

燃焼式カロリーメーターによる食物繊維含有食品の 物理的燃焼エネルギーの測定

本 多 芳 彦¹⁾・佐 藤 加 奈²⁾

Food energy determination by combustion calorimetry
with correction for fiber content.

Yoshihiko HONDA¹⁾ and Kana SATO²⁾
(Accepted 17 January 2012)

要 旨

最近、エネルギー値を表示した食品が多くなっている。このエネルギーについては化学的分析によって測定された各成分から計算されている。その計算の基本になるエネルギーは燃焼式カロリーメーターによって測定される成分ごとの物理的燃焼エネルギーである。この物理的燃焼エネルギーは糖質が4.1 kcal/g、タンパク質が5.65 kcal/g、および脂質が9.45 kcal/gである。しかし、我々はこのエネルギーのすべてを吸収し、生命活動に必要なエネルギーとして利用することは不可能である。

Atwater は各栄養素のエネルギーとして利用可能な割合を求め、その結果、糖質が4 kcal/g、タンパク質が4 kcal/g、および脂質が9 kcal/g になることを見出している。

我々は燃焼式カロリーメーターを用い、食物繊維以外の物理的燃焼エネルギーを推定する方法について検討した。

そこで、我々がほとんど吸収することのできない食物繊維を多く含む食品(カボチャ、メロン、小豆、栄養補助食品)について燃焼式カロリーメーターを用いて測定し、この値から分析値より求めた食物繊維以外の物理的燃焼エネルギーを引き、その値を求めた。この差が食物繊維の物理的燃焼エネルギーの値となる。

これらの物理的燃焼エネルギーと食物繊維量との関係を一次式で近似したところ、食物繊維の物理的燃焼エネルギーは $4.193 \times$ 食物繊維量で表され、この相関係数は 0.9853 であった。我々が吸収可能なタ

ンパク質などの物理的燃焼エネルギーは食品の物理的燃焼エネルギーからこの式で計算した食物繊維の物理的燃焼エネルギーの値を差し引いたエネルギーとなる。したがって、タンパク質などの物理的燃焼エネルギーは食物繊維量のみを化学的に分析するだけで求められることになる。

また、短時間でエネルギーが測定できる燃焼式カロリーメーターは製品開発においても利用できる。例えば、カロリーの低いコロッケを開発する場合、油調前後のコロッケの物理的燃焼エネルギーが簡単に測定できることから、製品開発の効率は向上する。

このように燃焼式カロリーメーターの利用は製品を開発する上での無駄な実験を省くことができる。

はじめに

人体には約 60 兆個の細胞があり、その細胞の一つ一つが生命を維持する上で必要な役目を果たすために多くのエネルギーを消費している。その燃料となるエネルギー源が食品に含まれている糖質や脂質およびタンパク質などである。

過去、人類は生きるためにエネルギー、すなわちカロリーに関係なく、空腹を満たすものを求めていた。しかし、飽食の現代においては肥満を起因とする病気を予防する上でエネルギーの低い食品が注目され、人々はこれら低カロリー食品²⁾³⁾⁴⁾を選んで購入するようになった。このような食品に対するニーズの変化により、今では加工食品の多くにエネルギーが表示され、消費者の多くはこの値を見て商品を選定するようになっている。

このエネルギーについては通常、成分を化学的に

¹⁾ 酪農学園大学酪農学部食品流通学科食品企画開発研究室

Department of Foods Distribution, Food Planning and Development, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan

²⁾ 株式会社新サカイヤフーズ

New Sakaiya Foods Co., Ltd.

分析し、その値から計算して求めている。この基本となるエネルギーの値は燃烧式カロリーメーター⁵⁾⁶⁾⁷⁾での測定値である。この方法で測定した三大栄養素の物理的燃烧エネルギーは糖質が4.10 kcal/g、脂質が9.45 kcal/g、およびタンパク質が5.65 kcal/gである。

我々はこの燃烧式カロリーメーターで測定される食品のエネルギー、すなわち食品中の成分のすべてのエネルギーを吸収し、生命活動に必要な熱量として利用することはできない。したがって、我々の体内で確保されるエネルギーは物理的燃烧エネルギーの値よりも低い値となる。特にタンパク質の生理的燃烧エネルギーは物理的燃烧エネルギーから尿素などの燃烧エネルギーを差し引いたものとなり、Atwater⁸⁾⁹⁾によると、その値はタンパク質が酸化された時に1g当たり平均1.25 kcal/gであることから、タンパク質の生理的燃烧エネルギーは4.40 kcal/gとなるとされている。さらに、人が利用できるエネルギーを求める場合には各栄養素の消化吸収率を求めなければならない。

その消化吸収率については、Rubner¹⁰⁾が1885年に各栄養素の物理的燃烧エネルギーと犬での吸収実験および当時のドイツ人の摂取食物の内容から三大栄養素のエネルギーを糖質が4.1 kcal/g、脂質が9.3 kcal/g、およびタンパク質が4.1 kcal/gであるとしている。

また、Atwaterらが1900年に各種の食品に含まれている栄養素の燃烧エネルギーを精密に測定し、これにアメリカの中流家庭における食事に含まれている栄養素を基本に消化吸収率をかけて生理的燃烧エネルギーを求め、エネルギー換算係数を算出している。その結果、炭水化物中の糖質が98%で4 kcal/g、脂質が95%で9 kcal/g、タンパク質が92%で4 kcal/gという値を得ている¹¹⁾¹²⁾。

日本では穀類、動物性食品、油脂類、大豆および大豆製品の中の主要食品について生理的燃烧エネルギーを測定し、独自のエネルギー換算係数を求めている。しかし、測定対象外のものでFAOの委員会が提唱しているものについてはFAOの換算係数¹³⁾を用い、さらにこれにもないものについてはAtwaterの係数を利用している。

また、炭水化物である食物繊維については従来エネルギー換算係数0 kcal/gとして考えられていたが、腸内細菌は食物繊維を利用して短鎖脂肪酸を生成するが、このうちプロピオン酸および酪酸が大腸から吸収されてエネルギー源になることが明らかとなった。そこで、今では食物繊維のエネルギーにつ

いてはグァーガムや小麦胚芽などの第1群の食物繊維が2 kcal/g、アラビアガムやビートファイバーなどの第2群の食物繊維が1 kcal/gおよび寒天、キサンタンガムやジェランガムなどの第3群の食物繊維が0 kcal/gであるとされている¹⁴⁾。

このように食物繊維の多くがエネルギーとして吸収されないか、または吸収率が低いことから、生命活動におけるエネルギーとしては重視されていないが、燃烧式カロリーメーターによる測定では大きな値を示すものとする。

したがって、単位重量当たりの食物繊維の物理的燃烧エネルギーが分かれば、食品の食物繊維量を測定し、燃烧式カロリーメーターで測定したエネルギーから、食物繊維の物理的燃烧エネルギーを引けば生命活動に利用されるタンパク質などの物理的燃烧エネルギーが求められることになる。

