

## 〈ノート〉

し渣混焼ラインを用いた下水汚泥焼却炉に対する  
草木バイオマス補助燃料の供給可能性宮本 豊尚<sup>1)</sup>, 谷藤 溪詩<sup>1)</sup>, 大本 拓<sup>1)</sup>, 重村 浩之<sup>1)</sup><sup>1)</sup> 国立研究開発法人 土木研究所 材料資源研究センター

(〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 E-mail: recycle-imarrc21@pwri.go.jp)

## 概要

下水道事業におけるカーボンニュートラルの推進の一助として、著者らは草木バイオマスの焼却炉補助燃料利用について検討している。本報では、全国の処理場を対象としたアンケート調査によるし渣の混焼状況を把握するとともに、し渣破砕機及び既存の搬送コンベアを用いたバイオマス供給の可能性について、複数のバイオマスを対象に検討を行った。適切に破砕した草木破砕物や木質チップであれば、し渣の混焼ラインを用いたバイオマス供給は実現可能性が高いと想定された。一方、稲わらは供給可能エネルギー量等の観点から不適と考えられた。

キーワード：下水汚泥焼却炉，草木バイオマス，補助燃料，し渣破砕機，コンベア

原稿受付 2021.5.28 原稿受理 2021.7.15

EICA: 26(2・3) 60-67

## 1. はじめに

平成 26 年に策定された「新下水道ビジョン」<sup>1)</sup>では、今後の人口減少にも柔軟に対応可能な污水处理システムへの進化が謳われている。本研究において人口減少と汚泥の発生量との関係を調査したところ、実際に、下水道整備の概成と人口減少に伴い、汚泥の発生量が減少する処理場も発生していた (Fig. 1)。

下水汚泥焼却炉は全国で約 250 炉供用されている (H30 年度末)<sup>2)</sup>。近年は汚泥処理の多様化により焼却炉は減少傾向にあるものの、下水汚泥の約半数の量は焼却されており、焼却プロセスは依然として主要な汚泥処理の一つである。現状、下水道施設計画・設計指針<sup>3)</sup>に示されている稼働率が標準とされた 75-80% を下回る焼却炉は約 2 割となり<sup>2)</sup> (Fig. 2)，今後もその割合は増加することが想定される。これらの焼却炉は放熱等の理由から汚泥投入量が減ると「追加」で補助燃料の供給を増やす必要があり、これによって汚泥量当たりの処分エネルギーが増加する場合がある。

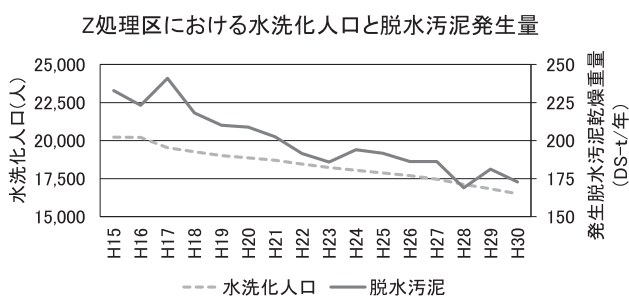
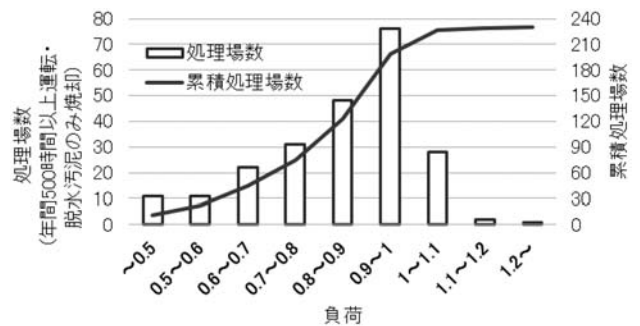


Fig. 1 Example of trends in population using a sewerage system and sludge cake generation



