

アジア地域における農業残渣からの エタノール生産に関する研究

2010年3月

矢 野 伸 一

目 次

第 1 章 序論	3
1.1 燃料エタノール使用の背景と問題点 -----	4
1.2 アジア地域における燃料エタノールの現状-----	5
1.3 リグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産技術-----	6
1.4 研究の目的・目標-----	12
 第 2 章 アジア地域における農業残渣からのエタノール生産 ポテンシャルの推計	 13
2.1 背景と目的-----	14
2.2 中国、インド、ASEAN 地域における、稲わら、バガス、E F B からの エタノール生産ポテンシャルの推計-----	15
2.3 中国で野焼きされる穀物わらからのエタノール生産ポテンシャルの推計 -----	39
2.4 まとめ -----	44
 第 3 章 オイルパーム栽培地域における農業残渣からのエタノール 生産可能性の検討	 45
3.1 背景と目的-----	46
3.2 オイルパーム産業で発生する農業残渣-----	47
3.3 マレーシアにおける生産可能性の検討-----	49
3.4 インドネシアにおける生産可能性の検討-----	58
3.5 オイルパーム幹に含まれる糖類からのエタノール生産について-----	60
3.6 まとめ-----	61
 第 4 章 他のアジア諸国および実用化についての検討	 62
4.1 他のアジア諸国についての検討-----	63
4.2 稲わらの収集と野焼きについて -----	67
4.3 他の資源の利用-----	68

4.4	GHG 排出量削減効果-----	70
4.5	オンサイト酵素生産を中心とするコスト低減に対する検討-----	71
4.6	まとめと展望-----	76
 第 5 章 結論		77
5.1	結論-----	78
5.2	結語 -----	79
 本研究についての発表論文-----		80
 引用文献-----		81
 謝辞-----		94

第1章 序論

1.1 燃料エタノール使用の背景と問題点-----	4
1.2 アジア地域における燃料エタノールの現状-----	5
1.3 リグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産技術-----	6
1.4 研究の目的・目標-----	12

第1章 序論

1.1 燃料エタノール使用の背景と問題点

バイオマスは植物が大気中の二酸化炭素を固定したものに由来し、再生可能で化石資源のような有限性の問題は無い。また燃焼しても二酸化炭素量を増加させないため、バイオマス由来燃料で化石燃料を代替できれば、化石資源の節約になるだけでなく、温室効果ガス（GHG）排出量削減により地球温暖化対策としての効果も期待できる。このため、バイオマス由来のバイオ燃料、特に自動車等に使用する液体燃料を代替できる燃料が注目されている。その中でエタノールはオクタン価が高くガソリン代替燃料として使用可能なため、既に世界の多くの国で燃料用の生産が行われている。特に米国とブラジルがエタノールの二大生産国で、両国で世界のエタノールの70%程度を生産している。現在のエタノール原料は米国ではトウモロコシのデンプン、ブラジルではサトウキビのショ糖と、これらの農業大国での主要農産物が使用されており、農業政策としての意味も大きい。

しかしこれらの作物は、本来は食料用または飼料用の目的で栽培されてきたものであり、エタノール需要の増大に伴い、資源の食用との競合の問題が生じてくる。2006年から2008年にかけて起きた世界的な穀物価格の急騰には様々な要因が考えられるが、米国でのエタノール原料向けトウモロコシ需要の急増もその一因と考えられている（樋口、2008）。世界の人口が増加を続けていること、アジア地域などの経済成長による肉類の消費拡大に伴う穀物需要の増大、気候変動や水資源の制約等により農業生産が不安定化する可能性などから、食料資源の確保の重要性は今後より一層高まってくるものと予想され、また従来型の原料のままでエタノール生産を拡大するためには、現在食用作物を栽培している耕地をエタノール用に転換する必要に迫られる事態も想定される（Kostka et al., 2009）。

このような背景から、今後は燃料用エタノールの原料には非食用資源を使用することが望ましく、特に廃木材や農業残渣などの廃棄物系バイオマスを原料に使用できれば、廃棄物処理を兼ねて地域環境にも貢献すると共に、原料コストの低減も期待できる。

1.2 アジアにおける燃料エタノールの現状

中国、インド、東南アジア諸国などのアジア諸国は、一般に高率で経済が成長しており、元々人口が多いだけに今後自動車台数が急増し、そのための燃料需要も増大すると考えられる（田辺、2004）。この増大する自動車燃料需要を従来通り石油だけに頼っているのは、資源の不足と価格の騰貴、および地球温暖化の加速等の問題が生じることが予測される。前節で述べたように、エタノールによるガソリン代替はこれらの問題に対する方策の1つとして有効と考えられる（矢野・美濃輪、2007）。京都議定書による温室効果ガス削減目標を課せられているのはアジアでは日本のみであるので、一般にアジア諸国では地球温暖化対策として燃料エタノールを使用するという意識は薄いように感じられるが、自国の農産資源を利用して石油代替を進められるエタノールの利用は、特に石油資源に乏しいインド、タイなどや、エネルギー需要が急増している中国にとっては国益にかなうものである。2008年の推計値で（RFA, 2009）、中国では既に年間190万KL程度の生産があり、米国、ブラジルに次ぐ世界第3位の生産国になっている。またタイが34万KL、インドが25万KLと、アジアではこの3か国で特に多量の燃料用エタノールの生産が行われている。

エタノール原料は、中国では当初トウモロコシのデンプンが使用されていたが、2006年から穀物の不足と価格の高騰が起きたため、穀物を原料とする新規なエタノール工場の建設が禁止されることになった。ただし燃料エタノールの使用自体は引き続き推進する政策がとられており、代替原料としてスィートソルガム、サツマイモ、キャッサバなどの利用が推奨されている（Li and Chan-Halbrendt, 2009）。タイ、インドではサトウキビからの製糖工程で発生する副産物であるモラセス（廃糖蜜）が主要なエタノール原料であり、タイではキャッサバデンプンからの生産も行われている。

アジア諸国は一般に農業部門が経済に占める割合が高く、現状では燃料用に新たな需要を創出することで農業振興として行われている面もあると考えられ、中国でも蓄積した穀物在庫の解消法の1つとしてエタノール生産が開始された経緯がある（阮、2007）。しかし前述のように、穀物が不足する事態になるとエタノール用の利用を抑制する必要に迫られた。このように農業生産が豊富なアジア地域においても、農産資源に対する食用と燃料用の競合が今後さらに顕在化してくる可能性がある。アジア諸国は人口が多く、今後も一般に人口増加が続くと予想されており、食料の確保は極めて重要な問題である。そのため非食用資源をエタノール原料に使用する事が望まれて

いる。その場合、木質バイオマスもその候補になり得るが、木質はリグニン含量が高くエタノール発酵の直接の原料となる単糖への分解が難しい。そのためより構造が柔らかく、資源量も多い、稲わらなどの農業残渣からのエタノール生産が特に期待されている。

1.3 リグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産技術

エタノールの製造方法には、エチレンの水和による合成法と、糖を発酵させて生産する発酵法があるが、エチレンは石油または天然ガスを原料とするため、合成法で生産されたエタノールを燃料に使用することは意味が無い。

発酵法の技術は基本的に酒造と同じであり、酵母を用いて糖をエタノールに変換する。しかし酒造も含めて通常エタノール生産に使用される酵母 *Saccharomyces cerevisiae* は、利用できる糖がグルコース、フルクトース、スクロースなどの一部の単糖、二糖に限られる。そのため、スクロースが含まれるサトウキビのジュースや砂糖を回収した残液であるモラセスの場合は、酵母を加えてそのまま発酵させることができるが、デンプンやセルロースなどの高分子を原料にする場合は、これらが発酵可能な糖にまで分解する必要がある。デンプンの分解は、ビール製造では麦芽の、日本酒などの場合では麴の、それぞれ分解酵素（アミラーゼ）を用いて行われているが、燃料用エタノールの生産では市販のアミラーゼが使用される。デンプンは分解性が良く、酵素のコストも低いので、既にトウモロコシやキャッサバなどのデンプンを原料にしたエタノール生産が大規模に行われている。

一方、農業残渣などのバイオマスはセルロース、ヘミセルロース、リグニンの3成分を主要構成要素とする物質であり、そのためリグノセルロース系バイオマスと呼ばれるが、そのエタノール原料としての利用にはまだ克服すべき技術課題が存在する（矢野、2008）。まず主成分であるセルロースは結晶構造を持つ強固な構造の物質であり、同じグルコースのポリマーであるデンプンに比較して分解が難しい。セルロースの分解には酸などで化学的に分解する方法と、セルロース分解酵素（セルラーゼ）によって分解する方法がある。現時点では酵素コストが高いことから酸分解法の方が現実的な選択と考えられるが、酸分解法には、糖の過分解による糖収率の低下と発酵阻害物質の生成、装置に高価な耐酸性材料を使用する必要性、廃酸の回収・処理の必要性、などの問題が存在する。これらの問題は、酸を使用する以上本質的に不可避と考

えられ、そのため今後コストを大幅に削減することは困難と予想される。一方酵素については、今後の技術開発によりコストが低減される可能性があるため、研究開発としては世界的に酵素法を対象にするものが主流になっている。

しかしリグノセルロース系バイオマスでは、セルロースがリグニン、ヘミセルロースによって保護されていることとセルロースそのものの酵素との反応性が低いことから、酵素を直接加えても、ほとんど分解は起きない。そのためリグニンなどの保護を外し、またセルロースの反応性を高めるために、酵素処理の前に適切な前処理を行うことが不可欠である。

リグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産のスキームを Fig. 1.1 に示す。

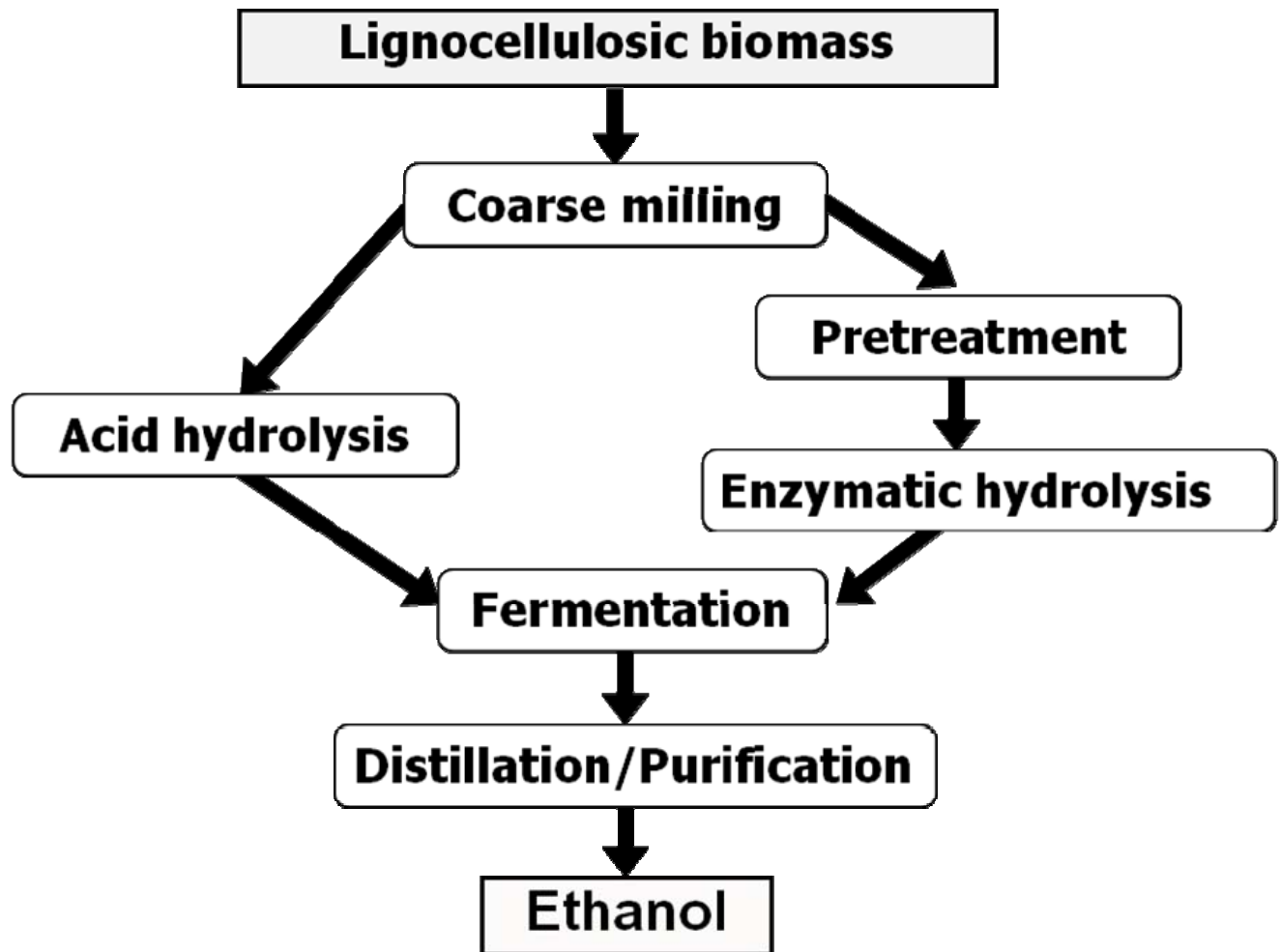


Fig. 1.1 Ethanol production scheme from lignocellulosic biomass with either acid hydrolysis or enzymatic hydrolysis.

前処理には様々な原理による多様な方法が研究されており (Sun and Cheng, 2002; Mosier et al., 2005; Wyman et al., 2005)、この中には前処理として酸を使用する方法もあるが、酸を使用すると酸分解で述べたような問題が生じてくる。アルカリを用いる方法はクラフトパルプ法による製紙と同じ原理であるが、廃液処理の必要に加えて、ヘミセルロース由来の糖が分解し易いという問題がある。

酸やアルカリを用いない方法としては、原料を物理的に微小粒子にまで粉砕する微粉砕処理法 (遠藤ら、2008)、水だけで高温、高圧処理を行う水熱処理法 (坂木・矢野、2006)、エタノールなどの有機溶媒で処理するオルガノソルブ法 (Arato et al., 2005) などが研究されている。特に微粉砕処理法は、少ない酵素量でも高い糖収率が得られ (Inoue et al., 2008)、発酵阻害物質の生成もほとんど起きないため、原理的には非常に優れた前処理技術と考えられるが (澤山ら、2007)、粉砕に消費されるエネルギーが大きいことが課題である。特に燃料用エタノール生産においては、エタノールとして得られるエネルギー以上を製造時に投入するのでは意味が無い。そのためより少ないエネルギーで粉砕処理が行える方法の研究が行われている (Fujimoto et al., 2008; Hiden et al., 2009)。

前処理されたバイオマスは、セルラーゼでの分解が可能になるが、セルラーゼとは単一の酵素ではなく、セルロースの非晶質部分にランダムに切れ目を入れるエンドグルカナーゼ、この切れ目からセロビオース単位で鎖を切っていくエキソグルカナーゼ (セロビオヒドラーゼ)、セロビオース (またはセロオリゴ糖) をグルコースにまで分解する β -グルコシダーゼの3成分から成る混合酵素系であり、これらの成分酵素が協調的に作用することで効率的な糖化が行われる (Fig. 1.2)。

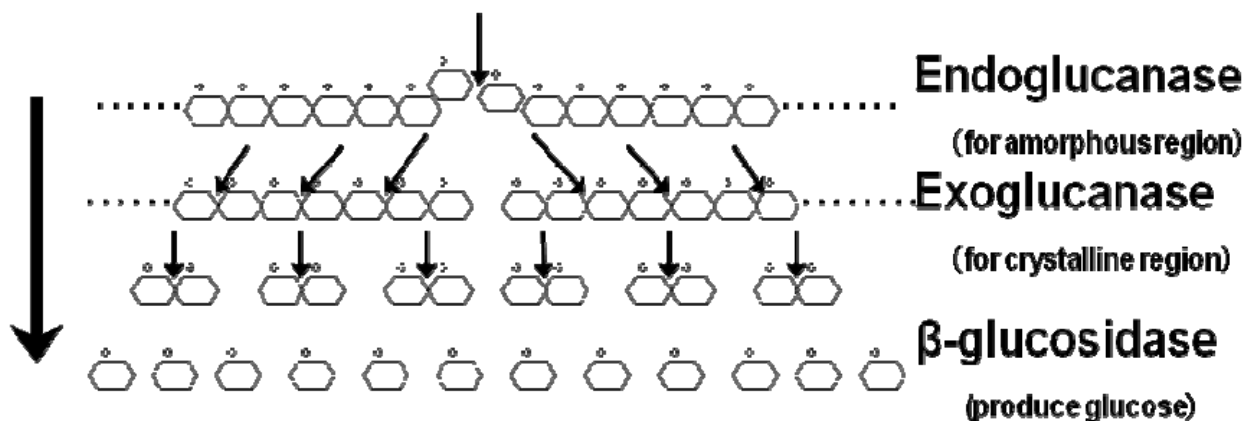


Fig. 1.2 Scheme of cellulose hydrolysis with three kinds of component enzymes in cellulase complex

セルラーゼは既に繊維、食品の処理等で工業的な使用が行われているが、今までの用途ではセルロースをグルコースまで完全に分解することは求められていなかった。

(完全に分解したら繊維が無くなってしまう。) そのため、現在一般的に使用されている *Trichoderma* 属の糸状菌から生産されるセルラーゼでは β -グルコシダーゼの活性はあまり高くないが、特に問題にはなっていないかった。しかし *S. cerevisiae* はセロビオースを利用できないためグルコースまで分解する必要があることから、エタノール生産を目的とする場合、 β -グルコシダーゼ活性が高いセルラーゼが要求される。この点、旧工業技術院微生物工業技術研究所（現独立行政法人産業技術総合研究所）の研究者によって 1982 年に日本の土壌から分離された糸状菌 *Acremonium cellulolyticus* が生産するセルラーゼ（Yamanobe et al., 1987）は、*Trichoderma* 属の菌が生産する酵素に比べて β -グルコシダーゼの活性が高いために、エタノール生産用に適したセルラーゼであると考えられる。

一方、ヘミセルロースにも糖が含まれているため、これも糖化して発酵原料にすることで、エタノール収量を増加させることができる。酸を用いる前処理や水熱処理などではヘミセルロースは容易に分解されて可溶化するが、オリゴ糖が残る場合が多い。また微粉碎処理ではヘミセルロースの分解は起こらない。このため、ヘミセルロースも酵素（ヘミセルラーゼ）によって単糖まで分解する必要がある。セルラーゼには通常ヘミセルロースを分解する各種酵素も含まれているので、セルラーゼ処理でヘミセルロースの糖化も行われるが、糖化効率を上げるためには別途ヘミセルラーゼを添加

することが有効な場合がある。その際注意する必要があるのは、原料バイオマスの種類によってヘミセルロースの構造が異なることである。すなわち、広葉樹、草本ではヘミセルロースの主構成要素はキシランであるのに対し、針葉樹ではマンナンであるので、対応する分解酵素の活性が高いヘミセルラーゼを選択する必要がある、農業残渣に対してはキシラン分解能が高い酵素が必要である。また、ヘミセルロースにはアセチル基やメチルグルクロン酸などの糖以外の側鎖があり、これらの結合を切る酵素の活性も必要である。

またセルロースを分解して得られるグルコースは *S. cerevisiae* で容易に発酵できるのに対し、キシランの分解で得られるキシロースは炭素 5 個から成る糖で、*S. cerevisiae* は利用することができない。キシロースを実用レベルで効率良くエタノールに変換できる微生物は未だ自然界からは見つかっていないので、遺伝子組み換え技術により *S. cerevisiae* にキシロースを発酵する能力を付与する研究が世界的に行われており (Hahn-Hägerdal et al, 2007-1)、キシロースのエタノールへの変換が可能になっている。その他、*Zymobacter palmae* (Yanase et al., 2007)、*Corynebacterium glutamicum* (Sakai et al., 2008) などの細菌にキシロース代謝系遺伝子を導入してエタノールを生産させることや、もともとキシロースの代謝能を持つ大腸菌 (*Escherichia coli*) に効率的なエタノール生産経路の酵素遺伝子を導入する (Ohta et al., 1991) など、様々なアプローチでキシロースを効率良くエタノールに変換できる微生物の研究開発が行われている。しかしまだ一般にキシロースからの発酵速度が遅くまたエタノールへの変換効率が低いこと、グルコースが共存するとグルコースが消費された後にしかキシロースが利用されない傾向があること、酵母の場合では中間代謝物であるキシリトールが蓄積しやすいこと、大腸菌の場合はエタノール耐性が低いためエタノール濃度が上がらないこと、また細菌は酵母より生育至適 pH が高く雑菌汚染を受けやすいこと、などまだ解決すべき技術的課題が残っている。さらにこれらの開発された微生物は遺伝子組み換え生物であるため各種の規制を受けるという問題もあり、現時点では実用的な技術としてはまだ確立していないと判断される。

1.4 研究の目的・目標

以上のように、アジアにおいて農業残渣からエタノールを生産して、これによりガソリンを代替する事は、資源、地球環境、食料の各面からその実現が期待される技術であり、エタノール生産の技術面のみならず、資源利用やエネルギー政策の観点からの研究も必要と考えられる。

