

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

Ethanol production potential from rice straw and bagasse in China, India,
and ASEAN countries

矢野伸一*¹ 澤山茂樹*² 井上宏之*³ 藤本真司*³
Shinichi YANO Shigeki SAWAYAMA Hiroyuki INOUE Shinji FUJIMOTO
美濃輪智朗*² 芋生憲司*⁴ 横山伸也*⁵
Tomoaki MINOWA Kenji IMOU Shinya YOKOYAMA

Abstract

Utilization of non-food resources as feedstock for fuel ethanol production is anticipated, especially in Asian countries with large population and growing gasoline consumption. We have estimated ethanol production potential from rice straw and sugarcane bagasse for China, India, and ASEAN countries, based on our experimental data without xylose utilization. We also considered the actual availability of the resources, which made our estimation more practical. With this modest estimation, about 3.7 to 3.9 billion liters of ethanol can be produced from rice straw and bagasse, for China, India, and all ASEAN, respectively. Possible substitution for gasoline consumption by ethanol from rice straw and bagasse was also calculated. Substitution of gasoline was 19.6%, 5.6%, and 3.6% for India, all ASEAN, and China, respectively. Asian countries have large ethanol production potential without utilizing food resources.

キーワード：エタノール、稲わら、バガス、中国、インド、ASEAN

Key Words : ethanol, rice straw, bagasse, China, India, ASEAN

1. はじめに

アジア地域は人口が多く経済成長も著しいため、今後自動車燃料の需要が急増するものと考えられ、この対応を石油資源だけに依存している、石油供給の逼迫と価格上昇、地球温暖化の加速、などの問題が生じることが懸念される。

この問題の対策の1つとして、再生可能でカーボンニュートラルである、エタノールなどのバイオ燃料で石油系燃料を代替することが有効と考えられている⁽¹⁾。世界的には既に多量の燃料用エタノールが生産、消費されているが、現状では本来食料、飼料用として生産される農産物が原料とされているため、資源の食用との競合、価格の高騰などの問題が生じる恐れがある。

特に人口が多いアジア地域においては、食料供給に影響を与えないことは重要である。このため食用と競合しない資源からのエタノール生産が期待されている。一般にアジア諸国は農業生産が豊富で、多量の農業残渣が発生しており、これらをエタノール生産の原料として利用できれば、食料供給に影響を与えずにエタノールを増産でき、また廃棄物の有効利用による経済効果等も期待できる。

アジア地域における農業残渣を含むバイオマス資源量の推計については既に報告があるが^{(2) (3)}、エタノール生産ポテンシャルについては言及されていない。一方、廃棄農産物と農業残渣からのエタノール生産ポテンシャルを大陸別に試算した研究が報告されているが⁽⁴⁾、稲わら、バガス等については資源の全量が利用できると仮定しており、また資源が含有する糖類の全てが効率100%でエタノールに変換されるとして計算を行っている。従ってこの推計値は、理論上可能な最大値を示してはいるが、現実的なものではない。

実際には農業残渣は相当量が飼料、燃料等に使用されおり、

*1 産業技術総合研究所バイオマス研究センター主任研究員
(〒737-0197 呉市広末広 2-2-2) e-mail: s-yano@aist.go.jp
東京大学大学院農学生命科学研究科大学院生
*2 産業技術総合研究所バイオマス研究センター研究チーム長
*3 産業技術総合研究所バイオマス研究センター研究員
*4 東京大学大学院農学生命科学研究科准教授
*5 東京大学大学院農学生命科学研究科教授
(原稿受付 2009年6月10日)

