

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：津森ジュン、日高 平、王 峰

【要旨】

低炭素型・循環型社会の構築に向け、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、固形物濃度（TS）10%程度まで高濃度化した下水混合汚泥を対象として嫌気性消化の連続式実験を行った。中温（35℃）条件下ではほとんどの期間で安定した処理が可能であり、一般的に現場で適用されている2～3%程度の場合と同程度の有機物（VS）除去率60%程度が、高濃度化しても2.7 kgVS/(m³・d)程度の負荷率で示された。高温条件下では、アンモニア性窒素濃度が2,000 mgN/Lを超過すると、メタン転換の阻害される傾向が示された。また下水2次処理水を用いて培養した藻類のメタン発酵特性を調査したところ、夏季培養の試料ではCODベースメタン転換率が0.56で、下水汚泥と同等であった。秋季培養の試料ではやや低下したものの、下水で培養した藻類からの下水処理場でのメタン回収の可能性が考えられた。

キーワード：メタン発酵、高濃度下水汚泥、廃棄物系バイオマス、微細藻類、アンモニア阻害

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、我が国で発生する下水汚泥中の有機分総量のうち、バイオガスや汚泥燃料としてエネルギー利用されている割合は2割未満であり、より積極的な活用が求められている¹⁾。我が国の下水処理場約2,000カ所のうち、嫌気性消化を行っている処理場数300カ所程度は、近年大きな変化がなく、特に小規模施設での採用例は少ない。

下水汚泥を含むバイオソリッドの利活用を検討するにあたっては、広域処理や共同処理など集約処理によることが効率的になる場合があることから、経済性や事業可能性を比較検討することが望ましい²⁾。小規模施設への展開を促進するためには、拠点となる処理場に、周辺の排水処理施設で発生する汚泥を含めて、地域の有機性廃棄物を集約することが考えられる。固定価格買取制度も始まり、消化ガス発電の導入が進みつつある¹⁾。バイオガス発生量を確保することで、エネルギー利用効率が向上し、維持管理費用の面でも有利となる。小規模下水処理場が点在し、下水汚泥を集約して嫌気性消化することを検討する場合、下水汚泥を高濃度化することで、処理場間の運搬効率を上げることが望ましい。

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³⁾。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⁴⁾。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。藤島ほか⁵⁾は、流動性を保つTS11%まで希釈した脱水汚泥を対象とした中温嫌気性消化が可能であることを報告しているものの、粘度については検討されていない。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⁶⁾。

これまでは想定されていなかった生ごみなどの受入が、近年石川県珠洲市などで実現されており、状況は変わりつつある。国土交通省の下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）でも、有機性廃棄物受入に関する実証データが集積しつつある⁷⁾⁸⁾。小規模施設では周辺の排水処理施設からの汚泥も集約処理の対象となり得る。より小規模向け水処理方式であるオキシデーションディッチ法（OD）からの脱水汚泥および有機性廃棄物の混合消化の研究も始まっており⁹⁾、小規模施設への普及が今後期待

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	Run 3a	Run 3b	
反応器1	35°C	処理場Aの混合汚泥	~150 mL/d	50~125 mL/d	94 mL/d	125 mL/d	←投入量
			28~d	84~34 d	45 d	34 d	←HRT
反応器2	55°C	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°C	処理場Bの混合汚泥	—	50 mL/d	—	—	←投入量
			—	84 d	—	—	←HRT
反応器4	55°C	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	113~425	426~599	600~832	
混合汚泥濃度設定値 (TS)			5%	7.5%	10%		

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

できる。

また近年下水を用いて藻類を培養し、エネルギー源として活用する研究も進められている。従来は油分含有率の高い藻類種を選択的に培養することで効率的なエネルギー生産が試みられてきたものの、下水を用いる場合は意図しない藻類種が優占する可能性もある。その場合でも、嫌気性消化を行えば藻類種によらずにメタンを回収できる可能性がある¹⁰⁾。下水処理場にて藻類を培養し嫌気性消化槽に投入できれば、さらなるエネルギー回収量増加につながる事が期待できる。

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 TS 10%程度でのメタン発酵特性を、長期的に調査した。TS 5%の場合に比して、体積で 1/2 程度に削減される。そして、下水で培養した藻類のメタン発酵特性を調査した。

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

石川県大聖寺川浄化センター(処理場 A)および石川県犀川左岸浄化センター(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 は中温で、それ以外は高温で運転した。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。Run 2 の 342 日目までの状況は昨年度の報告書にて報告しており、それに引き続いて運転した。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、5~10%程度まで濃縮した。一部の期間では汚泥性状が異なり設定濃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。

