

バイオマス資源の事業間連携活用 ～植物系バイオマスを活用した 下水汚泥の脱水技術～

山崎 廉予¹・重村 浩之²

^{1,2} 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ
(〒305-8510 茨城県つくば市南原1-6)

近年、下水処理場での地域バイオマス活用の利活用やエネルギー化が推進されている。生ゴミやし尿などの地域バイオマスと比較して、河川等で発生する刈草や湖で繁茂する水草等の植物系バイオマスは、有効利用方法の確立があまり進んでいないのが現状であるといえる。

国立研究開発法人土木研究所では、植物系バイオマスを用いた下水汚泥の脱水助剤として活用するための技術開発を行っている。この技術は、未利用バイオマスの有効活用、下水汚泥と地域バイオマスの連携処分による省エネルギー化の点で有用であると考えられる。また、下水道事業や河川事業において、バイオマス資源の事業間連携活用の促進の一助になると考えている。

キーワード 地域バイオマス、下水汚泥、脱水助剤、事業間連携活用、植物系バイオマス

1. はじめに

平成25年5月に閣議決定された環境省の循環型社会形成推進基本計画において、「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を行う取組や下水汚泥と食品廃棄物など他のバイオマスの混合消化・利用によるエネルギー回収効率の向上を推進する」と明記されている。生ゴミやし尿などの地域バイオマスは、下水汚泥と混合嫌気性消化を行うことで、バイオガス化によるエネルギー化事業が、各地で進んでいる¹⁾。一方、河川等で発生する刈草や湖で繁茂する水草等の植物系バイオマスにおいては、下水処理場での有効利用方法が確立されているとはいえないのが現状である。

国立研究開発法人土木研究所では、植物系バイオマスの利用方法として、下水汚泥の脱水性を高める物質である、脱水助剤として活用することを考えた。本技術を導入した場合の下水道事業と河川事業でのバイオマス資源の連携活用の一例を図-1に示す。河川事業では、刈草の有効利用が確立できるとともに、刈草処分費が削減できる可能性がある。下水道事業では、凝集剤などの汚泥処理にかかる費用の削減や、脱水汚泥の含水率が低下することで、焼却場への運搬費が削減できる可能性がある。

このように、本技術の確立は、未利用バイオマスの有効活用、下水汚泥と地域バイオマスの連携処分による処分費削減の可能性が見込める点で重要である。

本稿では、刈草や水草等の植物系バイオマスを下水処

理場で受け入れ、下水汚泥の脱水助剤として活用することにより、下水道事業におけるバイオマス受入れを積極的に進め、河川事業におけるバイオマス処分の課題を解決するとともに、両事業におけるバイオマス資源の事業間連携活用の観点を含めた有用な技術開発に向けた研究成果について紹介する。

2. 下水道事業・河川事業が抱える課題

(1) 下水道事業における下水汚泥の減容化

下水処理場で発生する下水汚泥の減容化や有効利用は、下水道事業において、常に課題とされている。下水汚泥の減容化は、脱水や嫌気性消化が一般的である。

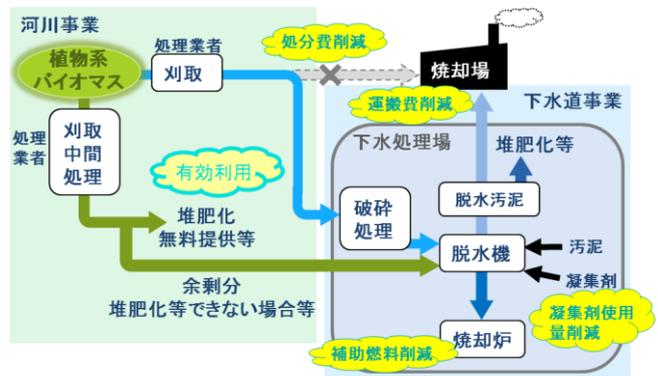


図-1 河川・下水道事業での植物系バイオマス資源の事業間連携活用の一例

脱水後の下水汚泥の含水率は、機械を用いた場合でも全国平均で約80%であり²⁾、脱水汚泥を処分する際に、大量の水も一緒に処分している状況であるといえる。脱水汚泥の含水率を低減することは、その後の汚泥の運搬、焼却、炭化等の維持管理費の削減に繋がる。下水汚泥の脱水性時には、化学薬品である凝集剤を使用することが一般的であり、様々な種類の凝集剤が市販されている。また、高性能な脱水機の開発も各社で行われている。しかし、いずれもコストが高いことや導入コストがかかることが課題として挙げられる。

