

食物繊維の機能とエネルギー値

中永 征太郎

ノートルダム清心女子大学

ノートルダム清心女子大学食品栄養学科に長い間お世話になったことから、実験動物を用いた試験研究結果が出来る限りヒトに外挿できることを、常に期待していた。これまでの食物繊維関連の調査研究のうちから、白ネズミを中心にした実験結果をまとめる機会が与えられたことは、まことに有難いことである。

食品あるいは飼料中に含まれる繊維量は栄養効率に関係することから、動物やヒトの食餌管理の際には繊維以外の食餌成分とともに考慮する必要がある。

とくにヒトの場合には食糧事情が好転するにともなって、繊維不足が健康管理上問題視されるようになった。そのために、繊維の疾病予防効果が認められるようになり、四訂日本食品成分表の炭水化物の項に示されていた粗繊維値が五訂日本食品成分表からは項を新たに食物繊維として、その含量が掲載されるようになった。これによりヒトにおいても食物繊維の目標摂取量が示されるようになった。この点では、ヒトの食餌管理は実験動物や家畜の飼養管理に遅れをとったことになる。

I 食物繊維の機能

1) エネルギー密度の調整

食物は可消化成分と難消化成分から構成されている。近年、食生活の洋風化にともなって可消化成分量と難消化成分量の比率、すなわち摂取エネルギー量 (E) / 食物繊維量 (DF) 比が高まる傾向にある。しかし、一方では、DF 摂取量の増加は、可消化成分の利用度を低下させる。

このように、DF の適正な摂取量を設定する際には E 量に対する DF 量をつねに考慮する必要がある。

そこで、食事条件を E/DF 比にもとめ、排便に対する食事の影響を検討した。これにより食事の DF の妥当な量を査定し、食事のエネルギーの利用度をできる限り低下させないで、しかも排便の効果が期待できるような食事条件を、ラットを用いて検索した。

その方法として、供試飼料は DF を含まない

基礎食に、ヘミセルロース、キトサン、アルギン酸、乳果オリゴ糖を含む fiber mixture (FM: 表 1) を添加し、成熟白ネズミに与えた。実験 1 は FM を 1、3、5、10% 基礎食に添加し、等量の基礎食を白ネズミに 4 週間与えた。実験 2 は、脂肪 (5、15、30%) 含量と同時に FM (1、5、10、15%) 含量の異なる飼料を配合し白ネズミに 9 日間与えた。

全糞採取法により消化試験を行い、食餌と糞便の熱量を測定し、各食餌の可消化エネルギー (E) をもとめた。一方、FM 中の DF を分析した。また、排便と糞便の形状の実態を捉えるため、胃腸通過時間と糞便の 100 粒重量を調査した。

その結果、FM の添加量の増加は糞便へのエネルギー損失度を増し、実験 1 における食餌中の E 含量は 460kcal/100g から 419kcal/100g、実験 2 の E 含量は 544kcal/100g から 379kcal/100g となった。

胃腸通過時間は FM を 5% から 10% 添加した食餌において有意に短縮し、糞便重量はいずれの脂肪添加食餌においても 5% 以上の FM を添加することにより有意に増加した。

以上の結果から、DF によるエネルギー利用率の低下をできる限り抑制し、しかも排便の充進が期待される E/DF 比の範囲は 76kcal/gDF から 135kcal/gDF であった。

2) 胃腸通過時間と糞便水分含量

食事の可消化物量と難消化物量の割合を変えることにより、排便に対してどのような影響がみられるかについて検討を加えることにした。そこで、可消化物量の指標を食事の有効エネルギーにもとめ、一方、食物繊維源としては海藻に着目した。そして、排便の効果を高めるためには、食事のエネルギー量と食物繊維量をどの程度に調整することが望ましいかについて把握しようとした。

実験条件として精白米を粉碎し、コンブ、ノリ、ワカメ、ヒジキの 4 種類の海藻を 1%、3%、5%、

10%配合して白ネズミに与えた。その食事条件を精白米のエネルギー (E) と精白米ならびに海藻中の食物繊維 (DF) 比として表し、胃腸通過時間、糞便水分含量に対する E/DF 比の影響を検討した。

その結果、食事の E/DF 比は、509kcal/g から 52kcal/g の範囲となり、胃腸通過時間と糞便水分含量の変動幅は、それぞれ11.7時間から5.3時間、57.7%から74.6%となった。この E/DF 比に対する胃腸通過時間、糞便水分含量との相関係数 (r) は $r=0.84$ 、 $r=-0.67$ となり (図1)、いずれも統計的に有意な相関性が認められた ($p<0.01$)。とくに精白米食中に 5%の海藻を添加することにより、胃腸通過時間は、有意に短縮し ($p<0.05\sim0.01$)、その際の E/DF 比の平均値は、 137 ± 28 kcal/g であった (図2)。

