

2-1) 腎臓障害 (ネフローゼ)

成長結果を表6に示した。体重増加量、飼料摂取量はPAN投与により有意に減少した。血液および尿成分は、PAN投与により尿中タンパク質の増加などネフローゼ症候群の特徴を示した(表5)。

表5 PAN投与の影響(血液・尿成分)

項目	Control	Test
血清アルブミン (g/dl)	3.01±0.09	2.14±0.18*
血清尿素窒素 (mg/dl)	25.6±1.1	77.2±15.2*
血清クレアチニン (mg/dl)	0.45±0.02	0.59±0.05*
尿中クレアチニン (mg/day)	2.64±0.06	2.34±0.08*
尿中タンパク質 (mg/day)	8.15±1.47	259.7±52.2*

Mean±SE (Control:n=6, PAN:n=8) * : 有意差あり

表6 PAN投与の影響(成長結果)

項目	Control	Test
初体重 (g)	90.17±2.06	90.13±1.67
体重増加量 (g)	31.5±1.06	18.0±1.80*
飼料摂取量 (g)	158.5±2.5	132.9±4.2*
内臓摘出屠体重 (g)	90.5±1.4	77.4±2.4*
肝臓 (g)	6.80±0.24	7.69±0.24*
腎臓 (g)	1.46±0.03	1.64±0.03*

3-1) 糖尿病

糖尿病群で飼料摂取量の増加、体重増加量の減少、腎臓肥大が認められた(表7)。血中グルコース濃度は標準群の4.8倍に上昇した。

表7 成長結果

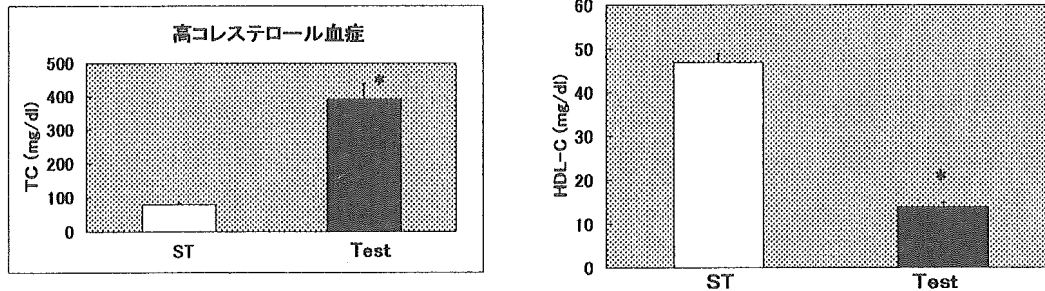
	Mean±SE	
	標準群	試験群
体重増加量 (g/13 d)	77.5±3.1	31.3±10.8*
飼料摂取量 (g/d)	18.2±1.2	32.1±2.4*
肝臓(g)	14.9±0.5	10.2±0.6*
腎臓(g)	2.72±0.06	3.25±0.36*

各群 : n=6

4-1) 食餌性高コレステロール血症

成長結果を表8に示す。体重増加量、飼料摂取量に差は見られなかった。試験群で血清総コレステロール値は有意に上昇し、HDLコレステロール値は有意に減少した(図6)。肝臓中のコレステロール値も有意に上昇した(表8)。

図5 高コレステロール食摂取時の血清総コレステロール値とHDLコレステロール値



* : 有意差あり

表8 成長結果

項目	Control	Test
初体重 (g)	134 ± 3	135 ± 2
体重増加量 (g/10d)	71.0 ± 2.9	67.3 ± 3.0
飼料摂取量 (g/10d)	158 ± 4	153 ± 5
内臓摘出屠体重 (g)	150 ± 4	146 ± 4
肝臓//内臓摘出屠体重(%)	4.45 ± 0.12	5.96 ± 0.07*
肝臓		
コレステロール(mg/g tissue)	5.2 ± 0.6	59.0 ± 2.0*
コレステロール(mg/liver)	34.8 ± 3.9	512.6 ± 24.6*

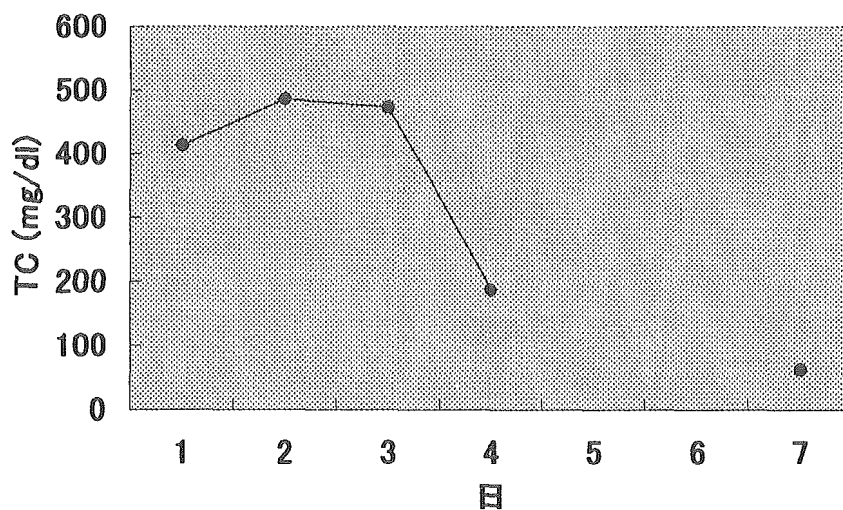
Control, Test: n=8

4-2) 薬剤性高コレステロール血症

Pluronic 投与後、経時的に血清総コレステロールを測定した。その結果、注射後1日目より血清総コレステロールは大きく上昇し、3日目まで持続した。4日目には値は減少し、7日目には正常値に戻った(図6)。

図 6

Pluronic 投与後の血清総コレステロール値



4-3) 高トリグリセリド血症

体重増加量に有意な差はみられなかった。飼料摂取量は試験群で有意に減少した(表 9)。試験群では有意な血清トリグリセリド値の上昇がみられた。血清総コレステロール値は標準群と試験群の間に有意な差はみられなかった(図 7)。肝臓中のトリグリセリド、総コレステロール、総脂質が試験群で有意に上昇した(表 9)。

