

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

研究担当者：南山瑞彦、岡安祐司、桜井健介

【要旨】

公共緑地等で発生する刈草等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ため、公共緑地で発生する刈草の性状を整理し、刈草の公共緑地から発生した刈草の処理方法（存置、野焼き、焼却(発電無し)、焼却(発電有り)、飼料化、堆肥化、バイオガス化)について、温室効果ガス(Greenhouse gas, GHG)排出量を算定し、焼却(発電有り)、飼料化、バイオガス化は、他の処理方法に比べて、正味の GHG 排出量が少なく、有効な利用方法と考えられた。

また、公共用水域で大量に発生する水草バイオマス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、水草と下水汚泥の混合嫌気性消化に関する実験を行った。水草と下水汚泥の混合嫌気性消化実験では、単独消化時よりも混合消化時に、メタンガス生成量が増加することが示された。

キーワード：地球温暖化対策、温室効果ガス、刈草、水草、メタン発酵

1. はじめに

河川、道路、公園、ダムなどの公物管理のため、草や木が多量に伐採・処分されている。それらをエネルギーや堆肥などの有機資材として有効利用し、化石資源由来のエネルギーやそのエネルギーの消費により製造される製品を代替できれば、温室効果ガスの排出を削減し、地球温暖化対策として貢献が可能である。

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ため、公共緑地で発生する刈草の性状を整理し、刈草の公共緑地等から発生した刈草の処理（存置、野焼き、焼却(発電無し)、焼却(発電有り)、飼料化、堆肥化、バイオガス化)について、温室効果ガス(Greenhouse gas, GHG)排出量を算定した。また、水草と下水汚泥の混合嫌気性消化実験を行った。

2. 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算定

2.1 背景

河川管理において重要な堤防法面の点検と堤体保全のため、堤防除草が定期的に行われている。除草後の刈草は、河川管理上あるいは廃棄物処理上支障がなく刈草を存置できる場合を除いて、焼却などにより処理されてきた。平成 23 年 5 月に策定された「河川砂防技術基準 維

持管理編(河川編)」（国土交通省）では、これまでの方法に加え、新たに刈草の飼料等への有効利用や野焼きによる処分等の取り組みに努めることとされた¹⁾。

一般に、刈草を含むバイオマスは広く、薄く存在している上、水分含有量が多い、かさばる等の扱いづらいという特性のために収集が困難であることが、十分に活用されていない原因の一つである²⁾。しかし、河川管理で発生する刈草は、毎年、一定量が発生し、管理システムが確立しており、比較的利用しやすいため、有効利用が期待される。

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³⁾、生物による分解が比較的早い。この特徴を活かし、飼料化^{4),5)}だけでなく、堆肥化^{6),7)}や嫌気性消化^{8),9)}なども有望な有効利用方法と思われる。

刈草をエネルギーや堆肥など有機資材として有効利用し、化石資源由来のエネルギーやそのエネルギーの消費により製造される製品を代替することは、GHG の排出を削減できることから、地球温暖化問題への対策として期待される。これは、植物が成長過程で光合成により二酸化炭素(CO₂)を吸収することから、大気中の CO₂ を増加させない「カーボンニュートラル」と呼ばれる特性¹⁰⁾を有しているためである。

現状では、河川堤防の管理者等が、地球温暖化対策としての効果の大きさを考慮に加えて、処理方法を選択し

ようとしても、比較のための情報は十分に整備されていない。このため、河川管理者による GHG 排出量の算定を容易にするため、様々な処理に伴う GHG 排出量の算定方法を開発し、GHG 排出量を算定した。

2.2 刈草の有効利用技術の導入検討事例

2.2.1 刈草の有効利用技術の概要

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³⁾、生物による分解が比較的早い。この特徴を活かし、バイオガス化、飼料化、堆肥化などがある有望な有効利用方法と思われる。

バイオガス化は、刈草を破砕機等で破砕した後に、嫌気性消化させ、メタンを含むバイオガスを発生させ有効利用する方法である。一般的に、発電等に用いられる。特に、国内に 200 か所程度存在する嫌気性消化槽を有する下水処理場で刈草を受け入れ、下水汚泥と混ぜて嫌気性消化させる方法は、既存施設を活用でき、有望と考えられる。

飼料化は、刈草をラップサイレージ化し、乳牛等に飼料として利用する方法である。国内で使用される粗飼料の一部は、オーストラリア等から輸入されているが、それらを代替できれば、輸送等で消費されていた石油燃料等の消費を削減することができる。

堆肥化は、植物廃材を腐熟させ、微生物の作用により各種含有物を分解安定化することによって、植物生育に有用な物質に変化させ¹¹⁾、堆肥として利用する方法である。それらが従来使用されていた化学肥料を代替できる場合、化学肥料の製造等に伴って消費されていた石油燃料等の消費を削減することができる。

2.2.2 バイオガス化の事例

新潟市の中部下水処理場において、刈草を受け入れて、下水汚泥と刈草等の混合嫌気性消化を行い、発生したメタンガスを用いて発電が行われる予定である^{12),13)}。北陸地方整備局において、信濃川下流河川事務所管内で発生する刈草のうち、従来、焼却場で処理していた刈草を新潟市中部下水処理場で受け入れた場合についてケーススタディを実施し、両者ともにコスト削減効果が見込まれ、温室効果ガス排出量も削減効果が見込まれている¹⁴⁾。

