

微生物によるバイオマス系廃棄物からの水素生成¹

石垣 智基²

Microbiological Hydrogen Production from Biomass Waste

Tomonori ISHIGAKI

Department of Environmental Solution Technology, Faculty of Science and Engineering, Rykoku University

Abstract

This study has showed experimental trials to expand the feasibility of fermentative hydrogen production from biomass-waste. Difficulties of fermentation of biomass-waste that is impossible to use as animal feeding stuff or compost, so called "unutilized biomass", must be need for material pretreatment because of variability on its quality and generation, and complicated operation management. Effective hydrogen production from biomass-waste with simple and easy management of fermentation must be indispensable for appropriate biomass utilization process. Several countermeasures such as feedstock combination, ash addition, dry fermentation, and inoculums development must contribute to expand the capacity of hydrogen fermentation of biomass-waste.

Key words; Fermentation, Biomass waste, Microbial community, Waste to energy

1. バイオマス系廃棄物の嫌気性水素発酵について

日本におけるバイオマス系廃棄物の年間発生量は2億8143万と算出されている¹⁾。バイオマス系廃棄物の資源化利用の核となる技術のうち、プライオリティが高く設定されている堆肥化や飼料化については、需要と供給間との量・質的なアンバランスから、利活用を進めるのが困難なケースが報告されている。また堆肥化や飼料化に不適な低品質・未利用バイオマス廃棄物についてはエネルギー化が有望視されているが、例えばメタン発酵は、エネルギーとしての利用価値が低くシステムが経済的に持続しないことおよび発生する消化液の利用・処理などの問題点が挙げられている。こうした状況下で発生する未利用バイオマス系廃棄物の利活用を推進する上で、特に堆肥化物や飼料化物の受入容量の低い都市近郊においては、エネルギー利用および製品原料化等の資源化技術の選択肢を広く持つことが不可欠である。未利用バイオマスからの水素生成に関する検討もその一つである。

バイオマスからの生物学的な水素生成には、嫌気性光合成細菌または嫌気性非光合成細菌が関わる。どちらにも利点・欠点は見受けられるが、非光合成細菌は増殖速度が速く、固形バイオマス基質の利用範囲が広く、増殖に光を必要としな

いために管理が容易で連続的な水素の生産が可能となるなどの利点がある。嫌気性代謝の代表的な反応においては、細菌群は解糖系を利用して、単糖、おもにグルコースからピルビン酸を生成し、さまざまな発酵産物を合成している (Table 1)。グルコースからの水素発酵において検出される主要な発酵代謝産物はギ酸、酢酸、乳酸、プロピオン酸、酪酸、エタノールである。最大水素収率は有機酸型発酵の4 mol-H₂/1mol-グルコース (約120 ml-H₂/g)に相当) であるが、その他の有機酸類が生成すればその分水素収率は小さくなる。また、発生した水素がメタン生成菌やホモ酢酸生成菌により消費される場合もあり、実質的な水素収率はさらに低下する可能性が高い。

嫌気性水素発酵については、グルコース、スクロースなど糖類の純粹基質と、単離菌である *Clostridium* 属または *Enterobacter* 属などの典型的な水素生成菌を用いた既往研究

Table 1 Theory of hydrogen production and fermentative products from glucose

水素生成	
酢酸生成	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$
酪酸生成	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2 + 2CO_2$
水素消費	
プロピオン酸生成	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
基質競合(水素消費なし)	
エタノール生成	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
乳酸生成	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH(OH)COOH$
プロピオン酸	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 4CH_3CH_2COOH$
・酢酸生成	$+2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O$
酪酸生成	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_3COOH$
ホモ酢酸生成細菌	$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$

1. 平成 20 年 6 月 12 日 本会第 120 回例会において発表

2. 龍谷大学理工学部環境ソリューション工学科

平成 20 年 3 月 7 日受理

が散見される。しかし、原料の前処理、無菌的な取り扱い、pH 制御などの発酵管理など、廃棄物の処理という点を念頭に置いた場合の実用化に際しての管理の煩雑さやコストなどの懸念材料が指摘される。

Okamoto²⁾は、実際の有機性廃棄物として食品廃棄物を用いた水素発酵を試み、米、ジャガイモといった炭水化物系の原料からは水素回収が可能一方で、卵の白身、肉などの蛋白質系、肉脂、鳥の皮などの脂質系の廃棄物からでは水素の収率が非常に低くなるなど、廃棄物の種類により水素発酵の難易度が大きく異なることが報告されている。また原料の多様性に加え、未利用バイオマスは分散型の発生が想起されるため、地域単位で組成や性状・品質が異なり、同質の原料を安定的に供給は期待できない。こうしたバイオマスの種類・性状・品質の変動・不均一性による水素生成効率への影響が、バイオマスからの水素生産実用化において重要な課題になると考えられる³⁾。

本論では、未利用バイオマス廃棄物の資源化の選択肢としての水素発酵の適用性を高めるための、無植種での簡便な維持管理と反応促進、および多様性に対応するための植種の開発に関するいくつかの検討事例について報告する。

2. バイオマス系廃棄物からの水素生成

バイオマス系廃棄物を原料とする水素発酵特性を明らかにするために、食品廃棄物（小規模食堂残飯）、鶏糞二種類、牛糞、コンポスト五種類を用いて、無植種で200ml 容スケールでの嫌気発酵を行った。食品廃棄物を原料とした場合、投入バイオマス 10 g に対して 3.2 ml の水素生成が確認された。これは有機物分(VS)1g あたり 0.2 ml の水素生成に相当する。また鶏糞からは水素が生成せず、23 ml のメタン生成が確認された。また、食品廃棄物発酵液の pH は水素生成に伴って低下する傾向にあり、開始時の pH 6.1 から三日間の培養で pH 3.6 まで低下した。食品廃棄物の発酵液からは 2000 mg/l 以上の酢酸が確認され、酢酸型の水素発酵が推測された他、およそ 10000 mg/l の乳酸が検出された。水素生成が確認されなかったバイオマスからは、数十から数百 mg/l のオーダーでしか有機酸類は検出されなかった。Table 2 には原料であるバイオマス廃棄物の 1:10 懸濁液中の有機酸濃度を示す。鶏糞中には酢酸が高い濃度であらかじめ含まれており、これらがメタン生成の基質となり、結果的に水素生成の雰囲気は形成されなかったことが推測される。原料種の性状を評価することで事前の水素発酵への適用可能性を判断し、発酵促進策の必要性

や他の資源化手法の適用について検討できると考えられた。

水素生成を促進するためのいくつかの発酵管理手法について検討した。pHの低い範囲でのメタン生成菌の活性低下を利用し、メタン発酵と水素発酵を区分する要因としてpH管理がしばしば用いられる。発酵開始時のpHを5前後に制御したところ、食品廃棄物の水素生成量はVSあたりに換算して1.5倍(0.3 ml-H₂/g-VS)となる一方、鶏糞の水素生成量が10倍(0.27 ml-H₂/g-VS)となるなど、その効果には原料による差異が確認された。ただし、開始時にpHを調整するだけでなく、培養中に有機酸が生成されpHが継続的に低く維持されることも、水素生成阻害の要因を除去するという点で重要であることが示された。一方で、有機酸の過剰な蓄積は水素生成も低下させるため注意が必要である。河野⁴⁾は有機酸の添加が水素生成に影響を与えることを報告しているが、本研究では酢酸、酪酸、プロピオン酸の添加は、水素発酵の促進・阻害のいずれの影響も示さなかった⁵⁾。適正な発酵管理の観点からは、水素生成促進の上での運転項目を増やすことは得策ではないことから、pHや有機酸濃度の管理はより簡便であることが求められるといえよう。

基質または微生物群の適合性を高める一方策として、原料を混合した水素発酵に関する検討を行った。鶏糞と牛糞、あるいは鶏糞とコンポストの混合発酵では、単独での発酵に比べて水素生成量はわずかに増加したが、それでも0.1 ml/g-VS以下に留まった。一方、鶏糞と食品廃棄物の混合では4.6 ml-H₂/g-VS~18 ml-H₂/g-VSと効率的な水素生成が確認された。水素生成と同時に、2000-5000 mg/lの酢酸および1500-5000 mg/lの酪酸が発酵液中で検出され、酢酸型と酪酸型の水素発酵が同時に起こったことが示唆された。単独原料では酪酸型の水素発酵は確認されなかったことから、原料の混合調整によって、基質と微生物群が適合し、発酵形態に影響を与えることで水素生成の促進に寄与した可能性が考えられる。こう

Table 2 Organic acids detected from material for hydrogen fermentation

	acetate	Propio- -nate	iso- butyrate	n- butyrate	iso- valerate	valerate	caproate
Food waste	218	24	7	11	4	8	ND
Chicken Manure A	551	89	ND	80	ND	ND	ND
Chicken Manure B	949	283	69	136	75	ND	ND
Cow manure	ND	ND	ND	4	ND	ND	ND
Compost a	ND	ND	ND	ND	ND	ND	20
Compost b	ND	ND	ND	17	2	ND	23
Compost c	ND	2	1	11	ND	ND	ND
Compost d	ND	3	2	13	2	ND	ND
Compost e	69	14	9	21	5	4	ND

した原料の混合調整による水素生成の促進は、バイオマスからの効率的な水素生産に寄与する、簡便な運転管理の方策として期待される。

3. バイオマス廃棄物の水素発酵の実用化に関する検討

バイオマス廃棄物を原料とした水素生成の実用化に向けて、および運転管理項目も含めてより具体的なパラメータ取得を目的として、4L容の発酵槽を用いたスケールアップ実験を行った。鶏糞と食品廃棄物を原料として発酵させた結果、約1日で原料1kgあたり12Lの水素生成(36 ml-H₂/g-VS)が達成された。すなわち20倍のスケールアップによって、有機物あたりの水素収率がほぼ2倍となった計算になる。この要因として、大型容器での発酵に伴って、反応系内を嫌気状態に維持することが容易となったことが挙げられる。発酵槽の酸化還元電位は400 mV前後で推移したが、一方で急速な反応進行によって有機酸が蓄積し、pHが4以下にまで低下したことで、以降の発酵が進まなかった可能性も推測され、運転管理の適正化による発酵促進の余地が考えられた。

嫌気性発酵の実用化に際してのひとつの問題点として、発生する残さと発酵液の処理が挙げられる。特に発酵液については液肥利用や次段でのメタン発酵が想定されるが、その適用性については検討が不十分である。一つの解決策として、乾式水素発酵による発酵液生成量の削減について検討した。フラスコスケールでの発酵実験の結果、含水率が60%前後で有機物あたりの水素生成量が著しく低下することが確認された (Figure 1)。この要因としては、水分量の減少による微生物活性の低下および酸素の持ち込みによる反応系内の好気化などが挙げられる。こうした関係性を元に、水素生成と廃液処理の両者を最適化する運転管理手法について提案が可能であるといえる。

4. バイオマスの多様性に対応可能な植種源の開発

多様な性状のバイオマス廃棄物を原料とした水素発酵を安定的にかつ効率的に維持管理するひとつの方策として、植種(種菌)の活用が挙げられる。既報の水素生成純粋菌や単一の原料を利用可能微生物群とは異なり、原料の多様性や性状の変動に対応可能な、水素生成植種源の構築について検討した。バイオマス廃棄物の反復回分培養により植種源を得るとともに、植種源を原料のバイオマスの5%添加して反復培養を行い、安定して効率的な水素生成が可能な水素生成細菌群集

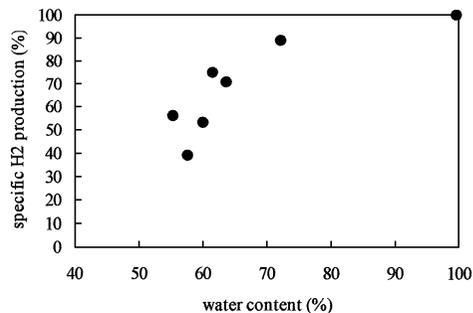


Figure 1 Hydrogen production by dry fermentation

の集積を試みた⁹⁾。

鶏糞と食品廃棄物の混合発酵より得られた植種源 CF は、多種のバイオマス原料からの水素生成が可能であったが、回分発酵の繰り返しにより徐々に水素生成能が低下する傾向が確認された。原料が食品廃棄物の場合、当初の水素生成能(35 ml/g-VS)から、繰り返しによって10分の1程度に減少した。また原料が鶏糞と食品廃棄物の混合物の場合、反復培養によっていったん水素生成能が増加し、最大でVS1gあたり60mlの水素生成能が確認されたが、さらに反復培養を重ねると水素生成量の低下と発生時期の遅延が確認された。

水素生成が低下する際の発酵液の特徴として、発酵初期に10000 mg/lを超えるような過度の酢酸の蓄積すること、およびその後の酢酸の蓄積が特徴的な現象として確認された。特に発酵液中のpHの低下により、水素発酵の最適条件であるpH5-6を下回り、水素生成菌の活性が低下したことが推察される。植種源の微生物群集解析の結果、嫌気性水素生成細菌である*Clostridium*属や*Enterobacter*属の存在が示されたが、反復に伴い水素生成能が低下するとともに検出されなくなった。同時期には酢酸の蓄積によって水素生成細菌とは基質競合関係にあるメタン生成菌の活性化が推察され、適切な微生物群集の形成・維持の重要性が明らかになった。

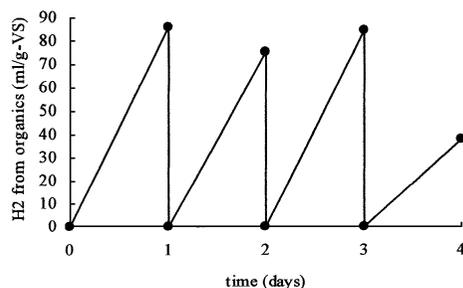


Figure 2 Sequential batch fermentation using inoculums

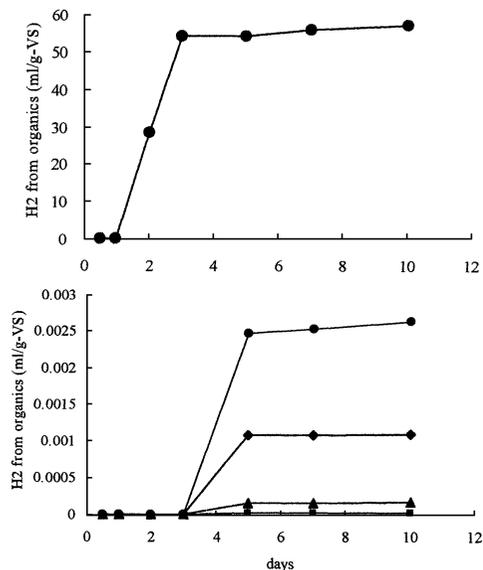


Figure 3 Effect of incineration ash on hydrogen production

鶏糞と米の混合発酵より得られた植種源CRについても、多種のバイオマス廃棄物からの水素生成が確認されたが、植種源CFに比べると反復培養に対する適応性が高いことが示された。特に鶏糞と米の混合物を原料とした場合、80 ml-H₂/g-VS程度の水素生成能が安定して確認された (Figure 2)。この際、発酵液からは水素生成菌である*Clostridium*属の存在が継続的に確認された。発酵液中からは高濃度の有機酸は検出されず、成分は酢酸より酪酸の方が支配的であった。以上のことから植種源CRは、pHの低下抑制、酢酸の蓄積の削減 (メタン生成菌の活性化を抑制)、水素生成菌の優占などの要件を満たすことで継続的な水素生成が達成されたと考えられる。

以上の結果から、水素生成微生物群集の集積化に向けて、水素生成細菌の優占など真正細菌の群集構造の形成、酢酸をはじめとする有機酸濃度の抑制と、それに伴うメタン生成細菌の抑制などの方策が示されたものと考えられる。

5. 廃棄物焼却灰の添加による水素発酵反応促進

バイオマスからの水素生成を促進する一つの手法として、廃棄物焼却灰との混合による水素生成量の増加に着目している⁷⁾。バイオマス廃棄物と焼却灰の共存による未制御系での水素発酵現象は、廃棄物処分の現場で観測されてきた事象であり、反応性が高く維持管理の容易なエネルギー化技術として

注目される。この反応は、特定の焼却灰としてバイオマスとの組み合わせで確認される現象であり、焼却灰含有成分由来の化学的な水素発生ではなく、生物発酵の促進的に機能していることが確認されている。鶏糞 a と食品廃棄物の混合発酵では上述のように 18ml-H₂/g-VS まで増加した。発酵液から 3000mg/l の酢酸および 1500mg/l の酪酸が検出されており、主要な発酵形式について変化がなく、酢酸型と酪酸型の水素発酵が同時に起こっていることが示唆された。

水素発酵促進剤としての焼却灰を用い、単独ではほとんど水素が生成されない未熟コンポストからの水素発酵を試みた。その結果焼却灰の種類により水素発生特性は大きく異なることが明らかになった (Figure 3)。ある一般廃棄物焼却灰を添加した場合、水素発生は最大で 57 ml-H₂/g-VS に達したが、その他の焼却灰を用いた場合は、その 1000-10000 分の 1 程度の水素生成にとどまった。またコンポストのみの発酵に比して、焼却灰混合が水素生成を促進する灰、阻害する灰、影響を及ぼさない灰の三種類があることが明らかとなり、原料の特性が水素生成に大きく影響することが示された。焼却灰中に含まれる特定の無機成分が水素発酵に与える効果については、現在検討中であるが、無機成分が示す緩衝作用が水素生成反応を促進する可能性が示唆されている。現在は水素生成の促進メカニズム解明により、未利用バイオマスの資源化を拡大する一手法としての適用可能性の評価を進めている段階である。

6. 結論

未利用バイオマスの資源化技術開発の一環として、バイオマスの水素発酵の実用化に向けた検討について報告した。原料の混合調整や焼却灰の添加にある水素生成反応の促進は簡便な維持管理での水素発酵を可能にする点で有望な手法であると考えられる。また乾式発酵の適用についても、発酵液の処理など追加的な処理とその費用に関する負担の軽減の可能性が示唆される。バイオマスの多様性に対応可能な植種源の開発は、小規模分散型のバイオマス利用技術を念頭に、安定かつ効率的な水素発酵を可能にする点で期待される。こうした取り組みを踏まえて、未利用バイオマス利活用技術の選択肢の一つとして水素発酵技術を発展させていくことが望まれる。

References

- 1) K. Kida: *Biomass Energy no Tokusei to Energy Henkan Ryou Gijutsu*, Lesson 12, NTS(2002)
- 2) M. Okamoto, T. Miyahara, O. Mizuno, T. Noike: *Water Science and Technology*, 41, 3, 25-32(2000)
- 3) T. Kono, G. Lee, T. Noike: *Yosui To Haisui*, 47, 9, 37-39(2005)
- 4) T. Kono, K. Wada, G. Lee, T. Noike: *Journal of Japan Society on Water Environment*, 28, 2, 87-92(2005)
- 5) Y. Yamamoto, T. Ishigaki, H. Sawamura, M. Ike, T. Naruoka, M. Yamada: *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Japan Society of Waste Management Experts* (2007)
- 6) T. Nakamura, Y. Yamamoto, H. Sawamura, M. Ike, T. Naruoka, M. Yamada, T. Ishigaki: *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Japan Society of Waste Management Experts* (2007)
- 7) H. Sawamura, M. Yamada, T. Naruoka, M. Ike, T. Ishigaki: *Proceeding of eleventh international waste management and landfill symposium* (2007)

食品廃棄物ゼロエミッションを目指して¹

満 石 良 三²

Strive for Zero Emission of Foodstuff Wastes

Ryozo Mitsuishi

Production Division Production Management, Consumers Co-operative Kobe,
2-1 Koyochonishi, Higashinada, Kobe, 658-0033

Abstract

Co-op Kobe Rokko Island, a consumer cooperative in Japan, installed a waste treatment system in order to estimate the possibility of terminating thermal and landfill disposals and to recycle various wastes generated from the Rokko Island Food Factory, which produces a range of approximately 500 different products. The system uses a methane fermentation machine and a bean curd refuse drying machine.

