

食品廃棄物からの クリーンエネルギー回収型発酵技術の開発

鈴木 昌 治*†

(平成 30 年 3 月 12 日受付/平成 30 年 4 月 20 日受理)

要約: 食品廃棄物の処理方法として、好気性生ごみ溶解槽と二相式メタン発酵法を組み合わせたシステムと、エタノール固体発酵システムを考案した。メタン発酵システムは、190 日間の連続運転から、生ごみ溶解槽の容積負荷は 80~100 kg-garbage/ (m³·day), 二相式メタン発酵法の酸生成槽は水理的滞留時間 (HRT) = 1.2 day, メタン発酵槽 (EGSB) の容積負荷は 9 kgCOD/ (m³·day) で運転できることがわかった。メタン発酵槽で回収されるメタンガス量は、生ごみ 100 kg から 5.8 m³N であり、理論値の 55% であった。システム全体の HRT が短く、処理水の下水道への放流が可能な点から、単相式メタン発酵法と比較して、有利であると考えられた。PCR-DGGE 法により細菌相を調べた結果、生ごみ溶解槽と酸生成槽では微生物の機能がそれぞれ分離成立し、各槽の細菌間では共代謝していることが確認された。

エタノール固体発酵システムは、試料調製 (水分調製), 糖化発酵, 蒸留の工程から構成される。乾燥生ごみにおいて糖化酵素の生産に適した麹菌として、麦味噌用の *Aspergillus oryzae* KBN650 株を選出した。本菌株の乾燥生ごみにおける糖化酵素力の発現は、培養温度 30°C, 初発水分含量 50% が最適であった。また、乾燥生ごみのエタノール固体発酵に適した酵母として、焼酎酵母 *Saccharomyces cerevisiae* A30 株を選出した。本菌株は、初発水分含量 60% において高いエタノール生成能を示した。エタノール固体発酵システムでは、生ごみ 150 kg から、30°C, 4 日間の糖化発酵で、99% エタノール換算で 6.2 kg のエタノールが生産され、全糖消費量に対するエタノール回収率は 70.0 % であった。

キーワード: 食品廃棄物, クリーンエネルギー, 二相式メタン発酵システム, エタノール固体発酵システム, バイオガス, バイオエタノール

1. はじめに

20 世紀は石油に代表される化石資源に依存した大量生産・大量消費・大量廃棄の工業化時代であった。産業革命を契機に始まった人間の活発な活動は、地球の長い歴史から見れば極めて短い期間で地球環境を激変させ、公害や温暖化に代表される地球規模の環境問題を顕在化させた。21 世紀は、①エネルギーの安定供給, ②地球の環境保全, ③経済成長の 3 つを同時に達成することにより、人類の繁栄の存続が可能になると考えられている。従って、21 世紀は環境の時代を目指すべく、公害や温暖化問題と不可分の関係にある石油依存型社会からの脱却を図るため、再生可能な資源を有効に活用する資源循環型の社会構造へ変革することが強く望まれている。そのための対応策のひとつとして、温室効果ガスとなる二酸化炭素 (CO₂) を増加させないカーボンニュートラルといわれているバイオマス (再生可能な生物由来の有機資源であり、生命と太陽がある限り枯渇しない資源) を効率的にメタン, エタノール, 水素などのクリーンエネルギーへと変換する技術の開発に寄せられる期待は大きい。

著者が所属していた研究室では、食料と競合しない廃棄物系バイオマスである食品廃棄物 (一般廃棄物と産業廃棄物の年間総排出量は約 2,000 万トン) を、高効率にメタンやエタノールなどのクリーンエネルギーに変換する小規模型の高速メタン発酵法¹⁻⁴⁾ と、エタノール固体発酵法⁵⁻⁷⁾ の新規システムの開発に取り組んできたので、その技術開発の事例を紹介する。

2. 高速メタン発酵システムによる食品廃棄物からのメタン生産技術

(1) 概要

食品廃棄物をメタンガスへと変換する従来のメタン発酵システムは、一つの槽内で有機物の加水分解や酸発酵、メタン発酵を完了させる単相式を採用したものが多く⁸⁻¹⁰⁾。単相式メタン発酵法は、発酵終了液の凝集剤による脱水処理によって発生する脱離液と汚泥の処理施設が必要となるため、設置スペースや建設コストが大きくなり、維持管理も煩雑になることからスケールメリットが確保されなければ導入が困難である。本稿で紹介するシステムでは、食品廃棄物のメタン発酵後の処理水を直接、下水道放流するこ

* 東京情報大学学長; 東京農業大学名誉教授

† Corresponding author (E-mails: senbei@rsch.tuis.ac.jp, senbei@nodai.ac.jp)

とで排水処理施設を省略し、システムを簡素化した。すなわちメタン汚泥の発生抑制と下水道放流が可能な処理水を得るため、また、さらなる高効率と省スペース化を図るため、メタン発酵にはメタン生成菌の凝集塊（グラニュール）を充填した高速リアクターを用いた。高速リアクターの安定運転を維持するため、生ごみの前処理には好気性微生物を利用した生ごみ溶解槽を設けると共に、酸発酵とメタン発酵の槽を分けた二相式を適用し、新しいメタン発酵システムとした。

