

ごみ焼却プラント運営事業における画像認識技術の活用

Image Recognition System Applied to Waste Incineration Plant Operation Business



藤 吉	誠	Makoto Fujiyoshi	①
川 端	馨	Kaoru Kawabata	②
水 井	一 憲	Kazunori Mizui	③
堅 多	達 也	Tatsuya Katada	④

あ ら ま し

ごみ焼却プラントの長期間運営事業では、運営上のノウハウや経験をうまく活かして、最適かつ安全なプラント運営管理とコストを最小限にすることが重要課題である。当社の遠隔支援・運転支援センターでは、最新のICT技術を利用し、各運営施設で行われる手動操作介入の要因を分析してそれを自動化するシステムを開発中である。このシステムの中で、まず挙げられるのが、FCM識別器と呼ぶ画像認識技術を応用した燃焼画像判断システム（CoSMoSとネーミング、商標登録済）である。本稿では、CoSMoS[®]、および同様の画像認識技術を応用したホッパーレベル監視システムについて述べる。

Abstract

In long-term projects involving the operation and management of waste incineration plants, it is very important to make use of our know-how and experience to minimize operating costs and keep the plant running smoothly and safely. Our company is using the latest information and communication technology (ICT) to develop a total remote support system to analyze manual operations in each plants and change them to the automatic control. The most remarkable feature is the combustion image recognition system (named CoSMoS) using fuzzy C-means (FCM) classifier technology. In this paper, we describe CoSMoS[®] and a hopper level monitoring system using the same image recognition technology.

1. 緒 言

ごみ焼却施設でもっとも不安定なプロセスは焼却炉内におけるごみの燃焼である。このため、中央制御室の運転員は、機器点検や現場保全などの業務と並行して多数の計器やITVカメラの画像を監視し、ごみの投入状況や燃焼状態に対し、つねに気を配らなければならない。ごみ質の急変などで燃焼状態が不安定になると、ごみの焼

却熱が不足し、蒸気タービンによる発電量が一定量以下に低下することにより売電量の減少やごみ焼却施設内の電力をまかなうための買電につながる。また、助燃バーナによる追い焚き燃料の消費や、有害ガス、未燃残渣の発生など多くの諸問題が発生する。このように、ごみの燃焼を安定的に持続することは売電収入や環境問題に大きく影響するため、ACC（Automatic Combustion Control：自動燃焼制御）の働きが以前に増して重要となってきた。特に近年は、100t/d未満の小型炉でも積極的にごみ発電を行い、余剰電力を売電する傾向が高まっており、最近、当社が受注した施設においてもボイラ付き小型焼却炉の割合が増えてきている。しかし、小型炉にボイラを設置すると熱吸収力の増大により炉が冷めやすくなり、わずかな燃焼悪化でも急激に炉温が低

① Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 精密研究室
 ② Hitz日立造船㈱ 環境・エネルギー・プラント本部 総合運営プロジェクトグループ
 ③ Hitz日立造船㈱ 環境・エネルギー・プラント本部 運営システム部
 ④ ㈱ニチゾウテック エンジニアリング事業本部 プロジェクト統括部

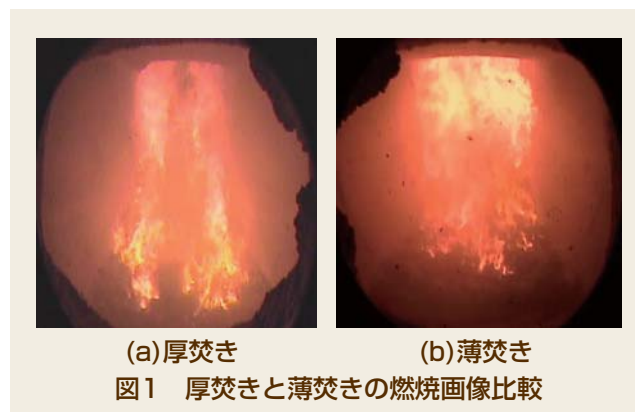
下しやすいという中大型炉には無い難しい操炉技術が要求される。燃焼が悪化しACCの応答が間に合わない場合は運転員の判断により、手動操作介入での燃焼状態の回復、復帰が必要となる。これはベテラン運転員でも非常に神経を使う作業であり、運転員の技量次第では状態をさらに悪化させるという事例が多く発生している。このようなことから、小型炉においてはより厳密にACCを効かせる必要があり、手動介入ゼロを目指した完全自動化が求められるようになってきている。

2. 小型炉のごみ燃焼プロセスの課題

小型炉のACCが不安定になる原因は様々であるが、多くの場合、ストーカ炉特有のマスバーンモデルの影響が大きいと考えられる。これは実際の蒸発量制御の仕組みを考えるとわかりやすい。刻々と変化のごみ質によって燃焼熱量が変動するため、ごみを炉内に過剰供給し、火格子下からの空気量を増減させることによって燃焼熱量を制御する方法が多く採用されている。また同時に燃焼によって炉内の可燃分が減少するため、ごみ層厚の計測によって炉内へのごみ供給量を補正し、ごみの過不足が生じないように給じん量を制御することも行われている。小型炉の場合は火格子の面積が小さいため、火格子上のごみ質・量分布のばらつきの影響が中大型炉に比べ相対的に大きくなる。小型炉の運転傾向を遠隔監視システムで解析したところ、実際はごみ質・量のばらつきが関係なくなるほど過剰に多く供給し、火格子上のごみを非常に厚くして運転する傾向があることを突き止めた。同時にこのような厚焚きによって低質ごみでは通気性低下による吹き抜け、高質ごみでは燃焼空気の絞り込みにとまごみ層厚の精度低下で制御が不安定になり、ACCの逆応答が起きやすい副作用も確認された。手動介入操作の多くはこれらの事象が起きた場合に行われており、究極の自動化には厚焚きからの脱却が必要と考えられた。このため、当社のごみ層厚制御の計算を根本的に見直すとともに、ACCの動特性を正規化するなどで2年以上にわたり実証テストを行い、薄焚きでもごみ枯れしない制御法を確立し、既設の運営施設から順次、層厚制御の切り替えを行っているところである。切り替えを実施した施設では、従来は困難だった薄焚き運転が可能となり、水分の多い低質ごみの乾燥高速化や、高質ごみ時のごみ枯れ防止などに威力を発揮している。