このような背景から本研究は、アジア地域における効率的なバイオマス利活用システムの構築に貢献する事を目的に、資源の利用可能量を推計する資源学的手法および資源からのエタノール生産技術、生産効率を探究する農芸化学的基盤から、農業残渣からの燃料用エタノール生産の可能性を、生産可能ポテンシャルと資源の利用状況を中心にして明らかにすることを目標として行った。

なおアジアとは広義にはユーラシア大陸のヨーロッパ部分を除く部分を中心とする広大な地域を指し、日本もまたアジアの国ではあるが、本研究ではその中で、農業生産が大きく経済の成長が続いている地域として 2004 年度から 2006 年度にかけて日本の大学、研究機関によりバイオマスの資源量、利用技術、環境への影響評価等の総合的な調査（ASEAN バイオマス研究開発総合戦略）が行われた ASEAN 諸国（佐々木、2007-1）を主たる対象とすると共に、ASEAN に隣接し、巨大な人口と農業生産を持ち経済成長が著しい中国、インドの両国についても併せて検討を行った。

第2章 アジア地域における農業残渣からのエタノール生産ポテンシャルの推計

2.1 背景と目的-----	14
2.2 中国、インド、ASEAN 地域における、稲わら、バガス、E F Bからの エタノール生産ポテンシャルの推計-----	15
2.3 中国で野焼きされる穀物わらからのエタノール生産ポテンシャルの推計-----	39
2.4 まとめ-----	44

第2章 アジア地域における農業残渣からのエタノール生産ポテンシャルの推計

2.1 背景と目的

第1章で述べたように、エタノールによるガソリン代替は、石油代替と、地球温暖化対策（GHG 排出量削減）が主要な目的であるが、そのいずれに対しても代替できる量が重要であり、現在のガソリン消費量に対してあまりにも少量しか代替できないのであれば、実質的な意味は大きく低下してしまう。例として、最近注目を集めている電気自動車について考えてみると、確かに1台当たりの二酸化炭素排出量を大幅に削減できる可能性があるが、地球温暖化対策としてはそのような車が大量に普及しなくては効果が現れて来ず、それにはまだ相当な時間を要すると予想される。この点、エタノールなどのバイオ燃料の使用は、現在既に走行している普通の自動車にも適用できるのがメリットであり、燃料の供給ができれば、自動車に対する即効的な地球温暖化対策になり得ると考えられる。そのため、どのくらいの量のエタノールが生産できて、それによりガソリン消費をどの程度を代替し得るかが重要であり、この意味からエタノールの生産ポテンシャルの推計が必要である。

IPCC の報告によれば2004年の世界のエネルギー起源のGHG 排出量に対する運輸部門の寄与は約23%で、その内の74%が道路輸送由来とされている（IPCC、2009）。ガソリンとディーゼル燃料の消費量比を勘案すると、エネルギー起源のGHGの7%程度がガソリン由来ということになる。究極的にはこの全てをエタノールなどの再生可能燃料で代替するのが理想的であるが、エタノールの場合、ガソリン消費量の10%を代替する事が燃料エタノール導入における当面の目標になると考えられる。それは、ガソリンに体積比で10%のエタノールを混合した燃料（E10 燃料と呼ばれる。）であれば、自動車のエンジンは基本的に現在のままでも対応可能であるからである。エタノール濃度が10%を超えると圧縮比の変更など、エンジンの改造を含めた自動車側の大きな変更が必要になってくる。個々の部品についてはE10 対応仕様にする必要がある物もあるが、日本を含めて現在市販されている自動車の多くはE10 に対応可能な仕様になっている。

アジアにおける農業残渣のポテンシャル推計は、稲わら、サトウキビバガス等の個々の1次資源については、多数の報告があるが（Yokoyama et al., 2000; Cuiping et al., 2004; Bhattacharya et al., 2005）、残渣から生産できるエタノールのポテンシャル報告は

極めて少ない。その中では、米国ミシガン州立大学の研究者が発表した論文 (Kim and Dale, 2004)と、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO ほか、2007-1) が 2006 年度にアジアを対象として実施した調査の報告が良く知られている。しかし Kim and Dale の報告では、アジア、アフリカなど大陸別にまとめた推計値しか示されておらず、アジア内の地域や個々の国ごとのポテンシャルを知ることができない。またその推計方法は、残渣に含まれるキシロースを含む全糖量から収率 100%でエタノールが生産できるという前提で行われており、従って理論上可能な最大値を示してはいるが、現実的な値とは考えられない。さらに残渣の利用可能度については、畑作物については残渣の 60%を ground cover として耕地に残す必要があるとしているのに対し、水田ではその必要が無いので稲わらは 100%利用できるとして計算している。そのためコムギ、トウモロコシに比べて、明らかに過剰と考えられるエタノール量がイネからは生産可能としている、という問題も存在する。一方 NEDO の推計は国ごとに綿密な調査を行って得られたデータを基にしているが、やはり資源の全量を利用し、かつキシロースも利用する前提で推定されている点から、まだ現実的な値とは差があるものと考えられる。

そこで本研究では、より現実的なデータ、条件のもとにエタノール生産ポテンシャルの推計を行って、現実的な値の提示を目指すこととした。

2.2 中国、インド、ASEAN 地域における、稲わら、バガス、E F Bからのエタノール生産ポテンシャルの推計

前述の「ASEAN バイオマス研究開発総合戦略」において、ASEAN 地域におけるバイオマス資源では、賦存量の点からイネ、サトウキビ、およびオイルパームから発生する稲わら、バガス、オイルパームの Empty Fruit Bunch (EFB) などの残渣の利用が特に有望である、と報告された (佐々木、2007-2)。本研究ではこれを基に、この 3 種の農業残渣からのエタノール生産ポテンシャルを推計することとした。また ASEAN 諸国に加えて中国、インドも対象とした。なお ASEAN 加盟国の内、シンガポールとブルネイについては、農業生産がほとんど無いので除外した。また東ティモールは地理的に東南アジアに分類され、経済的にも農業中心の国ではあるが、ASEAN には未加盟で農業生産量も小さいので、やはり本推計では対象としなかった。

現実的なポテンシャル推計を行うために、以下の条件を設定して推計を行った。

- ① 1.3 で述べたように、農業残渣からエタノール生産を行う上で現在の最大の技術的課題はセルロースを単糖に分解する（糖化）プロセスに存在する。そこで最も重要な要因となるセルロースの糖化率については、実際に原料ごとの糖化実験を行って、それにより得られた値を使用する。
- ② キシロースのエタノールへの変換は現時点では実地的な大規模生産の技術としてはまだ確立していない（Hahn-Hägerdal, 2007-2）と判断して、キシロースの利用は除外する。
- ③ グルコースからの発酵収率については、過大評価を避けるために、やや低位の値として 85%（Hamelinck et al., 2005）に設定する。
- ④ 一般に実験室レベルのエタノール生産実験では、発酵液中のエタノール濃度の測定によるエタノール量を報告している場合が多いが、実際に使用するためには発酵液を蒸留してエタノールを回収する必要がある、特にガソリン混合用には 99.5%以上にまで高度に脱水する必要がある。またプロセス間の移送時にロスが生じる可能性もあるので、プロセス回収率を考慮することとし、NEDO プロジェクトでの設定値である 90%とする。

糖化率を実測する実験は、産業技術総合研究所バイオマス研究センターにおいて標準的に行われている、微粉碎前処理後、酵素糖化する方法（Inoue et al., 2008）に従って以下のように行った。乾燥した試料をカッターミルで 0.2 mm 以下に粗粉碎したものの 1.0 g を容量 45ml の容器に入れ、遊星型ボールミル（ドイツ Fritsch 社製 Pulverisette 7）を用いて微粉碎を行った。粉碎は 400 rpm で 10 分の粉碎と 10 分の休止のサイクルで行われ、トータルの粉碎作動時間を 2 時間とした。微粉碎前処理された試料の糖化は、基質 1g 当たり、アクレモニウムセルラーゼ（明治製菓）4 または 40 FPU、Optimash BG（ヘミセルラーゼ、Genencore）0.02ml を用い、0.05 M の酢酸ナトリウム緩衝液（pH 5.0）中、45℃で 72 時間反応させて行った。ここで FPU とは Filter Paper Unit の略で、セルラーゼの総合的な活性の指標として最も一般的に使用される、ろ紙を基質として測定される活性である（Ghose, 1987）。生成した糖の量をアミネックス HPX-87P カラム(Biorad, USA)を装着した HPLC（JASCO）を用いて屈折率検出器（RI-2031Plus, JASCO）で測定し、別途米国再生可能エネルギー研究所の方法（Sluiter et al., 2008）に従って 72%硫酸で完全分解して得られた全糖量を基に糖化率を計算した。

推計に用いる農業残渣の量は、国際連合食糧農業機関（FAO）の生産量統計（FAO、

FAOSTAT_Production) による 2006 年の稲粃、サトウキビの生産量、および Palm Oil Statistics (Indonesian Palm Oil Association, 2008) のデータによる 2006 年のパーム油の生産量から、残渣ごとに Residue-Product Ratio (RPR) を設定して算出した。稲わらの RPR については品種や栽培地域によって大きく変動する事が報告されているが (Summers et al., 2003) 、その平均値およびタイにおける値 (Yokoyama et al, 2000) から、稲わら (乾重) / 粃 (乾重) = 1.5 と設定した。しかし近代的な短稈品種ではこの値が 1 程度であり、アジアを対象にした場合でも 1 以下の RPR を用いる例も報告されている (Gadde et al., 2009-1) ことから、RPR=1.0 の場合についても推計を行った。バガスについては一般的に認められているバガス (乾重) / サトウキビ (湿重) = 0.15 (Yokoyama et al, 2000) とした。EFB については、EFB (乾重) / 粗パーム油 = 0.4 (Salétes et al., 2004) の値を用いた。なお FAOSTAT の稲粃データの重量には水分が含まれていると思われるのでこの点を FAO に問い合わせたが、“no information” との回答であった。そのため、文献値から粃の含水率を 25% と推定して (徐ら、2002; Akal et al, 2007) 稲わらの乾燥重量を計算した。

また農業残渣の資源全てがエタノール生産用に利用できることは実際には考えにくいため、本研究では資源の利用可能度を設定した場合の推計も行うこととした。

稲わらは堆肥、燃料、材料等に利用されているほか、水田に鋤込まれる場合も肥料分の還元や土壌物性の改良等の意義が認められるので、どの程度の量が利用できるかは議論のあるところである (Matsumura et al., 2005) 。一方わらの野焼きは、日本では基本的に禁止されているが、アジア諸国では一般にまだ広く行われている。この野焼きされる分は余剰と考えられ、また野焼きによる大気汚染の問題も発生している。そこでこの野焼きされている分の稲わらをエタノール原料用に使用する事が現実的であると考えた。中国において野焼きされる稲わらの割合は 23~24% (Zhang et al., 2008; Cao et al., 2008) であり、インド、タイ、フィリピンではそれぞれ 23%、48%、95% という報告もある (Gadde et al., 2009-2) 。ここでは中国、インドのデータから 25% 程度が実際的な割合と考え、低位、高位の利用可能度をそれぞれ 20%、30% と設定した。

バガスはサトウキビから糖液を搾り取った残渣であるので製糖工場が発生し、工場の熱源や発電用の燃料として有効に利用されている。従ってエタノール用に利用可能なのは工場で余剰になる分である。その割合は工場の規模やボイラー効率によって変動するが、タイの例として 13~20% と報告されている (Kuprianov et al., 2005) ので、

低位、高位の利用可能度をそれぞれ 15%、20%と設定した。

EFB は伝統的には野焼きされ、残った灰を肥料に使用方法で利用されていたが、EFB の野焼きは大気汚染の問題が大きいため、現在は基本的に禁止されている。そのため現在の利用法は、マルチ、堆肥などであるが、これは他に利用方法が無いための消極的な使用であり、潜在的には相当な量が利用可能と考えられる。マレーシアでの聞き取り情報から、低位、高位の利用可能度をそれぞれ 60%、90%と設定した。

以上から、生産可能なエタノール量は下記の式によって計算される。

エタノール生産量 (L) = 資源量(kg)×グルコース含量×セルロースの糖化率×発酵収率(0.85)×プロセス回収率(0.9)×エタノール発酵の理論収率(0.51)/エタノールの比重(0.79kg/ L)

エタノール生産ポテンシャルは、資源を全量利用可能と仮定した場合 (Case A)、高位の利用可能度を設定した場合 (Case B)、低位の利用可能度を設定した場合 (Case C) の 3 つのケースに分けて推計を行った。稲わらについては RPR を 1.5、1.0 に設定した 2 種類の推計を行い、RPR = 1.5 の場合は Case A₁、B₁、C₁、RPR = 1.0 の場合は Case A₂、B₂、C₂ と表記した。また稲わらを含む合計の値を示す場合も、上記に従って Case A₁、A₂ などと表記した。

推定に用いる糖化率データを得るために、国産の稲わら、タイ産のバガス、マレーシア産の EFB を用いて糖化実験を行った。その結果を Table 2.1 に示す。グルコースの糖化率をみると、当然ながら酵素量が多い 40 FPU/ g 基質での処理の方が高い値を示すが、4 FPU/ g 基質での処理との差は小さく、酵素コストを考慮すると 4 FPU/ g 基質処理の方が現実的と判断し、エタノール生産ポテンシャルの推計には、4 FPU/ g 基質処理での糖化率を用いることとした。少ない酵素量でも高い糖化率が得られることは、微粉碎による前処理の特徴である (Fig.2.1 , Inoue et al., 2008) 。

Table 2.1 Sugar contents and recoveries from three kinds of agricultural residues for glucose and xylose

Glucose			
		Sugar recoveries (%)	
	Content (g/dry g)	4 FPU*	40 FPU
Rice Straw	0.289	88.2	91.7
Bagasse	0.404	84.8	91.7
EFB	0.417	38.7	44.2

Xylose			
		Sugar recoveries (%)	
	Content (g/dry g)	4 FPU	40 FPU
Rice Straw	0.148	70.1	78.3
Bagasse	0.207	74.2	84.0
EFB	0.251	43.2	43.8

*FPU: Filter Paper Unit

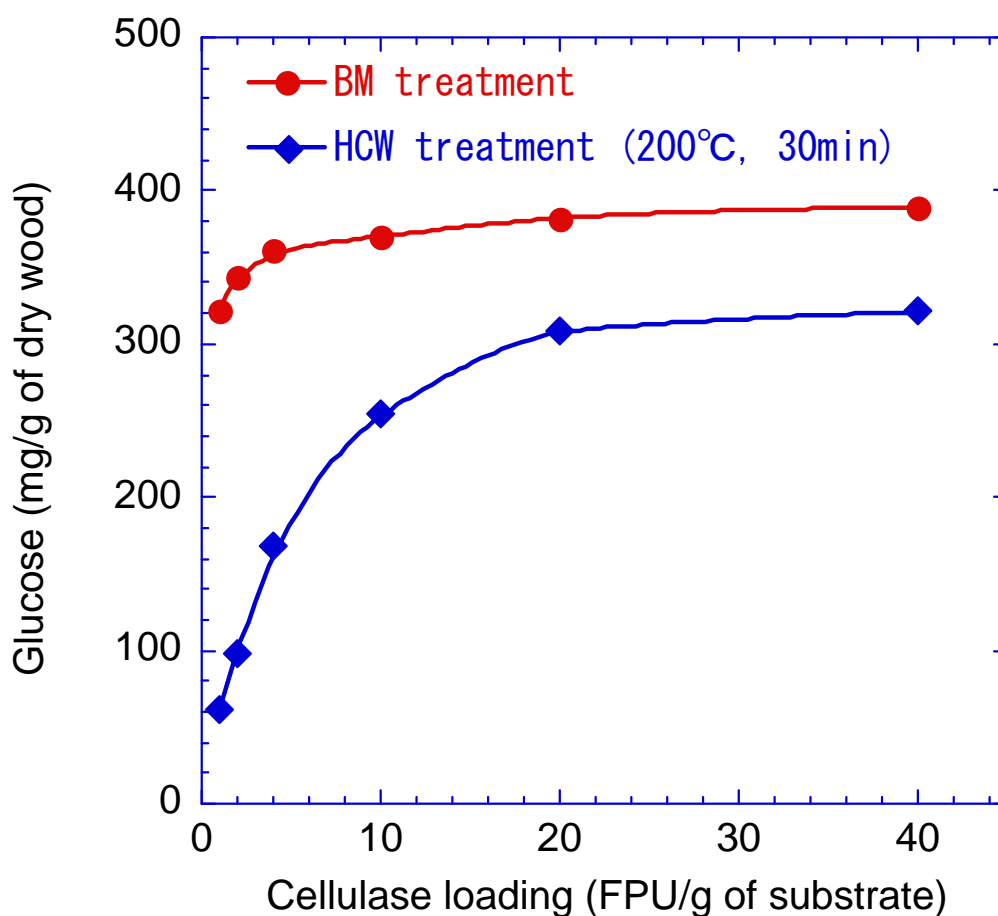


Fig. 2.1 Glucose recoveries from eucalyptus pretreated either by ball-mill pulverization (BM) or Hot-compressed water (HCW)

稲わら、バガスについては、4 FPU/ g 基質処理においても 80%代の糖化率が得られたが、EFB については 40 FPU/ g 基質でも 44%と非常に低い値であった。この低糖化率の原因は不明であったが、条件を同じにするために、EFB についても 4 FPU/ g 基質での糖化率を用いてポテンシャル推計を行った。またキシロースはここでの推計には使用しないが、Table 2.1 に示す糖化率が得られ、稲わら、バガスではグルコースより低い値であったが、EFB についてはグルコースと同等またはやや高い値となった。

これらのデータから推計した稲わらからのエタノール生産ポテンシャルを Table 2.2 (RPR = 1.5 の場合)、および Table 2.3 (RPR = 1.0 の場合) に示す。イネはアジアにおける最も主要な農作物であるので、全体に量が大きく、ポテンシャルは中国、インド、ASEAN の合計で、それぞれ近い値となっており、RPR=1.5 での、Case A₁ で 2,000 ~2,600 万 KL、Case B₁ で 600~800 万 KL、Case C₁ で 400~500 万 KL 程度である。

RPR=1.0 の場合、Case A₂ で 1,300～1,700 万 KL、Case B₂ で 400～500 万 KL、Case C₂ で 300 万 KL 程度である。なお Case C₁ と、Case B₂ は、最も値が小さくなる推定である Case C₂ に対して 1.5 倍になるので、値は等しくなる。

Table 2.4 にはバガスからのエタノール生産ポテンシャルを示す。バガスについてはインドの資源量が大きく、中国と ASEAN の合計ではそれぞれインドの 40%程度である。ASEAN 内ではタイの資源量が大きい一方、カンボジア、ラオスのように極めて資源量が少ない国が存在し、その差は稲わらの場合よりはるかに大きい。またバガスから生産可能なエタノール量は稲わら由来のエタノールに対して、中国、ASEAN 合計でそれぞれ 10%程度であったのに対し、インドの場合は 40%程度と多くなっている。このほかタイ、フィリピンで 30%を超えており、これらの国ではバガスの重要性が高いと言える。

Table 2.5 に EFB からのエタノール生産ポテンシャルを示す。オイルパームを商業的に生産しているのは対象地域ではインドネシア、マレーシア、タイの 3 か国に限られ、特にインドネシアとマレーシアがそれぞれ世界のパーム油の 40%以上を生産する 2 大生産国となっているため、この両国のポテンシャルが大きい。

Table 2.2 Ethanol production potential from rice straw in China, India, and ASEAN countries (rice straw / paddy rice = 1.5)

Country	Paddy Rice Production (10 ⁶ t)	Total Straw Amount (10 ⁶ t)	Ethanol Production Potential (10 ³ KL)		
			Case A ₁	Case B ₁	Case C ₁
China	184.1	207.1	26,133	7,840	5,227
India	139.1	156.5	19,747	5,924	3,949
Vietnam	35.8	40.3	5,085	1,526	1,017
Cambodia	6.3	7.0	888	267	178
Laos	2.7	3.0	378	113	76
Thailand	29.3	32.9	4,154	1,246	831
Myanmar	30.6	34.4	4,343	1,303	869
Malaysia	2.2	2.4	305	92	61
Indonesia	54.5	61.3	7,728	2,318	1,546
Philippines	15.3	17.2	2,176	653	435
Sum of ASEAN	176.6	198.6	25,057	7,517	5,011

Case A: Production from total straw

Case B: Production from straw by high availability

Case C: Production from straw by low availability

Table 2.3 Ethanol production potential from rice straw in China, India, and ASEAN countries (rice straw / paddy rice = 1.0)

Country	Paddy Rice Production (10 ⁶ t)	Total Straw Amount (10 ⁶ t)	Ethanol Production Potential (10 ³ KL)		
			Case A ₂	Case B ₂	Case C ₂
China	184.1	138.1	17,422	5,227	3,484
India	139.1	104.4	13,165	3,949	2,633
Vietnam	35.8	26.9	3,390	1,017	678
Cambodia	6.3	4.7	592	178	118
Laos	2.7	2.0	252	76	50
Thailand	29.3	22.0	2,769	831	554
Myanmar	30.6	23.0	2,895	869	579
Malaysia	2.2	1.6	203	61	41
Indonesia	54.5	40.8	5,152	1,546	1,030
Philippines	15.3	11.5	1,451	435	290
Sum of ASEAN	176.6	132.4	16,705	5,011	3,341

