

## 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～令和 3 年度

プログラムリーダー：材料資源研究グループ長 西崎到

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、令和 2 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、令和 2 年度まで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、下水処理水の熱を利用した加温の検討を行った。また、汚泥処理工程で発生する排水を利用した藻類培養について、培養槽の攪拌方法の研究を行った。さらに、培養藻類の回収技術、汚泥分離液処理施設での流入水および処理水を利用した藻類培養技術の開発について検討した。以下に、令和 2 年度までに得られた成果を示す。

- 下水を用いた上部開放レースウェイ培養槽による屋外での連続藻類培養において、下水処理水の熱を利用した簡易的な加温でも、通年での藻類培養が可能であることが示された。
- 消化汚泥の脱水分離液を下水で希釈した溶液を基質として、攪拌方法の異なる 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 77%、96%、溶解性りん平均除去率は 94%、98%、藻類培養液 1L あたりの平均余剰藻類生産速度は、それぞれ、14.4mgSS/L・d、22.0mgSS/L・d であった。
- 秋季に得られた、消化汚泥の脱水分離液を用いて培養した藻類と下水汚泥の混合回分式嫌気性消化実験を実

施し、培養藻類のメタン発生ポテンシャル評価を行った。投入した培養藻類 VS あたりのメタンガス発生量は、攪拌機による攪拌を行う系列、および曝気による攪拌を行う系列の場合、それぞれ、882NmL/g-VS、362NmL/g-VS であり、藻類培養の攪拌方法により大きく異なることがわかった。

- ・ディスクセパレーターによる回収により約 96%の藻類を回収することができた。
- ・汚泥分離液処理施設の流入水と処理水による微細藻類培養が可能か調査を行った結果、本研究の範囲では、処理水 40%と流入水 60%で混合して培養することで、最適な藻類培養が行えることが示された。
- ・汚泥分離液処理施設での流入水および処理水を利用した藻類培養について、自然光下に設置した 200L の上部から光を受け入れるカラム型培養槽での適用可能性を調査した結果、流入水と処理水を 6 対 4 で混合し、培養藻類について、培養槽の半分の量を投入して、培養を開始することで、藻類の増殖が可能であることを示した。培養開始時の藻類が少ない場合は、間欠攪拌等によって、培養槽内への光量を増やしつつ攪拌を行うことで、藻類培養が可能であることを示した。

## (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。剪定枝を下水汚泥焼却炉の補助燃料として活用するシステムについて、下水汚泥と剪定枝を混焼することによる消費エネルギー削減効果の算定を行った。また、実際の処理場を対象に、混焼可能な草木系バイオマス量を算出し、それらを下水汚泥と混焼することによる焼却灰への影響や創エネルギー効果について試算した。さらに、し渣搬送ラインを用いた供給手法について検討するため、実施設を想定した機器で破碎・搬送し、草木破碎物等の物性及び機器の運転状況を調査した。刈草を汚泥脱水助剤として活用する技術について、イネ科以外の植物の脱水助剤としての適用性の検討、刈草混合脱水汚泥を燃焼する際の汚泥処分費の比較検討を行った。また、パイロットスケールの圧入式スクリープレス脱水機を用いて、イネ科の刈草、クロマツの剪定枝、竹粉と、消化汚泥の混合脱水試験を実施した。さらに、実下水処理場のベルトプレス脱水機を用いて、刈草等と消化汚泥の混合脱水試験を行った。刈草の嫌気性消化の効率改善のために、部位別のメタンガス発生ポテンシャルに関する研究を行った。以下に、令和 2 年度までに得られた成果を示す。

- ・下水汚泥焼却炉における排熱を活用した剪定枝廃材の補助燃料利用システムについて、白煙防止空気の利用可能量と、乾燥可能な剪定枝廃材の量を算出し、それらを下水汚泥と混焼することによる消費エネルギー削減量を算定した。その結果、従来の化石燃料のみを用いる焼却炉と比較して、15%の消費エネルギーの削減が見込まれた。
- ・実際の下水処理場の汚泥焼却施設をモデルとして、バイオマスの混焼可能性について検討を行った。し渣の混焼ラインからのバイオマス供給を考えたとき、混焼能力の限界値は、焼却炉熱負荷量とバグフィルタの容量、混焼ラインの供給能力から、6wet-t/日が上限値となった。
- ・6.0wet-t/日の剪定枝の混合燃焼を行う場合、消化ガスの消費量を約 1500Nm<sup>3</sup>/日削減し、余剰ガスで約 2800kWh の発電が可能となった。
- ・バイオマス破碎時におけるし渣破碎機の挙動を調査した。バイオマス破碎時は消費電力が増加したものの、今回の条件では最大でも定格の約 70%の負荷となり、草木破碎物をし渣破碎機に投入することは問題とならないことが示唆された。
- ・し渣破碎機通過後の破碎物の物性については、し渣と草木破碎物の安息角はほぼ同等(40~45°)であり、シュート部における閉塞の可能性は低い。
- ・処理場に設置されているスクリーコンベア及びフライトコンベアを用いて搬送試験を行ったところ、草木破碎物はいずれも問題なく搬送でき、追加の電力は発生しなかった。あらかじめ適切に破碎した草木破碎物であれば、実処理場におけるし渣破碎機～搬送用コンベアを用いたバイオマス供給は実現可能性が高いと考えられる。
- ・活用が求められている河川等で発生する植物系バイオマスに着目し、下水処理場における汚泥の脱水助剤としての有用性を実験室レベルの遠心脱水試験で検証した。その結果、植物系バイオマスは、従来検討していた

## 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

イネ科以外の種類でも、下水汚泥の脱水助剤として有用である可能性を示した。また、植物系バイオマスの破碎後のサイズが大きく、固形物含有量が小さいほど、脱水助剤としての効果が見えやすく、汚泥の固形物濃度が大きいほど脱水助剤の効果が見えやすい傾向を示した。

- 刈草を下水汚泥脱水助剤として混合することで、脱水ケーキの保有熱量が上昇し、補助燃料費が削減され、灰分量の増加による灰処分費が増加しても、汚泥処分費が低減されることが示された。
- パイロットスケールの脱水機を用いたバイオマス混合脱水において、脱水ケーキの含水率が 1.5～14 ポイント低減することが示され、脱水後の湿ケーキ量は、バイオマス添加により減少することが示された。
- 汚泥への薬注率を 1.76%とし、松および草を 10%程度混合した場合、脱水ケーキの処分費がバイオマスを混合しない場合と比較して、汚泥処分費が 2～6%減少すると試算された。
- 10 mm 程度に破碎したバイオマスを、添加率 10、20 %で消化汚泥に混合した場合、通常薬注率 (1.1 %) では、バイオマス混合脱水において、脱水ケーキの含水率が 0.4～0.7 ポイント低減することが示された。また、薬注率を凝集が確認できる最低値に下げても (0.96 %)、バイオマスを混合することにより、薬注率が通常時のケーキ含水率よりも下がることを示された。
- 各実験日における 1 日当たりのケーキ発生量をホッパー重量から試算したところ、バイオマス混合脱水を実施した場合、単位時間当たりのケーキ発生量が削減できることが示された。
- 実下水処理場での実験結果等をもとに、バイオマス受け入れ費用、発生ケーキの処分費用による試算の結果、通常脱水と比較して、8 %～21 %、費用が削減できる可能性が示された。
- 刈草の部位 (葉、茎、根) ごとのメタンガス発生ポテンシャルを評価したところ、部位ごとに大きな差異が見られ、刈草中の葉や茎や根などの部位の比率について配慮する必要があると考えられた。また、メタン転換効率を増加させるためには、特定の部位を選択または排除する方法が有効である可能性が考えられた。

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

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Materials and Resources Research Group  
NISHIZAKI Itaru

**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、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、下水を利用した藻類培養の高効率化技術の開発、培養藻類の回収技術、汚泥分離液処理施設での流入水および処理水を利用した藻類培養技術の開発について調査した。汚泥分離液処理施設での流入水および処理水を利用した藻類培養について、自然光下に設置した200 Lの上部から光を受け入れるカラム型培養槽での適用可能性を調査した結果、流入水と処理水を6対4で混合し、培養藻類を培養槽の半分投入して培養開始することで、藻類の増殖が可能であることを示した。培養開始時の藻類が少ない場合は、間欠攪拌等によって、培養槽内への光量を増やしつつ攪拌を行うことで、藻類培養が可能であることを示した。藻類培養量の指標としているクロロフィル $a$ の測定について、前処理を行わない簡易的な測定が可能であることを示した。上部からのみ光を取り入れられるカラム型培養槽を用いて、高栄養塩濃度で透過率が低い汚泥処理工程の水を基質とした藻類培養において、1,000 m<sup>3</sup>程度の藻類培養槽であれば、嫌気性消化槽を保有する処理場において、敷地面積の5%以下で設置可能であり、そのうち約6割において、培養藻類の投入量は、現在の汚泥投入量の5%~10%に相当し、下水処理場での藻類培養および嫌気性消化への適用可能性が高いと想定された。

キーワード：下水道資源、藻類培養、汚泥処理工程水、カラム型培養槽、混合嫌気性消化、高位発熱量

#### 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<sup>1)</sup>。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. 目的

化石燃料の枯渇への懸念、化石燃料利用にとも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<sup>2) 3)</sup>。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CO<sub>2</sub>、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<sup>4) 5) 6)</sup>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、下水の最初沈殿池流出水（以下、「初沈流出水」という）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<sup>8)</sup>。

平成30年度<sup>9) 10)</sup>は、栄養塩や有機物量の多い初沈流出水、および消化汚泥の脱水分離液を下水で希釈した溶液を基質とした上部開放レースウェイ培養槽による屋外での藻類培養の検討を行った。また、初沈流出水での藻類培養では、通年での藻類培養を目指し、冬季において、下水処理水での加温が有効であるか検討を行った。その結果、初沈流出水を用いた上部開放レースウェイ培養槽による屋外での連続藻類培養において、下水処理水の熱を利用した簡易的な加温でも、通年での藻類培養が可能であることが示された。また、沈殿藻類のVS/TS(volatile to total solids)、高位発熱量は、下水汚泥と同程度であり、嫌気性消化への投入が有効である可能性が示された。重力濃縮のみでも、沈殿藻類の回収と処理水のSS(Suspended Solids)の低下が一定程度見込めることが示された。