薄焚き運転ではごみ層全体に燃焼空気が分散して通過するため図1のように火炎がカーテン状となり、火格子の左右端からの吹き抜けが無く、また2次燃焼が活発化しNOxやCOも抑制される。薄焚き技術によって小型炉でも基準とはかけ離れた過剰供給を行う必要は無くなった。しかし、ごみ質の急変による過渡応答は別問題として捉えなければならない。例えば、攪拌不足のごみや圧密ごみの投入があると炉内に未燃塊が生じやすいが、これらの多くは凹凸状になって火格子上に分布するため、ごみ層厚の計測値が乱れやすい。また、薄焚きはごみ質

が軽くなったときに加速度的に燃焼が進むことがあり、これに対して制御の応答が間に合わなければごみ枯れする。このような状況になっても安定したごみ送り制御を継続するには、燃焼状態を点で捉えるのではなく火格子上のごみ層や火炎の状態など立体的に把握することが必要である。これまで、未燃塊の位置や大きさ、火炎の長さや色、吹き抜けの有無など、複雑な炉内の状態判断は運転員の目視に頼らざるを得なかった。このように運転員の判断に委ねていた部分の自動化を行い、運転員の負担を最小化し誰が運転しても安定燃焼が実現する仕組みにすることで運営コストの抑制と安心・安定かつ安全な施設運営を両立させたいと考えている。当社では運転員の目の代わりをする技術として「FCM識別器による画像認識システム」の開発に取り組んでおり、これを炉内の燃焼状態判断に応用したシステムを「CoSMoS(コスモス: Combustion Sensing Monitor System)」と称し現在、調整運転と改良を重ねているところである。本稿では、燃焼状態判断自動化のコア技術である画像認識技術と、それを応用して開発したホッパレベル検知システムとCoSMoS®について紹介する。



(a)厚焚き (b)薄焚き
図1 厚焚きと薄焚きの燃焼画像比較

3. 画像認識技術— FCM 識別器

3.1 FCM識別器の概要 FCM識別器による画像認識の技術は、当社の子会社であるニチゾウテック(NTI)と大阪府立大学の共同研究により、駐車場の満空判定用に開発されたものであり、日光や照明などの外乱の影響下でも誤判定が少なく、人間の感覚に近い判定ができるという特徴を有している¹⁾。

FCM識別器の概要を駐車場の満空判定システムを例に説明する。FCM識別器は予め収集された画像データを複数個のクラス(状態)に人の目で分類しておき、各画像データの特徴を効率的に学習(訓練)して各クラスのクラスターを生成しておくことで、判定画像がどのクラスに属している可能性が高いかを計算し、自動分類するという手順で行う。図2はFCM識別器を応用して開発した駐車場の在車検知フローである。駐車車両検知において、一般的な画像処理手法を応用した場合は、駐車場の明るさ、路面・壁の色、車の車種・大きさ・色、車輪止め、身障者マーク、歩行者等を考慮して処理内容を決

定するため、環境の変化（路面色の変更、車輪止めの追加等）があった場合や別の駐車場に応用した場合、専門家による処理パラメータの変更や場合によっては処理内容の修正が必要となるケースが多い。それに対しFCM識別器は、人が目視で駐車か空車を判断した画像を用意すれば、あとは自動的に識別器が構築される仕組みなので、環境の変化や別の駐車場に応用した場合でも、識別器を構築する画像データを変更するのみで対応可能である。

これに用いる画像認識ソフトは、動画から静止画の切り出しなどを行う画像処理部、次元圧縮を行う主成分分析、ファジィクラスタリングを用いたFCM識別器などで構成されるソフトである。通常の画像処理ソフトに比べ、取込処理やデジタル処理は同様に必要だが、特殊なラベリング、エッジ処理等および複雑なアルゴリズムは必要なく、応用対象によってプログラムを作り直さなくてもよい。

このようにFCM識別器は対象の画像データとクラス情報を変えるのみで、基本的な処理方法は変える必要がない。またFCM識別器は、人が目視で入力したクラス分類通りに画像を分類するので、画像分類の特徴を明確にモデル化できない対象についても、人の目視に近い感覚での状態判定を高精度に行うことができるのが大きな特徴である。この例のように天候や昼夜、構造物、車種などの影響を受けにくい特徴を活かし、ごみ焼却炉の燃焼のように複雑に変化する対象でも、人の感覚に近い判定が行えるようになっている。



