

1. 委託事業名： 有機性汚泥の可溶化・メタン発酵技術によるバイオガスエネルギー変換プロセスの開発

2. 委託事業者名： 委託団体：山梨罐詰株式会社

連携大学：創価大学プランクトン工学研究所 客員教授 中崎清彦

連携団体：静岡県工業技術研究所

3. 研究成果概要：

【背景】

近年、循環型社会の構築および環境負荷の低い産業活動を目的とした取り組みが関心を集めている。メタン発酵は、廃棄物からエネルギー回収することができる技術として注目され、その普及が大変期待されている。静岡県は水産物及び農作物が豊富であること、および水資源が豊富であることから、これらを活用した食品会社も多い。これらの食品会社では、排水処理の過程で余剰汚泥が発生し、その処理費用が会社経営を圧迫している。

【目的】

余剰汚泥の固形物を可溶化し、メタン発酵しやすい原料に変換できれば、コンパクトな食品工場向けのゼロエミッション手法を考案できる。そこで本事業の目的は、余剰汚泥を可溶化し、メタン発酵の原料に適しているか評価し、メタン発酵過程で重要な微生物を明らかにし、事業化に向けたシステムの検討をすることである。

【研究結果および成果】

1. 余剰汚泥のメタン発酵

余剰汚泥は、山梨罐詰株式会社の敷地内にある排水処理場から発生する余剰有機性汚泥を用いた(Run SL-1)。有機性汚泥に Fe、Co、Ni をそれぞれ 1.0mg-Fe/L、0.1mg-Co/L、0.1mg-Ni/L となるように添加したものを混合原料とした。図 1 に実験装置の概要図を示す。発酵槽(1L)に自社廃シロップ液で馴養されたメタン発酵種菌 (MLSS:10,000 mg/L)0.5L、イオン交換水 0.5L を投入し、窒素 5L を発酵槽内へ曝気することで、発酵槽内の空気を除去した。その後、発酵槽内を、ヒーターで 38℃付近に保温し、スターラーで攪拌した。消化液排出・混合原料投入前の 2 時間は攪拌を停止することで、汚泥を沈降させた。1 日 1 回の頻度で、発酵槽内の消化液を排出し、原料ストックにある混合原料を投入した。発生したバイオガスを回収し、ガス濃度およびガス量を分析した。

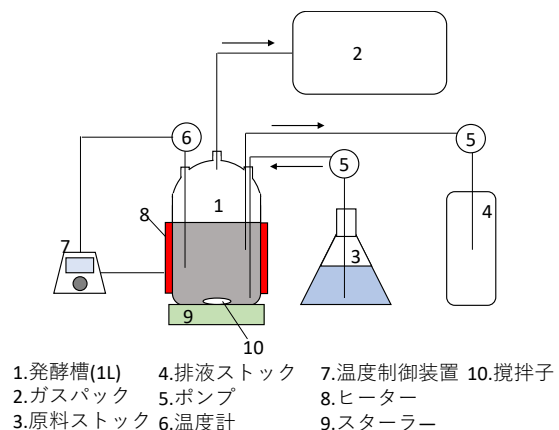


図 1 メタン発酵実験装置の概要図

図 2 に滞留日数(HRT)、ガス濃度およびガス発生効率の経時変化を示す。メタンガス濃度は、実験開始後 70 日後に約 70%に達した。最大のメタンガス発生効率は、510 ml/g-TOC/d を示した。(370 日目)。Nges らは、下水汚泥のメタン発酵では、中温および高温メタン発酵のメタンガス発生効率は、0.314~0.348 Nm³/kgVS/d と報告している¹⁾。これは TOC 基準で、526~583 ml/g-TOC/d であり、今回の結果と同等だった。

2. 前処理方法の検討

オゾン処理および熱アルカリ処理した有機性汚泥を原料とし、メタン発酵試験をおこなった。オゾン処理装置は、循環ラインに設置した静止型混合器でオゾンを高効率に溶解させることができる(オゾン供給能力 10g/h, 反応タンク容積 300L, 循環ポンプ吐出圧 0.2~0.25MPa)。各原料の処理条件および SS 分解率を表 1 に示す。これらの原料を用いて、メタン発酵実験をおこなった。