Case A: Production from total straw

Case B: Production from straw by high availability

Case C: Production from straw by low availability

Table 2.4 Ethanol production potential from sugarcane bagasse in China, India, and ASEAN countries

Country	Sugarcane Production (10 ⁶ t)	Total Bagasse Amount (10 ⁶ t)	Ethanol Production Potential (10 ³ KL)		
			Case A	Case B	Case C
China	100.4	15.1	2,555	511	383
India	281.2	42.2	7,151	1,430	1,073
Vietnam	15.7	2.4	399	80	60
Cambodia	0.1	0.0	4	1	1
Laos	0.2	0.0	6	1	1
Thailand	47.7	7.1	1,212	242	182
Myanmar	7.3	1.1	186	37	28
Malaysia	0.8	0.1	20	4	3
Indonesia	25.2	3.8	641	128	96
Philippines	24.4	3.7	619	124	93
Sum of ASEAN	121.3	18.2	3,086	617	463

Case A: Production from total bagasse

Case B: Production from bagasse by high availability

Case C: Production from bagasse by low availability

Table 2.5 Ethanol production potential from oil palm EFB in ASEAN countries

Country	Crude Palm Oil Production (10 ⁶ t)	Total EFB Amount (10 ⁶ t)	Ethanol Production Potential (10 ³ KL)		
			Case A	Case B	Case C
Thailand	0.9	0.3	27	25	16
Malaysia	15.9	6.4	507	457	304
Indonesia	16.1	6.4	513	462	308
Sum of ASEAN	32.8	13.1	1,048	943	629

Case A: Production from total EFB

Case B: Production from EFB by high availability

Case C: Production from EFB by low availability

これら 3 種の農業残渣からの生産ポテンシャルの合計を棒グラフで示した。

稲わらの $RPR = 1.5$ の場合：

Case A₁ (Fig.2.2) 、 Case B₁ (Fig.2.3) 、 Case C₁ (Fig.2.4)

稲わらの $RPR = 1.0$ の場合：

Case A₂ (Fig.2.5) 、 Case B₂ (Fig.2.6) 、 Case C₂ (Fig.2.7)

Case A₁、A₂ の場合、偶然であるが、中国、インド、ASEAN 合計でほぼ近似の値 (A₁ で 2,800 万 KL 程度、A₂ で 2,000 万 KL 程度) となったが、資源の利用可能度を考慮した Case B、C の場合は EFB の利用可能率を高く設定している関係で ASEAN のポテンシャルが相対的に大きくなっている。

なお本研究について学術雑誌に発表した論文では、論文 1 (*Intl. Energy J.*) では Case A (稲わらについては Case A₁) の、論文 2 (太陽エネルギー)、論文 3 (*J. Jpn. Inst. Energy*) では Case A、C (稲わらについては Case A₂、Case C₂) の値を、それぞれ記載している。

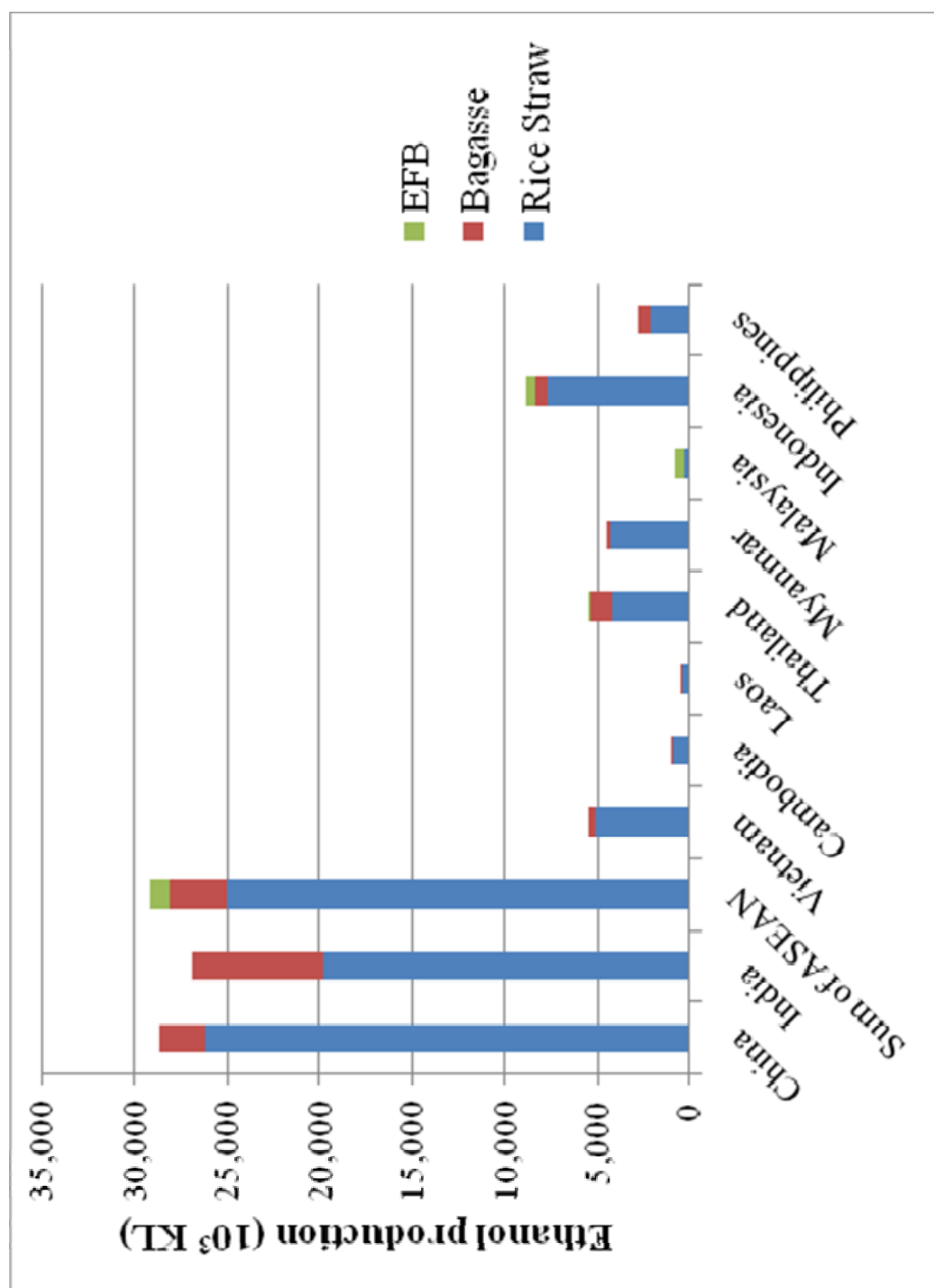


Fig.2.2 Ethanol production potential from three kinds of agricultural residues in China, India, and ASEAN countries (Case A: full resource availability, RPR of rice straw = 1.5)

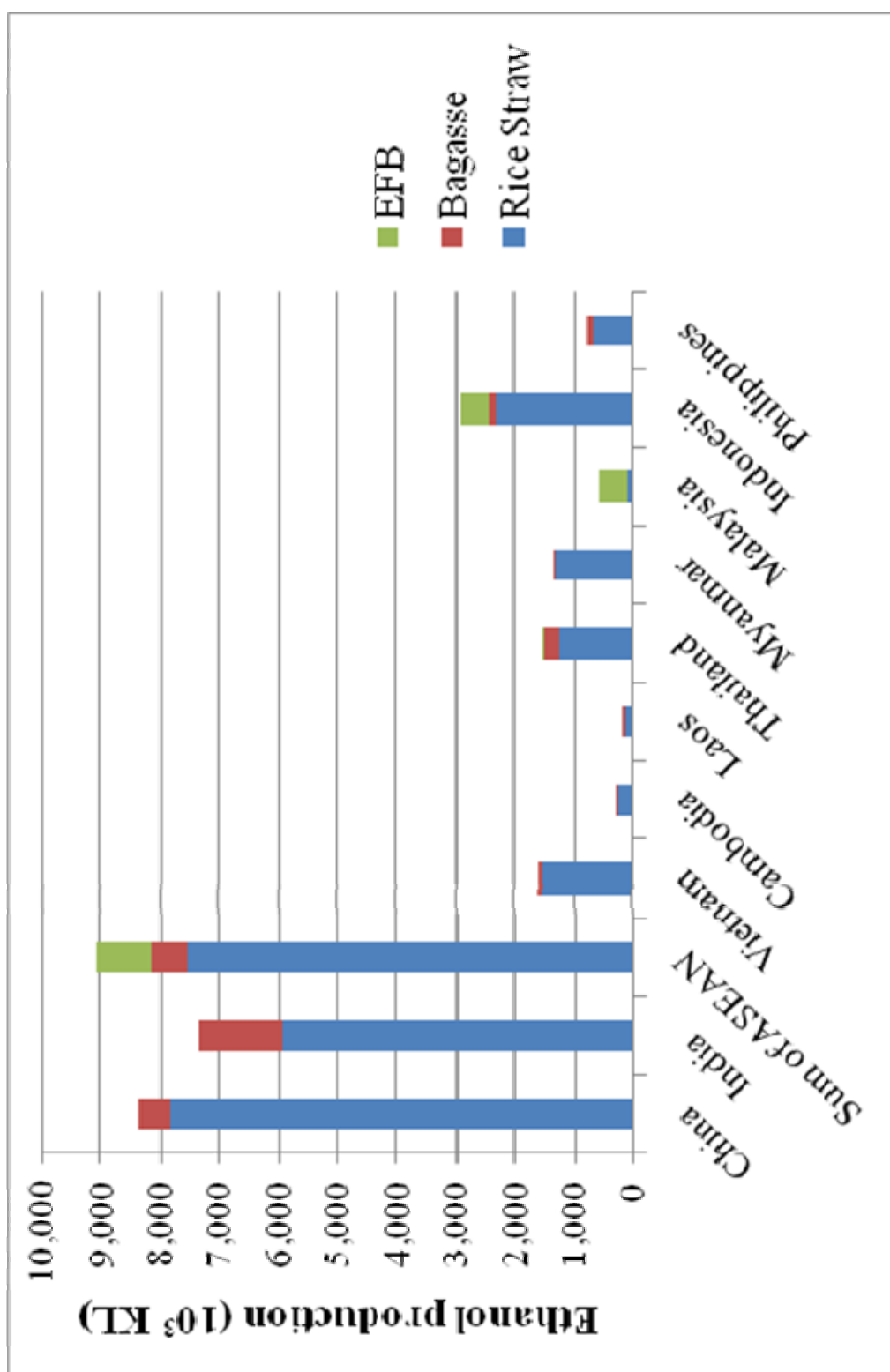


Fig. 2.3 Ethanol production potential from three kinds of agricultural residues in China, India, and ASEAN countries (Case B; higher resource availability; RPR of rice straw = 1.5)

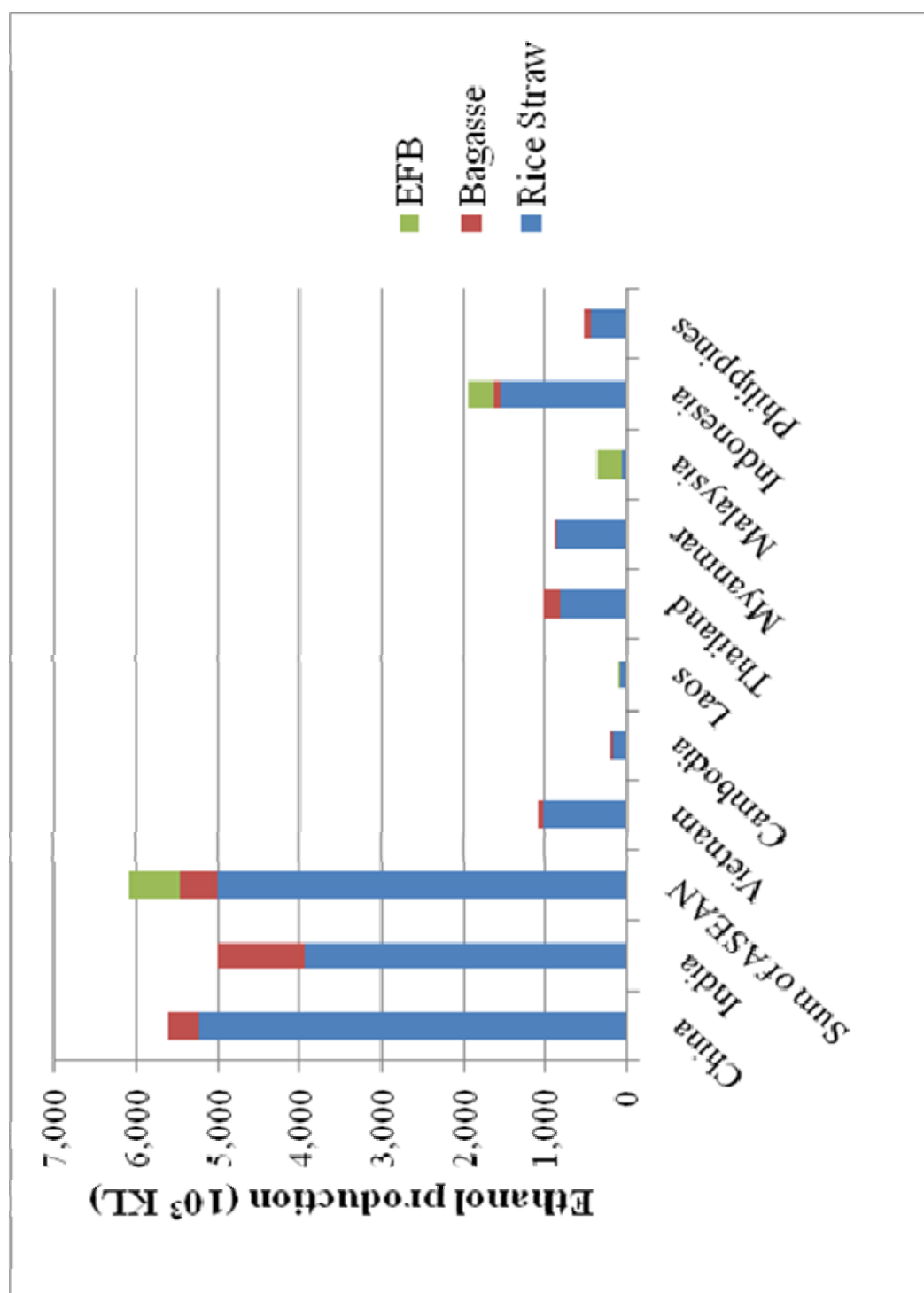


Fig. 2.4 Ethanol production potential from three kinds of agricultural residues in China, India, and ASEAN countries (Case C₁: lower resource availability, RPR of rice straw = 1.5)

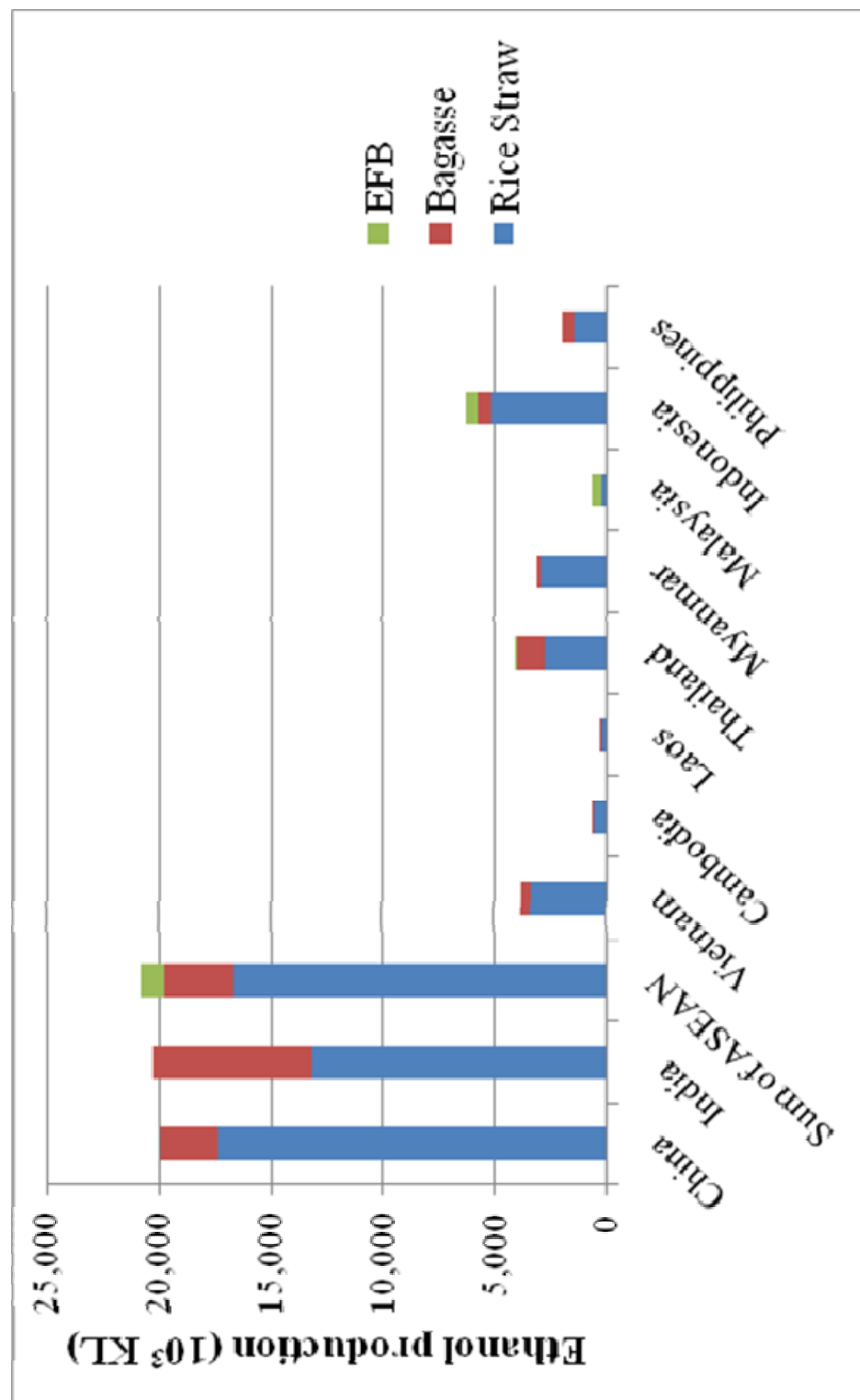


Fig. 2.5 Ethanol production potential from three kinds of agricultural residues in China, India, and ASEAN countries (Case A₂: full resource availability, RPR of rice straw = 1.0)

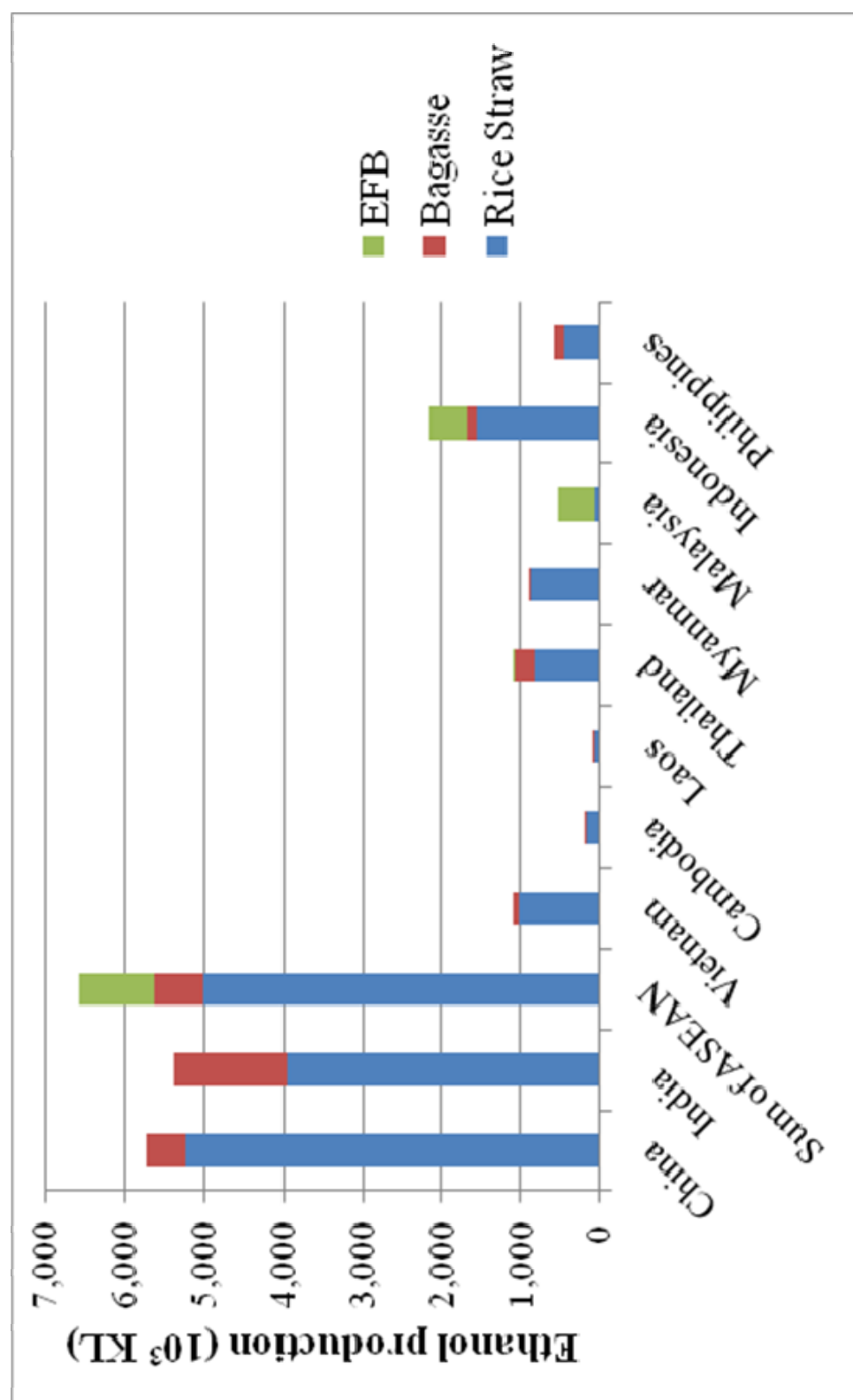


Fig. 2.6 Ethanol production potential from three kinds of agricultural residues in China, India, and ASEAN countries (Case B₂: higher resource availability, RPR of rice straw = 1.0)