2.1.2 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。粘度は粘度計(VISCOTESTER VT-04、リオン社)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。高濃度で水理的滞留時間(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

反応器 1 における TS および VS の経時変化を図 1 に示す。投入 TS を 10%に設定した 426 日目以降、消化液の TS 濃度は徐々に増加し、750 日目頃以降 5%程度で安定した。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 2)は、反応器 1 で 60%程度であり、投入 TS 濃度および負荷率が最大である Run 3b を含めておおむね一定であった。対して、高温で運転した反応器 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50~60%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¹¹⁾であり、投入TS濃度を10%程度まで増加させても、2.7 kgVS/(m³・d)程度の負荷率で安定した運転が可能であった。

反応器1での有機酸濃度(図3)については、新しい装置に移動した直後でやや不安定であった216日目頃および670~720日目頃以外で低濃度であり、最も高濃度で検出された酢酸でもおおむね200 mg/L程度以下であった。有機酸が蓄積していないことから、処理の安定性が確認できた。

2.2.2 アンモニア性窒素の影響

反応器1でのアンモニア性窒素濃度(図4)は、投入TS濃度が5%の時は1,000 mgN/L程度で推移し、投入TS濃度7.5%の場合は3,000 mgN/L程度に、投入TS濃度10%の場合は3,500 mgN/L程度に達した。ただし、250日目以降および650日目以降では、減少する傾向も見られた。濃縮後の投入TS濃度の変化による影響に加えて、季節的な変動による影響も考えられる。中温で運転した反応器1では、アンモニアによる阻害影響が見られず、処理が安定していた。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た。なおpHは、いずれも7~8程度であった。

アンモニア性窒素濃度と見かけのCOD除去率の関係を図5に示す。ここでは、処理場Aの汚泥を用いた回分式実験での値を参考にあわせて示している。中温条件である反応器1では、アンモニア性窒素濃度4,000 mgN/L程度でもCOD除去率0.5~0.6をおおむね維持していた。対して高温条件である反応器2~4では、アンモニア性窒素濃度が2,000 mgN/Lを越えると、COD除去率の低下が見られた。

処理場Aの汚泥を単独で消化した反応器1および2の消化液のTS濃度とアンモニア性窒素濃度の関係を図6に示す。中温条件と高温条件で大きな差が無く、混合汚泥の消化に伴うアンモニア性窒素の放出傾向は同様であると考えられる。一般的に高温条件下ではアンモニア阻害を受けやすいといわれており、投入基質の高濃度化の際には注意を要する。

