

流動床ごみ焼却炉の燃焼室内温度分布計測

Temperature Distribution Measurement for Fluidized Bed Refuse Incineration Plant

横山 賢一*、左近 健一*、加藤 定史*、稲井 宏之*、香ノ木 順*
KENICHI YOKOYAMA KENICHI SAKON SADAFUMI KATO HIROYUKI INAI JUN KONOKI

宮本 裕一**、林 正人**、小谷野 薫**、片岡 幹彦**
YUICHI MIYAMOTO MASATO HAYASHI KAORU KOYANO MIKHIKO KATAOKA

*川崎重工業(株) 環境装置第一事業部

／〒650-8680 神戸市中央区東川崎町1-1-3 (神戸クリスタルタワー)

Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Environmental Control Plant Division 1

/Kobe Crystal Tower, 1-1-3 Higashikawasaki-cho, Chuo-ku, Kobe, 650-8680, Japan

**川崎重工業(株) 電子・制御技術開発センター／〒673-8666 明石市川崎町1-1 (明石工場)

Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Electronic & Control Technology Development Center

/1-1 Kawasaki-cho, Akashi, 673-8666, Japan

Abstract

The objective of this study is to measure a temperature distribution in a furnace of a fluidized bed refuse incineration plant and to calculate a residence time of combustion gas which is more than 850°C in real time. It is confirmed that a residence time is more than 2 seconds in an actual plant by a result of the calculation. That is to say, high temperature and long residence time of gas are kept. In that case, CO concentration in combustion gas which is one of substitution indicators of dioxin is reduced. A multi-sheath thermocouple is used to measure a temperature distribution. A vertical temperature distribution in a secondary-combustion area of a furnace is measured along flow of gas. Furthermore, a temperature distribution model is made on a result of a measurement and characteristics of a temperature distribution under stable combustion are grasped. The temperature distribution model expresses gas temperature in position in a furnace and air ratio. Finally, a combustion control method is proposed to keep high temperature and long residence time of gas and to realize the temperature distribution under stable combustion using the temperature distribution model.

Key words : refuse incineration plant, temperature distribution, CO reduction, residence time of gas, combustion control

1 はじめに

近年、ごみ焼却炉のダイオキシン排出が社会的問題となり、ごみ焼却炉の低公害性向上への関心、要求が高ま

っている。1997年の厚生省の指針「ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン—ダイオキシン類削減プログラム—」では、ダイオキシン類排出濃度削減のための様々な対策が示されている。その一つにごみの安

定燃焼の実現があり、燃焼ガス温度850℃以上でガス滞留時間2秒以上が、ダイオキシン類を熱分解するための安定燃焼の指標となっている¹⁾。したがって、燃焼制御に関しても安定燃焼の実現を目的とした制御系設計が求められている。

筆者らはごみ焼却炉を対象として動特性解析や燃焼制御系の設計を実施し、実プラントに適用してきた^{2),3)}。

本研究では、流動床ごみ焼却炉を対象として燃焼室内温度分布を計測し、上記ガス滞留時間2秒以上の確保が実炉にて実現されており、その場合にダイオキシン代替指標の一つであり上記ガイドラインでも排出抑制が要求されている排ガス中のCO濃度が抑制されていることを報告する。さらに、燃焼室内温度分布計測結果に基づき燃焼室内温度分布モデルを作成し、それをを用いた排ガス中のCO濃度抑制のための燃焼制御方法を提案する。

2 システム構成

2.1 流動床ごみ焼却炉の概要

流動床ごみ焼却炉の概要を Fig. 1 に示す。予熱空気によって激しく混合・攪拌している加熱砂粒層に投入されたごみは、層内に巻き込まれ、その熱によって短時間に燃焼し、さらにフリーボード部で燃焼を完結する。また不燃物は層内を沈降し、焼却残さとして砂粒と共に抜き出される。流動床ごみ焼却炉の優れた特性として均一燃焼かつ燃焼完結時間が短いことがあげられ、難燃物処理や起動停止が短時間で可能などの特徴を有する。そのため、都市ごみをはじめとして、各種産業廃棄物、汚泥、プラスチック燃焼などの各方面で採用されている。

