

# 高感度センサーによる燃焼制御システム

## Combustion Control System Using by Advanced Sensor

黒田 学 基盤技術研究所 計測制御研究部 制御システムチーム 主任研究員  
土井 茂行 環境技術部 燃焼機器設計室 統括スタッフ  
島本 拓幸 基盤技術研究所 計測制御研究部 制御システムチーム  
藤井 聡 基盤技術研究所 計測制御研究部 制御システムチーム 主任研究員

Manabu Kuroda  
Shigeyuki Doi  
Hiroyuki Shimamoto  
Satoshi Fujii

ストーカ式ごみ焼却炉において、ダイオキシン抑制の観点からガス混合室温度の更なる高温安定が求められている。燃焼排ガス温度計測に従来使用している熱電対よりも応答が速い放射温度計を適用し、新たに燃焼制御系を設計した。燃焼状態の変化を迅速に検知し、適切に操作することを特徴としている。実際の工場における燃焼試験の結果、ガス混合室温度の高温安定化効果を確認した。

*For reducing dioxins emission from stoker-type incinerator, it is necessary to increase the stability of the temperature in the gas mixing chamber further. NKK has introduced the infrared pyrometer whose response speed is faster than that of thermocouple, and designed a new combustion control system. This feature is to catch the change of combustion condition rapidly and to operate actuators suitably. From the application to an incinerator in service, we have recognized this system increases stability of temperature in the gas mixing chamber.*

### 1. はじめに

近年、ごみ焼却炉から排出される有害物質、特にダイオキシン類に対する関心が高まっており、「ダイオキシン類発生防止等ガイドライン」や「ダイオキシン対策特別措置法」の施行により、排ガスのみならず主灰や飛灰も含めた、工場から排出されるすべてのダイオキシン類排出低減が求められている。

そのなかで、燃焼過程におけるダイオキシン類低減対策として、性状の異なるごみでも安定に燃焼させる、すなわち、ガス混合室の高温安定化技術が重要となっている。以前開発したハイブリッドACC（自動燃焼制御）<sup>1)</sup>では、ごみ燃焼状態変化に対して最も速く応答に現れる、ボイラ蒸発量を安定化させる方式により、ガス混合室の高温安定化を実現している。しかし、更なるダイオキシン低減要求に応えるためには、従来対処できなかった高速の燃焼状態変化に対応することで、ガス混合室を高度に高温安定化する制御システムが必要である。

その問題に対して、排ガス中CO<sub>2</sub>の熱放射エネルギーを検知する放射温度計に注目した。現在、排ガス温度の検知器は保護管付き熱電対が主流だが、保護管は熱電対の耐久性を高める反面、熱伝導による応答の遅れを生じさせる。そのため、保護管付き熱電対による燃焼状態変化の検知はボイラ蒸発量よりも遅く、制御性能の高度化を妨げている。

本研究では、放射温度計計測による高応答や耐久性の確認、および放射温度計を実炉に適用したときの燃焼制御試

験により、ガス混合室の高温安定性、ボイラ蒸発量の安定性向上に対する評価を行ったので報告する。

### 2. 放射温度計の原理と特性<sup>2)</sup>

すべての物体は、その表面から熱放射エネルギーを電磁波の形で放射している。そして、各物体の熱放射エネルギーの波長分布と各波長における強さは温度と一定の関係にある（プランクの法則）。本研究では、燃焼排ガスに多く含まれるCO<sub>2</sub>が吸収する波長帯（約4.3μm）の熱放射エネルギーの強さをバンドパスフィルターにより抽出する方式で、排ガス温度を算出する放射温度計を適用している。詳細仕様はTable 1のとおりであり、従来使用している熱電対と比較して、以下の特徴を有している。

- (1) 応答が速い。
- (2) 非接触で計測できるため、耐久性が高い。
- (3) 測定誤差がCO<sub>2</sub>濃度、温度、視路長（焼却炉の場合、炉幅に相当）に左右される。（CO<sub>2</sub>濃度が低く、温度が低いほど測定誤差が生じる。）

Table 1 Specification of infrared pyrometer

Temperature range	400 ~ 1800
Field of view	20mm(<600mm)
Device for detection	Thermopile
Spectral range	About 4.3 μm(CO <sub>2</sub> absorption)
90% response time	1 ~ 10sec (variable)
Accuracy	1% (600 ~ 1500 )

