

地球規模課題対応国際科学技術協力

(環境・エネルギー研究分野「気候変動の適応又は緩和に資する研究」領域)

サトウキビ廃棄物からのエタノール生産研究

(ブラジル)

平成 23 年度実施報告書

代表者：坂西 欣也

(独)産業技術総合研究所 バイオマス研究センター・センター長

<平成 20 年度採択>

1. プロジェクト全体の実施の概要

バイオマス由来のエタノールによるガソリンの代替は、二酸化炭素排出量の削減に有効な方策の1つと考えられている。ブラジルでは既にサトウキビの糖液からの大量の燃料用エタノールが生産されているが、これに加えて、バガス、茎葉などのサトウキビ廃棄物からもエタノールを生産する事で、同じ耕地面積からより多くのエタノールが生産でき、より多くのガソリンを代替する事で地球温暖化の緩和に貢献する事ができる。このような背景から、本研究は世界最大のサトウキビ生産国であるブラジルにおいて、サトウキビ廃棄物からのエタノール生産技術を確立する事を目標としている。

平成20年度からブラジル産のバガス、茎葉を材料にして、産業技術総合研究所(産総研)が持つ微粉碎前処理と酵素糖化に基づくエタノール生産技術の適用性の検討を行ってきた。その結果、これらはボールミルによる乾式微粉碎による前処理では高い糖化性を示すが、エネルギー消費量、経済性の点で優れ木質バイオマスでは実績がある湿式ディスクミル微粉碎による前処理では、低い糖化率しか得られないことが明らかになった。この問題を解決するために、水熱やアルカリ添加の組み合わせ処理等の新規な研究開発を行い、サトウキビ廃棄物に適した前処理方法を開発する。またサトウキビ廃棄物を用いた糖化酵素生産、およびエタノール収量の更なる向上に寄与するキシロースを効率良く発酵できる酵母の開発を進めるほか、エネルギー収支、経済性等の解析を行う。

最終的にはブラジルにベンチプラントを設置してより大きな規模で実験を行うことにより、実用的な技術としての検証を行い、また温室効果ガス排出量削減効果等についての解析・評価を実施する。

2. 研究グループ別の実施内容

研究機関名:(独)産業技術総合研究所 バイオマス研究センター

①研究のねらい

バイオマスは植物が光合成により大気中の二酸化炭素を固定した資源であり、燃焼しても二酸化炭素濃度を増加させない。このため、バイオマス由来の燃料によって石油等の化石燃料を代替することは、二酸化炭素排出量を削減できる有効な地球温暖化対策であり、特にガソリン等の液体燃料の代替は世界的にエネルギー消費量の増加が著しい運輸部門における即効的な温暖化対策の1つである。既にブラジル、米国を中心に大量のガソリン代替用エタノールが生産、消費されているが、現状では食用、飼料用と競合する資源を原料としているため、世界的に問題になっている穀物等の不足と価格高騰の一因となっていることが指摘されている。

ブラジルは世界最大のサトウキビおよびサトウキビからのエタノール生産国であり、最大のエタノール輸出国でもある。利用面でも1970年代からエタノールの燃料利用が積極的に行われており、現在ガソリンへの25%程度のエタノール添加が義務づけられていると共に、エタノールのみを燃料とするフレックス燃料車の普及が急速に進んでいるため、国内の燃料エタノール需要の増加が確実である。またブラジル政府の政策として、燃料用エタノールを重要な輸出品目として育成する方針が打ち出されており、世界的にバイオ燃料の需要が増大している中、輸出量の更なる増加が予想されている。これらに対応するエタノールの増産は、当面現在のサトウキビ糖液を原料とする方法が想定されており、そのためにはサトウキビの増産が必要になる。サトウキビ栽培地の拡大は、休耕地や利用度の低い放牧地の活用での対応が計画されているが、一部では林地を伐採しての開墾も行われており、新たな環境破壊と温暖化促進の要因になる危険性がある。

