

トウモロコシを原料とするバイオ化合物の生産トレンド

米国最大のトウモロコシ生産州アイオワ州での生産者の取り組み

アメリカ穀物協会では、トウモロコシの新たな利用先として、バイオプラスチックをはじめとするバイオ化合物の生産の可能性を探求しています。バイオ化合物は、従来の化石燃料を原料とする製品よりも炭素排出を抑え、生物分解性を高めることによりプラスチックごみなどによる環境汚染を防ぐことに貢献します。ここでは、2019年7月時点での、米国でもっともトウモロコシ生産量の高いアイオワ州のトウモロコシ委員会の取り組みを中心にお伝えします。

2015年に国際連合で「持続可能な開発目標-Sustainable Development Goals (SDGs)」が規定されました。SDGsには17のゴールと169のターゲットが挙げられていますが、健康、食料や環境に関する目標が非常に多いのが特徴です。また、これらのゴールはお互いに関連しあい、日本でも環境省を始め、経済産業省や農林水産省でも取り組みが行われています。また、2019年6月に開催された大阪G20サミットでも重要なトピックとして取り上げられ、日本政府がリーダーシップを発揮したところでした。



環境分野のSDGsでは、2025年までに海洋ごみや富栄養化を含む、特に陸上活動による汚染など、あらゆる種類の海洋汚染を防止し、大幅に削減、2030年までに廃棄物の発生防止、削減、再生利用及び再利用により、廃棄物の発生を大幅に削減することを目標としています。

国連のSDGsに先立って、すでに2004年には経済協力開発機構(OECD)が、バイオマスの利用やバイオテクノロジーの活用による新たな産業の振興を目指すことをバイオテクノロジー会議の結論として報告しています。この考え方は、欧米ではバイオエコノミー(Bioeconomy)やバイオベース・エコノミー(Biobased Economy)として様々な派生された考え方を産むことになり、2015年の国連のSDGsの提案によって、さらに深まってきています。

米国では、様々な生物起源原料を利用した新しいバイオベース製品の研究開発が進んできています。全米一のトウモロコシ生産州であるアイオワ州では、トウモロコシ生産者が生産するトウモロコシ1ブッシェル(約25.4キログラム)あたり1セントの拠出金を出して運営している基金であるチェックオフ基金の一部を利用して、新しいプラスチック原料の研究開発を進めています。



アイオワ州トウモロコシ委員会のアレックス・バック(Alex Buck)博士(写真)は以下のように述べています。

米国ではフォーチュン誌が毎年「World's Most Admired Companies」(世界で最も賞賛される企業)を発表し、世界の企業を1位から50位までをランキング化しています。それらの多くの企業が環境問題に対応

する宣言をそれぞれに発しています。たとえば、ペプシ、ネスレー、P&G、レゴ、ユニバーが2025年までにすべてのパッケージングを再利用可能あるいはリサイクル可能なものにするとしています。また、ダノン、ペプシなどの企業がNaturALL Bottle Allianceという連合を形成して、共同で再利用可能なパッケージングの利用を推し進めています。一方で、米国のミレニアル世代(1980年代から90年代に生まれた世代)を対象に行ったアンケート調査では、63%がバイオプラスチック製のフォークやナイフを使用したいと答えています。

現在のバイオプラスチックは、ポリ乳酸を原料としているものが多く、過去40年間、新しいものが出てきていませんが、新しい素材を開発するためには、以下を考慮していかななくてはなりません。

- 1) 市場が欲している再生可能でリサイクル可能なパッケージング
- 2) 既存の化合物に少し手を加えることにより、商業化への時間を短縮
- 3) 加工のステップとコストを低減
- 4) 効率と多様性を持たせて、コストを低減
- 5) 既存の産業インフラを利用して入手できる原料