流動床ごみ焼却炉の炉内は Fig. 2 に示すように流動層燃焼部とフリーボード燃焼部からなり、さらにフリーボード燃焼部は2次空気が供給される上流側燃焼域と、下流側燃焼域（再燃焼域）からなる。上流側燃焼域と下流側燃焼域の間にはガスの混合を考慮した炉のくびれと、2次空気の大部分が供給されるノズルとがある。再燃焼域はガス混合用のくびれ位置から燃焼室出口までであり、この範囲でガス滞留時間2秒以上となることが上記ガイドラインにて要求されている。従って燃焼室内の温度計測は、ごみ発熱量変動に対しても燃焼ガス温度850℃以上かつガス滞留時間2秒以上であることを確認できるように、再燃焼域においてガスの流れに沿って複数個所で行うことが望ましいとされている。

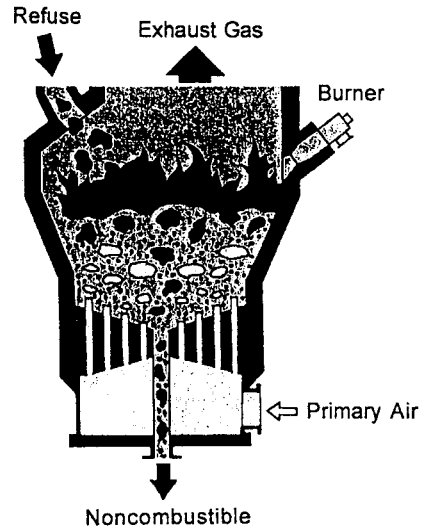


Fig. 1 Concept of Fluidized Bed Refuse Incineration Plant

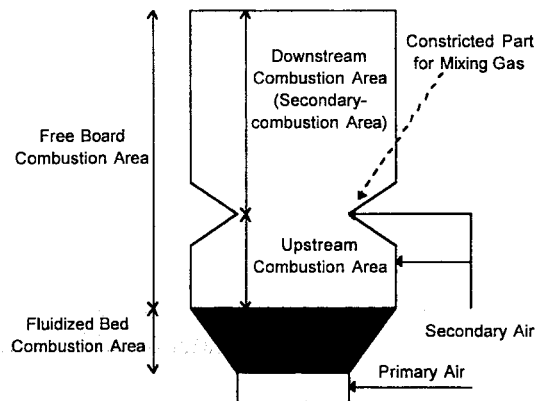


Fig. 2 Structure of Furnace

2.2 温度分布計測システムの概要

燃焼室内温度分布計測には多点式シース熱電対を用いた。多点式シース熱電対は長さの異なる複数のシース熱電対束であり、1つの温度計測口から挿入できる。シースの長さ、本数を選ぶことにより任意の複数点の温度計測が可能である。計測に用いたシース熱電対はKタイプシース熱電対(シース合金：ニッケルクロム合金(アルミ含)、シース外径：3.2mm)である。また、燃焼ガ

スによるシースの腐食を考慮し、設置期間を定めて計測を実施した⁴⁾。

本研究の温度分布計測はFig. 3に示すように多点式シース熱電対束を流動床ごみ焼却炉の炉頂部から垂直に炉内に挿入して、燃焼室内の垂直温度分布を計測した。熱電対束を挿入する温度計測口位置は炉の中心より約1mの位置とした。計測に用いた多点式シース熱電対束はシース熱電対数本からなり燃焼室内の数点のガス温度を計測した。数点のガス温度計測位置はガス混合用のくびれの位置を基準にすると、そこから炉頂（ガス下流側）に向かっての距離で約1m、2m、3m、4m、5m、6m、7m、8m、……である。このように、ガス混合用のくびれ位置より燃焼室出口までの再燃焼域のガス温度分布を、ガスの流れに沿って数箇所計測した。Fig. 4に、ある計測時間でのガス温度分布計測結果例を示す。

