

食品廃棄物高脂質含有物の 混合発酵に与える影響の実験的考察

東 祐樹¹・古市徹²・金相烈³・石井一英⁴

¹非会員 北海道大学修士課程 大学院工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: higashi @kanri-er.eng.hokudai.jp

²正会員 北海道大学教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: t-furu@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: sykim@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

本研究では廃棄物系バイオマスのひとつの食品系廃棄物の再利用法であるメタン発酵での発酵特性を考察した。既存のメタンガス発酵施設では家庭系生ごみを中心とした運転を行っているが、ガス発生量が少なく事業採算性を得るために飼料化や堆肥化に向かない食品廃棄物を受け入れ、その費用で事業採算性を得る必要がある。しかしそのような副資材を投入した際に発酵阻害が起こることが懸念されている。安定に発酵しつつ、どの程度の量の副資材を投入することができるのかを明らかにする必要がある。本研究では食品廃棄物高脂質含有物を受け入れ、槽内の脂質の割合が高くなった場合を想定し実験を行った。その結果、投入有機物の40%が脂質の場合、VS負荷量が0.01 kg-VS/m³であれば安全に発酵でき、それ以上の負荷量だと阻害が出る可能性が示唆された。また、肉とバターのように違う脂質の種類の場合、阻害の度合いが異なったが、それは高級脂肪酸による阻害の違い(化学的な特性)より、脂質の物理的な特性に起因することが示唆された。

Key Words : cofermentation, inhibition, food waste, VS loading, lipid

1. 序論

(1) 研究背景

廃棄物系バイオマスには家畜排せつ物、下水汚泥、食品廃棄物などがあり、その利活用技術には堆肥化、バイオガス化などがある。その中でも、特に再利用率が低いのが家庭系の食品廃棄物である。主に飼料や堆肥に再利用されているが、その割合も低く、再利用されなかったものはそのまま燃焼され処分されている。堆肥化、飼料化以外の再利用法としてメタン発酵が注目を浴びている。メタン発酵は投入物からのエネルギーを回収できるメリットがある。しかし、廃棄物受入料金で採算性を得るために廃棄物の選択が難しくなることやガス量を増加させるために通常とは異なる副資材を一度に大量に投入する際の発酵阻害が懸念されている。今後、廃棄物受入量を増やし、副資材を安定処理するために混合発酵の特性を明確にする必要がある。粘性が大きいもの(バターやマーガリンなど)や季節品(豚肉や魚肉)は飼料化や堆肥

化には向かず、また特徴として脂質が多い。一時的に脂質の成分が多い副資材を受け入れる際にどの程度の量の投入であれば安定に発酵することができるのかが分かれば受入の際にどの程度の副資材を受け入れることができるのかを判断する材料になると考えられる。

(2) 目的

本研究では、季節品や堆肥化及び、飼料化に向かない食品廃棄物高脂質含有物を対象とした混合発酵特性を、安定が行える有機物(VS)の負荷量の観点から、実験的に考察することを目的とする。

2. 食品廃棄物対象のバイオガス施設の現状

(1) 食品廃棄物のリサイクル状況

食品廃棄物とは一般家庭、食品流通業や飲食店業などから発生する生ごみのことであり、2,200万トンが毎年

排出されている。その中で食品残差などの産業廃棄物の再利用率は80%、家庭系生ごみの再利用率は5%である。両者をあわせた再利用率は27%であり、その他の廃棄物系バイオマスに比べて再利用率が低い。再利用先は、飼料→肥料→メタン発酵の順番で質の良いものが再利用される。堆肥、飼料に適しているものと考えられている食品廃棄物の特性を以下に記載する。

飼料：品質が安定していて、脂質と塩分が少なく栄養バランスがよいもので、ある程度の量が確保できるもの

堆肥：含水率が低く、異物が混入していないもの

飼料化と堆肥化には、受入施設によって異なるが、独自に受入基準を設けて品質管理を行っている。また飼料化と堆肥化は需要に限られているため、普及には地域特性が大きく影響する。そのため都市型地域などでは飼料、堆肥は需要が限定的なため、再利用されなかった食品廃棄物は、焼却されている。

