

バガスからの機能性食物繊維の生産技術

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者	柏木, 豊
巻/号	82巻4号
掲載ページ	p. 509-514
発行年月	2007年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



バガスからの機能性食物繊維の生産技術

柏木 豊*

【キーワード】：サトウキビ、食物繊維、抗酸化性爆砕処理、醗酵

1. サトウキビとバガス

サトウキビは、イネ科の多年性宿根植物で、原産地は南太平洋諸島あるいはインドであると言われている。現在は、北緯38°（南スペイン）から南緯34°（南アフリカ）にわたる広い地域で栽培されている。わが国にはサトウキビの砂糖が、鑑真和尚によって8世紀に中国から伝えられたと言われている（山根1960）。サトウキビ栽培は、1,400年代に中国から沖縄に導入され、その後、沖縄県の基幹作物として栽培されてきた。現在では、沖縄県、鹿児島県島嶼地域を中心とした南九州地方で栽培されている。サトウキビ栽培の目的は砂糖製造であるが、近年、その他の利用方法についてさまざまな研究がなされている。とくにサトウキビの圧搾後に副生されるバガスは、主成分が食物繊維であり、食品としての利用価値はかなり古い時代から考えられてきた。

バガスの成分は、セルロース40～60%、ペントザン20～30%、リグニン15～20%、灰分1～3%であり、まさに不溶性食物繊維そのものであると言える（図1）。しかし、サトウキビ茎部の植物細胞壁成分は、セルロース繊維にペントザンであるキシランやポリフェノール物質であるリグニンが結合して存在するため、非常に硬い物性を示す（Paturau 1969）。サトウキビは、沖縄、南九州地域の特徴的気候である台風の暴風雨に耐えられるよう品種改良が行われ（農畜産業振興機構 2006）、繊維構造が非常に強固な品種となっている。このため、バガスの主成分である繊維質が強固となり、粉碎しても食感が悪いうえ、微生物発酵や酵素処理による分解が困難である。

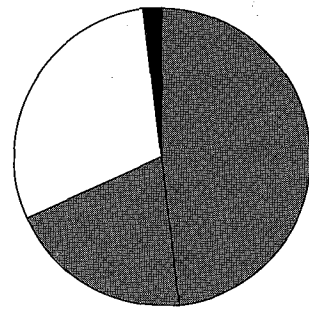
沖縄県では、製糖工場からサトウキビの搾り粕であるバガスが年間20万t近く発生しているが、現状では、製糖工場のボイラー燃料として用いられて

いるのが主な用途であり、一部が非木材パルプや合板の素材として利用されているほかは、畜産飼料、堆肥として使用されているにすぎず、付加価値を高めることが望まれてきた。このために、食品としての有効利用が考えられ、サトウキビ皮部のワックス成分の抽出などが研究されている。しかし、この他はほとんど有効利用されていない。

2. 現代人の食生活

現在の日本人の食事は欧米化が進み、野菜、穀物、魚介が中心の典型的な日本型食生活から肉食中心の食生活となり、食物繊維の摂取量が急速に低下している。厚生労働省の発表している食物繊維の摂取目安量の約半分の量しか摂取していないと言われている。食物繊維が不足すると、腸内環境の悪化、腸内での不要成分の長期滞留などが発生し、生活習慣病のリスクが高くなることがわかっており、食物繊維摂取の増加が推奨されている。各種の食物繊維食品が市販されているが、安価で機能性の高い適当な食品素材が見あたらないのが現状である。

セルロース、ヘミセルロースなどの植物細胞壁を構成する不溶性多糖類が食物繊維の素材として有



- セルロース 40～60%
- リグニン 15～20%
- ペントザン 20～30%
- 灰分 1～3%

図1 バガス成分の概要

*独立行政法人農業・食品産業総合研究機構
食品総合研究所 (Yutaka Kashiwagi)

望と見られており、これまでも稲ワラ、モミガラ、トウモロコシ芯などの農産副産物が原料として注目されていた。しかしながらこれらのものは、すでに堆肥、飼料、燃料や農畜産資材としての利用は行われているが、余剰分は農産廃棄物として扱われており、食品素材としての利用はこれまで活発ではなかった。このような農産廃棄物の一つとしてサトウキビ搾り粕であるバガスがある。

