

# 重回帰分析法を活用した過熱器出口蒸気温度制御による ごみ焼却発電施設の安定運転



新井 忠幸 ①  
佐藤 拓朗 ②  
白石 裕司 ③  
土佐 美幸 ④

## 要旨

当社は、京都市南部クリーンセンターの協力を得てごみ焼却発電施設の安定運転の向上を目的に重回帰分析法を活用した過熱器出口蒸気温度制御を開発した。

本開発では、投入ごみの発熱量変動に起因する燃焼ガスと蒸気変動の関連性に着目し、時間経過や操作、外乱などの影響因子を配慮したデータ駆動型の予測モデル式を確立し、過熱器出口蒸気温度制御へ適用した。その結果、重回帰分析法に2分後予測値を活用したフィードフォワード制御を導入することで、高温高圧化に対応した過熱器出口蒸気温度制御の制御性が向上し、燃焼状態とタービン発電電力量が安定化した。また、最も高温となる3<sup>rd</sup>過熱器管の腐食、減肉量の低減への効果もある。これは、ごみ焼却発電施設の安定化につながり、安定操炉の継続は機器の劣化や損傷が抑制されるため設備の延命化をもたらす。また、AIやICTを活用した自動運転による省力化・人員ミニマム化、DCS手動操作最小化に貢献する。

## キーワード

ボイラ、過熱器、蒸気温度、予測値

## 1. 緒言

ごみ焼却発電施設の安定運転を維持させるためには、燃焼状態を良好にする制御が必要である。燃焼状態を安定させるためには、ごみ性状の均一化が重要であり、焼却前のごみピット内を十分に攪拌する必要がある。しかし、発熱量の異なる性状のごみ（例えば、草木などの剪定枝や水分60%～70%含んだバイオガス化施設からの残渣ごみなど）の均一化は攪拌だけでは困難な一面もある。そのようなごみ投入に対しても良好な燃焼状態を維持するために、適切な制御方法を用いて、燃焼状態やタービン発電電力量を安定化させる必要がある。

また、近年、ごみ発電を高効率化するために、ボイラの高圧化が進み、それに対応した過熱器出口の蒸気温度制御の向上、ボイラ過熱器管の延命化が急務となっている。

当社は、京都南部クリーンセンターの協力を得て、投入ごみの発熱量変動に起因する燃焼ガスと蒸気変動の関連性に着目した。更なる燃焼の安定性向上、ボイラ過

熱器管の延命化を目的として、重回帰分析法を活用した過熱器出口温度制御を開発した。これにより、時間経過や、操作、外乱などの影響因子を配慮したデータ駆動型の予測モデル式を確立し、制御へ適用した。<sup>1)</sup>

本稿では、京都市南部クリーンセンターにて過熱器出口蒸気温度制御に重回帰分析法で得られた予測値を導入し、燃焼制御、タービン発電電力量の安定化、過熱器管の腐食、減肉量の低減効果について実証試験を行った結果について報告する。

## 2. 実証施設

2019年9月竣工した京都市南部クリーンセンターの施設概要を表1に示す。本施設は、ごみ処理能力250 t/24 h×2 炉のごみ焼却発電施設をはじめ、生ごみ等を発酵させて発生したメタンガスを活用するバイオガス化施設、大型ごみなどを破碎して資源となる鉄やアルミニウムを選別回収する選別資源化施設を併設した、複合施設である。また、最新のごみ焼却発電施設を導入し、エネルギー回収の最大化を目指す。ボイラは、高温高圧化仕様の高効率ごみ発電システムで、廃熱は4.00 MPa×400℃蒸気のボイラで熱回収し、抽気復水式蒸気タービン発電機で最大14,000 kWの発電を行うことができる。

- ① 環境事業本部 電気計装制御設計部
- ② 環境事業本部 電気計装制御設計部 技術士(衛生工学部門)
- ③ 環境事業本部 インキュベーション推進部 博士(工学)
- ④ 環境事業本部 インキュベーション推進部

