

ごみクレーン自動運転システムの高度化

Advancement of an automated waste crane operation system

渡邊 圭*・福川宙季*・谷田克義*博士(工学)・清水克哉**

Kei Watanabe・Hiroki Fukukawa・Katsuyoshi Tanida・Katsuya Shimizu

ごみ焼却施設ではピットや操炉状況に応じたごみクレーン操作により、ごみ性状の均一化と焼却炉への投入が行われる。一方、ごみ焼却施設では労働人口減少に伴い、熟練運転員の確保が困難になることが考えられる。従来のごみクレーン運転機能では、ごみピットの状況に応じたクレーン操作内容の自動決定ができないため、運転員のノウハウを取り入れた、より高度な自動運転機能が望まれている。当社は省人化・省力化の一環として、ピット内のごみ高さやごみの攪拌度、操業に必要な情報から、自動で最適な操作内容を決定してごみクレーンを動作させられるようにごみクレーン自動運転システムを高度化した。

In waste incineration plants, waste cranes are operated according to the pit and furnace conditions to ensure uniformity in waste characteristics and its input into the incinerator. However, with the decreasing labor force, it is anticipated that securing skilled operators will become challenging. Traditional waste crane operation functions cannot automatically determine crane operation details based on the conditions of the waste pit, so there is a demand for more advanced automatic operation functions that incorporate the expertise of operators. As part of efforts to reduce manpower and labor, our company has enhanced an automated waste crane operation system to automatically determine optimal operation details based on waste height, waste agitation level, and other necessary operational data, allowing the crane to operate accordingly.

Key Words :

ごみ焼却施設
ごみクレーン
自動運転

Incineration Plant
Waste Crane
Automatic Operation

まえがき

近年、ごみ焼却施設においてはDBO（Design, Build and Operation）による長期包括案件が一般的であり、資源の有効活用や競争力の向上の観点からLCC（Life Cycle Cost）の低減が求められている。加えて、労働人口の減少に伴い、熟練運転員の確保が困難になることが懸念される。これらを解決する手段として、IoT / AI 技術を活用した操業自動化による省人化 / 省力化が求められている。

ごみ焼却施設の操業には、各所で人手が関わる作業があるが、その1つに安定燃焼に影響するごみピットでの攪拌や積替え、炉内へのごみ投入といったクレーン操作作業があり、これらは熟練運転員のごみクレーン操作に依存している。ごみクレーンには、

クレーンメーカーが提供する自動運転機能も実装されているが、量や性状が変動する一般廃棄物を対象とするとごみクレーンでは、しばしば自動運転機能を使用できない状況が発生する。例えばごみ搬入の多い時間帯では、搬入されたごみのごみ投入扉レベルまで積み上がる前に別の場所へ積み替える必要があり、自動運転では作業が間に合わない状況が発生するため、クレーン運転員が操作しなければならない。

この課題に対し当社では、(株)神戸製鋼所と共同でごみクレーン自動運転機能の高度化を目指し、2018年より技術開発を進めてきた。本報では、開発したごみクレーン自動運転システムの概要および要素技術、実プラントでの評価試験の結果について報告する。

