[*J. Appl. Glycosci.* (応用糖質科学), Vol. 46, No. 2, p. 159-165 (1999)]

解 説

L-アラビノースの栄養・生理的機能と用途

檜作 進

鹿児島大学 (890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

Nutritional and Physiological Functions and Uses of L-Arabinose

Susumu Hizukuri

Kagoshima University (1-21-40, Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan)

L-Arabinose is a common component in a plant cell wall and is widely distributed in the plant kingdom. It is a main component of cereal hemicellulose, such as corn, wheat, rye, and rice, pectic substances of beet and apple pulps, and some plant gums. The sugar occurs in the free state in the heartwood of coniferous trees, but its small amounts have been found also in several foods and beverages made from cereals and other plant sources such as bread, miso, beer and tea. L-Arabinose is produced by the mild acid hydrolysis of some plant gums, corn fiber, and beet pulps. The taste of L-arabinose is quite similar to sucrose, but approximately half the sweetness. Naturally occurring arabinose is an L-form, and it is not metabolized in animals; thus it is a noncaloric sugar. Furthermore, it strongly inhibits intestinal sucrase uncompetitively and consequently inhibits the absorption of sucrose from the small intestine. The addition of 2-3% of L-arabinose to sucrose causes about a 60% reduction of the digestion of sucrose in the small intestine. The nondigested sucrose and L-arabinose, possibly metabolized by intestinal microbes, produce short-chain fatty acids and thus function similar to dietary fiber. L-Arabinose, by this function, reduces the increase of the levels of blood sugar, insulin, triglycerides, and cholesterol by the ingestion of sucrose. Therefore it has great merits as a sweetener and a food additive to improve the obesity and to maintain good health.

近年、多種多様な機能を有する種々の糖質が開発されて、健康指向の高まりの中で私どもの大きな関心事となっている。カロリー源としての糖質の必要性は当然として、現在上市されているオリゴ糖や、食物繊維の生理・生化学的機能として、(1)う蝕性の改善、(2)カロリーの低減、(3)ビフィズス菌の増殖(整腸、ビタミン生産)、(4)便秘性の改善、(5)血清コレステロールの低下、(6)血清中性脂肪の低下、(7)血圧上昇の抑制、(8)カルシウムの吸収促進、(9)抗腫瘍性、(10)静・抗菌性、(11)植物のエリシター活性、(12)神経細胞の成長・維持、など多数の効果を列挙することができる。これらは、それぞれ独立したもののばかりではなく、お互いに関連しているものもあるが、糖質がいかに広くわれわれの健康増進に役立つか示している。とくに、糖尿病や心疾患など、成人の生活習慣病との関係が深いことが注目される。オリゴ糖の他に、もっと小さい単糖に

も興味深い機能が見出されている。ここでは、その1例として、植物細胞壁のヘミセルロースの主成分の一つであるL-アラビノースの栄養・生理的機能と用途について述べたい。

1. 自然界の分布

遊離の状態では、針葉樹の心材(赤味部分)に少量存在することが知られているが¹⁾、その他では未だよく知られていない。結合状態では、陸上植物の細胞壁多糖(アラビナン、アラビノキシラン、アラビノガラクトナンなど)として普遍的に存在する。たとえば、トウモロコシ外皮、トウモロコシ穂軸、コメ、ムギなどの穀類(Table 1)²⁾や、テンサイ、リンゴなどの植物細胞壁を構成するヘミセルロースやペクチン質に豊富に存在する。キャベツ、インゲン豆などの野菜にも比較的多く含まれている^{3,4)}(Table 2)。メスキット

Table 1. Components of hemicellulose fractions from cereal brans (%).

Component	Rice	Wheat	Corn
Cellulose	0.3	0.2	nd.
Non-cellulose polysaccharides	72.8	80.6	90.7
Glucose	3.5	5.7	2.5
Arabinose	28.9	26.4	24.2
Xylose	27.5	43.7	42.8
Galactose	4.0	1.5	5.8
Mannose	nd.	nd.	nd.
Uronic acids	9.1	1.5	14.5
Lignin	1.9	2.3	0.7
Total nitrogen	3.3	2.3	0.7
Ash	5.4	4.2	1.6
Arabinose/Xylose	1.05	0.60	0.56

Cited from Y. Ayano, *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, **45**, 209-219 (1992).

