

V バイオエタノール生産に関する LCA 解析

1. はじめに

近年、新たな事業の事前評価、あるいは既存事業の事後評価の視点として、トリプルボトムライン、すなわち環境、経済、社会の各側面からの「持続可能性」の重要性が世界的に認識されている。これは、1984年に設置された国際連合「環境と開発に関する世界委員会（World Commission on Environment and Development, WCED）」（いわゆるブルントラント委員会）の1987年の報告書で示された、「将来世代のニーズを損なうことなく、現在の世代のニーズを満たすこと」という「持続可能な開発」に端を発している。

化石燃料の代替として注目されるセルロース系バイオマスを原料とするバイオエタノール生産についても、温室効果ガス・富栄養化・生物多様性などの環境的影響、生産コスト・雇用創出・経済波及効果などの経済的影響、農林地の保全・農山村の活性化・エネルギー安全保障などの社会的影響などを含め、「持続可能な開発」の視点に基づいた幅広い解析が行われている。

ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment, LCA）は、製品やサービスのいわゆる“ゆりかごから墓場まで”のライフサイクル全体について、物質やエネルギーの入力、出力を解析し、それらに起因する環境負荷を解析する手法であり、製品やサービスの環境影響評価に幅広く利用されており、ほぼ全てのバイオエタノール生産の解析に利用されている。

ここでは、草本系バイオエタノール生産に関するコストと環境負荷に関する LCA 解析の世界的動向を概説した後、筆者らが農林水産省委託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発」において実施した、草本バイオエタノール生産のコスト、エネルギーバランス、温室効果ガス排出量に関する LCA 解析結果を紹介する。

2. 草本系バイオエタノール製造プロセスの評価に関する報告

2.1 諸外国における解析事例

Roy ら¹⁾は、セルロース系バイオエタノール製造における LCA に関する報告を総説として取りまとめている。その中から、コストと環境負荷に関する報告の一部を以下に述べる。

a) エタノール製造コスト

セルロース系バイオエタノールの製造コストについて、コーンストーバー（トウモロコシ収穫後の茎葉部）から製造したエタノールの場合には 0.71-0.87\$/L²⁾（論文発表時の為替レートで 62～76 円/L。以下同じ。）、セルロース系残渣からのバイオエタノールの場合には 0.75-0.99 €/L³⁾（89～117 円/L）、などの報告例が

ある。セルロース系バイオエタノールは、ガソリンと比べて価格競争力がないとされているが、その理由として、酵素価格とプラントの建設コストが高いことがあげられ、セルラーゼ価格は全生産コストの40-55%を占めるとの報告³⁾もある。しかし、酵素コストについては文献により様々な値が報告されているのが現状である。これは、酵素をオンサイトで生産するか購入により供給するかなど、前提条件の違いに起因している。米国では、セルラーゼ生産コストについて将来的には0.1-0.5\$/gal (= 0.02-0.13\$/L) (1.8 ~ 11.4 円/L) 程度になるとの報告例が存在する。例えば、Seabraら⁴⁾は、2005年における酵素生産コストは1\$/gal (110 円/gal, 29 円/L) なのに対し、企業の積極的な投資や政府の研究費の投入により、2010年では0.5\$/gal (44 円/gal, 12 円/L) になるとしている²⁾。一方、欧州の報告事例ではセルラーゼコストだけで0.51 €/L (60 円/L) などの報告があり³⁾、酵素コストは文献によって大きな幅が見られる。各種報告におけるバイオエタノール製造における酵素コストの試算結果を、表1²¹⁾²⁾にまとめた。

