

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の利用適性と
スイートコーン残さからのバイオエタノール生産 —

恩田 匠・長沼 孝多・小嶋 匡人・長坂 克彦*¹
市川 和規*¹・加藤 知美*¹・島崎 洋一*²

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

— Use Suitability of Sweet Corn as the Biomass
and Bio-ethanol Production from Sweet Corn Residues —

Takumi ONDA, Kota NAGANUMA, Masato KOJIMA Katsuhiko NAGASAKA*¹,
Kazunori ICHIKAWA*¹, Tomomi KATO*¹ and Yoichi SHIMAZAKI*²

要 約

平成18年度における山梨県内のスイートコーン産地および試験ほ場で生産された、様々な品種のスイートコーンの残さの重量、糖度および搾汁率を調査した。県内で未利用バイオマスとして得られるスイートコーンの茎重量は19,445t、その茎から得られる糖類の総重量は655tと推定された。次に、本年度に調製したスイートコーン残さ搾汁液を基質として、ジャーファーマンター（発酵装置）により*Saccharomyces cerevisiae*を用いた発酵試験を実施した。その結果、スイートコーン残さを基質とした発酵収率（発酵歩合）は約0.85であることが分かった。以上のことから、県内で生産可能なエタノール量は、285t（360kl）であると推定された。また、今回得られたラボスケールでのデータをもとに、エネルギー収支の解析を行った結果、バイオエタノール1MJの生産にかかるエネルギー投入量は、0.667MJから0.795MJの範囲であることが判明した。

1. 緒 言

近年、地球温暖化対策や化石資源代替のために、バイオマスから生産されるエタノール、いわゆるバイオエタノール¹⁻⁵⁾の生産が非常に注目されている。バイオエタノールは、いわゆるカーボンニュートラルなエネルギーであることから、温室効果ガスの削減などにも寄与できることが指摘されている。

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、その残さからのエタノール生産

の可能性評価のための研究^{6,7)}に着手した。昨年度は、スイートコーン残さの糖含量などを明らかにし、エタノール生産の基質として有効な成分組成をもつことを明らかにした。本年度は、県内で得られるスイートコーン残さ量を調べ、ジャーファーマンターによるエタノール発酵の収率を明らかにすることで、県内で生産可能なエタノール量を推定した。また、県内における、スイートコーン残さからのバイオエタノール生産のエネルギー収支について解析した。

2. 実験方法

2-1 山梨県内に賦存するスイートコーン残さ量の推定

(1) 県内主要産地のスイートコーン残さ量調査

スイートコーンの残さは、茎部分（主枝と分け枝）と葉部分に分けられるが、本稿では糖を著量に含む茎部分をスイートコーン残さとした。スイートコーン残さ量推定のための調査は、2006年6月に、県内の主要産地

*1 総合農業技術センター

*2 山梨大学

である甲府市, 旧中道町および旧三珠町において行った。調査ほ場数は, 甲府市が4ほ場, 旧中道町が4ほ場, および旧三珠町が5ほ場であった。調査は各ほ場から6株を採取し, 莖重を主枝と分けつ枝に分け生体重を調査した。また莖中糖度は主枝の第2, 5, 7節間について調査した。

(2) 試験ほ場における主要品種の搾汁率と搾汁糖度調査

主要品種別の搾汁率と搾汁糖度を, 総合農業技術センター内のほ場(以下, 試験ほ場)で生産された5品種のスイートコーン(ゴールドラッシュ, きみひめ, 甘々娘, ミルフィーユ, MGS850)を供試して調べた。各品種30本を採取し, 莖と葉に分け生体重を調査した後に, 莖をロールプレス搾汁機(卓上小型搾汁機 TM-120 榎マツオ社製)を用い1本ずつ搾汁し, 得られた搾汁液の糖度と搾汁量を測定して, 搾汁糖度と搾汁率を算出した。