3.2 画像認識技術—FCM識別器の原理

FCM識別器はクラスタリング手法のひとつであるFuzzy-C-Means法を画像識別に応用したもので、ファジィクラスタのメンバシップを、データとクラスター中心とのマハラノビス距離により定義し、それからクラス毎のメンバシップを計算する。クラスタリングアルゴリズムは識別器の前処

理に用いられ、識別するクラス毎の大量の画像データをファジィクラスタにわけ、クラスターのメンバシップ関数の足し合わせを識別関数とする。FCM識別器の訓練の第一フェーズであるクラスタリングには、ハードとファジィの中間的なセミハードクラスタリングを採用する。これによって計算処理時間を減らし、アルゴリズムの収束を確実にしている。訓練の第二フェーズでは、FCM識別器で用いるパラメータとクラスターの混合比率を最適化するために粒子群最適化法 (particle swarm optimization, PSO) を用いる。PSOは遺伝的アルゴリズムのような進化的計算と多くの類似点を持っているが、交叉や突然変異といった進化操作がなく実装の容易性という点で優れている。

$$\begin{aligned} \min \quad & J_{shcm} = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N u_{ki} (D(x_k, v_i; S_i) - \eta \log \alpha_i + \log |S_i|) \\ \text{s.t.} \quad & \frac{1-\beta}{c-1} \leq u_{ki} \leq \beta \\ & \sum_{i=1}^c u_{ki} = 1 \\ & \sum_{i=1}^c \alpha_i = 1 \\ & \dots \dots (1) \end{aligned}$$

$D(x_k, v_i; S_i) = (x_k - v_i)^T S_i^{-1} (x_k - v_i)$ はデータベクトル、 $x_k \in R^p$ とクラスター中心、 $v_i \in R^p$ とのマハラノビス距離を表す。 c はクラスター数で N はデータ数である。クラスター中心 v_i 、共分散行列 S_i 、混合比率 α_i の更新式はラグランジュ関数をそれぞれで微分することで求められる^[2]。式(1)はK-L情報量正則化FCM法の目的関数を u_{ki} について線形化したもので、さらに $\eta=0$ としても線形である。

解は端点 $\in \left\{ \frac{1-\beta}{c-1}, \beta \right\}$ に収まり、 u_{ki} の更新式は以下のようになる。

$$u_{ki} = \begin{cases} \beta & \left(i = \arg \min_{1 \leq j \leq c} D(x_k, v_j; S_j) - \eta \log \alpha_j + \log |S_j| \right) \\ \frac{1-\beta}{c-1} & (\text{その他}) \end{cases} \dots \dots (2)$$

クラスター中心の初期値は、クラスタリング結果ができるだけランダムな初期値に依存しないように、クラス中心とクラス毎の主成分ベクトルを用いて決定される。クラスタリングが終わると第二フェーズとして、評価用の全データからクラスター中心までのマハラノビス距離を求め、各クラスへのメンバシップ値で識別を行う。 π_q をクラス q の混合比率、すなわちクラス q の事前確率とする。 x_k のクラス q へのメンバシップを次のように定める。

$$u_{qjk}^* = \alpha_{qj} |S_{qj}|^{-\frac{1}{r}} (D(x_k, v_{qj}; S_{qj}) + v)^{\frac{1}{m}} \dots \dots (3)$$

$$\tilde{u}_{qk} = \frac{\pi_q \sum_{j=1}^c u_{qjk}^*}{\sum_{s=1}^Q \pi_s \sum_{j=1}^c u_{sjk}^*} \dots \dots (4)$$

c はクラス毎のクラスター数であり、 Q はクラス数である。

クラス毎のクラスターの混合比率 α_{qj} と m, γ, v は識別器の自由パラメータ (hyper-parameter) である。自由パラメータは10-CV法 (交差確認法) の評価用データの誤識別率を最小化するように粒子群最適化法 (PSO) によって決定される。すなわち、識別器の三つのパラメータ m, γ, v と α_{qj} がPSOで最適化される。そして、訓練が完了した後にテストセットに対する性能が評価される。クラス・クラスター毎の共分散行列 S_{qj} が特異行列にならないように共分散行列の低階数近似法^{[9],[14]}を用いる。

3.3 FCM識別器の応用—ホップレベル検知システム

ごみ焼却施設に搬入されたごみはごみピットにいったん蓄積され、クレーンにより焼却炉の入口であるごみホップへ投入される。この投入タイミングを計るため、超音波センサが設置されている。この超音波センサは、ごみに反射して返ってくる超音波の時間差からごみのレベルを計測しており、ある一定のレベル以下になればクレーンに対して投入要求を行う。

しかし、実際の超音波センサによるレベル計測では、ごみホップのコーナ部分に溜まったごみの塊や長尺ごみを検知することがあり、結果として、ごみのレベルを正しく計測できないことが多く、ごみの完全自動投入の障害になっていることがある。このように、超音波センサによるレベル計測は信頼性が低いため、運転員は、ITVカメラ画像で確認してレベルを照合している状況である。そこで、人の感覚に近い判定ができるFCM識別器を、このホップレベルに応用することとした。

ごみホップには、**図3**に示すように監視用のITVカメラと超音波センサが取り付けられている。超音波センサは、ごみホップ斜面終端の突き当りをゼロ点として、斜面の一番上にあるごみと超音波センサ間の距離を計測する。一方、FCM識別器は、ホップの斜め上に取り付けられたITVカメラの画像を用いる。