※負荷の算出は下式で実施  

$$H30投入脱水汚泥量(t/年) \div [運転時間(hr/年) \times 焼却炉能力(t/日) \div 24(hr/日)]$$

Fig. 2 Load of incinerators (2018FY)<sup>2)</sup>

下水汚泥焼却炉の補助燃料として主に重油や消化ガスが利用されている。2050年のカーボンニュートラルを目指すうえで、下水道事業から排出される温室効果ガスの4.5%<sup>4)</sup>を占める補助燃料においても再生可能エネルギーの利用を促進する必要がある。カーボンニュートラルを推進するにあたっては、バイオマス補助燃料の利用による重油の使用量削減は有効であり、また消化ガスの燃料利用量を削減し、余剰となる消化ガスを一層の発電に利用することも有効であると考えられる。さらに、脱水汚泥の含水率を低下させ、汚泥そのものを高カロリー化することで補助燃料の利用量を削減することもできるが、汚泥の低含水率化に伴い流動性が低下するため、搬送等の問題が懸念される。

公園管理等の公共事業で発生する剪定枝等の草木系バイオマスの一部は焼却処分されており、カーボンニュートラルな未利用資源として存在している。著者らは、これらのバイオマスを下水汚泥焼却炉の補助燃

料として利用できれば、カーボンニュートラルの推進に貢献できると考えた。これまでにモデル都市・処理場におけるバイオマスの発生量や焼却炉での混焼量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一つの律速になることを明らかとした<sup>5)</sup>。杉チップの補助燃料利用事例<sup>6)</sup>はあるものの、同処理場では木質補助燃料の専用の供給ラインが整備されていた。下水汚泥焼却炉におけるバイオマス混焼の一般化を図る上では、既存施設を最大限活用し、追加の設備投資を最小限とする必要がある。

本報では、下水汚泥焼却炉の付属設備であるし渣混焼ラインを用いた簡便なバイオマス補助燃料の供給手法について評価するため、全国の処理場を対象としたアンケート調査によるし渣の混焼状況を把握するとともに、し渣破碎機及び既存のし渣搬送コンベアを用いたバイオマス供給の可能性について検討を行った。

## 2. し渣とし渣混焼ライン

### 2.1 し渣

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>。①沈砂池のスクリーンで除去したものと、②最初沈殿池と濃縮設備の中間等に設置される汚泥系のスクリーンで除去したものに分類されるが、処理場によってはその他にもポンプ場等のスクリーンで除去したものも含めた概念となっている。し渣は流域の特性・季節変動・降雨の有無等の影響を受け、例えば同じ沈砂池のスクリーンかすであったとしても、油脂や繊維等の成分が変化することが想定される。

### 2.2 し渣混焼ラインの整備と混焼状況

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、し渣の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>。実処理場においては、し渣をホッパで一時的貯留し、その後フィーダーからし渣破碎機に供給し、破碎されたし渣をコンベアで搬送して、脱水汚泥投入機の直前で脱水汚泥と混合して焼却炉に供給するといった事例もある。本稿ではし渣を混焼するために構成された一連の機器群を便宜上し渣混焼ラインと呼ぶ（Fig. 3）。

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下水道統計等の既存統計では整理されていなかっ

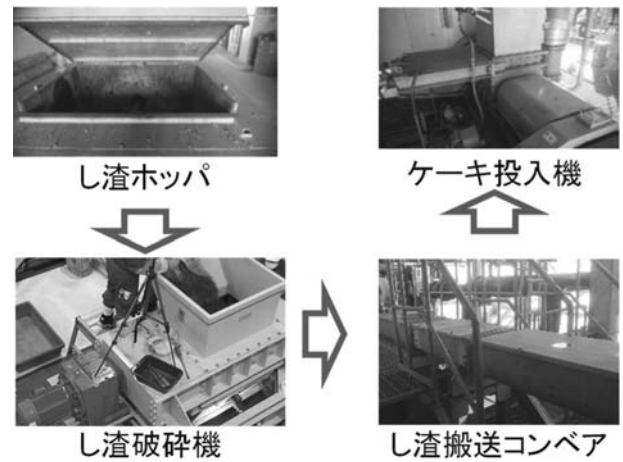


Fig. 3 Example of constituent equipment of the screenings co-firing line

た。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。

令和元年度に供用されている焼却炉は120処理場の244炉であったが、し渣を混焼している処理場は44ヶ所と全体の約1/3の処理場であった。44ヶ所の処理場のうち、スクリーンかすのみを混焼している処理場は24ヶ所であり、沈砂池のスクリーンかすのみを混焼している処理場は11ヶ所、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は4ヶ所であった。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、4-5 mm程度の目巾であり、沈砂池の細目スクリーンが概ね20 mmとなっている。回収された質量の比率（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った（Table 1）。

