

中赤外線カメラと AI・画像処理を活用した 回転ストーカ炉内ごみ状況の定量化

Using Mid-Infrared Cameras, AI, and Image Recognition to Quantify the Status of Waste in Rotary Combustors

尾崎圭太*博士(理学)・工藤貴洋**・梶原吉郎**技術士(衛生工学部門)・谷田克義***博士(工学)

Keita Ozaki・Takahiro Kudo・Yoshio Kajihara・Katsuyoshi Tanida

国内労働人口減少の課題に対応するごみ焼却施設の運転自動化・操業安定化の一方策として、当社では中赤外線カメラを用いて回転ストーカ炉内を火炎越しに撮影し、画像 AI・解析技術を活用した炉内ごみ状況の定量化に取り組んでいる。中赤外線カメラ画像から得られる情報として、炉内ごみ量やごみ攪拌状況があり、それらの定量化による焼却炉の燃焼制御の高度化や運転補助への活用が期待される。今回、ごみ量はディープラーニングによるセグメンテーション手法、ごみ攪拌状況はオプティカルフローにより数値化する手法を活用して炉内ごみ状況を定量化する技術を開発し、実施設でその有効性を確認した。

Automatic operation of waste treatment facilities with stabilized combustion is an important way of handling the labor shortage problems. In response to this, we have been working to improve combustion control for the rotary combustor. By using a mid-infrared camera, the state of the waste layer in the rotary combustor is shown in an image. We developed a way to quantify waste status inside the furnace leveraging both waste volume using a deep-learning-based segmentation and waste agitation using an optical-flow-based method. Its effectiveness was confirmed in the implementation facility.

Key Words :

回転ストーカ式焼却炉
中 赤 外 線 カ メ ラ
画 像 処 理
ディープラーニング
セグメンテーション
オプティカルフロー

Rotary combustor
Mid-infrared camera
Image processing
Deep learning
Segmentation
Optical flow

【セールスポイント】

- ・ 焼却炉内の状況を火炎越しに観察して、炉内ごみ状況の定量化が可能である。
- ・ 燃焼制御の高度化や焼却炉立ち上げ時の運転補助などへの活用が期待される。

ま え が き

国内労働人口の減少に伴う廃棄物処理施設の運転員確保が難しくなることが懸念されている。このため、操業安定化・運転自動化技術の開発は急務となっている。

これまで当社では、DCS（Distributed Control System, 分散型制御システム）操作の自動化や燃焼

制御の改良に取り組み、回転ストーカ式焼却炉（以下、回転ストーカ炉）の操業安定化に効果をあげてきた¹⁾。一方で、焼却炉内のごみの燃焼状態は炉内温度などの各種プロセス値や火炎画像を用いて推定しているのが現状であり、より直接的に炉内ごみ状況を定量化できれば、さらなる燃焼制御の高度化が期待される。

*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 計測技術研究室 **環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 機能開発室
***技術開発センター 基盤技術室

焼却炉内のごみ燃焼状態の観察には、火炎や粉塵の影響を受けにくい波長帯である中赤外線（波長 $3.9\ \mu\text{m}$ 帯）が有効である。今回、中赤外線カメラを用いて回転ストーカ炉内を撮影することで、回転ストーカ炉の特長であるごみが反転を伴いながら攪拌される状況を火炎越しに観察可能にするとともに、最新の画像AI・解析技術を活用したごみ量やごみ攪拌状況の定量化手法を開発したので紹介する。

1. 開発背景

焼却炉内はごみの燃焼に伴う熱放射が火炎として観察されるため、目視では炉内のごみ堆積状況や攪拌状況を確認することは難しい。炭素や酸素、水蒸気が燃焼時に生成される主たるガス成分の場合、火炎の放射強度が低くガスによる吸収が少ない波長帯として、中赤外線にあたる $3.9\ \mu\text{m}$ が火炎越し観察に適していることが知られている²⁾。

今回、回転ストーカ炉（図1、処理能力:65t/日・炉）の下流側にある巡回点検用の観察窓に中赤外線カメラに有感な撮像素子が搭載されたカメラを取り付け、毎秒30フレームで炉内の撮影を行った。図2は回転ストーカ炉内の中赤外線カメラ画像である。炉内のごみ堆積状況が火炎越しに観察可能であることが分かる。また、動画で見ると傾斜したストーカ炉の回転に伴ってごみが三次元的に移動し攪拌される状況が観察された。