本稿では好気性可溶化処理を組み込んだ生ごみの高速メタン発酵システムの研究開発の事例とその特長を解説する。

(2) 研究装置と実証プラント

好気性可溶化処理を組み込んだ高速メタン発酵システムの開発は、東京農工大学の世田谷キャンパス内のバイオマスエネルギーセンターで実施してきた。

食品廃棄物は小中学校の給食センターから排出される実廃棄物の調理くずと残飯を用いた（以下、生ごみと記す。生ごみ重量の組成は、残飯6：調理くず4）。本システムの開発にあたっては、1日当たり10kgの生ごみ処理規模の研究装置で基礎試験¹⁾を実施し、190日間の連続運転から生ごみ溶解槽、酸生成槽、沈殿槽、メタン発酵リアクターの各工程の基本性能を把握して、システムを構築した。その後、スケールアップの評価、実証装置の位置づけとして、1日当たり180kg（1世帯4人家族として、180世帯分に相当）の生ごみ処理規模のプラント（以下、実証プラント）を建設し、実証運転を行った。実証プラントの概要は下記のとおりである。

処理対象物：生ごみ 100 kg/日（最大 180 kg/日）

敷地面積：35 m²

バイオガス利用：ボイラー用燃料・ガスエンジンによる発電（残さ処理）

処理水：下水道放流または液肥として利用

沈殿槽の汚泥：肥料（窒素源）として利用予定、
生ごみ溶解槽で再分解

（ユーティリティ）

水道水：1日当たり約 1 m³

電気：1日当たり 70~100 kWh

実証プラントの外観を写真1に、フローシートを図1に示す。実証プラントは、受入・生ごみ溶解工程、酸生成工程、沈殿工程、メタン発酵工程、脱臭工程から構成される。以降では、各工程の技術的特徴および実証プラントの詳細を説明する。

①受入・生ごみ溶解工程

処理対象となる生ごみの重量組成は、食べ残しの残飯が60%、調理段階でまもって排出される野菜類が40%である。含水率は75~80%、重量1kg当たりの化学的酸素要求量（COD_{Cr}）は約0.3kg¹⁾である。この生ごみは、容量90Lの樹脂製専用容器で実証プラントへ搬入されてい

る。計量後、リフト式の生ごみ投入機で、1日1回定時に生ごみ溶解槽へ100kg投入される。生ごみの分別状況は非常に良く、ビニール類や金属などの爽雑物がほとんど含まれていないため、そのまま投入している。まとまった貝殻や骨などがみられた場合のみ、これらを除去している。

投入された生ごみは、生ごみ溶解槽で好気性微生物による分解、攪拌による破碎を受け、嵩をもつ固形状から可溶化して給水と混合されて液状化する。本槽の発酵部は有効容量1m³、底部は半円柱状の孔径1mmの金属メッシュになっており、パドルの付いた横型攪拌機が設置されている。担体として0.5m³の粗穀をあらかじめ投入している。1時間ごとに発酵部への散水、下部シュートへの洗浄水を供給し、同時に生ごみと担体を攪拌混合している。給水の



写真1 高速メタン発酵プラント

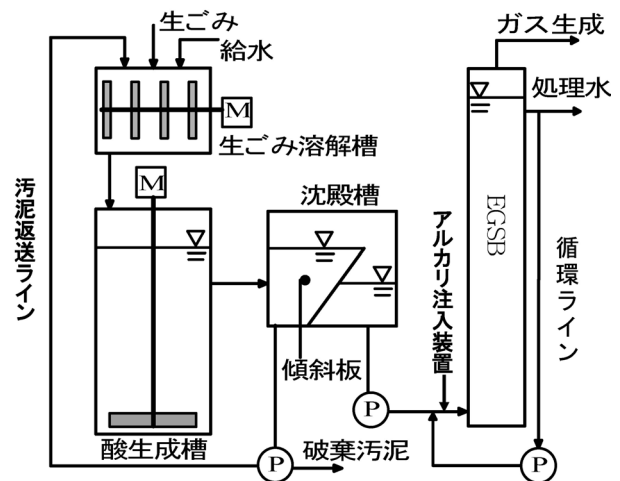


図1 高速メタン発酵システムのフロー

総量は1日当たり約 1.0m^3 （生ごみ重量の10倍）である。発酵部は微生物分解による発熱で約 40°C に維持される。なお、発酵に不適な爽雑物のみ発酵部から取り出すが、生ごみや担体を排出することはない。

②酸生成工程

生ごみ溶解槽で可溶化された生ごみ（以下、生ごみ溶解液）は酸生成槽へ流入する。乳酸が主成分である生ごみ溶解液は酸生成槽において、酢酸などの低級脂肪酸組成に変換される。酸生成槽は有効容量 1.5m^3 の円筒立型で水文学的滞留時間（以下、HRT）1.2日間で運転している。槽内は機械的に連続攪拌され 38°C になるようヒーターで加温されている。pH調整は行っていない。

沈殿槽では、メタン発酵槽の安定運転および処理水の水质制御を目的として、酸生成液から固形物や油脂分の一部を除去する。沈殿槽は上部が円筒状、下部が円錐状になっている。沈降した汚泥は最下部より引き抜き、浮上した油脂分は上部から取り出す。汚泥の一部は生ごみ溶解槽に送られ再分解している。

③メタン発酵工程

メタン発酵槽には、高速リアクターである Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) 法を適用している。単相式メタン発酵法では、前述のとおり、発酵終了液の凝集剤による脱水処理に伴って排出される汚泥の処理と、脱離液の排水処理が必要である。このため設置スペースや建設コストが大きくなり、維持管理も煩雑になる。本システムでは、グラニュール状汚泥を用いることにより、メタン発酵後の処理水を直接下水道放流することで、システムを簡素化し、設置スペースや建設コストの削減、維持管理の容易化を図っている。メタン発酵槽は有効容量 2.8m^3 （内径 $900\text{mm} \times 450\text{mmH}$ ）の円筒立型でHRT 3.0日間で運転している。槽内はヒーターで加温し、 38°C の中温で発酵し