(2) バイオガス化の普及の必要性

先に述べたように、堆肥化や飼料化できなかった食品廃棄物の多くは焼却されている。しかし、食品廃棄物は含水率が高いため焼却には向いていない。食品廃棄物はバイオマスとしてのエネルギーポテンシャルは高いため、焼却ではない方法で再利用することが望ましい。そこで堆肥化、飼料化以外への再利用方法としてメタン発酵が注目されている。メタン発酵は含水率が高いものが適しており、分別精度は低くても影響はあまりない。さらに、投入物からエネルギーとして取り出すことができ、かつエネルギー需要は多く地域特性に左右されないことが特徴である。

(3) 混合メタン発酵の必要性

現在、多くのメタン発酵施設で計画収集量通りの家庭系生ごみが集まらず、自身のプラントの電力もまかなえずに電気を購入している事例もある。事業として成立させるにはある程度の収入が必要であるが、現状のバイオガスプラントではアウトプットの売電だけでは収入が見込めない。よって、家庭系生ごみ以外の食品系廃棄物を受け入れ、受入料金での収入を増やす必要がある。しかし、受入廃棄物を増加させることによる発酵阻害が懸念されている。どの程度、安定発酵を保ちながら、副資材を投入できるのかがわかっておらず、混合発酵が進んでいないのが現状である。

(4) 発酵阻害の指標

メタン発酵プロセスでは、有機物は嫌気性微生物の働きによって分解され、最終的にメタンと二酸化炭素にま

で分解される。インプットに含まれる有機物は、主にタンパク質、脂質、炭水化物成分に大別されるが、それらの三成分それぞれに關与する微生物群や生成する代謝物が異なるため、有機性廃棄物中の成分組成が発酵速度やバイオガス生成量、ガス組成等の発酵特性に影響することになる。メタン発酵プロセスを制御する際、物理的要因（温度、滞留時間、VS負荷量、攪拌）と化学的要因（pH、揮発性有機酸濃度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の蓄積、高級脂肪酸の蓄積）の二つの要因がある。物理的要因はメタン発酵管理の際に管理側で自由に制御できる外部要因であり、管理方法を誤らなければ発酵阻害は起こらないだろう。しかし、維持管理の際、難しいのは内部要因としての化学的要因である。化学的要因は一般的に発酵阻害の指標として用いられる。これらを測定することによって槽内の状態が把握できるからである。

3. 食品廃棄物高脂質含有物の混合発酵実験によるガス発生特性

(1) 目的

高脂質含有食品廃棄物を受け入れ、定常的投入を想定し、本実験でメタン発酵特性を考察する。

(2) 実験方法

a) 種汚泥のサンプリングと実験前の馴養方法

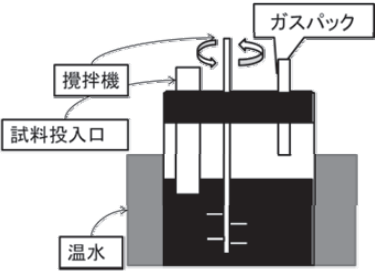


図-1 カラム実験装置

表-1 run1-run4の投入条件

	脂質 (%)	炭水化物 (%)	タンパク質 (%)	投入物
run1	40	32	28	肉、バナナ、生ごみ
run2				
run3	40	29	31	バター、豆腐、生ごみ
run4				

表-2 投入有機物の組成の特性

	TS (%)	VS (%)	炭水化物 (%)	タンパク質 (%)	脂質 (%)
肉	18.34	18.01	1	43	56
豆腐	8.47	7.87	34	51	15
バナナ	22.72	20.35	94	1	5
バター	84.27	82.91	0.1	0.9	99
生ごみ	4.34	3.62	53	29	18
TS:全固形分 VS:揮発性固形分					