全量利用できるということはありません。また現在のショ糖、デンプンからのエタノール生産は基本的には酒造と同じであり、技術的にはほぼ確立しているが、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成分からなる強固な構造を持っているため、エタノール発酵の原料になる糖を得てエタノールに変換するためには、いくつかの技術的課題が存在する⁽⁵⁾。まず、リグニンはヘミセルロースと共に主成分であるセルロースを保護しているため、そのままでは糖化酵素との反応性が極めて低い。このためこの保護を緩めるための適切な前処理技術の開発が不可欠である。またセルロース自体も結晶構造を持ち、同じくグルコースのポリマーであるデンプンと比較するとはるかに分解性が悪いので、効率良くセルロースを糖化できる酵素の開発が求められる。さらにヘミセルロースの主要構成糖であるキシロースは通常のエタノール発酵用の酵母は代謝できないという問題も存在する。これらの問題を解決するための研究開発が多くの研究機関で行われているが、まだ多様な材料に汎用的に利用できる実用技術は確立していないので、エタノール生産ポテンシャルの推計に用いる生産効率も、材料ごとに実際の実験結果に基づいた値を使用することが現実的な推計のためには必要と考えられる。

本報では、アジア地域で、人口および農業生産の多い中国、インドと、2004年度から日本の大学、研究機関により、バイオマスの資源量、生産技術、環境影響等の総合的な調査が行われたASEAN諸国⁽⁶⁾について、最も発生量が多いイネのわらと、やはり量が多かつ工場が発生するために収集が容易であるという特質を持つサトウキビのバガスを対象とし、実際の実験データに基づき、かつ資源の利用可能率の考慮も行ったエタノール生産ポテンシャルの推計について報告する。

2. 実験、推計方法

乾燥した国内産稲わらおよびタイ産のバガスをカッターミルで0.2mm以下に粗粉砕した試料1.0gを容量45mlの容器に入れ、遊星型ボールミル(Pulverisette 7, Fritsch, Germany)を用いて粉砕を行った。粉砕は400rpmで10分の粉砕と10分の休止のサイクルで行われ、トータルの粉砕時間を2時間とした。

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40FPU、Novozymes社製酵素188(β-グルコシダーゼ)5IU、Optimash BG(ヘミセルラーゼ, Genencore International)0.02mlの各酵素を添加し、0.05Mの酢酸ナトリウム緩衝液(pH 5.0)中、45°Cで72時間反応させて行った。生成した糖の量をHPLCで測定し、別途アメリカ国立再生可能エネルギー研究所の方法⁽⁷⁾に従って試料を72%硫酸で完全分解して得られた糖量を基に糖化率を算定した。

酵素糖化により、セルロース由来のグルコースと共に、

ヘミセルロース由来のキシロースも多量に得られるが、現状ではキシロースを発酵でエタノールに変換する実用技術が確立していないため⁽⁸⁾、キシロースは利用せず、グルコースのみを発酵でエタノールに変換する前提で推計を行った。この場合グルコースからの発酵は容易であるので、我々の発酵実験のデータ⁽⁹⁾から、確実に達成できると考えられる収率85%で発酵できるものとし、さらに実際の生産プラントでのプロセス回収率を90%と仮定した。以上から、エタノール生産ポテンシャルは下記の式により計算される。

$$\text{エタノール生産量 (L)} = \text{資源量 (kg)} \times \text{グルコース含量} \times \text{糖化率} \times \text{発酵収率 (0.85)} \times \text{プロセス収率 (0.9)} \times \text{エタノール発酵の理論収率 (0.51)} / \text{エタノールの比重 (0.79 kg/L)}$$

稲わら、バガスの資源量は、統計データが得られる稲わらとサトウキビの生産量から、一定の比率(residue product ratio: RPR)で計算する方法で推計した。稲わらのRPRについては品種により大きく変動することが報告されている⁽¹⁰⁾が、ここでは過大評価を避けるため、最も低い近代的な短稈品種の値1:1(双方乾物重基準)⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を採用した。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)=0.15:1とした⁽¹²⁾。2006年の稲わらとサトウキビの生産量は国際連合食料農業機関(FAO)の統計データ⁽¹³⁾より得た。稲わらのデータは新鮮重であるため、含水率を25%⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾として計算を行った。