一方、Wingren et al.¹³⁾は、木質系バイオエタノール製造プロセスにおいて、Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) と Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF) のコストを0.57 (\$/L) (66 円/L) および0.63 (\$/L) (73 円/L) とそれぞれ算出している。両者の間でトータルコストに差が出た原因として、SSF プロセスにおけるプラント建設コストの減少と、エタノール収率の向上が挙げられている。バイオエタノールの製造コスト低減のためには、酵素コストの削減に加え、プロセスの簡略化や、エタノール変換効率を向上させるための技術開発の促進が期待される。

b) エタノール製造に伴う環境負荷

セルロース系バイオエタノール製造プロセスの環境負荷の評価にLCA手法が広く用いられている。セルロース系バイオエタノールは、エネルギー安全保障の観点や、温室効果ガス (Green House Gases (GHG)) の削減に効果的であるという報告¹⁴⁾²⁰⁾がある一方で、化石燃料と比べてGHGを多く排出するといった報告²¹⁾もあり、その評価が分かれている。ガソリンと比較したGHG排出削減効果については、コーンストーバーで65%²²⁾、スイッチグラス (*Panicum virgatum* L.) で94%²³⁾、などの報告があるが、製品 (エタノール) と副産物への環境負荷の配分方法 (アロケーション法) の違いによって数字が変動することに注意が必要である。稲わらのように農業廃棄物としての扱いが可能な場合は、稲わらの生産に係わる環境負荷を考慮せず、玄米にすべての環境負荷を配分することもできるが、原料バイオマスがエタノールの製造を目的に生産される資源作物等の場合は、作物生産に係わる環境負荷をバイオエタノールに配分することになる。

ところで、GHG削減効果がある場合であっても、一酸化炭素 (CO)、窒素酸化物 (NO_x)、硫黄酸化物 (SO_x) の排出量が増加するなど環境に対して負の影響

表 1 異なる供給原料のバイオエタノール製造コストに関する文献の概要

著者	原料と供給量, コストおよび収率		2 酵素使用量	酵素コスト (\$/L)	エタノール製造コスト (\$/L)						備考
	原料と供給量 (t/d)	コスト (\$/t)			収率 (L/t)	1999	2000	2002	2005	2010	
1Wooley et al., 1999 ²⁸	*CS, 2000	25.0	257.38-355.79	15-20 FPU	0.079	0.380	-	0.248	0.217	-	酵素コストを 1/10 にする必要がある (1997 年ドル価格基準)。
McAlloon et al., 2000 ²⁹	*CS, 1050	35.0	272.52	-	0.050	0.396	-	-	-	-	酵素生産工程に関して若干の情報が見られている (1999 年ドル価格基準)
1Aden et al., 2002 ³⁰	*CS, 2000	30.0	272.52-339.51	12-17 FPU	0.026	-	0.346	-	0.283	-	酵素は外部より購入 (2000 年ドル価格基準)
1Aden et al., 2008 ³¹	*CS, 2000	60.0-46.0	257.38	-	0.085-0.026	-	1.110	0.666	-	0.351	酵素コストは想定値 (2002 年ドル価格基準)
1Dutta et al., 2010 ⁴	*CS, 2000	60.1	-	30-40 mg protein	0.085	-	-	-	0.801	-	酵素コストは想定値 (2007 年ドル価格基準)
1Eggeman et al., 2005 ³²	CS, 2000	35	-	15 FPU	0.039	-	-	0.262-0.441	-	-	酵素コストは想定値
Reith et al., 2002 ⁵	1VG, 2000	20 ^e	152.49	-	0.510 ^e	-	0.920 ^e	-	-	-	酵素コストは想定値
Orikasa et al., 2009 ³³	*RS, 200	15000 ^y	250.0	-	-	-	-	-	-	-	酵素コストは想定値
3Barta et al., 2010 ^{33,34}	スプルス, 200000 ^z	68.15	254.0-270.0	10 FPU	0.058-0.073	-	-	-	0.548-0.722	-	酵素コストは想定値

CS: コーンストローバー; RS: 稲わら; VG: 雑草; FPU: filter paper unit (ろ紙分解活性); 1 プラント耐用年数: 20 年; 2 per g-cellulose; * 希酸前処理; L ライム前処理; 3 プラント耐用年数 15 年; e: ユーロコスト; a 年換算