セルロース、ヘミセルロース系農産廃棄物は、植物細胞壁成分の多糖類を適切な技術で処理、分解することができれば、食物繊維素材やオリゴ糖素材として付加価値を高め、有効に再利用することが可能である。さらに、農産系バイオマスとして大量かつ集中して副生するため、変換処理に要するコストの面からも有利な原料と考えることができる。

3. 食物繊維

植物細胞壁を構成する多糖は、可溶性、不溶性食物繊維として機能を持つことが知られている。食物繊維は人の消化管内で水分を吸収して膨潤し、有害成分を吸着するなどの生理的機能性を有する。細胞壁はセルロース、ヘミセルロースが主要な成分である。

(1) セルロース

セルロースは、グルコースが β -1,4結合にて直鎖状に連結した多糖である。高等植物の細胞壁の主要な部分を構成し、地球上でもっとも大量に存在する多糖である。重合度は1,000~10,000ともいわれ巨大な直鎖状の分子である。植物組織中のセルロース繊維では、直鎖状分子が互いに水素結合によって束のような形になりマイクロフィブリルを形成している。大部分が結晶構造を有し、不溶性で物理的にも化学的にも強固な構造をしている。

(2) ヘミセルロース

ヘミセルロースは、植物体からアルカリ水溶液で抽出される多糖成分の総称である。成分は、キシロースが β -1,4結合にて直鎖状に結合したキシラン、アラビノースの多糖であるアラバン、マンノース構成単位とするマンナンなどのホモ多糖、あるいはキシラン主鎖に分枝としてアラビノースやグルクロン酸などが結合し、異なった種類の糖を含むヘテロ多糖として存在する。ペントースの多糖であるのでペントザンとも呼ばれる。イネ科植物や広葉樹

のヘミセルロースはキシランの主鎖にアラビノースなどの分岐が点在するアラビノキシランである。ヘミセルロースはリグニンとともに植物細胞壁の主成分であるセルロースに結合して存在し、植物細胞壁を補強する役目をしている。

4. オリゴ糖

オリゴ糖とは少糖とも言われ、通常は単糖が2~6個、グルコシド結合で脱水重合した糖質のことを言う。最近では、さらに重合度が大きい十糖以上のもも含めるようになった。多くのは多糖の分解物であり、自然界には微量にしか存在しないが、ラクトースやトレハロースのように単体として大量に存在するものもある。微生物や植物体内において細胞の耐久性を高める機能や情報伝達機能などの重要な機能を持つことが知られている。

(1) キシロオリゴ糖

キシロオリゴ糖は、キシランが部分的に分解して生成する少糖類であり、キシロースが2~10個程度結合したものである。これらのキシロオリゴ糖は水溶性であり、ヒトの消化管の酵素では分解されないが、腸内細菌によって資化され、ビフィズス菌の増殖因子として機能を持つことが知られている。キシロースはショ糖の40%程度の甘味度を持ち、キシロオリゴ糖もさわやかな甘味を有する。また、キシロースの糖アルコールであるキシリトールは甘味料成分などとして利用されている。

(2) セロオリゴ糖

セロオリゴ糖は、セルロースの部分分解物であり、グルコースが β -1,4結合で2~10個ほど結合したものである。ヒト消化管の酵素ではまったく分解されず、腸内細菌によってわずかに分解されると考えられる。キシロオリゴ糖が水溶性であるのに対して、セロオリゴ糖は重合度7程になるとほとんど不溶性となる。甘味度はキシロオリゴ糖よりも低く、微弱な甘味がある。このため、低分子量のオリゴ糖は、固形食品の賦形剤、ノンカロリー甘味料などとして利用が考えられている。

5. バイオマスの食品素材化に関するこれまでの研究

植物体の構成多糖であるセルロースやキシランは、それぞれ構成単糖であるグルコース、キシロー

スが重合した多糖であり、一方のグルコースポリマーであるデンプンと並んで自然界にきわめて大量に存在する。そこで、これらを分解し構成成分を得ることができれば、食品素材、飼料、発酵原料などへの用途が期待され、莫大な量のバイオマス資源として利用が考えられてきた。これまでも、農林水産省によるバイオマス変換計画がすすめられ、セルロース系バイオマス資源の利用に関する基礎的研究開発が行われた（農林水産省 1991）。

