

6.1 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、王 峰

【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。拠点となる下水処理場へ汚泥を効率的に輸送することも意図して、高濃度の下水汚泥のメタン発酵技術を開発するために、TS 7.5%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。中温条件下では安定した処理が可能であり、一般的な濃度の場合と同程度のCODベースで60%程度のメタン転換が、高濃度化しても示された。高温条件下での運転はやや不安定であった。回分式実験によりその原因を調査し、アンモニアなどの阻害物質蓄積による可能性が考えられた。また地域の廃棄物系バイオマスについて、下水処理場での混合消化に関する基礎的知見を収集するために、回分式実験により、メタン転換率を調査した。いずれも下水汚泥の転換率（60%）とおおむね同等であり、下水処理場で受け入れることで、メタンガス回収量増加に寄与する可能性が示された。

キーワード：メタン発酵、高濃度下水汚泥、混合消化、バイオマス、高温発酵

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活用状況を全国ベースでみると、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割であることから¹⁾、下水汚泥のエネルギー利用を進めることが必要であり、そのための嫌気性消化技術が注目されている。さらに、下水処理場を拠点とした地域の有機性廃棄物を有効利用するため、食品廃棄物、剪定枝、農業系廃棄物など様々なバイオマスとの混合消化がますます広まることが期待されている^{2,3,4)}。

しかし、農業系廃棄物など個別には嫌気性消化特性についての知見が集積している^{5,6)}ものの、下水汚泥との混合消化の観点では、これまでほとんど実現していなかったこともあり、基礎的知見が十分には蓄積していない。また、廃棄物系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⁷⁾。例えば地方都市などにおいて、拠点となる下水処理場に汚泥を集約して嫌気性消化を行うことで効率化が図れ、その際には汚泥の含水率を低下させ

濃度を高め、体積を減らすことで輸送を効率的に行うのが望ましい。汚泥処理の集約化を意図した高濃度下水汚泥のメタン発酵については、平成3年度～平成8年度に建設省土木研究所汚泥研究室で実験的検討がなされた。中温（30℃恒温室）では固形物濃度（TS）10%程度まで、高濃度化がガス発生に及ぼす影響が少ないことが示されている⁸⁾。高温（55℃）ではTS10%程度でアンモニア性窒素濃度が4,000 mgN/L程度まで増加し、ガス発生量は通常の数%でしかなかったことが示されている⁹⁾。しかしながら、これらの研究は主として回分式実験や数ヶ月程度の連続式実験に限られており、長期的な連続実験による評価はなされていない。実用化には至っておらず、現場で採用されている高濃度消化はおおむねTS5%程度までである¹⁰⁾。

そこで本研究では、現状で採用されている消化における一般的な下水汚泥より高濃度であるTS7.5%程度でのメタン発酵特性を、長期的に調査した。TS5%の場合に比して、体積で2/3程度に削減される。そして、廃棄物系バイオマスの下水汚泥との混合消化におけるメタン転換率などの基礎的知見を収集するために、回分式実験を実施した。

表 1 連続式実験の運転条件

反応器番号	温度	基質	Run 1	Run 2				←投入量
				50 mL/d	75 mL/d	100 mL/d	125 mL/d	
反応器1	35℃	処理場Aの混合汚泥	～150 mL/d	50 mL/d	75 mL/d	100 mL/d	125 mL/d	←投入量
			28～d	84 d	56 d	42 d	34 d	←HRT
反応器2	55℃	処理場Aの混合汚泥	～100 mL/d	50 mL/d				←投入量
			42～d	84 d				←HRT
反応器3	55℃	処理場Bの混合汚泥	—	50 mL/d				←投入量
			—	84 d				←HRT
反応器4	55℃	処理場Aの混合汚泥 +ご飯	—	混合汚泥 50 mL/d+ご飯 5g-wet/d				←投入量
			—	76 d				←HRT
経過日数 (日)			0～112	113～230	231～257	258～313	314～342	
混合汚泥濃度設定値 (TS)			5%	7.5%				

