総 説

穀類食物繊維の食品・栄養学的研究[†]

綾 野 雄 幸

千葉大学園芸学部生物生産科学科

Dietary Fiber in Cereals : Nutritional and Physiological Aspect

Yūkō AYANO

*Department of Bioproduction Science, Faculty of Horticulture, Chiba University,
Matsudo 271*

穀類は食物繊維 (dietary fiber, 以下 DF と略す) の大きな給源である。現代の食生活では、食味上、DF を多く含む外皮部分は精製の過程で除去されることが多く、たとえば、米は果皮、種皮、糊粉層の部分、すなわち「ぬか」層を除いて精白米とし、小麦も同じく糊粉層までの「ふすま」を除き、胚乳部だけを粉化して食用とする形態がとられている。したがって、精白米や精白小麦粉は DF の給源として十分な役割を果たしていない。欧米先進国における DF 摂取量の減少は、ここ 100 年の間に穀類の精製技術が発達し、その結果、高度に精白されたものを食べるようになったことに原因があるといわれる。わが国の食生活においても、精白度の低いものは利用されることが少ない。地方衛生研究所全国協議会が国民栄養調査から算出したデータによると¹⁾、日本人の 1 日当りの DF 摂取量は、昭和 30 年 22.20 g に対し、昭和 60 年 17.33 g で、ここ 30 年間に約 20% も減少している。食品群別にみると、穀類からの DF 摂取量は約半分に減少しており、穀類が DF の給源として大きな役割を果たしているか否かは疑問である。

穀類の DF は、ヒポクラテスの時代から小麦ふすまが便秘に有効な整腸作用をもたらすことで知られており、今日の DF の見直しのきっかけをつくった英国の Burkitt²⁾ は、ペントース類を豊富に含む穀類の DF は便の容積や軟らかさを増し、整腸にすぐれた効果のあることを指摘している。Morris³⁾ は英国の中年の健康成人について、DF の種類、摂取量と虚血性心疾患発生と

の関係について疫学調査を行い、穀類の DF 摂取量が多い場合、発症件数が少ないことを報告している。以上は、穀類に含まれる DF の生理作用についての一面であるが、その他にもいろいろな生理作用をもつものと想像される。

筆者は、昭和 52 年から、現代の食生活において利用されることが少なくなっている穀類外皮 (米ぬか、小麦ふすま、とうもろこし外皮) および麦類に含まれる DF について、食品・栄養学的に検討を加え、とくに穀類外皮を DF 強化用の素材として有効に利用する方法ならびに生理作用について研究を続けてきた。以下、これらの研究概要について述べることにする。

1. 穀類外皮とコレステロール代謝

玄米の搗精時に副産物として得られる米ぬか (玄米の約 8%)、小麦を製粉するとき副生する小麦ふすま (小麦の約 20%)、とうもろこし粒からデンプン採取時に wet milling 工程から得られるとうもろこし外皮 (とうもろこし粒の約 5.5%) は、表 1 に示すように DF 含量が高い。

これら穀類外皮は、そのまま粉化しただけの形態で、食餌中に添加して実験動物やヒトに投与した際、その生理作用はほとんど便量の増加、便秘改善程度しか認められておらず、虚血性心疾患、動脈硬化症などのリスクファクターとなる血清コレステロール濃度を低下させるような効果は見いだされていない。たとえば、小麦ふすまを材料とした研究では、血清コレステロール濃度の改善に否定的な結果が報告されている^{4)~8)}。小麦ふすま以外でも、とうもろこし外皮については Lee⁹⁾、海老原⁸⁾、綾野¹⁰⁾が、脱脂米ぬかについては綾野¹¹⁾が血

[†] 本総説は平成 3 年度学会賞の受賞の対象となったものである。

〒271 松戸市松戸 648

現在：千葉大学名誉教授

表 1. 米ぬか、小麦ふすまおよびとうもろこし外皮の食物繊維の分析例

(乾物%)

	食物繊維*	セルロース	ヘミセルロース	リグニン
米ぬか	26.0	7.6	14.0	4.4
小麦ふすま	47.2	11.5	32.1	3.6
とうもろこし外皮**	59.5	14.7	43.8	1.0

* Van Soest 法による NDF (neutral detergent fiber) 値を示す。** コーンスターチ製造の際の副産物。

清コレステロール濃度の改善に無効であることを報告している。しかし、綾野ら¹⁰⁾⁻¹²⁾は、穀類外皮を neutral detergent fiber (NDF) の形態にし、高コレステロール飼料(ショ糖を糖質源として、コレステロール 1%, コール酸ナトリウム 0.25% を含む)に 5% レベルで添加してラットに投与すると、血清コレステロール濃度の上昇抑制作用が認められた。ちなみに、NDF 標品は Van Soest の DF 定量法¹³⁾を応用し、穀類外皮を酵素処理してデンプンなどを除去した後、ラウリル硫酸ナトリウムを主材とした中性デタージェント溶液を用いて煮沸、洗浄して調製したもので、図 1, 2 は、米ぬか、とうもろこし外皮から分離した NDF 標品を走査型電子顕微鏡で観察したものである。両標品とも細胞内容物が中性デタージェント溶液で洗い流され、細胞壁部分がほぼ、そのままの形でとり出されていることがわかる。

