

〈特集〉

人工知能を活用したごみ焼却施設の自動運転システム

川 端 馨¹⁾, 小 浦 洋 平¹⁾, 藤 吉 誠²⁾¹⁾日立造船(株) 開発センター

(〒 559-8559 大阪市住之江区南港北 1-7-89 E-mail: kawabata_k@hitachizosen.co.jp)

²⁾日立造船(株) 事業企画・技術開発本部 技術研究所ものづくり基盤研究センター

(〒 551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11 E-mail: fujiyoshi_m@hitachizosen.co.jp)

概 要

当社はごみ焼却施設の遠隔監視をいち早く導入し、蓄積された大量の運転データから経年変化やごみ質の変動による影響を分析してきた。2014年にはこれらのデータを活用した世界初となる教師画像学習を用いた炉内画像認識システムを開発し、熟練運転員の判断を機械学習でシステム化することに成功した。また、ごみピットでの攪拌を遺伝的アルゴリズムで最適化する、ごみクレーン自動運転システムを開発、運転員による設定作業なしでごみの均質化を実現した。本稿ではこれら人工知能技術を用いたごみ焼却施設の自動化システムについて紹介する。

キーワード：ごみ焼却, 自動燃焼制御, ごみクレーン, Fuzzy C-Means, 遺伝的アルゴリズム

原稿受付 2018.5.9

EICA: 23(1) 3-7

1. はじめに

環境への配慮, 規制が高まるなか, ごみ焼却施設においても, 国が定める規制値より遥かに厳しい基準が適用されることが一般的になっている。もちろん, 最近のごみ焼却施設には高度な排ガス処理システムが併設され, それらの厳しい基準も十分にクリアできる技術が導入されている。また, 廃棄物からのエネルギー回収を最大限に行ない, CO₂排出量の削減に一役買うことや, 余剰電力を売電にあてることによって地方自治体の貴重な収入源になっている現状がある。ごみ焼却施設はこれら要件をハイレベルで満たす性能を備えているが, あくまでもその前提は, 排ガスや熱エネルギーの元となっている「ごみの燃焼が安定していること」に尽きる。したがって, ごみを安定に燃やす技術は, これらの達成すべき要件が厳しくなればなるほど重要性を増してくる。ごみは一般家庭などから排出される廃棄物なのでその組成は一定ではない。また, 天候や季節の違いによっても変動があることが知られている。つまり, ボイラーの燃料となるごみの発熱量(カロリー)が一定にならない問題がある。このため, ごみの発熱量が変化しても発生蒸気量を一定に保つために古くから自動燃焼制御という技術が使われている。自動燃焼制御は各社でいろんな工夫がみられるが, 基本はごみ焼却炉内に十分な量のごみを供給しておき, 燃焼用空気量を発生蒸気量の変動にあわせて増減させる制御を行なっている。この十分なごみ量というのは多すぎても少なすぎても燃焼が不安定になるという性質があり, 運転員が自動燃焼制御中にやむを得ず手動介入する大きな要因にもなっている。Fig. 1a~cにご



Fig. 1a Insufficient supply of waste



Fig. 1b Proper combustion



Fig. 1c Oversupply

みの供給不足, 適正供給, 過剰供給のそれぞれの状態における典型的な炉内燃焼を示す。

Fig. 1a はごみ枯れしており, 急激な炉温低下が起きやすい不安定な状態である。Fig. 1b は, ごみの供給量と燃焼速度がバランスしている良好な燃焼であり, 常にこの状態が維持されることが望ましい。Fig. 1c はごみの供給量が燃焼速度を上回っており, これが継

続すると燃え残り、すなわち未燃ごみが発生する原因となる。ごみ枯れや未燃の発生は頻繁に起こるものではないが、ごみピットでの攪拌ができていないときや、汚泥などの水分量が多いごみが投入されたようなときに、急激なごみ質変化に自動燃焼制御が追従できない場合の過渡的な現象として見られるものである。これを極力、最小化または回避することが安定運転持続の肝であったが、その対応は従来の自動燃焼制御では困難で熟練運転員の判断に頼る部分も多かった。そこで当社は、学習機能を持った燃焼画像認識システムと、ごみクレーン & ピット 3D-AI 自動管理システムを開発し、長年のこの課題を解決するに至った。