(1) の高応答性は、燃焼挙動を従来より迅速に検知できるので制御性向上に有効である。(2) の耐久性は、ランニングコスト削減に有効である。(3) の測定誤差は、温度が低くなるほど熱放射エネルギーが弱く、CO<sub>2</sub> 濃度が低いほど温度検知に必要な距離が長くなることに起因している。

Fig.1 は適用した放射温度計の測定誤差データであるが、連続式ストーカ式焼却炉のガス混合室における通常の条件（炉幅:3.2m 以上、CO<sub>2</sub> 濃度:12~15%、温度:850~950）を考慮すると、精度上問題ないと思われる。

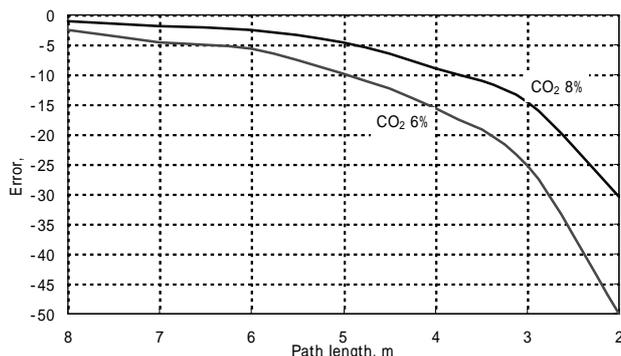


Fig.1 Thermometer error versus path length for several CO<sub>2</sub> concentrations (temperature 927 )

### 3. 実炉計測試験

実際の清掃工場（定格処理量：300t/d）にて、ガス混合室に保護管付き熱電対と放射温度計を隣接して（距離：30cm）設置し、操業データを収集した。

#### 3.1 放射温度計と保護管付き熱電対の応答比較

Fig.2 は 2 時間の実操業データ、Fig.3 はそのうちの 30 分を拡大した図である。温度の極大、極小値における時間を比較すると、放射温度計は保護管付き熱電対に比べて、120 秒前後速い。相互相関係数による評価でも 100~135 秒で極大値となっている。原因としては、保護管付き熱電対は熱伝導を利用しているため、被測定物（排ガス）の温度変化時に熱移動により熱平衡状態へ推移するのに時間を要しているからである。

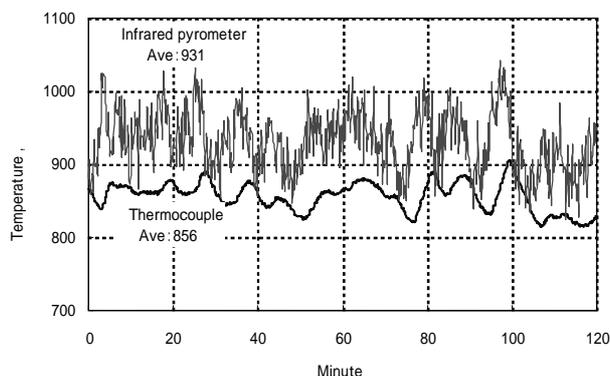


Fig.2 Relation among thermocouple and infrared pyrometer (1)

また、温度平均値を比較すると 70~80℃、放射温度計が保護管付き熱電対より高かった。原因としては、保護管付き熱電対は、排ガスに比べて温度の低い炉壁から放射熱により熱分が奪われるため、熱電対の温度は実際の排ガス温度よりも低く表示されるものと推定される。

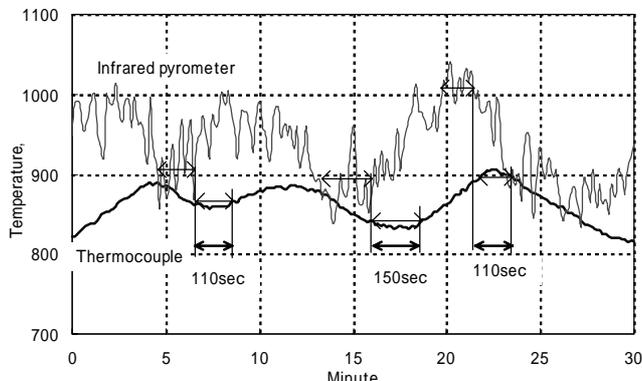


Fig.3 Relation among thermocouple and infrared pyrometer (2)