嫌気性消化は、下水汚泥中の有機物を微生物反応を利用して分解することで、下水汚泥の減容化を行うと同時に、発生する消化ガス（バイオガス）をエネルギーとして利用できる有用な技術として普及している。現在、全国で約300箇所の下水処理場において嫌気性消化が行われているが、その他の下水処理場で新たに設備を構築するためには、導入コストや設置場所の確保が課題として挙げられる。

(2) 河川事業で発生する植物系バイオマス活用の課題

河川管理においては、近年、維持修繕予算が減少傾向にあり、維持管理に係る費用の削減、維持管理の効率化が課題となっている。また、堤防や河川敷の刈草、伐木等を農業やエネルギー資源として活用する取組みが新しく進められつつあり、バイオマス資源としての河川の利活用に関する新たなニーズにどのように応えていくかが課題となっている³⁾。

河川等で発生する刈草の利用方法としては、一般者への無償提供が一般的であるが、処分量が引受先の需要に依存してしまうことや、鮮度や乾燥度等の刈草の品質管理が課題としてあり、刈草の有効利用方法が確立されているとはいえないのが現状である。

また水草は、河川、湖沼等の公共用水域において、富栄養化などの原因により異常発生しがており、水質の悪化、悪臭など、全国的に問題となっている。刈取られた水草は、一部堆肥化され、地域住民に無料配布されているが、それ以外は焼却処分されているのが現状である⁴⁾。

(3) 下水道事業での植物系バイオマス活用

嫌気性消化に受入れられる地域バイオマスとしては、有機物量が多いもの、易分解性であるものや下水汚泥との混合が容易な高含水率であるものが適している。刈草や水草等の植物系バイオマスは、汚泥よりも含水率が低く、有機物量が少ない場合が多いため、生ゴミやし尿と比較して、嫌気性消化での利用の普及には至っていないのが現状である。一方、下水に含まれるティッシュペーパーなどの繊維質や、木質チップ等のバイオマス脱水助剤として活用する既存の研究がある⁵⁾。植物系バイオマスも繊維質が多く、脱水助剤としての可能性を持っていると考えられる。

3. 植物系バイオマスによる脱水原理と目的

植物系バイオマスを汚泥に混合したときの脱水の原理を図-2に示す。汚泥に植物系バイオマス（固形物）を投入することで、汚泥中に水分の通り道ができ、水分が抜けやすくなる⁵⁾と考えられる。汚泥中の水分が、投入した固形物量以上に減少すれば、水分、汚泥を含めた全体の汚泥の重量や含水率は減少する。植物系バイオマスを混合して脱水したときの汚泥の含水率の変化の原理を図-3に示す。「刈草を汚泥の固形物量に対して10%混合して遠心脱水すると、混合しないよりも3%含水率が削減した」と仮定した。下水汚泥よりも含水率が低い植物系バイオマスを混合することで、脱水汚泥の含水率は物理的に減少するが、植物系バイオマスの固形物と水分を、混合脱水後の汚泥から差し引き、汚泥中の含水率を試算すると、1.4%減少したことがわかる。また、全体量も4%減少することがわかる。これは、投入した固形物量よりも、削減された汚泥中の水分量の方が多いためである。このような原理のもと、植物系バイオマスが下水汚泥の脱水助剤として利用できると想定した。

そこで本研究では、植物系バイオマスと汚泥の混合による脱水性の向上について、実験室レベルで検証を行った。また、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。