一方、サトウキビ産業では収穫されたサトウキビから糖液を絞った残渣であるバガスが大量に発生し

ている。製糖、エタノール工場ではバガスの燃焼によるエネルギー回収が行われているが、ボイラー、発電機等の効率向上により、余剰バガス量が増大する傾向にある。また以前は収穫前のサトウキビが作業性向上のために野焼きされていたが、現在では野焼きが禁止されているため、畑に残された茎葉等の処理と、これらが畑に残ることで病害虫が発生しやすくなる点が問題となっている。また特に最近普及している大型機械による収穫では、茎葉もサトウキビと一緒に回収されやすく、製糖、エタノール工場での処理が問題となっている。

そこでバガス、茎葉などのサトウキビ産業から発生する廃棄物系バイオマスをエタノール原料として利用できれば、処理を兼ねた廃棄物の有効利用になり、また耕地面積を増やさずにかつ食料との競合の問題を回避したエタノールの増産が可能になる。世界最大のサトウキビ生産国であるブラジルで、これらの非食用資源であるサトウキビ廃棄物からのエタノール生産技術が確立すれば、それによる増産効果は大きく、輸出も含めて大量の石油系燃料を代替することにより、有効な地球温暖化対策となる。

しかしこのような廃棄物系バイオマスから実用的なエタノール生産を行うためには、まだ克服すべき技術課題が存在している。そこでこれらの課題を解決するための技術開発を行い、ブラジルの既存のサトウキビ産業に適用できる生産システムを確立することが求められる。また開発された技術を東南アジア等他のサトウキビ栽培地域に適用して展開することにより、地球規模ではさらに大きな効果が期待でき、地球温暖化の緩和に貢献することができる。

②研究実施方法

バガス、茎葉などのサトウキビ廃棄物から燃料用エタノールを生産するためには、これらの廃棄物に含まれる多糖類、特にセルロースを効率的に発酵可能な単糖(グルコース)に変換する技術が必要である。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などと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、セルロース糖化酵素(セルラーゼ)によって分解する方法がある。現状では酵素コストが高いことから、酸分解法に優位性があり、ブラジルではDedini社が既にこの方法での技術開発を行っているが、酸分解法には、糖の過分解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・処理等の問題が存在する。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、今後コストを大幅に低減することは難しいと考えられるので、将来的にはコストを低減させた酵素法の実施が期待されている。

しかし、バガス等の廃棄物系バイオマスではセルロースはリグニン、ヘミセルロースによって保護されており、セルロース自体も強固な構造を持っているため、酵素を直接加えてもほとんど反応は起きない。このため、この保護を外して酵素を反応させやすくするための前処理が不可欠である。前処理には様々な原理による多様な方法が研究されているが、その中で微粉碎処理は、原料の種類を選ばず、少ない酵素量でも高い糖化率が得られるため、原理的に非常に優れた前処理技術と考えられる。しかし現状では要求される粉碎時間がまだ長く、コスト、エネルギー消費の点で問題がある。産総研ではこの問題を解決するために、新しい粉碎方式の開発や、他の処理との複合化などにより粉碎時間を大幅に短縮するための研究開発を行っている。また前述のように、現状では糖化酵素のコストが高いことが酵素法実用化の最大の問題となっている。燃料用エタノール生産では特に低コストが求められることから、酵素メーカーから酵素を購入するのでは経済的に成立する可能性が低いので、エタノール生産の場所でエタノール生産者が酵素も生産する(オンサイト酵素生産)という考え方が一般的になってきており、このためにエタノール生産者が酵素生産菌を自ら確保する必要がある。産業技術総合研究所はセルロースを原料としたエタノール生産に適した酵素を効率良く生産する菌株の開発に成功してい

るほか、ブラジルのリオデジャネイロ連邦大学（UFRJ）でも自ら酵素生産を行うための研究が行われている。

以上から産総研の微粉碎法を中心とした前処理後酵素処理を行う方式のサトウキビ廃棄物への適用性を検討し、最適な前処理・糖化条件の開発を行う。糖化酵素についてはUFRJと協力して、ブラジルでの生産、使用に適した酵素生産菌の開発を行う。