穀類外皮を NDF の形態にすると、血清コレステロール濃度の上昇抑制効果が発現するのは、次のように考えられる。穀類外皮そのままでは、細胞壁はデンプン、タンパク質に覆われ、これらが、まず消化管内で消化酵素により分解され、細胞壁面が露出した状態にならなければ、DF の特性が発揮されないことと、穀類外皮中には DF 以外の成分でコレステロール濃度の上昇を促進させる物質の存在が考えられる。江頭ら¹⁴⁾は、脱脂小麦ふすまのエタノール抽出物中にラットの血清コレステロール濃度上昇促進物質の存在を認め、前田ら¹⁵⁾は、ソルガム(モロコシ)の冷水抽出物中に、ラットの血清ならびに肝臓コレステロール濃度を上昇させ、トランスアミナーゼ活性を有意に増大させる物質の存在を認めている。NDF の形態にすると、生理効果と拮抗的に作用するこれらの夾雑物が除かれることと、DF の特性が発揮されやすくなり、コレステロールや胆汁酸に対する吸着能も高まることになる。綾野ら¹²⁾が、米ぬか由来の NDF 標品について、*in vitro* におけるコール酸ナトリウムの吸着能を調べた結果は、期待されるほど強くなく、むしろ消化管内で NDF 標品から溶出されやすくなったヘミセルロース B 画分の生理作用に、NDF 標品の吸着性が相乗的に加味され、効果が発現したものと推察される。穀類のヘミセルロース B 画分の生体内での溶出とコレステロール

濃度の上昇抑制作用については後述する。

2. 穀類外皮の精製と生理作用

以上のような理由で、穀類外皮から DF 素材を開発する場合、たんに粉化しただけで利用するよりも、NDF の形態に近づけるよう精製処理を施し、粉化するのがよい。この処理には、① 酵素剤を用いる方法、② 水中での高速攪拌、洗浄による物理的方法(実験室的にはミキサー処理により水中攪拌と洗浄を繰り返す)が考えられる。穀類外皮を精製して夾雑物を除き、DF 含量を高めることは、供給源である穀類によって、それぞれの物理化学的特性と生理機能を素材に付与することになる。しかも、DF 含量が高まるため、食品への添加量は少なくよく、品質面への影響も少なく、DF 素材の利用範囲は広まるであろう。現在、わが国では、とうもろこし外皮や小麦ふすまを②の物理的方法で精製処理した DF 素材が開発されている。表 2 は、両 DF 素材の成分分析値を未精製のものと比較したものである。両素材とも精製処理により DF 含量は高まり、精製とうもろこし外皮(refined corn bran, 以下 RCB と略す)では 90.0%、精製小麦ふすま(refined wheat bran, 以下 RWB と略す)では 81.1% を示し、脂質やタンパク質含量が低くなっている。なお、RWB は精製の過程でエタノール洗浄が施されているため、脂質含量が著しく低くなっている。

これら精製穀類外皮をラットに投与し、成長、可消化栄養素の消化吸収に及ぼす影響、消化管内での DF 成分や形態の変化について調べた。竹内ら¹⁶⁾は、 α -コーンスターチを糖質源とした飼料に RCB を DF 5% レベルで添加して幼ラットに 28 日間投与した。その結果、RCB 群は DF 無添加群に比べ、タンパク質と脂質の見かけの消化吸収率はいくらか低下したが、成長に悪影響はみられず、むしろ、飼料摂取量は増加し、体重増加の傾向を示した。そして腸管を通った RCB の DF 分解率は約 18% で、非セルロース多糖類の溶出が認められた。図 3, 4 は、消化管通過後における RCB の形態変化を走査型電子顕微鏡で投与前と比較したもので、消化管を通じたものは投与前と比べ、細胞壁は薄くなり、壁面の

図 1. 米ぬかからとり出した細胞壁を構成する食物繊維 (×500)¹²⁾
セルロース 29%, ヘミセルロース 47%, リグニン 16% からなる。

図 3. 投与前の精製とうもろこし外皮 (RCB) (×3,000)¹⁶⁾

図 2. とうもろこし外皮からとり出した細胞壁を構成する食物繊維 (×500)¹⁰⁾
セルロース 25%, ヘミセルロース 68%, リグニン 2% からなる。

図 4. RCB を飼料中に DF 5% レベルで添加してラットに投与し、糞中から回収したもの (×3,000)¹⁶⁾

表 2. 穀類 DF 素材 (高速攪拌, 洗浄処理) 成分組成¹⁸⁾²¹⁾ (%)

	とうもろこし外皮		小麦ふすま	
	未精製	精製 (RCB)	未精製	精製 (RWB)
水 分	4.9	4.1	10.3	8.6
粗タンパク質	11.9 (12.5)*	5.1 (5.3)	16.5 (18.4)	11.0 (12.0)
粗脂肪	5.2 (5.5)	3.0 (3.1)	3.0 (3.3)	0.05 (0.05)
灰 分	0.4 (0.4)	0.3 (0.3)	5.7 (6.4)	4.6 (5.0)
食物繊維**	67.8 (71.3)	86.3 (90.0)	47.3 (52.7)	74.1 (81.1)

* 乾物 %, ** Prosky 法による。

平滑さが失われた。Dintzis ら¹⁷⁾は、とうもろこし外皮がヒトの消化管内で受ける変化について調べているが、とうもろこし外皮は小麦ふすまや大豆外皮に比し、消化管内で受ける変化は少なく、走査型電子顕微鏡による観察でも形態的に目立った変化はなかったと報告している。この研究でのとうもろこし外皮は、dry milling 工程から採取した 18~30 mesh の粗い粒子のものである。それに対し、RCB は 100 mesh の微粒子で、図 3 にみられるように細胞壁が露出しているため、消化液や腸内細菌などにより影響を受けやすく、未精製のとうもろこし外皮とは異なった挙動を示すものと考えられる。佐々木¹⁸⁾は、RWB を飼料中に DF 5% レベルで添加してラットに投与し、各消化管ならびに糞中から回収したふすま残渣の構成糖について調べた (図 5)。RWB は消化管通過に伴い、対比試料として投与した未精製小麦ふすまに比べ、ヘミセルロース構成糖であるキシロースとアラビノースが減少した。RWB の場合も、消化管内で非セルロース多糖類の溶出が起きているわけで、糞から回収した RWB 残渣の走査型電子顕微鏡による観察では、細胞壁の一部崩壊が認められた (図 6, 7)。以上のように、RCB や RWB は消化管通過中に、細胞壁マトリックスからヘミセルロースを主体とした非セルロース