セルロースは、高温、強酸存在下で加水分解を行うことにより、構成単糖に加水分解される。この酸加水分解による木質系バイオマスの利用は、古く第一次世界大戦の頃に開発され、わが国でも 1960 年代に北海道でシラカバチップの酸糖化工場が建設されたこともあるが、強酸を使用するために設備の腐食や環境負荷の問題があり、現在では行われていない。一方、自然界では毎年再生産される木質系バイオマスが、微生物の酵素作用によって、分解されていることから、強力な分解能力を有する微生物や酵素の利用に注目が集まっている。しかしながら、微生物や酵素作用は常温常圧の穏和な条件で進行するため、木質系バイオマスを経済的な速度で分解するには不十分である。そこで、蒸煮・爆砕処理などの前処理技術が開発され、微生物、酵素処理の組合せによって経済的に見合う工程が考えられている。

(1) 蒸煮・爆砕処理

蒸煮・爆砕処理とは、木材チップなどのバイオマス原料を圧力釜中にて、180~230℃の水蒸気で適当な時間加熱処理を行った後、瞬時に圧力を解放し、バイオマスを水蒸気とともに放出し膨化粉碎する

方法である。高温高圧水蒸気によって、ヘミセルロース中のアセチル基が遊離し、pH が 3 程度まで低下する。このため、ヘミセルロースは部分加水分解をうけて水可溶性となる（図 2）。リグニンは、アリルエーテル結合が開裂することにより、低分子化し、有機溶媒や希アルカリ可溶となることが知られている。一方、セルロースは、可溶化しないが、ヘミセルロース、リグニンが低分子化、可溶化することによって、強固な結合による束縛から解放され、微生物、酵素による分解を受けやすくなる（農林水産省 1991）。

セルロース系バイオマスに対する爆砕処理によって、ヘミセルロースを水可溶化し、つづいてリグニンを有機溶媒などで抽出すれば、バイオマス原料から、ヘミセルロース、リグニン、セルロースの各成分を段階的に分別することができる。実際に、蒸煮・爆砕処理によってモミガラやトウモロコシ芯からヘミセルロース成分を可溶化分離することが行われ、酵素処理を併用して精製キシロオリゴ糖の製造が行われている。

(2) 酵素

植物細胞壁成分として、自然界では毎年莫大な量のセルロース系バイオマスが生産されている。その量は全世界で年間 1,000 億 t に達するとも言われているが、微生物の作用によって確実に分解され、全地球的な炭素循環の中に組み込まれ、生物体の再生産に利用されている。細菌や糸状菌（カビ、キノコなど）は、セルラーゼ、キシラナーゼなどの酵素を生産し、セルロース、キシランを加水分解して栄養源としながら生育している。これらの酵素はこれまでも多くの研究がなされており、食品加工、繊維工業、洗剤などの分野で実用的に使用されている。細菌や糸状菌などの微生物は複数のキシラナーゼ成分を分泌生産する能力を持ち、工業的に生産された酵素剤の中には、複数の酵素成分が含まれている。エンド-1,4-β-キシラナーゼ（以下、キシラナーゼと略す。）は、直鎖状のキシラン主鎖に対してランダムに作用し、高分子量キシランからキシロオリゴ糖を生成する。エキソ-1,4-β-キシロシダーゼ（以下、β-キシロシダーゼと略す。）はキシランやキシロオリゴ糖の末端からキシロースを遊離する反応を触媒する酵素である。キシランの分解にはこれらの酵素が協調して作用する。つまり、キシラナー