また消費者はバイオプラスチックを求めています、そのための費用を支払うのは企業の責任だと考えています。したがって、生産コストを下げることはとても重要です。

化石資源の原料は酸素を比較的含んでいませんが、バイオ原料の代表である糖は酸素を多く含んでいます。そこで、糖を原料として利用する場合には、酸素を多く含む素材に着目して開発を進める方が有利になります。糖の資源としてトウモロコシを使うことは、すでに生産から輸送、保管に至るロジスティクスが確立している点で有利です。そこでアイオワ州トウモロコシ委員会では、酸素分子を多く含むバイオ製品製造コストの削減を行いました。

対象にしたのは、モノエチレングリコール(Mono ethylene glycol, MEG)と呼ばれる物質です。MEGは不凍液やミネラルウォーターや清涼飲料水のプラスチックボトル、ポリエステル繊維にも使われる化合物です。現在ではボトルやポリエステルの3割近くがMEGを原料にしています。MEGは、ブドウ糖分子1個から3個製造されますが、その製造効率を従来の65%から85%程度まで改善することに成功し、特許を取得しました。その効率改善はトウモロコシ由来のブドウ糖から1ステップでのMEG製造によるものです。この歩留まり向上により、化石燃料由来のMEGをバイオMEGで代替できる可能性が生まれました。

このように、環境にやさしい消費者向けのバイオ製品のバラエティ

を増やし、トウモロコシ消費にも恩恵をもたらすと考えているとのことです。今後もアイオワ州トウモロコシ委員会では、新たなトウモロコシ

の活用法をチェックオフ資金を利用して研究していくとので、今後が期待されます。

ISUバイオエコノミー視察訪問

アイオワ州立大学のバイオエコノミー研究への取り組み

アイオワ州立大学バイオエコノミー研究所 (ISU Bioeconomy Institute, ISUBI) は実験室スケールの研究施設であるバイオリニューアブル研究所 (Biorenewables Research Institute、写真1)、バイオリニューアブルすなわちバイオ再生可能性に関する研究施設と、そこで得られた成果をスケールアップする



写真1 バイオリニューアブル研究所



写真2 バイオセンチュリー研究農場

バイオセンチュリー研究農場 (BioCentury Research Farm、写真2) の2か所から構成されている。

ISUBIは2010年にアイオワ州の人たちの寄付によって設立された。通常は寄付と州政府予算が半分ずつの費用負担をするが、この施設は100%が寄付に依っている。研究の中心は触媒であり、熱化学的触媒と生化学的触媒の両方を取り扱っているハイブリッドの研究所であるといえる。また、原料としてはトウモロコシのような再生可能な原料を用いている。研究の柱は、ガス化技術、パイロリシス、個別液化技術の3本である。これらの技術を組み合わせてバイオマスから、たとえばエタノールやジェット燃料を生産する。バイオマス原料をガス化して生成する水素や一酸化炭素を液化したバイオオイルを生成する。セルロース、ヘミセルロース、リグニンといったものが主な成分であるが、前者の2つからは糖を作り、リグニンからは赤茶色の粘性の高い酸性油 (Viscous acid oil) を作り、フェノール性油と瞬時に反応させてバイオアスファルトを作っている。バイオアスファルトには3つのメリットがある。まず米国では北部と南部で気温が異なるので、通常のアスファルトでは組成を変えないといけないのに対し、バイオアスファルトを通常のアスファルトに3割混ぜることで、どの地域でも使えるアスファルトになる。また、原料のリグニンを液化してアスファルトにするが、リグニン中の炭素をアスファルト中に隔離して環境から除くことができる。さらに、バイオアスファルトはバーベキューソースのにおいがする。このバイオアスファルトはバッチ製造から連続製造に、また、グラムレベルからキログラムレベルまでの技術開発をバイオエコノミー研究所で行った。現在はキログラムレベルからトンレベルへのスケールアップをバイオセンターにて行っている。

小スケールパイロリシス研究室

まず、小スケールでの試験が行われる。ここで製造される粘性の高い液体は99.8%が糖で、優れたバイオマテリアルである。バイオ原料であるバイオマスは熱処理されるが、粒径1.59ミリメートル (16分の1インチ) に細片化されている。ここまで細かくすることによって、パ

