

バッチ式乾式メタン発酵プラント導入に向けての検証

Validation for Installing Batch Operating Dry Methane Fermentation Plant

塩路 育美*1
Ikumi Shioji

中島 卓夫*1
Takuo Nakashima

内屋 雅樹*2
Masaki Uchiya

要旨

当社では、静岡県富士宮市の朝霧高原に、国内初となるバッチ式乾式メタン発酵プラント(ドイツ BEKON 社製)を導入し、家畜ふん尿や食品残渣などを原料としてバイオガス発電を行う「朝霧高原プロジェクト」に取り組んでいる。日本では湿式メタン発酵のプラントが主流で、乾式法のプラント導入は数件に留まっており知見が少ない。また、BEKON では食品残渣や剪定枝などをメタン発酵の原料とすることが多く、家畜ふん尿の処理実績が少ない状況であった。そのため、本プロジェクトの原料に対するバッチ式乾式メタン発酵の適用性の確認を行う必要があった。

そこで、著者らは、湿式法と乾式法(バッチ式)の実験装置を作製し、同じ原料を用いてメタン発酵させることで、湿式法によるバイオガス発生量をその原料のポテンシャルとして、乾式法(バッチ式)によるバイオガス発生効率を評価し、バッチ式乾式メタン発酵プラントの処理性能と、家畜ふん尿への適用性についての検証を行なった。

キーワード：乾式メタン発酵 バッチ式 バイオガス

1. はじめに

メタン発酵法とは、嫌気性条件下で嫌気性細菌の作用により有機性の廃水や廃棄物の一部を分解し、メタン(CH_4)と二酸化炭素(CO_2)を生成するものである。食品残渣や家畜ふん尿などの廃棄物系バイオマスをメタン発酵処理することで、およそ 60%のメタンとおよそ 40%の二酸化炭素から成るバイオガスを発生させることができる。発生したバイオガスは熱電併給装置(CHP、コージェネレーション)によって熱と電気に変換することができる。熱は発酵槽の加温や場内の暖房等に利用し、電気は売電することが多い。

メタン発酵には主に湿式法と乾式法の 2 種類がある。湿式法は日本で従来から用いられてきた主流の方式で、下水汚泥や家畜ふん尿など含水率の高い原料の処理に用いられている。湿式法では、発酵終了時に投入原料とほぼ同量の消化液と呼ばれる液体の発酵残渣が発生する。消化液は液肥として利用することもできるが、特に本州では散布する圃場や保管場所の確保が難しい。そのため多くは排水処理を行って処分しており、コストがかかる点が課題となっている。

一方、欧州で実績の多い乾式法は、含水率の低い原料を処理するもので、消化液の系外への発生がほとんどない。また、発酵残渣も固形で排出されるため、そのまま焼却あ

るいは堆肥化することができる。日本でも縦型や横型の連続式乾式メタン発酵装置が導入されているが、数件に留まっており、バッチ式の導入例はない。以降、単に乾式法と記載している場合はバッチ式を指すものとする。

2. 研究目的

2.1 朝霧高原プロジェクトの概要

朝霧高原プロジェクト(以下、朝霧 PJ という)とは、静岡県富士宮市にある堆肥製造会社富士バイオテックに搬入される廃棄物の前処理施設として、国内初のドイツ BEKON 社製バッチ式乾式メタン発酵プラントを導入し、発生したバイオガスから熱と電気を作り、熱は場内で利用し、電気は FIT 制度を用いて売電を行う事業である¹⁾(図 1)。発酵残渣は固形であるため、富士バイオテックの堆肥原料として用いることができる。

富士山西麓に広がる朝霧高原は酪農が盛んな地域で、乳牛のふん尿が大量に発生し、実際に富士バイオテックにも剪定枝と混合した状態で乳牛ふんが搬入され、処理されている。朝霧 PJ に係る全ての建築物は、都市計画法第 34 条第 4 号により農産物処理加工施設として建築許可を受けているため、富士宮市の市街化調整区域内の家畜ふん尿を主たる原料とする必要がある。そのため、乳牛ふんを 51%以

*1 環境エンジニアリング本部 環境技術部 *2 環境エンジニアリング本部 環境イノベーション部

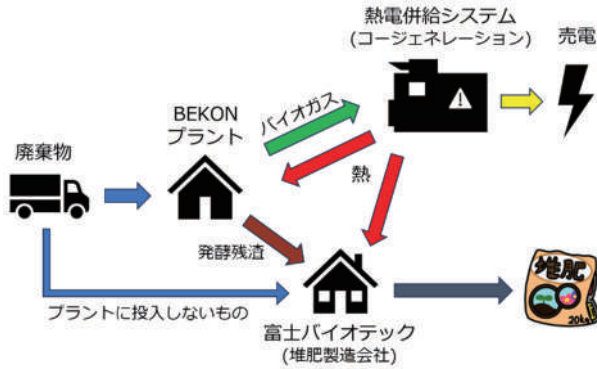


図1 事業スキーム図

上含んだ原料としなければならない。BEKON 社製のバッチ式乾式メタン発酵プラントでは、これまで家庭から出る食品残渣や剪定枝、落ち葉などを主な原料としており、家畜ふん尿の処理実績が少ないため、家畜ふん尿の同方式への適用性を検証する必要があった。

2.2 バッチ式乾式メタン発酵システム

図2、図3に BEKON 社製のバッチ式乾式メタン発酵プラントの外観と断面図を示す。このプラントでのメタン発酵手順は以下の通りである。

1) 発酵槽への原料充填

ホイールローダー等の重機で新しい原料を投入する。

2) 嫌気状態への移行

原料投入後、発酵槽の扉を閉めて密閉状態にする。この時点では槽内に酸素が残っているが、好気性発酵が進み速ければ数時間でほとんど酸素のない状態となる。

3) 3週間の嫌気性発酵

朝霧PJでは、プラントへの原料投入から排出までの1サイクルを約3週間としている。その間、定期的に発酵槽の天井から消化液を散布する。消化液は原料の間隙を通過して浸透し、発酵槽の壁や床から発酵槽内の側溝を通過して回収され、消化液槽に戻る。消化液が原料と接触することで、消化液中の菌の働きによって原料の分解が進み、メタンと二酸化炭素を主とするバイオガスが発生する。発生したバイオガスは、消化液槽上部の気相に送られて消化液槽や他の発酵槽からのバイオガスと混合された後、発酵槽上部に設置されたガスホルダーに送られる。ごく初期を除き、発酵初期のメタン濃度が低いバイオガスも他の槽からのメタン濃度の高いバイオガスと混合することで、常に一定以上のメタン濃度のバイオガスを得ることができる。