This paper not only introduces the background of the installation of this waste treatment system and its configuration, but also gives specific operation results and details the economic benefits brought about by the system. The paper clearly suggests effective future use of waste-related biomass from food factories

Key words: Environmental improvement liability, Obedience of regulation, Foodstuff wastes, Effective use

1. はじめに

コープこうべは、本部が兵庫県神戸市東部（神戸市東灘区住吉町）にあり、135万人、組合員からの出資金（約475億円）により、供給事業を中心に行う創業86年の歴史を持つ協同組合組織である。

兵庫県内の大小152店の店舗事業、22個所の共同購入センターを經由して組合員に直接商品を届ける無店舗事業、さらに今回紹介する直営食品工場による生産事業で構成される。年間総供給高は2,700億円、職員数は11,400名である。

食品工場は、1924年に味噌、醤油の醸造をするためにつくられ、1988年に神戸市南東の海岸を埋め立てた六甲アイランドに移転し、現在に至っている。9,000坪の敷地内には、7階建ての食品生産工場と食品生産に必要なエネルギーを供給するための機械棟、商品配送時に使用されるプラスチックコンテナを洗浄するプラコン洗浄棟が配置されている。豆腐、麺、パン、蒟蒻、納豆などの500品目の商品を毎日生産し、コープこうべ唯一の生産工場であることから、500名の職員が24時間体制で年365日休むことなく稼働している。その年間生産出荷高は125億円に達する。

2. 廃棄物処理施設導入の経緯

新食品工場は、省エネや水質汚濁防止などの環境にも配慮した工場として1988年竣工したが、廃棄物処理に関しては委託任せで排出量も不明確のままであった。

1999年にISO14001の認証を取得する際に廃棄物担当者を受け実態調査を開始した。その結果、①処分業者の休業時の生ごみ処理②生ごみ未分別の処分費への影響③生おからの供給先が不明確④腐敗した生おからの産廃処分などの多くの問題が判明し、実績把握を含めた工場全体の廃棄物処理に関する解決策ができるまでに2年を要した。

生ごみと容器包材の実績把握に最も多くの期間を要したが、部門、品目、時間別の集計が可能となり、それらのデータは廃棄物削減活動だけではなく、メタン発酵設備計画、設備運転管理を行う上で利用価値が高く、現在当工場内で大きな役割を果たしている（Table 1、Fig.1を参照）。

3. 廃棄物処理の概要

当初は、食品工場の廃棄物だけでなく、コープこうべの店舗で排出される廃棄物も受け入れ、コープこうべ全体の廃棄物処理も検討した。しかし、食品工場の生ごみ（動植物性残渣）は産業廃棄物であり、それらの廃棄物を処理する設備は産業廃棄物処理施設に分類されるため

1. 平成20年6月12日 本会第120回例会において発表

2. 生活協同組合コープこうべ生産事業部

平成20年2月29日 受理

Table 1 Waste amount before introduction of waste treatment facility (ton)

	工場内廃棄物量						
	生ごみ	排水汚泥	生おから	廃油	容器包材	粗大ごみ	合計
2002年度	1,576	360	4,920	267	212	14.2	7,349
2003年度	1,547	360	4,274	201	217	13.6	6,612

※排水汚泥は02年度脱水ケーキの産廃処理量を実績値とした。

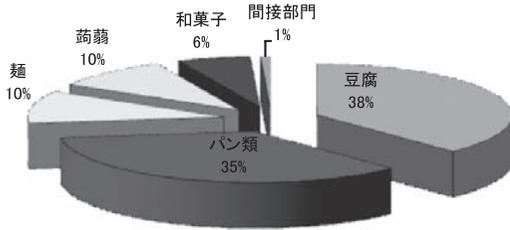


Fig.1 Composition of garbage

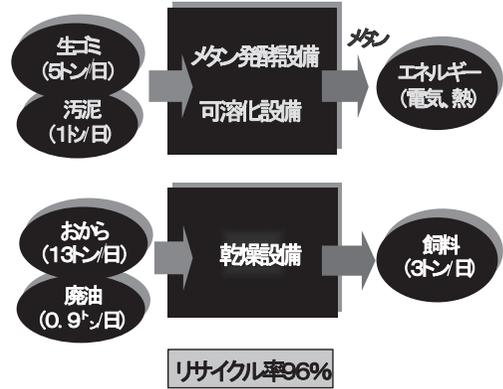


Fig.2 Basic framework of waste treatment

廃棄物処理法上、店舗で排出される事業系一般廃棄物を処理できないことから、食品工場の廃棄物に絞って計画を策定した。

また、生おからについては、メタン発酵での処理も検討したが、①投資コスト②設置スペース③生おからに含まれる窒素④食用廃油の有効利用を考慮した結果、乾燥飼料としてリサイクルするのが有利と判断し、生ごみと排水汚泥を処理するメタン発酵設備と生おからの乾燥飼料化設備の2つの設備導入を決定した。今回導入した廃棄物処理設備の基本構想をFig.2に、完成した設備のシステムフローをFig.3に示す。

3. 1 メタン発酵設備

それぞれの製造過程で発生した廃棄物を、破袋分別設備で容器や包装材を取り除き、生ごみ5 tonに3.3倍の水を加えて原料槽に貯める。定量送りされた生ごみがメタン発酵槽に約10日滞留する間にバイオガスが発生し脱硫塔で硫化水素などの不純ガスが取り除かれ、メタンガスとしてガスホルダーに蓄えられる。このメタンガスを24時間稼働する60 kWの発電機が優先的に使用し、ガスホルダー貯留量が20%～80%の範囲で消化ガスボイラを起動/停止させ余剰メタンガスも無駄なく活用している。

バイオガスで発電した1,440 kWh/日の電気は、メタン発酵設備とおから乾燥設備で消費され、消火ガスボイラから発生する蒸気は、豆腐のボイル工程など生産設備の一部に利用している。さらに、発電機から発生する廃熱もメタン発酵槽 (55℃) と可溶化槽 (65℃) の保温用に利用される。

排水設備の加圧浮上槽から排出される汚泥は、可溶化槽で酵素分解することにより排水設備の嫌気性処理でのメタンガス化を可能にし、脱水ケーキ1 ton/日の産廃処理も不要となった。

前述した生ごみに加える3.3倍の希釈水も下水放流される排水処理水を利用するなど、あらゆる面で「何もムダにしない」思想で計画構築を行った。

3. 2 おから乾燥設備

豆腐製造の副産物として発生する生おからの量は13 ton/日で、工場から排出される廃棄物の60%を占める。

すし揚げや厚揚げなどに使用される食用廃油(なたね油)、都市ガス、灯油を燃料とする気流方式の燃焼炉により約400℃の熱風で水分率76～78%の生おからを5%以下に乾燥させ長期保存可能な飼料を製造している。また、3日分の乾燥おからを貯留できるサイロも設けた。2006年度実績では、12 ton/日の生おからから16.5%に相当する2 ton/日の乾燥飼料が製造販売されている。

4. 廃棄物処理設備の運転実績

年度別に集計した設備の廃棄物処理実績と資源利活用実績をTable 2とTable 3に、各設備での電気使用量等をエネルギー実績としてTable 4に示す。

工場内の廃棄物の再資源化率 (96%) の達成ならびに廃棄物から得られる発電量、蒸気量は計画どおりであったが、すべてにおいて計画を達成できた訳ではなく、以下の問題点が発生した。

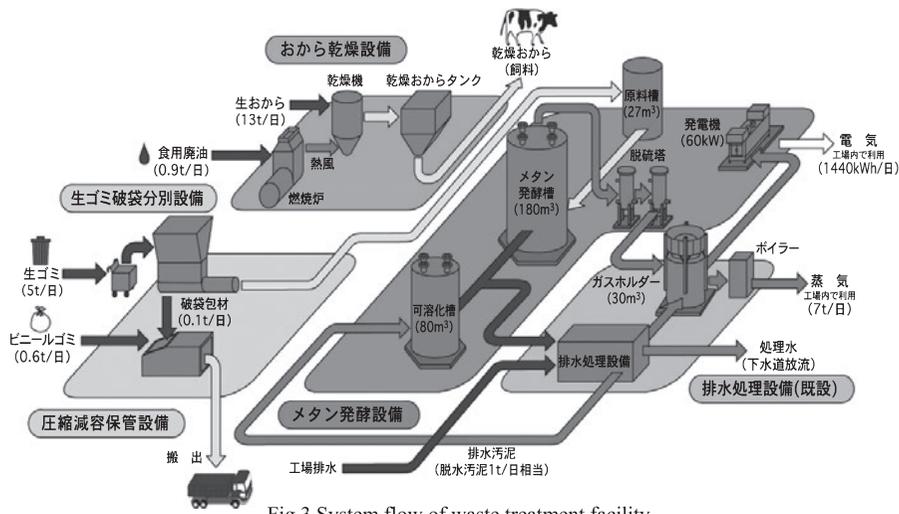


Fig.3 System flow of waste treatment facility

①破袋分別設備の不具合

当工場では500品目の商品を製造していることもあり、廃棄物を生ごみと包装材とに選別する際に不具合が生じた。Table 5に代表的な不具合の例と対応策を示す。

分別を必要としない団子の生地なども破袋分別装置に投入するが、粘性が高いため過負荷停止する故障が多発した。大型ミキサーのようなパルパー装置を追加し対策としたが、ビニールごみに分別されてしまう薄揚げ、糸蒟蒻などの軽量な廃棄物も分別機能を持たないパルパー装置に投入しなければならず手分別作業を製造部門に付加する結果となった。

②メタン発電で導入設備電力を賄う

Table 6のとおり、メタン発電量はメタン発酵設備と

おから乾燥設備の電気使用量に対して、年間7万kWh～12万kWh不足しており「導入設備の全ての電力をメタン発電で賄う計画目標」を達成できなかった。おから乾燥設備の消費電力が、計画値を大幅に上回ったことが原因であり、乾燥設備の電力・ガスなどのエネルギー消費量に対する検討が不十分であったと反省している。

③食用廃油排出量の不足

食用廃油の排出量は0.9 ton/日として計画したが、設備の試運転調整時に、実際は0.3 ton/日の排出量しかないことが判明した。そのため、非常用で計画した灯油を常時使用することになり、CO₂排出量及びランニングコストの増加を招く結果となった。

Table 2 Actual result of waste treatment (ton)

	工場内廃棄物量								総合計	リサイクル率
	再資源化処理量				産廃処理量					
	生ごみ	排水汚泥	生おから	廃油	合計	容器包材	粗大ごみ	合計		
2004年度	1,596	360	4,460	102	6,519	211	17	229	6,747	96.6%
2005年度	1,422	360	4,253	93	6,128	208	24	232	6,359	96.4%
2006年度	1,444	360	4,269	78	6,151	202	24	227	6,378	96.4%
2007年度	1,445	360	4,105	76	5,986	194	26	220	6,206	96.5%

※2007年度実績は12月末累計値からの予測値。また、排水汚泥は02年度脱水ケーキの産廃処理量を実績値とした。

Table 3 Actual result of resource utilization

	メタンガス発生量			メタンガス使用量		再生品目と量		
	メタン発酵設備	排水設備	合計	発電機	蒸気	発電	蒸気	飼料
	(N m ³)					(kwh)	(t)	(t)
2004年度	267,795	119,573	387,368	194,690	192,678	452,789	2,562	797
2005年度	248,295	102,983	351,278	175,325	175,953	493,387	2,510	663
2006年度	275,908	104,408	380,316	190,938	189,378	504,112	2,518	699
2007年度	301,286	112,699	413,985	206,066	207,919	527,858	2,764	647

※2007年度実績は12月末累計値からの予測値。

Table 4 Actual result of energy consumption

	電気			都市ガス	灯油	メタン 発電量	不足 電力量
	メタン発酵設備	おから乾燥設備	合計	おから乾燥設備			
	(kwh)			(N m ³)	(ℓ)		
2004年度	300,050	274,235	574,285	140,930	77,771	452,789	-121,496
2005年度	287,654	275,718	563,372	117,605	39,961	493,387	-69,985
2006年度	273,885	313,257	587,142	164,328	0	504,112	-83,030
2007年度	257,517	276,454	533,971	142,774	0	527,858	-6,113

※2007年度実績は12月末累計値からの予測値。

Table 5 Unacceptable items for separation facility

品目	原因	対策
薄揚げ	ビニールごみに混ざる	パルパー装置の追加で対応
糸蒟蒻	ビニールごみに混ざる	パルパー装置の追加で対応
餅生地	粘性が高く機械トラブルを招く	パルパー装置の追加で対応
卵豆腐の容器(硬質プラスチック)	小さく割れ生ごみに混ざる	手作業による分別
納豆	粘性があり容器が生ごみに混ざる	手作業による分別
団子類の串	小さく割れ生ごみに混ざる	手作業による分別

Table4の2006年度から灯油消費量がゼロとなっているのは2006年2月にバーナーを改善し、灯油を非常用に戻したためである。

④CO₂排出量の増加

生ごみのメタン発酵によって得られたメタンガスを有効利用できるため(1)式により約508 ton/年のCO₂排出削減効果があり、この数値は、当工場CO₂排出量の3.1%に相当する。

メタンガス量 (275,908 Nm³)

×都市ガス換算率 (8,570 kcal ÷ 9,820 kcal)

×CO₂排出係数 (2.108¹⁾) ÷ 1,000 …… (1)

しかし、生ごみ焼却を全廃し生ごみを有効活用することで削減されたと考えられるCO₂の量をメタン発酵設備の導入効果として認められないことから、おから乾燥設備から排出される380 tonのCO₂が増加する結果となった (Table 6)。

Table 6 CO₂ emissions from drying facility of bean curd lees (kg)

	消費量	CO ₂ 係数	CO ₂ 排出量
電力	83,030	0.387	32,133
都市ガス	164,328	2.108	346,403
灯油	0	2.490	0
			378,536

5. 設備導入効果

今回の設備は、コープこうべ自己負担金1億8,600万円と国庫助成金1億1,400万円(農林水産省の食品リサイクルモデル緊急整備事業)の総額3億円(メタン発酵設備2億円3,000万円、おから乾燥設備7,000万円)で2003年12

月に完成した(工事期間9ヶ月)。

この設備の経済性について2006年度の稼働実績数値から分析を行った。Table 7に設備投資効果を、Table 8に処理設備の導入前費用の内訳を、Table 9に設備収支の内訳を示す。

Table 7 Investment effect of facility (1,000 yen)

	メタン発酵設備	おから乾燥設備	合計
導入前費用	47,100	42,340	89,440
設備収支	-109	-6,297	-6,406
設備投資効果	46,991	36,043	83,034

Table 8 Expense before introduction of waste treatment facility (1,000 yen)

生ごみ・排水汚泥処理費	45,900
薬品費(排水汚泥)	1,200
生おから処理費	42,340
合計	89,440

Table 9 Expense balance before and after introduction of facility (1,000 yen)

	メタン発酵設備	おから乾燥設備	合計
再生エネルギー	12,678	3,016	15,694
飼料化収入	0	3,497	3,497
収入合計	12,678	6,513	19,191
光熱費	3,787	9,510	13,297
維持費	9,000	3,300	12,300
支出合計	12,787	12,810	25,597
年間収支	-109	-6,297	-6,406

設備導入前費用(2002年度実績8,944万円)を収入として算出すると、年間8,300万円の設備投資効果が見込め、自己負担金1億8,600万円の年度毎の減価償却費²⁾を加味した投資回収は、Table 10に示すように2006年度中に完了した。

設備導入前の処分費用を除く収支はマイナスだが、Table 11に示すように廃棄物1 tonあたりの処理費用は生ごみが60円/ton、生おからが1,475円/tonで、これらの

処理費用を現在の収集運搬費を除く産業廃棄物処理単価と比較すると、Table 12に示すように生ごみは1/833、生おからは1/12となりメタン発酵設備の経済効果が大きいことが分かる。

なお、2005年度以降の投資効果金額が減少しているのは

Table 10 Depreciation (1,000 yen)

	期首投資残	償却費	投資効果	期末投資残
2003年度	186,000	8,655	21,975	172,680
2004年度	172,680	19,455	87,900	104,234
2005年度	104,234	17,025	82,200	39,060
2006年度	39,060	14,905	83,034	-29,070
2007年度	0	13,053	84,913	-71,860
2008年度	0	11,437	83,000	-71,563

注)償却費はコープこうべ経理部の資産台帳による
減価償却率12.7%(17年償却 乾燥建屋は31年定額償却)
2007年度投資効果金額は12月末実績からの予測値

Table 11 Treatment cost per unit amount of waste (yen/ton)

	メタン発酵設備	おから乾燥設備	合計
年間処理量(t)	1,804	4,269	6,073
年間支出(千円)	109	6,297	6,406
単位当の処理費(円/t)	60	1,475	1,055

Table 12 Comparison of unit price of waste treatment

	生ごみ	生おから
①設備処理単価(円/t)	60	1,475
②産廃処理単価(円/t)	50,000	18,000
①:②	1/833	1/12

Table 13 Unit price of facility

	メタン発酵設備	おから乾燥設備
①投資金額(千円)	230,000	70,000
②設備処理能力(t/日)	6	13
③設備単価(千円/t)	38,333	5,385
④設備単価比較	7.1	1

乾燥飼料の販売単価下落が原因で、飼料単価の下落も考慮した上でおから乾燥設備の導入を決定しているため、想定範囲内の変動と考えている。

6. おわりに

食品廃棄物処理設備は、2003年12月の稼働開始から4年が経過し、現在も順調に運転を継続している。この設備が導入できたのは、メタン発酵設備から排出される高濃度液肥を既設の排水設備で処理可能であったことと、国庫補助で自己負担金を抑えられたことだと考えている。

有機性廃棄物のメタン発酵処理設備は嫌気性排水処理技術の応用であり完成度も高く食品製造工場の環境改善や経費削減策に有効な設備だと思うのだが、投資金額が高いためか導入実績は少ない。Table 13に示すように、当工場のメタン発酵設備は、1 tonあたりの設備単価がおから乾燥設備の7倍の3,800万円で液肥処理が必要な場合はさらに投資が膨らむ。一方、おから乾燥設備は、投資金額は低いがエネルギー消費量、CO₂排出量など環境対策設備として考えると解決すべき課題は残る。

