

## 低炭素型水処理・バイオマス利用技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：リサイクルチーム

研究担当者：内田 勉、日高 平、浅井圭介、  
岡本誠一郎、新井小百合

### 【要旨】

下水処理場に設置している嫌気性消化槽を活用した、低炭素型水処理・バイオマス利用技術を開発するための基礎実験を行った。TS 5%程度の下水混合汚泥を対象とした嫌気性消化の連続式実験を行ったところ、中温条件下では安定した処理が可能でCODベースメタン転換率0.6程度が得られたのに対して、高温条件下ではやや不安定であった。回分式実験1では、混合汚泥を20%投入した場合でもメタン発酵がすすみ、おおむね20日後に基質からのメタン生成が終了した。回分式実験2では、おからおよび豆皮の混合消化の可能性が示された。消化前の濃縮効率向上に活用しうるみずみち棒（土木研究所開発技術）については、導入下水処理場11ヶ所を訪問しヒアリング調査を行い、課題などを調査した。目詰まりの問題や温度影響についての課題が明らかになった。

キーワード：メタン発酵、下水汚泥、混合消化、バイオマス、濃縮

### 1. はじめに

国土交通省下水道部とりまとめデータによれば、下水汚泥のエネルギー資源としての利活用状況を全国ベースで見ると、発生する下水汚泥中の有機分総量のうち、下水道バイオガス又は汚泥燃料としてエネルギー利用された割合は約1割であり<sup>1)</sup>、バイオソリッドの利活用の観点から、下水処理場を核とした下水汚泥と有機性廃棄物の嫌気性消化技術が注目されている。下水汚泥以外のバイオマスとして、食品廃棄物、剪定枝、農業系廃棄物など様々な有機性廃棄物（他バイオマス）との混合消化がますます広まる事が期待されている<sup>2,3,4)</sup>。ただし、他バイオマスを受け入れる場合、負荷が高まるので、既設処理場を活用する場合には受入可能な余裕があるかが重要である。負荷率の増加に対応する手段として、中温から高温条件への変更や、投入汚泥の高濃度化が考えられる<sup>5)</sup>。そこで本研究では、一般的な混合汚泥よりも高濃度であるTS 5%程度の混合汚泥を基質として、有効容積3 Lの反応器の連続運転を中温および高温条件下で行い、その比較を試みた。また既設処理場の消化汚泥を用いた回分式実験を行い、混合消化の観点からの処理特性の把握を試みた。

下水汚泥の効率的な嫌気性消化処理では、その前段階で濃縮処理が必要である。すなわち、下水処理場において濃縮プロセスの効率化を図り、改善して

いくことが汚泥処理系全体の改善につながる。重力濃縮は構造が簡単でランニングコストも他の濃縮方式に比べ安価であるため、古くから多く採用されてきた。しかし、汚泥性状の悪化等による濃縮性能の低下などのから濃縮槽の更新を機に機械濃縮に移行している処理場も多い。一方、人口減少による下水道使用量の伸び悩みや改築更新費用の増大など、厳しい財政運営を余儀なくされており、設備のライフサイクルコストを抑える技術が重要になっていくと考えられる。本技術は既存の重力濃縮槽を活かし、簡易な構造で重力濃縮プロセスの効率化を図るための装置として開発されたのが「みずみち棒」である。みずみち棒は、既に日本全国11処理場13槽で導入されており効果を発揮している。しかし、みずみち棒を導入した処理場で効果に差がでていいるのも事実である。そこで本年度は導入済みの処理場を訪問し、関係者へのヒアリング調査を行い、現場での課題などを調査した。

### 2. 研究方法

#### 2.1 嫌気性消化の連続式実験

有効容積3 Lの反応器を2系列準備し、一方を中温（35℃）、もう一方を高温（55℃）の条件下で連続運転を行った（それぞれ中温系、および高温系とする）。反応器の概要は図1に示すとおりである。

