

山梨県におけるスイートコーン残さからの バイオエタノール生産の可能性評価

工業技術センター・総合農業技術センター¹・森林総合研究所²・山梨大学³
恩田 匠・長沼 孝多・橋本 卓也・小嶋 匡人・長坂 克彦¹・加藤 知美¹・
小澤 雅之²・島崎 洋一³

The Possibility of Bio-Ethanol Production from Sweet Corn Residues in Yamanashi Prefecture

Industrial Technology Center, Agricultural Research Center¹, Forest Research Institute², University
of Yamanashi³

Takumi ONDA, Kota NAGANUMA, Takuya HASHIMOTO, Masato KOJIMA, Katsuhiko NAGASAKA¹,
Tomomi KATO¹, Masayuki OZAWA² and Yoichi SHIMAZAKI³

要 約

スイートコーン残さからのエタノール生産を効率よく行うため、スイートコーン品種別の成分分析や、雌穂収穫後の成分含量の推移の調査、スイートコーン残さの酵素処理による糖類の増強方法の検討などを行った。また、バイオマスとしてのスイートコーン残さを補完するためのバイオマス植物として、ソルガムを供試試料とし、ソルガムの糖収量の高い栽培密度（株間）、夏収穫時期、追肥量について検討することで、その肥培管理技術を確立した。さらに、本県におけるスイートコーン残さからのエタノール生産の可能性について、エネルギー収支の解析やエタノール製造単価などから評価を行った。

Abstract

Aiming the utilization of sweet corn residues as a biomass, we investigated the contents of sugars and amino acids of various species of sweet corns residues. Changes in sugar and amino acid contents of sweet corn residues after ear harvesting and the effect of enzymatic digestion on their contents were also observed. To facilitate bio-ethanol production from sweet corn residues, the methods for nutrient management of Sorghum, as a supplement, were established. Furthermore, the possibility of bio-ethanol production in Yamanashi Prefecture was evaluated on the basis of ecological and economical balance.

1. 緒 言

近年、地球温暖化対策や化石資源代替のために、バイオエタノール¹⁻⁵⁾が注目され、世界的なレベルで研究が盛んに行われており、欧米などではスイートコーンやサトウキビからのバイオエタノール生産が実用化に至っている。一方で、最近、バイオエタノール生産において、原材料として用いられているスイートコーンやサトウキビについて、食糧との競合の問題が指摘されるようになり、廃棄物など食糧と競合しないバイオマスからのエタノール生産が望まれるようになってきている。

山梨県では、「山梨県環境基本条例」が施行（平成16

年4月）され、温室効果ガスの削減や資源の循環的活用などが目標として定められている。本県には未利用の農林産物系バイオマスが豊富に存在することから、これらバイオマスからのエタノール生産が期待されている。

我々は、山梨県におけるバイオエタノール生産の可能性を明らかにするために、本県の主要農産物であるスイートコーンに着目し、その残さからの、すなわち食糧と競合しないバイオマスからのエタノール生産の可能性評価のための研究⁶⁻⁸⁾に着手した。

昨年度までに、スイートコーンの栽培試験から、高いバイオマス量と糖濃度の得られる品種や栽培条件の調査、その搾汁液の糖類をはじめとした内容成分の分析を

行い、かつ県内で得られるスイートコーン残さ量の推定を行ってきた。また、スイートコーン残さ搾汁液の発酵酵母を用いたエタノール発酵試験を行い、搾汁液に栄養成分を付与することなく、エタノール生産が可能であること、またその発酵収率などを明らかにした。さらに、以上のような研究成果をもとに、県内で生産可能なエタノール量の推定を行い、スイートコーン残さからのバイオエタノール生産のエネルギー収支について解析を行ってきた。

本年度は、スイートコーン残さからのエタノール生産のための、スイートコーン品種別の成分分析や、雌穂収穫後の内容成分含量の推移の調査、本年度のスイートコーン残さ搾汁液を用いた発酵試験、さらにスイートコーン残さの酵素処理による糖類の増強方法の検討を行った。