(マメ科) や櫻, 桃などのガム質の主成分でもある。その他, 針葉樹にはアラビノグルクロノキシランとして, 広葉樹よりも多く存在する。とくにカラマツにはアラビノガラクトンとして比較的多量存在することが知られている⁵⁾。

自然界に存在する糖は通常D型であるが, アラビノースはL型で, 主としてフラノース型で存在するが, 例外的にピラノース型の存在も報告されている⁶⁾。他に植物の細胞壁を構成しているメチルペン

トースのラムノース, フコースもL型である。ガラクトースはD型の他に, L型がコーン穂軸や亜麻種子に存在することが見出されている⁷⁻¹⁰⁾。これらL型の糖の機能の研究と用途開発は今後の興味深い課題であろう。

Fig. 1にトウモロコシ繊維画分のヘミセルロース⁹⁾, Fig. 2にテンサイのペクチン⁴⁾の構造を示す。トウモロコシ繊維画分では, 主鎖が β -1,4-結合のD-キシランで, その2位または3位に, またはその2カ所にL-アラビノースが側鎖として結合し, その61%が非還元末端に存在することが示唆されている⁹⁾。米, 麦などの穀類のヘミセルロースも類似の構造である。テンサイ⁶⁾やリンゴ¹¹⁾のペクチンは, 主鎖の β -1,4-結合のD-ガラクトウロン酸に介在するラムノースの3位, または4位, あるいはラムノースに結合するガラクトースの側鎖の3位に, α -1,5-結合のL-アラビノースのオリゴマーが結合し, その2位, または3位, またはその両者の位置にさらにL-アラビノースが側鎖として結合し, アラビノースの密な毛状のアラビナン領域を形成している。これらの例のように, L-アラビノースは自然界に豊富に存在する糖の一つである。

2. 製 法

前述のように, L-アラビノースは細胞壁多糖中に酸に弱いフラノース型で存在するので, これらのヘミ

Table 2. Major components of non-starch polysaccharides in plant products.

	Non-starch polysaccharides (Dry, %)	Components (%)				
		Cellulose	Arabinose	Xylose	Uronic acids	Others
Haricot bean	19.5	4.6	7.3	2.2	3.2	2.2
Cabbage (Red)	32.5	12.0	6.4	1.7	7.8	4.6
Cauliflower	21.5	5.5	4.3	1.2	5.7	4.8
Brussels sprouts	29.8	8.6	7.1	1.3	6.5	6.3
Rye flower	13.5	1.4	3.6	5.7	0.2	2.6
Wheat flower	9.4	1.6	2.7	3.7	0.2	1.2
Wheat bran	41.4	8.2	9.9	17.7	1.2	4.4
Wheat germ	17.9	3.1	5.1	6.8	0.7	2.2
Sweet corn	6.0	1.7	1.2	1.7	0.4	1.0
Soya bean brane	74.4	39.4	5.7	9.4	10.2	9.7
Pea	14.8	5.8	4.1	1.4	2.2	1.3
Sweet potato	8.1	3.3	0.7	0.3	2.0	1.8

*H. E. Englyst, S. A. Bingham, S. A. Runswick, E. Collinson and J. H. Cummings: Dietary fiber (non-starch polysaccharides) in fruit, and vegetables and nuts, and in cereal products, *J. Hum. Nutr. Diet.*, **1**, 247-286 (1986) and *J. Hum. Nutr. Diet.*, **2**, 253-271 (1989). H. E. Englyst and S. M. Kingman, Dietary fiber and resistant starch. A nutritional classification of plant polysaccharides, *Dietary Fiber*, D. Kritchevsky, C. Bonfield, and J. W. Anderson, eds., Plenum Publishing Corporation, New York, p. 49 (1990).

Fig. 1. Schematic structure of maize heteroxylan.
Modified from L. Saulnier *et al.* (1995).

Fig. 2. Hypothetical structure of sugar beet pectin.

Modified from A. G. J. Voragen *et al.*, carbohydrate as organic raw materials III (1996).