我々エンドユーザが環境改善対策を検討するにあたり設備メーカーには経済性の高い設備開発を、行政には環境対策設備に対する法規制緩和措置や国庫補助申請の簡略化など設備導入を検討する際に選択肢が広げられる状況づくりを望む次第である。

References

- 1) Global Environment Information Centre, Ministry of the Environment: Guideline for estimation of the discharged greenhouse gas from business establishment, July 2003
- 2) Ministerial ordinance No. 35, The Ministry of Finance: Ministerial ordinance on life of depreciation property, revised on March 31st 2000

バイオエタノール使用の食糧問題への影響¹

梅 木 利 巳²

Impacts on the World Food Problems of the Use of Bio-ethanol as Energy Resources

Toshimi UMEKI

Former Professor of Tokyo University of Agriculture and Technology,

Abstract

Against the soaring the price of crude oil and global warming, the expectation for renewal energy has been increasing in recent years. Bio-ethanol is one of the biomass fuels which are made with the raw materials such farm products as corn, sugarcane, etc. The materials for bio-ethanol and that for food compete with each other. The increase of demand for ethanol give impacts on supply and demand for human food and livestock feed. In the U.S.A, with increase in the demand for bio-ethanol, prices of corn have been increasing. As the results, the decrease in production of soybean and wheat and the increase in the process of these crops take place against the background of bio-ethanol boom. The increase in GM (genetically modified) foods takes place. The change of international grain markets produces tight supply – demand situation. The supply – demand imbalance induces starvation in developing countries

Key words: Biomass energy, Global warming, Bio-ethanol, Agribusiness

1. 緒言

現在、世界的な食糧危機（食料需給の構造的不均衡）に影響する要因の一つとして石油代替燃料としてのエタノール原料への食料農産物の転用が挙げられる。原油価格の高騰と地球温暖化が産業と国民生活に様々な影響を与えるようになって、代替エネルギーとしてのバイオマスエネルギーの需要増大が食料問題を揺さぶる一つの要因となった。

石油を含む再生不能エネルギーの代替エネルギーとして水力、太陽熱、風力、地熱などと並んでバイオマス・エネルギーへ需要が増大している。バイオ燃料はバイオエタノールとバイオディーゼル燃料から構成されるが、前者の原料は3種類に分けられる。①デンプン質の作物（トウモロコシ、ジャガイモ、コム等）、②糖質の作物（サトウキビ、甜菜）、③セルロース系＝木質系（建築廃材、樹木、ワラ、紙、笹、竹など）。後者の原料はサトウキビや大豆を原料とする¹⁾。

バイオ燃料の需要の増大はエネルギー原料と人間食料との競合を引き起こす。トウモロコシ、サトウキビ、甜

菜、小麦、大麦、大豆はもともと食料であるが、代替エネルギーの原料に仕向けられると、食料と競合する。これに対比して、木材や廃棄バイオマスは食料との競合性は低い。

脱石油対策と地球温暖化対策として注目されているガソリン代替のバイオエタノールはサトウキビ、ビート（砂糖大根）、トウモロコシ、小麦、大麦などから搾り出した成分を発酵させて作ったエチルアルコールである。これらの原料作物は大気中の二酸化炭素を吸収して成長するので、地球温暖化を防止するので、京都議定書ではバイオエタノールやバイオディーゼルの燃やして発生した二酸化炭素は、植物が吸収した二酸化炭素を大気中に戻したものと考え、二酸化炭素排出量をゼロとみなしている。バイオ燃料への転換は地球温暖化対策としても期待される。

しかし、他方ではバイオ燃料資源と食料とが競合するので、バイオエネルギー原料農産物の需要増大が食料需給に深刻な影響を与えつつある。この問題に焦点を当てて考察する。

2. アメリカにおけるバイオ燃料の生産動向

2. 1 世界におけるバイオ燃料生産の概況

世界のバイオ燃料の生産量は2005年に約4863.7万kℓ、

1. 平成 20 年 6 月 12 日 本会第 120 回例会において発表

2. 元東京農工大学教授

平成 20 年 3 月 31 日 受理

そのうちバイオエタノールが4487.5万kℓで、バイオ燃料の9割はバイオエタノールである。米国の生産量は36.1%、ブラジルの生産量は35.8%で米国とブラジルが3分の2を占める。米国はトウモロコシが、ブラジルではサトウキビがエタノールの主原料である。その他、中国、インド、欧州など世界各地でバイオ燃料の生産が拡大しつつある (Fig.1) ²⁾。

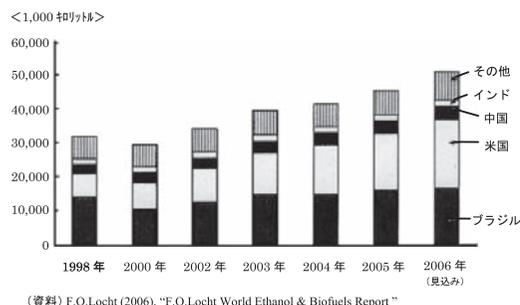


Fig.1 Trend of supply of bioethanol in the world

アメリカバイオ燃料業界団体 (RFA) の最新の情報によれば、2007年の米国のエタノール生産は前年比34%増の65億ガロンに達した。また、2007年度中に稼働したエタノール工場が29に達し、更に建設ラッシュが続いている。

2.2 エタノール生産の歴史的背景

アメリカでは1973年第1次石油ショック (第4次中東戦争) 以後、石油依存政策の検討を始める。更に、1979年の第2次石油ショックで石油依存政策の検討を更に強めた。ジミー・カーター大統領 (1977年~1981年) が石油を補充する燃料の確保政策を模索し、ADM社にエタノール製造を依頼する。1975年ADM社は最初のエタノール工場を建設した。

1980年代にはアメリカ農業は穀物の過剰に直面し、穀物在庫の増大と価格の大幅下落に遭遇した。生産制限政策が推進され、穀物メジャーは大きな危機に見まわれたが、穀物搾油業者ADM社のみはエタノール製造で危機を回避することに成功したと言われる。

2.3 MTBE問題

現在のアメリカのバイオエタノールへの関心は石油代替エネルギーの模索という面も含まれるが、ガソリンのオクタン価向上剤としてのMTBEの代替需要を解決することにあると言われる。MTBEが地下水汚染問題を引き起こし、石油企業の製造物責任を問う市民訴訟が拡大したので、MTBEに代わるガソリン添加剤としてバ

イオエタノールの大増産が求められという事情が最大の誘引であると言われる。従って、アメリカのエタノール生産の増大が脱石油・脱原子力や地球温暖化防止の長期的課題を念頭に置いているかどうか疑わしいという議論もある³⁾。

2.4 政治的背景

近年のアメリカのバイオエタノール開発には世界政治戦略が関わっている。アメリカのブッシュ大統領やチェイニー副大統領は石油産業界の出身で、石油産業界は彼等の莫大な政治資金の提供者であるから、ブッシュ大統領は石油重視のエネルギー政策で応えようと努力してきた。しかし、同時多発テロ (2001年9月11日) の発生の結果、中東の石油を狙ったイラク戦争は泥沼化し、この地域への石油依存は困難になった。1990年代後半以降の南米のベネズエラの反米闘争による石油市場の動揺もまたアメリカを揺さぶり始めた。中近東やベネズエラのような「非友好国家」への石油依存を減らさざるを得なくなった。加えて、反米的ベネズエラ政府を中南米で孤立させるために、チャベスが提唱する南米エネルギー統合構想に歯止めをかけねばならない。ブッシュ大統領が2007年3月にブラジルを訪問したのはベネズエラを孤立させるための「バイオ燃料のオパェック」創設を提案するためであったと言われる。

2.5 アメリカにおける生産政策の展開

米国の安全保障および環境保護を理由にブッシュ大統領が2005年「エネルギー政策法」を議会に提出し、2006年に40億ガロン (米、3.785 ℓ)、2012年には75億ガロンのエタノール生産政策を公表した。2007年のブッシュ大統領年頭教書はトウモロコシを原料とするエタノール生産を政策的に促進することを宣言した。アメリカはエタノール原料にトウモロコシ生産量の20%を当てるが、将来40%にまで増加するとした。米政府はエタノール生産の奨励のためにエタノール混合ガソリンに対する税を控除する。エタノール1ℓ当たり16円の物品控除税を設けた。更に工場建設への政府補助金を出し、その結果、エタノール工場数は1999年の50ヶ所から2006年の110ヶ所へと増加し、2007年度には73ヶ所のエタノール工場が建設中である (Fig.2) ²⁾。

2.6 州独自の生産政策の展開

幾つかの州が独自にエタノール政策を推進している。カリフォルニア州知事 (アーノルド・シュワルツネッガー) も2006年7月に州独自のエタノール増産政策を発表した。全米でエタノールのガソリンへの混合を義務付けている州は5つである。

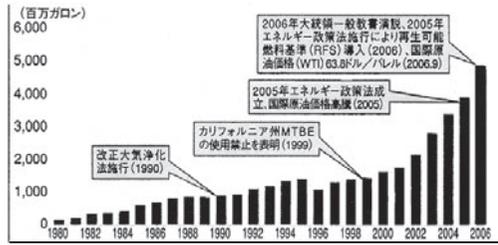


Fig.2 Trend of production of bioethanol in the U.S.A²⁾

3. エタノール生産へ参入する穀物商社

3.1 ADM社のエタノール産業への参入

アメリカではカーター大統領の依頼を受けて、最も早くエタノール製造に着手したのは穀物商社ADM社(アーチャー・ダニエルズ・ミッドランド)であった。同社はイリノイ州に本拠を置く穀物メジャーで本来は穀物を中心に牛、豚、家畜飼料の販売、コンスターチ、ブドウ糖、油脂、食品・飲料添加物の製造販売が本業である。穀物メジャーとしては最大手カーギルに次ぐ2番手であるが、この企業が脱石油、脱穀物戦略で急成長し、エタノール事業では最先端を走っている企業である。現在、全米のエタノール生産の20%を占める。国内ばかりでなく、インドネシアでパーム油の生産やブラジルのサトウキビを原料としたエタノール製造分野へも進出しつつある⁵⁾。

3.2 エタノールブームと企業の参入

ADM社の利益率はカーギル社の利益率よりも高いので、ADM社の穀物の仕入れ価格はカーギル社の穀物仕入れ価格よりも高い。このことが競合他社へも影響し、大手のCHS社(セネックス・ハーベスト・ステーツ)などもエタノール企業へ出資を始めた。ADM社を震源とするエタノールフィーバーが増大し、マイクロソフト社(ビルゲイツ)がエタノール工場に100億円投資し、著名な俳優や投資家が追随しつつある。前述のアメリカ政府政策の後押しが影響していることは勿論である⁵⁾。

Table 1 Trend of production capacity of bioethanol in the U.S.A²⁾

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
稼働工場数	50	54	56	61	68	72	81	95	110
うち農家所有	14	18	21	25	28	33	40	46	46
製造能力(万キロリットル)	644.1	661.9	727.4	888.5	1,024.5	1,173.7	1,379.1	1,841.3	2,079.3
うち農家所有	111.0	128.8	179.0	244.4	301.5	394.1	525.6	634.8	634.8
新規建設・拡張工事中工場数	5	6	5	13	11	15	16	31	76
うち農家所有	14	18	21	25	28	33	40	46	46
新規建設・拡張工事中工場製造能力(万キロリットル)	29.1	34.6	24.5	147.9	182.8	226.3	285.4	673.0	2,133.0
うち農家所有	29.1	22.7	22.7	126.8	120.4	169.2	170.3	70.8	70.8

資料：RFA(2007) (注)製造能力は年初の推計値

4. アメリカにおけるエタノール需要増大とその影響

4.1 トウモロコシ需要の増大

ビジネスチャンスが続くと期待してエタノール製造の工場数と製造能力が増大しつつある。結果として、エタノール原料のトウモロコシの需要は増大する。米国農務省の予測によれば2007年度のトウモロコシ生産量は124億6000万ブッシェル(1ブッシェルは約25kg)と過去最高になると見込む。そのうちエタノール用に振り向けるトウモロコシが2007年9月/2008年8月には全生産量の27%に達する。2007年/08年にかけてエタノール向けのトウモロコシ需要は47%増大すると予測している。今後10年間に世界中のエタノール市場は2倍に拡大するという予測もある(大手金融機関クレディ・スイス社)。

4.2 トウモロコシ価格の高騰

米国アイオワ州立大学の研究に基づく試算によると石油価格が現在の1バーレル55~60ドルの場合、10年後のバイオエタノール生産量は現在の6億ガロン(1ガロンは約3.8ℓ)から150億ガロンまで拡大する。石油価格が10ドル上昇した場合は300億ガロンまで増える。トウモロコシの作付け面積は10年後に最大44%拡大すると予測される。トウモロコシ生産は2006年には2870万トンが2008年には3328万トンへ増加すると予測される。

エタノール用のトウモロコシの増大によって食用・飼料向けのトウモロコシの供給が減少する。結果としてトウモロコシ価格の高騰が続いている。不作時に需給が逼迫するのは確実である。

4.3 その他の農業への影響

(1) 遺伝子組み替え作物が増大している。その他の影響として遺伝子組み替え作物の増大を引き起こしていることである。エタノール原料のトウモロコシにはトレーサビリティ(生産履歴の管理)の必要性がないからである。

(2) 土地価格や借地料が高騰しつつある。生産農家の土地購入、借り入れが活発化しつつある。不動産業者の土地投機を誘発している。

(3) アメリカではエタノール生産の盛んな州ではトウモロコシ栽培面積の拡大と共に、輪作体系が崩れつつある。

(4) トウモロコシの茎は今後の技術開発ではエタノール原料としての活用が期待される。米農務省農業研究局(ARS)は土壌中の有機物の水準を維持するためには全米のトウモロコシの茎の半分程度しかエタノール生産に利用できないと危惧する。トウモロコシの茎の利用は土壌浸食の危険が少ない土地でのみ実行可能だ。エタノール原料にむやみに利用すると土壌有機物が低下し、

長期的には土壌の質の低下＝土壌肥沃度が危惧される。その意味でもエタノール利用には限界がある⁶⁾。

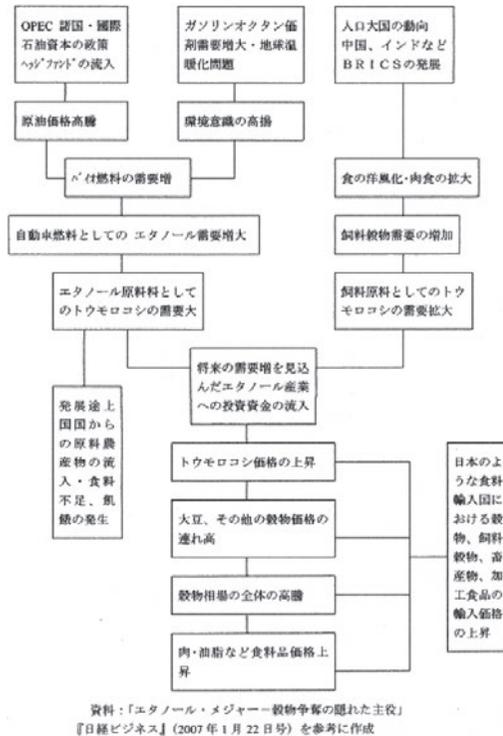


Fig.3 Flowchart showing change of the price level from crude oil to grain and food

5. バイオエタノール問題の世界的食糧問題への波及

(1) アメリカ国内でのトウモロコシ価格の上昇は飼料価格を押し上げ、畜産農家への皺寄せがはじまる。飼料穀物価格の上昇は肉や卵の価格に影響を与える。更に、トウモロコシと大豆・小麦の作付け面積の競合が起り、大豆や小麦の作付けが減少する。その結果、大豆や小麦価格が上昇し始めている。米国の消費者は過去1年間に一人当たり47ドルの食料コストの上昇に見舞われている⁷⁾。

(2) 世界各地で原油価格高騰が続くと穀物を自動車と家畜が奪い合う構図が続くと懸念される(レスター・ブラウン)。食料輸出国で食料資源とバイオマス・エネルギー資源との競合が激化すれば食料危機要因になりかねないと危惧される。アメリカは世界のトウモロコシの貿易量の70%を占める。アメリカのトウモロコシの輸出は1638万トンから1500万トンへ減少する。原油価格が高騰した場合、今後5年間に米国内で生産するトウモロコシの半分が燃料に向けられ、不作が重なりと輸出量は最高6割

に落ちる可能性があるとして危惧される。

(3) 既に、トウモロコシ輸入国への皺寄せが始まった。アメリカの隣国であるメキシコの主食はトウモロコシを原料にしたトルテイヤ(パンの一種、トウモロコシ粉をこねて作った丸い薄焼きパン)であるが、トウモロコシ輸入価格の上昇でメキシコ市民の食生活を脅かし、反発が強まっている。

(4) 中国では人口増大と経済発展の中で農産物の純輸入が増大しつつある。2006年は前年比15.3%、1000万と大きく輸入量が伸びた。トウモロコシは食用と家畜飼料とエタノール原料として輸入されている。中国のトウモロコシ生産量は2005年に1億3900万トンで、栽培面積も生産量も増えているが、飼料用およびエタノール原料向けの需要が増大しているので輸入にも依存せざるを得ないのである。当然、世界のトウモロコシ市場を揺さぶることになる⁸⁾。

(5) 日本は毎年1000万トンを超すトウモロコシを輸入し、2000億円を支払っている。今後は高値のトウモロコシを買いつづけることを余儀なくされる。日本では家畜飼料価格の高止まりが続くと見られる。日本では配合飼料価格安定基金制度で消費価格への影響をある程度緩和することが出来るが、それには限界がある。

(6) トウモロコシ価格の高騰は大豆価格の高騰を呼び起こしているので、日本の輸入大豆の価格にも影響し始めている。食用油も価格上昇中である (Fig.3)。

6. ブラジルにおけるエタノール問題の動向と特徴

(1) 歴史的背景として、世界で最初に石油代替のエタノール生産に着手したのはブラジルである。ブラジルでは1970年代初めの石油危機に遭遇した際に、米国の石油支配に反発し、1975年頃からガソリンの代替燃料としてサトウキビを原料にしたエタノール生産に取り組み始めた。1980年代には石油価格が下がり、エタノール生産は一時低迷したが、2003年のイラク戦争で石油価格が急騰したので、エタノールは再び増産されるようになる。地球温暖化対策という名目加わり、エタノール増産に拍車をかけている。ドイツの自動車メーカーがガソリンでもエタノールでも走れる「フレックス車」を開発し、エタノール需要が増大したと言われる。ブラジルで発売される新車の8割はこのタイプの自動車である。

(2) ブラジルはサトウキビ生産が世界第1位であり、このサトウキビを原料としてエタノールを生産し、国内消費に向けるだけでなく、エタノールの世界輸出量の8割を占めている。また、ブラジルではサトウキビを原料とするエタノール生産は2010年までに2330万kℓ(現在1600万kℓ)の増産目標を立てている。国内消費に重点を置くが、そのためにエタノール利用可能なフレックス

