

10 下水道施設を核とした資源・エネルギー有効利用に関する研究

研究期間：平成 28 年度～33 年度

プログラムリーダー：材料資源研究グループ長 渡辺博志

研究担当グループ：材料資源研究グループ（資源循環担当）

1. 研究の必要性

循環型社会の構築に向けて、再生可能なエネルギーに対する期待が高まっている。平成 26 年に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、再生可能エネルギーの一つとして、下水汚泥の有効活用の推進の方針が示されている。国土交通省が定めた「新下水道ビジョン」では、下水処理場での資源集約・エネルギー供給拠点化・自立化が中期目標として示され、下水汚泥と他のバイオマスとの混合処理や、下水中の栄養塩類を用いた有用藻類の培養・エネルギー抽出等の新たな技術開発を推進することとされている。一方で、例えば河川事業などで発生する刈草や伐木といったバイオマスも、単に廃棄せず有効活用を図ることが求められている。特に下水処理施設においてバイオマスを受け入れ、下水処理に必要となるエネルギーとして効率的に使用することが期待されている。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、バイオマスエネルギー生産手法の開発として、下水を利用した藻類培養の高効率化を図るとともに、培養藻類の回収、濃縮、脱水技術の高度化の研究を行う。得られた培養藻類・水草と下水汚泥の混合物について、石炭代替固形燃料化等への適用性の検討も行う。また、草木バイオマス有効利用技術の開発として、剪定枝等を下水処理場の汚泥焼却の補助燃料に活用する技術、刈草を汚泥脱水助剤として適用する技術の検討を行う。これらを本研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

(1) バイオマスエネルギー生産手法の開発

(2) 下水道施設を活用したバイオマスの資源・エネルギー有効利用方法の開発

このうち、平成 29 年度は(1)、(2)について実施している。

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、平成 29 年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) バイオマスエネルギー生産手法の開発

下水道を核とした資源回収、エネルギー生産およびエネルギー利用技術の開発を目指し、下水道資源を用いた藻類培養技術の高効率化に関して調査・研究を行った。下水を用いた藻類培養では、藻類回収量の高効率化のために、培養槽の形状の検討を行った。また、培養した藻類のエネルギー化について、簡易的にエネルギー収支の試算を行った。さらに、汚泥処理工程で発生する排水を利用した藻類培養技術の開発に関して調査・研究を行った。以下に、平成 29 年度に得られた成果を示す。

- ・屋外での活性汚泥の初沈流出水を用いた連続藻類培養において、上部開放レースウェイと密閉縦型槽の装置での藻類培養状況の比較を行った。その結果、密閉縦型槽では、上部開放レースウェイと比較して、冬季において、10℃程度高い水温を維持することが可能であり、培養槽の SS を約 2 倍程度の濃度で培養できることが示された。栄養塩除去率、COD 除去率は、どちらの装置においても、同程度見込まれることが示された。
- ・培養藻類のエネルギー化について、消費エネルギーおよび生産エネルギーの簡易的な収支試算を行った結果、嫌気性消化への投入により、エネルギー生産が可能であることが示された。
- ・嫌気性消化脱離液を下水で希釈した溶液を基質として、HRT を 8.4 日、16.8 日に設定した 2 系列の上部開放

型カラム型藻類培養水槽を用いて、3月～10月の間、太陽光の下で、回分式継代藻類培養を実施した。実験期間中の各系列の溶解性窒素の平均除去率は63%、95%、溶解性リンの平均除去率は89%、97%、藻類培養液1Lあたりの平均余剰藻類生産速度は25.5mgSS/L・d、22.9mgSS/L・dであった。

(2) 下水道施設を活用したバイオマスの資源・エネルギー有効利用方法の開発

下水道施設を活用したバイオマスの資源・エネルギー有効利用方法の開発を目指し、河川・道路等の管理で生じる草木バイオマスを下水処理場内で利用する方法に関して調査・研究を行った。剪定枝を下水污泥焼却炉の補助燃料として活用するための乾燥方法について文献調査等を行った。刈草を污泥脱水助剤として活用した場合の、河川事業、下水道事業での刈草処分にかかるコスト試算を行った。また、刈草の嫌気性消化の効率改善のために、前処理手法に関して調査・研究を行った。以下に、平成29年度に得られた成果を示す。

- ・剪定枝を下水污泥焼却炉で活用する技術について、自然乾燥には多大な用地と時間を要する。自然乾燥が困難な場合には、白煙防止空気の余剰分が強制乾燥に利用可能であると考えられた。
- ・刈草を污泥脱水助剤として適用する技術において、河川事業における刈草処分費は、焼却処理するよりも破碎処理後に下水処理場へ受け渡す方が削減できる可能性が示された。下水道事業における污泥処分費は、下水処理場外での焼却処分を想定した場合、凝集剤1.0%、刈草10%を混合して脱水を行うことで、污泥処分費が削減できる可能性が示された。
- ・刈草の嫌気性消化の前処理手法として、凍結解凍手法について検討した。模擬刈草と見立てた緑藻と下水污泥との混合消化（中温消化）によるメタン転換ポテンシャルを評価したところ、凍結解凍操作によりメタン発生ポテンシャルを著しく低下させる結果となり、前処理手法としては不適當であることがわかった。

RESEARCH ON EFFECTIVE USE OF RESOURCES / ENERGY FOCUSING ON SEWAGE FACILITIES

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Materials and Resources Research Group
WATANABE Hiroshi

Research Group : Materials and Resources Research Group (Recycling)

Abstract : There is a growing expectation for renewable energy towards building of a recycle-oriented society. "Basic Energy Plan" that was approved by the Cabinet in 2014, shows the promotion policy of effective use of the sewage sludge as one of the renewable energy. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has set "New sewage works vision" and it shows resource intensive, energy supply base and self-reliance sewage treatment plants as a medium-term goal. It includes facilitation of new technological development such as mixing process of sewage sludge and other biomass and extraction methods of useful algae using nutrients in the sewage. On the other hand, for example, biomass such as mowed grass and logging produced in rivers are required to be used without simply disposing. In particular, the sewage treatment facilities are expected to accept biomass and use as energy required for sewage treatment.

In this program, in light of these circumstances, we develop production methods for biomass energy and aim to achieve highly efficient algae culture using the treated wastewater and embark on the studies in advanced technologies for collection, concentration and dehydration for algae culture. We also examine the applicability of mixture of algae culture/water plants and sewage sludge to the coal alternative solid fuel. Technology for utilization of wood chips and pellets as dehydration agent for sewage sludge is also a part of our research.

Key words : biomass, energy, sewage sludge, algae culture

10.1 バイオマスエネルギー生産手法の開発

10.1.1 下水含有栄養塩を活用したエネルギー生産技術の開発に関する研究

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：重村浩之、岡安祐司、山崎廉予

【要旨】下水道を核とした資源回収、エネルギー生産およびエネルギー利用技術の開発を目指し、下水道資源を用いた藻類培養技術の高効率化や、水草と下水汚泥の混合消化特性に関して調査・研究を行った。下水処理水を用いた藻類培養では、上部開放レースウェイ型培養槽よりも、密閉縦型培養槽を用いることで、冬季の藻類培養量が増加することが明らかとなり、藻類培養量の高効率化が見込まれることが示唆された。嫌気性消化脱離液を用いた藻類培養では、下水で希釈した溶液を基質として、HRTを8.4日、16.8日に設定した2系列のカラム型藻類培養水槽を用いて、3月～10月の間、太陽光の下で、回分式継代藻類培養を実施した。実験期間中の各系列の溶解性窒素の平均除去率は63%、95%、溶解性リンの平均除去率は89%、97%、藻類培養液1Lあたりの平均余剰藻類生産速度は25.5mgSS/L・d、22.9mgSS/L・dであった。

キーワード：下水道資源、藻類培養、消化脱離液、バイオマス、混合嫌気性消化

1. はじめに

新下水道ビジョンでは、下水処理場での資源集約・エネルギー供給拠点化・自立化が中期目標として示されている¹⁾。下水汚泥中には食品残渣並びにその代謝物として高濃度の栄養塩が存在しており、これらを回収して資源利用する手法を検討する必要がある。また、下水処理水中の低濃度の栄養塩についても、閉鎖性水域など高濃度の栄養塩が問題となっている地域においては、除去することで放流先の公共用水域の水質改善につながることから、極力有効利用することが望ましいと考えられる。これらに対し、下水汚泥と他のバイオマスとの混合処理や、下水に含まれる栄養塩類を用いた有用藻類の培養、培養藻類からのエネルギー抽出等の新たな技術開発を推進することで、対策が可能であると考えられる。