海外において、刈草をメタン発酵して発電する事業についての文献は見当たらないが、畜産廃棄物と刈草の混合嫌気性消化や刈草を主体とする嫌気性消化の採算性を検討されている^{15),16),17)}。刈草を主体とする嫌気性消化¹⁷⁾においては、発電規模 500kW 以上において、採算性が確保できるとされている。

2.2.2 飼料化の事例

千葉県、島根県等で飼料化が行われている。

千葉県では、河川堤防刈草を活用した乳用牛発酵 TMR (total mixed rations:混合飼料) 飼料化実証事業^{18),19)}が行われており、ロールベアラで回収した堤防除草刈草をラップサイレージ化し、乳用発酵 TMR 飼料加工して近隣の畜産農家へ提供された。生産コスト約 25 円/kg であり、畜産農家の購入希望価格とほぼ同等と報告されている。

島根県では、道路で除草された刈草を集積場に運搬集積し、異物除去後、梱包ラッピング、その場で保管し、引き渡し日を決めて畜産農家が持ち帰り、牛の飼料として有効利用した^{20),21)}。これまでの処分場での処理経費に比べ、梱包ラッピングに掛かる経費は安価で、経費削減が達成された。

2.2.3 堆肥化の事例

東京都・埼玉県、三重県等で堆肥化が行われている。

東京都・埼玉県に所在する荒川上流河川事務所では、河川堤防等で発生した刈草を破砕し、4 か月間発酵させて、堆肥化している。「荒川緑肥(肥料登録)」と命名し、近隣の農家や園芸愛好家に提供したり、市・学校での利用やイベント会場で配布したりしている²²⁾。

三重県亀山市では、刈り草コンポスト化センターにおいて、道路、河川敷、家庭等から出る刈り草を堆肥化し、市民へ配布したり、公共施設及び関係機関等で活用したりしている^{23),24)}。

2.3 GHG 排出量の算定方法

2.3.1 算定方法

GHG 排出量の評価にあたっては、原料の調達から製品の廃棄までの環境影響を評価する、ライフサイクルアセスメント²⁵⁾の考え方をを用いた。

GHG 排出量は、プロセス毎に活動に伴って消費される化石燃料、電力、薬品量に GHG 排出係数を乗じ算定し、それらを積み上げてシナリオ全体の GHG 排出量とした。GHG 削減量は、シナリオ内で生じる資源化物(焼却や嫌気性消化から発電した電力、飼料、堆肥)が同等の機能を提供するシステム(電力供給、飼料の供給、化学肥料の供給)を代替するとみなし、この代替システム分を算定した。GHG 排出量および排出削減量は、シナリオ中の運用に由来する GHG 排出および排出削減を対象とし、比較的小さいと思われる施設や設備の建設や廃棄は対象外とした。

算定対象とする GHG の種類は、二酸化炭素(CO₂)、

メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)とした。各シナリオのGHG排出量と排出削減量を求める際には、各種のGHG量に地球温暖化係数を乗じて二酸化炭素換算量とした上で、合算して求めた。地球温暖化係数は、京都議定書の前提となっているIPCC第二次報告書²⁹⁾における積分期間100年の係数とし、重量当たりの温室効果がCO₂に対し、CH₄は21倍、N₂Oは310倍とした。刈草の焼却や分解に伴うCO₂の排出は、草の成長時に吸収したCO₂を還元する効果とみなせるので、IPCCガイドライン²⁷⁾と同様に、温室効果は無いものとした。

2.3.2 算定範囲

本研究における評価対象は、除草(面積1,000m²を1回)から、焼却または加工後、最終的に灰の埋め立てや農地還元等を通して、安定した状態となるまでとした。

2.3.3 刈草の性状

刈草の発生重量、組成、含水率は、土木研究所が以前実施した全国調査での測定結果²⁹⁾に基づいた。刈草の高位発熱量は、18.5±1.3MJ/kg-dry(平均±標準偏差)であった。2、3日存置し乾燥を行った刈草の含水率は0.180±0.088kg/kg-wetであり、灰分は0.112±0.044kg/kg-dryであった。

刈草の元素の重量割合を表-1に示す。一般にバイオマスは、主要構成成分がセルロースやリグニンであるため、炭素と水素は、それぞれ、45-50%、5-6%であることが知られており²⁹⁾、採取した刈草もそれらの範囲内であった。刈草の低位発熱量は、13.8MJ/kg-wetであり、ごみの低位発熱量の全国平均値(平成16年)約9.0MJ/kg-wet³⁰⁾より高かった。

表-1 河川の維持工事で発生した刈草86検体の元素の平均重量割合(単位：%)

	炭素	水素	窒素	硫黄	酸素
平均	46.3	5.42	1.34	0.01	40.5
標準偏差	2.7	0.35	0.41	0.03	2.3

刈草の年間回収重量の相加平均値は、667g-wet/m²であった。GHG排出量の試算にあたっては、除草は年2回が基本³¹⁾であることから、1回あたり334g-wet/m²として計算することとした。また、刈草は2、3日存置し、乾燥されて回収されることが多く、刈草の含水率は、測定された含水率(18.0%)と同等と仮定した。

2.3.4 評価シナリオ

評価シナリオは、図-1に示すとおり、実例のある、または、実用段階にある(A)存置、(B)野焼き、(C)焼却(発電無し)、(C')焼却(発電有り)、(D)飼料化、(E)堆肥化、(F)

