

畑作残渣からバイオエタノールを作る ー有用物質の共生産によるコスト削減ー

北口 敏弘

地方独立行政法人北海道立総合研究機構産業技術研究本部
ものづくり支援センター工業技術支援グループ 主査

共同研究機関：神戸大学、北海道大学

研究の背景、目的

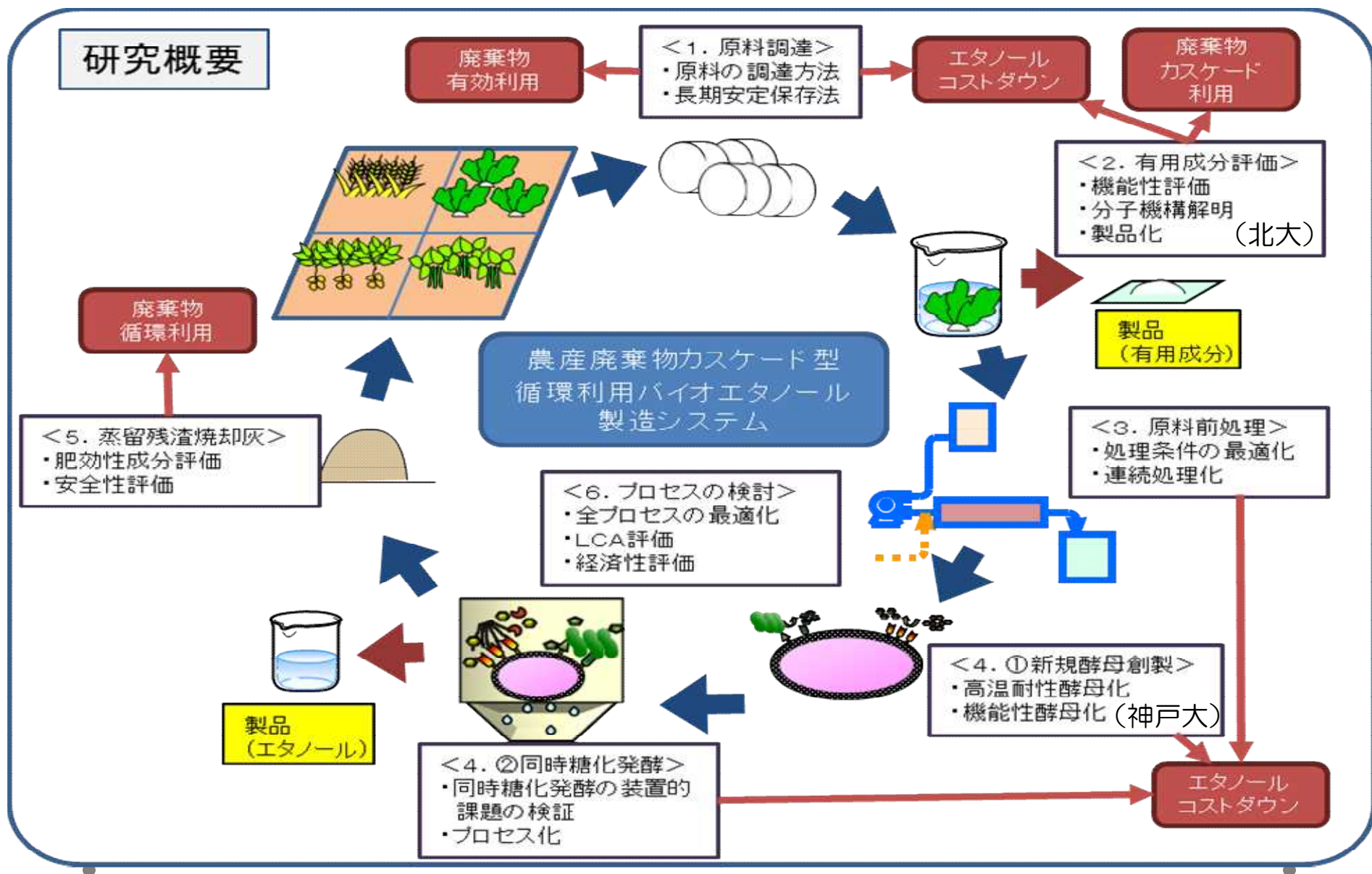
背景

- 二酸化炭素など温室効果ガスの排出量抑制による地球温暖化防止対策が望まれている。
- 化石燃料の枯渇、インド・中国などの発展によるエネルギー需要の増大などから石油価格が上昇しており、エネルギー源の多様化が望まれている。
- ビートトップなど畑作残渣は緑肥として鋤込まれているため、地中での分解時に亜酸化窒素など温室効果ガスが発生している。