これらの達成に向け、本研究では、「下水処理水を利用した藻類培養の高効率化、培養藻類の回収、濃縮、脱水技術の開発」、「下水処理水放流先に生育する水草の、下水汚泥と混合処理技術の開発」、「汚泥処理工程で発生する排水を利用した藻類培養技術の開発」、「培養藻類・水草と下水汚泥の混合物について、石炭代替固形燃料化への適用性調査およびメタン発酵（嫌気性消化）の特性解明調査」を目的とする。

2. 下水処理水を利用した藻類培養の高効率化、培養藻類の回収、濃縮、脱水技術の開発

化石燃料の枯渇への懸念、化石燃料利用にとまなう

地球温暖化を背景に、再生可能エネルギーの利用が推進される現代において、藻類を用いたエネルギー生産に大きな注目が集まっている。近年では、都市下水や工場排水に豊富に含まれる窒素、リンといった栄養塩を用いた藻類培養の試みが実施されてきている²⁾³⁾。日本のように下水道システムが広く普及している国々では、下水処理場内に流入してくる栄養塩や、焼却炉や消化ガス由来CO₂、下水熱など下水処理場が有する資源および下水処理場における土地や施設などのストックを活用した藻類培養によるエネルギー生成が期待される。

既往研究において⁴⁾⁵⁾⁶⁾ボトリオコッカスやクロレラなどのオイル含量の高い特定藻類や、ユーグレナなどの高機能物質を生産する特定藻類などを対象に、下水処理水等を用いた培養が実施されているが、これら特定の藻類の培養は、実環境下での適用性、大規模化に課題が残る。これに対し本研究室では、特定藻類の接種は行わず、下水処理水を直接培養液として用い、与えられた環境条件で優占する土着藻類（以下、藻類と記述）の培養技術の確立および培養藻類のエネルギー利用手法の検討を行ってきた。その結果、下水の初沈流出水や二次処理水による藻類培養が可能であることなどを示してきた⁷⁾⁸⁾。本研究では、下水処理水によるさらなる藻類培養の高効率化、培養藻類の回収、濃縮、脱水技術の開発を目的とし、培養装置の検討、培養基質のSS分の存在の検討を行った。

2. 1. 藻類培養装置の検討

2. 1. 1. 藻類培養状況の比較

藻類培養の高効率化において、培養装置の形状を検討した。本研究室ではこれまで、屋外に設置した 380L の上部開放レースウェイ型培養槽（図-1）において、土着藻類の培養が可能であることを明らかにしてきた^{7,8)}。レースウェイ型で藻類培養を行う場合、水槽を製作するよりも、建設コストを抑えられる利点があるが、上部開放であるため、天候の影響を受けやすく、特に冬季は水温の低下から、藻類培養量の低下が懸念される。また、光を取り込むために、20~30 cm 程度の浅い高さにしなければいけないことから、大規模培養するためには、広い敷地面積が必要となる欠点がある。

そこで本研究では、天候の影響を受けにくい密閉型で、かつ培養に必要な敷地面積を削減可能な縦型培養槽（図-2）での藻類培養を試みた。有効容積 50L（高さ 0.5 m、横 0.5m、幅 0.1m）の培養槽を用いた。装置の想定設置場所は、処理場内の建物の壁や外壁等とし、太陽エネルギーは、一面（0.5m×0.5m）から取り入れることを期待している。また、培養槽の後段に 50L の沈殿槽を設置し、重力濃縮により、培養藻類の回収を行った。また、沈殿槽からの排水を処理水とした。冬季の期間（11月~1月）は、培養槽の集光を期待しない一面（0.5m×0.5m）に設置した幅 0.01m の加温槽に、A 処理場の下水処理水をかけ流し、下水処理水熱を利用して、培養槽の加温を行った。

密閉縦型槽と藻類培養量を比較するため、上部開放レースウェイ型培養槽での藻類培養も同時に行った。培養槽の後段には、32L の沈殿槽を設置し、重力濃縮により、培養藻類の回収を行った。また、沈殿槽からの排水を処理水とした。冬季の期間（11月~1月）は、培養槽内に巻いたチューブに A 処理場の下水処理水をかけ流し、下水処理水の熱を利用して、簡易的な培養槽の加温を行った。

培養基質は、A 処理場の流入水を A 下水処理場内の実験施設に設置された標準活性汚泥処理装置（曝気槽有効容積：100 L）の最初沈殿池を通過した後の初沈流出水とした。CO₂ は、純炭酸ガスボンベ（体積比率：99.95%）を使用し、pH コントローラー（NPH-660NDE、日伸理化、日本）を用いて、pH8 に制御しながら添加した⁷⁾。また、培養槽内の藻類濃度が均一になるように、攪拌機による攪拌を常に行った。培養期間は、2017 年 6 月から 2018 年 1 月とした。

分析項目は、流入基質、培養液、処理水の SS、流入基質、培養液のクロロフィル a、水質（COD、アンモ



図-1 上部開放レースウェイ型培養槽



図-2 密閉縦型培養槽

ニア性窒素 (NH₄-N)、リン酸態リン (PO₄-P) とした。分析頻度は、基本的に週 1 回とした。1 週間に一度、沈殿槽から藻類の引き抜きを行っており、TS（固形物濃度）、VS（有機物濃度）を定期的に測定した。

各装置での藻類培養における、流入水、培養液の SS とクロロフィル a、水質分析結果 (COD、NH₄-N、PO₄-P) を図-3 に示す。夏季（6~7 月）、秋季（10 月）、冬季（11~12 月）の 3 つの期間に分けて、それぞれの平均値として示した。図-4 に、各装置での水温の経時変化を示した。上部開放レースウェイ型培養槽については、冬季に加温をしていない 2016 年の結果も合わせて示した。

上部開放レースウェイ型培養槽において、夏季（6 月~7 月）では水温が 20~30℃ と高いこともあり、SS が 300mg/L 程度で培養できていた。秋季（10 月）は、夜間の水温が 10℃ 程度まで下がることもあり、流入水に対して、培養槽での培養液の SS の増加は見られなかった。クロロフィルにおいても、0.5mg/L 程度まで減少してしまった。上部開放レースウェイ型培養槽の