そこで、食物繊維を含有する栄養補助食品の表示およびカボチャなどの食物繊維を多く含む食品を化学的に分析した成分の結果から求めた物理的燃烧エネルギーを燃烧式カロリーメーターによるエネルギーの測定値から引いた値と食物繊維量との関係からの食物繊維の単位重量当たりの物理的燃烧エネルギーを求めたので報告する。

1. 実験方法

1.1 燃烧式カロリーメーター¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾

食品の持つエネルギーの測定は図1に示すIKAカロリーメーターC200(ポンプカロリーメーター)を用いて測定した。この装置では食品を高圧の酸素中で爆発的に燃烧させた時に発生する熱量を一定量の水に吸収させ、その水温上昇と水量から食品の燃烧エネルギーを求める。この方法の原理は物質の体内での酸化と体外での酸化は同じであるという考えに基づいている。

今回使用したIKAカロリーメーターには酸素を充填する機能がないため、酸素充填には酸素ステーションC248を使用した。

1.2 燃烧式カロリーメーターによるエネルギーの測定方法

燃烧し易いように乾燥処理した試料をルツボの容積の約1/2(約6g)量入れ、重量を精度0.0001gまで正確に測定する。次に、燃烧式カロリーメーターのルツボホルダーにセットした後、点火ワイヤーに取り付けた綿糸を試料の中に埋め込み、綿糸を介して試料が燃烧されるようにしてから、測定用の容器に入れた。

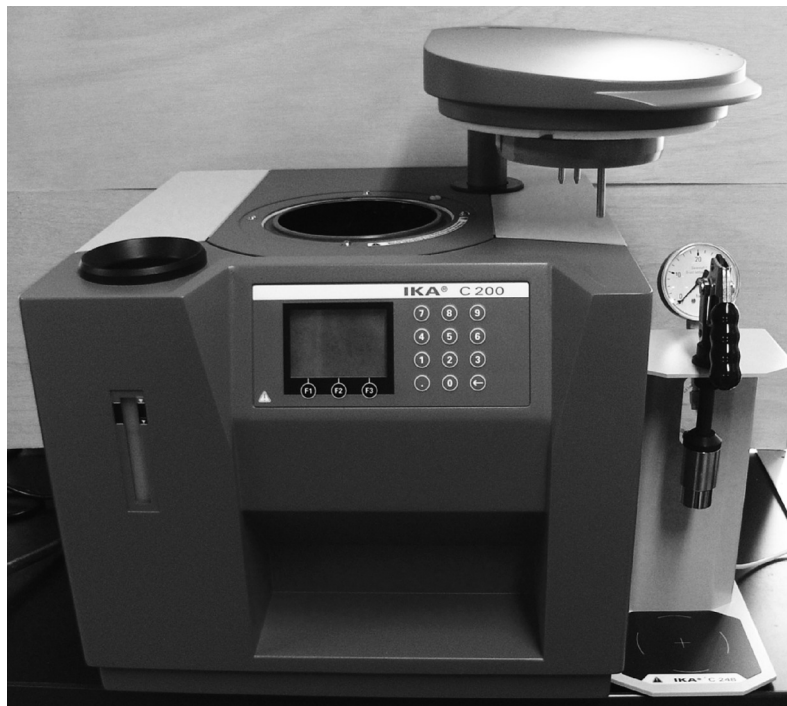


図1 燃焼式カロリーメーター (IKA カロリーメーターC200)

次に、酸素ステーションを使用して、測定用容器内に酸素を注入して圧力3 MPaにした後、添火アダプターを取り付けてからカロリーメーターの内槽に入れた。さらに、このカロリーメーターのタンクに 22 ± 3 °Cの水を2ℓ入れ、測定する試料の重量などを入力した後物理的燃焼エネルギーの測定を開始した。

測定終了後、測定容器中の燃焼ガスは排気ダクトの下や換気の良いところで排気用ボタンを押して排出した。排出後測定容器を開け、ルツボの内部を確認し、不完全燃焼の形跡があった場合には再度測定を行った。

1.3 成分分析方法

食品の成分分析の方法について以下に示す。

水分については減圧加熱・乾燥助剤法(70°C, 5時間)およびハロゲン加熱式水分計で、また、タンパク質についてはケルダール法および脂質については酸分解処理した後ソックスレー抽出法で測定した。さらに、食物繊維についてはブロスキー変法によって測定し、また、糖質については差し引き換算法で求めた。

1.4 分析値からの物理的燃焼エネルギーの計算

化学的に分析した成分値に、各栄養素の物理的燃焼エネルギー値である糖質の4.10 kcal/g、脂質の

9.45 kcal/g、タンパク質の5.65 kcal/gを乗じて、これらの総計から各食品の物理的燃焼エネルギーを求めた¹⁸⁾。

なお、燃焼式カロリーメーターによる物理的燃焼エネルギーの値は成分分析によって求めた水分で補正した値である。

1.5 試料

今回用いた測定用試料は西洋カボチャである栗ゆたかおよび食用に適さないおもちゃカボチャとも言われるペポカボチャ、夕張キングメロン、北海小豆、食物繊維が強化された各種栄養補助食品およびコロケ、さらにカロリーゼロの甘味料である。

水分の多い試料については定温乾燥器を用い、100°C、約24時間の条件で乾燥した後、燃焼式カロリーメーターの測定用として供した。

2. 実験結果および考察

2.1 分析値から求めた物理的燃焼エネルギーと燃焼式カロリーメーターによる測定値との比較

2.1.1 カボチャ(栗ゆたか)の物理的燃焼エネルギー

カボチャの成分分析値から求めた食物繊維を除いた物理的燃焼エネルギーの値と燃焼式のカロリーメーターで測定したエネルギーとの差から食物繊維

表1 カボチャ（栗ゆたか）の成分値および物理的燃焼エネルギー（100 g 当たり）

	カボチャ（栗ゆたか）果肉	カボチャ（栗ゆたか）ワタ	カボチャ（栗ゆたか）種
タンパク質	2.0g	1.8g	15.3g
脂質	0.9g	0.4g	17.1g
糖質	20.2g	4.0g	4.5g
水分	72.6g	90.2g	35.0g
灰分	1.0g	1.5g	2.2g
ナトリウム	1 mg未満	1 mg未満	6g
食物繊維	3.3g	2.1g	25.9g
物理的燃焼エネルギー	102.6kcal	30.4kcal	266.5kcal
燃焼式カロリーメーターによる測定値	112.1kcal	36.2kcal	344.9kcal