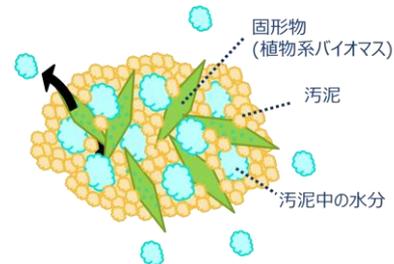


図-2 植物系バイオマスによる汚泥の脱水の原理

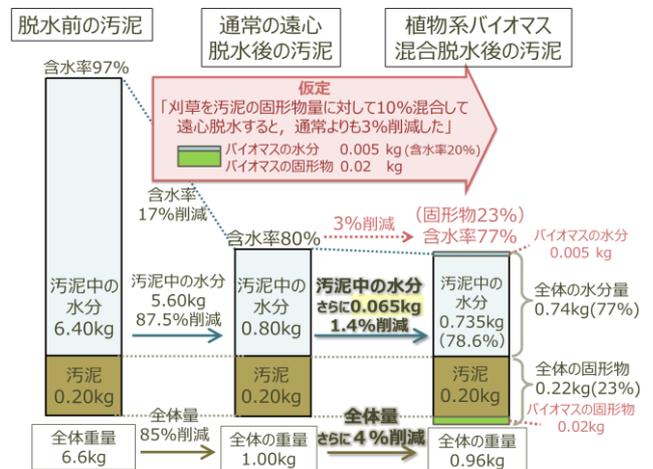


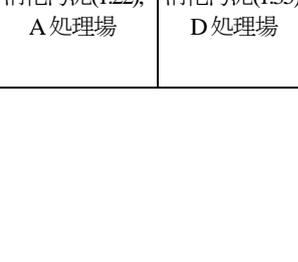
図-3 脱水時の汚泥の含水率の変化の原理

4. 植物系バイオマスによる汚泥の脱水性評価

(1) 植物系バイオマス混合汚泥の脱水試験方法

植物系バイオマスを下水汚泥に混合して脱水することで、汚泥の脱水性が向上するか検証を行った。実験に用いた植物系バイオマスの種類、採取場所、採取方法、前処理方法、汚泥の全固形物 (Total Solids : TS) を表-1に示す。実験に用いた植物系バイオマスは4種類、前処理方法の違いを含めると6種類である。脱水試験に用いた汚泥は、A処理場の最初沈殿池の重力濃縮汚泥と、余剰汚泥の機械濃縮汚泥を1対1で混合した汚泥 (以下、標準 (A))、A処理場の消化汚泥 (以下、消化 (A))、B処理場のOD汚泥の重力濃縮汚泥 (以下、OD (B))、D処理場の消化汚泥 (以下、消化 (D)) の4種類である。それぞれの植物系バイオマスにおいて、表-1に示すように、それぞれ異なる汚泥を用いて脱水試験を行った。植物系バイオマスの混合率は、下水汚泥のTSに対して植物系バイオマスのTSで0%~50%の範囲で検討した。凝集剤は、カチオン系の高分子凝集剤を用いた。凝集剤添加率は、実下水処理場での添加率が1~2%程度であることを考慮して、下水汚泥のTSに対して0%~2.0%の範囲で検討した。脱水方法は、実処理場での脱水方法として最も多く使われている遠心脱水とした。脱水試験は、「脱水セル法遠沈管試験」を参考に、50ml容の100メッシュのろ過筒に凝集剤と刈草を混合した汚泥を投入し、遠心分離機で3,000rpm、20分間の遠心分離を行った⁹⁾。