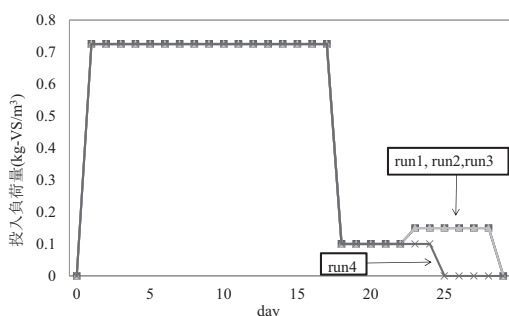


図-2 前半の経日投入負荷量

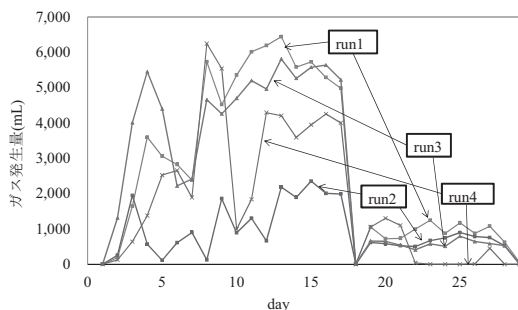


図-3 前半の経日ガス発生量

表-3 各runの18-29日の実験値と
発酵の際の安全域の理論値との比較¹⁾

	VFA [mg/L]	NH ₄ ⁺ -N [mg/L]	pH
適正範囲	<100 mg/L	< 200 mg/L	6.5 ~ 8.2
run1	15.55	70.86	7.78
run2	28.05	71.79	7.80
run3	25.96	68.63	7.68
run4	21.35	71.17	7.90

家庭系生ごみのみでメタン発酵を行っているA市のメタン発酵施設から、種汚泥としての発酵槽内汚泥と、メタン発酵の原料となる生ごみスラリー（収集生ごみを破碎し、異物を除き、水分を加えたもの）を採取した。採取後、実験室にて嫌気状態にしたメタン発酵槽を4つ用意し、それぞれに種汚泥を入れた後、メタン生成細菌群を安定させるために、一定の生ごみスラリーをガス発生が安定するまで投入した。

b) 実験装置

図-1に、実験装置の概略図を示した。発酵槽は容積10 Lのガラス円筒製の広口瓶を用いた。広口瓶の上部はゴム栓に、発酵原料投入、汚泥引抜口、バイオガス捕集口を設け、プロペラ式攪拌機シャフトが通る様に加工した。発酵槽内のスラリーが十分混合されるように、攪拌回転数を120rpmに設定し、温度は、発酵槽を温水がはいった

クーラーボックスに入れ、温度調節器により中温発酵に適した37℃に保った。滞留時間は、A市のメタン発酵施設と同様に20日間とした。

c) 投入条件

表-1に、本実験の投入条件を示す。run1～run4まで、すべての発酵槽に投入する試料は、投入有機物の脂質割合を40%に、表-2に示す種類の投入物を用いて調整した。なお、脂質の種類による分解特性をみるために、run1とrun2は主に肉、run3とrun4はバターを用いて、脂質割合を調整した。

表-2に、投入試料の成分調整に用いた有機物の種類とその基本的成分組成を表した。

d) 分析項目と分析方法

まず、全固形物量（TS）、揮発性固形分（VS）、灰分を測定した。有機物の3成分である炭水化物、タンパク質、脂質については、まず、タンパク質量はケルダール法にて窒素量を測定し、タンパク質量に換算した。そして、脂質量はソックスレー法にてエーテル抽出物量を測定し、脂質量として算出した。炭水化物量は、VSからタンパク質、脂質を減算して算出した。

その他、バイオガス発生量（ミリガスカウンター）、メタン濃度（ガスクロ法）、汚泥のpHを毎日測定し、揮発性有機酸（VFA）濃度（ガスクロ法）、NH₄⁺-N濃度（液クロ法）も適時測定した。

