

# 未利用農林産物系バイオマスの利用技術の開発

— 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 —

恩田 匠<sup>\*1</sup>・長沼 孝多<sup>\*1</sup>・橋本 卓也<sup>\*1</sup>・小嶋 匡人<sup>\*1</sup>  
長坂 克彦<sup>\*2</sup>・加藤 知美<sup>\*2</sup>・小澤 雅之<sup>\*3</sup>・島崎 洋一<sup>\*4</sup>

## Development of Biomass Utilization of Agri-forestry Residues in Yamanashi Prefecture

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

Takumi ONDA<sup>\*1</sup>, Kota NAGANUMA<sup>\*1</sup>, Takuya HASHIMOTO<sup>\*1</sup> and Masato KOJIMA<sup>\*1</sup>  
Katsuhiko NAGASAKA<sup>\*2</sup> and Tomomi KATO<sup>\*2</sup>, Masayuki OZAWA<sup>\*3</sup> and Yoichi SHIMAZAKI<sup>\*4</sup>

### 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

In order to accomplish the effective usage of sweet corn residues as a biomass, we investigated the contents of sugars and amino acids of various species of sweet corns residues, the changes of the sugars and amino acids contents of sweet corn residues after ear harvesting, and enzymatic digestion tests. And, plant nutrient management of Sorghum, as a biomass which was supplemented sweet corn residues was developed. The possibility of bioethanol production from sweet corn residues estimation was performed according to analysis of energy balance and production cost.

### 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<sup>1) 5)</sup>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<sup>6-8)</sup>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

\*1 工業技術センター  
\*2 総合農業技術センター  
\*3 森林総合研究所  
\*4 山梨大学

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’、‘ミルフィュー’、‘K6-025B’、‘K6-113’、‘KSY-588’、‘MK-744’、‘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<sup>8)</sup>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<sup>8)</sup>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、家庭用のジュースで均質化し、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<sup>9)</sup>に準拠し、セルラーゼ(Y-NC、ヤクルト薬品工業社製)10mg/g、 $\beta$ -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)5mg/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 $\alpha$ -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℃18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<sup>8)</sup>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℃、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<sup>8)</sup>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<sup>8)</sup>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、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O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、K<sub>2</sub>O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。

糖収量 = (茎の生収量 - 茎の乾物収量) × Brix 値 / (100 - 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-(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、K<sub>2</sub>O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<sup>10)</sup>は、山梨県の中央南部

に位置し、2006年2月20日に田代町、玉徳町、豊富村が合併した地域（面積31.81km<sup>2</sup>）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<sup>11)</sup>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<sup>12)</sup>を以下に示す。

エタノール潜在製造量 = 糖収量 × 0.514 (アルコール発酵理論効率) × 0.85 (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<sup>13)</sup>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<sup>14)</sup>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<sup>15)</sup>。また、スイートコーン残さの水田への鋤き込みにより、後作の水稲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<sup>16)</sup>。

現在、その対策として、残さの鋤込みから3日後に人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 [tCH<sub>4</sub>] = 作付面積 [ha] × メタン排出係数 [tCH<sub>4</sub>/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<sup>17)</sup>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。

Case 1: 5kL/年 (潜在製造量の100分の1)

Case 2: 50kL/年 (潜在製造量の10分の1)

Case 3: 500kL/年 (潜在製造量)

Case 4: 1,500kL/年

(Case 3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

Case 5: 5,000kL/年

(Case 3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<sup>18)</sup>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<sup>19), 20)</sup>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)<sup>0.7</sup>

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<sup>21)</sup>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)、ブリティックス10.0±3.7であった。最も粘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, ブリティックス16.3)であり、次いで「ミルフィーユ」(ブリティックス16.0)、「未来早生130」(ブリティックス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<sup>7), 8)</sup>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、茎中のブリティ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

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	1.6	ホスホセリン	2.5	
脂質	(g/100g)	0.0			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)		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

