

## バイオガスエネルギー

誌名	畜産の研究 = Animal-husbandry
ISSN	00093874
巻/号	682
掲載ページ	p. 223-226
発行年月	2014年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# バイオガスエネルギー

## 新しい農業へのバイオテクノロジーの応用<sup>1)</sup>

J. C. H. SHIH<sup>2)</sup> 著

堀口恵子<sup>3)</sup>・片山詔司<sup>4)</sup>・三枝修<sup>5)</sup>・信沢敏一<sup>6)</sup>・戸塚耕二<sup>6)</sup>共訳

### 概要

この21世紀の農業は全般的な5つの趨勢に従って新しい課題と変革に直面している。すなわち、①商業化、②国際化、③科学と技術、④環境および、⑤エネルギーの生産である。この研究室においては、バイオガスと酵素技術の一連の研究、開発および商業化がこの趨勢を反映している。嫌気性発酵は、有機廃棄物からメタンガスを60~70%含むバイオガスへと転換する微生物の作用である。鶏糞の簡素な好気性発酵(TAnD)システムは実験室から農場へと発展した。50~60°CでのTAnDは高率でバイオガスを生産し、その結果、処理工程は効率が良く発酵槽もコンパクトである。ノースカロライナ州立大学(NCSU)研究農場において最初の試験的なプラグー放水(水洗便所の放水栓式)TAnDが建設され、操業を開始した。このシステムは多様な利益をもたらすことが証明された。国連開発計画(UNDP)からの援助によって中国で1日5トンの鶏の堆肥(5万羽の産卵鶏から出る)を処理するTAnDが建設され、20年間稼働している。1日数百トンの糞尿を処理する大規模な発酵槽が、中国やヨーロッパで一般に普及しつつある。大きな発酵槽からのバイオガスは重要な

エネルギーの供給源となっており、電気の発生あるいは、輸送機関に燃料を供給する。エネルギー生産のほかに発酵槽は生体材料の豊富な給源である。羽毛分解菌がTAnDから発見されて、分離され、そして後にケラチンを分解する酵素ケラチナーゼおよび酵素をコードする遺伝子が同定された。過剰発現のための遺伝子操作と発酵のスケールアップにより、今日では酵素の工業的生産が可能となった。熱に安定なプロテアーゼとして、ケラチナーゼは羽毛粉の処理、飼料の消化率の向上およびプリオンたんぱく質(牛海綿状脳症の病因子とされている)の分解に有用であることが見いだされている。

### 1. 序論：農業の動向

われわれは、この21世紀の最初の10年間に人間の文明における最古の事業の一つである農業の表面と実際における急速な変革を目撃してきた。

新しい発展、または動向の主なものは次の通りである。

(1) 商業化：農業生産は企業の農業へと次第に変わりつつあり、そして高い効率と利益をともない規模の拡大を続けながら経営されている。農業は労働集約的な事業からますます資本集約的な企業へと動いている。

(2) 国際化：生産物の貿易・交易がますます活発になっており、WTO, FTA および ECTA などの条約や協定が広範囲にわたって農業に影響を及ぼしている。国際的な生産と販売を行っている多国籍企業がカギとなるプレーヤーになりつつある。

(3) 科学と技術：生き残りと成功には科学と技術に駆られた農業経営が緊要とされており、特にバイオテクノロジーは食の安全、食糧不足など緊急の問題を処理して一部解決するであろう。

<sup>1)</sup> From biogas energy, biotechnology to new agriculture

*World's Poultry Science Journal*, Vol. 68, September 2012

<sup>2)</sup> North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA/  
BioResource International, Inc., Morrisville, North Carolina,  
USA/Institute of Biological Chemistry, Academia Sinica, Taipei,  
Taiwan, ROC

<sup>3)</sup> 東京農業大学 (Keiko Horiguchi)

<sup>4)</sup> 株式会社北海道中央種鶏場 (Shoji Katayama)

<sup>5)</sup> ロイドレジスタークオリティアシユアランスリミテッド  
(Osamu Saegusa)

<sup>6)</sup> 日本動物看護学会 (Toshikazu Nobusawa, Koji Totsuka)