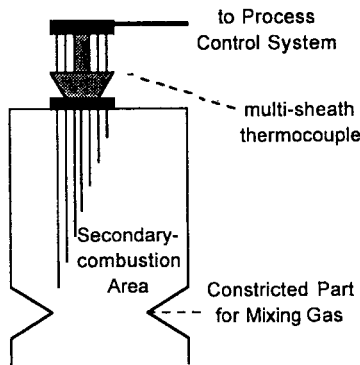


Fig. 3 Temperature Distribution Measurement System

くびれ位置に近い方がガス温度が高い傾向を持って温度が推移していることがわかる。計測結果は空気流量等の他のプロセス量と共に焼却炉の監視制御装置に入力しデータ解析を実施した。

以降で述べるガス滞留時間、温度分布モデル等の検討のために、本研究ではガスの流れ方向である炉内垂直方向のガス温度分布を計測した。また炉内水平方向の温度分布に関しては、くびれ位置にてガスが十分混合しており、垂直方向と比較すれば温度差の小さい温度分布であると考えて以降の検討を実施した。

- 計測条件：都市ごみ焼却運転時に計測、監視制御装置にてデータ収集
- 焼却炉：流動床ごみ焼却炉（都市ごみ）、焼却量26t/16h、ごみ低位発熱量1600kcal/kg、炉形状は円柱状で直径約4m、高さ約15m

3 ガス滞留時間

3.1 温度分布からガス滞留時間の導出

計測した数点の燃焼室内温度とその他の計測可能なプロセス量から、燃焼室内の850℃以上のガス滞留時間を以下の(1)~(7)式から導出する。導出に用いるガス中の酸素濃度とガス温度はそれぞれ、燃焼室出口酸素濃度と燃焼室出口ガス温度で代表する。

$$GT = GA1 + GA2 \quad \dots(1)$$

$$\lambda = 21 / (21 - O2) \quad \dots(2)$$

$$GG = (GT * ((1/\lambda) * (V0/A0) + (\lambda - 1) / \lambda) + 22.4 / 18 * GSP) * (273 + TG) / 273 \quad \dots(3)$$

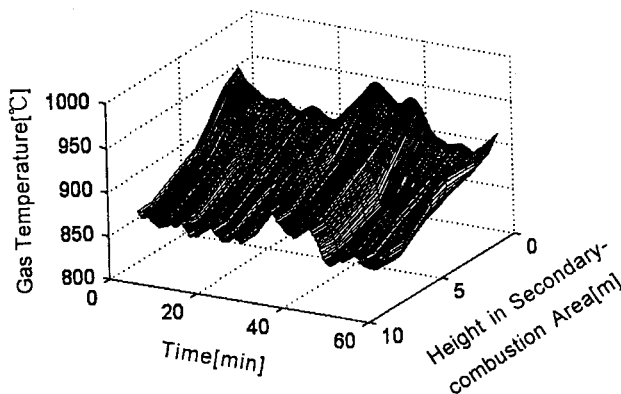


Fig. 4 Example of Transition of Temperature Distribution

$$VG = GG / SF \quad \dots(4)$$

$$LS = fT (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, \dots) \quad \dots(5)$$

$$TM = LS / VG \quad \dots(6)$$

(5)式で示した $fT()$ は(7)式から導出する。(7)式の LS_i ($i=1, 2, 3\dots$) は Fig. 5 に示すように各シース熱電対間の温度を内挿、外挿し、計測点周囲で850℃以上とみなす範囲を定めて導出する。

$$LS = LS1 + LS2 + LS3 + LS4 + LS5 + \dots(7)$$

ガス滞留時間導出に用いたプロセス量の記号は以下の通りである。

GT : 総空気流量 [Nm³/s]

GA1 : 流動用空気流量 [Nm³/s]

GA2 : 2次空気流量 [Nm³/s]

λ : 空気比 [-]

O2 : 燃焼室出口酸素濃度 [%]