回転ストーカ炉内のごみ量や攪拌状況が数値化されると、焼却炉の燃焼制御や運転補助に活用できる可能性がある。そこで、これら炉内ごみ状況の定量化手法を検討した。

2. 炉内ごみ量の定量化

回転ストーカ炉には燃焼制御システムの給じん量制御に基づいてごみが供給され、1時間に1～2回の速度で同じ向きに回転することで炉内にごみ層が形成されているが、実際の炉内ごみ量は、ごみの性

状や炉内温度などの各種プロセス値によって変動する可能性がある。そこで、炉内ごみ層分布がごみ量に応じて変化することに着目し、中赤外線カメラ1台の画像情報を用いたごみ量の相対変化の定量化に取り組んだ。

2.1 画像セグメンテーション

中赤外線カメラの炉内映像はごみ層を遮るようにして連絡管が常時回転して映るため、様々な状態の画像に対して安定・高精度にごみ層分布を識別する必要がある。これに対応するため、画像中の物体領域を識別する手法であるディープラーニングを用いた「セグメンテーション³⁾」を採用した。炉内画像に映るごみ層、連絡管、炉壁を識別対象として、それら識別対象の領域を教示した学習用データ155枚を作成し、教師あり機械学習によりセグメンテーションモデルを作成した。

学習に用いていない炉内画像を学習済みモデルに入力して得られたセグメンテーション結果を図3に示す。セグメンテーションモデルにより、ごみ層や連絡管、炉壁の領域を精度よく識別可能なことが確認された。

2.2 ごみ量の定量化方法

回転ストーカ炉は常時同じ方向に回転しているため、炉内ごみ量に応じごみ層の右端位置が変化する特徴がある。そこで、図3に示すセグメンテーションにより識別したごみ層の右端位置を用いることで、炉内ごみ量の相対変化をピクセルとして数値化した。なお、炉内映像には連絡管がごみ層右端を数分間、遮るタイミングがあり、その間にごみ層右端を測定することができない。そこで、連絡管のセグメンテーション結果を用いて、ごみ層の前を連絡管が通過していることを判定するロジックを構築し、連絡管通過時は正しくごみ層右端が測定された前回値を保持する処理とした。

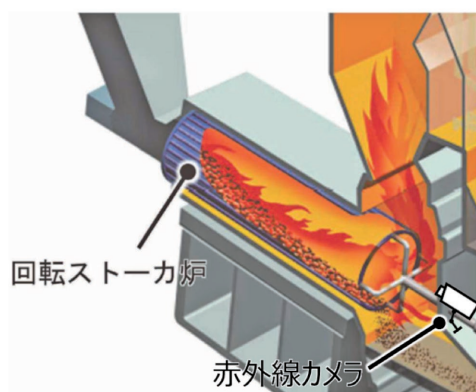


図1 回転ストーカ炉



図2 回転ストーカ炉内の中赤外線カメラ画像

2.3 ごみ量指標の測定結果

図4はごみ層右端の解析領域を回転ストーカ炉の上流側と下流側の二つの領域に設定し、開発した方法で定常運転中の回転ストーカ炉内ごみ量指標の連続測定を行った結果である。本測定期間においてごみ量指標は15:00頃まで安定しており、その後上流側のごみ量が減少して指標が低下し、約1時間遅れで下流側のごみ量が減少して指標が低下するトレンドが見られた。本測定結果より、炉内ごみ量の相対変化および上流から下流へのごみ送りの状況を定量化できることを確認できた。

3. 炉内ごみ攪拌状況の定量化

回転ストーカ炉内に形成されたごみ層は、回転する過程で安息角をこえると崩れる。ごみ崩れの大きさや発生頻度はごみの量や性状、ごみ送り速度（回転ストーカ炉回転速度）によって変動すると考えら

れる。特に大きなごみ崩れが発生すると、燃烧空気との接触面が大きく変化する（攪拌される）ことから、プロセス値変動と関係する可能性がある。そこで、時系列の中赤外線カメラ画像からごみ崩れ（ごみ攪拌）状況の定量化に取り組んだ。

