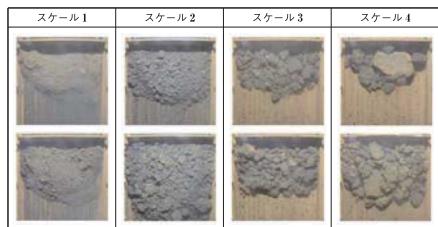


報 告

画像解析を活用した汚泥乾燥機の制御

Control of a Sewage Sludge Dryer Using Image Analysis



杉 井 祥 吾 * 河 野 孝 志 *

Syogo SUGII Takashi KAWANO

坂 口 孝 瑛 ** 水 野 孝 昭 **

Takaaki SAKAGUCHI Takaaki MIZUNO

【要 旨】 2023年3月に竣工した河北都市クリーンセンターでは、ごみの焼却と下水汚泥の集約処理による合理化がおこなわれており、ごみ焼却時に発生する蒸気の一部を利用し、4か所の下水処理場から発生する下水汚泥を蒸気間接加熱型の下水汚泥乾燥機で乾燥させている。乾燥した汚泥はごみとともに混焼して、汚泥乾燥や発電の熱源に利用している。この乾燥機において、固定された運転条件下では汚泥性状や処理量の変動により、乾燥した汚泥の含水率が変動するが、乾燥機の各種パラメータ設定の変更により含水率を調整できることを確認した。本稿では、このパラメータ変更におけるさらなる省力化を目指して画像解析による自動制御手法を導入し、安定運転ができるることを確認したので、その報告をおこなう。

キーワード：汚泥乾燥機、乾燥汚泥含水率、画像解析、機械学習

Abstract

At Kahoku County City Clean Center, which was completed in March 2023, they carry out rationalization (streamline processes) through waste incineration and consolidated sludge treatment. Specifically, they dry the sewage sludge generated from four different sewage treatment plants in a steam indirect-heating-type sewage sludge dryer by utilizing part of the steam generated in waste incineration. They put the dried sludge in mixed combustion with waste for utilization as a heat source for drying sludge and generating power. While the moisture content of the dried sludge fluctuates due to differences in the sludge properties and treatment volume in this dryer when the operating conditions are fixed, we have confirmed that the moisture content can be adjusted by changing various parameter settings of the dryer. This article reports on our confirmation that stable operation of the dryer is possible by introducing an automatic control method using image analysis to further save labor in adjusting these parameters.

Keywords: sewage sludge dryer, dry sludge moisture content, image analysis, machine learning

* デジタル技術推進部

Digital Technology Advancement Dept.

** 水処理技術部

Sewerage Engineering Dept.

1. はじめに

河北郡市クリーンセンター（以下、本施設と記す）は、これまでかほく市、津幡町、内灘町のごみを処理していた RDF 製造施設の老朽化、ならびに石川北部 RDF センター（RDF 専焼炉）が 2022 年度（令和 4 年度）末をもって稼働停止することにともない、河北郡市広域事務組合が「エネルギー回収型廃棄物処理施設建設工事」において建設した一般廃棄物処理施設（図 1 参照）である¹⁾。本施設の概要を以下に示す。

- ・発注者名：河北郡市広域事務組合
(石川県かほく市、津幡町、内灘町)
- ・事業名称：エネルギー回収型廃棄物処理施設建設工事
- ・建設場所：石川県河北郡津幡町字能瀬地内
- ・受入規模：118 t/24 h (88 t/24 h (ごみ) + 30 t/24 h (下水汚泥))
- ・焼却規模：98 t/24 h (49 t/24 h × 2 炉)
- ・竣工日：2023 年 3 月 10 日

本施設では、「エネルギー回収の促進」、「下水汚泥の集約処理（混焼）による合理化」を目的として、下水汚泥とごみを混焼して処理しているが、ごみ量に対する下水汚泥量の割合が 30% 以上（重量ベース）と高く、下水汚泥をそのまま直接焼却炉に投入する方法では安定燃焼させることが困難である。そこで、当社製の蒸気間接加熱型汚泥乾燥機（図 2 参照）にて下水汚泥を乾燥させたのち、ごみとの混焼をおこなっている。乾燥機の熱源は、ごみ焼却設備の廃熱を利用して発生させた蒸気であり、乾燥用の燃料は使用していない²⁾。

既報告³⁾では汚泥性状や処理量の変動により、乾



図 1 河北郡市クリーンセンター全景¹⁾



図 2 下水汚泥乾燥機外観³⁾

燥機にて乾燥された汚泥（以下、乾燥汚泥と記す）の含水率が変動することに対し、乾燥機の各種パラメータ設定の変更により含水率を調整できることを報告したが、本稿では含水率の調整に対しさらなる省力化を目指して、画像解析による自動制御手法を導入した経緯と、導入後の運転結果について報告する。