注1. 基質投入は、平日のみ

注2. 反応器3および反応器4は194日目に運転開始

2. 高濃度濃縮下水汚泥の嫌気性消化に関する研究

2.1 実験方法

2.1.1 連続式実験

処理場 A および処理場 B の試料を用いて、有効容積 3 L の反応器を 4 系列運転した(表 1)。反応器 1 は中温 (35℃) で、それ以外は高温 (55℃) で運転した。反応器 1、反応器 2 および反応器 3 は、混合汚泥のみを投入した系で、投入基質の採取処理場が異なる。反応器 4 では混合汚泥およびご飯を混合消化した。ご飯は、易分解性バイオマスの例として実験上用いたものである。

反応器 1 および反応器 2 の Run 1 の 96 日目までの状況は昨年度に報告しており、それに引き続いて運転した。反応器 3 および反応器 4 は、194 日目に新たに運転を開始した。その際の植種汚泥には、処理場 A の消化槽の高温消化汚泥を濃縮して用いた。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(Run 1)もしくは 7.5% 程度(Run 2)まで濃縮した。一部の期間は汚泥性状が異なり 7.5% 程度まで濃縮できなかったため、その間は投入汚泥 TS 量が同じになるように投入容積を調整して対応した。基質投入および消化液の引抜操作は平日のみ 1 日 1 回の頻度にて手動で行った。反応器 3 および反応器 4 の立ち上げ期間(30 日間)は、引き抜き消化汚泥を遠心分離し、上澄み液を除いて投入分の基質と混合してから反応器に返送することで、極力汚泥を流出させないようにした。

2.1.2 回分式実験

高温条件での不安定原因を探るために、Run 2 の期間中に高温条件下で反応器 2 の消化汚泥を用いて

下記 3 種類の回分式実験を行った。あわせて中温条件下で反応器 1 の消化汚泥を用いて回分 1 および回分 2 の回分式実験を行った。

- ・回分 1(コントロール系): 反応器の引き抜き消化汚泥のみ
- ・回分 2(希釈系): 反応器の引き抜き消化汚泥を、沸騰後冷ました水道水で半分に希釈
- ・回分 3(アンモニアストリッピング系): 反応器の引き抜き消化汚泥を遠心分離し(3,000 g、15 分)、上澄み液に KOH を添加して pH10 とし、窒素ガスで 10 分間パージし、HCl で pH を戻し、分離汚泥と混合それぞれ、0.5 L の反応器に 400 mL 投入し、基質として酢酸を 1 mL を添加し、55℃の条件下で、メタンガス生成量の経時変化を測定した。

2.1.3 分析方法

投入基質や消化汚泥の分析は、基本的に下水試験方法に従って行った。なお、COD_{Cr} 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、アンモニア性窒素は自動比色分析装置(TRAACS2000、BRAN LUEBBE 社)を用いた。見かけの除去率は、投入濃度と消化液濃度の差を投入濃度で除して算出した。Run 2 では HRT が長いので、完全混合槽を仮定して理論的に計算される投入基質の反応器内での濃度を用いて算出した。

2.2 結果および考察

2.2.1 連続式実験

pH の経時変化を図 1 に示す。反応器 1 では徐々に増加し 7.8 程度で安定した。反応器 2 では 150 日

目以降徐々に低下したので、引き抜き汚泥を濃縮して返送したところ、230日目頃から7.0~7.5程度まで回復した。反応器3では運転開始時から徐々に低下したので、引き抜き汚泥の濃縮返送操作を267日目から続けて行った。しかしpHは6以下まで低下したので、292日目以降KOHを添加してpHを7程度まで回復させた。その後も週1回程度はKOHによるpH調整を行った。反応器4では運転開始当初低下傾向が見られたものの、7.4程度まで回復した。