の物理的燃焼エネルギーを求めた。

表1に蒸し器で加熱処理（蒸煮）したカボチャ（栗ゆたか）の果肉，同様に加熱処理したカボチャのワタおよび種の成分値とこれらの値から求めた食物繊維以外の物理的燃焼エネルギーおよび燃焼式カロリーメーターで測定したエネルギー値を示した。

果肉では水分が72.6 g/100 gであり，次に多いのが糖質で20.5 g/100 gである。脂質やタンパク質は少なく，それぞれ0.9 g/100 gおよび2.0 g/100 gであった。これらの値に各成分の換算係数を乗じて物理的燃焼エネルギーを計算すると102.6 kcal/100 gとなった。一方，燃焼式カロリーメーターで測定した値は112.1 kcal/100 gであり，この差である9.5 kcal/100 gが食物繊維の物理的燃焼エネルギーに相当する。

この果肉には食物繊維が3.3 g/100 g含まれていることから，1 g当たりの物理的燃焼エネルギーとしては2.88 kcal/gとなった。

また，カボチャのワタについては水分が最も多く90.2 g/100 gで，次が糖質の4.0 g/100 gであり，タンパク質や脂質は共に少なく，それぞれ1.8 g/100 gおよび0.4 g/100 gであった。これらの値から食物繊維以外の物理的燃焼エネルギーを計算すると30.4 kcal/100 gで，これに対して燃焼式カロリーメーターで測定した値は36.2 kcal/100 gであり，これらの差が食物繊維の物理的燃焼エネルギーに相当する。したがって，これを食物繊維量2.1 g/100 gで割ると2.76 kcal/gとなった。

さらに，カボチャの種については水分が35.0 g/100 gであり，次に多く含まれているのが食物繊維の25.9 g/100 gである。その次が脂質の17.1 g/100 g，タンパク質の15.3 g/100 gであり，糖質は少なく4.5 g/100 gである。食物繊維が果肉などに比べて多いが，この殆どは種皮の部分によるものである。

この成分値から食物繊維以外の物理的燃焼エネルギーを計算すると266.5 kcal/100 gとなり，一方，燃焼式カロリーメーターで測定した値は344.9 kcal/100 gであった。これらの差は78.4 kcal/100 gとなり，果肉などに比べると大きな値を示したが，これは種に食物繊維が多く含まれていることによる。次に，これを食物繊維量で割ると3.02 kcal/gとなった。

このカボチャ（栗ゆたか）の各部位を試料として食物繊維の物理的燃焼エネルギーを求めたところ，上記のように2.76～3.02 kcal/gになることが分かった。

2.1.2 ペポカボチャの物理的燃焼エネルギー

ペポカボチャにはハローウィンなどに利用されるおもちゃカボチャや300 kg以上になるアトランティックジャイアント，食用にされているズッキーニなどがある。その種子の抽出物には機能性があることから付加価値の高いサプリメントの素材として利用されているが，おもちゃカボチャやアトランティックジャイアントの果肉は食用には適さず，日本では通常飼料用として利用されている¹⁹⁾。

栗カボチャと同様に，燃焼式カロリーメーターによって測定した値と食物繊維を除いた成分値から計算した物理的燃焼エネルギーとの差，すなわちこのカボチャの食物繊維の燃焼エネルギーを求めた。

表2に加熱処理（湯煮）してペースト状にしたペポカボチャの実，無加熱の種の成分値と食物繊維を除いた値から計算した物理的燃焼エネルギーおよび燃焼式カロリーメーターによって測定したエネルギーの値を示した。

ペポカボチャの果肉については水分が最も多く95.1 g/100 gであり，次が食物繊維の2.1 g/100 g，糖質の1.8 g/100 gで，タンパク質は0.5 g/100 g，脂

表2 ペポカボチャの成分値および物理的燃焼エネルギー (100 g 当たり)

	ペポカボチャ 果肉	ペポカボチャ 種
タンパク質	0.5g	17.0g
脂質	0.05g未満	23.9g
糖質	1.8g	0.4g
水分	95.1g	48.9g
灰分	0.5g	2.8g
ナトリウム	1mg	1mg未満
食物繊維	2.1g	7.0g
物理的燃焼エネルギー	10.2kcal	323.6kcal
燃焼式カロリーメーターによる測定値	18.3kcal	348.2kcal

質は 0.05 g/100 g 未満であった。これらの成分値から食物繊維を除いた物理的燃焼エネルギーを計算したところ 10.2 kcal/100 g となった。一方、燃焼式カロリーメーターで測定した値は 18.3 kcal/100 g であった。これらの差が食物繊維の燃焼エネルギーに相当し、これを食物繊維量 2.1 g/100 g で割ると 3.86 kcal/g となった。

また、ペポカボチャの種については水分が 48.9 g/100 g であり、次が脂質の 23.9 g/100 g で、その次がタンパク質の 17.0 g/100 g であった。さらに、ペポカボチャの食物繊維および糖質についてはそれぞれ、7.0 g/100 g および 0.4 g/100 g であった。

この成分値から食物繊維を除いた物理的燃焼エネルギーを計算したところ 323.6 kcal/100 g となったのに対し、燃焼式カロリーメーターで測定した値は 348.2 kcal/100 g であった。これらの差の 24.6 kcal/100 g は食物繊維の物理的燃焼エネルギーで、これを食物繊維量 7.0 g/100 g で割ると 3.51 kcal/g となった。

ペポカボチャについては 2 サンプルしか行っていないが、単位重量当たりの食物繊維の燃焼エネルギーはやや異なる値を示した。

さらに、ペポカボチャの種および栗ゆたかの種の固形分当たりの食物繊維量を比較すると、それぞれが 36.5 g/100 g、および 13.7 g/100 g であり、ペポカボチャの種の食物繊維量は栗ゆたかの種に比べて少ないことが分かる。これは栗ゆたかの種の皮の厚さが約 1.043 mm にあるのに対し、ペポカボチャの種の厚さは約 0.134 mm であり、すなわち後者の皮が薄いことによる。このため、種が柔らかく、クッキーなどのお菓子の原料として利用されている理由である。一方、機能性を有する脂質は 23.9 g/100 g と栗ゆたかに比べて高い値を示した。

ペポカボチャの種子の油脂などの抽出エキス中にはリグナンなどの機能性物質が含まれており、これ

らが頻尿、尿切れ、残尿感などの排尿障害の改善²⁰⁾に役立つことから、このエキスは機能性食品として高価格で販売されている。このため、このカボチャの種は有用物として注目されているが、重量比で約 80% も占める果肉が食用に適さないため、日本での生産量は少ない。

2.1.3 夕張キングメロンの物理的燃焼エネルギー

夕張キングメロン²¹⁾は赤肉タイプのメロンで、風味が良いことから大変高い評価を受け、他のメロンより高級品として販売されている。また、このメロンで作ったスイーツも多く、その加工では多くのワタや種が副産物として発生している。それらも有用な食品素材であるとの立場から、メロンの各部のエネルギーに注目し、これらについても分析値から食物繊維を除いて計算した物理的燃焼エネルギーと燃焼式カロリーメーターによる測定値との差から食物繊維の物理的燃焼エネルギーを求めた。