2-2 スイートコーン収穫時期の把握

試験ほ場で生産されたゴールドラッシュを供試して, 雌穂収穫後の糖含量の推移(6月14日~30日)を調べた。すなわち, スイートコーンの雌穂収穫後に任意の5株を経時的に抜き取り, それぞれ第2, 5, 7節間の糖度及び水分含有率を測定した。

2-3 スイートコーン残さ搾汁液の作製とその一般成分分析

試験ほ場で生産されたゴールドラッシュ(雌穂収穫日6月13日, 搾汁日6月21日)を供試試料として, ロールプレス搾汁機により搾汁液を作製し, 成分分析を行った。作製したスイートコーン残さ搾汁液は, 実験に供するまで凍結保存した。成分分析は, 既報と同様に, 一般成分(水分, タンパク質, 脂質, 灰分, 炭水化物)含量, 無機塩類含量, 糖組成およびアミノ酸組成について調べた。

2-4 スイートコーン残さ搾汁液の保存試験

凍結保存したスイートコーン(ゴールドラッシュ)残さ搾汁液を解冻し, 25℃で静置保存したときの, 一般細菌数, 酵母菌数の経時的な変化を調べた。一般細菌数は, 標準寒天培地とニュートリエント培地, 大腸菌群はデソキシコレート寒天培地を用いて調べた。標準寒天培地では混釈培養法, ニュートリエント培地では平板塗抹法で生菌数計測用の培地を作製し, 37℃で培養した。

酵母菌数は, ポテトデキストロース寒天培地を用い, 平板塗抹法により作製した培地を25℃で培養して調べた。

2-5 供試酵母とその培養, 使用酵母の選抜試験

供試酵母として, *Saccharomyces cerevisiae* JCM7255, JCM1817, JCM5710, IAM4017, IAM4027, IAM4043, IAM4064, IAM4083, IAM4098, IAM4135, IAM4112, IAM4145, IAM4160, IAM4166, IAM4175, IAM4181, IAM4182, IAM4195, IAM4205, 4210およびBaker's yeast type II (Sigma社製)計21菌株を用いた。Baker's

yeast type IIは, 乾燥酵母製剤から酵母を純粋分離して用いた。これら酵母の保存と培養は既報⁷⁾にしたがった。

使用酵母の選抜のため, スイートコーン残さ搾汁液(ゴールドラッシュ)6mlに, 供試酵母の前培養液を0.1ml接種し, 25℃3日間静置培養した。高速液体クロマトグラフィーを用いて, 培養後のエタノール量を測定し, 各酵母のアルコール生成量を比較した。

2-6 ジャーファーマンターを用いた発酵試験

ジャーファーマンター(Cullan, ミツワ社製)を用いて, スイートコーン(ゴールドラッシュ)残さ搾汁液のアルコール発酵試験を, 温度と攪拌回転数を制御しながら実施した。発酵の基本条件は, 発酵温度25℃とし, 攪拌回転数50rpmとした。殺菌済みのジャーファーマンターの発酵槽に, スイートコーン残さ搾汁液2.0lを投入し, 50℃30分間加熱殺菌した。殺菌処理後, 25℃に調整した発酵槽に, 酵母(*S. cerevisiae* JCM7255)の前培養液を添加した。発酵中の糖類含量, エタノール含量およびグリセロール含量を高速液体クロマトグラフを用いて測定し, 同時に酵母菌数とpHの推移も調べた。

2-7 スイートコーン全莖液からの発酵試験

スイートコーンを搾汁せずに莖部分のすべてを用いて調製した基質からのアルコール発酵試験を実施した。スイートコーンの莖部分は, 実験に供するまで凍結保存した。まず, 莖部分は解冻後, 家庭用ジューサーを用いて, 均質化した。このとき, 適宜蒸留水を添加して, 均質化を行った。均質化したスイートコーンの莖部分(以下, スイートコーン全莖液という)は, 加熱殺菌後, 酵母の前培養液を添加し, 25℃で静置培養により発酵を行った。発酵中の糖類, アルコールおよびグリセロール含量を調べた。