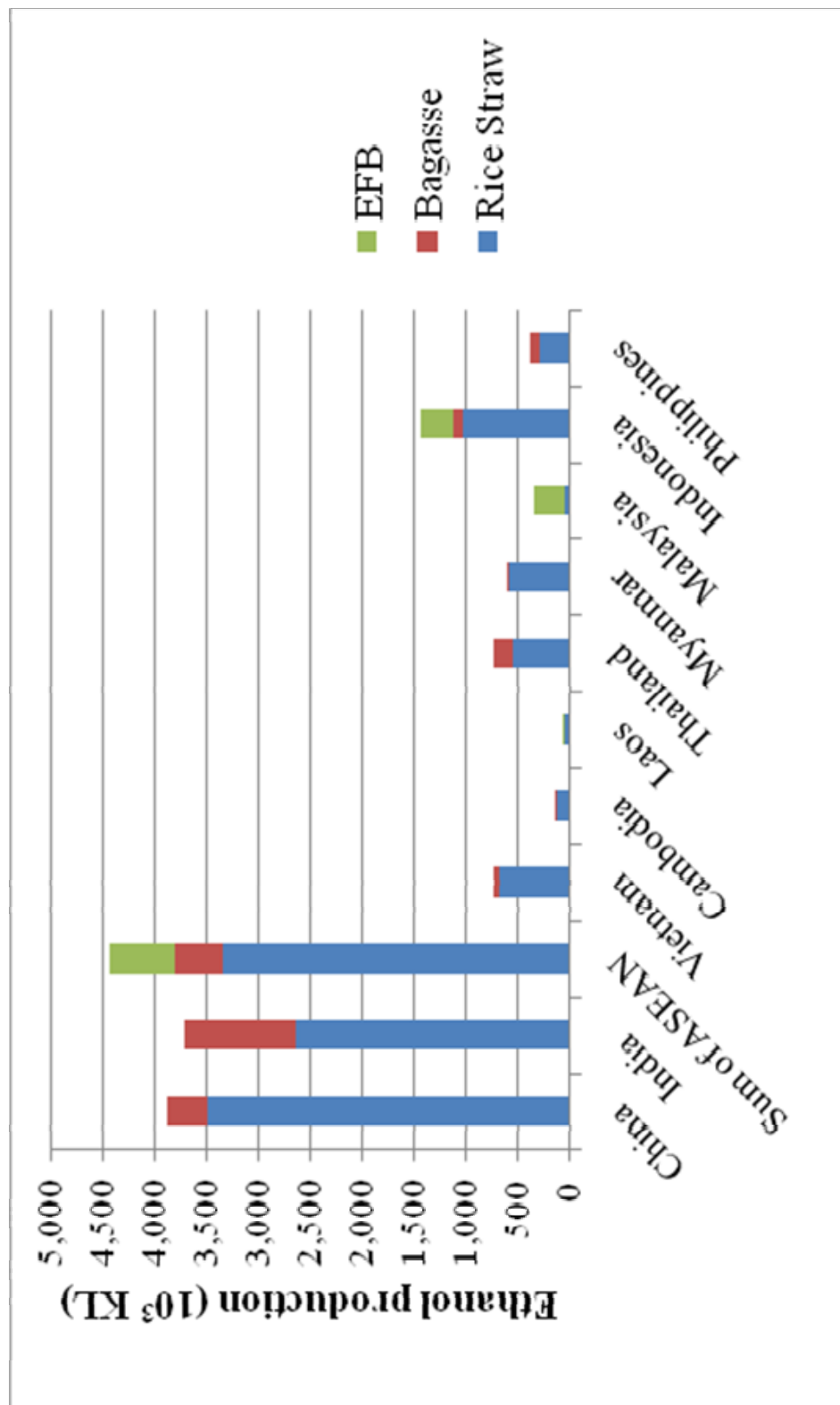


Fig. 2.- Ethanol production potential from three kinds of agricultural residues in China, India, and ASEAN countries (Case C₂: lower resource availability; RPR of rice straw = 1.0)

主要な国について、これらの推計値を NEDO が行った調査の推計値と比較した (Table 2.6、2.7)。

ここで留意すべきは以下の点である

- ①使用した作物生産量のデータが NEDO は 2004 年、本研究では 2006 年と異なっている。
- ②NEDO ではキシロースも利用する前提で推計を行っている。
- ③EFB の資源量は NEDO では Fresh Fruit Bunch (FFB) から、本推計はオイル生産量から推計している。
- ④発酵収率は 85 %で同じ設定であるが、原料当たりのエタノール収率は異なっている。
- ⑤NEDO 調査は中国と ASEAN では調査事業者が異なり、資源量の出典も異なる。

NEDO 調査では資源の全量を使用する推計しか行われていないので、その推計値は本研究での Case A₁ または A₂ に対応する。そこでまずこの 2 つを比較すると、稲わらでは比較的一致しているが、ASEAN 諸国については、Case A₁ は NEDO より推計値が大きく、Case A₂ の場合では小さくなっている。中国については Case A₁ でも NEDO の推計値より小さくなっている。またバガス、EFB については明らかに Case A の方が小さな値になっている。本研究での推計ではキシロースの利用を考慮しないために全般に本研究での推計値が小さくなっていると考えられるほか、EFB については本研究では実験で得られた低い糖化率を使用しているため、特に値が小さくなっている。資源の利用可能度を考慮した Case B、C ではさらにポテンシャルが小さくなり、NEDO 推計の 6~40 %程度の値となっている。すなわち、従来の推計では現実的な要因があまり考慮されていないことにより、本研究での推計値に比べ過大な数字が報告されていると考えられる。

Table 2.6 Comparison of ethanol production potential from rice straw for several Asian countries, among estimations by NEDO or this study

Rice straw (RPR = 1.5)

	Ethanol from rice straw (10 ³ KL)			
	NEDO	Case A ₁	Case B ₁	Case C ₁
China	33,477	26,133	7,840	5,227
Vietnam	3,912	5,085	1,526	1,017
Thailand	3,111	4,154	1,246	831
Indonesia	5,897	7,728	2,318	1,546
Philippines	1,580	2,176	653	435

Rice straw (RPR = 1.0)

	Ethanol from rice straw (10 ³ KL)			
	NEDO	Case A ₂	Case B ₂	Case C ₂
China	33,477	17,422	5,227	3,484
Vietnam	3,912	3,390	1,017	678
Thailand	3,111	2,769	831	554
Indonesia	5,897	5,152	1,546	1,030
Philippines	1,580	1,451	435	290

Case A: Production from total straw

Case B: Production from straw by high availability

Case C: Production from straw by low availability

Table 2.7 Comparison of ethanol production potential from bagasse and EFB for some Asian countries, among estimations by NEDO or this study

Bagasse

	Ethanol from bagasse (10 ³ KL)			
	NEDO	Case A	Case B	Case C
China	3,617	2,555	511	383
Vietnam	746	399	80	60
Thailand	3,054	1,212	242	182
Indonesia	1,257	641	128	96
Philippines	1,528	619	124	93

EFB

	Ethanol from EFB (10 ³ KL)			
	NEDO	Case A	Case B	Case C
Thailand	383	27	25	16
Malaysia	5,171	507	457	304
Indonesia	4,471	513	462	308

Case A: Production from total resources

Case B: Production from resources by high availability

Case C: Production from resources by low availability

最後にこのように推計されたエタノールの可能生産量により、各国のガソリン消費量をどの程度を代替できるかを、エネルギーベースで計算した。エタノールの体積当たりの発熱量はガソリンの 62 % しかないため、エタノールを混合すると体積当たりの走行距離、すなわち一般に燃費と呼ばれている km/ L の値が落ちてしまい、同じ距離を走るのに多くの燃料が必要になるため、エネルギーベースでの計算を行ったものである。なおエタノールはオクタン価が高く、含酸素燃料のため燃焼効率も向上することから、燃費は 62 % よりは高くなるとの報告もあるが (Galbe and Zacchi, 2002)、まだ一般的に認められている数値は存在しないので、本研究では過大評価を避けるために燃費も発熱量比の 62 % になるとの前提で計算している。なお E10 燃料と言う場合は体積比で 10 % のエタノールを混合するため、このエネルギーベースでの可能代替率が 6.2 % の場合には現在のガソリン消費量の 10 % の体積のエタノールが生産できることを意味している。

結果を Table 2.8 (稲わらの RPR = 1.5 の場合) および Table 2.9 (稲わらの RPR = 1.0 の場合) に示す。国によるガソリン消費量の差が大きいため、代替可能率にも大きな差があり、特にまだ自動車の普及が進んでいない、カンボジア、ラオス、ミャンマーなどの諸国では非常に大きな値を示しており、100 % を超えるケースもある。最もポテンシャル推計値が小さくなる Case C₂ の場合でも、インドでは 20 % 近い量の代替が可能であり、ASEAN 諸国でもマレーシア以外は 5 % 以上の代替が可能で、ASEAN 全体では 6.5 % の代替が可能であった。なお ASEAN 加盟国の内、シンガポールとブルネイは農業生産がほとんどないためにエタノール生産量の推計は行っていないがガソリン消費量は無視できないため、ASEAN 全体の代替率を計算する際のガソリン消費量には、この両国の消費量も含めている。また同じ条件で日本について計算してみると、Case C₂ では 0.2 % とわずかな量しか代替できない結果になった。これは日本のガソリン消費量が多いことと、それに対する農業生産（ここではほとんどイネの生産）がそれほどは大きくないためと考えられる。他のアジア諸国はいずれも日本よりは 1 桁以上高い代替可能率を示しており、従来よりも 1 桁数値が小さい本研究の Case C₂ の推計値に基づいても、一般にアジア諸国は農業残渣からの大きなエタノール生産ポテンシャルを持つと、結論付けられる。

Table 2.8 Possible substitution rates by ethanol from three kinds of agriculture residues in China, India, and ASEAN countries
(RPR for Rice straw =1.5)

Country	Gasoline consumption (10⁶ t)	Possible substitution by ethanol (%, Energy basis)		
		Case A₁	Case B₁	Case C₁
China	52.3	26.9	7.8	5.3
India	9.3	141.9	38.8	26.5
Vietnam	2.8	96.6	28.3	19.0
Cambodia	0.2	287.5	86.1	57.7
Laos	0.1	134.1	40.0	26.9
Thailand	5.4	49.4	13.9	9.4
Myanmar	0.4	614.6	181.9	121.7
Malaysia	7.9	5.2	3.4	2.3
Indonesia	13.1	33.3	10.9	7.3
Philippine	2.6	51.8	14.4	9.8
Sum of ASEAN	33.4	42.9	22.5	9.5
Japan	44.1	1.7	0.5	0.3

Case A: Production from total resources

Case B: Production from resources by high availability

Case C: Production from resources by low availability

Table 2.9 Possible substitution rates by ethanol from three kinds of agriculture residues in China, India, and ASEAN countries
(RPR for Rice straw =1.0)

Country	Gasoline consumption (10⁶ t)	Possible substitution by ethanol (%, Energy basis)		
		Case A₂	Case B₂	Case C₂
China	52.3	18.7	5.4	3.6
India	9.3	107.2	28.4	19.6
Vietnam	2.8	66.8	19.3	13.0
Cambodia	0.2	192.0	57.5	38.4
Laos	0.1	90.1	26.8	17.8
Thailand	5.4	36.7	10.1	6.9
Myanmar	0.4	418.1	122.9	82.4
Malaysia	7.9	4.5	3.2	2.2
Indonesia	13.1	23.7	8.0	5.4
Philippine	2.6	38.4	10.4	7.1
Sum of ASEAN	33.4	30.6	16.3	6.5
Japan	44.1	1.2	0.3	0.2

Case A: Production from total resources

Case B: Production from resources by high availability

Case C: Production from resources by low availability

2.3 中国で野焼きされる穀物わらからのエタノール生産ポテンシャルの推計

Table 2.9 において最もポテンシャル推計値が小さくなる Case C₂ での中国のガソリン代替可能率は、日本よりは 1 桁高いものの、3.6%と、マレーシアを除く ASEAN 諸国より低い値を示した。しかし中国では南部の広西チワン族自治区などで、稲作にサトウキビ、キャッサバ栽培を加えた東南アジア型の農業形態がみられるものの、国土が広大で気候も多様なため東南アジアでは栽培されない作物も多く、2.2 で推計した稲わら、バガス、EFB だけで中国全体のエタノール生産について考えることはできない。

中国では様々な作物が栽培されているので発生する残渣も多様であるが、特にイネ、コムギの生産量は世界一、トウモロコシも米国に次いで世界 2 位の穀物生産大国であり、これらの穀物のわらは賦存量の点から最も利用が期待される資源である。この場合資源の利用可能度をどのように設定するかが問題であるが、2.2 では稲わらについては野焼きされている量を参考に利用可能度を設定した。中国については、イネ、コムギ、トウモロコシのそれぞれについて、耕地で野焼きされているわらの量の地域（省、自治区、特別市）別の 2004 年のデータが存在する（Zhang et al., 2008）ので、これを利用して、野焼きされている分をエタノール原料として使用した場合のエタノール生産ポテンシャルの推計を行った。推計の条件として複数の文献による中国でのわらのグルコース含量を平均し、イネ（Jin et al., 2006, 2007; Ma et al., 2009）、コムギ（Zhu et al., 2006; Yang et al., 2008; Chen et al., 2008）は各 36 %、トウモロコシ（Han et al., 2008; Zhao et al., 2009; Liu et al., 2009）は 40 %とした。糖化率は、コムギとトウモロコシについては実験データが無いが、2.2 でのイネの値（88 %）を参考に、イネも含めて 85 %に統一して設定した。地域別の推計ポテンシャルを Table 2.10 に、2004 年の地域別のガソリン消費量データ（China Energy Statistical Yearbook, 2007）から計算したエタノールによるガソリン代替可能率を地図上に示した（Fig. 2.8）。この図では最も寄与の大きい作物を色分けして表示している。なお上記 Statistical Yearbook では、なぜかチベット自治区のガソリン消費量データが記載されていないので、チベットのガソリン代替可能率は計算できなかった。

Table 2.10 Ethanol production potential from field-burned straws of rice, wheat, and maize in China

Region	Ethanol from Rice Straw (10³ KL)	Ethanol from Wheat Straw (10³ KL)	Ethanol from Maize Straw (10³ KL)	Total Ethanol Production (10³ KL)
Beijing (北京)	0.4	17.1	48.8	66.3
Tianjin (天津)	21.2	30.1	88.3	139.7
Hebei (河北)	9.4	510.4	875.0	1,394.8
Shanxi (山西)	0.2	110.6	334.9	445.7
Neimenggu(内蒙古)	8.9	34.8	637.8	681.5
Liaoning (遼寧)	69.8	2.7	644.5	717.1
Jilin (吉林)	62.1	2.5	1,135.9	1,200.6
Heilongjiang (黑龍江)	178.7	18.2	626.0	822.9
Shanghai (上海)	37.9	7.4	5.2	50.5
Jiangsu (江蘇)	452.8	430.1	227.2	1,110.1
Zhejiang (浙江)	266.6	18.2	30.3	315.0
Anhui (安徽)	169.6	248.4	163.2	581.2
Fujian (福建)	160.5	1.8	12.6	175.0
Jiangxi (江西)	278.7	1.4	4.5	284.6
Shandong (山東)	19.7	858.7	1,258.7	2,137.1
Henan (河南)	43.9	934.5	508.2	1,486.6
Hubei (湖北)	296.8	80.3	131.3	508.4
Hunan (湖南)	436.2	7.6	95.9	539.7
Guangdong(廣東)	2401.3	1.2	65.6	468.2
Guangxi (廣西)	189.3	0.6	89.2	279.1
Hainan (海南)	40.9	0.0	6.2	47.1

Chongqing (重慶)	90.9	33.3	134.6	258.8
Sichuan(四川)	275.6	175.7	346.7	798.0

Table 2.10 (Contd.)

Region	Ethanol from Rice Straw (10³ KL)	Ethanol from Wheat Straw (10³ KL)	Ethanol from Maize Straw (10³ KL)	Total Ethanol Production (10³ KL)
Guizhou (貴州)	65.1	22.7	161.5	249.4
Yunnan (雲南)	68.2	28.8	153.1	250.1
Shaanxi (陝西)	10.5	121.2	185.1	316.7
Gansu(甘肅)	0.6	93.9	136.3	230.8
Qinghai (青海)	0.0	7.6	0.0	7.6
Ningxia (寧夏)	7.0	31.8	80.8	119.6
Xinjiang (新疆)	9.1	136.3	205.3	350.7
Xizang (西藏)	0.0	4.8	0.5	5.3
Total	3,672.03	3,972.64	8,393.35	16,038.02

推定の結果、中国は3種の穀物わらからだけで大きなエタノール生産ポテンシャルを持ち、ガソリン消費量に対する代替可能率は、多くの省・自治区で10%を超え、中国全体では15.9%であった。地域的には特に華北、東北のトウモロコシを中心とする地域のポテンシャルが大きく、コムギが多い河南省、安徽省も高い値を示した。特別市である北京、天津の両市は地理的に河北省に囲まれているので、河北省、北京市、天津市の合計で代替可能率を計算すると16.1%となり、このような大都市部を含めても高い代替可能率が得られることが明らかになった。一方南部のイネを中心とする地域は北部に比べて一般に代替可能率が低い傾向がみられた。なお2006年のガソリン消費量は2004年の約1.4倍に増加しているが、わらの量を2004年と同じと仮定した場合、2006年の代替可能率は中国全体で11.4%であった。なお稲わらからのポテンシャルについて、2.2での中国の推定値と比較すると、最も推計値が小さくなるCase C₂とほぼ同等の値であった。野焼きされるわらの量のデータが2004年のものであるのに対し、2.2で使用したデータは2006年という差はあるが、2004年の中国の稲生産量データを使って2.2と同様に計算してもポテンシャルは2006年とほとんど差が無かった。このことから、野焼きされるわらの量からの推計値は、Case C₂に近い実的な値と考えられる。

中国では既に農業残渣などのリグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産の研究開発が数か所の研究機関で行われており（Qu et al., 2006）、3,800 KL/年規模のパイロットプラントも建設されている（Li et al., 2009）。このため、中国では東南アジア諸国よりも早く農業残渣からのエタノール生産が実用化する可能性がある。

2.4 まとめ

中国、インド、ASEAN 諸国における稲わら、バガス、オイルパーム EFB からのエタノール生産ポテンシャルを、実際の実験データから得られた糖化率を用いるなど現実的な条件のもとで推計した。その結果、3種の農産廃棄物から生産可能なエタノール量は、中国、インド、ASEAN 合計について、最も大きな推計値を与える、稲わらの RPR を 1.5 とし、かつ資源が全量利用可能とした場合はそれぞれ 2,800 万 KL 程度、最も小さな推計値を与える、稲わらの RPR を 1.0 として低位の資源利用度を設定した場合はそれぞれ 400 万 KL 程度であった。

既存のポテンシャル推計より本推計の方が一般に値が小さく、特に資源の利用度を考慮した推計では大きく減少し、最も厳しい条件では従来の推計の 1 割以下の値になるが、この値を用いても、ほとんどの国で国内のガソリン消費の 5 %以上を代替できるポテンシャルがあることが明らかになった。別途推定した中国で野焼きされるイネ、コムギ、トウモロコシのわらの利用を仮定したポテンシャル推計においても、中国全体のガソリン消費量の 1 割以上の代替が可能であった。

以上から、本研究が対象としたアジア諸国では一般に、農業残渣から多量のエタノールを生産する事が可能であり、食用資源を使用しなくてもエタノールによる大きなガソリン代替ポテンシャルを持つことが示された。

第3章 オイルパーム栽培地域における農業残渣からのエタノール生産可能性の検討

3.1	背景と目的-----	46
3.2	オイルパーム産業で発生する農業残渣-----	47
3.3	マレーシアにおける生産可能性の検討-----	49
3.4	インドネシアにおける生産可能性の検討-----	58
3.5	オイルパーム幹に含まれる糖類からのエタノール生産について-----	60
3.6	まとめ-----	61

第3章 オイルパーム栽培地域における農業残渣からのエタノール生産可能性の検討

3.1 背景と目的

第2章でのポテンシャル推計に使用した作物生産量が示すように、パーム油の商業的生産はこの研究の対象地域内ではインドネシア、マレーシア、タイの3カ国に限定され、この3カ国で世界の生産量の約90%近くを占めている（Fig. 3.1）。