2. FCM 識別器による画像認識システム

熟練運転員は計器データだけでなく、中央制御室で映し出されている炉内監視画面の映像も燃焼状態を把握する手段として活用している。このような視覚情報からどう判断するべきか、という問題は暗黙知となっている部分が多く、容易に形式知化できない。また、人間が持つ曖昧さも判断に影響すると考え、数あるクラスタリング手法の中からクリスプではない対象にも有効な Fuzzy C-means (FCM) 法を使って熟練運転員の判断を学習、模倣できるシステムを開発した。FCM 法の解説は紙面の都合上省くが、炉内画像判定を実現するための簡単な学習イメージを **Fig. 2** に示す。最初に典型的な燃焼パターンを判断したい数だけ設定するがこれをクラス分けと呼ぶ。実際の燃焼画像から熟練運転員が各々のクラスと同等と感じたときの画像を抽出、各クラスの教師画像として与える。FCM 識別器は与えられた教師画像の集合からクラスごとに共通の特徴を抽出、すなわち概念を学習するのである。これによって、数百枚という機械学習の世界

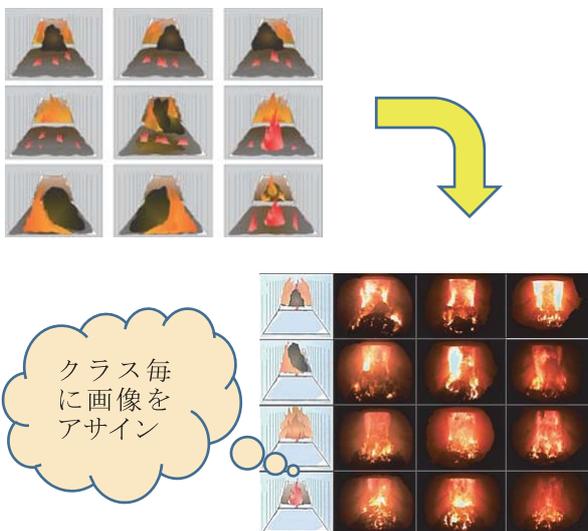


Fig. 2 Learning of teacher images using FCM method

では非常に少ない教師データ量にも関わらず運転員並みの分類ができる実用的なシステムが構築できる。

Fig. 3 に実際のシステム動作画面を示す。この画面では FCM 識別器による判定結果が刻々と更新される。多くの教師なし学習手法とは異なり、判定結果に違和感がある場合は、問題のあるクラスだけ学習をやり直すことも出来る。これは制御と連動する実用システムにとって大変重要なことであると考えている。

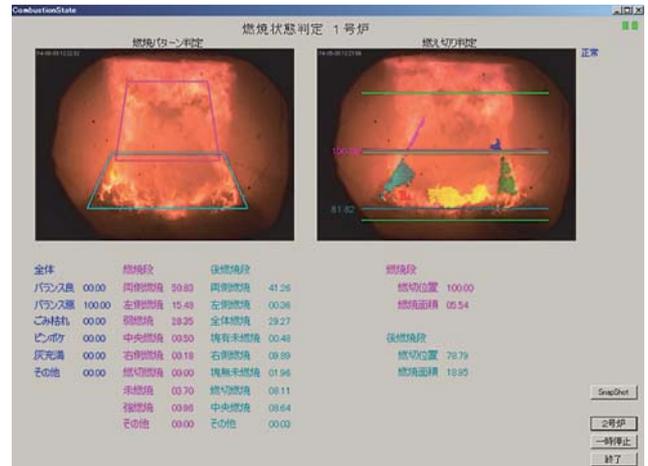


Fig. 3 Judgment monitoring of FCM classifier

本システムを用いた燃焼回復例を **Fig. 4a~b** に示す。**Fig. 4a** は FCM 識別器による補正制御を OFF、つまり従来制御と同じ状態で、FCM 識別器がごみ枯れを検出している期間に炉内温度の低下が起こっているが、回復がとても遅い。**Fig. 4b** は FCM 識別器による補正制御が ON の状態で、ごみ枯れを検出するとごみの供給量を定める給じん速度を上昇させるなどの制御が機能し、素早く回復運転が出来ていることが

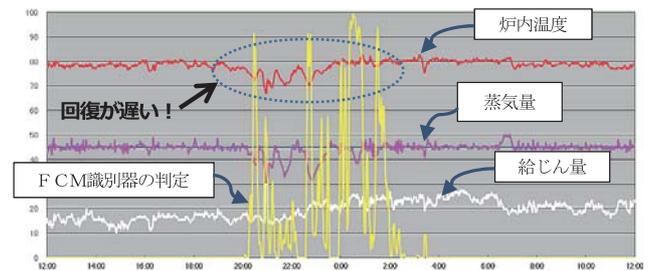


Fig. 4a FCM classifier "OFF"