翻訳・掲載に当たっては *World's Poultry Science Journal* 誌  
Editor の了承を得た。

(4) 環境保護: 化学肥料と農薬の過剰な使用は徐々に環境への負荷を増大させている。今日、大規模な動物生産は土壌、大気、水質にマイナスの影響を与える。これらの問題の解決策としては、新しい規制と環境にやさしい科学技術的方法の開発であり、持続可能な農業の開発のために、その必要性が高まるだけでなく必須となりつつある。

(5) エネルギー生産: 農業における第5番目の動向としては、近年、現れたが2008年には、原油の価格が1バーレル当たり100ドルを突破し、地球の気候変動についての関心が高まってきた。世界中の政府、産業界、研究機関は化石燃料の使用を減少させ、そしてバイオエタノール、バイオディーゼル、バイオガスを含めたクリーンな再生エネルギー源に投資するために研究を加速させている。これらバイオ燃料の生産には農業組織—その規模、構造基盤、兵站学とともに—は、費用効果の高い経済的な解決策を提供するよう一意的に定められている。これは21世紀における農業の新しく活力のある局面となるであろう。

## 2. 動物廃棄物か バイオガスの生産

動物および農業廃棄物の嫌気性発酵は農業エネルギー生産の一例である。この過程で廃棄物は細菌によって分解され、メタンと炭酸ガスの混合物であるバイオガスに転換される。メタン含量60~70%のバイオガスは暖房や給湯または発電に適した可燃性ガス燃料である。

### (1) 実験室の研究

1970年代の後半、鶏糞からバイオガスを生産する可能性を研究するために、この研究室がノースカロライナ州立大学(NCSU)に設立された。計画的・組織的に色々な種類の細菌および操作上の各種のパラメーターが研究され、バイオガスの生産を最大にするための最適条件が決定された。鶏糞は潜在的にバイオガス生産の良い基質であることが明らかとなった。発酵が高温(50~60℃)で起こると、中温(30~40℃)および環境温度(10~20℃)でそれぞれ働く通常の発酵と比べて、4倍と10倍も効率的である。例えば、100万羽の養鶏場があるとすると、1日当たり約100トンの新鮮鶏糞が発生する。研究室での実験結果から、これは8,000m<sup>3</sup>のバイオガスを生産すると推定される(HuangとShih, 1981)。この

量のバイオガスであれば、発電システムによって1日当たり16,000kwh、あるいは年間600万Kwhの電力に変換することができる。このエネルギーの推定生産量は、ごく最近中国やヨーロッパにおけるいくつかの大規模発酵槽で立証されている。

### (2) 予備試験的な計画(パイロットプロジェクト)

この実験結果に励まされて、この研究チームではNCSU試験農場に4,000羽の産卵鶏用の簡単なプロトタイプの発酵槽を建設した。毎日約400kgの新鮮鶏糞が50~55℃で処理された。3年間の運転の間に、成績は実験室で予測された通りの潜在能力に到達した(SteinsbergerとShih, 1984)。この野外試験は成功し、好気性嫌気性発酵(TAnD)の基本概念と実現の可能性を証明した。さらに、試験農場のパイロット発酵槽システムでこの技術と関連して多くの環境上の利益のあることが示された(Shih, 1987)。

### (3) 実用規模の発酵槽

TAnDの次のステップとしては、大規模でその実現の可能性を判断することであった。ある一つの好機が訪れた。それはNCSUでも、アメリカ国内でもなく、中国であり、嫌気性発酵とバイオガスがほぼ100年間使われてきた。TAnDの技術は、中国にはこれまでにない新規のものであったので、実用可能性の研究が1985年広州(中国広東省の省都)で行われた嫌気性発酵に関する国際シンポジウムで提案された(Shih, 1985)。5年後、UNDPからの助成金でわれわれの実験室が招かれて、北京のLiumingyingという村に実用規模のTAnDシステムの設計と建設を援助した。NCSUのプロトタイプを基本にして、100m<sup>3</sup>のコンクリート製断熱水槽と加熱システムを建造した。この小型の発酵槽で毎日50,000羽の産卵鶏から出る新鮮鶏糞5トン进行处理し、同時にバイオガス300m<sup>3</sup>を生産することができた。脱硫されたバイオガスは地下の導管で調理用と暖房用として村の200世帯へ供給された。発酵槽からの廃液と沈積物(スラッジ)は地元で使われ、そして有機質肥料として売却された。発酵槽への初期の投資資金は3年で回収された。過去20年間に世界各地から、このTAnDシステムについて学ぶために約20,000名の人がLiumingying村を訪れた。3年前には、電気を起こすために260万羽の産卵鶏から出る鶏糞进行处理する3,000m<sup>3</sup>の大きな発酵システム4基が中国の北京に建設された。

