

ルミナコイド素材のエネルギー評価の考え方とセロビオースならびに ヒドロキシプロピルメチルセルロースのエネルギー評価結果

一般社団法人日本食物繊維学会 ルミナコイド素材エネルギー評価検討委員会

- 委員長 奥 恒行（十文字学園女子大学 客員教授、長崎県立大学 名誉教授）
委員 青江誠一郎（大妻女子大学 教授）
委員 金谷建一郎（横浜薬科大学 講師、前・日本食品分析センター）
委員 倉沢 新一（関東学院大学 教授）
委員 真田 宏夫（千葉大学 名誉教授）
委員 山田 和彦（女子栄養大学 教授）

1. はじめに

保健機能食品制度が施行された平成 14 年以前に開発された難消化吸収性のオリゴ糖、糖アルコールについては、栄養表示に使用するために暫定的なエネルギー換算係数が定められている。また、主な食物繊維素材のエネルギー換算係数には、日本食物繊維学会が暫定的に評価した結果が厚生労働省から平成 15 年に提示され、現在に至っている。しかしながら、その後に開発された食物繊維を含めた難消化吸収性糖質素材は加工食品へ使用されているにも拘わらず、エネルギー評価がされない状態で放置されている。難消化吸収性糖質の公的なエネルギー評価法や制度が確立されていない所以である。

一般社団法人日本食物繊維学会は、本学会の賛助会員からの強い要望に応えるために、学会内にルミナコイド素材^{*)} エネルギー評価委員会を常設し、新しく開発されたルミナコイド素材のエネルギー評価をすることとした。これは、日本食物繊維学会が、平成 15 年に厚生労働省が提示した食物繊維素材のエネルギー換算係数の策定作業を行った実績を踏まえてのことである(1)。本稿では、現在までの知見に基づく難消化吸収性糖質のエネルギー評価の考え方を提示し、エネルギー評価を申請されたルミナコイド 2 素材、セロビオースならびにヒドロキシプロピルメチルセルロースについてエネルギー評価した結果を提示する。

なお、平成 15 年に厚生労働省が提示した主な食物繊維素材のエネルギー換算係数のエネルギー評価法と、平成 23 年以降のエネルギー評価法が若干異なることを認識する必要がある。すなわち、平成 15 年の食物繊維素材のエネルギー換算係数は、素材に含まれる食物繊維のみについてエネルギー評価をし、混在する消化吸収性糖質やタンパク質などに由来するエネルギー量は除外している。平成 23 年以降のエネルギー評価においては、これらを含めた素材そのものの総エネルギー量を示している。

^{*)}；ルミナコイド (luminacoid) は、日本食物繊維学会が提唱した食物繊維に代わる新しい概念で、「ヒトの小腸内で消化・吸収されにくく、消化管を介して健康の維持に役立つ生理作用を発現する食物成分」のことを意味する(2)。したがって、ルミナコイドは、食物繊維の定義からはみ出す難消化吸収性の単糖、オリゴ糖、糖アルコール、レジスタントスターチ、レジスタントプロテインなども包括する。

2. 難消化吸収性糖質のエネルギー評価の背景と目的

平成 12 年 11 月、五訂日本食品標準成分表の公表に伴って、栄養改善法（現・健康増進法）における「栄養表示基準等の取り扱いについて」の一部改正が行われ、平成 15 年 4 月 1 日から表示すべき栄養成分のうち「糖質」を「炭水化物」とすることとなった。このため、平成 15 年 2 月、炭水化物に含まれる食物繊維についてのエネルギー換算係数が厚生労働省より提示された。この食物繊維のエネルギー換算係数は、厚生科学研究；「特定保健用食材の安全性及び有用性に関する研究」（主任研究者：池上幸江）の助成を受けて(3)、日本食物繊維学会が中心になって評価・策定した。

当初、わが国の栄養表示基準におけるエネルギーについては、炭水化物から食物繊維や難消化性オリゴ糖・糖アルコールを除いた量に 4 kcal/g を乗じ、食物繊維は 0 kcal/g、難消化性オリゴ糖や糖アルコールはそれぞれのエネルギー換算係数を乗じ、これらの総和を炭水化物のエネルギー量としていた。しかし、食物繊維や難消化性オリゴ糖・糖アルコール含量が少なく、総エネルギー量への影響が少ない加工食品については、炭水化物量へ直接 4 kcal/g を乗じてエネルギー量としてもよいとしていた。ところが、五訂日本食品標準成分表が公表されたときに炭水化物の取り扱いが変更になり、食物繊維のエネルギー量を暫定的に 4 kcal/g として取り扱うこととしたために、特別用途食品に位置づけられている低カロリー食品などの創製が困難になるなどして食品業界に混乱をもたらすこととなった。食物繊維の公的なエネルギー評価法が確立されていなかった所以である。