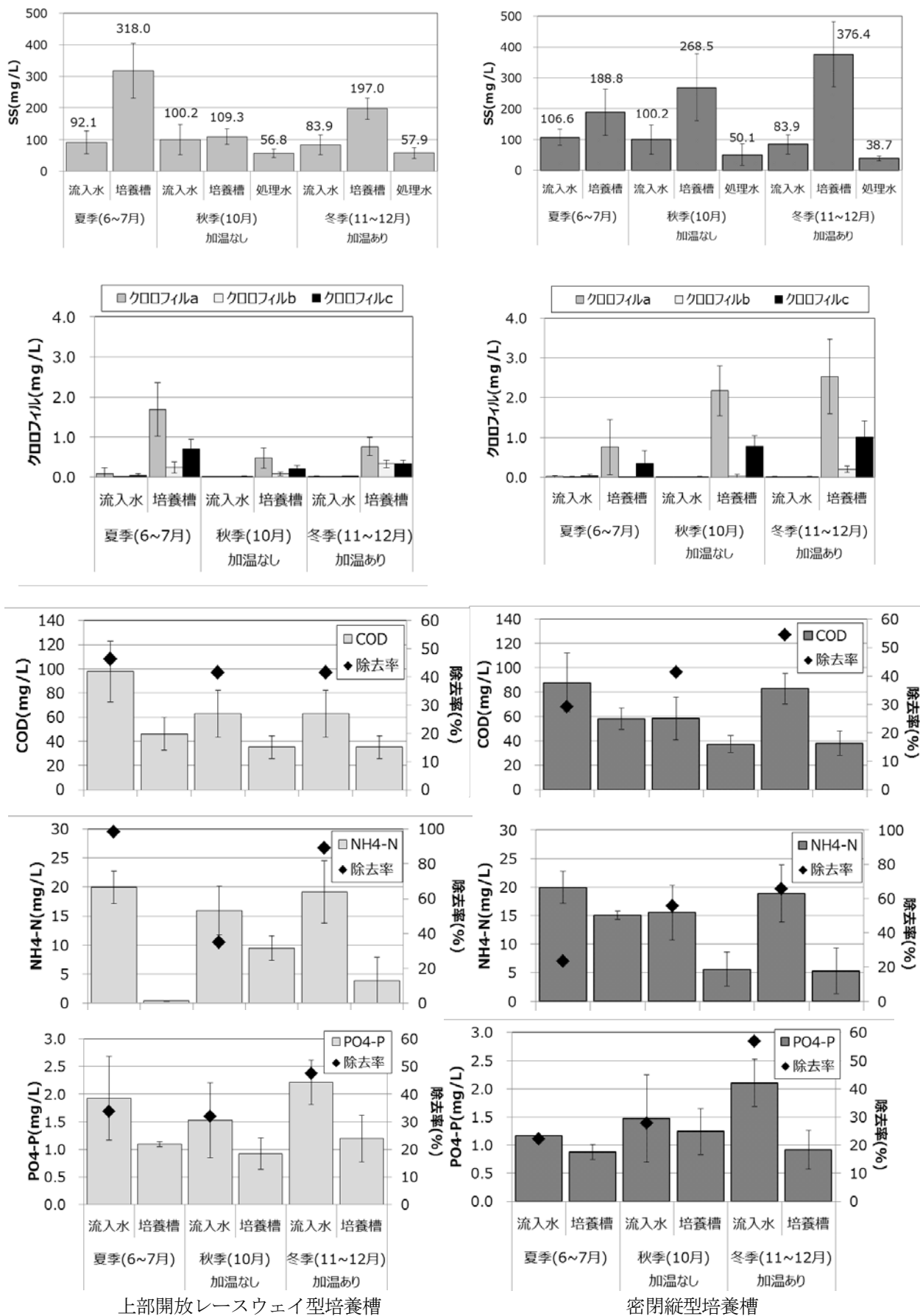


図-3 上部開放レースウェイ型培養槽と密閉縦型培養槽の流入水、藻類培養液のSS、クロロフィル a、水質

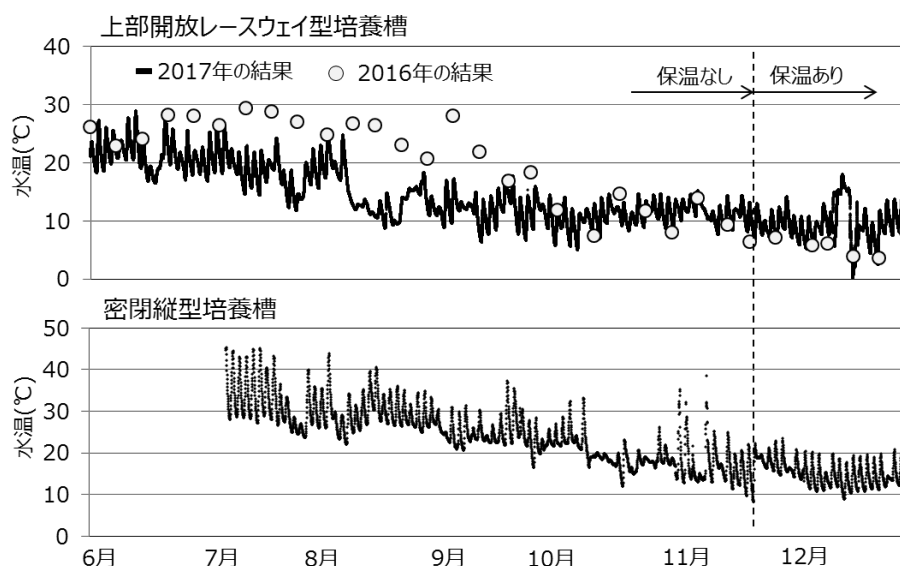


図4 上部開放レースウェイ型培養槽と密閉縦型培養槽の水温の経時変化（2016年、2017年）

2016年の結果は日中に測定した水温であり、2017年は、30分毎に24時間計測を行った結果である。図4より、2016年の冬季の日中の水温は、2017年の培養槽の夜間の最低水温と同程度であることがわかる。よって、簡易的な加温により、水温の低下を防げたことが示された。

密閉縦型培養槽は、2017年6月より装置を立ち上げたため、夏季におけるSSは、200mg/L程度と、上部開放レースウェイ型培養槽よりも低かった。水温は、30～40℃程度で上部開放レースウェイ型培養槽よりも、10℃程度高い温度で培養できていた。冬季においても、上部開放レースウェイ型培養槽よりも10℃近く高い水温で保持できており、日中は、20℃程度まで上昇したため、SSも350mg/Lと高濃度で藻類培養が可能であることが示された。

処理水のSSは、上部開放レースウェイ型培養槽においては、秋季の培養液のSSの1/2、冬季の培養液のSSの1/3程度で排水できていた。また、密閉縦型槽では、秋季では、培養槽の培養液のSSの1/5、冬季では、1/10程度で排水できていたが、いずれも処理場外への排水ができるレベルまでは減少しなかった。このため、そのまま系外へ排水する場合は、凝集剤添加やろ過、遠心等の処理が必要となると考えられる。その他の手法として、水処理系へ排水を返流する手法も考えられるため、藻類を含んだ水を水処理系へ流入させる場合の、活性汚泥への影響等を調査する必要があると考えられる。

図3において、クロロフィルの結果をみると、上部開放レースウェイ型培養槽と密閉縦型培養槽で、クロ

ロフィルbとクロロフィルcの割合が異なることがわかる。クロロフィルbは、緑藻に主に含まれており、クロロフィルcは、主に、珪藻に含まれる。密閉縦型培養槽では、上部開放レースウェイ型培養槽と比較して、緑藻が減少し、珪藻が安定的に保持される傾向があることがわかる。珪藻には殻があり、緑藻と比較して、動物プランクトンに捕食されにくい傾向がある。水温を安定的に保つことができ、気候の影響を受けにくい密閉縦型培養槽においては、動物プランクトンも高濃度で生息できると考えられ、通年を通して緑藻が動物プランクトンに捕食されたため、緑藻と珪藻の割合が、上部開放レースウェイ型培養槽と異なったのではないかと考えられる。これらについては、植物プランクトン、動物プランクトンの種類や細胞数を計測することで、明らかにすることができると考えられるため、今後検証を行っていく。

藻類培養における水質の変化は、上部開放レースウェイ型培養槽において、夏季のCOD除去率、NH₄-N除去率、PO₄-P除去率は、それぞれ46%、98%、34%程度であり、加温を行った冬季では、それぞれ42%、89%、47%程度であった。密閉縦型培養槽においては、夏季のCOD除去率、NH₄-N除去率、PO₄-P除去率は、それぞれ29%、23%、22%程度であり、加温ありの冬季では、それぞれ55%、66%、57%程度であった。密閉縦型培養槽では、夏季の藻類培養が安定しなかったため、各除去率が低かった。冬季においては、両装置において、窒素除去率に若干差がみられるが、どちらの装置もほぼ同程度のCOD、栄養塩除去率であることが示された。

2. 1. 2. 培養藻類の回収

冬季において、沈殿槽での重力濃縮による、培養藻類の回収量(10~20L)と液中 TS 濃度を測定した。培養槽の培養液の TS と、沈殿槽での沈殿藻類 (1 週間で沈殿した分) の TS を測定した結果、上部開放レースウェイ型培養槽では、それぞれ 0.058 (±0.039) %、0.43 (±0.17) % であり、1 週間で、約 7.5 倍に濃縮された藻類が 10~20L 程度 (培養槽 1L あたり、0.03L ~0.05L) 回収できる結果となった。密閉縦型培養槽では、それぞれ 0.079 (±0.013) %、0.4 (±0.25) % であり、1 週間で約 5 倍に濃縮された藻類が 10~20L 程度 (培養槽 1L あたり、0.2~0.4L) 回収できる結果となった。本研究では、上部開放レースウェイ型培養槽と密閉縦型培養槽で同程度の濃度の藻類が回収できる試算であるが、培養槽 1L あたりで換算すると、密閉縦型槽の方が、効率よく回収できる試算となった。回収効率は、沈殿槽の容積(面積)にも影響されるため、培養槽と沈殿槽の容積の関係についても、検証していく必要がある。また、回収藻類の TS 濃度は、消化汚泥に投入するバイオマスとしては低いと考えられ、消化槽に投入する濃縮汚泥と同程度の TS1%~3%にするためには、さらに 2~7 倍は濃縮する必要があると考えられる。これに対しては、沈殿槽の面積を大きくして、水面積負荷を下げることや、凝集剤の投入、遠心分離機などの使用で濃縮効率を上げる等の対応が必要であると考えられる。培養藻類を消化槽へ投入する際に適切な TS 濃度について今後検証し、適切な回収方法を検討していく。