4) 発酵の停止

3週間経過後、発酵槽内に空気を送り込み酸素濃度を上昇

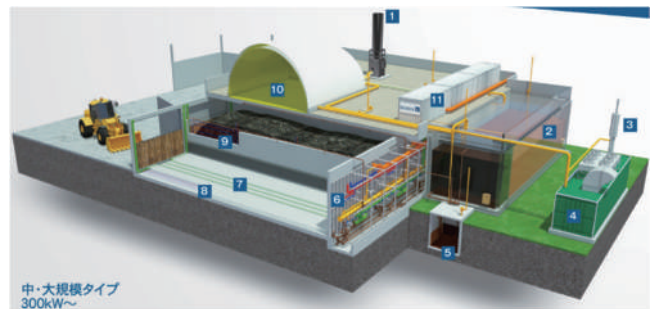
させメタン発酵を停止させる。槽内の酸素濃度およびメタン濃度を測定して安全を確認してから扉を開け、ホイールローダー等で発酵残渣を取り出す(堆肥原料へ)。

5) 1)～4)の繰り返し

このプラントはドイツをはじめ、主に欧州で利用されている技術で、日本では未だ導入されていない。消化液の処理が課題となる湿式法に対し、バッチ式乾式メタン発酵は消化液の系外への発生がほぼ無く、前処理が不要で、撪拌をしないため機械トラブルがほとんどなく運転コストが安価になるというメリットがある。しかしながら、常にメタン菌と原料が接触している湿式法や連続式の乾式法に比べて、バッチ式は菌と原料の接触が限定的となることが懸念された。



図2 BEKON プラント外観 2)



1	余剰ガス燃焼装置	7	送気用配管
2	消化液槽	8	床暖房
3	排気塔	9	壁暖房
4	熱電併給システム	10	ガスホルダー
5	沈殿槽	11	制御室
6	配管スペース		

図3 BEKON プラント断面図 2)

2.3 本研究の目的

本プラントを導入するにあたり、国内導入が初めてで知見が少なく、さらにドイツでは投入実績の少ない牛ふんを主原料として用いることから、円滑に事業を進める上で、メタン発酵が正常かつ継続して進むかを確認する必要があった。また、事業性の確保のために十分なメタン濃度のバイオガスが得られ、発酵阻害を起こさない適切な原料混合割合についても検討・確認する必要があった。

そこで、湿式法と乾式法の2種類のメタン発酵実験装置を作製し、現在、富士バイオテックに搬入されている廃棄物を用いてメタン発酵させることで、上記の課題について検証することとした。

3. 実験内容

3.1 実験全体の概要

湿式法の試験で発生したバイオガス発生量をその原料のポテンシャル量とみなして100%とした時に、これに対して乾式法のバイオガス発生量がどの程度の割合になるかを確認し検証した。また、乾式法では消化液を循環させることから、メタン発酵が順調に進み、発酵阻害が起きていないかの確認のため、消化液のpHとアンモニア性窒素濃度について測定を行った。

原料は受け入れた時点で含水率、強熱減量等を測定した。実験のタイミングからポテンシャル試験ができなかったものについては、同種の原料のうちなるべく性状に近いものの試験結果を採用して乾式法の結果と比較した。

3.2 湿式法による原料のポテンシャル確認試験

3.2.1 装置構成

湿式法の試験では、発酵槽として容量2Lのステンレス製密閉容器を使用した。発酵槽の上部には発生したバイオガスを回収するための配管と、試験開始時に槽内を嫌気性にするための窒素パージ用の配管を設けた。

2023年度はウォーターバスを使用して加温し、水中でも使用できるスターラーで槽内を撹拌した(写真1)。試験を続けるうちに、原料の撹拌不足が疑われ、特に剪定枝入り乳牛ふんではその傾向が顕著であったため、2024年度からは撹拌力の強いホットスターラーに変更した(写真2)。この際、測温抵抗体を取り付けて汚泥の温度を測定できるようにした。

発生したバイオガスはガス流量計(BPC Go、BPC Instruments製)により発生量を記録し、後段に取り付けたアルミガスバッグに回収してガス組成の測定を行った。

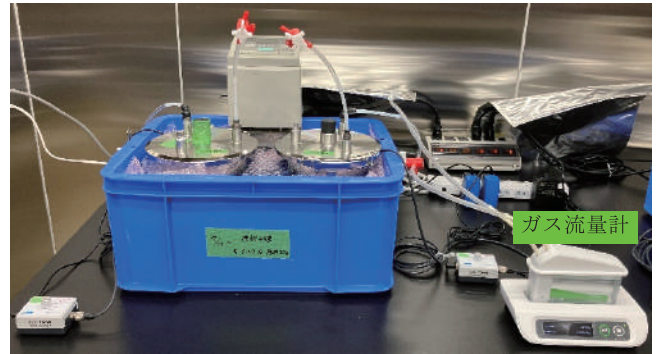


写真1 湿式試験装置(ウォーターバス)

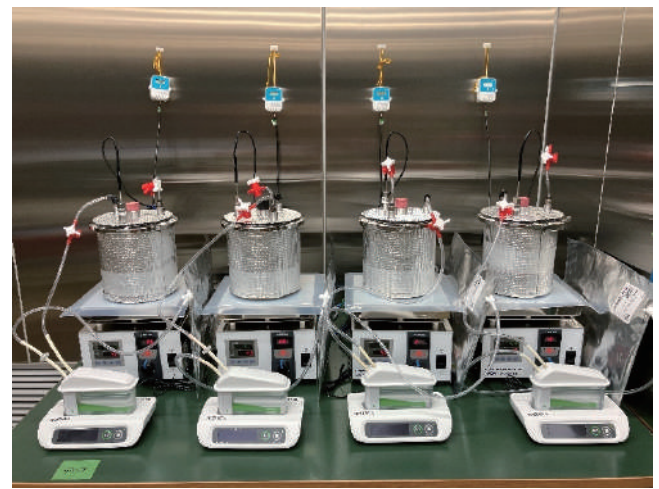


写真2 湿式試験装置(ホットスターラー)

