

# 下水汚泥焼却炉における 剪定枝等の木質バイオマス燃料導入に向けた取組み

桜井健介・宮本豊尚・谷藤溪詩・岡安祐司

## 1. はじめに

下水道は、汚水や雨水を排除することで公衆衛生の向上に寄与し、公共用水域の水質の保全に重要な役割を果たしている。下水道整備は進展し、2019年度末時点で下水道処理人口普及率は79.7%に達し、下水処理過程で発生する汚泥量も増大してきた（図-1）。下水汚泥焼却炉は、2019年度において全国に243基あり、焼却される下水汚泥は、乾燥重量で年間約129万トンである<sup>1)</sup>。全国から発生する汚泥は、乾燥重量で約234万トン<sup>2)</sup>であるので、約55%が焼却されている計算になる。

「下水道法」（2022年法律第44号改正）21条の2第2項において、「公共下水道管理者は、発生汚泥等の処理に当たっては、脱水、焼却等によりその減量に努めるとともに、発生汚泥等が燃料又は肥料として再生利用されるよう努めなければならない。」とされている。2015年度の改正により、従来の減量化に加えて、燃料化又は肥料化の努力義務が加えられ、今後増加していくことが期待される。焼却灰からリンを回収し肥料として利用する場合もあり、焼却は、減量の用途だけでなく重要な役割を担うものと思われる。また、国土交通省等が、脱炭素社会の実現に貢献するため、下水道事業の目指すべき姿として示した「グリーンイノベーション下水道」<sup>3)</sup>では、下水道が地域バイオマスや廃棄物処理システムと連携することが期待されている。

下水汚泥は、脱水機で脱水した状態でもそのうちの約80%は水分であることから、単体で燃焼するのは困難で、燃焼を補助するため、重油や都市ガスなどの補助燃料が必要になる。下水汚泥焼却炉において、地域のバイオマスを補助燃料として利用できれば、脱炭素社会の実現に貢献することができると考えられる。本稿では、土木研究所における下水汚泥焼却炉における剪定枝等の木質バイオマス燃料導入に向けた取組みを述べる。

## 2. 剪定枝の補助燃料として利用可能性

### 2.1 剪定枝について

河川、道路、公園、ダムなどの管理のため、毎年定期的に樹木の剪定等が行われている。例えば、全国の道路緑化樹木の本数は、2016年度末時点で、高木670万本、中低木1.4億本が存在し<sup>4)</sup>、定期的に剪定が行われている。国土交通省の109国道事務所、102河川事務所、17公園事務所、25ダム事務所に対して実施したアンケート結果によれば、これらの事務所から、剪定枝は高位発熱量で170TJ/年相当が発生していると推算される<sup>5)</sup>。一般に、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、バイオマスが十分に活用されていない原因の一つであるが、河川、道路、公園、ダムなどの管理のため生じた剪定枝は、日ごろより収集・処分されており、比較的利用しやすいバイオマスである。

土木研究所は、共同研究により下水汚泥焼却炉として加圧流動焼却炉に過給機を組み合わせた「過給式流動焼却炉」を開発した<sup>6)</sup>。その開発の過程において、2005年から2008年の間に、混合装置、圧送ポンプ等を用いた実証試験において、汚泥と広葉樹のチップやバーク等を予め混合して

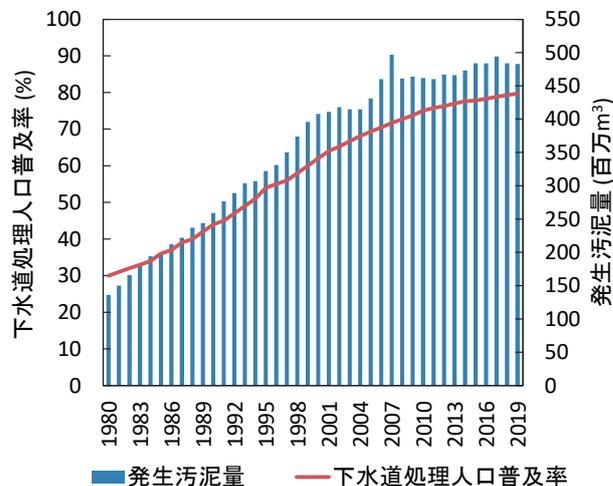


図-1 下水道処理人口普及率と発生汚泥量  
(初沈汚泥や余剰汚泥等の合計)<sup>1)</sup>

から、過給式流動焼却炉へ投入できることを実証した。しかし、剪定枝は対象としておらず、導入可能性は不明であった。

## 2.2 剪定枝の低位発熱量

水分を含むバイオマスの燃焼を検討する際には、水の蒸発に使われる熱量は実際には利用できないので、この無駄になる熱量を差し引いた低位発熱量が用いられる。

剪定枝が剪定された時の含水率は、58-62%程度<sup>7)</sup>であるが、乾燥等によって含水率は変化し、低位発熱量も大きく変わる。含水率別の低位発熱量を試算した結果から、乾燥などにより含水率が60%から20%に低下すると、低位発熱量は、5.6MJ/kg-wetから14MJ/kg-wetへ増加し、乾燥によって含水率を低下させることが有効と考えられる。なお、土木研究所の測定データ<sup>8)</sup>から、水素含有量0.06kh-H/kg-dry、高位発熱量19MJ/kg-dryと設定した。

