

6.3 地域バイオマスの資源管理と地域モデル構築に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ（リサイクル）

研究担当者：津森ジュン、日高 平、桜井健介、
堀尾重人、王 峰

【要旨】

社会資本のグリーン化に向け公共緑地で大量に発生する刈草の有望な利用方法の一つとして考えられる下水処理場での嫌気性消化技術導入に必要な基礎的知見を収集するために、刈草と下水汚泥の中温および高温混合嫌気性消化に関する連続式実験および回分式実験を行った。その結果中温条件下より高温条件下でのメタン転換率が高く、刈草のメタン転換率は VS ベースで $0.19 \text{ L CH}_4/\text{g VS}$ ・刈草程度であることが示された。80°C程度の超高温処理を組み込むことで、20～30%程度メタン転換率の高まることが示された。また、刈草の処理シナリオの温室効果ガス排出量の算定手法を開発するため、バイオガス化シナリオのパラメーターを精査するとともに、検討処理シナリオとして野焼きを追加した。さらに、刈草の性状や発生重量の変動が計算結果に与える影響を評価した。

キーワード：刈草混合消化、高温メタン発酵、インベントリ分析、温室効果ガス

1. はじめに

本研究は、公共緑地等バイオマスを資源として位置づけ、恒久的に利用していくための要素技術やシステムを提示することが目的である。平成 25 年度は、提示にあたり、刈草と下水汚泥の中温および高温混合嫌気性消化実験を行うとともに、超高温処理の可能性を検討した。また、刈草の各種の処理による温室効果ガス排出量の算定手法の構築を目指し、バイオガス化シナリオのパラメーターを精査するとともに、シナリオに野焼きを追加した。さらに、刈草の性状や発生重量の変動が計算結果に与える影響を評価した。

2. 刈草と下水汚泥の中温および高温混合嫌気性消化に関する実験

2.1 目的

公共緑地等バイオマスの有望な利用方法の一つとして下水処理場での嫌気性消化が考えられ、新潟市での検討事例も報告されている¹⁾。刈草については、特殊な前処理を行わなくても裁断のみで、ある程度のメタン転換が期待できることが、中温（35°C）条件下での混合消化について示されており^{2,3)}、また昨年度には高温（55°C）条件下での実験を行った⁴⁾。しかしながら、これらの知見は時期や用いた材料が異なり、同一条件下での中温および高温混合消化について、単純には比較できない。また、

メタン転換率向上のための前処理手法として、土木研究所では木質系バイオマスを対象とした蒸煮・爆砕の技術を開発してきており、その適用性が示されている^{5,6)}ものの、200°C以上での処理となり、要するエネルギーや費用の点が課題である。一方、70～80°C程度での超高温処理を組み込むことによるメタン発酵の効率化が、廃熱の活用手段として着目されており、下水汚泥および生ごみ⁷⁾、コーヒー滓⁸⁾、生分解性プラスチック⁹⁾などの種々の有機性廃棄物の嫌気性消化への適用性が報告されている。紙ごみに対する効果も報告されている¹⁰⁾ことから、比較的簡単な前処理として、刈草に対する効果が期待できるものの、検討事例は報告されていない。

そこで本年度は、刈草と下水汚泥の中温および高温混合嫌気性消化実験を行い、その比較を試みた。また、80°Cでの超高温前処理の効果を、回分式実験で調査した。

2.2 実験方法

2.2.1 連続式実験

用いた下水汚泥および刈草の性状を表 1 に示す。下水汚泥は、汎用性を示すために昨年度とは異なる下水処理場の混合汚泥を用いた。標準活性汚泥法を採用している都市下水処理場であり、汚泥性状や嫌気性消化特性は一般的な範囲内である¹¹⁾。混合汚泥の固形物（TS）濃度は 2%程度であるので、実験室での遠心分離操作により、4%程度まで濃縮した。刈草は、昨年度と同様に土木研究所

内で採取し、10 mm 程度に裁断した。

連続実験の運転条件を表 2 に示す。中温および高温での混合消化運転を、それぞれ反応器 RM および RT で行った。投入基質は、刈草および下水汚泥を有機物 (VS) ベースで 1:2 の割合で混合した。植種汚泥には、昨年度から培養してきた消化汚泥を用いた。また、中温および高温での下水汚泥のみの消化運転を、それぞれ反応器 RCM および RCT で行った。これらの反応器では、水理的滞留時間 (HRT) を 42 d として、投入下水汚泥の VS 負荷率をそろえた運転を設定した。基質投入および消化液の引抜操作は、平日 1 日 1 回の頻度で手動にて行った。