3.2.2 試験方法

種汚泥として下水処理場から入手した消化汚泥を使用し、1槽あたり1.5L程度投入した。消化汚泥中に残存している有機物由来のバイオガスが試験に与える影響を減らすため、原料投入前に1週間程度消化汚泥のみでメタン発酵を行った。原料の食品残渣は20~40g程度、剪定枝入り乳牛ふんは30~50g程度使用することとし、投入前にミキサーで粉碎した。発酵槽は密閉後、窒素パージを行い嫌気状態にした。消化汚泥は元々55℃でメタン発酵をさせていたため、湿式法の試験もそれに合わせて55℃の高温メタン発酵とした。

発酵槽は4槽用意し、1槽は原料を投入しないブランクとした。試験終了時に原料投入槽のバイオガス発生量からブランクのバイオガス発生量を差し引くことで、原料由来のバイオガス発生量を算出した。

実験は28日を上限として、ガス発生が見られなくなるまで実施した。

3.3 乾式法によるメタン発酵実験

3.3.1 装置構成

発酵槽と消化液槽として容量 65L のステンレス製ジャケット容器を使用した。容器の外側には温水を循環し、槽内を 55℃にすることを目標として加温した。内側にはステンレス製のかごを設置し、その中に原料を投入した。発酵槽には熱電対、消化液散布配管、バイオガス用配管等を取り付け、のぞき窓から内部が観察できるようにした(図 4、写真 3)。

発生したバイオガスはガス流量計によって発生量を記録し、後段の脱臭剤と脱硫剤を通してから大気放した。必要に応じてアルミガスバッグを取り付けてバイオガスを回収し、ガス組成の測定を行った。

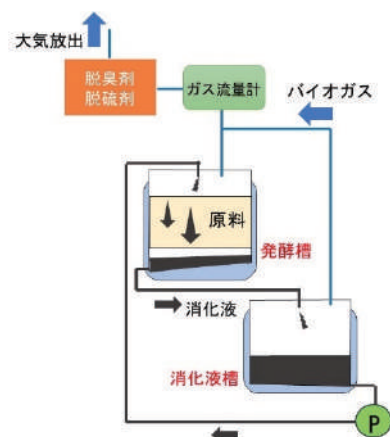


図 4 乾式実験装置概要図

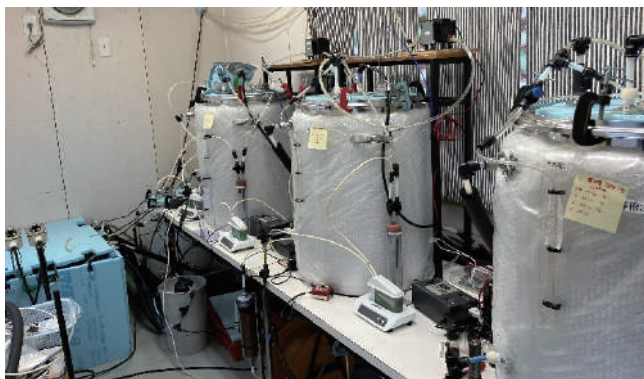


写真 3 乾式実験装置全景

3.3.2 実験方法

実験開始時の種汚泥は、湿式法で使用しているものと同じ消化汚泥 2L を蒸留水 20L で希釈したものを用い、以後は繰り返し使用した。その後消化汚泥の添加は行わず、消化液の量が少なくなった場合は蒸留水を適宜補充している。

原料は剪定枝入り乳牛ふん単体、もしくは、食品残渣と剪定枝入り乳牛ふんの混合物とし、投入量はいずれの場合

も最大 15kg とした。原料は粉碎せずに、有姿のままハンドスコップで混合して実験に用いた。

発酵槽は 3 槽、消化液槽は 1 槽用意し、消化液は 3 槽で共有した。朝霧 PJ の計画に合わせ、各種実験結果の評価は発酵期間 3 週間後のデータを採用するが、実験期間は経過観察のためガス発生が見られなくなるまでとした。

4. 実験結果

4.1 原料分析結果

今回主に使用した原料は、米や麺、野菜くずなどの入った残飯系の食品残渣と、剪定枝入りの乳牛ふんである。それぞれをメタン発酵させた場合、一般的に食品残渣のガス発生量は多いが、窒素含有量が多いため消化液中のアンモニア性窒素濃度が高くなり、投入量が多すぎると（負荷がかかりすぎると）メタン発酵が停止してしまう可能性がある³⁾。また、剪定枝（木）はリグニン等によって互いが強く結びついた構造のため、微生物で容易に分解されにくい⁴⁾。

原料の平均的な性状について、食品残渣の含水率は 68%、強熱減量は 96%であった。剪定枝入り乳牛ふんの含水率は 71%、強熱減量は 74%であった(写真 4、写真 5)。



写真 4 食品残渣

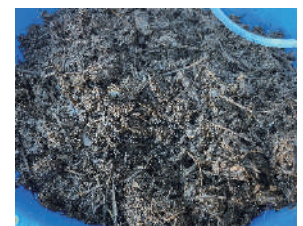


写真 5 剪定枝入り乳牛ふん

ここで、強熱減量とは、乾燥後の残留物を 600℃で 1 時間灰化した固形物(=有機物)の比率を示す。ただし、本実験に使用する原料は固形であり、1 時間の処理では燃焼しきれない可能性が考えられたため、灰化時間を 4 時間とした。

4.2 湿式ポテンシャル試験

4.2.1 剪定枝入り乳牛ふんの比較

図 5 に剪定枝入り乳牛ふんの試験結果の比較を示す。

最もガス発生量が多かったものは 2024 年 3 月 8 日受入分であり、193Nm³/t-VS であった。この原料の含水率は 74%、強熱減量は 78%であった。一方、ガス発生量が最も少なかったものは 2023 年 10 月 3 日受入分①で、46Nm³/t-VS であった。この原料の含水率は 61%、強熱減量は 70%であった。