表-1 実験に用いた植物系バイオマスおよび汚泥の諸元

表記	刈草裁断	刈草粉末	水草 (ヒシ)	水草 (ヒエ)	松 (新)	松 (枯死)	竹
種類	イネ科未同定		オニビシ	スズメノヒエ	クロマツ		破砕機 (GS150, ohashi) で 5mm 程度に裁断
採取場所	土木研究所敷地内		C 処理場内のストックヤード		D 処理場内のクロマツ林		
写真							
採取方法	ハサミで裁断後、2~3日放置		琵琶湖南湖の敷地周縁部で表層刈取り後1カ月程度天日干し		高枝バサミで剪定	落下した枯死葉を回収	
前処理方法	ハサミで10mm程度に裁断	粉碎機で1~5mm程度に粉碎	破砕機(MGS-1510Si, ミナト)で30~50mm程度に裁断	ハサミで10mm程度に裁断	破砕機(G283D, ohashi)で10~30mm程度に裁断	ハサミで10mm程度に裁断	
バイオマスのTS(%)	87.5	97.7	48.9	92.8	49.4	89.8	88.5
*汚泥種類 (TS(%)), 採取処理場	標準汚泥 (2.85), A 処理場	—	標準汚泥(2.53) A 処理場	標準汚泥(2.34) A 処理場	消化汚泥(1.22), A 処理場	消化汚泥(1.35), D 処理場	消化汚泥 (1.22), A 処理場
	消化汚泥(1.88), A 処理場						
	OD 汚泥(1.05), B 処理場						

*標準汚泥, OD (オキシデーションデッチ) 汚泥は濃縮したものを使用

(2) 植物系バイオマス混合汚泥の脱水試験結果

刈草裁断と標準 (A) の混合脱水試験における含水率の結果を図-4に示す。図-4左には、試験値である、植物系バイオマス混合脱水汚泥の含水率を示す。下水汚泥よりも含水率が低い植物系バイオマスを混合することで、脱水汚泥の含水率は物理的に減少する。そのため、植物系バイオマスの重さと水分量を、混合脱水汚泥から差し引くことで、脱水後の汚泥のみの含水率を試算した。その結果を図-4右に示す。この試算値により、脱水汚泥中に含まれる水分が、植物系バイオマスの混合によって減少したか否かが検証できる。

図-4右より、凝集剤0%では、刈草混合率の増加にほぼ比例して汚泥のみの含水率が低下していることから、刈草の混合により、脱水汚泥の脱水量が増加することが示された。従来の脱水条件に近い、凝集剤2.0%、刈草0%と比較すると、凝集剤2.0%、刈草10%または30%および凝集剤1.0%、刈草10%で、含水率はそれぞれ-2.2%、-1.7%、-0.3%低減した。刈草の混合割合によっては、脱水汚泥の含水率の低減効果がみられ、刈草が脱水助剤として有用であることが示された。

図-5に、各植物系バイオマスと各汚泥の混合脱水試験の結果を示す。縦軸は、バイオマス混合率0%で、各試験における凝集剤添加率が最も大きい条件での汚泥のみの含水率と比較したときの、各条件での汚泥のみの含水率の差を、含水率ポイント差として示している。ポイント差がマイナスの場合、含水率の低減効果がみられる可能性があるかとみることができる。また、結果の配置は、

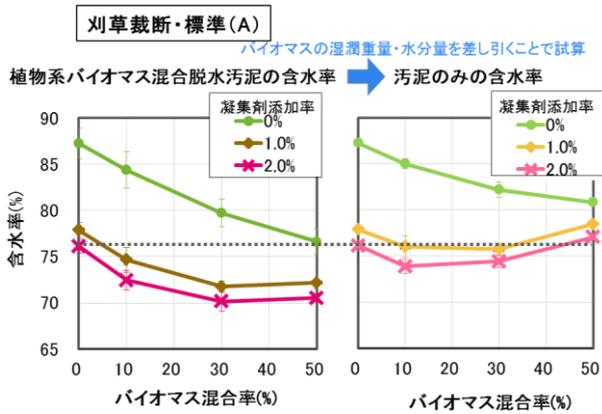


図4 植物系バイオマス混合脱水汚泥と汚泥のみの含水率
汚泥の種類、TSの大小、植物系バイオマスのサイズ、TSの大小で分類して並べている。この結果より、脱水汚泥の含水率の低減効果が見えやすい条件を考察した。