2.2.2 回分式実験

超高温処理の効果を確認するための回分式実験を、高温条件下で行った。消化汚泥 1.89 gVS に対して、下水汚泥および刈草の混合物を、処理時間 0、1、2、3、4、および 5 日間 80°C で超高温処理した基質 0.5 gVS を投入した。それぞれの実験は 3 ケースずつ行った。用いたバイアルの容積は 130 mL で、消化汚泥、下水汚泥および刈草を投入後イオン交換水で 100 mL にそろえた。そして、窒素ガスで 3 分間ヘッドスペースを置換し、恒温振とう器にて培養しながら、メタンガス発生量の経時変化を測定した。

表 1 下水汚泥および刈草の性状

	単位	下水汚泥	刈草
pH	—	5.64 ± 0.05	—
TS	%	4.0 ± 0.7	29.1 ± 1.1
VS	%	3.4 ± 0.6	26.8 ± 1.1
T-CODcr	g/L	63.4 ± 9.7	—
T-CODcr	g/g-VS	—	1.36 ± 0.02
C	% (dry)	44.4 ± 0.0	42.3 ± 0.4
H	% (dry)	6.72 ± 0.38	6.10 ± 0.46
N	% (dry)	5.34 ± 0.32	1.10 ± 0.57
脂質	% (dry)	6.07 ± 0.65	2.21 ± 0.40
炭水化物	% (dry)	39.2 ± 2.1	60.9 ± 8.7
タンパク質	% (dry)	30.1 ± 0.1	7.4 ± 0.9

表 2 連続式実験の設定条件

	RM	RCM	RT	RCT
HRT (d)	42	42	42	42
温度(°C)	35	35	55	55
VS負荷率(g(L-d))	1.2 ± 0.2	0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.1	0.7 ± 0.2
草:下水汚泥(VS比)	1.2	—	1.2	—

2.2.3 分析方法

汚泥性状の分析は、主として下水試験方法に従って行った。なお、CODcr および有機酸は吸光光度計 (DR2400、HACH) により分析し、その際にはそれぞれ CODcr 試薬 (HR) および有機酸試薬 (TNT872) を用いた。アンモニアの分析は自動比色分析装置 (TRAACS2000、BRAN LUEBBE) を用いた。CHN の分析は、元素分析計 (FALSH EA1112, アムコ) を用いた。脂質はソックスレー抽出法、炭水化物はフェノール硫酸法、タンパク質はローリー法で分析した。発生ガスの分析は、3M 水酸化ナトリウム水溶液を通過させることで二酸化炭素を除去し、メタンガス発生量として計量した。発生量は、連続式実験の場合ガスバックで採集し週に一回湿式ガスメータで測定し、回分式実験では水上置換で測定した。