ている。循環水の一部を槽上部に供給する気液分離装置（Gas Solid Separator）を設置し、浮上グラニュールの沈降性向上、消泡およびスカム生成の防止を行っている。メタン発酵に適したpH 7.0~7.5になるようアルカリ剤（NaOH）を供給し調整している。沈殿槽で汚泥を引き抜くことで流入する窒素量を制御しているため、メタン発酵に障害を与える $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は常に $2,500\text{mgN/L}^{10)}$ 以下に維持されている。なお、運転開始時には種汚泥として製菓工場排水処理施設の嫌気性処理槽のグラニュール状汚泥を投入した。

生成したバイオガスは、酸化鉄ペレットを充填した脱硫塔で硫化水素が除去され、ガスホルダーに一時貯留される。なお、バイオガスはボイラー用燃料やガスエンジンによる発電用原料として利用することができる。

④脱臭工程

実証プラント内で発生する臭気は、脱臭ブローアで捕集され、土壤脱臭床（ 1.3m^2 ）で処理される。捕集箇所は、生ごみ溶解槽、酸生成槽、沈殿槽、汚泥貯留槽および放流ピットである。

(3) 物質収支および処理性能

実証プラントの物質収支を図2に示す。これは研究装置の実績に基づいた実証プラントの設計値である。理論的には生ごみ 100kg から $10.5\text{m}^3\text{N}$ のメタンガスが得られる。本システムのメタン発酵槽で回収されるメタンガスは $5.8\text{m}^3\text{N}$ であり、理論値の55%となる。バイオガス中のメタンガス割合は約70%と高く、バイオガス生成量は $8.3\text{m}^3\text{N}$ になる。生ごみ溶解槽およびメタン発酵槽の容積負荷は、それぞれ 100kg 生ごみ / (m^3/d)、 $9\text{kgCOD}/(\text{m}^3/\text{d})$ である。生ごみ溶解槽のCOD分解率は投入生ごみに対して約20%、メタン発酵槽では流入水に対して約90%

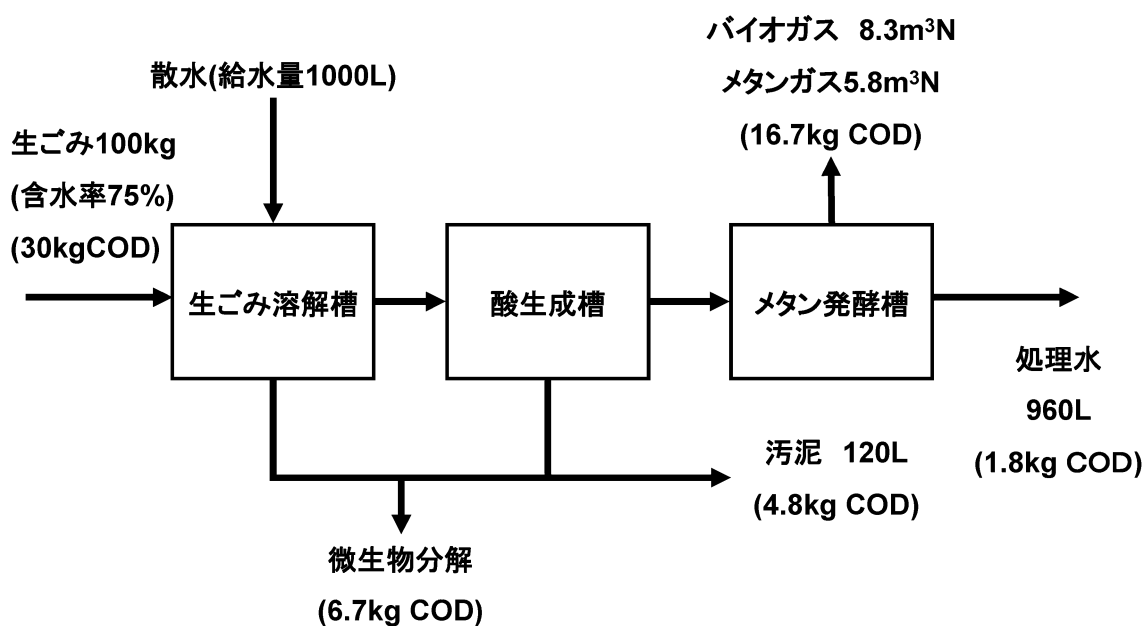


図2 高速メタン発酵システムの物質収支（1日当たりの投入量に対して）

である。

また、メタン発酵槽の出口液、すなわちシステムの処理水は、下水排除基準¹¹⁾(BOD, SS, ノルマルヘキサン抽出物(動植物油脂類), 窒素, リン, pH, 温度および沃素消費量)を満たす結果を得ている^{1,13)}。

生ごみ溶解槽における好気性分解は、生ごみの排出量や性状の変動に対して緩衝機能となるため、実際の廃棄物を処理する場合、メタン発酵槽の安定運転および処理水の下水排除基準の達成に対して有利である。なお、研究装置の実績から、この実証プラントにおいては1日当たり最大180 kgの生ごみを連続的に処理することが可能である。また、本システムは単相式メタン発酵法の生ごみの処理時間(約14日間)に比べ、約半分(約7日間)であり、処理日数が大巾に短縮されることに特長があった¹³⁾。