消化汚泥の脱水分離液を下水で希釈した溶液を基質として、水理的滞留時間を16.8日に設定した2系列（攪拌機による攪拌を行う系列、および曝気による攪拌を行う系列）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結果、実験期間中の各系列の溶解性窒素の平均除去率は77%、96%、溶解性リンの平均除去率は94%、98%、藻類培養液1Lあたりの平均余剰藻類生産速度は、それぞれ、14.4 mgSS/L・d、22.0 mgSS/L・dであった。消化汚泥の脱水分離液を用いて培養した藻類と下水汚泥の混合回分式嫌気性消化実験により、培養藻類のメタン発生ポテンシャル評価を行った結果、投入した培養藻類VSあたりのメタンガス発生量は、攪拌機による攪拌を行う系列、および曝気による攪拌を行う系列の場合、それぞれ、882 NmL/g-VS、362 NmL/g-VSであり、藻類培養の攪拌方法により大きく異なることがわかった。高位発熱量は、藻類培養が可能で3月～11月の期間を通じて、18.0～22.4 MJ/kg-DSの範囲であり、下水汚泥の乾燥物と同程度となることがわかった。

令和元年度<sup>11) 12)</sup>は、下水道資源による藻類培養の高効率化を目的とし、初沈流出水に下水汚泥を混合した基質を用いた上部開放レースウェイ培養槽による屋外での藻類培養、消化汚泥の脱水分離液を希釈せずに

基質として用いたカラム型培養槽での藻類培養、および汚泥分離液処理施設の流入水と処理水を混合した基質を用いて、上部からのみ光が取り入れられるタンク型培養槽を想定した、ビーカー試験による、藻類培養を行った。

屋外に設置した380Lレースウェイ培養槽において、最初沈殿池流出水および余剰汚泥との混合液を用いて、微細藻類培養を行った結果、余剰汚泥を基質に添加すると、回収微細藻類量が増加することが示された。藻類培養において、最初沈殿池流出水や余剰汚泥を用いることで、沈殿池における沈降性が良好となり、排水中のSSおよび水質のレベルが低下することが示された。採取した微細藻類を用いたメタン発生ポテンシャル試験では、微細藻類に混合汚泥と同等以上の有機酸が含まれており、メタン発生量の増加に寄与する可能性が示された。汚泥処理工程で発生する排水を用いた微細藻類培養において、屋外に設置した温室内における自然光を用いた30Lカラムにおいて、脱水ろ液を希釈せずに用いた藻類培養が可能であることが示された。また、ディスクセパレーターによる回収により約96%の藻類を回収することができた。高位発熱量は、22.1 MJ/kg-DSであり、未消化の下水汚泥の乾燥物よりも高い熱量であることが示された。汚泥分離液処理施設の流入水と処理水による微細藻類培養が可能か、実験室内においてビーカー試験による調査を行った結果、本研究の範囲では、処理水40%と流入水60%で混合して培養することで、最適な藻類培養が行えることが示された。回分式の嫌気性消化を行った結果、メタンガス発生量は、藻類を混合することで増加し、藻類が持つメタンガス発生ポテンシャルは、汚泥と同等であることが示唆された。消化後の汚泥の脱水試験では、ろ液の水質への藻類混合の影響はほぼないものと考えられた。

令和2年度は、藻類培養量の指標としているクロロフィルaの測定について、簡易的な測定方法の適用可能性を調査した。また、下水処理場の反応槽等を想定した、上部からのみ光を取り入れられるタンク型培養槽において、汚泥分離液処理施設の流入水と処理水の混合液を基質とした藻類培養において、令和元年度、実験室レベルでの藻類培養が確認できたが、スケールアップ(200L)および太陽光下での培養が可能か、評価を行った。タンク型培養槽を用いた培養藻類において、利用可能性のポテンシャルを調査した。さらに、下水処理場内における、カラム型培養槽での藻類培養における必要面積の試算および、培養藻類量の嫌気性

消化槽への投入量の試算を行い、本方法による藻類培養の実現可能性を調査した。

### 3. 下水処理場の反応槽の活用を想定した藻類培養の適用性評価

#### 3.1 実験方法

藻類培養には、200 Lの上部開放タンク型培養槽（直径600 mm×深さ1010 mm）（写真-1）を用いた。培養基質には、A市の処理センター内にある汚泥分離液処理施設の流入水および処理水を用いた。実験期間中の流入水、処理水のSS、水質（COD；Chemical Oxygen Demand, NH<sub>4</sub>N；アンモニウム態窒素, TP；全リン）の平均値を、表-1に示す。令和元年度に行った実験室レベルでの試験の結果を元に、流入水と処理水を6対4の割合で混合したものを、藻類の培養基質とした。事前培養した微細藻類を40 L（培養槽の1/5）混合した系、100 L（培養槽の1/2）混合した系を用意した。



写真-1 上部開放タンク型培養槽(200 L)

表-1 流入水と処理水の水質

	流入水	処理水
SS (mg/L)	1,500	9
COD (mg/L)	520	39
NH <sub>4</sub> N (mg/L)	259	19
TP (mg/L)	88	34

微細藻類を100L混合した系では、微細藻類が沈降しない程度の強い攪拌強度で混合する系と、微細藻類の沈降をある程度許容する弱い攪拌強度で混合する系の2種類を用意した。微細藻類を40L混合した系では、強い攪拌強度で混合する1種類で培養を行った。それぞれの系において、基質および培養液中の藻類量を、クロロフィルaの測定により、定量した。クロロフィルaの測定は、三波長吸光度法<sup>13)</sup>、<sup>14)</sup>および、本研究で検討した吸光度計を用いた簡易的な方法で行った。

クロロフィルaの定量は、通常吸光度法によって測定されるが、ろ過や、アセトン、ジメチルホルムアミド等による抽出、静置等の前処理に数時間の時間がかかる<sup>14)</sup>。藻類の懸濁液について、吸光度と藻体濃度の関係から、検量線を作成することで定量が可能であることが提案<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup>されており、これを参考に、本研究で培養した藻類培養液について、簡易的な測定方法が適応可能か検証を行った。

#### 3.2 クロロフィルaの簡易測定

純粋な藻類の懸濁液において、400 nm～900 nm前後の吸光波長の間で吸光スペクトルを測定すると、430 nm～470 nmおよび680 nm付近にクロロフィルaのピークが来ることが知られている<sup>16)</sup>。そのため、680 nm付近のピークから、藻類の細胞密度が測定可能であるとされている。

図-1に、本研究で用いた基質、本研究で培養された微細藻類培養液(1)、微細藻類培養液(2)の3種類において、吸光度波長400 nm～800 nmの間で5 nm間隔で測定した結果の一例を示す。基質では、波長が長くなるにつれ、吸光度の減少がみられた。微細藻類培養液(1)、(2)では、波長が長くなるにつれ、吸光度が減少するとともに、400～470 nm付近での吸光度の上昇と、685 nmのピークが見られた。本研究では、微細藻類培養液中には、微細藻類のほかにも、懸濁物や細菌類など様々な物質が存在しており、吸光スペクトルにもこれら物質の吸光が混在した状態で現れている。そのため、藻類培養液の685 nm付近の吸光度と、既存の手法に則って前処理を行った吸光光度法<sup>14)</sup>による685 nm付近の吸光度に相関関係は見られない。そこで、藻類培養液における懸濁物等による吸光度（図-1基質の吸光スペクトルに相当する部分）を差し引くことによって、クロロフィルa由来の吸光を算出することとした。

懸濁物等による吸光度は、波長が長くなるにしたがって直線的に減少するものとし、吸光スペクトルの形から、微細藻類の吸光度に影響されないと判断した550 nmと740 nmの吸光度で一時直線を引くことで、その間の減少傾向をみるものとした。この直線の式を算出し、685 nm時の懸濁物等による吸光度を推定し、685 nmの吸光度から差し引いた分を、クロロフィルa由来の吸光とみなした。本研究で培養した、38種類の培養時期が異なる微細藻類培養液において、三波長吸光度法によりクロロフィルa濃度を算出し、上記の方法により算出したクロロフィルa由来の吸光度と比較したところ、これらに相関関係がみられ、式(1)によ

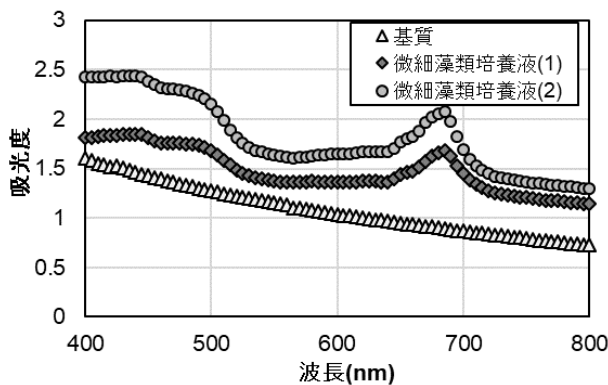


図-1 微細藻類培養液、基質における吸光スペクトル(400 nm~800 nm)の一例

り表されることがわかった ( $R^2=0.90$ )。この式(1)を用いて、簡易的に算出する推定クロロフィルaを測定することとした。

推定クロロフィルa

$$= 23.6 \times \text{クロロフィルa由来の吸光} + 0.27 \quad (\text{式1})$$

上記の38種類以外の微細藻類培養液において、簡易測定法と、三波長吸光度法によりクロロフィルaを算出し、値の相関関係を調査した結果を図-2に示す。図-2より、2方法によるクロロフィルaには相関関係が見られ、値はほぼ同じであることが示された。よって、本方法により、懸濁物を含む微細藻類培養液において、クロロフィルaの簡易的な推定が可能であることが示された。