GG : 発生ガス流量 [m³/s]

V0 : 理論ガス量 [Nm³/kg]

(導出式としてRosinの式等を用いる)

A0 : 理論空気量 [Nm³/kg]

(導出式としてRosinの式等を用いる)

TG : 燃焼室出口ガス温度 [℃]

GSP : 流動層内注水流量 [kg/s]

VG : ガス流速 [m/s]

SF : 燃焼室水平方向断面積 [m²]

LS : 850℃以上ガス温度域の垂直方向長さ [m]

fT : LS導出用関数 [-]

TM : 850℃以上ガス滞留時間 [s]

TS_i : 燃焼室内温度 i [℃] ($i=1, 2, 3\dots$)

LS_i : 計測点の周囲で850℃とみなす範囲 [m]

($i=1, 2, 3\dots$)

本計測を実施した流動床ごみ焼却炉では上記のガス滞留時間導出を監視制御装置内でオンライン計算しており、運転中にガス滞留時間をリアルタイムで確認可能である。

3.2 ガス滞留時間と排ガス特性

Fig. 6 は温度分布計測を実施した実炉での定常運転時のデータの一例である。前節で述べた方法で求めた850℃以上のガス滞留時間TM、排ガス中のCO濃度瞬時値(O₂12%換算)CO、850℃以上ガス温度域長さLS、ガス流速VG、ガス温度TS1のある計測時間での時系列データを示す。850℃以上のガス滞留時間2秒以上が安定して確保されていることが確認できる。また、その

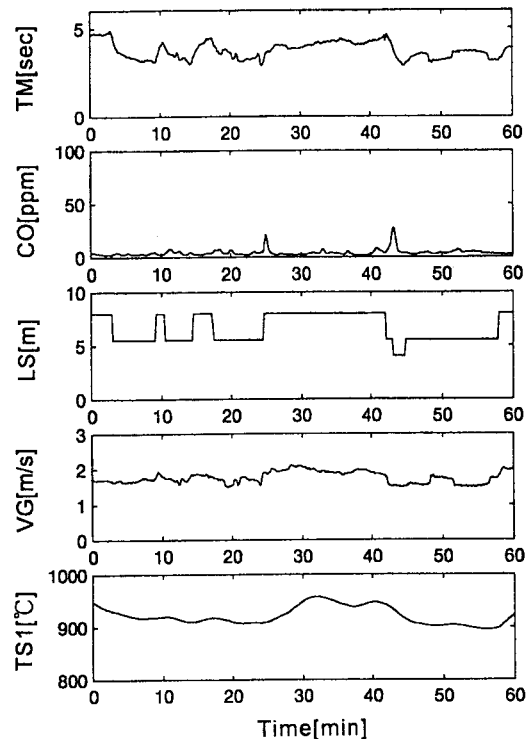


Fig. 6 Example of Plant Data

場合に排ガス中のCO濃度が抑制された安定した燃焼状態が継続していることも併せて確認できる。このように、実炉において、高い燃焼温度、長い滞留時間および完全燃焼が達成されている。この安定燃焼状態が継続するよう燃焼制御を実施することが必要である。

4 燃焼室内温度分布モデル

温度分布計測結果を用いて、排ガス中のCO濃度が抑制された安定燃焼時の温度分布の特徴を考察する。Fig. 7 は安定燃焼時の、ガス混合用くびれ位置から燃焼室出口までの各シース熱電対の温度特性を整理した結果の一例である。燃焼室内温度が上流側(くびれ位置付近)で約900~950℃の範囲にあり、下流側(燃焼室出口付近)で約840~890℃の範囲にある。このように下流側に行くにしたがってガス温度が下がることがわかる。

Fig. 7 のデータを用いて、燃焼室内温度分布モデルを作成する。温度分布モデルは、ガス混合用くびれ位置から燃焼室出口までの再燃焼域の範囲について作成する。燃焼室内のガス温度を、ガス混合用くびれ位置からの高