3) 糞便の形状

この研究は食餌中の食物繊維量が糞便形状と排泄に対してどのように関わっているかについて白ネズミを用いて検索しようとした。基礎食中のコーンスターチの一部を DF に置き換え全体を100%にして白ネズミの飼料を配合した。食物繊維源は日本人の食物摂取状況から標準的な食物繊維の組成を設定した (表1)。

食物繊維源の調製にあたっては、穀類：セルロース、いも・菓子・野菜・きのこ類：ヘミセルロース、種実・果実類：ペクチン、海藻：アルギン酸、豆・調味料および香辛料類：乳果オリゴ糖を充当した。

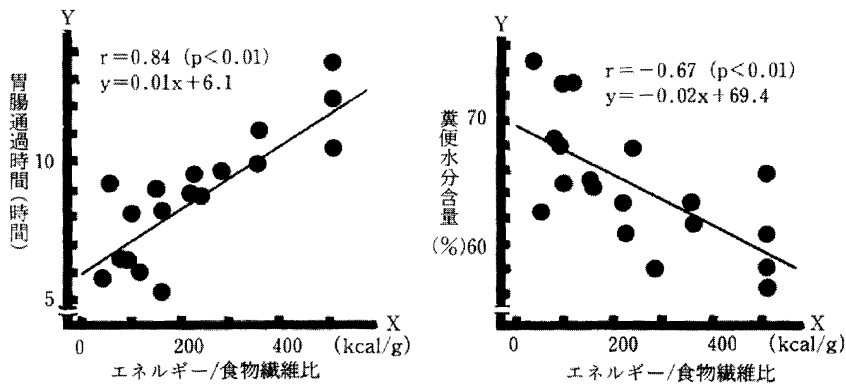


図1 エネルギー・食物繊維比に対する胃腸通過時間・糞便水分含量との相関性

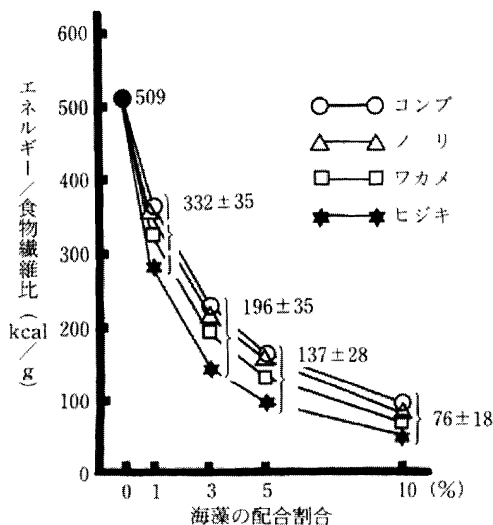


図2 精白米食中の海藻の配合割合に対するエネルギー・食物繊維比

表1 食物繊維源の組成 (%)

セルロース	31.00
ヘミセルロース	33.79
アルギン酸	5.13
ペクチン	7.28
乳果オリゴ糖	16.13
キトサン	6.67
計	100.00

排便指標としては

- (1) 糞便の形状:採取した糞便を風乾状態にまで 40℃の条件下で通風乾燥し、その長径と短径をノギスにより測定した。
- (2) 糞便の重量:個体別に代謝ケージに収容した白ネズミの糞便を通風乾燥し、その重量を測定した。
- (3) 胃腸通過時間:前日の 23 時から翌朝の 6 時まで絶食し、カーミン 0.5%を混合した飼料を白ネズミに一斉に摂食させ、その後白ネズミを常時観察し、赤色便の排泄までの時間を胃腸通過時間とした。

食餌の利用率としては、飼料摂取量と風乾糞便重量より食餌の風乾物利用率を次式により求めた。

$$\text{利用率} = \frac{\text{飼料摂取量} - \text{糞便重量}}{\text{飼料摂取量}} \times 100$$

結果についてみると、乾燥した糞便の短径とその糞便の重量は、DF0%群に対し DF 1 %以上の群において有意な差が認められた(表 2)。また、糞便の長径と胃腸通過時間には、DF5%以上の群において DF0%群との間に有意な差が認められた($p < 0.05$)。このことから 5%以上の DF 摂取が糞便形成に影響を及ぼすことが明らかとなった。この場合、DF5%摂取群の E/DF 比は 78.4kcal/g であり、幼児食の食品群別摂取量から算出した E/DF 比 82.7kcal/g、86.0kcal/g と類似した値となった。この E/DF 比の条件下においては、食事の消化性はやや低下し、胃腸通過時間の短縮と同時に糞便の形状にも影響を及ぼすものであった。