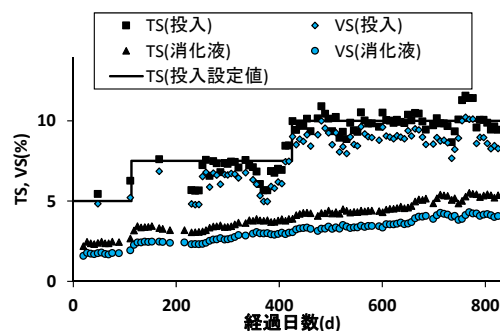


図1 反応器1におけるTSおよびVSの経時変化

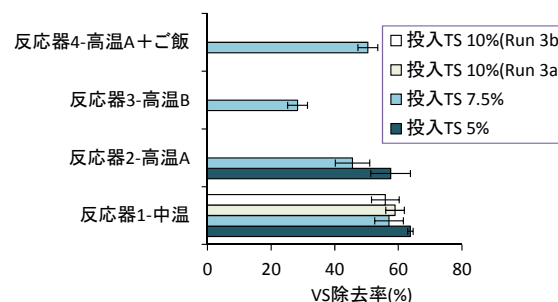


図2 連続実験におけるVS除去率

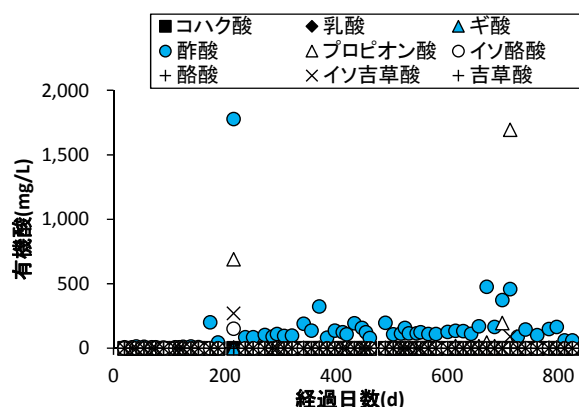


図3 反応器1における有機酸濃度

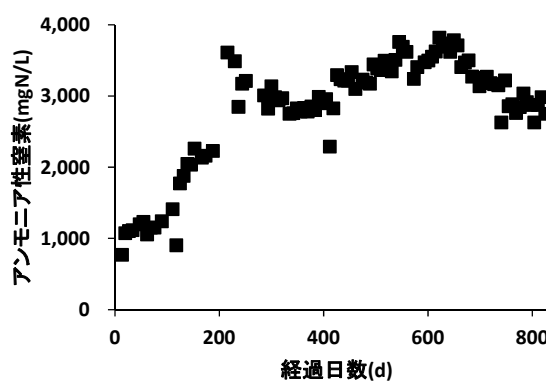


図4 反応器1におけるアンモニア性窒素濃度

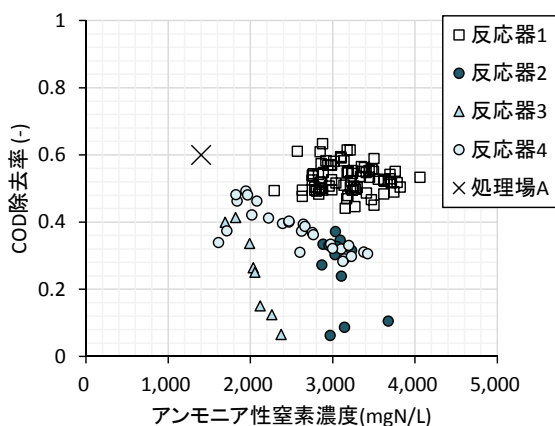


図5 アンモニア性窒素濃度とCOD除去率の関係

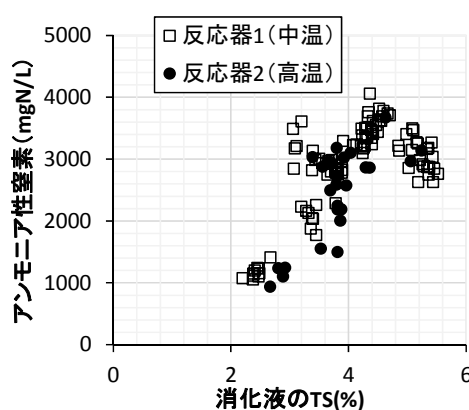


図6 消化液のTS濃度とアンモニア性窒素濃度
の関係

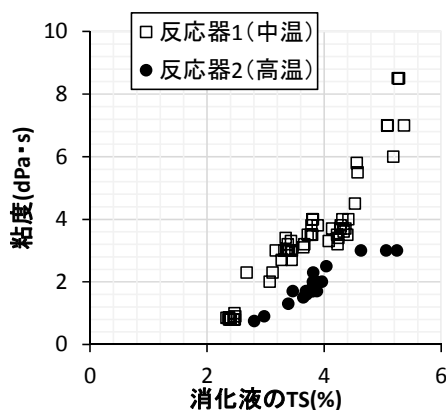


図7 消化液のTS濃度と粘度の関係

ただし、異なる処理場の下水汚泥の場合、窒素の挙動の異なる可能性が指摘されており¹¹⁾、投入TSが同程度でも消化液のアンモニア性窒素濃度が低い例も報告されている¹²⁾。また種々の有機性廃棄物を混合消化した場合のアンモニア放出量の知見も示されている¹³⁾。アンモニア性窒素濃度の挙動については特に、現場毎に注意を要するものと考えられる。

2.2.3 粘度の影響

反応器1および2の消化液のTS濃度と粘度の関係を図7に示す。消化液のTS濃度増加に従い、粘度が増加していた。特に中温条件下での粘度が高く、最大で8.5 dPa·sに達した。粘度の増加は消化槽内の攪拌効率に大きな影響を及ぼし、この点では、高温条件が有利である。なお、下水汚泥および生ごみの混合消化を想定した粘度5.4 dPa·sでの数値流体力学(CFD)解析では、攪拌に大きな問題が無いことが報告されている¹⁴⁾。

3. 下水で培養した藻類の嫌気性消化

3.1 実験方法

下水汚泥および生ごみを対象としたメタン発酵回分式実験で、種汚泥の培養基質が異なる場合にメタン発酵特性が多少異なることが報告されている¹⁵⁾。そこで有効容積100 Lの嫌気性消化反応器を用いて、下水汚泥および下水で培養した藻類を基質とした種汚泥の培養を、事前に数ヶ月間行った。