図5より、各結果において、バイオマス混合率の条件は異なるが、少なくとも1条件以上は、含水率のポイント差がマイナスになる条件があることがわかる。これより、本研究の範囲においては、どのような種類の植物系

バイオマスも、脱水助剤としての素質を持っている可能性が示された。混合率が低い場合は、含水率の低減効果が見えにくいのだが、高すぎる場合は、含水率の低減効果が見えない上、脱水汚泥の総重量が上昇する懸念がある。そのため、使用したい植物系バイオマスと汚泥の組み合わせにおいて、事前に最適な混合率を評価する必要がある。

次に、刈草裁断10%、凝集剤2.0%の条件において、汚泥の種類で結果を比較すると、標準(A)で最も含水率ポイント差が低くなっており、次いで消化(A)、OD(B)の順で低いことがわかる。刈草粉末を用いた場合も、OD(B)より、消化(A)で、含水率の低減効果が見えやすい傾向がある。これより、汚泥のTSが大きいほど、脱水汚泥の含水率の低減効果が見えやすい傾向があることが示された。

刈草裁断と刈草粉末の結果を比較すると、消化(A)において、刈草粉末10%、凝集剤2.0%において、含水率ポイント差が最も低いのが、全体としてみると、刈草裁断の方が、刈草粉末よりも含水率ポイント差が低い傾向