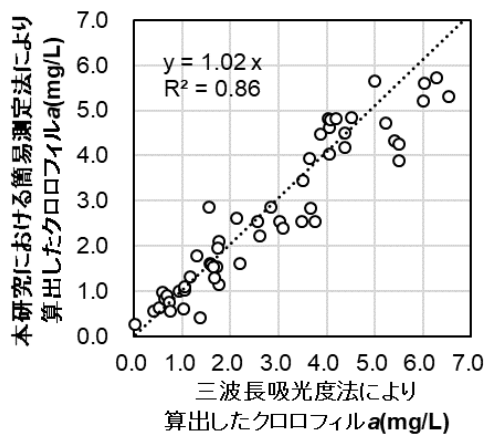


図-2 三波長吸光度法と簡易測定法により算出したクロロフィルaの相関曲線

### 3.3 基質濃度と攪拌強度の違いによる藻類培養量の比較

図-3に、200 L培養槽での微細藻類培養における、クロロフィルaの経時変化を示す。図-3(a)は、微細藻類を100 L混合し、弱い攪拌強度で培養した系である。図-3(b)は、微細藻類を100L混合し、強い攪拌強度で培養した系である。図-3(c)は、微細藻類を40 L混合し、強い攪拌強度で培養した系である。培養開始後、(a)(b)では、クロロフィルaの増殖が見られたが、(c)では見られなかった。(a)(b)では、基質の光透過性が低い、混合した微細藻類量が多かったため、光を吸収できる藻類が存在し、増殖できた一方で、(c)では、基質の透過性が低く、最初に混合した微細藻類の量が少ないため、光を吸収できる藻類が少なく、増殖できなかったと考えられる。そこで(c)では、途中から、10分攪拌、50分攪拌停止の間欠攪拌に切り替えた。間欠攪拌に切り替え後、クロロフィルaの増加が見られ、切り替え後、約1週間で、微細藻類を100 L混合した系と同程度のクロロフィルa量に達した。これは、攪拌停止中に、懸濁物が沈降し、槽内に届く光量が増加したからだと考えられる。

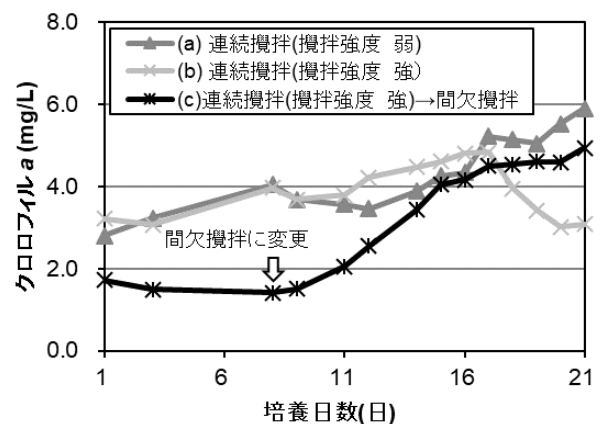


図-3 異なる基質濃度、攪拌強度による藻類培養液のクロロフィルaの経時変化((a)(b):微細藻類を100L混合した系、(c):微細藻類を40L混合した系)

図-4に、培養期間中の晴天時における、各培養槽の深さ方向の光の量を示す。藻類培養タンク内の光の量は、指数関数的に減少する傾向がみられた。これは、湖や沼地の水中の光量の減衰を表すランベルトベールの法則(式2)にあてはめ、表すことができた(図-4、破線)。



$$A = B \cdot \exp(-kz) \quad (\text{式2})$$

A: 水深  $z$  における水中光量

B: 水面直下の水中光量

k: 減衰係数

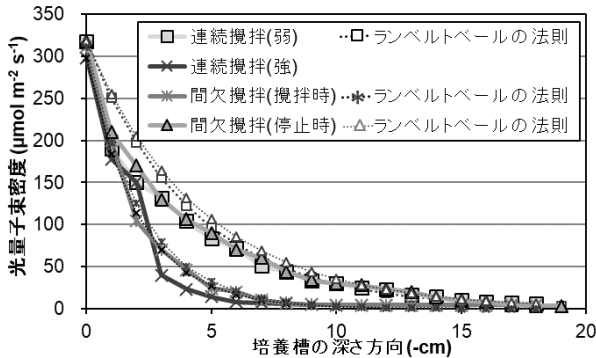


図 - 4 培養期間中の晴天時における、各培養槽の深さ方向の光量子束密度

攪拌強度の強い系では、約 6 cm で光がほとんど届かなくなったが、攪拌強度の弱い系および、間欠攪拌(停止時)では、約 20 cm まで光量がゼロにならなかった。光量が届く深さの違いは、微細藻類の培養量に影響を与えたことがわかる。

以上の結果より、光を上部からのみ取り入れられる反応槽等を活用したタンク型での微細藻類培養では、微細藻類の初期濃度を高い状態にするか、間欠的に攪拌することによって、微細藻類が光と接触する機会を増やすことができ、微細藻類の培養量を増やすことができることが示唆された。

### 3.4 下水処理場における藻類培養ポテンシャル

#### 3.4.1 培養藻類のエネルギーポテンシャル

本研究において、上部からのみ光が取り入れられるタンク型培養槽を用いて、汚泥分離液処理施設の流入水と処理水の混合液を基質として培養した藻類について、JIS M 8814に従って、高位発熱量を測定した。攪拌弱、攪拌強、間欠攪拌による各培養系における培養藻類の高位発熱量は、それぞれ17,2、15,8、16,4 MJ/kg-DSであり、未消化汚泥と同様であった。しかし、光の透過量が多い、カラム型培養槽を用いた、消化汚泥の脱水分離液を基質とした培養した藻類の高位発熱量での藻類培養では、18~22 MJ/kg-DSの高位発熱量であった<sup>10)12)</sup>ため、それよりは低い結果であった。今回の培養藻類のエネルギーは低いが、培養量や、培養にかかるコスト等では、カラム型培養槽よりも有利な可能性がある。今後、各培養槽における藻類培養に

ついて、各項目での比較検討を行う予定である。

次に、培養藻類のメタンガス発生ポテンシャルを評価した。培養藻類を、カチオン系の凝集剤0.75%添加後、沈降させることで濃縮して回収し、A市の処理センターの消化槽への投入汚泥(濃縮汚泥)と混合して、回分式の嫌気性消化を行った。消化汚泥は、上記の消化槽のものを用いた。消化汚泥400 ml、濃縮汚泥を消化汚泥のVS (Volatile Solids; 強熱減量物) (1.8%)の10%、培養藻類を濃縮汚泥のVS (3.6%)の20%で混合し、全量を500 mlに調整し、36℃、15日間の嫌気性消化を行った。

藻類は、TS1.7~2.1%に濃縮でき、上澄み液のSSは、20 mg/L~90 mg/L程度であった。上澄み液は、汚泥分離液処理施設の流入水に返送されるか、下水処理場の流入水として、施設から送水されるかのいずれかで処理されることになるため、上記程度のSSであれば、上澄み液の処理についても問題ないと考えられる。

嫌気性消化を行った結果では、汚泥のみに対して、藻類を添加した系では、ガス発生量が3~4%増加し、今回の培養方法における培養藻類の添加によるメタンガス発生量の増加が確認できた。

#### 3.4.2 下水処理場における藻類培養導入可能性の試算

A市の処理センターの敷地内において、重力濃縮槽を活用して微細藻類を培養し、消化槽へ投入する際のメタンガス発生量を試算した。重力濃縮槽は、容積1,000 m<sup>3</sup> (深さ4 m)、4機を活用すると想定した。培養藻類のTS (Total Solids; 全蒸発残留物)は2%、回収量は4分の3、濃縮藻類はTS3%と仮定した。培養日数を14日とすると、1日あたり約14 m<sup>3</sup>の藻類を消化槽に投入できる試算となる。A市の処理センターの消化槽への投入汚泥を、1槽あたり約200 m<sup>3</sup>/日と仮定すると、投入藻類量は、投入汚泥量の7%と試算され、藻類培養によるガス発生量の増加は、数%程度と想定される。

全国の嫌気性消化を行っている下水処理場において、培養藻類の投入可能性を調査した。図-5に、平成30年度の下水道統計のデータ<sup>17)</sup>を用いて、全国の嫌気性消化槽における、消化槽容積と投入汚泥量の差から試算した、投入可能な容積の割合を示す。約半数の消化槽では、消化槽の容積いっぱいを活用して運転されている状態である。その他41基では、約1%程度、40基程度では、5%~20%、投入可能な容積があるとの試算であった。約半数の消化槽においては、藻類を培養して投入することで、消化ガス発生量の増量が見込

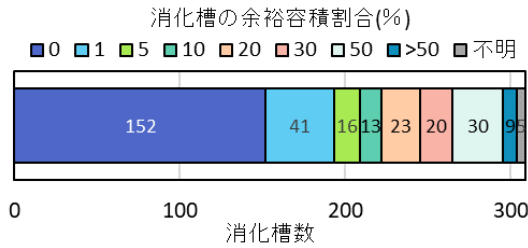


図-5 全国の嫌気性消化槽における、消化槽容積に対する投入可能容積の割合別の消化槽数

めることが想定された。

そこで、これらの処理場を対象として、タンク型培養槽を設置し、脱水分離液を基質とした微細藻類培養を行った場合を想定し、敷地面積、消化槽への投入藻類の増加割合について、適用可能性の試算を行った。1,000 m<sup>3</sup>、5,000 m<sup>3</sup>、10,000 m<sup>3</sup>の藻類培養槽を、それぞれ深さ 1 m、2 m、4 m の 3 ケースで設置、培養日数は、14 日と仮定し、敷地面積の 5 %以下で設置できる処理場数を算出した。また、それぞれの処理場での 1 日当たりの投入汚泥量に対する、培養藻類の投入量の割合を試算した。対象とした処理場は、データを取得可能であった 131 処理場とした。

これらの試算結果を図-6 に示す。容積 1,000 m<sup>3</sup>程度の培養槽（培養槽面積 250~1,000 m<sup>2</sup>）は、対象とした処理場では、大半の処理場において、5%以下の敷地面積で設置可能である試算結果であった。また、このとき、6 割以上の処理場において、投入できる藻類量は、投入汚泥の 5%~10%程度であった。この結果は、対象外とした嫌気性消化槽を保有する処理場においても、同様であった。また、培養槽の深さを深くすることで、容積 5,000 m<sup>3</sup>以上の培養槽が 5%以下の敷地面積で設置可能な処理場数は増えるが、藻類の投入割合も半数近くが投入汚泥に対して 20%以上と大きくなることが示された。一方、今後数十年で、人口減少に伴う投入汚泥量の減少が想定され、培養藻類投入が可能な処理場数や、可能な投入割合が増える可能性がある。藻類の投入割合が増えるほど、消化汚泥の細菌叢への影響が大きくなり、一時的に消化率が悪化する可能性があるため、この点は、今後の動向により調査が必要である。