多糖類が溶出されやすい組織になっており、不溶性 DF の機能以外に、消化管中で溶出した非セルロース多糖類が水溶性 DF として生理作用に関与するものと考えられる。

また、RCB には変異原物質に対する吸着性、不活性化能が見いだされている。Takeuchi ら¹⁹⁾は、サルモネラ菌を用いたエームス法による試験で、RCB は Trp-P-1, Glu-P-1 などの焼け焦げ変異原物質や dinitropyrene を強く吸着し、不活性化することを認め、dinitropyrene の吸着、不活性化率は 91.6% を示したという。Morotomi ら²⁰⁾も、RCB はセルロースやりんごパルプなどに比し、吸着能が高いことを報告している。

次に、これら精製穀類外皮の生理作用について、ラットならびにヒトで検討された結果を紹介する。RCB や RWB を高コレステロール飼料に DF 5% レベルで添加

図 5. 消化管ならびに糞中から回収したふすま残渣の構成糖比¹⁸⁾

図 6. 投与前の精製小麦ふすま (RWB) ($\times 1,000$)¹⁸⁾

図 7. RWB を飼料中に DF 5% レベルで添加してラットに投与し、糞中から回収したもの ($\times 1,500$)¹⁸⁾

表 3. 腸内通過と糞の水分含量²²⁾

	食物繊維無添加群	小麦ふすま群	RCB 群
腸内通過時間 (h)			
摂取後、糞が出来るまでの時間	17.7±1.5	14.3±1.5	14.2±1.1
出終わるまでの時間	50.8±1.2 ^{b)c)}	29.0±2.1 ^{a)}	32.5±1.2 ^{a)}
糞の水分含量 (%)	40.6±1.6 ^{b)c)}	48.7±1.7 ^{a)}	46.0±0.3 ^{a)}

平均値±標準誤差を示す。a) 食物繊維無添加群と有意差あり ($p<0.05$)、b) 小麦ふすま群と有意差あり ($p<0.05$)、c) RCB 群と有意差あり ($p<0.05$)。

してラットに投与した試験では、両穀類外皮とも未精製のものに比し、血清コレステロール濃度の上昇抑制効果が発現した¹⁸⁾²¹⁾。また、RCB を α -コーンスターチを糖質源とした飼料に DF 5% レベルで添加してラットに投与し、食物残渣の腸内通過時間を測定したところ、対比試料の小麦ふすま (未精製) と同程度に腸内通過時間を短縮し、糞の水分含量を増加させた²²⁾ (表 3)。小麦ふすまの場合、精製の有無は腸内通過時間に影響を及ぼさなかった¹⁸⁾。Sugawara ら²³⁾は、RCB を成人男子に 1 日 6g ないし 12g 投与し、腸内菌叢に及ぼす影響について試験している。それによるとビフィズス菌を始めとして菌叢に大きな変化は認められなかったが、便量が著しく増加し、発がんに関与するといわれる β -glucuronidase 活性が大きく低下し、腸内環境の改善がはかられたという。食品への利用として、竹内ら²²⁾は、RCB を添加したスティック状のビスケットを調製し、女子大生を被験者 (212 名) として、1 日 1 日ビスケット 12 本 (供試ビスケット約 31g, DF 約 5.5g を含む) を補助食品として摂食させ、その前後における排便状況について調べた (図 8)。その結果、テスト前に毎日排便のあるヒトは 37.6% であったが、1 週間後には 55.7%、2 週間後には 60.2% に増加した。逆にテスト前に便秘症 (排便が 3 日ないし 4 日に 1 回) とみなされたヒトは 25.8% いたが、1 週間のビスケット摂取により 59.6% のヒトに便秘改善効果が認められた。供試ビスケットは品質的には普通ビスケットと遜色なく、食味、食感、DF 添加によってもほとんど損なわれなかった。山田²⁴⁾は、RCB を主な DF 源とし、これに可溶性のキトサンおよびアルギン酸を少量配合して調製した市販ビスケット (DF 20.0% を含む、商品名「ヘルケッ」) を、高脂血症患者に補助食品として 1 日 25g (DF として 5g)、5 週間投与した。その結果、患者全般に血清コレステロール値が低下し、動脈硬化指数の改善、血圧低下の傾向が認められ、便秘気味の患者では改善効果が認められたという。このことは、RCB は他の DF 素材との併用により生理効果がいっそう強められることを示している。

図 8. 精製とうもろこし外皮 (RCB) 添加ビスケットによる便秘改善効果²²⁾

3. 穀類に含まれるヘミセルロースの生理作用

綾野ら¹²⁾は、ラットのコレステロール代謝に及ぼす脱脂米ぬかの影響について検討した実験で、脱脂米ぬかを NDF の形態にしてラットに投与すると、血清コレステロール濃度の上昇抑制作用を示したが、NDF 中のヘミセルロース画分を除いた acid detergent fiber (ADF) の形態にして投与すると、粉末セルロースと同様、上昇抑制作用を示さなかった。この結果から、両標品の成分的な違いであるヘミセルロース画分が血清コレステロール濃度の上昇抑制に何らかの形で関与しているものと推定した。そこで、「ぬか」、「ふすま」中に含まれるヘミセルロース画分を抽出、分離し、それら標品の生理作用について検討することを試みた。穀類に含まれるヘミセルロースの生理作用に関しては、Vijayagopalan ら²⁵⁾の研究や筆者らの一連の研究以外にはほとんど見当たらない。ちなみに、Vijayagopalan らの研究は、玄米には血中のコレステロール濃度を低下させる作用があり、その有効成分は米ぬかからアルカリ抽出して得たウロン酸を含む多糖類であるという。

米、小麦、とうもろこしなど単子葉植物の細胞壁に含まれるヘミセルロースの主成分は、アラビノキシラン系多糖で、 β -1,4 結合したキシラン主鎖にアラビノースが α -1,3 結合した基本構造をもっている。ヘミセルロースは細胞壁からベクテン性多糖を抽出した後、希アルカリ液で処理することにより抽出されるが、Southgate²⁶⁾が