イブの自動車の生産に力を入れる。日本の自動車メーカーのトヨタもブラジルへ進出しつつある。

(3) 日本の商社丸紅はブラジルに世界最大のバイオ工場を建設しつつある。ブラジルの大手穀物商社アグレニコ・グループと合併でバイオディーゼルの会社(アグレニコ・バイオエナジー)を設立した。これを通じて、新会社はブラジルのマト・グロソ州など3州に大豆搾油の2工場とバイオディーゼルの生産3工場を建設しつつあると伝えられる。

(4) ブラジルではサトウキビの半分は製糖用、半分はエタノール用に仕向けるが、砂糖価格が上昇すればエタノール生産の比率を弾力的に下げる。他方ではエタノール原料生産拡大のためにオレンジからサトウキビへの転換が進んでいるので、世界のオレンジ需給と価格にも影響を与えつつある。更に、サトウキビ生産と大豆生産の拡大に伴い、アマゾンでは森林破壊が急速に進行していることにも注目すべきである。

(5) ブラジルではエタノールの更なる輸出増の可能性も探っている。潜在的余力があり、原油高で世界的需要は伸びると判断している。輸出では日本を今後の重要な輸出先と位置付けている。

7. 簡単な要約と展望

再生可能エネルギー源としてのバイオマス燃料への期待は大きい。

(1) バイオ燃料が本当に環境に優しいエネルギーであるかどうか検討する余地が残されている。バイオ燃料の原料生産、製造、輸送に必要なエネルギーを考慮しなければならないからである。

(2) バイオエネルギー原料としてのトウモロコシ、大豆、ナタネなどは生産国における食料、飼料、加工食品原料との競合を引き起こし、食品価格の高騰を誘発している。

(3) エタノールおよびその原料としてのトウモロコシやサトウキビは国際市場での取引を誘発するグローバルエネルギーである。従って、世界的な食料需給問題に連動する。発展途上国の飢餓を誘発し、日本のような食料

輸入国には国際的な需給変動を通じて、穀物、飼料、加工食品の輸入価格の上昇をもたらす。(4) エタノール原料を確保するという名目でGM作物が拡散する危険性がある。食品の安全性低下のリスクを孕んでいる。

(5) トウモロコシ、小麦、ナタネ、サトウキビを原料とするエタノールやバイオディーゼルの生産などは食料資源と競合するから安易な依存は慎むべきであると考えられる。非食料資源を原料としたバイオマスエネルギーの開発を急がねばならない^{9), 10)}。

References

- 1) Y. Amagasa: *Bio nennryo-Hatake de tsukuru energy*, Commons, Oct. 2007(2007)
- 2) T. Koizumi: *Beikoku ni okeru bioethanol seisaku no temkai to nochikusambutsujuyou ni ataeru eikyo*, Primaff Review, No.25, 2007(2007)
- 3) Y. Noguchi: *Beikoku bio nennryo no seijikeizaigaku*, Journal of Japanese Scientists, Vol.43, No.1, 2008(2008)
- 4) Japan Agricultural Co-operatives: *Ethanol seisann to America nogyo eno eikyo*, Letter of International agriculture and provision, The 1st Vol., Issue May and Jun. 2006(2006)
- 5) Nikkei Business Publications, Inc.: *Kokumotsu senso no kakureta shuyaku-Ethanol major*, Issue Jan. 2007(2007)
- 6) Japan Agricultural Co-operatives: *Ethanol seisann to America nogyo eno eikyo*, Letter of International agriculture and provision, The 2nd Vol., Issue May and Jun. 2006(2006)
- 7) T. Etoh: *Tomorokoshi kara yomu sekaikeizai*, kobunsha, Vol.041, May 2002(2002)
- 8) O. Kitani: *Biomass wa chikyukankyo wo sukueruka*, IWANAMI SHOTEN, Vol.578, Nov. 2007(2007)
- 9) T. Nakamura: *Shizen energy sennryaku*, Institute of Autonomy, Apr. 2001(2001)
- 10) T. Koizumi: *Bioethanol to sekai no shokuryojuyou*, Tsukuba-shoboh, Nov. 2007(2007)

加圧熱水処理技術を用いた木材からのバイオエタノール生産¹宮 藤 久 士²・坂 志 朗²

Bioethanol Production from Wood by Using Hot-Compressed Water Technology

Hisashi MIYAFUJI and Shiro SAKA

Department of Socio-Environmental Energy Science, Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Abstract

Bioethanol production from wood with hot-compressed water technology was studied. Four different yeasts were selected in this study such as *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida shehatae*, *Pachysolen tannophilus* and *Pichia stipitis*. The fermentation test of the water-soluble portion showed no ethanol production with any yeasts. Various furan and phenolic compounds derived from carbohydrates and lignin as inhibitors for ethanol fermentation were found to contaminate the WS portion. Wood charcoal could remove these inhibitors without removing the fermentable sugars. Furthermore, all fermentable sugars in the water-soluble portion could be converted to ethanol in the binary fermentation system of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pachysolen tannophilus*.

Key words: Wood, Hot-compressed water, Inhibition, Fermentation, Bioethanol

1. 結 言

近年、地球規模でのエネルギー・環境問題が取りざたされる中、環境負荷の小さく持続可能な資源としてバイオマスが注目されている。京都議定書の発効により1990年比で6%のCO₂排出量削減の義務を負うわが国において、カーボンニュートラルな資源であるバイオマスの利用促進は極めて重要な課題である。中でも地球上に大量に存在する木材は重要なバイオマス資源の一つである。エネルギー・環境問題解決を目指した木材の利用に関して、エネルギー変換や機能性材料創製など様々な研究がこれまでも行われてきている。その中で、木材からのバイオエタノール生産に関する研究は、大きな関心が寄せられているテーマの一つである。バイオエタノールは化石燃料代替資源として、特に自動車等の輸送用燃料としての利用が期待されている。現在は、トウモロコシ、廃糖蜜などを原料に用いることが多いが、食糧問題が危惧されるなかで、原料の木材への転換が望まれている。

木材中のセルロースやヘミセルロースなどの多糖類を加水分解し発酵性の単糖を得て、それらを微生物を用いた発酵によりエタノールへと変換させることで木材からエタノールが生産される。このプロセスの中で、木材か

ら発酵性の糖類を得る方法として、古くから硫酸などを用いた酸加水分解法をはじめとし、様々な方法が報告されている¹⁾。しかしながら、近年、超臨界水を含む加圧熱水を用いたリグノセルロースの加水分解に関して鋭意研究が進められ、無触媒で短時間で反応が進むことが明らかとなってきている²⁻²¹⁾。本研究では、加圧熱水処理による木材の加水分解で得られた発酵性の糖類からの高効率なエタノール生産を目指し、エタノール発酵における発酵阻害の改善や、ヘキソース、ペントースの共発酵によるエタノール変換について検討を行った研究成果について紹介する。

2. 実 験

試料としてスギ (*Cryptomeria japonica*) およびブナ (*Fagus crenata*) 木粉を用い、バッチ型バイオマス変換装置⁵⁻⁸⁾によりスズ浴槽温度を400℃、浸漬時間を8秒として処理を行った。木材を加圧熱水処理するとFig.1のように分画され、水可溶部、水不溶部(沈殿)、メタノール可溶部(オイル状物質)、メタノール不溶残渣が得られる。水可溶部には、セルロースおよびヘミセルロースの加水分解により得られたオリゴ糖(2量体~12量体)や単糖(グルコース、フルクトース、マンノース、キシロースガラクトース、アラビノースなど)が可溶化していることが明らかとなっており⁹⁾、ここでは木材の加圧熱水処理後ろ過により残渣を分離することで水可溶部を得て、

1. 平成20年6月12日本会第120回例会において発表

2. 京都大学大学院エネルギー科学研究科

平成20年2月29日受理

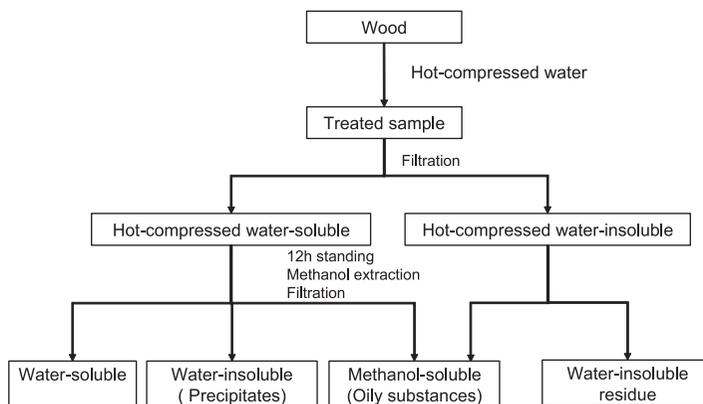


Fig.1 Fractionation of wood treated with hot-compressed water.

Table 1 The concentrations of inhibitors and sugars in the water-soluble portion from Japanese cedar untreated and treated with wood charcoal prepared at 900°C.

	Concentration in the water-soluble portion (mg/L)	
	Untreated	Treated with wood charcoal
5-HMF	378	n.d.
Furfural	240	n.d.
Vanillin	818	n.d.
Acetoguaiacone	3	n.d.
Guaiaacol	33	n.d.
Coniferylaldehyde	94	n.d.
Glucose	1.04×10^3	1.04×10^3
Other sugars*	0.92×10^3	0.94×10^3

5-HMF: 5-Hydroxymethylfurfural *The total of fructose, mannose, galactose and xylose. n.d.: Not detected.

これを実験に供した。

木質炭化物には、試料としてスギ木粉を用い、窒素雰囲気下において400°C~900°Cの所定温度にて1時間処理することで調製を行った。

水可溶部に木質炭化物を浸漬し、10分間攪拌処理を行い、発酵阻害物質の吸着・除去を試みた。木質炭化物による処理後、高速液体クロマトグラフィー (HPLC, Shimadzu LC-10A system; カラム, STR ODS-II; 検出器, UV検出器($\lambda=280\text{nm}$); 移動相, メタノールおよび水; 温度, 40°C) により分析し、発酵阻害物質の定性・定量を行った。

Saccharomyces cerevisiae (IFO 0233)、*Candida shehatae* (NBRC 1983)、*Pichia stipitis* (NBRC 10006) および *Pachysoletan tannophilus* (NBRC 1007) を用いて、木質炭化物処理前後の水可溶部についてエタノール発酵を行った。発酵温度は28°Cとし、栄養液には、ペプトン、イースト抽出物、モルト抽出物の混合溶液を用いた。所定時間ごとにサンプリングを行い、HPLC (Shimadzu LC-10A system; カラム, Bio-Rad Aminex HPX-87H; 検出器, 示差屈折計 (RID); 移動相, 0.005mol/L H_2SO_4 ; 温度, 45°C) により糖およびエタノールの定量を行った。

3. 結果および考察

3.1. 木質炭化物を用いた発酵阻害物質の吸着・除去

スギからの水可溶部に対する HPLC 分析の結果、グルコースなどの発酵性の糖類だけでなく、糖の過分解物であるフルフラール、5-ヒドロキシメチルフルフラールといったフラン化合物、リグニン由来化合物であるバニリン、アセトグアイアコン、グアヤコール、コニフェリルアルデヒドなどのピークが確認され、これらが水可溶部に含まれていることが分かった。これらの物質はエタノール発酵における阻害物質として働くことが知られており、水可溶部から取り除く必要がある。そこで発酵阻害物質の吸着・除去を目的として木質炭化物処理の検討を行った。

Table 1 には、900°Cで調製した木質炭化物にて処理を行った後の水可溶部中における各種化合物の濃度を示す。また無処理の水可溶部での濃度も合わせて示している。フルクトース、マンノース、ガラクトース、キシロースは HPLC 分析で分離できなかったため、一つのピークとして定量し、その他の単糖 (other sugars) として示している。木質炭化物処理により糖分解物やリグニン由来物

Table 2 The concentrations of inhibitors and sugars in the water-soluble portion from Japanese beech untreated and treated with wood charcoal prepared at 900°C.

	Concentration in the water-soluble portion (mg/L)	
	Untreated	Treated with wood charcoal
5-HMF	352	5
Furfural	299	2
Vanillin	38	n.d.
Acetoguaiacone	10	n.d.
Syringaldehyde	104	n.d.
Coniferylaldehyde	51	n.d.
Glucose	0.90×10^3	0.88×10^3
Other sugars*	0.83×10^3	0.83×10^3

5-HMF: 5-Hydroxymethylfurfural

*The total of fructose, mannose, galactose and xylose.

n.d.: Not detected.

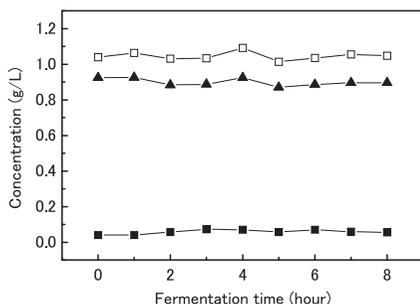


Fig. 2 Changes of the sugars and ethanol concentrations during the fermentation of the water-soluble portion from Japanese cedar.

□:Glucose, ▲:Fructose+mannose+galactose+xylose, ■:Ethanol

質は除去されるが、単糖は除去されることがなく水可溶部中に残存することが分かる。

また Table 2 には、ブナからの水可溶部で同様に木質炭化物処理を行った時の結果を示している。スギでの結果と同様に糖分解物やリグニン由来物質が除去され、単糖は除去されることがなく水可溶部中に残存することが分かる。これらの結果から、木質炭化物は発酵阻害物質を選択的に除去しようと言える。

3. 2. 木質炭化物処理した水可溶部のエタノール発酵性

3. 2. 1 スギからの水可溶部のエタノール発酵性

Fig. 2 には、スギからの水可溶部について、*Saccharomyces cerevisiae* によるエタノール発酵におけるグルコース、フルクトース+マンノース+ガラクトース+キシロース、エタノールの濃度変化を示す。木質炭化物処理を行っていない水可溶部では糖類の濃度減少は見られず、また、エタノールの生成も見られないことから、発酵が進んでいないことが分かる。Table 1 にあるように種々の発酵阻害物質が含まれるため、発酵阻害が生じていると考えられる。Fig. 3 に、900°Cで調製した木質炭化物で処理を行った水可溶部のエタノール発酵の結果を示す。発酵時間の経過とともにグルコース濃度および

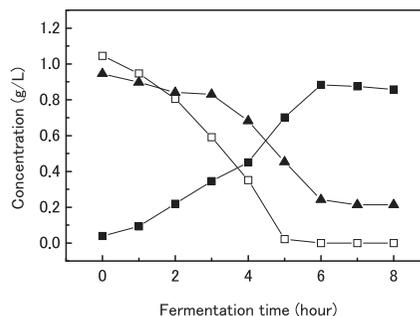


Fig. 3 Changes of the sugars and ethanol concentrations during the fermentation of the water-soluble portion treated by wood charcoal prepared at 900°C.

□:Glucose, ▲:Fructose+mannose+galactose+xylose, ■:Ethanol

フルクトース+マンノース+ガラクトース+キシロース濃度が減少し、エタノール濃度の上昇が見られエタノール発酵が進んでいることが分かる。また、発酵開始6時間後においてグルコース濃度は0となり、その他の糖類の濃度も約0.2g/Lで一定、エタノール濃度も一定となり発酵がほぼ終了していると考えられる。木質炭化物で処理した場合、Table 1 からも分かるように、発酵阻害物質が吸着・除去されるため、発酵性が改善されエタノールが生成したものと考えられる。その他の糖類の中で、ヘキソースであるフルクトース、マンノース、ガラクトースは*Saccharomyces cerevisiae*によりエタノールへと変換され得るので、ここで発酵終了後も残存している糖はペントースであるキシロースであると推察される。

次に、同様に木質炭化物処理を行った水可溶部について、各種酵母を用いてエタノール発酵を行った。本研究で用いている*Saccharomyces cerevisiae*以外の酵母すなわち*Pichia stipitis*、*Pachysolen tannophilus*、*Candida shehatae*は、ペントースだけでなくキシロースもエタノール発酵できる微生物である。Fig. 4 には、発酵におけるエタノール濃度およびエタノール収率の変化を示している。エタノール収率はグルコース、フルクトース、マン

ノース、ガラクトース、キシロースのすべてが理論収率でエタノールに変換されたときの収率を 100%とした。*Saccharomyces cerevisiae*では、6~8時間程度でエタノール濃度が約 0.88g/Lとなる。データは示されていないが、その際に消費されている単糖はグルコースが約 1.04g/Lで、その他の単糖が 0.73g/Lであり、合計 1.77g/Lが消費されている。理論的には 100g のヘキソースから 51.1g のエタノールが得られることを考えると、消費された単糖のほとんどがエタノールへ変換されていると考えられる。

一方で、*Pichia stipitis*、*Pachysolen tannophilus*、*Candida shehatae*では、エタノール発酵に要する時間はそれぞれ異なるが、いずれも *Saccharomyces cerevisiae*より発酵時間は長い。また、エタノール生産量はこれら 3種の中で大きな差は見られず、0.4g/L程度であった。また、発酵終了後の HPLC 分析においてグルコースおよびその他の単糖のピークは消失しており、キシロースを含む全ての単糖が消費されていた。しかしながら、エタノール生産量は *Saccharomyces cerevisiae*よりも低くなっ

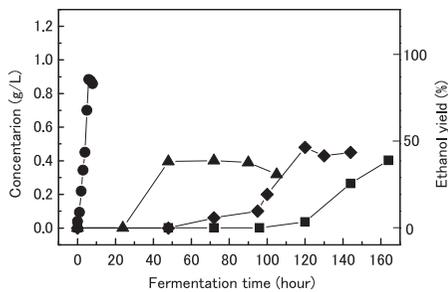


Fig. 4 Changes of the sugars and ethanol concentrations during the fermentation of the water-soluble portion from Japanese cedar with various yeasts.

●: *Saccharomyces cerevisiae*, ■: *Pichia stipitis*, ▲: *Pachysolen tannophilus*, ◆: *Candida shehatae*

ており、これら 3種類の酵母は発酵効率が *Saccharomyces cerevisiae*よりも低いと考えられる。この 3種類の酵母での比較においては、エタノール生産量はほぼ同じであることを考えると、発酵時間が短い *Pachysolen tannophilus* がよりエタノール発酵に適していると考えられる。

水可溶部に含まれる単糖を効率的に全てエタノールへ変換する目的で *Saccharomyces cerevisiae* と *Pachysolen tannophilus* を用いた共発酵系でのエタノール発酵の検討を行った。Fig.5 には、*Saccharomyces cerevisiae* と *Pachysolen tannophilus* を混合させた状

態で発酵を行った結果を示す。8時間までのエタノール生産は *Saccharomyces cerevisiae* によるヘキソースの発酵に由来するものと考えられる。8時間以降は *Pachysolen tannophilus* によるキシロースの発酵が進行し、60時間程度の発酵時間を要しているものの、理論収率に近い収率でエタノールへと変換されることが分かった。

3.2.2 プナからの水可溶部のエタノール発酵性

Fig.6 に、プナからの水可溶部について木質炭化物処理を施し、各種酵母を用いてエタノール発酵を行った結果を示す。*Saccharomyces cerevisiae*では、スギの場合と同様に6時間程度で発酵が終了し、エタノール濃度が 0.44g/Lとなる。その時消費されている単糖はグルコースが 0.88g/L、その他の単糖が 0.10g/Lであり、消費された単糖の多くがエタノールへ変換されている。また、発酵終了後には、キシロースが発酵系内に残存していた。

一方で、*Pichia stipitis*、*Pachysolen tannophilus*、

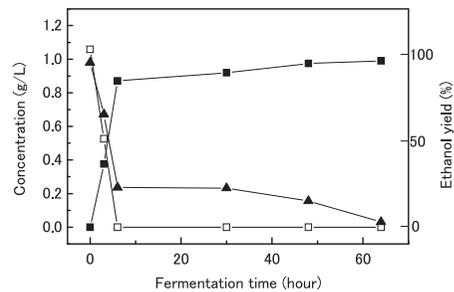


Fig. 5 Changes of sugars and ethanol concentrations during the fermentation of the water-soluble portion from Japanese cedar with the mixture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pachysolen tannophilus*.