安定的な培養のためには、培養槽の高さを 1m 程度にすることが望ましく、この場合、敷地面積 5%以下で 5,000m<sup>3</sup>以上の培養槽を設置できる処理場数は、40 以下と限られるが、これらのほとんどでは、5%~10%の投入割合となり、現状では、実現可能性が高いと想

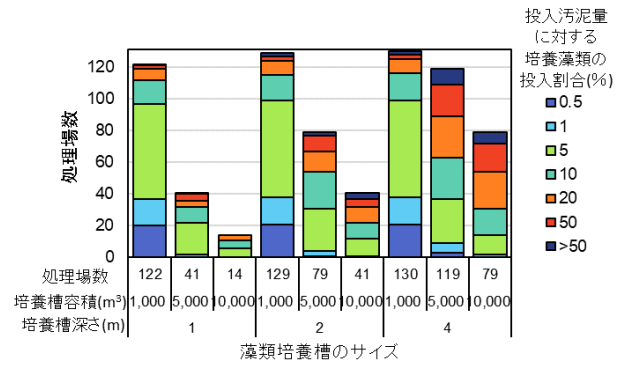


図-6 嫌気性消化槽を保有する下水処理場における、各面積のタンク型培養槽が敷地面積5%以下で設置可能な処理場数および各消化槽への投入汚泥量に対する培養藻類の投入割合

定される。

以上の結果より、タンク型の藻類培養槽を用いた藻類培養および嫌気性消化槽への投入によるバイオガス発生量の増量について、処理場の敷地面積面、投入割合ともに、現状の下水処理場の状況において、実現可能な処理場は一定数存在することが示された。

タンク型の藻類培養槽では、光の透過量が他の形状の培養槽よりも少なく、培養量は少ない傾向にあるが、培養槽の建設や運転では、他の形状の培養槽よりも安価であり、導入も容易であると考えられる。また、休止中の重力濃縮槽や反応槽がある下水処理場では、それを活用した藻類培養を行えば、初期投資はほぼなしで、培養を開始することが可能である。

一方、大都市等にあり、投入汚泥量が多い消化槽においては、培養藻類の投入量が 0.5%以下となるところもあり、その場合は、本研究で検討した培養方法による培養藻類の投入によるバイオガス発生量の増加は顕著には見られない。その場合は、カラム型培養槽内に光源を設置することや、光の透過量が多く、設置面積が少なく済むカラム型を活用すること、タンク型よりも培養速度を上げられるレースウェイ型培養槽を活用することなど、藻類培養設備を充実させ培養量を増やすことで、培養藻類の消化槽への投入適用性が考えられる。

#### 4. まとめ

令和 2 年度には、汚泥分離液処理施設での流入水および処理水を利用した藻類培養について、上部から光を受け入れるカラム型培養槽の適用性の調査、藻類培養の指標としているクロロフィル a の簡易測定の検証、培養藻類の下水処理場での利用可能性の試算を行った。

以下に、得られた成果を示す。

1. 藻類培養量の指標としているクロロフィル *a* の測定について、前処理を行わない簡易的な測定方法が適用可能か調査した。その結果、藻類培養液の 400 nm ~800 nm の吸光スペクトルを測定し、事前に作成した検量線を活用することで、簡易的にクロロフィル *a* が推測できることが示された。
2. 汚泥分離液処理施設での流入水および処理水を利用した藻類培養について、自然光下に設置した 200L の上部から光を受け入れるカラム型培養槽での適用可能性を調査した結果、流入水と処理水を 6 対 4 で混合し、培養藻類を培養槽の半分投入して培養開始することで、藻類の増殖が可能であることを示した。培養開始時の藻類が少ない場合は、間欠攪拌等によって、培養槽内への光量を増やしつつ攪拌を行うことで、藻類培養が可能であることを示した。
3. 上部からのみ光を取り入れられるカラム型培養槽を用いて、高栄養塩濃度で透過率が低い汚泥処理工程の水を基質とした藻類培養において、実下水処理場での適用可能性を調査した。1,000 m<sup>3</sup> 程度の藻類培養槽であれば、嫌気性消化槽を保有する処理場において、敷地面積の 5 %以下で設置可能である試算であり、そのうち約 6 割において、消化槽への培養藻類の投入量は、現在の汚泥投入量の 5 %~10 %に相当し、下水処理場での藻類培養および嫌気性消化への適用の実現性が高いと想定された。

## 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～、p.3.17、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. Woiciechowski, C. Larroche, C.R. Soccol : Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage. *Applied Energy*. Vol.88, No.10, pp.3291-3294, 2011
- 6) 鈴木秀幸、武田誠也、渡辺翔太、横山一樹、鈴木健吾、平岩良太、峰哲哉、梅田優一、佐野和裕、塚原純哉、宮内大樹、細川恒、岡健太郎、田嶋淳：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、pp.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
- 9) 山崎廉予、重村浩之：下水を用いた自然発生型藻類培養技術の検討、第 21 回水環境学会シンポジウム、pp.84-85、2018
- 10) 国立研究開発法人土木研究所：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、平成 30 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.12-18、2020
- 11) Y. Yamasaki, H. Shigemura : Natural Microalgal Cultivation Systems Using Primary Effluent and Excess Sludge, *Environmental Technology*, pp.1-13, 2020.
- 12) 国立研究開発法人土木研究所：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、令和元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 4402 号、pp.10-25、2021
- 13) S.W. Jeffrey et al.: New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton, *Biochimie und Physiologie der Pflanzen*, Vol.167, No.2, pp.191-194, 1975
- 14) 建設省河川局：河川水質試験方法(案) [1997年版] 試験方法編、技報堂出版、pp.916-927、1997
- 15) 西澤一俊、千原光雄：藻類研究法、共立出版、pp.278-280、1979

16) 川崎琢真、清水洋平、多田匡秀 : 吸光光度計を利用した餌料用微細藻培養密度の簡易推定法、水産技術、Vol.9、No.1、pp.27-31、2017

17) 日本下水道協会 : 平成 30 年度版 下水道統計 第 75 号、2021

## 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、宮本豊尚、山崎廉予、谷藤溪詩、大本拓

#### 【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。剪定枝等の草木系バイオマス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、し渣搬送ラインを用いた供給手法について検討するため、実施設を想定した機器で破碎・搬送し、草木破碎物等の物性及び機器の運転状況を調査した。その結果、適切に破碎した草木破碎物の供給は実現可能性が高いことが確認された。実下水処理場のベルトプレス脱水機を用いて、刈草及び水草と、消化汚泥の混合脱水試験を行い、下水処理場外に搬出処分した場合における、汚泥処分費の試算を行った。その結果、通常の脱水時における薬注率では、バイオマス混合脱水において、脱水ケーキの含水率が0.4～0.7ポイント低減することが示され、薬注率を凝集が確認できる最低値まで下げた場合も、含水率の低減が確認できた。脱水後の湿ケーキ量は、バイオマス添加により減少することが示された。また、汚泥処分費は、バイオマスを混合しない場合と比較して8%～21%減少する可能性が示された。

キーワード：バイオマス、剪定枝、刈草、下水汚泥焼却補助燃料、汚泥脱水助剤

#### 1. はじめに

下水道整備の進展にとまぬ、令和元年度末時点で下水道人口普及率は約79.7%、管路延長は約48万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<sup>1)</sup>。循環型社会形成推進基本計画（平成25年5月、閣議決定）<sup>2)</sup>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）<sup>3)</sup>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

過年度<sup>4)</sup>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、剪定枝は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草木系バイオマスを、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）<sup>5)</sup>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。一方、実処理場において導入を考える場合、既存の施設を評価し、最大限活用することが重要である。令和元年度は、下水汚泥焼却炉における剪定枝等の補助燃料利用システムについて、実施設への導入手法や課題抽出を行うため、モデル都市・処理場におけるバイオマスの発生量や焼却炉での混焼上限値等について机上による検討を行い、混焼にあたってはバイオマスの焼却炉への供給能力が律速になることを明らかとした<sup>6)</sup>。

令和2年度はバイオマスの供給手法として令和元年度に想定した「し渣の混焼ライン」（図-1）の利用について検討を行った。具体的には、①全国におけるし渣の混焼状況をアンケートにより把握するとともに、②バイオマス破碎時におけるし渣破碎機の挙動、破碎物の物性及びコンベアによる搬送特性について調査した。

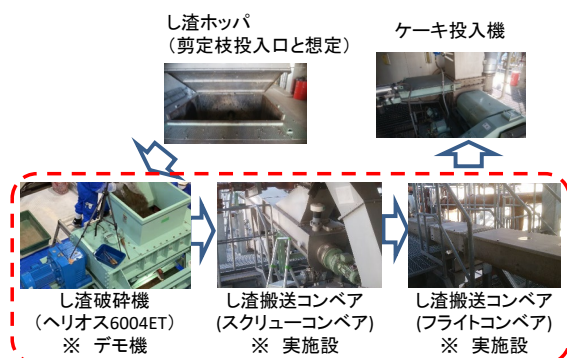


図-1 し渣混焼ラインの機器構成例と令和2年度検討範囲（赤枠内）

## 2. 1 方法

### 2. 1. 1 全国のし渣混焼状況調査

し渣は、下水道用語集（2000年版）によると、「スクリーンかすと同義」とされ、「流入下水中のごみ、木片等の浮遊性のきょう雑物を、スクリーンで除去したもの」とされている<sup>7),8)</sup>。下水道施設計画・設計指針と解説（2019年版）によると、「近年、廃棄物の最終処分場の確保が困難なことから、処理場内で発生するスクリーンかすや沈砂等を脱水汚泥と混合し、焼却するケースもある」とされ、混焼を想定する焼却炉の構造に関する留意点についても言及されている<sup>9)</sup>。