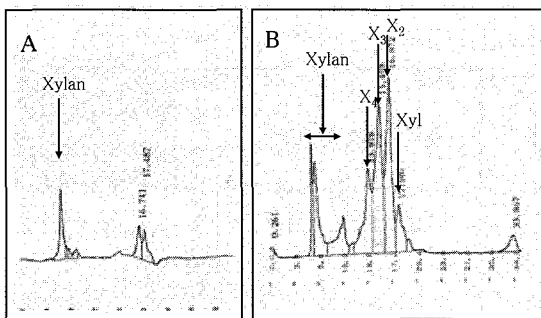


図 2 HPLC によるバガス抽出物の成分分析
A：バガス抽出物，B：爆砕バガスの熱水抽出物。

ゼがキシランをランダムに加水分解しキシロオリゴ糖を生成し、 β -キシロシダーゼがキシロオリゴ糖を末端から切断しキシロースにまで加水分解する(図3)。

6. バガスへの蒸煮・爆砕処理と酵素処理の利用

バガスは、木質系バイオマスと同様に強固な構造をしているため、微生物による分解には時間がかかり、酵素によって実用的に見合う反応速度で分解することはほとんど不可能である。これまでの生産例では、バイオマス原料に対していったん蒸煮処理あるいは爆砕処理を行い、可溶性キシランを分離し、さらにこれを酵素処理することによってキシロオリゴ糖やキシロースを取得していた。精製コストがかかるが、高精製度キシロオリゴ糖やキシロースは、コストに見合うだけの価値を十分に有する。

しかし、バガスにはすでに食物繊維としてセルロースが存在するため、爆砕処理バガスに直接キシラナーゼを作用させキシロオリゴ糖の含量を増やせば、オリゴ糖を含む食物繊維として食品素材を製造することが可能となる。本研究では、爆砕処理と酵素処理を連続して行うことを考えた。前処理として、カッターにより適当な大きさに粉碎したバガスに対して蒸煮・爆砕装置によって爆砕処理を行った。蒸煮・爆砕処理バガスは、やや褐色を帯びた、黒糖様の香ばしい香りを持つ粉砕物として得られた。爆

砕処理バガスは、セルロースを主成分とする細胞壁構造が崩壊し、部分分解し可溶化したキシランやリグニンを含むものである。キシランは部分的にキシロオリゴ糖までに分解するが、かなりの部分が高分子として残存している。これに引き続いて酵素処理を行い、キシランをキシロオリゴ糖にまで分解することを行った(特願2001-320553)。

一般に、食品用・工業用キシラナーゼ酵素剤には、複数のキシラナーゼ成分が含まれているため、キシランにこれらの微生物や酵素を直接作用させると、一気に加水分解が進み、主生成物としてキシロースが得られるだけになる。このため、キシロオリゴ糖を得るためには、酵素剤から β -キシロシダーゼを除きキシラナーゼ活性を高めることが必要である。あるいは、キシラナーゼ生産微生物の中から β -キシロシダーゼ活性の少ない菌を選択することが必要と考えられた。

市販のキシラナーゼ酵素剤に含まれる酵素は、 β -キシロシダーゼの分子量およそ200kDに対して、キシラナーゼはおよそ50kDであることから、分子量によって分画し、 β -キシロシダーゼを除くことが可能である。得られたキシラナーゼ酵素を用いることによって、 $X_2 \sim X_4$ を主体としたキシロオリゴ糖を得ることができた。さらに、食品用微生物の中から、キシラナーゼ活性が高く、 β -キシロシダーゼ活性が低い菌株として醤油麹菌の一種である*Aspergillus sojae*を選抜し、さらに自然突然変異株、UV突然変異株から単胞子分離を行うことによって、さらに β -キシロシダーゼ活性の低い株を選抜し、これらを用いることによりキシロオリゴ糖を蓄積させることができた(図4, 図5)。