表 4. 穀類外皮からアルカリ抽出、分離したヘミセルロース標品の成分組成²¹⁾²⁷⁾²⁸⁾

(乾物%)

	ヘミセルロース標品		
	米ぬか	小麦ふすま	とうもろこし外皮
セルロース	0.3	0.2	nd.
非セルロース多糖類	72.8	80.6	90.7
グルコース	3.5	5.7	2.5
アラビノース	28.9	26.4	24.2
キシロース	27.5	43.7	42.8
ガラクトース	4.0	1.5	5.8
マンノース	nd.	nd.	nd.
ウロン酸	9.1	1.5	14.5
リグニン	1.9	2.3	0.7
全窒素	3.3	2.3	0.7
灰 分	5.4	4.2	1.6

示した DF の分画法から定義すると、抽出時のアルカリ濃度、水に対する溶解性などから A, B, C の 3 種に区分される。このなかでヘミセルロース B 画分は高度に枝分かれした多糖類で水に可溶である。筆者らは、穀類外皮中のヘミセルロース B 画分に焦点を絞って、希アルカリによる抽出、分離を試みた¹⁰⁾¹¹⁾。抽出剤には 0.5 N 水酸化ナトリウム溶液を用い、室温で 18 時間振とう、抽出し、遠心分離して得た抽出液を酢酸で中和、トリクロル酢酸で除タンパク後、透析、次に 4 倍量のエタノールを加えて沈殿させたものを凍結乾燥して標品とした。表 4 は、米ぬか、小麦ふすま、とうもろこし外皮からそれぞれ抽出、分離したヘミセルロース標品の成分分析例²¹⁾²⁷⁾²⁸⁾である。各標品とも非セルロース多糖類が大半を占め、構成糖はキシロースとアラビノースが主なもので、ウロン酸もかなり含まれている。次に、これら各標品の生理作用について述べる。

1) 血清コレステロール濃度の上昇抑制作用

脱脂米ぬか、小麦ふすま、とうもろこし外皮から抽出、分離した各ヘミセルロース標品を高コレステロール飼料に添加してラットに投与したところ、0.5% レベルの添加で血清コレステロール濃度の上昇を有意に抑制した¹¹⁾。そこで、ヘミセルロース標品による血清コレステロール濃度の上昇抑制の作用機作を明らかにするため、青江ら²⁷⁾は、表 4 に示した米ぬかヘミセルロース (以下、RBH と略す) 標品について、すでに作用機作が推定されている高メトキシシルベクチン (Brown NF Unipeptin) と比較検討した。高コレステロール飼料 (コレステロール 1%, コール酸ナトリウム 0.25% を含む) に対照群のセルロース 4% レベルの半分を RBH 標品ならびに高メトキシシルベクチンでそれぞれ置換してラットに 9 日

間投与した。その結果、表 5 に示すように両群とも血清コレステロール濃度の上昇抑制作用を示したが、RBH 群では肝臓コレステロールの蓄積は抑制されなかった。肝臓コレステロール蓄積率、大腸および糞中の中性ステロイド量、見かけの中性ステロイド吸収率の成績から、その作用機作は両群間で異なると考えられる。高メトキシシルベクチンは、これまでの報告^{29)~31)}が示すとおり、外因性コレステロールの吸収を阻害することにより、中性ステロイドの排泄を促進し、血清ならびに肝臓コレステロール濃度の上昇を抑制するのに対し、RBH は外因性コレステロールの吸収を阻害せず、酸性ステロイドの排泄のみが促進された。したがって、RBH は肝臓においてコレステロールから胆汁酸への代謝を促進させ、結果として血清コレステロール濃度の上昇が抑制されたものと考えられる。未発表であるが、RBH は肝臓の代謝と応答している可能性が高いことが、コレステロール代謝の律速酵素である cholesterol 7 α -hydroxylase 活性の上昇から認められている。RBH は消化酵素によって分解を受けないが、腸内細菌によって分解を受け発酵する性質があり²⁸⁾、ラットに投与した RBH は *Bifidobacterium* 属によく資化され、短鎖脂肪酸として酢酸、プロピオン酸、酪酸などの生成が認められている²⁸⁾。最近、これら短鎖脂肪酸の生理効果が注目され、血中コレステロール濃度の低下作用にプロピオン酸の関与が示唆されている³²⁾。したがって、RBH の腸内発酵産物が何らかの形でコレステロール代謝に影響を及ぼしている可能性があり、今後の検討が待たれる。

次に、とうもろこし外皮由来のヘミセルロース (以下、CBH と略す) のコレステロール代謝について、竹内ら²¹⁾は表 4 に示した CBH 標品を、先の RBH 標品による試

表 5. 高コレステロール飼料に添加した米ぬかヘミセルロース (RBH) がラットの血清ならびに肝臓コレステロール濃度, 大腸および糞中ステロイドレベルに及ぼす影響²⁷⁾

	対照群	RBH 群	ペクチン群
	セルロース 4%	セルロース 2%+RBH 2%	セルロース 2%+ペクチン 2%
摂取コレステロール (mg)	1518±17	1603±26 ^{a)}	1542±45
血清コレステロール (mg/dl)			
6 日目 (尾静脈採血)	326±16	253±10 ^{a)}	227±23 ^{a)}
9 日目 (一夜絶食, 解剖)	316±26	256±13 ^{a)}	231±11 ^{a)}
HDL-コレステロール (mg/dl)	22.3±1.0	24.6±0.7	22.6±1.8
肝臓コレステロール (mg/組織 g)	42.5±3.0	46.1±1.8	30.7±0.9 ^{a)b)}
肝臓コレステロール蓄積率 (%)	35.7±2.4	37.9±1.2	22.3±0.4 ^{a)b)}
中性ステロイド:			
大腸+糞 (mg/ラット/日)	73.5±4.8	88.2±5.0	100.3±13.9
見かけの吸収率 (%)	63.3±2.4	59.8±2.9	49.1±5.1 ^{a)}
酸性ステロイド:			
大腸+糞 (μmol/ラット/日)	40.8±1.9	56.2±3.9 ^{a)}	46.7±4.9