バイオガス化とした。

各シナリオに共通の除草プロセスおよび集草プロセスでは、一般的な刈幅150cm、ガソリン燃費9.2L/h³²⁾のハンドガイド式草刈機を用いることとした。除草と集草の作業時間は、文献³²⁾から、それぞれ、1.28h/1000m²、1.04h/1000m²とした。トラックへの積み込みや積み下ろしは人力とした。人力による作業は、GHG排出が無いものとした。

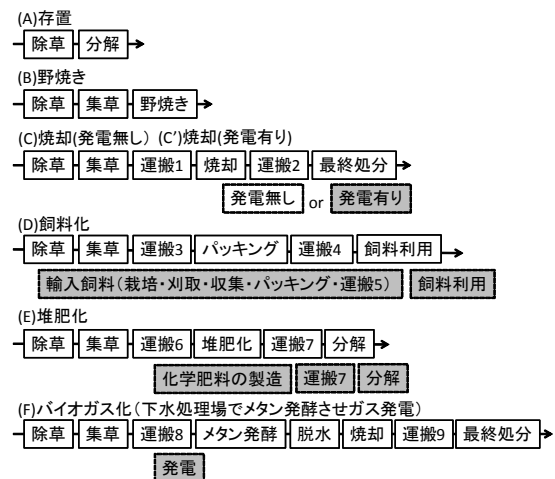


図-1 温室効果ガス排出量の評価対象とするシナリオと構成プロセス(灰色に着色された部分は、代替されるプロセスを示す)

a) 存置シナリオ

存置シナリオは、除草と分解プロセスより構成されるものとした。分解プロセスにおける炭素と窒素のCH₄やN₂Oへの転換率は、有機肥料や化学肥料の畑地での施肥³³⁾と同値とした。

b) 野焼きシナリオ

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CH₄、N₂O転換率は、農業残渣の野焼き²⁷⁾と同等とした。

c) 焼却シナリオ

焼却シナリオは、発生した刈草を既存のごみ焼却場で中間処理し、灰を最終処分することを想定した。焼却のGHG排出量は、文献³⁴⁻³⁶⁾によると、炉の形式、炉の大きさ、発電効率、溶融の有無などにより異なる。本報告において焼却施設の処理方式は、全国で最多(1221施設中463施設³⁵⁾)の全連続運転のストーカ式施設とした。実施において刈草のみの焼却に伴う電力、燃料、薬剤の使用量を把握するのは困難であるため、文献²⁰⁾の計算モデルを利用して算定し、特に説明の無いものは計算モデルのデフォルト条件を採用した。焼却施設の処理規模は、規模別施設数で最多帯³⁷⁾の200t/dを仮定した。計算モデルでは、発電量は、ごみの量と低位発熱量に依存

する発生蒸気量と主に施設規模に依存する場内蒸気使用量の差から使用可能蒸気量を求め、発電効率を用いて計算される。本シナリオでは、既存の焼却処理場に刈草が追加的に投入されることを想定し、場内蒸気使用量は変わらず、発生蒸気量が増加するものとして計算した。また、刈草を投入していない状態でも発生蒸気量は場内蒸気使用量を上回っており、かつ、補助燃料は利用していないものとした。集塵灰は、薬剤処理後セメント固化されるものとした。全連続運転のストーカ式焼却炉の CH_4 、 N_2O 転換率は、一般廃棄物焼却炉の CH_4 と N_2O 排出係数（廃棄物総量ベース）³⁹および一般廃棄物の炭素と窒素の標準含有率³⁰から計算して、設定した。

最終処分プロセスでは焼却灰のセメント固化物を対象とした。処分場の設計条件は計算モデル²⁰中のデフォルト条件とした。

d) 飼料化シナリオ

飼料化シナリオは、ラップサイレージ化した刈草と乾草が同等の栄養価および嗜好性がある³⁹ので、刈草をラップサイレージ化して、乳牛等に飼料として利用することとし、同量のオーストラリア産輸入乾草と代替することとした。パッキングプロセスは、梱包、密封、積込から構成され、それぞれの軽油消費量は、文献⁴⁰から $0.6\text{L}/1000\text{m}^2$ 、 $0.4\text{L}/1000\text{m}^2$ 、 $0.4\text{L}/1000\text{m}^2$ とした。代替するオーストラリア産輸入乾草の生産・輸送に伴うGHG 排出量は、文献⁴¹から全国平均値を計算して、 $258.1\text{g-CO}_2/\text{kg-wet}$ を用いた。オーストラリア産輸入乾草の含水率は10%として計算した。

e) 堆肥化シナリオ

堆肥化シナリオについては、有機堆肥の製造および施用に伴うGHG 排出量から、相応の化学肥料の製造および施用に伴うGHG 排出削減量を差し引くことで全体のGHG 排出量を計算した。有機堆肥の製造は、バックホーにより電気式の破碎機に投入し、破碎後、ホイールローダーによる切り返しを行うものとした。バックホー軽油消費量、破碎機電力消費量、ホイールローダー電力消費量は、文献⁴²の測定値から、それぞれ、 $0.0157\text{L}/\text{dry-kg}$ 、 $18.0\text{Wh}/\text{dry-kg}$ 、 $0.00798\text{L}/\text{dry-kg}$ とした。相応の化学肥料の製造とは、有機肥料中の窒素とリン酸の量と等しい窒素とリン酸を含む化学肥料の製造とし、その製造に伴うGHG は文献⁴³から、 $1.64\text{kg-CO}_2\text{eq.}/\text{kg-N}$ と $1.44\text{kgCO}_2\text{eq.}/\text{kg-P}_2\text{O}_5$ を用いた。刈草の堆肥化の過程では、窒素量に変化が無いものと仮定し計算した。一般に、国内の河川堤防等で見られる草本のリン含有率は、0.1-0.4%程度⁴⁴であり、堆肥のリン酸含有率は、堆肥化