(3) 高脂質含有物食品廃棄物の定常負荷投入実験

実験期間は77日間であったが、以下のように、はじめの0～29日（前半とする）と30～77日（後半とする）とに分けて述べる。

a) 前半（0～29日）での実験結果と考察

各runの経日VS負荷量を図-2、経日のガス発生量を図-3に示した。run1に一定負荷量の生ごみスラリー（0.725 kg-VS/m³）を発酵が安定する18日目まで投入した。その後各runすべてVS負荷量0.1 kg-VS/m³に調整した試料を投入した。run1～run3は28日目まではガスの発生一定量で発生していたが、29日目にはすべてのrunでガスの発生が止まってしまった。

一方、run4は25日目に発酵が停止した。run4の場合は、酸素がメタン発酵槽に侵入が原因であることが確認されたので、窒素注入を再度行い、槽内を嫌気状態に再度調整し、経過を観察した。なおrun1～3の場合は酸素の侵入は見られなかった。

また、表-3のように、VFA、NH₄⁺-Nの蓄積、pHの低下による阻害は見られなかった。

そこで引き抜いた汚泥の性状を確認してみると油脂を多く含んだ状態となっていた（図-4参照）。参考文献¹⁾では、高級脂肪酸は炭水化物やタンパク質と異なり、メ

タン菌の表面に付着し易く、低濃度でも発酵阻害を与える可能性がある」と指摘されている。本実験でも油脂の膜が確認できたことから阻害の原因は高級脂肪酸が細菌に付着し、メタン発酵を妨害したことによるものであると

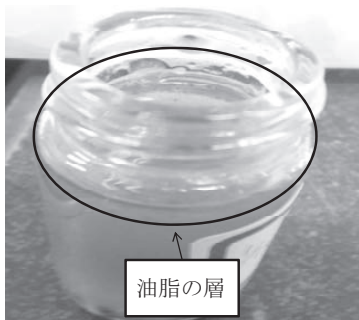


図4 引き抜いた汚泥の性状

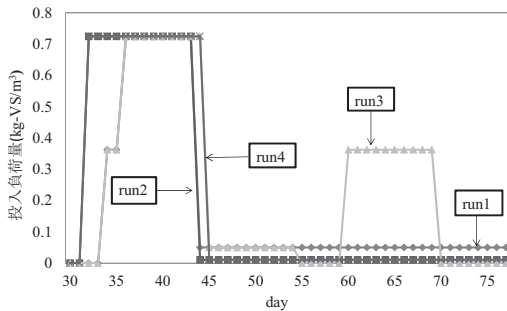


図5 後半の経日投入量負荷量

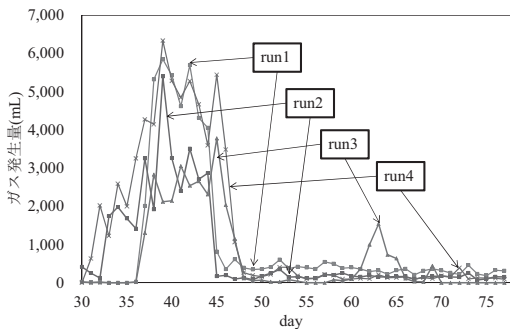


図6 後半の経日ガス発生量

表4 試料投入後のVS負荷量と
その間の平均ガス発生量

	投入物	VS負荷量(kg-VS/m ³)	ガス発生量(mL)
run1	肉 パナナ	0.05	430.21
run2	生ごみ	0.01	167.94
run3	バター 豆	0.05	40.28
run4	腐 生ごみ	0.01	226.13

考えられた。

以上のことから、高脂質含有物食品廃棄物をメタン発酵で処理する際は、VFA、NH₄⁺-N、pHといった一般的な発酵阻害の指標の他に、高級脂肪酸の濃度を確認する必要があることが示唆された。