2. 下水汚泥乾燥機の概要

2.1 下水汚泥乾燥機の構造

下水汚泥乾燥機の概略図を図 3 に示す。ケーシングの接泥部はジャケット構造、本体部のシャフトとパドル羽根を中空構造とし、その中に蒸気を供給して、間接的に下水汚泥に熱を与える構造となっている。機内に投入された下水汚泥は、パドル羽根によって攪拌混合作用を受けながら加熱乾燥され、乾燥された汚泥は、徐々に入口から出口側へ移動し、順次排出される仕組みとなっている。

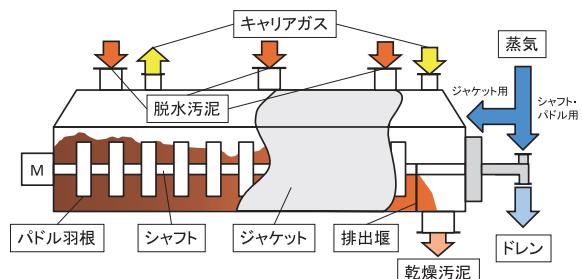


図 3 下水汚泥乾燥機概略図

下水汚泥乾燥機の運転に影響を与える因子を表 1 に示す。本乾燥機は、下水汚泥の供給量や性状が変動しても、乾燥汚泥の性状が安定するよう、パドル

表1 汚泥乾燥機の運転に影響を与える因子

項目	運転への影響
下水汚泥供給量	汚泥供給量が少ないほど乾燥しやすい
パドル羽根の回転数	パドル羽根の回転数が高いほどパドル羽根と汚泥の接触頻度が上がるため、乾燥しやすくなる
排出堰の高さ	排出堰は上下に可動する構造になっており、堰が高いほど乾燥機内の汚泥滞留時間が長くなるため、乾燥しやすくなる
汚泥分散投入割合	投入弁の開タイマー時間の設定に応じて各投入口からの下水汚泥投入割合が決定され、排出堰付近での汚泥含水率を調整することができる

羽根の回転数および排出堰の高さを調整する機能を有している。また、複数箇所の汚泥投入口から下水汚泥を分散投入することで、投入された下水汚泥が効率よく混合・分散・乾燥される仕組みであり、排出堰付近での調湿も可能となっている。

2.2 処理フロー

下水汚泥乾燥設備の処理フローを図4に示す。下水汚泥は、下水汚泥供給ポンプにて所定量が下水汚泥乾燥機に供給される。下水汚泥乾燥機にて蒸発した水分を含むキャリアガスは、焼却炉内に吹き込んで燃焼脱臭をおこなっている。乾燥された汚泥は乾燥汚泥貯留槽に一時貯留された後、ごみホッパに供給され、ごみと混焼処理される。

3. 画像解析の導入検討

3.1 導入の背景

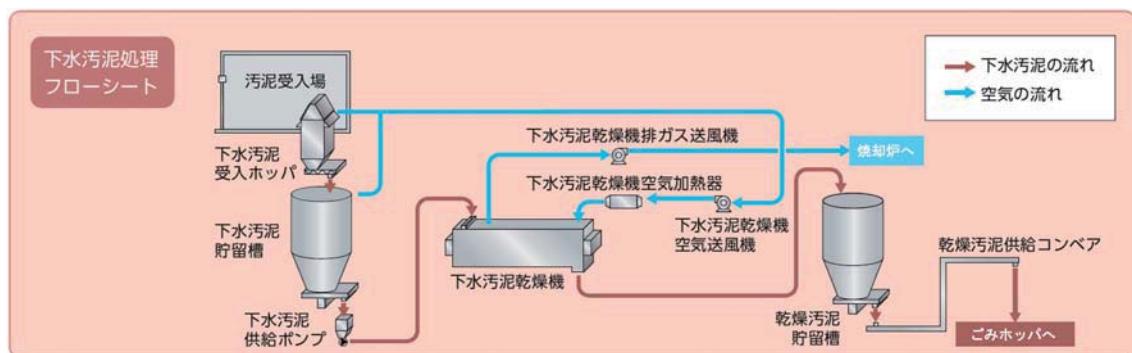
乾燥機の各種パラメータを調整した後に、蒸発水分量[†]の調整範囲を実運転で確認した結果を表2に示す。