2-8 県内スイートコーン残さから得られるエタノール量の推定

県内のスイートコーン残さから得られるバイオエタノール推定量は次式から算出した。

エタノール量(t) = 作付け面積(ha) × 主要産地の莖重(t/ha) × 搾汁率(%) / 100 × 搾汁糖度(%) / 100 × 0.5114 (エタノール発酵の変換理論値) × エタノール発酵歩合

2-9 県内におけるスイートコーン残さからのエタノール生産におけるエネルギー収支の試算

スイートコーンの産地である笛吹ライン(旧市川大門町から旧中道町まで)周辺を対象にエネルギー収支の算出を行った。プロセスは, 生産, 輸送, 発酵の3つに分類した。生産プロセスは残さを想定しているため, エネルギー消費量はなしと考えた。輸送プロセスは輸送量を10,052tとし, 笛吹ラインの距離10kmを輸送トラッ

表1 県内主要産地におけるスイートコーン残さ量および茎中糖度

地域	品種	茎重 (g/株)			茎中糖度 (Brix%)
		主枝	分けつ	合計	
甲府市	ゴールドラッシュ	339	134	473	10.2
旧中道町	きみひめ	353	123	476	11.3
旧三珠町	甘々娘	439	157	596	14.3
	平均	370	124	494	11.9

表2 試験ほ場における品種別の生体重・茎中糖度・搾汁率

品種	茎重 (g/株)			搾汁率 %	茎中糖度 Brix %
	主枝	分けつ	合計		
ゴールドラッシュ	338	31	369	23.5	13
甘々娘	405	84	489	30.7	13.6
きみひめ	288	159	447	24	13.5
ミルフィーユ	316	24	340	27.5	13
MGS850	285	62	347	22.9	12.5
平均	326	72	398	25.7	13.1

クが往復すると仮定した。輸送トラックは2種類を考え、2t (ガソリン34.6MJ/l, 燃費6 km/l) と10t (軽油38.2MJ/l, 燃費3.5km/l) の稼働とした。発酵プロセスのエネルギー収支は不確実性が高いため、先行研究 (トヨタ自動車・みずほ情報銀行; 輸送用燃料のWell-to-Wheel評価) の値⁸⁾を参照した。なお、本研究では、輸送プロセスの前段階、残さの刈り取りと収集する際のエネルギー投入量は算出してない。

3. 結 果

3-1 県内で得られるバイオマスとしてのスイートコーン残さ量の推定

県内主要スイートコーン産地で得られる残さ量を表1に示した。各地域を代表する品種は甲府市がゴールドラッシュ、旧中道町がきみひめ、旧三珠町が甘々娘であり、それぞれの主枝、分けつ枝を合わせた茎重は1株あたりそれぞれ473g, 476gおよび596gであった。以上のことから、旧三珠町の甘々娘の茎重量が最も重いことが分かった。

次に試験ほ場で生産した各品種のスイートコーンの搾汁率と搾汁糖度を表2に示した。試験に用いた品種別の平均茎重は、1株あたりの主枝が326g, 分けつ枝が72gで総茎重は398gであった。各品種別の搾汁率の平均は、25.7%であり、供試した品種の中では甘々娘が30.7%と最も高かった。品種別の搾汁糖度は平均が13.1%であり、搾汁率と同様に甘々娘が13.6%と最も高かった。

以上の調査から、県内で得られるバイオマスとしてのスイートコーン残さは、19,445t, 得られる糖重量は

655tであると推定された (表4)。

3-2 スイートコーン収穫時期の検討

雌穂収穫後のゴールドラッシュの糖度と水分含量の推移を調べた結果を図1に示した。雌穂収穫後の茎中糖度は8日後まで増加し、それ以降は大きな変化が認められなかった。水分含有率は8日後までは大きな変化はなく、それ以降に低下が認められた (図1)。なお、雌穂を未収穫の対照区ではこのような糖度の上昇は見られなかった。また、この雌穂収穫後の茎中糖度上昇と水分の低下する現象は現地調査でも確認された (図表は省略)。