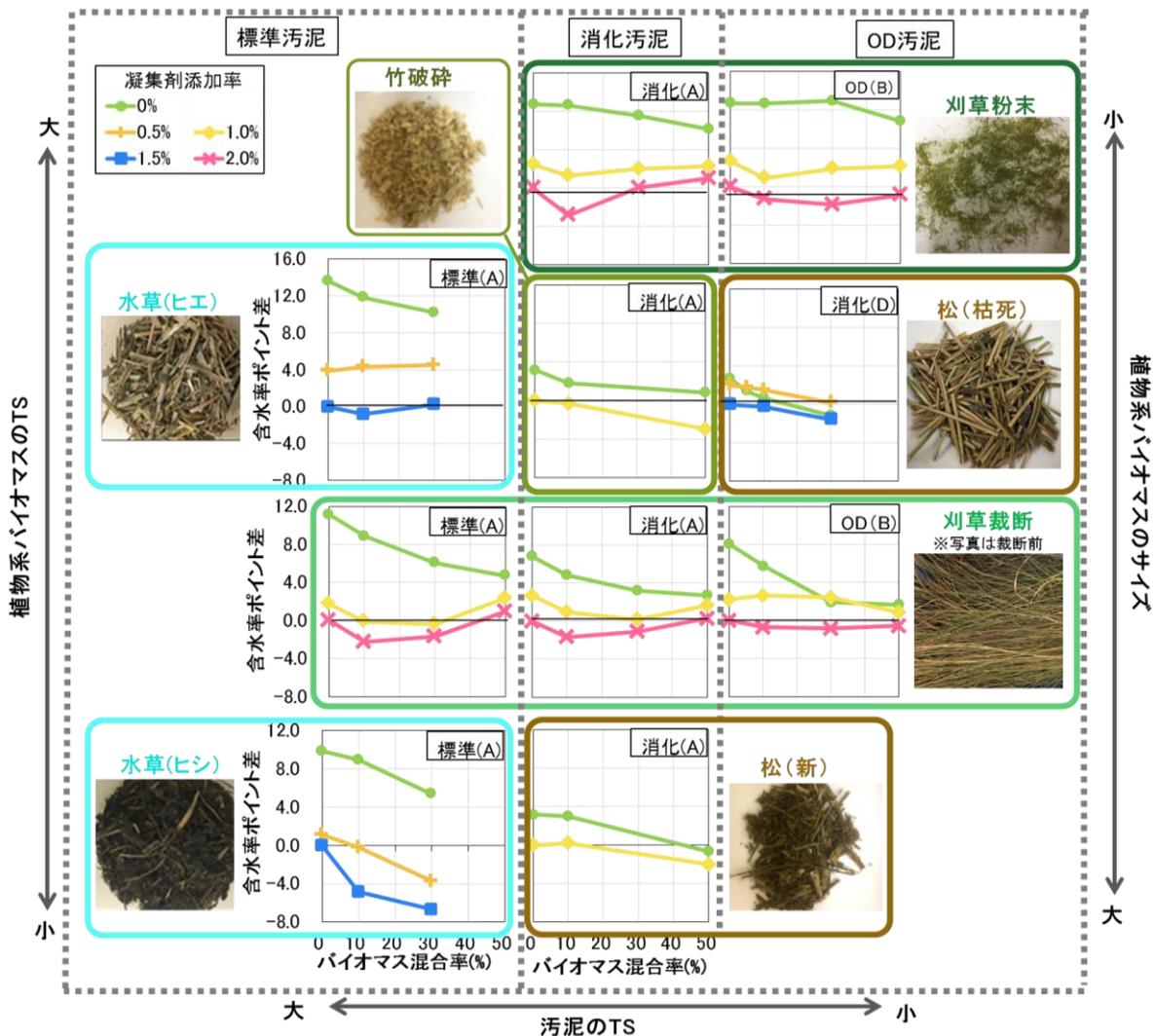


図5 各植物系バイオマスと汚泥の混合脱水試験から試算した汚泥のみの含水率のポイント差
(バイオマス混合率0%、凝集剤添加率最大時の汚泥のみの含水率と比較)

にあり、マイナスになる条件も多いことがわかる。また、標準汚泥において、バイオマス10%時の結果を各植物系バイオマスと比較すると、水草（ヒシ）が最も含水率ポイント差が低く、次いで刈草裁断、水草（ヒエ）の順で低い結果であった。これより、植物系バイオマスのサイズが大きく、TSが小さいほうが、脱水汚泥の含水率の低減効果が見えやすい傾向があることが示された。

4. 植物系バイオマス活用による処分費削減の検証

(1) 河川事業における植物系バイオマス処分費の試算

河川等で発生する植物バイオマス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、処分費が削減される可能性がある(図-1)。そこで、植物バイオマスの代表として既存の知見が多くみられる刈草において、処分方法別の刈草処分費を調査した。処分方法は、図-6に示す5ケースとした。従来の処分方法として、焼却場での処分、存置、ロールラッピングで、一般者に無償提供、下水処理場へ受け渡した後、下水処理場で破碎、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、下水処理場への受渡しである⁹⁾⁷⁾。

図-7に、刈草処分費の比較結果を示す。刈草処分費は、処分方法で異なる文献を参考にしたため、焼却処分の費用に対する比率として示すことで比較した。焼却処分と比較すると、その他の処分方法において、処分費が減額することがわかる。ロールラッピングと、下水処理場へ受渡すケースでは、焼却処分と比較して、ほぼ同程度の減額率で処分できることが示された。しかし、その減額率は、破碎処理を河川事業で行うか、下水道事業で行うかによって変わる可能性がある。これは、下水処理場への刈草の受入れが、廃棄物処理としてか有価物としてかによっても変わるため、それぞれの自治体で対応できる方法で受入れる必要がある。また、草刈場所、下水処理場、再資源化施設の距離によって運搬費が変化するため、それぞれのケースで再度試算する必要がある。

ロールラッピング等で、一般者に提供する場合は、刈草の乾燥方法や腐食度などの品質が求められる可能性が高いが、脱水助剤として使用する場合に求められる品質は高くはないと考えており、一般者に提供できない刈草も使用できると考えられる。

なお、茨城県内において、草刈り1回あたりに発生する未利用の刈草を下水処理場で処分する場合、刈草10%で使用すると仮定すると、脱水施設を持つ40処理場において1.4カ月で処分可能である試算結果が出ている⁹⁾。また、琵琶湖南湖で刈取った水草量を1か所の下水処理場で処分する場合、水草30%で使用すると、1年以内に処分できる試算結果が出ている⁹⁾。