昨年度の「下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究」での藻類培養実験と同様の条件下で、20 Lの反応器を用いて、流入下水および脱水ろ液を用いた藻類の培養を行った。培養した藻類を体積比1:1で混合した培養液および混合汚泥を体積比2:5で混合し、種汚泥の培養基質とした。藻類培養液および混合汚泥のTS濃度は、それぞれ0.05%および0.6~1.2%程度であった。

温度条件を中温(35℃)に維持していた嫌気性消化反応器内の消化汚泥¹³⁾を用いて、運転を開始した。週2回(月および木曜日;祝日がある場合は適宜変更)基質を投入し、同量の消化液を引き抜いた。HRTは、50 dで運転した。ここでの主目的は消化汚泥の馴致培養であることから、特に難分解性成分との接触時間を確保するために、通常より長めに設定した運転を行った。

藻類の嫌気性消化特性を調査する回分式実験は、嫌気性反応器(容量0.5 L程度)に種汚泥および基質を投入し、窒素ガスでパージして行った。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。種汚泥については、回分式実験開始の1週間ほど前から、基質投入を停止した状態で温度条件のみを維持し、種汚泥からのガス発生量をなるべく抑えるようにした。実験条件の設定は表2に示すと

おりであり、それぞれで種汚泥量を400 mLとした。ここで用いた藻類は、下水2次処理水を用いて屋外に設置した約380 Lのレースウェイ型水槽2系列にて培養しており、その詳細は「下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究」で報告している。8月7日は回収藻類量が少なかったため、2系列分を混合して用いた。基質/種汚泥のVS比は0.1もしくは0.2に設定した。それぞれの条件下で、2もしくは3組ずつの回分式実験を行った。分析方法は前章と同様である。

表2 藻類の回分式嫌気性消化実験条件

No.	採取日	系列	基質/種汚泥のVS比
1	8月7日	2系列の混合	0.1
2	9月4日	返送あり	0.2
3	9月4日	返送なし	0.2
4	10月2日	返送あり	0.1
5	10月2日	返送なし	0.1
6	10月16日	返送あり	0.2

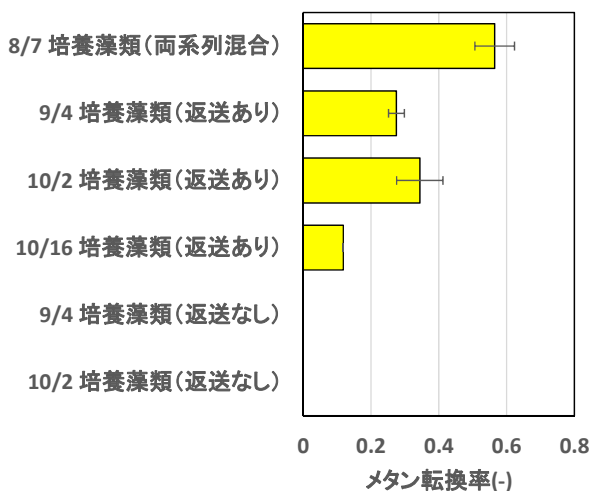


図8 藻類のCODベースメタン転換率

3.2 結果および考察

投入基質量(gCOD)に対する生成メタン量(gCOD)として算出したCODベースメタン転換率を図8に示す。8月7日の混合試料のメタン転換率は0.56で、一般的な下水汚泥と同程度の効率が得られた。それ以降の試料では、返送ありの系列でやや低下したものの0.3程度の転換率が得られたのに対して、返送なしの系列ではほとんどメタンに転換されなかった。全体としてはセネデスムス科が中心で、秋季の返送なし系列ではオオキシティス科が増加していた。培養藻類の種類により、メタン転換効率が変化する可能性が考えられる。

宮本・岡本¹⁰⁾は、冬季の2次処理水での屋外培養藻類のメタン発酵特性を調査しており、その構成は

クラミドモナス科 61%程度およびセネデスムス科 20%程度で、VS除去率を55%と報告している。また、アオコおよび下水汚泥の嫌気性消化におけるTOCベース除去率が、それぞれ40~55%および50~60%と報告されている¹⁶⁾。Sialveら¹⁷⁾は、脂質含有率40%以下の場合、脂質抽出よりも嫌気性消化が望ましいとしている。これらより、油分が少ない藻類も含めて、下水で培養した藻類からの下水処理場でのメタン回収の可能性が考えられる。