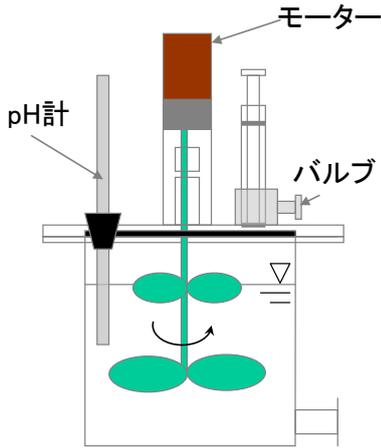


図1 連続式実験用の反応器

植種汚泥として、中温系は石川県犀川左岸浄化センターの、高温系は石川県大聖寺川浄化センターの消化槽から採取した消化汚泥を用いた。投入汚泥は、犀川左岸浄化センターの混合汚泥を用いた。混合汚泥の濃度は TS 3~4%程度であるので、実験室での遠心分離操作により、5%程度まで濃縮した。基質投入および消化液の引抜操作は1日1回の頻度にて手動で行った。中温系は、運転開始当初数日に1回の頻度で、1回あたり150 mLの基質投入を行った。処理が安定してきたと考えられた40日目以降は、平日のみ1日1回の頻度で150 mLの基質投入を行った。高温系についても運転開始当初は数日に1回の頻度で、1回あたり150 mLの基質投入を行った。しかしながら、メタン発生が停止し処理が安定しなかったことから、運転開始45日目以降基質投入を停止した。有機酸の蓄積は認められたものの、pHの制御などを行ってもメタン発酵活性が回復しなかったため、運転開始77日目には汚泥の半分(1.5 L)を新たに採取した大聖寺川浄化センターの消化槽の消化汚泥と入れ替えた。これ以降の高温系の基質は大聖寺川浄化センターの混合汚泥を5%に濃縮したものとして、79および82日目に50 mL投入したところ、メタン生成活性が認められた。そこで、84日目以降は、平日のみ1日1回の頻度で100 mLの基質投入を行った。その際には、200 mLの消化汚泥を引き抜き遠心分離し、上澄み液100 mLを除いて投入分の基質100 mLと混合してから反応器に投入することで、極力汚泥を流出させないようにした。

pH、TS、VS、COD<sub>Cr</sub>、アンモニア、水溶性揮発性脂肪酸(VFAs)、ならびに発生ガス量および組成を、下水試験方法に従って行った。なお、COD<sub>Cr</sub>の

分析は HACH 社の吸光光度計 DR2400 および COD 試薬 (HR) を用いた。発生ガスはガスクロマトグラフ (GC-2014ATF、SHIMADZU) を、アンモニアは自動比色分析装置 (TRAACS2000、BRAN LUEBBE 社) を、VFAs はイオンクロマトグラフ (IC 20、DIONEX 社) を用いた。

## 2. 2 嫌気性消化の回分式実験

回分式実験1として、消化汚泥および投入基質の混合比の影響を確認するために、犀川左岸浄化センターの消化汚泥および混合汚泥を用いて、混合汚泥の体積比を0、5、10および20%とした4系列について、35℃にて回分式実験を行った。回分式実験2として、大聖寺川浄化センターの消化汚泥および混合汚泥、ならびに他バイオマスの例として食品廃棄物(おからおよび豆皮)を用いて、55℃にて回分式実験を行った。ここでは、消化汚泥のみのブランク系、消化汚泥(体積比90%)および混合汚泥(体積比10%)の下水汚泥系、下水汚泥系に食品廃棄物をさらに5 gVS/L添加した系を設定した。

いずれの混合汚泥についても、濃縮操作は行っていない。これらの実験では、250 mLもしくは500 mLのガラス瓶および攪拌機を組み合わせた反応器を用いた。発生ガスはアルカリ剤を通過させることで二酸化炭素を除去し、経時的にメタンガスとしての発生量を測定した。その他の項目の分析方法は、連続式実験と同様である。

## 2. 3 みずみち棒の調査

北海道の小樽市、苫小牧市および余市町、四国の今治市、ならびに九州の有田町および熊本市の処理場を訪問し、関係者へのヒアリング調査を行い、現場での課題などを調査した。

## 3. 研究結果

### 3. 1 嫌気性消化の連続式実験に関する実験結果

連続式実験における、TSおよびVSの経時変化を図2に、アンモニア性窒素濃度の経時変化を図3に示す。中温系では、投入TSおよびVSの実測値が平均でそれぞれ5.1および4.3%であり、消化汚泥ではそれぞれ平均2.4および1.7%程度を安定して維持していた。既設の消化槽での平均的なVSベースでの消化率は60%程度であり、同程度の消化率が得られている。アンモニア性窒素濃度はおおむね1,000 mgN/L以下であり、メタン発酵への阻害影響はなか