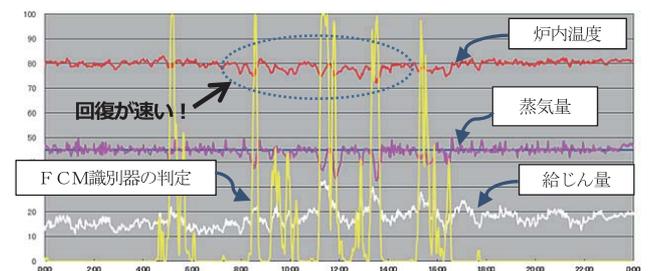


Fig. 4b FCM classifier "ON"

分かる。このような動きは熟練運転員の技能に近いものであり、機械が人間から学ぶ知能化技術を実機で実証できた。

本システムは特殊なカメラを必要とせず、一般的な監視カメラを用いて運用できる。また、人間が見て判断できるものであれば、ごみ焼却以外の分野にも応用可能であることを付け加えておく。

3. ごみクレーン & ピット 3D-AI 自動管理システム

ごみ焼却における燃焼および発電量の安定化のため、焼却炉に投入するごみの均質化が有効であることは経験的な知見として広く知られているところである。このため、ごみクレーン操作者の負担を軽減することと、効率的にごみを攪拌する手段として、従来からごみクレーン自動運転システムによるごみピット内の自動攪拌が行なわれているが、攪拌エリアやタイムスケジュールは管理者が計画して設定する必要があった。また、敷地面積や焼却量の関係によりごみピットが小さい場合、ごみの表層部の攪拌だけでは焼却炉への投入が進むにつれ攪拌されたごみが枯渇しやすい問題があった。

当社は、従来のごみクレーン自動運転システムに、ごみピット3次元マップ技術を搭載し、生物の進化の過程を参考にした確率的探索を行なう遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以降 GA) を実装して、エリア設定にとらわれない攪拌回数の均一化と、ごみの表面層だけでなく、さらにその下層にあるごみに対しても自動攪拌する仕組みを運転稼働中のごみ焼却施設に導入した。

以下に本システムの概要と得られた成果を説明する。

3.1 ごみピット3次元マップ

従来システムではごみピット平面を一定の大きさのブロックに分割し、各ブロックのごみ高さを表示するものであったので、ごみがどれだけ積み替えられ、他のブロックのごみと混ぜ合わされたのかが見えなかった。本システムは、ごみクレーンの動作履歴から攪拌回数や混合割合を計算し、カラーグラフでその度合いを示すことができる (Fig. 5)。

また、ごみクレーンの運動軌跡やバケットの開閉履歴も識別カラーと軌跡線で表示かつデータベース化されるため、ごみクレーンの保安全管理やトラブル調査などにも活用できるものとなっている。

3.2 遺伝的アルゴリズム

ごみクレーン自動運転システムと連携させるには、ごみピットを多数のブロックに分割して、ごみのつか

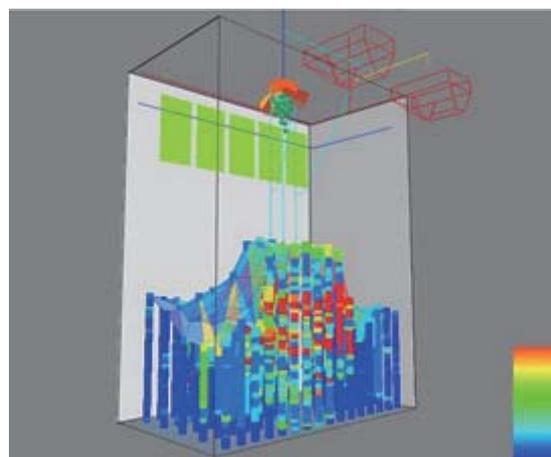


Fig. 5 Waste pit 3D-map display

み、投下位置の順番を決める必要がある。例えば50ブロックあるとして、最低3回はごみを動かすとなると6,250,000通りものパターンが存在する。これを2層目、3層目まで範囲を広げるとさらに膨大なパターン数となり、計算が終わらない問題と直面することになる。そこで全探索を行わずとも好成績な近似解が得られるGAを用いることでこの問題の解決を図ることにした。

GAとは進化論的手法の代表例であり、生物の進化のメカニズムをプログラム上で再現するアプローチである。Fig. 6にGAで用いる遺伝子モデルを示す。GAの構成要素である遺伝子には、ごみのつかみ位置 (Catch) と投下位置 (Drop) を入れ込み、これを攪拌順序で並べてひとつの攪拌運転パターンとしている。