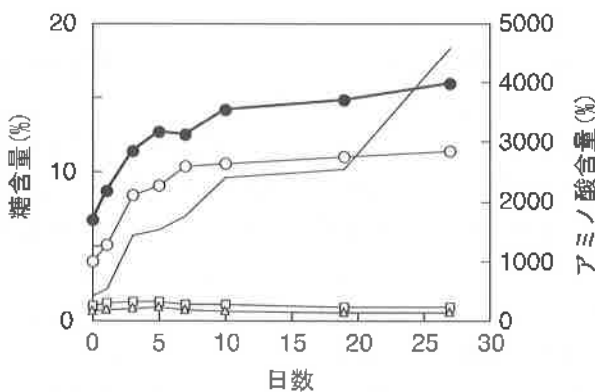


図1 雌穂収穫後のスイートコーン残さに含まれる糖類とアミノ酸含量の推移

●: 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)

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rix19.0 (pH5.2) であった。

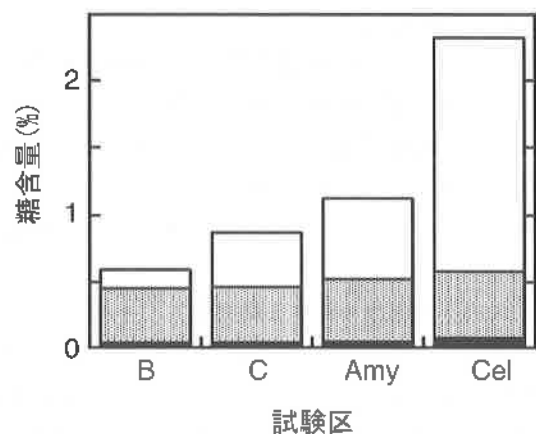


図2 スイートコーン残さ懸濁液の酵素処理後の糖類含量  
試験区は、B: 酵素処理前, C: 酵素無添加区, Amy: アミラーゼ系酵素処理区, Cel: セルラーゼ系酵素処理区。カラムは、黒色: フラクトース, 灰色: スクロース, 白: グルコース。

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)。

表2 株間がソルゴの生育・収量に及ぼす影響

株間 cm	全重 (t/10a)			糖収量 <sup>a)</sup> (t/10a)			搾汁糖度 (Brix)		搾汁率 (%)		草丈 (m)		倒伏 <sup>b)</sup> 程度	
	夏	秋	合計	夏	秋	合計	夏	秋	夏	秋	夏	秋	夏	秋
10	7.0	5.4	12.4	0.5	0.5	1.0	10.1	13.8	36.5	32.8	2.8	2.9	4.5	1.5
15	8.6	6.2	14.8	0.6	0.7	1.2	10.1	14	36	37.3	2.7	3.2	2.0	2.0
20	8.4	6.4	14.8	0.5	0.6	1.1	9	13.5	35	34.4	2.6	3.2	1.8	1.3
25	8.7	8.3	17.0	0.5	0.8	1.3	8.6	13.6	34	35	3.0	3.4	2.0	0.8
30	8.8	7.6	16.4	0.5	0.8	1.3	8.8	14.7	32.9	36.2	3.3	3.2	1.3	1.3

a) 糖収量=(茎の生収量-茎の乾物収量)×Brix値/(100-Brix値), b) 倒伏程度:肉眼観察により, 0(無)~5(基)の6段階評価

表3 夏刈り取り時期が生育・収量に及ぼす影響

刈取時期	全重 (t/10a)			糖収量 <sup>a)</sup> (t/10a)			搾汁糖度 (Brix)		搾汁率 (%)		草丈 (m)		倒伏程度	
	夏	秋	合計	夏	秋	合計	夏	秋	夏	秋	夏	秋	夏	秋
7月25日	6.9	4.0	10.9	0.3	0.3	0.6	5.5	11.8	42.8	28.3	2.6	2.5	4.5	0.8
7月31日	7.6	4.2	11.8	0.5	0.4	0.9	8.4	14.7	40.8	28.7	2.7	2.6	4.5	0.5
8月9日	8.7	5.2	13.9	0.6	0.4	1.0	10.5	13.0	39.0	33.3	2.7	3.0	4.5	1.0
8月15日	7.7	4.2	11.9	0.6	0.3	1.0	12.8	12.3	37.0	32.6	3.0	2.9	4.5	1.5
8月20日	6.8	3.2	9.9	0.6	0.2	0.9	13.7	10.6	32.9	32.2	2.9	2.4	4.5	0.8

