

〈特集〉

開口率定量化による流動床式ガス化溶融炉の出滓口自動監視技術の開発

浜 元 和 久¹⁾, 砂 田 浩 志²⁾, 植 浦 大 樹²⁾

¹⁾ (株)神戸製鋼所

(〒 651-2271 兵庫県神戸市西区高塚第 1-5-5 E-mail: hamamoto.kazuhisa@kobelco.com)

²⁾ (株)神鋼環境ソリューション

(〒 651-0086 兵庫県神戸市中央区磯上通 2-2-21 三宮グランドビル 6F E-mail: h.sunada@kobelco-eco.co.jp)

概 要

流動床式ガス化溶融炉の操業では、出滓口を常時監視し、固着したスラグを適宜除去する設備操作を行う。このスラグ除去判断の自動化を目的に、画像による出滓口開口率定量化に取り組み、出滓口のカメラ画像の特徴である輝度ムラや明るさ変動等に対応した定量化手法を開発した。稼働中の設備のカメラ画像を用いた評価実験で、開発手法の誤差が最大約 11% であり、従来技術の誤差最大 19% と比べて 6 割以下にまで低減できることを確認した¹⁾。これにより、従来主観評価に頼っていた出滓口開口状況を定量評価することを可能にした。

キーワード：流動式ガス化溶融炉、廃棄物、目視検査、画像処理、定量化

原稿受付 2018.4.26

EICA: 23(1) 8-12

1. はじめに

ごみ処理設備の 1 つに流動床式ガス化溶融炉がある (Fig. 1)。流動床式ガス化溶融炉は、ごみが持つ熱エネルギーを利用することで外部燃料を用いることなく、ごみのガス化、燃焼、溶融処理までを一貫して行う事の特徴としており、全国各地で施設が稼働する一般的な都市ごみ処理方式の一つとなっている²⁻⁴⁾。

この流動床式ガス化溶融炉を安定稼働させるには、溶融したスラグ (以降、溶融スラグ) を出滓口から円滑に排出し続ける必要がある。そのため、出滓口にスラグが固着して溶融スラグの流れを妨げないように、

出滓口の開口状態をカメラで監視し、固着したスラグ (以降、固着スラグ) を必要に応じて除去する。スラグ除去の判断は、出滓口の開口部の割合 (以降、開口率)、および炉温や投入されたごみの性質等、複数の要因から、オペレータが総合的に判断しているが、個人差等により判断にバラツキが生じる。また安定操業を優先させたい心理が反映し、必要以上にスラグ除去作業が行われる傾向にあった。筆者らは、スラグ除去判断を自動化するために、出滓口を監視するカメラ画像 (以降、出滓口画像) からの開口率定量化の取組を始めた¹⁾。

この取り組みにより、これまで主観評価されてきた出滓口開口状態の時間変化も定量評価できるようになったので報告する。

2. 出滓口画像の特徴¹⁾

流動床式ガス化溶融炉において出滓口は溶融炉下側に配置されている (Fig. 1)。監視カメラは斜め下側から出滓口を撮影するため、出滓口画像には出滓口および固着スラグ、排出される溶融スラグ、炉内の様子が映りこむ (Fig. 2)。出滓口の領域内に限定すると、出滓口開口部は、出滓口の領域から固着スラグの領域を除外した領域になる (Fig. 3)。そのため出滓口開口率を定量化するためには固着スラグの領域を検出する必要があるが、出滓口画像には以下の特徴があり (Fig. 4)、それらが開口率計算の外乱要因となる。