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（Fig. 4）。全国で見れば混焼量の約8割がスクリーンかす、約2割が沈砂であった。汚泥に対するし渣等の混焼率（湿潤重量ベース）はFig. 5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。

Table 1 Example of screen width and generated screenings ratio

	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	20 mm	20 mm	25 mm	25 mm	25 mm
初沈汚泥系統スクリーン巾	4 mm	8 mm	4 mm	5 mm	5 mm
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

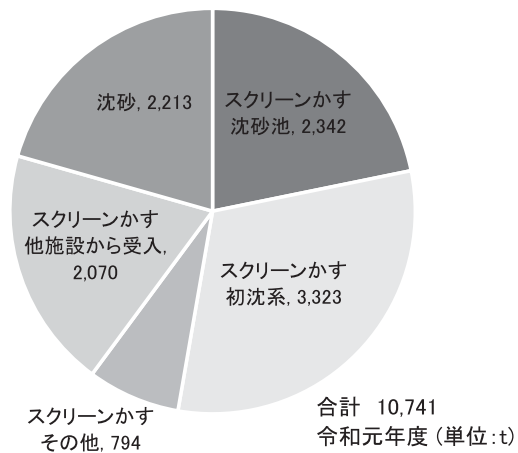


Fig. 4 Co-firing amount of screenings and grit in sewage sludge incinerators in Japan

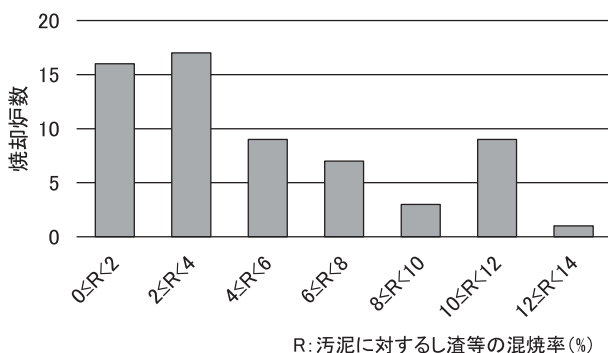


Fig. 5 Co-firing rate of sludge cake to screenings

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>10)</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。下水汚泥を専焼する焼却炉の立場からみるとし渣とバイオマスはいずれも異物であり、また、し渣として回収されるものにも草等のバイオマスも含まれる可能性がある。よってこの値から、バイオマス等の混焼の割合を決めるにあたっての一定の目安が示された。

### 3. し渣混焼ラインを用いたバイオマス供給の適用性検討

次に、実施設のし渣混焼ラインを想定したバイオマスの供給について検討した。本報での調査項目は、し渣破碎機への影響、破碎物の物性調査（安息角と飛散性）、搬送コンベアへの影響である。

検討に用いた試料は、比較対象としてA市X処理場の最初沈殿池と重力濃縮槽の中間に位置に設置されているスクリーンから回収されたし渣（スクリーンかす）と、バイオマスとして草木破碎物（民間の処理施設より購入）、木質チップ（ヒノキ）及び稲わらである。なおX処理場では、汚泥系から発生するし渣に

ついて焼却炉で混焼することが想定されており、沈砂池から発生するし渣は場外で処分されている。

#### 3.1 し渣破碎機への影響

##### (1) 実験方法

実処理場で導入されている破碎機（ヘリオス6004ET）のデモ機（Fig. 6）を用い、破碎の可否及び破碎時における電力消費量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0.5 t/hであり、カッターは刃巾25 mm、30列である。動力は7.5 kW、三相4線式、200 V、50 Hzのインバーター制御である。



Fig. 6 Dreg crusher used in the experiment

実験に供した試料は、X処理場で発生するし渣（汚泥システムのスクリーンかす：10 kg）と、バイオマスとして草木系破碎物（あらかじめ20 mm以下に破碎したもの：15 kg）、木質チップ（同じく20 mm以下のもの：10 kg）及び稲わら（あらかじめ10 cm程度に細断されたもの：10 kg）の3種類である。試料の投入は人力で概ね一定速度で行い、目視にて2軸カッターの刃の上に過剰に蓄積しないように正転と逆転を繰り返しながら破碎を行った。本研究では、し渣およびバイオマスの含水率及びかさ密度がそれぞれ異なっており、同一の投入量および投入容積で実験を進めることは困難であった。しかし、全ての試料において破碎機への供給量はコンベアでの搬送速度と比較すると過剰となる条件で実施しており、破碎機による試料の破碎の可否及び破碎時における消費電力特性を確認するには十分であった。