った。VFAs として、コハク酸、乳酸、ギ酸、プロピオン酸、イソ酪酸、酪酸、イソ吉草酸、および吉草酸はほとんど検出されず、酢酸は 7~14 mg/L であり、VFAs の蓄積は特に観察されなかった。一方高温系では、運転開始 55 日目（前回の基質投入から 10 日経過）に、酢酸が 4,000 mg/L 程度、プロピオン酸が 800 mg/L 程度、酪酸が 500 mg/L 程度、およびイソ吉草酸が 400 mg/L 程度蓄積した。同時期に、アンモニア性窒素濃度は 1,400 mgN/L であり、pH は 7~8 程度を維持していたので、酸発酵活性は問題なく、メタン発酵活性が悪化していたことによると判断した。運転開始 77 日目に消化汚泥を投入して以降は、メタン生成が観察された。

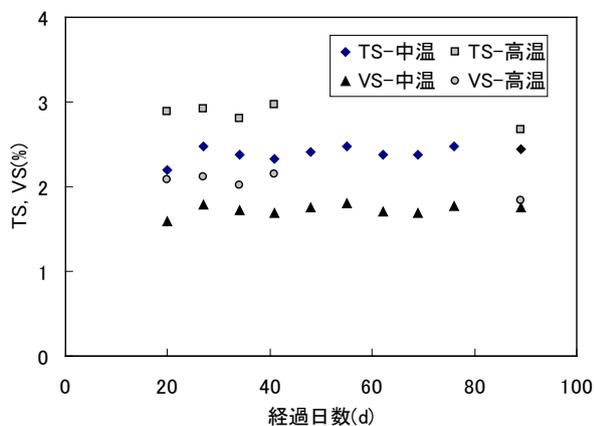


図 2 連続式実験における TS および VS の経時変化

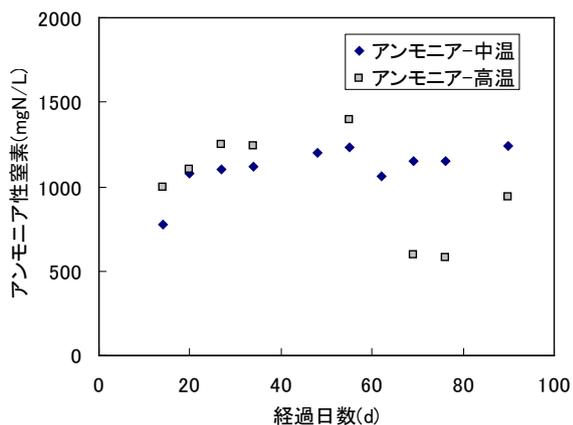


図 3 連続式実験におけるアンモニア性窒素の経時変化

中温系での累積投入基質量 (gCOD) と累積生成メタン量 (gCOD) の関係を図 4 に示す。運転開始

22 日目~96 日目の結果をまとめたものであり、全期間を通じて COD ベースで 60% 程度の安定したメタン転換が示されている。混合汚泥および消化汚泥の COD/VS 比はいずれも 1.6 程度であったことから、既設消化槽と同程度のメタン転換率が得られていたことが示された。本研究での負荷率 1.8 kgTS/ (m<sup>3</sup>・d) 程度で、アンモニアや VFAs の蓄積は特に見られなかったことから、負荷率のさらなる向上は可能であると考えられる。

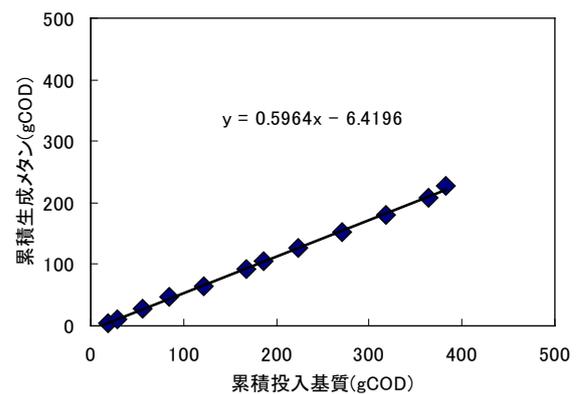


図 4 連続実験 (中温系) における累積投入基質量と累積生成メタン量の関係

### 3. 2 嫌気性消化の回分式実験に関する実験結果

回分式実験 1 で用いた消化汚泥および混合汚泥の TCOD<sub>Cr</sub> は、それぞれ 15 および 48 g/L であった。回分式実験 1 の結果を図 5 に示す。ここでは、ブランクによるメタン生成量を差し引き、反応器体積あたりに換算して示している。最初の数日間のメタン生成速度は投入基質濃度によらずほぼ同程度であった。5%、10% および 20% の系でそれぞれ 5 日、10 日および 20 日程度経過後に基質からのメタン発生は完了していた。混合汚泥のメタン転換率は COD ベースで 70% となり、最終的なメタン生成量はおおむね投入量に比例していた。水田ら<sup>9)</sup>は、混合汚泥の割合を 20% とした回分式実験で、生汚泥および余剰汚泥の寄与を一次相関式で表しており、この程度の割合であれば、回分式実験でメタン転換率の評価が行えるものと考えられる。