□: Glucose, ▲: Fructose+mannose+galactose+xylose, ■: Ethanol

*Candida shehatae*では、スギの場合と同様、いずれも *Saccharomyces cerevisiae*より発酵時間は長かった。またデータは示されていないが、グルコース、ガラクトース、マンノース、フルクトース、キシロースのすべての単糖が消費されているものの、エタノール生産量は *Saccharomyces cerevisiae*よりも低くなった。この 3種類の酵母での比較では、スギでの結果と同様に発酵時間が短い *Pachysolen tannophilus* がよりエタノール発酵に適していると考えられる。

Fig.7 には、*Saccharomyces cerevisiae* と *Pachysolen tannophilus* を混合させた状態で発酵を行った結果を示

す。スギでの結果とほぼ同様で、8 時間までの *Saccharomyces cerevisiae* による発酵、その後の *Pachysolen tannophilus* によるキシロースの発酵が進行

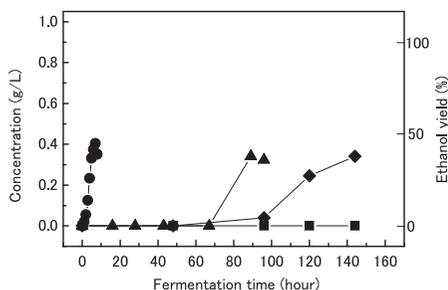


Fig. 6 Changes of the sugars and ethanol concentrations during the fermentation of the water-soluble portion from Japanese beech with various yeasts.

●: *Saccharomyces cerevisiae*, ■: *Pichia stipitis*,
▲: *Pachysolen tannophilus*, ◆: *Candida shehatae*

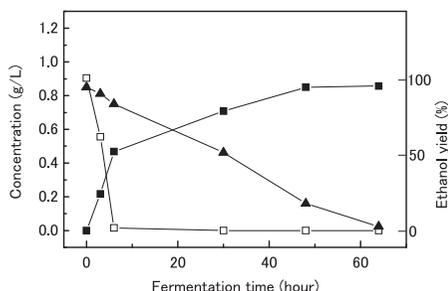


Fig. 7 Changes of sugars and ethanol concentrations during the fermentation of the water-soluble portion from Japanese beech with the mixture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pachysolen tannophilus*.

□: Glucose, ▲: Fructose+mannose+galactose+xylose,
■: Ethanol

し、約 60 時間程度で発酵が終了し、エタノールがほぼ理論収率に近い値で生産されることが分かった。

4. 結 言

木材の加圧熱水処理により得られた水可溶部について、木質炭化物を用いた発酵性改善処理を試みた結果、木質炭化物は発酵阻害物質の吸着・除去に優れており、水可 *Bioresour. Technol.*, **58**, pp.197-202 (1996)

溶部の発酵性改善に有効であることが分かった。わずか 10 分の浸漬により発酵性を改善でき、簡便な発酵性改善処理を確立できた。

さらに、キシロースを発酵できない *Saccharomyces cerevisiae* とキシロース発酵能を有する *Pachysolen tannophilus* を併用した発酵系は、木材から得られるほとんどの単糖が効率的にエタノールへと変換されることも明らかとなった。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の若手奨励研究助成により支援を賜りました。ここに、厚く御礼申し上げます。

References

- 1) S. Saka: *Biomass · Energy · Environment*, IPC (Tokyo), pp.251-290 (2001)
- 2) T. Ueno, S. Saka: *Cellulose*, **6**, pp.177-191 (1999)
- 3) S. Saka, R. Konishi: In *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*; Bridgwater, A.V., Ed.; Blackwell Sci. (Oxford), pp.1338-1348 (2001)
- 4) D. Kusdiana, E. Minami, K. Ehara, S. Saka: In *12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*: Amsterdam, pp.789-792 (2002)
- 5) K. Ehara, S. Saka, H. Kawamoto: *J. Wood Sci.*, **48**, pp.320-325 (2002)
- 6) K. Ehara, S. Saka: *Cellulose*, **9**, pp.301-311 (2002)
- 7) D. Takada, K. Ehara, S. Saka: *J. Wood Sci.*, **50**, pp.253-259 (2004)
- 8) K. Ehara, D. Takada, S. Saka: *J. Wood Sci.*, **51**, pp.256-261 (2005)
- 9) K. Ehara, S. Saka: *J. Wood Sci.*, **51**, pp.148-153 (2005)
- 10) K. Yoshida, J. Kusaki, K. Ehara, S. Saka: *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **123**, pp.795-806 (2005)
- 11) K. Ehara, S. Saka: In *Lignocellulose Biodegradation*; B.C. Saha, K. Hayashi, Ed.; ACS Symposium Series 889; ACS (Washington, DC), pp.69-83 (2005)
- 12) H. Miyafuji, T. Nakata, K. Ehara, S. Saka: *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **124**, pp.963-971 (2005)
- 13) T. Nakata, H. Miyafuji, S. Saka: *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **130**, pp.476-485 (2006)
- 14) T. Sakaki, M. Shibata, T. Miki, H. Hirose, N. Hayashi:
- 15) T. Sakaki, M. Shibata, T. Miki, H. Hirose, N. Hayashi:

- Energy Fuels*, **10**, pp.684-688 (1996)
- 16) H. Ando, T. Sakaki, T. Kokusho, M. Shibata, Y. Uemura, Y. Hatate: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, pp.3688-3639 (2000)
- 17) T. Sakaki, M. Shibata, T. Sumi, S. Yasuda: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, pp.661-665 (2002)
- 18) M. Sasaki, B. Kabyemela, R. Malaluan, S. Hirose, N. Takeda, T. Adschiri, K. Arai: *J. Supercrit. Fluids*, **13**, pp. 261-268 (1998)
- 19) M. Sasaki, Z. Fang, Y. Fukushima, T. Adschiri, K. Arai: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, pp.2883-2890 (2000)
- 20) M. Sasaki, T. Adschiri, K. Arai: *AIChE J.*, **50**, pp. 192-202 (2004)
- 21) M. Matsunaga, H. Matsui: *Mokuzai Gakkaishi*, **50**, pp.325-332 (2004)

超音波技術を利用したバイオディーゼル燃料の製造¹坂東 博²

Ultrasonically Driven Process for Biodiesel Fuel Production

Hiroshi BANDOW

Department of Applied Chemistry, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract

Physical and chemical phenomena driven by ultrasound irradiation to liquid media have attracted much attention due to their unique nature in these few decades. Among them, extremely high temperature and pressure reaction fields provided through the formation of cavitation bubbles in a bulk solution under the normal condition and micro-scale vigorous agitation of solutions by ultrasound are of chemical importance in the practical application point of view. In this talk, fundamental aspects of sonochemistry will be overviewed briefly, and one of their application, sonochemically driven biodiesel fuel(BDF) production from vegetable (waste) oils will be given. Higher efficiency of ultrasound-assisted trans-esterification of triglycerides, the main component of vegetable oil, with alcohols to yield mono-alcohol fatty acid esters, will be demonstrated compared with the conventional mechanical stirring method.

Key words: Renewable energy resource, Vegetable oil, Fatty acid methyl ester (FAME), Alternative diesel fuel, Ultrasound irradiation

1. はじめに

廃植物油から生成されるバイオディーゼル燃料 (BDF) は再生可能な植物から作られ、芳香族炭化水素と硫黄化合物を全く含まないため、地球温暖化の原因物質である炭酸ガスの削減、PM2.5 で代表される微粒子とベンズピレンなどの発ガン性多環芳香族化合物の排出削減に有効であるため注目されている¹⁻⁶⁾。アメリカではすでに2012年にはBDFを軽油に8%混ぜた燃料を使うことが、ヨーロッパでは軽油へのBDFの添加を2005年から0.75%ずつ増やし2009年には5.75%にまで増やすことが計画されている。特にドイツではすでに15万t規模の装置が作られており、2010年のヨーロッパ全体の生産量はバイオエタノールおよびバイオディーゼルともに800万tを超えると予想されている。日本でもBDFの燃料としての規格が2005年度中には決まり、ガソリンに3%エタノールを添加することが認められるE3ロードマップが示されたのと同様に、軽油にBDFを添加するための法整備が準備されつつある。しかし欧米のように使用することが義務付けられているのと、日本のように入れても良いというのでは大きく異なる。特に日本でディーゼル燃料としての消費が実際に広がらないのは、車に使用するには安全性、運転性など厳しい規格に適合しなければならないが、現在多くの自治体で簡便に製造しているBDFの収率、純度、副生物(特にグリ

セリンの純度)にはまだ問題があって、値段が高いことと、燃料としての規格に完全に適合してはいないからである。本来、環境にやさしい燃料としてBDFを使うためには、廃油を燃料に変えるのであるから、多少の問題には目を瞑ろうといった安易な考えではなく、(原料→製造プロセス→製品→燃料としての使用状況→排出ガス)の全てを考慮したライフサイクルアセスメント(LCA)に基づいた、軽油に競争可能なまたは軽油より優れた燃料としてのBDFの製造を考えなければならない。そこで原料としては廃油以外にジャトロフパオイルなど食用油としては使用することが出来ない油、食用としても利用できるがTable 1に示すように単位面積当たりの収量の多いパーム油を原料としてBDFの製造を検討している。

Table 1 Comparison between conventional and ultrasonic method for BDF production.

反応条件	従来法(攪拌)	超音波法
反応温度	60°C	室温(25°C)
触媒量	3%以上	0.5%以下
触媒	KOH	KOH, NaOH
メタノール量	数倍の過剰量	量論量+数%
反応時間	数時間	10分
その他の油	パーム油は不可	パーム油も可
その他のアルコール	可	可

超音波を反応過程に用いることにより、Table 2に示すように、常温で、極めて少量の触媒の添加によって迅速にBDF生成反応が進行し、しかも石鹸が殆ど副生しないため、グリセリンとBDFの分離が極めて容易なBDF製造プロセスの開発が可能となったのでこれを紹介する。

ディーゼル燃料として広く用いられている軽油に優る燃料製造の実用化を目指して、超音波反応場を有機廃棄

1. 平成20年6月12日本会第120回例会において発表
2. 大阪府立大学大学院工学研究科
平成20年3月27日受理

Table 2 Various vegetable oils and their average yields

油種植物	原料	平均油分 (%)	平均収量 (t/ha)	油収量 (t/ha)
アブラヤシ	中果皮	20	20.00	4.00
アブラヤシ	肉果皮、胚乳	45	1.20	0.54
ダイズ	大豆	17	1.88	0.32
ラッカセイ	落花生	25	0.80	0.20
ワタ	綿実	16	0.99	1.58
アブラナ	種子	35	1.37	0.48
ヒマワリ	種子	35	1.39	0.49
ココヤシ	コブラ	64	0.55	0.35
ジャトロバ	種子	35	17.5	6.00

※ 多年生植物はアブラヤシとジャトロバ

物の有効利用に適用するために、以下の5点について検討した。

- (1) 原料となる植物油の選択
- (2) 廃油にも応用可能なアルコールによるエステル化反応最適条件の検討。
- (3) 従来、分離過程で問題となっている副生成物である石鹸の生成の少ない BDF 製造法の確立。
- (4) 生成した BDF と副生成物のグリセリンの分離
- (5) 生成した BDF と中間反応物のジ及びモノグリセリドとの洗浄分

2. 超音波反応場

超音波反応場についてはまだ分からないことが多いが、現在分かっていることを簡単に説明する。

超音波とは周波数 20kHz から 2MHz までの音波であると定義されている。水への超音波照射により、式 (1) に示すように水の分解生成物である水素原子と OH ラジカルが生成する。



また、水に高出力の超音波を照射すると、超音波により水中に気泡が生成・成長・崩壊し、その際、系内に局所的な高温・高圧状態のキャビテーションが生じる⁷⁾。超音波反応場とは

1) プラズマ的反応場

高温・高圧反応場 5000°C、1000 気圧

特色：超急加熱、超急冷 10⁶°C/s

2) 光触媒、放射線の反応場

水の分解生成物の OH ラジカルによる酸化・分解反応

特色：不均一反応場（反応物質の濃縮による加速促進）

3) 高速攪拌、衝撃波的反応場

ショック・ウェーブ(水の高速流)

特色：高速物質移動、混合、分離

ここで形成されるキャビテーションバブルには二種類のものがある。1 つは、瞬間的に崩壊する transient bubble(以下 t.b.と略記)で、もう 1 つは、穏やかに崩壊する stable bubble(以下 s.b.と略記)である。t.b.は約 1-2μsec.

の寿命をもち、内部に溶存気体をわずかに含むだけで、その溶存気体が衝撃的、断熱的に崩壊することによって、液体分子は大きな加速度をもって互いに衝突するため、t.b.界面は瞬間的に数千 K、数百から数千気圧という高温高圧状態となる。この瞬間に液体分子の分解やラジカルの生成といった大きなエネルギーを要する化学反応が起こる。s.b.は約数十 μsec.の寿命をもち、内部に溶存気体や溶媒や溶質液体の蒸気を含む。このため、崩壊の際の液体分子衝突はやわらげられ、千数百 K、数十気圧が達成されるが、寿命が長い化学作用、特に加水分解などの分子の衝突が反応進行の大きな要因である場合に非常に寄与が大きい。これらの水中に生成する高温・高圧反応場を用いて、機能性物質の創製が可能となるナノメートルレベルの金属微粒子はその量子サイズ効果からバルクの金属とは異なった機能を有するため、粒子サイズのコントロール、2 種以上の金属又は無機材料からなる複合化が活発に研究されている。超音波化学(ソノケミストリー)は周波数数十 kHz から数 MHz の超音波を液体に照射することによって液体中に生成する微小な気泡(マイクロバブル)の崩壊によって短時間・局所的に生ずる、5000°C以上・1000 気圧⁷⁾以上という特殊な反応場(Fig.1)を利用する化学である。

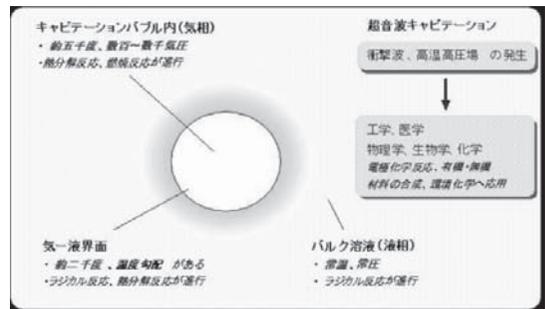


Fig. 1 Schematic representation and some applications of unique reaction field stimulated by ultrasound irradiation.

最近、カーボンナノチューブ⁸⁾や無定形鉄⁹⁾、有害有機化合物の分解無害化¹⁰⁻¹⁴⁾に超音波反応場が利用され、成功をおさめている。従来より周波数と出力の比較的低い(市販の洗浄器では 20~35kHz 程度)超音波が用いられていたが、更に高周波数、高出力の超音波の利用によって初めて成功したものである。Table 3 に示すように、超音波反応場は従来から多く検討されている反応場とは異なる点も多い。例えば、プラズマ反応場と超音波反応場は高温・高圧への到達時間と常温へ戻る時間が全く異なり、超音波照射では、10¹⁰°C/s という超急加熱・超急冷が実際に起こっている。また極めて局所の反応場であるため、γ線や紫外線照射のような全体がほぼ均一の系ではなく、極めて局所に反応物や反応担体が存在する不

均一な系が実現できる。また水溶液に超音波を照射すると、同じ系内にプラズマや超臨界のような高温・高圧反応場と γ 線のようなH及びOHラジカル反応場が共存し、これらをうまく選択することにより、超音波独自の反応の制御、物質の創製が可能となる。

Table 3 Comparison of various chemical reaction

化学過程	圧力 (Mpa)	時間 (s)	エネルギー (eV)
超音波化学	10^2	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-1} \sim 1$
光化学	$\sim 10^{-1}$	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	$1 \sim 10$
放射線化学	$\sim 10^{-1}$	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	$10^6 \sim 10^9$
プラズマ化学	$\sim 10^{-7}$	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	$1 \sim 10$
熱化学	$\sim 10^{-1}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 10^{-1}$

3. 基礎実験

3.1 超音波反応実験装置

実験装置はFig.2に示すとおりで、超音波照射には、多周波超音波発生器(カイジョウ社製 4012型)及びピタン酸バリウム振動子(200kHz, 65mm ϕ , 200W (6.0 / cm³))を用いた。

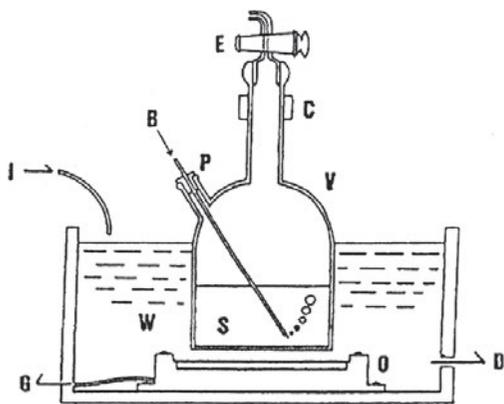


Fig.2 Setup for fundamental experiments on ultrasonically driven chemical reaction.

V:ガラス反応器、S: 試料溶液、O:振動子、G:超音波発生器、W:冷却水、E: ストップコック、C: クランプ、P: シリコンセプタム、B: 曝気ガス、I: 冷却水入り口、D: 冷却水出口

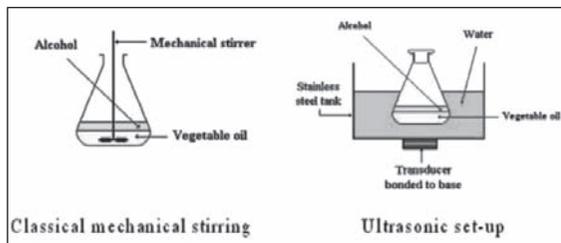


Fig.3 Schematic drawing of conventional and ultrasonic BDF production.