以上より、焼却処分よりも、下水処理場へ受渡す方が、

河川事業者の刈草処分費が削減されることが示された。また、発生した植物系バイオマスは、非現実的でない範囲で、下水処理場における処分が行える可能性がある。

(2) 下水道事業における汚泥処分費の試算

植物系バイオマス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可能性がある。そこで、刈草、標準(A)を用いた場合の汚泥処分費を試算した。脱水汚泥の処分方法は、下水処理場外の焼却場での焼却処分および下水処理場内の焼却炉での焼却の2ケースとした。

下水処理場外の焼却場における焼却処分における汚泥処分費は、脱水時の凝集剤費(820円/kg)、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(16,000円/t(湿重量ベース))の合計とした⁹⁾。刈草の受入れの費用は、実質0円とした。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は脱水設備投入汚泥量の平均値である4,762t/月とした。

下水処理場内の焼却炉での焼却における汚泥処分費は、補助燃料費(A重油、80円/L)、焼却灰処分費(8,000円/t)¹⁰⁾の合計とした。補助燃料量は、刈草混合脱水汚泥の有機物含有量、保有熱量より、自然限界を試算し、算出した。

それぞれの汚泥処分費の結果を図-8、図-9に示す。汚泥処分費は、凝集剤2%、刈草0%の場合を従来かかる費用とみなし、それに対する比率で示した。図-8より、凝集剤0.5%、刈草0~50%、凝集剤1%、刈草0~30%にお

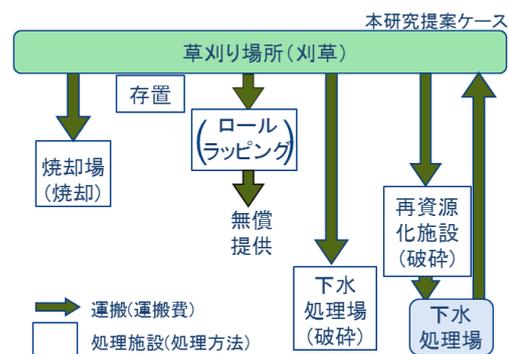


図-6 刈草処分ルートの場合設定

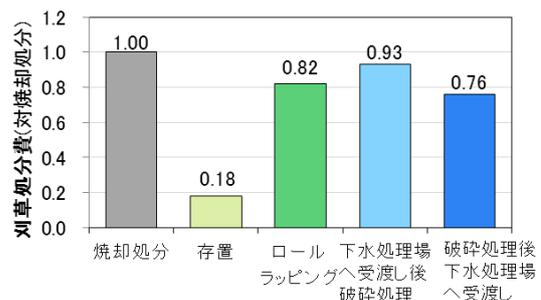


図-7 各刈草処分方法による刈草処分費の比較(対焼却処分費)

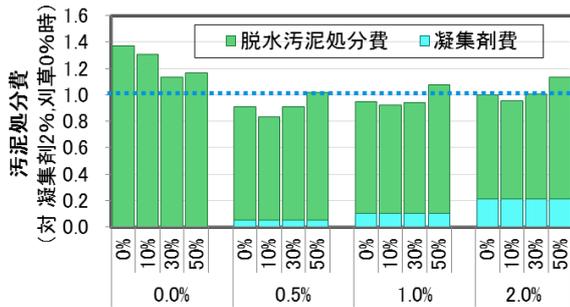


図8 下水処理場外の焼却場において焼却処分する場合の汚泥処分費の試算結果(刈草, 標準(A))

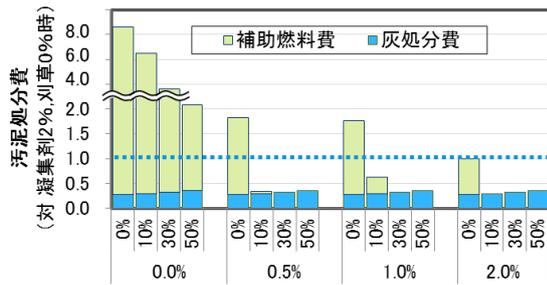


図9 下水処理場内の焼却炉において焼却する場合の汚泥処分費の試算結果(刈草, 標準(A))