表2 蒸発水分量データ

項目	単位	設計値	最大値	最小値
下水汚泥供給量	kg/h	1,250	1,250	570
下水汚泥含水率	%	82.4	83.5	83.4
乾燥汚泥含水率	%	20.0	12.7	37.0
排出堰の開度	%	0	0	100
パドル羽根の回転数増減率	%	100	138.9	37.5
蒸発水分量	kg/h	975	1,014	420

乾燥機の各種パラメータの変更により乾燥汚泥含水率を調整できることを確認したが、投入される汚泥性状や処理量が変化した場合には、排出される乾燥汚泥含水率も変動することから、運転員の判断によって各種パラメータを変更する必要があった。そこでさらなる省力化・自動化を目指して排出乾燥汚泥の画像解析による自動制御の導入を検討した。

乾燥機出口に設置したNo.1乾燥汚泥搬送コンベア内の含水率が異なる乾燥汚泥の映像を図5に示す。これまでの運転から、乾燥汚泥は含水率の上昇にともない、粒径が大きくなることが明らかになっており³⁾、画像から乾燥汚泥の粒径を数値データとして取り出すことができれば、乾燥機内の運転状況や含水率の判定がおこなえるのではないかと想定した。

図4 下水汚泥乾燥設備フローシート³⁾

[†] 蒸発水分量：間接加熱乾燥方式における、単位時間あたりに蒸発させられる水分量のこと。下水汚泥供給量、下水汚泥含水率および乾燥汚泥含水率の分析値を用いて算出。



図5 No. 1 乾燥汚泥搬送コンベア内乾燥汚泥映像（左：含水率 20%，右：含水率 35%）

3.2 仮設カメラによるコンベア画像の数値化

3.2.1 仮設カメラの画像取得方法

No. 1 乾燥汚泥搬送コンベアに流れる乾燥汚泥の画像を取得するため、当該コンベアに設置されているITVカメラと同じ位置に仮設カメラを設置した（図6）。そしてカメラで撮影した画像をレコーダで記録し、その画像を用いて画像解析をおこなった。



図6 仮設カメラ設置状況

3.2.2 画像の前処理、機械学習によるスケール設定

No. 1 乾燥汚泥搬送コンベアはライトコンベアである。乾燥汚泥の画像解析にあたり、仮設カメラで撮影したコンベア動画からライト搬送部のみを抽出対象とした。ライトコンベアは一定周期で乾燥汚泥を搬送しており、搬送される乾燥汚泥の画像解析に必要なエリアが適切に抽出できるように工夫を施している（図7）。

画像解析で乾燥汚泥を粒径ごとに分類する手法として、ラベル付け不要な教師なし学習を採用した。教師なし学習は、画像から特徴量を抽出し、類似した特徴を持つ画像同士を自動的に粒径毎のクラスに分類（クラスタリング）する。この教師なし学習の手法で30クラスにクラスタリングした結果の一部

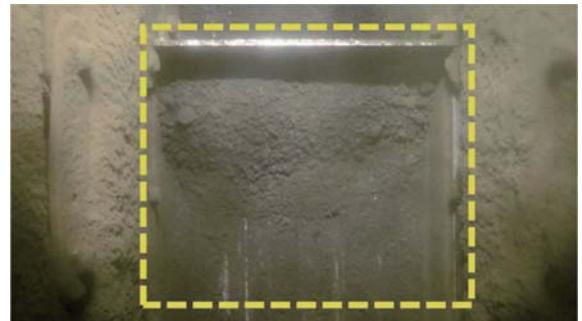


図7 仮設カメラのコンベア画像（画像の切り取り範囲）

を表3に示す。その結果、クラス2, 6, 11やクラス9, 12では粒径が近いにもかかわらず別のクラスに分類されている。

そこで、教師なし学習を用いて出力された30クラスの画像を、人が判断し、乾燥汚泥の粒径の小さい方から順に5段階に分類（これを0~4のスケールと呼ぶ）した（表4）。なお、ライト部に乾燥汚泥が存在しない場合をスケール0としている。

教師なし学習で分類したクラスにスケールを紐づけることにより、画像から乾燥汚泥の粒径を数値として出力することを可能とした。

3.2.3 画像のスケール出力のトレンドグラフ

一定周期で取得したライト上の乾燥汚泥画像に対してスケール分類処理をおこない、1分平均したスケール出力のトレンドグラフを図8に示す。なお、スケール0（汚泥が存在しない状態）は平均処理から除外している。

0~9時間はスケール2.5~3.5であり、比較的大きな粒径の汚泥が搬送されていたことが確認される。これに対して、19~24時間ではスケール2.0程度の低スケール値であり、汚泥の粒径が小さい傾向にある。特に12~16時間ではスケール1程度の出現頻度が高く、細かな汚泥の状態であることが示唆され