が増加する可能性も示唆されており²⁴⁾、GHG以外の項目も考慮して、バイオエタノール製造プロセスの環境負荷について評価することが期待される。

一方、Koga and Tajima²⁵⁾は、稲わらをバイオエタノールの原料として水田から持ち出した場合、水田から発生するメタン(CH₄)が大幅に減少する可能性を指摘している。CH₄は、地球温暖化係数(Global Warming Potential, GWP)が23²⁶⁾であり、その排出が削減されると、GHG排出量削減効果は非常に大きい(バイオマス輸送のための燃料消費量は比較的小さく¹⁰⁾、バイオマスの移動を考慮してもGHG削減効果は大きく減じない)。このように、バイオエタノール製造とは直接関係しない間接的な影響も含め、バイオエタノール製造の環境への影響について検討することが重要であると思われる。

2.2 我が国における報告事例

我が国におけるセルロース系バイオエタノール製造のLCAに関する報告事例は、諸外国と比較して極めて少ない。これは、バイオエタノール製造が商業的に実施されていないことが主因と思われる。その中で、濃硫酸加水分解法による報告事例が数例^{10, 27, 28)}存在する。これらの報告における製造プロセスに関する環境負荷因子とその量(インベントリ)は、NEDO報告書²⁸⁾を基に解析されており、酵素糖化法との単純な比較は困難であるが、バイオエタノール製造コストは55円/ℓ～124円/ℓとなっている。これらの解析のいずれにも共通するのが、原料コストが製造コストの大部分を占めるということである。例えば、折笠らの報告¹⁰⁾では、124円のうち原料コストが69.8円(全体の73%)となっており、コスト削減のためには原料価格を下げる取り組みや、原料投入量を大幅に減らす技術開発、すなわち、変換効率の向上を集中的に進める事の必要性について言及されている。また、CO₂排出量削減の観点からは、リグニンなどの残渣をボイラーの熱源として利用してエネルギー回収する必要があるとしており、もし、エネルギー回収がない場合は、大幅なCO₂削減効果が見込めないと報告されている。残渣の有効利用だけでなく、通常の熱源にバイオマスペレットを使用するなど、外部から投入されるエネルギーをカーボンニュートラルな資源であるバイオ燃料により賄うプロセスを想定し、最適なプロセスを検討する必要があると考えられる。ただし、その場合も、間伐材や廃木材といった原料自体はカーボンニュートラルであったとしても、原料の運搬、細断・粉碎、ペレット加工、ペレットの貯蔵・輸送などのプロセスでのCO₂排出量を考慮する必要がある。佐賀ら^{30, 31)}は、CO₂の削減効果について、副産物の利用はセルロース系バイオエタノール製造プロセスにおいてCO₂削減のための必要条件であり、最も効果的な副産物利用方法を検討する必要があるとしている。

これらの報告では、バイオエタノール単独でのCO₂削減効果を期待するのは厳しいとしており、ガス化発電、他産業からの廃熱利用、飼料・肥料化も含め、

副産物の利用を加味してバイオエタノール製造プロセスの最適化を検討する必要があると考えられる。また、既存の報告は濃硫酸加水分解法の解析が多いことも問題である。バイオエタノール変換技術開発の主流である、酵素加水分解法によるプロセスの評価を、早急かつ着実に実施していく必要がある。

3. プロジェクト研究における解析対象および目標

本特集の最初に解説されているように、Calcium Capturing by Carbonation（以下、CaCCO法）³²⁾ や Direct Saccharification of Culum（以下、DiSC法）³³⁾ など、高効率なバイオエタノール変換技術の確立に向けた研究開発が進んでいる。また、本プロジェクトにおいてはコスト目標も明確に定められており、原料の生産から廃液処理工程までを含めて100円/L程度と、低コストでバイオエタノールを製造する技術開発が求められている。一方、世界各国でバイオ燃料の二酸化炭素（CO₂）削減率に関して基準を策定する動きが進みつつあり、我が国においても「バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会」において、バイオ燃料のCO₂削減率として50%を一つの方向性と報告している。このような現状を受けて、新たな変換技術を用いたバイオエタノール製造プロセス全体のCO₂排出量がバイオエタノールのCO₂削減基準に合致するかについて評価する必要性が高まっている。