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、どの程度の量がエタノール原料用に利用可能であるのかは議論のあるところである。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、明らかに余剰と考えられ、また野焼きによる大気汚染の問題も発生している。そこで我々は、この野焼きされている分の稲わらをエタノール用に使用することが現実的と考え、発生する稲わらの全量が利用可能な場合(ケース1)と共に、中国、インドにおいて野焼きされるわらの量が全体の23~24%程度である⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ことから、利用可能量を全体の20%と仮定した場合(ケース2)の推計も行った。

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、製糖工場が発生する。バガスは工場の熱源や発電用の燃料として有効に利用されており、それでも余剰になる分がエタノール生産用に利用可能である。余剰分の割合はボイラー効率などにより工場ごとに異なるが、タイの例では一般に全バガスの13~20%が余剰であること⁽¹⁸⁾が報告されている。そこで我々は利用可能なバガス量を15%と設定した。

以上から、資源利用度を考慮するケース2については、全量を利用するケース1の値に、上記の利用可能率を掛けて算定した。

生産されたエタノールによるガソリン代替量のエネルギー

データベースでの推計のための各国の2006年のガソリン消費量は国際エネルギー機関(IEA)の統計データベース⁽¹⁹⁾から得た。またガソリンとエタノールの発熱量として、それぞれ43.0 MJ/kg、26.7 MJ/kgの値⁽²⁰⁾を用いた。

3. 結果と考察

セルロースを糖化する酵素(セルラーゼ)は単一の酵素ではなく、3種類の異なる活性を持つ酵素の混合物として通常生産される。このためセルラーゼの活性の表現には数種類の定義が存在するが、ここでは総合的な活性の指標として最もよく使用される Filter Paper Unit (FPU、ろ紙を基質とした活性の指標)⁽²¹⁾により、通常の実験条件で良く使用される40 FPU/g・基質と、経済性を考慮して酵素量を1/10に減らした4 FPU/g・基質、の2条件で酵素糖化を行った。表1に、実験に使用した稲わら、バガスの完全分解で得られたグルコース含量と、ボールミル粉砕後、酵素で糖化して得られたグルコース量から計算した糖化率を示した。

Table 1 Glucose contents and hydrolysis rates after milling and enzyme treatment for rice straw and bagasse

	Glucose Content (g/dry g)	Hydrolysis rate (%)	
		Cellulase 4 FPU [*] /g	Cellulase 40 FPU [*] /g
Rice Straw	0.289	88.2	91.7
Bagasse	0.404	84.8	91.7

*FPU: Filter Paper Unit

当然ながら酵素量が多い40 FPU/g・基質の方が糖化率は高いが、4 FPU/g・基質との差は稲わらで3.8%、バガスで7.9%であり、酵素コストを考慮すると多少糖化率が低くても、4 FPU/g・基質のほうが現実的であると判断し、4 FPU/g・基質での糖化率をポテンシャルの推計に使用した。少ない酵素量でも高い糖化率が得られることはボールミル粉砕による前処理の特徴と考えられている⁽²²⁾。

表2に稲わらの量と、稲わらから生産可能なエタノール量の推計結果を示した。稲わらの発生量は、中国、インド、ASEAN合計で、それぞれ近似の値となっており、エタノール生産量についてもケース2で26-34億L程度が生産可能である。ASEAN内では、インドネシア、ベトナム、ミャンマー、タイのポテンシャルが大きく、マレーシア、ラオス、カンボジアはこれらより1桁少なくなっている。

表3にバガスの量と、バガスから生産可能なエタノール量の推計結果を示した。バガスについてはインドの資源量が大きく、中国とASEAN合計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。また生産可能エタノール量は稲わら由来エタノールに対して中国で約11%、ASEAN合計でも約14%しか存在しないが、インドの場合は41%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。なお稲わらとバガスを合計したケース2のエタノール生産ポテンシャルは、中国、インド、ASEAN合計で、それぞれ37-39億L程度に達している。

