

高バイオマス量サトウキビを用いた砂糖・エタノール複合生産プロセス ～新しい農工一体型・産業横断型プロセス設計～

アサヒグループホールディングス（株）豊かさ創造研究所 バイオエタノール技術開発部

上席主任研究員 小原 聡

1. はじめに

サトウキビは主に高価な甘味資源である砂糖の原料として利用されてきた。そのため、原料開発、副産物の利用方法も砂糖産業を中心に行われてきた。副産物のうち、搾り粕であるバガスは製糖工場の熱・電力を賄う循環型の自給エネルギー源として、糖蜜はエタノールやアミノ酸等の発酵産業における安価な二次原料として利用されてきた。近年、バイオエタノールの原料としても、サトウキビの持つ高いバイオマス生産性、エタノール変換の容易さ、バガスの活用範囲の広さ（製造エネルギー源やセルロース資源）が注目されている。

国土の狭い日本は、ブラジルなどの砂糖生産大国とは異なり、砂糖自給率が低く、生産地域の拡大も望めない。また、サトウキビ価格は国際価格に比べて極めて高い。このような状況下で、サトウキビからエタノールのみを生産すると、①砂糖生産との競合（砂糖自給率低下）、②エタノール製造コスト高（原料費のみで約200円/L）という問題が起こる。そのため、サトウキビを原料としたエタノール生産では、砂糖を抽出した後に残る副産物（糖蜜、バガス）を原料とした生産プロセスの開発が取り組まれてきた。

日本のサトウキビ原料は高価であるが、国によって決められる国産糖価格も高いため、砂糖産業として採算が取れ、その結果、副産物である糖蜜やバガスが比較的安価に入手できる。しかし、日本の砂糖産業では歴史的に砂糖生産を目的に品種改良された“砂糖歩留の良い＝副産物が出にくい”サトウキビを原料とし、高度に砂糖生産を優先した“砂糖歩留の良い＝副産物が出にくい”製糖プロセスが開発されてきたため、必然的に糖蜜やバガスの副生量が少ない。例えば糖蜜は、砂糖の結晶回収工程を3回繰り返した後の残渣である

ため、最終的に残る糖分が非常に少なく、少ない残糖分に対して多くの塩類（ミネラル分）が濃縮されることによって、これを発酵原料にした場合、酵母によるエタノール発酵が阻害される。つまり、日本の製糖技術が高いが故に、国産の糖蜜はエタノール原料としての品質が低いと言える。加えて、度重なる結晶化により黒色のカラメル状反応生成物が多く生じるため、着色排水の処理も問題となっている。

一方、バガスも安価・均質なセルロース資源として、セルロース系エタノールの研究者から注目されているが、バガス余剰量が少ないため、事業規模での生産量は望めない。それだけでなく、バガス余剰量の少なさゆえに、糖蜜やバガスからのバイオエタノール製造には、結局多くの石油を使うという矛盾も生じる。

このように日本では、極めて高度な製糖技術のために、製糖副産物である糖蜜やバガスを原料としたエタノール生産事業を単独で行なうことは難しい状況である。

2. 農工一体型・産業横断型生産プロセス開発

2002年より、アサヒビール（現・アサヒグループホールディングス）と九州沖縄農業研究センターは、砂糖とエタノールという2つの産業を別々に考えるのではなく、「砂糖&エタノール」という2つの商品を産業横断的に効率よく複合生産するプロセスを共同開発してきた。具体的には、初めに理想的なプロセスを設計し、次にプロセス実現に必要なサトウキビ原料を開発する、という農工一体型の全く新しい手法である。

