

石狩湾新港地域における 食品廃棄物のメタン発酵特性の考察

諏訪部 力¹・古市 徹²・金 相烈³・石井 一英⁴

¹非会員 北海道大学大学院 公共政策学教育部 (〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目)
E-mail: chikara.suwabe@hops.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院工学研究院 教授 (〒060-0808 北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目)
E-mail: t-furu@eng.hokudai.ac.jp

³非会員 北海道大学大学院工学研究院 特任助教 (〒060-0808 北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目)
E-mail: sykim@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 北海道大学大学院工学研究院 准教授 (〒060-0808 北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目)
E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

本研究では、バイオマスの利活用による地域循環モデルの一つとして石狩湾新港地域にある工業団地からのバイオマスのメタン発酵特性について研究を行った。サンプリングしたバイオマスは炭水化物・脂質・タンパク質の成分調査を行い、有機成分が一定比率になるように混合した試料を、中温 (35℃) で約 4 週間の回分式メタン発酵実験をすることで、有機成分がメタン発酵特性に与える影響を明らかにした。その結果、メタンガス発生量に最も寄与する有機成分は脂質であること、メタンガス発生速度に最も寄与するのはタンパク質であることを、三角ダイヤグラムへの図示によって定量的比較が可能な状態で示すことができた。これにより、食品廃棄物の種類に依らない新たなメタン発酵特性評価を行うことができた。

Key Words : Organic Wastes, Methane Fermentation, Lipid, Protein, Carbohydrate, Ishikari bay new port area

1. はじめに

(1) 研究背景

有機性廃棄物のメタン発酵によるバイオガス化は他のバイオマス利用法である堆肥化や飼料化と比べて要求される分別精度が高くないことや、利用先も農業に限られず用途が多岐に渡り扱いに優れていること、カーボンニュートラルであるため再生可能エネルギーとして地球環境保全に適していることなどにより、有機廃棄物の有効利活用として大きく注目されている。

バイオマスを有効利用するためにはその地域に適したシステムを構築することが重要であり、北海道におけるバイオマスへの取り組みの一つとして、石狩湾新港地域にある工業団地を中心としたバイオマスのバイオガス化の事業性の評価が行なわれている。これは工業団地周辺にバイオガス化施設を建設し、工業団地やその周辺から排出される有機性廃棄物を利用してバイオガス化を行って得られたエネルギーを工業団地に還元するという、工業団地を動脈産業、バイオガス化施設を静脈産業とする地域循環システムである。石狩湾新港地域の工業団地を中心としたモデルの場合、動脈産業と静脈産業が近接し

ていることで、インプットとアウトプットの一定量の確保や効率的な収集運搬が期待される。

石狩湾新港地域におけるバイオマスのバイオガス化に関する事業を成功させるためには、インプットの量と質の把握が重要である。インプットの量については、石狩市によるアンケート調査¹⁾などで賦存量を知ることができ、また正味の受け入れ可能量についても推定方法の研究²⁾が行われている。一方、インプットの質については、生ごみや下水汚泥のメタン発酵特性は既存研究により明らかにされているものの、食品廃棄物は排出工場ごとに種類が大きく異なることから、食品廃棄物という大きな分類としてのメタン発酵特性は予測ができていないという現状がある。そこで本研究では、バイオマスはその種類に限らず炭水化物・脂質・タンパク質の 3 つの有機成分に分けられること、それぞれメタン発酵の分解経路が違いうことに着目して、メタン発酵特性の評価を行うことを試みた。

(2) 目的

本研究では、石狩湾新港地域におけるバイオガス化システムのインプットの評価を行うために必要とされる、

以下の2点について実験的考察を行った。

- ・石狩湾新港地域にある食品工場から排出される食品廃棄物のメタン発酵特性を明らかにする。
- ・食品廃棄物の有機成分を炭水化物・脂質・タンパク質の3つに分け、これらの成分がメタン発酵特性に与える影響について調べ、メタン発酵特性の新たな評価指標として提案する。