Table 2 Ethanol production potential from rice straw in China, India, and ASEAN countries

Country	Rice Production (10 ⁶ t)	Total Straw Amount (10 ⁶ t)	Straw Amount considering Availability (10 ⁶ t)	Ethanol Production Potential (10 ⁶ L)	
				Case 1*	Case 2*
China	184.1	138.1	27.6	17,422	3,484
India	139.1	104.4	20.9	13,165	2,633
Vietnam	35.8	26.9	5.4	3,390	678
Cambodia	6.3	4.7	0.9	592	118
Laos	2.7	2.0	0.4	252	50
Thailand	29.3	22.0	4.4	2,769	554
Myanmar	30.6	23.0	4.6	2,895	579
Malaysia	2.2	1.6	0.3	203	41
Indonesia	54.5	40.8	8.2	5,152	1,030
Philippines	15.3	11.5	2.3	1,451	290
Sum of ASEAN	176.6	132.4	26.5	16,705	3,341

*Case 1: Potential from total straw, Case 2: Potential from straw amount considering availability

Table 3 Ethanol production potential from sugarcane bagasse in China, India, and ASEAN countries

Country	Sugarcane Production (10 ⁶ t)	Total Bagasse Amount (10 ⁶ t)	Bagasse Amount considering Availability (10 ⁶ t)	Ethanol Production Potential (10 ⁶ L)	
				Case 1*	Case 2*
China	100.4	15.1	2.26	2,555	383
India	281.2	42.2	6.33	7,151	1,073
Vietnam	15.7	2.4	0.35	399	60
Cambodia	0.1	0.0	0.00	4	1
Laos	0.2	0.0	0.00	6	1
Thailand	47.7	7.1	1.07	1,212	182
Myanmar	7.3	1.1	0.16	186	28
Malaysia	0.8	0.1	0.02	20	3
Indonesia	25.2	3.8	0.57	641	96
Philippines	24.4	3.7	0.55	619	93
Sum of ASEAN	121.3	18.2	2.73	3,086	463

*Case 1: Potential from total bagasse, Case 2: Potential from bagasse amount considering availability

これらの稲わらおよびバガスから生産可能なエタノールが各国のガソリン消費のどの程度を代替できるかについて、エネルギーベースでの計算を行った（表4）。

Table 4 Gasoline consumption and possible substitution by ethanol from rice straw and bagasse in China, India and ASEAN countries

Country	Gasoline consumption (10 ⁶ t)	Possible substitution by ethanol (% , Energy base)	
		Case 1	Case 2
China	52.27	18.7	3.6
India	9.29	107.2	19.6
Vietnam	2.78	66.8	13.0
Cambodia	0.15	192.1	38.4
Laos	0.14	90.0	17.9
Thailand	5.35	36.5	6.7
Myanmar	0.36	418.1	82.4
Malaysia	7.91	1.4	0.3
Indonesia	13.06	21.7	4.2
Philippines	2.64	38.4	7.1
Sum of ASEAN	33.36	29.1	5.6

*Case 1: Potential from total resources

Case 2: Potential form resources considering availability

ASEAN 加盟国のシンガポール、ブルネイは、イネ、サトウキビの生産が無いため資源の推計からは除外しているが、ガソリンの消費量は無視できないため、ASEAN 合計のガソリン消費量にはこの2カ国の分も含まれている。国によるガソリン消費量の差が大きいため、代替可能率も幅