平均値±標準誤差を示す。a) 対照 (セルロース) 群と有意差あり ($p<0.05$), b) RBH 群と有意差あり ($p<0.05$)。

表 6. 高コレステロール飼料に添加したとうもろこしヘミセルロース (CBH) がラットの血清ならびに肝臓コレステロール濃度に及ぼす影響²¹⁾

	セルロース群	CBH 群
	4%	セルロース 2%+CBH 2%
血清コレステロール (mg/dl)		
6 日目 (尾静脈採血)	392±23	253±29 ^{a)}
9 日目 (尾静脈採血)	453±40	288±24 ^{a)}
10 日目 (一夜絶食, 解剖)	380±29	226±21 ^{a)}
HDL-コレステロール (mg/dl)	11.0±1.1	13.0±1.5
肝臓コレステロール (mg/組織 g)	69.8±1.3	63.0±1.5 ^{a)}

平均値±標準誤差を示す。a) セルロース群と有意差あり ($p<0.05$)。

験と同じ組み立てでラットに投与した。その結果, CBH 標品は血清ならびに肝臓コレステロール濃度に対し上昇抑制作用を示した (表 6)。この場合, 糞中ステロイド排泄について調べたが, CBH 群は対照のセルロース群に比し, 中性ステロイドの排泄が促進されたが, 酸性ステロイドの排泄量には差が認められなかった。この現象は, 高メトキシルペクチンが示す作用機作に似ており, RBH とはいくらか異なるように考えられる。RBH, CBH は両標品とも, その主成分はアラビノキシランで, 実験に用いた標品のアラビノース/キシロース比は前者が 1.05 に対し, 後者は 0.56 で, 糖組成からみると分子構造上に差異がある。この違いが DF 特性, つまり粘性, ゲル形成能などに反映し, 生理的機能に影響を及ぼ

す一因子になっているものと考えられる。CBH は RBH に比し, 粘性が強く, そのため企業レベルでのヘミセルロース標品の調製には, キシラナーゼによる粘度低下の処理が施されている。

参考に, RBH 標品がラットの消化管組織に及ぼす影響について試験した結果を紹介する。青江ら³⁹⁾は, RBH 標品を飼料中に 2% レベルで添加してラットに 17 日間投与した後, 摘出した各消化管の組織標本を作製し, 光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡により検索した。結果は, 空腸の絨毛に若干の腫張と, 空腸~回腸の絨毛に間隔, 配置が不規則になる傾向が認められたが, その度合は対比試料の高メトキシルペクチンほどではなく, ラットの成長が DF 無添加群より良好であった。このことか

ら RBH は消化管機能にまで影響を及ぼしているとは考えられない。

2) 腸内環境改善作用

青江ら²⁸⁾は、RBH 標品についてヒト由来の腸内細菌による発酵性を *in vitro* で調べたところ、*Bifidobacterium* 属に比較的良好に資化されることが認められた。また、ラットに投与し、糞便内細菌叢の解析を行った結果でも、対比試料の高メトキシシルベクチンに比し、*Bifidobacterium* 数が増加し、盲腸内の pH 低下、有機酸含量の増加が認められ、なかでも酢酸の生成量が多かった(図 9)。

Sugawara ら³⁴⁾は、CBH 標品をヒト (26~43 歳) に 1 日当り 10 g、10 日間投与して、腸内環境に及ぼす影響について試験している。その結果は、腸内菌叢に大きな変化は認められなかったが、便において、重量の増加、pH の低下 (pH 6.0)、アンモニア含量の減少が認められ、発がんに関与するといわれる β -glucuronidase や nitroreductase 活性が有意に低下したと報告している。以上から、穀類由来のヘミセルロースは腸内環境を改善し、整腸作用を始めとする生理作用に好影響を与えるものと考えられる。

3) 抗脂肪肝作用

オロット酸 (orotic acid, ピリミジン系核酸前駆物質) をラットに投与すると、肝障害を伴わない脂肪肝 (本態は、肝細胞ミトコンドリアのリン脂質の合成低下による脂肪酸酸化障害を主因とするトリグリセリドの蓄積) を起こすことが知られている。宮坂ら³⁵⁾³⁶⁾は、オロット酸 1% 混入飼料に、対照群のセルロース 4% レベルの半分を CBH 標品で置換して幼ラットに 10 日間投与したところ、CBH 群は対比試料の高メトキシシルベクチン群に比し、肝臓における脂質、とくにトリグリセリドの蓄積が抑制された。糞中のオロット酸分析結果では、CBH 群のオロット酸の排泄量は、対照のセルロース群やベクチン群に比し有意に少なく、オロット酸摂取量に対する排泄の割合も他群より低い値を示した。CBH の作用機作は、オロット酸の吸収阻害により肝脂質の蓄積を抑制するのではなく、CBH の腸内発酵産物が何らかの形で影響を及ぼしているものと推定される。

4) ヘミセルロース素材の開発

穀類外皮からのヘミセルロース B 画分の抽出、分離に、筆者らは抽出剤に 0.5 N 水酸化ナトリウム溶液を、抽出液中のタンパク質の沈殿剤にトリクロル酢酸 (TCA) を用いている。ヘミセルロースを食品添加素材として開発する場合、抽出剤に水酸化ナトリウムを用いると抽出率はよいが、抽出標品の色調を褐変化する傾向があり、一方、企業レベルでは水酸化ナトリウムの取扱いに難点があるという。また、TCA の使用には食品衛生上の問題

(平均値±標準誤差)

