

都市ごみ焼却炉の適応バンド制御システム

前田知幸*・中山万希志*・下梨 孝**・河端博昭***

*技術開発本部・生産技術研究所 **都市環境事業部・計電装技術室 ***都市環境事業部・環境エンジニアリングセンター

An Adaptive Band Control System for Fluidized Bed Incinerators

Tomoyuki Maeda・Makishi Nakayama・Takashi Shimonashi・Hiroaki Kawabata

A new automatic combustion control system for fluidized bed incinerators was developed. This system consists of an adaptive control block, which estimates a plant transfer function model to calculate the proper control-gain due to refuse calories, and a second band function block that includes a dead-zone filter to decrease the frequency of refuse sticking. Through actual experiments, it was confirmed that this new control system reduces temperature deviations and decreases the CO levels in the combustion exhaust gas.

まえがき = 近年、都市ごみ焼却炉は未利用エネルギーの有効活用の観点から、単にごみを焼却する施設にとどまらず、ボイラを併設することにより焼却廃熱から熱を回収し、その発生蒸気により発電・売電をおこなうエネルギー回収施設として位置づけられてきている。それとともに、環境保全の立場からダイオキシン類の新ガイドラインに代表されるように、有害物質の排出規制はさらに厳しくなっている。このような規制に対応するために、当社は燃焼技術・排ガス処理技術の確立に取り組んでおり、その一つに燃焼制御があげられる。燃焼制御の目的は、有害物質の発生を抑制するために、燃焼の不安定化を抑制し安定燃焼を実現することである。

いっぽう、当社のごみ焼却炉は流動床式焼却炉であり、燃焼速度が比較的速く、どんな廃棄物でも燃焼できる反面、供給ごみ量あるいはごみ質の変動が瞬時に燃焼状態の変化として現れやすい。そのため、燃焼制御をおこなうには、それらの変動に即座に対応することが必要となる。

そこで炉頂温度の変動抑制により安定燃焼が達成できると考え、ごみ質の変動をオンライン推定して、制御ゲインを修正する適応制御の手法¹⁾と、ロータでの供給ごみの噛み込みを低減するバンド機能とを組合わせた、適応バンド制御システムの開発をおこなった。本稿では、システムの構成とその実プラント適用結果について報告する。

1 流動床式ごみ焼却炉

流動床式ごみ焼却炉のシステムフローを第1図に示す。ごみ焼却のプロセスについて説明すると、ごみピットからクレーンによりホッパ内に投入されたごみは、破袋刃付きロータと固定刃を備えたアンビル間を破碎しながら通過し、振動コンベア内で振動によりごみ供給量の偏りを抑えられ、炉内へ投入される。投入されたごみは、炉下部より吹き込まれる1次空気によって流動化している砂層部分に取込まれ、短時間の間に乾燥、ガス化、燃焼される。一部発生した未燃ガスは炉上部のフリーボード部へ上昇し、炉側壁部より吹き込まれる2次空気と

混合することにより完全燃焼する。完全燃焼した排ガスは、ガス冷却塔で減温され、バグフィルタで粉塵や有害物質などを除去された後、煙突から大気へと排出される。

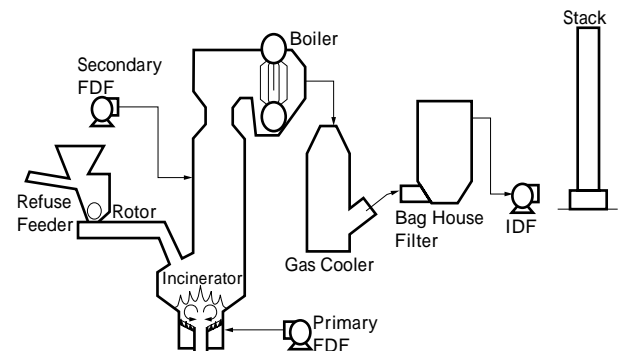
この際、排ガス中の有害物質抑制の観点から、焼却炉での燃焼状態を安定化することが操業上非常に重要であり、そのための燃焼制御手法とその手法を実現する自動制御システムが強く望まれている。