(4) 生ごみ溶解槽, 酸生成槽, メタン発酵槽の微生物特性

PCR-DGGE法により、生ごみ溶解槽と酸生成槽の細菌相を調べたところ、生ごみ溶解槽と酸生成槽の細菌相は大きく違うことが確認できた。生ごみ溶解槽では*Lactobacillus*属および*Clostridium*属に分類される細菌が、酸生成槽からは*Megasphaera*属に分類される細菌が検出された²⁾。*Lactobacillus*属の乳酸生成および*Megasphaera*属の乳酸利用による共代謝を介した酪酸生成の例が報告¹²⁾されている。生ごみ溶解槽のVFA組成は乳酸主体であり、酸生成槽では乳酸はほとんど分解されて酢酸やプロピオン酸、酪酸になる²⁾ことから、細菌相の点からも機能分離が成立しており、良好な発酵が維持されていることが推察された。メタン発酵槽では*Bacillus*属や*Clostridium*属など17属の多様な真正細菌群によって、様々な有機物がメタン生成菌へ供給されていることが推察された¹³⁾。

また、メタン発酵槽から、中温メタン発酵過程で一般的に検出されるメタン生成菌とともに、*Methanolinea*属や*Methanofollis*属、archaeon LL25 A10などの特徴的な系統群が検出された¹³⁾。なお、メタン発酵槽内の細菌群とそれらの役割の解明にあたっては、さらに多くのバンドを解析することや、培養法によって分離した菌株の機能について詳細に検討する必要がある。

(5) まとめ

上述のとおり、「好気性可溶化処理を組み込んだ高速メタン発酵システム」は、生ごみや食品廃棄物の処理を兼ねたバイオガス化に関して、システムの簡素化や建設コストの削減、維持管理の容易化と併せて処理日数の短縮化による設置スペースの削減を実現していると考えられる。ただし、課題とされている家庭系を主とした一般廃棄物由来の食品廃棄物への適用という面では、排出量数十kg/日の小規模レベルまで、採算性を含めた事業化が実現できるシステムであることが望まれる。本システムは未だ改善すべき点もあり、処理性能の向上やメタンガスの回収率の増加、各機器の省力化、設備のユニット化を図り、さらなる研究

開発を進めて完成度を高める必要がある。本システムは関西の大手スーパーマーケットに設置され、主に食品売り場から排出される野菜・肉類・魚類などの残渣を毎日1トン処理(ガス化)し、回収したメタンガスはガスエンジンにより、1日当たり240kwhの電気と13m³の温水に変換し、場内やプラントの稼働エネルギーに使用されており、現場レベルでの有効性が実証されている¹⁴⁾。

3. エタノール固体発酵システムによる食品廃棄物からのエタノール生産技術

(1) 概要

バイオマスからの生物学的変換技術によるエタノール生産の基本は、世界の各地で太古の昔から伝承されてきた酒造りの技法を応用したものである。酒造りの技法は、それぞれの民族で固有であると共に、人類の祖先達は酒の主成分がエタノールであることや、これを生産する正体が目には見えない微生物であることを認識する、はるか以前から試行錯誤をくり返しながら独自の製造法を確立してきた。したがって、それらの技法には、先人達の創意工夫と英知が凝縮されていると言っても過言ではなく、その技法や原料は地域によって千差万別である。例えば、わが国の代表的な醸造酒と蒸留酒にはそれぞれ清酒と焼酎がある。清酒の原料は米であり、焼酎は米、麦、芋類などを用いるが、でんぷん質の糖化には性質が異なる麹菌を使い分けて用いることに特徴がある。また、バイオマス(トウモロコシやサトウキビなど)のエタノール発酵液を蒸留し、得られたエタノールを液体燃料としたものが「バイオエタノール」¹⁵⁾である。エタノール発酵の技術上の共通点は、いずれも原料を液体の状態で行う「液体発酵法」¹⁶⁾を採用していることである。液状の発酵液を蒸留すると未分解の有機物を多量に含んだ蒸留廃液が排出されることから、この廃液の処理施設の設置が必要になるため、設置スペースの確保や建設コストと処理コストが増大すると共に、維持管理が煩雑になる。

一方、中国の酒に白酒(バイチュウ)と呼ばれる蒸留酒があるが、白酒製造には液体発酵とは相反する固体発酵法が採用されている。すなわち、窖(クツ)と呼ばれる土堀の穴に、蒸煮した雑穀(こうりゃんなど)と糖化菌(クモノスカビやケカビ)で製造した麴(大曲)を混ぜ合わせた固体物を投入しておく、固体の状態でも糖化と発酵が進行し、固体状の発酵物には6%程度のエタノールが生成蓄積される。この発酵物からは、水蒸気蒸留により生成エタノールを回収すると共に、蒸留後に残存する固形状の残渣は、家畜の飼料として利用されている。バイオマスの多くは固体状のものが多いことや、バイオマスからのエタノール生産にあたっては、蒸留廃液の発生抑制の観点からも固体発酵法を適用するメリットは大きいものと考えられる。

本稿では、生ごみのエタノール固体発酵法の研究開発の事例とその特長を解説する。

(2) 研究装置⁵⁻⁷⁾

バイオマスからバイオエタノールを製造するプラント

は、液体発酵法が主流であり、固体発酵法を採用している事例は皆無である。そこで、生ごみ（小中学校給食の調理くずと食べ残し）を発酵原料とした時の固体発酵法の基礎的知見を収集するため、図3に示すシステムフローに基づいて、①蒸気乾燥器により乾燥して品質の安定化を図る試料調製工程。②乾燥生ごみにでんぶん分解活性が強い麦味噌用麹菌を散布して生ごみ麹を製造する糖化酵素生産工程（生ごみ麹製造工程）。③乾燥生ごみと生ごみ麹を同量ずつ混合し、ここに焼酎酵母を添加後、固体発酵槽に投入し、酵母の増殖とでんぶん質やセルロースの糖化を促進しながら並行複発酵を進行させエタノールを生産させる糖化発酵工程。④発酵終了後の発酵物を減圧真空蒸留機により蒸留しエタノールを回収する蒸留工程を設置した。蒸留後の蒸留残渣は固形物として排出される。なお、乾燥生ごみにおいて良好に生育し、かつ糖化酵素の生産に適した麹菌として麦味噌用の *Aspergillus oryzae* KBN650 株を選出した⁵⁾。本菌株の乾燥生ごみにおける糖化酵素力の発現は培養温度 30℃、初発水分含量 50% が最適であった。また、乾燥生ごみのエタノール固体発酵に適した酵母として焼酎酵母 *Saccharomyces cerevisiae* A30 株を選出した。本菌株は、乾燥生ごみと生ごみ麹の等量混合物の初発水分含量 60% において高いエタノール生成能を示した。