平成 12 年 11 月に公表された五訂日本食品標準成分表では、四訂食品標準成分表に収載している成分値の項目を大幅に増加し、炭水化物の扱いが大きく変更された。四訂食品標準成分表までは「炭水化物」を「糖質」と「繊維素」に分けて成分値を載せていたが(4)、五訂食品標準成分表では食物繊維研究成果を受け入れて食物繊維の成分値項目が別につくられ、水溶性、不溶性、総食物繊維の成分値を掲載することとなった。これに伴って、「繊維素」は削除された。五訂食品成分表の「炭水化物」の取り扱いの変更を受けて、栄養表示基準の規定により表示すべき栄養成分のうち「糖質」を「炭水化物」にすることとなった(5)。このため、従来の炭水化物のエネルギー算定法に矛盾が生じてきた。

五訂食品標準成分表の公表後から平成 15 年 3 月末までは、炭水化物のエネルギーを算出するにあたっては「糖質」に食物繊維を加えた量を「炭水化物」の量とし、これにエネルギー換算係数 4 kcal/g を乗じて求めることとしていた（難消化性糖質含量の多い一部の食品についてはアトウオーター係数によるエネルギー値に 0.5 を乗じて算出）。この暫定的エネルギー評価法では食物繊維のエネルギー量は 4 kcal/g となるので、以前の栄養表示基準に比べて食品のエネルギー量は多くなり、ある商品については商品開発のコンセプトが維持できなくなるなどの混乱を招いた。改正された栄養表示基準では、必要に応じて「炭水化物」を「糖質」と「食物繊維」に分け、それぞれのエネルギー量を算出することとしたために、食物繊維のエネルギー換算係数を設定する必要が生じた。

3. 食物繊維を含めた難消化吸収性糖質の代謝的特徴

食物繊維を含む難消化吸収性糖質の代謝経路は、図1に示すように腸内細菌を介して利用されることが特徴である(6)。経口的に摂取した食物繊維は消化されないので小腸を通り抜けて大腸に到達し、腸内細菌による発酵を受けて酢酸、プロピオン酸、酪酸などの短鎖脂肪酸の他、炭酸ガス、水素ガス、メタンガスなどに代謝される。これらのうち短鎖脂肪酸が大腸から吸収され、肝臓や筋肉などの臓器においてさらに代謝されてエネルギーを産生する。消化されない、あるいは吸収されないオリゴ糖や単糖は食物繊維と同様に小腸を通り抜けて大腸に到達し、腸内細菌による発酵を受ける。難消化性であるフラクトオリゴ糖は発酵過程で炭酸ガスやメタンガスなどに代謝されるほか、菌体成分としても利用されるので、有効エネルギー量は消化吸収性糖質に比べて少なくなる。腸内細菌による発酵を受けない糖質は糞塊成分となって体外へ排泄されるのでエネルギー産生には寄与しない。

消化・吸収されない食物繊維やオリゴ糖であっても腸内細菌によって短鎖脂肪酸に転換されて宿主に利用されるので、エネルギー源として寄与している。さらに、腸内細菌を介した生体利用は、生成される短鎖脂肪酸量の多寡によって産生するエネルギー量が異なるので、腸内細菌に利用されやすいか、利用されにくいかによって宿主への貢献度が異なる。