*技術開発センター 基盤技術室

**株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター メカトロニクス研究室

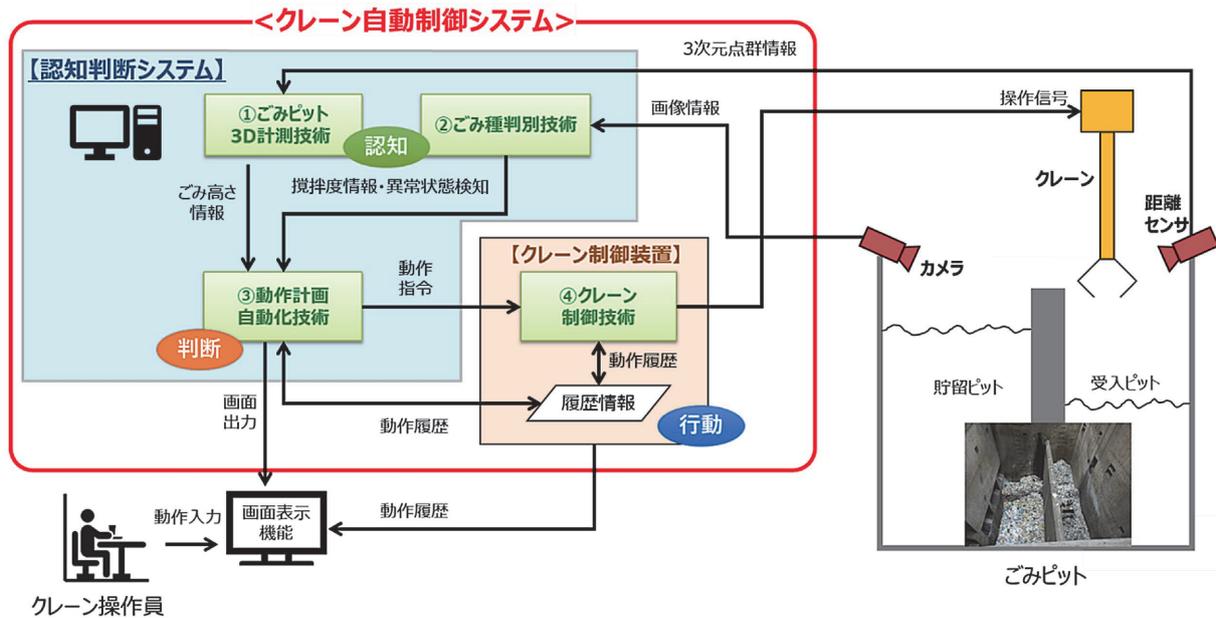


図1 ごみクレーン全自動運転システム概要

1. ごみクレーン自動運転システムの概要

図1に本システムの概略を示す。図1ではダブルピット形式(受入ピット/貯留ピット)のごみ焼却施設を例として示しており、基本的なシステムの開発はダブルピットにて行った。クレーン運転員の認知/判断/操作スキルを代替するために、ごみ高さを計測する距離センサとごみ面の画像を取得するためのカメラの情報を基にごみピットの状態を認知する機能、認知したごみピットの状態からクレーンの次の動作を決定する判断機能、および決定された動作に従いクレーンを制御する制御機能から構成されている。

2. ごみクレーン自動運転システムの要素技術

ごみクレーン自動運転システムは、1) ごみピット3D計測技術、2) ごみ種判別技術、3) 動作計画自動化技術、4) クレーン制御技術の4つの技術で構成される。

1) ごみピット3D計測技術

従来のシステムでは、クレーンのバケットがつかみ動作を行った際にごみの高さ情報を得ている。具体的には、ピット内を粗い番地に分割し、バケットがつかみ動作を行った箇所に該当する番地の高さ情報を一律に更新する。しかしながら、この方式では粗い分割による情報の分解能や情報更新のリアルタイム性(その番地でのつかみ動作時点で更新)の点で信頼性に欠ける問題があった。