3-3 スイートコーン搾汁液の一般成分分析

本年度に発酵試験に用いたスイートコーン (ゴールドラッシュ) の成分分析結果を表3に示した。昨年度に供試したキャンベラと比較して、糖濃度は若干高かったが、一般成分である水分、タンパク質、脂質、灰分、炭水化物および金属塩の含量は、昨年度調べたキャンベラの数値とほぼ同等であった。一方で、アミノ酸のうち、グルタミン含量は顕著に低かった。

3-4 スイートコーン搾汁液の保存性

25℃で保存したスイートコーン残さ搾汁液には、酵母のみが検出された。この酵母の生菌数の推移を図2に示したが、保存3日後には酵母菌数は10⁶CFU/mlレベルに達し、5日後には腐敗臭を呈した。なお、一般細菌類の増殖は認められなかった。

3-5 スイートコーン搾汁液発酵のための酵母の選別

供試酵母21株の試験管レベルでの発酵試験の結果、得られるエタノール濃度には顕著な差異は無かった (図表は省略)。

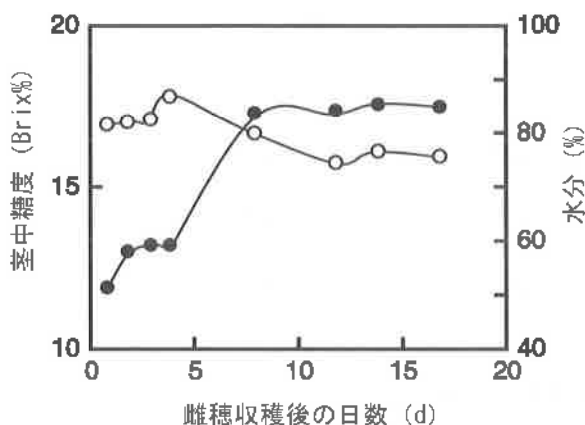


図1 スイートコーン（ゴールドラッシュ）の雌穂収穫後の茎中糖度と水分の推移

●：糖度，○：水分

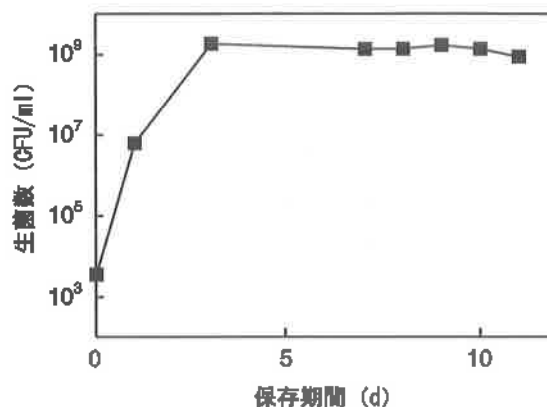


図2 スイートコーン残さ搾汁液保存中の微生物生菌数の推移

■：酵母菌数

表3 スイートコーン（ゴールドラッシュ）残さ搾汁液の成分分析

分析項目	分析項目	分析項目		
水分 (g/100g)	86.7	金属 (mg/100g)		
タンパク質 (g/100g)	0.2	ナトリウム	1.6	
脂質 (g/100g)	0.0	カリウム	563.9	
灰分 (g/100g)	1.2	マグネシウム	11.9	
炭水化物 (g/100g)	11.9	カルシウム	12.8	
		鉄	0.4	
		亜鉛	0.2	
		銅	ND	
		マンガン	ND	
	Brix (%)	11.2	アミノ酸 (mg/100g)	
	糖類 (g/100ml)		ホスホセリン	2.0
	スクロース	8.5	タウリン	ND
	グルコース	1.3	アスパラギン酸	12.3
	フルクトース	1.0	スレオニン	4.8
	エタノール (%)	ND	セリン	6.8
	グリセロール (%)	ND	アスパラギン	14.4
	有機酸 (g/100ml)		グルタミン酸	19.4
	酢酸	ND	グルタミン	18.3
	乳酸	ND	グリシン	2.1
	コハク酸	ND	アラニン	5.8
	リンゴ酸	ND	バリン	5.6
	クエン酸	ND	メチオニン	2.0
			シスタチオニン	ND
			イソロイシン	3.3
			ロイシン	5.7
			チロシン	4.5
			フェニルアラニン	4.0
			γ-アミノ酪酸	5.8
			オルニチン	ND
			リジン	4.2
			ヒスチジン	3.2
			アルギニン	7.4
			ヒドロキシプロリン	ND
			プロリン	2.6

3-6 ジャーフェーマンターを用いた発酵試験

*S.cerevisiae*の初発の接種菌数を 8.0×10^5 CFU/mlとしたときと 5.0×10^4 CFU/mlとしたときの発酵期間中の糖類（スクロース、グルコース、フラクトース）含量、エタノール含量、グリセロール含量および酵母の生菌数の推移を調べた結果を、それぞれ図3-Aと図3-Bに示した。初発の菌数を 5.0×10^4 CFU/mlとしたとき（図3

図3-B）には、糖類がほぼ完全に消費されるまでに約96時間を要し、初発菌数 8.0×10^5 CFU/mlのとき（図3-A）には36時間を要した。いずれの場合も、糖から得られるエタノールの理論値からの収率（発酵歩合）のそれぞれ3回の実験の平均値は、それぞれ0.85、0.86であった。なお、初発菌数が 1.0×10^4 CFU/ml以下の場合や殺菌処理を施さない場合、エタノールの生成はきわめて低いか