#### 3.2 放射温度計とボイラ蒸発量の応答比較

ボイラ蒸発量は、現状ではごみ燃焼状態変化に対して最も遅れが少なく、応答に現れる計測端であるため、自動燃焼制御における最も重要な指標となっている。

Fig.4 に示すように、相互の定性的な挙動には正の相関が見られるだけでなく、放射温度計の方がボイラ蒸発量に比べて 60~90 秒応答が速い。

この結果は、放射温度計の計測値を適用して従来より迅速に燃焼挙動を把握できることを示している。さらに、温度計測値に基づき、適切な操作量を与えることで、従来以上にガス混合室温度高温安定化やダイオキシン排出低減など、制御性能が向上する可能性を示している。

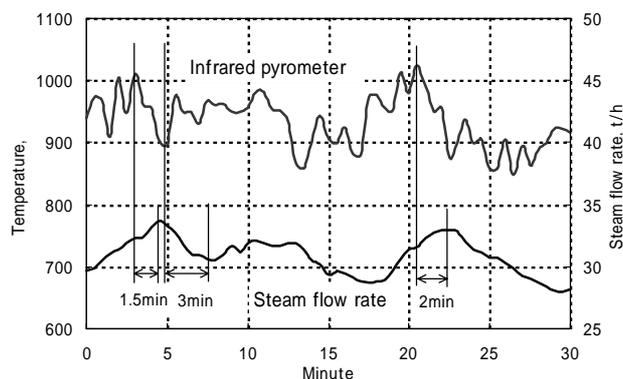


Fig.4 Relation among temperature using infrared pyrometer and steam flow rate

### 4. 燃焼制御試験

3 章で確認済みである高応答性を活かした放射温度計適用燃焼制御系を新たに設計し、計測試験と同じ清掃工場本燃焼制御系の性能確認試験を実施した。

4.1 制御系の構成

従来の燃焼制御方法<sup>1)</sup>では Fig.5(a)に示すように、長期燃焼安定を目的として、炉内燃焼モデルに基づき、燃焼負荷やごみ質を入力とした基準値演算 Fr を実施する。CO や NOx の短期的な燃焼変動に対しては、主にボイラ蒸発量を指標にしたファジィ制御 Fc1 により補正量を算出、基準値へ積算して操作指令値としている。

放射温度計の計測値を適用するメリットは、短期的な燃焼変動に対して、従来指標であるボイラ蒸発量よりも迅速に検知できることである。そのため、以下の2種類の放射温度計適用制御系を設計し、燃焼空気量、冷却空気量、乾燥・燃焼火格子速度の操作端へ適用した。

一つ目は Fig.5(b)に示すように、従来制御系に放射温度計の温度差分値を入力としたファジィ補正 Fc2 を追加する構成である。燃焼状態変化を温度の上昇・下降という定性的な傾向より迅速に検知、対処することで、制御性能向上を狙う。

温度計測値に対しては、高応答性を維持しながらノイズの少ない信号を抽出するために、一次遅れフィルターを設置した。また、温度差分の間隔についても調整を実施した。

二つ目は Fig.5(c)に示すように、従来のボイラ蒸発量に基づく補正 Fc1 に代えて、放射温度計によるガス混合室温度基準値に基づくファジィ補正 Fc3 を適用し、前述の放射温度計の温度差分値を入力としたファジィ補正 Fc2 を追加する構成である。ファジィ補正 Fc3 のガス混合室温度基準値は、焼却負荷、ごみの発熱量、ガス混合室温度、ボイラ蒸発量より所定時間ごとに算出、更新される。直接温度を追従させる方式によって、ガス混合室温度の高度安定化を狙う。

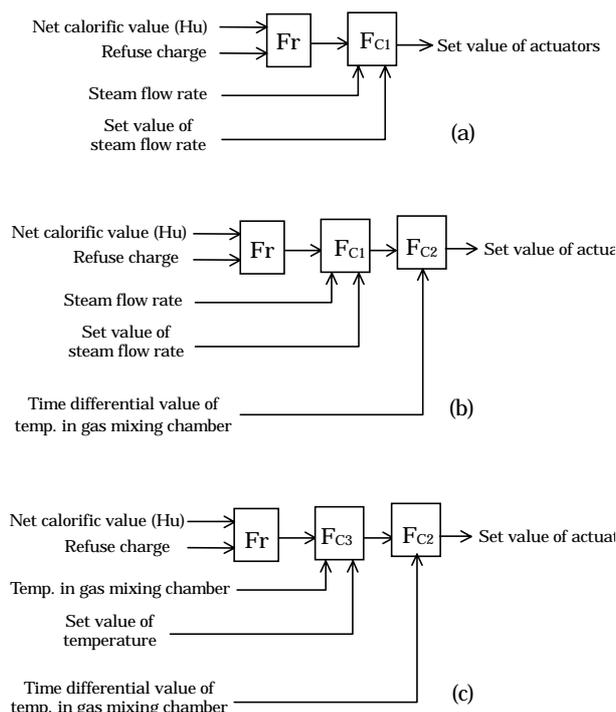


Fig.5 Block diagram of controller

4.2 制御試験 1 (温度差分補正)