## 3. 下水汚泥と乾燥させた剪定枝の混合焼却による化石燃料の削減効果の算定

### 3.1 剪定枝の乾燥熱源の検討

脱水汚泥50t-wet/日を焼却する下水汚泥焼却炉(従来の流動焼却炉)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が限られること等から大半が利用されずにいる<sup>9)</sup>。これは、土地の制約などから自然乾燥が困難な場合に、剪定枝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。

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<sup>10)</sup>があり、ステンレス鋼を腐食させる可能性がある。

一方、白煙防止空気は、排ガス中の水蒸気が冷やされて白く見える白煙を防止するの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<sup>11)</sup>。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る。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<sup>12)</sup>」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おり、その際、白煙が見えること等について、周辺住民の理解を求めている。なお、関連する手引き<sup>13)</sup>では、白煙防止基準を設定する場合は、外気温度5℃、湿度50%程度が一般的であるとされている。

### 3.2 剪定枝と下水汚泥の混合焼却による化石燃料削減効果の算定

#### 3.2.1 方法

下水汚泥焼却炉における排熱を活用して剪定枝を乾燥し、乾燥した剪定枝を下水汚泥焼却炉の補助燃料として利用するシステムを想定し、従来消費していた化石燃料の削減効果を算定した<sup>14)</sup>。

方法は、現状の下水汚泥焼却炉における白煙防止空気の利用可能量を算出し、その白煙防止空気乾燥可能な剪定枝の量を算出した。そして、その剪定枝を補助燃料として利用した時の化石燃料削減量を算定した。

本稿における剪定枝の補助燃料利用システムのフローは、図-2に示した。ヤードに収集された剪定枝を、バックホーで破砕機に投入してチップ化し、下水汚泥焼却炉の近傍で白煙防止空気を用いた乾燥機で乾燥させ、貯留槽において短時間貯留後、混練機を用いて下水汚泥と混練し、下水汚泥

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、洗煙に使用した(硫酸、硫酸水素、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 <sup>9)</sup>	50℃	350℃
熱量 <sup>9)</sup>	10GJ/時	1.8GJ/時

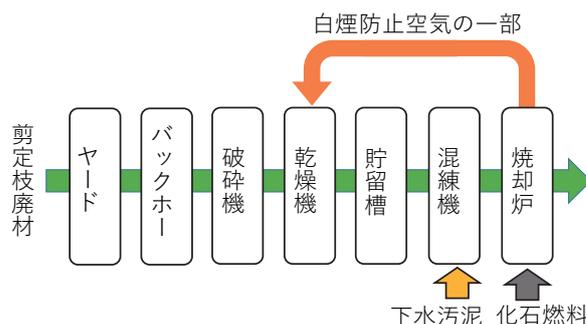


図-2 剪定枝の補助燃料利用システムのフロー

焼却炉へ投入することを想定した。なお、白煙防止空気は貯留せずに、乾燥機の稼働時のみ、発生している白煙防止空気の一部を使用することとした。

### 3.2.2 結果

白煙を防止する際の外気の条件を、一般的な値(外気温度5℃、湿度50%)<sup>13)</sup>にした場合、白煙防止空気の6%を排ガスと混合すれば白煙が防止でき、残りの94%は利用可能と試算された。次に、同じ外気条件において、処理能力50t-wet/日の下水汚泥焼却炉において利用可能な白煙防止空気乾燥可能な剪定枝は、乾燥前の状態(含水率50%)で0.8t-wet/時と算定された。乾燥機が週5日、1日につき7時間稼働する場合は、乾燥可能な剪定枝は1週間で28t-wet(含水率50%)となり、乾燥した剪定枝の低位発熱量は243GJ(含水率20%)となった。新たに生じた剪定枝の破碎工程で消費される化石燃料消費量は16.3GJ/週であるが、これを考慮しても、従来型焼却炉の化石燃料消費量(208GJ/週)を上回る値となることが確認された。

## 4. 既存施設の活用による焼却炉への剪定枝の投入方法の検討

### 4.1 下水処理場のし渣の投入設備について

下水処理場では、処理場内で発生したし渣(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)を下水汚泥と混合して焼却するケースがある。土木研究所の調査では、焼却を行う下水処理場の約1/3で、し渣との混焼が実施されていた<sup>15)</sup>。既存施設においてし渣を焼却炉に投入するための設備を有する場合、その設備を活用して剪定枝も投入できる可能性が考えられる。そこで、し渣の投入フローのうち、破碎・搬送設備が、剪定枝と刈草の破碎混合物(草木混