表3 教師なし学習によるクラス分け結果

クラス1	クラス2	クラス3	クラス4
クラス5	クラス6	クラス7	クラス8
クラス9	クラス10	クラス11	クラス12

表4 各スケールにおける乾燥汚泥の状況

スケール1	スケール2	スケール3	スケール4

る。

このように、スケール（粒形）は時間帯によって明確な変動傾向を示しており、設備の運転状態や処理条件、入口汚泥条件の変化が乾燥汚泥の状態に反映されている可能性が高い。

3.3 画像解析データと乾燥汚泥含水率の相関

数値化された乾燥汚泥の大きさと、その時の乾燥汚泥含水率との相関を図9に示す。当初想定した相関が概ね得られていることを確認できた。

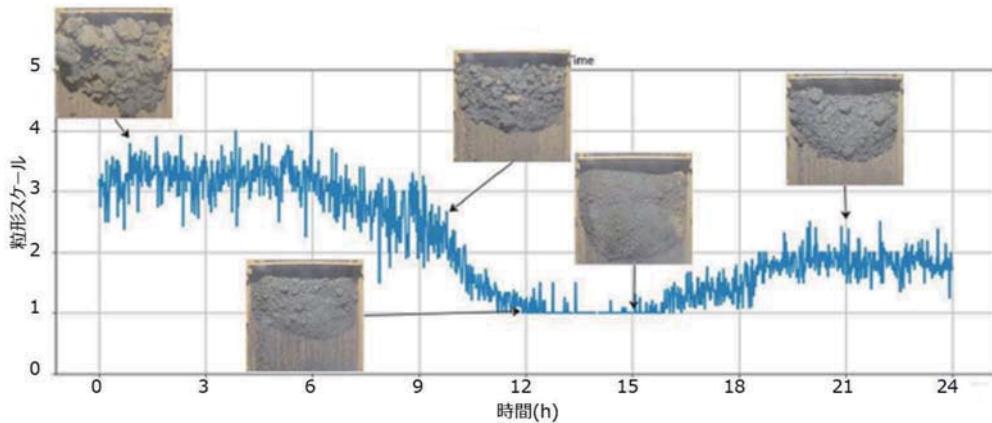


図 8 乾燥汚泥画像解析による乾燥汚泥数値化の1分平均のトレンドグラフ

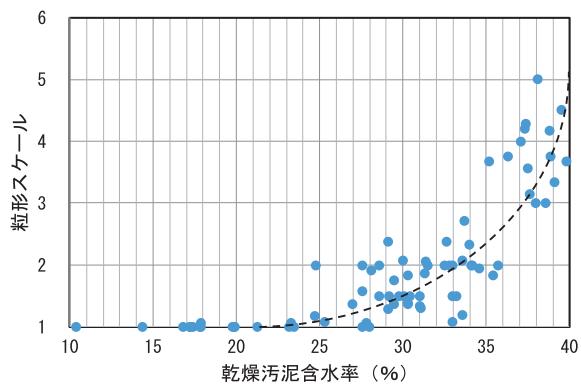


図 9 乾燥汚泥含水率と粒形スケールの相関

4. 画像解析データを用いた乾燥機の制御

ITV 画像をスケール分類処理で数値化することで、乾燥汚泥の状態の傾向をリアルタイムで捉えられることが確認できたため、次のステップとして、PC に乾燥汚泥の粒形スケールに上限・下限の閾値を設定し、閾値を超えた場合にアラームを出すシステムを導入した。

さらに、数値化した粒形スケールに対応した乾燥汚泥の調湿制御を導入した。その制御内容は、粒形スケールの移動平均値が「粒形下限設定値」以下の場合を過乾燥状態とし、乾燥性能を低下させる目的で乾燥機の回転数を下げ、「粒形上限設定値」以上の場合は乾燥不足として乾燥機の回転数を上げるものとしている。なお、排出堰の高さや汚泥分散投入割合も乾燥機の運転に影響を与えるが、制御を単純化させる点から今回の運転では回転数のみを使用した。

4.1 実機導入後の運転結果

本制御導入後の運転結果の一例を図 10 に示す。

この日は午前 7 時 20 分に乾燥機へ投入する汚泥の系列を変更し、さらに汚泥貯留量との兼ね合いから午前 9 時に乾燥機の運転負荷を 60% から 50% へと低下させた。運転負荷の変更にともない粒形スケール（移動平均）は減少、それに応じて乾燥機の回転数が自動的に低下した。午前 5 時、午後 5 時（17 時）には粒形スケール（生値）がそれぞれ 3.5, 4.0 を記録したことで乾燥機の回転数が自動的に上昇した。これにより粒形スケールの上昇が抑えられ安定した運転が維持された。