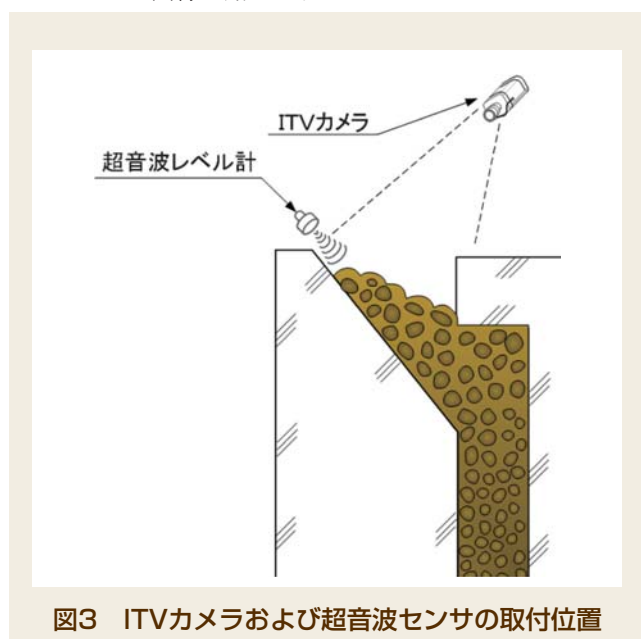


図3 ITVカメラおよび超音波センサの取付位置

FCM識別器によるレベル計測では、まず計測範囲を**図4**の青線で示す範囲に限定し、赤線で区切った5つの

エリアのうち、どの部分までごみが溜まっているかということに基づいて、ごみレベルを5クラスに分類する問題として考え、人の目視により5クラスに分類した画像を使ってFCM識別器を構築した。

FCM識別器構築時の目視による画像を5クラスに分類する際に、コーナ部分のごみの引っ掛かりや長尺ごみを除外することで、FCM識別器も同様にそれらを除外してレベルを計測することが可能となる。



図4 ごみレベルの分類

このFCM識別器により、判定画像についての5クラスのメンバシップが計算され、その値が最も大きいクラスをごみレベルと判断することができる。この場合、計測結果は1、2、3、4、5というような離散値となり、ごみの投入判定には十分利用可能であるが、ごみの高さは連続的に変化するものであり、人の感覚とはかけ離れている。そこで、FCM識別器が計算した5クラスのメンバシップを利用して、計測結果を連続値で表現できるように変換することとした。

まず、ごみレベルの計測結果は0～100の連続値で表現することとし、**図5**の水色線で示す上の位置を100、下の位置を0と設定した。そして、FCM識別器が計算したメンバシップの合計値が1になるように正規化し、各クラスの中心値に対し重み付き平均を計算すること (**図6**参照) で、5段階の離散値を0～100の連続値に変換する。この時の計算式は以下のとおりである。

$$L = \left(\sum_i \tilde{U}_i \times L_i \right) \times \frac{100.0}{5.0}$$

L : ホップレベル

\tilde{U}_i : クラス i に属する確率 (メンバシップ値)

実証炉におけるごみホップレベル計測値の比較結果を**図7**に示す。図において、超音波センサの計測値を赤色、FCM識別器による計測値を緑色で示している。図中に赤丸で示した区間において、超音波センサの計測値は約5mの値を示している。これは、超音波センサが**図8**で示すようなホップ上部に溜まったごみに反応しているためと考えられる。一方、FCM識別器による計測値は、ホップ上部のごみだけでなく、垂れ下がったテープ状のごみや

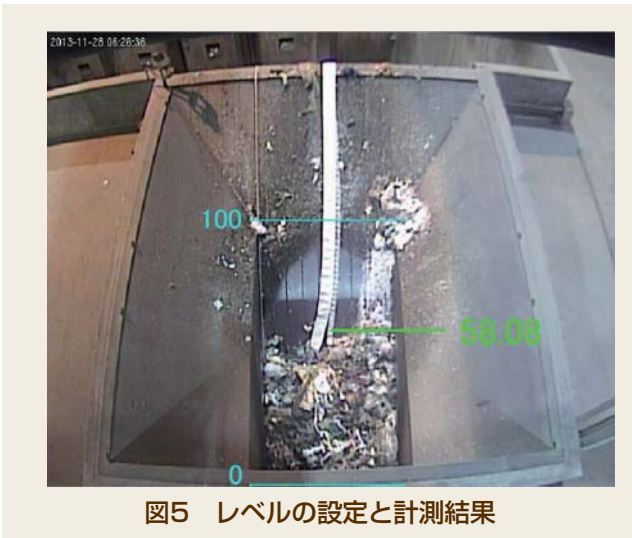


図5 レベルの設定と計測結果

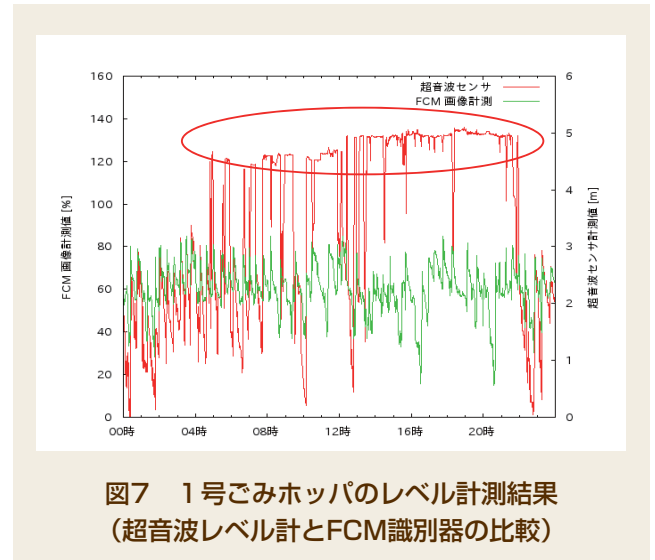


図7 1号ごみホッパのレベル計測結果 (超音波レベル計とFCM識別器の比較)