回分式実験 2 で用いたおからおよび豆皮の VS はそれぞれ 0.24 および 0.37 gVS/g-wet であった。混合汚泥、おからおよび豆皮のメタン転換率は COD ベースでそれぞれ 60%、45% および 50% 程度であり、おからおよび豆皮のメタン転換率は、一般的な生ご

み<sup>7)</sup>に比べてやや低かった。またメタンガス発生がほぼ停止するまでにかかった日数は、混合汚泥が10日程度、おからおよび豆皮が16日程度であった。馴致期間を確保することでメタン転換率が向上する可能性もあり、今後下水処理場でこうした食品廃棄物を受け入れることが、メタン発酵の観点では可能であると考えられた。

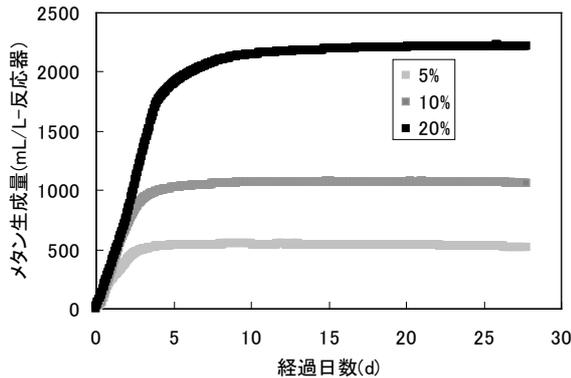


図5 回分式実験1でのメタン生成の経時変化

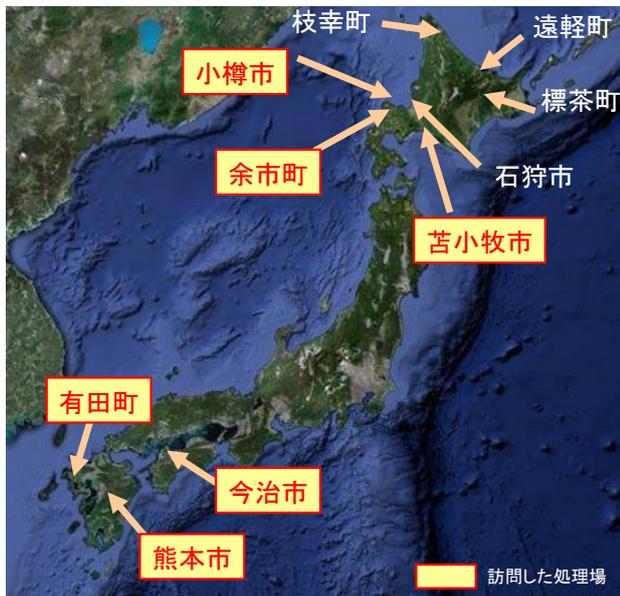


図6 みずみち棒の導入状況および訪問した処理場

### 3. 3 みずみち棒の調査結果

みずみち棒の導入状況および訪問した処理場を図6に示す。導入されている地域は北海道と四国、九州などの温暖な地域のみであり、本州での導入はまだない。

北海道で導入されている処理場へは、平成23年7月7日～8日にかけて訪問した。北海道地方は気温

が低いこともあり、スカム発生などの心配もなく、みずみち棒による効果を確認することができた。しかし苦小牧市では、みずみち棒が目詰まりを起こすという問題があった。みずみち棒の目詰まりは濃縮槽の中心に近い最も濃度が高くなる部分で発生しており、目詰まりにより引抜き濃度は低下し、掃除し除去することでまた引抜き濃度は改善するとのことであった。目詰まりを起こすものは髪の毛など繊維状のしさが原因となっているようである。みずみち棒がない場合に比べ、みずみち棒がある場合は重力濃縮槽内の障害物が増えることにもなるので、導入する際はしさを除去を確実に行う必要があると考えられる。しが多い処理場では、重力濃縮槽の前段にしさ破砕機やスクリーンなどを設けることも有効であると考えられる。