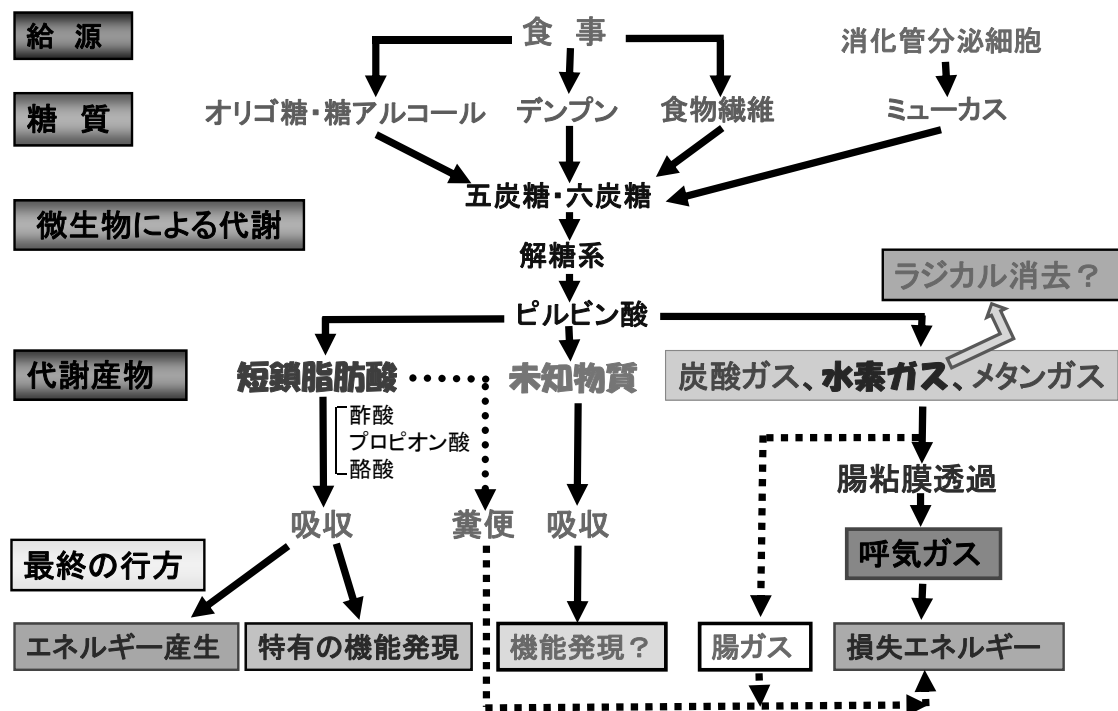


図1. 難消化吸収性糖質の腸内細菌を介した代謝経路

4. 難消化吸収性糖質の有効エネルギー量の変動要因

天然の食物繊維は消化されないが、デンプン分解物や単糖・オリゴ糖などを原料にして人工合成した食物繊維素材は、単糖や消化性オリゴ糖なども含有している(7,8)、エネルギー評価にあたっては何%が消化・吸収されるかを明らかにする必要がある。さらに、近年開発された単糖(希少糖など)の中には小腸から吸収されたもの

が代謝されずに尿へ排泄されるものがある(9,10)。代謝されずに尿中へ排泄される糖質はエネルギー損失になるので、このような糖質については尿中排泄率を明らかにする必要がある。小腸から吸収されてエネルギー産生へ代謝される糖質は 4 kcal/g になり、代謝されずに尿中へ排泄される糖質は 0 kcal/g となる。

一方、難消化吸収性糖質の腸内細菌による発酵性は種類によって異なるので、エネルギー評価をするにあたっては、難消化吸収性糖質の発酵性を明らかにする必要がある。難消化吸収性糖質には、フラクトオリゴ糖のように完全に発酵を受けて糞便へ排泄されないものと、寒天のようにほとんど腸内細菌による発酵を受けないもの、その中間的なものがある(11)。フラクトオリゴ糖のように、完全に発酵を受けて利用される難消化吸収性糖質のエネルギー量は 2 kcal/g で、発酵を受けない難消化吸収性糖質は短鎖脂肪酸を生成しないのでエネルギー量は 0 kcal/g となる(11)。大腸に到達して腸内細菌による発酵を受けずに糞便へ排泄される糖質については糞便排泄率を明らかにする必要がある。糞便に排泄される部分のエネルギー量は 0 kcal/g となる。

問題は中間的な発酵を受ける食物繊維のような食物成分の扱いである。特に、海藻由来の食物繊維は、アルギン酸を例にとりて考えると理解できるように、腸内細菌による発酵をきわめて受けにくい。しかし、部分加水分解をして分子量を小さくすると溶解性を増すと同時に発酵性も増大する。また、水溶性食物繊維であっても高分子のものは発酵性の低いものがある。したがって、難消化吸収性糖質素材のエネルギー評価をするためには、その発酵性を明らかにすることが必須条件となる。