攪拌法と超音波法を比較するために、Fig.3に示すような、フラスコを用いた実験を行って超音波の効果について確認した。

超音波法については、Fig.4に示すような、低周波数の照射に用いた超音波照射装置、本多電子社製 28 kHz,40kHz 洗浄槽 (WS-1200-28型、WS-1200-40型)を、高周波数の照射には STIMIN 社製、Multi-Frequent-5-Sonicator (1500kHz, 500kHz, 38kHz)を用いた。また連続装置として、Fig.5aに示す、ドイツ製ホーン型振動子 (Dr.Hirsher社製を用いたものを Fig.5bに示す。プッシュ・プル型振動子 (Crest社製)を用いた装置の空の状態を Fig.6aに、アルコールと食用油を入れて超音波を照射したときの装置の様子を Fig.6bに示した。



Fig.4 Laboratory experiment for continuous BDF production by using an ultrasonic cleaning bath (Freq.= 40kHz)



Fig.5a Horn-type US transducer.



Fig.5b Continuous BDF reactor equipped with Horn-type US transducer(Fig.5a).



Fig.6a Continuous BDF reactor equipped with push-pull type US transducer.



Fig.6b Emulsification of oil with alcohol by US irradiation during BDF production.

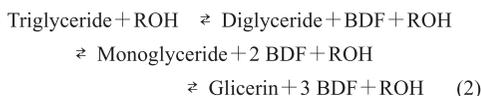
生成物は示差屈折率検出器を用いた高速液体クロマトグラフ(HPLC)によって定量した。アルキル鎖の分布を測るためにGC-MS(島津、2010型)を用いて分析をした。

3.2. BDFの製造

3.2.1 トリオレインによる平衡反応の検討

植物油とメタノールの反応の経時変化を検討した。

この反応は、よく知られているように植物油の主成分であるグリセリン(3価のアルコール)の脂肪酸エステルと(1価の)アルコールのエステル交換反応であり、反応(2)に示すように逐次的に反応する。



反応は基本的にこのような平衡反応であり、超音波照射下における反応もこの反応機構で進行することが確かめられた。ただし、後に示すように超音波照射下での反応は従来の攪拌法より効率良くBDFが生成することが分かった。しかも少ない触媒量、アルコール量で効率良くBDFが生成するので、超音波はBDF製造にとって有効な方法である。

BDFを生成するエステル化反応は平衡反応であるため、反応を生成系により進行させるためにはアルコールの量を増やさなければならない。そこで攪拌反応によって、植物油の標準物質としてオレイン酸のトリグリセリド(トリオレイン)を用いて平衡反応の進行過程を検討した。反応にはFig.3に示したような機械攪拌装置つきエーレンマイヤーフラスコを用いた。

反応にはそれぞれ純度がKOH >95%、MeOH >99.5%、

Triolein >70%の試薬を用いた。まず触媒(KOH)を0.5%と一定にし、アルコールとトリオレインとの比を9:1 ~ 1:1と変えて検討した。反応温度は室温(26°C)であった。結果の1例をTable 4およびFig.7示す。

Table 4 Concentration change of reactant and products by conventional mechanical stirring method for BDF production: Triolein/MeOH molar ratio = 1/6

Time hour	Methyleate	Glycerin	MonoOlein	DiOlein	Triolein
1	93.18	0.17	0.41	2.57	3.64
3	95.13	0.27	0.25	1.90	2.42
5	96.09	0.23	0.20	1.54	1.92
7	96.69	0.06	0.20	1.35	1.67
10	96.96	0.07	0.24	1.27	1.45

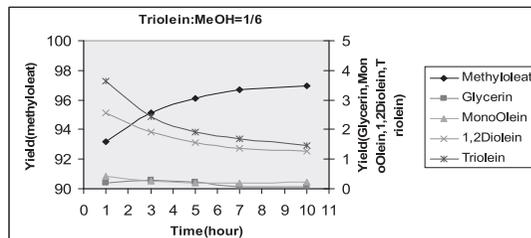


Fig.7 Time profile of BDF(Methyleate) production. Reaction condition: Oil/ROH molar ratio = 1/6

従来広く用いられている機械攪拌ではアルコールが植物油の6倍程度の過剰量を添加しても10時間の長時間の反応後でも数%の未反応のトリグリセリドが存在し、アルコールを植物油の9倍添加してはじめて99%以上の反応率が得られることが明らかとなった。この結果は、攪拌法では反応が完結するのが極めて時間がかかることを示している。そこで、触媒量を1.0%、1.5%、3.0%と変えて、アルコールと植物油の比を3と6で検討した。触媒として用いるKOHの量を増やすと、反応は速くなるが石鹸の副生が多く、純粋なグリセリンを得ることが難しく、石鹸の混ざったグリセリンが廃棄物として後に残る環境に有害なプロセスになってしまう。

それに対して超音波法では、この反応が10~30分程度の反応時間でほぼ平衡に達することが明らかとなった。トリオレインではなく、植物油(菜種油、コーン油、オリーブ油、ひまわり油、パーム油、ブドウ種油、綿実油およびジャトロバ油)を原料として、超音波照射によるBDFの製造を試みたところ、油種による違いは多少あるものの85%以上の収率でBDFが生成し、副反応生成物のグリセリンと中間生成物のモノグリセリドを水洗いした後では98%以上の純度の高いBDFの取り出しが可能であった。

このようにBDFの生成反応は超音波の混合作用によって促進されるので、20kHz~40kHzの比較的低い周波数の超音波が有効であることが明らかとなった。

Table 5 Comparison of the performance for BDF production among various ultrasonic methods including conventional method.

攪拌法	超音波法			
	定在波型	ホーン型	プッシュプル型	
反応時間	60分	20分	10分	5~10分
触媒量	2~3%	0.5%	0.5%	0.3%
収率	80~90%	98%	98%	98%以上
石鹸の副生	多量	少量	少量	微量
BDF品質	△	○	◎	◎

さらに、超音波照射装置のタイプによる違いを検討するために、Fig.4、5a,b、6a,bで示した異なるタイプの照射装置による反応効率の違いをTable 5に示した。



Fig.8a BDF produced by conventional mechanical stirring. Note: BDF(upper) and glycerine(lower) with heavy saponification.



Fig.8b BDF produced by ultrasonically assisted reaction. Note: Clear separation of BDF(upper) and glycerine(lower) with rare saponification.

Table 5 の結果はプッシュ・プル型の照射装置においては 5 分程度のきわめて短い反応時間で 98%以上の収率で BDF の製造が可能となることを示唆している。また、興味深いことに Fig.8 に示すように超音波照射の反応系では石鹸の副生が相当少なく、BDF と同時に生成するグリセリンの BDF からの分離が容易である。この様に触媒の KOH を増やすと石鹸が多く副生するが反応速度は速く、触媒量を減らすと機械攪拌では反応が殆ど完結せず、しかも石鹸が生成してグリセリンに混入する問題が高くなるが、このような従来法の問題点を、超音波法により相当改善できることが期待される。加えて、超音波法を利用した連続流通法により、超音波反応器内での平均滞留時間が 10~20 分程度で 20L 毎分で 98%近い変換率で BDF を製造できることも確認することが出来た¹⁵⁾。

このように超音波を用いると常温・常圧の極めて温和な条件下で、BDF の製造、分離などが可能となり、超音波 BDF 製造法は極めて将来性のある新しい BDF の生成法であると言える。

References

1) B.I. Agra, S. Waranjat: *Renewable Energy*, **9**, pp. 1025-1028(1996)

2) T.A Foglia, K.C. Jones, M.J. Haas, K. M. Scott: *The Cotton Gin and Oil Mill Press* (2000)

3) S.Saka, D. Kusdiana,: *Fuel*, **80**, p.225(2001)

4) W.W. Christie: *Lipid Technology*, **2**, pp.48-49(1990)

5) W.W. Christie: *Lipid Technology*, **2**, pp.79-80(1990).

6) T.J. Mason: *PRACTICAL SONOCHEMISTRY*, user's guide to applications in chemistry and chemical engineering, Ellis Horwood, London (1991)

7) K.S.Suslick, D.A. Hammenton, R.E. Cline. Jr.: *The sonochemical hot spot*, *J. Am. Chem. Soc.* **108**, pp.5641-5642(1986)

8) K.S. Suslick: *Sonochemistry*, *Science*, **247**, pp.1439-1445(1990)

9) Y. Nagata, K. Hirai, K. Okitsu, T. Dohmaru and Y. Maeda: *Decomposition of chlorofluorocarbon CFC113 in water by ultrasonic irradiation*, *Chem. Lett.*, 1995, pp. 203-204(1995)

10) Y. E. Yoo, N. Takenaka, H. Bandow, Y. Nagata and Y. Maeda: *Decomposition of Geosmin in aqueous solution*, *Chem. Lett.*, 1995, pp.961-962(1995)

11) K. Hirai, Y. Nagata and Y. Maeda: *Decomposition of chlorofluorocarbons and hydrofluorocarbons in water by ultrasonic irradiation: Ultrasonic Sonochemistry*, **3**, pp.205-208(1996)

12) E. Ryu, T. Takenaka, H. Bandow, Y. Nagata, J. Morioka, Y. Maeda: *Opna shosya ni yoru shukibutu no jokyū*, *Akushu no kenkyū*, **27**, pp.143-149(1996)

13) Y. Nagata, Y. Mizukoshi, K. Okitsu and Y. Maeda: *Decomposition of hydroxyl-benzoic and humic acids in water by ultrasonic irradiation*, *Environ. Sci. Technol.*, **30**, pp.1133-1138(1996)

14) Y.Nagata, M. Nakagawa, H. Okuno, Y. Mizukoshi, B. Yim, and Y. Maeda: *Sonochemical degradation of chloropehols in water*, *Ultrasonic sonochem.*, **7**, pp.115-120(2000)

15) C. Stavarache, M. Vinatoru, Y. Maeda and H. Bandow : *Ultrasonically driven continuous process for vegetable oil transesterification Ultrasonics Sonochem*, **14**, pp.413-417(2007)

Lignocellulose —Potential in sustainable human society—

Masamitsu FUNAOKA

Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurima-Machiya, Tsu, Mie 514-8507, Japan

Abstract

In order to achieve the cascade-type flow of lignocellulosic components as functional materials, a new type of structure-controllable lignin-based polymers (lignophenols) has originally been designed, and the selective conversion process (phase-separation process) of lignocellulosics to carbohydrates and lignophenols has been developed. This process has been termed “Phase-separation process”. Three types of system plants for the conversion of lignocellulosics through the phase-separation process have been constructed in and out of Mie University campus. A sustainable industrial system through successive functionality control of lignocellulosics is proposed.

Key words: Phytomaterials, Lignin, Phase-separation system, Lignophenols, Resource circulation

1. 化石資源から循環系資源への転換

植物系バイオマスは、光合成により気体—固体間でエンドレスループを形成している。したがって、我々がその利用と廃棄を繰り返しても、循環炭素の総量は変動せず（カーボンニュートラル）、生態系の攪乱にはつながらないと一般には認識され、これが 21 世紀型活動の基礎となっている。しかし、ここには大きな落とし穴があることを忘れてはならない。「時間」と「エネルギー」のファクターの欠如である。

植物は炭素の流れとして 3 つの Phase よりなるエンドレスループを形成している (Fig. 1) :

Phase I: 炭素濃縮, 分子構築 (光合成) (陸上)

Phase II: High potential 形態維持 (陸上)

Phase III: 分子構造解放, 拡散 (地下)

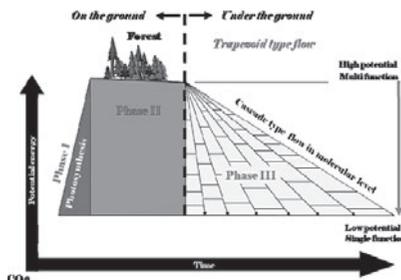


Fig.1 Sustainable flow of lignocellulosics

持続的資源（植物）を基盤とする、そして環境を攪乱しない社会の構築には、植物種毎に異なる上記生態系炭素循環システムの基本パターンを攪乱することなく、それを人間社会における複合体レベルから分子レベルへの物質、材料の流れに再現することがキートとなる。

2. 炭素の流れを制御する物質

樹体は脂肪族系短期循環素材によってそのほとんどが構成されているが、そこに 20~30% 量のリグニンが複合化されることにより、生態系における際だった耐久性が発現している。

樹体に長期循環性を付与するリグニンの Phase I および Phase II における構造上のキーポイントは以下の 3 点に集約される。

1. 潜在性多価フェノール骨格
 2. 脱水素重合系基本サブユニット
- リニア性: Hardwood lignin > Softwood lignin
 分子サイズ: Softwood lignin > Hardwood lignin
3. 活性環境応答サイト: C9 ユニットのベンジル位
- リグニンは樹木中で長期間機能 (Fig. 1 Phase II) した後、フィールドは土壤中に移り (Fig. 1 Phase III), 分子内アルキルアリアルエーテルは徐々に脱アルキル化酵素の作用を受け、多価フェノール活性が再生、フミン系物質として植物栄養素、微量元素の吸着固定等に対し長期間持続的に機能する。脱アルキル化により循環速度制御機構の解除された活性多価フェノール環の

1. 平成 20 年 6 月 12 日本会第 120 回例会において発表
 2. 三重大学大学院生物資源学研究所
 平成 20 年 3 月 3 日受理

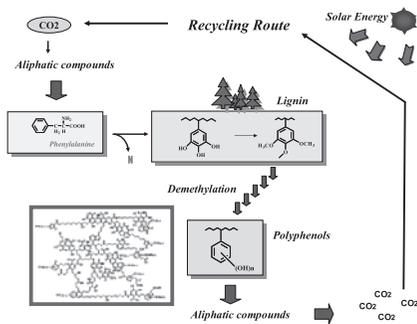


Fig.2 Sustainable flow of lignocellulosics (Phase III).

一部は酸化され、芳香環が解裂、脂肪族化合物へと転換され、その後最終的に CO₂へと転換される。(Fig.2)。

3. 芳香族系基盤資源の変換指針

天然リグニンの逐次構造制御システムの構築にあたり、以下の構造ユニットが重要となる。

- ① C α -aryl ether units
 - ② Reactive benzyl carbon (環境対応サイト)
 - ③ C α -aryl ether units
 - ④ Alkyl-aryl ether units
- ・ キノンメチドへの隣接フェノール核の付加によって形成された①を選択的に切断することにより、天然リグニンを3次元高分子からそのリニア型サブユニットに解体する。(高次構造制御)
 - ・ ②への選択的フェノールグラフティングによって、リグニンC9基本ユニットに1,1-bis(aryl)propane型構造を構築する。(C9基本ユニットの機能化)
 - ・ ②の結果としてC α -phenol-C β -aryl ether unitsが形成されるが、C α フェノール核の隣接炭素求核攻撃性を制御することにより、フェノール活性の交換および分子量制御を行う。(分子内スイッチング素子の構築)
 - ・ ④の潜在性フェノール構造を逐次発現させることにより、活性の持続性を制御する(C α エーテル→C β エーテル→メトキシ基)。

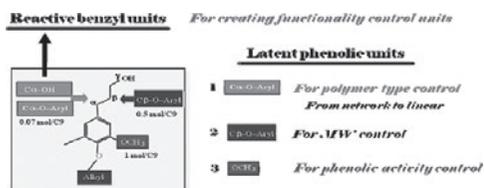


Fig.3 Conversion design of native lignin.

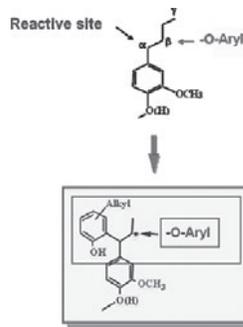


Fig.4 First conversion of native lignin.

4. 高分子複合系の精密リファイニング

環境応答性および生態系循環速度が大きく異なる脂肪族系および芳香族系素材を、何れを廃棄することもなく生態系循環システムにしたがい持続的に活用するためには、これまで廃棄されてきたリグニンの精密機能制御技術を確認することが必須となる。生命に主眼をおいたとき廃棄物に分類されるリグニンは、生態系における貴重なそして唯一の芳香族系分子濃縮体である。

細胞壁において炭水化物とリグニンは高次複合構造を形成している。セルロース高分子鎖は単糖の脱水によって形成されており、一方リグニンでは逆に加水が行われている。構造特性の全く異なるこの両素材を単一環境下で個別に精密変換することは不可能に近く、従来の単一系高エネルギー処理ではなく新規な変換系の開発が必須となる。

炭水化物は加水によりその構成基礎ユニットへと変換し、一方リグニンは上記変換設計にしたがい精密変換する反応系として、常温、常圧下で機能する新しいシステム(相分離系変換システム)を考案した¹⁵⁾。システムのキーポイントは、疎水性リグニンと親水性炭水化物に個別の反応系(機能環境媒体)を設定し、リグニンはPhenolysisにより、一方炭水化物はHydrolysisにより常温常圧下で選択的に変換・分離することにある(Fig.5)。

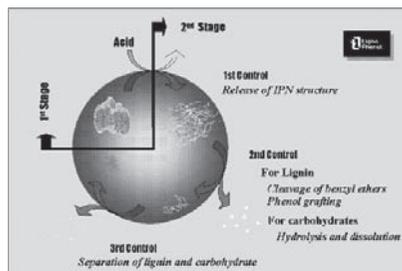


Fig.5 Phase-separation system for selective conversion of lignocellulosics.

リグノセルロース系複合体 (粉体) を疎水性媒体 (フェノール誘導体) で溶媒和した後、酸水溶液中に投入し、系を激しく攪拌する。疎水性フェノールは水中で微粒子状に分散し、内部のリグノセルロースは界面でのみ短時間酸と接触する。すると炭水化物は膨潤、部分加水分解をうけ、一方リグニンのベンジルアリアルエーテルが開裂、生成したカチオンにはフェノール誘導体が導入され、高度な細胞壁複合系がゆるみ始める (1st Control)。加水分解を受けた親水性炭水化物はフェノール相から水相へと抜け出す (2nd Control)、一方変換によって疎水性の高まったリグニンは反対に粒子界面から中心部へと移行し、結果として酸との接触による複雑な2次変性は可及的に抑制される (3rd Control)。系の攪拌を停止すると、両相の比重差により反応系は機能変換リグニンを含む有機相 (上層) と炭水化物を溶解した水相 (下層) に分離する。

上記変換反応は室温、開放系で迅速に進行し、針葉樹、広葉樹、草本などいずれのリグノセルロース系複合体からも、その天然リグニンはほぼ定量的に 1,1-bis(aryl)propane units を高頻度で含むリニア型フェノール系リグニン素材 (リグノフェノール) に変換され、最終的に白色粉末状で分離される。一方、炭水化物は処理過程において膨潤と部分加水分解を受け、主として分子量 2000 以下の低分子画分および分子量 10 万以上の水溶性ポリマーとして水相に分離され、処理時間の延長と共に、モノマー、ダイマー区分へと移行する。反応初期、水相には優先的に加水分解容易なヘミセルロース系の糖質が分離し、時間とともにセルロース由来のグルコース系の糖質の比率が上昇する。フェノール層には反応初期、リグニンと緊密な関係を有するヘミセルロース系の糖質が認められるが、処理時間の経過とともに減少する。

変換系に超音波エネルギーを付加すると、水相における有機相の微細化が進行し、反応面積が拡大する結果、変換速度は飛躍的に上昇する⁶⁾。GPを原料とした場合、5分以内の処理でほぼ定量的な変換・分離が達成される。

2001年夏、三重大学構内に相分離系変換の基本システムを具現化する植物系分子変換・分離システム第1号プラントを建設した。2003年12月には北九州 (若松) に第2号変換システムプラント (農林水産省 林野庁補助事業) が完成し、企業による比較的大規模な試験運転が継続されている。さらに2007年夏、連続変換を達成する第3号機が完成、試験運転を始めている (Fig. 6)。

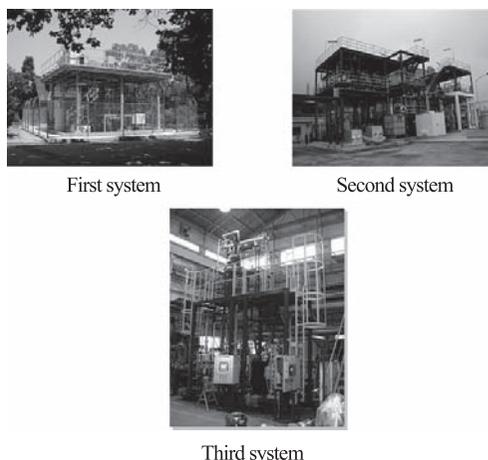


Fig.6 System plants for the phase- separation conversion.