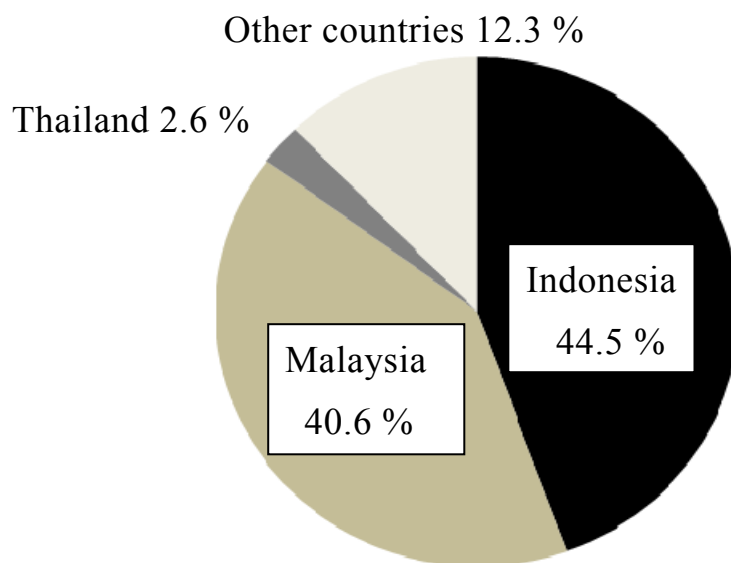


Fig. 3.1 World production of palm oil (2008)

(Indonesian Palm Oil Assosiation のデータから作成)

特にインドネシア、マレーシアの生産量が極めて多く、それぞれ世界の40%以上を生産している。このようにオイルパームは東南アジアにおいて大きな存在を占める特徴的な作物であるが、オイルパーム残渣からのエタノール生産やその利用については、稲わら、バガスと比べて報告例が極めて少ない。そこで本章では、オイルパーム残渣からのエタノール生産のポテンシャルについてマレーシア、インドネシアの2国を対象にして検討し、その可能性を明らかにすることを目的とした。

3.2 オイルパーム産業で発生する農業残渣

オイルパーム産業では多様な廃棄物が発生している (Fig. 3.2)。栽培地ではオイルを含む果実が房状の構造体内に入っている **Fresh Fruit Bunch (FFB)** の形で収穫され、オイル工場に輸送される。工場では、悪臭の原因になる遊離脂肪酸の発生を防ぐためにリパーゼを失活させる目的で FFB を高温蒸気処理した後、果実が回収される。この際果実が除かれた果房部分として **EFB** が発生する。果実の果肉部にはオイルが含まれるので、これを搾って粗パーム油が回収されるが、この際の搾り粕が **Mesocarp (中果皮) Fiber (MF)** である。さらに果実内には種子があり、この胚乳部分からパーム核油が回収され、その際シェル (果実殻) と搾り粕である核ケーキが発生する。さらに最近粗パーム油から純度の高いパーム油と水分、固形分を分離するデキャンターと呼ばれる装置の普及が始まっており、この分離の際にペースト状の残渣であるデキャンターケーキ (**DC**) が発生する。一方栽培地では、FFB の収穫時に剪定されるフロンド (羽状の葉) と、油脂の生産性を維持するために 25 年程度で木の更新が行われる際に伐採される幹 (廃トランク) が廃棄物として発生する。

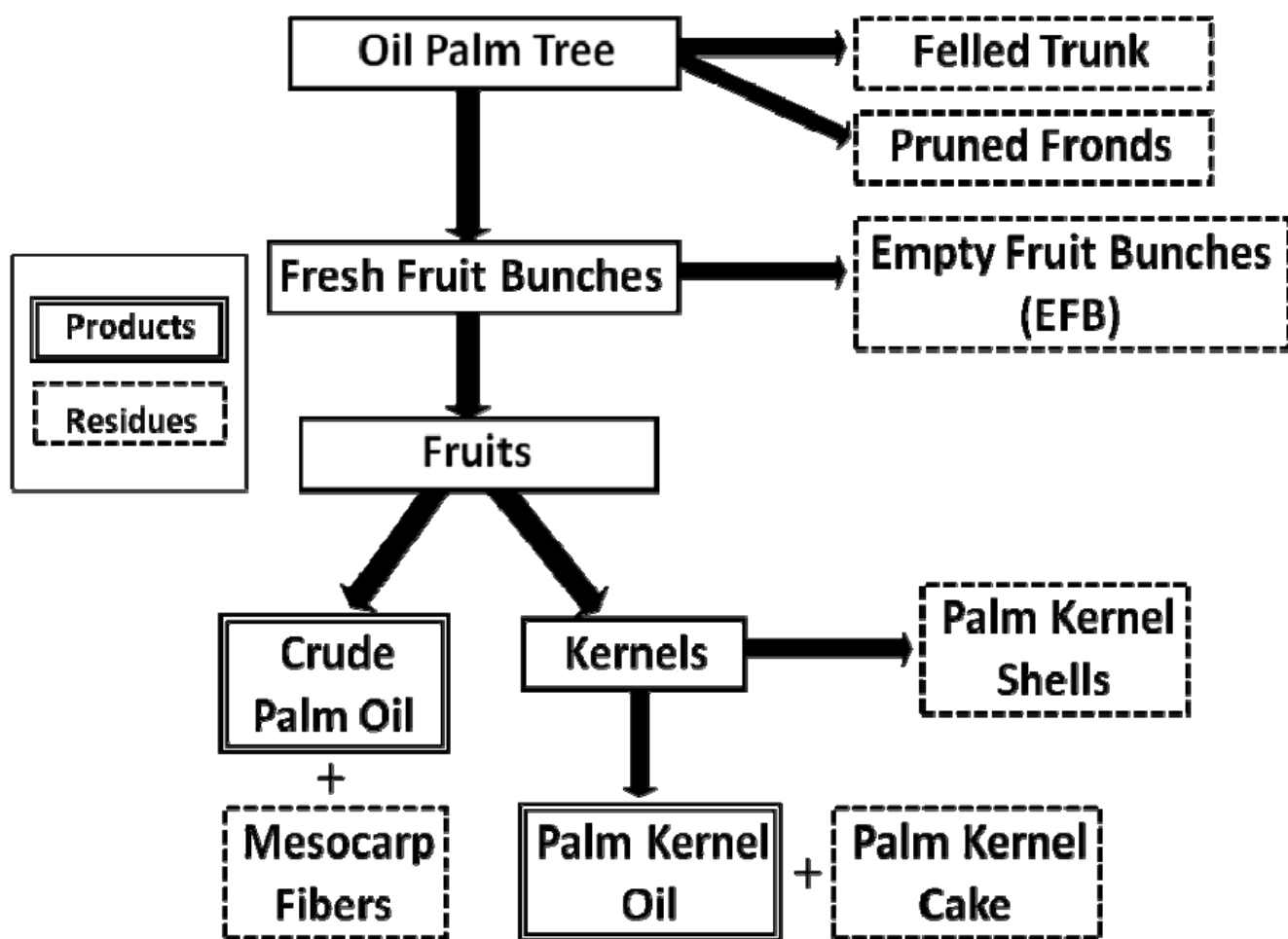


Fig. 3.2 Scheme of product and residue generation in oil palm industries

3.3 マレーシアにおける生産可能性の検討

第2章で明らかにしたように、一般にアジア諸国は大きな農業残渣からのエタノール生産ポテンシャルを持ち、これによるガソリン消費の代替可能率も高い値を示すが、マレーシアは例外的に代替可能率が低い。これは、マレーシアが農業生産およびガソリン消費において他の東南アジア諸国と異なる特徴を持つことによる (Table 3.1)。

まずマレーシアのガソリン消費量は人口 100 万人当たり 306.5 kt と他の東南アジア諸国より数倍大きく、日本の値 (343.9 kt) に近い。また他の諸国と比べて、液体燃料需要におけるガソリンの割合が高くガソリンの重要性が大きい。なおマレーシアで大量に生産されているパーム油をメタノール等とエステル交換する事でバイオディーゼル燃料 (BDF) が製造できるが、これはディーゼルエンジン用の燃料であり、オートサイクルエンジン用のガソリンを代替できるバイオ燃料としてはエタノールが必要になる。

一方、農業生産については、東南アジアの国としては例外的に稲の生産量が少なく、サトウキビの栽培量もわずかであるため、第2章での3種の農業残渣からのエタノール生産ポテンシャル推計では、EFB からのポテンシャルが全体の 87 %を占め、他の国では稲わら由来が 70 %以上を占めることに比べて極めて特徴的である。

Table 3.1 Comparison of agricultural production and gasoline consumption among Malaysia, other ASEAN countries, and Japan

	Population (10 ⁶)	Rice Production (10 ⁶ t)	Sugarcane Production (10 ⁶ t)	Cassava Production (10 ⁶ t)	Palm oil Production (10 ⁶ t)	Milled rice export (10 ³ t)/ 10 ⁶ persons	Gasoline consumption (10 ³ t) / 10 ⁶ persons	Gasoline / Diesel Consumption Ratio*
Vietnam	85.3	35.8	15.7	7.8		54.4	32.6	0.54
Thailand	64.8	29.3	47.7	22.6	0.9	92.5	82.5	0.34
Indonesia	225.5	54.5	25.2	20.0	16.1	-1.4	57.9	0.84
Malaysia	25.8	2.2	0.8	0.4	15.9	-23.4	306.5	0.95
Japan	128.2	10.7	1.3			0.0	343.9	0.87

*weight basis, Diesel consumption includes heavy oil.

マレーシアではサトウキビ以外でエタノール原料になり得る作物であるキャッサバ、トウモロコシの生産量も少なく、サトウキビを含めて仮にこれらの農産物生産の全量をエタノール用に使用したと仮定しても、生産可能な量はサトウキビから 4.6 万 KL、キャッサバから 7.2 万 KL、トウモロコシから 2.7 万 KL 程度で合計しても 15 万 KL 程度にしかならず、エネルギーベースで、国内のガソリン消費量の約 9 % しか代替できないと計算された。マレーシアは穀物自給率が 27 % しかないなど国内生産による食料が不足している国であるので、これらの農産物をエタノール原料に使用する事は現実的ではないと考えられる。また農業残渣の利用も、稲わら、バガスから生産可能なエタノールの量は、資源を全量使用した場合でもそれぞれ 20.3 万 KL、2.0 万 KL であり、食用資源由来のエタノール生産可能量と大きな差は無い。

しかしマレーシアはパーム油の大生産国であり、オイルパーム由来の各種廃棄物が大量に発生している。そこでこれらの残渣からエタノールを生産する事が、マレーシアにおいては重要と考えられる。

マレーシアにおけるオイルパーム残渣の発生量（乾物重）を Table 3.2 に示す。核ケーキについては 2006 年の文献データ（Saw et al, 2008）を用い、その他については ha 当たりの賦存量（Yusoff, 2006）と 2006 年の栽培面積（367 万 ha、Indonesian Palm Oil Association, 2008）から計算した。ただしトランクについては 2007 年の再植面積（NEDO ら、2008-1）を計算に用いた。

Malaysia Palm Oil Board（MPOB）等での聞き取り調査等を基にこれらの利用可能性について検討すると、シェルは燃料用、核ケーキは飼料用として有効に利用されており、かつ大部分が輸出されているので、国内で利用できる余剰量はほとんどないと考えられる。フロンド、トランクの賦存量は極めて大きいですが、耕地からの回収、移送には多大な労力、コストが必要なため、現状では耕地にそのまま放置されるだけでほとんど利用されていない。このためエタノール原料としても、EFB などのオイル工場で集中的に発生する廃棄物と比べると、利用しにくいと考えられる。

Table 3.2 Amounts and availability of oil palm residues in Malaysia

Residues	Amount in Malaysia in 2006 (10 ³ t, DM)	Present major usage	Price* (Ringgit/ t)	Availability
Trunk	5,840	Plywood, Pulp		△ : Difficulty for collection and transportation
FronD	38,200			△ : Difficulty for collection and transportation
EFB	5,870	Mulch, Fertililzer	100	◎ : Large excess amount
Mesocarp Fiber	5,980	Fuel		△ ~ ○ : More surplus with improvement of boiler efficiency
Kernel Shell	4,040	Fuel	100	× : Exported
Kernel Cake	2,200	Feed	1,000	× : Exported
Decanter Cake				× ~ △ : Very little, but increasing

現在 EFB の一部は肥料用や農地のマルチ用に利用されているが、その需要はあまり大きくなく、残余分をエタノール原料に使用することに特に問題は無いため、EFB はエタノール原料用残渣として最も有望と考えられる。MF は現状ではオイル工場で使用するエネルギー供給のために、ほぼ全量が燃焼されている。ただしこれは、余剰分を出さないために全量を使い切ることを前提にボイラー設計がなされているため、エネルギー回収効率は極めて低い状態になっている（九州工業大学白井義人教授、私信）。このためボイラーの効率を上げることで余剰分を発生させ、これをエタノール原料に利用する事は比較的容易と考えられる。DC は mesocarp 由来で MF としては分離されなかった細かい粒子分が回収されていると考えられ、成分的には MF と類似したものと予想される。現時点ではデキャンターの設置率が低いので発生量は少なく、現状では特に利用されていないが、今後デキャンターが普及して行くのに従って、発生量が増加していくと考えられる。そこで現在および近い将来での利用可能性が高い残渣と考えられる、EFB、MF、DC の 3 種に注目することとした。

EFB については 2 章でのエタノール生産ポテンシャル推計用のデータ取得のために既に糖化実験を行っているが、その糖化率は稲わら、バガスの半分以下と極めて低いものであった。この低糖化率の原因の可能性の 1 つとして、日本で使用した材料が輸入された乾燥品で極めて固い状態であったことが考えられた。しかし 3.2 で述べたように、オイル工場では高温蒸気処理を受けるため EFB は発生時には湿潤な状態にあり、また蒸気処理が酵素糖化のための前処理の効果を持つ可能性もあるので、工場で排出された直後の EFB を用いると糖化率が向上する可能性が考えられた。そこでマレーシア、クアラルンプール市郊外に位置するマレーシア・プトラ大学構内に設置されている産業技術総合研究所の実験施設を利用して、現地で得られる新鮮な材料を用いた糖化実験を行った。実験材料は実験施設から車で 20 分程度の距離の Dengkil にあるオイル工場 (Seri Ulu Langat Palm Oil Industry) で採取した EFB、MF を直ちに用いて行った。DC については、デキャンターを設置している、車で 3 時間程度の距離の Kuantan 市にあるオイル工場 (Felda Palm Industry) (Fig. 3.3) から入手したものを使用した。



Fig. 3.3 Locations of University Putra Malaysia (UPM) and oil mills for biomass collection in Malaysia

前処理は湿式ディスクミル（グローエンジニアリング社、RD1-15G）による微粉砕法を用いた。2章の実験で用いたボールミルによる処理では、前処理効果は高いものの長い粉砕時間を必要とし、多くのエネルギーを消費する事が問題であった。このため産業技術総合研究所では、前処理効果はやや劣るものの、必要エネルギーを大幅に低減できるディスクミルの使用に方式を転換しており、マレーシアの実験施設にもディスクミルが設置されているため、これを使用したものである。ディスクミル処理は回転数 2,400 rpm で行った。なおディスクミルでは1回の処理での粉砕効果は小さいため、処理した材料を回収して、再び処理するサイクルを反復して実験を行った。酵素糖化は第2章のセルラーゼ 4 FPU/g 基質での実験と同じ条件で行った。生成したグルコースの量は、グルコースオキシダーゼとの反応で生成する過酸化水素の反応を利用して比色定量するグルコース定量キット（和光純薬、グルコース CII テストワコー）を用いて定量した。

ディスクミル処理のサイクル数および糖化時間と EFB からの糖収量の関係を Fig. 3.4 に示す。処理サイクル数が多いほど糖収量が高くなる傾向がみられ、今回の実験で行った最高サイクル数である 40 サイクルにおいて最大の収量が得られ、その際のグルコース収率は 53.3 %であった。まだ特段高い糖化率とは言えないが、日本での実験に比べると約 4 割の増加となった。これをボールミル処理による稲わらの結果と比較すると、糖化率は稲わらの方が 1.6 倍も高いことになるが、グルコース含量は EFB の方が多いため、得られるグルコースの絶対量では、稲わら 254mg/g に対し、EFB 222mg/g と、その差は 12 %程度にまで接近する。またディスクミルはボールミルよりはやや処理効果が劣り、稲わらの場合ボールミル処理より 12 %程度糖化率が低下するとされている（Hideno et al., 2008）ので、仮に EFB でも同じ比率で差があるとすると、ボールミル処理では糖化率が 60 %程度になる可能性がある。いずれにしても新鮮な材料を使用することでより高い糖化率が得られることが明らかになった。なお 0 サイクル（無処理）でもある程度糖化が起きているのは、工場での高温蒸気処理が一定の前処理効果を示した可能性が考えられる。

MF についても同様に糖化実験を行ったが、糖化率は最大で 33.0%で、新鮮な材料を用いても糖化率は極めて低いことがわかった。DC については既にペースト状になっているため、前処理無しで直接酵素糖化を行い、44.9 %のグルコース回収率を得た。DC は糖化率が低く、グルコース含量も少ない（14.0%）ため、得られるグルコースの

絶対量は 63mg/g と少量であった。ただ前処理を必要としないことは利点である。

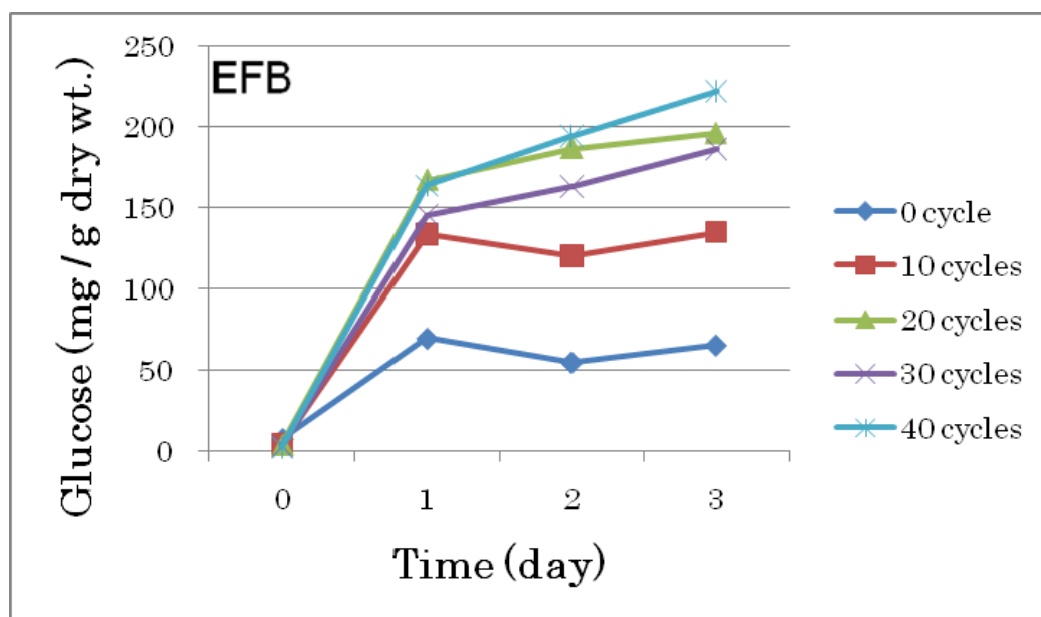


Fig. 3.4 Glucose recoveries from oil palm EFB with different cycles of wet disk milling pretreatment and enzymatic hydrolysis

2章で報告した、ポテンシャル推計値が最も小さくなる Case C₂ での EFB、稲わら、バガスから生産可能なエタノール量によるマレーシアのガソリン消費量の代替可能率は 2.2 %である。EFB に対して、今回マレーシアで行った実験により得られた高い糖化率を適用して再計算すると、この値が 2.8 %に向上した。また MF については、前述のようにボイラーの効率を向上させることでエタノール原料用に使用可能な余剰分が発生する事が期待できる。ボイラーの改善は技術的には容易であるが、投資が必要なため直ちに広くは実施できないと考えられるので、MF の 10 %が余剰として利用できるようになると仮定し、今回得られた糖化率と MF のグルコース含量から MF を利用することによるエタノール生産の増加量を計算すると 3,820 KL となった。これを含めても国内ガソリン消費量の代替可能率は 2.3 %と、0.1 %増加するだけであった。

以上からマレーシアでは、現時点でエタノール原料として使用できるバイオマスは EFB にほぼ限定されるが、それだけでは資源の利用可能度を最も厳しく設定した場合、国内ガソリン消費量の 3 %程度しか代替できないことが明らかになった。そこで EFB からより多くのエタノールを生産する方策の 1 つとして、2.2 では除外したキシロース