また、エタノール生産プラント導入の可能性を検討する中で、バイオマスとしてスイートコーン残さ搾汁液のみでは、プラントの稼働率が著しく低いことが想定された。そこで、スイートコーン残さを補完する作物として、得られるバイオマス量や糖含量が高く、エタノール発酵に適していることが分かっている、ソルガムの栽培について、本県の気象条件に適した糖収量の高い肥培管理技術の確立を行った。

さらに、本県において、スイートコーン残さ搾汁液を主とした未利用バイオマスからのバイオエタノール生産、特に中央市をモデル地域として設定したときのエネルギー収支やエタノール製造コスト(単価)の解析から、エタノール生産実用化の可能性を評価した。

2. 実験方法

2-1 供試スイートコーンとその試験栽培

エタノール発酵試験のためのスイートコーンは、昨年度と同様に、総合農業技術センター内の試験ほ場(山梨県甲斐市下今井、標高315m)で夏期に栽培された‘ゴールドラッシュ’(は種日3月8日、雌穂収穫日6月14日、搾汁日6月21日)を供試した。

また、品種別のスイートコーン残さで得られる糖組成とアミノ酸組成を調べるため、13品種のスイートコーン(‘恵味キュート’、‘甘々娘’、‘ゴールドラッシュ’、‘さきちゃん’、‘未来早生130’、‘ミルフィーユ’、‘K6-025B’、‘K6-113’、‘KSY-588’、‘MK-Z44’、‘MK-2506’、‘YTB-6760’および‘YTY6310’)を供試した。これらも、総合農業技術センター内の試験ほ場で夏期(は種日3月8日、雌穂収穫日6月14日、搾汁日6月21日)に栽培されたものである。

2-2 スイートコーン残さ搾汁液の調製と成分分析

試験ほ場で得られたスイートコーン残さについて、既

報⁸⁾と同様に、ロールプレス搾汁機により、搾汁液を得た。搾汁液は、成分分析や発酵試験に供されるまで、凍結保存した。

スイートコーン残さ搾汁液の成分分析は、既報⁸⁾と同様に、一般成分(水分、タンパク質、脂質、灰分、炭水化物)含量、無機塩含量、糖組成とその含量およびアミノ酸組成とその含量の測定を行った。

2-3 スイートコーン残さの酵素処理

バイオマスとして、スイートコーン残さをより効率的に利用するため、酵素処理による、糖含量の増強について検討を行った。酵素分解は、デンプンを加水分解する酵素系とセルロースを加水分解する酵素系によった。すなわち、スイートコーン残さを、残さ重量の3倍量の0.05M酢酸緩衝液(pH5.0)とともに、家庭用のジューサーで均質化し、残さ懸濁液を調製した。この残さ懸濁液に、セルロース分解酵素系の酵素液としては、矢野らの方法⁹⁾に準拠し、セルラーゼ(Y-NC、ヤクルト薬品工業社製)10mg/g、 β -グルコシダーゼ4mg(アーモンド由来、2.6U/mgシグマ化学社製)およびセルラーゼY-NC(ヤクルト薬品工業社製)5m/gとなるように、またデンプン分解酵素系の酵素液としては α -アミラーゼ1mg/g(20U/mg、*Bacillus subtilis*由来、和光純薬社製)になるように、それぞれ残さ懸濁液に添加して、65°C18時間反応を行った後の反応終了後の糖組成を調べた。

2-4 スイートコーン残さ搾汁液のエタノール発酵試験

本年度の‘ゴールドラッシュ’スイートコーン残さから得られた搾汁液について、既報⁸⁾と同様に、酵母(*Saccharomyces cerevisiae* JCM7255)を用いた発酵試験を実施した。発酵条件は、搾汁液(2l)を用い、培養温度25°C、攪拌回転数50rpmとして、48時間発酵させた。