滞留日数(HRT)30 日のメタンガス発生効率と SS 分解率の関係を図 3 に示した。未処理の余剰汚泥(SS 分解率 0%)は、328 ml/g-TOC/d のメタンガス発生効率だった。(図 2 の経過日数 90 日目のメタンガス発生効率)。一方、オゾン処理した余剰汚泥では、SS 分解率が上がっても、メタンガス発生がほとんど認められなかった。これはオゾン処理により生成される阻害物質の影響であると考えられるが、そのメカニズムおよび対応策については今後の課題である。熱アルカリ処理(NaOH で調整)は、中和による薬剤コストを削減するために原料の中和をしなかった。しかし、発酵槽の pH が 8.2~8.4 と正常値(6.5~8.2)をわずかに逸脱していた。現在、中和した原料を投入し、その効果を検証している。余剰汚泥をメタン発酵する際、SS を分解するだけで無く、

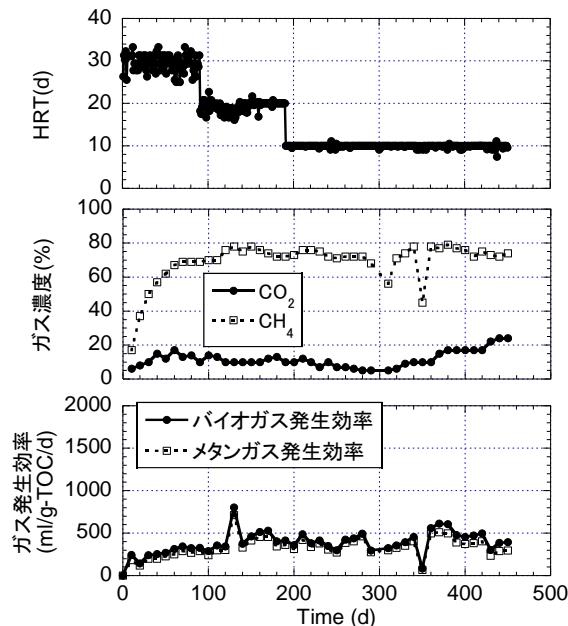


図 2 Run SL-1 の HRT、ガス濃度およびガス発生効率の経時変化

表 1 各原料の処理条件および SS 分解率

処理方法	処理条件	SS分解率
オゾン処理	オゾン供給量 31 g/kg-SS	6.7%
オゾン処理	オゾン供給量 367 g/kg-SS	47.1%
熱アルカリ処理	60°C、pH11以上 30分間	47.3%

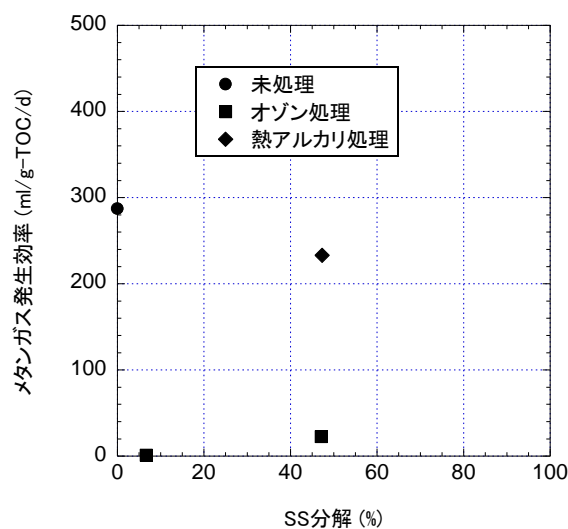


図 3 SS 分解率とメタンガス発生効率の関係
(滞留日数は 30 日)