2 適応バンド制御

安定燃焼を目的とする燃焼制御を実現するには、供給ごみに外乱要因が存在することが大きな問題となる。問題点は大別して、ごみ質に関するものとごみ供給量に関するものにわけることができる。

ごみ質に関しては、ごみの発熱量が変化することが問題である。ごみのもつ発熱量が常に一定であれば、炉内燃焼を安定に保つことは容易であるが、都市ごみには様々な発熱量のごみが混在しており、供給熱量を一定に保つのは容易でない。したがって、制御においては刻一刻変化のごみ質の変化を推定し対処する必要がある。

いっぽう、ごみ供給量に関してはごみ供給が指令値どおりにおこなわれない場合があることが問題である。ごみ供給量を増減させたい場合は、ロータの回転数を増減することによって操作する。しかし、ロータの回転数を大きく変化させるとロータにごみが噛み込まれて、一時的にごみが供給されない場合が生じる。その際には、瞬時に燃焼状態が悪化するため、安定燃焼を維持すること



第1図 流動床式都市ごみ焼却炉
Fig. 1 Schematic diagram of fluidized-bed incinerator

が困難となる。そこで、ロータ回転数が大きく変化することを抑制した制御系を構成する必要がある。

以上のような観点から、以下ではごみ質、ごみ供給量の問題点に対応するため、適応制御手法とバンド機能を組合わせた適応バンド制御システムを提案する。

2.1 ごみ焼却燃焼モデル

制御の際の制御量としては、炉内の燃焼状態をよく表わしている炉頂温度をもちいることとする。いっぽう、操作量は炉頂温度への影響がもっとも大きいごみ供給量とほぼ1対1対応の関係にあるロータ回転数をもちいる。熊本らは熱収支方程式をもとに、上記操作量、制御量を入出力とする伝達関数モデルを導出し、1次遅れ系で表わされることを示した²⁾。本論文では、この結果を引用し、以下の1次遅れ系を制御対象のモデルとしてもちいる。

$$y(k+1) = ay(k) + bu(k) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $y(k)$ は出力(炉頂温度)、 $u(k)$ は入力(ロータ回転数)、 k はサンプル時刻、 a b はごみの発熱量や燃焼状態、炉内の蓄熱などにより逐次変化するパラメータであり、適応制御をおこなうためには a b をオンライン推定する必要がある。

このモデルの妥当性を検証するため、実稼働中のごみ焼却炉において、ロータ回転数を+10%変化させるステップ応答実験を実施し、1次遅れ系として同定をおこなった。その結果、同定モデルとして時定数500秒の1次遅れ系をえた。その同定モデルによる推定出力とステップ応答データを第2図に示す。なお、同図および以下の各図においてロータ回転数は実験開始時点をもとに100%とし、そこからの変動を示している。第2図より、同定モデルの推定出力は炉頂温度のステップ応答を近似しており、制御モデルとして1次遅れ系をもちいることの妥当性が確認された。

2.2 オンライン推定

適応制御系の一般的な構成を第3図に示す。適応制御では、制御対象のモデルを同定する部分と、その同定モデルをもとに適切な制御ゲインを算出する部分から構成される。ここでは、まずモデル同定の部分について述べる。

モデル同定では、式(1)の a 、 b の推定をオンラインで逐次的におこなう。その手法として、ここでは以下に示す逐次最小二乗推定法³⁾をもちいる。未知パラメータ a b の逐次推定値を $\hat{a}(k)$ 、 $\hat{b}(k)$ とし、推定値ベクトルを次式で定義する。

$$\hat{\theta}(k) = [\hat{a}(k) \quad \hat{b}(k)]^T \quad \dots\dots\dots (2)$$

この $\hat{\theta}(k)$ 、推定誤差 $e(k)$ を以下の式により逐次的に計算して求める。

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + W(k)e(k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{\theta}^T(k)\phi(k) \quad \dots\dots\dots (4)$$