剪定枝入り乳牛ふんの試験ではガス発生量に大きな差が見られた。

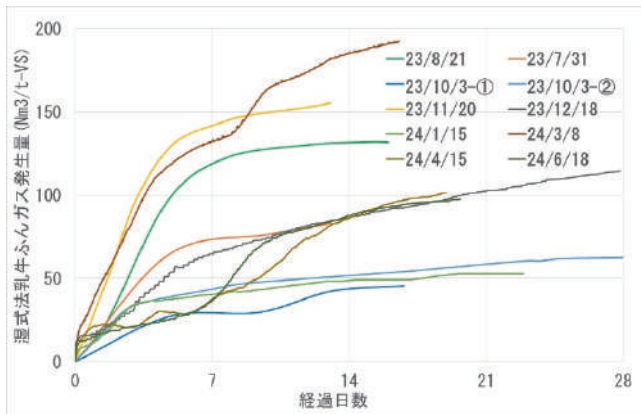


図5 剪定枝入り乳牛ふんガス発生量

4.2.2 食品残渣の比較

図6に食品残渣の試験結果の比較を示す。最もガス発生量が多かったものは残飯4であり、 $730\text{Nm}^3/\text{t-VS}$ であった。この原料の含水率は72%、強熱減量は80%であった。一方、最もガス発生量が少なかったものは残飯3で、 $428\text{Nm}^3/\text{t-VS}$ であった。この原料の含水率は76%、強熱減量は95%であった。残飯系の食品残渣はガス発生量の変動が大きいものの、乳牛ふんより十分多かった。

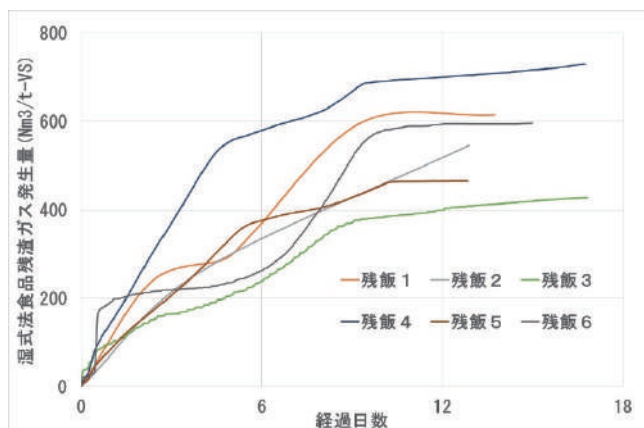


図6 食品残渣ガス発生量

4.3 乾式メタン発酵実験

4.3.1 実験概要

乾式法の実験では、同じ種類の原料であってもガス発生ポテンシャルに差があることや、同一の原料を用いて異なる条件で実験した場合のガス発生量の差等を確認するため、剪定枝入り乳牛ふん単体、あるいは乳牛ふんと食品残渣を混合して実験を行った。

4.3.2 ガス発生量比較

図7に剪定枝入り乳牛ふんの実験結果の比較を示す。実験開始から3週間経過時点で、最もガス発生量が多かったものは $161\text{Nm}^3/\text{t-VS}$ となり、この原料の含水率は67%、強熱減量は72%であった。最もガス発生量が少なかったものは

$50\text{Nm}^3/\text{t-VS}$ となり、この原料の含水率は70%、強熱減量は73%であった。乾式法でも湿式法と同様にガス発生量に大幅に差があった。

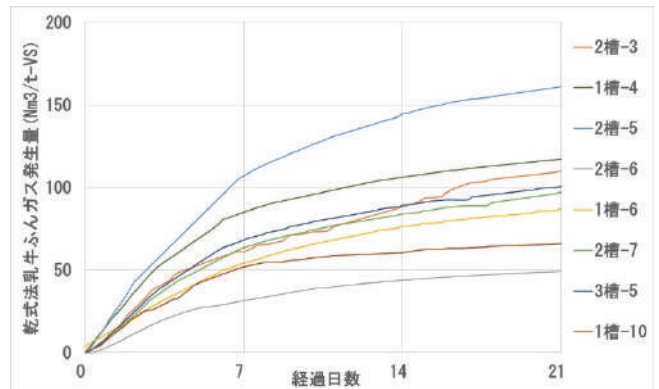


図7 乾式法剪定枝入り乳牛ふんガス発生量

次に、図8に剪定枝入り乳牛ふんと食品残渣を混合した原料の実験結果の比較を示す。

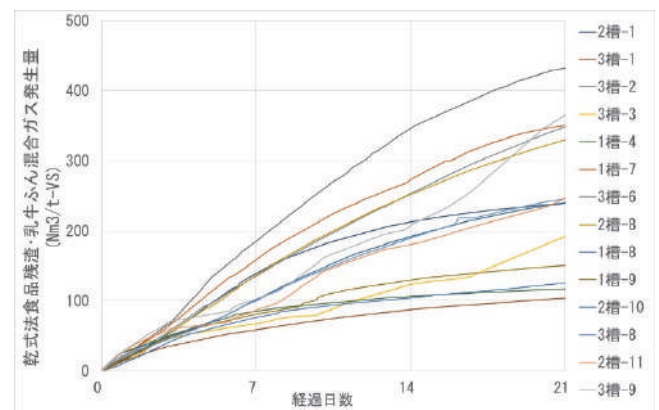


図8 乾式法乳牛ふん食品残渣混合ガス発生量

実験開始から3週間経過時点で最もガス発生量が多かったものは $432\text{Nm}^3/\text{t-VS}$ であり、剪定枝入り乳牛ふんと食品残渣の混合割合が湿重量比で1:1であった。この混合原料の含水率は77%、強熱減量は75%であった。

次に、発酵槽から発生したバイオガスのメタン濃度の推移を図9に示す。多くの実験においてメタン濃度は実験を開始してすぐに上昇し始め、5日程で安定しており、3週間経過時点で平均56%であった。一部初期のメタン濃度が低く、実験が進むにつれ急激に濃度が上昇しているものは、食品残渣の投入によって発生した酸が蓄積し、分解に時間がかかったためと考えられる。

4.3.3 消化液の性状変化

乾式法の実験では消化液を循環して繰り返し使用しているため、含まれる成分が次第に濃縮する可能性が考えられ

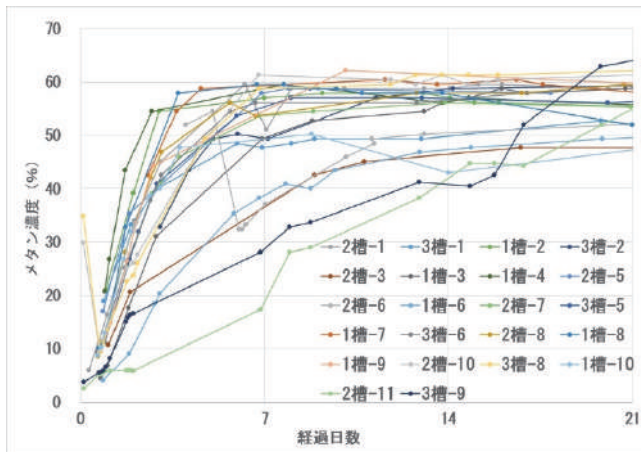


図9 乾式実験メタン濃度の推移

る。写真6に消化液の色の変化を示す。左が①実験開始から数日後、中央が②1か月後、そして右が③4か月後である。実験初期はほとんど水のため透明に近いが、実験を続けるにつれ茶色から黒へと変化している。