メタン発酵に影響を及ぼす要因を除く必要があった。

3. 微生物叢の解析

未処理汚泥のメタン発酵過程（SL1）で採取したサンプル中に含まれる微生物群の相対存在度を積み上げ棒グラフで図4に示す。相対存在度がすべてのサンプルにおいて2%以下のものはその他としてまとめた。未処理汚泥のメタン発酵過程においては、Anaerolinaceae、Bacteroidales、Cloacamonaceaeの3群のBacteriaが高い相対存在度で出現した。ここに詳細は示さないが、2017年から安定的に未処理汚泥をメタン発酵している藤枝市浄化センターで採取したサンプルからも、これらの3群の微生物が優先していた。この結果は、前処理しない汚泥のメタン発酵の初期段階、すなわち、酸生成過程で、上述の3群が重要な役割を担っているという考えを裏付けるものと思われた。McIlroyら（2017）は下水汚泥のメタン発酵過程でAnaerolinaceaeに属するBrevefilum fermentansが優勢になることを報告している²⁾。また、Brazら（2022）は下水汚泥のメタン発酵槽に、グリセロールを添加することによって有機物の過負荷ショックを加えたところ、ショック前に存在したBacteroidalesがFirmicutesに置き換わったことを確かめている。この結果は、Bacteroidalesがグリセロールよりも下水汚泥を好むことを示していると考えられた。さらに、微生物叢のネットワーク解析により、グリセロール分解に主要な役割を果たすVeillonellaceae科とCandidatus Cloacimonetesの強い関連が観察される³⁾と述べており、Candidatus Cloacimonetesが汚泥のメタン発酵に由来した可能性が考えられた。これらの研究報告は、Anaerolinaceae、Bacteroidales、Cloacamonaceaeの3群の微生物が汚泥のメタン発酵に関連することを示しているが、本研究ではこれまで報告がなかった3群が同時に優勢になることを実証することができた。