2. 1. 3. 培養藻類のエネルギー化

培養藻類のエネルギー化として、藻類と汚泥の混合嫌気性消化によるメタンガス発生量の増加を想定し、冬季の藻類培養における、嫌気性消化槽へ投入した場合の消費エネルギーと生産エネルギーの収支の試算を簡易的に行った。

消費エネルギーにかかわる項目は、培養槽への流入ポンプ (180 kJ/m³槽容量/日)、培養槽の攪拌 (144 kJ/m³槽容量/日)、回収時のかき寄せ機 (144 kJ/m³) の消費電力、嫌気性消化における加温、攪拌等の消費電力 (19,080 kJ/m³) とした。培養槽への流入量を 10,000m³/日、HRT4 日、培養槽の容積を、40,000m³と設定した。回収方法は重力濃縮とし、回収率 0.76、濃縮倍率 58⁷⁾とした場合、回収時の容量は 131m³/日であった。

上部開放レースウェイ型培養槽では、培養藻類による総生産エネルギーは、藻類の培養量(197mg/L)と高

位発熱量 (16.2kJ/g-dry) のより、31,914 MJ/日と試算され、回収率 0.76 より、回収エネルギーは、24,255 MJ/日と試算された。最終的な生産エネルギーは、メタン転換率 (0.51) をかけることで、12,370MJ/日と算出された。消費エネルギーは、8,279 MJ/日と試算され、4,091 MJ/日のエネルギーが回収できる試算結果となった。

密閉縦型培養槽では、培養藻類による総生産エネルギーは、藻類の培養量(376mg/L)と高位発熱量 (16.2kJ/g-dry) より、60,912 MJ/日と試算され、回収エネルギーは、46,293 MJ/日と試算された。最終的な生産エネルギーは、メタン転換率 (0.51) をかけることで、23,609 MJ/日と算出され、消費エネルギーは、8,279 MJ/日と試算され、15,330 MJ/日のエネルギーが回収できる試算結果となった。

これらの結果を図-5 に示す。簡易的なエネルギー収支の試算の結果、上部開放レースウェイ型培養槽、密閉縦型培養槽ともに、培養藻類を嫌気性消化へ投入することにより、エネルギー生産が可能とであることが示された。

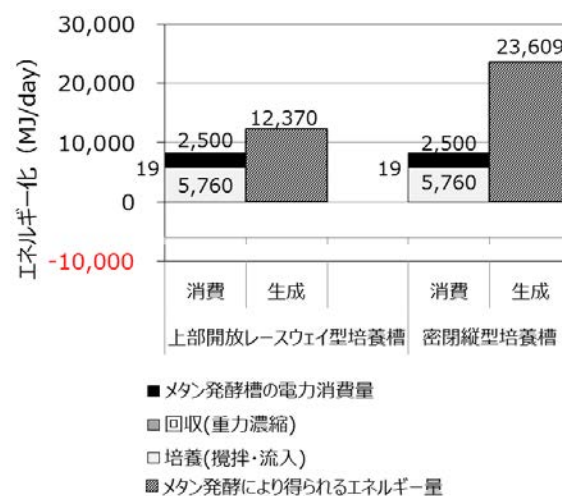


図-5 培養藻類エネルギー化 (嫌気性消化) におけるエネルギー収支 (冬季)

3. 汚泥処理工程で発生する排水を利用した藻類培養技術の開発

3. 1. 目的

本研究では、下水を用いて培養した藻類や、下水処理場の放流先水域に発生する水草を、下水処理場にて下水汚泥と混合し、嫌気性消化によりエネルギーを回収する手法の開発を目的としている。

既往の調査研究の結果、下水処理水による藻類培養が可能であることが示された。下水処理場には、下水処理水以外にも、窒素やリンなどの栄養塩を豊富に含む工程水が存在する。そこで本研究では、これらを対象とした藻類培養技術について検討する。まず、手始めとして、汚泥の減容化のために用いられている消化工程で発生する消化汚泥を脱水した際に得られる消化脱離液を対象とした藻類培養技術の開発について検討した。新たに開発する技術の概略を図-6に示す。

3. 2. 実験方法

消化脱離液は、下水処理方式：標準活性汚泥法、汚泥処理方式：中温嫌気性消化を採用している B 下水処理場より採取し用いた。なお、消化脱離液は、藻類培養への阻害を考慮し、他の工程水を用いて希釈することとし、一部合流式を含む分流式の A 下水処理場へ流入した下水を、最初沈殿池実験装置で処理し、さらに、部分循環式嫌気性ろ床実験装置にて処理を行った処理

水を希釈水として用いた。藻類培養は、内径 20cm、厚さ 1cm、長さ 1m の透明アクリル管を鉛直に立て、底面部分に排出口を設けた上部開放型のカラム型藻類培養装置を用い、茨城県つくば市内の温室内で実施した。藻類培養方法は回分式とし、培養開始時に、消化脱離液と嫌気性ろ床流出水の混合液と、前回の培養終了時の培養液の一部を、カラム型藻類培養装置に投入し、その後は、一定の培養期間（1 週間または 2 週間）を設定し放置した。それぞれの系列の水理学的滞留時間（HRT）は、8.4 日、16.8 日となる。培養液の攪拌は、常時、小型のエアレーション装置にて行った。消化脱離液と嫌気性ろ床流出水の混合比は、あらかじめ各溶液中の溶解性リン濃度を測定し、混合液の濃度が 4mg-P/L になるように設定した。前回の培養終了時の培養液は、混合液に対して、1/5 の容積の溶液を投入し、合計で 30L になるように調整した。温室での実験に先立ち、室温 15~20℃の実験室内に、蛍光灯により 1 日あたり 12 時間、側面から光（光量子密度：約 165 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）を照射する 5L のビーカー 2 系列を設置し、消化脱離液、嫌気性ろ床流出水、および別の実験で、下水処理水を用いて培養した藻類培養液を投入し、1 週間の培養後、温室内で実施する実験と同様の要領で、培養期間 1 週間の回分式藻類継代培養を 3 回実施し、得られた培養液を、温室での実験に用いた。さら

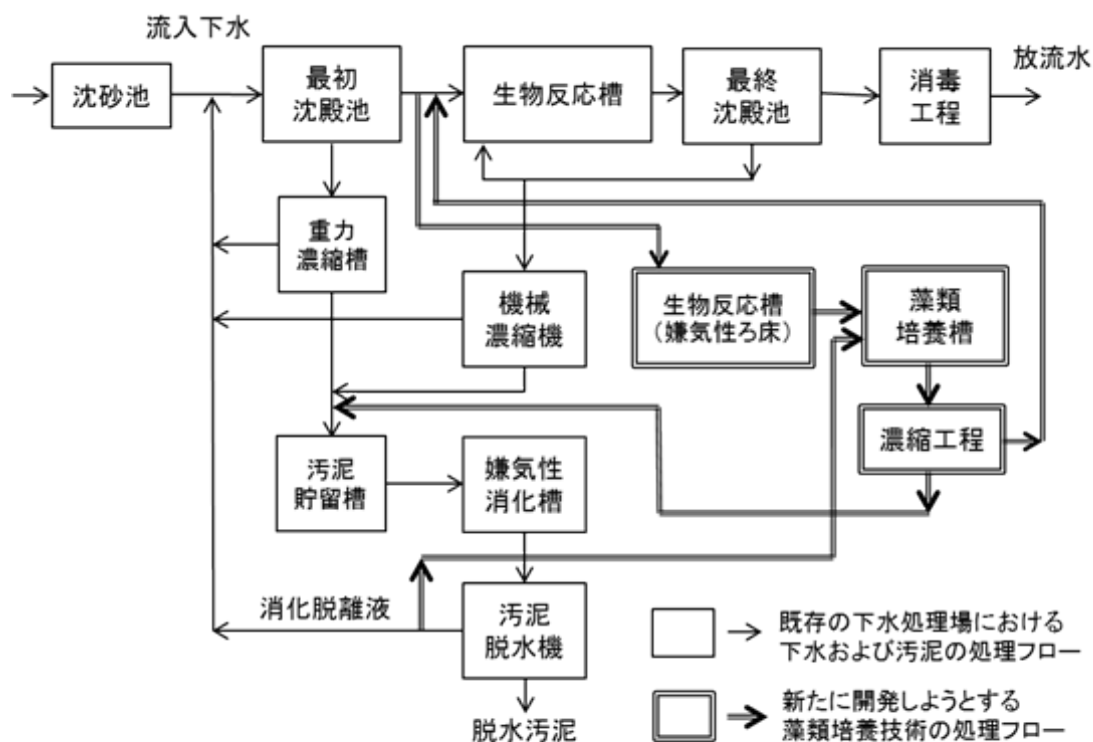


図-6 新たに開発する技術の概略

に、分析開始前に2か月間の馴致期間を設けた。分析は、2017年3月から開始し、培養開始時および終了時の培養液の性状（溶解性各態窒素、溶解性リン、浮遊物質）を分析した。

