

米国のバイオエタノールが果たす役割とコーンバイオリファイナリーの発展

この記事は3本の英文記事に基づいてアメリカ穀物協会が参考までにまとめたものです。詳細と内容の確認については、各記事の原文に当たってください。

(原文の掲載ページ)

●トウモロコシ穀粒から茎葉まで、より多くのものを得るために
<https://ethanolproducer.com/articles/19423/getting-more-from-cornundefinedkernel-to-stalk>

●次世代に良い燃料を届けよう
<https://ethanolproducer.com/articles/19421/letundefineds-give-the-next-generation-a-better-fuel>

●物価高の解決策
<https://ethanolproducer.com/articles/19422/the-cure-for-high-prices>

トウモロコシ穀粒から茎葉まで、 より多くのものを得るために

米国のバイオエタノール産業では、原料のトウモロコシ穀粒中のデンプンのバイオエタノールの生産と並行して得られる「併産物」として、穀粒中のたんぱく質や油分由来のジスチラーズグレインと呼ばれるたんぱく質に富んだ家畜飼料原料と、トウモロコシ穀粒から得られるジスチラーズコーン油(DCO: Distillers Corn Oil)の回収が行われ、トウモロコシ穀粒の余すことのない利用が行われています。最近では、これらの併産物の生産効率を最大化するための努力が行われている一方で、茎や葉を利用して再生可能天然ガス(RNG: Renewable Natural Gas)が製造されるようになってきました。ここでは、アイオワ州のバーバイオ(verbio)社のRNG製造と、間もなく完成するコーンバイオリファイナリーのグランドオープニングを紹介します。

トウモロコシの多角的な利用の一つであるバイオリファイニングは、近年速いスピードで進んでいますが、その利用はまだ始まったばかりで、ちょうど120年前の化石燃料の利用の始まりと似た状況にあります。その当時、つまり自動車が普及していなかった時代には、石油はランプの明かりの原料としてのみ認識されていました。

現在のエタノール産業は、トウモロコシの穀粒、ひいてはトウモロコシの植物体全体から、エタノールをのみ生産からより多くの併産物の製造を進展させるという、過去に石油からのランプ油以外の製品製造を行うようになったのと同じような道を歩んでいると言えます。これはトウモロコシ由来バイオエタノールの低炭素

化に貢献する方法の一つであることも意味しています。現在のエタノールは、トウモロコシ(=過去の石油の場合は石油)からより付加価値の高い他の製品を生産する「石油ランプの明かりの原料」なのかもしれません。このたとえば、何年も前から語られていましたが、まさに今さらなる真実味を帯びてきています。

たんぱく質源となるDDGSや油脂源となるDCOは、エタノールより経済的価値を高め始めてもいます。実際、DCO価格は過去最高になっていて、エタノール生産企業はその回収率を最大化するためにあらゆる努力をしています。

さらに私たちはトウモロコシの穀粒だけでなく、トウモロコシの全体の利用も向上させつつあります。過去10年間、トウモロコシの茎葉からエタノールを生産する試みがなされてきました。未だ道は険しいですが、私たちはそれを諦めてはいません。それらの工場は、トウモロコシのほぼ全てを利用する多角的なバイオリファイナリーへと生まれ変わろうとしています。穀粒だけでなく、茎葉も利用しようとしているのです。

すでにトウモロコシの茎葉からは、再生可能天然ガス(RNG)を生産しており、トウモロコシ穀粒からのエタノールの生産の際、エタノール製造工程で出るシンスチレージと呼ばれる留分は、茎葉と一緒にRNGの副原料として使われる予定です。このような「バイオリファイニング」の手法で、今後はDCOのような既存の製品だけでなく、窒素肥料や、最終的にはCO₂からの合成天然ガスなど、様々な製品も生産できるようになるでしょう。

今後、このようなセルロース系RNGとトウモロコシ由来のエタノールの両方が生産されるようになり、トウモロコシの穀粒から茎葉までの利用価値を最大限に引き出すことができる、これまでにない工場が増加すると期待されます。