4. 23年度までの解析結果の概要

DiSC法や常温CaCCO（RT-CaCCO）法からバイオエタノールを生産した場合のコストおよびCO₂排出量について解析を行った。コストについては、DiSC法およびRT-CaCCO法で、それぞれ109円/Lおよび144円/Lと試算された³⁴⁾（図

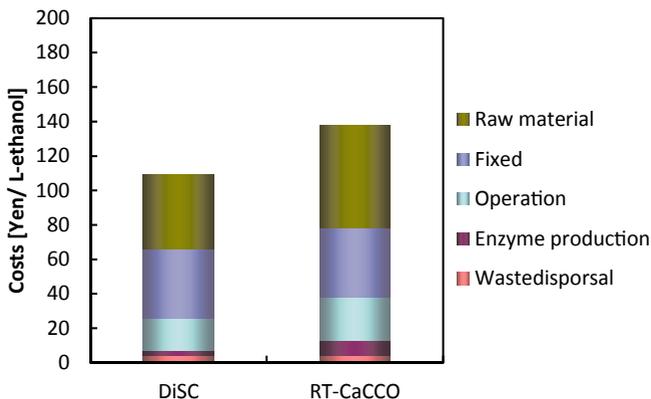


図1 バイオエタノールの生産コスト内訳

1)。原料費と固定費の占める割合が最も大きいことから、変換効率の向上による原料コスト削減およびプロセスの簡略化による設備コスト低減を検討する必要があることを提言した。エタノール製造工程では、各種前処理工程および酵素生産工程におけるコスト負荷が大きいことが定量的に示された。

一方、RT-CaCCO法を基本としてコスト、CO₂排出量の縮減に寄与できると考えられる改善オプションを含むシナリオを設定した³⁵⁾。改善オプションとしては、①発酵・蒸留過程の効率化（減圧発酵&蒸留）、②年間施設稼働日数の増大（300日から350日）、③再生可能エネルギー推進施策の導入（バイオマスコストの低減）を設定した。シナリオごとでは、S1は基本ケース、S2では①と②、S3では、①、②、③の改善オプションを採用した。設定したシナリオの概要については表2に示した。その結果、コストについては基本ケースのS1に対して、改善ケースのS2およびS3で、それぞれ5.0%および35.6%、低減することが分かった（図2）。また、CO₂排出量については、基本ケースのS1に対して、改善

表2 新技術・新施策導入を想定したシナリオ設定

S1：基本ケース	通常の発酵と蒸留
S2：革新ケース	減圧発酵&蒸留
S3：将来ケース	減圧発酵&蒸留，再生可能エネルギー推進試作導入

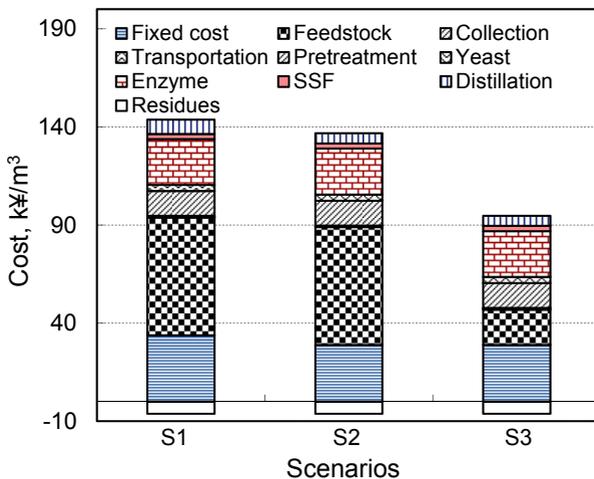


図2 RT-CaCCO法を基本としたシナリオベースのコスト解析

ケースの S2, S3 では 3.4% 低減することが分かった (図 3)。また, 酵素単価が全体コストに及ぼす影響を調べ, いずれのシナリオにおいても影響度が大きく, 酵素コストの低減がエタノール生産における今後の大きな課題であることを示した (図 4)。酵素コスト低減のためには, 低コスト生産技術の開発に加えて, 酵