事例³²を元に0.4%とした。化学肥料および有機堆肥の施肥に伴う炭素と窒素の CH_4 や N_2O への転換率は、IPCC ガイドライン²⁷と同様に区別がないものとし、存置シナリオと同値とした。化学肥料の製造については、GHG 排出量を文献値⁴⁰のまま計上した。

f) バイオガス化シナリオ

バイオガス化シナリオは、刈草を2、3cm程度に破碎後、嫌気性消化槽と発電機を有する既存の下水処理場にて下水汚泥と混合して嫌気性消化し、バイオガスを回収した後、機械脱水した後に焼却して、灰を埋め立てるものとした。回収されたバイオガスは、精製して、ガスエンジンにて発電し、従来の電気と代替することとした。破碎に係る消費電力は、前節の堆肥化と同じとした。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⁴⁶から、それぞれ 7.2 、 $7.6\text{kWh}/\text{m}^3$ とした。刈草の比重は、文献⁴⁷を参考に $220\text{kg}/\text{m}^3$ として計算した。脱水プロセスでは、刈草の含水率が下水汚泥と比べてかなり低いため、刈草が保持していた水分は、脱水後も変化しないことと仮定した。焼却プロセスは、主な形式である流動床式⁴⁸とし、消費電力量は、ごみ焼却の計算モデル³⁴を利用して設定した。施設規模は、規模別施設数で最多帯⁴⁸の $100\text{t}/\text{d}$ とした。

メタンガスの発生条件については、破碎機で2、3cm程度に破碎された刈草を消化した実験結果⁹より、消化ガス発生量 $0.31\text{NL}/\text{gVS}$ 、メタン濃度64%、VS分解率23%とした。メタンガスの低位発熱量およびバイオガスの精製による消費電力量は、それぞれ、 $35.9\text{MJ}/\text{Nm}^3$ 、 $0.387\text{Wh}/\text{NL-CH}_4$ ⁴⁶と設定した。ガスエンジンの発電効率は、一般に25-39%であり⁴⁹、33%として計算した。消化のための加温は、ガスエンジンの排熱利用から賄うものとし、化石燃料の利用は無いものとした。消化後の刈草の高位発熱量は、VS分解率と同じく23%が失われたものとして計算した。

活動に伴って消費される化石燃料、電力、薬品量またはGHG 排出量は、以下に示す各シナリオに基づき、表-2のとおり設定した。

バイオマスが焼却や生物反応によって分解される際には、 CO_2 以外に CH_4 や N_2O が排出される。刈草が焼却や生物分解される際に、バイオマス中の炭素および窒素が表-3の転換率に従い、 CH_4 や N_2O によって転換されるものとした。また、化石燃料と電力の使用によるGHG 排出係数は文献⁵⁰に基づき、化学薬品のGHG 排出係数

は、LCI データベース IDEA ver.1.1⁵¹⁾を参照した。化石燃料、電力、化学薬品の GHG 排出係数は、表-4 に示した。

表-2 刈草の処理に関する各プロセスにおいて消費される化石燃料、電力、薬品量または GHG 排出量(1000m²・除草1回あたり)

プロセス, 消費物	原単位	参照文献
(1)除草・集草		
草刈機ガソリン消費量(L)	14.9	31),32)
(2)焼却(発電無し)		
ごみ焼却場内消費電力(kWh)	36.8	34)
消石灰使用量(kg)	1.8	34)
セメント使用量(kg)	1.3	34)
キレート剤使用量(kg)	0.16	34)
(3)焼却(発電有り)		
ごみ焼却場内消費電力(kWh)	36.1	34)
効率10%時発電量(kWh)	-88.3	34)
効率20%時発電量(kWh)	-177	34)
消石灰, セメント, キレート剤使用量は③と同じ		
(4)最終処分		
浸出水処理の消費電力(kWh)	0.042	34)
浸出水処理の消費重油(L)	0.0036	34)
埋立用重機の消費軽油(L)	0.0080	34)
(5)飼料化		
密封関連機械消費軽油(L)	1.4	40)
輸入飼料の生産運搬に係る GHG(kg-CO ₂ eq.)	-71	41)
(6)堆肥化		
バックホー軽油使用量(L)	4.3	42)
破碎機等消費電力(kWh)	4.9	42)
ホイールローダー軽油使用量(L)	2.2	42)
化学肥料製造(窒素)に係る GHG(kg-CO ₂ eq.)	-6.0	43)
化学肥料製造(リン)に係る GHG(kg-CO ₂ eq.)	-0.79	43)
(7)バイオガス化		
バックホー軽油使用量(L)	4.3	42)
破碎機等消費電力(kWh)	4.9	42)
消化の消費電力(kWh)	7.5	46)
脱水の消費電力(kWh)	7.9	46)
流動床式焼却の消費電力(kWh)	27.8	34)
消石灰使用量(kg)	1.1	34)
セメント使用量(kg)	3.8	34)
キレート剤使用量(kg)	0.46	34)
ガスエンジン発電量(kWh)	-148	49)
浸出水処理の消費電力(kWh)	0.065	34)

浸出水処理の消費重油(L)	0.0055	34)
埋立用重機の消費軽油(L)	0.0158	34)