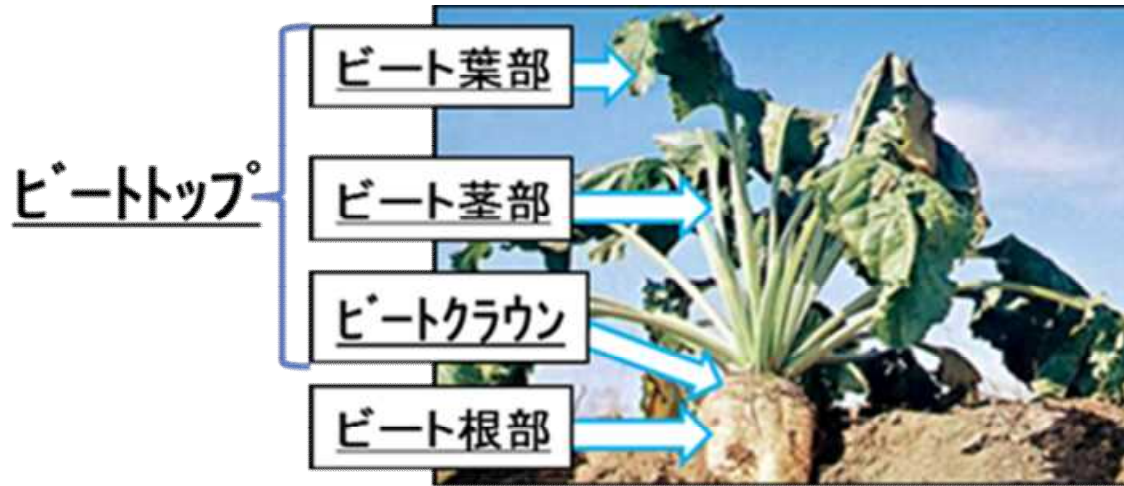
目的

- ビートトップなどのセルロース系農業廃棄物から有価物(ビートトップ油：抗肥満性を有する)を回収して廃棄物のカスケード利用を図り、効率的なエタノール製造方法を検討し、安価なバイオエタノール製造技術体系を確立し、地球温暖化防止に貢献する。
- エタノール蒸留残渣のサーマルリサイクル後に得られる焼却灰を肥料等として圃場還元する廃棄物循環利用システムを構築する。

研究の概要



ビートトップとは



ビートトップとは、収穫前に予め切り取られる葉部、茎部、根部の一部（クラウン）であり、通常、圃場に鋤込まれる。

北海道内と十勝管内の農業残渣排出量

農業残渣	作付面積あたりの乾物重量 (kg/ha)	作付面積(ha)		賦存量(万t)	
		北海道	十勝管内	北海道	十勝管内
小豆殻+茎葉	1107	23200	12500	3	1.4
大豆殻+茎葉	3141	24400	4160	8	1.3
麦わら(小麦)	3583	116300	45700	42	16.4
スイートコーン茎葉	-	9640	3190	12	3.7
ビートトップ	6800	62600	26800	43	18.2

※スイートコーン以外は乾物ベース



ビート栽培状況



ビートトップ

ビートトップ回収機



昭和43年～60年に販売されていた回収機（東洋農機(株)製）



日本甜菜製糖(株)、帯広畜産大学などが開発中の回収機

ビートトップ回収機 2



- ・ビート収穫機を改造したもの。
- ・回転ドラム下部にカッターがあり、ビートトップをカッティングしたのち、土と混ざることなく、コンベアに導入される。

- ・作業能率は6a/h
- ・収穫量は、20～30t/ha



- ・改善は必要であるが利用可能である。



ビートトップ脂溶性物質、糖の保存性

バイオマスは秋期の一時期に収穫されるため、利用するまでの期間保存する必要がある。そこで、色素や糖について保存性の試験を行った。

試験方法

①エタノール水溶液の噴霧による糖の保存試験

エタノール水溶液(0,1,10,90%)を基質に当量噴霧し、室温(25°C)及び低温(3°C)保存での糖含有量の経時変化を測定

②抽出後のエタノール溶液でのカロテノイドの保存試験

4倍容のエタノールに4昼夜浸漬後、抽出された脂溶性物質をそのままエタノール中で保存。保存温度、室温(25°C)、低温(3°C)、高温(40°C)と遮光の有無による影響を調べた。

○糖類の測定

NREL/TP-510-42618に準拠

○カロテノイドの測定

液体クロマトグラフィーにて測定



ビートトップに含まれる糖の保存性

試験結果

ビート茎葉部の性状

ビート茎葉部の糖類 (%乾物ベース)