2-5 供試ソルガムとその試験栽培

バイオマス植物としてのスイートコーン残さを補完するための、ソルガムの利用について、最も高い糖濃度が得られる栽培条件などを調査した。ソルガムは、既報⁸⁾において、本県の平坦地で糖収量の高いことが確認された、中晩種の‘スーパーソルゴー’を供試した。試験栽培は、総合農業技術センター内の試験ほ場で実施した。

2-6 ソルガムの肥培管理試験

供試ソルガムについて、バイオマス植物として、高い糖含量が得られる施肥管理技術を調査した。すなわち、栽培時の栽植密度(株間)、夏収穫の時期、および追肥量が、得られる糖含量に与える影響を、以下のように調べた。

(1) 栽植密度の検討

ソルガムの栽培密度が、収穫時に得られる糖含量に与える影響を調べた。本試験栽培のは種は既報⁸⁾で報告したように、夏と秋2回の収穫が見込まれる4月中旬、すなわち2007年4月20日に実施した。夏の収穫は同年8月10日に、秋の収穫は同年11月21日に行った。

栽植密度は、条間を55cmに固定し、株間を以下5区分：10cm (18,182株/10a)、15cm (12,121株/10a)、20cm (9,091株/10a)、25cm (7,273株/10a) および30cm (6,061株/10a) に設定した。施肥は基肥としてN、P₂O₅、K₂Oを各11kg/10aになるようにくみあい化成8号(コープケミカル社製)を用い、また土壌改良資材として牛ふん堆肥(JA梨北製)2,000kg/10a、苦土石灰(駒形石灰工業社製)100kg/10aを施用した。追肥はN、K₂Oを各9kg/10aとなるようにくみあいNK化成14号(コープケミカル社製)で夏収穫後の条間に施用した。

夏と秋の収穫物について、茎中のBrix、水分率、生収量(茎)を測定し、下記の式を用いて糖収量を算出した。

$$\text{糖収量} = (\text{茎の生収量} - \text{茎の乾物収量}) \times \text{Brix値} / (100 - \text{Brix値})$$

また、収穫の作業性や糖収量に関連のある倒伏程度についても調査した。

(2) 夏収穫時期の検討

夏収穫を2007年7月25日、7月31日、8月9日、8月15日、8月20日に、秋の収穫は同年11月21日に行い、得られる糖含量などの差異を調査した。品種、は種時期、追肥量、試験規模、調査項目については、2-6-1)と同様とし、栽植密度は条間55cm、株間10cm (18,182株/10a) とした。

なお、夏収穫株は、台風による倒伏が発生したが、倒伏したままでは夏収穫時期の影響を明確にすることができないので、人為的に直立させた。

(3) 追肥量の検討

追肥量が、得られる糖含量に与える影響を調べた。本試験の品種、試験規模、栽植密度、調査項目については2-6-1(2)と同様に行った。は種は2006年4月22日に、夏収穫は同年8月10日に、秋の収穫は同年11月16日に行った。追肥量はN、K₂Oを各0、3、6、9、12、15kg/10aとなるようにくみあいNK化成14号で夏収穫後の条間に施用した。

2-7 エタノール潜在製造量の推定

エタノール潜在製造量の推定は、山梨県と中央市の2地域を対象とした。中央市¹⁰⁾は、山梨県の中央南部に位置し、2006年2月20日に田富町、玉穂町、豊富村が合併した地域(面積31.81km²)であり、農地がその

36.5%を占めている。中でも、豊富地区は、県内で最もスイートコーン栽培が盛んな地域である。エタノール潜在製造量の算出にあたり、作付面積は2005年農林業センサス¹¹⁾のデータを参照し、ソルガムの場合、耕作放棄地での2期作と仮定した。算出式¹²⁾を以下に示す。

$$\text{エタノール潜在製造量} = \text{糖収量} \times 0.514 (\text{アルコール発酵理論効率}) \times 0.85 (\text{アルコール発酵歩合})$$