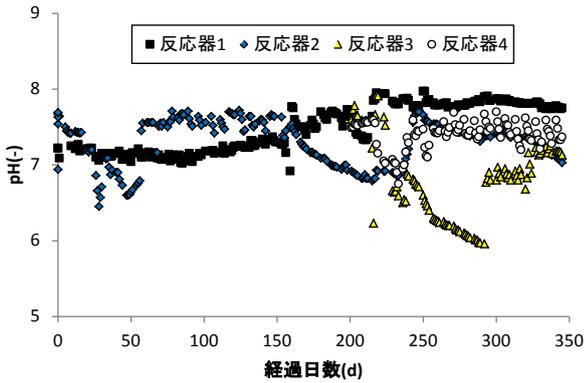


図1 連続実験におけるpHの経時変化

TSおよびVSの経時変化を図2に示す。投入TSを7.5%に設定した後、消化液のTS濃度は徐々に増加し、反応器1および反応器4では3.5%程度となり、反応器2では5%程度まで増加した。投入汚泥の異なる反応器3でも、同様の条件で運転した反応器2と同様に5%程度まで増加した。VS濃度も同様の傾向を示し、TS濃度の8割程度で推移した。見かけのVS除去率(図3)は、反応器1で60%程度であったのに対して、反応器2および反応器3では30~45%程度であった。反応器4では、ご飯が完全に分解すると仮定した、下水汚泥分のみの除去率が50%程度であった。見かけのCOD_{Cr}除去率について、反応器1では、全期間を通じておおむね60%程度を安定して維持した。これは、投入TS濃度2~4%で運転している一般的な中温消化槽と同程度の除去効率であり¹¹⁾、投入TS濃度を7.5%程度まで増加させても、安定した運転の可能であることが示された。

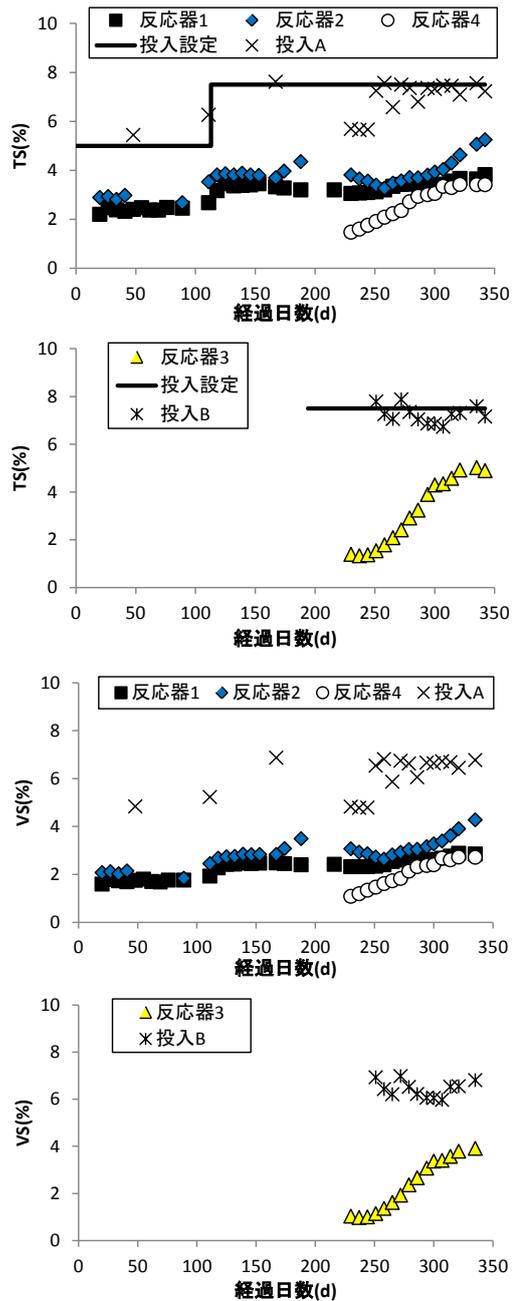


図2 連続実験におけるTSおよびVSの経時変化

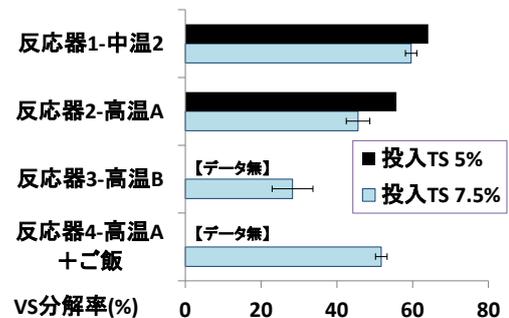


図3 連続式実験におけるみかけのVS除去率 (ご飯は完全に分解すると仮定)