合チップ)に適用できるか検証したので、本章ではその概要を報告する。詳細は既報<sup>15)</sup>を参照されたい。

### 4.2 方法

実施設のし渣の焼却炉への投入フローとして、図-3の構成を想定し、し渣破碎機(デモ機)、スクリュウコンベア(実施設)、フライトコンベア(実施設)を用いて、①バイオマス破碎時におけるし渣破碎機の挙動、②破碎物の物性、③コンベアによる破碎物の搬送特性を調査した。

### 4.3 結果

し渣破碎機(最大処理量0.5t/h、動力7.5kW)を用いて、草木混合チップ(大きさ20mm以下)を破碎したところ、最大でも定格の約70%の負荷となり、草木混合チップ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(図-4上)と草木混合チップ(図-4下)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と考えられた。また、破碎物のかさ密度から計算によって求めると、粒径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は発生しにくいと考えられた。コンベアでの乗り継ぎでは、自由落下を想定すると粒径1mm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と考えられた。

実施設のスクリュウコンベア(定格搬送能力300kg/h、定格出力1.5kW)及びフライトコンベア(定格搬送能力300kg/h、定格出力0.75kW)を用いて100kg/hの速度で搬送試験を行ったところ、草木混合チップはいずれも問題なく搬送でき、追加の消費電力は発生しなかった。

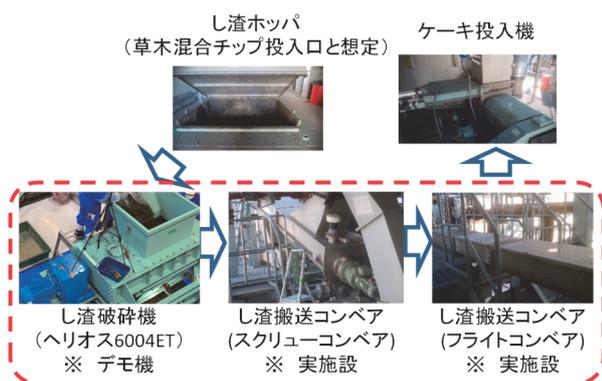


図-3 し渣の焼却炉投入フローと検証範囲(赤枠)



図-4 破碎機通過後のし渣(上)と草木混合チップ(下)

同一体積の破砕物の搬送を仮定すると、し渣に比べて草木混合チップは単位時間当たりの搬送可能質量は小さくなった。一方、草木混合チップは低位発熱量がし渣よりも高く、供給できる熱量は草木混合チップのほうが大きくなった。

これらの結果から、大きさが20mm以下の草木混合チップであれば、下水処理場における既存のし渣破砕機及び搬送コンベアを用いた供給は実現可能性が高いと考えられた。

## 5. おわりに

本稿では、下水汚泥焼却炉における剪定枝等の木質バイオマス燃料導入に向けた取組みとして、剪定枝の補助燃料として利用可能性、既存施設の活用による焼却炉への剪定枝の投入方法などの検討に取り組んできた結果の概要を報告した。

今後の課題としては、污泥中にはリンが高濃度で含まれる場合、析出した岩状物質が煙道を閉塞させる等のリスクを有しており、バイオマスの補助燃料利用はそのリスクを高めることが想定される。そこで、国土交通省の競争的資金（下水道応用研究）により、京都大学、月島機械(株)、(株)タクマと共同で、バイオマスのみならず廃プラスチック、廃タイヤ等の補助燃料について、焼却灰の特性、焼却炉内の反応、排ガスによる影響等を評価し、既存の焼却システムへの適用性を検討することとしている。

引き続き、土木研究所ではこれらの検討を通じ、下水道汚泥焼却炉における木質系バイオマス燃料導入に向けて研究活動を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：令和元年度版下水道統計、2021
- 2) 国土交通省ウェブサイト：<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/content/001480935.xlsx>（最終閲覧日：2022/8/17）
- 3) 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 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書 ～脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道～、2022
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：わが国の街路樹Ⅷ、国土技術政策総合研究所資料第1050号、2018
- 5) 独立行政法人土木研究所：平成20年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料第4157号、pp.38~46、2009
- 6) 桜井健介、植松龍二：過給式流動燃焼システムの開発、月間下水道、第40巻、第7号、pp.33~36、2017
- 7) 独立行政法人土木研究所：平成19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4123号、pp.61~64、2008
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 桜井健介、重村浩之：第46回環境システム研究論文発表会講演集、pp.123~129、2018
- 15) 宮本豊尚、谷藤溪詩、大本拓、重村浩之：学会誌「EICA」、第26巻、第2・3号、pp.60~67、2021

桜井健介



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 主任研究員  
SAKURAI Kensuke

宮本豊尚



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 主任研究員  
MIYAMOTO Toyohisa

谷藤溪詩



研究当時 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 専門研究員、現 森林研究・整備機構 森林総合研究所 森林資源化学研究領域、博士（農学）  
Dr. TANIFUJI Keishi

岡安祐司



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 上席研究員、博士（工学）  
Dr. OKAYASU Yuji