が広いが、現実的な資源の利用可能性を考慮したケース2の場合でも、インドではガソリン消費の19.6%が代替可能という結果になった。中国では3.6%、ASEAN 合計では5.6%の代替が可能である。ASEAN 内では、まだ自動車の普及率が低い諸国で高い代替率を示している。マレーシアは、イネ、サトウキビとも生産量が少ないため、ガソリン代替率は極めて低く ASEAN 内では特異な存在である。ただしマレーシアはインドネシアと並ぶパームオイルの世界の2大生産国であり、オイルパーム由来の残渣は大量に発生している。我々はオイルパーム空果房からのエタノール生産ポテンシャルも類似の方法で推計しており、それによると本報告のケース2のように、資源の利用可能性を考慮した場合でも、ガソリン消費の1.8%が代替可能、という結果が出ており⁽²³⁾、マレーシアではオイルパーム由来の残渣がより重要と考えられる。

我々のエタノール生産ポテンシャル推計値は、既存の廃棄農産物と農業残渣からの大陸別エタノール生産ポテンシャルの報告⁽⁴⁾に比べて、以下の理由からより現実的な値だと考える。

- (1) 実際の実験データに基づく原料ごとの糖収量を推計に使用している。
- (2) 推計に用いる糖化率は、実用的な生産を考慮して、少ない酵素量での糖化による低い値を採用している。
- (3) 現時点では実用技術が確立していないキシロースのエタノールへの変換を考慮していない。
- (4) プロセス回収率を考慮している。
- (5) 稲わらの資源量推定のための RPR に、考えられる範囲内での低位の値を採用している。
- (6) 現実的な資源の利用可能性を考慮した推計も行っている。

このような条件で推計した値でも、対象としたアジア諸国では、一般にエタノール生産ポテンシャルは大きく、イ

インドでは、資源の利用可能性を考慮したケース2でもガソリン消費の約20%を代替できることが示された。これは世界的に最も一般的に行われている、ガソリンに対して10%のエタノールを混合するE10燃料用のエタノールをインドではこれらの農業残渣からのエタノールだけで十分供給できるポテンシャルがあることを示している。

中国でのガソリン代替率は資源の利用可能性を考慮した場合、稲わら、バガスを合わせても3.6%にとどまっているが、中国では稲わらと同等量の小麦のわらと、稲わらの約2倍量のトウモロコシのわらが発生していると報告されている⁽¹⁶⁾。我々は小麦わら、トウモロコシわらについては糖化実験のデータをまだ持っていないので、本報告ではこれらからの生産ポテンシャルの推計は行わなかったが、これらも稲わらと同じ利用度、変換効率で利用できると仮定した場合は、わらからのエタノールだけで中国全土のE10に必要な量を供給できると推測される。

一方、日本について同様に計算してみると、資源の利用可能性を考慮した場合のガソリンの代替率は0.3%とわずかなものであった。本報告が対象としたアジア諸国は、急速に経済発展が進んではいるものの、まだ1人あたりのガソリン消費量は先進国に比べて少なく⁽¹⁹⁾、かつ農業生産も豊富であるため、大きな代替率になったものと考えられる。

本報告で行った現実的な前提に基づいた推計においても、アジア諸国は一般に、食料と競合しない農業残渣からだけでも大きなエタノール生産ポテンシャルを持つことが示された。

4. 結論

中国、インド、ASEAN 諸国における稲わらとサトウキビバガスからのエタノール生産ポテンシャルを、実際の実験による糖収量のデータに基づき、かつキシロースの利用を考慮せずに推計した。資源の利用可能割合も考慮した現実的な推計の場合でも、これらの地域は稲わら、バガスからのエタノール生産に大きなポテンシャルを持ち、中国、インド、ASEAN 合計で、それぞれ37-39億L程度のエタノールが生産可能であることが示された。これらのエタノールによる可能ガソリン代替率をエネルギーベースで推計したところ、インドではガソリン消費量の19.6%を代替することが可能であるという結果が得られた。またASEAN 合計では5.6%、中国では3.6%の代替が可能である。