この研究装置では、乾燥生ごみと生ごみ麹の等量混合物 10kg（全糖 18%）から、99% エタノール約 1kg が回収された。また、麹菌や焼酎酵母の代謝反応による損失を差し引くと 1.8kg が減量化され、残りの 8.2kg が固形状の蒸留残渣として排出された。この固形残渣の炭素（C）/窒素（N）比は、発酵前（C/N 比は 40）に比べて著しく減少した（C/N 比は 10 以下）。これは糖化発酵に伴う炭水化物の二酸化炭素やエタノールへの変換に起因する。さらに生ごみ麹中の麹菌菌体や固体基質で増殖した酵母菌体に由来する微生物タンパク質の蓄積も関係する。蒸留残渣は微生物タンパク質を豊富に含む速効性肥料や飼料として活用することが可能であることがわかった。

(3) 実証プラント

実証プラントは、研究装置に基づいた基本システムのスケールアップとその評価に基づいたプラントとして、発酵原料の受け入れと前処理から蒸留までをシステム化した形で運転稼働している。実証プラントの概要は下記のとおりである。

発酵原料は 3 (2) と同じ生ごみ（小中学校給食の調理くずと食べ残し）を用いた。処理能力は 1 バッチ当たりの容量が 200L。敷地面積は 15m²。固形状の蒸留残渣は飼肥料として利用可能。また、蒸留廃液は発生しない。原料の水分調製時にわずかに低濃度排水が発生することもあるが、下水道放流が可能な水質である。実証プラントの外観を写真 2 に示す。また、エタノール固体発酵プロセスを図 4 に示す。実証プラントは、①原料破碎、②原料投入および水分調製、③植種（種床添加）、④糖化発酵、⑤乾燥前発酵物分取、⑥蒸留、⑦乾燥凝縮、⑧回収排出の主に 8 工程から構成される。以下に各工程の技術的特徴と工程間の関連性を説明する。

①原料破碎（破碎機）

発酵原料の生ごみを破碎機に投入し、これを破碎し、原料ホッパーで受ける。破碎処理を必要としない原料は直接原料ホッパーに投入する。

②原料投入および水分調製（缶体密閉型発酵乾燥槽）

原料ホッパーから破碎物を密閉型発酵乾燥槽（以下、缶体と記す）へ吸引ホースを使って移送する。投入された破碎物は含水率に応じて水分調製を行う。固体発酵の最適初発含水率は 60% 程度あり、含水率が高い原料は乾燥処理し、低い原料は水道水等を必要量加水する。なお、水分調製には、蒸留工程で排出する凝縮水を用いることも可能である。乾燥処理は蒸気発生装置（以下、ボイラーと記す）からの蒸気によって行い、その後、缶体の内部温度が糖化剤（麹菌あるいは酵素剤）や発酵性酵母（植種）の添加可能な温度になるまで、攪拌し原料品温を 30℃ 位まで低下させる。

