

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 24 年度実施報告書

代表者：平田 悟史

(独)産業技術総合研究所 バイオマスリファイナリー研究センター長
(平成 25 年 2 月から)

代表者：坂西 欣也

(平成 25 年 1 月まで)

(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指して実施するものである。サトウキビ廃棄物からエタノールを生産するためには、廃棄物を糖化酵素と反応しやすい状態に変える「前処理技術」、現状で最大のコスト高要因である糖化酵素を低コストで生産する「糖化酵素技術」、および廃棄物に多量に含まれるが通常の酵母では発酵できないキシロースをいかに利用するかを中心とする「発酵技術」の3つが重要な技術課題として存在する。加えて本事業は地球規模課題対応の気候変動の緩和に資する研究であるため、ライフサイクルアセスメント(LCA)手法による温室効果ガス(GHG)排出削減効果算定等の「システム解析・評価技術」も重要になる。これらの課題の解決のために、該当する分野の研究ポテンシャルを持つブラジルの2大学(リオデジャネイロ連邦大学:UFRJ、サンタカタリーナ連邦大学:UFSC)と、産業技術総合研究所(産総研)との共同研究を実施する。

「前処理技術」については、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、サトウキビ廃棄物は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との組み合わせ処理等の新規な研究を行い、サトウキビ廃棄物に適した前処理方法を開発した。「糖化酵素技術」については、サトウキビ廃棄物を炭素源とする酵素生産技術と効率的生産に必要な培養工学の研究を実施した。「発酵技術」についてはエタノール発酵に適したブラジル産酵母を選定したほか、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た。「システム解析・評価技術」では、物質収支シミュレータ、GHG計算シミュレータを開発して、GHG排出削減効果等のLCA解析・評価を実施している。

最終的にはUFRJ構内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、またこれにより得られるデータを用いた温室効果ガス排出量削減効果等についてのLCA解析・評価を実施する計画であるが、UFRJ側の準備の遅れにより、現時点ではまだ実現していない。

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 バイオマスリファイナリー研究センター

①研究のねらい

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る。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20-25%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ことから、国内の燃料エタノール需要が急増している。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として育成する方針も打ち出されている。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るが、サトウキビ栽培地の拡大は新たな環境破壊と温暖化促進の要因になる危険性も秘めている。

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、ボイラーの効率向上等により、余剰バガス量が増大する傾向にある。また以前は人手による収穫の作業性向上のために畑での野焼きが行わ

れていたが、機械化の進展と政府が野焼き禁止の方針を示していることから野焼きする面積が減少しており、畑に残された茎葉等の処理も問題になりつつある。

そこでこれら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に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について、該当する研究ポテンシャルを持つUFRJ、UFSCと産総研間で共同研究を行うことにより、ブラジルの現状に即したサトウキビ廃棄物からのエタノール生産システム技術を開発することが本研究のねらいである。

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、酸分解法の方が経済性では優位であるが、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化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、このための酵素生産技術が必要である。産総研はセルロース系バイオマ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、UFRJでも酵素生産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系の開発を行う。

これらの研究成果を活用したサトウキビ廃棄物からエタノールを生産するベンチスケールの実験を実施し、大きな規模での技術実証とさらに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

減効果経済性などの解析・評価を実施する。

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。しかしここで問題になるのは、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。産総研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、元々利用できない糖であるため、酵母のキシロース取り込みについては知見が無かった。そこで酵母の糖取り込み機構に関する研究実績があるUFSCと産総研との共同研究により、取り込みも含めてキシロースの効率的な発酵ができる酵母株についての研究を行う。遺伝子組み換え生物を使用することになるため、UFRJに設置するベンチスケール施設ではキシロースの発酵は行わないが、将来の利用に向けて優良菌株の開発を目指す。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

前処理技術については、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微粉碎前処理が、サトウキビ廃棄物に対しては効果が低いという、当初予想していなかった事実が明らかになったため、ディスクミル処理と水熱処理やアルカリ処理との組み合わせ、また経済性は低いが前処理効果が高いイオン液体を用いた実験を行って、サトウキビ廃棄物に適した前処理方法の研究開発を行った。酵素生産については、サトウキビ廃棄物を炭素源とする酵素生産技術を開発すると共に、 kLa などの培養工学的ファクターが酵素生産に与える関係を明らかにした。効率的なキシロース発酵酵母の開発には、キシロース代謝能を導入した酵母株の等の取り込みについての研究を行っている。またサトウキビ廃棄物からのエタノール生産を想定した物質収支計算シミュレータ、GHG計算シミュレータを開発し、今までに得られたデータを用いてGHG排出量削減効果等の解析を行っている。

以上のように、各要素技術研究については概ね当初計画に見合う成果が出ていると判断するが、ベンチスケールでの生産実験については、プラントを設置する建物の建設が予定から大幅に遅れ、建物完成後も電気工事や機器の調達が遅れたことにより、未だに実施できていない。

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）

本制度で招へいして産業技術総合研究所バイオマスリファイナリー研究センターに滞在した 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を含む育種等に関する技術を実際の実験を伴う研究活動を通じて移転した。

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

UFRJ のベンチスケール実験設備は狭小な従来の実験室には設置できないため、ブラジル側の予算で新しく建設する実験棟に設置する。当初は2011年5月頃に新実験棟が完成する予定であったが、途中で設計変更や入札の不落などがあり、建設が大幅に遅延した。このため当初は2012年8月31日で終了する予定であった本事業の期間を、2012年12月31日まで延長した。しかし建物は2012年4月頃に完成したものの、電気工事や機材調達の遅れがあり、2012年中の実験設備整備は達成できなかった。このため2013年8月31日までの再度の期間延長を行い、早期の実験開始を目指して事業を継続することにした。

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国際 2 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国際 5 件)
- ③ 論文詳細情報
 1. 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**(19), 7402-7409 (2010)
 2. A. S. da Silva, S.-H. Lee, S. Inoue, 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**(22), 10505-10509 (2011)
 3. T. Miura, S.-H. Lee, S. Inoue, T. Endo, Improvement of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse by dilute-alkali-catalyzed hydrothermal treatment and subsequent disk milling, *Bioresource Technology*, **105**, 95-99 (2012)
 4. M.-T. Gao, S. Yano, H. Inoue, K. Sakanishi, Combination of wet disk milling and hydrogen peroxide treatments for enhancing saccharification of sugarcane bagasse, *Biochemical Engineering Journal*, **68**, 152-158 (2012)
 5. X.-Z. Sun, S. Fujimoto, T. Minowa, A comparison of power generation and ethanol production using sugarcane bagasse from the perspective of mitigating GHG emissions, *Energy Policy*, **57**, 624-629 (2013)

(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(イノベーション推進本部 上席イノベーションコーディネータ)
平成 25 年1月まで
平田 悟史 (バイオマスリファイナリー研究センター長) 平成 25 年 2 月から

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