表3に夕張キングメロンの果肉(生)、および加熱処理(湯煮)後の種と酵素処理して液状化したワタの成分値とこれらの値から食物繊維を除いた物理的燃焼エネルギーおよび燃焼式カロリーメーターで測定したエネルギーの値を示した。

夕張キングメロンの果肉については水分が最も多く 81.5 g/100 g であり、次が糖質の 15.1 g/100 g で、食物繊維およびタンパク質はそれぞれ 1.4 g/100 g および 1.3 g/100 g であった。また、脂質については 0.05 g/100 g 未満であった。これらの成分値から食物繊維を除いた物理的燃焼エネルギーを求めると 100 g 当たり 69.3 kcal/100 g となった。一方、燃焼式カロリーメーターで測定した値は 74.2 kcal/100 g であった。これらの差は食物繊維の燃焼エネルギーに相当することから、これを食物繊維量 1.4 g/100 g で割ると 3.50 kcal/g となった。

表3 夕張キングメロンの成分値および物理的燃焼エネルギー (100 g 当たり)

	メロンの果肉	メロンのワタ (酵素処理)	メロンの種
タンパク質	1.3g	2.3g	11.9g
脂質	0.05g未満	0.1g	17.8g
糖質	15.1g	11.2g	0.2g
水分	81.5g	84.2g	43.3g
灰分	0.7g	1.4g	2.2g
ナトリウム	23mg	13mg	4 mg
食物繊維	1.4g	0.8g	24.6g
物理的燃焼エネルギー	69.3kcal	59.9kcal	236.3kcal
燃焼式カロリーメーターによる 測定値	74.2kcal	62.3kcal	343.7kcal

また、セルラーゼ系の酵素などで液状化した夕張メロンのワタの成分では水分が最も多く 84.2 g/100 g で、次に糖質の 11.2 g/100 g であった。さらに、タンパク質および脂質がそれぞれ 2.3 g/100 g および 0.1 g/100 g であり、食物繊維については 0.8 g/100 g であった。この成分値から食物繊維を除く物理的燃焼エネルギーを計算したところ 59.9 kcal/100 g であり、一方、燃焼式カロリーメーターで測定した値は 62.3 kcal/100 g であった。これらの差が食物繊維の物理的燃焼エネルギーに相当することから、この差を食物繊維量 0.8 g/100 g で割ると、単位重量当たりの物理的燃焼エネルギーが求められ、その値は 3.00 kcal/g となった。

さらに、夕張キングメロンの種については最も多いのが水分の 43.3 g/100 g であり、次に多いのが食物繊維の 24.6 g/100 g であった。また、脂質やタンパク質も多く、それぞれ 17.8 g/100 g および 11.9 g/100 g であり、一方、糖質については少なく、0.2 g/100 g であった。この成分値から食物繊維以外の物理的燃焼エネルギーを求めたところ 236.3 kcal/100 g となり、一方、燃焼式カロリーメーターで測定した値は 343.7 kcal/100 g となった。これらの差を食物繊維量 24.6 g/100 g で割り、単位重量当たりの

物理的燃焼エネルギーを求めると 4.37 kcal/g となった。

メロンの場合、このようにして求めた食物繊維の単位重量当たりの物理的燃焼エネルギーは 3.00～4.37 kcal/100 g となり、カボチャの場合に比べてこれら値に差が認められた。

2.1.4 北海小豆のエネルギー

小豆は澱粉質が多く、主に餡としてスイーツなどの加工食品に広く利用されており、また、ポリフェノール²²⁾などが多く含まれていることから、抗酸化能などの機能面に注目した商品にも利用されている。この小豆についても成分分析を行い、この値から食物繊維の分を除いて求めた物理的燃焼エネルギーと燃焼式カロリーメーターで測定したエネルギーとの差、すなわち北海小豆の食物繊維の物理的燃焼エネルギーを求めた。

表4に北海小豆を加熱処理(湯煮)した全粒タイプのもものとこれを潰した後ガーゼで漉して果肉のみにしたもの、および水道水で洗って皮のみにしたものの成分値とこれらの値から食物繊維の分を除いて求めた物理的燃焼エネルギーおよび燃焼式カロリーメーターで測定したエネルギーの値を示した。

表4 小豆の成分値および物理的燃焼エネルギー (100 g 当たり)

	小豆 (全粒)	小豆の果肉	小豆の皮
タンパク質	9.0g	6.6g	1.3g
脂質	0.4g	0.2g	0.1g
糖質	11.1g	14.0g	0.05g未満
水分	56.1g	75.3g	88.6g
灰分	1.5g	0.6g	0.2g
ナトリウム	2 mg	5 mg	10mg
食物繊維	21.9g	3.3g	9.8g
物理的燃焼エネルギー	100.1kcal	96.6kcal	8.3kcal
燃焼式カロリーメーターによる 測定値	186.6kcal	110.6kcal	48.8kcal

北海小豆（全粒）の成分では最も多いのが水分の56.1 g/100 gで、次に多いのが食物繊維の21.9 g/100 g、さらに糖質の11.1 g/100 gおよびタンパク質の9.0 g/100 gであり、脂質は少なく0.4 g/100 gであった。これらの成分から小豆（全粒）の食物繊維を除いた燃烧エネルギーを計算すると100.1 kcal/100 gとなった。一方、燃烧式カロリーメーターで測定した値は186.6 kcal/100 gであった。これらの差86.5 kcal/100 gが食物繊維の燃烧エネルギーに相当することから、この値を食物繊維の含有量21.9 g/100 gで割り、単位重量当たりの燃烧エネルギーを求めると3.95 kcal/gとなった。

また、加熱処理（湯煮）した小豆を潰した後ガーゼで漉し、滲液から回収した果肉では、水分が最も多く75.3 g/100 gであり、次に糖質の14.0 g/100 g、タンパク質の6.6 g/100 g、食物繊維の3.3 g/100 g、脂質の0.2 g/100 gの順であった。これらの成分からこの食物繊維を除いた燃烧エネルギーを計算すると96.6 kcal/100 gとなり、また、燃烧式カロリーメーターで測定した値は110.6 kcal/100 gであった。これらの差を食物繊維量で割って求めた物理的燃烧エネルギーは4.24 kcal/gであり、全粒の場合に比べてやや高い値を示した。

さらに、小豆をガーゼで漉し、その中に残ったものを水道水で良く洗うことによって小豆の皮のみにしたものである。最も多いのが水分の88.6 g/100 gで、次に食物繊維の9.8 g/100 gであり、その次がタンパク質の1.3 g/100 g、脂質の0.1 g/100 gと続き、糖質については0.05 g/100 g未満であった。小豆の果肉と分離した後水洗処理した小豆の皮の固形分が11.4 g/100 gであることから、その内食物繊維が86.0%も占めていることになる。