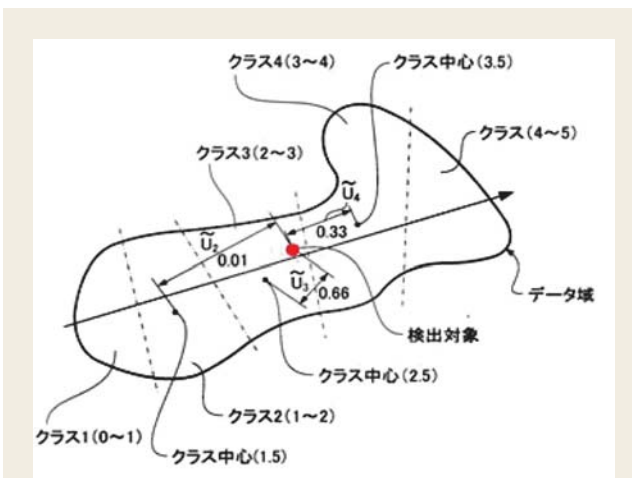


図6 FCM識別器で離散値を連続値に変換する仕組み

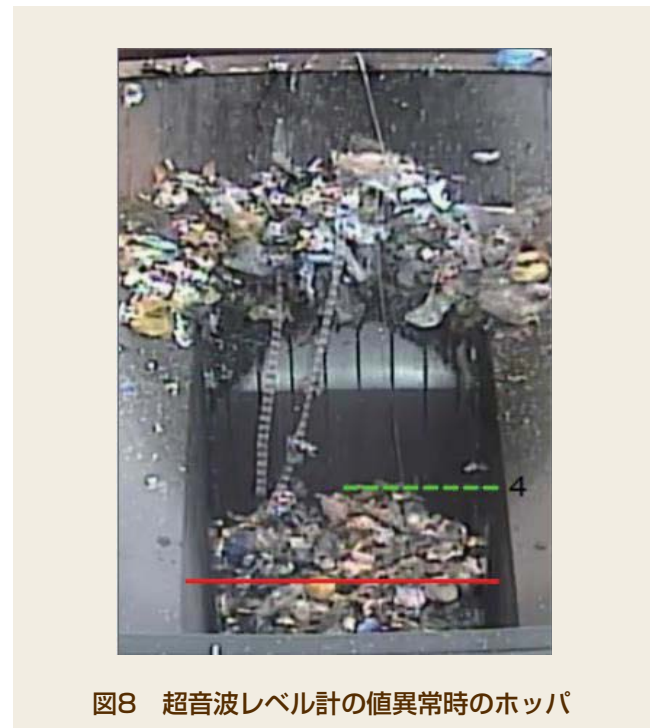


図8 超音波レベル計の値異常時のホッパ

ホッパ斜面の模様を誤って検出することなく、図8の緑色の線で示したごみレベルを正しく示している。

また、一日を通して、FCM識別器による計測値は単調減少と急増を繰り返している。この変動はごみが焼却炉に供給されていくことによるレベル低下と、新しいごみの投入による急激なレベル増加を表しており、この挙動の結果からもFCM識別器の方が正しい値を出力していると考えられる。

現在、実証炉の中央制御室では、図9に示す計測ソフトによりホッパレベルの計測結果と過去1時間のレベル変動を同時に表示している。本ソフトにより、ごみ詰まりによるホッパのブリッジを早期に発見することが容易になるなど、現場でも十分活用いただいております。今後は他施設にも応用展開する予定である。

4. 燃焼画像判断システム (CoSMoS®)

4.1 CoSMoS®の概要 CoSMoS®はFCM識別器をごみの燃焼状態判定に応用したものである。炉内の様子をベテラン運転員と同じ感覚で状態判断することを意図して学習型識別器を搭載している。ベテラン運転員



図9 実機運用のレベル推定ソフトの画面

は長い運転経験から燃焼画像をデフォルメしたり、特徴の選別（パターン化）をして捉えていると考えられる。例えば、火炎が白色に近く放射状に立ち上がっている場所があればそこが燃焼空気の抜け穴になっており、その周囲は厚いごみ層に覆われている状況を立体的に想像するといったようなものである。このように炉内画像から得られる情報は通常の計器では得ることができない燃焼状態の具体的把握に有効であり、これまでも画像処理技術を使って情報を取得しようとする試みが行われてきた。しかし、二値化やサーモグラフィなど従来の技術では機械的に光（火炎）の強弱や周波数を識別し、燃え切り点や火炎面積、火炎温度を求めるといった光の数値化に終始していたため、学習や特徴点抽出といった人間の感覚に基づく判断を模倣することができなかった。これに対し、CoSMoS[®]は燃焼状態を複数のパターンに分割し、FCM識別器で炉内画像から得た現在の燃焼状態がそれぞれのパターンにどのくらいの割合で合致しているのかを計算し、その度合いに応じてACCの各種パラメータを運転員に代わって操作変更する機能を持っている。