（1）理想的な生産プロセスの設計

既存の製糖工場にエタノール生産プロセスを新たに組み込み、一連の生産プロセスとした上で、

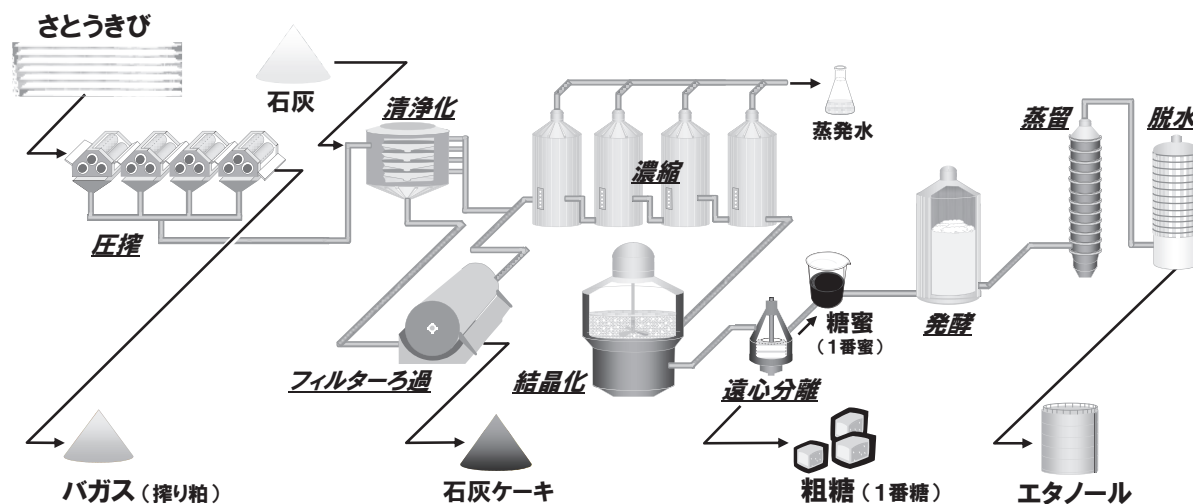


図1. 砂糖・エタノール複合生産プロセスの概要

糖質資源、製造燃料資源（バガス）を砂糖生産で独占せず、エタノール生産に資源分配することを基本とする。概要を図1に示す。

設備面では、既存の製糖設備を最大限活用し、その隣にエタノール製造設備（発酵～蒸留～脱水）を新たに併設し、ラインを繋ぎ完全に一連の工程にする。共通工程（圧搾機、ボイラー、ユーティリティ設備等）を共有化することで、新たな設備投資を削減できる。

生産工程面では、まず砂糖とエタノールの生産比率を見直し、従来3回行っていた砂糖の回収工程を1回に短縮し、1回しか砂糖を抽出していない良質な糖蜜（1番蜜）からエタノールを製造する。この変更を砂糖生産エネルギーの観点から見ると、3回の工程で95%の砂糖を回収していた従来法に比べて、改良法は最も回収率の高い1回目（70%）だけにするため、砂糖回収量あたりの生産エネルギーが約55%削減でき効率的である。エタノール生産の観点から見ると、ショ糖の分配比率が、砂糖：エタノール=95:5から70:30と変わることに加えて、糖蜜の発酵性向上（塩濃縮の軽減）によって、エタノール生産量が飛躍的に増加する。

生産エネルギー面では、バガス燃焼エネルギー（蒸気・電気）で全工程（砂糖・エタノール生産）のエネルギーを賄うように設計し、石油を使用せず、低コスト・低環境負荷のエタノール生産を可能にする。

これまでの砂糖生産では、目的生産物が砂糖の

みであり、製造エネルギーをバガス燃焼で賄ったことから、無理な砂糖回収を行ってきた。見直された砂糖・エタノール複合生産プロセスでは、砂糖生産とエタノール生産の両方にメリットがある生産比率が実現される。

（2）原料の設計・開発

理想的なプロセスを実現するために、新たなサトウキビを設計・開発した。新しい原料には、砂糖生産量低下とバガス不足を補うために、以下の条件を充たすことが求められる。

条件①：1回の砂糖回収工程で従来の砂糖生産量（8 t/ha）を得られるような「単位面積あたりのショ糖収量」を有する

条件②：バガス燃焼エネルギーで全製造エネルギーを供給できるような「単位面積あたりの繊維収量」を有する

これらの条件を、プロセス中の単位操作の収率、エネルギー原単位データを利用して、サトウキビの形質中で改良が可能な「単位収量、ショ糖含率、還元糖含率、繊維含率」の4つのパラメーターの関係式で表した。この関係式に、九州沖縄農業研究センターが育成した様々な「高バイオマスサトウキビ系統群」の栽培データを当てはめ、条件を充たす有望系統を選抜した。