2. 実験方法

(1) サンプルング

実験で用いるサンプルは、想定されるバイオガス化システムのインプットとして受け入れ優先度が高い、現在リサイクルされていない食品廃棄物・肥料化および飼料化に不向きで排出量の多い食品系の汚泥とした。ここでは、食品系の汚泥とは、食品工場の下水処理設備から排出される汚泥とする。石狩湾新港地域にある食品工場へヒアリング調査を行い、これらに該当する廃棄物をサンプルリングした結果、豚肉・鮭・いか・バナナ・シナチク・メンマ・脱水汚泥の7項目を収集した（シナチクとは味付け前のメンマをさし、メンマとは味付けされた後のものと定義する）。実験では、これら7項目のサンプルについて考察を行っていく。ヒアリング対象企業は、石狩湾新港地域ポテンシャルガイド³⁾から抽出した。

(2) 実験の手順

a) サンプルの分析

サンプルをミキサーにて前処理（均一化）し、各種成分分析を行った。分析内容は、三成分（水分・有機分・配分）、元素組成（CHONS）、有機成分（炭水化物・脂質・タンパク質）である。これらの分析結果は実験の下準備のために行ったもので実験の本質とは関係ないため、結果は割愛した。各手法の詳細は以下の通りとなる。

前処理 電動ミキサーを用いて直径2.5mmの麺状に細分化したのち、手でよく揉み均一化させた。

三成分分析 サンプル1gを小皿にとり、105℃で2h乾燥させ水分を飛ばした。その後、600℃で30min焼却して有機分を燃焼させ、灰分を得た。それぞれの質量差をとり、三成分量を計測した。

元素分析 「エレメンタールVarioELⅢ」を用いて計測した。

有機成分分析 脂質はソックスレー抽出（ジエチルエーテル）を用いた。タンパク質はケルダール窒素より換算した。炭水化物は三成分分析で求めた有機分量から脂質とタンパク質の量を差し引いた値とした。

b) 実験の方法

実験の手順を図-1にまとめた。

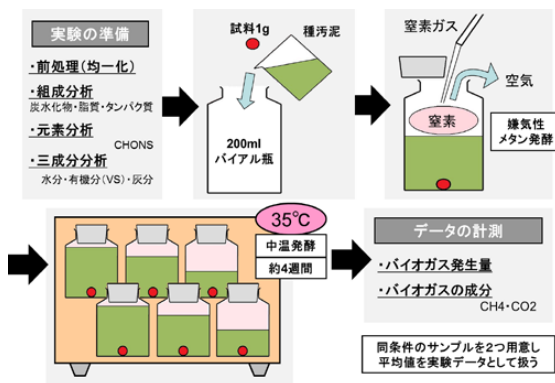


図-1 実験の手順

実験は回分反応方式をとり、嫌気性条件化の中温メタン発酵を行うこととする。200ml バイアル瓶に湿潤試料1g と一定の F/M 比になるように種汚泥を入れ、なかの空気を室素置換したのち密封し、35℃恒温槽の中に静置させた。メタン発酵の期間は、中温発酵を採用するバイオガス化施設と同じ 3～4 週間を目安にとり、適宜バイオガス発生量とバイオガスの成分（CO₂ 及び CH₄）を計測した。同条件のサンプルを二つ用意し、その平均値を計測データとした。

(3) 混合試料の作成

有機成分である炭水化物・脂質・タンパク質の割合による影響を評価するために、これら3つの成分の割合を変化させた混合サンプルを作成し、メタン発酵特性の評価を行った。混合に用いるのは炭水化物の割合が最も多いバナナ、脂質が多い鮭、タンパク質が多いいかの3項目とし、うち2項目ずつを混合させることで湿潤試料1gを作成した。混合パターンは表-1の通りである。

表-1 サンプルの混合比率と有機成分割合

	サンプル	炭水化物	脂質	タンパク質
①	鮭1g	43.3	52.9	3.8
②	いか1g	5.5	1	93.5
③	バナナ1g	90.4	7.6	2
④	鮭0.6g + いか0.4g	3.3	38.4	58.3
⑤	鮭0.3g + いか0.7g	2.7	24.7	72.5
⑥	鮭0.1g + いか0.9g	2.3	13.8	83.9
⑦	鮭0.75g + バナナ0.25g	21.1	42.9	36
⑧	鮭0.5g + バナナ0.5g	41.2	31.3	27.5
⑨	鮭0.25g + バナナ0.75g	65	17.5	17.5
⑩	いか0.75g + バナナ0.25g	25.2	5.9	68.9
⑪	いか0.5g + バナナ0.5g	48.1	4.3	47.6
⑫	いか0.25g + バナナ0.75g	70.9	2.6	26.5