3. リグニンの2次構造制御

生態系長期循環資源であるリグニンを持続的に逐次活用するためには、その機能を任意に転換し得る分子内スイッチが必要となる。

側鎖 C α 位への選択的フェノールグラフティングにより、リグノフェノール分子内には高頻度で 1,1-bis-(aryl)propane-2-O-aryl ether ユニットが形成される。このユニットを機能変換ポイントとして位置付け、C α -フェノール核を C β エーテル結合の解裂スイッチとして機能させる新しいシステムを考案した⁷⁾。スイッチング機能には、電子欠損した C β 炭素に対する C α フェノール核 OH の求核攻撃性を活用し、その開始はフェノール核の塩基性と運動性によって制御する。立体的に隣接炭素攻撃が可能な *p*-アルキル置換フェノールはいずれもスイッチング素子として機能する。

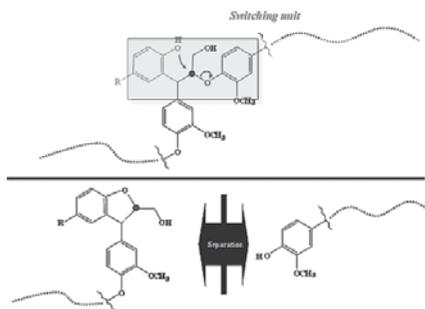


Fig.7 Intramolecular switching device.

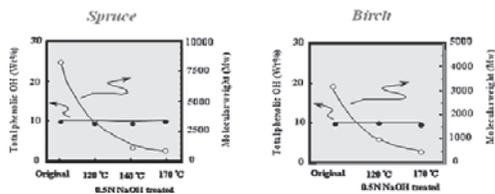


Fig.8 Functionality control of lignophenols using intramolecular switching devices.

この分子機能変換は、C α フェノール核とリグニン母体芳香核間のフェノール活性交換により発現し (Fig. 7), 結果として分子量は低下する一方、その全フェノール活性は一定に保たれる (Fig. 8)。制御分子量はスイッチング素子の分子内頻度と明確に相関しており、コントロール素子を活用し、スイッチング素子の分子内分布を制御することによって、リグノフェノールの分子量を任意にコントロール可能である (Fig. 9)。

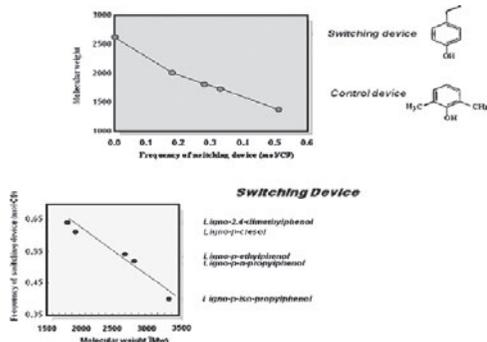


Fig.9 Relationship between the frequency of switching devices and controlled molecular weight.

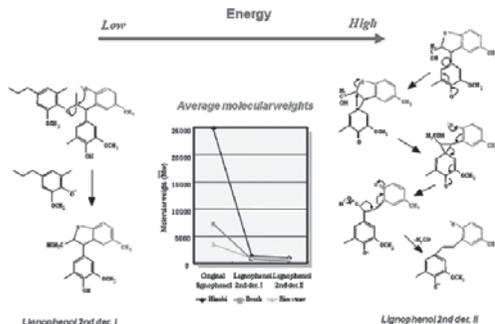


Fig.10 Conversion mechanism of lignophenol.

スイッチング素子の機能メカニズムは、エネルギーによって異なり、比較的低エネルギー環境下では、C β 炭素へのフェノキシドイオンの攻撃が優先し、クマラン環の形成を伴うエーテル結合の解裂が進行するが、高エネルギーの場合にはアリールミグレーションが生じ、結果としてスチルベン型ユニットが形成される (Fig. 10)。

芳香核上に活性ポイントを持したフェノール核 (反応性素子) は、架橋により隣接分子との接合ユニットとして機能し、リグノフェノール分子は安定な3次元構造へと生長するが、一方活性ポイントを有しないフェノール核 (安定素子) を保持した素材では、分子末端でのみ結合が生じ、リニア型へと成長する (Fig. 11)。両素子の分子内頻度を制御することにより、高分子の架橋密度をコントロールすることができ、様々な物性を有するリグニン系循環型機能材料を誘導することができる⁸⁾。

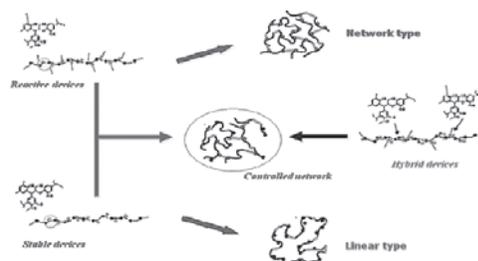


Fig.11 Structure control of lignophenols.

3. Phase III を具現化する持続的社會

これまで様々なリグノセルロース資源のリファインング手法が提案・実行されているが、そのほとんどは高エネルギー環境下での処理を核としている。高度な環境応答機能を有するリグニンはその過程で高度な変性を被り、以後、構造の詳細が活用されることなくほとんどが燃焼されている。生物素材を基盤とする脱石油型社会の構築には、芳香族、脂肪族両素材を持続的に獲得するシステムの構築が必須であり、それにはリグニンの機能的な活用がキーとなる。

複合体 (木材等) としての活用後、相分離系変換システムにてリグノフェノールと糖質に精密変換することにより、機能と時間の因子を具現化する分子素材の材料としての持続的な流れを構築することが可能となる。

リグノフェノールは、分子内に組み込んだスイッチング素子を機能させることにより最終的に2量体まで制御可能であり、さらなる脱アルキル化反応等を施すことによって単純な芳香族系ケミカルスへと誘導、合成化学工業へと持続的に芳香族系原料を供給することが可能となる。

一方、相分離系変換システムを構成する酸媒体を選択

することにより、加水分解速度の差を用いてセルロースとヘミセルロースを選択的に分離することが可能であり、さらにセルロースの重合度を任意に制御することも出来る。したがって、長鎖セルロースとしての利用後、最終的にグルコースへと誘導し、各種発酵操作等によって有用なケミカルスへと持続的に転換、利用することが可能となる。

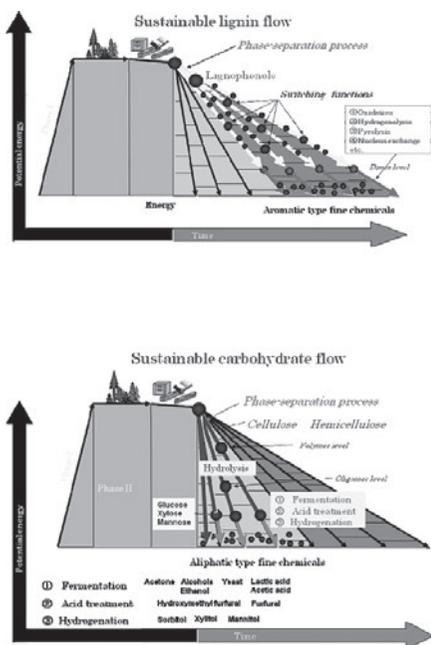


Fig.12 Sustainable flow of lignin and carbohydrates.

我が国は石油資源を有しないが、そのルーツの一つである膨大な森林資源とその持続的な管理技術を保有している。炭酸ガスを原料とする植物の光合成システムを促進、管理する林業、それを受けて材料加工を行う木材工業、その後精密に分子複合系を解放する分子分離工業、分離素材の特性を分子レベルで生かす循環型材料を創製する植物系分子素材工業、そして高度に単純化された原料から機能材料を生み出す精密化学工業が工業ネットワークユニットを構成し (Fig. 13)、それを各地に点在させる。そしてさらに個々の工業ネットワーク間をネットワークで結びマテリアルインターネットネットワークを構

築する。これによって地域間の不均衡をユニット間での補い合いにより常時は正することが可能となり、高度なそして持続的な石油に依存しない社会が構築されるであろう。

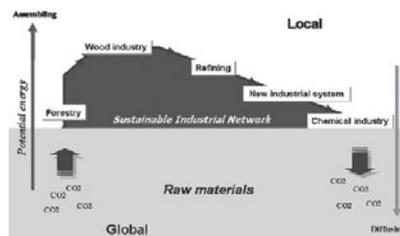


Fig.13 Sustainable industrial network.

References

- 1) M. Funaoka, "Rapid separation of wood into carbohydrate and lignin with concentrated acid-phenol system", Tappi J., Vol.72, 145-149 (1989).
- 2) M. Funaoka, "Characteristics of lignin structural conversion in a phase-separative reaction system composed of cresol and sulfuric acid", Holzforschung, Vol.50, 245-252 (1996).
- 3) M. Funaoka, "A new type of phenolic lignin-based network polymer with the structure-variable function composed of 1,1-diarylpropane units", Polymer International, Vol.47, 277-290 (1998).
- 4) M. Funaoka, "Lignin, Its functions and successive flow", Macromol., Symp., 201, 213-221 (2003).
- 5) K. Mikame and M. Funaoka, "Conversion and separation pattern of lignocellulosic carbohydrates through the phase-separation treatment", Polymer Journal, Vol.38, 694-702 (2006).
- 6) K. Nagamatsu, Y. Nagamatsu and M. Funaoka, "Conversion of phytomaterials by phase-separation process with ultrasonic irradiation", Network polymer, Vol.24, 30-39 (2003).
- 7) M. Funaoka, "Functionality controllable lignin-based polymers", Processing of polymers, Vol.48, 66-73 (1999).
- 8) Y. Nagamatsu and M. Funaoka, "Design of recyclable matrixes from lignin-based polymers", Green Chemistry, Vol.5, 595-601 (2003).

バイオマスエネルギー利活用システムの設計と評価¹

藤江 幸一²

後藤 尚弘³・大門 裕之³・蒲原弘継³

Design of Biomass Energy Utilization System and Evaluation for Plantation in Tropical Area

Koichi FUJIE Naohiro GOTO Hiroyuki DAIMON Hirotosugu KAMAHARA

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology

Abstract

The paper presents the results of a material flow analysis (MFA) of agro-industries such as palm oil, sugar cane and cassava in Indonesia and concerns with the aspects of those productions including liquid and solid wastes, residues, wastewater and possible GHG emission. Based upon the MFA, procedure to design appropriate biomass utilization system both in plantations and agro industries by the use of life cycle analysis (LCA) is proposed. The MFA clarified that abundant GHG discharged from lagoon which is receiving high strength mill effluent, especially in casaba and palm oil industries. Entire energy in the casaba industry is supplied from outside using fossil fuel. Beside the excess electricity, abundant excess biomass is available from sugar cane and palm oil industries for power generation.

The procedure will be released as program software for plantations, agro-industries and in the regional area surrounding plantations. The software can also be utilized for the LCA of imported bio-ethanol (BE) and bio-diesel fuel (BDF) in Japan. It can also be utilized for the appropriate improvement of plantation with agro-industry to reduce the wastes and GHG emission and to increase the power generation which can be supplied to the surrounding area of plantation by establishing local grid for power supply.

Key words: Material flow analysis (MFA), Plantation, Biomass utilization system, Sustainability, Green house gas

1. 緒 言

「バイオマス・ニッポン総合戦略」にリードされたと言ってもよいバイオマス・ブームである。昭和30年代前半までの日本の農村は当にバイオマス社会であり、稲わら、麦わら、雑木林の下草や落ち葉などは、家畜の餌、俵や筵(むしろ)、燃料、堆肥などとして実に有効活用されていた。しかし現在では、農畜産廃棄物の大量排出、管理されずに放置された田畑や山林など、バイオマスに関係する課題が山積している。バイオマス利活用を推進する目的として“温室効果ガス(GHG)を排出しないエネルギー生産”が強調されているが、コストや物質・エネルギー収支を考えると、この目的で国内でのバイオマス利活用事業を持続することには困難が多い様に見える。

GHGを排出しないエネルギーの生産という観点では熱帯・亜

熱帯地域を中心に展開しているプランテーションに大きな期待が寄せられる。インドネシア・スマトラ島を例にとると、一つのプランテーションの面積が数万ヘクタール、すなわち数百平方キロメートルにもおよび、そこではパーム、天然ゴム、サトウキビ、コーヒーなどの単一作物が大規模に生産されている。これらのプランテーションで生産される作物の中で、サトウキビから砂糖を製造する製糖工場で排出される廃糖蜜を利用したバイオエタノールの製造、パーム油を原料としたバイオディーゼル燃料(BDF)の製造、キャッサバから生産されるデンプン(以下、タピオカ)を原料とするエタノールの製造などが注目されている。ただし、キャッサバについてはプランテーション以外の小規模な農家でも生産されている。ナンヨウアブラギリとも呼ばれるヤトロファ(*Jatropha*)もパームヤシと同様に油脂を生産でき、生育管理が容易な植物として大きな関心を集めている。

上記したプランテーション産物は、通常は併設されている工場加工され、それぞれ粗糖、パーム油、タピオカなどが生産されているが、共通して高濃度の有機性排水と製品に転換されなかった残渣(以下、残バイオマス)が加工工程から発生して

1. 平成20年6月12日 本会第120回例会において発表

2 横浜国立大学・環境情報研究院

3 豊橋技術科学大学・エコロジー工学系

平成20年3月7日受理

いる。これらの排水は掘り抜き貯留池であるラグーンに2、3ヶ月滞留させて自然浄化を行った後、河川放流やプランテーション灌漑に利用されている。製糖工場ではサトウキビの搾りかすであるバガスが大量に発生し、発電および蒸気供給用ボイラーの燃料として有効利用されている。パーム油工場でも搾りかすである油が残ったファイバーや種子 (Kernel) の殻などが大量に発生し、やはり蒸気供給と発電のためのボイラー燃料として使われている。製糖工場とパーム油工場はこれらの残バイオマスを利用することで、エネルギー的には自立しており、工場の始動時と構内での運搬機械を除いて、通常の操業では化石燃料の消費は無いとされている。一方、キャッサバ・デンプン (タピオカ) 工場からはキャッサバの皮や搾りかすが大量に排出されているが、含水率が高いため燃料としては利用できず、家畜飼料などとしての利用が一般的である。工場の動力源や製品乾燥のための熱風発生には化石燃料が使われている。

このようなプランテーションおよびその産物を加工する工場 (agro-industry) における環境負荷、すなわち水環境への汚濁負荷や温室効果ガスの排出、バイオマス残渣排出の実態はどのようになっているのか、またその排出はどこまで削減できるのか、燃料や素材としてバイオマスはどの程度利活用可能なのか、あるいは加工工場の電力を外部へ供給する能力はどれ程あるのか、そして、パーム油を加工したバイオディーゼ燃料 (BDF) や廃糖蜜およびキャッサバを原料として製造されたエタノール (以下、バイオエタノール) を、例えばわが国で燃料として利用することは、どのような意味があるのか、すなわちどれ程のGHG 排出削減や、どれ程の環境生態系への負荷低減に貢献できるのかなどを明らかにしておく必要がある。

そこでプランテーションでの各種バイオマスおよびバイオマス産物の生産における物質・エネルギー収支等を現地での調査結果に基づいて解析するとともに、温室効果ガスの排出を抑制するバイオマス由来のエネルギー生産や京都メカニズムに基づくクリーン開発メカニズム (CDM) 事業の可能性についても検討してきたので、その結果を紹介させていただく。

2. プランテーションにおける実態調査

プランテーション産物の生産から加工、輸送にいたる一般的過程を Fig.1 に示した。本研究ではパームヤシ、キャッサバ、サトウキビを対象として、1) プランテーションにおける面積当たりの生産量に対する施肥、バイオマス残渣の農地還元、エネルギー消費等の解析、2) 産物の加工・精製工場における炭素を中心とした物質収支とエネルギー消費等の解析に基づくプロセ

ス効率および環境負荷の評価、3) プランテーション産物であるパーム油、廃糖蜜、キャッサバを原料としたバイオ燃料である BDF、バイオエタノールの生産および輸送の過程における化石燃料の消費および GHG 排出の解析と評価、4) プランテーションおよび産物加工・精製工場における残バイオマス、余剰電力等の利用による地域へのエネルギー供給システムの設計と供給量増大の可能性評価等を行う。

これらの取り組みを通して、プランテーションおよびアグロインダストリーにおける環境生態への負荷低減の促進、プランテーション・バイオマスの利活用促進による総合的な化石燃料消費および GHG 排出の削減のための方途の探索およびその大きさの可能性の評価を行うとともに、バイオマス産物利用の意義を明らかにすることを目的としてきた。

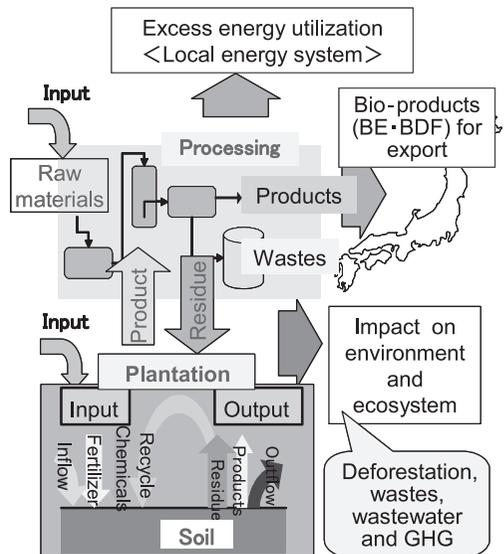


Fig. 1 Material and energy flow in biomass utilization, and environmental impact

本研究では、サトウキビ、パームヤシ、キャッサバ、天然ゴム、アカシア・マンギウムなどのプランテーションが集積しているスマトラ島南端の Lampung 州を中心とした地域を調査研究の対象とした。現地の Lampung 大学やインドネシア技術評価応用庁 (以下、BPPT)、同国環境省をはじめとした公的機関等の協力を得て、プランテーションの種類、規模、位置などの地理情報、物質・エネルギー収支等の実地調査による解析、関連する公開情報の収集等にあたった。加えて、多数のプランテーションでヒアリングを行い物質・エネルギー収支に関連する情報の収集を行うとともに、排水・廃棄物量の発生量調査、ラグーンでのバイオガス発生量実測を含む炭素や各種肥料成分の収支の