③植種（種床添加）

缶体内の原料を攪拌しながら糖化発酵資材（糖化や発酵

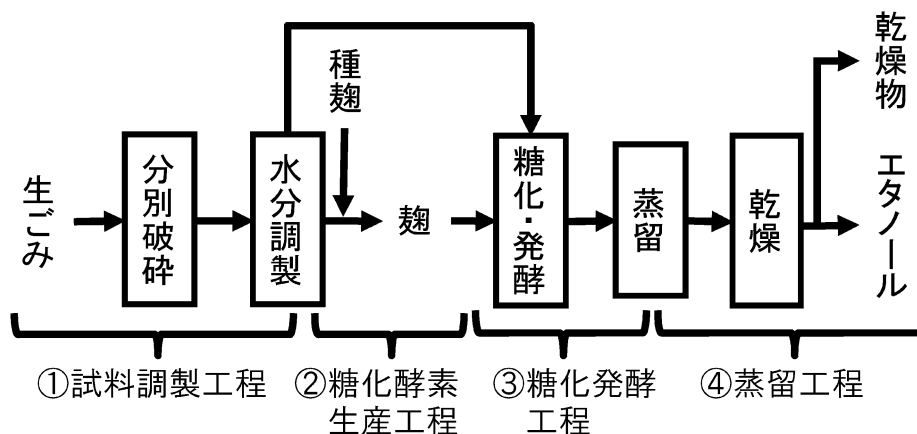


図 3 研究装置のシステムフロー

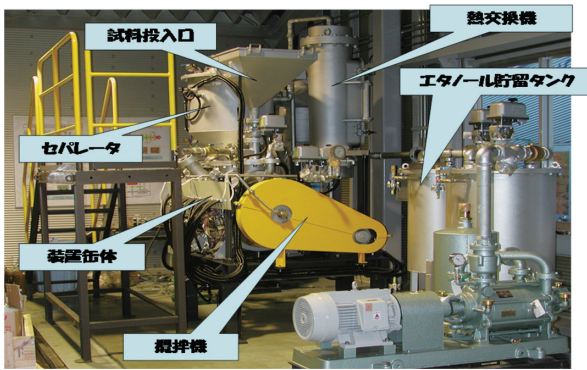


写真 2 エタノール固体発酵の実証プラント

を行う微生物や酵素、その混合物または、乾燥前発酵物)を投入する。糖化用の微生物は、醸造用麹菌などである。発酵性酵母は、固体基質でのエタノール生産に適した酵母として選出した焼酎酵母である。糖化菌は市販の種麹を用い、ふすまで培養したふすま麹として用いる。市販の酵素剤を用いることにより、製麹工程を省略することもできる。供試酵母はジャーファメンターで大量培養した前培養菌体を用いる。糖化発酵が終了した段階で蒸留乾燥前に缶体内から分取した発酵物を植種として用いることで種菌の前培養作業等が省略でき効率化を図ることができる。植種の添加量は発酵原料に対して1%の添加量が適量である。植種は、缶体内へ直接投入するか、もしくは原料ホッパーへ添加することも可能である。

④糖化発酵工程 (缶体・密閉型発酵乾燥槽)

缶体内では、60%程度に水分調整された破碎生ごみに糖化発酵資材が添加混合され、主に、生ごみ中のでんぷん質の糖化と生成糖のエタノール発酵が同時に進行する並行複発酵によりエタノールが生成される。缶体内は間断的に攪拌と吸気を行うことで糖化と発酵の効率化を図る。なお、発酵過程で発生する熱により缶体内の温度が上昇する場合は、ジャケットに最適の熱媒を通して発酵に最適な温度(30℃前後)に調整する必要がある。一方、缶体内の温度が低下して低温になる場合には、ボイラーからの蒸気や温

水などの熱媒ジャケットを通して加温する必要がある。また、発酵過程では水蒸気、炭酸ガス、あるいはエタノール蒸気が発生する。特にエタノール濃度の上昇が糖化発酵過程を阻害する濃度以上になることを防止するため、吸引弁を閉鎖し、ボイラーの蒸気により缶体内を加温し、冷却装置からの冷却水を蒸留器を通して蒸留器を冷却し、発生したエタノール蒸気の一部を蒸留して缶体内のエタノール濃度を低下させる。なお、原料破碎物にグルコースなどの発酵性糖を多く含む場合は、糖化剤の添加の必要がなくなるため、糖化発酵時間の短縮化あるいは簡略化することができる。

⑤乾燥前発酵物分取工程

発酵終了後に缶体に装着した排出口弁を開放して、缶体内の発酵物を所定量(10~20kg)分取する。分取した発酵物は、糖化酵素やエタノール発酵に関与する酵母を豊富に含むことから、次のサイクルの植種として使用することができる。

⑥蒸留

ボイラーからの蒸気をジャケットを通して缶体を加温し、冷却装置からの冷却水を蒸留器を通して冷却後、吸引ポンプを起動して缶体内を減圧し、缶体内の固型発酵物を攪拌しながら、生成蓄積されたエタノールを蒸留する。缶体内の圧力は-70MPa以下とし、缶体の内部温度は約40℃から60℃に設定する。この状態により、エタノール蒸気を効率的に発生できる。生じたエタノール蒸気は蒸留器により凝縮されてエタノールに変換されて、エタノール貯留タンクに回収される。エタノール回収の完了の目安は、蒸留器の入口に設けた温度センサーでモニターされる蒸気温度が60℃を超えた時点となる。または、所定の蒸留時間を設定し、その時間が経過した時点で完了とすることもできる。

⑦乾燥凝縮

エタノール回収後の残渣を乾燥するため蒸留器と凝縮水タンクを連通させ、さらに凝縮水タンクと吸引ポンプを連通する。次に缶体内の温度を65℃以上となるように蒸気を通し、缶体内を加温するとともに、缶体内の圧力が-70MPaになるように吸引する。これにより缶体内が減

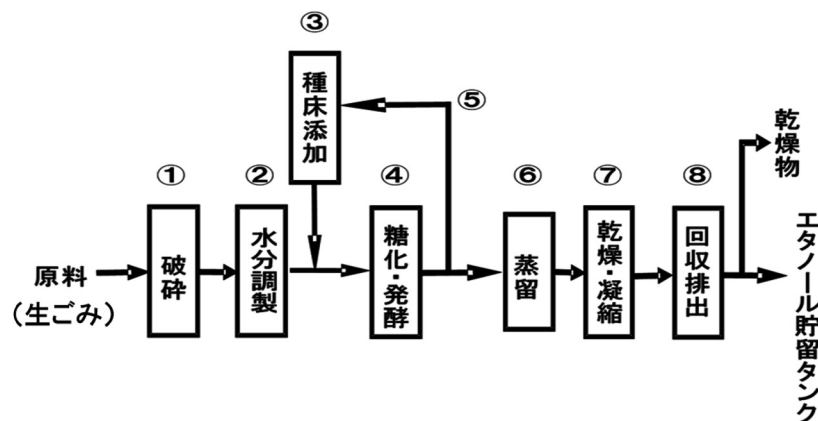


図 4 実証プラントのエタノール固体発酵プロセス

圧され、蒸留残渣が65℃以上に加温されることにより、生じた水蒸気が蒸留器により凝縮されて蒸留液に変換され凝縮水タンクに回収される。蒸留液の回収は、水位計により所定量の蒸留液が回収された時点で完了とする。完了後は、吸引ポンプを停止し、吸引弁を開放して缶体内を常圧に戻し、ボイラーからの蒸気供給を停止する。

⑧回収排出

缶体内の乾燥蒸留残渣は、缶体内の攪拌手段により排出口に集積する。排出口弁を開放して乾燥蒸留残渣を排出する。また、凝縮水タンクに貯留された留液は系外に排出される。なお、留液は系外に排出されるだけでなく、熱媒体や破碎原料の水分調整などにできる限り利用する。