からのエタノール生産について検討することにした。

農業残渣はヘミセルロースの主要構成糖として多量のキシロースを含有しており、EFB の場合約 250mg/ g とグルコースの 60 %程度の量のキシロースが存在するが、通常の *S. cerevisiae* では発酵することができない。*S. cerevisiae* はキシロースは代謝できないが、その異性体であるキシリロースは代謝できるので、キシロースをキシリロースに変換する代謝系の酵素遺伝子を遺伝子操作により導入すればキシロースを利用できるようになる。これは、キシロースをキシリトールに還元するキシロース還元酵素 (xylose reductase: XR) と生成したキシリトールをキシリロースに変換するキシリトール脱水素酵素 (xylitol dehydrogenase: XDH) の 2 つの酵素遺伝子の導入により可能になる。世界の複数の研究室がこの戦略に基づいて遺伝子組み換え *S. cerevisiae* を作成することに成功し、キシロースのエタノールへの変換が可能になったが、中間代謝産物のキシリトールが蓄積するなどの現象が起き、エタノールへの変換効率が悪いことが問題になっている (Hahn- Hägerdal et al, 2007-1)。これは XR の反応に関与する補酵素が主として NADPH であるのに対し、XDH では NAD(+)であるため、補酵素の不均衡が起こることが原因と考えられる。この問題に対して京都大学ではタンパク質工学により補酵素特異性を NADP(+)に改変した XDH を作成した (Watanabe et al., 2005)。この技術により、2 つの酵素が同じ補酵素を利用することで補酵素のリサイクルが可能になり、全体の反応が円滑に進むものと予想された。そこで産業技術総合研究所は京都大学との共同研究で、この改変された酵素の遺伝子を *S. cerevisiae* の実用株に導入することにより、キシロースからのエタノール生産性が向上した酵母株を開発する事に成功した (Matsushika et al., 2008-1, 2)。ここでは 2.2 で実験を行って得られた EFB からのキシロースの回収率と、この改変酵母株によるキシロースからの発酵収率を基に、EFB のキシロースを利用する場合のエタノールの増産効果の推定を行った (Table. 3.3)。資源の利用可能性を低位とした Case C の数値をベースにキシロースも利用する場合 (Case D) のポテンシャルを推定した。なお参考のため、他のオイルパーム生産国であるインドネシア、タイについての推計値も記載した。これにより EFB からの可能エタノール生産量が従来の約 1.6 倍に増加した。これよりマレーシアの場合、国内ガソリン消費量の代替可能率は最大 4.4%まで向上させることができると推定された。

Table 3.3 Possible ethanol production potential from EFB considering availability without (Case C) and with (Case D) xylose utilization

Country	Crude Palm Oil Production (10 ⁶ t)	Estimated amount of total EFB (10 ⁶ t)	EFB Amount Considering Availability (10 ⁶ t)	Ethanol Production Potential (10 ³ KL)	
				Case C	Case D
Malaysia	15.88	6.19	3.72	308	481
Indonesia	16.05	6.26	3.76	304	486
Thailand	0.86	0.34	0.20	16	26
Total	32.79	12.79	7.68	629	994

なおマレーシアのオイルパーム栽培面積は年率 2－3％で増加しており、これに応じて上記残渣の発生量も増大するので、これは将来のエタノール生産ポテンシャル増加の要因になる。

3.4 インドネシアにおける生産可能性の検討

インドネシアはマレーシアと並ぶパーム油の世界の 2 大生産国であり、オイルパーム由来の残渣が大量に発生することはマレーシアと同じである。しかしインドネシアはイネ、サトウキビ、キャッサバのいずれも ASEAN 内では 1、2 位の生産量を持つ点がマレーシアとは異なる。また現在までのところ明確な燃料エタノール政策を打ち出していないマレーシアと異なり、インドネシア政府は 2015 年に国全体で E10 を実施する計画を持っており、そのために必要なエタノールは 278 万 KL (NEDO、2008-3: この値は体積比による 10％分と考えられる) とされている。

インドネシアは砂糖の輸入国ではあるが、国内でのサトウキビ増産が行われており、それに伴いモラセスの生産も増加していて、2006 年からはモラセスの純輸出国になっ

ている。そのため余剰分のモラセスをエタノール原料にすることが現実的である。政府はキャッサバからのエタノール生産も予定しているようであるが、インドネシアはキャッサバデンプンの輸入国でもあり、エタノール用にどの程度増産できるかどうかは不透明である。インドネシアは2億2000万人を超える巨大な人口を持ちトータルとしては食料輸入国であるので、食用資源のエタノール原料用としての利用には問題があり、農業残渣使用の必要性が大きい国と考える。

そこで、政府が目標とするガソリンの全面E10化に必要な量のエタノールを、2006年と2015年において、余剰モラセスと農業残渣から供給できるかどうかを検討した（Table 3.4）。2006年については、余剰モラセスから生産可能なエタノールはわずかであったが、2.2で推定したポテンシャル推計値が最も小さくなるCase C₂での3種の農業残渣から生産可能なエタノール量を加えることでE10化に必要なエタノール量の93%を供給することが可能であった。また2015年に関しては、サトウキビ、イネ、パーム油の各生産量、およびモラセスの生産量から需要量を引いた余剰量が、現在の割合で増加すると仮定すると（Case 1）、2015年のエタノール必要量の97%を供給する事が可能である。しかし農業生産が現在の率のまま増加する事は、特に急激に増加しているオイルパームの場合、土地の制約もあり難しいことも考えられる。そこで農産物生産量の増加率が現在の1/2で2015年まで推移する仮定で計算すると（Case 2）、エタノール生産量が減り、必要量の72%しか供給できないことになった。それで、仮に資源の利用度を上げるケースを想定してみると、EFBと稲わらについて、資源の利用度を1.5倍（これは2.2での資源の利用可能率の高位の数字に対応）にする（Case 3）ことで、286万KLと、2015年での予想必要量を上回るエタノールが生産可能であることが示された。バガスは工場のエネルギー源として有効利用されているために、3種の残渣の中では利用度を上げることが最も難しいと考えられるが、この場合はバガスの利用度を上げなくても対応できるという結果になった。

今までは資源の利用可能率を設定してどのくらいのエタノールが生産可能であるかを論じてきたが、この場合のように目標値が決まっている場合は、逆に資源の利用可能率をいくらにするべきかという提言もできるわけである。

Table 3.4 Ethanol production potential (in 10³ KL) from excess molasses and agricultural residues in Indonesia, for 2006 and 2015 (with three assumptions)

	Excess molasses	Rice straw	Bagasse	EFB	Total	Necessary volume for mandatory E10
2006	94	1,030	96	308	1,528	1,650
2015 (Case1)	209	1,354	175	955	2,693	2,780
2015 (Case2)	127	1,185	130	551	1,993	
2015 (Case3)	127	1,778	130	826	2,861	

Case 1: for higher agricultural production

Case 2: for lower agricultural production

Case 3: for lower agricultural production, with increased resource availability

3.5 オイルパーム幹に含まれる糖類からのエタノール生産について

オイルパームの幹には可溶性糖類であるスクロース、グルコース、フラクトースが含まれていることは以前から報告されていたが (Henson et al., 1999)、特段注目されていなかった。しかし近年、NEDO のプロジェクトにおいて、国際農林水産業研究センターを中心とした研究グループが、オイルパーム幹を搾汁する事により得られる糖液からエタノールを生産する研究開発を行い (NEDO ほか、2007-2, 2008-1)、そのポテンシャルが大きいことを報告した。これによると 1 本のオイルパーム幹から 107.8 kg の可溶性糖類が得られ、平均栽植密度を 142 本/ha とし、エタノール生成量を理論収率の 70% と仮定した場合、6.93KL/ha のエタノールが生産可能とされている。

オイルパームは栽植後 25 年程度経過すると油脂の生産性が落ちるため、木を伐採して再植が行われる。実際に利用可能な幹はこの更新時に伐採されて発生するものであるが、マレーシアにおける 2007 年の再植面積は 77,934 ha とされており (NEDO ほか、2007-2,)、これと上記の ha 当たりの生産量から、マレーシア全体でオイルパーム幹が

ら生産可能なエタノール量は年間約 54 万 KL と推定された。この量を第 2 章で行ったようにガソリン消費量とエネルギー基準で比較すると、マレーシアの全ガソリン消費の 3.3% を代替できるという結果になった。

もちろん伐採される全ての幹から糖類を回収するのは困難と考えられる。特に搾汁については、オイルパーム幹に適した搾汁用装置類がこの NEDO 事業で開発されたところであり、これを量産して普及させるには少なくとも数年単位の時間がかかると推測される。ただしマレーシアにおけるオイルパームの再植面積は年による変動はあるものの今後増加傾向にあり、2010 年代の平均では 10 万 ha/ 年程度の伐採が予想されているので、この技術の普及が予定される 2010 年代においては、ある程度の量のエタノールがオイルパーム幹から回収される糖類から生産されるものと期待される。また搾汁後に残る残渣を糖化してエタノール原料として利用することも考えられる。

3.6 まとめ

- ・オイルパーム産業からは多様な残渣が排出されているが、その中では、現状の利用度が低い EFB が最もエタノール原料として有望である。マレーシアの場合、資源の利用度を最も厳しく推計した場合でも EFB を中心とした残渣からのエタノールで、ガソリン消費量の 2.8 % を代替できるポテンシャルがある。仮に EFB 中のキシロースも発酵原料として利用できるとすると、エタノール収量が 1.6 倍に増加し、代替可能率は 4.4 % になる。
- ・MF、DC は今後余剰量、発生量が増加してくる可能性はあるが、これらによるエタノール増収効果は小さいと予想される。
- ・インドネシアでは EFB だけでなく稲わら、バガスも利用する事で現状でも全国の E10 化に必要な量のエタノールをほぼ生産できるポテンシャルがあり、今後の農業生産の増加によっては、2015 年でも E10 用のエタノールを供給できる可能性がある。
- ・木の更新の際に発生する廃パーム幹に含まれる発酵性糖類は、エタノール原料としての利用が今後有望と考えられる。

第4章 他のアジア諸国および実用化についての検討

4.1	他のアジア諸国についての検討-----	63
(1)	タイ-----	63
(2)	ベトナム-----	64
(3)	フィリピン-----	65
(4)	その他の東南アジア諸国-----	66
(5)	インド-----	66
4.2	稲わらの収集と野焼きについて-----	67
4.3	他の資源の利用-----	68
4.4	GHG 排出量削減効果-----	70
4.5	オンサイト酵素生産を中心とするコスト低減に対する検討-----	71
4.6	まとめと展望-----	76

第4章 他のアジア諸国および実用化についての検討

4.1 他のアジア諸国についての検討

(1) タイ

タイはサトウキビ、キャッサバについては ASEAN 内での最大生産国であり、イネの生産も多い、農業資源が非常に豊かな国である。これらのいずれの農産物もエタノール原料として使用可能ではあるが、イネは主食および輸出用として重要であり、価格がキャッサバより高い。デンプン含量を考慮し、生産可能なエタノール 1L 当たりの原料価格の比較例では、キャッサバが 6.8 パーツ/L であるのに対して、破碎米を用いても 16.2 パーツ/L と、2 倍以上のコストになる (Re-focus, 2004) ことが報告されている。従って、デンプン系のエタノール原料としてはもっぱらキャッサバが使用されている。

世界最大のサトウキビ生産国であるブラジルでは、サトウキビは砂糖用とエタノール用に区別されており、サトウキビジュースから直接エタノール生産が行われているが、タイの場合、サトウキビは基本的に砂糖生産が目的であり、エタノールは副産物であるモラセスを原料に生産されている。

タイ政府は燃料用エタノールの生産・利用政策を推進しており、既に 2004 年から E10 燃料の普及が始まり、2011 年に全てのガソリンを E10 化する方針が打ち出されている。タイ政府は必要なエタノールを国内のモラセスとキャッサバを原料として生産するよう計画していて、非食用資源からの生産は現時点では特に考慮されていない。現時点ではモラセスからの生産が中心であるが、将来的な増産分の原料には主としてキャッサバを使用するように計画されている。これはタイでは厳格な砂糖管理政策が行われており、サトウキビ価格や販売量が政府に管理されて自由度が少なく、価格安定のために工場の新設は困難であり、副産物であるモラセスだけを増産できない、という事情がある。一方、キャッサバは乾燥に強く土壌もあまり選ばないため他の作物に適さない土地でも栽培でき、タイでは東北地方を中心に 100 万 ha 程度の作付がある。

2009 年 10 月現在のタイにおける燃料用エタノール生産能力は 250 万 L/ 日 (タイではエタノールの生産、消費のいずれにおいても、データは L/ 日の単位が使用されているので、以後タイについてはこの単位を用いる) である (Jenvanitpanjakul and Bhandhubanyong, 2009) ので、全量 E10 を実施するのに必要なエタノール量 300 万 L/

日にかなり近い供給能力がある。2.2 で推計した 3 種の農業残渣からのエタノール生産ポテンシャルは最も量が少ない Case C₂ では 206 万 L/日にとどまり、ポテンシャル的にも残渣を使用する必要性は高くない。

従って、タイで農業残渣からのエタノール生産を行うには、現状のモラセス、キャッサバからの生産に比べて何かの優位性を示す必要がある。本来農業残渣等の非食用資源を使用する意義は食料と競合しない点にあるが、サトウキビではモラセスという副産物を使用すること、キャッサバは生産物の 8 割程度が輸出されている商品作物で自国の食料供給にはあまり影響しない、という状況から、タイの場合この点は直接的には重要性が認識されにくい。

1 つ考えられるのは今後の輸出も含めた増産に対する資源確保である。タイ政府が認可した燃料用エタノール工場リストによると、今後操業を開始する予定の工場が 6 つあり、これらを加えると、生産能力は約 570 万 L/日になると計画されている。これはタイのガソリン消費量のほぼ 20%に当たり、政府が E10 に続いて開始した E20 を全てのガソリンに適用する際の量に匹敵する。ただ今後操業予定の工場はほとんどキャッサバを原料にする計画になっているが、タイでも新たな耕地の開拓は困難であり、キャッサバの増産には単位面積当たりの収量増で対応する考え方になっている（斎藤・脇谷、2009-1）。新品種の導入などで増収を実現する計画だが、これがうまくいかない場合、E20 の実現に支障を生じることもあり得る。またキャッサバ、サトウキビとも農作物であるので、年による生産量の変動があり、特にタイのサトウキビは生産量の年次変動が非常に大きく、これに伴って原料価格も変動する。このような不安定要素を緩和するために、一定量の非食用資源を原料にするという考え方もあり得るであろう。

その他、優位性を主張できる可能性がある要因として、GHG 排出量削減、低コスト化があるが、これらについては 4.4、4.5 で述べる。

（2）ベトナム

ベトナムはタイを上回るイネの生産量があり、サトウキビ、キャッサバについてもそれぞれタイの 1/3 程度の生産がある。現時点では燃料用エタノールの生産はほとんどないが、ベトナム政府は 2015 年には 25 万 t の E5 燃料を使用する計画を持ち（Man, 2009）、このために約 1.5 万 KL のエタノールが必要になる。タイと同様にモラセスと

キャッサバからのエタノール生産が考えられるが、キャッサバについては現在生産の約半量が国内消費され、残りの半量はチップの形で輸出されていて、その 90%は中国向けである。キャッサバチップは中国ではエタノール（飲料用を含む）原料、飼料として使用されているが、中国でトウモロコシなどの穀物からの新規のエタノール生産プロジェクトが禁止されたこともあり、エタノール原料用のキャッサバチップの需要が急増している。2009 年 1~8 月のベトナムのキャッサバの輸出量は前年比 70 %の増加を示し、価格も 180 USD / t まで上昇している（VOV News, 2009）。1 kg のチップを作るのに 2.5 kg 程度の生イモを必要とする（加藤ら、2007）ので、生イモ価格は 70 USD/t = 0.07 USD/kg 程度になるが、これによるとエタノール 1L 当たりの原料コストが 0.4 USD 程度と高コストになってしまう。ベトナムは中国とは地続きで輸送し易いという利点もあり、中国向けのキャッサバ輸出量は今後も増加すると予想されるので、キャッサバを原料としたエタノール生産には問題がある。

モラセスはベトナムでは飲料用エタノール原料とグルタミン酸ナトリウム原料にそれぞれ約半量ずつ、使用されており現状では余剰が無いので、今後サトウキビの増産に伴い発生する余剰分のモラセスが当面のエタノール原料として想定される。ベトナムではタイと異なり、サトウキビの栽培や砂糖の販売には規制が無いため、サトウキビの作付面積が農民の意思によって変化し易いこともあり、サトウキビの生産量は不安定であり、現在の水準から大きく増産されるかどうかは不確定である。

ベトナムでは現在は燃料エタノールの生産がほとんど無くこれから増産を計画する段階であり、上記のように従来型の原料については必要量を供給できるかどうか不確定要素がある。2.2 での推計から、ベトナムでは最も推計値が小さくなる Case C₂ の場合でも、稲わらとバガスからのエタノールで国内のガソリン消費の 13 %を代替できるポテンシャルがあるので、コスト的に競争力を持てれば、これらの農業残渣からのエタノール生産が行われる可能性があると考えられる。

（3）フィリピン

フィリピンでは 2009 年から E5 が義務化され、さらに E10 も目指すとされている。全量 E5 化のためには 23 万 KL のエタノールが必要（NEF、2009）と予想されているが、現在の生産量は少なく、輸入の必要が生じる見込みである。フィリピンは砂糖の輸出国であり、燃料用エタノールの原料もモラセスを想定しているが、仮に現在輸出

されている分のモラセスが利用可能と考えた場合でも、生産可能なエタノールは5万KL程度である。フィリピンはキャッサバデンプンの輸入国であるだけでなく、世界最大の米輸入国でもあり、食料の自給ができていない中では、インドネシアと同様に農業残渣をエタノール原料に使用する必要性が高い。2.2で推計した3種の農業残渣からのポテンシャルは、最も推計値が小さくなるCase C₂の場合でも38.3万KLあり、全量E5化に対応できる。なお、フィリピンではオイルパームは栽培されていないが、ココヤシはインドネシアと並び世界の1/4程度のシェアを持つ大生産国であるので、フィリピンではココヤシ残渣の利用を検討する事が重要であろう。

(4) その他のASEAN諸国

カンボジア、ラオス、ミャンマーの3か国では燃料用のエタノール生産は行われていない。いずれも農業は稲作中心であるが、カンボジアではキャッサバ、ミャンマーではサトウキビの生産があり、これらからのエタノール生産は可能と考えられる。しかし、これらの国ではまだ自動車の普及率が低くてガソリン需要が少ない一方、電化率が20~35%と低い水準にとどまっているので、農業残渣のエネルギー利用を考える場合、エタノールよりも発電を優先すべきかもしれない。

(5) インド

インド政府は2002年からE5燃料の導入を開始し、2006年から全国でのE5導入を開始した。このために必要なエタノールの量は2008年のガソリン消費量に基づくと、77万KLになる(Sukumaran et al., 2009)。インドでもエタノール生産はモラセスを原料にして行われているが、燃料用の生産量は2008年で25万KL程度とされており、現状では完全E5化に必要な量を満たしていない。今後E10燃料導入の計画もあり、燃料エタノール需要は確実に増加することが予想されるが、巨大な人口をかかえ、かつ貧困層の割合が高い状況では、デンプン作物のエタノール原料としての利用は考えにくく、農業残渣利用の必要性が高いことをインドの研究者も指摘している(Sukumaran et al., 2009)。2.2で示したように、最も推計値が小さくなるCase C₂の場合でも、インドでは稲わらとバガスからのエタノールで国内のガソリン消費量の約20%の代替がエネルギーベースで可能であり、農業残渣のポテンシャルは大きい。例えば、Case C₂でのバガスからだけでも約100万KLのエタノールが供給可能で、全面E5化に必要な

量を上回っている。

4.2 稲わらの収集と野焼きについて

本研究で主に対象とした3種の農業残渣の中で、バガス、EFBはそれぞれ製糖工場、パームオイル工場で集中して発生するので、収集が容易である。しかし稲わらは通常収穫後も耕地に残り、何らかの目的が無いと運び出されることは無い。本研究では耕地で野焼きされる稲わらを利用可能と考え、この分はエタノール原料用に使用可能であるという考え方でポテンシャル推計を行ったが、実際に使用する場合は稲わらを収集してエタノール工場まで運搬するためのエネルギー、コストが必要になる。この点で、イネの残渣としては、籾すり過程で発生する籾殻の方が収集が容易で好ましいことになるが、籾殻は資源量が稲わらの数分の1で少ないこと、一般に稲わらよりリグニン含量が多く、エタノール生産が難しくなる可能性があることから、本研究では稲わらを対象とした。

稲わらは、かさ比重が低くそのままでは輸送効率が悪いので、ベール化し圧縮して密度を上げて輸送することが好ましい。日本でのこの方式による試算例では、エネルギー的には収集に48 MJ/ 10a、運搬に431 MJ/ 10aを必要とし、エタノール生産のエネルギー収支である(+)1,169 MJ/ 10aの1/3以上を占めること(佐賀ら、2008-1)、コストについては収集運搬の合計で26.6 円/ kgかかり、エタノール原料として求められるコストの2倍以上の水準であること(佐賀ら、2008-2)が報告されており、まだ改善の必要がある状況である。アジア諸国では一般にベール化は装置が高いこともあり早期の普及は難しいと考えられるが(Binod et al, 2009)、タイではこのシステムの研究が行われているようである(Suramaythangkoor and Gheewala, 2010)。

このように、収集・輸送の必要性は稲わらを実際に使用する場合の障害になると考えられるが、一方野焼きによる大気汚染の影響も深刻である。一例として中国でのイネ、コムギ、トウモロコシわらの野焼きにより発生する有害物質が中国全体での排出量に占める割合は、揮発性有機物質で約11%、一酸化炭素で7.7%、窒素酸化物で3.6%と報告されている(Cao et al, 2008)。またこの3種のわらの中では、稲わらが最も窒素酸化物を発生しやすく、重量当たりではトウモロコシの1.4倍、コムギの1.6倍の量が発生することも報告されている(Zhang et al, 2008)。野焼きされるわらの転用には、大気汚染を軽減するための外部効果が含まれ、この点を考慮した経済的な優