上記成分値から小豆の皮の食物繊維以外の物理的燃烧エネルギーを計算すると8.3 kcal/100 gとなり、一方、燃烧式カロリーメーターで測定した値については48.8 kcal/100 gとなった。これらの差を食物繊維量9.8 g/100 gで割って求めた物理的燃烧エネルギーは4.13 kcal/gとなり、小豆の果肉の場合にやや近い値を示した。

2.1.5 食物繊維を強化した栄養補助食品の物理的燃烧エネルギー

食物繊維を手軽に補給できる補助食品として市販されている食物繊維含有量の多い栄養補助食品²³⁾を対象とし、表示されている成分値から食物繊維の分を除いて計算した物理的燃烧エネルギーと燃烧式カロリーメーターで測定したエネルギーとの差を求

めた。この値は各栄養補助食品の食物繊維の物理的燃烧エネルギーに相当する。さらに、これを含有する食物繊維量で割って単位重量当たりの物理的燃烧エネルギーを求めた。

栄養補助食品には生理的燃烧エネルギーの値が表示されており、この値には食物繊維を第1群から第3群に分けて計算して加えていると思われる。本実験では物理的燃烧エネルギーとして求めており、また、食物繊維については除外していることから、表5の値は商品に表示されているエネルギー値とは異なっている。

今回測定に供した食物繊維を強化した栄養補助食品は11個で、これらに表示されている成分値とタンパク質などの栄養成分から計算した物理的燃烧エネルギーおよび燃烧式カロリーメーターで測定したエネルギーを表5に示した。

対象とした栄養補助食品の中で最も食物繊維量が多かったのは「ダイエタリーファイバー顆粒」（81.8 g/100 g）（オリヒロ株式会社）、「イージーファイバー」（80.6 g/100 g）（小林製薬EF株式会社）、「食物繊維パウダー」（80.6 g/100 g）（イオン株式会社）であり、これらの場合、成分値から求めた食物繊維以外の物理的燃烧エネルギーはそれぞれ、3.7 kcal/100 g、65.6 kcal/100 gおよび57.4 kcal/100 gであった。これに対して燃烧式カロリーメーターによる測定値はそれぞれ390.4 kcal/100 g、390.4 kcal/100 gおよび389.7 kcal/100 gであった。これらの差から単位食物繊維量当たりの物理的燃烧エネルギーを求めると、それぞれ4.73 kcal/g、4.03 kcal/gおよび4.12 kcal/gとなった。

次に、食物繊維量が多かったのが「グルコケア」（大正製薬株式会社）の73.5 g/100 gであり、食物繊維以外の成分値から求めた物理的燃烧エネルギー値が68.3 kcal/100 gであったのに対し、燃烧式カロリーメーターによる測定値は390.0 kcal/100 gであった。これらの差を食物繊維量で割ると4.38 kcal/gとなった。

その次が54.6 g/100 gの「大麦若葉の青汁」（株式会社日本メディックスN2）で食物繊維以外の成分値から求めた物理的燃烧エネルギーは168.7 kcal/100 gで、また、燃烧式カロリーメーターによる測定値は373.9 kcal/100 gであり、これらの差を食物繊維量で割ると3.76 kcal/gとなった。

これらに続くのが「大麦若葉スーパー100」（オリヒロプランデュ株式会社）の48.0 g/100 g、「大地の恵み大麦若葉」（オリヒロプランデュ株式会社）の44.4 g/100 g、「さらりとおいしい大麦若葉」（新日本

表5 食物繊維を強化した栄養補助食品の成分値から求めた物理的燃焼エネルギーの値と燃焼式カロリーメーターによる物理的燃焼エネルギーの測定値との差

商品名	発売元、販売者、製造者	タンパク質 (g/100g)	脂質 (g/100g)	糖質 (g/100g)	3成分から求めた物理的燃焼エネルギー (kcal/100g)	食物繊維 (g/100g)	燃焼式カロリーメーターによる測定値 (kcal/100g)	物理的燃焼エネルギーの差 (kcal/100g)
イーザーファイバー	小林製薬EF(株)	0	0	16	65.6	80.6	390.4	324.8
食物繊維パウダー	イオン(株)	0	0	14	57.4	80.6	389.7	332.3
ダイエタリーファイバー顆粒	オリヒロ(株)	0	0	0.9	3.7	81.8	390.4	386.7
大麦若葉スーパー100	オリヒロプランデュ(株)	23.3	6	14.7	248.6	48	433.1	184.5
ケール粉末100%青汁	山本漢方製薬(株)	20.1	4.9	18.9	237.4	36.4	407.4	170
ケール青汁国内産青汁ゴールド	サプリアート(株)	21.6	6	14.7	239	34.4	381.8	142.8
グルコケア	大正製薬(株)	1.2	0	15	68.3	73.5	390	321.7
ぬか玄	(株)杉食	11.7	18.9	38.6	403	19.5	493.1	90.1
さらりとおいしい大麦若葉	新日本漢方(株)	26.3	6.3	11	253.2	44.3	437.1	183.9
大麦若葉の青汁	(株)日本メテックスN2	11.3	2.3	20.3	168.7	54.6	373.9	205.2
大地の恵み 大麦若葉	オリヒロプランデュ(株)	28.1	6.4	10.5	262.3	44.4	431.7	169.4

漢方株式会社)44.3 g/100 g であり、これらの食物繊維以外の成分値から求めた物理的燃焼エネルギー値はそれぞれ 248.6 kcal/100 g, 262.3kcal/100 g および 253.2 kcal/100 g であった。一方、燃焼式カロリーメーターによる測定値はそれぞれ 433.1 kcal/100 g, 431.7kcal/100 g および 437.1 kcal/100 g であった。これらの差を食物繊維量で割ると、それぞれ 3.84 kcal/g, 3.82kcal/g および 4.15 kcal/g となった。

また、「ケール粉末 100%青汁」(山本漢方製薬株式会社) および「ケール青汁国内産青汁ゴールド」(サプリアート株式会社) の食物繊維量はそれぞれ 36.4 g/100 g, 34.4 g/100 g であり、食物繊維以外の成分値から求めた物理的燃焼エネルギー値はそれぞれ 237.4 kcal/100 g, 239.0kcal/100 g であった。これらに対して燃焼式カロリーメーターによる測定値が 407.4 kcal/100 g および 381.8 kcal/100 g であり、これらの差をそれぞれの食物繊維量で割るとそれぞれ 4.67 kcal/g および 4.15 kcal/g となった。