2-8 エネルギー収支の試算

バイオ燃料を製造する条件として、エネルギー収支(エネルギー投入量/エネルギー製造量)が1未満となる必要がある。そこで、中央市を対象にバイオ燃料の製造段階におけるエネルギー収支の試算を行った。エネルギー収支を算出するプロセスは、(i)栽培、(ii)収集、(iii)輸送、(iv)発酵の4つに分類し、以下のように検討した。

(i)栽培プロセスは、スイートコーンの場合には残さ利用のためエネルギー消費量がないものとし、ソルガムの場合にはトラクタの能率¹³⁾0.47ha/h、燃費10~20L/hを参照し、さらに整地、植付、肥料、追肥の4工程を考慮した。

(ii)収集プロセスは、ロールベアラの利用を考え、トラクタと同じデータを参照した。トラックに収穫物を掲載するクレーンの動力は考慮していない。

(iii)輸送プロセスは、中央市内の5kmを往復すると仮定し、2t(ガソリン34.6MJ/L、燃費6km/L)と10t(軽油38.2MJ/L、燃費3.5km/L)のトラックの稼働とした。

(iv)発酵プロセスについては、ラボスケールにおける試験からは、エネルギー消費量の算出が困難なため、先行研究の値¹⁴⁾を参照した。

2-9 メタン排出量の低減効果

スイートコーン残さ利用によるメタンガス排出量の低減効果について、山梨県および中央市をモデル地域として算出した。

スイートコーンの収穫後、その残さが水田に鋤込まれ、メタンが大量発生することが確認されている。メタンは温室効果ガスのひとつであり、二酸化炭素に比べて、21倍の温室効果がある。山梨県のメタン排出量の約3分の2は、家畜や水田などの農業に由来するものであることが分かっている¹⁵⁾。また、スイートコーン残さの水田への鋤き込みにより、後作の水稻に窒素過多や異常還元による生育初期の立ち枯れなどの問題も発生している¹⁶⁾。

現在、その対策として、残さの鋤込みから3日後に入水が行われているが、さらに、残さのすべてを収集し、燃料化することによりメタン排出量の低減に寄与できることが考えられた。メタン排出量推定のための算出式を以下に示す。

メタン排出量 [tCH₄] = 作付面積 [ha] × メタン排出係数 [tCH₄/ha]

2-10 エタノール製造単価の試算

エタノール製造プラントを導入する際には、その経済性を十分に検討する必要がある。そこで、新エネルギー人材育成研修会のテキスト¹⁷⁾を参照し、中央市を対象にバイオエタノール製造単価の試算を行った。表5-1に5つのケーススタディの前提条件を示す。プラントの製造規模は、中央市におけるエタノール潜在製造量の推計値を参照した。プラントの年間稼働日数は、スイートコーン残さとソルガムの貯蔵を考え、100日間(スイートコーン残さ30日間、ソルガム1期作40日間、ソルガム2期作30日間)を基準とした。5つのケーススタディ(年間エタノール製造量)の位置付けを整理すると、以下ようになる。

- Case1: 5 kL/年 (潜在製造量の100分の1)
- Case2: 50kL/年 (潜在製造量の10分の1)
- Case3: 500kL/年 (潜在製造量)
- Case4: 1,500kL/年 (Case3を基準に年間稼働日数を3倍)

スイートコーン残さとソルガム以外の利活用を想定

- Case5: 5,000kL/年 (Case3を基準に日間製造量を10倍)

中央市以外の近隣市町村の協力を想定

表5-2に検討対象費目ごとの設定値および計算方法をそれぞれ示す。エタノールの製造コストは、建設費、原材料調達費、ユーティリティ費、メンテナンス費、人件費の合計と定義した。プラントの建設費については、日本での導入事例は少なく、積算するにあたり不確定要素が大きい。沖縄県伊江村¹⁸⁾に導入されたサトウキビを原料とするバイオエタノール実証プラントは、5.5億円(日間製造量22.5L、年間稼働日数50日、年間製造量1,125L)である。また、新潟県^{19), 20)}に導入予定のイネを原料とするバイオエタノール実証プラントは、12億円(日間製造量3.3kL、年間稼働日数300日、年間製造量1,000kL)である。本分析では、新潟県の事例を基準建設規模とし、スケールファクターを考慮した0.7乗則を適用した。算出式を以下に示す。