イロリシスが良好に進む。反応は毎時0.5ミリグラムのスケールのマイクロ・パイロリシスで試験される (写真3)。ここで生成したバイオオイルは、10%の糖を含むが、30~40%に濃縮をし、水と混合後に樹脂を使ってフェノール性物質を分離して、糖を水相に抽出する。バイオオイル成分は有機溶媒で溶出させる (写真4)。この段階で99%の濃度になるが、この濃縮生成過程は温度を高くしないので、糖のカラメル化は起こらない。



写真3 マイクロパイロリシス装置



写真4 生成物分離カラム

バイオ再生可能化合物 (Biorenewable chemicals)

バイオ原料から科学的に生産された素材の利用法を研究している。バイオ再生可能化合物の利用について、汎用できる技術の開発と生物的な技術と化学的な技術の片方でなく、それらを組み合わせた技術の研究をしている。それらの素材の中には、生物的に生産されるユニークな中間体に、それを出発原体として様々な分子に変換することができるポテンシャルの高いバイオに適した分子 (バイオプリベリッジ分子、Bio-privilege molecules) と呼んでいるものが含まれる。その一例であるトリアシッドラクトン (Tri-acid lactone) は、かつてソルビン酸合成の原料として使われていたが、2014年に原油価格が下がったため、経済性を失った。しかし、植物防御分子効果や殺虫効果のあるポガストンという物質の原料として有望視されている。これまでポガストンは6ステップの化学合成で製造されているが、炭素収率は5%と低い。このトリアシッドラクトンを原料とすると、炭素カップリングの1ステップで製造でき、炭素収率は96%である。また、統合性によって抗菌性のあるケト体を合成することができる。その際に異性体を作ることができるが、C2ケト体は殺虫剤として使われるピレスリンとして知られている。これまで作られたことなかったほかのケト体を合成し、殺虫性についてスクリーニングした。その結果、C5、C4、C3といった物質が合成できたが、そのうちのC3体が広範囲のスペクトルを持つ殺虫性を示した。ピレスリンに抵抗性の昆虫が出現しているため、この物質が期待されている。また、ムコン酸 (Muconic acid) から、アジピン酸 (Adipic acid) が生合成されていたが、これも原油価格の下落で採算性を失った。アジピン酸

を原料とするナイロン66は原料のアジピン酸に2%水分が含まれると40%の合成能力を失ってしまう。ところが、ムコン酸に二重結合を入れる反応を生物的に行って、ナイロン66製造のための疎水性材料を製造することができ、その中の水分含量は0.5%未満であった。

実験室では75ミリリットルのリアクターでミリグラムレベルの初期段階のスクリーニングをしている。次の段階にはフローリアクターが利用され、グラムレベルを数か月で試験している。

ISUバイオセンチュリー研究農場

アイオワ州立大学のバイオセンチュリー研究農場は、バイオマスのサプライチェーンにいるいろいろな人たちによって10年前に設立された。農学者 (Agronomists)、技術者 (Engineers)、化学者 (Chemists) が、バイオマス利用の品質とコストの最適化を目指すことによって、サプライチェーンにいるすべての人たちが協力するきっかけを作っている。大きく2グループがロジスティクス、プレパレーション、発酵、化学変換の4つのテーマに取り組んでいる。ここではパイロットプラントスケールの実証実験をしていて、大学発の技術の産業界への橋渡しの役割を担っている。

原料処理

バイオ製品を生産するための植物体原料の処理を研究している (写真5)。原料としての品質では長期保存のために水分含量が重要である。また、灰分は植物体そのものと農場で収穫時に混ざってしまう土壌由来のものがあり、前処理や製造工程で障害となる。収穫やその後の処理に手間を掛けな