これを三角ダイアグラムにプロットしたものが図-2となる。実験では、①④⑤⑥②のメタン発酵特性を比較することで脂質とタンパク質の割合による影響を、①⑦⑧⑨③のメタン発酵特性を比較することで脂質と炭水化物の割合による影響を、②⑩⑪⑫③のメタン発酵特性を比較することでタンパク質と炭水化物の割合による影響を

評価する。

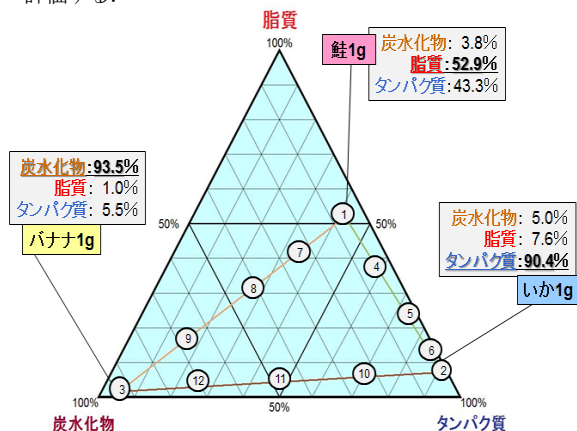


図-2 有機成分の三角ダイアグラム

(4) 実験内容

a) F/M比によるメタン発酵特性の計測

7項目のサンプルそれぞれのメタン発酵に最適なF/M比を求めるため、1つのサンプルにつき、全蒸発残留物(TS)を基準にしてF/M比0.2, 0.3, 0.4となるように調節した3パターンのバイアル瓶を用意し、バイオガス発生量を比較した。

b) バイオガス発生ポテンシャルの計測

7項目のサンプルのバイオガス発生量を測定し、バイオガス発生ポテンシャルを比較した。

c) 反応速度と反応率の計測

7項目のサンプルのバイオガス発生量の理論値に対する反応率を測定することで、バイオガス発生速度と反応率を比較した。

d) メタン発酵終了後のpH

7項目のサンプルのメタン発酵終了後のpHを測定することで、pHによる発酵阻害の有無を調べた。

e) 混合試料のバイオガス発生ポテンシャルの計測

混合した12項目の試料のバイオガス発生量を測定し、バイオガス発生ポテンシャルを比較した。

f) 混合試料の反応速度と反応率の計測

混合した12項目の試料のバイオガス発生量の理論値に対する反応率を測定することで、バイオガス発生速度と反応率を比較した。

3. 実験結果と考察

(1) 実験結果

a) F/M比によるメタン発酵特性

図-3に、F/M比ごとのバイオガス発生量を示すグラフを示した。種汚泥より発生するバイオガスの値を差し引

いてあり、湿潤試料1gからのバイオガス発生量を表している。いずれのサンプルにおいても、F/M比による違いはあまり見られないことが実験的に確かめられた。これ以降、サンプルごとのメタン発酵特性を考察する際は、最も良好な反応を示したサンプルの多かったF/M比0.3のデータをもとに比較を行うこととする。