建設費 = 基準建設費 × (日間製造量 / 基準日間製造量)^{0.7}

なお、ソルガムの栽培費用については、東北農業センターの研究成果情報²¹⁾を参照した。

3. 結果

3-1 供試したスイートコーン残さ搾汁液の成分分析結果

(1) エタノール発酵試験用の搾汁液の成分分析

本年度の発酵試験に用いたスイートコーン残さ搾汁液の成分分析結果を表1に示した。アミノ酸組成などに若干の差異があるものの、既報の分析値とほぼ同等な数値を示した。

(2) 品種別の糖含量とアミノ酸組成の差異

13品種の品種別のスイートコーン残さ搾汁液中に含まれる糖組成とアミノ酸組成を調べた結果、各品種における糖類とアミノ酸の組成はほぼ同等な傾向を示した。

糖類の平均値は、スクロース6.5±3.5 (g/100ml)、グルコース1.2±0.3 (g/100ml)、フラクトース0.8±0.8 (g/100ml)、ブリックス10.0±3.7であった。最も糖濃度が高かったのは、‘甘々娘’(スクロース12.3, グルコース1.3, フラクトース0.7, ブリックス16.3)であり、次いで‘ミルフィーユ’(ブリックス16.0), ‘未来早生130’(ブリックス15.3)であった。これらは、特にスクロースの蓄積が大きく、バイオマス植物として有用であることが分かった。

また、全てのアミノ酸含量を合計した、総アミノ酸含量は、319.1±255.0 (mg/100ml)であった。総アミノ酸含量が最も高かったのは、‘ミルフィーユ’の1459 (mg/100ml)であり、‘甘々娘’(1432mg/100ml)なども高かった。既報^{7), 8)}と同様に、全ての品種で、グルタミンやアスパラギン酸含量が高いことが分かった。

3-2 雌穂収穫後のスイートコーンの残さ(茎部分)の内容成分の推移

雌穂収穫後のスイートコーンの茎部分を、試験ほ場で放置したときの、糖組成とその含量ならびにアミノ酸含量の推移を調べた結果を図1に示した。これまでの研究で、スイートコーンの茎部分をほ場に放置することで、茎中のブリックス値が増大することが分かっているが、今回の検討から、糖類の中でスクロースが増大している