図 7 高トリグリセリド血症ラットの血清トリグリセリドおよび血清総コレステロール値

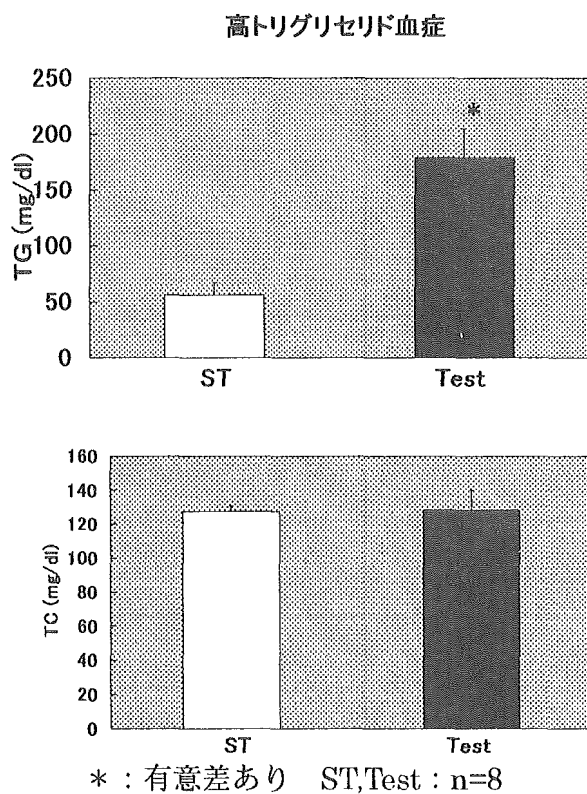


表 9

成長結果および肝臓脂質値

項目	Control	Test
初体重 (g)	87.6±1.3	87.8±1.1
体重増加量 (g)	112±3	108±4
飼料摂取量 (g)	237±5	206±6*
飼料効率	0.46±0.01	0.52±0.01*
内臓摘出屠体重 (g)	142±3	138±3
肝臓/内臓摘出屠体重(%)	6.9±0.1	7.8±0.2*
肝臓脂質値 (mg/g 組織)		
トリグリセリド	40.3±19.5	114±6*
総コレステロール	3.45±0.30	5.34±0.30*
総脂質	89±8	142±6*

〈研究 2〉

調査研究

本研究で使用した特定保健用食品の調査結果について表 10 に示した。平成 13 年 5 月の時点で、フラクトオリゴ糖、乳果オリゴ糖は、多数の商品の素材として使用されていた(表 10)。

表 10 本研究で使用した特定保健用食品素材を含む食品の商品名

フラクトオリゴ糖	イソマルトオリゴ糖	乳果オリゴ糖	ラクチュロース
<ul style="list-style-type: none"> ・メイオリゴ ・オリゴコーヒー ・日本オリゴのフラクトオリゴ糖 ・オリゴ 55 ・オリゴシュガー39 ・おなかにおいしいオリゴ糖 ・ゴーサインスティック ・お・な・か・にやさしくオリゴとうふ ・オリゴでしっかり 	<ul style="list-style-type: none"> ・オリゴタイム(シロップ) ・アサヒパワーゴールド ・エコライフ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ワナナイトプレーン ・ワナナイトビター ・ワナナイトジンジャー ・フローズンヨーグルトすこやか家族 ・オリゴのおかげ ・ビックオリゴキャンディー ・ビックオリゴビスケット ・オリゴのおかげ EX ・オリゴのおかげポ 	<ul style="list-style-type: none"> ・毎朝爽快

Ca(カルシウム)		ーションタイプ ・ヘルシーバランス (6種類) ・UCC ココアミルク ス ・オリゴで元気	
-----------	--	--	--

特定保健用食品素材に関する情報²⁰⁾

乳果オリゴ糖：しょ糖と乳糖に果糖転移酵素を作用させて製造する。しょ糖が酵素により果糖とブドウ糖に分かれ、次いで果糖が乳糖に転移結合してラクトスクロースに変わる。このラクトスクロースが主成分となり、未反応の乳糖やしょ糖、反応中にできるブドウ糖や果糖が合わさった製品が乳果オリゴ糖である。

イソマルトオリゴ糖：ハチミツに含まれるオリゴ糖の一種で、酵母で発酵しないので非発酵性糖とも呼ばれる。工業的にはデンプンにアミラーゼ、転移酵素を反応させてつくられる。すっきりした甘味（砂糖の約 50%）があり、耐熱性や耐酸性があるので、製菓、製パン、飲料などにも利用しやすい。

フラクトオリゴ糖：天然にはアスパラガス、ニンニク、ゴボウ、タマネギなど野菜類や蜂蜜に少量含まれているが、工業的にはしょ糖に果糖転移酵素を作用させて生産されている。しょ糖に 1-3 個の果糖（フラクトース）が結びついたもの。

ラクチュロース：二糖類の乳糖にアルカリを作用させて工業的に作ったオリゴ糖で、異性化乳糖ともいう。

実験研究

1-1) 特定保健用食品素材等が四塩化炭素肝障害ラットのトランスアミナーゼ活性等に及ぼす影響

成長結果を表 11 に示した。体重増加量、飼料摂取量でオリゴ糖の群、アガリクス群は対照(Control)群に比し低い値を示した。肝臓重量はアガリクス群が他群に比べ高い傾向を示した。GPT の経時変化を図 8 に示した。四塩化炭素を投与した全ての群で 10 日目は高い値を示し肝障害の度合いが悪化したと思われる。しかし、今回の試験試料は、対照群より肝臓障害をより増悪させるという作用は示さなかった(図 8)。試験飼料投与後、10 日目の血清 GPT は、各サンプル間で有意な差は認められなかった(図 9)が、血清 GOT に関してアガリクス群は対照群に比べ有意に低い値を示した(図 10)。四塩化炭素投与により免疫系、マクロファージが活性化され血中 NO 濃度が四塩化炭素肝障害で増加するという報告があることより NO 値を測定した。その結果乳果オリゴ糖は対照群より低い値を示した。他の試料は四塩化炭素無投与群の値より高く対照群とほぼ同じ値を示した(表 12)。しかし乳果オリゴ糖は四塩化炭素肝障害を抑制しなかった。

表 11

成長結果

Parameter	Standard	Control	L A C	F R U
Weight gain(g/10days)	49.6 ± 11.8	58.8 ± 24.3	32.8 ± 14.3	41.0 ± 29.8
Feed intake(g/10days)	222 ± 26a	169 ± 23ab	132 ± 20b	144 ± 40b
Feed efficiency ¹⁾	0.22 ± 0.04	0.35 ± 0.14	0.25 ± 0.12	0.26 ± 0.16
Liver (%) ²⁾	5.45 ± 0.36a	9.82 ± 2.71ab	8.98 ± 0.73ab	9.38 ± 3.74ab

Parameter	L T U	I S O	A G B
Weight gain(g/10days)	35.3 ± 28	46.7 ± 15.4	34.0 ± 17.7
Feed intake(g/10days)	130 ± 10b	141 ± 7b	145 ± 26b
Feed efficiency	0.27 ± 0.23	0.33 ± 0.10	0.23 ± 0.10
Liver (%)	9.97 ± 2.06ab	8.23 ± 1.57a	13.2 ± 0.9b