4) 食餌制限の効果

食餌中の食物繊維量の増加は、食餌の容積を

増すと同時に、エネルギー密度の低下をまねく。また、一方では糞便排泄量の増大にともない代謝性窒素排泄の亢進、消化率・飼料効率の低下がみられる。この食餌の密度と利用率の変動に対処するため摂食量は増加する。このような摂食量への適応現象を食餌制限の面に活用することが可能であるかどうかを探ろうとした。

ここでは食物繊維の給源をセルロース粉末とし、飼料摂取量とセルロース添加量の関係を検討し、つづいて等重量の食餌に対して、セルロースを配合した際の減量効果について検索した。

その結果、セルロース 10%以上の群において摂食量は、対照群(セルロース 0%)に比較して増加し、飼料効率は、20%以上のセルロース添加により有意に低下した($p < 0.05$)。ただし各飼料 100g あたりの可消化エネルギー量は、基礎飼料 407kcal、5%食 388kcal、10%食 369kcal、20%食 327kcal、30%食 286kcal であった。セルロース 10%以上の添加により摂食量の増加がみられたので、引き続き paired feeding の条件下で飼養試験を実施した。

供試動物は、11 週齢の雄白ネズミ 15 匹を 3 群に区分し、まず対照群には基礎飼料を ad libitum に与え、その前日の摂食量と等重量の 10%セルロース食を摂取させた群、残り 1 群は、対照群の 90%量の基礎飼料を 6 週間与えた。

以上の結果、セルロース群の体重、飼料効率ともに、他の 2 群に比して常に低値となった。また、肥満度は対照群に比較してセルロース群が有意に低値となった ($p < 0.05$)。

屠体重、内臓除去体重、肝重量は、対照群と他の 2 群間に差異が認められた ($p < 0.05$)。

以上の結果から、減量対策としては、食餌の質と量の両面からの食餌制限がより有効であった。

表 2 供試飼料中の食物繊維量と排便状況ならびに風乾物利用率

食物繊維含量(%)	平均±SD				
	0	1	3	5	10
長径(mm)	7.14±1.54	7.36±1.65	7.05±1.31	8.38±1.59*	8.22±1.30*
短径(mm)	3.02±0.56	3.53±0.54*	3.48±0.33*	3.40±0.57*	3.94±0.40*
重量(g)	0.85±0.20	1.41±0.14*	2.84±0.49*	3.89±0.35*	6.72±0.44*
通過時間(分)	801±106	754±119	705±180	619±116*	501±65*
風乾利用率(%)	98.87±0.25	98.17±0.14*	96.59±0.56*	95.01±0.34*	91.25±0.33*
E/Df(kcal/g)	---	410.2	133.7	78.4	36.6

※ 食物繊維含量 0 %摂取群に対する差 ($p < 0.05$)

5) 血糖値上昇抑制効果

食事に DF が混在することにより糖の吸収が、どのように変化するかについて検討した。

実験条件として、単位体重あたり 2g/kg のブドウ糖食、一方、それにセルロース粉末を加えた供試食を、約 15 時間絶食した雄成家兔に強制経口投与した。その結果、食餌中にセルロースを添加することにより、最高血糖値は低下し (図 3)、糖の吸収が緩慢になったことから、糖の腸管吸収の速度、あるいは、糖の組織への取り込みに影響をおよぼすことが示唆された。

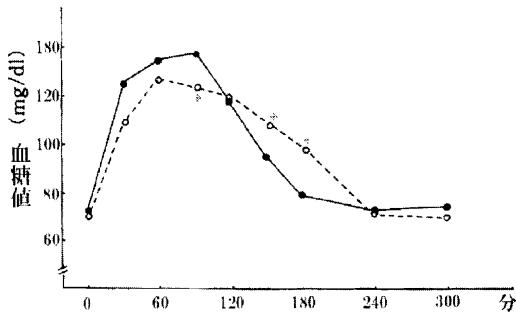


図3 セルロース含量の異なる飼料を摂取したウサギの血糖曲線

○---○ 25%セルロース食
●—● セルロース0%食

※ セルロース0%食との差 ($p < 0.05$)

II 白ネズミによる食餌中の難消化物のエネルギー値

飼料中の難消化物は、大腸内において腸内細菌の発酵・分解をうけ、その一部はエネルギーとして利用される。そのエネルギー含量がどの程度であるかを、白ネズミを用いて実測、検討した。

その方法として、sprague-dawley 系白ネズミを用い全糞採取法による消化試験を実施した。本試験開始時には個体別に実験食を摂取させ、採糞を行なった。採取した糞便はビーカーに入れ、40℃の砂浴中において乾燥させた後、夾雑物を取り除いて重量を測定し、風乾糞便排泄量とした。その糞便はミルサー (フィリップ製) を用いて 30mesh 以上に粉碎した。この場合の白ネズミの飼育は、白ネズミを個体別に代謝ケージに収容し、20~22℃に空調した室内で飼育した。飼育管理としては1日1回、午前8~9時の間に給餌・給水・採糞を行い、自由食の条件下で飼育した。飼料摂取量の測定は前日の給餌量から当日の残食量を差し引いた値とした。