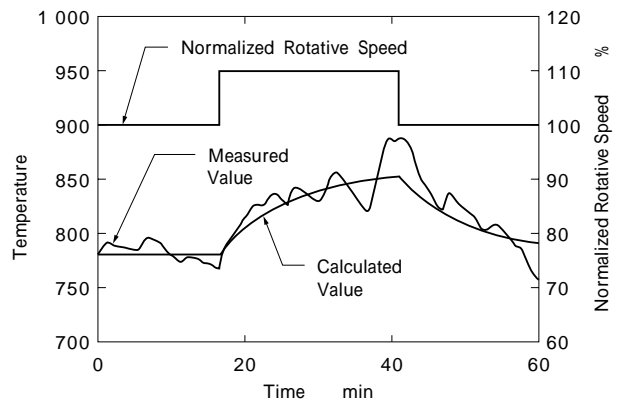
ここで、 $W(k)$ 、 $\phi(k)$ は次式にしたがって計算する。

$$\phi(k) = [y(k) \quad u(k)]^T \quad \dots\dots\dots (5)$$

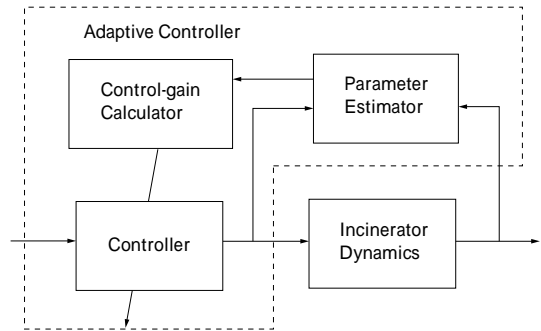
$$W(k+1) = P(k)\phi(k)\phi(k)^T + \phi(k)\phi(k)^T P(k) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$P(k+1) = \{I - W(k+1)\phi(k)\phi(k)^T\} P(k) \quad \dots\dots\dots (7)$$

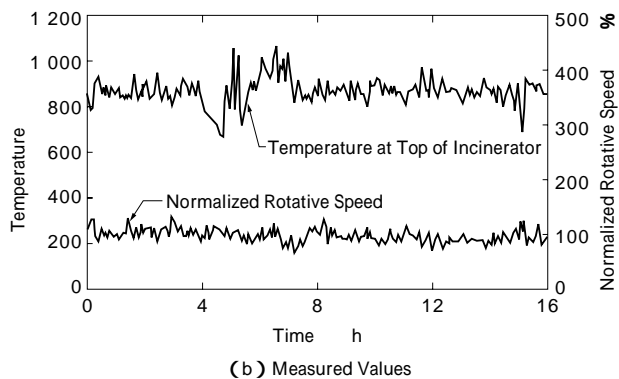
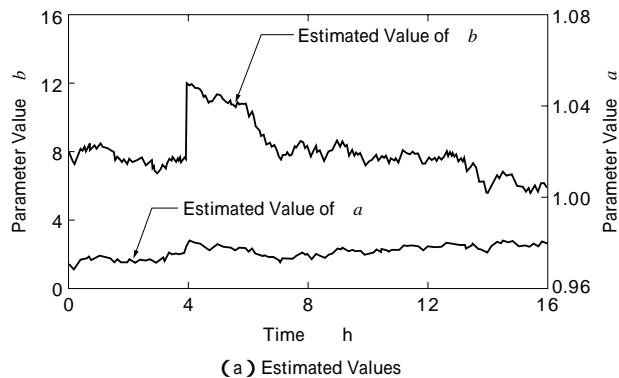
ただし、 I は忘却係数である。



第2図 ステップ応答
Fig. 2 Step response



第3図 適応制御系
Fig. 3 Adaptive control system



第4図 オンライン推定結果
Fig. 4 On-line estimation results

次に、実プラントデータをもちいた上記アルゴリズムによる推定結果、および同定にもちいた炉頂温度、ロータ回転数を第4図に示す。第4図より a の推定値にくらべて b の推定値が大きく変化していることがわかる。

また、炉頂温度、ロータ回転数と推定値を比較すると、4時間後近辺に燃烧状態の変化が現れているが、推定値もそれに対応して変化しており、推定が正しくおこなわれていることが確認できる。