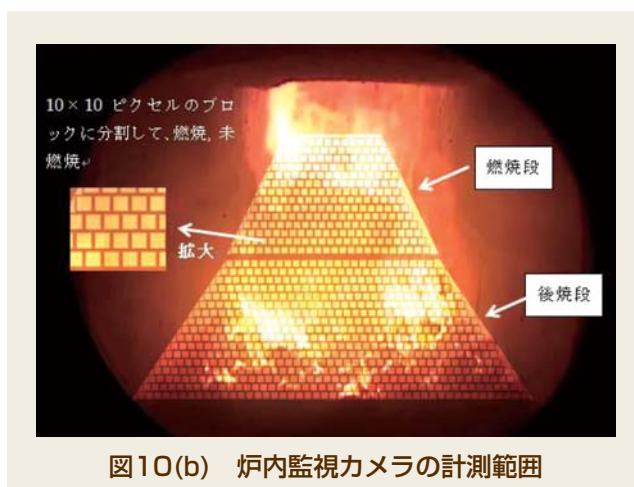
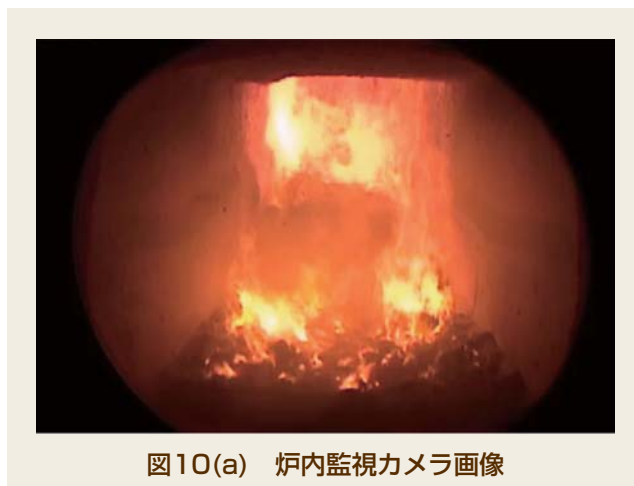
4.2 燃え切り点制御への応用

4.2.1 燃え切り点の検出原理

燃焼状態の画像的指標の一つとして燃え切り点が挙げられる。燃え切り点は、炉内に投入されたごみが燃え尽きる位置であり、この位置を一定の範囲に収まるように火格子速度の制御を行っている。基本的には、燃え切り点の位置が上流にずれれば燃えすぎによるごみ枯れ傾向と判断して火格子速度を速くし、手前に下がればごみの燃焼不良傾向と判断して、火格子速度を遅くする制御を行っている。

これまでは燃え切り点計測の画像処理手法として、画像の輝度に対する二値化手法を使っていたが、この手法は条件・環境の変化に対応できないという問題があった。例えば、炉内の画像は燃焼状態に応じて照度が変わるので、それに合わせて二値化パラメータ（閾値）を自動的に変える必要があるが、それを高精度で実施する仕組みを実現することができず、炉内の明るさが変わるたびに燃え切り点が大きく変動するという状況であった。このため外乱に強い実用的な判定が可能なFCM識別器を応用して燃え切り点検出手法を構築することとした。燃え切り点検出に使用する炉内監視用のITVカメラは後燃段の後方に設置されており、その炉内監視カメラ画像は図10 a)のように燃焼段と後燃段を斜め上から写したものになる。この画像に対して、図10 b)の白枠で示すように燃焼段と後燃段それぞれに台形型の計測範囲を設定する。そして、それぞれの台形の領域を10×10ピクセルの小ブロックに分割し、ブロックが燃焼、未燃焼のどちらであるかを識別する2クラスのカテゴリ問題と考え、そのブロック分類にFCM識別器を使用する。これにより、10×10ピクセルのブロック単位で燃焼部分を識別することができる。

次に、燃焼部分と判定されたブロックに対して、8連結ラベリング処理を実施し、燃焼ブロックの塊（以後、グループと称す）を検出する。そして、検出したグループのうち



燃焼ブロック数が一定の数値より少ない場合は、小さな炎の塊であると考え、主燃焼部分ではないと判断して、以後の燃え切り判定処理からは除外することとした。こうして検出された主燃焼部分の各グループの最下端のブロックを、各燃焼グループの燃え切り点とし、そのうちで最も後ろ（=Y座標が大きい）にあるブロックを最終的な燃え切り点として検出する。

燃え切り点の計測値は、燃焼段、後燃段のそれぞれの台形の上端を0、下端を100として、以下の式で算出することとした。

$$P = \frac{100.0 \times \{\max(y_1, \dots, y_n) - Y_{top}\}}{(Y_{bottom} - Y_{top})}$$

P : 燃え切り点

y_i : 各燃焼グループの最下端ブロックのY座標

Y_{top} : 処理範囲上端のY座標

Y_{bottom} : 処理範囲下端のY座標

4.2.2 燃え切り点の検出結果

FCM識別器を応用した燃え切り点検出方法による検出結果の一例を図11に示す。図には従来手法との比較のため、二値化手法による結果を併せて示す。赤線がFCM識別器の示す燃え切り点で、他の線は異なる閾値を用いた二値化での

燃え切り点である。まず二値化の結果について、図からもわかるように閾値の設定により大きく結果が異なり、小さな炎を検出したケースも見受けられる。また図は静止画であるためわかりにくいですが、結果を連続表示して確認すると、判定の結果が毎回大きく変動するケースも確認された。それに対してFCM識別器の結果は、人が目視により判断した燃え切り点と近い位置を検出（小さな炎を無視）しており、結果を連続表示した場合も、二値化と比較して変動量が格段に小さいことが確認された。この結果を受け、現在、FCM識別器による燃え切り点検出判定を使って、火格子速度を自動的に調整する制御システムを構築し、実炉による実証テストを継続している。