グルコ	キリン	ガラクト	アラビ	マン
17.5	2.5	2.6	7.0	0.2

ビート茎葉部のカロテノイド含有量 (ppm乾物ベース)

α-ネオキサチン	β-オキサチン	ルテイン
190	60	480

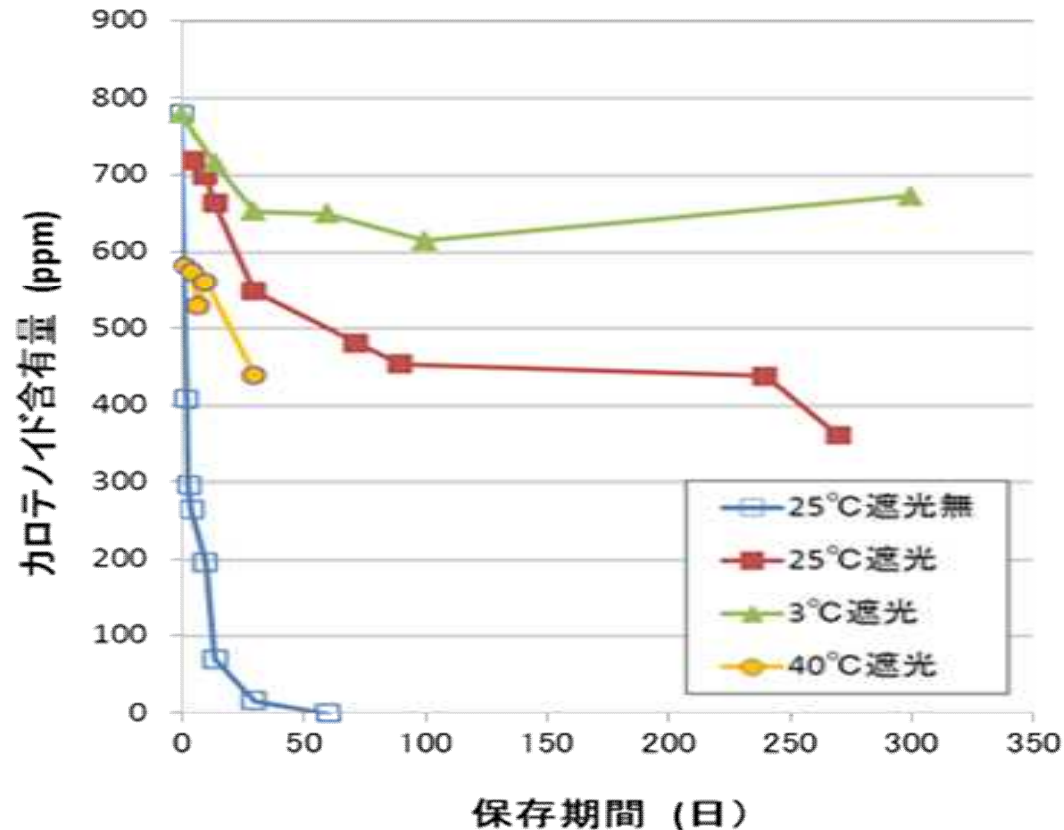
糖類含有量の試験結果 (エタノール噴霧) (%)

保存温度 (°C)	噴霧エタノール 濃度(%)	保存期間									
		初期値	2日	1週間	2週間	1月	2月	3月	4月	6月	9月
3	0%	30	26	27	33	32	33	30	29		
	1%		28	29	32	34	34	30	25	24	23
	10%		27		28		31	30	27	31	33
	90%		29	21	27	29	32	30	27	31	34
25	0%		28	30	28	0	27	24	17	15	14
	1%		30	30	27	32	26	20	16	16	13
	10%		27		24		27	27	22	21	15
	90%		26	27	29	31	29	29	27	27	31

- 9ヶ月後でも低温では、10%以上の濃度でほとんど変化無かった。
- 室温では3ヶ月以降でエタノール濃度が低いサンプルは減少しているが、90%噴霧サンプルは、減少していない。

ビートトップ脂溶性物質の保存性

カロテノイド含有量の変化
(アルコール抽出液保存)



- 遮光により、カロテノイド含有量の低下が著しく抑制された。
- 低温+遮光での保存が有効であることが示された。
- ビートトップ油の生産は、ビート収穫当初から翌年3月までの、寒冷外気を利用できる期間内に行うことが有効であることが示された。