- ・炉の燃焼状態に応じた輝度ムラがある
- ・炉の燃焼状態に応じた明るさ変動がある

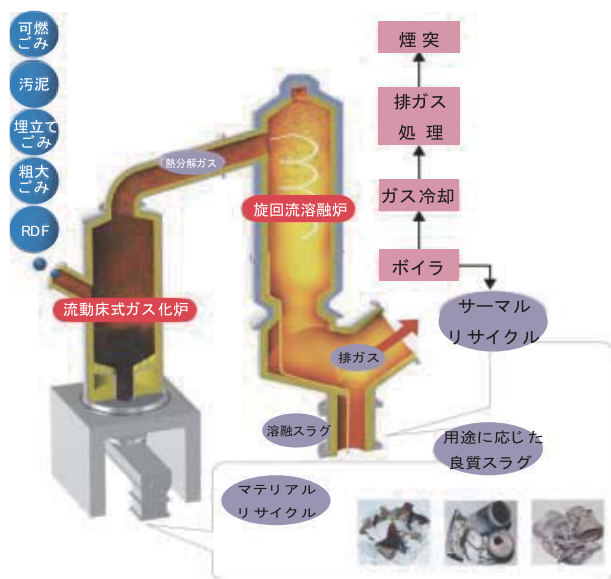


Fig. 1 Outline of Gasification and Melting Process³⁻⁴⁾

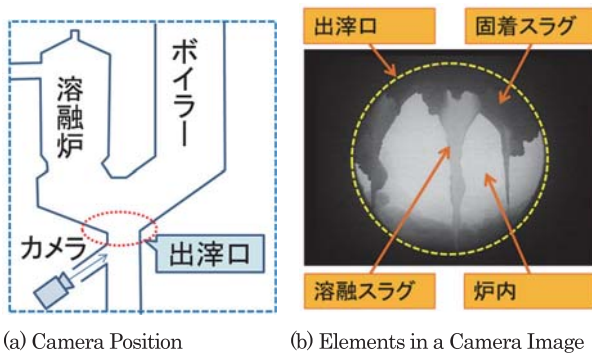


Fig. 2 Camera Image Of Cinder Notch¹⁾

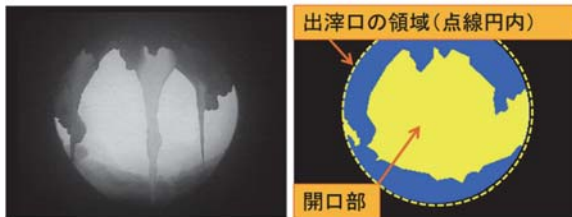


Fig. 3 Definition of Cinder Notch's Aperture Ratio¹⁾

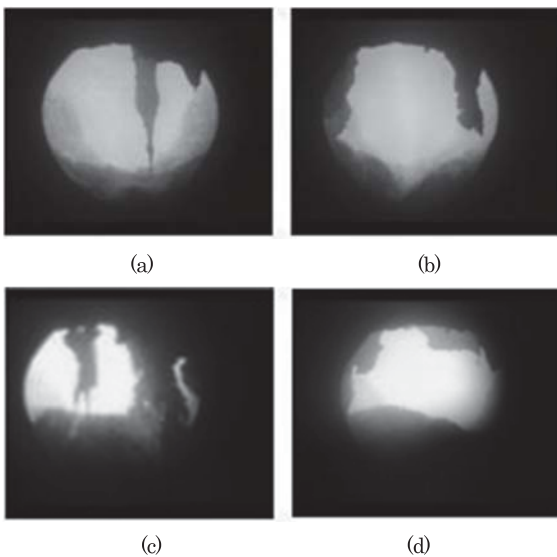


Fig. 4 Camera Image Samples of Cinder Notch¹⁾

- ・ 操業条件に応じて、固着スラグの形状・量が多様に変化する
- ・ 固着スラグ、溶融スラグの静止画での区別が困難
そのため開口率を計算するには上記の出滓口画像の特徴に対策する事が必要になる。

3. 従来の出滓口監視技術とその問題点¹⁾

画像に基づいた出滓口の自動監視技術として、過去に確認できるものだけで2つの技術が報告されている⁵⁻⁷⁾。また近年発展著しいディープラーニングを用いる事も考えられる。しかしそれら3つの技術は、それぞれ以下に示す問題を持つため、そのままでは本取

組の対象である出滓口開口率の定量化には適用できない。

- 1) 出滓口画像を複数フレーム用いて基準画像を作成し、出滓口画像と基準画像との差分計算を行うことで、基準画像より明るく映る溶融スラグを検出する技術がある⁵⁾。この方法は、画像上の溶融スラグ以外の背景の明るさや輝度ムラが安定している事が前提であり、本件の様に炉の燃焼状態に応じた明るさ変動が発生する事例への適用が難しい。
- 2) 各画素について、近傍領域内の画素平均値を閾値とした二値化処理を行い、溶融したスラグを抽出する技術がある⁶⁻⁷⁾。この技術は画像の輝度ムラや明るさ変動の影響をなくす事ができる。しかし画面上のスラグ面積が近傍領域面積より大きい場合、正常にスラグ検出できなくなる問題がある。
- 3) ディープラーニングを用いた開口率定量化は、構築した定量化モデルがブラックボックスになるため、原因が特定できない誤動作を起こす可能性を廃除できず、安定稼働が求められるごみ処理設備への適用は難しい。

4. 今回開発の出滓口開口率定量化手法¹⁾

以上を踏まえ、輝度ムラ、明るさ変動、固着スラグの形状・量の多様な変化、固着スラグと溶融スラグが同程度の輝度で映る、といった外乱要因に対応するため、以下4つの方針を立てて定量化手法構築に取り組んだ。