図の説明は、表1に同じ。なお、夏収穫は全区で倒伏したので人為的に直立させた。

### 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うになり明らかになった。

#### (1) 栽植密度

夏収穫物と秋収穫物合計の全重量は、株間25cmとした試験区が最も重く、株間10cm区が軽かった(表2)。得られた搾汁糖度および搾汁率は、夏収穫で株間が広いほど低下する傾向が認められたが、秋収穫では一定の傾向が認められなかった。糖収量は株間25、30cm区が1.3t/10aと高かった。

倒伏程度は夏収穫で10cm区が著しく高かったが、他

の試験区では差は認められなかった。

#### (2) 夏収穫時期

夏秋収穫物合計の全重量は夏収穫、秋収穫ともに、8月9日収穫区が最も重かった。搾汁糖度では、夏収穫は刈り取り時期が遅いほど高く、秋収穫は7月25日区を除いて、刈り取り時期が遅いほど高い傾向が認められた。糖収量は8月9日区が、1.0t/10aと最も高かった(表3)。

秋収穫の倒伏程度には一定の傾向は認められなかった。

#### (3) 追肥量

夏収穫物と秋収穫物合計の全重量は、追肥量が増えるにしたがって増加した。搾汁糖度は9kg/10a区が最も高く、15kg/10a区は7.7%と他の区と比較して低かった。糖収量は、追肥量9kg/10a区が、1.5t/10aと最も高かった(表4)。

なお、倒伏程度は、追肥量が少ない0.3kg/10a区で低く、追肥量が多い15kg/10aで高かった。

### 3-6 エタノール潜在製造量の推計

表6-1に山梨県および中央市のエタノール潜在製造量の推計結果を示す。山梨県のスイートコーン残

表4 追肥量が秋収穫の生育・収量に及ぼす影響

追肥量 (kg/10a)	生体重 (t/10a)		糖収量 (t/10a)		搾汁糖度 (Brix)	搾汁率 (%)	草丈 (cm)	倒伏程度
	秋	合計	秋	合計				
	0	2.5	10.2	0.21				
3	3.7	11.4	0.34	1.35	12.3	34.4	1.8	0.3
6	4.9	12.6	0.42	1.43	11	38.8	2.3	2.0
9	5.2	12.9	0.54	1.55	13.3	39.3	2.4	0.3
12	5.6	13.3	0.5	1.51	11.7	42.2	2.3	2.3
15	6.1	13.8	0.38	1.39	7.7	42.4	2.1	3.8
夏収穫 <sup>a)</sup>	7.7	-	1.01	-	15.9	38.1	2.0	-

図の説明は、表1に同じ。なお、夏収穫は全区で倒伏したので人為的に直立させた。

a) 夏収穫は各区の平均値を示す。

さとソルガムから得られるエタノール潜在製造量は22,721kLである。これは、2006年度における山梨県のガソリン消費量<sup>22)</sup>の4.8%に相当する。中央市の潜在製造量は176kJであり、2006年度における中央市公用車のガソリン消費量の25.2倍に相当する。

### 3-7 エネルギー収支の試算

表6-2は中央市におけるバイオ燃料製造のエネルギー収支の結果である。スイートコーン残さが0.643か

表5-1 経済性分析のケーススタディの前提条件

項目	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
スイートコーン残さ[t]	23	230	2,300	Case3を基準に	Case3を基準に
ソルガム1期作[t]	30	300	3,000	年間稼働日数 を3倍	日間製造量を 10倍
ソルガム2期作[t]	23	230	2,300		
年間エタノール製造量[kL/年]	5	50	500	1,500	5,000
日間エタノール製造量[L/日]	50	500	5,000	5,000	50,000
プラント建設費[百万円]	63	318	1,594	1,594	7,988

ら0.717、ソルガムが0.654から0.739の範囲である。栽培プロセスのエネルギー消費量の有無が起因し、ソルガムに比べて、スイートコーン残さの方がよい結果が得られた。発酵プロセスのエネルギー消費量を抑えることが最も重要である。

### 3-8 メタン排出量の低減効果

表6-3に山梨県および中央市の水田からのメタン排出量を示す。中央市の水田のメタン排出量は、スイートコーン残さ鋤込直後に入水する場合と比べて、スイートコーン残さ鋤込3日後の入水により52%、スイートコーン残さのエタノール変換により72%の低減効果がある。