表1 京都市南部クリーンセンターの施設概要

焼却施設	処理能力	500t/日 (250t/24h×2 炉)
	炉形式	ストーカ式焼却炉/全連続燃焼式
	ボイラ	最大蒸気発生量 48.6t/h 4.00MPa×400℃
	発電設備	最大 14,000kW
バイオガス化施設	処理能力	60t/日 (30t/日×2 系統)
	処理方式	メタン発酵
	発電設備	最大 1,000kW
選別資源化施設	処理能力	180t/6h (破碎 140t 切断 40t)
	処理方式	破碎・切断

### 3. 過熱器出口蒸気温度制御と重回帰分析法

#### 3.1 過熱器出口蒸気温度制御プロセス概要

過熱器出口蒸気温度制御のプロセス概要について図1に示す。

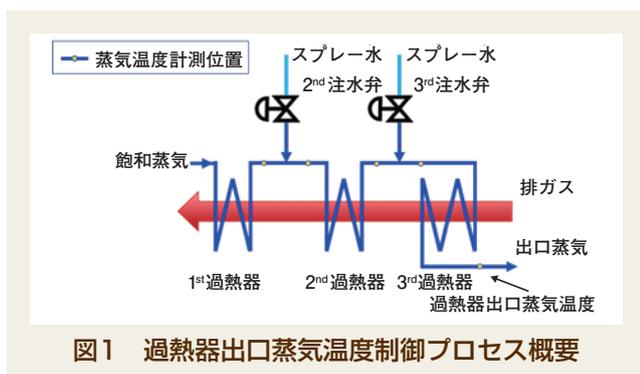


図1 過熱器出口蒸気温度制御プロセス概要

過熱器はボイラにて発生した飽和蒸気を過熱し、蒸気タービン発電機の効率向上を目的に設置されている機器である。過熱器の配置としては、1<sup>st</sup>過熱器、2<sup>nd</sup>過熱器、3<sup>rd</sup>過熱器の3ブロックに分割されそれぞれのブロック間には過熱低減器を設けている。制御内容については、2<sup>nd</sup>過熱器、3<sup>rd</sup>過熱器出口蒸気温度は過熱器入口に設置された過熱低減器に注水する減温水量を調節し過熱器出口蒸気温度が所定の温度となるよう入口蒸気温度を制御している。また、過熱器は最も高温蒸気となる3<sup>rd</sup>過熱器を排ガス温度の高い上流側に配置し伝熱効率を高めている。この構成とすることで400℃の過熱蒸気を安定して得ることができる。

#### 3.2 重回帰分析法

重回帰分析法とは、複数の説明変数が目的変数に与える影響を分析するために使用する統計解析手法の1つである。

過熱器出口蒸気温度の予測モデル式を算出するために本手法を採用した。重回帰分析法の特徴と効果について以下に示す。

図2(a)は説明変数が1つの場合の単回帰で回帰式を求めた例である。図中の青中実点は実測値であり、赤実線は回帰式を表す直線である。各実測値と推定値の誤差の二乗和が最小となるような直線、つまり回帰式が求まる。

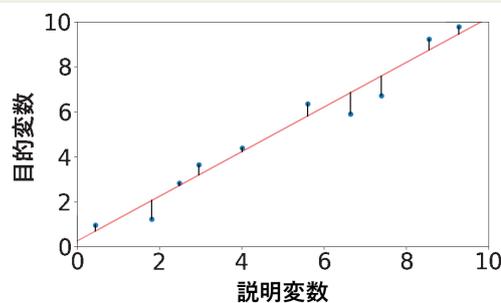
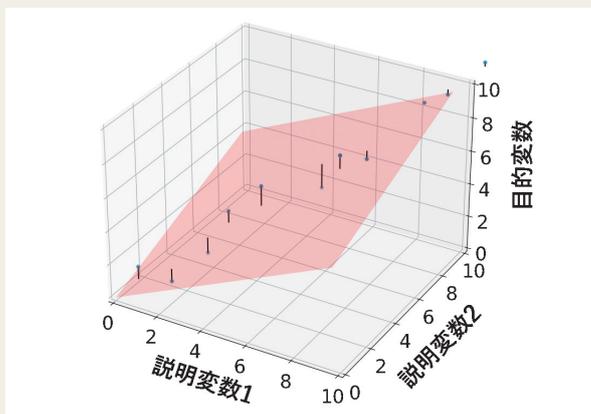
これに対して、図2(b)は説明変数が2つの場合に重回帰分析により回帰式を求めた例である。この場合では回帰式は平面となり、単回帰の場合と同様に、各実測値と推定値の誤差の二乗和が最小となるように平面を求める。重回帰分析は更に説明変数が多い場合にも適用可能である。