3. 3. 実験結果

2017年3月～10月の間の実験期間中における、2系列（系列1—培養期間：1週間（HRT 8.4日）、系列2—培養期間：2週間（HRT 16.8日））の培養装置内培養液の水質分析結果の平均値を表-1、表-2に示す。培養液中の溶解性窒素濃度、溶解性リン濃度は、培養前後を比較すると、藻類に取り込まれる等の結果、低下した。表-1、表-2において、実験期間中の各系列の溶解性窒素の平均除去率はそれぞれ63%、95%、溶解性リンの平均除去率はそれぞれ89%、97%であった。また、溶解性窒素は、消化脱離液中、嫌気性ろ床流出水中とも、大部分がアンモニア性窒素の形態であった。一方、培養終了時の培養液中の溶解性窒素の形態は、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素が大部分を占めたが、それらの比率について、明確な傾向はみられなかった。

また、表-1、表-2より、藻類培養液1Lあたりの平均余剰藻類生産速度は25.5mgSS/L・d、22.9mgSS/L・dであった。今後は、日射量や水温、水質、攪拌方式等と藻類増殖速度の関係を整理し、最適な培養条件について検討する予定である。

表-1 系列1の培養液の分析結果(平均値、単位 mg/L)

	培養開始時	培養終了時
溶解性窒素	34.7	12.7
溶解性リン	3.55	0.39
浮遊物質	53.7	214

表-2 系列2の培養液の分析結果(平均値、単位 mg/L)

	培養開始時	培養終了時
溶解性窒素	34.6	1.7
溶解性リン	3.53	0.11
浮遊物質	74.7	385

4. まとめ

本年度、下水処理水を利用した藻類培養の高効率化技術の開発、汚泥処理工程で発生する排水を利用した藻類培養技術の開発、水草と下水汚泥の混合物のメタン発酵（嫌気性消化）の特性解明調査について調査した。以下に、得られた成果を示す。

1. 屋外での活性汚泥の初沈流出水を用いた連続藻類培養において、上部開放レースウェイと密閉縦

型槽の装置での藻類培養状況の比較を行った。その結果、密閉縦型槽では、上部開放レースウェイと比較して、冬季において、10°C程度高い水温を維持することが可能であり、培養槽のSSを約2倍程度の濃度で培養できるとなることが示された。栄養塩除去率、COD除去率は、どちらの装置においても、同程度見込まれることが示された。

2. 培養藻類のエネルギー化について、消費エネルギーおよび生産エネルギーの簡易的な収支試算を行った結果、嫌気性消化への投入により、エネルギー生産が可能であることを示した。
3. 嫌気性消化脱離液を下水で希釈した溶液を基質として、HRTを8.4日、16.8日に設定した2系列の上部開放型カラム型藻類培養水槽を用いて、3月～10月の間、太陽光の下で、回分式継代藻類培養を実施した。実験期間中の各系列の溶解性窒素の平均除去率は63%、95%、溶解性リンの平均除去率は89%、97%、藻類培養液1Lあたりの平均余剰藻類生産速度は25.5mgSS/L・d、22.9mgSS/L・dであった。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部公益社団法人日本下水道協会：下水道政策研究委員会 報告書 新下水道ビジョン～「循環のみち」の持続と進化～、2014.
- 2) J.B.K. Park, R.J. Craggs, A.N. Shilton: Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond, *Water Research*, Vol.45, pp.6637-6649, 2011.
- 3) S. Chinnasmy, A. Bhatnagar, R.W. Hunt, K.C. Das: Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biodiesel application, *Bioresource Technology*, Vol.101, pp.3097-3105, 2010.
- 4) S. Cho, T.T. Luong, D. Lee, Y.K. Oh, T. Lee: Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production, *Bioresource Technology*. Vol.102, pp.8639-8645, 2011.
- 5) E.B. Sydney, T.E. da Silva, A. Tokarski, A.C. Novak, J.C. de Carvalho, A.L. Woiciehowski, C. Larroche, C.R. Soccol: Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage. *Applied Energy*. Vol.88 (10), pp.3291-3294, 2011.
- 6) 鈴木秀幸ら：下水処理場から発生する「未利用資源」を利活用したユーグレナ培養技術の実証研究、第53回下水道研究発表会講演集、p.184-186、2016
- 7) 国立研究開発法人土木研究所：下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究、平成27年度下水道関係年次報告書集、土木研究所資料第4347号、pp.26-51、2017.
- 8) 岡安祐司、山崎廉予、桜井健介、重村浩之：下水汚泥の嫌気性消化脱離液を用いた藻類培養における水理学的滞留時間の影響について、第52回日本水環境学会年会講演集、p.160、2018.

10.2 下水道施設を活用したバイオマスの資源・エネルギー有効利用方法の開発

10.2.1 河川事業等に由来するバイオマスの下水処理場内利用に関する研究

担当チーム：材料資源研究グループ（資源循環担当）

研究担当者：重村浩之、岡安祐司、桜井健介、山崎廉予

【要旨】下水道施設を活用したバイオマスの資源・エネルギー有効利用方法の開発を目指し、河川・道路等の管理で生じる草木バイオマスを下水処理場内で利用する方法に関して調査・研究を行った。剪定枝を下水汚泥焼却炉で補助燃料として活用する技術について、自然乾燥が困難な場合には、下水汚泥焼却炉の白煙防止空気の余剰分が乾燥に利用可能であると考えられた。刈草を汚泥脱水助剤として適用する技術において、下水処理場で刈草を受け入れることで、河川事業における刈草処分費が削減できる可能性が示された。また、下水道事業において、下水処理場外での焼却処分を想定した場合、刈草を汚泥に混合することで、汚泥処分費が削減できる可能性が示された。また、刈草の嫌気性消化の前処理手法として、凍結解凍手法について検討した。模擬刈草と見立てた緑藻と下水汚泥との混合消化（中温消化）によるメタン転換ポテンシャルを評価したところ、凍結解凍操作によりメタン発生ポテンシャルを著しく低下させる結果となり、前処理手法としては不適當であることがわかった。

キーワード：バイオマス、剪定枝、刈草、凍結解凍、混合嫌気性消化

1. はじめに

下水道整備の進展にともない、平成 27 年度末時点で下水道人口普及率は約 77.8%、管路延長は約 47 万 km、処理場数は約 2,200 箇所など下水道ストックは増大してきた¹⁾。循環型社会形成推進基本計画（平成 25 年 5 月、閣議決定）²⁾では、「循環資源・バイオマス資源のエネルギー源への利用」のために、下水処理場を地域のバイオマス活用の拠点としてエネルギー回収等を行う取り組みを推進する方向性が示されている。また、国土交通省河川砂防技術基準維持管理編（河川編）³⁾では、伐木や刈草について、リサイクル及びコスト削減の観点から有効利用に努めることとされるなど、河川事業等で発生するバイオマスも有効利用が求められている。

下水処理場は、全国に点在し、かつ、エネルギー消費施設であり、また、河川事業等に由来するバイオマス（剪定枝や刈草）の発生源に近接している場合もあり、効率的なバイオマス利用が期待できる。このような背景を踏まえて、本研究では、河川事業等に由来するバイオマスの下水処理場内利用を促進することを目的とする。

2. 剪定枝を木質バイオマスとして下水汚泥焼却炉で活用する技術の検討

昨年度⁴⁾示したように、河川、道路、公園、ダム

などの管理のため日頃より剪定枝が発生しており、収集体制が確立していることから、比較的利用しやすいバイオマスであると考えられる。これらで発生した剪定枝等の木質バイオマスを、下水汚泥焼却炉における補助燃料として利用できれば、地球温暖化対策として貢献可能と考えられる。しかし、剪定枝は含水率が 45%~59%(湿量基準)⁴⁾程度であり、補助燃料として活用する際は、チップを乾燥して利用するのが望ましいと考えられる。そこで、木質チップの自然乾燥に要する保管期間、保管場所の面積について調査した。つぎに、土地の制約などから自然乾燥が困難な場合を想定し、温風を利用した強制乾燥の実用性を検討するため、熱源としての下水汚泥焼却炉の利用可能性を調査した。さらに、剪定枝の灰分とその低減方法を調査した。