そこで、高分解能でリアルタイムにごみ高さを計

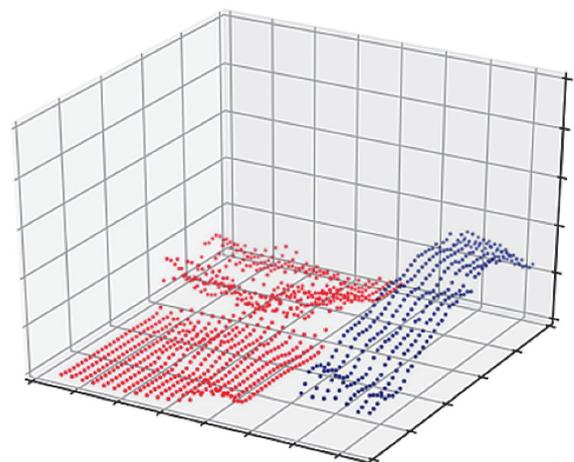


図2 ごみピット3D点群データの一例

測するため、図2のような3D点群データが得られるレーザ式距離センサによる連続計測方法を採用した。具体的には、死角ができるだけ少なくなるようピット対面に2台のセンサを設置し、各センサで取得した3D点群データに対してごみピット座標系に合わせた回転・平行移動処理を施し合成する。その後、外れ値の除去処理と内挿補間処理を行うことで、クレーンの映り込みや死角領域が存在してもごみピット全面のごみ高さを安定的に取得できるようになった。本技術によりごみ高さデータの信頼性が向上し、高精度なクレーン制御が可能となった。

2) ごみ種判別技術

焼却炉にてごみを安定的に燃焼させるためには、ごみ質を均一化することが重要である。そのために

は最適なクレーン動作を決める指標となるごみの種類を判別する機能や、焼却炉に投入するごみを適切に決定する判断基準となるごみの攪拌度合いを定量的に把握する機能が必要となる。本技術ではピット画像から袋ごみや汚泥などのごみ種を学習させ、学習モデルの推論結果を基に攪拌度としてごみ攪拌状態の定量指標を定義した。

過去に実施したごみ種判別結果を図3に示す。図中の緑色の矩形は未攪拌の袋ごみと判別されている箇所を示している。図3(a)では、未攪拌ごみが多く検出されているが、図3(b)では検出が少ない。このように、ごみ種判別の検出量によって攪拌度合いを把握する。

3) 動作計画自動化技術

動作計画では、まずピット内および操炉状況を把握するため、ごみピット3D計測技術およびごみ種判別技術により計測したピット内視覚情報(ごみ高さ、ごみ種、攪拌度)および運転情報(投入要求、搬入扉開閉情報など)を取得する。取得した情報から動作計画ロジックによりクレーン操作を判断し、操作命令に関する信号をクレーン制御装置へ送信することで、自動運転を実現する。

動作計画ロジックは、熟練運転員へのヒアリングや過去のクレーン操作履歴データから操作ノウハウを抽出したフローチャートによって構築される。本技術では、クレーンの動作種類(攪拌/積替/投入)およびクレーンによるごみのつかみ、放しなどの動作目標位置を算出することで、ピット内情報および操炉状況を基に最適なクレーン動作をリアルタイム

に自動選択/実行することが可能となる。

4) クレーン制御技術

本技術では、動作計画自動化技術による所与の動作を実現するためのクレーン移動経路生成とクレーン動作制御を行う。

まず、図4のように動作計画自動化技術によって算出された目的値へ向かうためのクレーンの移動経路が生成される。この時、ピット内のごみや進入禁止エリアといった障害物を回避し、かつ移動距離が最も短くなる経路が生成される。

次に、クレーン制御信号(速度指令等)を決定する。目標値フィルタ(2次遅れ要素)とPID制御方式を採用し、振れ量を抑制しつつ生成された経路上を通るよう動作させる。従来のシステムではPLC(Programmable Logic Controller)を用いたラダー言語によるクレーン制御を行っていたが、クレーン制御の高度化に対応するため、C言語にて制御を行えるC言語コントローラ(三菱電機製)を採用した。これにより巻き上げ下げ・横行・走行・バケット開閉の複合同時制御を可能とした。