さ、くびれ位置でのガス温度、空気比の関数で表すものとする。

Fig. 7のデータを空気比によって数種類に分け、各空気比での温度の平均値を計算する。空気比毎に、各計測点での温度平均値から最小二乗法により燃焼室内温度分布を多項式近似する。各計測点での空気比毎の平均値および多項式近似したグラフをFig. 8に示す。グラフより空気比によってガス温度の変化傾向に違いがあることがわかる。

近似式を用いて燃焼室内温度分布モデルは(8)式で表

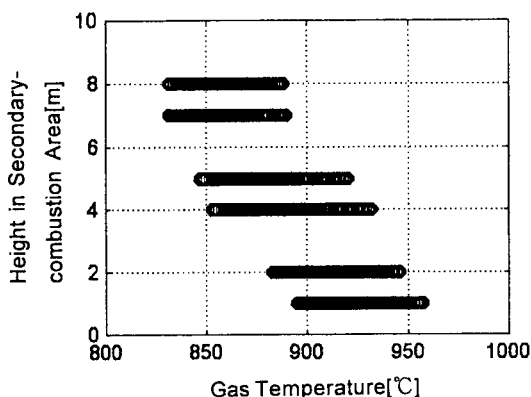


Fig. 7 Characteristic of Temperature Distribution

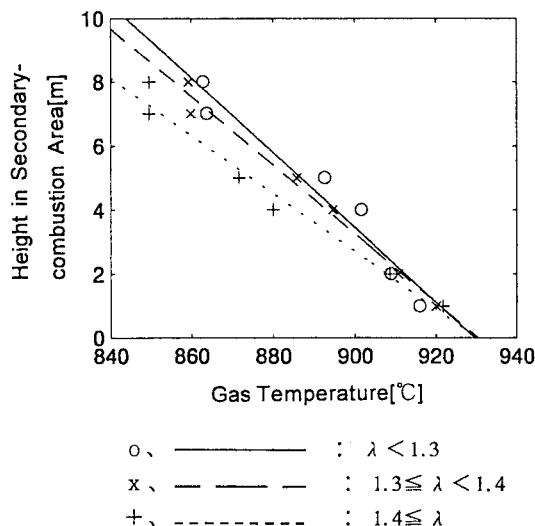


Fig. 8 Temperature Distribution Model

され、係数は空気比によって変化する。

• 燃焼室内温度分布モデル

$$T(L, \lambda, T_0) = \sum_{i=1}^n (A_i(\lambda) \times L^i) + T_0 \quad \dots(8)$$

T : 燃焼室内ガス温度 [°C]

L : ガス混合用くびれ位置からの高さ [m]

T₀ : ガス混合用くびれ位置でのガス温度 [°C]

A_i : 係数

(8)式の温度分布モデルにより、ガス混合用くびれ位置付近で発生した高温燃焼ガスが、燃焼室下流側に行くにしたがってどのように温度変化するかが、くびれ位置からの高さ空気比から把握できる。

5 燃焼室内温度分布制御

5.1 炉出口ガス温度設定値の導出

4章で作成した燃焼室内温度分布モデルを用いて、安定燃焼時の燃焼室内温度分布を実現するための燃焼制御手法を下記に示す。

安定燃焼には2秒以上の長いガス滞留時間が必要である。そこで、ガスが炉内で所定の時間滞留するのに必要な炉内の距離を(4)式で求めたガス流速VGを用いて(9)式から導出する。

$$L A = V G * T M A \quad \dots(9)$$

LA : ガスが炉内で所定の時間滞留するのに必要な炉内の距離 [m]

TMA : 所定のガス滞留時間 [s]

導出に用いるTMAについては、上記ガイドラインで示された2秒以上の値から適当な値を設定する。LAはVGと同様にリアルタイムで計算される。

上記で導出したLAより、ガス混合用くびれ位置を基準の位置としてそこからガスの流れの下流側に向かって距離LAの位置を炉内目標位置とする。ガス混合用くびれ位置から炉内目標位置までの範囲でガスが2秒以上滞留するため、この範囲でガス温度を850°C以上の高温とすることが安定燃焼に必要なとなる。