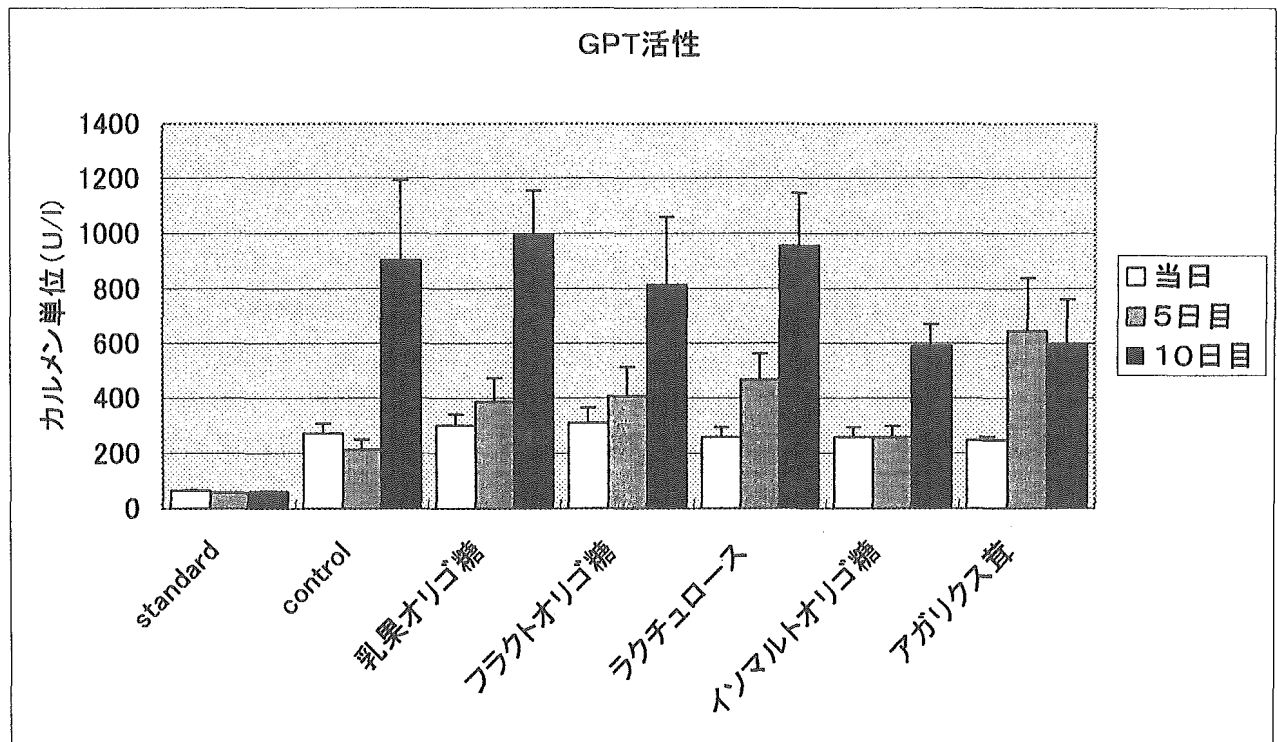
Mean ± SD (標準群 : n=7, オリゴ糖群 n=6, 対照群・アガリクス群 : n=5)

Test substances: 乳果オリゴ糖 (LAC)、フラクトオリゴ糖 (FRU)、
ラクチュロース (LTU)、イソマルトオリゴ糖 (ISO)、アガリクス (AGB)

1) Body weight gain / Feed intake

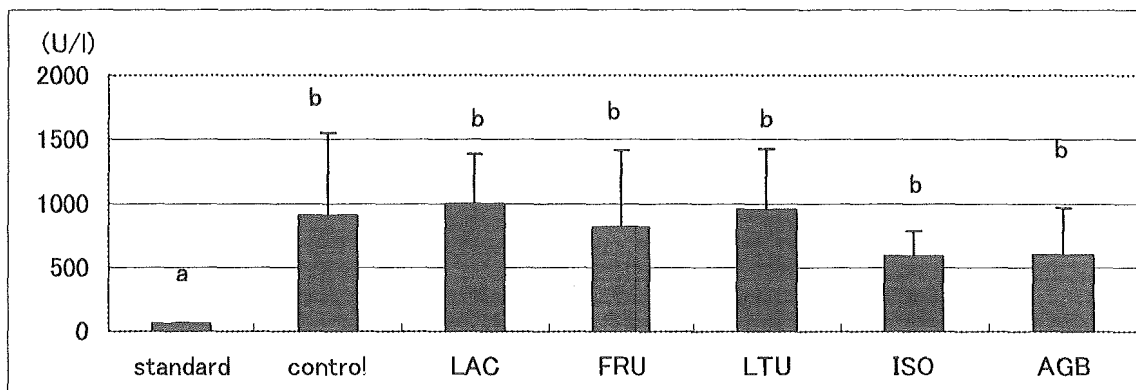
2) Liver weight / Carcass weight × 100 異なるアルファベット間は有意差あり

図 8 試験試料に切り替え 0, 5, 10 目の血清 GPT



Mean ± SD

図9 特定保健用食品素材等が四塩化炭素肝障害ラットの血清 GPT (10 日目) に及ぼす影響

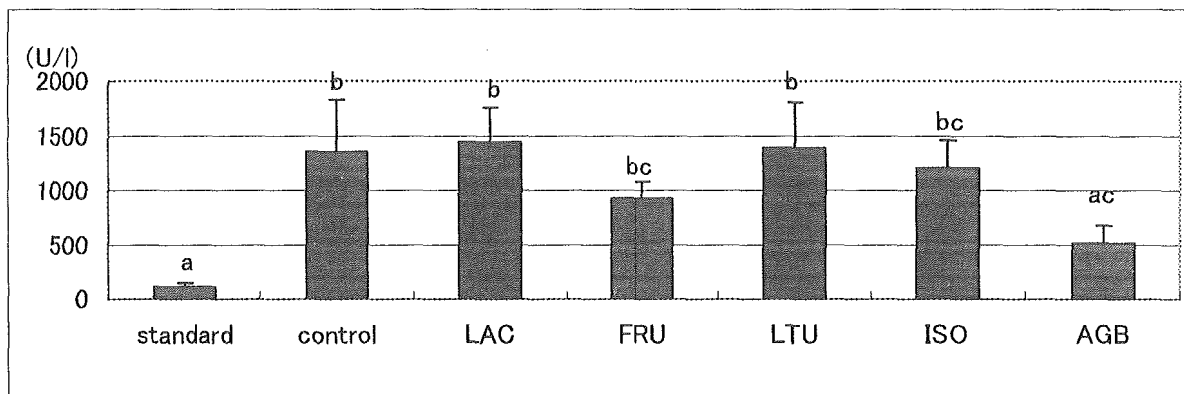


Mean ± SD

Test substances: 乳果オリゴ糖 (LAC)、フラクトオリゴ糖 (FRU)、ラクチュロース (LTU)、イソマルトオリゴ糖 (ISO)、アガリクス (AGB)

異なるアルファベット間には有意差あり

図10 特定保健用食品素材等が四塩化炭素肝障害ラットの血清 GOT (10 日目) に及ぼす影響



Mean ± SD

Test substances: 乳果オリゴ糖 (LAC)、フラクトオリゴ糖 (FRU)、ラクチュロース (LTU)、イソマルトオリゴ糖 (ISO)、アガリクス (AGB)