ビートトップ脂溶性物質の機能性

試験方法1（脂溶性物質の抽出、分析）

1. 10倍容のエタノールに一晩浸漬して抽出
2. 抽出液をろ過
3. 再び10倍容のエタノールに一晩浸漬して抽出
4. 2回抽出した液をエバポレーターで濃縮
5. 濃縮物にクロロホルム：メタノール：蒸留水=10:5:3を加え、混合後、下層を回収
6. 薄層クロマトグラフィー等にて油脂成分を分析

試験方法2（脂溶性物質の機能性評価）

マウス（Ⅱ型糖尿病・肥満モデルマウス）による動物実験

○飼料（コーンスターチを主成分としたAIN-93G組成）

コントロール群：大豆油14%

抽出油投与群：大豆油14%のうち4%を抽出油で置換

○各群マウス数：6匹ずつ

○飼育期間：26日間

○評価項目：血液中血糖値、肝臓脂質等

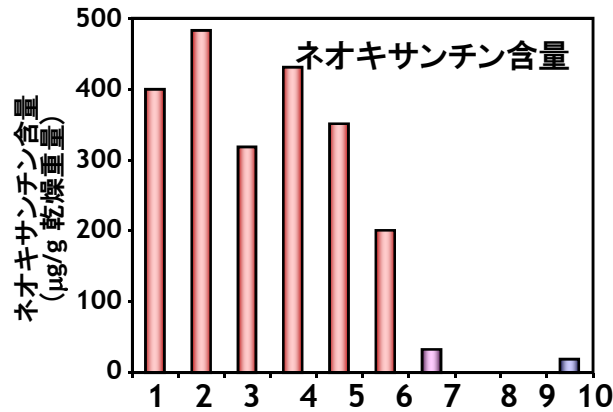
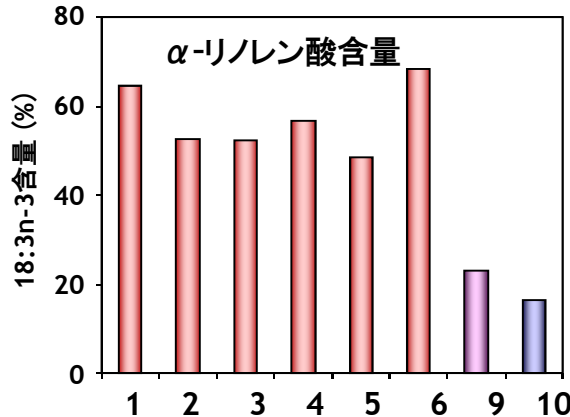
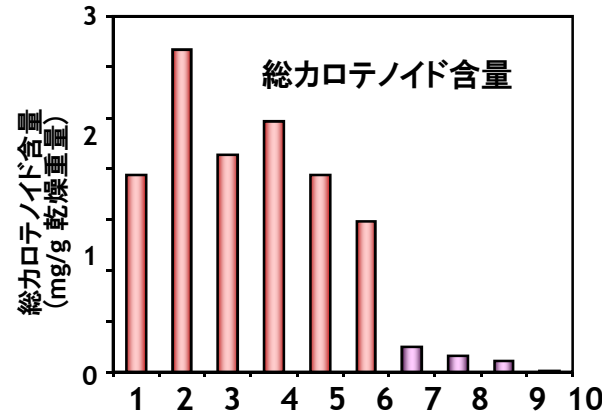
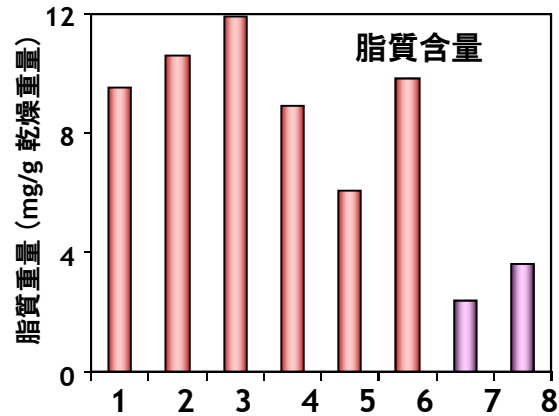
ビートトップ脂質の含有量、成分

未利用植物葉部
(ビートトップなど)

エタノール抽出

エタノール
プラントリーフ油(～10%乾重量)
(機能性成分:ネオキサンチン、極性糖脂質)

■プラントリーフ油の特徴(他の植物由来の脂質とは異なる特徴)