参考文献

- (1) 矢野伸一・美濃輪智朗, アジアにおける自動車用バイオ燃料の現状と展望, 日本エネルギー学会誌, 86-1 (2007), 18
- (2) S. C. Bhattacharya, P. A. Salam, H. L. Pham, N. H. Ravindranath, Sustainable biomass production for energy in selected Asian countries. *Biomass Bioenergy*, 25(2003), 471
- (3) A. Koopmans, Biomass energy demand and supply for South and South-East Asia—assessing the resource base. *Biomass Bioenergy*, 28 (2005), 133
- (4) S. Kim, B. E. Dale, Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioenergy*, 26 (2004), 361
- (5) 遠藤貴士・矢野伸一・井上宏之・澤山茂樹、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, 日本エネルギー学会誌, 87-6 (2008), 430
- (6) 佐々木義之, 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, 日本エネルギー学会誌, 86-6 (2007), 364
- (7) A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton, Laboratory Analytical Procedure, National Renewable Energy Laboratory, USA
<http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/42618.pdf>
- (8) B. Hahn-Hägerdal, K. Karhumaa, M. Jeppsson, M. F. Gorwa-Grauslund, Metabolic engineering for pentose utilization in *Saccharomyces cerevisiae*. *Adv. Biochem. Engin/Biotechnol.*, 108 (2007), 147
- (9) 村上克治・井上宏之・矢野伸一・滝村修・澤山茂樹, オイルパーム廃棄残渣からのバイオエタノール生産, 廃棄物資源循環学会論文誌, 20-1 (2009), 74
- (10) M. D. Summers, B. M. Jenkins, P. R. Hyde, J. F. Williams, R. G. Mutters, S. C. Scardacci, M. W. Hair, Biomass production and allocation in rice with implications for rice straw harvesting and utilization. *Biomass Bioenergy*, 24 (2003), 163
- (11) Y. Matsumura, T. Minowa, H. Yamamoto, Amount, availability, and potential use of rice straw (agricultural residue) biomass as an energy resource in Japan. *Biomass Bioenergy*, 29 (2005), 347
- (12) S. Yokoyama, T. Ogi, A. Nalampoon, Biomass energy potential in Thailand. *Biomass Bioenergy*, 18 (2005), 405
- (13) Food and Agriculture Organization, FAOSTAT
<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>
- (14) 徐潤琪・後藤清和・前澤重禮・三輪精博, 中国における刳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 (2002), 17
- (15) D. Akal, K. Kahveci, A. Cihan, Mathematical modeling of drying rough rice in stacks. *Food Sci. Tech. Intl.*, 13(2007), 437
- (16) H. Zhang, X. Ye, T. Cheng, J. Chen, X. Yang, L. Wang, R. Zhang, A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory. *Atmospheric Environment*, 42(2008), 8432
- (17) B. Gadde, S. Bonnet, C. Menke, S. Garivait, Air pollutant

- emissions from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines. *Environmental Pollution*, 157 (2009), 1554
- (18) V. I. Kuprianov, W. Permchart, K. Janvijitsakul, Fluidized bed combustion of pre-dried Thai bagasse. *Fuel Processing Technology*, 86 (2005), 849
- (19) International Energy Agency, Statistics
<http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>
- (20) バイオ燃料技術革新協議会, バイオ燃料技術革新計画, (2008), p.76
<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/fuel/080404/hontai.pdf>
- (21) T. K. Ghose, Measurement of cellulase activities. *Pure & Appl. Chem.*, 59 (1987), 257
- (22) H. Inoue, S. Yano, T. Endo, T. Sakaki, S. Sawayama, Combining hot-compressed water and ball milling pretreatments to improve the efficiency of the enzymatic hydrolysis of eucalyptus. *Biotechnology for Biofuels*, 1:2 (2008)
- (23) S. Yano, K. Murakami, S. Sawayama, K. Imou, S. Yokoyama, Ethanol production potential from oil palm empty fruit bunches in Southeast Asian countries considering xylose utilization, *日本エネルギー学会誌*, 88-10 (2009), 923