図 9. ラット盲腸内容物の有機酸含量 (mg) と pH²⁸⁾

がある。そこで、水酸化ナトリウムにかえて水酸化カルシウムを用いる方法が、企業レベルではとうもろこし外皮からの抽出に応用されている。精製とうもろこし外皮 (RCB) を 1% 水酸化カルシウム溶液で 90°C、60 分加熱し、抽出液を脱塩後、キシラナーゼで処理して低粘度化し、次に、活性炭、イオン交換樹脂により脱色、脱塩などの精製処理を施し、濃縮、乾燥して製品とする。この DF 素材は水溶性コーン・ファイバー (SCF) と称され、上市されている。竹内ら²¹⁾は、この SCF を実験的に水酸化ナトリウムで抽出、分離した CBH 標品と成分、生理機能について比較検討した。両標品は成分的には大差は認められないが、分子量は SCF 約 20 万、CBH 約 100 万で、高コレステロール飼料に 2% レベルで添加してラットに投与した試験では、血清ならびに肝臓コレステロール濃度に対し、SCF は CBH と同程度に上昇抑制効果を示した。

4. 麦類に含まれる穀物ガム質と脂質代謝

大麦、オーツ (えん麦) は精白しても、精白米に比し DF 含量が高い (表 7)。大麦、オーツの細胞壁にはグルコースが β -1,3 と β -1,4 の両方の結合によって直鎖状に連なった構造をもつ β -グルカンが含まれている³⁷⁾。このものは穀物ガム質とも呼ばれ、水溶性で粘性の強い DF である。筆者が、精白大麦 (産地別、12 品目) について Asp 法³⁸⁾により DF 分析を行った結果、乾物として、水不溶性 DF 7.73±0.06%, 水溶性 DF 3.72±0.42% で、また、穀物ガム質を Wood 法³⁷⁾の方法で分

表 7. 精白大麦, オーツ, 精白米の成分分析例
(%)

	精白大麦 ^{a)}	オーツ ^{b)}	精白米 ^{c)}
水分	8.79	7.03	9.20
粗タンパク質	6.67	10.50	6.10
脂質	1.62	8.93	0.68
灰分	0.82	1.68	0.50
食物繊維 ^{d)}	10.84	7.79	1.37

^{a)} 精白歩合 65% (新潟産), ^{b)} 未精白のカットタイプ (オーストラリア産), ^{c)} ササニシキ (市販品, 千葉産), ^{d)} Asp 法による。

析した結果は $2.60 \pm 0.43\%$ で、水溶性 DF の主体は穀物ガム質であることが認められた。

これらの麦類が脂質代謝に及ぼす影響については、実験動物やヒトの両面から検討されている。オーツの血清コレステロール濃度上昇抑制効果は、1963 年、DeGroot ら³⁹⁾によって初めて報告されて以来、実験動物では Fisher ら⁴⁰⁾, Chen ら⁴¹⁾⁴²⁾, Shinnick ら⁴³⁾が、ヒトに関しては Van Horn ら⁴⁴⁾, Kirby ら⁴⁵⁾, Anderson ら⁴⁶⁾, Davidson ら⁴⁷⁾の報告がある。大麦もオーツと同様に血清コレステロール濃度の上昇抑制効果が、高瀬ら⁴⁸⁾, Fadel ら⁴⁹⁾, Newman ら⁵⁰⁾, McIntosh ら⁵¹⁾によって報告されている。現在までに、オーツ、オーツブランの生理効果の主体は穀物ガム質であると推定されている⁴²⁾⁵²⁾。

小田ら⁵³⁾は、オーツならびに大麦から穀物ガム質画分を Wood ら³⁷⁾の方法を一部改変して抽出、分離し、これらガム質標品を標準飼料に DF 2% レベルで添加して遺伝性肥満 Zucker ラットに投与し、脂質代謝に及ぼす影響について調べた。その結果、オーツならびに大麦の穀物ガム質は脂肪肝ならびに血清コレステロール濃度上昇を抑制するなど、肥満に伴う症状を緩和することが認められた。オーツガム質は、その大量調製法が Wood ら⁴⁴⁾によって報告され、その方法で調製されたガム質標品がヒトの耐糖能実験⁵⁵⁾などに使われ始めている。綾野ら⁵⁶⁾が、ライ麦粉から Wood らの方法で抽出、分離した DF 標品は、穀物ガム質よりもアラビノキシラン含量が高く、高コレステロール飼料に 2% レベルで添加してラットに投与した試験では、血清ならびに肝臓コレステロール濃度の上昇抑制効果を示した。最近、オーツ加工品や麦飯が保健食として見直され、食生活改善に重要な役割を担っているが、穀物ガム質という DF が保健的価値を高める一因子であることは否めない事実である。

5. 穀類のエクストルーダー処理と生理作用

近年、シリアル食品の製造にエクストルーダー (Extruder, 以下 Ex と略す) が多く使われている。Ex は加熱機構を組み込んだ強力なスクリューにより原料を押し出す装置で、処理中に原料はさまざまな物理的影響 (加熱、圧縮、剪断、膨化など) を受け、処理前とは異なった物性や成分組成に変化する。

穀類の Ex 処理が、その素材の DF 成分や生理作用に及ぼす影響について、Björck ら⁵⁷⁾, Siljeström ら⁵⁸⁾が小麦粉、全粒小麦を材料として行った研究がある。それによると、Ex 処理は DF 中の水溶性画分を増加させるという。筆者らは、小麦ふすま、オーツを材料として、これらをシリアル食品製造の加工条件下で Ex 処理し、DF 成分の変化、生理作用に及ぼす影響について調べた。Aoe ら⁵⁹⁾は、小麦ふすまをバレル温度 136°C, 160°C の 2 条件で Ex 処理を行ったが、ふすまの細胞壁は破壊されないが、壁面は薄く、粗くなり、DF の可溶化が認められた。このものを飼料中に DF 5% レベルで添加してラットに投与したが、ラットの成長や栄養素の消化吸収に対して Ex 処理による悪影響は認められなかった。小田ら⁶⁰⁾⁶¹⁾は、全粒オーツ、オーツブランについて Ex 処理を行った。全粒オーツの Ex 処理 (バレル温度 140°C, 177°C の 2 条件) では、DF の水溶性画分は増加し、高コレステロール飼料に 55% レベルで添加してラットに投与した試験では、Ex 処理オーツ (バレル温度 177°C) は蒸煮オーツに比し、血清コレステロール濃度の上昇抑制能が増強した。オーツブラン (脱脂) についても Ex 処理 (バレル温度 141°C) は、DF の水溶性画分を増加させ、高コレステロール飼料に添加してラットに投与した試験では、蒸煮したオーツブランや精白米に比し、血清ならびに肝臓コレステロール濃度の上昇を有意に抑制した。穀類の Ex 処理は、DF の水溶性画分を増加させ、DF の有効性を高める加工法といえよう。