食物繊維量が最も少なかったのは「ぬか玄」(株式会社杉食) の 19.5 g/100 g であり、食物繊維以外の成分値から求めた物理的燃焼エネルギー値は 403.0 kcal/100 g であった。一方、燃焼式カロリーメーターによる測定値は 493.1 kcal/100 g であり、これらの差が食物繊維の物理的燃焼エネルギーであるこ

とから、食物繊維の単位重量当たりの物理的燃焼エネルギーを求めると 4.62 kcal/g となった。

食物繊維の単位重量当たりの物理的燃焼エネルギーについてはややばらつきが認められるがほぼ 4 kcal/g 台であった。

2.2 食物繊維量と物理的燃焼エネルギーの差との関係

2.1 で示したように、食物繊維の単位重量当たりの物理的燃焼エネルギーが野菜類での値と栄養補助食品での値にやや差が認められた。そこで、表6に示した食物繊維量および燃焼式カロリーメーターの測定値から食物繊維以外の成分から求めた物理的燃焼エネルギーを引いて求めた値を直線回帰(図2)し、この傾きから食物繊維の単位重量当たりの物理的燃焼エネルギーを求めた。

なお、食物繊維を含まないものではこの物理的燃焼エネルギーの差はなくなるはずである。そこで、これを確かめるために脱脂粉乳の成分値から求めた物理的燃焼エネルギーと燃焼式カロリーメーターによって測定した燃焼エネルギーを求めたところ、それぞれ 394.5 kcal/100 g および 394.6 kcal/100 g とほぼ同値となることを確認した。

この値を含めて直線回帰を行った結果、食物繊維量 (X) と燃焼エネルギーとの差 (Y) との関係は

表6 燃焼式カロリーメーターで測定されたエネルギーの値と3成分から求めた物理的燃焼エネルギーの値との差

品名	食物繊維量 (g/100g)	燃焼式カロリーメーターによる測定値と3成分から求めた物理的燃焼エネルギーとの差 (食物繊維のエネルギーに相当) (kcal/100g)
カボチャ (栗ゆたか) (果肉)	3.3	9.5
カボチャ (栗ゆたか) (ワタ)	2.1	5.7
カボチャ (栗ゆたか) (種)	25.9	78.4
ペポカボチャ (果肉)	2.1	8.1
ペポカボチャ (種)	7	24.6
メロン (夕張) (果肉)	1.4	4.9
メロン (夕張) (ワタ)	0.8	2.4
メロン (種)	24.6	106.7
小豆 (全粒)	21.9	86.5
小豆 (果肉)	3.3	14
小豆 (皮)	9.8	40.5
イージーファイバー	80.6	324.8
食物繊維パウダー	80.6	332.3
ダイエットファイバー	81.8	386.7
大麦若葉スーパー100	48	184.5
ケール粉末100%青汁	36.4	170
ケール青汁国内産青汁ゴールド	34.4	142.8
グルコケア	73.5	321.7
ぬか玄	19.5	90.1
さらりとおいしい大麦青汁	44.3	183.9
大麦若葉の青汁	54.6	205.2
大地の恵み大麦若葉	44.4	169.4

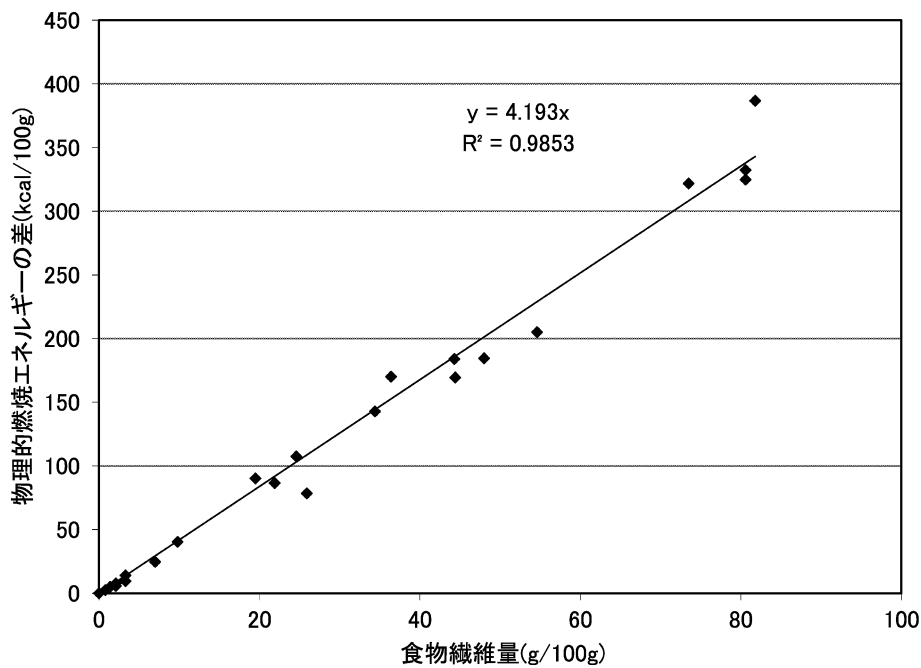


図2 食物繊維量と物理的燃焼エネルギーの差との関係

$Y=4.193 X$ (相関係数 0.9853) で表されることが分かった。

この式の傾きである 4.193 は単位重量当たりの食物繊維の物理的燃焼エネルギー (kcal/g) を示している。したがって、燃焼式カロリーメーターで物理的燃焼エネルギーを測定し、さらに食物繊維量のみを化学的に測定して、上式からその物理的燃焼エネルギーを求めれば、それらの差がタンパク質などの物理的燃焼エネルギーの値となる。

このようにタンパク質などの栄養成分の物理的燃焼エネルギーの推算が容易になる。

2.3 カロリーゼロ甘味料の物理的燃焼エネルギー

低カロリー食品やカロリーゼロ食品に使用されている甘味料のエネルギーを燃焼式カロリーメーターで測定した。ここでは炭水化物の難消化性糖質第 3 群に分類され²⁴⁾、生理的燃焼エネルギー換算係数では 0 kcal/g のエリスリトールとスクラロースを試料として用いた。

(1) エリスリトール (三菱化学フーズ㈱)

エリスリトール²⁵⁾は糖アルコールの一種で、白ブドウや梨などの果実、キノコ、ワイン、醤油、味噌などの発酵食品に含まれる天然の糖質で、工業的にはブドウ糖を発酵して製造される。甘味度はショ糖の 75% であり、我々がエネルギーとして利用できないカロリーゼロの甘味料である。

これは摂取したエリスリトールの大部分が小腸で吸収された後、生体内で代謝されずに 90% 以上が尿中に排泄され、残りは未変化のまま糞便中に排泄されるか、腸内細菌により発酵されるためである。

試料としたエリスリトールは水分が 0.95 g/100 g であり、燃焼式カロリーメーターで測定したエネルギーは 263.0 kcal/100 g であった。しかし、我々がエネルギーとして吸収できないことから栄養分としては 0 kcal/100 g である。