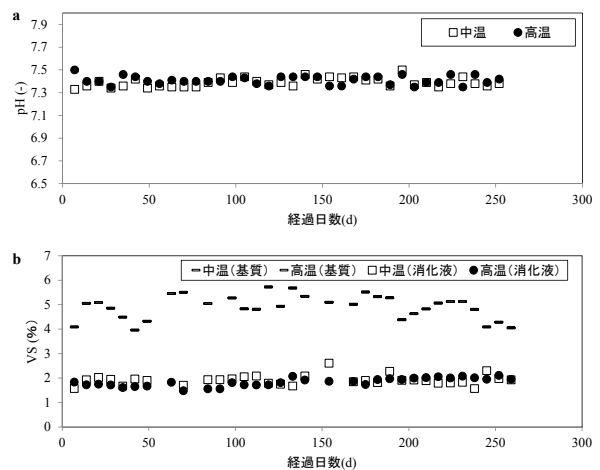


図 1 連続式実験における pH(a) および VS(b) の経時変化

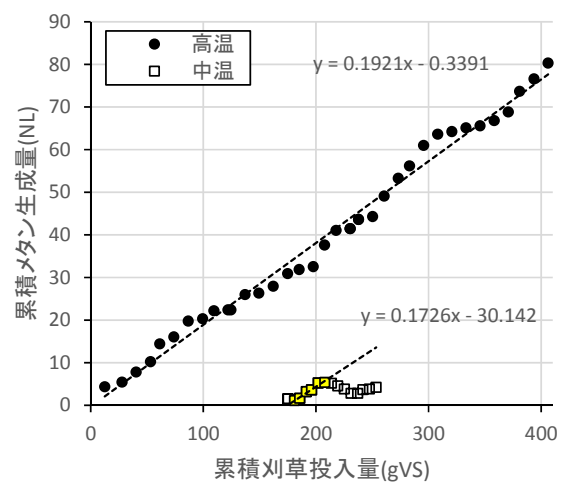


図 2 連続式実験における累積投入刈草量と累積生成メタン量の関係

2.3 結果および考察

2.3.1 連続式実験による加温温度の影響の検討

連続式実験における、pH および VS の経時変化を図1に示す。pH は全期間を通じて 7.3~7.5 程度で安定していた。下水汚泥および刈草の混合物の VS は 5%前後で、消化後には RM および RT いずれも 2%程度に減少した。アンモニア性窒素濃度はおおむね 1,500 mgN/L 以下であり、メタン発酵への阻害影響はなかった。有機酸濃度は RM および RT でそれぞれ 1,200 および 1,000 mgHOAc/L 程度であった。下水汚泥のみを投入した RCM および RCT での平均メタン転換率は、それぞれ 0.34 および 0.36 NL/gVS であった。

RM および RT における累積投入刈草量と累積生成メタン量の関係を図2に示す。刈草からのメタン生成量は、RCM もしくは RCT における下水汚泥のメタン生成量を差し引いて算出しており、この傾きが、投入刈草あたりのメタン生成量となる。RM では刈草からのメタン生成量が負の値となり、刈草の投入によりメタン生成量が減少していた。ただし、例えば 161~202 日目の期間は傾きが正の値であり、0.17 NL/gVS 程度であった。一方 RT では全期間を通じて 0.19 NL/gVS 程度であり、RM でのメタンガス発生が安定していた期間よりも、やや高かった。これは、異なる下水処理場の汚泥を用いた昨年度の結果⁴⁾と同程度である。これより、刈草を混合消化する場合、高温で運転するのが、より安定し効率がよいことが示されている。

2.3.2 回分式実験による超高温前処理の検討

超高温前処理の影響を調査した回分式実験における投入基質からのメタン生成量を、図3に示す。全体として、中温条件下よりも高温条件下でのメタン転換率が高かった。いずれの温度条件下でも、超高温処理時間を3日以上とした場合に、特にメタン転換率向上効果が見られ、前処理を行わない場合に比べて 20~30%程度向上した。

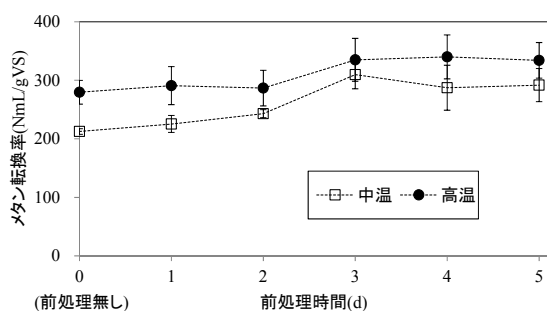


図3 超高温処理後の回分式実験におけるメタン発生量

80°C程度の処理であれば、例えば回収したメタンによる発電で発生する排熱の活用など、従来有効活用されていなかった熱源で対応できる点で、有用な前処理になると考えられる。

3. 公共緑地等から発生した刈草の処理による温室効果ガス排出量の評価

刈草の特徴は木材に比べリグニンの含有量が少なく柔らかい点であり¹²⁾、生物による分解が比較的早い。この特徴を活かし、飼料化、堆肥化、下水処理場での嫌気性消化などが有望な処理方法と思われる。

刈草の処理による温室効果ガスの排出量は、処理方法毎に異なる。加えて、発生する刈草の性状、運搬距離などに左右される。そこで本研究では、実際に用いられている方法と今後有望と考えられるシナリオ毎の温室効果ガス排出量を定量的に評価し、管理者に適切な判断材料を与えようとするものである。

平成25年度は、平成24年度までに構築した評価手法について、バイオガス化シナリオのパラメーターを精査するとともに、シナリオに「野焼き」を追加した。また、刈草の性状や発生量の変動が計算結果に与える影響（不確実性）を評価した。