従来の制御系 ( Fig.5(a) ), および放射温度計による温度差分補正を追加した制御系 ( Fig.5(b) ), それぞれの4時間操業データを Fig.6 と Fig.7 に、炉内燃焼の安定度に関する主要項目の比較を Table 2 に示す。両者の比較より、次の放射温度計による温度差分補正による効果が確認できた。

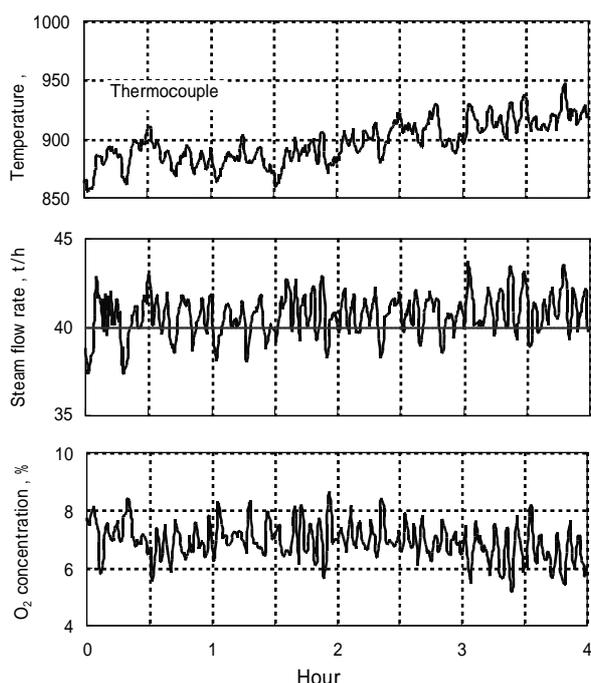


Fig.6 Experimental result with conventional ACC

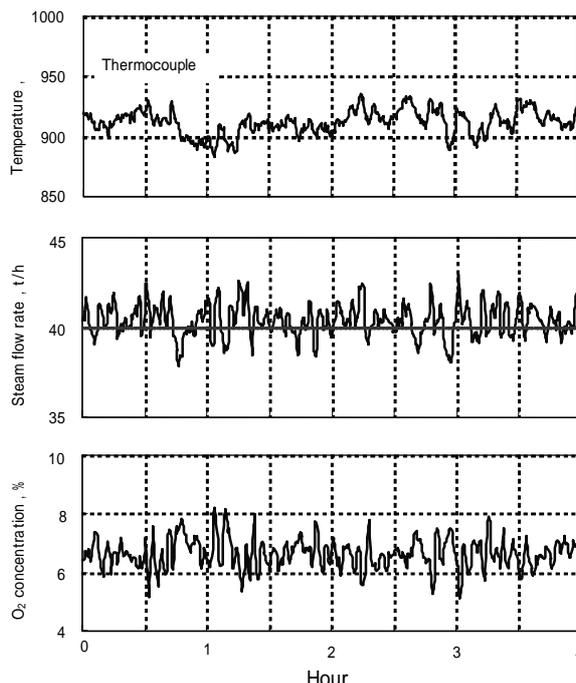


Fig.7 Experimental result with ACC using infrared pyrometer

- (1) ガス混合室温度は平均値レベルで従来通りの高温を維持しながら、ばらつき(標準偏差)が抑制されている。
- (2) ボイラ蒸発量は、設定値へ精度良く追従して行く。ごみ質の変化による蒸発量の落ち込みは見られない。
- (3) O<sub>2</sub> 濃度についても、ばらつきが抑制されている。

放射温度計で従来より速く、燃焼状態の変化を検知し、適切に対処することで、焼却炉内の更なる安定燃焼が達成されている。なお、完全燃焼の指標となる CO 濃度は、両制御方法とも低濃度で安定している。

Table 2 Comparison between conventional ACC and ACC using infrared pyrometer

	Conventional ACC (Fig.5(a))	ACC using infrared pyrometer (Fig.5(b))
Standard deviation of temperature,	17.5	14.5
Stability of steam flow rate, %	3.1	2.5
Standard deviation of O <sub>2</sub> concentration, %	0.75	0.59