写真5 バイオマス原料として用いるコーンストーバーのバイル

ければコストは低くて済むが、夾雑物が多くなる。したがって、収穫のコストと品質との間のバランスを最適化することにより、変換の経済性を図ることが望ましい。収穫と保管の技術を改善することにより、灰分の含量は40%下がり、かつコストも1トン当たり120ドルから70~80ドルに下げることができた。バイオ製品の生産過程であるバイオリファイナリーに使う原料は、キッチンで調理する材料を前処理すると同様に、細片化する。この際に小さな粒径にすればするほどリファイナリーの効率は上がる。どこまで細かくするコストを掛けられるかは、バイオリファイナリーと競合にある原油精製の原料である原油価格によって左右される。たとえば、コストの掛け方が高いと原油価格が120ドルの時には経済的に成り立つが30ドルになった場合には成り立たないということが起こる。また、粒径を100マイクロにまで小さくすると、細片化のコストも運搬コストも上がってしまう。どこまでコストを掛けて細片化するかは、生産する製品の価値によっても左右される。たとえば、化粧品のような付加価値商品であればコストを掛けられるが、燃料として使うためには、処理にコストは掛けられない。

原料として、コーンストーバーと木材があるが、木材の方が均一で灰分も少ないので利用しやすい。ここでは、木材 (ウッドチップ) を100マイクロ、8分の1インチ、4分の1インチの3種類の粒径のものを準



写真6 粉碎されたコーンストーバー(奥)とウッドチップ(手前)。それぞれ左から右に粒径100マイクロ(0.1ミリメートル)、8分の1インチ(3.2ミリメートル)、4分の1インチ(6.4ミリメートル)に粉碎したもの。

備して試験している。心がけているのは、ここでの目的は炭素を土壌に返すという循環をしながら、利益の出る持続可能性を達成することである (写真6)。

熱化学変換 (Thermo-chemical conversion)

トウモロコシのストーバーを原料 (Feedstock) として、その変換を熱化学的に行っている。FT法によってガス化したものをクリーンアップする工程により、水素と一酸化炭素を生成する。熱化学変換は加圧下で温度を摂氏850度に上げる。トウモロコシ以外にも、原料として自生するスイッチグラスが有効である。現在は毎時13キログラムの効率であるが、将来は毎時35キログラムを目指している。この工程によりタール分が生成するが、これは鉄触媒によって硫黄分を取り除いた後、アンモニアカラムにかけている。

熱化学変換によって生成した成分は120度1気圧の条件で液体中間体にする。この技術は新規のもので、毎時22キログラム (1日0.5

トン) の効率である。このようにした液体中間体に酵素を反応させる。ここまでの行程で生成するのは糖を多く含む液体成分とタールである。糖は精製シエタノール生産などに利用するほか、さらに結晶化による純化が行われる。タールは石油精製での hidroクラッキングで生産される製品と同じであり、バイオアスファルトとして利用されるほか、土壌改良の補助剤としても利用可能である。

バイオオイルの糖画分 (Biooil Sugar Fraction、写



写真7 バイロリシスにより生成するバイオ・オイル画分



写真8 1トンスケールの発酵タンク

真7)は糖を15%含むが、陽イオン・陰イオン交換樹脂を通してバイオチャー(Biochar)になる。この全体のプロセスは1日200トンの生産を目指しているが、これは地域のエタノール生産のスケールであり、DuPontなどの大規模施設では1日2,000トンの効率が必要である。



写真9 発酵後のサンプルを集める遠心機

発酵

大学キャンパスで小スケールで試験されたものを500キログラム、1,000キログラムのタンクを利用してスケールアップしている(写真

8)。ここでのスケールアップにより産業化への橋渡しを行っている。たとえば、ADMやCargillは大きすぎてこのレベルの試験は非効率である。発酵後の細胞などは遠心機などで集めている(写真9)。