(2) スクラロース (三栄源エフ・エフ・アイ㈱)

ショ糖の 3 つの水酸基を選択的に塩素原子に置き換えることによって生成されたものである。甘味度はスクロース(ショ糖)²⁶⁾²⁷⁾の 600 倍で、後味が少なく、また、酸、熱に安定で消化されないという特徴がある。この最大使用量は生菓子および菓子で 1.8 g/kg、ジャムで 1.0 g/kg、酒・清涼飲料水などでは 0.40 g/kg、また、砂糖代替食品で 12 g/kg、その他の食品 0.58 g/kg である。ただし、特別用途表示の許可または承認を受けた場合は、この限りではないとされている²⁸⁾。

試料としたスクラロースは水分が 0.38 g/100 g であり、燃焼式カロリーメーターで測定したエネルギーは 225.7 kcal/100 g であった。しかし、エリスリトールと同様に我々が生理的燃焼エネルギーとして活用できないことから栄養分としては 0 kcal/100 g である²⁸⁾。

これらの結果から燃焼式カロリーメーターでの測定では我々がエネルギーとして活用できない難消化性糖質の第 3 群に分類されるカロリーゼロの甘味料であっても高い物理的燃焼エネルギーを示すことが分かる²⁹⁾。

この甘味料を含む食品では前述した式から求めた食物繊維のエネルギーを引いて求めた物理的燃焼エネルギーの値の中にこのエネルギーが含まれるため、タンパク質などの栄養成分のみの物理的燃焼エネルギーにはならない。したがって、このような甘味料を含む食品ではこれに含まれる甘味料分の物理的燃焼エネルギーをあらかじめ引いておかなければならない。

2.4 低カロリーコロッケ開発への燃焼式カロリーメーターの利用

健康志向がますます高まる中、低カロリー商品が好まれ、油で揚げられる高カロリー商品であるコロッケが嫌われる傾向にある。これはコロッケのみでなく、油分の多いものについては同様の傾向にある。

このコロッケのカロリーの低下、すなわちエネルギーを減少させるため、バッタ液やパン粉の改良によって吸着される油分を減らすなどの方法が試みられている。特に、油の吸着量の少ないパン粉の開発に関する研究や特許は多い³⁰⁾³¹⁾。

このような研究の際、この実験の効果を評価するのにこの燃焼式カロリーメーターの利用が可能である。すなわち、各種条件で作ったコロッケの油調前後のエネルギーを燃焼式カロリーメーターで測定し、さらにコロッケ重量および水分を測定することによって吸油量の抑制効果および水の置換状態の評価が容易になるはずである。

そこで、株式会社新サカイヤフーズの商品である男爵(牛肉入り)コロッケ、カボチャコロッケおよびホタテクリームコロッケの油調前後での物理的燃焼エネルギーを測定した。それらの結果を表 7 に示す。

男爵(牛肉入り)コロッケを油で揚げる前の水分が 66.1 g/100 g であり、および物理的燃焼エネルギーが 153.3 kcal/100 g であった。揚げた後では水

表7 コロッケの物理的燃焼エネルギーおよび水分含量

	油調前のエネルギー (kcal/100g) (水分含量 (%))	油調後のエネルギー (kcal/100g) (水分含量 (%))
男爵 (牛肉入り) コロッケ	153.3 (66.1)	316.8 (47.5)
カボチャコロッケ	155.3 (63.1)	313.7 (45.3)
ホタテクリームコロッケ	170.4 (67.0)	287.8 (53.5)

分が47.5 g/100 gとなり、エネルギーは316.8 kcal/100 gになった。この物理的燃焼エネルギーの上昇は油で揚げることによって油がコロッケの中種中に侵入すると同時に中種中の水が排出されたことおよびパン粉が吸油したことによる。

また、カボチャコロッケについても油調前後で水分が63.1 g/100 gから45.3 g/100 gに低下し、物理的燃焼エネルギーが155.3 kcal/100 gから313.7 kcal/100 gに上昇しているのが、およびホタテクリームコロッケでは油調前後で水分が67.0 g/100 gから53.5 g/100 gに低下し、物理的燃焼エネルギーが170.4 kcal/100 gから287.8 kcal/100 gに上昇しているのが認められた。

このように燃焼式カロリーメーターでは短時間で物理的燃焼エネルギーの測定ができること、また、水分もハロゲン加熱式水分計などによって短時間で測定できることから、これらの測定のみで試作品のエネルギーの評価が可能となる。例えば、パン粉の改良などで吸油量の抑制をはかる目的の実験などにおいては物理的燃焼エネルギーの量でその効果が判定できることから開発効率は向上するものと考えられる。

おわりに

我々が食品を摂取し、活用できるエネルギーについては化学的に分析した値から計算して求めている。この基本となるエネルギーの値は燃焼式カロリーメーターで測定して求めた値である。この方法で測定した三大栄養素の物理的燃焼エネルギーは糖質が4.10 kcal/g、脂質が9.45 kcal/g、およびタンパク質が5.65 kcal/gである。しかし、我々はこの燃焼式カロリーメーターで測定される食品のエネルギー、すなわち食品中の成分のすべてのエネルギーを吸収し、生命活動に必要な熱量として利用できない。

特に食物繊維の多くはエネルギーとして吸収されないか、または吸収率が低いことから、生命活動に

おけるエネルギーとしては重視されていないが、燃焼式カロリーメーターによる測定値としては大きな値を示す。このため、生命活動に使用されているタンパク質などの物理的燃焼エネルギーを求めるには化学的に成分分析を行う必要がある。

そこで、食物繊維を含有する栄養補助食品の表示およびカボチャなどの食物繊維を多く含む食品の成分を化学的に分析すると共に燃焼式カロリーメーターで物理的燃焼エネルギーを測定した値からタンパク質などの生命活動に利用される成分の値を基に計算した物理的燃焼エネルギーを引いた値と食物繊維量との関係を求めた。それらの関係を直線回帰した結果、物理的燃焼エネルギーの差 (Y) と食物繊維量 (X) との関係は $Y=4.193 X$ (相関係数 0.9853) で表された。

したがって、食品の食物繊維量のみを化学的に分析し、燃焼式カロリーメーターで測定したエネルギーから、この式で求めた食物繊維の物理的燃焼エネルギーを引けば生命活動に利用されるタンパク質などの物理的燃焼エネルギーが容易に求められることになる。

さらに、燃焼式カロリーメーターでは短時間で物理的燃焼エネルギーの測定ができること、また水分についてもハロゲン加熱式水分計などで測定できることから、これらの測定のみで試作品のエネルギーの評価が可能となる。例えば、コロッケの開発などにおいてパン粉の改良で吸油量の抑制をはかる場合、物理的燃焼エネルギーを測定し、その値から効果の判定が容易になることから、その開発速度は向上するものと考えられる。