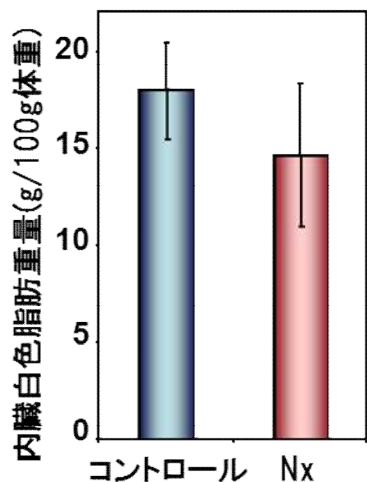
- 葉部には光合成を担うクロロプラスト由来の脂質(プラントリーフ油;主として糖脂質)が他の部位より多い
- 主たる脂肪酸はα-リノレン酸(18:4n-3)
- 光合成色素(カロテノイド)の含量が高い
- 特徴的な光合成カロテノイドはネオキサンチン

1:ビートトップ; 2:小松菜; 3:大葉; 4:バジル; 5:ニラ;
6:春菊;
7:ササゲ(実); 8:シントウ(実); 9:ピーマン(実);
10:アスパラガス(蕾)

1:ビートトップ; 2:ホウレンソウ; 3:チンゲンサイ; 4:ミズナ;
5:パセリ; 6:ネギ;
7:トウガラシ(実); 8:ピーマン(実); 9:ササゲ(実);
10:ブロッコリー(蕾)

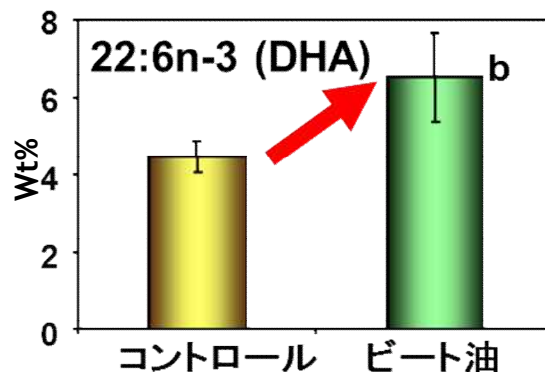
ビートトップ脂質の機能性

内蔵白色脂肪組織重量



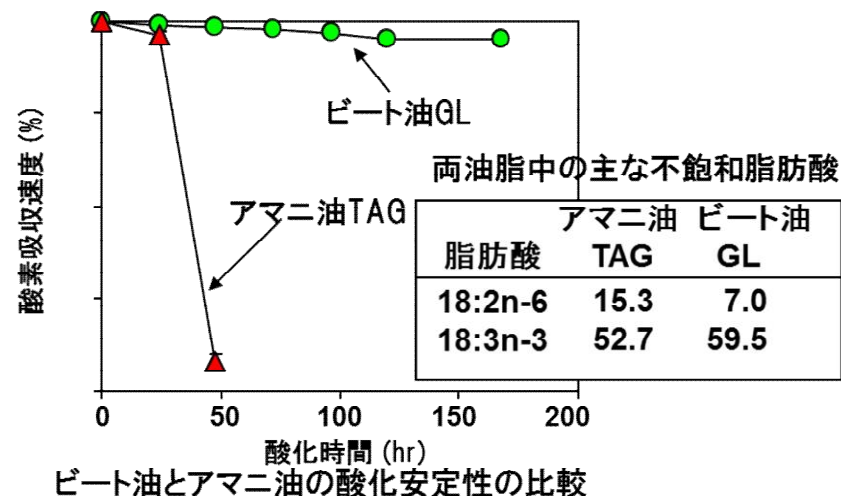
抗肥満作用

- 脂質代謝改善作用:
 - ネオキサンチンとオメガ3不飽和脂肪酸に起因
 - 肝臓総コレステロールの有意な減少
 - 肝臓総脂質と中性脂質の減少



ビート油投与による肝臓中のDHAを始めとするオメガ3脂肪酸の増大

- 肝臓中のDHA含量の増大:
 - ビートトップ油の α -リノレン酸が基質
 - 含まれるスフィンゴ脂質やネオキサンチンの作用によりDHA合成が促進
 - ビートトップ油はDHAの供給源となる