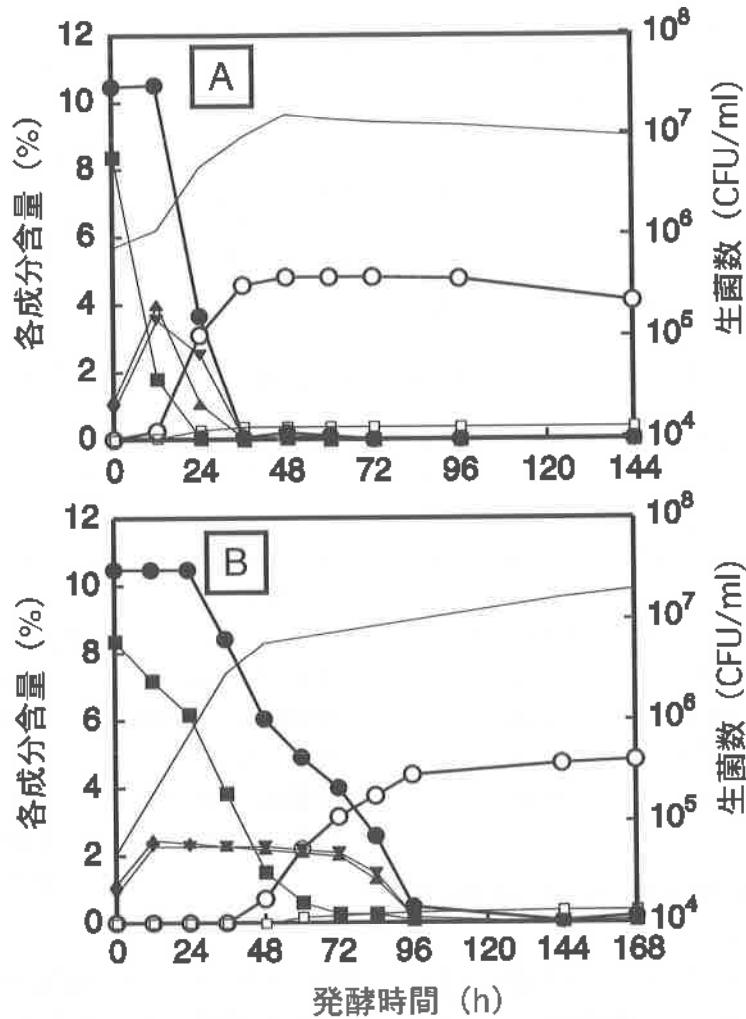


図3 ジャーフェーマンターを用いたスイートコーン残さ搾汁液のエタノール発酵試験
 [3-A: 初発酵母菌数 8.0×10^4 CFU/ml, 3-B: 初発酵母菌数 5.0×10^4 CFU/ml]
 ●: 全糖, ■: スクロース, ▲: グルコース, ▼: フルクトース, ○: エタノール, □: グリセロール, 実線: 酵母の生菌数.

ほとんど蓄積が認められなかった。

3-7 スイートコーン全茎液からの発酵試験

スイートコーンの茎部分を家庭用ジューサーで均質化する際には、茎重量に対して2倍量の蒸留水の添加が必要であった。2倍量より少ない蒸留水の添加では均質化することが出来なかった。

このスイートコーン全茎液の糖類含量を調べた結果、スクロース1.67%、グルコース0.65%およびフラクトース0.44%であり、茎部分からの糖の回収の寄与は比較的小さかった。また、3日後のエタノールの発酵収率は0.78以下と低かった。

3-8 県内で得られるバイオエタノール量の推定

各生産地から得られるスイートコーン残さを用いて生産可能なバイオエタノール量を算出した結果を表4に示した。県内で得られるバイオエタノールの推定量は、年間285t (360kl)、エネルギー量として7,604,599MJと推定された。

3-9 県内スイートコーンからのエタノール生産量の推定とエネルギー収支の試算

本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において、バイオエタノール1MJの生産に必要なエネルギー投入量は、0.667MJから0.795MJの範囲であることがわかった(表5)。このエネルギー投入量は、先行研究⁹⁾で報告されている、バイオエタノール1MJの生産にかかるエネルギー投入量の0.947MJから1.055MJとした数値よりも低かった。