セルロース成分やガム質を，セルロースよりも比較的温和な条件で加水分解することによって得ることができる。たとえば，メスキトガムを1.0N規定硫酸で84-86℃で6時間処理後，塩化カルシウムで中和し，不溶性の残渣を濾過し，アニオンとカチオンのイオン交換樹脂で処理し濃縮し結晶化すると，32%の収量でL-アラビノース ($[\alpha]_D^{25} +98.5^\circ\text{C}$, mp 145-152℃) が得られる¹²⁾。コーンファイバー¹³⁾やガッチィガム¹⁴⁾，ビートファイバーを温和な条件で加水分解することに

よっても，優先的にL-アラビノースを遊離させることが可能で，容易に調製することができる。結晶化の条件により， α -L-アラビノース $\cdot\text{CaCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ¹⁵⁾， β -L-アラビノース $\cdot\text{CaCl}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ ¹⁶⁾， β -L-アラビノース $\cdot\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ のように塩化カルシウムと含水の結晶を形成する。

3. 機能

3.1 甘味度

L-アラビノースの甘味性は、砂糖のほぼ50%で味質は砂糖に近い。砂糖に10%程度添加しても、甘味度を調整すると判別し難い。

3.2 代謝

L-アラビノースは穀類のヘミセルロースの主成分である。したがって、専ら食糧や飼料としての価値、すなわちエネルギー源としての有効性が検討されてきた。その結果、摂取したL-アラビノースは小腸で吸収され難いことが、ネズミ¹⁷⁾やニワトリ¹⁸⁾、ブタ¹⁹⁾などで明らかにされている。多量のL-アラビノースをブタに与えた場合、摂取された量の13%はそのまま尿中に排泄され、30%は大腸に入り、腸内細菌で醗酵され、短鎖脂肪酸や乳酸などを生成する。小腸で行方不明の57%は、小腸で吸収されてエネルギー化されたのか、短鎖脂肪酸に醗酵されたのか、原因は明らかではない。しかし、後者の可能性が大きい。C¹⁴-L-アラビノースを人に静注した場合、6時間後に呼気から回収された¹⁴Cの量はわずかに0.8%で、一方、24時間内に尿中から回収された量は85%である²⁰⁾。一方、D-キシロースは呼気中に16%、尿中に35%回収される。この事実は、L-アラビノースは人体ではまったく利用されないが、一方、D-キシロースは若干エネルギー化されることを示している。したがって、L-アラビノースのエネルギーは、0カロリーでダイエットシュガーとして評価される。上述のブタにおけるL-アラビノースの代謝から考えると、人でもアラビノースは一部分は腸内細菌による醗酵の末、短鎖脂肪酸に変化し、利用されるものと考えられる。すなわち、可溶性食物繊維としての機能を発揮することが期待される。

3.3 シュクラゼの阻害

1974年にG. Semenzaら²¹⁾が、ラットの小腸のシュクラゼ (α -グルコシダーゼ) の作用機作の研究中に、この酵素がL-アラビノースやD-キシロースによって阻害されることを発見した。その後、Seriら^{22,23)}も、L-アラビノースとD-キシロースがラットや豚の小腸のシュクラゼを特異的に強力に阻害することを確認した。この作用は、非天然型のD-アラビノースやL-キシロースには認められず、阻害作用のあるのはいずれも天然型であることは興味深い。L-アラビノースとD-キシロースのシュクラゼの阻害は濃度依存的で、50 mMの濃度でそれぞれ56%と

52%の阻害を示す。両者の阻害型式は不拮抗型 (uncompetitive) で、L-アラビノースの阻害定数 (K_i) は2.0 mM^{22,23)}である。一方、砂糖に対する K_m はラットとラビットで8-10 mM^{24,25)}、ラット小腸の酵素で23.6 mMの高い値も報告されている²⁶⁾。これらの値は、L-アラビノースが、シュクラゼに対して基質の砂糖の4-5倍、さらにもっと高い親和性をもつことを示している。シュクラゼの阻害作用は、L-アラビノースについてD-キシロースも大きい。L-アラビノースの方がD-キシロースよりも体内の保持性が長く、効果が大きいことが示唆される。その理由は、L-アラビノースはD-キシロースに比べて吸収が悪いからである。これらのペントースには、 α -グルコシダーゼの阻害作用も認められているが、その効果は期待し難い。 α -グルコシダーゼの強力な阻害剤としては、アカルボース (acarbose) が知られている²⁷⁾が、この阻害型式は拮抗型 ($K_i=1.1 \mu\text{M}$) であり、L-アラビノースと明らかに異なる。シュクラゼの反応機構はピンポン・バイ・バイであると示唆されている^{21,25)}。L-アラビノースやD-キシロースの阻害作用は、その阻害形式から、酵素基質結合体に作用するもので、シュクラゼが基質の砂糖か、フルクトースを分離してグルコースを結合した状態に結合し、阻害作用を発揮するものと考えられる。