得られた爆砕・発酵(酵素処理)バガスは、オリ

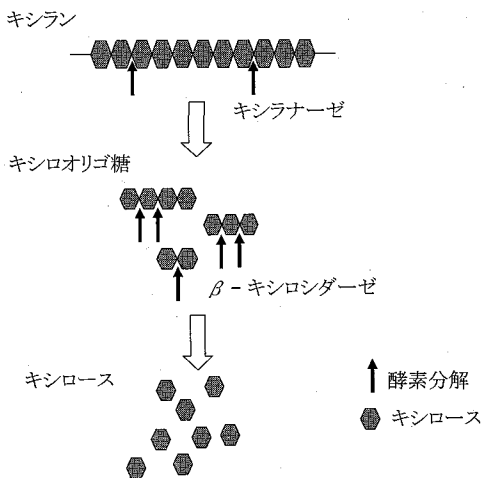


図3 キシランの酵素分解の模式図

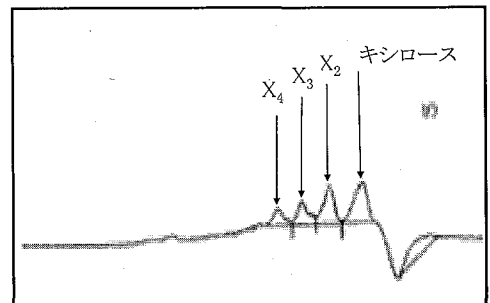


図4 爆砕発酵バガスのオリゴ糖成分

ゴ糖を含有する食物繊維であるとともに、さらに有用な機能性を持つことが期待された（特願2005-143327）。

7. 爆砕発酵処理バガスの食物繊維としての機能

(1) 腸内細菌と腸内環境改善効果

キシロオリゴ糖は、ビフィズス菌などの善玉腸内細菌の成長因子であることがわかっている。爆砕発酵処理バガスの抽出液を用いて、試験管レベルでの腸内細菌の増殖効果を検討した。この結果、*Lactobacillus* 属や *Bifidobacterium* 属などの善玉菌にのみ資化性が認められ、*Clostridium* 属などによる資化性は認められなかった。このため、キシロオリゴ糖を含む爆砕発酵バガスは善玉腸内菌の割合を増やす機能があると考えられる（表1）。表1はバガス抽出物にそれぞれの菌を接種し培養後の pH 変化値を測定し、pH 変化が 0.3 以上のものを菌生育の指標としたものである。さらに、ボランティアによるヒト腸内改善効果試験を行った。一定期間、ボランティアに摂取してもらい、便中の腸内細菌、アンモニア定量の結果、摂取量 10g/日にて有意にビフィズス菌数を増加することが確認された。

(2) 抗酸化性

蒸煮・爆砕処理によって、木質系バイオマスに含まれるリグニンは部分分解されアルカリ水溶液や有機溶媒に可溶化することが知られている。生成したリグニン分解物が抗酸化性を持つことが期待された。そこで、爆砕バガスの熱水抽出物、80%エタノール抽出物について、DPPH ラジカル消去活性によって抗酸化性を検討した。この結果、水溶性画分、エタノール抽出画分ともに高い抗酸化活性を有

表1 糖発酵性が認められた細菌

細菌名	pH変化値
<i>Enterococcus faecalis</i>	0.42
<i>Bifidobacterium adolescentis</i>	1.16
<i>Bifidobacterium infantis</i>	1.09
<i>Bifidobacterium spl</i>	1.07
<i>Lactobacillus cassi</i>	0.92
<i>Lactobacillus delbruckii</i>	0.86
<i>Lactobacillus plantrum</i>	0.84
<i>Streptococcus thrmophilus</i>	0.98

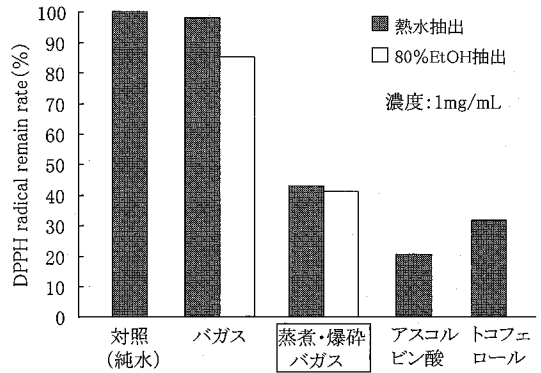


図6 バガス抽出物の抗酸化活性

DPPH ラジカル残存量により、活性ラジカル消去効果を比較した。

することがわかった（図6）。1mg/mLの濃度において、アスコルビン酸、トコフェロールに近い抗酸化活性を持つことがわかった。抗酸化活性指標のポリフェノール量が約7倍も増加していることが確認されている。

さらに、ボランティアによる摂取試験の結果から、ヒト体内での抗酸化バイオマーカーである尿中8-OHdG量は、爆砕バガスを摂取することで有意に低下しており、体内での酸化ストレス軽減にも効果を示すことが明らかになった。