移動経路生成と動作制御を組み合わせることで、従来よりも高速でクレーンの移動が可能となった。

3. 汎用性向上のための技術開発

各要素技術の他、さまざまな施設に導入可能とするため、汎用性を向上させるための拡張技術の開発を行った。

3.1 シングルピット対応

要素技術開発は受入ピットと貯留ピットが分離されたダブルピット形式のごみ焼却施設を対象として

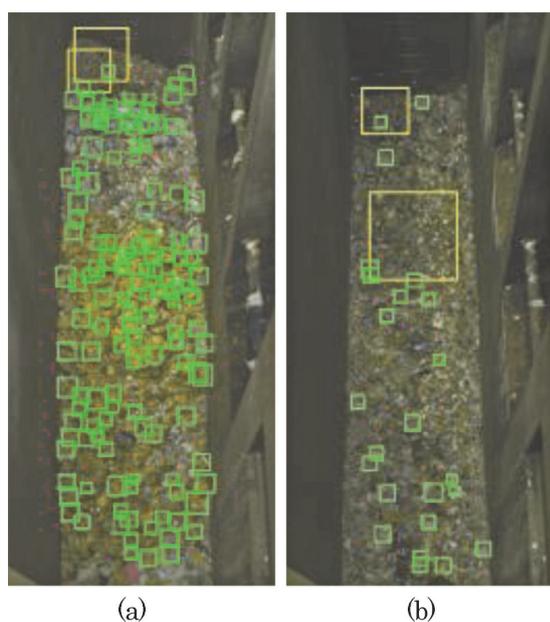


図3 ごみ種判別結果の一例
(図内緑矩形枠:未攪拌袋ごみ検出箇所)

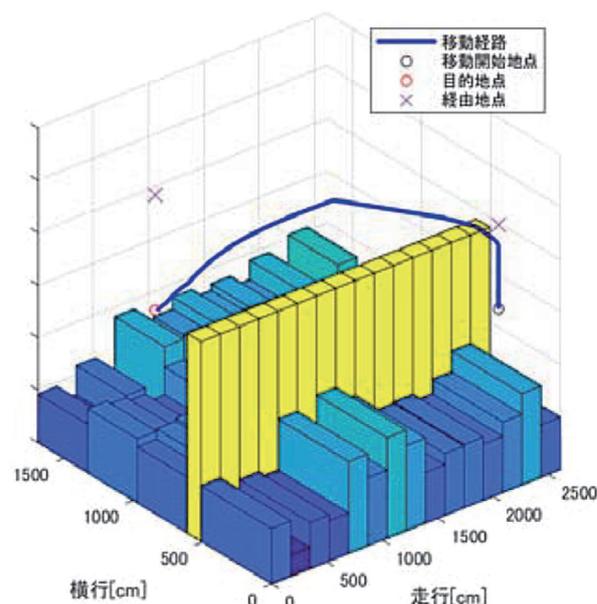


図4 クレーン移動経路生成の一例

いたが、受入ピットと貯留ピットの分離がないシングルピット形式にも対応できるよう改良を行った。

シングルピット形式では受入エリアと積替エリアの間に壁が無いため、図5のように積み上げたごみが崩れないような土手を作る必要がある。本システムではクレーン運転員の土手作成手順を参考にしてプログラムに落とし込み、自動運転であっても土手を作成可能とした。

3.2 ごみクレーン2台同時運転技術

ごみクレーン自動化システムは動作計画ロジックの行動選択により現在のタスクに対して最適な対応を行うが、より迅速な操作が必要になる可能性を考慮して、ごみクレーンの2台同時自動運転技術を開発した。2台同時自動運転では一度に複数の動作プランを用意し、動作プラン毎にクレーン操作に割り振られた得点を計算する。その結果、最も得点の高い動作プランを実行することで、1台ずつ動作を決めるよりも全体最適化が図られる。

4. 実プラント評価試験結果

高度化したクレーン自動運転システムの有効性を評価するため、操業中の実施設（回転ストロカ炉、シングルピット、3炉中2炉稼働時）にて、約6日間の評価試験を実施した。なお、本試験では状況に応じてクレーン2台同時運転を行った。