- ・ Temperature : using by thermocouple
- ・ Set value of steam flow rate : 40t/h
- ・ Stability = (standard deviation)/(average)

#### 4.3 制御試験 2 (温度基準値補正)

ボイラ蒸発量による補正制御 (Fig.5(b)) に代わり、放射温度計による温度基準値に基づく補正制御 (Fig.5(c)) を適用し、制御性能を比較した。

Table 3 に示すとおり、ボイラ蒸発量より応答が速い放射温度計計測値を入力として、温度を直接基準値に追従させる制御方式は、蒸発量の安定度を維持しながら、ガス混合室温度や O<sub>2</sub> 濃度を一層安定化させている。そのため、燃焼過程におけるダイオキシン発生抑制に効果的な制御方式と考えられる。

Table 3 Comparison between ACC using steam flow rate based controller and ACC using temperature based controller

	ACC using steam flow rate based controller (Fig.5(b))	ACC using temperature based controller (Fig.5(c))
Standard deviation of temperature,	13.4	11.4
Stability of steam flow rate, %	2.71	2.73
Standard deviation of O <sub>2</sub> concentration, %	0.57	0.53

- ・ Temperature : using by thermocouple
- ・ Set value of steam flow rate : 36t/h

#### 4.4 ガス混合室ダイオキシン濃度推定

今回の燃焼試験では、実際にダイオキシンを計測していないため、定格処理量、および操業条件(負荷: 定格、各計測のガス混合室平均温度: 872 ~ 904 )が等しい他工場

偏差より得られる一次近似を推定関数とみなして、4.2 節におけるガス混合室温度標準偏差 (Table 2 参照) より、ボイラ出口におけるダイオキシン濃度を推定した。

Fig.8 に示すとおり、従来 ACC における推定値は 1.01ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>、放射温度計を適用した燃焼制御系における推定値は 0.76ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> であり、燃焼過程におけるダイオキシン抑制効果が期待できる。

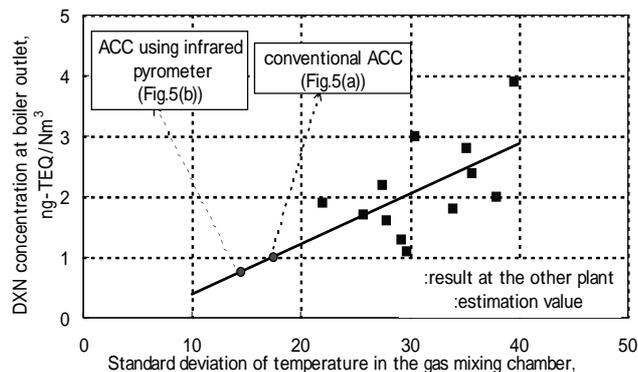


Fig.8 Estimation of DXN emission

#### 5. おわりに

ガス混合室に放射温度計を適用した、計測および燃焼制御試験によって、以下の項目を確認した。

- (1) 従来の保護管付き熱電対に比べ 120 秒前後、ボイラ蒸気量に対しても 60 ~ 90 秒程度、応答が速い。
- (2) 放射温度計を適用した燃焼制御系は、従来の制御系に比べて、ガス混合室温度のみならずボイラ蒸発量、O<sub>2</sub> 濃度の安定維持に有効である。
- (3) 燃焼過程に発生するダイオキシン濃度の低減が期待できる。

今後の課題としては、ごみの発熱量推定計算に、従来使用しているボイラ蒸発量に代わり、放射温度計によるガス混合室温度計測値を使用することにより、放射温度計を適用した燃焼制御システムのブラッシュアップを図る。加えて、実際のダイオキシン計測により、放射温度計を適用した燃焼制御システムの効果を確認する。

#### 参考文献

- 1) 藤井聡ほか. “ストーカ式ごみ焼却炉のハイブリッド燃焼制御システム”. 日本機械学会論文集 C 編. pp.1200-1207(1997).
- 2) 松山裕. “実用温度測定”. 財団法人省エネルギーセンター. 1998.

<問い合わせ先>

基盤技術研究所 計測制御研究部  
 Tel. 044 (322) 6435 黒田 学  
 E-mail address : mkuroda@lab.keihin.nkk.co.jp  
 環境技術部 燃焼機器設計室  
 Tel. 045 (505) 7681 土井 茂行  
 E-mail address : dois@eng.tsurumi.nkk.co.jp