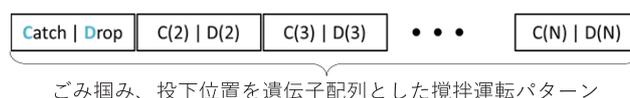


Fig. 6 A gene used of GA

つぎに攪拌順序を決めるための探索方法について説明する。Fig. 7にフローチャートを示す。Fig. 6に示す遺伝子の列群を初期集団としてランダムに複数個初期生成し、短時間で最大の攪拌効果が得られるパターンを持つ遺伝子の列群を見つけるため、各々の攪拌性能を評価関数で数値化した後、成績の良い遺伝子列群だけを次世代に残す。この繰り返しによりパターンが収束するが、局所解に陥ることを避けるため、遺伝子内の情報を交換する交叉や突然変異といった遺伝的操作を行なうようにしている。これを終了条件になるまで繰り返すことで要求レベルを満たした攪拌運転パターンを構成する遺伝子列群を得る。このプロセスにより、ノートPCでも僅か数分で攪拌運転パターンを生成することが可能になった。

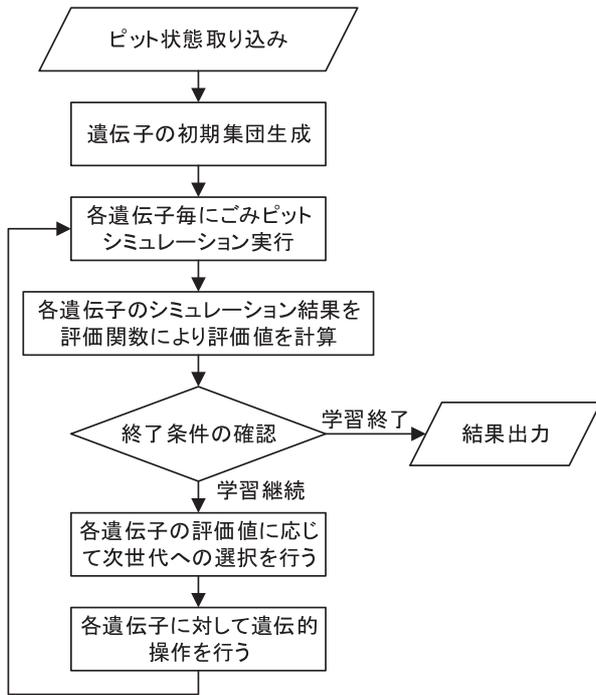


Fig. 7 Flowchart of GA

3.3 システム構成

システム構成図を Fig. 8 に示す。ごみピット 3次元マップの表示を行なうごみピット管理用 PC に GA アルゴリズムを導入した。ごみピット管理用 MCU (Multi Control Unit) は、GA アルゴリズムより算出された運転スケジュールを受信し、ごみクレーン制御用 MCU へ運転スケジュールから取得した座標 (クレーンバケットの行先) を送信する。

ごみ焼却炉への投入時は、ごみピット管理用 MCU がメモリ内部のごみピット 3次元マップから投入座標を判定し、ごみクレーン制御用 MCU へ座標を送信する。

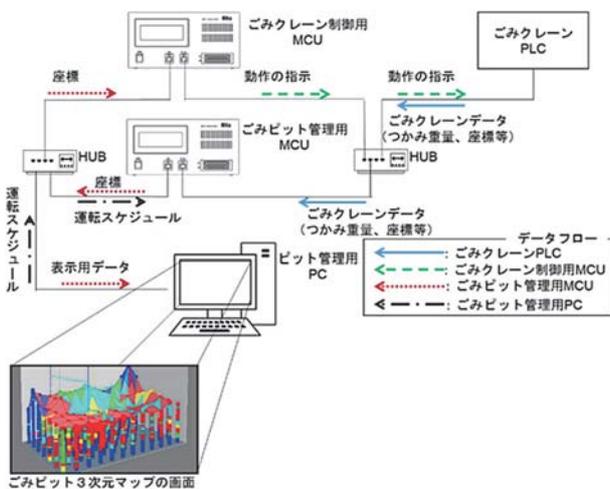


Fig. 8 System configuration

3.4 運用効果の検証

本システムをごみ焼却施設に導入した結果を報告する。Fig. 9a~9b にごみピットを真上から見た 9月21日の18時から0時までのごみクレーン運動軌跡とごみピット各エリアの「攪拌回数の変化」を示す。