4. 考 察

県内のスイートコーン産地において賦存するスイートコーンの残さ量を推定することができた。各品種のスイートコーンの中では、甘々娘が、その高い糖含量と搾汁率から、バイオマスとして最も期待できた。また、雌穂収穫後に糖濃度が大きく変化することが分かり、エタノール発酵の原料として糖含量の高いスイートコーン残さを得るには、雌穂収穫後1週間程度放置した方が良いと考えられた。この雌穂収穫後の糖類の蓄積機構は今後

表4 県内で得られるスイートコーン残さの推定量と生産可能なエタノールの推定量

地域	主要品種	作付面積 [ha]	茎量 [t]	搾汁量 [t]	糖量 [t]	アルコール量 [t]	生産量 [kL]	エネルギー量 [MJ]
甲府	ゴールドラッシュ	68	1,588	372	48	21	26	557,284
旧中道	きみひめ	98	2,306	553	74	32	41	859,146
旧三珠	甘々娘	46	1,309	402	55	24	30	638,554
笛吹ライン		412	10,052	2,584	339	147	186	3,931,110
全県		797	19,445	4,999	655	285	360	7,604,599

- 1) 「笛吹ライン」と「全県」の数値は、それぞれの作付面積(412ha, 797ha)から、主要3地域(甲府・旧中道・旧三珠)における茎重と搾汁率の平均値を用いて算出した値。
- 2) 糖量からアルコール量への換算には、アルコール発酵の理論効率0.5114と、今回の研究で得られた発酵歩合(本稿では0.85とした)を用いた。
- 3) 生産量の重量[t]から容量[kL]への変換にはエタノール密度0.79 [g/cm³]⁹⁾を用いた。
- 4) 生産量の容量[kL]からエネルギー量[MJ]への変換にはエタノール低位発熱量21,100 [MJ/kL]⁹⁾を用いた。