3.1 オプティカルフロー

時系列画像データから移動物体を検知する画像処理手法の一つである「オプティカルフロー⁴⁾」を中赤外線画像に適用し、ごみ崩れ検知を行った。オプティカルフローでは、物体の移動方向と移動量の情報がベクトルとして得られる。

図5は中程度のごみ崩れ発生時の画像に対し、オプティカルフローにより検知された移動物体ベクトルを重ね合わせたものである。ごみ崩れ発生部のオプティカルフローによりごみ崩れを検知可能なことが確認された。本時系列画像から移動物体として検

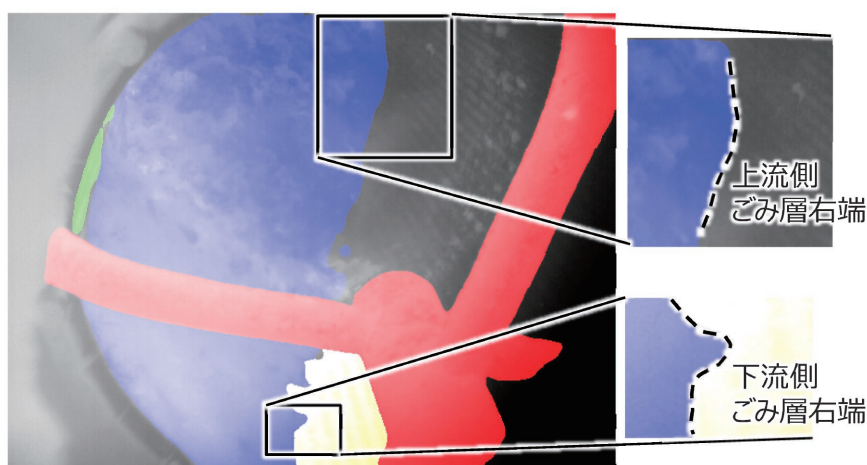


図3 セグメンテーションによる領域識別結果および上流側、下流側のごみ層右端位置
(青:ごみ層, 赤:連絡管, 黄・黄緑:炉壁)

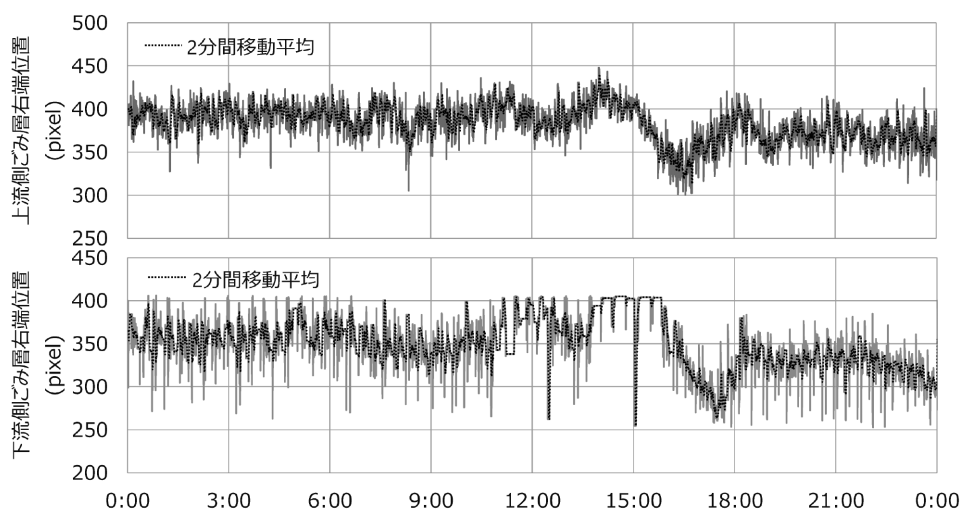


図4 ごみ層右端位置(ごみ量指標)の測定結果

知された画素（ピクセル）数は5 000 pixelであり、ピクセル数をごみ崩れの大きさを示す指標として用いることとした。

3.2 ごみ攪拌状況の定量化方法

炉内ごみ層は不連続に大小さまざまな崩れる。そこで、ごみ崩れの大きさごとの発生頻度を算出し、定常的なごみ攪拌状況と非定常なごみ崩れを識別するようにした。今回、移動物体ピクセル数が5 000以上のときごみ崩れ発生を定義して、10分間ごとのごみ崩れ発生頻度を算出した。