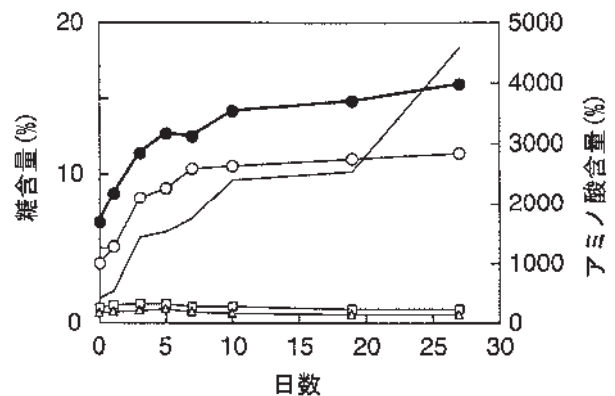


図1 雌穂収穫後のスイートコーン残さに含まれる糖類とアミノ酸含量の推移

●: 全糖量, ○: スクロース, □: グルコース, △: フラクトース, 実線: 総アミノ酸 (検出された各アミノ酸含量の総和)。

表1 スイートコーン ‘ゴールドラッシュ’ (H19) 残さ搾汁液の内容成分

分析項目		分析項目		分析項目			
水分	(g/100g)	86.7	金属	(mg/100g)	アミノ酸 (mg/100g)		
タンパク質	(g/100g)	0.2	ナトリウム		ホスホセリン	2.5	
脂質	(g/100g)	0			タウリン	0.6	
灰分	(g/100g)	1.2	Brix	(%)	11.2	アスパラギン酸	75.1
炭水化物	(g/100g)	11.9				スレオニン	20.8
			糖類	(g/100ml)		セリン	38.7
			スクロース		9.0	アスパラギン	91.5
			グルコース		1.2	グルタミン酸	12.2
			フルクトース		1.0	グルタミン	872.6
						グリシン	8.6
			エタノール	(%)	ND	アラニン	26.7
			グリセロール	(%)	ND	バリン	19.7
						メチオニン	4.9
			有機酸	(g/100ml)	ND	シスタチオニン	1.7
			酢酸		ND	イソロイシン	9.7
			乳酸		ND	ロイシン	17.6
			コハク酸		ND	チロシン	37.5
			リンゴ酸		ND	フェニルアラニン	9.3
			クエン酸		ND	γ-アミノ酪酸	0.6
						オルニチン	0.9
						リジン	13.3
						ヒスチジン	7.4
						アルギニン	30.9
						ヒドロキシプロリン	5.8
						プロリン	5.8

ことが明らかとなった。このことから、本現象が光合成による糖の蓄積の結果であることが分かった。

また、総アミノ酸含量も経時的に増加する傾向が認められた。アミノ酸は、発酵酵母の増殖にも必要であることから、雌穂収穫後に放置することが、アミノ酸増強の面からも有効であることが考えられた。

3-3 スイートコーン残さ搾汁液のエタノール発酵試験

2007年に調製されたスイートコーン残さ搾汁液についての発酵試験の結果、既報と同様に、発酵48時間後には、糖類（初発の全糖類含量11.2%）がほぼ完全に消費され、エタノールが4.9%蓄積され、その発酵収率は0.85であることを確認した（図表は省略）。

また、ソルガム搾汁液の糖組成は、スクロース16.9 (g/100ml)、グルコース1.2 (g/100ml)、フラクトース1.02 (g/100ml)、ブリックス19.0 (pH5.2) であった。ソルガム搾汁液については酵母によるエタノール発酵の検討例は多いが、本搾汁液も、スイートコーン残さ搾汁液と同様に栄養成分などを添加することなく、エタノールが得られることを確認した（図表は省略）。

3-4 スイートコーン残さの酵素処理による糖の増強

スイートコーン残さ懸濁液に酵素処理した後の、糖含量の増強の結果を、図2に示した。アミラーゼ系酵素お

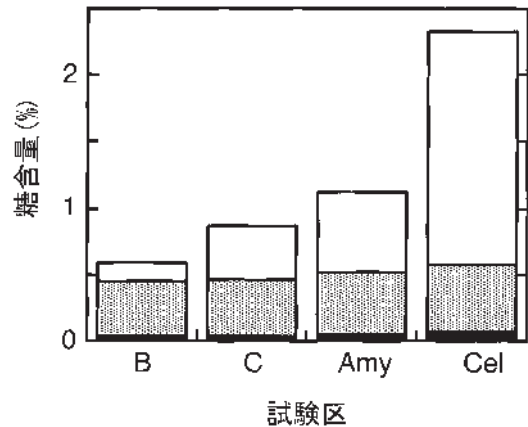


図2 スイートコーン残さ懸濁液の酵素処理後の糖類含量

試験区は、B：酵素処理前、C：酵素無添加区、Amy：アミラーゼ系酵素処理区、Cel：セルラーゼ系酵素処理区。カラムは、黒色：フラクトース、灰色：スクロース、白：グルコース。

よびセルラーゼ系酵素を処理した場合とも、グルコース濃度の増大が認められ、それぞれデンプンまたはセルロース成分が分解されたことが確認された。特に、セルラーゼ酵素系では、全糖含量として4倍まで増加した。

3-5 ソルガムの肥培管理技術

高い糖収率が得られるための肥培管理技術が以下のよ