図11 燃え切り点検出結果の一例

4.3 燃焼パターン判定への応用

4.3.1 燃焼パターン判定の手法 燃焼悪化の原因となる未燃塊や吹き抜けの発生は炉内画像で確認できた時点でごみ送りに関する制御パラメータを適切な値に調整することが求められる。しかし、それらの問題の規模（大きさ）や場所によってどの火格子をどれくらい速度調整するのかを判断するのは相当なベテランにならないとできない。炉内の状態を正確に判断し、最も適切な方法によって制御の補正を自動化することは誰でも安心して運転できるごみ焼却施設の必須条件である。

実際の炉内画像で説明する。図12(a)は燃焼が安定している正常な状態で、制御の補正は必要ない。

一方、図12(b)(c)は燃焼に問題がある状態で、その状況に応じて制御の補正が必要であり、このような状態になる傾向を早期に発見し、パラメータを変更して燃焼状態を安定させることが重要である。

しかしながら、炉内の燃焼状態は極めて複雑に変化するため、パターンマッチング的な手法では判定精度を向上させようとすると膨大な数の指標パターンが必要になり、実用化が困難である。FCM識別器であれば、代表的な指標パターンをいくつか設定しておけば与えられた指標パターンとぴったり一致しないような燃焼状態でも、それぞれの指標パターンにどれくらい近いかを数値化することができるので、制御の方向性を見失うことはない。これは、FCM識別器を使うと画像判定ではつきものであ

る誤判定を防ぎつつ判断を大きく間違えないロバスト性を持たせることができるからである。実証試験ではこのような特徴をもとに、ACCを補正する制御法として、燃焼状態別のパターンに属する割合からグレードを統合することにより制御調整値を決定するモデルを使用している。



図12(a) 正常燃焼



図12(b) 燃焼に問題がある状態(ごみ枯れ)

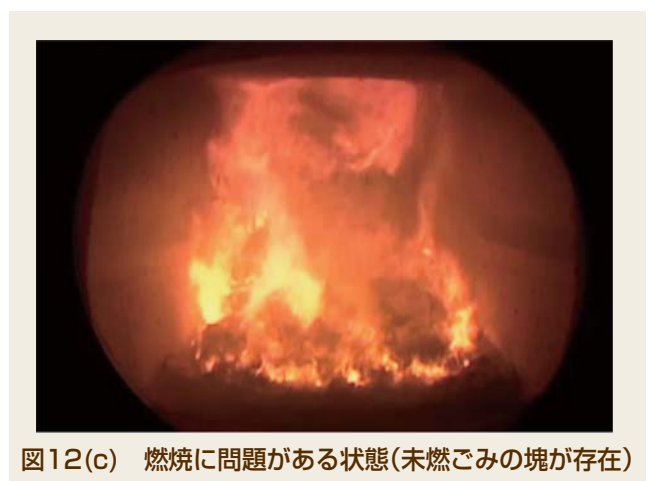


図12(c) 燃焼に問題がある状態(未燃ごみの塊が存在)

4.3.2 燃焼パターン判定の仕組みと結果

燃焼パターン判定は典型的な特徴ある燃焼状態を8パターンに分類し、現在の燃焼状態がどのパターンに相当するのかを数値で示す。燃焼状態は複雑に変化するため、各パターンのどれかに完全に一致する場合もあれば、AとBの間ということもある。また、どのパターンにも属さ

ないような燃焼状態もあり得る。FCM識別器は与えられたパターンと判定対象とが一致する可能性を%で表現するため、燃焼状態のような正常と異常の境界が明確でない対象には適した判別手法とも言える。指標となるパターンの設定に際しては実際の炉内画像から燃焼悪化パターンを分析して、複数の運転員が燃焼状態の特徴から誰しもが同じパターンを選択するような典型的な8つの燃焼状態に絞り込みを行った。訓練学習も複数の運転員が8つのパターンのどれかに相当すると判断した実画像を使用して行った。FCM識別器により実炉の炉内画像の分類を行った結果を表1に示す。約1ヶ月間にわたる炉内画像から人が8つのパターンのどれかに相当すると判断したシーンをランダムに抽出し、それをFCM識別器が8つのうち、このパターンであると分類した結果と一致すれば正解とした。この結果、表に示すようにトータルの正解率は78%弱となった。パターンによっては正解率が低いものがあるが、これらは訓練学習データが比較的少ないグループに属しており、学習不足が影響した可能性がある。

前述のとおり、燃焼状態は絶えず複雑に変化しており、また、そこに人の主観が入ってくるので人の目と機械の目とは捉え方が本質的に一致しない。言い換えれば、どちらが本当の正解なのか厳密に分類することはできない。ベテラン運転員であるほど、バイアス(先入観)がかかりやすいのも事実であり、これらがいまわって、人とFCM識別器の両方の誤差が含まれていると考えるのが自然であろう。このように客観的評価の数値化自体が誤差を含むということを考慮すれば、得られた判定結果は高レベルと言えよう。