遇措置をとることも政策としてあり得ると思われる。

4.3 他の資源の利用

本研究で主として対象とした稲わら、バガス、およびオイルパーム廃棄物以外にも多様な農業残渣が発生している。例えば東南アジアでの主要作物に関しては、イネの籾殻、トウモロコシの茎、サトウキビの梢頭部・枯葉（収穫時に切断する先端の部分と圃場に残る葉、英語では *top and leaf*）などがある。文献値からこれらの RPR を、籾殻（乾重） / 籾（乾重） = 0.23 (Yokoyama et al., 2000)、トウモロコシ茎（乾重） / トウモロコシ穀粒（乾重） = 1.0 (Lai, 2005) かつトウモロコシ穀粒の中位の水分含量を 18 % (Weinberg et al., 2008)、およびサトウキビの梢頭部・枯葉（乾重） / サトウキビ（湿重） = 0.12 (Lai, 2005) と設定して資源量を計算すると Table 4.1 のようになる。RPR から、籾殻は稲わらの 15~23 %、サトウキビの梢頭部・枯葉はバガスの 80 % の量があり、またトウモロコシの茎については稲わらと比較して、中国で 60~90 %、ASEAN 合計で 11~17 %、インドで 8~12 % 程度の量がある。本研究は、基本的に実際の実験により得られた糖化率データを用いてポテンシャル推計を行うことを特徴としているので、エタノール生産量の推計までは行わないが、これらの残渣からも稲わら、バガスと同程度の効率でエタノールが生産できると仮定すれば、稲わら、バガス由来の生産量に対して、上記の割合でエタノールが増産できることになる。

Table 4.1 Amounts of rice husk, sugarcane top and leaves, and maize straw generated in China, India, and ASEAN countries

Country	Rice Husk (10⁶ t)	Sugarcane Top and Leaves (10⁶ t)	Maize Straw (10⁶ t)
China	43.1	12.6	124.4
India	32.6	35.1	12.4
Vietnam	8.4	2.0	3.2
Cambodia	1.5	0.0	0.3
Laos	0.6	0.0	0.4
Thailand	6.8	6.0	3.1
Myanmar	7.2	0.9	0.8
Malaysia	0.5	0.1	0.1
Indonesia	12.7	3.2	9.5
Philippines	3.6	3.0	5.0
Sum of ASEAN	41.3	15.2	22.2

このほか東南アジア地域における主要作物の残渣としては、キャッサバの茎やココヤシの殻、最近バイオディーゼル燃料用原料として注目され栽培面積が増加しているジャトロファの残渣などがあるが、これらは稲わら、バガスとは性状が異なるので、エタノール生産ポテンシャルの推計は、仮定としても実際の実験データが得られるまでは控えたい。なおキャッサバからデンプンを採取した搾りかすであるキャッサバパルプ（キャッサババガスと呼ばれることもある。）も工場で発生する収集が容易な残渣であるが、乾燥重の 60 %程度をデンプンが占めており、15～19 %程度存在するセルロースと合わせて糖化した後発酵する事により、350 ml/ kg（乾燥重）程度のエタノールが生産できることが最近相次いで報告された（Kosugi et al., 2009; Rattanachomsri et al., 2009）。キャッサバはデンプン製造以外に、チップ、ペレットにも加工されるので、

単純にキャッサバ生産量からエタノール生産ポテンシャルを推計する事は出来ないが、タイの場合は生産量の 55 %がデンプン用であり（斎藤・脇谷、2009-2）、1t (湿重) のキャッサバ根茎から 135 kg (乾燥重) のキャッサバパルプが得られる（NEDO ほか、2006）ので、タイで発生するキャッサバパルプ全量から上記の変換効率でエタノールが生産できるとすると、約 59 万 KL のエタノールが生成可能になる。これは 2006 年のタイのガソリン消費量に対して、エネルギーベースで 5.4 %の代替が可能な量である。キャッサバパルプは主成分がデンプンでありセルロースより糖化が簡単で酵素コストもかからないことから、エタノール原料として今後使用が有望な資源と考えられる。ただし、キャッサバパルプは高温のタイでは急速に腐敗するので、デンプン工場にエタノール生産設備を併設するシステムが望ましいであろう。

4.4 GHG 排出量削減効果

エタノールによるガソリンの代替は GHG 排出量削減が主目的の 1 つであり、代替したガソリンの部分は確実に二酸化炭素排出量削減に寄与するが、真の削減になっているかどうかの評価には、エタノール生産過程における排出を考慮したライフサイクルアセスメント（LCA）が必須である。作物栽培における排出を含めたエタノール生産による排出量のタイにおける研究が報告されており（Amatayakul and Berndes, 2007）、それによると、モラセスからの生産では 0.4 kg CO₂ equivalent (e) / L、キャッサバからは 0.96 kg CO₂ e / L である。これを熱量からガソリン 1L 当たりに換算するとそれぞれ、0.65 kg CO₂ e / L、1.55 kg CO₂ e / L となった。ガソリンの well-to-wheels の排出量は 2.40 kg CO₂ e / L であるので、エタノールの使用による GHG 排出量削減の効果が認められる。一方、農業残渣等から生産する場合は、製造時の副産物からエネルギー回収を行う前提では 0.87 kg CO₂ e / L（ガソリン換算）の GHG 排出削減効果があると報告されている（佐賀ら、2009）が、これはモラセスよりは劣りキャッサバとほぼ同等の効果である。一方、最新の報告ではキャッサバからのエタノール生産はエネルギー的にはマイナスであるという結果も出ており（Papong and Malakul, 2010）、LCA についてもより精密な解析が望まれる。

農業残渣等のリグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産はまだ技術が完全に確立していないため、まだシステムの設定条件により評価が大きく変わってしまう状態にある。今後、技術開発による効率化と共に、GHG 削減に有効なシステム化の

研究も重要である。また作物を原料にして増産を図る場合、土地利用変化による GHG 排出への影響も考慮する必要がある。

4.5 オンサイト酵素生産を中心とするコスト低減に関する検討

本研究で対象としたアジア諸国は一般に農業残渣からのエタノール生産ポテンシャルが大きく、食用資源を使用しなくても国内のガソリン消費の相当量を代替できることを示してきた。しかし実際に農業残渣からのエタノール生産が商業的に行われるかどうかについてはコストが鍵を握っている。エタノールはガソリン代替燃料であり、しかも体積当たりの発熱量はガソリンより少ないので、ガソリン以下の低コストが求められる。またモラセスやキャッサバなど従来型原料からの生産に対して競争力を持てなければ、大量に普及する事は難しいであろう。第1章で述べたように、農業残渣などのリグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産にはまだ技術的課題が残り、真に商業的と言える規模での生産も行われていないので、現状では従来型原料からのエタノール生産と直接比較できるレベルでのコスト計算を行うためのデータも不十分な状態と考えられる。

従来型原料からのエタノール生産コストについては、タイでの試算データ（対象期間：2002-2005 年）があり（Yoosin and Sorapipatana, 2007）、それによるとモラセスからの生産では 19.4 バーツ/L、キャッサバからでは 11.6 バーツ/L とされ、キャッサバの方が低コストである。これは原料コストが製品エタノール 1L 当たりで、キャッサバが 6.9 バーツであるのに対し、モラセスでは 15.8 バーツであるためである。いずれにしてもコスト全体に対する原料コストの占める割合が大きく、キャッサバでは 59 %、モラセスでは 81 %に達している。農業残渣を使用すれば原料コストは大幅に削減できると考えられ、原料以外のコストを含めて現在の生産コストより安くできれば、現時点でも生産する意義があることになる。農業残渣からのエタノール生産はまだ技術が確立できていないこともあって推定は難しいが、一例としてタイで行われているモラセスとバガスの両方からエタノールを生産する NEDO のモデル事業の資料では、原料費の減少幅が設備費・操業費の増加を上回り、モラセスを原料にした場合と比べて、全体のコストが 19 %低減されると試算している（NEDO、2008-3）。

リグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産コストについては、日本ではバイオ燃料技術革新計画（2008 年）により、免税後の国内ガソリン価格との競合の観

点から 100 円/L、将来的には国際的なガソリン価格との競合のために 40 円/L の目標値が設定されている（鮫島、2009）。一方、現状のコスト解析として、産業技術総合研究所は日本における稲わらからのエタノール生産のコスト試算を報告しているが（澤山、2008）、それによると現状では、全体コストに対して原料費は 24%であるのに対し、糖化酵素のコストが 64%に達している。従って酵素コストの低減が最重要課題である。そのためには優れた前処理技術による酵素使用量の低減や酵素リサイクル技術などの開発が期待されるが、もう 1 つのアプローチとして酵素を酵素メーカーから購入するのではなく、エタノール生産者が自らエタノール生産の場所で生産するという、オンサイト酵素生産という考え方がある（Fujimoto et al., 2008）。これにより酵素メーカーの利潤の部分をカットできるだけでなく、エタノール生産の場所で生産する事から輸送や貯蔵、およびそれらのために必要だった加工・製品化の費用も低減でき、大きなコスト削減効果が期待できる。産業技術総合研究所の試算でも、オンサイト酵素生産ができれば、酵素コストを 1/3 程度に低減でき、全体に占める酵素コストの割合も 35%にまで低下すると報告されている。

しかしオンサイト酵素生産の問題点の 1 つは、セルラーゼなどの糖化酵素は工業的には糸状菌の培養により生産されているが、酵素メーカーが自ら持つ優良な酵素生産菌を無料で使用させてくれるとは考えられないため、何らかの対価を払うか、もしくはエタノール生産者が自ら優れた生産菌を持つ必要があることである。自ら生産菌を持つためには、自然界からスクリーニングを行うことは 1 つの有効な方策である。筆者らはセルラーゼおよびヘミセルラーゼ生産菌として有望な糸状菌を最近新たに東京都内の土壌から単離している（矢野ら、2009）。なお現在工業的に使用される糖化酵素生産菌の生育至適温度は 25~30℃程度であるが、東南アジアなどではより高温で生育できる酵素生産菌が求められる。従ってオンサイト酵素生産を行うためには、生産する国で酵素生産菌を探索・開発する事が好ましい。東南アジアなどの熱帯地域は一般に生物資源が豊かであり、またいくつかの研究機関では糸状菌のカルチャーコレクションも整備されているので、優良な酵素生産菌が単離されることが期待される。中国では、山東大学で独自に単離されたセルラーゼ生産菌 *Penicillium decumbens* があり（Qu, 2008）、この菌によるセルラーゼ生産のための研究が行われている（Sun et al., 2008）。

優良な菌株が見つければ、それを改良して酵素生産性をさらに高めることが可能

である。一例として、1.3 で述べたセルラーゼ生産菌 *A. cellulolyticus* は、親株 (Y-94) の突然変異処理により生産性が向上した TN 株によって明治製菓㈱による商品化に至り、この市販酵素を第 2 章、第 3 章での糖化実験にも使用したが、筆者も関与した最近の研究では、2 代目の変異株 (C-1) を突然処理することにより酵素生産性が更に向上した株 (CF-2612) を取得でき (Fang et al., 2009)、これにより最初の野生株に対して培養液あたりの酵素生産性が 9 倍に増加したことになる (Fig.4.1)。これは一般にセルラーゼの工業生産に使用されている *T. reesei* の実用株と同等の生産性と言える (Table 4.2)。また誘導物質の添加による生産性向上の研究も行われた (Fang et al., 2008)。アジア諸国においてもこのような研究開発により、生産性が高くまた現地での生産に適した酵素生産菌株が開発されることが期待される。

オンサイト酵素生産のもう 1 つの有利性として、安価な炭素源の利用可能性が挙げられる。酵素は有機物であり、多量に生産させるには多量の炭素源が必要である。実験室での酵素生産では炭素源としてソルカフロックなどの精製度が高いセルロース系資材が使用される場合が一般的で、酵素生産性も良いが、実際の生産にはコストが高すぎる。エタノール原料用の前処理されたバイオマスを酵素生産の炭素源に使用すれば、酵素生産用の炭素源を別途用意する必要が無く、低コストでもある。ただし、セルラーゼの生産性は使用する炭素源により大きく変動する事が知られており (Fang et al., 2008)、原料の選択には注意が必要であるが、バガス (Camassola and Dillon, 2009)、コーンストーバー (Juhász et al., 2005) によりセルロースと同等以上の酵素活性が得られることが報告されており、エタノール生産原料用の農業残渣が酵素生産にも使用できる可能性は高い。

strain Y-94 (Wild strain)

(2.0 FPU/ml)

Strain TN

(7.3 FPU/ml)

Strain C-1

(13 FPU/ml)

Improved Strain

CF-2612

(18 FPU/ml)

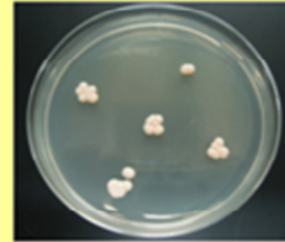
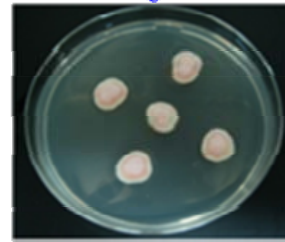
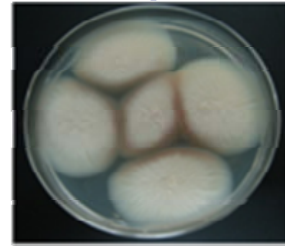


Fig. 4.1 Improvement of cellulase productivity by mutation in *Acremonium cellulolyticus*
(FPU: Filter Paper Unit)

Table 4.2 Comparison of cellulase productivity of *Acremomnium cellulolyticus* with those of *Trichoderma reesei* strains

	<i>T. reesei</i> CL847 (Durand et al., 1988)	<i>T. reesei</i> CDU-11 (安戸, 1989)	<i>A. cellulolyticus</i> CF-2612
Carbon source concentration (%)	7	6	5
FPU (U/mL)	21	19	18
Extracellular protein (g/L)	24	23	18.1
Specific activity (FPU/mg)	0.88	0.83	0.99
Fermentation period (days)	7	7	5
Productivity (FPU/L/h)	140	113.1	150
β-glucosidase (U/mL)	6.3	17.4	40.3

4.6 まとめと展望

第2章で野焼きされるわらからのエタノール生産ポテンシャルを検討した中国と、第3章でオイルパーム残渣からのポテンシャルを中心に検討したマレーシア、インドネシア以外の国について、農業残渣からのエタノール生産の可能性について検討を行った。これらの国は稲作を中心として、サトウキビ、キャッサバも栽培するという農業形態をとっている場合が多く、燃料エタノール生産は余剰のモラセスを原料とする事が想定されている場合が多いが、既にガソリンの E10 燃料化に必要なエタノールをほぼ供給できているタイを除けば、モラセスだけでは原料の不足が予測され、農業残渣使用の必要性が高いと判断される。

本研究で対象としなかった残渣の利用と、GHG 排出量削減効果の評価は、今後アジア地域での農業残渣からのエタノール生産を進める上で、更なる検討、解析が必要な事項である。

稲わらの収集・運搬と生産コストの低減は、残渣からのエタノール生産を実用化する上で必要な技術的課題であり、特にオンサイト酵素生産による酵素コストの低下と、そのために必要な酵素高生産性微生物の現地での開発が重要である。

実際の農業残渣からのエタノール生産として、まず実現可能性が高いのはバガスからの生産と考えられる。これは、バガスは製糖工場で発生するので新たに収集する必要がない事、2章で示したようにバガスの糖化性が良い事、また場所によっては製糖工場に隣接してモラセスからのエタノール生産が行われており、新規な投資が少なく済むこと、等の理由による。EFB も工場で発生するので収集についての問題は少ないが、EFB の酵素糖化やエタノール生産の研究例は少なく、特に酵素糖化率の更なる向上を目指した技術開発が必要である。稲わらは収集・運搬に問題があるが、資源量としては圧倒的に多いので、その利用に向けた技術開発は重要である。当面使用できる分をバガスや EFB からのエタノール生産の副原料的に使用する事が想定されるが、収集・運搬を含めた総合的な利用技術が確立されることにより、2章で述べたエタノール原料としてのポテンシャルが発揮されることが期待される。

第 5 章 結論

5.1 結論-----	78
-------------	----

5.2 結語-----	79
-------------	----

第5章 結論

5.1 結論

アジア地域における効率的なバイオマス利活用システムの構築に貢献する事を目的に、東南アジア、中国、インドにおける農業残渣からの燃料用エタノール生産の可能性の検討を、主として生産ポテンシャルと資源の利用可能性の観点から行った。

(1) ASEAN 諸国、中国、インドにおける稲わら、バガス、EFB からのエタノール生産ポテンシャルを、実際の実験に基づく糖化率データを使用しキシロースの利用を除外するなどの実際的な条件を用いて推定した。また資源の利用可能度を設定したポテンシャル推計も行った。生産可能なエタノールによる各国のガソリン消費の代替可能率を算定した。

その結果、最も値が小さくなる条件で得られた従来よりも1桁小さいポテンシャル推計値を用いても、対象としたアジア諸国では一般に大きなガソリン代替ポテンシャルが認められた。

(2) 中国については、主要穀物であるイネ、コムギ、トウモロコシについて、耕地で野焼きされる分のわらをエタノール生産用に転用可能と考えて、これらからのエタノール生産ポテンシャルを推計した。その結果、これらの野焼きされるわらからだけでも多量のエタノールが生産でき、中国全体のガソリン消費量の10%以上を代替できることを示した。省別では、北部から東北部のトウモロコシ栽培地帯で特に高いガソリン代替可能率を示した。

(3) 東南アジアに特異的とも言える作物であるオイルパームの残渣からのエタノール生産の可能性について、マレーシアとインドネシアを対象に検討を行った。マレーシアでは従来型のエタノール原料の生産に乏しく、オイルパーム残渣利用の必要性が高いが、その中ではEFBが最も利用可能度が高いことが確認された。さらに限られた資源からより多くのエタノールを生産する方策としてキシロースの利用についても検討した。インドネシアはオイルパーム以外にサトウキビ、キャッサバの生産も多いものの、全てのガソリンをE10にするという政府の方針を達成するためにはこれらの資源だけでは不足が生じるが、農業残渣を使用する事で必要量をほぼ供給できることを示した。

(4) その他のアジア諸国についての検討も行うと共に、稲わらの収集、その他の資

源の利用、GHG 排出削減効果、コスト低減についての考察を行った。特に酵素コストの低減が必要であり、そのためには生産国に適した酵素生産菌を開発する事が重要であることを指摘した。

以上のように本研究により、従来よりも実条件的な条件を考慮したエタノール生産ポテンシャルの推計値に基づいても、中国、インド、ASEAN 諸国においては、一般に農業残渣からの大きなエタノール生産とガソリン代替のポテンシャルが認められ、食用資源を利用しなくてもガソリン消費の一定量を代替できることが明らかになった。その実現のためには今後、原料の収集・運搬、糖化酵素のコスト低減などの技術面、および各国の状況に応じた政策面での研究、検討が必要である。

5.2 結語

農業残渣からの燃料用エタノール生産は、地球温暖化の進行が深刻になり、かつ今後のエネルギーや食料の供給に対する不安要因が指摘されている現在の状況で、早期の実現が望まれる技術であり、生産技術の開発だけでなく、その利用・普及についても多様なアプローチからの検討が必要である。

本研究が、対象としたアジア地域における効率的なバイオマス利活用システムの構築の一助となれば幸いである。

本研究についての発表論文

1. Yano, S., Inoue, H., Tanapongpipat, S., Fujimoto, S., Minowa, T., Sawayama, S., Imou, K., Yokoyama, S. 2009: Potential of ethanol production from major agricultural residues in Southeast Asia. *Intl. Energy J.* **10**, 209-214
2. 矢野伸一, 澤山茂樹、井上宏之、藤本真司、美濃輪智朗、芋生憲司、横山伸也
2009: 中国、インド、ASEANにおける稲わら、バガスからのエタノール生産ポテンシャルの推計. 太陽エネルギー, **35** (6), 39-44
3. Yano, S., Murakami, K., Sawayama, S., Imou, K., Yokoyama, S. 2009: Ethanol production potential from oil palm empty fruit bunches in Southeast Asian countries considering xylose utilization. *J. Jpn. Inst. Energy*, **88**, 923-926

引用文献

安戸 饒. 1989: *Trichoderma reesei* によるセルラーゼ生産. バイオサイエンスとインダストリー. **47**, 840-843

Akal, D., Kahveci, K., Cihan, A. 2007: Mathematical modelling of drying rough rice in stacks. *Food Sci. Tech. Intl.*, **13**, 437-445

Amatayakul, W., Berndes, G. 2007: Fuel ethanol program in Thailand: energy, agricultural, and environmental trade-offs and prospects for CO₂ abatement. *Energy Sustain. Dev.*, **11**, 51-66

Arato, C., Pye, E.K., Gjennestad, G. 2005: The Lignol approach to biorefining of woody biomass to produce ethanol and chemicals. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **121-124**, 871-882

Bhattacharya, S.C., Salam, P.A., Runqing, H., Somashekar, H.I., Racelis, D.A., Rathnasiri, P.G., Yingyuad, R. 2005: An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries for 2010. *Biomass Bioenergy*, **29**, 153-166