### 3-9 エタノール製造単価の試算

表6-4に5つのケーススタディのエタノール製造

表5-2 検討対象費目ごとの設定値および計算方法

項目	設定値および計算方法
①建設費	建設費は、Case1が63[百万円]、Case2が318[百万円]、Case3が1,594[百万円]、Case4が1,594[百万円]、Case5が7,988[百万円]である。 新潟県の米を原料とした事例(日間製造量3,333L/日)の建設費が1,200[百万円]である。これを基準と考え、各ケースの日間製造量に0.7乗則を適用し、建設費を算出した。 なお、日間製造量は、Case1が50L/日、Case2が500L/日、Case3が5,000L/日、Case4が5,000L/日、Case5が50,000L/日である。 補助率は50%を想定した。建設費に補助率を乗じることにより補助額が定まる。 実質建設費は建設費から補助額の差とし、それを耐用年数15年で割った値を用いた。
②原材料調達費	農産廃棄物の試算例から、スイートコーン3,800円/t、ソルガム11,300円/tとした。 ソルガムの栽培費用7,500円/t、収集費用3,800円/tと仮定した。
③ユーティリティ費	建設費の2%と設定した。
④メンテナンス費	建設費の1%と設定した。
⑤人件費	人件費を4.5[百万円/年]とし、5名体制とする。

表6-1 山梨県および中央市のエタノール潜在製造量の推計結果

地域	作物	作付面積 [ha]	収穫量 [t]	乾物収量 [t]	糖量 [t]	アルコール量 [t]	生産量 [kL]	エネルギー量 [MJ]
山梨県	スイートコーン残さ	797	19,447	4,220	2,295	1,003	1,269	26,785,443
	ソルガム1期作	3,261	184,888	55,466	22,126	9,667	12,236	258,189,744
	ソルガム2期作	3,261	139,237	41,771	16,663	7,280	9,215	194,439,190
中央市	スイートコーン残さ	104	2,538	551	300	131	166	3,495,215
	ソルガム1期作	76	4,320	1,296	517	226	286	6,032,696
	ソルガム2期作	76	3,253	976	389	170	215	4,543,142

推計に用いた数値は、以下のとおり。コーン残さ収率24.4[t/ha]、ソルガム1期作収率81.0[t/ha]、ソルガム2期作収率61.0[t/ha]、ソルガム粗放的栽培効率0.7、コーン残さ搾汁糖度0.131、ソルガム乾物収率0.300、ソルガム搾汁率0.146、発酵理論効率0.514、発酵歩合0.85、エタノール密度0.79[g/cm<sup>3</sup>]、エタノール低位発熱量21.1[MJ/L]

表6-2 中央市におけるバイオ燃料製造のエネルギー収支

ケース	作物 スイートコーン残さ		ソルガム	
	最良	最悪	最良	最悪
整地			0.023	0.047
収集	0.024	0.048	0.012	0.023
輸送	0.008	0.021	0.008	0.021
発酵	0.611	0.648	0.611	0.648
合計	0.643	0.717	0.654	0.739

表6-4 各ケーススタディのエタノール製造単価

項目	単位	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
エタノール製造量	[kL/年]	5	50	500	1,500	5,000
建設費	[円/L]	420	212	106	35	53
原材料調達費	[円/L]	137	137	137	137	137
ユーティリティ費	[円/L]	252	127	64	21	32
メンテナンス費	[円/L]	126	64	32	11	16
人件費	[円/L]	4,500	450	45	15	5
エタノール製造単価	[円/L]	5,435	990	384	220	243

単価を示す。Case 1 から Case 3 の製造単価は、384円/Lから5,435円/Lの範囲となった。エタノールの製造規模が小さい場合、人件費の占める割合が多く、製造規模が大きくなるにしたがい、原材料調達費の占める割合が多くなる。次に、Case 3 を基準として、年間稼働日数が3倍になったCase 4 では220円/L、日間製造量が10倍になったCase 5 では243円/Lとなった。