b) 後半(30～57日)の実験結果と考察

各runの経日VS負荷量を図-5、経日のガス発生量を図-6に示した。前半の実験でメタン発酵が一度停止したため、ガスが再度発生するまで投入を控えた。それぞれガスが発生し始めてから(32-34日)、前半と同様に一定量(0.3625 kg-VS/m³または0.725 kg-VS/m³)の生ごみスラリーを投入した。約10日後の44日前後で各runのガス発生量が安定したので、VS負荷量を0.05 kg-VS/m³、0.01 kg-VS/m³に調整した試料を投入した。そのまま投入を続けると、55日目にrun3は発酵が停止した。run1, 2, 4は発酵が停止することなくほぼ一定量のガス発生が見られた。表-4は試料投入開始後のVS負荷量とその間の平均ガス発生量である。VS負荷量が、0.01kg-VS/m³ではバター、肉ともに発酵阻害は起こらなかった。しかし、VS負荷量が、0.05kg-VS/m³では、肉の場合はガスが発生していたが、バターの方はガスの発生が55日目に停止してしまった。以上の結果から、バターと肉は、

$$0.01 \text{ kg-VS/m}^3 \leq \text{バター} \leq 0.05 \text{ kg-VS/m}^3$$

$$0.05 \text{ kg-VS/m}^3 \leq \text{肉} < 0.15 \text{ kg-VS/m}^3$$

の範囲に阻害を引き起こす負荷量があることがわかった。なお、肉は前半の実験から0.15 kg-VS/m³投入した際発酵が停止してしまったため上限を0.15 kg-VS/m³とした。

c) 高級脂肪酸の観点からの阻害の考察

以上の実験結果より、阻害を起こす脂肪の投入量の範囲を考察する。脂肪には、種類によって分解特性が異なることから、特に、高級脂肪酸に注目して考察する。

脂肪は有機物によってさまざまな脂肪酸を形態をとり、それらの含有量も異なっている。表-5は肉とバターの高級脂肪酸の割合を示した³⁾ものであり、高級脂肪酸の割合は肉の方が高い。楮春鳳等⁴⁾によれば中温でのメタン発酵の際に阻害に影響を与える高級脂肪酸は、リノール

表-5 バター及び肉の脂肪酸の割合

	高級脂肪酸(C6以上)の割合
肉	97.78
バター	84.90

表-6 肉とバターのオレイン酸、リノール酸の
含有割合と総和

	1日当たりの 投入量 (g-VS/day)	脂質 割合 (%)	オレ イン 酸 (%)	リノ ール 酸 (%)	1日当たりの (オレイン酸+リノール酸) の投入量の総和(g/day)
肉	0.20	56	44.04	4.50	0.05
バター	0.07	99	26.70	3.60	0.02

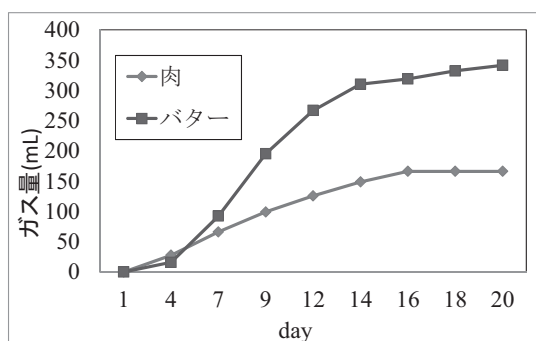


図-7 VS1gあたりの累積ガス発生量

酸(C18.2)>オレイン酸(C18.1)>>ラウリン酸(C12)>ミリスチン酸(C14)>カプリン酸(C10)の順であり、パルミチン酸(C16)、ステアリン酸(C18)による阻害は少ないと指摘している(Cの後の数字は炭素数を表している)。今回は、肉とバターでリノール酸、オレイン酸以外の高級脂肪酸の含有割合は大きな違いはなく、リノール酸とリノレン酸による阻害がもっとも大きいのでこの二つの高級脂肪酸に着目し、0.01 kg-VS/m³での2つの高級脂肪酸の投入重量をそれぞれ計算した。