なお、かさ密度は以下により求めた。まず所定量のサンプルをポリバケツに量り取り（し渣は水分を多く含むため約5 Lとし、バイオマスは約10 Lとした）、これを45°の角度からペール缶（直径28.5 cm、高さ38 cm）に試料を移した。その時のペール缶内に堆積した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。

##### (2) 実験結果

破碎試験において試料の投入に要した時間は、し渣（10 kg）が約3秒、草木破碎物（15 kg）が約40秒、木質チップ（10 kg）が約45秒、稲わら（10 kg）が

約 270 秒であった。かさ密度で除した単位体積あたりで表現すると、し渣 (かさ密度:  $0.60 \text{ g/cm}^3$ ) は約  $5.5 \text{ L/s}$ 、草木破砕物 (かさ密度:  $0.21 \text{ g/cm}^3$ ) は約  $1.8 \text{ L/s}$ 、木質チップ (かさ密度:  $0.13 \text{ g/cm}^3$ ) は約  $1.7 \text{ L/s}$ 、稲わら (かさ密度:  $0.025 \text{ g/cm}^3$ ) は約  $1.5 \text{ L/s}$  となる。これは後述する X 処理場のし渣搬送コンベアにおける定格搬送速度約  $440 \text{ L/h} = \text{約 } 0.12 \text{ L/s}$  と比べてバイオマスでは約 10 倍、し渣では約 50 倍の大きな値となっており、X 処理場で想定される破砕機の運転に対して過剰な処理を実施した場合での実験結果と評価できる。

し渣破砕機は、破砕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  $13 \text{ A}$  であった。

し渣の破砕においては、破砕機の電流がほとんど変化しないことが確認された。し渣は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。そのため破砕機の通過には負荷がかからなかったと考えられる。

バイオマスの破砕ではいずれも電流値が増加した。草木破砕物では、最大で  $21 \text{ A}$  まで上昇した。草木破砕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、破砕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ったと考えられる。しかし今回使用した破砕機の定格電流値 ( $29.3 \text{ A}$ ) に対して最大でも約 70% の負荷であった。木質チップ及び稲わらの破砕では、最大で定格電流値とほぼ同じ値 ( $29 \text{ A}$ ) まで上昇した。木質チップは草木破砕物よりも固くせん断に力を要し、また、かさ密度の小さな稲わらはカッターの刃の上に投入物が厚みを持って堆積したため、それぞれ瞬間的に定格電流値まで負荷が高まったと考えられる。今回の実験では過負荷により破砕機が停止することなく運転が可能であったため、いずれも問題なく破砕機を通過できたといえる。ただし、稲わらの破砕時には細かい粉状の破砕物が発生し、飛散する現象が確認された。

## 3.2 破砕物の物性調査

### 3.2.1 安息角の評価

#### (1) 実験方法

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、破砕物の安息角により評価した。安息角とは、粉粒体を平面上に自然堆積させたときに、堆積した粉粒体と斜面と平面のなす角である<sup>11)</sup>。安息角が大きすぎると、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。シュート部で高い山が形成されると詰まりが生じ、またコンベアのケーシ

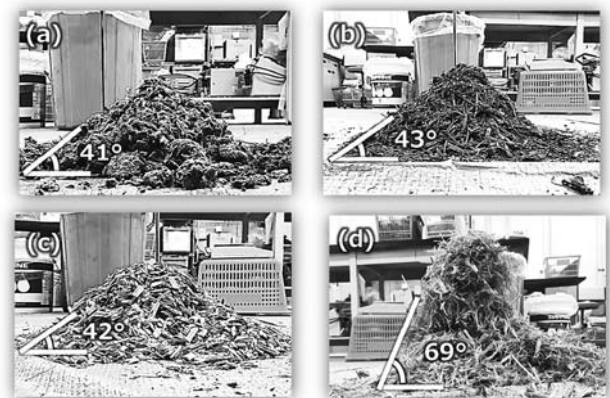
ング内部でも閉塞しやすくなるため、コンベアによって円滑に搬送することができなくなる恐れがある。