(4) 実証プラントの処理性能と物質収支¹⁷⁾

小中学校の給食センターから排出された調理くずと食べ残しをほぼ均等に混合した150kgの原料を実証プラントで処理した時の物質収支を図5に示す。発酵資材のうち、糖化剤には市販酵素剤を用い、酵母は焼酎酵母の前培養菌体を用いた。糖化発酵条件は30℃、4日間培養とした。その時の一例であるが、発酵原料の含水率は76%であった。これを破碎後、缶体内へ移送してから加温し、含水率を62%になるまで乾燥処理した。水分の除去により乾燥生ごみ量として93kgとなり、この時の全糖分は26.4g/100g乾燥物であった。ここに酵素剤93gと前培養した酵母の濃縮菌体を添加し、30℃で4日間培養した。糖分の消費に伴ってエタノールが緩やかに生成された。培養終了後の全糖量は4.9g/100g発酵物であり、糖化発酵期間中の全糖消費量は21.5g/100g発酵物であった。固体発酵物中のエタノール含有量は7.6g/100g乾燥物であり、全糖消費量あたりのエタノール変換率は70.0%であった。また、物質収支の一例であるが、150kgの生ごみを原料とした場合、缶体中で乾燥処理して93kgとした。排出水量は40Lであったが、気化して系外へも飛散した。次いで酵素剤による糖化と、糖化生成糖の酵母によるエタノール発酵により、7.6g/100g乾燥物のエタノールが生成し、約

10kgが二酸化炭素として損失した。固体発酵物約83kgを減圧蒸留すると、99%エタノール換算で6.2kgのエタノールが回収され、蒸留残渣73kgが排出された。研究装置と実証プラントにおける全糖消費量当たりのエタノール変換率は、両者共に同等の70%以上であったが、エタノール回収率は研究装置の方が高かった。生ごみ100kgからのエタノール製造にかかるランニングコストは370円/Lであったが、農林水産省の製造ランニングコストの試験目標額は100円/Lであり、割高であった。

技術的な面では、実証プラントのエタノール回収率の向上など今後に残された課題もあるが、実証プラントレベルでもエタノール固体発酵システムの実現の可能性が確認された。

(5) まとめ

上記のとおり「エタノール固体発酵法によるエタノール製造技術」では、バイオマスからのバイオエタノール生産に関して、その製造技術の主流となっている液体発酵法とは相反する発酵形態となる固体発酵法によるバイオエタノール製造技術の開発とその実現性を検討した。

現時点では、液体発酵法に比べて、システムの簡素化や小型化、設置スペースや建設コストの削減、維持管理の容易性を実現していると考えられる。特に廃液処理に係る設備や運転コストを大幅に削減できることや、酵母菌体由来するタンパク質を豊富に含む蒸留残渣は飼料や肥料に活用できることも大きな特長になる。

なお、本システムは生ごみの他にも、廃棄パンやジャガイモ加工残渣、バナナ皮、廃棄弁当はもとより、多収穫米（飼料米）などの資源作物等からも幅広くエタノールが生産できることを確認している。

しかしながら、本システムは未だ改善すべき課題もあり、特に発酵効率のさらなる向上やエタノール回収率の向上、各工程設備の省力化などを検討し、採算性がとれる事業化システムとしてさらに完成度を高める必要がある。