2.3 適応制御アルゴリズム

次に同定モデルの結果をもちいた制御ゲインの計算方法について示す。適応制御系の構成としては様々なものが提案されているが¹⁾、ここでは第5図に示す構成を考えた。第5図では、一定以上の偏差がある場合のみ次節で述べるバンド機能を通してフィードバックをおこない、偏差がない場合はフィードフォワードと制御対象からなる開ループによって制御をおこなう構造となっている。したがって、制御ゲイン C は、偏差がない状態では炉頂温度が目標温度と一致するように、最終値の定理にしたがって、次式により算出する。

$$C = (1 - \hat{d}(k)) / \hat{b}(k) \dots \dots \dots (8)$$

式(8)より、制御ゲインはオンライン推定での推定値を使用して計算される。このことからごみ発熱量の変化があった場合は、炉頂温度が目標温度と一致するように制御ゲインを逐次変更することで、燃烧への影響を抑制している。

2.4 バンド機能

次に、バンド機能について示す。一般的には、ロータ回転数を大きく変化させると、ごみがロータにおいて噛み込まれてしまう場合がある。そのときは、ごみが正しく供給されなくなり、焼却炉の燃烧状態を安定化させることが困難となる。したがって、制御系を実プラントに適用するにあたっては、ロータ回転数を大きく変化させることは望ましくないとされている。そのようなごみ量が変動する問題に対しては、同定信号に不感帯をもちいる手法⁴⁾⁵⁾が提案されている。しかし、この手法では不感帯の影響が推定機構、制御ゲインを経由するため、その調整に多大な時間が費やされるという問題がある。そこで、不感帯の影響がより直接的に把握でき、調整時間を短縮できるように、フィードバック部分にバンド機能を有するフィルタを設ける手法を検討した(第5図参照)。バンド機能を次式に示す。

$$m[k] = \begin{cases} \text{err}[k] - B_1 & \text{err}[k] > B_1 \\ 0 & B_1 \geq \text{err}[k] \geq B_2 \dots \dots \dots (9) \\ \text{err}[k] - B_2 & B_2 > \text{err}[k] \end{cases}$$

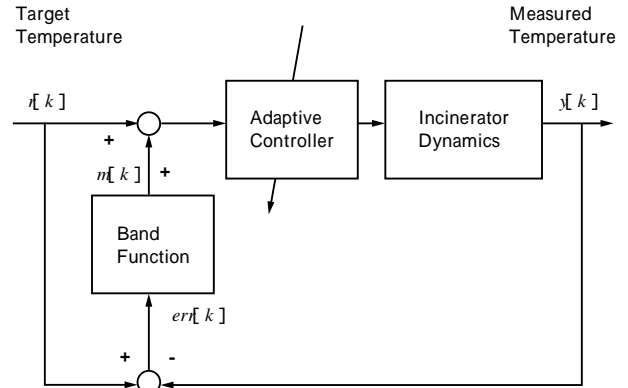
$$\text{err}[k] = r[k] - y[k] \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $m[k]$ はフィードバック量、 B_1, B_2 はバンド上下限值である。