この効果の要因は、フェルラ酸など4種類の抗酸化物質の増加によるものであることが、独立行政法人森林総合研究所によって解明されている。さらに、人ボランティアによる摂取試験を継続して行い、血糖値上昇抑制効果などの注目すべき機能性を有する結果が得られている（藤野ら 2006）。

8. まとめ

ここで紹介した研究では、バガス原料に対

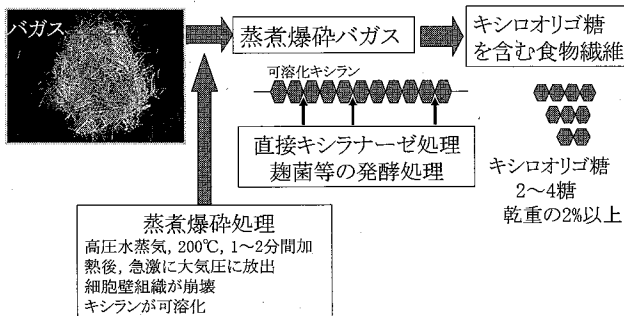


図5 バガスの蒸煮爆砕処理と酵素処理

して蒸煮・爆砕処理, 酵素・発酵処理を組み合わせる方法によって, キシロオリゴ糖を含有する食物繊維素材の開発に成功した. 従来の可溶化キシラン抽出, 酵素処理によるオリゴ糖製造とは違って, 食物繊維素材そのものを製造する技術である. 成分の抽出・精製を行わないためコストを低減化することができるとともに, 食物繊維, オリゴ糖, 抗酸化性などの複合的機能を有する食物繊維が得られた.

本技術は, これまでの高度に精製した機能性成分を食品に添加し, 機能性強化食品とするものとは違った方向をめざした食品製造技術である. 独立行政法人と企業との共同研究の成果として, 爆砕バガスの製造技術, キシラナーゼ活性が高くキシロシダーゼ活性が低い酵素剤の製造法, 醤油用麹菌の菌株を選抜し発酵に利用する方法など, 各種の技術を複合させることにより初めて成し得たものと考えている. 現在, 月産 2t 規模のパイロットプラントにおいて蒸煮・爆砕条件などの最適運転条件, 製造プロセスのスケールアップ技術を確立している.

さらに, 本技術をサトウキビ産業に適用すれば, サトウキビを圧搾して黒糖を生産し, その搾り粕であるバガスから機能性食物繊維を生産するという農産物の多段階的な利用技術が構築されたことになり, 環境的にゼロエミッションであるとともに高付加価値製品を生産するという新規生産システム

として, 沖縄を中心とした地域産業の活性化に貢献するものと考えられる.

爆砕・発酵処理バガスは複雑な成分組成の食物繊維であり, 多くの機能性が期待されるものであるため, 複合成分による機能性の解明, 新規の機能性物質など多くの解明すべき課題を含んでいる. 今後は, これらの機能性, 成分解明を掘り下げて研究することが必要である.

本稿にて紹介した研究は, 独立行政法人食品総合研究所 (現, 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所), 株式会社琉球パイオリソース開発, 独立行政法人森林総合研究所の共同研究をもとにしたものである. また, 独立行政法人科学技術振興機構における委託開発事業として実用技術開発, 製品化が行われている.

参考文献

- 山根嶽雄 1960. 甘蔗, 原料糖製造法. 丸善, 東京. 1-23.
Paturau, J.M. 1969. Characteristics of Bagasse, By-Products of the Cane Sugar Industry. Elsevier Publishing, Amsterdam. 25-42.
独立行政法人農畜産業振興機構 2006. 日本のさとうきび品種.
農林水産省 1991. バイオマス変換計画. 農林水産技術会議事務局編, 光琳, 東京.
特願 2001-320553. 抗酸化性食物繊維およびその製造方法, 並びにそれを用いた加工食品.
特願 2005-143327. 爆砕発酵バガスの製造方法,
藤野哲也 2006. さとうきび由来高機能素材 (発酵バガッセ) 摂取におけるヒト糞便フローラへの影響と抗酸化性. 日本農芸化学会 2006 年大会講演要旨 53.