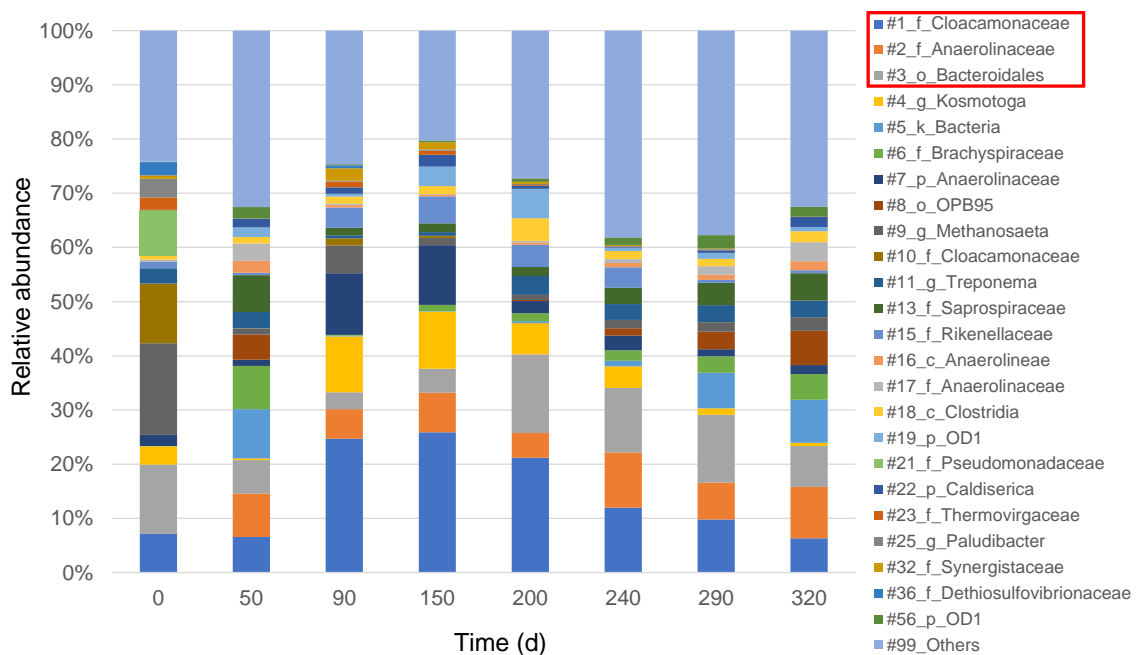


図4 未処理汚泥メタン発酵過程(SL1)の微生物叢変化、赤枠が優占種

4. エネルギー収支

今回の結果では、前処理による効果を確認できなかった。そこで、未処理の Run SL-1 の結果を参考に、エネルギー収支(図 5)を作成することで、余剰汚泥のメタン発酵の課題を見出した。発酵槽の容積は 40m³、HRT : 10 日、余剰汚泥の投入量は 4,000 L/d とした。投入した余剰汚泥由来の炭素が全てメタンガスに変換された場合、その熱量は 1139MJ に相当した。また、バイオガス中にメタンガスが 75%含まれることから、余剰汚泥の投入によりメタンガス(4,000 L/d×4.25 g-TOC/L×510 ml/g-TOC/d×10⁻⁶ ×0.75=8.7m³ : 熱量 311MJ に相当)が発生し、バイオガスボイラーへ供給された。メタン発酵槽を加温するための蒸気(720MJ)を発生するために、追加でプロパンガス(489MJ)が必要となる。メタン発酵槽とバイオガスボイラーの消費電力は、それぞれ 275MJ と 24MJ である。以上の結果、投入エネルギーに対する回収エネルギーの比率は、0.4 となり、エネルギー収支はマイナスになった。この原因は、投入する余剰汚泥のエネルギー量が少ないこと、およびメタン発酵のガス化率が低いことである。投入方法を検討した結果、1 次前処理で余剰汚泥を濃縮し、2 次前処理で固形物を可溶化することが、余剰汚泥のメタン発酵の効率化に繋がると考えられた。

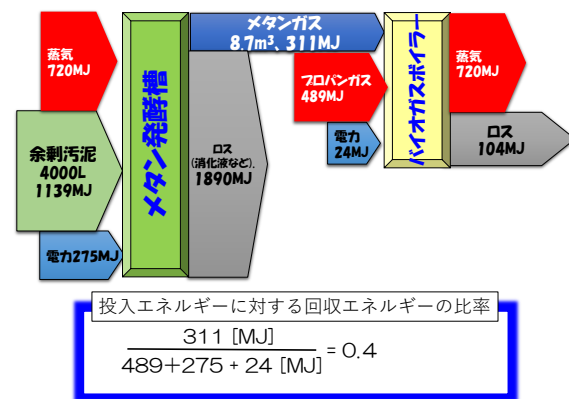


図 5 エネルギー収支

【まとめ】

- ・未処理の余剰汚泥でも 510 ml/g-TOC のメタンガス発生効率を示した。
- ・今回の検証では、前処理(オゾン処理・熱アルカリ処理)の効果を示すことができなかった。
- ・余剰汚泥のメタン発酵の酸生成に重要な役割を担っていると推察される、3 種類 (Anaerolinaceae、Bacteroidales、Cloacamonaceae)の微生物を特定した。
- ・余剰汚泥のメタン発酵には、1 次処理に濃縮工程、2 次処理に可溶化工程が必要だった。

【地域社会への波及効果】

余剰汚泥のメタン発酵は、下水処理場など大規模の事業所での導入事例はあるが、中小規模の食品会社へは普及していない。その理由は、大容量の発酵槽を必要とするからである。本事業の前処理方法を活用したシステムが確立し、余剰汚泥を小型メタン発酵システムで処理できれば、食品リサイクル率が向上し、エネルギーの地産地消が普及すると考えられる。

(引用文献)

- 1) IA Nges, J Liu, *Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered· sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions, Renewable Energy, Vol.35 (2010) 2200-2206*
- 2) SJ McIlroy, RH Kirkegaard, MS Dueholm, E Fernando, SM. Karst, M Albertsen, PH. Nielsen, *Culture-Independent Analyses Reveal Novel Anaerolineaceae as Abundant Primary Fermenters in Anaerobic Digesters Treating Waste Activated Sludge, Front. Microbiol., Vol.8 (2017), <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01134>*
- 3) GHR Braz, N Fernandez-Gonzalez, JM Lema, M Carballa, *Organic overloading affects the microbial interactions during anaerobic digestion in sewage sludge reactors, Chemosphere, Vol.222 (2019) 323-332*