3.3 ごみ攪拌状況の定量化結果

図6は定常運転における回転ストーカ炉上流側のごみ崩れおよびごみ崩れ頻度の定量化結果である。

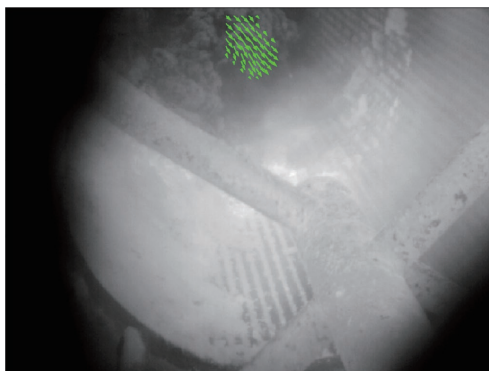


図5 オプティカルフローによる検知結果

ピクセル数の小さなごみ崩れが繰り返し発生するなかで、4:10～4:20頃にピクセル数が大きいごみ崩れがときおり発生している状況が分かる。このことから、開発した方法により炉内ごみ攪拌状況を定量化できることを確認した。

むすび

中赤外線カメラを用いることで回転ストーカ炉内ごみ状況が観察でき、AI・画像処理を活用し炉内ごみ状況を定量化する手法を確立した。今後は炉内ごみ状況の定量化情報を用いた焼却炉の燃焼制御の高度化や運転補助への活用を検討していく所存である。

[参考文献]

- 1) 工藤ら：インテリジェント制御システムの改良による長期間の手動介入操作ゼロ運転，第46回全国都市清掃会議研究・事例発表会講演論文集（2025），p.49-51
- 2) I. E. Gordon, L. S. Rothman, R. J. Hargreaves, R. Hashemi, E. V. Karlovets, F. M. Skinner, et al., The HITRAN2020 molecular spectroscopic database, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 277, 107949 (2022).
- 3) B. Cheng et al., Masked-attention Mask Transformer for Universal Image Segmentation. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2022), p.1290-1299
- 4) Gunnar Farneback, Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, SCIA'03 Proceedings of the 13th Scandinavian conference on Image analysis, July (2003), pp.363-370.

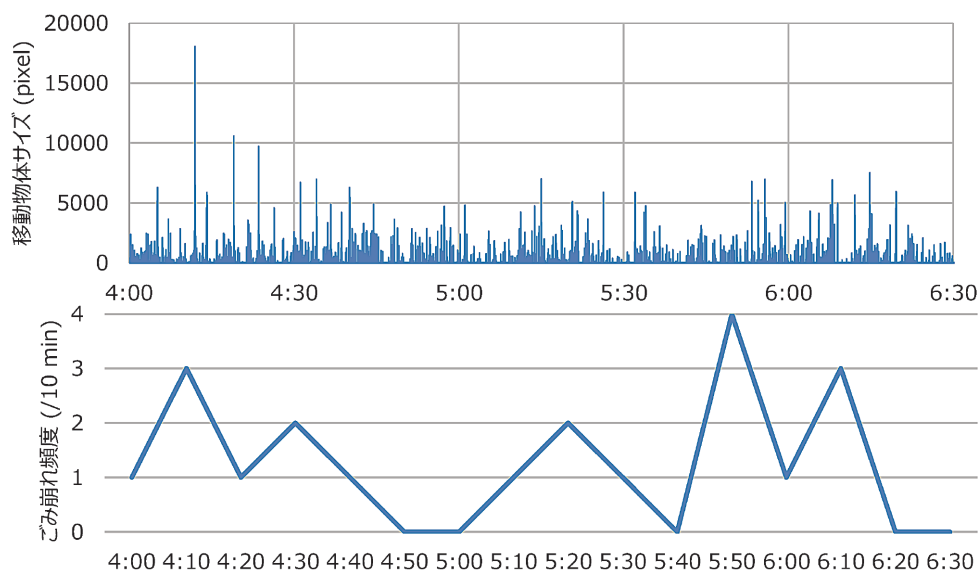


図6 ごみ崩れの検知結果(上)およびごみ崩れ頻度の算出結果(下)