解析も併せて行った。

3. パームヤシのプランテーション

3.1 生産プロセスと運転状況

調査研究の対象としたランポン州のアブラヤシ・プランテーションにおけるアブラヤシ果房 (FFB: Fresh Fruit Bunch) の収量は10~11 トン/haであり、このときの施肥量 (kg/ha) はそれぞれ、窒素N: 95.7、 P_2O_5 : 31.1、 K_2O : 151.2、MgO: 52.5であった。これらの化学肥料を製造するためのエネルギー消費量は3.3GJ/haと見積もられる¹⁾。

プランテーションで収穫されたFFBから粗パーム油(CPO)を製造する工場のプロセスをFig.2に示す。

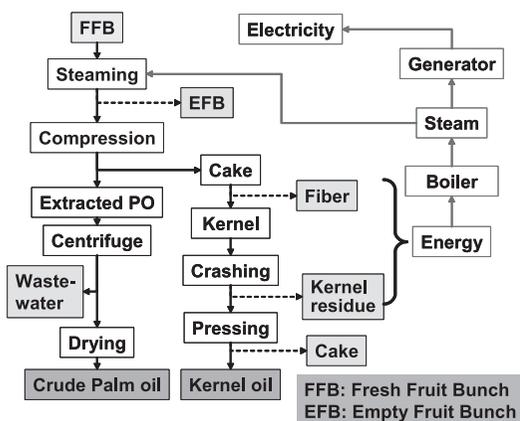


Fig.2 Process diagram of palm oil mill

FFBは約140~150°C (3kg/cm²)で100分程度加熱(蒸熱)されてパーム油の分解・劣化の原因となる酵素を失活させ、さらにFFBからパーム果実を分離した後で機械的に搾油する。搾油されたパーム油は遠心分離・乾燥工程を経て水分が除去される。ここから発生する水分は、残留油分をエマルジョンとして含む高濃度排水であり、蒸熱工程の凝縮水などの他工程から排出される排水とともに、素掘りの池であるラグーンに長期間貯留することで処理が行われている。搾油工程から排出される圧搾ケーキ中には果肉部分の繊維質と種子(Kernel)が含まれている。圧搾ケーキから分離された種子は、破碎後に再度の圧搾によってカーネル油の生産に利用される。一方、繊維質とKernelの殻は、低含水率であることに加えて油分も含まれているのでボイラーの燃料として蒸気発生や発電に有効利用されている。前述したようにパーム油製造工場では、スタートアップ時を除いて

エネルギー的に自立しており、化石燃料を必要としない。

大量に発生する果実除去後のヤシ空房 (EFB: Empty Fruit Bunch) については、その焼却灰がカリ肥料としてプランテーションへ還元されていたが、現在インドネシアでは大気汚染防止等の観点から、EFBの単純焼却は禁止されている。ボイラーから発生する焼却灰(主灰)はプランテーションに還元施肥されている。

3.2 パーム油製造工場での物質収支

Lampung州内にある国営プランテーションに併設されているパーム油製造工場における調査結果から明らかになった重量基準での物質収支をFig.3に示す。毎時40トンのFFBを受け入れているこの工場では、粗パーム油とカーネル油を合わせて毎時9.66トンを生産している。一方で、水分にばらつきは有るが毎時18トンを越える繊維質、EFBなどが排出されており、EFB(8.6t/h)以外はボイラー燃料として利用されている(前述)。この工場の排水は濃度が31000g-COD/m³、流量が33.7m³/hに達していた。多様な微生物群集による分解浄化を期待して、素掘りのラグーンに2、3ヶ月間滞留させた後、パームヤシの灌漑に利用されている。

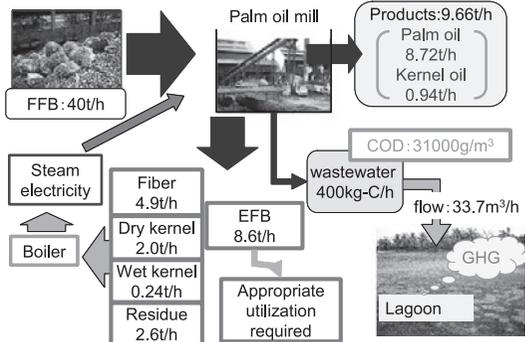


Fig.3 Material flow in palm oil mill

Fig.3に示されたパーム油製造工場における重量基準の物質収支をもとに、それぞれに含まれている有機炭素に着目した物質収支を推計し、その結果をFig.4に示した。40tのFFBは12tの有機炭素に相当する。これを基準(100%)とすると、製品であるパーム油およびカーネル油として回収される有機炭素の収率は57%にとどまり、41%が加工残渣であるファイバー(Fig.3ではFiber)、カーネルの殻、EFBなどの残バイオマスとして、そして約3%が排水として排出される。この41%の残バイオマスで工場を稼動するエネルギー供給が賄われているが、まだ残バイオマス量には余裕があり、更なる発電が可能であると予想され

る。単純焼却が禁止されている EFB については、適切な有効利用が期待されているが、高含水率であるために燃料としての利用には乾燥が不可欠であり、現有のボイラー廃熱を利用できれば EFB の燃焼や高温ガス化などが可能になる。

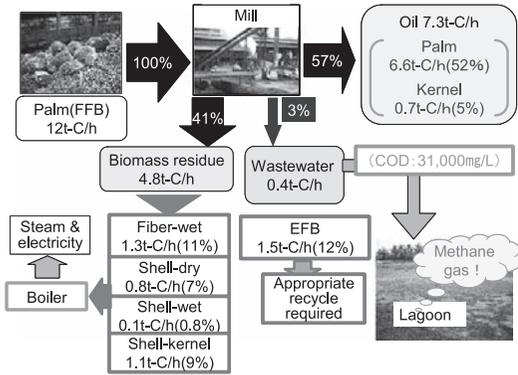


Fig.4 Organic carbon flow in palm oil mill

3.3 パーム油製造工場での GHG 排出

このようにパーム油製造工場からは高濃度の有機性排水が発生しており、ラグーンに滞留させるだけの処理が行われている。酸素供給が不十分な熱帯の高温条件下で高濃度有機性排水を長時間滞留させれば、当然のことながら嫌気微生物分解が進行し、二酸化炭素の21倍の温暖化効果を有するメタンと二酸化炭素の発生が急速に進行する。排水受け入れ口に近いラグーンの表面はほとんどスカムで覆われているが、スカムの間から活発に気泡が発生しているのが目視できる。この気泡を捕集して発生量と組成を測定した結果が Fig.5 である。

ラグーンに流入した排水 (POME : Palm Oil Mill Effluent) 中

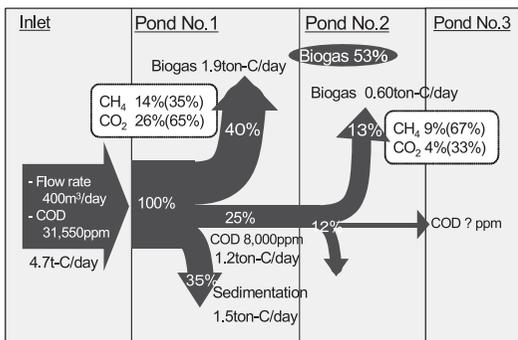


Fig.5 Biogas and green house gas discharge from lagoon receiving palm oil mill effluent.

有機炭素の 53%がラグーンでの生物反応によってメタンおよび二酸化炭素に変換され、大気中に分散していることが明らかになった。処理水の COD は概ね 500mg/L 以下であり、その他の有機汚濁物質は沈殿分離されたものと考えた。

3.4 パーム油を利用することの意味

当地のプランテーション 1ha あたりの FFB 収穫量は 10~11 トンであり、CPO として約 2.5 トンの生産が可能である。この CPO が同量の BDF (Bio-diesel fuel) に変換できるとすれば、1 トンの BDF を生産するために必要な耕地面積は 0.4ha になる。一方、パーム油工場では CPO1 トン製造当たり約 50kg の有機炭素が排水に排出され、それを処理するラグーンでは 22kg のメタン(有機炭素として 17kg)が発生する。メタンの地球温暖化係数 21 を乗じて換算すると二酸化炭素 462kg に相当する。ただし、パーム油製造工場は、搾油残渣である繊維質 (ファイバー) 等の残バイオマスを利用することでエネルギー的には自立している。

4. キャッサバ・デンプンの生産

4.1 キャッサバ・デンプン工場のプロセス

キャッサバからデンプン (タピオカ) を生産する工場に対しても同様の調査を実施した。農家やプランテーションから搬入されたキャッサバからタピオカを生産する工程で排出される残バイオマスを Fig.6 に示した。

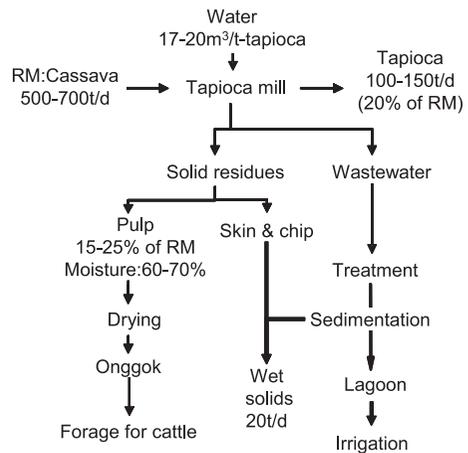


Fig.6 Discharge of residual biomass from tapioca mill

デンプン生産工程から発生する主な残バイオマスは、キャッサバの欠片と皮、搾り滓に加えて高濃度の有機性排水である。搾りかす (Fig.6 では Pulp) は乾燥後に乾燥搾り滓 (Onggok) と

して肥育牛の飼料として利用されている。調査したデンプン工場の中には、牛舎を併設して肥育を行っている例が見られた。大量に発生する高濃度排水は、後述の通りラグーンに貯留後、河川へ放流されているが、地下浸透や蒸発によって相当量が失われている。

4.2 キャッサバ・デンプン工場での炭素収支

キャッサバ・デンプン工場における炭素に着目した物質収支とユーティリティー使用量を Fig.7 に示した。搬入された 750 トンのキャッサバには 140 トンの有機炭素が含まれており、その 40% がデンプン（タピオカ）として回収される。前述したように皮、欠片、搾り滓として排出される有機炭素は 26~40% であり、特に排水として排出される有機炭素が 20~22% にも達しているのが注目される。

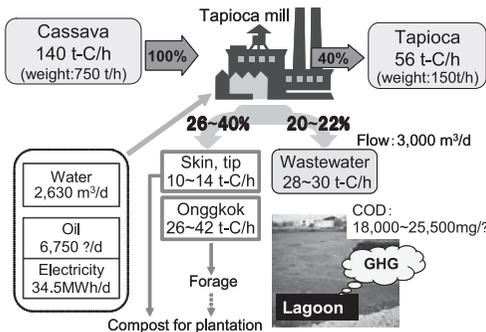


Fig.7 Organic carbon flow in a tapioca mill.

パーム油工場での調査と同様にラグーンにおけるバイオガスの発生量とその成分分析結果を Fig.8 に示した。流入有機炭素の 74% がラグーンにおいてバイオガスに転換され、そのうち 49% はメタンである。このメタンを含む GHG の排出量は二酸化炭素換算でタピオカ 1 トン当たり 1140kg と推算される。ラグーンからこのメタンを捕集してエネルギーとして利用すると、この工場消費している重油および電力の約半分を賄えると推算される。ただし発電には重油を用い、その発電効率を 25% と仮定した。ラグーンからの GHG の排出抑制に加えて、化石燃料の消費が削減されることにより、現状での GHG 総排出量の 74% を削減できると予想される。キャッサバ・デンプン工場では、その運転に必要なエネルギーは全て外部からの化石燃料によって賄われている。ラグーンで大量に発生するメタンを回収してエネルギーとして利用することは GHG の大幅な排出削減に加えて、運転コストの低減にも貢献でき、CDM の対象となり得る。

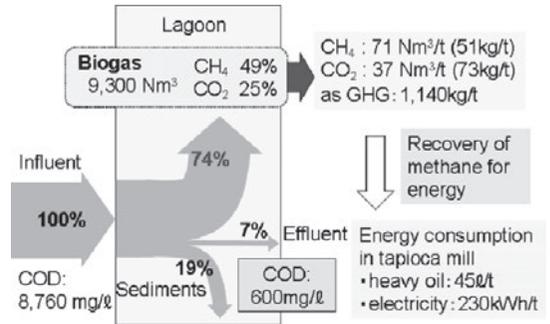


Fig.8 Organic carbon balance in lagoon receiving wastewater from tapioca mill and use of biogas for energy.

4.3 サトウキビ製糖工場での物質フロー

サトウキビ製糖工場におけるプロセスと物質フローの例を Fig.9 に示した。サトウキビからの砂糖および糖蜜（廃糖蜜）の収率に加えて排水量の大きさを把握することができる。

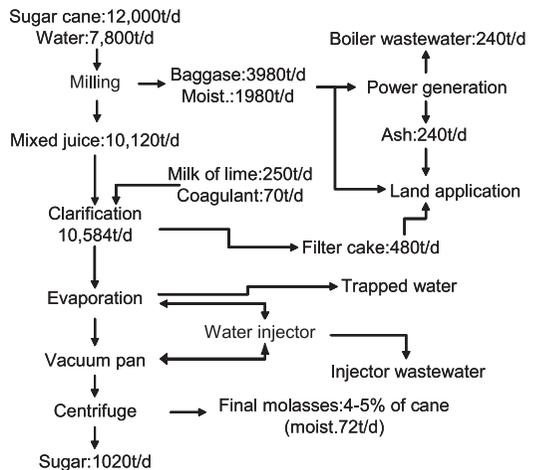


Fig.9 Material flow in sugar cane processing mill

ラグーンに流入する製糖工場排水中の有機炭素およびバイオガスの発生量と組成の実測を行った。製品および原料 1 トン当たり排水中に排出される有機炭素量を、キャッサバ・デンプン、パーム油（前出）と比較して Fig.10 に示した。デンプン 1 トン製造当たり 200kg もの有機炭素が排水中に排出されている。パーム油では約 40kg、サトウキビでは 3.5~7kg にとどまる。ラグーンからのメタンおよび二酸化炭素の排出量は、サトウキビの場合は大きくない。前述したように、パーム油工場とサトウキビ（製糖）工場はエネルギー的に自立しており、それぞれの運転に化石燃料を必要としない。むしろ余剰の電力および燃料とし

て利用できるバイオマスを抱えている。一方、キャッサバ・デンプン工場では前述の通りエネルギーは全て外部から供給されている。キャッサバ・デンプン工場およびパーム油工場でのメタンの回収と燃料化の推進、パーム油工場および製糖工場における省エネルギー化と残バイオマスの燃料化等による有効活用が推進されるべきであり、CDM 事業としての可能性が大きい。スマトラではキャッサバ・デンプンを原料とした大規模なバイオエタノール生産工場の建設が進行しており、その廃液処理が懸念される。そこでの物質・エネルギー収支の調査・解析についても取組み始めている。

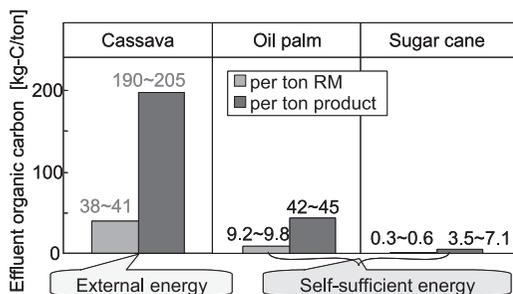


Fig.10 Discharge of organic carbon from agro-industries.

5. プランテーションを核とした地域エネルギー供給システム

キャッサバ・デンプン工場のようにエネルギーが不足している一方で、パーム油やサトウキビ製糖工場ではエネルギー利用可能な残バイオマスおよび電力ともに十分な余裕があると判断できる。これらの余剰バイオマス、余剰電力を利用した地域エネルギーシステムが想定される (Fig.11)。

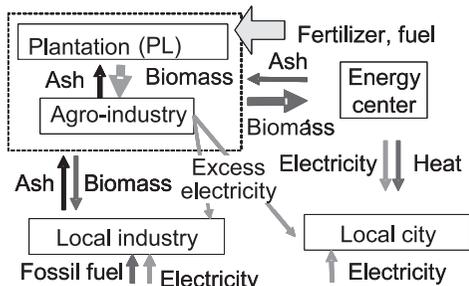


Fig.11 Supply of excess electricity and energy from plantation to local city and other industries.

パーム油関係の余剰バイオマスとしてはEFB、油椰子の樹幹な

どが挙げられるが、乾燥や破砕が必要になる。パーム油圧搾残渣であるファイバーやカーネルの殻なども余剰分が有り、燃料化の対象となろう。バガスについては、持続的なサトウキビ生産に必要な有機質の土壌還元量を検討しながら、エネルギーとしての利用促進が考えられる。上記したバイオマスの焼却灰に含まれるカリウム、リンなどの成分は耕地への還元が必要である。

6. プランテーションにおけるバイオマス利活用システム設計と評価の手法

アブラヤシ、サトウキビ、キャッサバ、アカシア・マンギウム等を対象として、プランテーションから加工工場、その製品の利用に至る過程における物質・エネルギー収支等の調査・解析結果をもとに持続性、地域適合性、自然共生等の観点から改善の方策とその効果を予測するとともに、それらの産物を輸入利用することの意義を定量化するためのプログラムの開発を行っている (Fig.12 参照)。

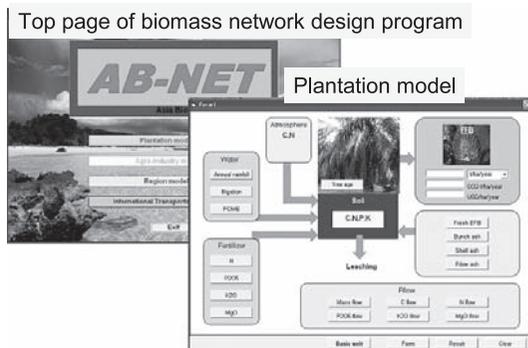


Fig.12 Program software for system design of biomass utilization network and evaluation.

[謝 辞] この研究は文部科学省の平成 17 年度科学技術振興調整費による「バイオマス利活用システムの設計と評価」の一環として実施したものである。

References

1) H.Kamahara, M.Shimizu, A.Widiant, R.Tachibana, Y.Atauta, N.Goto, H.Daimon, K.Fujie, LCA of BDF production from oil palm on the basis of energy consumption and GHG emission, Paper presented at annual meeting of the Institute of Life Cycle Assessment, Japan (February 28-March 1, 2008)