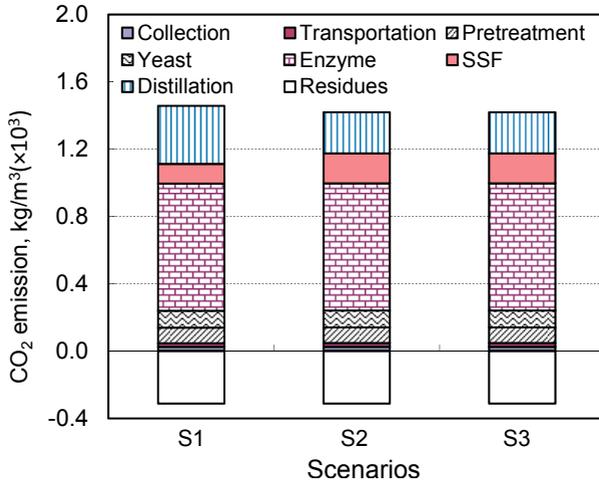


図 3 RT-CaCCO 法を基本としたシナリオベースの CO₂ 排出量解析

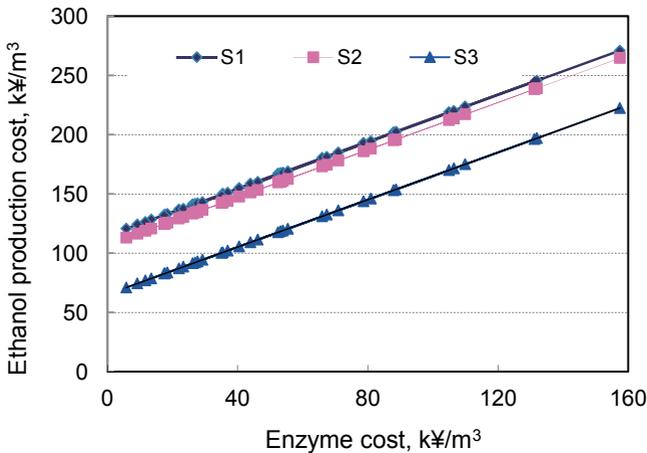


図 4 RT-CaCCO 法を基本としたシナリオベースのコスト解析
(酵素単価の影響)

素の再利用技術の開発も重要であるといえる。

原料生産部分がバイオエタノール生産プロセス全体のCO₂排出量に及ぼす影響を評価するため、RT-CaCCO法およびDiSC法による稲わらからのバイオエタノール生産について、原料生産工程のCO₂排出量を経済価値に基づいて玄米と稲わらへ配分し、原料バイオマス生産工程の影響も加味したライフサイクルCO₂(LC-CO₂)解析を行った³⁶⁾。その結果、水管理変化のない条件で生産されたバイオエタノールのCO₂排出量は、ガソリンのCO₂排出量(81.7g-CO₂/MJ)に対してRT-CaCCO法およびDiSC法でそれぞれ48 g-CO₂/MJおよび33g-CO₂/MJであり、バイオエタノール導入に伴うCO₂削減率は、RT-CaCCO法およびDiSC法でそれぞれ41%および59%と試算された(図5)。水管理変化がある条件においても、RT-CaCCO法およびDiSC法のCO₂削減率は、それぞれ32%および52%程度と期待される(図5)。稲わらの水田外への持ち出しにより、稲わらからの肥料成分供給が無くなることに伴う投入窒素肥料の増分を考慮しても、メタンガス起因のCO₂発生量が4.5~6.1g-CO₂/MJ程度低減する効果が期待される。CO₂削減目標の視点からは、既存の水田が多い地域ではコシヒカリなどの稲わらを用いてRT-CaCCO法によりバイオエタノールを製造し、休耕田などが多い地域ではリーフスター由来稲わらを用いてDiSC法によりバイオエタノールを製造することが効果的と考えられる。地域の置かれた状況に応じてRT-CaCCO法とDiSC法を使い分けることにより、効果的にCO₂を削減できるバイオエタノールの製造が可能になると期待される。