異なるアルファベット間には有意差あり

表 12 特定保健用食品素材等が四塩化炭素肝障害ラットの血清 NO レベルに及ぼす影響

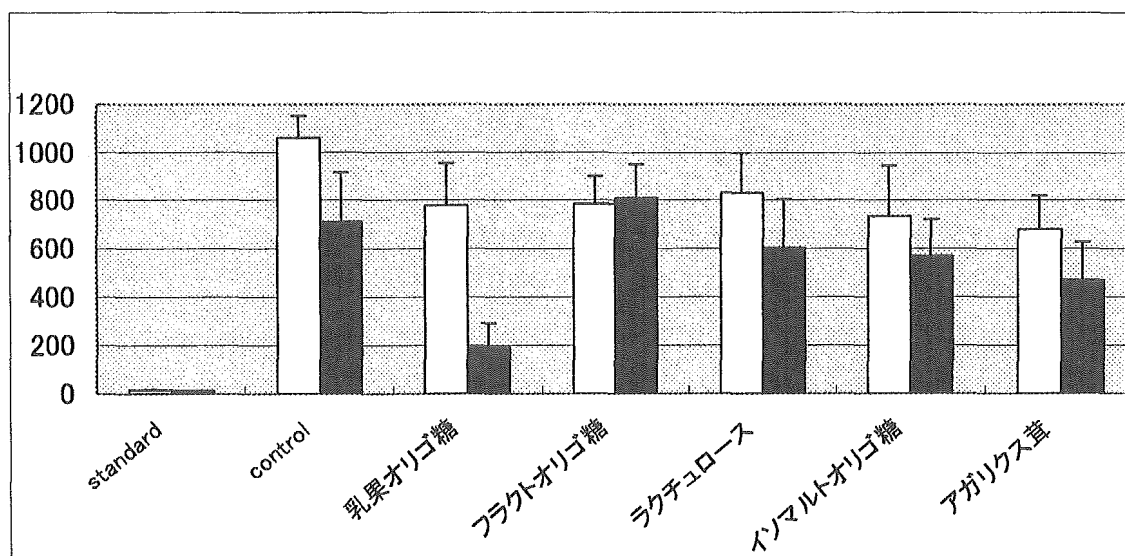
Parameter	Standard	Control	LAC	FRU
NO (μM)	13.9 \pm 1.5ac	21.8 \pm 2.2b	13.2 \pm 1.5c	17.3 \pm 3.8abc
Parameter	LTU	ISO	AGB	
NO (μM)	19.3 \pm 2.5ab	18.9 \pm 2.9ab	20.1 \pm 2.9b	

Mean \pm SD

1-2) 特定保健用食品素材等がガラクトサミン肝障害ラットのトランスアミナーゼ活性に及ぼす影響

ガラクトサミンを投与後 20-24 時間後に最も血清トランスアミナーゼ活性が上昇し、その後徐々に減少し肝障害が回復していくという予備実験の結果から、今回トランスアミナーゼ活性が上昇している状態で特定保健用食品素材等を単回投与した場合の影響について検討した。つまり肝障害の回復を悪化させるか、促進するか検討した。投与量はラットが一日に自由摂取する量を想定し（食餌中オリゴ糖 5%、アガリクス 1%）決定した。その結果、どの食品素材もガラクトサミン肝障害を悪化させるものはなかった（図 11）。乳果オリゴ糖は対照群、他群に比し回復を促進する傾向がうかがえた（ガラクトサミン処理群間には有意差なし）。

図 11 特定保健用食品素材等がガラクトサミン肝障害ラットの血清 GPT に及ぼす影響（ガラクトサミン投与 24 時間後（白棒）、48 時間後（黒棒））



Mean \pm SD n=7

【研究結果の考察】

本研究は特定保健用食品素材の安全性評価手法を確立する目的で、学術論文、書籍、学会要旨集などを参考にして、各種疾病モデルを作成した。

あまり知られていない薬剤による障害について、そのメカニズムについて簡単にふれておく。ガラクトサミン肝障害はその病理組織像がヒトのウィルス性肝炎に類似しているといわれている。そのメカニズムは完全には明らかにされていないが、ガラクトサミンが直接肝細胞に障害作用を起こしているのではなく、ガラクトサミンが UDP-ガラクトサミンなどへ代謝されていく過程で UDP-ガラクトサミンが合成されるため UDP がトラップされ、肝臓の UTP 含量の欠乏がおこり、RNA やタンパク質の合成障害がおこるためと考えられている⁸⁾。四塩化炭素肝障害は肝硬変のモデルであるが、四塩化炭素が肝細胞の滑面小胞体で代謝され障害惹起物質に変わって肝障害を引き起こすと報告されている¹⁰⁾。アセトアミノフェンは世界中で最も幅広く使用されている解熱鎮痛剤のひとつであり、アセトアミノフェンは適量であれば、グルクロン酸や硫酸などの抱合体となり排泄される。しかし、過剰量によって引き起こされる肝障害は、その代謝産物が肝臓中のグルタチオンのようなスルフヒドリル基を持つ化合物あるいはタンパク質などとアセトアミノフェンの酸化生成物が結合することにより、肝臓中のある物質が減少し肝臓の機能低下につながると考えられている²¹⁻²²⁾。 α -Naphthylisothiocyanate 肝障害は、その経口投与により肝臓細胞の膜輸送に関する Na-K ATPase などの酵素活性の変動が起こり、肝細胞内で生成胆汁成分の肝細胞外への輸送量が減少し、肝内に溜まり肝機能の低下を引き起こす。さらに、肝内に溜まった胆汁成分は血液中に放出され、生体内の各種組織に影響が及ぶと考えられている¹⁴⁾。ピューロマイシンアミノヌクレオシドは細胞との親和性により腎糸球体、尿細管上皮に蓄積し直接作用し、ネフローゼ症候群を発現させる¹⁸⁾。

疾病モデル動物の作成結果、肝臓障害に関しては、どのモデルラットも肝臓障害の指標となるトランスアミナーゼ (GOT、GPT) 活性が対照群 (正常ラット) より有意に上昇した。しかし、肝臓障害ラットは血清トランスアミナーゼ活性にバラツキが大きく、一群あたりの匹数を多くする必要があると思われる。また使用するラットが同じ系統、週齢でも購入する会社 (例えば日本クレアと日本 SLC) が異なると感受性が異なるので注意する必要がある。実際、ガラクトサミン肝障害の実験で同じ系統、週齢のラットでも SLC から購入したラットのほうが日本クレアから購入したラットよりガラクトサミンへの感受性が高く、同じ量のガラクトサミンを注射してもトランスアミナーゼ値が大きく異なった (データは示していない)。四塩化炭素肝障害モデルラットは脂肪肝、肝硬変のモデルとしてよく使用されるが、欠点として長期飼育 (一ヶ月以上) と飼育途中、致死率が若干高いことが挙げられる。慢性アルコール肝障害モデルは、液体飼料で毎日新鮮なもの調製し投与するため、試料調製に手間がかかること、液体飼料に溶けないサンプルは使用できない等欠点がある。しかし、以上の点を考慮すれば上記手法で安全性を評価することができる。腎臓障害、糖尿病、高脂血症モデル動物に関しても今回の実験結果から安全性評価に活用出来ると思われる。

研究 2 では、実際に特定保健用食品素材および健康食品を肝臓障害ラットに投与してその安全性を評価したところ、今回使用した試料はこの実験条件下では肝障害を増悪させな

かった。乳果オリゴ糖に関してはガラクトサミン肝障害からの回復を早める傾向が示唆された。そのメカニズムに関してはさらなる研究が必要である。

【まとめ】

特定保健用食品素材の安全性評価手法の検索に関する研究として、1)安全性評価のための、実験モデル動物の作成と評価、2)特定保健用食品素材および健康食品の安全性評価を行った。学術論文、学会発表要旨、専門書を参考に、比較的罹患率の高い疾病の実験モデル動物（肝臓障害、腎臓障害、糖尿病、高脂血症）を作成した。

