査会編、日本食品標準成分表の改訂に関する調査資料—日本人における穀類の利用エネルギー測定調査結果—、科学技術庁資源調査所資料第92号、1981
- 6) 科学技術庁資源調査会編、日本食品標準成分表の改訂に関する調査資料—日本人における油脂類の利用エネルギー測定調査結果及び主要食品の利用エネルギー値—、科学技術庁資源調査所資料第99号、1982
- 7) Pannemans DL, Westerterp KR. Estimation of energy intake to feed subjects at energy balance as verified with doubly labelled water: a study in the elderly. *Eur J Clin Nutr*. 1993
- 8) Campbell WW, Kruskall LJ, Evans WJ. Lower body versus whole body resistive exercise training and energy requirements of older men and women. *Metabolism*. Aug; 51(8): 989–97. 2002
- 9) Baer DJ, Rumpler WV, Miles CW, Fahey GC Jr. Dietary fiber decreases the metabolizable energy content and nutrient digestibility of mixed diets fed to humans. *J Nutr*. Apr; 127(4): 579–86. 1997
- 10) Baer DJ, Gebauer SK, Novotny JA. Measured energy value of pistachios in the human diet. *Br J Nutr*. Jan; 107(1): 120–5. 2012
- 11) Baer DJ, Gebauer SK, Novotny JA. Walnuts Consumed by Healthy Adults Provide Less Available Energy than Predicted by the Atwater Factors. *J Nutr*. Jan; 146(1): 9–13. 2016
- 12) Basolo A, Hohenadel M, Ang QY, et al. Effects of underfeeding and oral vancomycin on gut microbiome and nutrient absorption in humans. *Nat Med*. Apr; 26(4): 589–598. 2020
- 13) Miles CW, Brooks B, Barnes R, Marcus W, Prather ES, Bodwell CE. Calorie and protein intake and balance of men and women consuming self-selected diets. *Am J Clin Nutr*. Dec; 40(6 Suppl): 1361–7. 1984

おもな活動報告

1月 体育会自転車競技部 VO₂、乳酸、体脂肪率測定(1～3月)
 冬季国民体育大会神奈川県代表選手健康診断
 (11～1月)
 新型コロナウイルス感染症罹患後のスポーツ復帰のため
 の検診(問診、心図検査、心エコー検査)(年間)
 体育会ボクシング部、柔道部体脂肪率測定
 北京オリンピック帯同(石田医師)

教職員対象オンライン運動教室(1～3月)

2月 体育会蹴球部体脂肪率検査
 体育会競走部血液検査

3月 KEIO SPORTS SDGs シンポジウム 2022 ～持続可能な
 スポーツ・身体活動の発展～開催(3/5)
 体育会蹴球部体脂肪率検査

《《《《《《トピックス》》》》》》》》》》》》

開催報告

2022年3月5日(土)日吉キャンパス来往舎にて「KEIO SPORTS SDGs シンポジウム 2022 ～持続可能なスポーツ・身体活動の発展～」が行われました。Zoom と YouTube によるオンライン配信も併せて行い、約180名の方にご参加いただきました。

本シンポジウムでは、「慶應スポーツ SDGs シンポジウム 2020」で取り上げた内容の進展、具体的取組の共有を目的に
 かけ、2021年度のKEIO SPORTS SDGsの進捗報告をはじめ、8名の登壇者から活発な情報発信が行われました。また、特別講演として、Sheffield Hallam University の Associate Professor Anna Lowe 先生による『Sheffield における身体活動システムズアプローチ「Move More.」』はオンデマンド配信を行いました。

詳細な報告は、次号のニューズレターにて行います。



フィットネス測定再開のお知らせ

スポーツ医学研究センターでは、以前より呼吸代謝計測システム Quark CPET (cosmed 社製)を用いた運動パフォーマンス評価 (VO₂ 測定)を行ってまいりました。しかし、新型コロナウイルス感染症の流行により、被験者間での感染防止の観点から測定を中止しておりました。

このたび、アンチバクテリアフィルターを用いる他、感染防止対策を講じ、測定を再開しましたのでご報告します。他にも、一日の受け入れ人数を制限しながら、体脂肪率測定なども再開していますので、測定をご希望の団体は、スポーツ医学研究センターのサイト (<http://sports.hc.keio.ac.jp/>) お問い合わせフォームよりご連絡ください。



Newsletter No.40

慶應義塾大学スポーツ医学研究センター ニューズレター 第40号

慶應義塾大学スポーツ医学研究センター Sports Medicine Research Center, Keio University

発行日: 2022年3月31日

代表: 勝川史憲

〒223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1 慶應義塾大学スポーツ医学研究センター TEL:045-566-1090 FAX:045-566-1067 <http://sports.hc.keio.ac.jp/>