また、数年前には大規模なトウモロコシ茎葉の生産・流通への取り組みがネバダ州で始まりました。これは必要な栽培面積でトウモロコシを契約栽培し、原料の収集、パッキング、バイオリファイナリーへの輸送を一貫して行うものです(写真)。この新しい組織的な取り組みは、これまで個々の事業者にとってトウモロコシ茎葉の利用の大きな課題となっていた原料の流通や保管への解決策となることが期待されます。

今後は、トウモロコシからバイオエタノールを生産するという単純な図式の工程ではなく、トウモロコシの植物体全体から様々な製品を製造する、バイオリファイナリー的な発想の産業への転換が期待されています。そして、その結果、トウモロコシ原料バイオエタノールの脱炭素への貢献度が、さらに増していくことが期待されています。



次世代に良い燃料を届けよう

バイオエタノールは、現在米国内で走行中の2億7千万台の自動車の脱炭素への恩恵をもたらしています。さらにこのエタノールの利用を増大させることによって、EV導入よりも短い時間で脱炭素への貢献を進めることが可能です。しかし、エタノールの恩恵は、脱炭素だけにとどまりません。オクタン価向上剤として優れているエタノールの利用をさらに加速することによって、オクタン価向上のためにガソリンに添加されているベンゼン系発がん性物質を置き換えることができるのです。

エタノール産業の歴史は50年前にさかのぼります。1970年代にほんの一握りの工場から今日のような急成長を遂げた原動力は、エネルギー安全保障、環境、農業や農村地域の経済発展、そして人間の健康に影響を及ぼさないオクタン価添加剤としての意義でした。

現在の1ガロン5ドル(1リットル約170円)台のガソリンを前にして、エタノールのガソリン混合による利用の経済的メリットは高まりました。しかし、エタノールが、現在オクタン価向上のために使用している有毒で発がん性のあるベンゼンなどの芳香族化合物を置き換えるクリーンな代替品であるという事実は、ガソリン価格にかかわらず変わりません。このことは、1990年に行われた大気浄化法改正の際に、当時の連邦議会の議員であったトム・ダッシュルやボブ・ドールら超党派が、エタノールを芳香族化合物の代わりに混合利用することを要求したときから知られていたのです。

この、エタノールのガソリンへの混合による、ベンゼン系発がん性物質を代替して人命を救うという価値は、さらに認識をされるようになる必要があります。

現在、米国では次世代燃料法という法案が提出されています。この法案は、再生可能燃料基準(RFS)、気候変動、EVといったエタノールをめぐる問題を解決するだけでなく、少し見えなくなりかけているエタノールの意義の認識を根本から変える法案です。この法案には、20の企業や業界団体が支持を表明していて、エタノールをエネルギー分野のメジャーな舞台に押し上げた大気浄化法以来の、根本的、包括的にその価値を見直すための、燃料に関するもっとも大きな変革の法案と言えるでしょう。この法律は、自動車と燃料を統合されたシステムとしてとらえ、自動車

メーカーと燃料供給企業が長年取り組んできた、いくつかのもっとも困難な問題に取り組むものです。

自動車業界は最低オクタン価の引き上げを長年求めてきました。オクタン価の高い燃料を使えば、自動車メーカーは容易に燃費を向上させることができます。この点でこの法案は自動車業界に恩恵を与えます。法案はオクタン価の指標であるリ

サーチオクタン価(RON)の98という値を求めています。このオクタン価によって燃費を7~8%向上させることができるのです。

さらに、オクタン価向上と同時に温室効果ガスを40%以上削減することを求めています。また、芳香族化合物を削減する必要があるとしていることが重要だとしています。エタノールは、オクタン価向上、温室効果ガス排出削減、芳香族化合物の削減のすべてを満たします。したがってこの法案は、エタノールに広く門戸を開放することになります。この法案によって、エタノールの現在のガソリン10%混合から、20%から30%混合への道を事実上開くこととなります。またその結果、自動車の燃費が良くなり、石油の使用量も減り、二酸化炭素の排出量も減り、有害物質の排出も減り、さらに消費者には燃料費が安くなるという効果ももたらされるのです。