Binod, P., Sindhu, R., Singhanian, R.R., Vikram, S., Devi, L., Nagalakshimi, S., Kurien, N., Sukumaran, R.K., Pandey, A. 2009: Bioethanol production from rice straw. *Bioresour. Technol.*, in press (Available online)

Camassola, M., Dillon, A. J. P.: 2005 Biological pretreatment of sugar cane bagasse for the production of cellulases and xylanases by *Penicillium echinulatum*. *Ind. Crop Prd.*, **29**, 642-647

Cao, G., Zhang X., Wang, Y., Zheng, F. 2008: Estimation of emissions from field burning of crop straw in China. *Chin. Sci. Bull.*, **53**, 784-790

China Energy Statistical Yearbook 2007:

<http://www.pinggu.org/nianjian/cnny2007/indexeh.htm>

Chen, H., Han, Y., Xu, J. 2008: Simultaneous saccharification and fermentation of steam exploded wheat straw pretreated with alkaline peroxide. *Process Biochem.*, **43**, 1462-1466

Cuiping, L., Yanyongjie, Chuangzhi, W., Haitao, H. 2004: Study on the distribution and quantity of biomass residues resources in China. *Biomass Bioenergy*, **27**, 111-117

Durand, H., Clanet, M., Tiraby, G. 1988: Genetic improvement of *Trichoderma reesei* for large scale cellulase production. *Enzyme. Microb. Technol.*, **10**, 341-346

遠藤貴士、矢野伸一、井上宏之、澤山茂樹 2008: 木質系バイオマスからのバイオエタノール製造技術の現状. *J. Jpn. Inst. Energy*, **87**, 430-437

Fang, X., Yano, S., Inoue, H., Sawayama, S. 2008: Lactose enhances cellulase production by the filamentous fungus *Acremonium cellulolyticus*. *J. Biosci. Bioeng.*, **106**, 115-120

Fang, X., Yano, S., Inoue, H., Sawayama, S. 2009: Strain improvement of *Acremonium cellulolyticus* for cellulase production by mutation. *J. Biosci. Bioeng.*, **107**, 256-261

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) FAOSTAT_Production
<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>

Fujimoto, S., Inoue, H., Yano, S., Sakaki, T., Minowa, T., Endo, T., Sawayama, S., Sakanishi, K. 2008: Bioethanol production from lignocellulosic biomass requiring no sulfuric acid: mechanochemical pretreatment and enzymatic saccharification. *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **51**, 264-273

Gadde, B., Menke, C., Wassmann, R. 2009-1: Rice straw as a renewable energy source in India, Thailand, and the Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation. *Biomass Bioenergy*, **33**, 1532-1546

Gadde, B., Bonnet, S., Menke, C., Garivait, S. 2009-2: Air pollutant emissions from rice straw Open filed burning in India, Thailand, and the Philippines. *Environ. Pollut.*, **157**, 1554-1558

Galbe, M., Zacchi, G. 2002: A review of the production of ethanol from softwood. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **59**, 618-628

Ghose, T.K. 1987: Measurement of cellulase activities. *Pure Appl. Chem.*, **59**, 257-268

阮蔚 2007: 中国におけるトウモロコシの需要変化 ―エタノール等工業需要の急増により加速する輸入国化―. 農林金融、**60**, 485-498

Hahn-Hägerdal, B., Karhumaa, K., Fonseca, C., Spencer-Marins, I., Gorwa-Grauslund, M.F. 2007-1: Towards industrial pentose-fermenting yeast strains. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **74**, 937-953

Hahn-Hägerdal, B., Karhumaa, K., Jeppsson, M., Gorwa-Grauslund, M.F. 2007-2: Metabolic engineering for pentose utilization in *Saccharomyces cerevisiae*. *Adv. Biochem. Engin/Biotechnol.*, **108**, 147-177

Hamelinck, C.N., van Hooijdonk, G., Faaij, A.P.C., 2005: Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass Bioenergy*, **28**, 384-410

Han, Y., Chen H. 2008: Characterization of β -glucosidase from corn stover and its application in simultaneous saccharification and fermentation. *Bioresour. Technol.*, **99**, 6081-6087

Henson, I.E., Chang, K.C., Siti A.M., Chai, S.H., Hasnuddin, M.Y., Zakaria, A. 1999: Oil palm trunk as a carbohydrate reserve. *J. Oil Palm Res.*, **11**, 98-113

Hiden, A., Inoue, H., Tsukahara, K., Fujimoto, S., Minowa, T., Inoue, S., Endo, T., Sawayama, S. 2009: Wet disk milling pretreatment without sulfuric acid for enzymatic hydrolysis of rice straw. *Bioresour. Technol.*, **100**, 2706-2711

樋口修 2008: 穀物価格の高騰と国際食料需給. 調査と情報 (国立国会図書館) 第 **617** 号

Indonesian Palm Oil Association 2009: Palm Oil Statistics 2008, <http://www.gapkiconference.org/download/Palm%20Stats%202008.pdf>

Inoue, H., Yano, S., Endo, T., Sakaki, T., Sawayama, S. 2008: Combining hot-compressed water and ball milling pretreatments to improve the efficiency of the enzymatic hydrolysis of eucalyptus. *Biotechnol. Biofuels*, **1**:2

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2009: IPCC 地球温暖化第四次レポート、中央法規出版、pp. 240-244

Jenvanitpanjakul, P., Bhandhubanyong, P. 2009: Rice and sugar energy complex model.

6th Biomass-Asia Workshop, Hiroshima, Japan

http://www.biomass-asia-workshop.jp/biomassws/06workshop/presentation/18_Peesamai.pdf

Jin, S., Chen, H. 2006: Structural properties and enzymatic hydrolysis of rice straw.

Process Biochem., **41**, 1261-1264

Jin, S., Chen, H. 2007: Near-infrared analysis of the chemical composition of rice straw.

Ind. Crop. Prod., **26**, 207-211

徐潤琪、後藤清和、前澤重禮、三輪精 2002: 中国における粳天日乾燥の適正条件

に関する研究－四川省を対象として－. 農業生産技術管理学会誌, **9**(1), 17-22

Juhász, T., Szengyel, Z., Reczey, K., Siika-Aho, M., Viikari, L.: 2005

Characterization of cellulases and hemicellulases produced by *Trichoderma reesei* on various carbon sources. *Proc. Biochem.*, **40**, 3519-3525

加藤信夫、竹中憲一、岡田美乃里 2007: わが国のでん粉需要に大きな影響を与えてい

るタイにおけるタピオカ産業の現状について (2). 農畜産業振興機構でん粉情報

<http://www.alic.go.jp/starch/world/report/200710-05-02.htm>

Kim, S., Dale, B.E. 2004: Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioenergy*, **26**, 361-375

Kostka, G., Polzin, C., Scharrer, J. 2009: The future of sugar cane in (the) People's Republic of China and India – Supply constraints and expansion potential. *Appl. Energy*, **86**, S100-S107

Kosugi, A., Kondo, A., Ueda, M., Murata, Y., Vaithanomsat, P., Thanapase, W., Arai, T., Mori, Y. 2009: Production of ethanol from cassava pulp *via* fermentation with a surface-engineered yeast strain displaying glucoamylase. *Renew. Energy*, **34**, 1354-1358

- Kuprianov, V.I., Permchart, W., Janvijtsakul, K. 2005: Fluidized bed combustion of pre-dried Thai bagasse. *Fuel Process. Technol.*, **86**, 849-860
- Lal, R. 2005: World crop residues production and implications of its use as a biofuels. *Environ. Intl.*, **31**, 575-584
- Li, H., Yuan, Z., Ma, L., Wu, C. 2009: The status of biomass utilization in China. 6th Biomass-Asia Workshop, Hiroshima, Japan
http://www.biomass-asia-workshop.jp/biomassws/06workshop/presentation/22_Haibin.pdf
- Li, S-Z., Chan-Halbrendt, C. 2009: Ethanol production in (the) People's Republic of China: Potential and technologies. *Appl. Energy*, **86**, S162-S169
- Liu, L., Sun, J., Cai, C., Wang, S., Pei, H., Zhang, J. 2009: Corn stover pretreatment by inorganic salts and its effects on hemicellulose and cellulose degradation. *Bioresour. Technol.*, **100**, 5865-5871
- Ma, H., Liu, W., Chen, X., Wu Y., Yu, Z. 2009: Enhanced enzymatic saccharification of rice straw by microwave pretreatment. *Bioresour. Technol.*, **100**, 1279-1284
- Man, T.D. 2009: Comments on rice and sugar energy complex model –Comparison with status in Vietnam. 6th Biomass-Asia Workshop, Hiroshima, Japan
http://www.biomass-asia-workshop.jp/biomassws/06workshop/presentation/19_TDMan.pdf
- Matsumura, Y., Minowa T., Yamamoto, H. 2005: Amount, availability, and potential use of rice straw (agricultural residue) biomass as an energy resource in Japan. *Biomass Bioenergy*, **29**, 347-354

- Matsushika, A., Watanabe, S., Kodaki, T., Makino, K., Sawayama, S. 2008-1:
Bioethanol production from xylose by recombinant *Saccharomyces cerevisiae* expressing
xylose reductase, NADP⁺-dependent xylitol dehydrogenase, and xylulokinase.
J. Biosci. Bioeng., **105**, 296-299
- Matsushika, A., Watanabe, S., Kodaki, T., Makino, K., Inoue, H., Murakami, K., Takimura,
O., Sawayama, S. 2008-2: Expression of protein engineered NADP⁺-dependent xylitol
dehydrogenase increases ethanol production from xylose in recombinant *Saccharomyces*
cerevisiae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **81**, 243-255
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M., Ladisch, M. 2005:
Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass.
Bioresour. Technol., **96**, 673-686
- NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）、日本産業技術振興協会 2006: タイ
におけるソフトバイオマスからの効率的燃料エタノール変換技術の調査. NEDO 平成
17 年度国際共同研究先導調査事業／研究者派遣型国際共同研究調査事業成果報告書
100007317、pp. 489-534
- NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）、アルコール協会 2007-1: アジア諸
国における未利用バイオマスからの燃料エタノール生産に関わる調査. NEDO 平成 18
年度調査報告書 100010708
- NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）、国際農林水産業研究センター 2007-2:
マレーシアにおけるオイルパーム幹（トランク）からの効率的燃料用エタノール製造
技術の研究開発. NEDO 平成 19 年度成果報告書 10001745
- NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）、国際農林水産業研究センター 2008-1:
マレーシアにおけるオイルパーム幹（トランク）からの効率的燃料用エタノール製造
技術の研究開発. NEDO 平成 20 年度成果報告書 20090000000190

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）2008-2: 未利用農業廃棄物由来セルロース計バイオマスからの燃料エタノール製造に関する調査（インドネシア）.

アジア地域におけるバイオマス関連国際事業に係る成果報告会（平成 20 年 9 月 19 日、川崎）講演資料

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）2008-3: 製糖工場におけるモラセスバガスエタノール製造モデル事業（タイ）の実施状況. アジア地域におけるバイオマス関連国際事業に係る成果報告会（平成 20 年 9 月 19 日、川崎）講演資料

NEF（新エネルギー財団）アジアバイオマスオフィス 2009: フィリピンでE5 が義務化 http://www.asiabiomass.jp/topics/090302_01.html

Ohta, K., Beall, D.S., Mejia, J.P., Shanmugam, K.T., Ingram, L.O. 1991: Genetic improvement of *Escherichia coli* for ethanol production: Chromosomal integration of *Zymomonas mobilis* genes encoding pyruvate decarboxylase and alcohol dehydrogenase II. *Appl. Environ. Microbiol.*, **57**, 893-900

Papong, S., Malakul, P. 2010: Life-cycle energy and environmental analysis of bioethanol production from cassava in Thailand. *Bioresour. Technol.*, **101**, S112-S118

Qu, Y., Zhu, M., Liu, K., Bao, X., Lin J. 2006: Studies on cellulosic ethanol production for sustainable supply of liquid fuel in China. *Biotechnol. J.*, **1**, 1235-1240

Qu, Y. 2008: Cellulolytic enzymes from *Penicillium decumbens* JU-A10 for biorefinery of lignocellulosics. 5th Biomass-Asia Workshop, Guangzhou, China
http://www.biomass-asia-workshop.jp/biomassws/05workshop/program/22_Qu.pdf

Rattanachomsri, U., Tanapongpipat, S., Eurwilaichitr, L., Champreda, V. 2009: Simultaneous non-thermal saccharification of cassava pulp by multi-enzyme activity and ethanol fermentation by *Candida tropicalis*. *J. Biosci. Bioeng.*, **107**, 488-493

Re-focus 2004: Biofuels in Asia, Re-focus, Elsevier Ltd., 2004 May/ June, pp. 44-47

RFA (Renewable Fuels Association), 2009: <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/#E>

佐賀清崇、横山伸也、芋生憲司 2008-1: 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. *J. Jpn. Soc. Energy Res.*, **29**(1), 30-35

佐賀清崇、芋生憲司、横山伸也、藤本真司、柳田高志、美濃輪智朗 2008-2: バイオエタノール生産に向けた稲わら等の収集運搬体系に関する研究.
J. Jpn. Soc. Energy Res., **29**(6), 8-13

佐賀清崇、藤本真司、柳田高志、多田千佳、ベスピャトコ リュドミラ ユリイブナ、バティスタ エルマー、美濃輪智朗 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.
J. Jpn. Soc. Energy Res., **30**(2), 9-14

斎藤孝宏、脇谷和彦 2009-1: タイのタピオカでん粉の生産と流通について(1)
～キャッサバ生産とその変動要因～. 農畜産業振興機構でん粉情報
<http://www.alic.go.jp/starch/world/report/200902-01.html>

斎藤孝宏、脇谷和彦 2009-2: タイのタピオカでん粉の生産と流通について(2)
～キャッサバ生産とその変動要因～. 農畜産業振興機構でん粉情報
<http://www.alic.go.jp/starch/world/report/200903-02.html>

坂木剛、矢野伸一 2006: 可能性広がるバイオマスの水熱糖化／発酵. 月刊水,
48(9), 28-35

Salétes, S., Caliman, J-P., Raham, D. 2004: Study of mineral nutrient losses from oil palm empty fruit bunches during temporary storage. *J. Oil Palm Res.*, **16**, 11-21

鮫島正浩 2009：セルロース系バイオマス由来バイオ燃料の開発．第二世代バイオ燃料の開発と応用展開、シーエムシー出版、pp. 12-21

Sasaki, M., Jojima, T., Inui, M., Yukawa, H. 2008: Simultaneous utilization of D-cellubiose, D-glucose, and D-xylose by recombinant *Corynebacterium glutamicum* under oxygen-deprived conditions. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **81**, 691-699

佐々木義之 2007-1: バイオマスの効率的な利用技術の開発に向けて－ASEANバイオマス研究開発総合戦略の概要を中心に－. *J. Jpn. Inst. Energy*, **86**, 364-367

佐々木義之（研究総括責任者）2007-2: 「ASEANバイオマス研究開発総合戦略」報告書

http://www.biomass-asia-workshop.jp/biomassws/research-consortium/jp/project/ASEAN_Biomass_report.pdf

Saw, H.Y., Janaun, J., Subbarao, D. 2008: Hydration properties of palm kernel cake. *J. Food Eng.*, **89**, 227-231

澤山茂樹、遠藤貴士、矢野伸一、坂西欣也 2007: バイオエタノール燃料の製造技術．自動車技術, **61**(11), 16-21

澤山茂樹 2008: *Acremonium cellulolyticus*を用いた木質からのバイオエタノール製造技術について．日本農芸化学会2008年度大会シンポジウム（名古屋）

Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D. 2008: Determination of sugars, byproducts, and degradation products in liquid fraction process samples. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-510-42623

Sukumaran, R.K., Surender, V.J., Sindhu, R., Binod, P., Janu, K.U., Sajna, K.V., Rajasree, K.P., Pandey, A. 2009: Lignocellulosic ethanol in India: Prospects, challenges and feedstock availability. *Bioresour. Technol.*, *in press* (Available online December 2009)

Summers, M.D., Jenkins, B.M., Hyde, P.R., Williams, J.F., Mutters, R.G., Scardacci, S.C., Hair, M.W. 2003: Biomass production and allocation in rice with implications for straw harvesting and utilization. *Biomass Bioenergy*, **24**, 163-173

Sun, Y., Cheng, J. 2002: Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresour. Technol.*, **83**, 1-11

Sun, X., Liu, Z., Zheng, K., Song, X., Qu, Y. 2008: The composition of basal and induced cellulase systems in *Penicillium decumbens* under induction or repression conditions. *Enzym. Microb. Technol.*, **42**, 560-567

Suramaythangkoor, T., Gheewala, S.H. 2010: Potential alternatives of heat and power technology application using rice straw in Thailand. *Appl. Energy*, **87**, 128-133

田辺靖雄 2004: アジアエネルギーパートナーシップ –新たな石油危機への対応–、エネルギーフォーラム

VOV News 2009: Cassava exports double this year

<http://english.vovnews.vn/Home/Cassava-exports-double-this-year/200910/108848.vov>

Watanabe, S., Kodaki, T., Makino, K. 2005: Complete reversal of coenzyme specificity of xylitol dehydrogenase and increase of thermostability by the introduction of structural zinc. *J. Biol. Chem.*, **280**, 10340-10349

Weinberg, Z.G., Yan, Y., Chen, Y., Finkelman, S., Ashbell, G., Navarro, S. 2008: The effect of moisture level on high-moisture maize (*Zea mays* L.) under hermetic storage conditions – *in vitro* studies. *J. Stored Prod. Res.*, **44**, 136-144

Wyman, C.E., Dale, B.E., Elander, R.T., Holtzapple, M., Ladisch, M.R., Lee, Y.Y. 2005: Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Bioresour. Technol.*, **96**, 1959-1966

Yamanobe, T., Mitsuishi, Y., Takasaki, Y. 1987: Isolation of a cellulolytic enzyme Producing microorganism, culture conditions and some properties of the enzymes. *Agric. Biol. Chem.*, **51**, 65-74

Yanase, H., Sato, D., Yamamoto, K., Matsuda, S., Yamamoto, S., Okamoto, K. 2007: Genetic engineering of *Zymobacter palmae* for production of ethanol from xylose. *Appl. Environ. Microbiol.*, **73**, 2592-2599

Yang, Z., Zhang, B., Chen, X., Bai, Z., Zhang, H. 2008: Studies on pyrolysis of wheat straw residues from ethanol production by solid-state fermentation. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **81**, 243-246

矢野伸一、美濃輪智朗 2007: アジアにおける自動車用バイオ燃料の現状と展望 *J. Jpn. Inst. Energy*, **86**, 18-24

矢野伸一 2008: セルロース系バイオエタノールの製造技術動向. ペトロテック, **31**, 429-434

矢野伸一、喜多尾千秋、井上宏之、澤山茂樹、芋生憲司、横山伸也 2009: バイオマスからの次世代型エタノール製造技術に有用な新規ヘミセルラーゼ生産菌 *Aspergillus aculeatus* KIF 78株 *J. Environ. Biotechnol.* **9**, 81-87

Yokoyama, S., Ogi, T., and Nalampoon, A. 2000: Biomass energy potential in Thailand.

Biomass Bioenergy, **18**, 405-410

Yoosin, S., Sorapipatana, C. 2007: A study of ethanol production cost for gasoline

substitution in Thailand and its competitiveness. *Thammasat Int. J. Sci. Technol.*, **12**, 69-80

Yusoff, S. 2006: Renewable energy from palm oil – innovation on effective utilization of

waste. *J. Clean Prod.*, **14**, 87-93

Zhang, H., Ye, X., Cheng, T., Chen, J., Yang, X., Wang, L., Zhang R. 2008:

A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory. *Atmos. Environ.*, **42**, 8432-8441

Zhao, J., Xia, L. 2009: Simultaneous saccharification and fermentation of alkaline-pretreated corn stover to ethanol using a recombinant yeast strain.

Fuel Process. Technol., **90**, 1193-1197

Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Zhang, X., Wang, C., Yu, F., Jin, S. 2006: Production of ethanol from microwave-assisted alkali pretreated wheat straw. *Process Biochem.*,

41, 869-873

謝辞

本研究は東京大学大学院農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻の横山伸也教授のご指導の下に行われたものであります。本論文を結ぶにあたり、終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました横山伸也教授に衷心より敬意と感謝の意を表します。

また本論文をまとめるに当たり、丁寧なご指示とご指導を賜りました東京大学大学院農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻の芋生憲司准教授、並びに数々の貴重なご意見をいただきました生物機械工学研究室の皆様へ深く感謝いたします。

さらに、産業技術総合研究所に在職中の私に本研究の機会を与えてくださった産業技術総合研究所バイオマス研究センターの坂西欣也研究センター長、澤山茂樹エタノール・バイオ変換チーム長に厚く御礼申し上げるとともに、本研究に必要な情報、ご意見を提供いただいた産業技術総合研究所バイオマス研究センターの職員の皆様へ心からの感謝の意を表します。

最後に私のマレーシアでの研究のために、一方ならずご協力、ご助言をいただきましたマレーシア・プトラ大学の Mohd Ali Hassan 教授とそのスタッフの皆様、および九州工業大学生命体工学研究科 生体機能専攻の白井義人教授、脇坂港准教授、渡辺伸特任教授の皆様へ厚く御礼申し上げます。