3.1 開発中の評価手法の概要

目的は、公物管理者等が刈草の処理を行う際に、処理経費に加えて、地球温暖化対策の効果を定量的に考慮して、総合的に適切な処理方法を選択することである。評価対象とする機能単位は、「公共緑地1,000m²・1回除草から発生する刈草の処理」とした。ここで刈草の処理とは、河川などの公物管理のために除草し、必要に応じ中間処理（焼却や資源化）の後、廃棄または利用され最終的に安定した状態となるまでのプロセスとした。評価対象とするシナリオは、現実的な利用方法と思われる、図4の8種類とした。

3.2 処理シナリオのインベントリ分析

平成25年度に実施したバイオガス化シナリオおよび野焼きシナリオのインベントリ分析方法を示す。

バイオガス化シナリオは、刈草を数cmに破碎後、下水処理場にて下水汚泥と混合して嫌気性消化し、メタンガスを回収した後、機械脱水後焼却して、焼却シナリオ中の最終処分と同様に埋め立てるものとした。消化、脱水プロセスは、中温消化、遠心脱水によるものとし、消化、脱水による電力消費量は、処理体積に比例するものと仮定し、汚泥体積と電力消費量の実測値¹³⁾から、それぞれ 7.2、5.3kWh/m³とした。刈草の比重は、文献¹⁴⁾を参考に

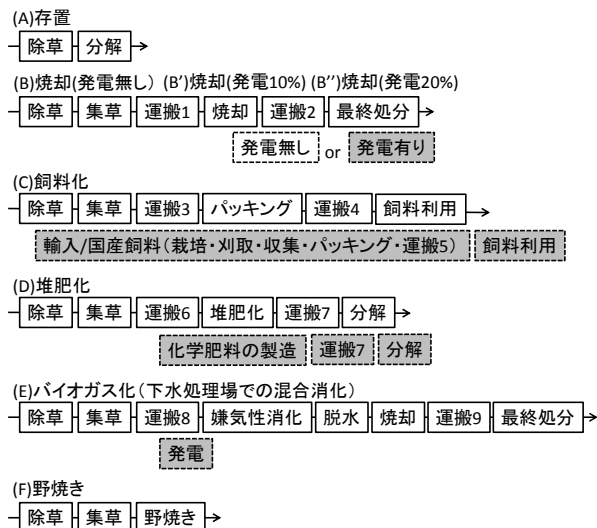


図4 温室効果ガス排出量の評価対象とする8シナリオとそれらを構成するプロセス（着色されたプロセスは、相殺する代替システムを示す）

0.22として計算した。刈草の含水率が下水汚泥と比べてかなり低いため、脱水プロセスにおける脱水効果が期待できないことから、水分は変化しないことと仮定した。消化された刈草の焼却プロセスは、主な形式である流動床式¹⁵⁾とし、施設規模は、規模別施設数で最多帯¹⁵⁾の100t/dとした。消費電力量は、ごみ焼却のモデル¹⁶⁾を利用して設定した。

野焼きシナリオは、除草および集草後、現地で焼却されるものとした。焼却時の CH_4 、 N_2O 転換率は、農業残渣の野焼き¹⁷⁾と同等とし、 $5 \text{ g-CH}_4\text{-C/kg-C}$ 、 $7 \text{ g-N}_2\text{O-N/kg-N}$ とした。ただし、刈草の焼却や分解に伴う CO_2 の排出は、草の成長時に吸収した CO_2 を還元する効果とみなせるので、IPCCガイドライン¹⁷⁾と同様に、温室効果は無いものとした。

3.3 刈草の性状と発生重量による不確実性分析

3.3.1 分析方法

刈草の性状と発生重量に関するデータの変動が、刈草の処理時の温室効果ガス排出量の算定結果に与える影響について評価するため、モンテカルロ法を用いた不確実性分析を実施した。さらに、刈草の発生重量と性状に関する各変数の感度分析を行った。感度分析にあたっては、既報¹⁸⁾と同様に、異常値による大きな影響を避けるため、スピアマンの順位相関係数を用いて、大きな影響を与える変数を抽出した。変数は、発生重量、高位発熱量、含水率、灰分、元素の重量割合（炭素、水素、窒素、硫黄、酸素）である。各変数の分布について、発生重量は対数正規分布、その他の変数は正規分布に適合させた。変数