1つ目の方針として、最初に固着スラグ・溶融スラグをまとめて抽出した。Fig. 2およびFig. 4を見るとわかるとおり、静止画では固着スラグと溶融スラグの区別が難しいが、炉内と溶融スラグ・固着スラグの区別は静止画でも比較的容易にできる。そこで、まずは固着スラグと溶融スラグをまとめて「固着スラグの候補領域」として抽出し、これを後処理で固着スラグと溶融スラグに分離することにした。

2つ目の方針として、低周波数成分除去後、閾値を自動決定する二値化処理で固着スラグ候補領域を抽出した。輝度ムラとは、画像の特定部位において低周波の変動成分を持ち、輝度値が緩やかに変化することを示す。また、明るさ変動とは画像全体の輝度平均値が経時変化する事を示す。この影響をなくして固着スラグの候補領域を抽出するには、

- A) 画像の低周波成分を除去してから、自動で閾値を決定し、二値化処理を行う
- B) 各画素につき、輝度ムラが無視できる大きさの演算範囲を設け、演算範囲内で閾値を自動決定

し、二値化処理を行う

と言った方法が考えられる。ただし、B)の方法は従来技術⁶⁻⁷⁾の手法であり、固着スラグの候補領域の大きさが演算範囲より大きいと、正常に固着スラグの候補領域を抽出できなくなる。そこで、本研究ではA)の方法を採用し、バンドパスフィルタでノイズ除去と低周波成分の除去を同時に行った後、大津の二値化法⁸⁾によって画像を二値化することで、固着スラグの候補領域を抽出することにした。

3つ目の方針として、自動で二値化閾値を決定する処理で、輝度急変部を使わないことにした。上記の通り、低周波成分除去後に閾値を自動決定する二値化処理をかけるが、**Fig. 5 (a) (b)**に示すとおり、原画像で輝度が急変している部位は、低周波成分除去後に相対的に輝度が高くなる。そのため、出滓口画像中の輝度急変部を生む画面中のスラグの形状・量に応じて、後段の大津の二値化処理が正常動作しない可能性がある**(Fig. 5 (c) (d))**。そこで、輝度急変部とその周辺領域を大津の二値化処理実行時に用いないことで対応する。

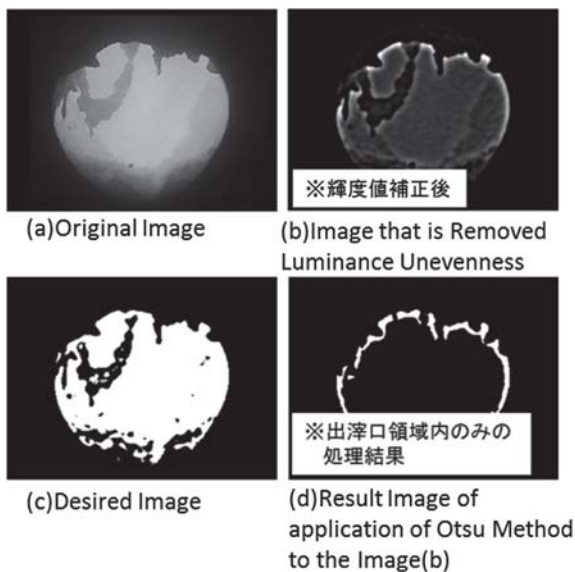


Fig. 5 Influence of Sudden Luminance Change on Detection of Solid Slag¹⁾

4つ目の方針として、動画像により固着スラグと溶融スラグを分離することにした。上記の通り、輝度が同程度になることがあり、静止画では固着スラグと溶融スラグの分離が難しい。しかし動画像で見ると、溶融スラグは画面上を移動するため、容易に固着スラグと溶融スラグを区別できる。そこで、ここでは一定時間、固着スラグの候補領域として検出され続ける領域を固着スラグ、そうでない領域を溶融スラグとして分離することとした。

以上の方針を全て踏まえて出滓口開口率を定量的に計算する方法を構築した。具体的ステップを以下に示す。

[STEP1] ムラ除去処理

出滓口画像にバンドパスフィルタを適用する事で、ノイズ除去すると同時にムラを除去する**(Fig. 6 (a))**。ノイズ除去するのは、後段の輝度急変部検出処理がノイズの影響を受けやすいためである。

バンドパスフィルタのパラメータは試行錯誤を通じて決定した。

[STEP2] 輝度急変部除外用マスク作成

ムラ除去処理を行うと副作用として、輝度急変部近傍の輝度が相対的に高くなり、画面中のスラグの形状・量に応じて後段の閾値決定処理を誤動作させる。そこでエッジ検出処理でエッジ領域抽出し、膨張させることで、輝度急変部除去用のマスクを作成する**(Fig. 6 (b) (c))**。