5. おわりに

バイオ燃料の持続可能性に関しては、Global Bioenergy Partnership (GBEP)において検討が進められ、2011年に持続可能性指標(The Global Bioenergy

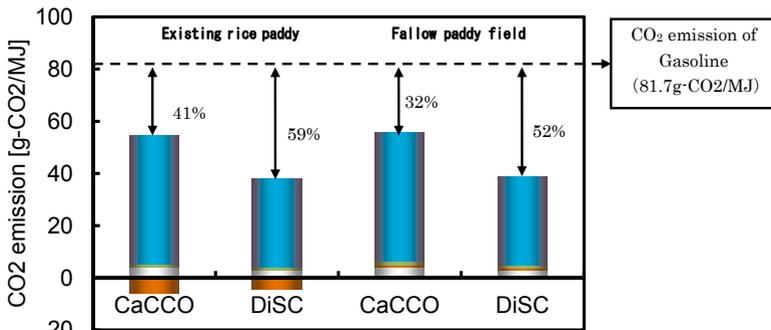


図5 CaCCO法およびDiSC法におけるCO₂排出量の比較
(原料栽培～原料収集～燃料製造)

Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy)が公表されている³⁷⁾。一方、前述のように、わが国においてはバイオ燃料の持続可能性指標として温室効果ガス50%削減が一つの方向性として示されているが、これはEUにおける同様の検討に基づいて定められた「再生可能エネルギー指令」³⁸⁾、等を参考に設定されたものである³⁹⁾。

すなわち、環境負荷が小さそうだというイメージに頼ったバイオエタノール生産の事業化は世界的に許されず、環境（環境負荷）、経済（コスト）の視点での厳しい評価が求められる。一方で、発展途上国やBRICsにおける農業・農村振興、あるいは先進国であっても景観保護、地域振興などの社会の持続性を重視して、環境・経済の効能が大きくない場合であっても、バイオエタノール生産を実施するという選択もあり得る。

このような、複数基準を用いた評価の一般化は困難で個別の案件ごとの意志決定が必要であると考えられるが⁴⁰⁾、環境・経済・社会のトリプルボトムラインという視点に立った各側面の評価を正確に実施し、その結果を意思決定者や社会に正確に伝達することが重要であると考えている。

（農研機構食品総合研究所 椎名 武夫・
岩手大学農学部農学生命課程 折笠 貴寛）

引用文献

- 1) Roy, P., Tokuyasu, K., Orikasa, T., Nakamura, N., and Shiina, T. (2012). A review of life cycle assessment (LCA) of bioethanol from lignocellulosic biomass, *Japan Agricultural Research Quarterly* **46**, 41-57.
- 2) Dutta, A., Dowe, N., Ibsen, K. N., Schell, D. J., and Aden, A. (2010). An economic comparison of different fermentation configurations to convert corn stover to ethanol using *Z. mobilis* and *Saccharomyces*. *Biotechnol. Prog.* **26**, 64-72.
- 3) Reith, J.H., Uil, H.D., Veen, H.V, Laat, W.T.A.M.D, Niessen, J.J., Jong, E.D., Elbersen, H.W., Weusthuis, R., Dijken, J.P.V., and Raamsdonk, L. (2002). Co-production of bio-ethanol, electricity and heat from biomass residues. The 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Amsterdam, The Netherlands, June 17-21.
- 4) Seabra, J.E.A., Tao, L., Chum, H.L., and Macedo, I.C. (2010). A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. *Biomass and Bioenergy*, **34**, 1065-1078.