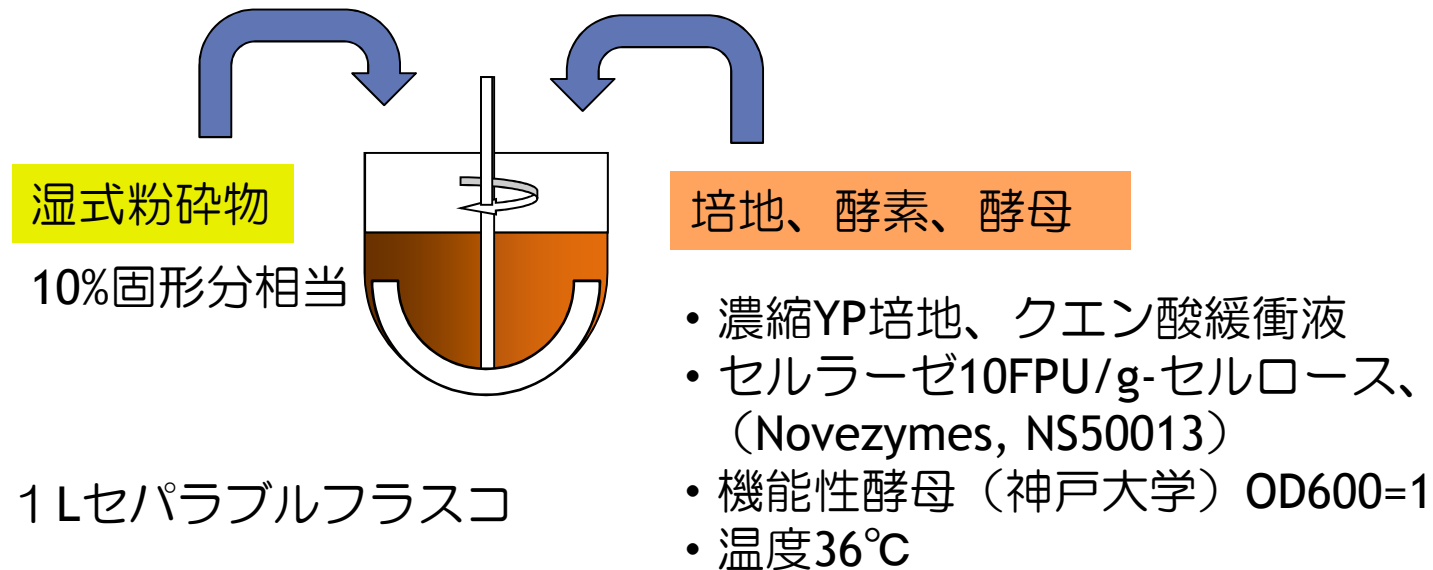


- ビート油GL中の高度不飽和脂肪酸は非常に安定性が高い。
- オメガ3脂肪酸を含む油脂(アマニ油や魚油)はその酸化安定性の低さから食品への活用が困難。
- しかし、ビート油の場合、オメガ3脂肪酸含量を多く含むにもかかわらず極めて酸化安定性が高い。

ビートトップ湿式粉碎物の同時糖化発酵特性

湿式粉碎 のみで前処理したビートトップの発酵特性を評価

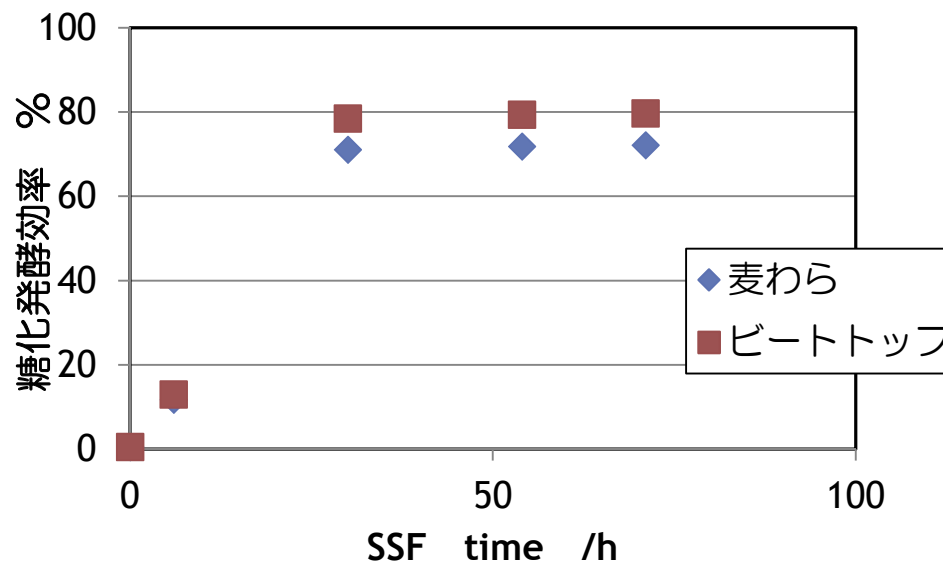
- 2011秋採取のビートトップ（茎葉＋クラウン部）
- 10cm程度に切断後、マスコロイダーを用いて湿式粉碎



ビートトップ湿式粉碎物の同時糖化発酵特性

ビートトップ湿式粉碎物の性状 (Glu換算)