#### 4. 考察

バイオマスとしてのスイートコーン残さは、品種別では、「甘々娘」や「ミルフィーユ」が高い糖濃度とアミノ酸含量を示したことから、最も優れていることが分かった。また、雌穂収穫後、ほ場に約12~20日程度放置することで、糖類とアミノ酸含量の増強ができることが確認された。また、スイートコーン残さへの酵素処理によって、特にセルラーゼ系の酵素処理が有効であることがわかり、搾汁液調製前の処理に有効である可能性が考えられた。しかしながら、酵素製剤のコストを考えた場合の収支面での有効性は不明であり、実用化における換

表6-3 山梨県および中央市の水田からのメタン排出量

地域	水田とコーン残さ処理	作付面積 [ha]	排出量 [tCH <sub>4</sub> ]
山梨県	水田単作	5,020	798
	水田+コーン残さ鋤込直後入水		775
	水田+コーン残さ鋤込3日後入水	500	275
	水田+コーン残さエタノール変換		80
中央市	水田単作	224	36
	水田+コーン残さ鋤込直後入水		145
	水田+コーン残さ鋤込3日後入水	94	51
	水田+コーン残さエタノール変換		15

討課題といえる。

スイートコーン残さは1年のうちで得られる時期がきわめて短いことから、それを補完するバイオマスとしての、ソルガムの肥培技術を明らかにすることができた。ソルガムの栽培は、休耕地利用の促進が期待できた。

本研究における取り組みで、本県で、スイートコーン残さからバイオエタノールを生産する場合の、エネルギー収支やコストについての解析を行うことができた。中央市を対象にしたバイオ燃料の製造段階におけるエネルギー収支の解析から発酵プロセスのエネルギー消費を抑えることが最も重要であることがわかった。その対策として、山梨県の県有林の主伐から発生する林地残材の利用を考える。山梨県において1年間に発生する林地残材の熱量(主伐面積90.542ha×有効林地残材81.25t/ha×林地残材熱量16,747MJ/t)<sup>23)</sup>を推計した結果、123TJ(ガソリン換算3,561kL)になる。これを木質ボイラ(効率0.9)を用いて、Case 3(年間バイオ燃料製造量500kL)の発酵プロセスの熱源に利用すると仮定すれば、山梨県の林地残材のおよそ6%で賄うことができ、バイオマスの複合利活用の観点からも非常に有効である。

中央市のエタノール潜在製造量を参照し、製造規模別にエタノール製造単価を試算した結果、384円/Lから5,435円/Lとなった。2007年5月に日本政府が公表した次世代自動車・燃料イニシアティブ<sup>24)</sup>によれば、2015年の国産バイオ燃料の製造単価目標は100円/Lである。



本解析では、農産物の貯蔵の観点から年間稼働日数を100日と仮定したが、その他の未利用農産物の収集も考慮し、年間稼働日数を300日に増加させれば、220円/Lになる可能性がある。また、農産物を輸送する観点から、収集対象を中央市に限定したが、スイートコーンの特産地である笛吹ラインの周辺地域を含め、日間製造量を5kL/年から50kL/年の10倍に増加させれば、243円/Lになる可能性がある。したがって、採算性を求めるには、プラントの年間稼働日数を増やすことが最も効果的であり、スイートコーン残さとソルガム以外の未利用農産物の収集や農産物の収集範囲を中央市以外の近隣市町村に拡充することが重要である。

また、バイオエタノール生産で、スイートコーン残さに含まれる糖類が消費されることで、県内で発生するメタンガスの削減効果も期待できた。

## 5. 結 言

本県におけるバイオエタノール生産の可能性について明らかにすることができた。本研究では、バイオエタノール製造プラントを規模別に導入したケーススタディを実施した。その効果を定量的に提示した意義は大きいといえる。今後、本研究をフィージビリティスタディに展開する際には、建設費、原材料調達費や副産物収入費などを改めて精査する必要がある。また、本事業を実施するためには、産官学民が一体となり、行政、研究機関、プラント業者や地域の農業協同組合などの協力体制を築くことが不可欠である。