2.1 木質チップの自然乾燥の可能性について

スギの枝葉を自然乾燥させた実験では、破碎径を段々細かくして空隙が小さくなるほど乾燥速度は遅くなり、チップは特に遅い⁵⁾。イチョウやプラタナスを数十 cm 程度で切断したものを、屋内で乾燥させたケースでは、含水率 20%以下にするのに 1~3 か月程度を要するが、チップでは約 3 か月でも含水率 20%に達しておらず⁶⁾、チップの自然乾燥には時間を要する。また、34mm×14mm×4mm 程度のスギ・ヒノキチップを水浸させて含水率を調整した

実験では、攪拌なしで乾燥するのは表面から 10cm 程度までであり、攪拌の効果が顕著であるとされている⁷⁾。河川、道路、公園、ダム等の管理に由来する剪定枝を多量に乾燥する場合、破碎径等により変化するものの、温風を用いる強制乾燥に比べて長く時間がかかり、広大な土地を要すると考えられた。

また、チップを保管する際には、微生物の活動に起因する発酵熱と、油脂類の酸化に起因する発熱による火災⁸⁾の発生に注意する必要がある。破碎チップは、切削チップよりも発火の危険性が高いので、注意が必要である⁹⁾。なお、堆肥化等のため剪定枝チップを保管している場合、積み上げ高さの上限を 3m または 3.5m に設定している例があり¹⁰⁾、積み上げ高さの上限に配慮する必要がある。

2. 2 木質チップの乾燥に適した下水汚泥焼却炉の排熱の種類

50 トン/日の下水汚泥焼却炉から、中・低温排熱は年間約 3PJ 程度発生しているが、排熱温度が低く用途に限られること等から大半が利用されずにいる¹¹⁾。これは、土地の制約などから自然乾燥が困難な場合に、木質チップの乾燥熱源として利用できる可能性がある。具体には、「洗煙排水」や「白煙防止空気」がある。それぞれの性質、温度、熱量を表-1 に示す。

表-1 洗煙排水や白煙防止空気の特徵

	洗煙排水	白煙防止空気
性質	排煙処理塔において、硫酸酸化物、硫化水素、ばいじん等を吸収した水	白煙防止のため煙突において洗浄排煙と混合するために、白煙防止熱交換器で加温された空気
温度*	50°C ¹¹⁾	350°C ¹¹⁾
熱量*	10GJ/h ¹¹⁾	1.8GJ/h ¹¹⁾

*温度と熱量は、50 トン/日の流動床式焼却炉の例

洗煙排水は、熱量は多いが、温度が低く活用が難しい。また、塩化物イオン、硫酸イオン濃度が高い場合¹²⁾があり、ステンレス鋼に対して腐食させる可能性がある。

一方、白煙防止空気は、白煙の防止に必要な熱量以上の熱を大気中へ放出しており、一部が利用可能である¹³⁾。白煙防止空気は、外気を熱交換器で加温したものであり、絶対湿度が低く、洗煙排水に比べ

て熱量は少ないものの、乾燥に適していると考えられた。ごみ焼却施設では、環境省の「高効率ごみ発電施設整備マニュアル¹⁴⁾」において、原則として白煙防止処理をせず、より高効率なエネルギー回収を推進するよう努めることとされている。ただし、白煙が見えること等について、周辺住民に理解を求めるよう努める必要がある¹⁴⁾。白煙防止基準を設定する場合は、外気温度 5°C、湿度 50%程度が一般的である¹⁵⁾とされている。

2. 3 剪定枝の灰分について

剪定枝を燃料として利用する際、灰分が多いと重量当たりの熱量が低下し、灰の炉外への持ち出し熱量も増加するのに加えて、灰の処分量が増加するため、重要な成分である。土木研究所が調査¹⁶⁾した、国土交通省の河川または国道事務所等で採取された剪定枝に該当する 14 試料の灰分は、1.7~13%であった。一般社団法人日本木質バイオマスエネルギー協会の制定した木質チップの規格¹⁷⁾において、灰分は最大で 5.0%である。また、一般社団法人日本木質ペレット協会の制定した木質ペレット品質規格¹⁸⁾において、灰分は最大で 2.0%である。

灰分を下げようとする場合、剪定枝の灰分は平均直径と相関関係がある¹⁹⁾ため、平均直径が一定以上の剪定枝を用いることで灰分を低減可能と思われる。また、混入する土砂を取り除くことも有効であり、剪定枝から篩目 1mm で土砂を篩分けた事例²⁰⁾では、灰分が 3.4%から 1.7%まで減少したとのことであり、これらによっても灰分が低下することが期待される。

3. 刈草を汚泥脱水助剤として適用する技術

1. で示した課題について、河川等で発生する刈草を下水道事業で受け入れ、汚泥の脱水助剤として活用する技術を開発する。これにより、河川事業においては、刈草の処分にかかる費用の削減、下水道事業においては、凝集剤添加や汚泥処理費用の削減が可能となり、かつ刈草のリサイクルシステムが確立できる。本研究では、裁断したイネ科の刈草を様々な性状の汚泥と混合し、汚泥の脱水性が向上するかどうか、実験室レベルで検証を行った結果、刈草の混合により、脱水時の汚泥の含水率の低減化が見込まれることが明らかとなった⁴⁾。本研究では、本研究提案技術を導入した際の河川事業における刈草処分費、下水処理場における汚泥処分費の試算を行い、経済的な有意性の有無を検証した。

3. 1. 河川事業における刈草処分費の試算

河川等で発生する刈草を下水道事業に受け渡すことで、破碎処理までの処分となり、焼却処理をした場合と比較すると、刈草処分費が削減される可能性がある(図-1)。そこで、試算により検証を行った。従来の刈草処分方法として、焼却場に運搬するケース(A)を設定し、本研究提案技術を導入した場合の刈草処分方法として、再資源化施設で破碎後、下水処理場へ受け渡すケース(B)を設定した(図-2)。1回あたりの刈草処分量は、茨城県において、有効利用されていない分1,224t(平成27年度実績)とした。刈草処分費は、運搬費(運搬距離×ガソリン代)と処分費[(焼却(30,660円/t)または破碎(22,090円/t)の処理費)×刈草処分量]の合計とした。草刈り場所から処理場所までの片道の運搬距離は、茨城県の総面積や同県内に立地している焼却場の数等を考慮して試算²⁰⁾し、1往復の運搬距離は、ケース(A)が17.4km、ケース(B)は、最も短い場合で24.4km、最も長い場合で41.6kmと設定した。運搬には2tトラックの使用を想定し、走行速度30km/h、ガソリン燃費4.9L/h²²⁾、ガソリン単価を121円/Lより、19.76円/kmと設定した。

ケース(A)、ケース(B)における、刈草処分費の試算結果を図-3に示す。1回あたりの刈草処分費は、ケース(B)がケース(A)よりも1千万円程度安くなる試算結果となった。また、運搬費は処分費の0.5~2.0%程度とかなり小さい結果であった。この結果、運搬距離がこれよりも長くなったとしても、刈草を下水処理場に受け渡した方が、刈草処分費は安く抑えられる可能性が示された。

3. 2. 下水道事業における汚泥処分費の試算

刈草を汚泥に混合することで、脱水時の凝集剤使用量や発生する脱水汚泥量の変化によって、脱水汚泥処分費が変化する。そこで、試算による検証を行った。脱水汚泥の処分方法は、本研究では、下水処理場外の焼却場における焼却処分を想定した。汚泥処分費は、脱水時の凝集剤費、下水処理場外への運搬費及び焼却処分や埋立処分費等を含めた脱水汚泥処分費の合計とした。本試算では、刈草の破碎および下水処理場への運搬にかかる費用は河川事業で負担するものとみなし、破碎された刈草の下水処理場での受入れの費用は、実質0円とした。凝集剤費は820円/kg、脱水汚泥処分費は16千円/t(湿重量ベース)とした。汚泥脱水設備に投入する汚泥量は、高分子凝集剤を使用した濃縮汚泥または消化汚泥の脱水を行っている1,212か所の下水処理場における平成26