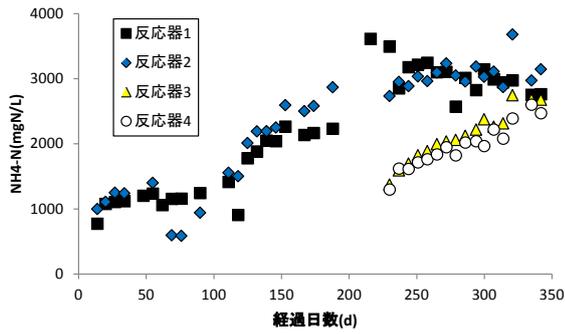


図4 連続実験におけるアンモニア性窒素濃度の経時変化

アンモニア性窒素濃度の経時変化を図4に示す。投入TS濃度が5%の時は、反応器1および反応器2いずれも1,000 mgN/L程度で推移し、メタン発酵への阻害影響は考えられない濃度であった。投入TS濃度を7.5%に増加させた後はすべての系列で徐々に増加し、いずれの系列も3,000 mgN/L程度に達した。反応器1では処理が安定していたことから中温条件では問題なかった。高温条件である反応器2および反応器3では処理が不安定であったことから、アンモニア性窒素濃度がメタン発酵を阻害していた可能

性が考えられる⁹⁾。およそ1年間の連続運転を経ても、馴致されることはなかった。

粘度について、反応器1では3 dPa・s程度であった。高温系では運転期間中徐々に増加する傾向が見られ、Run 2の最後の時期に、反応器2では3 dPa・s程度、反応器3では2.5 dPa・s程度、反応器4では1.5 dPa・s程度に達した。全体として、高温で運転した系列でやや低い傾向が見られた。

中温系では、投入TS濃度7.5%での負荷率が2.2 kgTS/(m³・d)程度で、一般的な下水処理場と同程度の安定した運転が可能であった。アンモニアやVFAs(図5)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が可能であると考えられる。高温系は不安定であったものの、粘度が低めであることは高濃度化で懸念される攪拌の点で有利である。易分解性有機性廃棄物を混合消化することで、反応に関わる微生物群が活性化し安定する可能性も考えられた。

2.2.2 回分式実験

回分式実験におけるメタン生成量の結果を図6に示す。希釈した実験では、比較しやすいように希釈倍率をかけたメタン生成量を示している。高温条件下での回分1、回分2および回分3の実験開始時に