このように燃焼式カロリーメーターの用途は幅広いといえる。

謝 辞

この研究の一部は田中製餡株式会社の受託研究として実施いたしました。ここに田中製餡株式会社の関係各位に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 豊沢功, 能岡浄, 安倍史子, 「身近な食品学」, pp. 21-22, p. 58, 化学同人 (2005).
- 2) M. Ognean, Neli Darie and Claudia Felicia Ognean, Studies about obtaining Low calorie and high fiber content bakery product using wheat bran, Acta Universitatis Cibiniensis, Seria F Chemia, 9, 1, pp. 55-66, 9 (2006).
- 3) Corby K. Martin, Partick M. O'Neil and Laura Pawlow, Changes in food cravings during low-calorie and very-low-calorie diets, Obesity, 14, pp. 115-121 (2006).
- 4) David Lansky, Ph. D., and Kelly D. Brownell, Ph. D., Estimates of food quantity and calories: Errors in self-report among obese patients, The American Journal of Clinical Nutrition 35, April, pp. 727-732 (1982).
- 5) Laboratory Exercise, Burning, Calories, The Energy in Food, pp. 1-6, BISC150, Fall (2004).
- 6) Atwater W.O. and Snell J.F., Description of bomb-calorimeter and method of its use, The Journal of The American Chemical Society, 25, 7, pp. 659-699 (1903).
- 7) Parr Instrument Company, Calorimeter Applications, Tech Note. No. 104, pp. 1-7 (2006).
- 8) <http://www.sportsci.org/news/history/atwater/atwater.html>, Frank I. Katch Wilbur Olin Atwater.
- 9) Leonard A. Maynard, Wilbur O. Atwater; -A Biographical Sketch (May 3, 1844-October 6, 1907), Journal of Nutrition, 78, pp. 1-9 (1962).
- 10) William H. Chambers, Max Ruber, Journal of Nutrition, 48, pp. 1-12 (1952).
- 11) Atwater W.O., Rosa E.B. A new respiration calorimeter and experiments on the conservation of energy in the human body, Physical Review (Series I), 9, (3), pp. 129-163.
- 12) Atwater W.O., Rosa E.B., A new respiration calorimeter and experiments on the conservation of energy in the human body, II, Physical Review (Series I), 9, (4), pp. 214-251.
- 13) 廣田才之, 有賀豊彦, 鈴木たね子, 伊藤靖子, 辻悦子, 小畠義樹, 伊藤順子, 日高敏郎編, 「栄養学総論 改訂版」, p. 185, 共立出版 (2000).
- 14) 日本分析センター, JFRL ニュース, No. 35, 食品の熱量 (エネルギー) について~エネルギー換算係数の話~ (2003年7月).
- 15) 吉田勉編著, 笠原利英, 藤森泰, 堀坂宣弘, 川端博秋, 菊地恵一郎, 布施真理子, 「栄養学, 生物的アプローチ」, pp. 21-22, 学文社 (2000).
- 16) 杉本悦郎, 「栄養学総論」, pp. 142-142, 光世館 (2000).
- 17) 林寛, 「栄養学総論」, pp. 209-210, 三共出版 (1996).
- 18) 廣田才之, 有賀豊彦, 鈴木たね子, 伊藤靖子, 辻悦子, 小畠義樹, 伊藤順子, 日高敏郎編, 「栄養学総論」, p. 184, 共立出版 (2000).
- 19) 高宮和彦編, 「シリーズ (食品の科学) 野菜の科学」, p. 18, 朝倉書店 (1993).
- 20) 曾我部仁史, 寺戸隆, 医学と薬学, 薬用ペポカボチャ種子抽出エキスおよび大豆胚芽抽出エキスの混合加工食品の夜間頻尿に対する一般臨床試験, 46, 5, 727 (2001年11月).
- 21) 「食材図典Ⅲ 地産食材編」, p. 122, 小学館 (2008).
- 22) 栄養機能化学研究科会編, 「栄養機能化学 (2版)」, p. 141-145, 朝倉書店 (2005).
- 23) 大濱宏文, 池田秀子, 松井静子, 「サプリメント (栄養補助食品) ガイドブック」, pp. 250-255, CMP ジャパン (2003).
- 24) 日本分析センター, JFRL ニュース, No. 35, 食品の熱量 (エネルギー) について~エネルギー換算係数~ (2003年7月).
- 25) 内田実, 食品と容器, エリスリトールの特性と用途開発, Vol. 50, No. 6, 330 (2009).
- 26) 五十嵐脩, 小林彰夫, 田村真八郎, 「丸善食品総合事典」, p. 144, 丸善 (1998).
- 27) 芳伸幸治, 竹村優子, 月刊フードケミカル, 9, 29 (2008).
- 28) 厚生省告示第 370 号, 食品・添加物等の規格基準.
- 29) 日本分析センター, JFRL ニュース, No. 13, 食品の熱量 (エネルギー) について~糖質とエネルギー~ (2000年4月).
- 30) 平岡芳信, 逢坂江理, 開俊夫, 原田浩, 辻田純二, 吸油率の少ないパン粉の開発 (第1報) コンニャクの利用, 愛媛県工業系研究報告, 46, 51 (2008).
- 31) 特開 2002-78443, 吸油抑制能及び油脂代替能を有する食品添加材及びそれを含有する食品.

Abstract

Energy value notations on food products are becoming increasingly prevalent. Food energy is calculated using the nutrient composition determined by chemical analyses of food products and handbook physical heat of combustion values that have been determined by combustion calorimetry. The standard heat of combustion values of sugars, protein and fats are 4.1, 5.65 and 9.45 kcal/g, respectively; however, not all of this energy is bioavailable to humans. Atwater determined the respective ratios of available energy for sugar, protein and fat and proposed food energy values of 4, 4 and 9 kcal/g, respectively. In the present study, we determined the non-fiber food energy.

We determined the food energy of foods (squash, melon, adzuki beans, and nutritional supplements) that are largely comprised of fiber using a combustion calorimeter and subtracted the food energy derived from non-fiber food components to obtain the heat of combustion of fiber, which is poorly absorbed.

We developed the following formula for the heat of combustion of fiber (kcal/g): $4.193 \times \text{fiber content (g)}$. The relationship between heat of combustion of fiber determined experimentally and by this formula was linear with a correlation coefficient of 0.9853. The available food energy of proteins and other food components is equal to the heat of combustion of the food product minus the heat of combustion of fiber calculated by this formula. In this way, the food energy of protein and other food components can be calculated after chemically determining the dietary fiber content.

The development of combustion calorimeters with rapid determination capabilities will prove advantageous for food product development. For example, measurements of food energy made before and after deep-frying for the development of a low-calorie croquette would improve product development efficiency. Thus, combustion calorimetry plays an important role in food product development.