1) 安全性評価のための、実験モデル動物の作成と評価

本実験で作成したモデル動物
<ul style="list-style-type: none">・肝臓障害モデル：ガラクトサミン肝臓障害、四塩化炭素肝臓障害、アセトアミノフェン肝臓障害、胆汁うったい型肝臓障害、アルコール性肝臓障害・糖尿病モデル：ストレプトゾトシン誘導性糖尿病・腎臓障害モデル：ピューロマイシンアミノヌクレオシド誘導性ネフローゼ・高脂血症モデル：食餌性高コレステロール血症、薬剤による高コレステロール血症、高トリグリセリド血症

実験モデル動物を作成した結果、アルコール性肝障害のように飼育および餌の調製に時間がかかり簡便に行えないモデル動物もあるが、他のモデルに関しては特別な技術を必要とすることなく各種障害を引き起こし安全性評価に活用できると結論した。またこのモデル動物は、安全性の評価だけではなく有用性の評価にも応用できると思われる。

2) 特定保健用食品素材および健康食品の安全性評価

実験で用いた試験試料
<ul style="list-style-type: none">・特定保健用食品素材：フラクトオリゴ糖、イソマルトオリゴ糖、乳果オリゴ糖、ラクチュロース・健康食品素材：アガリクス

次に特定保健用食品素材および健康食品の安全性評価を行った。四塩化炭素肝臓障害(慢性肝炎モデル) およびガラクトサミン肝障害(急性肝炎モデル) に及ぼす上記特定保健用食品素材および健康食品素材の影響を調べたところ、肝臓障害を増悪させる素材はなくこの系の実験に関しては安全性が確認された。

【引用文献】

- 1)Office of Technology Assessment: "Environmental contaminants in Food", Congress of United States, Washington, D.C., Dec. (1979)
- 2)栗飯原景昭：食品の安全性評価、学会出版センター, P1 (1983)
- 3)国民衛生の動向・厚生指標、厚生統計協会、48(9), P48 (2001)
- 4)池上幸江：厚生科学研究：平成十二年度新開発食品等の安全性の確保に関する研究報告書, P6 (2000)
- 5)National Research Council : Guide for Care and use of laboratory animals. NIH publication No.85-23(rev.), U.S.Government Printing office, Washington,DC. (1985)
- 6)Keppler,L., et al.: *Exp. Mol. Pathol.*, 9, 279 (1968)
- 7)Decker,K. and Keppler,D.: Progress in Liver Diseases (Popper,H. and Schaffner,F., eds.), Grune and Stratton (New York and London) 183 (1972)
- 8)Keppler,D., et al.: *J. Biol. Chem.*, 249, 211 (1974)
- 9)Lippi,U. and Guidi,G: *Clin.Chim.Acta.*,28,431 (1970)
- 10)Recknagel,R.O.: *Pharm. Rev.*, 19, 145 (1967)
- 11)Ishida,K., et al.: *Exp. Toxic. Pathol.*, 49, 207 (1997)
- 12)Gandner, C.R., et al.: *Hepatology.*, 27, 748 (1998)
- 13)Tolman, K.G.: *Am. J. Med.*, 105, 13S (1998)
- 14)Marcel, E., et al.: *Bull. Res. Counc. Israel.*, 8E, 7 (1959)
- 15)Schaffner,R., et al. : *Lab. Invest.*, 28, 321 (1973)
- 16)Plaa, G.L., et al.: *Pharmacol. Rev.*, 28, 207 (1977)
- 17)Thener,R.C., et al.: *Am. J. Clin. Nutr.*, 25, 175 (1972)
- 18)谷本義文：実験動物の血液・尿生化学、ソフトサイエンス社、P169 (1988)
- 19)Wout, Z.G., et al.: *J. Parent. Sci. Tec.*, 46, 192 (1992)
- 20)奥田拓道：健康・栄養食品辞典（東洋医学舎）P736 (2000)
- 21)Wang,P., et al.: *Hepatology.*, 29, 161 (1999)
- 22)Herbert,T., et al.: *J.Biochem. Toxic.*, 11, 289 (1996)

【謝辞】

本研究をまとめるにあたり数多くのご助言を頂きました大妻女子大学教授池上幸江先生、千葉大学教授真田宏夫先生に深謝いたします。

食物繊維のエネルギー評価に関する研究

分担研究者 奥 恒 行
県立長崎シーボルト大学看護栄養学部

1. 研究概要

近年、食物繊維が生活習慣病の予防に寄与していることが明らかになるのに伴い、食物繊維摂取量が減少してきていることと相俟って、食物繊維を強化した加工食品が商品化され、身近に利用する機会が多くなってきた。

一方、加工食品には栄養成分表示制度に基づいてエネルギーをはじめ主要栄養成分表示が義務付けられている(1)。食物繊維含有加工食品においても例外ではない。わが国の栄養改善法における加工食品の栄養表示制度では、食物繊維のエネルギー値は暫定的に4 kcal/gを用いている。このため、特別用途食品に位置づけられている低カロリー食品の創製が困難になっている。欧米諸国では、食物繊維のエネルギー値は暫定的に0 kcal/gを用いてきたが、最近では真実に近い評価をする動きがでてきて、国によって0 kcal/gあるいは2 kcal/gを使っている。

食物繊維は消化吸収されないが、腸内細菌によって発酵分解を受けて短鎖脂肪酸に転換されて利用されることが考えられるために、その有効エネルギー量は0 kcal/gでもなければ4 kcal/gでもないはずである。五訂日本食品標準成分表においては(2)、炭水化物の中に位置付けられていた糖質と繊維の扱いが変更になり、また、食物繊維を含めた難消化性栄養成分のエネルギー評価法が確立されていないこともあって、難消化性栄養成分のエネルギー評価の考え方を暫定的に変更した。これにともなって、栄養成分表示においては、食物繊維を含めた難消化性栄養成分のエネルギーを暫定的に4kcal/gとしたために、食品業界に混乱をもたらしている。それゆえ、現段階における科学的根拠に基づいて、食物繊維のエネルギー評価を行い、より真実に近いエネルギー値を提示する必要がある。

2. 研究の特色

米国、EU、FAO/WHOなどにおいても食物繊維のエネルギー評価をする動きがでてきて、暫定的に2 kcal/gを用いようとしている。しかし、その算出根拠は明示されていない。EUが提示している2 kcal/gはベルギーのDr. Roberfloidらが示したイヌリン分解物の値1.5 kcal/gを根拠にしているが(3)、エネルギー評価についての実験を行っているわけではない。彼らは、著者らが報告している難消化性であるフラクトオリゴ糖について代謝実験結果ならびに有効エネルギー推定値を利用しているに過ぎない(4, 5)。著者らは、各食物繊維素材について発酵性を測定し、腸内細菌によって発酵分解される部分については2 kcal/gを用い、発酵分解されないものは0 kcal/gを用いてエネルギー評価することを基本原則としている。この点が特徴であり、この評価法は欧米