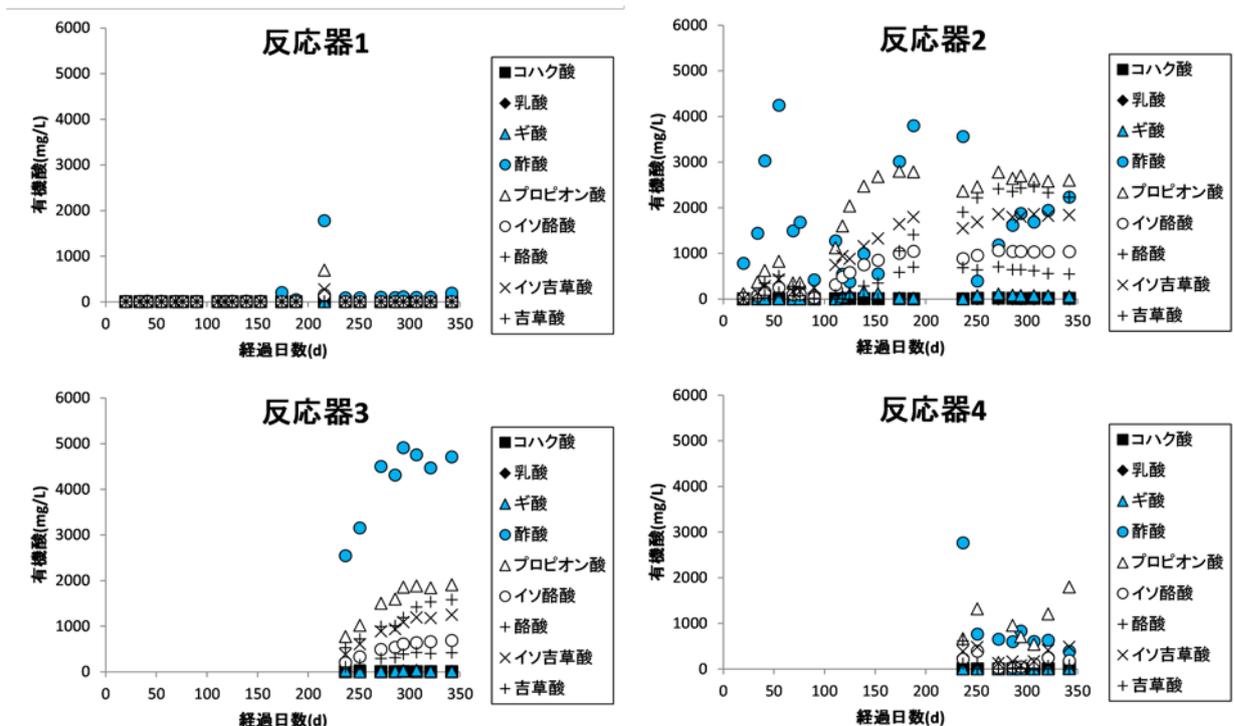


図5 連続実験における有機酸濃度の経時変化

おけるアンモニア性窒素濃度は、それぞれ 3,320、1,670 および 2,460 mgN/L であった。回分3では実験開始直後のメタン生成量が多かった。回分2では、実験開始直後からメタン生成効率が回分1および回分3より高く、80 h以降にはメタン生成量がさらに向上し、回分1および回分3を大きく上回った。これらの結果より、反応器2でのメタン生成活性が弱かったのは、アンモニアもしくは他の物質の蓄積によりメタン発酵が阻害されていた可能性が考えられた。

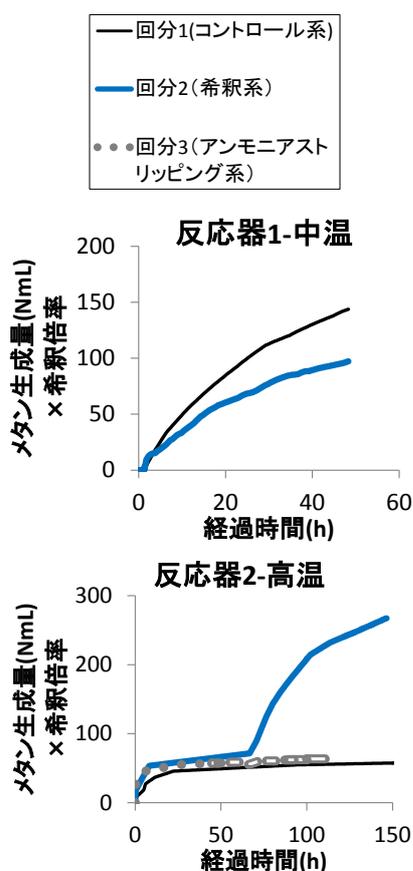


図6 回分式実験におけるメタン生成量の経時変化

3. 地域の廃棄物系バイオマスの嫌気性消化に関する研究

3.1 実験方法

嫌気性反応器(容量 0.5 L)に消化汚泥および基質を投入し、高温条件下では2週間程度回分式にて嫌気性消化実験を行った。ここでは、処理場Aの消化汚泥を植種汚泥として用いた。廃棄物系バイオマスとしては、処理場Aの地域で可能性の考えられた食品廃棄物として、おから、豆皮、および和菓子に対

象とした。

実験の前後で汚泥や基質の性状を分析すると共に、実験中メタンガス生成量の経時変化を計測した。発生したバイオガスは、強アルカリ溶液を通過させることで二酸化炭素を除去し、メタンガスの生成量として計測した。