重回帰分析は非常に基本的な手法であり、非線形な現象を表現するには適さない。しかしながら、得られる回帰式は単純な四則演算で表現できるために高機能なシステム構成は不要である。本稿では、DCSソフトプログラムにて作成が可能であり既存施設への適用が容易であることを重視して採用した。

また、時系列のプロセスデータの予測を行う場合、直前のデータと現在のデータには強い相関があるために、直前のデータを予測値とすることでみかけ上は高い精度の予測が得られる可能性がある。そのため、本稿では「過熱器出口蒸気温度の現在値と数分後の値の差分」を目的変数とした。すなわち、将来の過熱器出口蒸気温度の予測モデル式は次式で算出する。

$$\begin{aligned} \text{過熱器出口蒸気温度の予測値} = & \\ & \text{過熱器出口蒸気温度の現在値} \\ & + (\text{予測された過熱器出口蒸気温度の差分}) \end{aligned}$$

このような手法にて過熱器出口蒸気温度の予測値を算出し、制御に適用した。

図2(a) 単回帰分析の例  
(青中実点は実測値、赤実線は回帰式)図2(b) 重回帰分析の例  
(青中実点は実測値、赤平面は回帰式)

## 4. 実証試験の方法

**4.1 試験概要** 過熱器出口蒸気温度制御（以下3<sup>rd</sup>過熱器出口蒸気温度）の課題である目標温度に到達するまでの応答時間の遅れを解消するため、過熱器出口蒸気温度を現在値とせず、予測値を活用したフィードフォワード制御を行うことにより過熱器出口蒸気温度制御の安定化を図る。フィードフォワード制御は、あらかじめ制御動作を予測しながら制御を行う手法で制御対象に対して外乱や変動がある場合に有効である。

重回帰分析法による予測モデル式構築では、過熱器出口蒸気温度を予測するために説明変数としてボイラ過熱器・給水系統、排ガス処理系統などの複数のプロセスデータを活用した。予測モデル式は、3パターンの異なる説明変数の組み合わせを活用し実証試験を実施し評価を行った。この結果、3パターンの予測モデル式についていずれも精度が高く、同様の効果が得られたことにより予測モデル式の汎用性や信頼性が高いことを確認した。

**4.2 予測モデル式の選定** 重回帰分析法で使用する目的変数、説明変数についてトレンドデータにて一定期間データ収集し予測モデル式を決定した。そこで、説明変数の異なる3パターンの予測モデル式の精度について、過熱器出口蒸気温度の標準偏差（現在値－予測値）にて比較し検証した結果を表2に示す。

表2 過熱器出口蒸気温度予測モデル式結果

項目	過熱器出口蒸気温度		
	パターン①	パターン②	パターン③
予測モデル式パターンNo.			
標準偏差（現在値－予測値）	1.97	1.71	1.55

パターン③のモデル式が標準偏差値1.55で最も精度が高く、信頼性が高いことがわかった。従って、パターン③のモデル式を採用することが適切であり、より正確な予測値の算出が可能と判断した。

**4.3 適正なn分後予測値の選定** 次にパターン③の予測モデル式を活用し、過熱器出口蒸気温度について1分後、2分後、3分後の予測値を算出しグラフ化した結果を、図3 (a)、(b)、(c) に示す。なお、それぞれのグラフは、現在値と予測値との時間軸をそろえるために1分後、2分後、3分後の予測値と現在値が比較できるようにグラフを重ね合わせて示した。(例えば、現在時刻が21時00分の場合、1分後予測値は20時59分、2分後予測値は20時58分、3分後は20時57分の予測値を活用し現在値とグラフを重ね合わせて示した。)