（3）パイロットプラントでの検証と原料選抜

沖縄県伊江島にパイロットプラント（写真1）を建設し、主にプロセス実証と原料選抜を目的と



写真1 砂糖・エタノール複合パイロットプラント (伊江島)

した実証試験を行なった (2006~2010年: 農林水産省、経済産業省、環境省、内閣府との連携プロジェクト)。プラントは一連の複合生産工程 (砂糖生産~エタノール生産まで) で構成され、原料処理量として1 t/d (国内製糖工場の1/500~1/2000のスケール) である。

原料選抜では、九州沖縄農業研究センターが主担当となり、約1 haの圃場で約3000系統の高バイオマス量サトウキビの栽培試験を実施した。選



写真2 高バイオマス量サトウキビ [KY01-2044] (右) 対照: 製糖用さとうきび・[NiF8: 農林8号] (左)

抜条件を充たす砂糖・エタノール複合生産用原料として「KY01-2044」(写真2)を選抜した。KY01-2044は従来種と比較して、単位収量が約2倍、糖収量が約1.5倍、繊維収量が約2倍程度であり、砂糖・エタノール用として品種登録された。

プラント規模でのプロセス実証では、様々な形質を持つ高バイオマス量系統1tを原料として一連の物質収支を調査した。製糖用原料であるNi15を対照として、多収で低糖度・低純糖率である高バイオマス系統第1世代(S3-19, KR98-1001)と、第1世代をやや高糖度に改良した第2世代(KY01-2043, KY01-2044, KY02-1581)を試験に用いた。ショ糖の収支を図2に示す。

製糖用品種と比較して、第1世代では原料中のショ糖量、粗糖回収率がともに低下するため、従来と同等の粗糖生産量(3回結晶化で100~120kg/t-cane)を維持するには、単位収量を製糖用品種の3.5~4倍程度にする必要がある。第2世代は製糖用品種より原料中のショ糖量が約2割低いが、粗糖回収率がほぼ同等であるため、単位