エタノールは、ハイオクタン、低炭素、クリーン、低コスト、そして経済の活性化という、次世代に向けた真の燃料であると言えます。米国内を現在走っている2億7千万台のエンジン(内燃機関)駆動自動車に対する現時点ですぐに恩恵をもたらすこととなります。さらに、市場投入までの時間とコストがかかると思われるEVの普及を待つまでもなく今後数十年にわたって利用が続くことになるであろうと予想されるエンジン車にも恩恵を与え続けることができるのです。このように、次世代燃料法は、30年以上前に作られた大気浄化法の条項のビジョンを実現するために必要とされているのです。

物価高の解決策

ガソリン価格の高騰が続く中、米国のエタノール産業の団体である再生可能燃料協会(RFA:Renewable Fuels Association)は米国の燃料供給においてエタノールがより大きな役割を果たすよう、引き続き提唱しています。

「価格高騰の特効薬は..価格高騰である」と言われています。つまり、ある製品の価格が耐えがたいほど上昇すると、消費者は消費を減らすか、その製品をまったく買わなくなります。そうすると、その商品の供給が増え、やがて価格が下がるのです。これとは反対に、価格が暴落すれば、安い価格にメリットを見出した消費者や需要サイドの購買力が高まり、その製品の購買を増やし

ます。その結果、需要が増え、やがて価格は上がっていきます。これは、需要と供給のバランスで、原油やトウモロコシをはじめとする商品の需給と価格についての基礎的な動きです。現実には、これに投機や天変地異などのファクターが加わり、より複雑な動きをします。

さて、原油価格高騰などの理由によって価格高騰した米国のガソリン価格は、6月に1ガロン5ドル(1リットル約170円)という新記録を樹立しました。その結果、自動車通勤をやめたり、夏のドライブ旅行を断念したりすることによる「消費の減少」が必要なのでしょう。それには、もっと良い解決策、すなわちエタノールの利用があります。全米のガソリンスタンドでは、すでにエタノールがガソリンに混合して利用されています。ガソリン価格の高騰に対処するために、このエタノールが効果を現わしています。エタノールは2022年の夏、ガソリンより1ガロンあたり1ドルから1ドル50セント(1リットル約35円から100円)安くすることが可能であり、ガソリン精製業者やガソリンスタンドはガソリン価格を下げることににより消費者に貢献することができているのです。

しかし、ガソリン精製業者はエタノールを製造していません。先に述べたように市場原理から見ればもっと混合するべきです。そこで、バイデン政権はこの夏、記録的なガソリン価格の高騰に対する解決策としてエタノールの使用量を増やすよう働きかけました。

環境保護庁(EPA)はこの6月に、再生可能燃料基準(RFS)に関する規制措置を講じました。それは、エタノールの生産拡大を通じてエネルギー安全保障を強化し、低炭素の再生可能燃料の使用を拡大するための強固な基盤の提唱です。具体的には、EPAはトウモロコシのデンプンを原料とする従来型再生可能燃料の2022年の混合要件を過去最高の152.5億ガロン(約577億リットル)に設定し、例外的に施行されていた小規模製油所のエタノール混合免除プログラムに終止符を打ちました。

ガソリン価格の高騰の解決策は、これ以上の高騰でないことは明らかです。エタノールの生産量を増やし、競争を促進することが解決策になるのです。そのために、RFAは米国の燃料供給においてエタノールがより大きな役割を果たすよう、引き続き努力を続けていきます。

DDGSハンドブック第4版 第9章 -vol.2

(177号より続く)

DDGS中の脂質の過酸化

豚およびブイラーへの過酸化脂質給与の影響

トウモロコシDDGSには、世界中で飼料に用いられている一般的な飼料原料中で粗脂肪含量が最も高い。脂質の過酸化反応は、熱、酸素、水分、遷移金属(Cu(銅)やFe(鉄)など)によって引き起こされる複雑な化学連鎖反応であり、フリーラジカルは有毒なアルデヒドやその他の化合物に変換される(Shursonら、2015)。DDGSに含まれているトウモロコシ油は、主に多価不飽和脂肪酸(特に、リノール酸(C18:2)58%)で構成されていることから、過酸化を受けやすい(Frankelら、1984)。脂質が比較的高温で加熱されると、アルデヒド、カルボニル、ケトンなどの二次脂質過酸化生成物が大量に生成される(Esterbauerら、1991)。DDGS製造時の乾燥温度は500℃にもなる可能性があり、脂質過酸化の影響を受けやすくなる。すべての酸化促進条件(熱、酸素、水分、遷移ミネラル)は、DDGSを生産するエタノール工場に存在しており、DDGSは輸送、保管および飼料工場での配合飼料の製造中にこれらの要因にさらされる可能性がある。したがって、製造後、輸送中および長期保管中のDDGSの過酸化の程度については、いくつかの懸念がある。