[STEP3] 二値化閾値決定

ムラ除去後の画像から輝度急変部除外用マスクの領域内の画素だけを用い、大津の二値化の方法で閾値を決定する。その閾値でムラ除去後の画像を二値化する事で、画像の明るさ変動の影響を抑制し、固着したスラグ、溶融したスラグがない「明らかな開口部」である炉内の領域を抽出する**(Fig. 6 (d))**。

[STEP4] 固着スラグの候補領域抽出

出滓口の形状データと炉内の領域の差分から「固着スラグの候補領域」を抽出する**(Fig. 6 (e))**。

[STEP5] 固着したスラグの抽出

一定時間 t の間、固着スラグの候補領域であり続けた領域を、固着したスラグと判断する。今回は $t=10$ 秒とした。本処理により、静止画では判断困難な固着

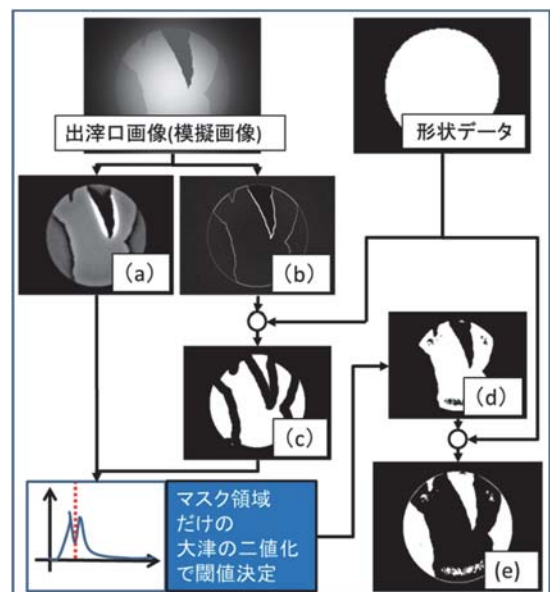


Fig. 6 Outline of Region Extraction Method of Candidates for Solid Slag¹⁾

スラグを抽出できるようになる。

[STEP6] 開口率の導出

出滓口開口率を A 、画面上の固着したスラグの面積を S 、出滓口面積を H として式 1 により求める。なお、 H は既知の値として与えられる。

$$A = (H - S) / H \quad (式 1)$$

5. 評価実験結果

5.1 開発手法の精度評価¹⁾

開発手法の有効性検証のため、人間による開口率計算結果を基準とした評価を行った。評価用データは稼働中の設備から採取した 18 件の画像である。比較のため、上記開発手法の STEP1~STEP4 を以下 2 つの手法に置き換えて固着スラグの候補領域を導出する手法とあわせて評価した。

- α) 画像全体に対する大津の二値化処理
- β) 局所平均値を閾値とする二値化処理 (従来技術⁶⁻⁷⁾)

なお、(β) の手法は比較的ノイズの影響を受けやすいため、ガウシアンフィルタでノイズ除去した画像を用いる。(β) の手法のノイズ除去および、局所平均値を求める時の演算範囲は、開発手法で用いたバンドパスフィルタの高周波成分除去、および低周波成分除去の演算範囲と同じ大きさに設定している。

評価の結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す。Fig. 7 を見ると、比較手法に対して開発手法は平均誤差を 35% (-10% → -6.5%)、誤差を最大で 59% (-18.5% → -10.9%) 低減しており、従来手法より精度良く開口率を定量化できている事を確認した。

これは Fig. 8 に示すとおり、比較手法 (α)、比較手法 (β) がそれぞれ、画像の輝度ムラ、および固着スラグの形状・量の多様な変化の影響を受けたため、固着スラグ候補領域の検出精度が落ちたのに対し、開発手法はそれら外乱要因の影響を抑制できたためと考えられる。