この結果、現在値と予測値について1分後、2分後、3分後それぞれの予測値が現在値と乖離なくほぼ一致していることから、予測モデル式の精度が高く、制御値としての活用も可能であり、安定性も確保されることを確認した。また、過熱器出口蒸気温度制御において、予測

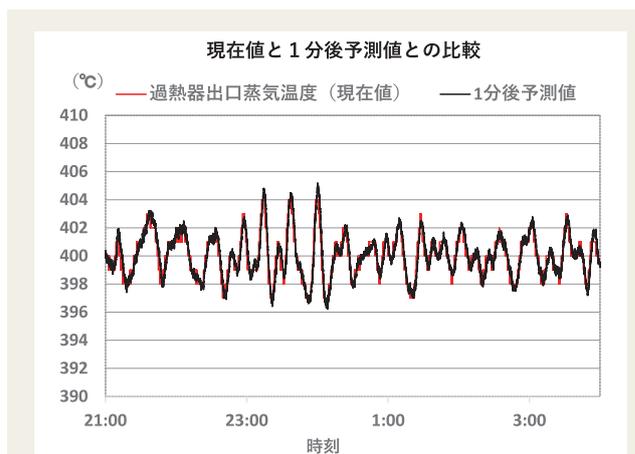


図3(a) 現在値と1分後予測値との比較

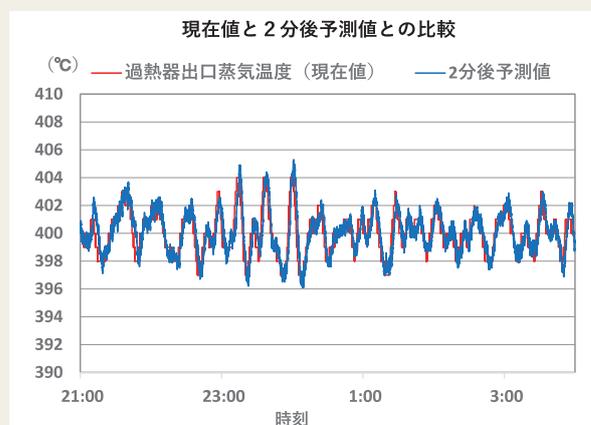


図3(b) 現在値と2分後予測値との比較

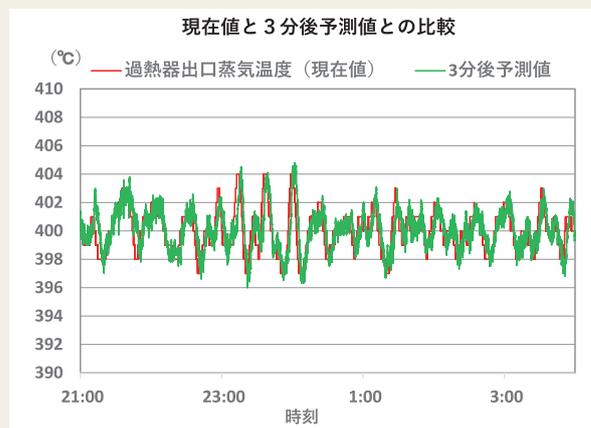


図3(c) 現在値と3分後予測値との比較

モデル式の活用により、従来のフィードバック制御（制御対象の現在の状態を測定し、その結果をもとに制御入力を調整することで目標値に近づける制御手法）主体とした制御構造よりもさらに高度で信頼性の高い制御が期待できると判断した。

次にパターン③の予測モデル式を活用し、過熱器出口蒸気温度について1分後、2分後、3分後の予測値を算出し、予測値と現在値との差がどの程度あるか確認するために標準偏差（現在値－予測値）にて比較し検証した結果を表3に示す。

表3 過熱器出口蒸気温度n分後予測値と比較結果

項目	過熱器出口蒸気温度		
	1分後	2分後	3分後
標準偏差 (現在値— 予測値)	0.52	0.84	1.11

基本的には近い未来ほど予測精度は高くなるため、1分後予測値での標準偏差が0.52と最も良いデータとなった。機器構成(検出端である温度計、操作端である注水弁の位置関係など)や従来の制御性の遅れ時間を検証し総合的に判断した結果、2分後予測データを活用することにより正確な制御が実現することができると判断した。