ごみ焼却炉では、炉出口ガス温度すなわち再燃焼室温度制御用の熱電対を設置し炉出口ガス温度制御を行っている。炉出口ガス温度制御の設定値を温度分布モデルとLAを用いて以下の通り導出する。

(2)式で求めた空気比λを用いて4章で作成した温度分布モデルより、空気比λに対する炉内ガス温度分布を

導出する。導出した温度分布モデルを用いて、炉内目標位置でのガス温度と制御用熱電対位置でのガス温度の差を(10)式から導出する。

$$TD = TC - TB \quad \dots(10)$$

TB：温度分布モデルを用いて導出した炉内目標位置でのガス温度 [°C]

TC：温度分布モデルを用いて導出した制御用熱電対位置でのガス温度 [°C]

TD：温度分布モデルを用いて導出した炉内目標位置と制御用熱電対位置とのガス温度差 [°C]

ガス混合用くびれ位置から炉内目標位置の範囲でガス温度が850°C以上となるためには、その範囲内で最も温度が低くなる炉内目標位置のガス温度が850°C以上である必要がある。そのため、炉内目標位置のガス温度を850°C以上とするために必要な炉出口ガス温度制御用熱電対位置でのガス温度を制御用の設定値とすればよい。

そこで、TDを用いて炉出口ガス温度設定値を(11)式から導出する。

$$TS = TF + TD \quad \dots(11)$$

TS：炉出口ガス温度制御設定用演算値 [°C]

TF：所定のガス温度 [°C]

TFは炉内でのごみの完全燃焼、安定燃焼に必要なと考えられる温度であり、上記ガイドラインで示された850°C以上の値から適当な値を選ぶ。(9)~(11)式で示した炉出口ガス温度設定値導出の方法をFig. 9に示す。

制御用熱電対位置でのガス温度をTSとするようにごみ供給量、空気流量等を操作することにより、距離LAの範囲でガス温度がTF以上となると考えられる。従って、本手法のガス温度設定値を用いることにより所定のガス温度TF以上で所定のガス滞留時間TMA以上が確

保でき、安定燃焼が達成できると考えられる。

今回提案する燃焼制御手法のデータ処理フローをFig. 10に示す。燃焼室出口酸素濃度、空気流量等のプロセス量よりガス流量、流速、ガス滞留時間が2秒以上となる再燃焼域内の炉内目標位置を求め、空気比を入力として求めた温度分布モデルを用いて燃焼室ガス温度の設定値を導出している。ただし、本制御手法は高いガス温度と長いガス滞留時間を確保することが目的であり、実際に制御に用いる場合には導出されたガス温度設定値が基準となるガス温度より高い場合のみ設定値を変更する。また、ガス流量の急変等により温度設定値が基準となるガス温度から大きくはずれた場合には、その対応として、ガス流速を制御量として空気流量の設定値を導出する制御に切り換える等の手法が考えられる。