諸国の暫定的な算出法に比べて説得力があると考えている。

3. 研究目的

本研究は、以下の3領域について調査・実験を行なう。

- 1) 米国をはじめヨーロッパなどの先進国において、食物繊維のエネルギーがどのように扱われ、どのようなエネルギー換算係数が用いられ、それがどのような方法に基づいて評価されたものであるかを文献的に調査する。
- 2) 難消化性オリゴ糖や糖アルコールは放射性化合物を作り易いので、それを用いて消化吸収されない糖質が腸内細菌を介して利用されることを実証し、食物繊維も類似した代謝経路で利用されることを明らかにする。
- 3) 現段階における知見に基づく食物繊維エネルギー評価の進め方を提示する。
確立された方法がない現段階において、いろいろな食物繊維について共通した基盤に立ってエネルギー評価をする考え方を提示する。
- 4) 現在、わが国において商品化されている食物繊維素材についてエネルギー評価を試みる。

現在、わが国で市販されている食物繊維素材および開発中の食物繊維素材にどのようなものがあるかを調査し、提示したエネルギー評価法に基づいてそれぞれの食物繊維素材についてのエネルギー換算係数の推計を試みる。

4. 研究・調査結果

1) 諸外国における各種食物繊維素材のエネルギー値に関する文献調査結果

食物繊維およびオリゴ糖、糖アルコールを含めた難消化性糖質のエネルギー評価に関する文献を中心に検索した。これらには、エネルギー評価を直接の目的として実験を行ったもの、付随的にエネルギー評価に言及したもの、総説のなかでエネルギーに言及したものなどがある。これらをまとめたものが表1である。

食物繊維としては、アラビアガム、アラビノキシラン、アルギン酸ナトリウム、イヌリン、オリゴフルクトース、カラギーナン、寒天、グアーガム、グルコマンナン、小麦ふすま、セルロース、カルボキシメチルセルロース(CMC)、大豆ファイバー、トウモロコシふすま、難消化性デキストリン、ビートファイバー、ペクチン、ポリデキストロース、レジスタントスターチ、ローカストビンガムなどが対象となった。

全体的には、アラビアガム、アラビノキシラン、イヌリン、グアーガム、グルコマンナン、ペクチンなどの水溶性食物繊維は発酵分解を受けるために見かけの消化率が高いことを示し、1~2 kcal/gの範囲にあるものが多かった。中には2~3 kcal/gを示すものもあった。いずれにしても、水溶性食物繊維が腸内細菌で発酵を受けることを考えると、1~2 kcal/gの値は妥当な範囲ではないかと考える。同じ水溶性食物繊維であるポリデキストロースは化学的に合成されたものであるために、他の水溶性食物繊維とは異なった挙動を示すことが明らかにされている。消化吸収される部分が約25%、発酵分解を受けない部分が約55%存在するため、エネルギー値は1 kcal/g前後が提示されていた。デキストリンの水解される部分を加水分解後、処理して消化され難くした難消化性デキストリンは分子量などの性状や用途がポリデキストロースと類似して

表1. 食物繊維のエネルギー消化性に関する文献

食物繊維名	評価系	エネルギー値	表題	掲載雑誌名
総説			Dietary fiber: a healthy discussion	(Ronald C. Deis 1999)
総説			Suitability of traditional energy values for novel foods and food ingredients. 2000	Food Contrl 2000
アラビアガム	ヒト	消化率約100%	原本のコピーなし/表題不明	Am. J. Clin. Nutr., 37: 368-375(1984)
アラビアガム	ラット	2.00以下	Acacia gum (Gum Arabic): a nutritional fiber; metabolism and calorific value	Food Additives and Contaminants, 15, 251-264 (1998)
アラビアガム	ラット	1.00-0.0	In vitro determination of the caloric value of gum Arabic in the male rat...biological data	Food Additives and Contaminants, 4, 232-246 (1987)
アラビノキシラン	ラット	1.30	Estimation of available energy of dietary fibers by indirect calorimetry in rat	Eur. J. Nutr., 40, 23-29 (20019)
アルギン酸ナトリウム	ラット	0.45-0.3	表題不明	Nature; 219, 1172 (1968)
アルギン酸ナトリウム	ラット	1.05	表題不明	Journal of Applied Bacteriology, 80, 349-369 (1996)
アルギン酸ナトリウム	ラット	1.40	表題不明	Academic Press, New York, pp 55-82 (1959)
アルギン酸ナトリウム	ヒト	消化率極めて低い	表題不明	Am. J. Nutr., 31, S128-130 (1978)
イヌリン	ヒト	1.50	Caloric value of inulin and Oligofructose	J. Nutr., 129, 1436s-1437 (1999)
イヌリン	ヒト	1.20	Net energy value of non-starch polysaccharide isolates (sugar beet fiber and commercial inulin) and their impact on nutrient digestive utilization in health	Br. J. Nutr., 80, 343-352(1998)

オリゴフルクトース	ヒト	1.50	The first ORAFITI Research Conference (Hosoya et al.)	Proceeding of the first ORAFITI Research Conference, Brussel, 1995
オリゴフルクトース	ラット	1.50	Caloric value of inulin and Oligofructose	J. Nutr., 129, 1436s-1437 (1999)
オリゴフルクトース	ヒト	1.50-1.0	The biochemistry of Oligofructose, a nondigestible fiber: An approach to calculate its	Nutr. Rev., 51: 137-146 (1993)
オリゴフルクトース	ラット	1.48	Usage energy value of selected bulking agents	J. Food Sci., 58: 1176-1198 (1998)
カラギーナン	ラット	記載なし	Effect of indigestible polysaccharide on protein digestibility and nitrogen retention on growing rats	Nutr. Metab., 23: 399-407 (1979)
カラギーナン	ラット	盲腸存在菌の酵素活性比較	Hydrocolloid food additives and rat caecal microbial enzyme activities	Food Chem. Toxic., 22: 415-418 (1984)
寒天	ラット	腸内細菌を変化させない	Hydrocolloid food additives and rat caecal microbial enzyme activities	Food Chem. Toxic., 22: 415-418 (1984)
寒天	ラット	腸内でほとんど分解されない	Effect of indigestible polysaccharide on protein digestibility and nitrogen retention on growing rats	Nutr. Metab., 23: 399-407 (1979)
寒天	ラット	エネルギー源として利用されない	ラットに給与した寒天末の栄養生理的効果	栄養・食科学会誌, 47: 227-233 (1994)
グアーガム	ラット	記載なし	Effect of indigestible polysaccharide on protein digestibility and nitrogen retention on growing rats	Nutr. Metab., 23: 399-407 (1979)
グアーガム	ラット	盲腸存在菌の酵素活性比較	Hydrocolloid food additives and rat caecal microbial enzyme activities	Food Chem. Toxic., 22: 415-418 (1984)
グアーガム	ラット	3.30	表題不明	Int. J. Obes., 11: 101-105 (1987)
グアーガム	ヒト	2.80	表題不明	Am. J. Clin. Nutr., 37: 368-375 (1984)
グアーガム	ラット	グアーガムとグアーガム分解物は同エネルギー	Protein and energy utilization of growing rats fed on the diets containing intact or partially hydrolyzed guar gum	Comp. Biochem. Physiol., 107A:255-260(1994)
グアーガム	ラット	2.40	Energy values and energy balance in rats fed on supplements of guar gum or	Br. J. Nutr., 65: 415-433(1991)