安息角は、所定量の試料を、床から筒底の高さが  $40 \text{ cm}$  の位置に設置した筒 (直径  $12 \text{ cm}$ 、筒長  $15 \text{ cm}$ ) 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<sup>12)</sup>) で地面と山の斜面を成す角度を測定し、左右の角度の平均値から安息角を求めた。この試験を 3 回繰り返し、それらの平均値を採用した。

#### (2) 実験結果

し渣破砕機通過後の、し渣と草木破砕物、木質チップ及び稲わらの安息角の測定状況を Fig. 7 に示す。し渣と草木破砕物及び木質チップの安息角はほぼ同等 (約  $40 \sim 45^\circ$ ) であった。本施設で搬送対象として設計されているし渣では閉塞しないよう設計されていると考えられることから、安息角がし渣と同等であった草木破砕物と木質チップについてはし渣搬送ラインのシュート部における閉塞の可能性は低いことが確認された。なお、今回の結果で得られた安息角 (約  $40 \sim 45^\circ$ ) は、粉体の流動性評価<sup>13)</sup>と照らし合わせても普通とされる範囲である。

一方、稲わらについては、約  $70^\circ$  とし渣と比べて安息角が大きく (流動性が悪く)、シュート部における閉塞の可能性が否定できない結果となった。



a: し渣, b: 草木破砕物, c: 木質チップ, d: 稲わら  
note: 角度は3回の測定における平均値を表記

Fig. 7 Angle of repose of each sample

### 3.2.2 飛散性の評価

#### (1) 評価方法

し渣の搬送はケーシングが設置されているフライトコンベア等の閉鎖空間での実施を想定して設計されているが、飛散しやすい搬送物を対象とすると、フライトコンベアのチェーン等に付着し、搬送時の抵抗増加、異音及び異常発熱等が懸念される。そこでコンベアのケーシング内の飛散性について、Wills らが示した式<sup>14)</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(I)で表現される。

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

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>15)</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、速度に応じた飛散の可能性のある代表長さを求めた。密度については、水分を含んだ状態のかさ密度を採用し、通常コンベアで搬送するし渣およびバイオマスは水分と一定の空隙を含んだ塊であるとして捉え、飛散が起こりやすい条件において計算を行った。かさ密度は、破碎機を通過した各材料に対して、3.1(1)に記載した手法で測定を行った。

また、搬送物の飛散はコンベアの乗り継ぎやシュート部でも発生することが想定される。搬送物の落下に伴う飛散については、ストークス数と粒径の関係から評価した。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>17)</sup>。

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

ここで、 $S$ はストークス数、 $\rho_m$ は物体の密度、 $d$ は粒径、 $u$ は代表速度、 $\mu$ は空気の粘度(20℃として $1.82 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ )<sup>18)</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>17)</sup>。

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

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>17)</sup>。

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

ただし $Re = \frac{\rho_a d u}{\mu}$ である。

## (2) 結果

湿潤状態のかさ密度は、し渣が $0.68 \text{ g/cm}^3$ 、草木破砕物が $0.18 \text{ g/cm}^3$ 、木質チップが $0.16 \text{ g/cm}^3$ 、稲わらが $0.034 \text{ g/cm}^3$ であった。この値をもとに、コンベアのケーシング内において搬送物が飛散し得る風速を(1)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Fig.8に示す。概ね草木破砕物や木質チップはし渣の半分の風速で、稲わらは約1/4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5 m/min以下とする<sup>16)</sup>とされており、この搬送速度では、草木破砕物や木質チップでは $1 \mu\text{m}$ 程度以上の大きさ、稲わらでは $10 \mu\text{m}$ 程度以上の大きさであれば、飛散しにくいと計算される。

粒径に対するストークス数の計算結果をFig.9に示す。ストークス数が1より十分に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>17)</sup>ため、コンベアの乗り継ぎやシュート部における粒子の自由落下により、飛散の可能性は低いと考えられる。ストークス数が十分に大きくなる(ここでは $S > 10$ とする)粒子径を求めると、し渣、草木破砕物及び木質チップでは約1mm以上となった。密度の小さな稲わらについては約2mm以上となった。これは、先述したWillsらの式から想定される粒子径(草木破砕物や木質チップで $1 \mu\text{m}$ 程度以上、稲わらで約 $10 \mu\text{m}$ 以上)と比べて大きく、コンベアの乗り継ぎやシュート