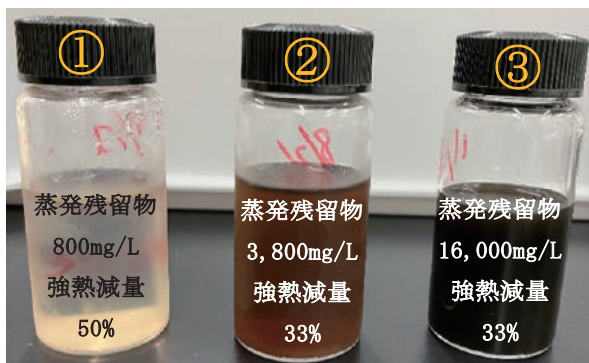


写真6 乾式消化液の色の変化

消化液中の蒸発残留物と強熱減量の経時変化を図10に示す。実験を続けるうちに消化液の蒸発残留物が増加し、実験開始から約200日経過したところで消化液ポンプの電磁弁に固形物が付着してポンプが故障してしまった。そのためろ過精度200 μ mのフィルターを設置し、実験開始から約375日経過後の強熱減量は、30%付近を推移している。また、蒸発残留物は30,000mg/L程度を推移している。

メタン発酵が順調に進んでいるかを確認するため、消化液のアンモニア性窒素濃度とpHの測定を行った。図11にその経時変化を示す。

実験開始から約375日経過後、消化液のpHは8.5付近、アンモニア性窒素濃度は2,000~2,500mg/Lを推移している。

良好なメタン発酵プロセスの場合、pHは6.5~8.2の範囲にあることが多い。ただし、下水汚泥、家畜排せつ物や

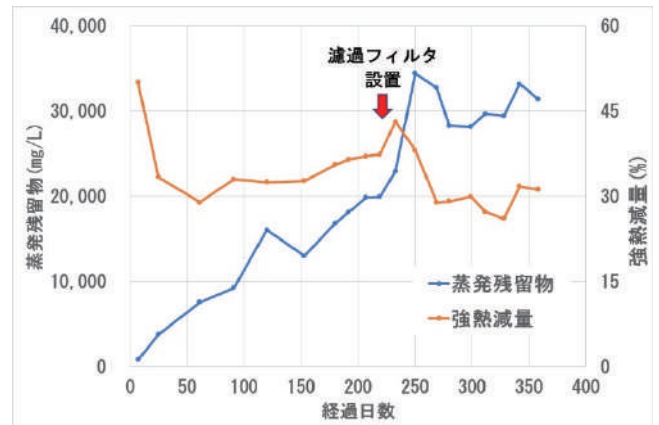


図10 乾式消化液の蒸発残留物・強熱減量の経時変化

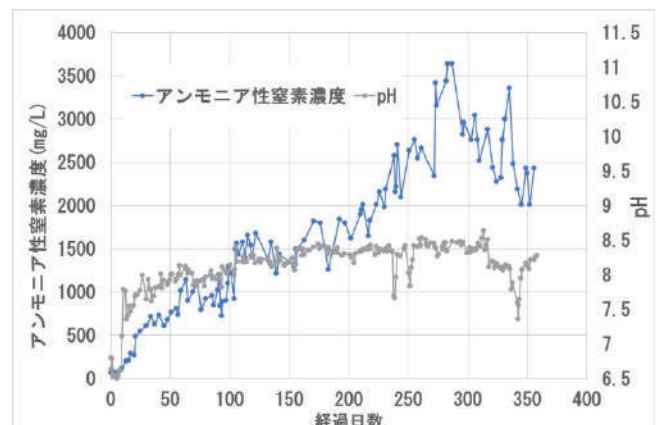


図11 消化液のアンモニア性窒素濃度とpHの経時変化

タンパク質を多く含む生ごみを原料としている場合は、アンモニア性窒素濃度が高いため、pHはやや高めとなることもある⁴⁾。本研究の原料は乳牛ふんと食品残渣のため、その影響を受けてpHが高くなっていることが示唆された。

また、メタン発酵阻害を起こさないアンモニア性窒素濃度について、高温消化の場合2,500mg/L以下とみなす成果が得られている⁵⁾。現状アンモニアによる発酵阻害は起きていないが、今後再度上昇する可能性があり、引き続き測定を続けていく。

次に、写真7に消化液槽内の消化液表面の目視観察結果を示す。

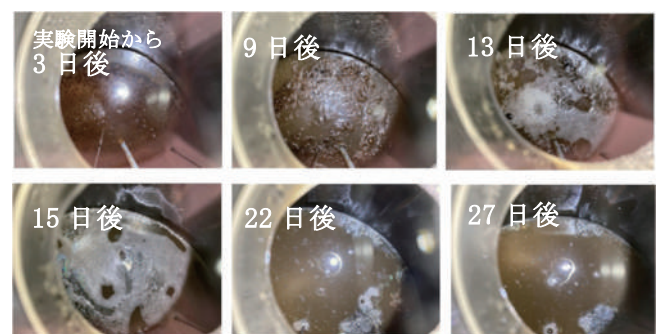


写真7 消化液槽内でのメタン発酵

乾式法の実験を開始し、原料(剪定枝入り乳牛ふん単体)を投入してから3日後に、消化液表面に油膜のようなものが確認できた。その後油膜状のものが増加し、実験開始から13日後には消化液表面に泡が発生し始め、15日後には最大となった。その後、泡は減少していった。これは、消化液が原料の間隙を通して消化液槽に戻る過程で、原料中の有機成分が消化液槽に流れ込んだことによって、消化液槽内でのメタン発酵が起きたためと考えられる。

消化液から発生したバイオガスのメタン濃度の推移を図12に示す。消化液槽からの発生ガス中のメタン濃度は、原料の投入・排出や種類の影響を受けて、40~70%程度の範囲で大きく変化している。消化液槽から発生したバイオガスは、新規の原料投入後に発生量が増加することから、原料充填が新しい発酵槽由来として割り当てている。