注意) 刈草の有効利用による排出削減量は、マイナスで表記した。

表-3 各シナリオで採用されたCH₄, N₂O転換率

シナリオ	CH ₄ 転換率 (g-CH ₄ -C/kg-C)	N ₂ O転換率 (g-N ₂ O-N/kg-N)	参照文献
(A)存置	-	6.2	33)
(B)野焼き	5.0	7.0	27)
(C), (C')焼却	0.046	0.35	30), 38)
(D)飼料化	-	6.2	33)
(E)堆肥化	-	6.2	33)
(G)バイオガス化	0.046	0.35	30), 38)

表-4 化石燃料、電力、薬品の使用によるGHG排出係数

対象	CO ₂ (kg)	CH ₄ (g)	N ₂ O(g)	参照文献
ガソリン(L)	2.32	1.87*	0.0215*	50)
軽油(L)	2.58	-	0.0641	50)
重油(L)	2.71	-	0.0665	50)
電力(kWh)	0.550	-	-	50)
消石灰(kg)	1.05	-	-	51)
セメント(kg)	0.86	-	-	51)
キレート剤(kg)	1.37	-	-	51)

*自動車の場合は含まれない

2.4 シナリオ別の GHG 排出量の算定

GHG 排出量と GHG 排出削減量の計算結果を図-2 に示した。これらの合計が、正味の GHG 排出量として評価された。焼却(発電有り)、飼料化、バイオガス化は、正味の GHG 排出量が特に少なくなっていることがわかった。焼却(発電有り)は、発電効率が10%の場合を例示した。20%以上の発電効率を持つごみ焼却施設もわずか(全1,189施設中15施設)に有り⁵²⁾、その場合には、GHG 排出削減量がさらに大きくなる。なお、除草場所から焼却や加工施設や利用先への運搬に伴う GHG 排出量は、含まれていない。除草面積1,000m²から発生した刈草を2トントラックで運搬すると、GHG 排出量が1kmあたり0.38kg-CO₂増加することを考慮する必要がある。

各シナリオに共通の除草・集草プロセスでは、ハンドガイド式草刈機を用いることとしており、GHG 排出量は50.8kg-CO₂であった。シナリオによっては GHG 排出量の半分以上を占めており、刈草の処理方法だけでなく、除草・集草プロセスからの GHG 排出量低減も重要であると考えられた。

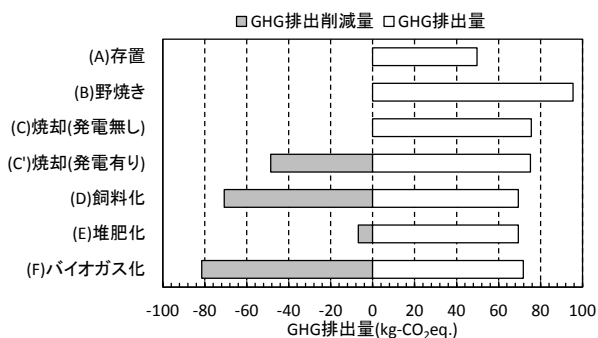


図-2 公共緑地 1000m²から発生した刈草の処理シナリオ別の温室効果ガス排出量と排出削減量

2.5 公共緑地等から発生した刈草の処理による GHG 排出量の算定のまとめ

公共緑地で発生する刈草の性状を整理し、刈草の公共緑地等から発生した刈草の処理（存置、野焼き、焼却(発電無し)、焼却(発電有り)、飼料化、堆肥化、バイオガス化)について、正味のGHG排出量を算定したところ、以下の知見を得た。

- 1) 焼却(発電有り)、飼料化、バイオガス化は、他の処理方法に比べて、正味のGHG排出量が特に少なくなっていた。
- 2) 各シナリオに共通の除草プロセスにおいて、ハンドガイド式草刈機を用いた場合、GHG排出量は50.8kg-CO₂であった。シナリオによってはGHG排出量の半分以上を占めていた。

3. 水草と下水汚泥の混合嫌気性消化に関する実験的検討

3.1 目的

本研究では、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を検討している。特に、近年では、河川・湖沼等の公共用水域で水草が異常発生している⁵³⁾ことを踏まえて、水草の下水処理場での有効利用方法を想定した、水草と下水汚泥の混合嫌気性消化の実験を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 回分式実験

嫌気性消化槽での、濃縮汚泥および水草投入による効果を確認するために、消化汚泥、濃縮汚泥および水草を用いて、消化汚泥のみを添加する系列、消化汚泥に濃縮汚泥のみを添加する系列、消化汚泥に濃縮汚泥と水草の混合比を変化させて添加する系列、ならびに、消化汚泥

に水草のみを添加する系列について、中温条件（35℃）にて回分式嫌気性消化実験を行った。実験に使用した消化汚泥は、茨城県霞ヶ浦浄化センターの濃縮汚泥を基質として、中温条件（35℃）、HRTを20日に設定した嫌気性反応器を連続運転し、そこから得られた余剰消化汚泥とした。実験に使用した濃縮汚泥は、茨城県霞ヶ浦浄化センターで採取したものとした。実験に使用した水草は、2015年6月に、滋賀県琵琶湖の矢橋帰帆島中間水路において刈り取られた後、1か月程度天日乾燥された水草（主にオニビシ）を、ペースト状になるまで粉碎したものをを用いた。

回分式嫌気性消化実験は、ガラス瓶および攪拌機を組み合わせた反応器を用い、消化汚泥400mLを投入し、表-5に示す所定量の濃縮汚泥、水草を添加し、沸騰後冷ました水道水を加えて500mLとした。その後、反応器内を窒素ガスで十分に置換し密栓後、35℃に調整した恒温水槽内に設置し、経時的にメタンガス発生量を測定した。