## 5. 実証試験の結果

過熱器出口蒸気温度について2分後予測データ導入前と導入後の結果をそれぞれ表4および図4に示す。

2分後予測データを導入した結果、過熱器出口蒸気温度の制御性が向上したことを確認した。具体的には、導入前と比較すると過熱器出口蒸気温度(現在値)について上下変動幅が抑制され現在値—設定値の標準偏差が

表4 過熱器出口蒸気温度予測モデル式結果

項目	過熱器出口蒸気温度	
	予測制御	
	導入前	導入後
標準偏差 (現在値—予測値)	3.16	1.58
395℃~405℃ (±5℃キープ率)	91.4%	100.0%

3.16(導入前)から1.58(導入後)となり、現在値と設定値400℃との差異が小さくなった。また、設定値に対する±5℃キープ率(過熱器出口蒸気温度が設定値±5℃の範囲に収まっていた時間割合)が91.4%(導入前)から100.0%(導入後)に向上し、目標値に近い温度を維持できることを確認した。

次に、重回帰分析法を活用した自動制御の評価を表5に示す。2分後予測値を活用した過熱器出口蒸気温度制御の制御性の向上により投入ごみの発熱量変動に起因する燃焼ガスと蒸気変動により生じる過熱器出口蒸気温度の変動を吸収し、燃焼の安定、タービン発電機電力量の安定を確認した。またボイラ主蒸気温度の変動幅の減少は、3<sup>rd</sup>過熱器管の腐食、減肉量の低減への効果がある。

表5 重回帰分析法を活用した自動制御の評価

項目	プロセスデータ	標準偏差	
		予測制御導入前	予測制御導入後
燃焼の安定	蒸気量偏差 (現在値—設定値)	1.17	0.88
	2秒滞留後 燃焼ガス温度	23.63	14.78
	炉出口 O <sub>2</sub> 濃度	0.69	0.47
タービン発電機電力量の安定	タービン 入口蒸気温度	1.39	1.22
	タービン発電 電力量	0.42	0.33
3 <sup>rd</sup> 過熱器管の腐食、 減肉量低減	ボイラ 3 <sup>rd</sup> 過熱器 入口排ガス温度	8.62	6.29

過熱器出口蒸気温度 (予測制御導入前と導入後の比較)