しかしながら、実際に混焼を実施している処理場数や混焼率については調べられていない。そこで今回想定しているし渣の混焼ラインからのバイオマス供給システムについて、適用可能な処理場を把握するため、全国の下水汚泥焼却炉を有している下水道事業者に対してアンケート調査を実施し、令和元年度のし渣の混焼状況を整理した。

### 2. 1. 2 実施設におけるバイオマス搬送特性の調査

実施設のし渣混焼ラインを想定したバイオマスの搬送特性の調査を行った。今年度検討したのは①バイオマス破碎時におけるし渣破碎機の挙動調査、②破碎物の物性調査、③コンベアによる破碎物の搬送特性調査である。

#### ①バイオマス破碎時におけるし渣破碎機の挙動調査

実処理場で導入されているし渣破碎機（ヘリオス6004ET）のデモ機（図-2）を用い、破碎の可否及び破碎時における電流値の変化について調査した。

この破碎機の能力は、最大処理量が0.5t/hであり、カッターは刃巾25mm、30列である。動力は7.5kW、三相4線式、200V、50Hzのインバーター制御である。

実験に供した試料は、X処理場で発生するし渣（汚泥系統のスクリーンかす）及び草木混合物（あらかじめ20mm以下に破碎・調製したもの）である。



図-2 実験に供したし渣破碎機

#### ②破碎物の物性調査

バイオマスをコンベアで搬送するにあたって、搬送路の閉塞やバイオマスの飛散が懸念される。

このうち閉塞については、コンベアの乗り継ぎ等で搬送物を落下させる際、搬送物が積み重なって「高い山」が形成されてしてしまうと次のコンベアに円滑に送ることができなくなる。そこで安息角を指標として、破碎物の物性を評価した。安息角の測定は、所定量の試料を、床から筒底の高さが40cmの位置に設置した筒（直径12cm、筒長15cm）を通して、床に落下させ、その時にできた試料堆積物の山の写真を撮影し、画像解析ソフト（imageJ）で解析することにより測定した。安息角は左右の角度の平均値とした。この試験を3回繰り返し、それらの平均値を採用した。

また、し渣の搬送はフライトコンベア等の閉鎖空間で実施されるよう設計されているが、飛散しやすい搬送物を対象とすると、フライトのチェーンなどに附着し、搬送時の抵抗増加、異音及び異常発熱等の原因にもなりかねない。そこで飛散性について確認するため、Willsらが示した式<sup>10)</sup>を用いて評価した。Willsらが区分した「コンパクト」な物体の場合、飛散条件は式(1)で表現される。

$$\frac{1}{2} \rho_a U^2 C_F > \rho_m l g I \cdots (1)$$

ここで、 $l$ はコンパクトな物体の代表長さ、 $\rho_a$ は空気の密度、 $\rho_m$ は物体の密度、 $C_F$ は空気力係数、 $U$ は飛び出すときの風速、 $g$ は重力加速度である。 $I$ は広い定義の摩擦係数で、置かれているだけの「ルーズ」な物体では $I \approx 1$ とされる<sup>11)</sup>。物体の密度についてはかさ密度を採用し、風速をコンベアの搬送速度と同値と仮定し、速度に応じた舞い上がる可能性のある代表長さを求めた。密度については、安全側の観点から、湿潤条件におけるかさ密度を採用した。かさ密度の測定は以下により求めた。まず所定量のサンプルをバケツにとり、これを逆さまにしてペール缶（直径28.5cm、高さ38cm）に移した。その時のペール管内に存在する試料

の高さを定規により最長部と最短部を測定し、その平均値から求めたかさ体積で所定量を除した。

③コンベアによる破碎物の搬送特性調査

X 処理場で実際に供用されているスクリーコンベア（定格搬送能力 300kg/h、定格出力 1.5kW、定格電圧 400V）及びフライトコンベア（定格搬送能力 300kg/h、定格出力 0.75kW、定格電圧 400V）を用い、搬送の可否及び搬送時における電力消費量の変化について調査した。実験に供した試料は、①で破碎したスクリーンかす及び草木破碎物であり、現在の運転条件である 100kg/h の搬送速度でバイオマスを供給した。

実験の評価は、実際の運搬の可否のほか、電流値の変動からみた抵抗の変化、及び搬送可能な草木破碎物のエネルギー量と使用電力量で行った。

2. 2 結果と考察

2. 2. 1 全国のし渣混焼状況

令和元年度に供用されている焼却炉は 120 処理場の 244 炉であった。このうちし渣を混焼しているのは 44 処理場と全体の約 1/3 の処理場であった。

44 カ所の処理場のうち、スクリーンかすのみを混焼しているのが 24 処理場であり、沈砂池のスクリーンかすのみを混焼しているのが 11 処理場、主に最初沈殿池と濃縮設備の中間（以下汚泥処理系統）に設置されたスクリーンかすのみを混焼している処理場が 4 処理場であった。また、し渣単独ではなく沈砂も同時に焼却している処理場は 20 処理場であった。なお、汚泥処理系統のスクリーンは、4-5mm 程度の目巾であり、沈砂池の細目スクリーンが概ね 20mm となっている。そのため、回収比率は処理場によって異なるものの概ね汚泥処理系統のスクリーンかすが沈砂池のスクリーンかすよりも多く回収される傾向にある(表-2)。

表-2 スクリーンかすの発生比の例

	A処理場	B処理場	C処理場	D処理場	E処理場
沈砂池細目スクリーン巾	20mm	20mm	25mm	25mm	25mm
初沈汚泥系統スクリーン巾	4mm	8mm	4mm	5mm	5mm
回収比	6.2	16.2	1.6	1.4	15.8

※ 回収比は、初沈汚泥系統に設置されたスクリーンの回収量を沈砂池のスクリーン回収量で除した値

スクリーンかす及び沈砂の令和元年度の混焼量は全国で約 1 万 t/年となっていた (図-3 参照)。全国で見れば混焼量の約 8 割がスクリーンかす、約 2 割が沈砂となった。し渣等の汚泥に対する混焼率（湿潤重量ベース）は図-4 に示すヒストグラムとなった。中央値は 3.8%、平均値は 4.6%、最大値は 12.5%で

あった。下水道事業団の機械設備標準仕様書においては、し渣混焼は下水道施設から発生するし渣を対象とし、混焼率を通常 5 質量%以下（最大 10 質量%）とすることが示されており<sup>12)</sup>、概ねこの仕様を踏襲している処理場が多いことが分かった。

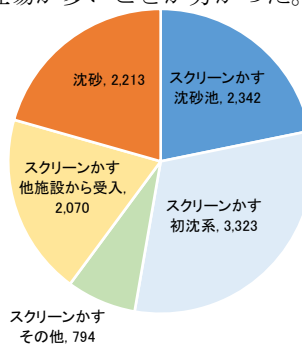


図-3 混焼物の割合 (単位 : t)

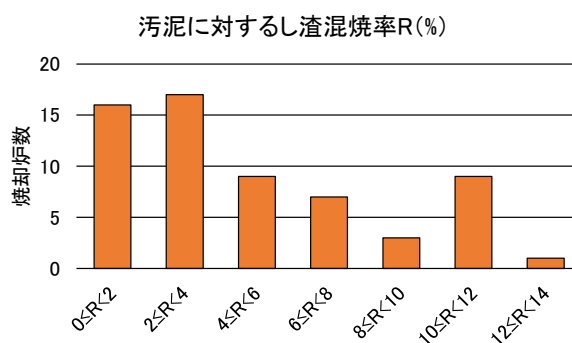


図-4 汚泥に対するし渣混焼率のヒストグラム

2. 2. 2 実施におけるバイオマス搬送特性の調査

①バイオマス破碎時におけるし渣破碎機の挙動調査

し渣破碎機は、破碎物が存在しない無負荷状態であったとしても、刃を回転させるため等に一定の電流が必要であり、本装置では 13A であった。

元来の目的であるし渣（汚泥系スクリーンかす）の投入時は、電流はほとんど変化しなかった。し渣はトイレトペーパーや毛髪等の繊維分と油脂分から構成されており、これらは柔らかく、厚みがあるものではない。そのため破碎機の通過には負荷がかからなかったと考えられる。

一方草木破碎物の投入時は、電流値は増加し、最大で 21A まで上昇した。草木破碎物の中に含まれている剪定枝等の木質は硬さや厚みがあるため、破碎機の通過に際してより大きな力でつぶしあるいは切断が必要となる。しかし今回使用した破碎機の定格電流値（29.3A）に対して最大でも約 70%の負荷となり、今回の条件では草木破碎物をし渣破碎機に投入することは問題とならないことが示唆された。

②破砕物の物性調査

(1) 安息角の評価

①のし渣破砕機通過後の、し渣及び草木破砕物の安息角の測定状況を図-5(a),(b)に示す。いずれもほぼ同等 (40~45°) であり、シュート部における閉塞の可能性は低いことが確認できた。



図-5 (a) 破砕機通過後し渣の安息角



図-5 (b) 破砕機通過後草木破砕物の安息角

(2) 飛散性の評価

し渣と草木破砕物のかさ密度は湿潤状態で 0.68g/cm<sup>3</sup>、0.18g/cm<sup>3</sup>であった。この値をもとに、飛散に必要な風速を (I) 式より求めた。破砕物の長さは破砕後の 20mm 以下の範囲で、粒径の条件を変化させた計算結果を表-3 に示す。概ね草木破砕物はし渣の半分の風速で飛散することがわかる。一方、し渣搬送におけるバケットコンベアの搬送速度は 5m/min(=0.083m/s)以下とする<sup>13)</sup>とされており、1μm 程度以上の大きさであれば、コンベアの搬送に伴う飛散について発生しにくいと考えられる。

表-3 飛散に必要な風速

代表長さL (mm)		0.001	0.01	0.1	1	10	20
風速U (m/s)	し渣	0.10	0.3	1.0	3.2	10.2	14.4
	草木破砕物	0.05	0.2	0.5	1.7	5.2	7.4