例えば、50% が消化吸収されて利用され、50% が大腸に到達して完全に発酵される糖質の有効エネルギー量は、 $4 \text{ kcal/g} \times 0.5 + 2 \text{ kcal/g} \times 0.5 = 3 \text{ kcal/g}$ となる。フラクトオリゴ糖のような消化されないオリゴ糖は 100%大腸に到達して完全に発酵を受けるので、有効エネルギー量は $2 \text{ kcal/g} \times 1.0 = 2 \text{ kcal/g}$ となる(11)。健康増進法における加工食品の栄養成分表示のエネルギー計算には、このような考え方に基づいて算出された単糖、オリゴ糖、糖アルコールのエネルギー換算係数が用いられている(12)。

5. 難消化吸収性糖質素材のエネルギー評価の基本的な考え方

以上、述べたような問題を考慮して、難消化吸収性糖質素材のエネルギー評価を次のように行うこととした。高分子の食物繊維は他の栄養素の消化吸収を阻害するために、全体としてはエネルギー量を減らすように作用する。しかし、1回に摂取する食物繊維量は少ないので、1日のエネルギー摂取量に及ぼす影響は微々たるものとして、当委員会のエネルギー評価においてはこれを無視することとした。

なお、エネルギー評価を行う場合の食物繊維定量は、日本食品標準成分表に用いている Prosky 変法や AOAC 公定法に準じて行うことを原則とする(13,14)。また、2010年と 2011年に、改良法が AOAC 公定法 2009.01 および 2011.25 として公表されたので(15,16)、これに準じて定量する必要がある。難消化吸収性オリゴ糖・単糖および糖アルコールの定量法は公表された方法で行う(17)。エネルギー評価の原則は以下の通りとする(11)。

- ① 消化吸収されて代謝される糖質については、4 kcal/g とする。
- ② 消化吸収されて代謝されずに尿中へ排泄される糖質は、0 kcal/g とする。

- ③ 全く消化吸収されず完全に発酵を受ける糖質は、2 kcal/g とする。
- ④ 全く消化吸収されず発酵も受けない糖質（糞便排泄分）は、0 kcal/g とする。
- ⑤ 発酵性が明らかな難消化吸収性糖質については、その発酵率に 2 kcal/g を乗じてエネルギー量を算出し、小数第一位を四捨五入して整数化する。

つまり、天然の食物繊維のような消化吸収されない糖質のエネルギー量はその発酵性によって 0 kcal/g、1 kcal/g および 2 kcal/g のいずれかに振り分ける。また、難消化吸収性糖質の腸内細菌による発酵性は摂取量の多寡によっても影響されるが、1回の摂取量はせいぜい数 g 程度であるので、摂取量の多寡による影響は少ないと考え、無視することとした。以上の考えに基づいた評価手順を整理して当てはめると図 2 のようになる。

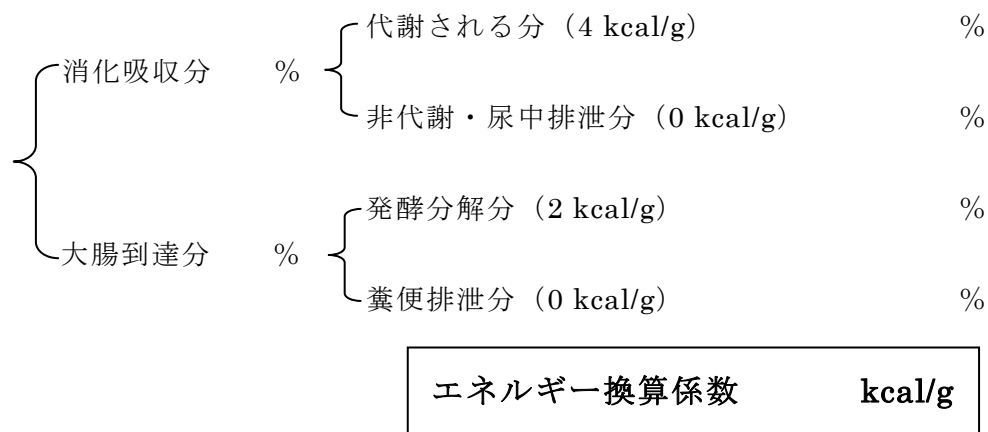


図 2. ルミナコイド素材エネルギー評価にあたっての区分け

6. ルミナコイド素材のエネルギー評価の対象成分について

市販されているルミナコイド素材には、天然の重合度の大きいもの、部分加水分解したもの、デンプンやデキストリンやその分解物を特殊な方法で加工・重合した比較的小分子のものなどがある。特殊な方法で加工・重合した比較的小分子のルミナコイド素材には、単糖、二糖、オリゴ糖などの消化吸収性糖質を多少なりとも含んだものがほとんどである。このため、食物繊維定量法 (AOAC 2001.03) である酵素-重量法では(15)、これらの低分子の単糖やオリゴ糖はエタノール沈殿しないので食物繊維として定量されない。したがって、食物繊維定量法の変法である酵素-HPLC 法を組み合わせて測定しなければならない(15)。