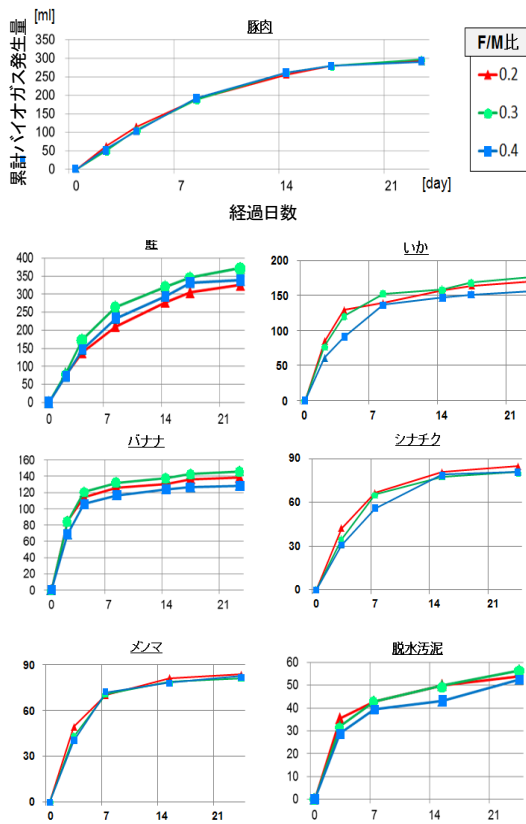


図-3 サンプル7項目別のF/M比によるバイオガス発生量

b) バイオガス発生ポテンシャル

図-4に、サンプルごとのバイオガス発生量を示すグラフを示した。種汚泥より発生するバイオガスの値を差し引いてあり、湿潤試料1gのバイオガス発生量を表している。

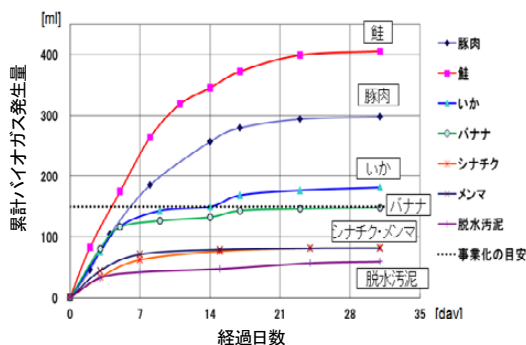


図-4 バイオガス発生量ポテンシャル

どのサンプルも実験開始21～28日の時点で反応のピークを迎えていることが分かる。また、バイオガス発生量の評価基準として事業化の目安を設定した。目安は、バイオガス化施設が「高効率原燃料施設」に認定され、補助金の交付対象となる「バイオガス発生量が150ml/g以上」とした。これによると、鮭と豚肉は基準の2倍以上、いかとバナナは基準と同程度、シナチク・メンマ・脱水汚泥は基準の半分以下のバイオガス発生量となった。

c) 反応速度と反応率

図-5に、バイオガス発生量理論値との比較を示すグラフを示した。理論値はCHON元素組成に基づく化学量論式で算出した。式は以下の通りである。

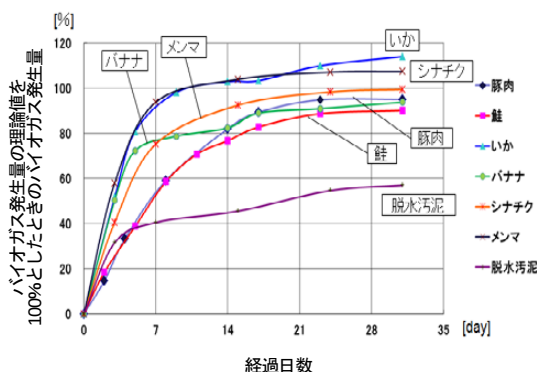
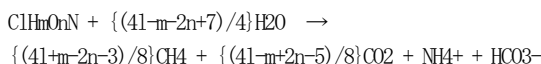


図-5 バイオガス発生速度と発生理論値

反応のピークである実験開始3～4週間の時点で、脱水汚泥以外のサンプルが理論値の90%以上を示している。実際のバイオガス化施設の中温メタン発酵期間も3～4週間であるため、サンプルのバイオガス発生ポテンシャルを十分に引き出していると言える。また、バイオガス化施設のバイオガス回収見込みは80%とされており、それに到達するまでの日数で反応速度を評価すると、いか・シナチクが5日、メンマ・バナナが約10日、豚肉・鮭が約14日と、大きく差が表れていることが分かる。

d) メタン発酵後のpH

実験終了後の各サンプルの残渣のpHを表-2に記した。いずれもpH7.6～8.0の間に収まっており、メタン発酵に適切であるとされる⁴⁾pH6.0～9.0の中性を示している。このことから、本実験においてはpHが影響するメタン発酵阻害は起こらず、安定的に反応したと考えられる。