次に、コンベアの乗り継ぎやシュート部における粉塵発生について検討するため、ストークス数と粒径の関係を調べた。ストークス数とは、粒子の流れに対する追従性を示す指標であり、大気中での落下現象は(II)式で表現される<sup>14)</sup>。

$$S = \frac{\rho_p d^2 u}{\mu L} \dots (II)$$

ここで、 $S$ はストークス数、 $\rho_p$ は物体の密度、 $d$ は粒径、 $u$ は代表速度、 $\mu$ は空気粘度 (20°Cとして 1.82×10<sup>-5</sup>Pa・s)<sup>15)</sup>、 $L$ は代表長さである。代表長さについてはコンベアの乗り継ぎ高さを想定して 1m と仮定し、代表速度を粒子の最大速度である終末沈降速度とすると $u$ は (III) 式で表現できる<sup>14)</sup>。

$$u = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_a)g d}{3\rho_a C_D}} \dots (III)$$

ここで、 $\rho_a$ は空気の密度、 $g$ は重力加速度、 $C_D$ は抗力係数である。抗力係数はレイノルズ数 $Re$ を用いると (IV) 式で示される<sup>14)</sup>。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & : Re < 2 \\ \frac{10}{\sqrt{Re}} & : 2 < Re < 500 \\ 0.44 & : Re > 500 \end{cases} \dots (IV)$$

ただし  $Re = \frac{\rho_a d u}{\mu}$

粒径に対するストークス数の計算結果を図-6 に示す。ストークス数が 1 より十分大きければ粒子は流体 (ここでは空気) の動きに関係なく運動する<sup>14)</sup>。ストークス数が十分に大きい場合 (ここでは  $S > 10$  と仮定)、その粒子はし渣・草木破砕物ともに 1mm 程度以上のオーダーとなる。逆に言えば、1mm 程度以下のオーダーの粒子については、空気の動きなどの影響を受けた飛散が発生する可能性があり、留意する必要がある。

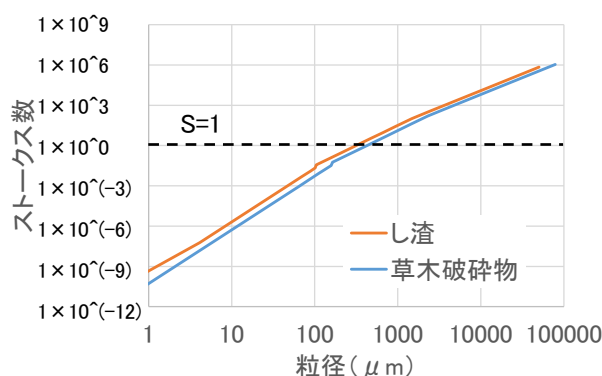


図-6 粒径とストークス数

③コンベアによる破砕物の搬送特性調査

X 処理場で供用されているスクリーコンベア及びフライトコンベアは、し渣及び草木破砕物の閉塞や付着が生じることなく搬送することができた。消費電力については、無負荷状態も含めていずれも実験期間中一定の値 (スクリーコンベアは 3.7A、フライトコンベアは 2.15A) を示しており、付着等による抵抗の増



大は発生せず、消費電力は増加しなかった。

また、かさ密度より単位時間当たりの搬送可能体積について評価した。本研究では、し渣と比べて草木破砕物は単位時間当たりの搬送可能質量は小さくなることが明らかとなった。すなわち、し渣のかさ密度 ( $0.68\text{g/cm}^3$ ) に比べて草木破砕物 ( $0.18\text{g/cm}^3$ ) は小さく、し渣の設計搬送能力である  $300\text{kg/h}$  (し渣として  $441.2\text{L/h}$ ) と同等の体積を搬送するとすれば、草木破砕物の搬送量は約  $79\text{kg/h}$  にとどまる。なお、本実験においてはこの能力以上の草木破砕物の搬送を行ったが、特に問題は生じなかった。

また低位発熱量を求めたところ、し渣は  $1.7\text{MJ/kg}$ 、草木破砕物は  $8.7\text{MJ/kg}$  であった。し渣の設計最大搬送能力  $300\text{kg/h}$  では、し渣が供給できる低位発熱量は  $5.1 \times 10^2 \text{MJ/h}$ 、体積が制限となる場合には草木破砕物が供給できる低位発熱量は  $6.9 \times 10^2 \text{MJ/h}$  となり、草木破砕物のほうがより大きな熱量を供給できることが分かった。なお X 処理場でのし渣搬送系に要する機器の総容量は約  $40\text{kW}$  ( $=1.4 \times 10^2 \text{MJ/h}$ ) であるので、機器の運転に必要なエネルギーよりも供給するエネルギーのほうが大きくなっており、し渣及び草木破砕物のコンベア搬送による焼却炉での燃焼は合理的であるといえる。

### 2. 3 結論

本稿では、バイオマスの供給手法として想定した「し渣の混焼ライン」の利用について、全国におけるし渣の混焼状況をアンケートにより把握し、バイオマス破砕時におけるし渣破砕機の挙動、破砕物の物性及びコンベアによる搬送特性について調査した。得られた結論は、以下の通りである。

- A) 全国の焼却を実施している 120 処理場のうち、し渣を混焼しているのは 44 処理場であった。混焼しているし渣は処理場によって異なっており、し渣の混焼率は、中央値で 3.8%、平均値で 4.6%、最大値は 12.5% であった。
- B) バイオマス破砕時におけるし渣破砕機の挙動を調査した。バイオマス破砕時は消費電力が増加したものの、今回の条件では最大でも定格の約 70% の負荷となり、草木破砕物をし渣破砕機に投入することは問題とならないことが示唆された。
- C) し渣破砕機通過後の破砕物の物性については、し渣と草木破砕物の安息角はほぼ同等 ( $40 \sim 45^\circ$ ) であり、シュート部における閉塞の可能性は低い。また、 $1\text{mm}$  程度以上の大きさであればコンベアの搬送に伴う飛散は発生しにくいと考えられる。

コンベアでの乗り継ぎでは、 $1\text{mm}$  程度以下のオーダーの粒子について飛散が発生する可能性があり、留意する必要がある。

- D) X 処理場に設置されているスクリーコンベア及びフライトコンベアを用いて搬送試験を行ったところ、草木破砕物はいずれも問題なく搬送でき、追加の電力は発生しなかった。
- E) かさ密度から単位時間当たりの搬送可能体積について評価すると、し渣と比べて草木破砕物は単位時間当たりの搬送可能質量は小さくなった。供給できる熱量は、草木破砕物のほうがし渣より大きくなった。
- F) A) ~ E) の結果から、あらかじめ適切に破砕した草木破砕物であれば、実処理場におけるし渣破砕機～搬送用コンベアを用いたバイオマス供給は実現可能性が高いと考えられる。

### 3. 草木系バイオマス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等の草木系バイオマスを下水道事業で受け入れ、下水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、凝集剤添加量や汚泥処分費用の削減が可能となり、草木系バイオマスのリサイクルシステムの確立が可能となる。

平成 28 年度の研究において、 $10\text{mm}$  程度に裁断したイネ科の刈草を、様々な性状の汚泥（標準活性汚泥法の最初沈殿池重力濃縮汚泥と余剰汚泥機械濃縮汚泥の混合汚泥、消化汚泥、オキシデーションディッチ法の濃縮汚泥）と混合し、汚泥の脱水性が向上するか否か、実験室レベルで遠心脱水試験を行った。その結果、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<sup>416)</sup>。

平成 29 年度には、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結果、河川事業における刈草処分費は、焼却処理するよりも破砕処理後に下水処理場へ受け渡す方が削減できる可能性を示した。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<sup>17)</sup>。

平成 30 年度の研究においては、従来検討していたイネ科の刈草以外のバイオマス種類（水草であるオニ

ビシ、スズメノヒエ、クロマツの剪定枝、竹粉)でも下水汚泥の脱水助剤としての有用性の可能性があること、植物系バイオマスの破碎後のサイズが大きく、植物のTSが小さいほど、脱水助剤としての効果が見えやすい傾向を示すこと、汚泥のTS(固形物濃度)が大きいほど脱水助剤の効果が見えやすい傾向を示すことが明らかとなった<sup>18)19)</sup>。また、クロマツの剪定枝、竹粉では、模擬ベルトプレス脱水試験を行った。その結果、脱水後の汚泥量は、バイオマスを混同しない場合と同等レベル、またはそれ以下となり、汚泥を処理場外に搬出する場合のコスト削減が見込まれることが示された。バイオマス混合による脱水の際の汚泥の剥離、ろ液の水質への影響はほぼないものと考えられた<sup>19)</sup>。

令和元年度の研究においては、1 m<sup>3</sup>/h 程度処理が可能なパイロットスケールの圧入式スクリュープレス脱水機を用いて、イネ科の刈草、クロマツの剪定枝、竹粉と、消化汚泥の混合脱水試験を行った。また、本技術導入による経済的な有意性を明らかにすることを目的とし、下水処理場外で焼却処分した場合における、汚泥処分費の試算を行った。その結果、10、30、50%のバイオマス添加率において、最適薬注率では、バイオマス混合脱水において、脱水ケーキの含水率が1.5~14ポイント低減することが示された。また、バイオマス添加率が高いほど、脱水効果が高い傾向を示した。薬注率を凝集する最低濃度まで下げると、バイオマス添加による脱水ケーキの含水率低減効果は見られなかった。脱水後の湿ケーキ量は、バイオマス添加により減少することが示された。これは、バイオマス添加による脱水ケーキの含水率の低減効果が影響していることが示唆された。脱水時における汚泥から分離された排水の水質について、全リン、アンモニア性窒素、全COD<sub>Cr</sub>ともに、バイオマスを混合することで、減少する傾向を示した。バイオマスを下水処理場で破碎し、バイオマス混合脱水を行った後、処理場外の焼却場で焼却処分を行う場合、松および草を10%程度混合

して脱水を行うと、脱水ケーキの処分費がバイオマスを混合しない場合と比較して2~6%減少することが示された<sup>6)20)</sup>。

本研究では、これまでの成果に基づき、実下水処理場(A下水処理場)のベルトプレス脱水機において、数種の草木系バイオマス(イネ科の刈草、水草であるナガエツルノゲイトウ)と消化汚泥の混合脱水の実証試験を行った。水草は、湖沼での刈り取り後、乾燥および破碎の前処理が必要であるため、下水処理場内での前処理について敷地面積の点での可能性を試算した。また、本技術導入による経済的な有意性を明らかにすることを目的とし、下水処理場外で脱水ケーキを処分した場合における、汚泥処分費の試算を行った。