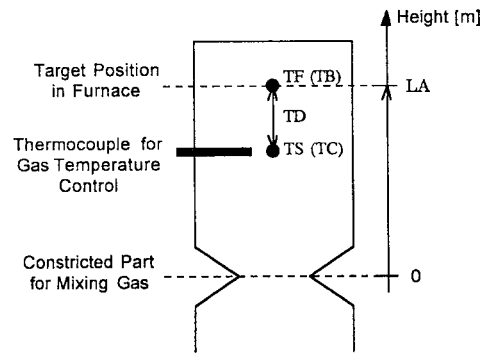


Fig. 9 Calculation of Set Value of Gas Temperature

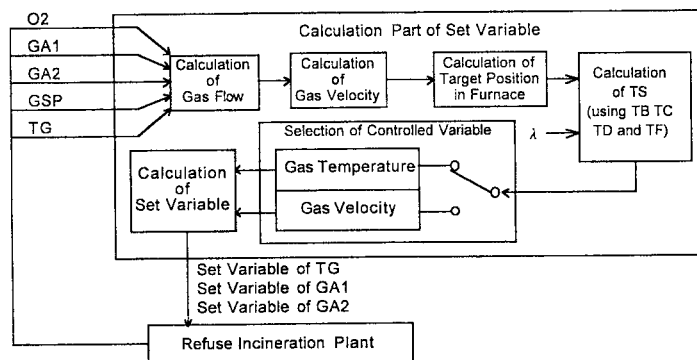


Fig. 10 Flw Diagram of Combustion Control

5.2 実機データによる検証

本制御手法を用いた場合について、実機データを用いて検証する。検証には上記温度分布計測を実施したごみ焼却炉のデータを用いた。Fig. 11に本手法の検証に用いた空気比の実機データ入、本手法を用いて求めた炉出口ガス温度制御用熱電対位置でのガス温度設定用演算値TS、実際に制御に用いるためガス温度設定用演算値TSにフィルタ、ローリミッタをかけて求めた炉出口ガス

温度設定値TSCの時系列データ、および炉出口ガス温度(制御用熱電対の計測値)の実機データTGを示す。Fig. 11より、導出された炉出口ガス温度設定値が適切に出力され、炉出口ガス温度の安定範囲が保持でき、ガス滞留時間の確保が可能となっていることがわかる。従って、本制御手法を用いて炉出口ガス温度設定値を導出しガス温度制御を行うことにより安定した燃焼制御が実施できる。

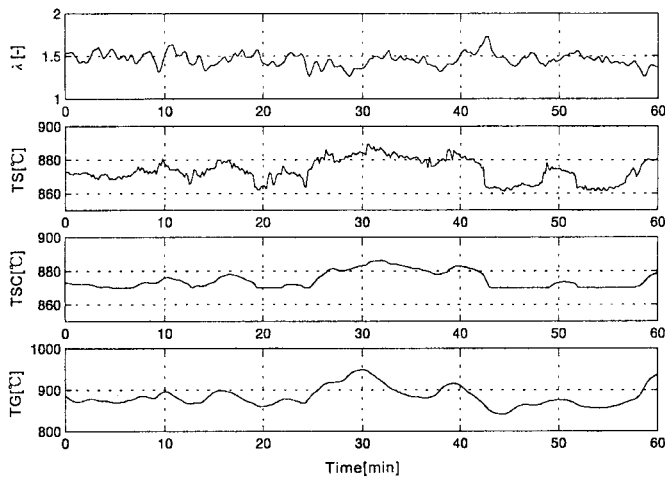


Fig. 11 Verification of Combustion Control Method

6 おわりに

流動床ごみ焼却炉を対象に燃焼室内温度分布を多点式シース熱電対を用いて計測し、安定燃焼の指標である850℃以上のガス滞留時間2秒以上が実炉にて確保されており、またその場合に排ガス中のCO濃度が抑制できることを確認した。

また、燃焼室内温度分布計測結果を基に燃焼室内温度分布モデルを作成し、安定燃焼時の温度分布を実現し高いガス温度、長いガス滞留時間を実現するための燃焼制御方法として、炉出口ガス温度設定値の導出手法を提案した。

今後、本研究で述べた温度分布計測、モデル化手法の各種ごみ焼却炉への適用、本研究で提案した燃焼制御手法の実炉への適用を実施し、燃焼性能向上、安定運転、低公害運転の一層の強化を図っていく。

参考文献

- 1) 都市清掃編集委員会：新ガイドラインの概要、都市清掃、Vol.50、No.218、214/229、(1997)
- 2) 宮本、黒崎、藤山、南部：流動床ごみ焼却炉の動特性解析と燃焼制御、計測自動制御学会論文集、Vol.32、No.2、215/223、(1996)
- 3) 宮本、林、宮崎、藤山、南部、豊嶋：流動床ごみ焼却炉の動特性解析とパラメータ推定、第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集、881/882、(1993)
- 4) 計測自動制御学会：温度計測基礎講座テキスト、(1998)