その結果が表-6である。これより、阻害を引き起こす高級脂肪酸の量は肉の方が多くなっていた。しかし、本実験では肉よりもバターが先に発酵阻害が起きていた。

以上より、高級脂肪酸のみの観点からでは、本実験での阻害を説明することができない。高級脂肪酸以外の要因で阻害が起きていることを考える必要がある。

(4) 反応速度の観点からの阻害の考察

今回、肉とバターの発酵の違いを考察するためにバッチ実験を行った。

a) 実験装置

容量約200 mLのバイアル瓶に、試料1 gと汚泥-試料比(FM比)が0.3になるように種汚泥の量を調整して投入し、ヘッドスペースを窒素置換し、瓶内を嫌気性状態で密閉した後、37℃で中温状態を保った。実験開始後、2～3日に一度、バイオガス発生量とガス濃度を測定した。バイオガス発生量は、ゴム栓に10 mL容量の注射器を用いて中のガスを抽出し、内圧と外圧が等しくなった時の容量をガス量とした。

b) 実験結果と考察

得られた実験結果を図-7に示した。20日間で、VS1 gあたりの累積ガス発生量は、バター>肉でその分解量には2倍の差が見られた。

その理由を考察すると、バターと肉の性状の違いであると考えられる。バターは、中温発酵の温度で容易に液状となり、槽内で均一になりやすい。しかし、肉は中温付近で液状になることはなく、槽内では均一になりにく

い。20日間という限られた期間の間では、バターの方が分解されやすいことがわかった。

(5) 本研究による阻害の考察

既存の研究から¹⁾、脂質を十分に汚泥に分散させると加水分解が容易に進行し、大量の高級脂肪酸が生成されることが分かっており、バターはこの発生した高級脂肪酸が十分に次の段階に処理される前に次の脂質が投入されてしまい、処理しきれなくなり高級脂肪酸が蓄積してしまったと考えられる。一方、肉に関しては、温度が中温程度ではバターのように液状にならず、かつ個体のまま槽内で偏在し、分解されていないものが固形場のまま蓄積されていると考えられる。このように、投入物の中温の際の性状等によっても発酵の阻害に変化が出ることが示唆された。

4. 結論

- ① 脂質の割合が40%の食品廃棄物の安定発酵できるVS負荷量は本実験の範囲では0.01 kg-VS/m³であり、バターを主成分とした食品廃棄物では0.05kg-VS/m³以上だと高級脂肪酸の蓄積で阻害が起こる可能性が示唆された。
- ② 食品廃棄物高脂質含有物をメタン発酵で処理する際、設定温度での投入物の性状を考慮して負荷量を決定する必要があることが示唆された。

謝辞

北海道総合研究機構工業試験場の三津橋氏には、深く御礼する。なお、本研究の一部は、環境研究総合推進費補助金「バイオマスの利活用を基軸とした地域循環圏のモデル化と普及方策に関する研究」により実施した。

参考文献

- (1) 野池達也：メタン発酵、技報堂出版、2009
- (2) 社団法人日本下水道協会：下水試験方法 上巻、1997
- (3) 石鹼百科：主な油脂の脂肪酸組成 (2012/12/25閲覧)
<http://www.live-science.com/honkan/soap/soapchemistry03.html>
- (4) 椿春鳳・李玉友・宮原高志・野池達也：中温および高温メタン発酵に及ぼす高級脂肪酸の阻害効果の比較、土木学会論文集、No.559、31-38、1996

(2013. 7. 19 受付)

EXPERIMENTAL STUDY OF INFLUENCE OF HIGH-FAT CONTENT FOOD WASTE ON COFERMENTATION PROCESS

Yuki HIGASHI, Toru FURUICHI, SangYul KIM and Kazuei ISHII

This study discussed the characteristics of methane fermentation of food waste. Existing methane fermentation facilities targeted for household food waste have a bad business profitability because of small amounts of gases. Therefore, the use of food waste unsuitable for composting or animal feed should be considered. However, it is possible that the fermentation inhibition occurs when such sub-materials are mixed up. It is necessary to clarify the amount of sub-materials to keep fermentation stable. This study examined influence of high-fat content food waste in laboratory-scale column experiments. The results suggested that VS loading of up to 0.01 kg-VS/m³ be likely to be fermented safely in 40% lipid, but inhibition occur in the higher loading than 0.01 kg-VS/m³. Also, different fats such as butter and meat were shown differences in inhibition, which is not because of chemical property but because of physical property.