表-5 回分式嫌気性消化実験における基質の組成

系列名	投入消化汚泥	投入基質 (gVS)	
		濃縮汚泥	水草
1-1	400mL	—	—
1-2	400mL	0.647	—
1-3	400mL	0.647	0.641
1-4	400mL	0.647	1.282
1-5	400mL	—	0.641
1-6	400mL	—	1.282
2-1	400mL	—	—
2-2	400mL	0.837	—
2-3	400mL	0.837	0.418
2-4	400mL	0.837	0.836
2-5	400mL	—	0.418
2-6	400mL	—	0.836

3.2.2 分析方法

消化汚泥、濃縮汚泥、投入水草、実験終了後の培養液の性状分析は、下水試験方法に従って行った。なお、COD_{Cr}の分析は吸光光度計（DR2400、HACH社）により、COD試験薬を用いた。アンモニア性窒素濃度は、自動比色分析装置（TRAACS2000、BRAN LUEBBE社）を用いた。発生メタンガス量の測定は、水上置換方式のガス流量計（BioReactor Simulator AMPTS II、Bioprocess Control）を用いた。

3.3 結果および考察

回分式実験におけるメタン生成量の経時変化を、図-3、図-4に示す。なお、回分式実験で用いた消化汚泥、濃縮汚泥、水草のVSは、1.0%、6.2%、16.9%（系列1）および0.7%、1.3%、16.7%（系列2）であった。濃縮汚泥や水草を投入した系列では、実験開始後1週間程度の間は、メタン発生速度が大きかったが、その後は、基質を投入しなかったブランクの系列と同程度にまで発生速度が低下した。本実験では実験期間を6週間（42日間）に設定し、累積メタン発生量を整理した。表-6に、各系列における累積メタン発生量、他の系列でのメタン発生量を差し引いて計算される水草由来のメタン発生量を示す。さらに、各系列に投入した水草量と、水草由来のメタン発生量の関係を図-5に示す。水草のみを単独で嫌気性消化する場合に比べて、下水汚泥と混合して処理した方が、メタン発生量が大きい結果が得られた。混合処理により、栄養バランスの改善や、下水汚泥の酸発酵で活性化する微生物群により水草の可溶化および酸発酵が促進されることなどにより、水草からのメタン転換が促進されると考えられる。

また、本実験における、投入基質のVSベースのメタン転換率は、濃縮汚泥のみを投入した場合で、0.17～0.21NL/gVSであり、オキシデーションディッチ法の脱水汚泥を用いた嫌気性消化におけるメタン転換率の報告値0.1～0.2NL/gVS⁵⁴⁾と同程度であり、標準活性汚泥法における濃縮汚泥を用いた場合に比べて小さかった。本実験で使用した濃縮汚泥は、PAC添加標準活性法、嫌気無酸素好気法、凝集剤添加循環式硝化脱窒法、担体投入型修正Bardenpho法などの各種の高度処理方式が導入された

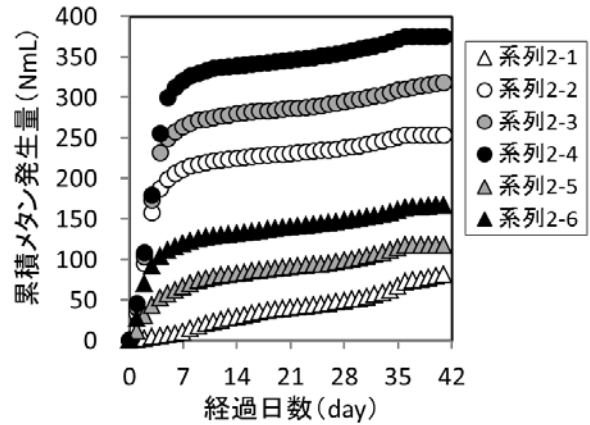


図-4 回分式嫌気性消化実験（系列2）におけるメタン生成量の経時的変化

表-6 回分式嫌気性消化実験におけるメタン発生量

系列名	累積メタン発生量 (NmL)	水草由来メタン発生量 (NmL)	備考 (水草由来メタン発生量の推定方法)
1-1	58.6	—	
1-2	171.8	—	
1-3	263.2	91.4	(1-3) - (1-2)
1-4	346.2	177.4	(1-4) - (1-2)
1-5	129.9	71.3	(1-5) - (1-1)
1-6	224.8	166.2	(1-6) - (1-1)
2-1	81.4	—	
2-2	253.8	—	
2-3	318.5	64.7	(2-3) - (2-2)
2-4	375.0	121.2	(2-4) - (2-2)
2-5	117.9	36.5	(2-5) - (2-1)
2-6	167.2	85.8	(2-6) - (2-1)