砂糖 (2.5 g/kg) を一晩絶食させたラットに与えると、15-30分後に血糖値は著しく上昇するが、同時にL-アラビノース (50-250 mg/kg) を与えると、血糖値 (Fig. 3) と血中インスリン濃度の上昇は顕著に抑制される。この抑制効果は濃度依存的である²²⁾。50 mg/kg と 250 mg/kg のL-アラビノースを与えると、

Fig. 3. Effects of L-arabinose on plasma glucose.*

Key: □, 2.5 g/kg sucrose; ▨, 50 mg/kg L-arabinose; ■, 250 mg/kg L-arabinose

* Modified from K. Sanai, K. Seri, and S. Inoue (1997).²²⁾

砂糖摂取 15 分後の血糖値の上昇は、コントロールに比べてそれぞれ 44.4%と 52.6%抑制される。実際、 ^{14}C -砂糖を与えた場合、3 時間と 6 時間でそれぞれ 20.7%と 35.3%の放射能が CO_2 として呼気から回収されるが、50 mg/kg の L-アラビノース投与では 3 時間および 6 時間でそれぞれ 59%と 32%抑制される。250 mg/kg では、3 時間と 6 時間でそれぞれ 73.2%と 45.6%の高い抑制率を示すことが報告されている。明らかに砂糖の分解阻害による吸収の阻害があり、 ^{14}C -砂糖摂取 2 時間後、コントロール群では胃の残存率が 1.9%、小腸には 7.7%の ^{14}C -が残存したが、一方、L-アラビノース 50 mg/kg の投与では、小腸に 28.7%の ^{14}C -が残存することが認められている。また、盲腸にも ^{14}C -の放射能が増加することが観察されており、これらの量は砂糖摂取 6 時間後には、いっそう顕著である²²⁾。

摂取された砂糖は小腸粘膜のシュクラゼの作用によって、グルコースとフラクトースに分解されて吸収されるが、L-アラビノースや D-キシロースが存在すると分解が妨げられる結果、吸収されず、小腸で分解されないまま大腸に達することが示唆される。小腸で分解を免れた砂糖が、大腸で腸内細菌の作用により短鎖脂肪酸になるなどの変化を受けるのか、そのまま排泄されるのかについては未だ明らかではない²³⁾。しかし、前者の可能性が高い。ラットにプロピオン酸を投与したとき、血清コレステロールの濃度が低下することが示されている²⁸⁾。したがって、L-アラビノースによる血清コレステロール濃度の低下も期待される。実際、これを裏付けるようにラットで砂糖 20%を含む飼料に L-アラビノースを 2.5%加えると、血清コレステロールの濃度がほぼ 10%低下することが認められている（藤井、未発表）。ラットで L-アラビノースを豊富に含むトウモロコシ外皮^{29,30)}や小麦フスマ³¹⁾の水溶性ヘミセルロースに、血清コレステロールの上昇抑制作用が認められている。この作用に L-アラビノースが直接関与している可能性が高いと考えられる。

血中インスリン濃度の上昇は、肥満を招くことが示唆されている。前述のように、L-アラビノースと D-キシロースは砂糖摂取時における血糖値の上昇と同時に、インスリン濃度の上昇をも抑制する。ラットでは、D-キシロースをおもな糖質として砂糖を使用した飼料に添加することにより、摂取量に依存して、後腹膜や副睾丸の周囲の脂肪の増加を低減させることが示唆されている³²⁾。L-アラビノースについては検討さ

れていないが、藤井ら（未発表）は同様の効果があることを認めている。したがって、L-アラビノースや D-キシロースは肥満や、さらには高血圧、高脂血症などの予防に役立つと考えられる。

小麦のヘミセルロース（食物繊維）がラットの消化管を通過すると、残渣中のヘミセルロースの L-アラビノースや D-キシロースが減少することが報告されている³¹⁾。すなわち、消化管中でこれらペントース、またはペントースがオリゴ糖として可溶化し、吸収または腸内細菌に利用されることを示唆している。L-アラビノースは末端に存在し分解されやすいことから、胃の酸性下で分離し、遊離糖として食物繊維の機能と理解されている機能、すなわち、血糖の上昇抑制、血清中の中性脂肪やコレステロール濃度の低減、腸内ビフィズス菌の増殖などの本質的な作用をしている可能性が示唆される。

3.4 カルシウムの吸収促進

L-アラビノースには、ネズミの実験でカルシウムの吸収を促進する作用がある。この効果は D-アラビノースやその他難吸収性糖においても認められる³³⁾。この作用は盲腸切除ラットでも認められたことから、L-アラビノースのような難吸収性糖は小腸でのカルシウムの吸収を促進するのではないかと考えられる。