5.2 開発手法による出滓口開口率の経時変化の評価

以上の精度評価実験結果を受け、開発手法によって出滓口開口状態の時間変化を定量評価できるか、実設備から取得した 12 時間分の動画像を用いて検証した。

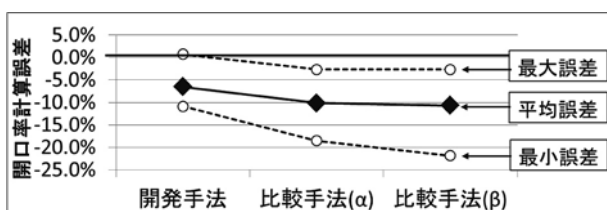


Fig. 7 Result of Experimental Accuracy Evaluation¹⁾

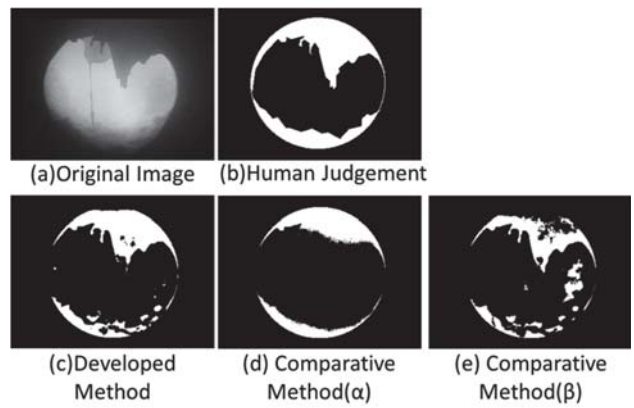


Fig. 8 Result Image Samples of Solid Slag Detection by Each Method¹⁾

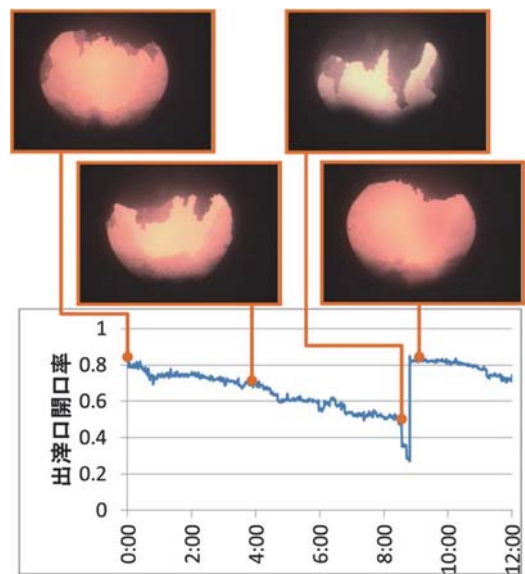


Fig. 9 Observation of Temporal Change in Cinder Notch's Aperture Ratio

検証は、開発手法で導出した出滓口開口率と動画像を複数個所で比較する事で行った。

検証結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 を見ると、出滓口にスラグが徐々に固着していく様子や、スラグ除去によって開口部が拡大する様子が、出滓口開口率から評価できている事がわかる。

以上の検証から、これまで主観評価しかできなかった出滓口開口状態の時間変化を、開発手法によって定量評価できる事が確認でき、開発手法の有効性を確認できた。

6. ま と め

流動床式ガス化溶融炉を対象に、スラグ除去判断の自動化を目的として出滓口開口率の定量化手法の開発に取り組んだ。稼働中の設備の監視カメラの動画像を用いた性能評価を行い、人間による開口率計算結果基準で最大誤差が 11% 以下である事、また、これまで主観評価に頼っていた出滓口開口状態の時間変化を開

発手法によって定量評価できる事を確認した。

今後は固着したスラグの除去判断自動化のため、オペレータの判断のルール抽出に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 浜元和久, 他: 流動床式ガス化溶融炉の出滓口監視技術の開発 —— 出滓口開口率の定量化 ——, DIA2018 動的画像処理実利用化ワークショップ (2018.3.8-9 名古屋), No. IS2-17 (2018)
- 2) 水岡翔, 他: 流動床式ガス化溶融炉の長期連続安定稼働, 神鋼環境ソリューション技報, Vol. 7, No. 1, pp. 56-60 (2010)
- 3) 青木勇: 流動床式ガス化溶融炉の操業自動化に向けた制御システム, 産業機械 2017 年 5 月号, No. 800, pp. 16-19 (2017)
- 4) 江口徹, 他: 流動床式ガス化溶融炉における排ガス CO, NOx 制御技術, 神鋼環境ソリューション技報, Vol. 14 No. 1, pp. 19-25 (2017)
- 5) 前沢敏昭, 他: 画像認識による下水汚泥溶融炉の監視・制御, EICA, Vol. 4, No. 1, pp. 39-43. (1999)
- 6) 宮本裕一, 他: ごみガス化溶融プラントのスラグ流監視装置の開発, 第 39 回計測自動制御学会講演会予稿集, (2000)
- 7) 栗林榮一, 他: ガス化溶融炉のスラグ流監視装置の開発, EICA, Vol. 9, No. 2, pp. 193-196, (2004)
- 8) 大津展之: 判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J63-D, No. 4, pp. 349-356 (1980)