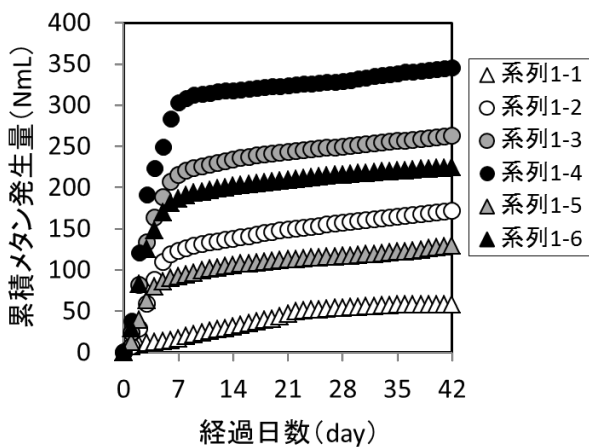


図-3 回分式嫌気性消化実験（系列1）におけるメタン生成量の経時的変化

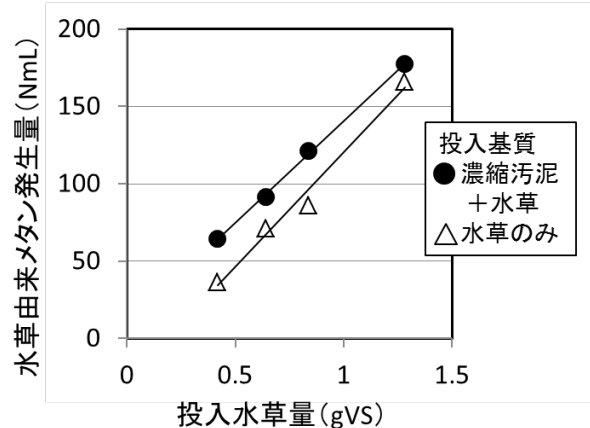


図-5 回分式嫌気性消化実験における投入水草量と、水草由来メタン発生量の関係

下水処理場から採取されたものであり、汚泥性状がメタン転換率に影響を与えていたと考えられる。なお、CODベースメタン転換率は、濃縮汚泥のみを投入した場合で5~9%、水草のみを投入した場合で7~12%、濃縮汚泥と水草を混合して投入した場合で9~16%であった。

4. おわりに

公共緑地等で発生する刈草等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ため、公共緑地で発生する刈草の性状を整理し、刈草の公共緑地から発生した刈草の処理方法（存置、野焼き、焼却(発電無し)、焼却(発電有り)、飼料化、堆肥化、バイオガス化)について、温室効果ガス(Greenhouse gas, GHG)排出量を算定し、焼却(発電有り)、飼料化、バイオガス化は、他の処理方法に比べて、正味のGHG排出量が少なく、有効な利用方法と考えられた。

また、公共用水域で大量に発生する水草バイオマス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、水草と下水汚泥の混合嫌気性消化に関する実験を行った。水草と下水汚泥の混合嫌気性消化実験では、単独消化時よりも混合消化時に、メタンガス生成量が増加することが示された。

謝辞

汚泥採取、水草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

- 国土交通省：河川砂防技術基準維持管理編（河川編）（http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf），2013.
- バイオマス・ニッポン総合戦略，平成18年3月31日閣議決定
- 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.
- 愛知県畜産総合センター：河川敷刈草飼料利用促進の取り組み（<http://www.pref.aichi.jp/0000022559.html>），2009.
- 国土交通省関東地方整備局河川部河川管理課：堤防の刈草無償提供（http://www.ktr.mlit.go.jp/river/shihon/river_shihon00000127.html）.
- 道路緑化保全協会：植物発生材堆肥化の手引き—緑のリサイクルの実現を目指して，1998.
- 環境省九州地方環境事務所：野草堆肥利用マニュアル，平成18年3月，2006.
- 独立行政法人土木研究所：下水道施設におけるバイオガスの完全利用に関する調査，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，pp.1-16，2010.
- 独立行政法人土木研究所：下水処理場の再生可能エネルギー供給拠点化方策検討調査，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，pp.1-39，2011.
- 閣議決定：バイオマス活用推進基本計画，2010.地球温暖化対策の推進に関する法律（平成十年十月九日法律第百十七号）、第20条の1第1項、最終改正：平成二六年五月三〇日法律第四二号
- 社団法人道路緑化保全協会、植物廃材堆肥化技術暫定指針（案）、平成7年3月
- 新潟市：中部下水処理場混合消化施設受入事務に係る要綱を制定しました、新潟市ホームページ <https://www.city.niigata.lg.jp/kurashi/jyogesuido/gesui/work/konngoushouka.html>、2016.2.17
- 山本 茂浩：バイオガス発電 刈草等と下水汚泥の混合消化と消化ガス発電について（新潟市）（特集 下水道の創エネルギー）月刊下水道 38(3)，pp.48-51，2015.
- 山崎憲人・杉浩行：河川堤防の刈草を活用した下水汚泥の混合消化ガス発電の経済性と環境負荷軽減の検討、平成26年度・北陸地方整備局・事業研究発表会、pp.1-5，2014.
- バイオマス産業エネルギー研究所、BTS社のバイオガス発電システム、<http://www.zenkei.ne.jp/pdf/biomass.pdf>
- Michael Kottner：How to built Grass based ecological Biogas Plants?、International Biogas and Bioenergy Center of Competence、2012. <http://www.docme.ru/doc/409319/how-to-build-grass-based-ecological-biogas-plants-%3F>
- Martin Elsaber, Jorg Messner, Ulrich Keymer, Reinhard Robberg, Frank Setzer：Biogas from Grass、DLG Expert Knowledge Series 386，2012.
- 高梨勝：河川堤防刈草を有効活用した乳牛用発酵TMR 飼料の利用技術、畜産技術 701，pp.13-17，2010.