豚やブイラーに対して、過酸化脂質を給与すると成長成績が低下し、酸化ストレスが増加することが示されている。Hungら(2017)は、29報の公表文献のデータについてのメタ分析を行い、増体日量が5%、飼料摂取日量が3%、飼料効率が2%、血漿ビタミンE濃度が52%低下し、血清中TBARS(チオバルビツル酸反応性物質)値が120%高まった。最近公表されたKarrら(2015)およびShursonら(2015)のレビューでは、豚および家

禽に対する過酸化脂質給与による生物学的な影響と過酸化脂質の測定結果の解釈に関する課題について包括的に述べられている。本ハンドブックの24章では、最近行われた高度に過酸化されたDDGSを豚に給与した試験の結果を記載している(Songら、2013; 2014; Hansonら、2015a)。

供給源が異なるDDGSの脂質過酸化指標調査

Song and Shurson(2013)は、米国の9つの州のエタノール工場から入手したトウモロコシDDGS 31試料の脂質過酸化と色調を測定し、これらの値をトウモロコシと比較している(表4)。過酸化物質とTBARS値は、飼料業界で長年使用されている脂質過酸化の一般的な指標となっている。ただし、これらの過酸化指標には他のすべての過酸化測定と同様にいくつかの制限があり、脂質の過酸化の真の程度を常に反映しているわけではない(Hungら、2017; Shursonら、2015)。現在、飼料原料の脂質過酸化を測定するための基準やガイドラインはない。しかし、Wangら(2016)は、4-ヒドロキシノネナールと特定のアルデヒドの比率が、植物油の過酸化の実際の程度を推定するための指標となりうることを示唆している。しかし、残念ながら、一般的にはこれらの分析は委託分析機関では行われていない。

PV(過酸化価)は、過酸化のプロセスの開始段階における過酸化の程度を推定するために使用されている。DDGSのPVは変動が大きく(CV=97.5%)、油脂中の最小値は4.2meq/kg、最大値は84.1meq/kgであった。TBARS値は、過酸化の増加期(アルデヒドの大部分が生成される時期)における脂質過酸化の程度を推定するために使用されている。PVの値と比較してTBARS値はDDGSの試料間でのバラツキが少なく(CV=

43.6%)、脂質中含量は1.0から5.2ng MDA相当量/mgの範囲だった。PVDDとTBARSの両者が、DDGS製造時に行われる熱処理のためにトウモロコシより高値となった。L*とPV(r=-0.63)、b*とPV(r=-0.57)の間には中程度の負の相関が認められたが、L*とTBARS(r=-0.73)とb*とTBARS(r=-0.67)の間の負の相関はわずかに高かった。これらの結果は、色調が濃く、黄色味が少ないDDGSで過酸化が進んでいる可能性があることを示唆している。しかし、その後行われた、著しく酸化が進んだ

DDGSを含む飼料を離乳豚(Songら, 2014)および妊娠豚と産仔(Hansonら, 2016)に給与しても、発育成績に悪影響はなかった。これらの研究において発育成績に悪影響が発生しなかった原因としては、DDGS中に高濃度に含まれている抗酸化化合物(トコフェロール、フェルラ酸、ルテイン、ゼアキサンチン)の存在(Shurson, 2017)や、硫黄化合物の内因性抗酸化物質への変換の結果の可能性がある。