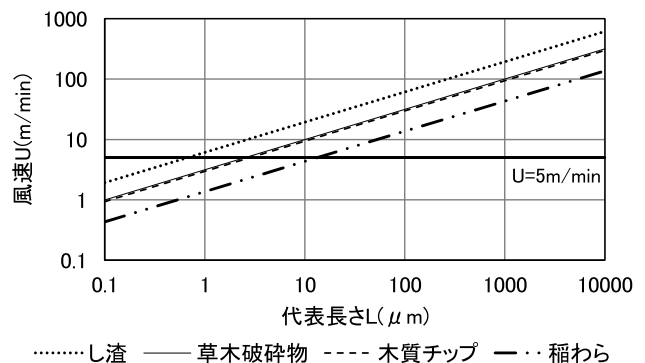


Fig. 8 Wind speed required for scattering

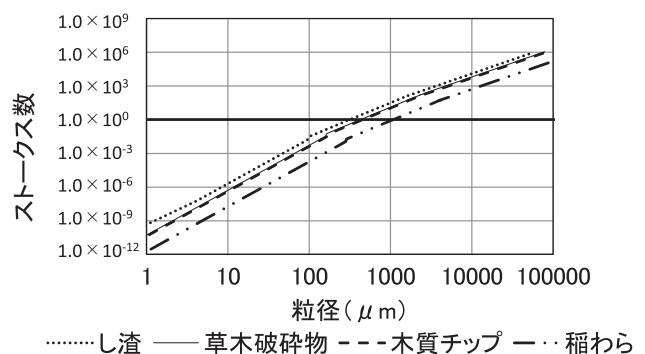


Fig. 9 Particle size and Stokes number

部では比較的大きな粒子も飛散する可能性があることを示している。

以上から、コンベアの搬送やコンベアの乗り継ぎ・シュート部における飛散に関する粒径の目安を示した。

### 3.3 破砕物の搬送特性

#### (1) 実験方法

X 処理場で実際に供用されているスクリューコンベア（定格搬送能力 300 kg/h、定格出力 1.5 kW、定格電圧 400 V）及びフライトコンベア（定格搬送能力 300 kg/h、定格出力 0.75kW、定格電圧 400 V）を用い、搬送状況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。実験に供したコンベアの概要を Fig. 10 に、試料と搬送量を Table 2 にそれぞれ示す。破砕物の搬送速度は、X 処理場での通常時におけるし渣搬送速度（100 kg/h）と同一とした。

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、及び単位時間当たりの搬送可能な草木破砕物のエネルギーと使用電力量で行った。

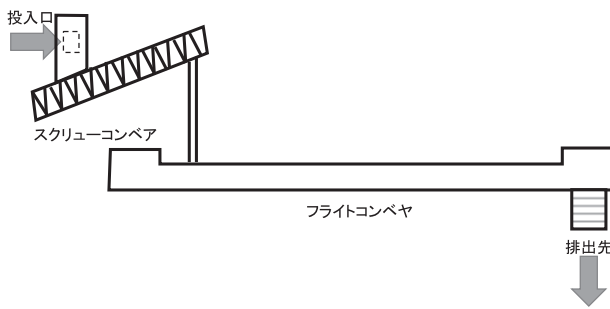


Fig. 10 Conceptual diagram of the conveyor used for the experiment

Table 2 Conditions for transport experiments

	搬送物	混合比	供給量	供給時間	供給体積速度
No. 1	し渣のみ		8.35 kg	5 分	0.15 kL/h
No. 2	し渣+草木破砕物	1 : 1	8.35 kg	5 分	
No. 3	し渣+木チップ	1 : 1	8.35 kg	5 分	
No. 4	し渣+稲わら	9 : 1	5.00 kg	3 分	
No. 5	草木破砕物		8.35 kg	5 分	0.56 kL/h
No. 6	木質チップ		8.35 kg	5 分	0.63 kL/h
No. 7	稲わら		3.00 kg	5 分	1.1 kL/h
No. 8	し渣のみ		16.7 kg	10 分	0.15 kL/h

#### (2) 結果

X 処理場で供用されているスクリューコンベア及びフライトコンベアを用いた実験では、し渣及び草木破砕物の閉塞や付着に伴う過負荷停止等、運転上重大な問題は発生せず、搬送できることが確認された。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（スクリューコンベアは 3.7 A、フライトコンベアは 2.15 A）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。