- 5) Wooley, R., Ruth, M., Sheehan, J., and Ibsen, K. (1999). Lignocellulosic biomass to ethanol—process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis—current and futuristic scenarios, Report No. TP-580-26157. National Renewable Energy Laboratory. Golden Colorado USA.
- 6) McAloon, A., Taylor, F., and Yee, W. (2000). Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, NREL/TP-580-28893.
- 7) Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., and Wallace, B. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, Report No. NREL/TP-510-32438, <<http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/32438.pdf>>.
- 8) Aden, A., (2008). Biochemical Production of Ethanol from Corn Stover: State of technology model. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, Report No. NREL/TP-510-43205, < <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43205.pdf>>.
- 9) Eggeman, T. and Elander, R. (2005). Process and economic analysis of pretreatment technologies. *Bioresour. Technol.* **96**, 2019–2025.
- 10) 折笠貴寛・徳安健・井上貴至・小島浩司・ロイ ポリトシユ・中村宣貴・椎名武夫 (2009), 稲わら由来のバイオエタノール生産におけるエタノール変換効率の違いがコスト, CO2 排出およびエネルギー収支に及ぼす影響, 農業機械学会誌 **71**(5), 45-53.
- 11) Barta, Z., Reczey, k., and Zacchi, G. (2010a). Techno-economic evaluation of stillage treatment with anaerobic digestion in a softwood-to-ethanol process. *Biotechnol. Biofuels* **3**: 21.
- 12) Barta, Z., Kovacs, K., Reczey, K., and Zacchi, G. (2010b). Process design and economics of on-site cellulase production on various carbon sources in a softwood-based ethanol plant. *Enzyme Research*, Article ID734182.
- 13) Wingren, A., Galbe M., and Zacchi, G. (2003). Techno-economic evaluation of producing ethanol from softwood: comparison of SSF and SHF and identification of bottlenecks. *Biotechnol. Prog.* **19**, 1109–1117.
- 14) Spatari, S., Zhang, Y., and MacLean, H. L. (2005). Life cycle assessment of switchgrass- and corn stover-derived ethanol-fueled automobiles. *Environ. Sci. Technol.* **39**, 9750–9758.
- 15) Williams, P.R.D., Inman, D., Aden, A., and Heath, G.A. (2009). Environmental and sustainability factors associated with next-generation biofuels in the

- US: what do we really know. *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 4763–4775.
- 16) Mabee, W.E., and Saddler, J.N. (2010). Bioethanol from lignocellulosics: Status and perspectives in Canada. *Bioresour. Technol.* **101**, 4806–4813.
 - 17) Wyman, C. E. (1994). Ethanol from lignocellulosic biomass: technology, economics, and opportunities. *Bioresour. Technol.* **50**, 3–15.
 - 18) Fleming, J.S., Habibi, S., and MacLean, H.L. (2006). Investigating the sustainability of lignocellulose-derived fuels for light-duty vehicles. *Transport. Res. Part D: Transport and Environ.* **11**, 146–159.
 - 19) González-García, S., Luo, L., Moreiraa, M.T., Feijoo, G., and Huppes, G. (2009). Life cycle assessment of flax shives derived second generation ethanol fueled automobiles in Spain. *Renew. Sustain. Revs.*, **13**, 1922–1933.
 - 20) Vliet, V.O.P.R., Faaij, A.P.C. and Turkenburg, W.C. (2009). Fischer-Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: a carbon, energy flow and cost analysis. *Energy Con. Manag.* **50**, 855–876.
 - 21) Fu, G., Chan, A., and Minns, D. (2003). Life cycle assessment of bio-ethanol derived from cellulose. *Int. J. Life Cycle Assess.* **8**, 137–141.
 - 22) Spatari, S., Zhang, Y., and MacLean, H. L. (2005). Life cycle assessment of switchgrass- and corn stover-derived ethanol-fueled automobiles. *Environ. Sci. Technol.* **39**, 9750–9758.
 - 23) Schmer, M.R., Vogel, K.P., Mitchell, R.B., and Perrin, R.K. (2008). Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* **105**, 464–469.
 - 24) Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Walsh, M., and Nelson, R. (2003). Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. *J. Ind. Ecol.* **7**, 117–146.
 - 25) Koga, N. and Tajima, R. (2011). Assessing energy efficiencies and greenhouse gas emissions under bioethanol-oriented paddy rice production in northern Japan. *J. Environ. Manag.* **92**, 967–973.
 - 26) 伊坪徳宏 (2007), 第4章・ライフサイクル影響評価「LCA 概論 (稲葉敦, 青木良輔監修), pp.127」, 丸善, 東京
 - 27) 朝野賢司・美濃輪智郎 (2007), 日本におけるバイオエタノールの生産コストとCO2削減コスト分析, 日本エネルギー学会誌, **86**, 957-963.
 - 28) 楊翠芬・玄地裕・匂坂正幸 (2011), 耕作放棄地利用を考慮したバイオエタノール生産プロセスのコスト・環境負荷の評価, 日本LCA学会誌, **7(3)**, 281-291.
 - 29) NEDO (2006), バイオマスエネルギー高効率転換技術開発／セルロース系バイオマスを原料とする新規なエタノール醗酵技術等により燃料用エタノール