### 3. ケラチナーゼの バイオテクノロジー

バイオ燃料生産の源として TAnD に注目が集まっているにもかかわらず、最終的には全くの新しい展開へと導いた新しい手段を切り開いたのは、ある 1 つの偶然の発見であった。

#### (1) 羽毛の分解とケラチナーゼの発見

NCSU 大学の試験農場にある発酵槽を運転している間に、糞の中に入った鶏の羽毛が発酵槽の中では消失してしまうというある興味深い現象が発見された。ある 1 つの出来事、すなわち 1 羽の産卵鶏がケージから落下して最後には不注意にも発酵槽の中に落ちてしまった。水槽(タンク)を開けたとき、そこには産卵鶏は羽一枚なく、全く跡形もなくなっていた。羽はヒトの毛や手の爪と同じく非常に抵抗性の高いケラチンと呼ばれるたんぱく質から構成されており、このケラチンは通常の消化の過程では分解されることはないの、このことは注目すべきことである。この出来事があって、この難問を解決するために約 2 年間で使われ、羽毛分解細菌 *Bacillus licheniformis* PWD-1 が発酵槽から分離された。これが鶏糞の発酵槽から分離された最初の細菌である (Williams ら, 1990)。この細菌は、ケラチンのように分解が困難なたんぱく質を分解することのできる独特の酵素を生産することが明らかになったので、この特性に因んで酵素はケラチナーゼと命名された (Lin ら, 1992; Shih, 1993)。

#### (2) ケラチナーゼの遺伝学と生産

酵素があれば、酵素をコード化する遺伝子が必ずある。酵素はたどっていくと細菌中にあり、ついにその遺伝子が分離され、遺伝子の基本構造を決定するために塩基配列の決定を行った (Lin ら, 1995)。遺伝子操作により、酵素(ケラチナーゼ)の生産量を 4~5 倍に増大させることができた。実験室にある 150 リットルの発酵槽で応用研究を行うために必要とする十分な量の酵素を生産することができた (Wang と Shih, 1999)。後にケラチナーゼは市販され、50,000 リットルの工業規模の発酵槽で生産された。ケラチナーゼ PWD-1 の発見後、世界中の多くの実験室で同じような研究が行われ、新しい多くのケラチナーゼが発見された (Gupta と Ramnani, 2006; Brendelli ら, 2009)。

### 4. ケラチナーゼの応用

ケラチナーゼの応用研究に基づいて、この酵素を利用する多くの方法が発見された。—あるものは予測できたものであり、あるものは目新しいものであった。

#### (1) フェザーミールの処理

毎年、アメリカでは約 100 万トンの羽毛が、世界では 400~500 万トンの羽毛が集められている。羽毛の 90% はケラチンたんぱく質であるから、飼料用に酵素ケラチナーゼで羽毛をより消化されやすいフェザーミールに変えることは可能である。さらに、酵素は必要とする時間と温度の条件を減少させることで加工処理を容易にする。家禽産業のこの主要な副産物の栄養価と利用性は酵素処理の過程で改善される。

#### (2) 飼料添加物としての酵素

2001 年にもう 1 つの興味ある報告がなされた。幼雛用飼料に少量 (<0.1%) のケラチナーゼを添加すると、飼料効率が改善された。実際に、酵素添加低たんぱく質飼料で飼育された鶏は、標準のたんぱく質飼料で飼育された鶏と同じ大きさにまで成長した。追加の実験は、飼料添加物としてのケラチナーゼは出荷日齢 (42 日) 時に増体重を一羽当たり約 100g 向上させると結論づけた (Odetallah ら, 2003; 2005)。そのほかに、鶏の成長を損なうことなく飼料たんぱく質の摂取総量を 10% 減少させることができた (Wang ら, 2006)。現在知られている通り、ケラチナーゼは強力な広範囲たんぱく質分解酵素であるから、鶏の腸管内では、たんぱく質の消化率を向上させる。飼料へ酵素を添加すると栄養素の利用性が良くなり、鶏の成長を促進する。この成績の改善に基づいて計算すると、飼料添加酵素の金額ベースでの価値は大豆の市場価格にもよるが、飼料 1 トン当たり 20~30US ドルの節約になると見積もられている。世界中の成長中の鶏と豚では、全潜在的なコストの節約は数 10 億ドルになると見積もられている。酵素製品 Versazyme<sup>TR</sup> (VZ) は現在生産され、世界中で販売されている (Wang ら, 2006)。