今までに、本システムが採用された事例としては、自治

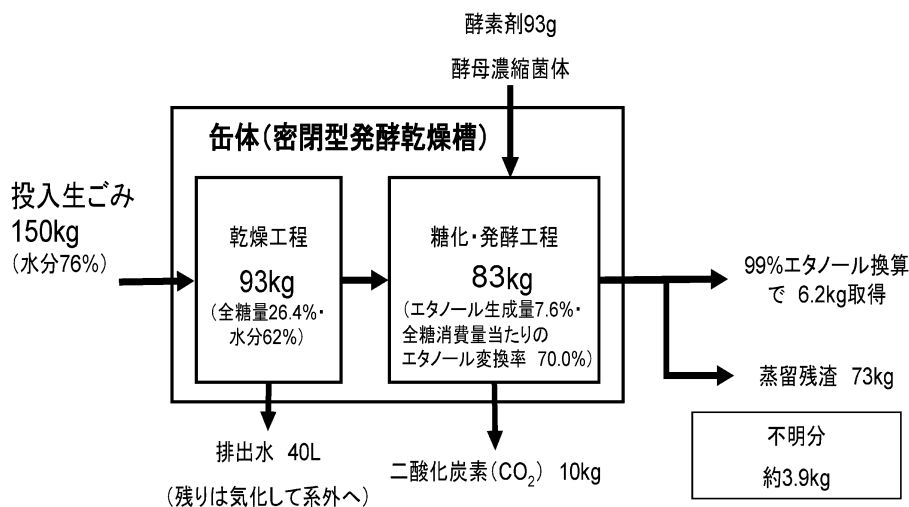


図5 エタノール固体発酵実証プラントの物質収支

体をリーダーとする地産地消型の多収穫米の栽培とバイオエタノール化・飼料化のモデル化事業での実績がある¹⁸⁾。

引用・参考文献

- 1) 坂本勝, 長野晃弘, 鈴木昌治, 野池達也 (2004) 生ごみの二相式メタン発酵法による処理特性. 廃棄物学会論文誌. 15: 86-95.
- 2) 坂本勝, 鈴木昌治, 李玉友, 野池達也 (2005) 好気性可溶化プロセスを適用した生ごみの二相式メタン発酵特性. 廃棄物学会論文誌. 16: 369-377.
- 3) 長野晃弘, 鈴木昌治ら (2012) メタンガス生成システム. 日本国特許庁. 特許公報. 登録番号 4945035.
- 4) M. SAKAMOTO, M. SUZUKI, T. NOIKE (2004) A new three-phase methane fermentation system for treating food wastes, ANAEROBIC BIOCONVERSION ANSWER FOR SUSTAINABILITY Anaerobic Digestion anaerobic. www.AD2004.MONTREAL.ORG. Proceedings 3: 1691-1693.
- 5) 本多宏明, 大西章博, 藤本尚志, 鈴木昌治 (2008) 生ごみの固体発酵法によるバイオエタノール製造技術の開発. 環境技術. 37: 207-215.
- 6) 鈴木昌治, 本多宏明 (2007) エタノールの製造方法, およびエタノール製造システム. 日本国特許庁. 特許公報. 登録番号 4237684.
- 7) 鈴木昌治ほか (2007) “固体エタノール発酵法によるエタノール製造技術” バイオ液体燃料. (株) エヌ・ティ・エス, 神奈川, pp. 146-155.
- 8) 佐々木宏, 李玉友, 関廣二, 上垣内郁夫 (1999) 生ごみの高温・高濃度メタン発酵に及ぼす滞留時間と負荷の影響. 水環境学会誌. 22: 983-989.
- 9) 上村繁樹, 高橋克夫, 栗山豊, 北野誠, 田中松夫 (2000) 生ごみのメタン発酵効率に及ぼす無機塩類の影響. 工業用水. 501: 2-7.
- 10) 李玉友, 佐々木宏, 奥野芳男, 関廣二, 上垣内郁夫 (1998) 生ごみの高温メタン発酵に及ぼす投入濃度の影響. 環境工学研究論文集. 35: 29-39.
- 11) (社) 日本下水道協会 (1999) 流域別下水道整備総合計画調査, 指針と解説. 184-185.
- 12) 塚原隆充, 橋爪研太, 小山公成, 山田耕司, 牛田一成 (2003) 乳酸菌 *Lactobacillus acidophilus* と乳酸利用菌 *Megasphaera elsdenii* の代謝共同を利用した酪酸生成. 第7回腸内細菌学会予稿集. 21.
- 13) 外ノ岡和政, 海老澤拓哉, 長野晃弘, 大西章博, 藤本尚志, 鈴木昌治 (2013) 可溶化処理を適用した二相式メタン発酵実証装置の研究—処理特性と微生物学的なメカニズムの解析—. 環境技術. 42: 235-244.
- 14) 澤山茂樹 (2009) バイオガスの本, 日刊工業新聞社, ショッピングセンターでリサイクル. 110-111.
- 15) 井内正直, 栗原雅博, 芦澤正美 (2007) わが国とアジア地域におけるバイオマスエネルギー利用の現状と課題 (特集 本格化するバイオエタノールの国産化—そして, バイオマス燃料のいま). エネルギー. 40: 18-23.
- 16) 斉木隆 (2005) バイオマス液体燃料の動向. バイオサイエンスとインダストリー. 63: 182-185.
- 17) 本多宏明 (2008) 生ごみの固体発酵法によるバイオエタノール製造技術の開発. 東京農業大学大学院博士後期課程博士論文.
- 18) 奥州市総合政策部政策企画課 (2011) 奥州広報おうしゅう, 地産地消エネルギーをつくる. Vol. 63. 5. pp4-7.

Development of Clean Energy Recovery from Food Waste through Fermentation Technology

By

Masaharu SUZUKI^{*†}

(Received March 12, 2018 / Accepted April 20, 2018)

Summary : We developed a new system to treat food waste and garbage using a two-phase methane fermentation system (TPMFS) with aerobic solubilization process (ASP) and ethanol solid-state fermentation system (ESSFS). In a continuous 190-day experiment using TPMFS, we found that ASP was able to convert a volumetric load of 80 to 100 kg-garbage/(m³ · day) and acidification process (AP) was able to operate at a hydraulic retention time (HRT) of 1.2 days. Additionally, the maximum volumetric load of methane fermentation process in an expanded granular sludge bed reactor (EGSB) was 9 kg-chemical oxygen demand (COD)/(m³ · day). The advantages of TPMFS in comparison to those of single-phase MFS are the shortening of HRT and creating the possibility to discharge the treated water into the sewer system.

As a result of investigating the microflora using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE) method, we found that the microbes in ASP varied compared to those in AP. Moreover, it was confirmed that co-metabolism existed among the microbes during ASP.

ESSFS was constructed by including the sequential processes of material preparation (water content adjustment), multi parallel fermentation (saccharification and fermentation), and distillation. Based on properties such as the saccharifying enzyme productivity and ability to grow on dry food waste, *Aspergillus oryzae* KBN650, which is used for Japanese barley miso production, was selected as the most suitable mold for saccharification. The optimal conditions for the saccharifying enzyme productivity in this strain were a cultivation temperature of 30 °C and initial water content (IWC) of 50%. Further, *Saccharomyces cerevisiae* A30, which is used for shochu production, was selected as the most suitable yeast for ESSFS. The maximum ethanol productivity of this strain was observed at an IWC of 60%. In TPMFS, saccharification and fermentation at 30°C for 4 days produced ethanol (6.2 kg; 99% purity) from food waste (150 kg). The ethanol recovery rate was 70.0% based on the amount of consumption of all the sugars.

Key words : food waste, clean energy, two-phase methane fermentation system, ethanol solid-state fermentation system, Biogas, Bioethanol

* President , Tokyo University of Information Sciences : Professor Emeritus, Tokyo University of Agriculture

† Corresponding author (E-mail:senbei@rsch.tuis.ac.jp, senbei@nodai.ac.jp)