いては、凝集剤費の削減が影響し、従来よりも費用が安くなることがわかる。一方、凝集剤2.0%、刈草10%においては、刈草の混合により汚泥の含水率が低減し、汚泥の湿潤重量が減ったため、脱水汚泥処分費が低減し、従来よりも費用が安くなる可能性が示された。図9より、凝集剤0.5~2.0%、刈草10~50%において、従来よりも費用が安くなる可能性を示した。刈草を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た場合においても、汚泥処分費が低減されることが示された。

5. まとめ

本研究では、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で検証した。また、河川事業における刈草処分費、下水道事業における汚泥処分費の試算を行った。

その結果、以上の結果より、植物系バイオマスは、どのような種類でも下水汚泥の脱水助剤としての有用性があること、植物系バイオマスのサイズが大きく、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、汚泥は、TS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。

河川事業における刈草処分費は、焼却処分よりも、下水処理場へ受渡す方が、河川事業者の刈草処分費が削減されることが示された。また、下水処理場外の焼却場に

おける焼却処分における汚泥処分費は、従来よりも安くなる条件があることが示された。下水処理場内の焼却炉での焼却においては、刈草混合により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。

6. 課題

本稿で示した脱水助剤として有効な植物系バイオマス、や含水率の低減効果が見えやすい汚泥の条件は、大まかな傾向として示している。汚泥の違いにより、有機物量などの性状も異なるため、それらも脱水性の違いに影響している可能性があることに留意が必要である。

今後は、ベルトプレス等、脱水方法の検証や、各植物系バイオマスでの処分費の試算等を精査することで、技術の普及に繋げる取り組みを行っていく。

また、実験室レベルでの小規模の脱水実験のみのため、植物系バイオマスのサイズは、大きくても50mm程度までしか検証できていない。実規模機械で脱水試験を行うことで、植物系バイオマスのサイズや混合率を決定するとともに、汚泥の配管、ポンプ、返流水等への影響調査も行う必要がある。

謝辞: A, B, C, D下水処理場の関係者の皆様には、汚泥や植物系バイオマスの採取に関して、多大なるご協力を賜りました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 竹田 悠人, 栗田 雄佑, 小松 俊哉, 姫野 修司: 下水汚泥と刈草の混合嫌気性消化特性, 土木学会論文集G(環境), 71, pp.19-26, 2015
- 2) 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
- 3) 社会資本整備審議会: 安全を持続的に確保するための今後の河川管理のあり方について(答申), 2013
- 4) 滋賀県 HP: <http://www.pref.shiga.lg.jp/d/saisei/files/mizukusa/files/youkouriyou.pdf>
- 5) 高橋広治, 奈良朋之, 安藤健彦, 別府智志, 加藤順一, 林 恭子: 繊維状脱水助剤の適用事例報告, 第51回下水道研究発表会講演集, Vol.51, pp.979-981, 2014
- 6) 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, 土木学会論文集G(環境), Vol.73, No.7, pp.365-373, 2017
- 7) 田知行 志保, 大井 哲哉, 山崎 友子, 中村 晃子, 時田 正樹: 平成28年度北陸地方整備局事業研究発表会, 堤防の刈草処分における新たな取組み(試行)について, 2016
- 8) 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のガス発電の経済性と環境負荷軽減の検討, 国土交通省国土技術研究会論文集, pp.169-174, 2014.
- 9) 山崎廉予, 岡安祐司, 重村浩之: 水草バイオマスを汚泥脱水助剤として活用するための基礎的研究, 第17回世界湖沼会議, 05-23, 2018
- 10) 大下和徹, 高岡昌輝, 水野孝昭: 下水汚泥処理における焼却廃熱を利用した発電システムの検討, 土木学会論文集G(環境), Vol.68, No.7, pp.317-324, 2012