Fig. 7 に示した通り、稲わらは安息角が高く、スクリューコンベアへの投入部分及びスクリューコンベアからフライトコンベアへの乗り換え部分のシュート部における閉塞が懸念されたが、今回の実験ではいずれの実験系においてもシュート部の閉塞は発生しなかった。一方、実験の途中から、フライトコンベアからこすれるような異音が生じ、特に No. 7 の稲わらの搬送以降は、その異音は大きくなった。3.2.2 で示したように、稲わらは飛散しやすいと想定されるため、チェーン等へ付着したことが一つの原因だと考えられる。本実験では長時間の搬送を行っていないため長期的な影響については不明であるが、チェーンへの付着は異音にとどまらず、摩耗や発熱等の機器トラブルにつながる可能性がある。また、実験終了後にスクリューコンベアの最下部を確認したところ、実験に供した稲わらや木質チップの滞留が確認された。そのため、し渣搬送ラインにバイオマスを送給する際には、定期的な清掃等の対策が必要となることが明らかとなった。

また、本実験では、No. 7 の稲わらの搬送においてスクリューコンベアへの投入が限界に近く、Table 2 に示した以上の量の稲わらの供給は運転上支障をきたすと判断された。そのため、し渣搬送ラインでバイオマスを搬送する場合、搬送物の質量と体積のそれぞれが搬送量を制限する要因となりえることが分かった。すなわち、搬送物の質量が過大となる場合はコンベア駆動部のトルクによる制約を受け、搬送物の体積が過大となる場合、コンベア付属のケーシングから規定される通過可能断面の制約を受ける。

そこで、定格搬送能力（300 kg/h）をし渣のかさ密度で除し、単位時間当たりの搬送可能体積を求めた。し渣の時間当たりの搬送可能体積は 440 L/h であった。これと同じ体積のバイオマスを搬送すると仮定し、体積が制限となる場合の搬送量を求めると、草木破砕物と木質チップの搬送量はそれぞれ 79 kg/h 及び 71 kg/h となり、稲わらの搬送量はかさ密度が低いため 15 kg/h と最も小さな値となった。なお、今回の実験においてはこの搬送量以上のバイオマスの搬送を行っているが、運転上重大な支障をきたす問題は生じなかった。

また、X 処理場の焼却炉は、70 t/日（≒約 3000 kg/h）の汚泥焼却能力を持ち、し渣の汚泥に対する最大供給可能重量比は約 10%（し渣 300 kg/h に対し汚泥 3000 kg/h）で設計されている。体積が制限となる場合の搬送量と X 処理場の汚泥焼却能力（3000 kg/h）の重量比をとると、草木破砕物では約 2.7%、木質チップでは約 2.4%、稲わらでは約 0.5% となり、し渣混焼率の中央値よりも低くなった。体積が制限となる場合として求められるバイオマスの搬送量は、現状の

国内の一般的なし渣混焼量の範囲内であり、概ね妥当であると考えられる。

さらに、高位発熱量と CHN 及び含水率の測定結果から低位発熱量を計算した結果、し渣は 1.7 MJ/kg、草木破砕物は 8.7 MJ/kg、木質チップと稲わらは 14 MJ/kg であった。し渣の設計最大搬送能力 300 kg/h では、し渣が供給できる低位発熱量は  $5.1 \times 10^2$  MJ/h である。体積が制限となる場合の搬送量では、バイオマスが供給できる低位発熱量は草木破砕物が  $6.9 \times 10^2$  MJ/h、木質チップが  $1.0 \times 10^3$  MJ/h、稲わらが  $2.1 \times 10^2$  MJ/h となり、木質チップ > 草木破砕物 > し渣 > 稲わらの順で熱量を供給できることが分かった。稲わらは、し渣に比べて供給可能なエネルギー量が少なく、搬送試験においても本実験条件以上の供給においては問題をきたす懸念があるため、補助燃料対象としては取り扱うには不適と考えられる。