平成 15 年 2 月に公表された暫定的な食物繊維エネルギー換算係数に関しては、消化されない成分のみについてエネルギー評価し、混在する消化吸収性の単糖やオリゴ糖ならびに消化性のタンパク質や脂質はエネルギー評価の対象から除外することとし、評価しなかった。これらの成分は食品成分分析において、消化吸収性の糖質・脂質・タンパク質として定量されるからである。しかし、このことを理解している人は少なく、表に示された数値を鵜呑みにする者が少なくなかった。表記法が明確でなかったために第三者に誤解されやすいことも事実であった。

一方、近年、開発が盛んである希少糖については、体内動態が複雑なために従来の

評価方法では対応できなくなった。このことを配慮して、第1回目（平成23年）、第2回目（平成24年）ならびに今回の第3回目（平成25年）のエネルギー評価においては、素材そのものについてのエネルギー量を算定することとした(18,19)。このため、これらのルミナコイド素材を使用した加工食品のエネルギー量は、定量した加工食品中の食物繊維量を元に添加した素材量を計算してエネルギー換算係数を乗じて算出することになるので、エネルギー量算出が従来よりも煩雑になる。また、難消化吸収性の単糖、オリゴ糖、糖アルコールなどについては、加工食品中に存在する量が酵素-HPLC法で定量できるので、それぞれのエネルギー換算係数を乗じることによって総エネルギー量を算出できる。このため、新しいエネルギー評価法では、それぞれの素材そのものについてのエネルギー換算係数を求めることとした。

上記に示した新しい考え方によって難消化吸収性糖質のエネルギー評価をするためには、難消化吸収性糖質素材の成分組成を明確にするとともに、それに含まれる難消化吸収性糖質についての発酵性を明らかにする必要がある。発酵性はその難消化吸収性糖質から生成される短鎖脂肪酸量を推算する根拠となるからである。また、吸収されて代謝されずにそのまま尿中へ排泄される単糖については、その排泄率を測定する必要がある。例えば、複雑な組成のポリデキストロースは、消化吸収される単糖やオリゴ糖は約25%、発酵される難消化性オリゴ糖は約20%、発酵分解を受けない多糖は約55%などから成っている(7,20)。したがって、ポリデキストロースを使用した加工食品の食物繊維を定量すると、食物繊維としては75%が分画・定量できる。栄養成分表示では、ポリデキストロースを用いた加工食品のエネルギー量を表示するために、食物繊維定量法で測定できた量から原材料のポリデキストロース量を換算し、これにポリデキストロースのエネルギー換算係数1 kcal/gを乗じて求めることになる。

7. セロビオースおよびヒドロキシプロピルメチルセルロースのエネルギー評価結果

今回のエネルギー評価においては、評価希望のあったルミナコイド素材（難消化吸収性糖質）6種類のうち、評価に必要な資料が整っていると判断された3素材を対象として評価作業を行った。その結果、1素材は評価資料不足のためペンディングとなり、ほとんど消化されないが腸内細菌によって完全に発酵分解されるセロビオースは2 kcal/g、ほとんど消化されず発酵もされないヒドロキシプロピルメチルセルロースは0 kcal/gとなった（表1）。今回、評価対象から外れた素材については評価資料が蓄積されれば、順次評価作業を進める予定である。

表1 セロビオースおよびヒドロキシプロピルメチルセルロースのエネルギー評価結果

素材名	消化吸収 (%)	代謝 (%)	尿中排出 (%)	未吸収 (%)	発酵 (%)	糞排泄 (%)	エネルギー (kcal/g)
セロビオース	0	0	0	100	100	0	2
ヒドロキシプロピルメチルセルロース	0	0	0	100	0	100	0