3.2 結果および考察

回分式実験による廃棄物系バイオマスのメタン転換率測定結果を図7に示す。処理場Aの混合汚泥の転換率は60%程度であり、他都市での値と同程度¹¹⁾であることから、実験精度も問題ないと考えられる。食品廃棄物については、50~60%程度であった。一般的な生ごみ¹²⁾の80~90%と比しては低いものの、いずれも下水汚泥の転換率とおおむね同等以上であり、下水処理場で受け入れることで、メタンガス回収量増加に寄与することが期待できる。

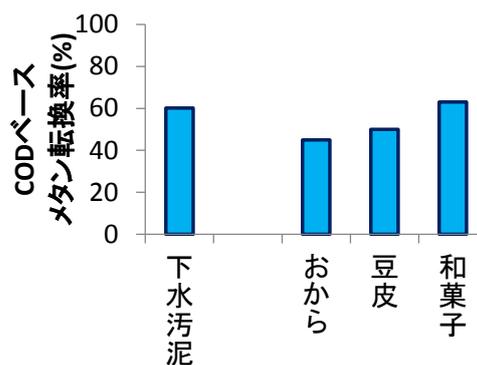


図7 回分式実験による廃棄物系バイオマスのメタン転換率測定結果

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。得られた成果は以下の通りである。

1) TS 7.5%程度 of 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、一般的な濃度の場合と同程度のCODベースで60%程度のメタン転換が、高濃度化しても示された。
- ・高温条件下での運転はやや不安定であった。回分式実験によりその原因を調査し、アンモニアなどの阻害物質蓄積による可能性が考えられた。

2) 地域の廃棄物系バイオマスについて、回分式実験

により、メタン転換率を調査した。いずれも下水汚泥の転換率（60%）とおおむね同等以上であり、下水処理場で受け入れることで、メタンガス回収量増加に寄与することが期待できる。

今後も引き続き基礎的実験を継続することで、より高負荷で安定した処理をめざし、バイオマス受入時の影響を評価する予定である。

謝辞

嫌気性消化の実験は、主として石川県他との共同研究として実施した。一部の実験試料は、ジャパンウェルネス（株）から提供頂いた。ここに記して、関係各位に謝意を表する。

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) 古市徹：バイオガスの技術とシステム、オーム社, 2006.
- 6) 中村真人, 柚山義人, 山岡賢, 折立文子, 清水夏樹, 阿部邦夫, 相原秀基, 藤川智紀：メタン発酵プラントのトラブル記録と長期運転データの解析—山田バイオマスプラントを事例として—, 農村工学研究所技報, 210, 11-36, 2010.
- 7) 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.
- 8) 建設省土木研究所：平成 4 年度下水道関係調査研究年次報告書集, 1993.
- 9) 建設省土木研究所：平成 8 年度下水道関係調査研究年次報告書集, 1997.
- 10) 日本下水道協会：下水道統計（平成 22 年度版）（第 67 号）, 2012.
- 11) 日高 平, 内田 勉：下水汚泥の性状および消化特性に関する処理場毎の比較調査：土木学会論文集 G（環境）, Vol. 68, No.7, III_325-III_332, 2012.
- 12) 洪 鋒, 津野 洋, 日高 平, 千 智勲：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, 廃棄物学会論文誌別冊, Vol.15, No.5, 381-388, 2004.

DEVELOPMENT OF LOW-CARBON WASTEWATER TREATMENT AND BIOMASS UTILIZATION PROCESSES

Budgeted : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Materials and Resources Research Group (Recycling)

Author : Tsutomu UCHIDA, Taira HIDAKA, Feng WANG

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 sewage sludge of TS 7.5% were performed to develop methane fermentation of high-solid sludge for easy transportation with less volume. The mesophilic operation was stable with the COD base methane conversion ratio of 0.6. The thermophilic operation was not so stable, and the batch experiments showed that this may have been caused by the accumulation of ammonia. The methane conversion performance of waste biomass, including food waste, was analyzed by batch experiments. The methane conversion ratios of most types of waste biomass were around 0.6, which showed that waste biomass can be accepted at sewage treatment plants to improve methane recovery.

Key words: methane fermentation, high-solid sewage sludge, co-digestion, waste biomass, thermophilic fermentation