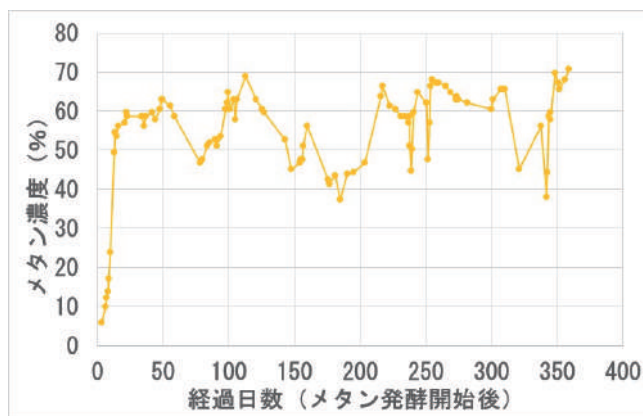


図12 乾式消化液メタン濃度の推移

4.3.4 湿式ポテンシャル試験との比較

図13に湿式ポテンシャル試験とのガス発生量の比較を示す。湿式法の試験で得られた原料のポテンシャル量に対する実験開始3週間後の乾式法のガス発生量を見てみると、平均86%のガス発生量となることが分かった。

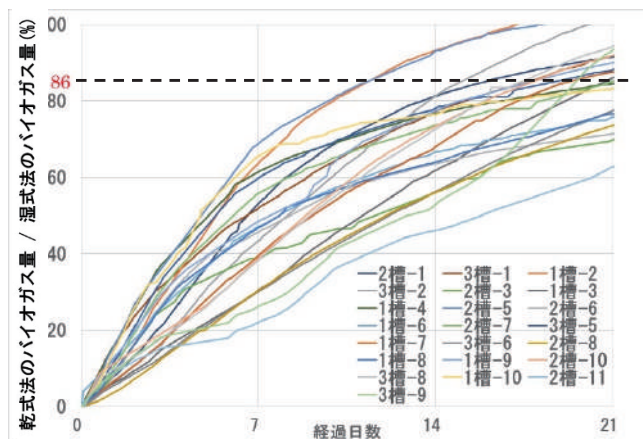


図13 ポテンシャル量と乾式法のガス発生量比較

一部の試験において、3週間経過時にポテンシャルの発生ガス量を超えているものが確認できる。これは後述するポテンシャル試験の試験精度による可能性と、実験期間の都合からポテンシャル試験を行うことができなかったものについて、過去に行った同種の原料のうち、性状に近いもののポテンシャル量を採用して効率を算出したため、差が生じた可能性が考えられる。

4.3.5 バッチ式乾式メタン発酵プロセスの検証

BEKON プラントでは発酵槽への原料の投入はホイールローダーで行う。そのため、原料の混合度合いによりガス発生量に差が生じることが考えられる。そこで、乾式実験の際にこの事象について検証を行った。

剪定枝入り乳牛ふんと食品残渣を用い、2槽のうち1槽では投入前に原料をハンドスコップで十分混合し、もう1槽では混合せず、原料ごとに層になるように積み上げることで、ガス発生量に差が出るかを確認した。図14に比較結果を示す。

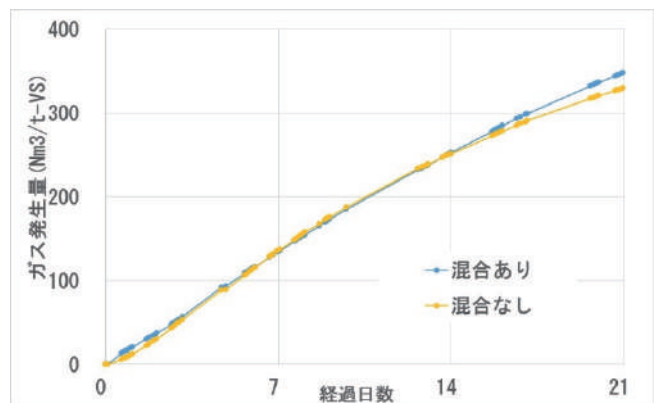


図14 事前混合有無の比較

原料の事前混合の有無によるガス発生量の差はほとんど認められなかった。実際にプラントに原料を投入する場合も混合は行わず、ホイールローダーで原料を投入する順番を変える程度であるが、今回の実験から従来の方法で問題ないことが分かった。しかしながら、消化液の浸透性を保つため、剪定枝入り乳牛ふんをまんべんなく投入することは有効であると推測される。

5. 考察

5.1 原料のばらつき

写真8、写真9に最もバイオガス発生量のポテンシャルが高かった残飯4と、最も低かった残飯3を示す。残飯4は油揚げが目立つ。一方、残飯3は茶色いそばろ状の搾りかすのようなものが大半で、他に麺類が確認できた。

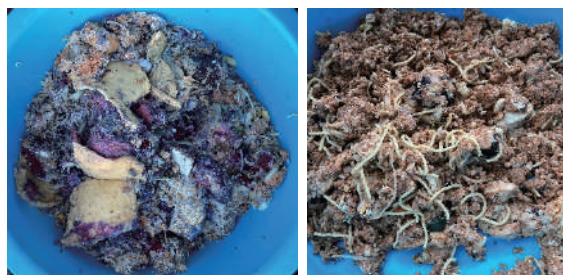


写真8 残飯4



写真9 残飯3

油揚げは植物性油脂を多く含んでいる。植物性油脂の大部分は炭素と窒素で構成されていることから、多量のバイオガス発生が期待できる原料である。一方、植物性油脂が加水分解すると高級脂肪酸が生成されるが、これは難分解性有機物である上、低濃度でもメタン発酵阻害を引き起こす⁴⁾。

今回残飯4のガス発生量が最も多くなったのは、油揚げに起因するものと考えられるが、発酵阻害を起こさないよう実プラントでは適切な投入量を検討しなければならない。また、写真に示したように食品残渣の種類は毎回異なっており、プラントを安定して運転するために引き続きポテンシャル試験を行ってデータを集めることが重要である。

剪定枝入り乳牛ふんの実験では、図5、図7に示したとおり、ガス発生量に大きなばらつきが認められた。乳牛ふんと混合される剪定枝の種類は季節により見た目と異なっており、写真10、写真11に示すとおり混合割合も毎回変動している。