#### (3) プリオンたんぱく質の分解

17 年前にヨーロッパでは狂牛病、すなわち牛海綿状脳症 (BSE) の発生があった。プリオン説 (Prusiner, 1991) によれば、この病気は異常なプリオンたんぱく質によって引き起こされる。このプリオンたんぱく質には 2 つの異性体があり、1 つは無害であり、

もう1つの方の PrP<sup>Sc</sup> は感染性がある。PrP<sup>Sc</sup> は誤って折りたたまれ、集まって極めて安定な構造となるので、アルコール、熱、加圧滅菌などの標準的な殺菌方法および普通のプロテアーゼ(たんぱく質分解酵素)にも抵抗力がある。プリオンたんぱく質は羽毛のケラチンと構造が著しく似ている。この発見の後、2001年にオランダの Lelystad にある動物疾病研究センターは、PrP<sup>Sc</sup> を分解する能力を試験するためにケラチナーゼのサンプルを購入した。そこで、3日間の実験室での分析の結果、BSEの PrP<sup>Sc</sup> を分解できることが示された。この発見は狂牛病の蔓延防止のためにプリオンたんぱく質の酵素的な消毒の可能性へ道を開いた(Langeveldら、2003)。

### 5. バイオガスおよびケラチナーゼから BRI

棄物処理とエネルギー生産工程の研究として

始まったが、過去35年間の教育と研究で初期の目的を達成したのみならず、そのほか多くの予期できないそして意外性のある利益と幸運をもたらした。途中、NCSUの研究グループは合計10の合衆国および国際特許を累積した。すなわち好熱性嫌気性発酵に関する発明を始めとして、羽毛分解細菌の発見、酵素ケラチナーゼとその遺伝子の分離同定、ケラチナーゼの生産規模の拡大、飼料添加物としてのケラチナーゼの応用およびプリオンたんぱく質の酵素分解の発見である。さらに、バイオテクノロジーの会社を分離新設し、酵素製品を商業的に開発し、それを研究室から世界市場へ向けて販売した(ShihとWang、2006)。この一連の研究、開発および商業化は興味あるケーススタディー(事例研究)であり、近代農業の一般的な趨勢を反映している。すなわち、エネルギー、環境、科学と技術、国際化および商業化である。

#### 【おしらせ】

#### 畜産環境情報誌2月1日号(第50号)のホームページ上での発行について

財団法人畜産環境整備機構が発行する「畜産環境情報」誌は、これまでも畜産環境に関する各種情報、畜産環境対策技術情報、畜産環境整備リースに関する情報等を印刷物とホームページの両方で提供してきました。

タイムリーな情報を迅速に発信するために、2013年8月1日号(第47号)からホームページ上での発行に切り替えてきました。最新号は、2014年2月1日号(第50号)をお届けしています。

第50号は「堆肥特集」とし、

1. エコファーマーと家畜ふん堆肥、
  2. 飼料稲への家畜ふん堆肥の利用、
  3. 熊本県における堆肥の生産・流通をめぐる現状と課題、
  4. 総合農協の力を十分に発揮し広域における堆肥流通を推進(菊池地域農業協同組合)、
  5. リン酸とカリ成分の肥効を考慮した堆肥の適正な施用方法、
  6. 高肥料成分のペレット堆肥の作り方、
- 6つの記事を掲載しています。

是非ともご高覧下さい。

畜産環境情報 ホームページアドレス

[http://www.leio.or.jp/pub\\_train/publication/tkj/index.html](http://www.leio.or.jp/pub_train/publication/tkj/index.html)

畜産環境情報

#### 【問合せ先】

財団法人 畜産環境整備機構

担当：羽賀(はが)、木下(きのした)

電話：03-3459-6300(代表) FAX：03-3459-6315 メール：haga@leio.or.jp