グルコマンナン	ヒト	消化率96%	こんにゃくの生理的研究	東京医学雑誌, 25: 518 (1911)
グルコマンナン	ヒト	消化率84%	数種多糖類の消化利用に就いて	慶応医学, 8: 1985 (1928)
小麦ファイバー	ラット	0.88	Usable energy of value of selected bulking agents	J. Food Sci., 58:1176-1198 (1998)
小麦フスマ	ヒト	セルロースとして60%消化される	表題不明	Metabolism, 25: 1129-1135 (1976)
セルロース	ラット	糞中に100%回収	Evaluation of the health aspects of cellulose derivatives as food ingredients	Federation of American Societies for Experimental Biology
セルロース		記載なし	アビセル・セオラス	パンフレット
セルロース		記載なし	結晶セルロース	植物資源の生理活性物質ハンドブック、p.368-372
セルロース	ラット	0.05	Determination of digestible energy values and fermentability of dietary fiber supplements: a European interlaboratory study in vivo	Br. J. Nutr., 74: 289-302(1995)
セルロース	ラット	0.10	Energy balance and energy values of α -amylase (EC3.2.1.1)-resistant maize and pea (<i>Pisum sativum</i>) starch in the rat	Br. J. Nutr., 63: 467-480(1990)
セルロース	ラット	0.00	Energy values and energy balance in rats fed on supplements of guar gum or	Br. J. Nutr., 65: 414-433(1991)
セルロース	ラット	0.50	Estimation of available energy of dietary fibers by indirect calorimetry in rat	Eur. J. Nutr., 40: 23-29 (2001)
CMC	ラット	盲腸存在菌の酵素活性比較	Hydrocolloid food additives and rat caecal microbial enzyme activities	Food Chem. Toxic., 22: 415-418 (1984)
ダイズファイバー	ラット	80%以上が分解される	Physiological effects of water-soluble soybean fiber in rat	Biosci. Biotechnol. Biochem., 63: 1340-1345 (1999)
ダイズファイバー	ラット	2.10	Determination of digestible energy values and fermentability of dietary fiber supplements: a European interlaboratory study in vivo	Br. J. Nutr., 74: 289-302(1995)

トウモロコシフスマ	ラット	0.60	Determination of digestible energy values and fermentability of dietary fiber supplements: a European interlaboratory study in vivo	Br. J. Nutr., 74: 289-302(1995)
難消化性デキストリン	ラット	0.50	Energy value of a mixed glycosidic linked dextrin determined in rats	J. Agric. Food Chem., 46: 2253-2259 (1998)
ビートファイバー	ラット	1.60	Determination of digestible energy values and fermentability of dietary fiber supplements: a European interlaboratory study in vivo	Br. J. Nutr., 74: 289-302(1995)
ビートファイバー	ヒト	2.80	Net energy value of non-starch polysaccharide isolates (sugar beet fiber and commercial inulin) and their impact on nutrient digestive utilization in health	Br. J. Nutr., 74: 289-302(1995)
ビートファイバー	ラット	2.20	The biological effects and digestible energy value of a sugar-beet preparation in	Br. J. Nutr., 64: 187-199(1990)
ペクチン	ラット		Hydrocolloid food additives and rat caecal microbial enzyme activities	Food Chem. Toxic., 22: 415-418 (1984)
ペクチン	ヒト		盲腸存在菌の酵素活性比較 ほぼ100%消化される 表題不明	Br. J. Nutr., 41: 477-485 (1979)
ペクチン	ラット	1.70	Determination of digestible energy values and fermentability of dietary fiber supplements: a European interlaboratory study in vivo	Br. J. Nutr., 74: 289-302(1995)
ペクチン	ラット	1.60	Estimation of available energy of dietary fibers by indirect calorimetry in rat	Eur. J. Nutr., 40: 23-29(2001)

ポリデキストロース	ラット	1.10	A method for estimating the available energy of incompletely digested carbohydrates in rats	J. Nutr., 122: 1425-1433 (1992)
ポリデキストロース	ヒト	1.00	Caloric utilization and disposition of [14C]polydextrose in man	J. Agric. Food Chem., 31: 389 (1983)
ポリデキストロース	ラット	1.00	Caloric utilization and disposition of [14C]polydextrose in rat	J. Agric. Food Chem., 29: 1181 (1981)
ポリデキストロース	ヒト	1.20	Gastrointestinal effects and energy value of polydextrose in healthy nonobese men	Am. J. Clin. Nutr., 59: 1362-1368 (1994)
ポリデキストロース	ラット	0.77	Usable energy of value of selected bulking agents	J. Food Sci., 58: 1176-1198 (1998)
ポリデキストロース	ヒト	1.30	表題不明	Rowlett Institute (unpublished)
ポリデキストロース	ラット	1.80	表題不明	Br. J. Nutr., 57: 235(1987)
ポリデキストロース	チキン	1.06	表題不明	J. Food Sci., 53: 120 (1993)
レジスタントスターチ	ラット	2.50	Estimation of available energy of dietary fibers by indirect calorimetry in rat	Eur. J. Nutr., 40: 23-29(2001)
レジスタントスターチ/エンドウ	ラット	3.00	Energy balance and energy values of α -amylase (EC3.2.1.1)-resistant maize and pea (Pisum sativum) starch in the rat	Br. J. Nutr., 63: 467-480(1990)
レジスタントスターチ/コーン	ラット	3.60	Energy balance and energy values of α -amylase (EC3.2.1.1)-resistant maize and pea (Pisum sativum) starch in the rat	Br. J. Nutr., 63: 467-480(1990)
ローカストビーンガム	ラット		Hydrocolloid food additives and rat caecal microbial enzyme activities	Food Chem. Toxic., 22: 415-418 (1984)
			盲腸存在菌の酵素活性比較	

いるが、そのエネルギー量は 0.5 kcal/g と評価していた。これを提示した文献は、わずかに 1 報に過ぎなかったが、このエネルギー値は組成や構造などから勘案すると、少し低すぎるように思われる。

一方、セルロースおよび寒天などの不水溶性食物繊維は腸内細菌による発酵分解を受け難いために、エネルギー量はほとんど 0 kcal/g に近いと評価されていた。見解が異なっていたのはアルギン酸ナトリウムで、エネルギーが 0 kcal/g に近い評価から 1 kcal/g 前後まであり、用いたアルギン酸の性状によって異なることが伺えた。小麦ふすまのエネルギー値も文献によって異なっていたが、これも用いた材料の違い、特に組成の差異によるものと考えられる。

世界で食物繊維のエネルギーがどのように扱われて、それがどのような方法に基づいて評価されたものであるかを文献的に調査し、国によって 0 kcal/g を用いたり、2 kcal/g を用いたりしていることを把握するとともに、FAO/WHO、米国、EU などにおいても食物繊維のエネルギー評価法が確立されていないことが明らかになった。

2) 食物繊維を含めた難消化性糖質の代謝的特徴

(1) 難消化性オリゴ糖の発酵分解によるエネルギー産生

難消化性であるフラクトオリゴ糖（別名ネオシュガー）は、表 2 に示すようにラット小腸粘膜ホモジネートを用いて *in vitro* で消化性を観察すると、マルトースやショ糖が水解されるのに対してフラクトオリゴ糖の主成分である GF₂ や GF₃ はほとんど水解酵素で水解されない(4)。

表 2 ラット小腸粘膜ホモジネートによるフラクトオリゴ糖の消化性の検討

	Sucrose	Maltose	GF ₂	GF ₃
	(nmole substrate hydrolyzed/hr/mg protein)			
Duodenum	2000 ± 390	9730 ± 1550	10.7 ± 1.9	3.91 ± 0.95
Jejunum	2740 ± 250	12420 ± 780	13.9 ± 1.1	3.45 ± 1.13
Ileum	1220 ± 20	10190 ± 650	10.9 ± 0.5	4.03 ± 1.37

Each value represents as the mean ± S. E. of 5 rats.