- ルを製造する技術の開発 平成 13 年度～平成 17 年度成果報告書, 149-232.
- 30) 佐賀清崇・横山伸也・芋生憲司 (2008), 稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析, エネルギー・資源学会論文誌, **29**(1), 30-35.
 - 31) 佐賀清崇・藤本真司・柳田高志・多田千佳・ベスピャトコ リユドミラ ユリイブナ・バティスタ エルマー, 美濃輪智郎 (2009), 前処理・糖化法の違いを考慮したセルロース系バイオエタノール製造プロセスの比較評価, エネルギー・資源学会論文誌, **30**(2), 9-14.
 - 32) Shiroma, R., Park, J-Y., Al-Haq, M.I., Arakane, M., Ike, M., and Tokuyasu K. (2011). RT-CaCCO process: an improved CaCCO process for rice straw by its incorporation with a step of lime pretreatment at room temperature. *Bioresourse Technology* **102**, 2943-2949.
 - 33) Park, J-Y., Ike, M., Arakane, M., Shiroma, R., Li, Y., Arai-Sanoh, Y., Kondo, M., and Tokuyasu, K. (2011). DiSC (direct saccharification of culms) process for bioethanol production from rice straw, *Bioresour. Technol.* **102**, 6502-6507.
 - 34) Orikasa, T., Tokuyasu, K., Park, J-Y., Kondo, M., Sanoh, Y., Inoue, T., Kojima, K., Yano, T., Roy, P., Nakamura, N., and Shiina, T. (2010). Soft-carbohydrate-rich rice straw: a potential raw material for bio-ethanol, *Proceedings of the 9th International Conference on Eco Balance*, 542-544.
 - 35) Roy, P., Orikasa, T., Tokuyasu, K., Nakamura, N., and Shiina, T. (2012). A techno-economic and environmental evaluation of the life cycle of bioethanol produced from rice straw by RT-CaCCO process, *Biomass and Bioenergy* **37**, 188-195.
 - 36) 折笠貴寛・徳安健・ロイ ポリトシュ・井上貴至・小島浩司・中村宣貴・矢野歳和・椎名武夫 (2011), 稲わらからの CaCCO 法および DiSC 法によるバイオエタノール生産の LC-CO₂ 評価, 第 70 回農業機械学会年次大会講演要旨集, 294-295.
 - 37) Global Bioenergy Partnership (2011). The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy, GBEP ホームページ, 入手先 < <http://www.globalbioenergy.org/programmeofwork/task-force-on-sustainability/gbep-report-on-sustainability-indicators-for-bioenergy/en/>> (2012 年 11 月 30 日参照)
 - 38) Europe Commission (2008). EU Directive 2009/28/EC, , EU ホームページ, 入手先 < http://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/sustainability_criteria_en.htm> (2012 年 11 月 30 日参照)
 - 39) 椎名武夫・折笠貴寛・井上貴至・小島浩司 (2009): バイオ燃料の持続可能性基準, 農産物流通技術 2009, 農産物流通技術研究会編, 75-79

- 40) 林清忠 (2012) : 複数の意思決定者が複数の基準を用いて選択することの意味ーバイオマスを活用した持続可能な社会形成のためにー, 日本 LCA 学会誌, **8**(4), 349-355