4. 用 途

砂糖はわれわれの味覚に最も適した甘味剤として、また、エネルギー源として重要な糖質である。食生活が豊かになるとともに消費が増大し、先進国では過剰摂取による弊害が指摘されている。砂糖は小腸のシュクラゼでグルコースとフルクトースに分解されて吸収されるので、砂糖の摂取は血糖値の上昇と血中インスリン濃度の上昇をもたらす、肥満の原因になる。したがって、糖尿病や心疾患などの成人病の誘因になることから、アスパルテームやステビアなどのノンカロリーの代用甘味剤が開発されてきた。L-アラビノースは、これらの代用甘味剤と異なり、砂糖と併用することによって砂糖の代謝を抑制するユニークな作用をもっている。L-アラビノースの味質は砂糖に近く、少量の添加では味質の変化は感知され難い。したがって、砂糖を甘味剤として欠かせない種々の食品群に L-アラビノースを少量添加することによって、従来の甘味性を変化させることなく健康的な製品を提供することが可能になる。コーヒー、ジュースなどの各種ドリンク、アイスクリームやシャーベットなどの冷菓や

ヨーグルトなどの乳製品、饅頭、大福餅、求肥などの和菓子、チョコレート、ケーキ、カステラなどの洋菓子、パンなどへの広い用途が期待される。砂糖と異なり還元糖であるので、加熱により褐変を起こしやすい傾向はあるが、通常の調理条件下では許容される程度である。メイラード反応を利用して、肉のフレーバーの生成にも用いられる。

肥満人口は1980年以降急速に増加しつつあり、関係者の間で大きな関心と呼んでいる³⁴⁾。肥満の原因として、エネルギーの過剰摂取があげられるが、食物の過剰摂取をもたらす因子や、逆に摂取したエネルギーを無駄にする代謝機構などの研究が進んでいる³⁵⁾。L-アラビノースの摂取はこの問題の解決の一つの重要なキーになるのではないかと期待される。

前述のように、L-アラビノースは、植物の細胞壁を構成するヘミセルロースやガム質に普遍的に存在し、われわれが主食とする米や小麦などの穀類の繊維質にとくに多く存在する。これらの繊維質では、L-アラビノースはアラビノキシランとして、D-キシロースの β -1,4-結合の主鎖に、2位または3位で結合して側鎖を形成している。この側鎖の結合は、酸や熱に対して弱く、容易に主鎖から分離する。最近、柴沼ら(柴沼 清, 大崎繁満, 檜作 進, 未発表)は、少量ではあるが、穀類を原料とする食品中に遊離で存在することを見出した。すなわち、味噌やパン、ビール、緑茶、紅茶などに少量存在し、古くから食生活の中でなじんできた物質である。積極的に各種食品にL-アラビノースを強化することによって、食品の機能を大きく高めることが可能である。効果は劣るが、D-キシロースにも同様な作用がある。したがって、同じ目的で両者の混合物を用いることもできる。

5. む す び

植物の繊維質、ヘミセルロース、リグニンは多様な成分やそれらの機能に期待されながら、トウモロコシファーバー、麦のフスマ、ジャガイモやサツマイモの澱粉粕、テンサイやサトウキビのパルプなど、未だ十分利用されていないものが多い。これらは化石資源に代わる21世紀の生物資源として広く利用されねばならない。ここではL-アラビノースに限って述べたが、その他のヘミセルロースの構成糖にも特異な用途がある。これらの今後の開発が切に望まれる。