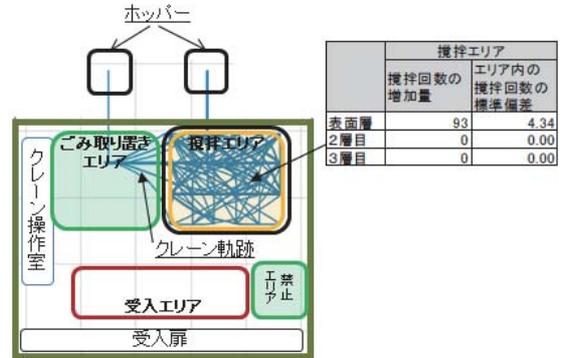


Fig. 9a Before introduction of GA (2016/9/21)

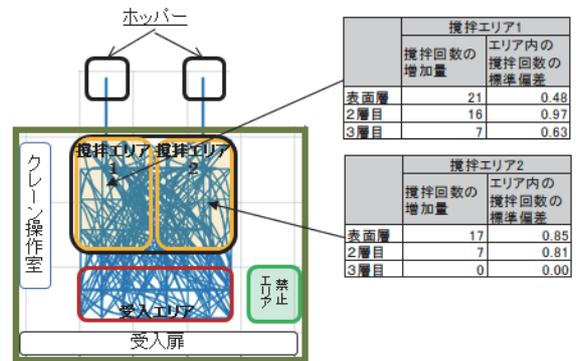


Fig. 9b After introduction of GA (2017/9/21)

導入前 (Fig. 9a) は、2016年時点の従来型のシステムによる運用で管理者がごみピットを攪拌や投入など目的別にエリア分けして設定する必要があった。そして GA 導入後、この1年後の実証 (Fig. 9b) では GA が決定した攪拌スケジュールに任せた自動運転により、広い範囲で攪拌されたごみを確保することが出来た。また、表面層の攪拌回数の標準偏差が縮小し、下層部の攪拌回数を向上させることができた。

次に導入前後における炉投入ごみにおける攪拌回数分布を Fig. 10 に示す。導入前は攪拌回数のピークが無く標準偏差は 3.5 回であったが導入後は 4 回をピークとして標準偏差が 2.2 回に改善した。この時の燃焼

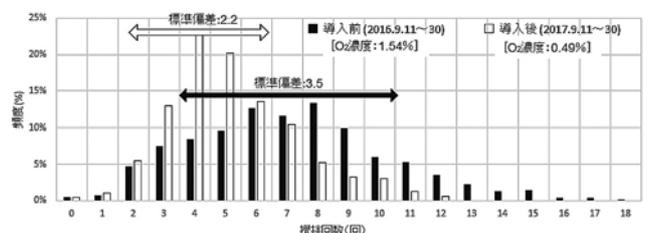


Fig. 10 Distribution of stirring waste to hopper

安定性の指標となる集じん器出口 O_2 濃度の変動幅の標準偏差が導入前 1.54% から導入後は 0.49% に改善した。このことから、炉内に供給されるごみの均質効果により燃焼用空気の変動が抑制されたものと推測される。

4. ま と め

ごみ焼却炉に投入される直前のごみの発熱量をリアルタイムに計測できる技術はまだ確立されていない。このため、ごみ焼却炉に投入されたごみがよく燃えるごみなのか、そうでないのかは炉内で燃焼させて初めて知ることになる。我々はこのように事前に知ることのできないごみ質に対して、ごみ質を事前に知る必要性そのものを不要とする発想で、ごみピットで攪拌を十分に行ない、ムラ無く混ぜ合わせることで、どの位置のごみを掴んで投入しても、ごみ質が大きく変化しない方法を考案した。しかし、それでもごみである以上、混ざり切らなかったごみが投入されることも考えられる。これに対しては電子の眼の役割をする FCM

識別器で炉内の燃焼の様子から燃焼の変化を検知し、自動燃焼制御を補正することにした。燃焼の度合いは温度計や流量計など物理センサで計測したデータにも反映されるが、これらの「点」で計測するセンサでは炉内全体の様子を総括的に知ることはできない。

炉内画像には火焰の色や長さ、火焰の分布、燃え切り点など燃焼指標に使える非常に多くの情報が含まれている。FCM 識別器は炉内を「面」でとらえ、熟練者の感覚から学習することで、注目すべき特徴が炉内画像の中にどのように含まれているかを見つけようとする。そして人間と同じようにパターン A とパターン B の中間くらいというような自然な振り分けができるので、炉内燃焼のようなほぼ無限のパターンが存在する対象でも無難に適用できる。

今後もごみ焼却のさらなる安定運転を目指して人工知能技術を活用していく所存である。

さいごにシステム開発において多大なご協力をいただきました秦野市伊勢原市環境衛生組合様に心よりお礼を申し上げます。