### 3.1 実下水処理場のベルトプレス脱水機による草木系バイオマス混合脱水試験

#### 3.1.1 実証試験概要

バイオマス混合脱水試験は、A下水処理場で冬季に実施した。本処理場は、1日あたりの流入水量が約15,000 m<sup>3</sup>の中規模処理場であり、汚泥処理工程には消化設備を有しており、1日あたり約100 m<sup>3</sup>の消化汚泥(汚泥濃度1.6~1.8%程度)を、ベルトプレス脱水機により脱水している。

本試験で用いたバイオマスの性状を表-4に示す。刈草①および刈草②は土木研究所内で採取し、刈り取りの当日または翌日に破碎処理を行った。水草は、A下水処理場と同じ市内にあるB湖において管理業者が刈り取ったものを使用し、屋根付きの風通しがよい倉庫で、約17日間乾燥後、破碎処理を行った。バイオマスは、樹木破碎機(GS131GH、10 mmスクリーン、大橋製<sup>21)</sup>)で10 mm程度に破碎後、5 mmのふるいにかけて、破碎しきれなかった分を取り除いた。脱水試験は3日間で、表-5に示す13ケースを実施した。薬注率は、通常、本処理場で使用している薬注率である1.1%および、試験直前にピーカー試験により検討した凝集する最低薬注率である0.96%の2種類で検討した。使用

表-4 実験に用いた草木系バイオマスの性状

表記	刈草①		刈草②		水草	
種類	イネ科の刈草(主にススキ)		イネ科の刈草(主にクマザサ)		ナガエツルノゲイトウ	
写真	破碎前	破碎後	破碎前	破碎後	破碎前	破碎後
	含水率(%)	13.1	8.1	30.0	10.6	87.0

した凝集剤は、カチオン系の高分子凝集剤である。

バイオマスの投入は、凝集混和槽の上部から行い、各混合割合となるよう、1分間に一定量の投入を30分間程度行った。投入開始から約50分～1時間後に脱水ケーキを採取し、TS、VS（有機物濃度）を測定し、含水率、バイオマス混合割合を算出した。

表-5 脱水試験の実験ケース(13系列)

実験日	サンプル名	薬注率(%)	バイオマス種類	混合割合*(%)
1日目	系列1	1.1	なし	
	系列2	1.1	水草	10.0
	系列3	1.1	刈草②	10.0
	系列4	1.1	なし	
2日目	系列5	0.96	なし	
	系列6	0.96	刈草①	10.0
	系列7	0.96	刈草②	10.0
	系列8	0.96	水草	10.0
	系列9	0.96	なし	
3日目	系列10	1.1	なし	
	系列11	1.1	刈草①	10.0
	系列12	1.1	刈草①	20.0
	系列13	1.1	なし	

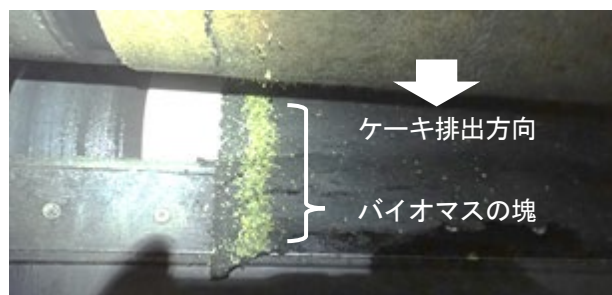
\*汚泥の固形物量に対するバイオマスの固形物量

### 3.1.2 バイオマス混合脱水試験

#### ① バイオマスの混合

凝集混和槽におけるバイオマスの投入において、目視での確認ではあるが、攪拌機の回転数が 68.5 rpm（周速度 3.7 m/s）以上で、バイオマスが汚泥中に混合された。バイオマスを完全に混合するためには、回転数を上げる必要があり、薬注率 1.1 %では 1.1 倍、0.96 %では 1.3 倍、バイオマスを混合しない通常時よりも上げる必要があった。

凝集混和槽において混合されたバイオマス混合汚泥が、ベルトプレス脱水機のろ布に乗るまでの過程を観察した。実験で使用したベルトプレス脱水機では、投入トラフが脱水機入口の中央に設置してあり、凝集剤と混和した汚泥は、両端に向かって広がりながらろ布に均一に乗り、脱水される仕組みであった。そのため、汚泥中に混合しきれていないバイオマスは、ろ布の両端に流れ、脱水ケーキの両端 5cm 位に塊になる傾向がみられた。両端以外の部分においては、バイオマスは汚泥中に均一に混合されていた（図-7）。バイオマス混合の偏りによるサイドリーク等の脱水機への不具合はみられなかった。また、薬注率を下げた系列では、バイオマスがろ布の端によってしまう現象に、解消傾向がみられた。これは、汚泥の凝集が弱くなったことで、バイオマスが汚泥中に混合しやすくなったためだと考えられる。



(a) 排出部のろ布サイドの脱水ケーキの様子  
(バイオマスが端にたまっている)



(b) 脱水ケーキ中にバイオマスが混合されている様子

図-7 脱水ケーキの様子

#### ② ケーキ含水率

各試験ケースにおける、バイオマス込みの見かけの脱水ケーキ含水率およびバイオマス量を差し引いた真の脱水ケーキ含水率の結果を図-8に示す。横軸は、汚泥 1m<sup>3</sup> に対するバイオマスの湿潤混合量を示している。見かけのケーキ含水率は、バイオマス混合により、0.7~1.8 ポイント低減した。真の含水率では、0.4~0.7 ポイント低減した。また、薬注率を下げても、バイオマスを混合することにより、薬注率が通常時のケーキ含水率（図-8(a) 0 kg/m<sup>3</sup> 時のケーキ含水率 81.7%）よりも下がることが示された（図-8(a), (b)の点線以下）。バイオマス混合による、凝集剤使用量の削減が可能であることが示された。

バイオマスは、汚泥の固形物量に対して 10%、20% で混合したため、約 2 kg/m<sup>3</sup>、4 kg/m<sup>3</sup> の混合割合となるはずであったが、3.1.2 ①で示した通り、ろ布の位置によって、バイオマス混合に偏りがみられたため、ケー

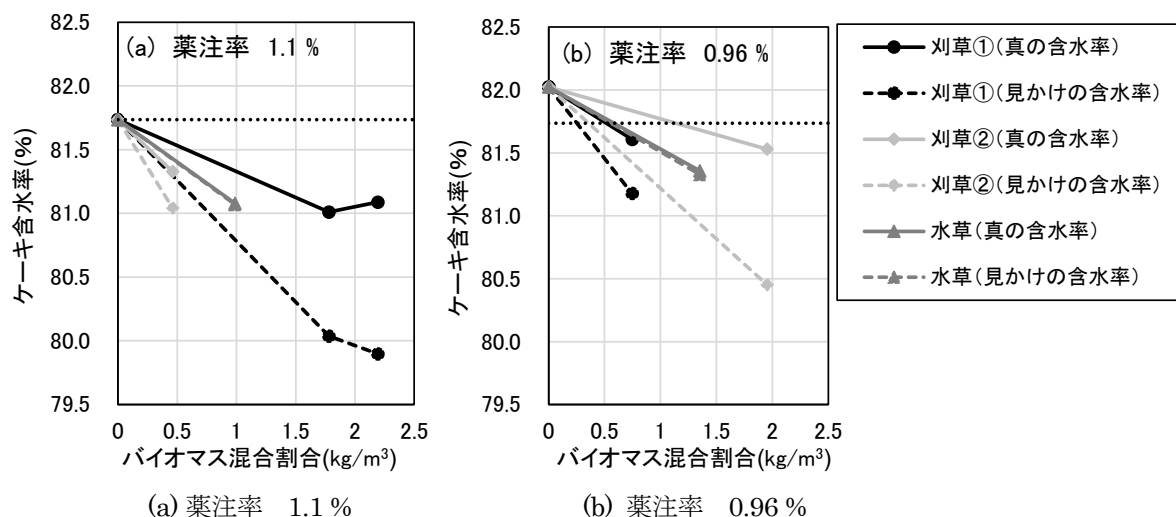


図-8 脱水ケーキの含水率

(真の含水率：バイオマス量を差し引いた計算値、見かけの含水率：バイオマス込みの含水率)

キを採取したろ布中央部分ではバイオマスの混合割合が低くなる傾向であった。

③ ケーキ発生量

ケーキ発生量は、各実験系列で測定することは困難なため、バイオマス混合脱水の実証実験を行った脱水機と通常の脱水を行った脱水機において、1日当たりのケーキ発生量をホッパー重量から比較した。結果を表-6に示す。バイオマス混合脱水を実施した場合、単位時間当たりのケーキ発生量が削減できる結果であった。また、薬注率を下げた2日目においても、ケーキ発生量は同様に削減できた。ろ布速度、上下のろ布圧力、ケーキ厚みは、脱水方法による差はみられなかった。なお、試験期間中の各日において、バイオマス投入の総時間は、脱水機稼働時間の約3分の1であった。今回は、ホッパー重量での算出であったため、ケーキ発生量の削減分は概算量であるが、バイオマス混合脱水により、少なくとも発生量の削減は可能であることが示された。

3.2 実施設におけるバイオマス前処理の可能性検討

水草は、刈取り時の含水率が87%と高く、本研究で使用した破砕機で処理するためには、可能な限り乾燥

させることが望ましい。水草の乾燥は、水草の飛散を防ぐため、屋内の風通しのよい環境で、30cm程度の扉で囲ったスペースにおいて自然乾燥で行った。乾燥時間を短縮させるため、水草を薄く並べた平干しと、乾燥スペースを削減するため、水草を30cm程度に積重ねた方法で、乾燥にかかる日数を検証した。乾燥期間中の平均気温は7.2℃(最低-5.2℃、最高14.7℃)、平均湿度は58%であった。

各乾燥条件における含水率の変化を図-9に示す。平干しでは、7日以上乾燥で含水率が20%を下回り、破砕機での破砕が可能となった。積重ねた場合、上部は平干しと比較して乾燥が遅いものの、10日以上乾燥で約20%の含水率となった。積重ねた場合、下部では乾燥が進まなかったため、3日後に上下を反転させたところ(図-9)、含水率の低下が確認できたため、乾燥途中での切り返しが必要であることがわかった。積重ねた場合では、切り返しを行うことで、17日以上乾燥で含水率が30%になった。試算の結果、本研究で実施した乾燥方法において、水草の乾燥に必要な敷地面積は、平干しで約136m<sup>2</sup>/t、積重ねで約44m<sup>2</sup>/tであった。