貴重なデータのご提供とご助言をいただいた、合同酒精㈱の世利謙二博士に深謝する。

これは科学技術庁の平成9年度科学技術振興調整費による「地域先導研究：地域資源の高機能化と環境調和型利用システムの基盤研究」の一環である。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- 1) W. Pigman: in *The Carbohydrates, Chemistry, Biochemistry, Physiology*, W. Pigman ed., Academic Press, New York, p. 79 (1957).
- 2) 綾野雄幸: 日本栄養・食糧学会誌, **45**, 209-219 (1992).
- 3) H. N. Englyst, S. A. Bingham, S. A. Runswick, E. Collinson and J. H. Cummings: *J. Hum. Nutr. Diet.*, **1**, 247-286 (1988); **2**, 253-271 (1989).
- 4) H. N. Englyst and S. M. Kingman, in *Dietary Fiber*, D. Kritchevsky, C. Bonfield and J. W. Anderson, eds., Plenum Publishing Corporation, New York, p. 49-65 (1990).
- 5) 越島哲夫: 「木材の化学」, 原口隆英他編集, 文永堂, 東京, p. 66 (1985).
- 6) I. J. Colquhoun, M.-C. Ralet, J.-F. Thibault, C. B. Faulds and G. Williamson: *Carbohydr. Res.*, **263**, 243-256 (1994).
- 7) R. L. Whistler and W. M. Corbett: *J. Am. Chem. Soc.*, **77**, 6328-6330 (1955).
- 8) R. L. Whistler and J. N. BeMiller: *J. Am. Chem. Soc.*, **78**, 1163-1165 (1956).
- 9) L. Saulnier, C. Marot, E. Chanliaud and J.-F. Thibault: *Carbohydr. Polym.*, **26**, 279-287 (1995).
- 10) R. M. Robert and E. Harter: *Phytochem.*, **12**, 2679-2682 (1973).
- 11) H. A. Schols, M. A. Posthumus and A. G. J. Voragen: *Carbohydr. Res.*, **206**, 117-129 (1990).
- 12) F. B. Cramer: *J. Franklin. Inst.*, **256**, 93-94 (1953).
- 13) 柴沼 清, 高峯和則, 大崎繁満, 檜作 進: 応用糖質科学 (講演要旨), **45**, 337 (1998).
- 14) R. L. Whistler: in *Industrial Gums, Polysaccharides and Their Derivatives*, 3rd ed., R. L. Whistler and J. M. BeMiller, eds., Academic Press, New York, p. 309 (1993).
- 15) W. C. Austin and J. P. Walsh: *J. Am. Chem. Soc.*, **56**, 934-935 (1934).
- 16) J. K. Dale: *J. Am. Chem. Soc.*, **56**, 932-934 (1934).
- 17) F. Cori: *J. Biol. Chem.*, **66**, 691-715 (1925).
- 18) P. V. Wagh and P. E. Waibel: *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **124**, 421-424 (1967).
- 19) J. B. Schutte, J. de Jong and E. J. van Weerden: *British Journal of Nutrition*, **68**, 195-207 (1992).
- 20) S. Segal and J. B. Foley: *J. Clin. Invest.*, **38**, 407-413 (1959).
- 21) G. Semenza and A.-K. von Balthazar: *Eur. J. Biochem.*, **41**, 149-162 (1974).
- 22) 讃井和子, 世利謙二, 井上修二: 日本栄養・食糧学会誌, **50**, 133-137 (1997).
- 23) K. Seri, K. Sanai, N. Matsuo, K. Kawakubo, C. Xue and S. Inoue: *Metabolism*, **45**, 1368-1374 (1996).

- 24) Y. Takesue : *J. Biochem.*, **65**, 545-552 (1969).
- 25) A. Cogori and G. Semenza : *J. Biol. Chem.*, **250**, 7802-7809 (1975).
- 26) 浅野敏彦, 吉村康美, 樺田清彦 : 日本栄養・食糧学会誌, **49**, 157-162 (1996).
- 27) E. Truscheit, W. Frommer, B. Junge, L. Muller, D. D. Schmidt and W. Wingender : *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **20**, 744-761 (1981).
- 28) 海老原清 : 第2回食物繊維研究会報告集, 32-39 (1990).
- 29) 綾野雄幸, 太田富貴雄, 渡辺幸雄, 中村 強, 滝沢まゆみ : 栄養と食糧, **35**, 431-439 (1982).
- 30) 竹内政保, 菅原正義, 高庄敏行, 江頭祐嘉合, 真田宏夫, 綾野雄幸 : 日本食品工業学会誌, **38**, 981-989 (1991).
- 31) 佐々木康人, 玉井洋介, 林 洋一, 窪田正二郎, 藤尾高志, 小笠原武雄, 江頭祐嘉合, 真田宏夫, 綾野雄幸 : 日本栄養・食糧学会誌, **44**, 461-470 (1991).
- 32) 浅野敏彦, 吉村康美, 垣内利仁, 樺田清彦, 寺地 務, 特開平 7-309765 (1994).
- 33) R. Brommage, C. Binacua, S. Antille, and A. L. Carrie : *J. Nutr.*, **123**, 2186-2194 (1993).
- 34) G. Taubes : *Science*, **280**, 1367-1368 (1998).
- 35) T. Gura : *Science*, **280**, 1369-1370 (1998).

(平成10年12月17日受付;平成11年2月18日受理)