表-2 メタン発酵実験終了後のpH

	豚肉	鮭	いか	バナナ	シナチク	メンマ	脱水汚泥	種汚泥(ブランク)
pH	7.6	7.6	7.8	7.6	7.9	7.8	8	8

e) 混合試料のバイオガス発生ポテンシャルの計測

図-6に、サンプルごとのバイオガス発生量を示すグラフを示した。種汚泥より発生するバイオガスの値を差し引いてあり、また有機成分割合の比較をするために揮発性固形分(VS)1gあたりのバイオガス発生量を表している。図中の番号は表-1のサンプルの番号と一致している。

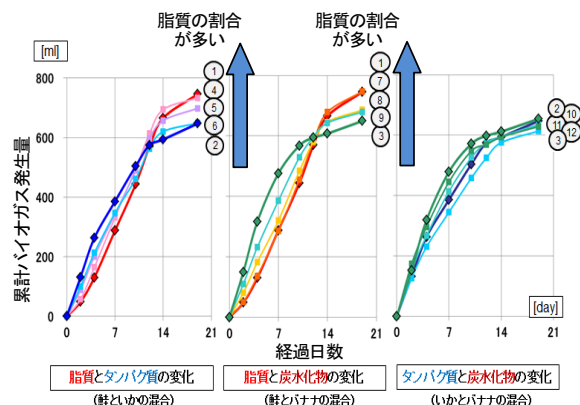


図-6 バイオガス発生ポテンシャル

脂質とタンパク質では脂質の割合が高くなるほどバイオガス発生量が増えることが分かる。また中央の図より、脂質と炭水化物においても脂質の割合が高いほど同様であった。一方、タンパク質と炭水化物では割合が変わってもバイオガス発生量に差は見られないことが明らかとなった。また、総合的な比較を行うと、バイオガス発生量への寄与度は脂質>タンパク質≒炭水化物であることが分かった。

f) 混合試料の反応速度と反応率の計測

図-7に、バイオガス発生量理論値との比較を示すグラフを示した。式は前述と同じ式を用いている。また、図中の番号は表-1のサンプルの番号と一致している。

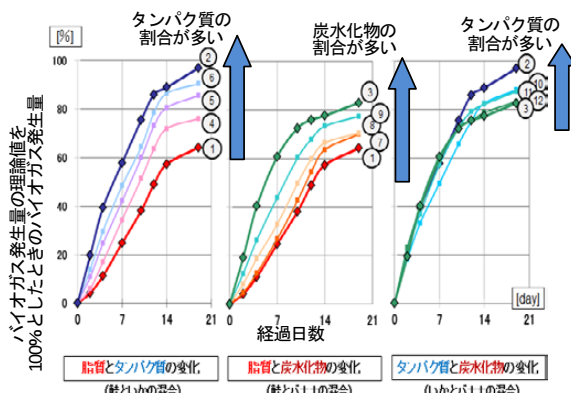


図-7 バイオガス発生速度と発生理論値

脂質とタンパク質ではタンパク質の割合が高くなるほど反応速度が大きくなることが分かる。また、脂質と炭

水化物においては炭水化物の割合が高いほど同様であった。一方、タンパク質と炭水化物ではタンパク質の割合が高くなるほど反応速度が大きくなることが明らかとなった。また、総合的な比較を行うと、反応速度への寄与度はタンパク質＞炭水化物＞脂質であることが分かった。

(2) 考察

また本研究では、三角ダイアグラムに実験データをプロットすることで、メタン発酵特性の評価指標を作成した(図-8)。各条件に該当する2点間を直線で結び、メタン発酵特性の境界線を示した。