## 参考文献

- 1) 大聖泰弘, 三井物産 編: バイオエタノール最前線, 工業調査会 (1999)
- 2) 原後雄太, 泊みゆき 著: バイオマス産業社会, 築地書房 (2002)
- 3) 湯川英明: バイオエタノールの生産技術と実用化の展望, 高圧ガス, 40, 28-32 (2003)
- 4) 稲田雄二: バイオエタノール—世界の現状と日本の今後の取り組み—, 環境研究, 133, 64-72 (2004)
- 5) Kuntecova, L.: The potential role of bioethanol, Int. Sugar J., 98, 448-452 (1996)
- 6) 長坂克彦, 市川和規, 加藤知美, 小林真理: スイートコーン残さ及びソルガムの利用適性, 山梨県総理研研究報告, 1, 17-21 (2006)
- 7) 恩田匠, 長沼孝多, 小松正和: スイートコーン残さからのバイオエタノール生産, 山梨県総理研研究報告, 1, 24-27 (2006)
- 8) 恩田匠, 長沼孝多, 小嶋匡人, 長坂克彦, 市川和規, 加藤知美, 島崎洋一: 未利用農林産物系バイオマス

- の利用技術の開発—バイオマス植物としてのスイートコーン利用適性とスイートコーン残さからのバイオエタノール生産—, 山梨県総理研研究報告, 2, 17-23 (2007)
- 9) 矢野伸一, 井上宏之, 遠藤貴上, 坂木剛, 澤山茂樹: エタノール生産のための木質バイオマスの前処理・酵素糖化技術の開, 第2回バイオマス科学会議発表論文集, p.24-25 (2006)
  - 10) 山梨県中央市: 行政情報, <http://www.city.chuo.yamanashi.jp/gyosei/> (アクセス日 2007.11.1)
  - 11) 農林水産省: 統計情報, <http://www.maff.go.jp/j/tokci/> (アクセス日 2007.11.1)
  - 12) 農林水産省: 統計情報, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/> (アクセス日 2007.11.1)
  - 13) 農林水産省農林水産技術会議事務局編: 国のバイオマス変換計画 (1991)
  - 14) 農業環境技術研究所: LCA手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル, <http://www.niaes.affrc.go.jp/project/lca/> (アクセス日 2007.2.26)
  - 15) トヨタ自動車, みずほ情報銀行: 輸送用燃料のWell-to-Wheel評価 (2004.11) <http://www.mizuho-ir.co.jp/research/wtwghg041130.html> (アクセス日 2006.8.28)
  - 16) 山梨県循環型社会推進課: 山梨県地球温暖化対策推進計画第3章, <http://www.pref.yamanashi.jp/barrier/html/junkan/74018292287.html> (アクセス日 2007.6.1)
  - 17) 長坂克彦, 花形敏男, 松野篤, 木下耕一: スイートコーン残渣鋤込み水田における水稻の生育安定とメタン発生削減, 日本土壤肥料学会誌, 74 (6), 817-821 (2003)
  - 18) 新エネルギー財団: 新エネルギー人材育成研修会テキストバイオマスコース (バイオ燃料編), (2007)
  - 19) NEDO: バイオマス等未活用エネルギー実証試験, 38, 沖縄地区における燃料製造のためのサトウキビからのバイオマスエタノール製造技術に関する実証試験事業, <http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/pamphlets/shinene/baiomasu/index.html> (アクセス日 2007.9.4)
  - 20) 新エネルギー財団: 新エネルギー人材育成研修会テキストバイオ燃料演習コース (経済性分析) 配付資料, (2008)
  - 21) 農林水産省: 販売を軸とした米システムのあり方に関する第6回検討会, イネを原料としたバイオエタノールの地域エネルギー循環モデルづくりについて, [http://www.maff.go.jp/j/study/kome\\_sys/06/index.html](http://www.maff.go.jp/j/study/kome_sys/06/index.html) (アクセス日 2008.2.20)

- 22) 東北農業研究センター：平成17年度研究成果情報,  
<http://www.tnaes.affrc.go.jp/seika/jyonhou/H17/seisan/h17seisan10.html> (アクセス日 2008.2.20)
- 23) 小澤雅之：山梨県地域における林地残材の堆積状況,  
山梨県総理研研究報告, 2, 24-27 (2007)
- 24) 石油連盟：石油統計情報10. 都道府県別販売実績,  
<http://www.paj.gr.jp/statis/statis.html> (アクセス日 2008.3.7)
- 25) 経済産業省：次世代自動車・燃料イニシアティブ,  
<http://www.meti.go.jp/press/20070528001/20070528001.html> (アクセス日 2007.11.1)