8. おわりに

本稿では、わが国における難消化吸収性糖質（食物繊維、オリゴ糖、糖アルコールなど）のエネルギー評価の背景と経緯を示すと共に、当ルミナコイド素材エネルギー評価検討委員会のエネルギー評価の考え方と方法を紹介し、その評価法に従ってルミナコイド 2 素材のエネルギー評価をした。これまでにエネルギー評価したルミナコイド素材は 8 種類になる。今後もエネルギー評価を希望する素材があれば対応する積りである。なお、評価結果は消費者庁へ報告し、栄養表示に活用するよう要望して行く所存である。

9. 引用文献

- 1) 奥 恒行、山田和彦、金谷建一郎：各種食物繊維素材のエネルギーの推算値。日本食物繊維学会誌、6; 81-86(2002).
- 2) 桐山修八、池上幸江、印南 敏、海老原 清、片山洋子、竹内文久：日本における Dietary fiber の定義・用語・分類をめぐる論議と包括的用语の提案まで。日本食物繊維学会誌、7; 39-49(2003).
- 3) 厚生科学研究：生活安全総合研究「特定保健用食材の安全性及び有用性に関する研究（主任研究者；池上幸江）、平成 13 年度分担研究報告書。
- 4) 科学技術庁資源調査会：四訂日本食品標準成分表(1982).
- 5) 科学技術庁資源調査会：五訂日本食品標準成分表(2000).
- 6) Oku T, Nakamura S: Digestion, absorption, fermentation, and metabolism of functional sugar substitutes and their available energy. Pure Appl Chem, 74; 1253-1261(2002).
- 7) 奥 恒行、細谷憲政：低エネルギー食品素材ポリデキストロースの生体利用。ファイザー（株）資料(1983).
- 8) 大隈一裕、松田 功、勝田康夫、半野敬夫：澱粉の熱変性と酵素作用—難消化性デキストリンの特性—。澱粉科学、37; 107-114(1990).
- 9) Noda K, Oku T: Metabolism and disposition of erythritol after oral administration to rats. J Nutr, 122; 1266-1272(1992).
- 10) 飯田哲郎、大隈一裕：希少糖（D-プシコースと D-アロース）の生理効果。日本食物繊維学会誌、16; 9-17(2012).
- 11) 中村禎子、奥 恒行：ヒトにおける呼気水素ガス試験による発酵分解評価の有効性とそれに基づく各種食物繊維素材のエネルギー評価の試み。日本食物繊維学会誌、9; 34-46(2005).
- 12) 奥 恒行：難消化吸収性糖質の有効エネルギー量について、栄養学雑誌、54; 143-150(1996).
- 13) Prosky L, Asp NG, Schweizer TF, DeVeries JW, Furda I: Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory study. J Assoc Off Anal Chem, 71; 1017-1026(1988).
- 14) AOAC Official Methods in Official Methods of Analysis of AOAC

- International 17th ED., AOAC International, Gaithersburg (2000).
- 15) McCleary BV, DeVries JW, Rader JI, Cohen G, Prosky L, Mugford DC, Champ M, Okuma K: Determination of total dietary fiber (CODEX definition) by enzymatic-gravimetric method and liquid chromatography: collaborative study. *JAOAC Int*, 93: 221-33(2010).
 - 16) McCleary BV, DeVries JW, Rader JI, Cohen G, Prosky L, Mugford DC, Champ M, Okuma K: Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber (CODEX definition) by enzymatic-gravimetric method and liquid chromatography: collaborative study. *JAOAC Int*, 95: 824-44(2012).
 - 17) Ohkuma K, Matsuda I, Katta Y, Tsuji K. New method for determining total dietary fiber by liquid chromatography. *JAOAC Int*, 83; 1013-1019(2000).
 - 18) 奥 恒行、青江誠一郎、金谷建一郎、倉沢新一、真田宏夫、山田和彦：ルミナコイド（難消化吸収性糖質）素材のエネルギー評価法とエネルギー換算係数についての概要．*ルミナコイド研究*、15; 70-77(2011).
 - 19) 奥 恒行、青江誠一郎、金谷建一郎、倉沢新一、真田宏夫、山田和彦：ルミナコイド素材のエネルギー評価の考え方とメチルセルロース、イヌリン、還元難消化性デキストリンならびに高架橋澱粉のエネルギー評価結果．*ルミナコイド研究*、17; 47-52(2013).
 - 20) Figdor SK, Bianchine JR: Caloric utilization and disposition of [14C]-polydextrose in man. *J Agric Food Chem*, 31; 389-393(1983).

(平成 26 年 3 月 20 日、常務理事会承認)