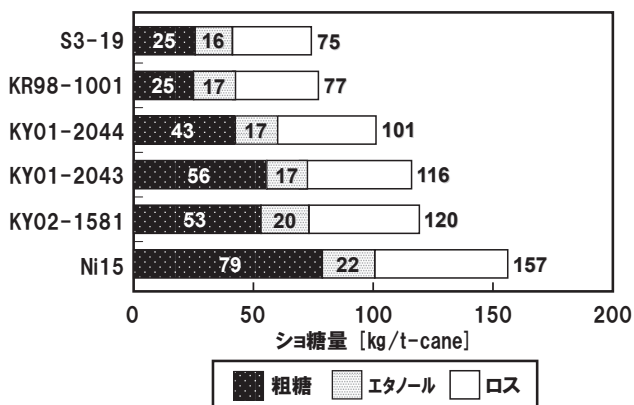


図2. 原料1トンに含まれるショ糖量とプロセス収支

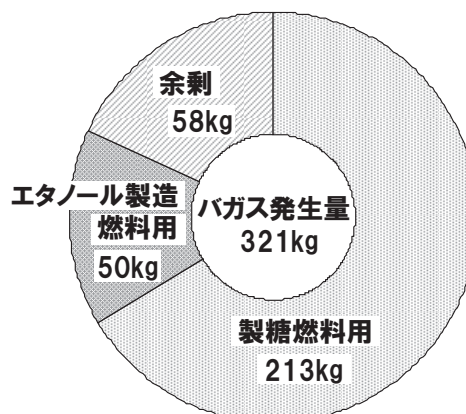


図3. 高バイオマス量系統(KY01-2043)のバガス収支

表 モデルアイランドの設定とプロセス導入後の試算データ

モデルアイランド		設定値 (導入前)		導入後	
圃場データ	栽培形態	栽培面積	単位収量	栽培面積	単位収量
	夏植	732ha	75t/ha	332ha	100t/ha
	株出(1回目)	244ha	50t/ha	332ha	110t/ha
	株出(2回目)			332ha	95t/ha
	株出(3回目)			332ha	90t/ha
	株出(4回目)			332ha	85t/ha
	春植	244ha	50t/ha		
	夏植次年度収穫	732ha		332ha	
	苗畑	48ha		8ha	
	栽培面積合計	2000ha		2000ha	
	(うち収穫面積)	(1220ha)		(1660ha)	
	原料生産量計	79,300t/y		159,400t/y	
工場データ	工場稼動日数	80d		160d	
	粗糖生産量	9,250t/y		10,800t/y	
	エタノール生産量	840kL/y		4,400kL/y	
	バガス生産量	21,900t/y		53,200t/y	

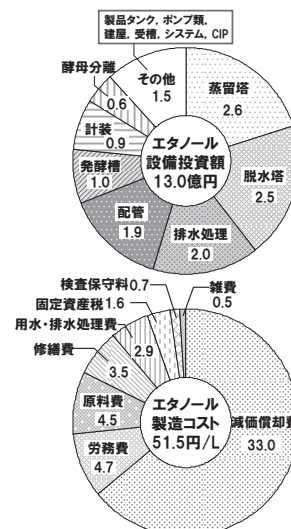


図4. モデルアイランドでの設備投資金額(上)、製造コスト(下)

収量が製糖用品種の1.5～2倍程度であれば、従来と同等の粗糖生産量が確保できることが分かった。高バイオマス量系統(KY01-2043)でのバガス収支を図3に示す。これより、バガス燃焼エネルギーのみで砂糖・エタノール製造が可能であることもプラント規模で実証された。

3. プロセス導入効果の試算

(1) 生産量の変化

プロセスの導入効果は地域によって異なるため、沖縄県の平均データから架空のモデルアイランドを設定し、高バイオマス量サトウキビ、新規複合生産モデルを導入した際の生産量変化の試算を行なった。設定条件及び生産量は表(次頁)のようになる。モデルアイランドは、沖縄県で平均的な生産規模である石垣島の圃場規模(2000ha)、栽培形態比率(夏植:株出:春植=6:1:1)、製糖工場規模(1000t/d処理)を採用した。原料収量、生産歩留は伊江島での実証試験で得られた数値を使用した。試算の結果、導入後の原料生産量は約2倍に、粗糖生産量が約1.2倍に、エタノール生産量が約5倍に増加することが示された。この規模では年間4400kL(沖縄県のガソリン消費量:約60万kLの0.7%分に相当)のエタノールが製造できることが分かった。

(2) コスト比較

モデルアイランドにおいて、エタノール製造に必要な設備投資額および製造コストを試算した結

果を図4に示す。モデルアイランド規模では年間4400kLのエタノールが製造でき、この時の設備投資額が約13億円、製造コストで約51.5円/Lとなる(糖蜜価格を現状レベルの2,000円/tとして計算)。製糖工場規模が2,000t/d(モデルアイランドの2倍)であれば、40円/L程度のエタノール製造コストを達成できる。また、糖蜜の良質化に伴ない、糖蜜を現状の約10倍のプレミアム価格(20,000円/t)にした場合でも、製造コストは約90円/Lであり、100円/L以下を達成できる。

4. おわりに

今回紹介したプロセスは、原料多収化による農家の安定収入の確保と土地生産性の向上、国産食料の安定生産、環境負荷低減と経済性を両立した大規模エタノール生産を可能にするもので、国内での実現可能性も高い。このプロセスは、日本全国で展開可能な一般解では無いが、国内の農業、食料、エネルギーの問題を同時に解決する1つのアイデア(特殊解)として参考になればと考える。特に、農工一体型の原料開発、異なる産業プロセスの融合による最適プロセス開発という考え方の導入は全く新しい解を導き出す可能性がある。

国内で本プロセスが導入されるには、砂糖生産のみを前提とした現在のサトウキビ取引制度の改定が必要であり、今後の課題である。農産物から食料とエネルギーが生産される時代に合った省庁横断的な制度改革が期待される。