#### 4. ま と め

本報では、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、実施施設を想定した破砕機及びコンベアでし渣及びバイオマスを処理・搬送し、搬送物の物性及びそれぞれの運転状況について調査を行った。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) バイオマスをし渣破砕機で処理すると破砕機の消費電力が増加し、バイオマスの種類によっては定格電流値と同等の負荷がかかったが、いずれも問題なく通過した。ただし稲わらを破砕した際には、細かい粒子の飛散が確認された。
- C) し渣破砕機通過後の、し渣と草木破砕物及び木質チップの安息角はほぼ同等（約 40~45°）であり、これらはし渣搬送ラインのシュート部において閉塞しにくいと判断された。一方で稲わらについては安息角が約 70° とし渣と比べて大きくなっており、シュート部における閉塞の可能性が否定できない結果となった。
- D) 飛散に与える粒径を検討し、コンベアの搬送や、コンベアの乗り継ぎ・シュート部における落下に伴う飛散の目安を示した。
- E) 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、バイオマスはいずれも重大な問題が

発生することなく搬送でき、電流値の増加は確認されなかった。ただし、稲わらについては閉塞は発生しなかったが、搬送後にフライトコンベアから異音が発生した。その原因としては、破砕された稲わらの細かな粒子がチェーン等に付着した可能性が考えられる。

- F) 体積により搬送可能量が規定されると仮定すると、し渣と比べてバイオマスはかさ密度が小さいため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、木質チップや草木破砕物はし渣より大きく、稲わらはし渣を下回った。

A)~F) の結果から、あらかじめ適切に破砕した草木破砕物や木質チップであれば、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想定された。一方で稲わらについては、し渣よりも供給可能エネルギー量が少ないだけでなく、破砕時における粉体の飛散や安息角が大きすぎることによる搬送（閉塞の可能性）の問題が想定されるため、補助燃料対象としては取り扱うには不適と考えられる。

今後は、バイオマスの混焼に伴い変化する焼却灰の挙動や焼却炉への影響を検討するとともに、補助燃料の多様化についても検討することを予定している。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたっては全国の焼却炉を有する公共団体にはアンケート調査にご協力いただいた。また、X 処理場及び同市下水道計画課の皆様には実験の実施に際し多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を示す。

#### 参 考 文 献

- 1) 国土交通省下水道部・日本下水道協会：新下水道ビジョン、2014年7月
- 2) 日本下水道協会：下水道統計（平成30年度版）
- 3) 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、p.568, 2019
- 4) 国土交通省 HP：SDGsの達成を目指した下水汚泥利活用のあり方について  
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001378321.pdf> (参照 2021.4.22)
- 5) 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、pp.26-35, 2021.
- 6) 東京都 HP：東京都流域下水道 50 年のあゆみ、P.51  
<https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/business/pdf/ayumi50.pdf> (参照 2021.5.22)
- 7) 日本下水道協会：下水道用語集 2000年版、p.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) 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
- 11) 技報堂出版：化学用語辞典 (第三版), p.40, 1992
- 12) Image J (Image processing and analysis in Java) 公開HP: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html> (参照 2021.5.7)
- 13) Carr, R. L.: Evaluating Flow Properties of Solids, Chemical Engineering, 18, 163-168, 1965
- 14) Wills, J. Wyatt, T. and Lee, B. E.: Warnings of high winds in densely populated areas. United Kingdom National Coordination Committee for Natural Disaster Reducton, 1998
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 粉体工学会：粉体層の操作とシミュレーション, pp.74-81, 2009
- 18) 国立天文台：理科年表, 平成30年度, p.396, 2017

## Possibility of Supplying Vegetation Biomass Auxiliary Fuel to a Sewage Sludge Incinerator Using a Screenings Co-Firing Line

Toyohisa Miyamoto<sup>1)</sup>, Keishi Tanifuji<sup>1)</sup>, Taku Omoto<sup>1)</sup> and Hiroyuki Shigemura<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> National Research and Development Agency Public Works Research Institute

† Correspondence should be addressed to Toyohisa Miyamoto :  
(National Research and Development Agency Public Works Research Institute  
E-mail : recycle-imarrc21@pwri.go.jp)

### Abstract

To promote carbon neutrality in sewerage works, we have considered using vegetation biomass incinerator auxiliary fuel. In this report, we discuss about the status of co-firing screenings by conducting a nationwide survey of treatment plants and examine the possibility of biomass supply using a dreg crusher and an existing conveyor. Biomass supply using the co-firing line of screenings was assumed to be highly feasible if crushed vegetation and wood chips are finely crushed. In contrast, rice straw was considered unsuitable because of the amount of energy it could supply.

**Key words :** sewage sludge incinerator, biomass, auxiliary fuel, dreg crusher, conveyor