DDGSの脂質過酸化防止のための市販抗酸化剤の効果

市販の合成抗酸化剤は飼料中の油脂の過酸化を最小限に抑えるために使用されている(Valenzuelaら, 2002; Chenら, 2014)。最も一般的に使用されている合成抗酸化剤には、BHA(t-ブチル-4-ヒドロキシアニソール)、BHT(2,6-ジ-t-ブチルヒドロキシルエン)、TBHQ(t-ブチルヒドロキノン)、エトキシキン、2,6-ジ-t-ブチル-4-ヒドロキシメチルフェノールなどがある(Guoら, 2006)。

粗脂肪含量が高い(13%)あるいは低い(5%)DDGSに合成抗酸化剤を添加した場合の効果の評価したHansonら(2015b)による唯一の報告が公表されている。2種類のDDGSには、TBHQ(Rendox; Kemin Industries、デモイン、IA)1,000mg/kg、またはエトキシキン(Santoquin; Novus International、Stルイ、ミズーリ)およびTBHQ 1,500mg/kgを添加し、温度(38℃)、相対湿度(90%)に調節したチャンバー内で28日間保管して、脂質過酸化の程度を測定した。その結果、28日間の貯蔵期間中に

表4. トウモロコシDDGS 31試料から抽出した油の脂質過酸化指標の概要とDDGSの色調 (Song and Shurson, 2013)

DDGS 指標	トウモロコシ	平均	中央値	最小値	最大値	CV %
過酸化物質 meq/kg脂質	3.1	13.9	11.7	4.2	84.1	97.5
TBARS ¹ , ng MDA equiv/mg oil	0.2	1.9	1.7	1.0	5.2	43.6
Color						
L* ²	83.9	54.1	54.9	45.2	58.1	4.6
a* ³	2.6	10.9	10.8	9.3	12.4	7.2
b* ⁴	20.0	37.3	37.5	26.6	42.7	8.8

¹ TBARS = チオバルビツール酸反応性物質

² L* = 値が大きいかほど明るい色を示す

³ a* = 正の値が大きいかほど、赤色味がより強い

⁴ b* = 正の値が大きいかほど、黄色味がより強い

表5. DDGSの粗脂肪、抗酸化剤およびサンプリング日が温度38℃、相対湿度90%で保存したDDGSの脂質過酸化に対する影響(HansonR, 2015から改編)

Item	High Oil DDGS			Low Oil DDGS		
	対照	Rendox	Santoquin	対照	Rendox	Santoquin
過酸化物質 mEq/kg脂質						
14日目	7.1 ^a	3.1 ^{bc}	3.6 ^b	4.5 ^d	2.7 ^c	2.8 ^b
28日目	31.4 ^a	13.9 ^{bc}	15.4 ^b	20.5 ^d	11.7 ^{bc}	13.6 ^{bc}
TBARS 1 mg/MDA 2 Eq/kg脂質						
14日目	5.1 ^a	2.9 ^{cd}	2.4 ^d	3.8 ^{bc}	2.4 ^d	2.3 ^d
28日目	21.1 ^a	9.5 ^b	9.0 ^b	14.3 ^d	11.0 ^{bc}	10.1 ^{bc}
p-アニシジン価³						
14日目	3.9 ^a	1.0 ^b	1.0 ^b	3.8 ^a	0.7 ^b	1.0 ^b
28日目	9.1 ^a	3.4 ^{bc}	2.9 ^{bc}	9.5 ^a	5.0 ^b	4.3 ^b

a-c 異符号間に有意差あり (P < 0.05)

¹ TBARS = チオバルビツール酸反応物質

² MDA = マロンジアルデヒド

³ 単位なし

脂質過酸化が発生して増加し、過酸化の程度は、粗脂肪含量が低いDDGSに比べて高いDDGSが高かった(表5)。また、各DDGSにRendoxまたはSantoquinを追加すると、過酸化の程度が約50%減少した。これらの結果は、RendoxまたはSantoquinのいずれかの追加により、高温多湿条件下で最大28日間保管した場合に、脂質の過酸化を低減する効果があることを示している。さらに、DDGSの水分含量は、28日間の保管期間中に10.2から21.4%に増加し、すべてのサンプルでカビが著しく生育した。

第9章の引用文献リストにつきましてはこちらをご覧ください。

<https://grains.org/wp-content/uploads/2018/06/Chapter-9.pdf>

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 COUNCIL アメリカ穀物協会

〒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: Japan@grains.org

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