	ビート茎葉	ビートトップ (茎葉+クラウン)
固形分	10.2 %	12.9 %
セルロース量	8.5 mg/g(Wet)	8.2 mg/g(Wet)
スクロース量	ND	22.7 mg/g(Wet)
グルコース量	16.3 mg/g(Wet)	19.8 mg/g(Wet)
フルクトース量	8.6 mg/g(Wet)	13.3 mg/g(Wet)



ビートトップの同時糖化発酵特性 (TS:10%)

- ビートトップのセルロースは糖類全体の13%と少ないが、スクロースやフルクトースが多く含まれており、粉碎のみでエタノール発酵が可能であった。
- ビートトップのみでも発酵が可能であり、30h後に発酵効率が約80%と高い値を得た。



湿式粉碎のみで発酵が可能であることが分かった。

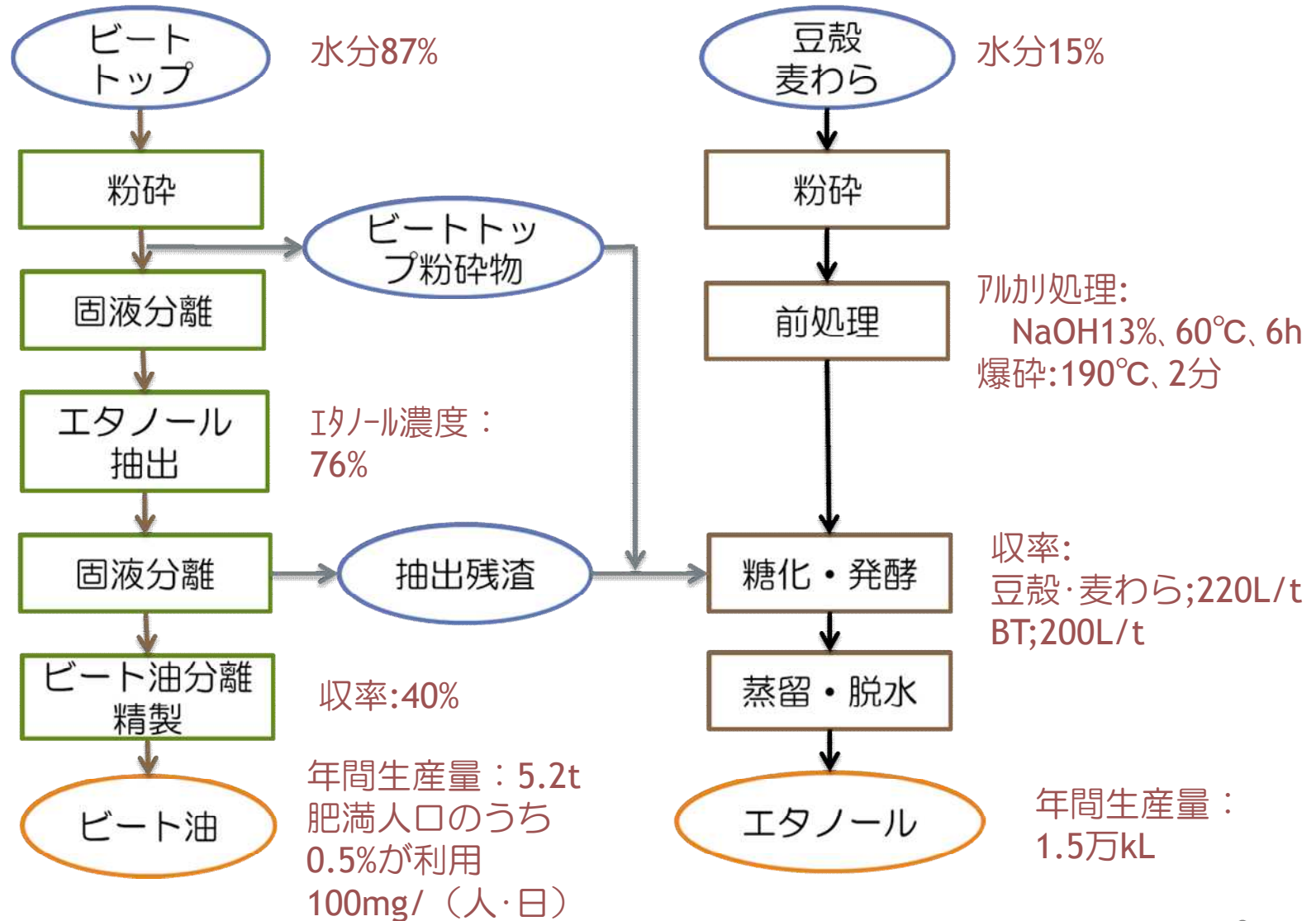
プロセスの検討

前提条件：

操業期間 300日／年（ただし、ビートトップ油生産は原料保存のため低温外気を利用できる期間11月～翌3月の150日間とする）

	項目	仕様設定
ビートトップ油生産	粗粉碎	カッターミルによる素粉碎
	破碎	マスコロイダーによるゲル化
	ビートトップ初期水分	87%
	ビートトップ初期脂溶成分含有量	100mg/g-dry
	抽出エタノール/基質比	4kg/kg-wet
	抽出エタノール初期濃度	85%
	抽出エタノール最終濃度	76%
	抽出段数	1段
	抽出時間	16h
	固液分離後固形分濃度	25%
固液分離による脂溶成分の液側への亡失率	46%	
エタノール生産	粗粉碎	カッターミルに供給可能な素粉碎
	破碎	スクリーンφ5mm通過
	アルカリ処理	アルカリ種:NaOH、濃度:13%、固形分濃度:25%、温度:60~75℃、時間:6h
	蒸煮爆砕処理	温度:190℃、時間:2分、アルカリ処理+蒸煮爆砕処理の物質回収率:グルカン100%、キシラン86%、処理後のTS:20%
	糖化発酵	セルラーゼ使用量:5FPU/g-セルロース、36℃、収率:ビートトップ200L/t、麦桿等220L/t
	蒸留・脱水	蒸留:エタノール回収率99.5%、製品濃度92%wt、脱水:ゼオライト膜脱水、エタノール回収率98%、製品濃度99.5%wt

プロセスの検討



経済性評価

項目		単位	数値	備考	
計画生産規模	規模	kL/y	15000		
	麦わら、豆殻	kL/y	7830		
	ビートトップ	kL/y	7170		
処理量	麦わら、豆殻	t/y	35591		
	ビートトップ	t/y	28160		