表5 県内の笛吹ラインにおけるバイオエタノール生産のエネルギー収支算出結果

	最良ケース	最悪ケース
生産 [MJ/MJ]	0	0
輸送 [MJ/MJ]	0.056	0.147
発酵 [MJ/MJ]	0.611	0.648
	0.667	0.795

表6 バイオエタノール生産の先行研究におけるエネルギー収支

	最良ケース	最悪ケース
生産 [MJ/MJ]	0.258	0.328
国外輸送 [MJ/MJ]	0.012	0.013
発酵 [MJ/MJ]	0.611	0.648
国外輸送 [MJ/MJ]	0.057	0.057
国内輸送 [MJ/MJ]	0.009	0.009
	0.947	1.055

検討する必要があるが、雌穂収穫後に光合成生産物が茎中に蓄積した可能性が高いものと考えられた。

なお、季節的制約のあるスイートコーンを補完するために有効と考えられる、バイオマス植物としてのソルガムの調査結果については米年度に報告したい。

搾汁した後のスイートコーン残さ搾汁液は、保存性が悪く、室温では3~5日間以内にエタノール発酵を開始する必要があった。*S.cerevisiae*の21菌株を用いた選抜試験の結果、エタノール生成量に大きな差異は認められなかった。したがって、本菌種の酵母を用いればほぼ同程度のエタノールが得られることが分かった。また、ジャーファーマンターを用いた、*S.cerevisiae*によるエタノール発酵試験では、発酵収率は約0.85であることが分かった。発酵収率は、デンプン質のバイオマスの場合で0.88~0.93程度、糖蜜の場合で0.80~0.83と報告されていることから、条件設定などの検討により収率を若干高められる可能性は考えられた。

一方で、搾汁をせずに茎部分を全部用いる発酵試験では、高い糖濃度の基質が得られないことから、生成されるエタノール濃度が低く、現状では本法によるエタノール生産は困難であると考えられた。今後は、搾汁後の茎部分に残存する糖類の利用方法について検討する必要がある。

以上の実験室レベルの知見をもとにして、県内スイートコーン残さからのバイオエタノール生産におけるエネルギー収支を明らかにすることができた。先行研究との

比較により、エネルギー収支の観点では本研究から得られた実績は有効であるといえる。今後は、エタノール生産プラントの設計を含めた、より厳密なエネルギー収支を明らかにし、コスト収支を明らかにしていく。

5. 結 言

山梨県内で得られるスイートコーン残さ量とその搾汁液から生産可能なエタノール量を算出し、バイオエタノール生産におけるエネルギー収支を試算することができた。今後は、スイートコーンを補完するために有効と考えられるソルガムの栽培適性を検討し、より効率のよいアルコール生産条件についても検討していく。さらに、実際のバイオエタノール生産プラントの設計を含めた、エネルギー収支算出・コスト収支を調査していく。

参考文献

- 1) 大型泰弘, 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量産技術と実用化の展望, 高圧ガス, 40, 28-32 (2003)
- 4) 稲田雄二: バイオエタノールー世界の現状と日本の今後の取り組みー, 環境研究, 133, 64-72 (2004)

- 5) Kunteova, L. : The potential role of bioethanol, Int. Sugar J., 98, 448-452 (1996)
- 6) 長坂克彦, 市川和規, 加藤和美, 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) 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)
- 9) 大山尚宏, 中田俊彦: 地域特性を考慮した自動車用エネルギー作物利活用システムの設計, 第15回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 261-262 (2006.8)
- 10) 斉木隆: エタノール生産技術, バイオエタノール最前線 (大聖泰弘・三井物産編), 工業調査会, p.114-145 (1999)