またバガス等の廃棄物系バイオマスに含まれるヘミセルロースは糖を中心とした構造の高分子であり、ヘミセルロースからも糖を回収して発酵原料とすることで、エタノール収率を向上させることができる。しかしサトウキビで問題になるのは、ヘミセルロースの主成分が通常のエタノール発酵用微生物では利用できないキシロースであることである。産業技術総合研究所では遺伝子組み換え技術により、キシロースを効率良く発酵できる酵母株の開発に成功しているが、既に大規模なサトウキビ産業が成立しているブラジルへの遺伝子組換え酵母の適用には検討を要する。これについては、エタノール発酵用酵母の開発や糖代謝の研究で実績があるサンタカタリーナ連邦大学（UFSC）と共同で、ブラジルでの生産に適した技術を検討する。

これらの要素技術を統合して一貫生産システムとしての実験、研究をブラジルに設置するベンチプラントを用いた大きな規模での実験を含めて行う。さらにLCA等の解析に必要なデータ収集を行い、温室効果ガス排出量削減効果、エネルギー収支、経済性などの解析・評価を実施する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

微粉碎前処理技術のバガス、サトウキビ茎葉への適用性評価、アルカリやオゾン等の処理と粉碎の組み合わせ、およびイオン液体を用いた前処理技術の開発、バガス、サトウキビ茎葉の糖化に適した酵素系の研究および酵素生産の研究、キシロース発酵性酵母の開発、各種解析に必要な基本データの取得、等について、計画通りに研究が進捗している。ただしブラジルでのベンチプラントについては、プラントを設置する建物の建設が予定から大幅に遅れ、未だにプラントが整備できていない状況にある。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

本制度及び JICA 集団研修で招へいして産業技術総合研究所に滞在した UFRJ、UFSC の研究者に、前処理技術としての微粉碎前処理、水熱処理、イオン液体処理、オゾン処理、および酵素糖化、糖化物の発酵、糖化酵素の生産、キシロース発酵のための酵母の遺伝子操作等の技術を実際の実験を通じて移転した。また温室効果ガス削減効果、エネルギー収支、経済性などの解析・評価方法について、ブラジル側の研究者に教授した。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況

木質等のバイオマスでは実績がある湿式ディスクミルによる前処理が、サトウキビ廃棄物に対しては効果が小さいことは予想外であったが、これを改善するために他の処理との複合技術を開発して問題を克服した。また最近注目されるようになったイオン液体による前処理技術のサトウキビ廃棄物への適用性を検討し、大きな効果があることを明らかにすると共に、イオン液体の使用量を低減できる処理技術を開発することができた。

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 発表総数(国内0 件、国際 3件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0件、国際 3件)
- ③ 論文詳細情報

A. S. da Silva, H. Inoue, T. Endo, S. Yano, E.P.S. Bon: Milling pretreatment of sugarcane bagasse and straw for enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation. *Bioresource Technology*, **101**, 7402-7409 (2010)

A. S. da Silva, S.-H. Lee, T. Endo, E.P.S. Bon: Major improvement in the rate and yield of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse via pretreatment with the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate. *Bioresource Technology*, **102**, 10505-10509 (2011)

T. Miura, S.-H. Lee, S. Inoue, T. Endo: Improvement of sugarcane bagasse by dilute-alkali-catalyzed hydrothermal treatment and subsequent disk milling. *Bioresource Technology*, **105**, 95-99 (2012)

(2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳 (0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数 (0 件)

4. プロジェクト実施体制

(1) 産業技術総合研究所(サトウキビ廃棄物からのエタノール生産研究)

① 研究者リーダー名: 坂西 欣也(バイオマス研究センター長)

② 研究項目

- ・サトウキビ廃棄物に適した前処理技術の研究開発
- ・サトウキビ廃棄物に適した糖化酵素の開発及び糖化技術の研究開発
- ・サトウキビ廃棄物に適したエタノール発酵微生物の研究開発
- ・プロセス統合とライフサイクルアセスメント解析

以上