フラクトオリゴ糖で飼育したラットの腸粘膜を用いても GF₂ や GF₃ の水解性は観察されないため、フラクトオリゴ糖摂取による消化酵素の誘導はないもと考えられる。また、¹⁴C-フラクトオリゴ糖を通常ラット (conventional rat) の静脈に投与したところ、投与 8 時間後には投与量の 70% 以上が、24 時間後には 95% 以上が代謝されずに尿中へ排泄された(4)。ところが、¹⁴C-フラクトオリゴ糖を通常ラットへ経口投与すると、炭酸ガスへの代謝はショ糖に比べて 3~4 時間の time lag が生じるが、消化酵素で消化されないにもかかわらず、24 時間の代謝量はショ糖と同程度になり、差異が見かけ上観察されない(5, 6)。一方、抗生物質で処理して腸内細菌を減少させたラットや無菌ラット (germfree rat) へ ¹⁴C-フラクトオリゴ糖を同様に経口投与した場合には、ショ糖は通常ラットと同様に炭酸ガスへ代謝されたが、フラクトオリゴ糖はほとんど代謝されない(図 1)。さらに、¹⁴C-フラクトオリゴ糖を通常ラット盲腸へ直接投与した場合は、炭酸ガスへの代謝に time lag は観察されなくなる(図 2)。この経口投与と盲腸投与

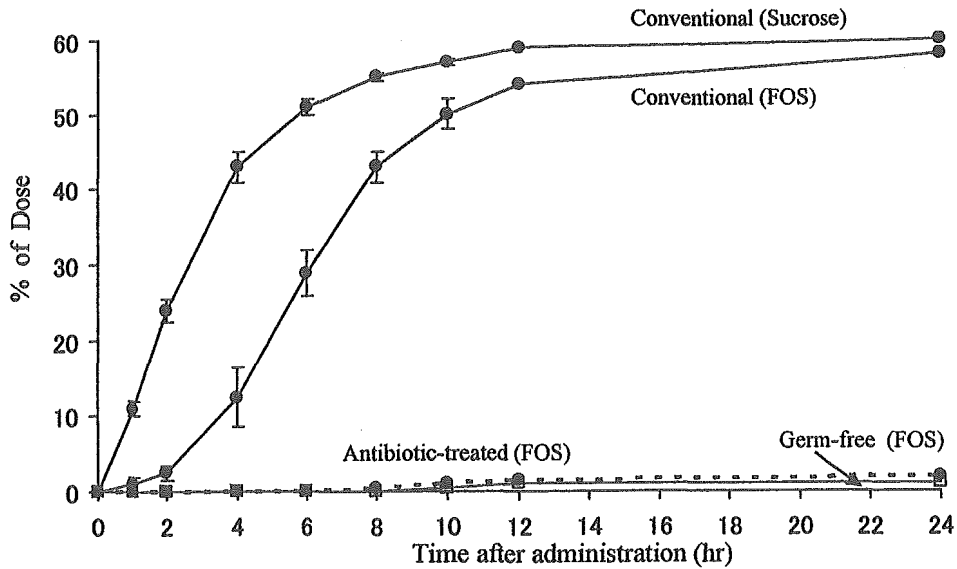


Figure 1. Cumulative expired ¹⁴CO₂ after oral administration of [¹⁴C]Fructooligosaccharide (FOS) or [¹⁴C]sucrose to conventional, antibiotics-treated and germ-free rats.

[¹⁴C]FOS (74 kBq per 4mg/0.4 mL) dissolved in 9 g of NaCl in 1 L of distilled water was administered orally to conventional, antibiotic-treated and germ-free rats (body weight about 230 g). Immediately after dosing, rats were transferred to individual metabolic cages that had a closed system made of glass (111 kBq per 4 mg/0.4 mL) was used as the control digestible sugar. Each point represents the mean ± SEM for three to four rats. FOS; Fructooligosaccharides.

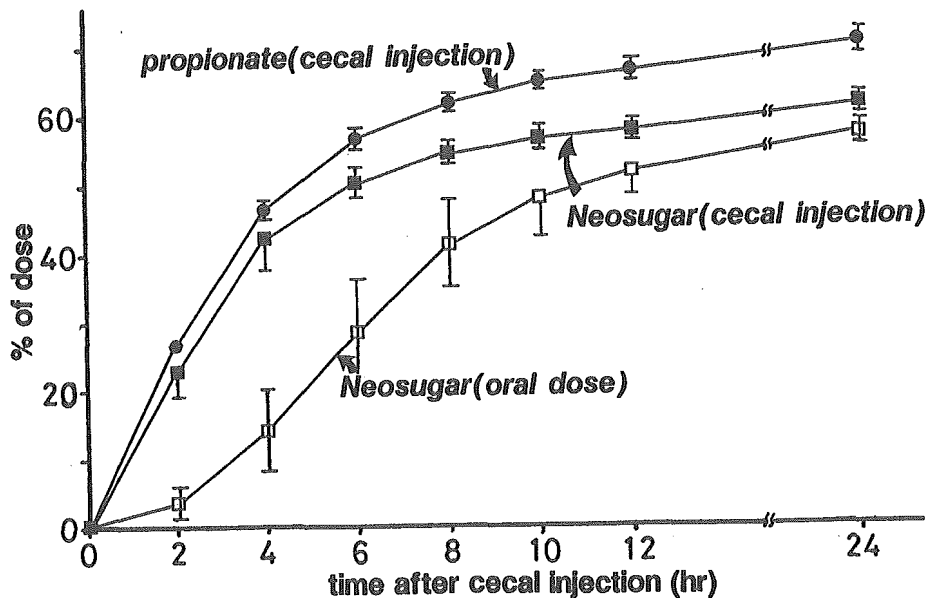


Figure 2 Cumulative expired ¹⁴CO₂ after the direct injection of [¹⁴C]fructooligosaccharide into the cecum of conventional rats.

[¹⁴C]fructooligosaccharide into the cecum of conventional rats. [¹⁴C]FOS (74 kBq per 4 mg/0.4mL) was injected directly into the cecum of conventional rats. The results of oral administration of [¹⁴C]FOS or [¹⁴C]sucrose are represented as Figure 1. Each point represents the mean ± standard error for three to four rats.