バイオアスファルトのパイロットプラント

バイオエコノミー研究所で得られた成果をもとに、バイオアスファルト製造のスケールアップをしている(写真10)。現時点では大豆油を重合させて分子量により分離し、ゲル相とガラス相に分ける。また、バッチ反応槽で500リットルから5,000リットルにスケールアップしている。



写真10 バイオアスファルト製造のパイロットプラント

米国農務省「世界農業需給予測(WASDE)」による 飼料穀物(トウモロコシ、ソルガム、大麦)需給概要の抜粋

2019年8月12日米国農務省発表の世界農業需給予測の米国産飼料穀物に関する部分の抜粋の参考和訳を以下に掲載いたします。WASDEのフルレポートについては(<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/>)よりご確認ください。また、数値や内容については、原文のレポートのものが優先いたします。各項目の詳細、注釈についても原文をご参照ください。

今月の2019/20年度の米国産粗粒穀物の見通しは、生産量の引き上げ、輸出とエタノールへの利用の引き下げと期末在庫の上方修正となっています。トウモロコシ生産量の予測は、収穫面積の減少が実質的に単収の増加によって補われたことから、7月の予測より2,600万ブッシェル引き上げられ、139億ブッシェルとなっています。今年度の最初の調査ベースの単収予測は、先月の予測より3.5ブッシェル高い1エーカーあたり169.5ブッシェルとなっています。発表された作物生産量レポートでは、イリノイ州、インディアナ州、アイオワ州、ミネソタ州、ネブラスカ州、オハイオ州とサウスダコタ州で昨年より低く予測されています。主要生産州のうちで昨年より高く予測されているのは、ミズーリ州のみです。エタノール向けのトウモロコシの利用量は2,500万ブッシェル減の55億ブッシェルとなっています。輸出については、米国の輸出競争力の低下とアルゼンチン、ブラジル、ウクライナとの競争の激化を反映して引き下げられています。供給の増加と利用の減少によって、期末在庫は1億7,100万ブッシェル増の22億ブッシェルとなっています。年間平均農家出荷トウモロコシ価格は10セント引き下げられて1ブッシェルあたり\$3.60となっています。

米国外の2019/20年度の粗粒穀物の見通しは、先月と比較して、生産量と貿易量の引き上げと、在庫の増大となっています。ウクライナのトウモロコシ生産量は、作付け面積と単収の両方の引き上げをもとに史上最大と予測されています。受粉期の適切な時期での低めの気温と降雨により、単収が大幅に上昇すると期待されています。ヨーロッパのトウモロコシ生産量は、ルーマニア、ハンガリーとブ

ルガリアでの増加が、ポーランド、フランス、ドイツでの減少を補って、引き上げられています。大麦の生産量は、アルゼンチンとロシアで引き上げられています。トルコとEUとカザフスタンで引き下げられています。

2019/20年度の主な世界の貿易での変更は、ウクライナとセルビアでのトウモロコシ輸出の増大で、その一部がロシアでの減少を補っています。2018/19年度のアルゼンチンとブラジルでのトウモロコシ輸出量は、2019年3月に始まった現地の市場年度において、7月の予想より多い出荷を反映して引き上げられています。2019/20年度のトウモロコシ輸入量は、主にEUとインドネシアでの増大を受けて引き上げられています。中国については、タンパク原料の消費が低く予測されていることから、トウモロコシの飼料そのほかへの利用が引き下げられています。米国外でのトウモロコシの期末在庫は、主に中国、EU、ウクライナ、トルコでの増加とそれを一部補うアルゼンチンとインドネシアでの減少を反映して、先月と比較して上方修正されています。

ネットワークに関するご意見、
ご感想をお寄せ下さい。



U.S. GRAINS アメリカ穀物協会
COUNCIL

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1丁目2番20号
第3虎の門電気ビル11階

Tel: 03-6206-1041 Fax: 03-6205-4960

E-mail: grainsjp@gol.com

本部ホームページ(英語): <http://www.grains.org>
日本事務所ホームページ(日本語): <http://grainsjp.org/>