年度の一カ月あたりの平均値(4,762t/月(湿重量

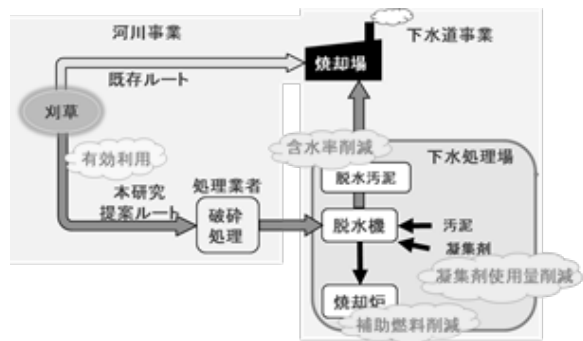


図-1 河川刈草を下水道事業で受入れるケースの一例

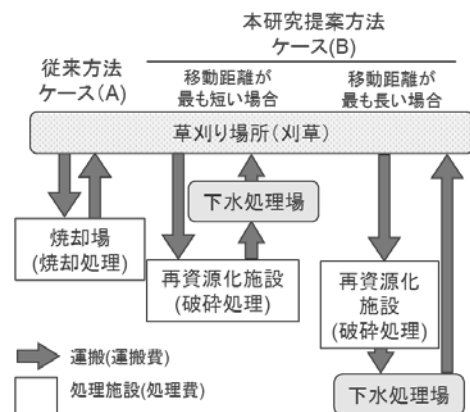


図-2 刈草処分ルートの場合設定

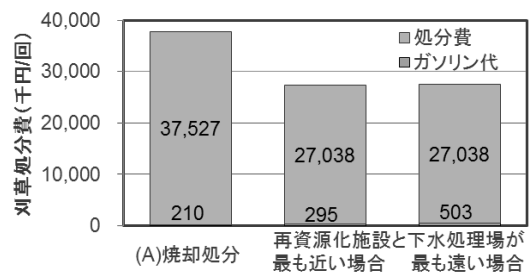


図-3 1回あたりの刈草処分費の試算結果

ベース))とした²³⁾。昨年度の実験結果⁴⁾で得られた脱水前の汚泥TS、脱水後の刈草混合脱水汚泥量の値を用いて、一カ月あたりの脱水汚泥量を算出し、汚泥処分費を試算した²⁴⁾。なお、脱水前の汚泥TSは、標準汚泥は2.9%、OD汚泥は1.1%であった。

脱水汚泥処分費の試算結果を図-4に示す。図中に、従来の方法として、凝集剤2%、刈草0%の場合の汚泥処分費を⊙で示した。また、⊙よりも汚泥処分費が安くなる条件に×を付けた。標準汚泥では、凝集剤0.5%、1.0%、刈草10%、30%の場合、刈草を混合することで、従来の方法よりも汚泥処分費が削減できる可能性が示された。刈草30%では汚泥のみ

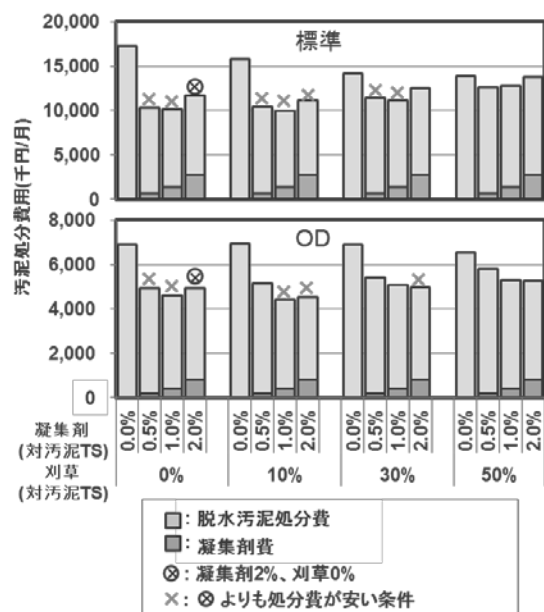


図-4 汚泥処分費の試算結果

の含水率が上昇する傾向を示した⁴⁾が、汚泥処分費としてみると、凝集剤費の削減により、安くなる結果となった。OD 汚泥では、汚泥処分費が削減できる可能性のあるケースは、凝集剤 1.0%以上、刈草 10%であった。どちらの性状の汚泥でも、刈草混合により汚泥処分費が安くなるケースがみられた。

4. 下水汚泥と刈草の混合嫌気性消化の効率向上技術

4.1 はじめに

河川事業等の公共事業に由来するバイオマスの有望な利用方法の一つとして、下水処理場での下水汚泥との混合による嫌気性消化が考えられ、新潟市での検討事例²⁵⁾²⁶⁾も報告されており、また、既往の調査研究²⁷⁾²⁸⁾で、刈草(草の葉や茎)について検討し、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を示してきたところである。一方で、刈草中の有機物のメタンへの転換率は、下水汚泥に比べて小さいこと、何らかの前処理を加えることで、メタン転換率が向上する事例も報告されている。

そこで、本研究では、刈草の前処理手法として、刈草を凍結し、細胞中の水の凍結に伴う体積増加により細胞壁を破碎する手法について検討した。なお、本年度は、刈草は種類が多岐にわたるため、陸上植物と同様に緑色植物亜界に属し、クロロフィル a, b による光合成を行う単純な緑藻を模擬刈草に見立てて、培養した緑藻に対して前処理手法を適用した場

合としない場合の、培養緑藻と下水汚泥との混合嫌気性消化によるメタン転換ポテンシャルについて検討を行った。

4.1.1 実験方法

嫌気性消化槽での、濃縮汚泥および模擬刈草投入による効果を確認するために、消化汚泥、濃縮汚泥、濃縮藻類、凍結解凍濃縮藻類を用いて、消化汚泥のみを添加する系列(ブランク)、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濃縮藻類を添加する系列ならびに消化汚泥に濃縮汚泥と凍結解凍藻類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、濃縮汚泥は、茨城県内の、下水処理方式として標準活性汚泥法、汚泥処理方式として中温消化を行っている下水処理場より採取して使用した。実験に使用した濃縮藻類は、既述の下水処理場で発生した消化脱離液を用いて HRT=16.8 日の条件で継代培養して得られた余剰藻類培養液²⁹⁾を遠心分離により固液分離し、上澄水を取り除いたものとした。その一部については、-20℃に設定した冷凍庫内に一日置き、その後、冷蔵庫内にて解凍し、凍結解凍濃縮藻類試料とした。

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-2 に示す所定量の濃縮汚泥、濃縮藻類、凍結乾燥濃縮藻類を添加し、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。なお、回分式嫌気性消化実験は、2017年10月

表-2 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	濃縮藻類	
			濃縮藻類	凍結解凍
1-1	400mL	—	—	—
1-2	400mL	—	—	—
2-1	400mL	0.344	—	—
2-2	400mL	0.344	—	—
3-1	400mL	0.344	0.069	
3-2	400mL	0.344	0.069	
4-1	400mL	0.344	—	0.069
4-2	400mL	0.344	—	0.069

～11月にかけて実施した。

4.2. 分析方法

消化汚泥、濃縮汚泥、濃縮藻類、凍結解凍濃縮藻類、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、吸光度計（DR2400、HACH社）により、COD試薬を用いた。アンモニア性窒素濃度の測定には、自動比色分析装置（TRAACS2000、BRANLUEBBE社）を用いた。発生メタンガス量の測定には、水上置換方式のガス流量計（BioReactor Simulator AMPTS II、Bioprocess Control）を用いた。

4.3. 結果および考察

本実験で用いた消化汚泥、濃縮汚泥、濃縮藻類、凍結解凍濃縮藻類のTSは1.2%、2.8%、1.4%、1.4%、VSは0.9%、2.3%、1.1%、1.1%であった。濃縮汚泥や濃縮藻類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21日間に設定した。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濃縮汚泥、濃縮藻類、凍結解凍濃縮藻類由来のメタン発生量を表3に示す。

本実験における、投入基質の単位VSあたりのメタン発生量は、濃縮汚泥のみを投入した場合で、 $72.6 / 0.344 = 211 \text{ NmL/gVS}$ であった。既往の調査研究で示されている一般的な下水処理場における中温消化での数値（ 0.36 NL/gVS ）に比べてやや小さかったが、これは、下水処理場の消化槽が連続式であるのに対して、本実験では、回分式実験であることによるものと考えられる。