写真10 乳牛ふんA



写真11 乳牛ふんB

写真12、写真13にポテンシャル試験終了時の発酵槽内の様子を示す。ガス発生量が最も多かった24/3/8到着分では剪定枝がほとんど残っていないが、23/10/3到着分②ではほとんどそのままの状態が残っていた。

2023年度の湿式試験における攪拌方法は水中でも使用できるスターラーによるものであり、攪拌力は一般的なスターラーと同程度である。一方、2024年度の試験や後述する外注分析先で使用しているものは、攪拌力が高い上、負荷が変動しても回転数を維持することができるホットスタ



写真12 24/3/8 到着分



写真13 23/10/3 到着分②

ーラーである。試験後に残っていた剪定枝の量から、水中スターラーの場合は剪定枝を攪拌することが難しく、沈殿していた可能性が考えられた。そこで、同じ原料を用いた湿式ポテンシャル試験を外部機関に依頼し、著者らが水中スターラーを使用して行っていたポテンシャル試験の精度を確認することとした。

5.2 湿式ポテンシャル試験精度の確認

ポテンシャル試験の精度を確認するため、外部機関(株式会社バイオガスラボ、石川県能美市)に同じ原料を用いた湿式メタン発酵試験を依頼し、クロスチェックを行った。著者らと外部機関の試験方法の比較を表1に示す。

表1 試験方法比較

項目	著者ら	外部機関
発酵槽実容量	1.5L	3.5L
種汚泥	下水消化汚泥	ラボ馴養汚泥
発酵温度	55±1.0℃	37±0.5℃
攪拌方法	水中スターラー	ホットスターラー
加温方法	ウォーターバス	同上

原料は著者らが入手したコーヒーかすと剪定枝入り乳牛ふんとした。いずれも、前処理としてミキサーで原料を粉碎してから試験を行っている。

コーヒーかすのバイオガス発生量は 499Nm³/t-VS に対し、外部機関では 502 Nm³/t-VS となりほとんど差がなかった。発生バイオガス中のメタン濃度については 66%に対し、外部機関では 61%であった。

剪定枝入り乳牛ふんのバイオガス発生量は 63Nm³/t-VS に対し、外部機関では 114 Nm³/t-VS となり大きく異なっていた。一方、発生バイオガス中のメタン濃度については 68%に対し、外部機関では 69%となり大きな差はなかった。

本比較試験によって、水中スターラーの攪拌力が不足していたために剪定枝入り乳牛ふんを十分に攪拌できず、メタン発酵の初期段階である加水分解が進みづらく、その後の酸発酵、メタン発酵段階に移行しづらかった可能性が示唆された。また、著者らが前処理の際に使用したミキサー

が剪定枝の粉碎に適しておらず、粉碎が不十分であった可能性も考えられる。一方で、著者らの試験でホットスターラーを使用した場合でもメタン発酵がうまく進まないことがあるため、引き続き適切な攪拌方法を検討する必要がある。

図 15 に著者らが行ったポテンシャル試験の結果を、図 16 に外部機関の試験結果を示す。

5.3 菌叢の変化

種汚泥として使用した消化汚泥(以下、種汚泥)と、実験開始から約 250 日経過した時点で採取した乾式法の消化液(以下、乾式消化液)について、真正細菌・古細菌を対象として菌叢解析を行なった。乾式消化液は前述の通り、消化汚泥 2L を蒸留水 20L で希釈したものから実験を始め、以後は蒸留水の添加のみ行っている。そのため、実験を繰り返すことによって投入した原料の分解に適した菌が優勢となり、実験開始時とは異なった菌叢に変化していくことが考えられる。

5.3.1 分析方法

DNA 抽出は、Extrap Soil DNA Kit plus ver:2(バイオダイナミクス研究所)を用いて行った。16S rRNA 遺伝子(V4 領域)を増幅するため、表 2 のプライマーを用いて PCR を行った。配列の分類及び解析は、菌叢解析用ソフトウェアである QIIME2(<http://qiime2.org/>、ver2022.2)を用いた。

5.3.2 分析結果

真正細菌と古細菌を対象とした菌叢解析結果を図 17 に示す。種汚泥で最も多く検出されたのは *Cloacimonadaceae* の group W5 であり、約 46% を占めていた。これはメタゲノム解析により高温プロピオン酸化細菌である可能性が報告されている⁶⁾。一方、乾式消化液では種汚泥でほとんど検出されなかった *Defluviitoga* が最も多く約 26% となり、その他は *Firmicutes* 門の細菌が大半を占めた。*Firmicutes*

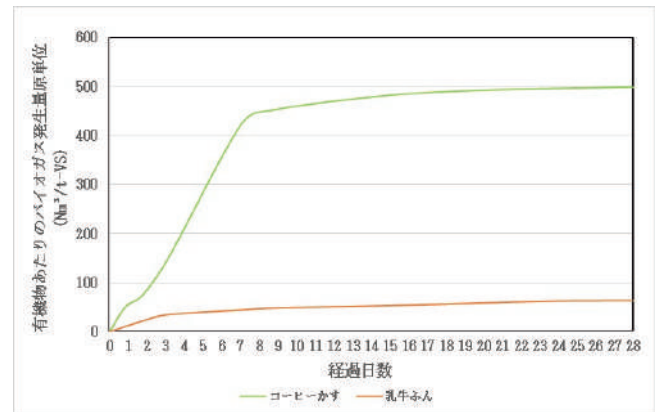


図 15 弊社ポテンシャル試験結果

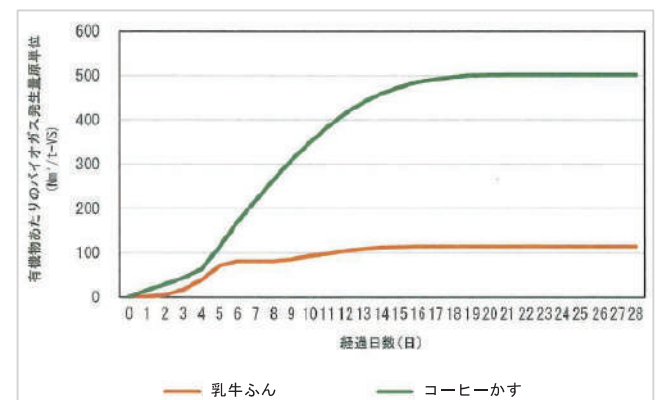


図 16 外部機関ポテンシャル試験結果

門には、タンパク質を利用する細菌が多く存在しているため⁴⁾、食品残渣を投入し続けた影響が考えられる。

図 18 に古細菌の菌叢解析結果を示す。種汚泥では、水素資化性高温メタン生成菌である *Methanothermobacter* が約 89% を占めていた。一方、乾式消化液ではこの割合が約 27% となり、水素資化性の *Methanoculleus* が約 44% と最も多く、酢酸資化性の *Methanosarcina* が約 19%、*Methanobacterium* が約 7%、*Methanomassiliicoccus* が約 3% であった。