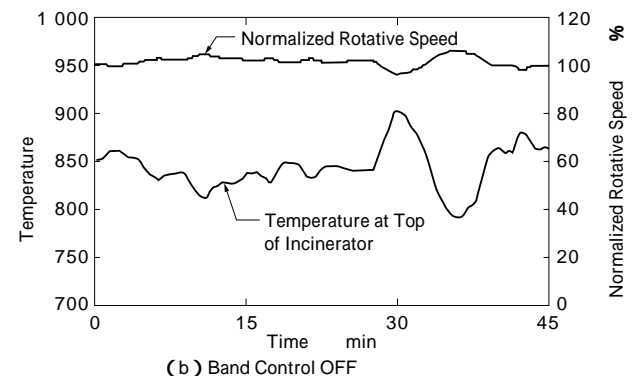
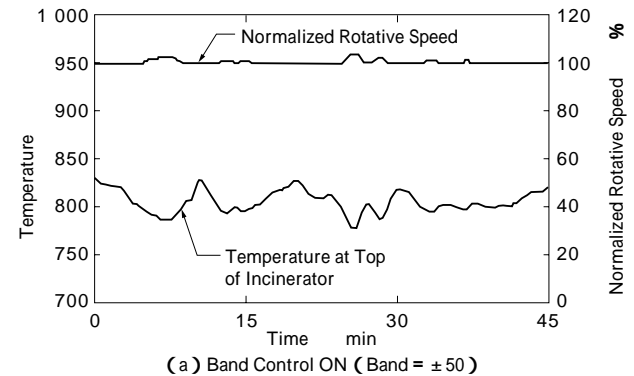
式(9)、式(10)よりバンド機能では、フィードバック部分に不感帯をもつことで、目標温度との偏差が大きな場合のみフィードバックをおこなう。これにより、ロータ回転数の大きな変化が頻繁におこることを抑制し、ごみの噛み込み発生を減少させている。

バンド機能の有効性を検証するため、目標温度を850とし、バンド機能あり($B_1=50, B_2=-50$)、なしの条件で実プラント適用をおこなった結果を示す。

第6図(a),(b)を比較すると、バンド機能によってロータ回転数の変化が大きく抑えられていることがわ



第5図 適応バンド制御システム図
Fig. 5 Adaptive band control system



第6図 バンド制御結果
Fig. 6 Effect of band control on temperature at top of incinerator

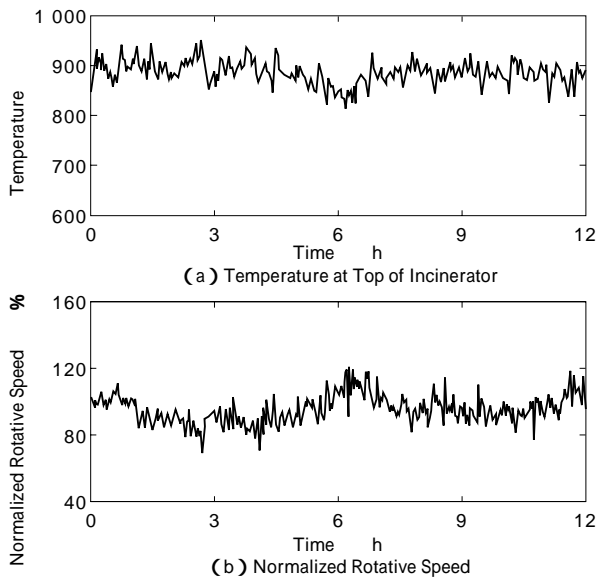
かる。

次に炉頂温度に注目すると、第6図(b)の35分付近で、ごみの噛み込みが原因と思われる大きな温度の低下が確認できる。しかし、第6図(a)ではそのような状況が発生しておらず、これからバンド機能が有効に機能していることがわかる。温度の標準偏差でみても、22.8 から 11.5 とバンド機能により約半分に低減されている。

バンド幅の制御効果への影響として、バンド幅を大きくしすぎたり小さくしすぎたりすると、制御ゲインの不足、ごみの噛み込みの増加などにより、温度変動へ悪影響を及ぼすことが経験的には確認されている。しかし、バンド幅の設計方法を明らかにするには至っておらず、その部分に関しては今後の課題としたい。

3 実プラント適用結果

適応バンド制御システムを、当社納入プラントに適用



第7図 実機適用制御結果 (制御あり)
Fig. 7 Control results (Control ON)