のデータは、土木研究所の過年度の調査結果を用いた。なお、計算には、Oracle Crystal Ball Version 11(株式会社構造計画研究所)を用いた。

3.3.2 分析結果

本報では、(B')効率10%の発電機を有するごみ焼却施設による刈草の処理の結果を示す。効率10%の発電機を有するごみ焼却施設による刈草の処理(B')の不確実性分析の結果を図5に示す。2.5%値は $-62.6 \text{ kg-CO}_2\text{eq}$ であり、50%値は $15.6 \text{ kg-CO}_2\text{eq}$ であり、97.5%値は $33.1 \text{ kg-CO}_2\text{eq}$ であった。また、刈草の発生重量と性状に関する各変数の感度分析の結果を図6に示す。刈草の発生重量は、除草場所毎の変動が大きいこともあり、相関係数は -0.94 と大きく、刈草の発生重量の変動が、処理時の温室効果ガス排出量の算定結果に与える影響は大きかった。実際には、河川管理者等が、刈草の発生重量について、複数の工区で発生した刈草の合計や刈草以外の樹木などの合計のみを把握するなどして、工区毎には整理されていないケースもあるため、算定作業軽減のため、刈草の発生重量の平均値などで代表させて算定することも考えられたが、正確な温室効果ガス排出量の計算には、評価対象の刈草の発生重量を正確に把握することが重要と考えられた。

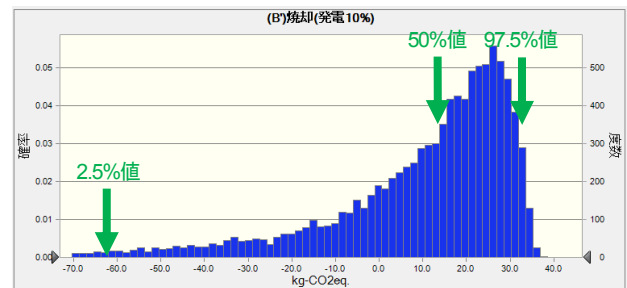


図5 刈草の性状や発生重量の変動が与える刈草の処理時の温室効果ガス排出量の不確実性（効率10%の発電機を有するごみ焼却施設による場合）

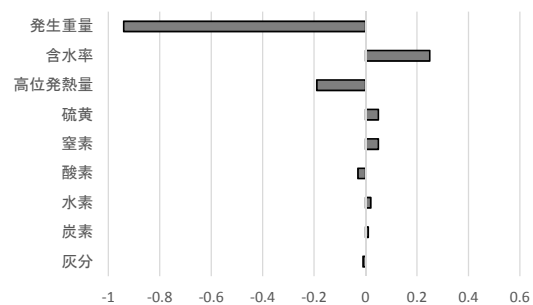


図6 刈草の性状や発生重量に関する各変数と計算された刈草の処理時の温室効果ガス排出量の順位相関係数（効率10%の発電機を有するごみ焼却施設による場合）

4. まとめ

本研究では刈草に関する嫌気性消化実験及び各種処理シナリオの評価モデルの開発を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 刈草および下水混合汚泥を基質とした混合嫌気性消化の実験について、
 - ・連続式実験では、中温条件下より高温条件下でメタン転換率が高く、処理が安定していた。
 - ・回分式実験により、80°C程度の超高温処理を組み込むことで、メタン転換率の高まることが示された。
- 2) 新たに追加した野焼きシナリオでは、焼却時のCH₄、N₂O転換率を5 g-CH₄-C/kg-C、7 g-N₂O-N/kg-Nとした。
- 3) 開発評価モデルの不確実性分析では、いずれのシナリオでも刈草の発生重量が与える影響が大きく、正確な温室効果ガス排出量の計算には、評価対象の刈草の発生重量を正確に把握することが重要と考えられた。