変動費	原料費	円/L	59	麦等13.7円/kg-dry、豆殻2.4円/kg-dry、ビートトップ(BT) : 2.9円/kg-wet	
	電力売電	円/L	0	FITバイオマス廃棄物(木質以外) 燃焼発電17.85円/kWh	
	電力使用	円/L	2		
	A重油	円/L	14		
	工業用水	円/L	0		
	薬品類	NaOH	円/L	14	
		硫酸	円/L	3	
		酵素	円/L	5	NRELの酵素生産の5.1円/L
		その他	円/L	5	日本アルコール協会ベース、軟水剤など
	小計	円/L	27		
	排水処理	円/L	1	NRELベース	
	ビート トップ油	生産費用	円/L	11	3.3万円/kg-BT油
		売油収入	円/L	-42	130万円/kg-BT油
	合計	円/L	71		

・ビートトップ脂質の販売によってバイオエタノールの単価が約30円/L低減出来ることがわかった。

本研究より得られた主な成果

- 原料収集、保存に関する検討では、原料の賦存量を明らかとした。また、企業が開発しているビートトップ回収機によるビートの回収が可能であることが分かった。また、糖類、カロテノイドについて9ヶ月まで長期保存できる条件を見いだした。また、カロテノイドは、遮光+低温により著しく保存性が改善された。
- 原料に含まれる有用成分評価では、ビートトップ脂質量や成分を明らかとし、ビートトップ脂質中のネオキサンチンの生物活性とその分子機構の一端を解明すると共に、グリセロ糖脂質の酸化安定性が格段に高いことを見出した。さらに、製品化プロセスを確立した。
- 原料の前処理では、グルコース収率は麦稈が90%、大豆殻は77%となる前処理条件を見いだした。安定した運転が可能な連続前処理装置の開発を行った。
- 同時糖化発酵では、創製した機能性温度ストレス耐性酵母は高温におけるセルロース原料からの同時糖化発酵において高いエタノール生産性を示した。また、高温糖化により液化が早期に進行し、糖化発酵効率が向上することが認められた。
- エタノール蒸留残渣焼却灰の成分評価では、ビートトップ灰、麦稈灰、大豆殻灰の全てが粗製加里塩の基準以上の酸化カリウムを含有しており、肥料として安全に利用できることが分かった。
- 以上の研究結果を踏まえて、北海道十勝地方にモデルを設定しビートトップ油とバイオエタノールの生産プロセスを提案し、そのプロセスについてLCA評価、経済性評価を行った。

これらより、農産廃棄物から有用物質を生産し、その残渣を利用したバイオエタノール生産プロセスを構築し、価格競争力のあるバイオエタノール生産体系を確立できた。

ご静聴、ありがとうございました。