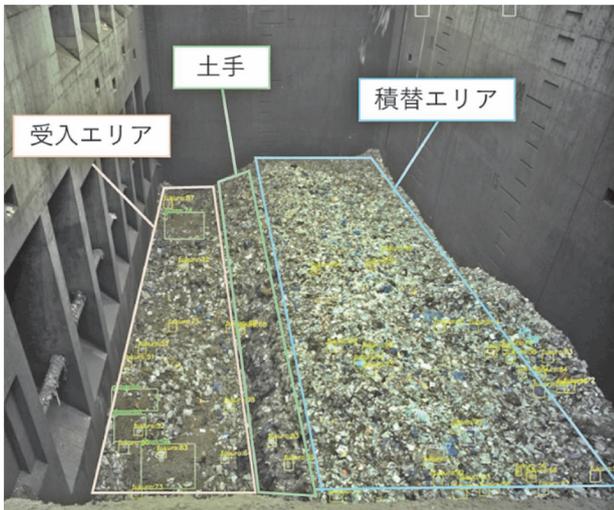


図5 シングルピットの運用

4.1 自動運転における積替速度

搬入時間帯は、図6に示すように搬入扉前の受入エリアのごみを積替エリアに積み替える作業が優先される。高度化したクレーン自動運転システムによる積替速度を評価するため、各曜日における搬入時間帯での積替エリアのごみ高さの上昇速度でごみの積替速度を評価した。

評価結果を表1に示す。表1は手動運転での積替速度を1とした時の相対的な積替速度を示しており、日によって自動運転による積替速度にばらつきが生じていることがわかる。本システムはごみ投入扉の高さまでの猶予や、その日に搬入されるごみ量の予測値などから総合的に作業内容を決定しており、ピットの状況によっては積替えよりも攪拌を優先するため、ばらつきが生じたと考えられる。なお、自動運転中にごみのごみ投入扉の高さまで積みあがることは無く、問題なく積替作業を完遂できている。

以上より、ピットの状況に応じた作業判断ができており、必要に応じて手動運転と遜色のない速度での積替えが可能であることを確認できた。

4.2 自動運転割合と手動介入操作

試験期間中に自動運転を行った時間の割合を評価した結果を表2に示す。試験中のクレーンが動作していた時間のうち、99%以上の時間を自動運転で対応できた。バケットと壁の衝突を回避するために設けた自動運転中のインターロックにより、クレー

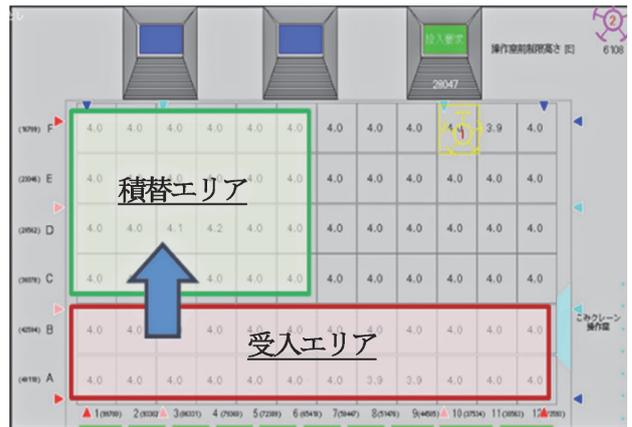


図6 搬入時間帯の作業

表1 積替速度評価結果

	月曜	火曜	水曜	木曜	金曜	土曜
手動運転	1	1	1	1	1	1
自動運転	1.05	0.92	0.66	0.86	1.02	1.10

ンが侵入できないピット壁際エリアのごみの除去作業のみ運転員が手動操作で行っており、その割合は0.4%であった。

4.3 土手形成技術

評価試験を行った施設はシングルピットであったので、土手形成技術についても評価を行った。土手とはシングルピットにおける受入エリアと積替エリアの間の斜面部分であり、各エリアを広く使うために、手動と同等の角度の土手を作る必要がある。クレーン運転員の手動操作による土手形成と、自動運転による土手形成の角度を比較した結果を図7および図8に示す。自動運転でも手動と同等の角度で土手を形成できることが確認できた。