謝辞

汚泥採取などでお世話になりました下水処理場関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本茂浩：新潟市における再生可能エネルギーの取組み、第50回下水道研究発表会講演集、pp.916-918、2013。
- 2) 独立行政法人土木研究所：平成21年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料、第4191号、2010。
- 3) 独立行政法人土木研究所：平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料、第4212号、2011。
- 4) 独立行政法人土木研究所：平成24年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料、第4275号、2013。
- 5) 落 修一、鈴木 穰、南山 瑞彦、越智 崇：木質に蒸煮・爆砕を施すことによる木質と下水汚泥との混合・嫌気性消化法に関する研究、下水道協会誌論文集、Vol.41、No.498、pp.97-107、2004。
- 6) 落 修一、南山 瑞彦、長沢 英和、鈴木 穰：蒸煮・爆砕木質と下水汚泥とを混合・嫌気性消化した消化汚泥の処理性、下水道協会誌論文集、Vol.42、No.508、pp.111-123、2005。
- 7) 李名烈、日高平、津野洋：超高温酸発酵処理を組み込んだ生ごみおよび下水汚泥の嫌気性処理技術の開発、環境工学研究論文集、Vol.45、pp.333-339、2008。
- 8) 日高平、津野洋、西村文武、都築良太、山瀬康平、坪田潤：超高温可溶性処理を組み込んだコーヒー滓の高温膜型嫌気性消化法の開発、土木学会論文集G(環境)、Vol.67、No.7、pp.III_293-III_301、2011。
- 9) Feng Wang, Taira Hidaka, Hiroshi Tsuno, Jun Tsubota : Co-digestion of polylactide and kitchen garbage in hyperthermophilic and thermophilic continuous anaerobic process, Bioresource Technology, Vol.112, pp.67-74, 2012.
- 10) 大隅省二郎、坪田潤、津野洋：生ごみおよび紙の高温メタン発酵残渣に対する超高温可溶性処理の定量的評価、廃棄物資源循環学会論文誌、Vol.23、No.5、pp.224-231、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、pp.III_325-III_332、2012。
- 12) 公益社団法人化学工業会、一般社団法人日本エネルギー学会編：バイオマスプロセスハンドブック、株式会社オーム社、2012。
- 13) 惣田訓、池道彦：処理規模を考慮した様々な下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価、再生と利用、34(129)、6-15、2010。
- 14) Onoda, Y., Westoby, M., Adler, P. B., Choong, A. M., Clissold, F. J., Cornelissen, J. H., Diaz, S., Dominy, N. J., Elgart, A., Enrico, L., Fine, P. V., Howard, J. J., Jalili, A., Kitajima, K., Kurokawa, H., McArthur, C., Lucas, P. W., Markesteijn, L., Perez-Harguindeguy, N., Poorter, L., Richards, L., Santiago, L. S., Sosinski, E. E., Jr., Van Bael, S. A., Warton, D. I., Wright, I. J., Wright, S. J., Yamashita, N., Global patterns of leaf mechanical properties, Ecology letters, 14, 301-312, 2011.
- 15) 公益社団法人日本下水道協会発行：平成23年度版下水道統計、第68号、2013。
- 16) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価 — マテリアルフロー・LCA評価プログラム—、技報堂出版株式会社、2005。
- 17) IPCC: Reporting Instructions, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1996.
- 18) 本下 晶晴、伊坪 徳宏、稲葉 敦：乗用車を事例としたLCA結果の不確実性分析、日本LCA学会誌、4(3)、260-269、2008。

A STUDY ON RESOURCE MANAGEMENT OF REGIONAL BIOMASS AND THE CONSTRUCTION OF A REGIONAL MODEL

Budgeted : Grants for operating expenses

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Recycling Research Team, Materials and Resources Research Group

Author : TSUMORI Jun, HIDAKA Taira, SAKURAI Kensuke, HORIO Shigehito, WANG Feng

Abstract : As for developing a biomass resource management system of local authorities, we have been conducting the following studies. Applicability of grass to co-digestion with sewage sludge was demonstrated in laboratory-scale continuous and batch experiments. The average methane production in the continuous thermophilic co-digestion experiment with sewage sludge was 0.19 L CH₄/gVS-grass, which was higher than that in the continuous mesophilic operation. Hyperthermophilic pre-treatment at 80° C promoted the methane production yield. In addition, in order to show quantity of greenhouse gas emission by different types of disposal of grass waste, parameters for calculating greenhouse-gas emission from methane fermentation in wastewater treatment plant were reviewed, and scenario of open burning in green field was added. Uncertainty affected by variation of grass characteristics and yield to estimation of greenhouse gas emission was shown.

Key words : Co-digestion of grass and sewage sludge, Hyperthermophilic pre-treatment, Inventory analysis, Greenhouse-gas emission