全国の中規模処理場(水処理量10,000~50,000m<sup>3</sup>/日)のうち、消化汚泥を脱水している処理場において、バイオマスを汚泥の固形物比に対して10%混合して脱水すると仮定した場合、1日に必要な水草の湿潤量は約2.9t、刈草は約0.5tであった。平干し、積重ねのそれぞれにおいて、水草乾燥に必要な敷地面積は、各中規模処理場の敷地面積(平均約67,000m<sup>2</sup>)に対して、平均で8%、4%であった。実証実験を実施した

表-6 各実験日におけるケーキ発生量

項目	単位時間あたりのケーキ発生量	
	バイオマス混合脱水	通常脱水
単位	t/h	t/h
1日目	0.74	0.85
2日目	0.74	0.85
3日目	0.76	0.85

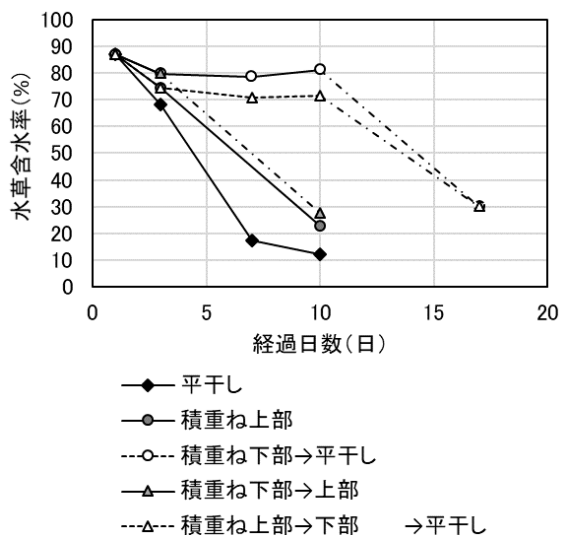


図-9 水草乾燥時の含水率の変化

A 下水処理場においては、それぞれ 2%、1%であった。本研究では、日光が直接当たらない場所での乾燥であったため、天日乾燥が可能な施設とすれば、さらに乾燥にかかる日数、スペースは削減できると想定される。一方、刈草においては、冬季の場合はもともとの含水率が低く、刈取り直後に破碎可能であり、乾燥スペースは不要で、ストック、作業スペースのみで、水草よりも必要な敷地は少なくなる。本試算では、乾燥に必要なスペースのみを試算したが、作業、乾燥したバイオマスのストックスペースを考慮しても、バイオマス前処理スペースは、下水処理場において十分に確保できるものと想定される。また、夏季においては、刈草の含水率や湿度、気温等の乾燥環境が変わるため、再度検討が必要である。

### 3.3 バイオマス混合脱水導入におけるコスト評価

表-7に、バイオマス混合脱水による費用対効果の結果を示す。3.2で示したバイオマス必要量の試算と同じ条件において、試算した。ケーキ発生量は 11 t/日、ケーキ処分費は 16,000 円/t-脱水ケーキ<sup>17)</sup>、凝集剤費用を 820 円/kg<sup>17)</sup>と設定し、バイオマス受入れ費用を 10,000 円/t-バイオマス、発生量の削減を 3.1.2③で概算量として算出された削減量の約半分の 6%と仮定した。バイオマス混合脱水により、通常脱水と比較して、年間で約 5,400 千円～15,400 千円の便益が見込める結果であった。また、バイオマス受入れ時の収入がない場合においても、年間約 3,800 千円～4,800 千円の便益が見込める。本試算で想定したケースでは、バイオマス混合脱水において、バイオマス受け入れ費用、発生ケーキの処分費用による試算の結果、通常脱水と比較して、8%～21%、費用が削減できる可能性が示された。本試算には、バイオマスの破碎機、投入機、保管施設等の初期費用が含まれていないが、これらを考慮しても、数年以内に便益が見込めることが想定された。

### 3.4 結論

本研究では、バイオマスとしての活用が求められている刈草、水草（ナガエツルノゲイトウ）において、下水汚泥の脱水助剤としての有用性を、実下水処理場のベルトプレス脱水機による実証実験で検証した。実験は、冬季に行った。水草は、面積的に、下水処理場の敷地内での前処理が可能か、試算を行った。また、本技術導入による経済的な有意性を明らかにすることを目的とし、下水処理場外で脱水ケーキを処分した場

表-7 バイオマス混合脱水による費用対効果

試算項目	脱水方法	通常脱水	バイオマス混合脱水			
			刈草①	刈草②	水草	
バイオマス必要量	t/日	-	0.43	0.54	2.90	
バイオマス受け入れによる収入	(a)	千円/年	-	1,579	1,962	10,565
凝集剤費用(薬注率通常)	(b)	千円/年	7,602	7,602	7,602	7,602
ケーキ処分費	(c)	千円/年	64,240	60,386	60,386	60,386
-(a)+(b)+(c)		千円/年	71,842 (100)	66,409 (92)	66,026 (92)	57,423 (80)
凝集剤費用(バイオマス混合時薬注率13%削減)	(c)'	千円/年	7,602	6,635	6,635	6,635
-(a)+(b)+(c)'		千円/年	71,842 (100)	65,442 (91)	65,058 (91)	56,455 (79)

合における、汚泥処分費の試算を行った。得られた結果は以下の通りである。

- A) 凝集混和槽におけるバイオマスの投入では、バイオマスを完全に混合するために、薬注率 1.1 % では 1.1 倍、0.96 % では 1.3 倍、バイオマスを混合しない通常時よりも、回転数を上げる必要があった。
- B) ベルトプレス脱水機において、バイオマスは、ろ布の中央部分では、均一に汚泥中に混合されるが、ろ布の両サイドに一部流れ、塊ができる傾向であった。薬注率を下げることで、ろ布の両サイドでの塊は解消される傾向がみられた。
- C) 10 mm 程度に破碎したバイオマスを、添加率 10、20 % で消化汚泥に混合した場合、通常薬注率 (1.1 %) では、バイオマス混合脱水において、脱水ケーキの含水率が 0.4~0.7 ポイント低減することが示された。また、薬注率を凝集が確認できる最低値に下げても (0.96 %)、バイオマスを混合することにより、薬注率が通常時のケーキ含水率よりも下がること示された。
- D) 各実験日における 1 日当たりのケーキ発生量をホッパー重量から試算したところ、バイオマス混合脱水を実施した場合、単位時間当たりのケーキ発生量が削減できることが示された。
- E) 水草乾燥において、平干し、積重ねのそれぞれに必要な敷地面積は、中規模処理場の敷地面積に対して、平均で 8 %、4 % であった。実証実験を実施した A 下水処理場においては、それぞれ 2 %、1 % であった。作業、乾燥したバイオマスのストックスペースを考慮しても、バイオマス前処理スペースは、下水処理場において十分に確保できるものと想定された。
- F) バイオマス混合脱水において、バイオマス受け入れ費用、発生ケーキの処分費用による試算の結果、通常脱水と比較して、8 %~21 %、費用が削減できる可能性が示された。バイオマスの破碎機、投入機、保管施設等の初期費用を考慮しても、数年以内に便益が見込めることが想定された。

以上の結果より、草本系バイオマスと汚泥の混合脱水は、脱水ケーキの含水率の低減、湿ケーキ量の減少、費用の削減において利点がある可能性が、実下水処理場の脱水機を用いた実証実験により示された。また、試算の結果、受け入れバイオマスは、下水処理場内の

敷地面積で前処理可能であることが示された。

### 参考文献

- 1) 国土交通省 下水道 : <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/index.html> (参照 : 2021.4.13)
- 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](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](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 4370 号、pp.27-35、2018
- 5) 中田友三 : 下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価方法及び閉塞防止方法、東京都下水道局技術調査年報 2016、Vol.40、pp.135-148、2016
- 6) 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、令和元年度下水道関係年次報告書集、土木研究所資料第 4402 号、p p.26-35、2021
- 7) 日本下水道協会 : 下水道用語集 2000 年版、pp.167、2000
- 8) 日本下水道協会 : 下水道用語集 2000 年版、pp.210-211、2000
- 9) 日本下水道協会 : 下水道施設計画・設計指針と解説 後編 2019 年版、pp.571-572、2019
- 10) Wills, J.A.B Lee, B.E and Wyatt, T.: A model of wind-borne debris damage, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, Issues 4-5, pp.555-565、2002
- 11) 西村宏明、谷口徹郎、丸山敬 : 飛散物の軌跡の解析と建材の耐衝撃試験、日本建築総合試験所機関紙 GBRC、135 号、Vol.34、No.1、pp.14-24、2009
- 12) 地方共同法人日本下水道事業団 : 機械設備標準仕様書 平成 31 年度、p.13-1、2019
- 13) 地方共同法人日本下水道事業団 : 機械設備標準仕様書、平成 31 年度、pp.13-23 - 13-24、2019
- 14) 粉体工学会 : 粉体層の操作とシミュレーション、pp.74-81、2009
- 15) 国立天文台 : 理科年表、平成 30 年度、p.396、2017
- 16) 山崎廉予、重村浩之 : 刈草を下水汚泥の脱水助剤として活用するための基礎的研究、第 54 回下水道研究発表会講

## 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

演集、pp.1012-1014、2017

- 17) 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
- 18) 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 30 年  
度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.19-34、2020
- 19) 山崎廉予、重村浩之：植物バイオマス混合による下水汚  
泥脱水への影響評価、第 56 回下水道研究発表会講演集、  
pp.1166-1168、2019
- 20) 山崎廉予、重村浩之：草木系バイオマスの活用による下水  
汚泥の脱水性向上とその効果、下水道協会誌、54、698、  
pp.98-107、2020
- 21) 大橋 HP： [http://www.ohashi-inc.com/pdf/GS130  
GH&GS130GHB\\_171226.pdf](http://www.ohashi-inc.com/pdf/GS130GH&GS130GHB_171226.pdf) (参照 2020.6.1)