一日を通して乾燥機の電流値は 50~60 A 程度で安定して推移しており、本制御の導入によって安定した運転が実現されていることが確認された。

4.2 制御上の課題

本制御を導入後、2か月間の検証の結果、下記の課題が確認された。

- ・ITV 用の観窓が運転継続にともなって汚れ、画像認識不良が発生する
- ・下水汚泥の供給量等、入口条件の急激な変動に対しては自動制御が間に合わず含水率が上昇し、乾燥汚泥の粒径が増加する

今後、さらなる運転検証とその他の調整機構を組み入れた適正な制御方法によりこれらの課題を解決していく予定である。

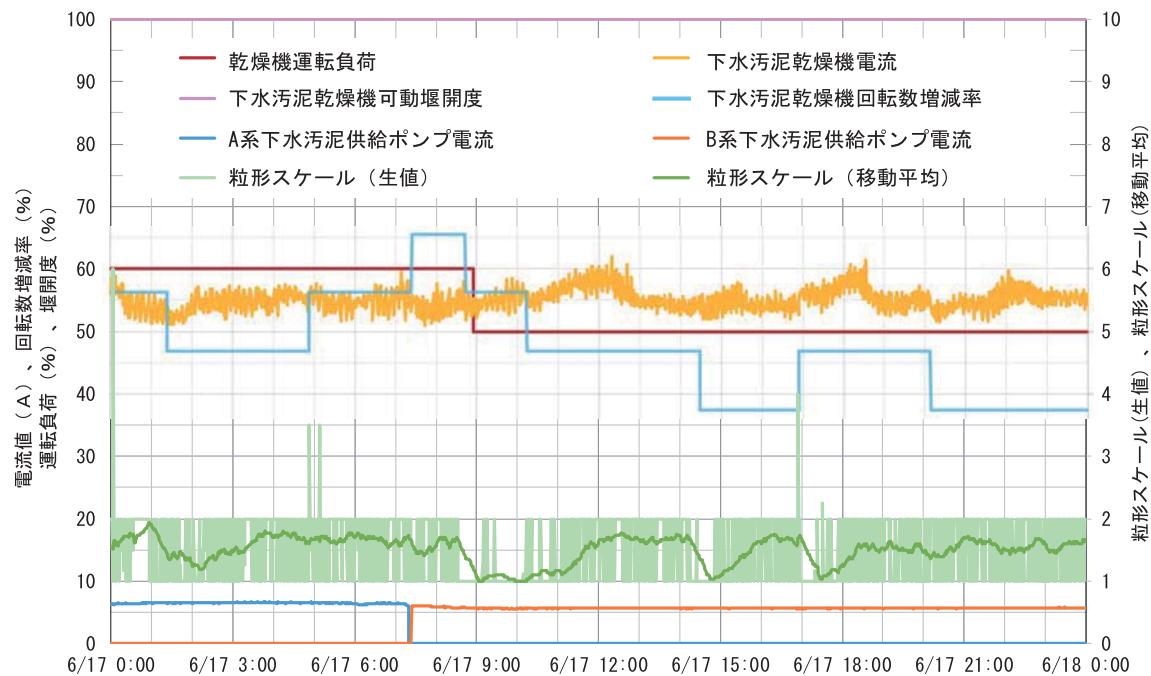


図 10 実機導入後の運転結果の例

5. おわりに

本稿では、河北郡市クリーンセンターに納入した下水汚泥乾燥機の含水率を安定させるための画像解析を活用した制御の紹介と、運転状況について報告した。本制御の導入により、下水汚泥の燃焼性を安定させ、一般廃棄物との集約処理を実現するとともに、乾燥機の運転における省力化を図ることができた。当社は今後もデジタル技術の活用により、各種プラントの省力化を実現していく所存である。

最後に、本制御の導入および検証に、多大なるご助力を賜りました河北郡市広域事務組合殿、株式会

社中央設計技術研究所殿をはじめ、関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安藤周平：河北郡市クリーンセンター 運転報告、タクマ技報、Vol. 31, No. 2, pp. 75-80 (2023)
- 2) 堀井靖生、水野孝昭、株丹直樹、宍田健一：蒸気間接加熱型汚泥乾燥機の開発、タクマ技報、Vol. 27, No. 1, pp. 52-57 (2019)
- 3) 坂口孝瑛：河北郡市クリーンセンターにおける下水汚泥乾燥機の運転報告、タクマ技報、Vol. 32, No. 1, pp. 65-70 (2024)