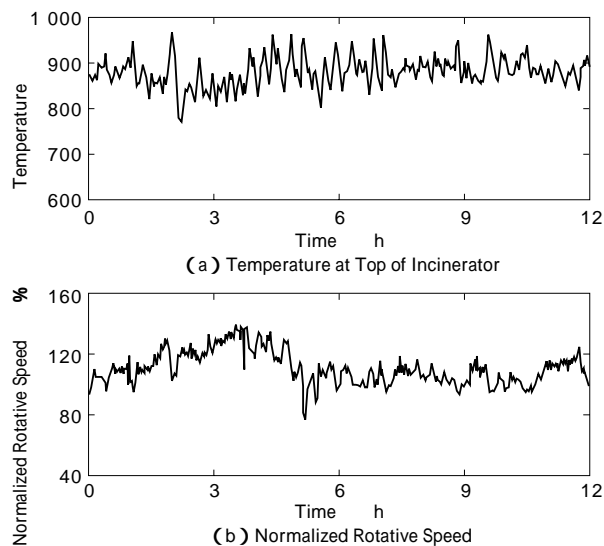
した結果を以下に示す。目標温度 900℃，バンド幅を ±50℃ として適用実験をおこなった。その結果を第7図に，比較として制御なしの場合のデータを第8図に示す。

制御ありの場合では制御なしと比較して，炉頂温度の変動幅が小さくなっていることがわかる。これを，温度変動 (= 最大値 - 最小値)，標準偏差 (12 時間分の全離散データ 750 点から計算) によって定量的に評価すると，制御ありの場合は制御なしの場合にくらべて，温度変動では約 230℃ が約 145℃，標準偏差にして 32 から 23℃ と，それぞれ減少しており，いずれにおいても本制御システムによる炉頂温度の変動抑制が確認された。

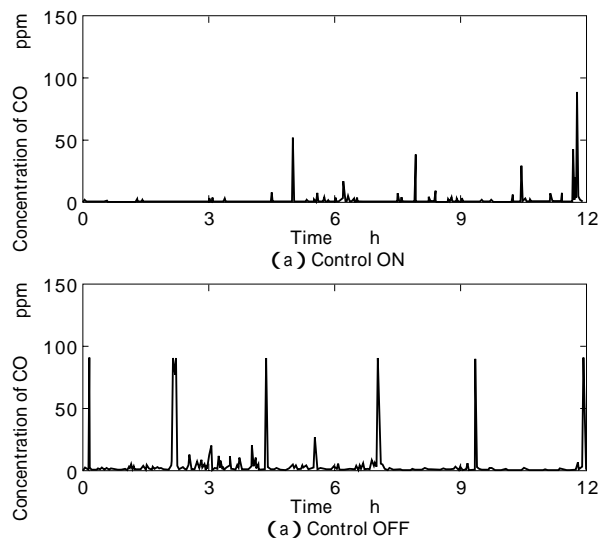
次に，安定燃焼の評価として重要である，排ガス中の有害物質により制御効果を確認する。ここでは，有害物質としてダイオキシン類の新ガイドラインで示されている CO 濃度に注目してみる。制御あり/なしそれぞれの場合の CO 濃度のグラフを第9図に示す。第9図より制御によってピーク回数 (50ppm を越えるもの) が 0.5 回/時間から 0.3 回/時間と約 40% 低減，平均値においても 7.6ppm が 1.9ppm と約 75% 低減できていることが確認できる。このことから，制御をおこなうことでより安定な燃焼状態が実現できていることがわかる。

むすび= ゴミ焼却炉の燃焼制御において，適応バンド制御手法を適用した自動制御システムを構築した。本システムは，ゴミ質変動の燃焼への影響を抑制し，ゴミのロータでの噛み込みを低減する機能をもつ。実プラントにおいて適用実験をおこなった結果，安定燃焼の実現を確認した。

本システムは 実プラントにおいて現在稼働中であり，安定燃焼による高性能化を達成している。



第8図 実機適用制御結果 (制御なし)
Fig. 8 Control results (Control OFF)



第9図 実機適用制御結果 (CO 濃度)
Fig. 9 Effect of adaptive control and band control on concentration of CO

参考文献

- 1) K. J. Astrom et al. : Adaptive Control Addison Wesley (1989).
- 2) 熊本博光ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.43，No.2(1993)，p.83.
- 3) 足立修一：ユーザのためのシステム同定理論，計測自動制御学会学術図書 (1984).
- 4) 中島 学ほか：第4回廃棄物学会研究発表会講演会論文集 (1993)，p.675.
- 5) 中島 学ほか：第36回自動制御連合講演会論文集 (1993)，p.165.