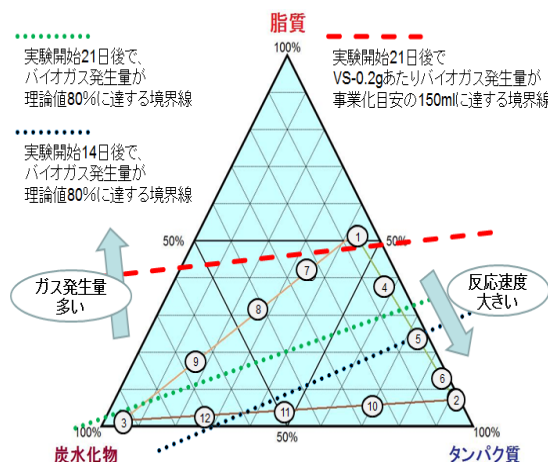


図-8 有機成分によるメタン発酵特性の評価

実際のバイオガス化施設でのバイオガス回収見込みは約80%であり、バイオガス発生量が理論値80%に達するまでの時間を反応速度の評価基準とすると、メタン発酵開始14日でそれを達成するにはタンパク質の割合の高さが何よりも重要であることが分かる。該当するのは②⑤⑥⑩⑪であった。一方、少し遅れて21日で達成するためには、タンパク質の割合が低くとも、炭水化物の割合が高ければ良いということが分かる。該当するのは③⑫であった。

バイオガス発生量については、事業化の目安である150ml/gに達するのはVS-0.2gの試料ならば脂質の割合が約50%以上必要であることが分かる(VS-0.2gに設定したのは試料①～⑫のVSの下限が約0.2であるため)。該当するのは①のみであった。また、VSが多ければ50%

以下、VSが少なければ50%以上の脂質が必要となる。これらの結果はb) c)とe) f)とで相違が見られるが、VSの違いや実験に使用した種汚泥の違いによるものと考えられる。

以上から、インプットとなる廃棄物の種類や分類に拠らない新たな評価を行うことができた。これにより、実際のバイオガス化施設がインプットのメタン発酵特性を推定する場合、従来のようにインプットの種類や量で捉えるのではなく、有機成分の割合として捉えることでメタン発酵特性を把握することが可能となる。

しかし本研究は回分実験であり連続的なメタン醗酵負荷が考慮されていないため、バイオガス発生速度においては正確な値を導き出したとは言い難い。今後、実験方式やサンプルを替えて実験を繰り返すことで、現実のバイオガス化施設のメタン醗酵に应用できるよう評価指標を補完していく必要がある。

4. 結論

- ・石狩湾新港地域にある食品工場より排出される食品廃棄物のメタン発酵特性を明らかにした。
- ・メタンガス発生量に最も寄与する有機成分は脂質であること、メタンガス発生速度に最も寄与する有機成分はタンパク質であることを実験的に明らかにした。
- ・想定する石狩湾新港地域のバイオガス化施設の事業化目安となるインプットの有機成分割合を明らかにした。
- ・炭水化物・脂質・タンパク質の有機成分の割合を示す三角ダイアグラムにより、新たなメタン発酵特性の評価指標を作成した。

参考文献

- 1) 石狩市：石狩市地域新エネルギービジョン（バイオマス）報告書（案），p.71（平成23年）
- 2) 渡辺翔：石狩湾新港地域におけるバイオガス化システム事後床における検討－二項ロジックモデルを用いた食品廃棄物収集可能量の推定手法の提案，環（2011）
- 3) 石狩湾新港地域ポテンシャルガイド－企業ナビゲーション－<http://www.ishikari-dev.co.jp/site/index.html>（2010年9月）
- 4) 森田信ら：「先進型好悪効率乾式メタン発酵システム実験事業」－可燃ごみ核組成のバイオガス発生特性に関する研究，第17回廃棄物学会研究発表会講演論文集，p.481-483（2006）

Studies on Methane Fermentation Characteristics of Organic Wastes from Food Industry in Ishikari Bay New Port Area

Chikara SUWABE, Toru FURUICHI, Kim Sang-Yul, Kazuei ISHII

In this study, as one of regional circulation models through biomass utilization, methane fermentation characteristics of organic wastes from food plants in Ishikari bay new port area were examined. The sampled organic wastes from food plants were analyzed to investigate ratios of lipid, protein, and carbohydrate and mixed each other to obtain the preset ratios of lipid, protein, and carbohydrate. The mixture samples were to examine the effects of their ratios of organic wastes on the methane yield and methane production rates with batch tests that were performed for 4 weeks at mesophilic conditions (35°C).

As a result, it was found that the amount of methane yield was significantly influenced by the content of lipid, whereas methane production rate was influenced by the content of protein. These relations were plotted in ternary lipid-protein-carbohydrate diagram with index lines of both methane yield and methane production rates, which enable estimate approximately methane fermentation characteristics for organic wastes, regardless of the kinds of food wastes .