四国および九州の処理場へは、平成23年8月30日～9日1日にかけて訪問した。今治市および有田町においては、みずみち棒導入後、引抜き汚泥の濃度は向上したという結果が得られているものの、熊本市では引抜き汚泥の濃度に向上は見られていなかった。温暖な地域では、引抜き汚泥の濃度を高くするために、界面高さを上げると、滞留時間が長くなり、引抜く前に汚泥が腐敗し、スカムが発生する傾向が見られた。腐敗によるガスが汚泥に付着し汚泥を浮上させ、スカムが発生するばかりでなく、引抜き濃度も低下するといった現象が発生するので、汚泥の腐敗時間を考慮した運転が必要である。引抜き汚泥の濃度は向上しないものの、みずみち棒導入によりスカムの発生が抑えられているということだったので、汚泥に付着したガスをみずみち棒により再び分離させるといった効果がある可能性も考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、下水処理場に設置している嫌気性消化槽を活用した、低炭素型水処理・バイオマス利用技術を開発するための基礎実験を行った。また、みずみち棒については、導入下水処理場を訪問し、ヒアリング調査を行い、現場での課題などを調査した。得られた成果は以下の通りである。

1) TS 5%程度の下水混合汚泥を対象とした嫌気性消化の連続式実験を行ったところ、中温条件下では安定した処理が可能であり、全期間を通じてCODベースで60%程度のメタン転換が示されたのに対して、高温条件下での運転はやや不安定であった。

2) 回分式実験 1 では、混合汚泥を消化汚泥に対して体積比 20%投入した場合でもメタン発酵がすすみ、おおむね 20 日後に基質からのメタン生成が終了した。回分式実験 2 では、おからおよび豆皮の混合消化の可能性が示された。

3) 北海道の小樽市、苫小牧市および余市町、四国の今治市、ならびに九州の有田町および熊本市の処理場を訪問し、関係者へのヒアリング調査を行い、現場での課題などを調査し、北海道では目詰まりの可能性や、温暖な地域では腐敗ガスによる影響などの課題が明らかになった。

今後、嫌気性消化については基礎的実験を継続することでその安定性を評価し、みずみち棒については示された課題に対する基礎実験を行う必要がある。

## 謝辞

嫌気性消化の実験では、石川県の多大なる協力を得ている。みずみち棒の調査では、導入自治体の多大なる協力を得ている。ここに記して、関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本下水道協会：日本の下水道、平成 23 年度下水道白書, 2012.
- 2) 菅野一敏、村上清志、平川一省：既設下水処理場への複合バイオマスの受入れと混合消化の取組, 第 48 回下水道研究発表会講演集, 208-210, 2011.
- 3) 堀尾重人、桜井健介、岡本誠一郎：下水処理場を核としたバイオマス利活用による GHG 削減効果, 第 48 回下水道研究発表会講演集, 193-195, 2011.
- 4) 下水道新技術推進機構：下水処理場へのバイオマス(生ごみ等) 受入マニュアル, 2011.
- 5) 山口律子、石橋重則、常松順子、松尾和正：福岡市における高温高濃度消化の検証と維持管理に関する一考察, 第 47 回下水道研究発表会貢献集, 912-914, 2010.
- 6) 水田健太郎、山本博英、島田正夫：嫌気性消化における投入基質性状・メタン発酵特性, 第 48 回下水道研究発表会講演集, 199-201, 2011.
- 7) 洪鋒、津野洋、日高平：1 日 1 回給餌操作での生ごみの高温メタン発酵特性に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 15(5), 381~388, 2004.

## DEVELOPMENT OF LOW-CARBON WASTEWATER TREATMENT AND BIOMASS UTILIZATION PROCESSES

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Materials and  
Resources Research Group  
(Recycling)

Author : Tsutomu UCHIDA, Taira  
HIDAKA, Keisuke ASAI,  
Seiichiro OKAMOTO, Sayuri  
ARAI

**Abstract:** Basic laboratory experiments were performed to develop low-carbon wastewater treatment and biomass utilization processes by using anaerobic digesters installed in wastewater treatment plants. Continuous anaerobic digestion experiments with mixed sludge of TS 5% showed that mesophilic operation was stable with the methane conversion ratio of 0.6 by COD base, although thermophilic operation was not so stable. In batch experiments, 20 days were required for methane production when the mixing ratio of the mixed sludge was 20%, and the applicability of bean curd refuse and bean hull to co-digestion was demonstrated. Current status of Water Path Forming Poles (WPFs), improved gravity thickening technique developed by PWRI, were also surveyed at 11 wastewater treatment plants where WPFs are installed. Clogging problems and effect of temperatures were pointed out.

**Key words:** methane fermentation, sewage sludge, co-digestion, biomass, thickening