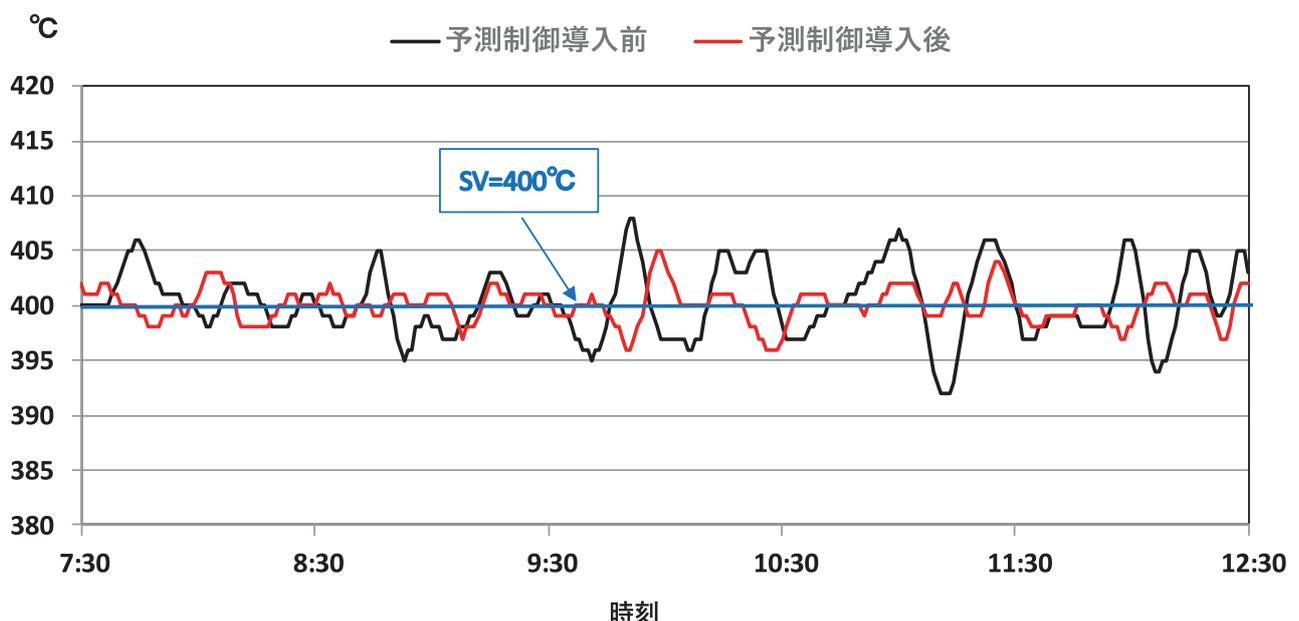


図4 予測制御導入前と予測制御後のトレンドグラフ

## 6. 今後の課題

予測モデルの精度を維持するためには、定期的なモデルの再学習や、外部要因の影響を考慮した制御方法の改善、パラメータの調整が必要である。予測モデル式による制御は、現在値と予測値が一致している場合には有効だが、乖離が生じた場合には正確な制御ができなくなるため、そのような場合には、予測値を現在値に戻すなど別の制御手法にする必要がある。従って、定期的に予測モデル式の制御性の精度を確認し、制御構造の安定性を確保する必要がある。

## 7. 結 言

本稿では、2分後予測値を活用したフィードフォワード制御を導入することにより高温高压化に対応した過熱器出口蒸気温度に対する制御性の向上を確認することができた。また、本制御の高度化により、ごみ焼却発電施設の安定化につながった。このような安定操炉の継続は設備の延命効果をもたらす。当社は、このような予測値を活用した新たな視点を自動燃焼制御に用い、総合的な制御システムの構築を図って、AIやICTを活用した自動運転による省力化・人員ミニマム化、DCS手動操作最小化に貢献する所存である。

## SDGsに貢献する技術

発電の安定化により、「目標7手ごろで信頼でき、持続可能かつ近代的なエネルギーへのアクセスを確保する」に貢献できる。

## 謝 辞

最後に、本試験において、多大なご協力をいただきました京都南部クリーンセンターの皆様にお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 新井忠幸, 佐藤拓朗, 土佐美幸ほか: 過熱器出口蒸気温度制御に重回帰分析法を活用した評価, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2022.

## 文責者

日立造船株式会社 環境事業本部  
設計統括部 電気計装制御設計部  
ソリューション・プロセス制御システムグループ  
新井忠幸  
Tel : 06-6569-0258  
Fax : 06-6569-0256  
E-mail : arai\_ta@hitachizosen.co.jp

## Stable Operation of Waste to Energy Plants by Controlling Steam Temperature at Outlet of Superheater Using Multiple Regression Analysis Method

### Abstract

Hitachi Zosen, in cooperation with Southern Kyoto City Clean Center, has developed a superheater outlet steam temperature control method utilizing multiple regression analysis to improve the stable operation of waste to energy plants.

In this project, we focused on the relationship between incineration gas and steam fluctuation caused by fluctuations in the calorific value of feed waste to establish a data-driven predictive model formula taking into account influential factors such as elapsed time, operations, and external disturbances, and applied it to steam temperature control at the outlet of the vessel. The results showed that by introducing feedforward control using the prediction value after two minutes to the multiple regression analysis method, controllability improved of the superheater outlet steam temperature in response to high temperatures and high pressures, along with the stability of the combustion state and turbine power generation amount. It also had the effect of reducing corrosion and thinning of the third superheater tube.

This will lead to the stabilization of the waste incineration power plant, and the continued stable operation of the furnace will prevent equipment damage and deterioration, and thus help prolong the plant's service life. In addition, automated operation using AI and ICT will contribute to reducing human intervention as well as minimizing manual DCS operation.

### Authors

Tadayuki Arai (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : arai\_ta@hitachizosen.co.jp)  
Takuo Sato Yuji Shiraishi Miyuki Tosa