また、投入基質として、濃縮汚泥のみを投入した場合（系列2）と、濃縮汚泥および濃縮藻類を投入した場合（系列3）を比較し、投入濃縮藻類の単位VSあたりのメタン発生量を算出すると、 $24.2 / 0.069 = 351 \text{ NmL/gVS}$ となった。この数値は、既往の調査研究結果²⁷⁾で示されている、濃縮汚泥および葉や茎のみの刈草を投入した、中温条件での回分式嫌気性消化実験結果から得られた、投入刈草の単位VSあたりのメタン発生量（ 0.118 NL/gVS ）と比較すると大きく、一般的な植物と比べると、メタン転換ポテンシャルが大きい結果であった。

一方、濃縮汚泥のみを投入した場合（系列2）と、濃縮汚泥および凍結解凍濃縮藻類を投入した場合（系列4）を比較し、投入凍結解凍濃縮藻類の単位

表3 回分式嫌気性消化実験におけるメタン発生量
(単位：NmL)

系列名	累積メタン発生量	メタンガスの由来			
		消化汚泥	濃縮汚泥	濃縮藻類	
				凍結	解凍
1-1	105.2	107.5	—	—	—
1-2	109.7				
平均	107.5				
2-1	178.6	107.5	72.6	—	—
2-2	181.4				
平均	180.0				
3-1	198.8	107.5	72.6	24.2	—
3-2	209.6				
平均	204.2				
4-1	187.6	107.5	72.6	—	2.5
4-2	177.4				
平均	182.5				

VSあたりのメタン発生量を算出すると、 $2.5 / 0.069 = 36 \text{ NmL/gVS}$ となった。この数値は、凍結解凍を行わない濃縮藻類の場合（系列3）に比べて著しく小さく、凍結解凍処理により、メタン発生ポテンシャルを著しく低下させる結果となった。凍結操作により、有機物の酸発酵に関与する酵素が失活した等の理由が考えられるが、詳細な原因は不明である。

5. まとめ

本年度、木質バイオマスを下水汚泥焼却炉で活用する技術、刈草を汚泥脱水助剤として適用する技術、下水汚泥と刈草の混合嫌気性消化の効率向上技術について調査した。以下に得られた成果を示す。

1. 剪定枝を下水汚泥焼却炉で活用する技術について、自然乾燥が困難な場合には、白煙防止空気の余剰分が乾燥に利用可能であると考えられた。
2. 刈草を汚泥脱水助剤として適用する技術において、河川事業における刈草処分費は、焼却処理するよりも破碎処理後に下水処理場へ受け渡す方が削減できる可能性が示された。下水道事業における汚泥処分費は、下水処理場外での焼却処分を想定した場合、凝集剤1.0%、刈草10%を混合して脱水を行うことで、汚泥処分費が削減できる可能性が示された。

3. 河川事業等の公共事業に由来する刈草の有望な利用方法の一つとして、下水処理場での下水汚泥との混合による嫌気性消化が考えられているが、刈草中の有機物のメタンへの転換率は、下水汚泥に比べて小さく、何らかの前処理を加えることで、メタン転換率を向上させることが有効であると考えられる。本年度は、刈草の前処理手法として、凍結解凍手法について検討した。模擬刈草と見立てた緑藻と下水汚泥との混合消化（中温消化）によるメタン転換ポテンシャルを評価したところ、凍結解凍操作により、むしろメタン発生ポテンシャルを著しく低下させる結果となり、前処理手法としては不適当であることがわかった。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：平成 28 年度下水道白書 p.50、2016
- 2) 閣議決定：循環型社会形成推進基本計画、2015 http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_3.pdf (参照：2017.2.27)
- 3) 国土交通省河川砂防技術基準維持管理編（河川編）、平成 27 年 3 月改定、2015、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf (参照 2017.2.27)
- 4) 国立研究開発法人土木研究所：河川事業等に由来するバイオマスの下水処理場内利用に関する研究、平成 28 年度下水道関係年次報告書集、土木研究所資料第 43 70 号、pp.27-35、2018。
- 5) 農林水産技術会議事務局：第 3 編 木質バイオマス変換総合技術の開発、地域活性化のためのバイオマスの利用技術の開発(2)、pp.153-165、2014、<http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2039017291.pdf> (参照：2017.8.22)
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所：都市由来植物廃材のエネルギー利用手法等に関する技術資料、国総研資料第 845 号、pp.167-168、2015
- 7) 宮田大輔、鈴木保志、小畑篤史、後藤純一、板井拓司、政岡尚志、吉井二郎：木質チップの自然乾燥における攪拌の効果、pp.75-83、90(2)、2008、https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjfs/90/2/90_2_75/_pdf (参照：2017.8.22)
- 8) 水田 亮、望月真、海和晋史、鳥谷淳：災害廃棄物の発熱及び出火危険性に関する検証、消防技術安全所報 5 2 号、pp.96-104、2015、<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-gijyutuka/shyohou2/52/52-10.pdf> (参照：2017.8.22)
- 9) 株式会社森林環境リアライズ、株式会社富士通総研、環境エネルギー普及株式会社：木質バイオマスボイラー導入・運用にかかわる実務テキスト、2013、http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/con_4.html (参照 2017.8.22)
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所：都市由来植物廃材のエネルギー利用手法等に関する技術資料、国総研資料第 845 号、p.220、2015
- 11) 資源のみち委員会：資源のみちの実現に向けて 報告書、p.30、2007、<http://www.mlit.go.jp/common/000038167.pdf> (参照 2017.8.8)
- 12) 岩下栄、小川裕正、落修一、石田貴、井上匠、尾家俊康、和泉一也：焼却炉からの排熱利用によるバイナリー発電技術の適用について、第 51 回下水道研究発表会講演集、2014。
- 13) 三島俊一：複数熱源に対する温度差発電技術の適応に関する研究、博士論文、佐賀大学、2016。
- 14) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：高効率ごみ発電施設整備マニュアル、平成 22 年 3 月改定、2010、https://www.env.go.jp/recycle/misc/he-wge_facil/ (参照：2017.8.8)
- 15) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：廃棄物処理施設の発注仕様書作成の手引き(標準発注仕様書及びその解説)エネルギー回収推進施設編ごみ焼却施設(第 2 版)、2013、https://www.env.go.jp/recycle/waste/3r_network/7_misc/man_wtfspec/1-1_hrf.pdf (参照：2017.8.8)
- 16) 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、土木研究所資料第 4095 号、平成 20 年 2 月、2008、<https://www.pwri.go.jp/team/fimarro/activity/tech-info/tech4095.pdf> (参照：2017.9.12)
- 17) 木質バイオマスエネルギー利用推進協議会制定：燃料用木質チップの品質規格、2014
- 18) 一般社団法人日本木質ペレット協会制定：木質ペレット品質規格、2017、<https://w-pellet.org/download/1313/> (参照：2017.9.12)
- 19) 澤井徹、梶本武志、本庄孝子、佐野寛、難波邦彦、井田民男、淵端学、左近孝憲：和歌山県における果樹剪定枝のエネルギー利用—剪定枝の灰分、C/N 比および燃焼特性—、https://www.jstage.jst.go.jp/article/jriet/1972/35/12/35_12_916/_article-char/ja/ (参照：2017.9.12)
- 20) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構産業技術研究

本部工業試験所：一般廃棄物（枝・葉・草等）を原料としたペレット燃料製造、技術支援成果事例集、2016、
<https://www.hro.or.jp/list/industrial/research/iri/jyoho/casebook/16/example/22.pdf>（参照：2017.9.12）

- 21) 国立研究開発法人土木研究所：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、平成 27 年度下水道関係年次報告書集、土木研究所資料第 4347 号、p p.16-25, 2017.
- 22) 国立研究開発法人土木研究所：平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集、公共事業由来バイオマスの資源化・利用技術に関する研究、土木研究所資料第 4157 号、pp.38-46、2011.
- 23) 公益社団法人日本下水道協会：平成 26 年度版下水道統計、第 71 号、2017.
- 24) 山崎廉予、重村浩之：刈草の汚泥脱水助剤としての利用検討、環境工学フォーラム論文集、Vol.73、No.7、pp.365-373、2017.
- 25) 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.
- 26) 山本茂浩：下水汚泥と刈り草等の混合消化実証実験、第 51 回下水道研究発表会講演集、pp.937-939、2014.
- 27) 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.
- 28) 栗田雄佑、小松俊哉、姫野修司：異なる下水汚泥を用いた刈草と混合嫌気性消化における分解特性の把握、第 51 回下水道研究発表会講演集、pp.940-941、2014.
- 29) 岡安祐司、山崎廉予、桜井健介、重村浩之：下水汚泥の嫌気性消化脱離液を用いた藻類培養における水理学的滞留時間の影響について、第 52 回日本水環境学会年会講演集、p.160、2018.