おわりに

以上、本稿においては、筆者が穀類の DF について永年にわたり行ってきた研究結果を中心に紹介した。

現在、わが国の食生活では、DF 摂取量は冒頭に述べたとおり低下しており、摂取量の増加が望まれる状態である。米国のがん協会⁶²⁾では、健康な成人は 1 日当り、25~35 g の DF 摂取を勧めている。DF を摂るとき、その種類により生理作用に違いがあるので、特定の食品に偏らないよう、いろいろな食品群から摂るように心掛けることが大切である。とくに穀類には、以上に述べたようにすぐれた生理機能をもつ DF が含まれており、この際、穀類外皮や麦類の DF の重要性を認識し、見直すべきである。食生活において、穀類から DF を効果的に

摂るには、玄穀のまま、あるいは精白度を低くして利用することが望ましいが、現代の食生活では、食味上、精白度の低いものを利用することが少なくなっている。そのため、穀類外皮を食事構成に組み入れるには、穀類外皮から生理的に有効な DF 成分を分離して、DF 強化用の素材に調製し、食品に添加することが考えられる。

現在、わが国で穀類外皮から調製した DF 素材で、市場に出まわっているものに水不溶性タイプでは、精製して DF 含量を高めたとうもろこし外皮、小麦ふすまがあり、水溶性タイプでは、とうもろこし外皮から抽出、分離して調製したヘミセルロースがある。これらの DF 素材は、以上に紹介した生理作用以外にもいろいろな生理機能をもつものと考えられる。筆者らは、未発表であるが、水溶性ヘミセルロースがラットの D-ガラクトサミン塩酸塩の腹腔内注射による肝障害を軽減させる作用のあることを見だしている。水溶性ヘミセルロースは、今後、出現が期待される「機能性食品」の添加素材として有望であり、さらに研究の展開が望まれる。

終わりに、本研究を推進するに当たり、絶大な協力をいただいた千葉大学園芸学部食品および栄養化学研究部の教員、協同研究者、そして、研究にいろいろとご支援をいただいた日本食品化工(株)、日東製粉(株)、雪印乳業(株)、全国精麦工業協同組合連合会に対して深甚な謝意を表する。

文 献

- 1) 地方衛生研究所全国協議会(編): 食物繊維成分表, 45 (1990), 第一出版(東京)
- 2) Burkitt, D.P.: 食物繊維で現代病は予防できる(桐山修八監訳), 160 (1983), 中央公論社(東京)
- 3) Morris, J.N., Marr, J.W. and Clayton, D.G.: Dietary Fiber (Heaton, K.W., ed.), 45 (1978), John Libbey & Co., Ltd. (London)
- 4) Ranhotra, G.S.: *Cereal Chem.*, 50, 358 (1973)
- 5) Kay, R.M. and Truswell, A.S.: *Proc. Nutr. Soc.*, 34, 17A (1975)
- 6) Tsai, A.C., Elias, J., Kelley, J.J., Lin, R.-S.C. and Robson, J.R.K.: *J. Nutr.*, 106, 118 (1976)
- 7) Forsythe, W.A., Chenoweth, W.L. and Bennink, M.R.: *J. Food Sci.*, 43, 1470 (1978)
- 8) 海老原清, 平尾昭彦, 桐山修八: 農化, 52, 401 (1978)
- 9) Lee, W.Y., Bennink, M.R. and Chenoweth, W.L.: *Cereal Chem.*, 56, 279 (1979)
- 10) 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 (1982)
- 11) 綾野雄幸, 太田富貴雄, 渡辺幸雄, 三田浩三, 中村 強: 食物繊維—食品学・栄養学的アプローチ(印南 敏ら編), 201 (1983), 篠原出版(東京)
- 12) 綾野雄幸, 太田富貴雄, 渡辺幸雄, 三田浩三: 栄養と食糧, 33, 283 (1980)
- 13) Van Soest, P.J.: *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, 46, 825 (1963)
- 14) 江頭祐嘉合, 児島和枝, 鹿島真樹, 青江誠一郎, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 第 41 回日本栄養・食糧学会総会講演要旨集, 192 (1987)
- 15) 前田万里, 前田竜郎, 細田 浩, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 栄食誌, 42, 433 (1989)
- 16) 竹内政保, 川村三郎, 田中 進, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 栄食誌, 41, 35 (1988)
- 17) Dintzis, F.R., Legg, L.M., Deatherage, W.L., Baker, F.L., Inglett, G.E., Jacob, R.A., Reck, S.J., Munoz, J.M., Klevay, L.M., Sandstead, H.H. and Shuey, W.C.: *Cereal Chem.*, 56, 123 (1979)
- 18) 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: 栄食誌, 44, 461 (1991)
- 19) Takeuchi, M., Hara, M., Inoue, T. and Kada, T.: *Mutat. Res.*, 204, 263 (1988)
- 20) Morotomi, M. and Mutai, M.: *J. Natl. Cancer Inst.*, 77, 195 (1986)
- 21) 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: 日食工誌, 38, 981 (1991)
- 22) 竹内政保, 川村三郎, 菅原正義, 鈴木陽子, 薮花雄, 尾形ひろみ, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 栄食誌, 45, 165 (1987)
- 23) Sugawara, M., Benno, Y., Takeuchi, M. and Mitsuoka, T.: *Agric. Biol. Chem.*, 53, 2625 (1989)
- 24) 山田信博: *Prog. Med.*, 10, 2298 (1990)
- 25) Vijayagopalan, P. and Kurup, P.A.: *Atherosclerosis*, 15, 215 (1972)
- 26) Southgate, D.A.T.: Fiber in Human Nutrition (Spiller, G.A. and Amen, R.J., eds.), 31 (1976), Plenum Press (New York)
- 27) 青江誠一郎, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 栄食誌, 42, 55 (1989)
- 28) 青江誠一郎, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 栄食誌, 41, 203 (1988)
- 29) Fisher, H., Griminger, P. and Siller, W.G.: *J. Atheroscler. Res.*, 7, 381 (1967)
- 30) Kay, R.M. and Truswell, A.S.: *Am. J. Clin. Nutr.*, 30, 171 (1977)
- 31) O'Brien, B.C. and Reiser, R.: *J. Nutr.*, 109, 98 (1979)
- 32) Chen, W.L., Anderson, J.W. and Jennings, D.: *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 175, 215 (1984)
- 33) 青江誠一郎, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 栄食誌, 42, 139 (1989)
- 34) Sugawara, M., Suzuki, K., Endo, K., Kume-mura, M., Takeuchi, M. and Mitsuoka, T.: *Agric. Biol. Chem.*, 54, 1683 (1990)
- 35) 宮坂弘子, 太田富貴雄, 綾野雄幸: 栄食誌, 43, 319 (1990)
- 36) Miyasaka, H., Sanada, H. and Ayano, Y.: *Biosci. Biotech. Biochem.*, 56, 157 (1992)
- 37) Wood, P.J., Paton, D. and Siddiqui, I.R.: *Cereal Chem.*, 54, 524 (1977)
- 38) Asp, N.G., Johansson, C.G., Hallmer, H. and Siljeström, M.: *J. Agric. Food Chem.*, 31, 476 (1983)
- 39) DeGroot, A.P., Luyken, R. and Pikaar, N.A.: *Lancet*, 2, 303 (1963)
- 40) Fisher, H. and Griminger, P.: *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 126, 108 (1967)
- 41) Chen, W.L. and Anderson, J.W.: *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 162, 310 (1979)
- 42) Chen, W.L., Anderson, J.W. and Gould, M.R.:

- Nutr. Rep. Int.*, 24, 1093 (1981)
- 43) Shinnick, F.L., Ink, S.L. and Marlett, J.A. : *J. Nutr.*, 120, 561 (1990)
 - 44) Van Horn, L.V., Liu, K., Parker, D., Emydy, L., Liao, Y., Pan, W.H., Giumetti, D., Hewitt, J. and Stamler, J. : *J. Am. Diet. Assoc.*, 86, 759 (1986)
 - 45) Kirby, R.W., Anderson, J.W., Sieling, B., Rees, E.D., Chen, W.L., Millew, R.E. and Kay, R.M. : *Am. J. Clin. Nutr.*, 34, 824 (1981)
 - 46) Anderson, J.W., Spencer, D.B., Hamilton, C.C., Smith, S.F., Tietzen, J., Bryant, C.A. and Oeltgen, P. : *Am. J. Clin. Nutr.*, 52, 495 (1990)
 - 47) Davidson, M.H., Dugan, L.D., Burns, J.H., Bova, J., Story, K. and Drennan, K.B. : *J. Am. Med. Assoc.*, 265, 1833 (1991)
 - 48) 高瀬幸子, 栗原長代, 道喜美代 : 栄養と食糧, 23, 426 (1971)
 - 49) Fadel, J.G., Newman, R.K., Newman, C.W. and Barnes, A.E. : *Nutr. Rep. Int.*, 35, 1049 (1987)
 - 50) Newman, R.K., Lewis, S.E., Newman, C.W. and Boik, R.J. : *Nutr. Rep. Int.*, 39, 749 (1989)
 - 51) McIntosh, G.H., Whyte, J., McArthur, R. and Nestel, P.J. : *Am. J. Clin. Nutr.*, 53, 1205 (1991)
 - 52) Jennings, C.D., Boleyn, K., Bridges, S.R., Wood, P.J. and Anderson, J.W. : *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 189, 13 (1988)
 - 53) 小田泰士, 青江誠一郎, 真田宏夫, 綾野雄幸 : 栄食誌, 44, 455 (1991)
 - 54) Wood, P.J., Weisz, J., Fedec, P. and Burrows, V.D. : *Cereal Chem.*, 66, 97 (1989)
 - 55) Braaten, J.T., Wood, P.J., Scott, F.W., Riedel, K.D., Poste, L.M. and Collins, M.W. : *Am. J. Clin. Nutr.*, 53, 1425 (1991)
 - 56) 綾野雄幸, 太田富貴雄, 児島和枝, 前田万里, 吉岡牧美 : 千葉大園学報, 36 号, 1 (1985)
 - 57) Björck, I., Nyman, M. and Asp, N.G. : *Cereal Chem.*, 61, 174 (1984)
 - 58) Siljeström, M., Westerlund, E., Björck, I., Holm, J., Asp, N.G. and Theander, O. : *J. Cereal Sci.*, 4, 315 (1986)
 - 59) Aoe, S., Nakaoka, M., Ido, K., Tamai, Y., Ohta, F. and Ayano, Y. : *Cereal Chem.*, 66, 252 (1989)
 - 60) 小田泰士, 青江誠一郎, 中岡正令, 井門和夫, 太田富貴雄, 綾野雄幸 : 栄食誌, 41, 449 (1988)
 - 61) 小田泰士, 青江誠一郎, 綾野雄幸 : 栄食誌, 44, 189 (1991)
 - 62) National Cancer Institute : Diet, Nutrition and Cancer Prevention, No. 85-2711, 8 (1985), NIH Publication

(1991 年 8 月 15 日受理)