表 2 PCR に使用したプライマー

標的微生物	標的遺伝子	プライマー名	配列(5' -3')
真正細菌 古細菌	16S rRNA遺伝子 V4領域	515F (Parada)	TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAG <u>GTGYCAGCMGCCGCGGTAA</u>
		806R (Apprill)	GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAG <u>GGACTACNVGGGTWTCTAAT</u>
古細菌	16S rRNA遺伝子 V4領域	U519F	TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAG <u>CAGYMGCTCGGKAAHACC</u>
		Arch806R	GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAG <u>GGACTACNSGGGTMTCTAAT</u>

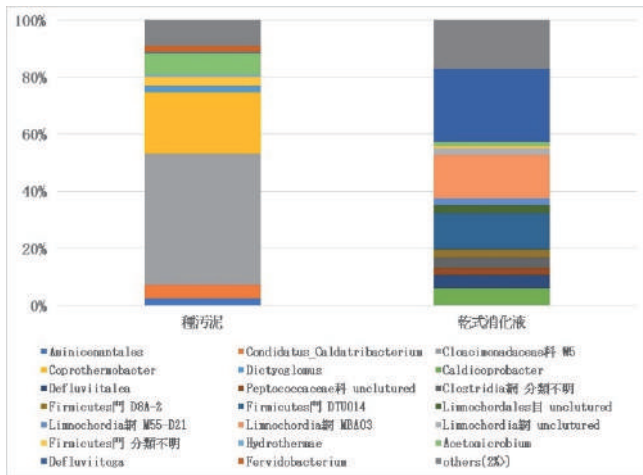


図 17 真正細菌・古細菌 菌叢解析結果

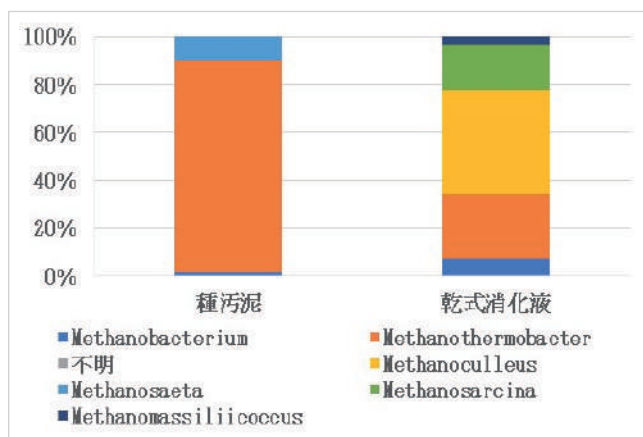


図 18 古細菌 菌叢解析結果

6. まとめ

静岡県富士宮市に国内初のドイツ BEKON 社製バッチ式乾式メタン発酵プラントを導入するにあたり、湿式法と乾式法の実験装置を作製し、同じ原料を用いて実験を行うことで、BEKON で処理実績の少ない乳牛ふんの処理可否を検証するとともに、バイオガス発生量等を比較した。比較に用いるデータは、湿式法の試験で得られた原料のポテンシャルと、乾式法では実プラントの運転サイクルに合わせ、実験開始から 3 週間経過時点のデータとした。実験の結果、乾式法では 3 週間で湿式法の約 86% のガス発生量となることが分かった。この時のメタン濃度は平均 56% であった。また、BEKON では処理実績の少ない乳牛ふんを原料としても、問題なくメタン発酵が進むことが分かった。

乾式消化液の pH は 8.5 程度となっており、一般的な消化液の pH よりやや高めの数値となっている。アンモニア性窒素

濃度は 2,000~2,500mg/L を推移しているが、現時点でアンモニア阻害は見られていない。アンモニア性窒素濃度は今後も上昇する可能性があり、引き続き注視する。

種汚泥として使用した下水処理場の消化汚泥と、乾式消化液について菌叢解析を行なった。真正細菌と古細菌を対象とした解析において、種汚泥では高温プロピオン酸化細菌が半数以上を占めていたのに対し、乾式消化液ではタンパク質を分解する細菌が多く検出された。一方、古細菌を対象とした解析において、種汚泥では *Methanothermobacter* が約 89% を占めていたのに対し、乾式消化液では基質の投入によってメタン菌種が増加したことが確認できた。

今後は実プラントの運営に向け、効率よくバイオガスを得られて発酵阻害の起きない原料配合を決定するべく実験を継続し、改善を図っていく。

謝辞

本研究にあたりご指導くださった株式会社バイオガストラボ三崎岳郎氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 株式会社鴻池組：国内初、バッチ式の乾式メタン発酵によるバイオガス発電事業-朝霧高原プロジェクト
<https://www.konoike.co.jp/news/2024/202402063299.html>
(参照 2024-7-17)
- 2) KS バイオマスエネルギーHP
<https://ks-biomass.com/product> (参照 2024-5-31)
- 3) NEDO：バイオマスエネルギー地域自立システムの導入案件・技術指針(第6版)-第3部メタン発酵技術に係る基礎知識、
<https://www.nedo.go.jp/content/100932093.pdf>
- 4) 野池達也ほか：メタン発酵、技報堂出版、2020.6、p.41, 138, 224
- 5) Li Y.Y., Ko I.B., Noike T., Funaishi K. and Sasaki H. (2004). "Comparison of Ammonia Inhibition between the Methophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion of Municipal Solid Wastes", *Proc. of 10th World Congress on Anaerobic Digestion*, Volume1, pp.507-514, 29/ Aug-2/ Sep/ 2004, Montréal, Canada.
- 6) S.Dyksma and C.Gallert : *Candidatus Syntrophosphaera thermopropionivorans*: a novel player in syntrophic propionate oxidation during anaerobic digestion. *Environ. Microbiol. Rep.*, Vol.11, No.4, 558-570, 2019.