- 19) 須藤吉康、江藤哲雄：河川堤防刈り草を有効活用した乳牛用発酵 TMR 飼料の開発による牛生産コスト削減効果の評価、河川堤防刈草の有効活用、pp. 39-48, 2013.
- 20) 島根県土木部道路維持課：「神話の国しまね」新たな維持管理への挑戦、道路行政セミナー（河川堤防の刈草を家畜の飼料に）、pp.5-6、2009.
- 21) 島根県畜産技術センター、畜産技術普及グループ：土木部との連携により、道路の刈草を家畜の飼料に、畜産技術レポート、2010.
- 22) さいたま統計・情報センター：堤防除草で発生する刈草を堆肥化、さいたま統計・情報センター情報収集資料（公開資料）
- 23) 亀山市：亀山市一般廃棄物処理基本計画（ごみ処理基本計画編）平成 23 年 3 月、
- 24) 日本エヌ・ユー・エス株式会社：ごみ減量化検討事前調査業務報告書 平成 24 年 3 月、三重県
- 25) 伊坪徳宏、田原聖隆、成田暢彦：LCA 概論、社団法人産業環境管理協会発行、2007
- 26) IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995 (SAR), 1995.
- 27) IPCC: Reporting Instructions, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1996.
- 28) 独立行政法人土木研究所：土木研究所資料 4157 号、pp.38-46、2009
- 29) 日本エネルギー学会編：バイオマスハンドブック、オーム社、2002.
- 30) 社団法人全国都市清掃会議編：ゴミ処理施設整備の計画・設計要領 2006 改訂版、p.33、2006.
- 31) 公園・緑地維持管理研究会編集：公園・緑地の維持管理と積算 改訂 4 版、財団法人経済調査会発行、2005.
- 32) 一般財団法人建設物価調査会発行：国土交通省土木工事標準積算基準書(河川・道路編)平成 25 年度(10 月改正)、2013.
- 33) 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編、環境省地球環境局総務課低炭素社会推進室 監修：日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2013 年 4 月、2013.
- 34) 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.
- 35) 田畑 智博、李 一石、菱沼 竜男、楊 翠芬：統計資料を用いた一般廃棄物焼却施設の LCI データ簡易算定法に関する検討、第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集、2010.
- 36) 楊翠芬、田畑智博、菱沼竜男、玄地裕：廃棄物由来 CO2 排出量を考慮した焼却施設の LCA 手法の検討—千葉県を事例に、都市清掃、61(283)、pp.235-241、2008.
- 37) 環境省：平成 24 年一般廃棄物処理実態調査結果 (http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h24/index.html)、2014.
- 38) 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会：温室効果ガス排出量算定に関する検討結果 廃棄物分野における算定方法の改善について 平成 22 年 3 月 (<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/ken-to/h2203/7.pdf>)、2010.
- 39) 中井里香、朝倉康夫、松田浩典、倉田佳洋、西野 治、億 正樹：河川敷野草の飼料化への試み(第 1 報)、奈良県畜産技術センター研究報告第 39 号、pp.1-12、2015.
- 40) 農業機械学会：農業機械による環境保全機能向上のための調査研究、1992.
- 41) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」：バイオマス利活用システムの設計と評価、資料 2 輸入飼料の地域別ライフサイクル・エネルギー消費量および GHG 排出量データベース、pp.253-261、2006.
- 42) 藤原宣夫：植栽樹木の二酸化炭素固定量からみた都市緑化施策の評価に関する研究、千葉大学学位申請論文、2005.
- 43) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」：バイオマス利活用システムの設計と評価、第 IV 部バイオマス利活用システムの評価手法、pp.163-183、2006.
- 44) 独立行政法人土木研究所：草木系バイオマスの組成分析データ集、土木研究所資料 4095 号、2008.
- 45) 国土交通省荒川上流河川事務所、肥料取締法に基づく表示「荒川緑肥」(平成 26 年 1 月生産)、埼玉県特肥 428 号、2014.
- 46) 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)、pp.6-15、2010.
- 47) 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.
- 48) 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.
- 49) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン 一改訂版一 (<http://www.mlit.go.jp/common/001083170.pdf>)，2015.
- 50) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル (Ver3.5)，2014.
- 51) 産業技術総合研究所，産業環境管理協会：LCI データベース IDEA ver.1.1, MiLCA ガイドブック，2012.
- 52) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：一般廃棄物の排出及び処理状況等(平成 24 年度)について、2014.3
- 53) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター：南湖生態系の順応的管理に関するサイエンスレポート，平成23～25 年度南湖生態系の順応的管理方法に関する研究の成果報告書，2015
- 54) 日高平，對馬育夫，津森ジュン，南山瑞彦，下水の脱水汚泥性状が中温嫌気性消化に及ぼす影響，土木学会論文集 G (環境)，Vol.71, No.7, pp.III_27-III_37, 2015.

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 : Materials and Resources Research Group

Author : MINAMIYAMA Mizuhiko, OKAYASU Yuji, SAKURAI Kensuke

Abstract : In order to develop a sustainable technology and system of using grass waste generated from public green space as a global warming prevention measure, we have been conducted the following studies. Amounts of total greenhouse gas emissions by each seven disposal processes, namely retaining in a field, burning in a field, incinerations with/without power generation, utilization as coarse feed, composting, and co-digestion with sewage sludge, were calculated. As the result, amounts of total greenhouse gas emission by incineration with power generation, utilization as coarse feed and co-digestion with sewage sludge were less than those of other disposal processes. Applicability of reaped waterweed in lake to co-digestion with sewage sludge was demonstrated in laboratory-scale experiments. Co-digestion of reaped waterweed with sewage sludge promoted the methane production yield.

Key words : Global warming prevention, Greenhouse gas, Grass waste, Co-digestion of reaped waterweed with sewage sludge