表1 FCM識別器による燃焼パターン分類結果

クラス	判定数	判定結果								正解率
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	31	26	2	0	0	3	0	0	0	83.87
2	59	6	43	3	5	0	1	0	1	72.88
3	8	0	1	6	0	1	0	0	0	75.00
4	18	0	0	1	15	1	1	0	0	83.33
5	24	2	0	0	0	22	0	0	0	91.67
6	12	0	0	0	1	1	9	0	1	75.00
7	13	0	1	2	0	1	0	9	0	69.23
8	6	0	0	3	0	0	0	0	3	50.00
計	171	34	47	15	21	29	11	9	5	77.78

5. 結 言

まず、FCM識別器によるごみホップのレベル計測については、既設の超音波センサと比べて、非常に安定しており、ごみの引っ掛かりなどの外乱の影響を受けない。ごみの自動投入やブリッジ検出のためのセンサとして十分利用可能なことが確認できた。

次にCoSMoS[®]に関して、一つ目の焼却炉内の燃え切り点については目視の結果と比べて、概ね正しく計測できており、従来の画像処理(二値化)に比べて照度や熾き火などの外乱にも強いという結果が得られた。

二つ目の燃焼パターン判定では、高度な判断能力を必

要とする火炎の勢い、分布、未燃塊の位置の判定は燃焼パターンという形で指標化し、FCM識別器が各パターンの訓練学習を繰り返すことによって運転員と同じような判断をさせるのに実用的な成果が得られた。もちろん、運転員は画像のみで判断しているわけではないので、今後、画像以外のプロセスデータも判断材料に加えることで判定精度はさらに上昇すると思われる。

今後のCoSMoS[®]に関しての改良・検討課題は、画像認識の識別率を上げることがメインとなるが、具体策は以下の3点である。

- ①燃焼パターンの選定最適化
- ②画像以外の判断要素の統合
- ③訓練学習の合理化、学習時間の短縮

従来は、燃え切り点だけでは火炎の具合や未燃塊の有無がどうなっているのか判定できないため、火格子速度の自動調整に踏み切ることが出来なかった。現在は、燃焼パターンのどの状態に近いかを判断し、その状態に基づくファジィ推論で制御パラメータの変更を代行することで、ベテラン運転員の判断に近い制御の実現を目指している。今回の開発でこれまで、数値化が困難などの理由で利用できなかった画像情報を一種のセンサ情報と同様に取り扱えるようになったことは大きい。実炉で稼働中のシステムには、この画像認識に加えて運転員が手動操作している部分を自動化し、自動パラメータ調整の機能を追加して、長期の運転実証試験を行っている。これまでの実証試験の結果、従来の厚焚きでは困難だったごみ質の変化を視覚的に捉えるということが、薄焚きでは非常に簡単にできるという大きな成果があった。薄焚き燃焼は火炎が火格子全体から薄く長く伸びるという、見た目に美しい燃え方をするのでごみ質の変化がわかりやすい。薄焚きで運転すると、投入ごみが低質ごみに変わったときに未燃塊が炉の奥から送られてくるのがはっきりわかるようになる。また、ごみ質が軽くなれば火炎全体が赤色や黄色から白色に変わり、火炎の伸びも短くなるのでごみ枯れの前兆もわかる。これらの現象は、既設のセンサであるごみ層厚計の反応よりも早くFCM識別器で捉えることができるので、過渡期におけるACCの追従性を大きく改善できるのである。まさに薄焚き運転とFCM識別器の組合せはベストな関係と言える。中大型炉でも梅雨時や水分の多い夏場のごみなどで苦労している施設もあると聞かすが、高い操炉技術を必要とする小型炉での安定燃焼技術は逆に「小は大を兼ねる」ことができ、中大型炉においても適用できる。また、焼却炉の規模を問わず低負荷運転をすると燃焼位置が変わることにより制御性が悪くなることがあるが、これもCoSMoS[®]によって改善が期待できる。CoSMoS[®]は既存の機械設備を改造することなく、通常の炉内監視カメラを流用しACCを含む制御システムの部分的な変更だけで済み、既設の清掃工場でも設置が容易である。

CoSMoS[®]が運転の超自動化と燃焼改善の切り札となるよう今後もシステムの完成度を高めていく所存である。

【謝辞】

本稿を書くにあたり、元大阪府立大学、市橋名誉教授に多大なるご協力をいただきました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1]市橋秀友: “ファジィクラスタリングに基づくパターン認識: 監視カメラによる駐車場の満空管理システム”, 日本知能情報ファジィ学会 東海支部研究会 予稿, **2009**
- [2]市橋秀友, 野津亮, 本多克宏: セミハードクラスタリングとその識別器への応用, 日本知能情報ファジィ学会誌, vol. 22, no. 3, **2010**.
- [3]M. E. Tipping and C. M. Bishop: “Mixtures of probabilistic principal component analysers,” *Neural Computation*, vol.11, pp.443-482, **1999**.
- [4]S. Omachi, F. Sun, and H. Aso: “A noise-adaptive discriminant function and its application to blurred machine-printed kanji recognition,” *IEEE Trans. on PAMI*, vol.22, no.3, pp.314-319, **2000**.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 技術開発本部
精密研究室
藤吉 誠
Tel : 06-6551-9312 Fax : 06-6551-9841
e-mail : fujiyoshi_m@hitachizosen.co.jp

Makoto Fujiyoshi
Hitachi Zosen Corporation
Technical Development Headquarters
Precision Laboratory
Tel : +81-6-6551-9312 Fax : +81-6-6551-9841
e-mail : fujiyoshi_m@hitachizosen.co.jp



藤吉 誠



川端 馨



水 井 一 憲



堅 多 達 也