4.4 消費電力量

ごみクレーンの動作に係る消費電力量の評価結果を表3に示す。全ての試験期間において消費電力量が低下し、平均で13%低下したことを確認した。なお通常運転時、日中はクレーン運転員による手動操作、夜間は従来の自動運転システムによる操作を行っていた。消費電力量が低下した理由は、日中はクレーン運転員の手動操作と同等のクレーン操作を実現し、夜間においては従来の自動運転システムと比較してクレーンの移動経路やバケット開閉動作が最適化されクレーンの動作効率が向上したため、1日のトータルで消費電力量が低下したと考えられる。以上の結果から、本技術は手動運転と遜色のない作業速度を有しながら、省エネルギーにも貢献できることがわかった。

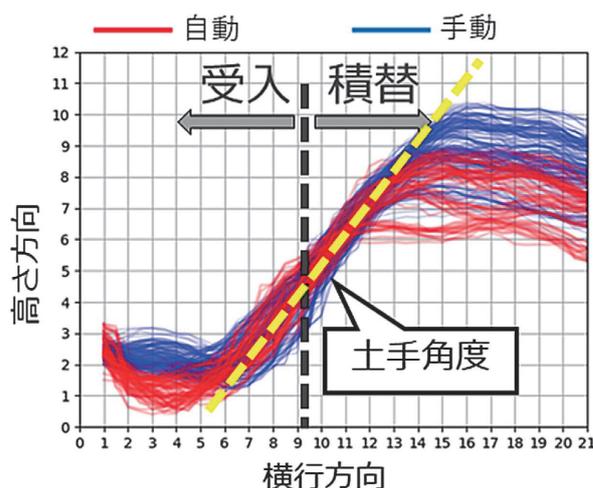


図7 ごみピット高さレベル

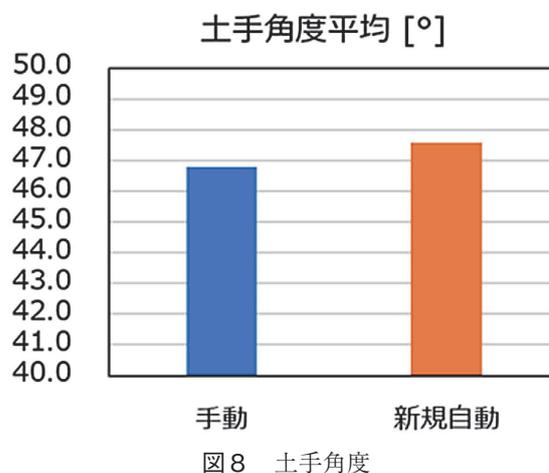


図8 土手角度

表2 自動運転割合評価結果

運転モード	運転台数 [台]	運転時間 [h]	割合 [%]	備考
自動運転	2	19.0	15.0	自動運転割合 99.6%
	1	106.6	83.9	
手動運転	1	0.5	0.4	壁際ごみ除去
停止	0	0.9	0.7	クレーン切替
合計	—	127.0	100.0	—

表3 消費電力量評価結果

	月曜	火曜	水曜	木曜	金曜	平均
通常運転時	1	1	1	1	1	1
試験期間	0.986	0.785	0.843	0.756	0.980	0.870
低下率[%]	1.4	21.5	15.7	24.4	2.0	13.0

む す び

クレーン運転員の認知／判断／操作スキルを代替する4つの要素技術と、汎用化を目的とした拡張技術により、ごみクレーン自動運転システムの高度化を完遂した。このごみクレーン自動運転システムの高度化により、手動運転と遜色のない速度での自動運転が可能となり、クレーン動作時間の99%以上の自動運転を実現した。さらに、従来と比較して消

費電力量が削減され、ごみクレーン自動運転を通じて環境負荷の低減にも貢献できることを確認した。今後、本格運用の検討を進めていく

[参考文献]

- 1) 眞野文宏ほか：神鋼環境ソリューション技報, Vol.17, No1, p.10-14 (2020)
- 2) 渡邊圭ほか：環境浄化技術, Vol.21, No.4, p.52-56 (2022)