実験食ならびに糞便中のエネルギーの測定は、改良型燃研式断熱熱量計により分析した。実験食の難消化物中のエネルギー量を測定するため

の方法として、実験食と糞便を、食物繊維を定量する際の Proskey-AOAC 法により酵素処理した。酵素処理の目的は、実験食については人工消化による難消化物量を定量するためであり、一方糞便の酵素処理については生体由来の代謝性排泄物量をもとめるためであった。つまり、白ネズミの消化管内で消化されなかったものはアミラーゼ、プロテアーゼの処理によっても加水分解を受けないものと仮定した。

そこで、実験食の人工消化による可消化エネルギーの含量をもとめた (in vitro)。その方法として、一定量の実験食を燃研式断熱熱量計により、全エネルギー含量を測定した。また、同様に Proskey-AOAC 法により酵素処理し、その残渣を風乾状態にまで乾燥させたものについてもエネルギー量を実測し、以下の計算式により可消化エネルギー量をもとめた。

$$\begin{aligned} & \text{人工消化による可消化エネルギー量(kcal/g)} \\ &= \text{実験食の全エネルギー量(kcal/g)} \\ & \times \frac{\text{エネルギー利用率 (\%)}}{100} \end{aligned}$$

次に、難消化物の大腸内におけるエネルギー産生量は、白ネズミの消化試験による有効エネルギー量 (in vivo) と人工消化試験からもとめた可消化エネルギー量 (in vitro) の差として表した。つまり、人工消化試験からは小腸までのエネルギー利用率を実測しようとした。すなわち、大腸内エネルギー産生量 (kcal/g) = 有効エネルギー量 (kcal/g) - 可消化エネルギー量 (kcal/g) とした。

これまでに、上記の方法により実測された難消化物中のエネルギー含量を表3にまとめた。

表3 食餌中の難消化物のエネルギー含量

食餌	難消化物のエネルギー含量(kcal/g)
大麦	2.17
玄米	1.87
キャベツ	2.18
白菜	0.40
大根	0.64
しいたけ	0.76
ヒジキ	0.32
ワカメ	0.90
コンブ	0.56
ノリ	0.24

おわりに、ノートルダム清心女子大学を退職するにあたり、記念講演としてご高配を頂いた岡山実験動物研究会 倉林譲会長をはじめ、会員諸兄に謝意を表します。記念講演は平成 18 年 12 月 8 日第 52 回岡山実験動物研究会（於 ピュアリティまきび、岡山市）において開催された。

引用文献

- 1) 中永征太郎, 彌益あや, 佐藤孜郎, 高橋正侑, 坂本廣司: ラットの排便に及ぼす食餌のエネルギー・食物繊維比の影響, 日本栄養・食糧学会誌, 44(4); 279-285, 1991
- 2) 中永征太郎, 彌益あや, 佐藤孜郎: 精白米食の海藻添加によるエネルギー・食物繊維比と胃腸通過時間ならびに糞便水分含量への影響, ノートルダム清心女子大学紀要, 16(1); 55-59, 1992
- 3) 矢野啓三郎, 柿木佐恵子, 中永征太郎: 幼児食における食品群別摂取量のエネルギー・食物繊維比について, 幼少児健康教育研究, 7(1); 45-48, 1998
- 4) 中永征太郎, 加藤節子, 佐藤孜郎: 食物繊維による食餌制限について, ノートルダム清心女子大学紀要, 11(1); 29-34, 1987
- 5) 中永征太郎: Dietary fiber の生理的効果について- 1, ノートルダム清心女子大学紀要, 2(1); 59-63, 1978
- 6) 中永征太郎, 柿木佐恵子: 白ネズミにおける大麦(押し麦)のエネルギー利用率について, ノートルダム清心女子大学紀要, 28(1); 80-83, 2004
- 7) 逸見佐恵子, 泉友美子, 中永征太郎: 白ネズミにおける玄米のエネルギー利用率, ノートルダム清心女子大学紀要, 31(1); 50-54, 2007
- 8) 山本いず美, 逸見佐恵子, 中永征太郎: 白ネズミにおけるキャベツの不消化物量とそのエネルギー値, ノートルダム清心女子大学紀要, 31(1); 62-71, 2007
- 9) 中永征太郎, 田村あや, 佐藤孜郎: 海藻中のエネルギー利用率について, ノートルダム清心女子大学紀要, 19(1); 41-46, 1995