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。その結果、以下のことが明らかになった。

1) TS 7.5~10%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、2.7 kgVS/(m³・d)程度の負荷率で一般的な濃度の場合と同程度のVS除去率60%程度が、高濃度化しても示された。
- ・中温条件下では、アンモニア性窒素濃度4,000 mgN/L程度でもCOD除去率0.5~0.6をおおむね維持していた。対して高温条件下では、アンモニア性窒素濃度が2,000 mgN/Lを越えると、COD除去率の低下が見られた。

2) 下水2次処理水を用いて培養した藻類のメタン発酵特性を調査したところ、

- ・夏季の試料のCODベースメタン転換率は0.56で、下水汚泥と同等であった。
- ・秋季の試料では、返送ありの条件下で培養した藻類のCODベースメタン転換率が0.3程度であったのに対して、返送なしの条件下で培養した藻類からは全くメタンが生成しなかった。

今後は、より高負荷条件下での実験により限界負荷率を把握するとともに、異なる処理場の試料も含めた実験により下水や汚泥性状が処理特性に及ぼす影響を調査する予定である。

謝辞

2.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。3.では、下水試料の採取などで、地方自治体および下水処理場関係者の協力を得ている。ここに記して、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 安陪達哉：下水汚泥資源の平成 23 年度有効利用調査結果, 再生と利用, Vol.38, No.142, pp.86-88, 2014.
- 2) 国土交通省・日本下水道協会：バイオソリッド利活用基本計画（下水汚泥処理総合計画）策定マニュアル, pp.14-15, 2004.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 藤島繁樹, 宮原高志, 水野修, 野池達也：脱水汚泥の嫌気性消化に及ぼす固形物濃度の影響, 土木学会論文集, No.622/VII-11, pp.73-80, 1999.
- 6) 日本下水道協会：下水道統計（平成 23 年度版）（第 68 号）, 2013.
- 7) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.1 超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステム導入ガイドライン(案), 国土技術政策総合研究所資料, No.736, 2013.
- 8) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.2 バイオガスを活用した効果的な再生可能エネルギー生産システム導入ガイドライン(案), 国土技術政策総合研究所資料, No.737, 2013.
- 9) 戸苺丈仁, 池本良子, 中木原江利, 中出貴大, 古婷婷, 本多了:オキシデーションディッチ汚泥と廃油揚げを用いた高濃度混合嫌気性消化, 土木学会論文集 G(環境), Vol.69, No.7, pp.III_597-III_603, 2013.
- 10) 宮本豊尚, 岡本誠一郎：藻類を用いたメタン発酵の可能性検討, 第 47 回下水道研究発表会講演集, pp.453-455, 2010.
- 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, pp.III_325-III_332, 2012.
- 12) Hidaka T., Wang F., Togari T., Uchida T., Suzuki Y.: Comparative performance of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion for high-solid sewage sludge, *Bioresource Technology*, Vol.149, pp.177-183, 2013.
- 13) 日高 平, 王 峰, 内田 勉, 鈴木 穰：回分式実験による下水汚泥と有機性廃棄物の嫌気性消化特性調査, 土木学会論文集 G(環境), Vol.69, No.7, pp.III_605-III_614, 2013.
- 14) 下水道技術開発プロジェクト (SPIRIT21) 委員会：下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト, グリーン・スラッジ・エネルギー技術, 下水汚泥とバイオマスの同時処理方式によるエネルギー回収技術に係る技術報告書, 2007.
- 15) 中村匡志, 鈴木昌治, 坂本勝：有機性廃棄物の混合消化に関する研究-培養汚泥と基質の違いにおける消化特性, 第 43 回下水道研究発表会講演集, pp.443-445, 2006.
- 16) 矢木修身編著：アオコの増殖及び分解に関する研究, 国立公害研究所研究報告第 92 号, 1986.
- 17) Sialve B., Bernet N., Bernard O.: Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, Vol.27, pp.409-416, 2009.

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 : Jun TSUMORI, 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 total solids (TS) 10% were performed to develop methane fermentation of high-solid sludge for easy transportation with less volume. The mesophilic operation was stable with the volatile solids (VS) removal ratio of 0.6. The thermophilic operation was not so stable, when the ammonium nitrogen concentration was over 2,000 mgN/L. The methane conversion performance of microalgae, cultivated using secondary effluent, was analyzed by batch experiments. The methane conversion ratio of the cultivated microalgae was around 0.6, which showed that microalgae can be co-digested with sewage sludge to improve methane recovery.

Key words: methane fermentation, high-solid sewage sludge, waste biomass, microalgae, inhibition by ammonia