

ACC+ARモデル協調制御による都市ごみ焼却炉の長期燃焼実験

京都大学
国立公衆衛生院
備タクマ

平岡正勝、津村和志
○藤原健史
高市克己、辻本進一

1 はじめに

都市ごみ焼却炉において、自動燃焼制御（ACC）稼働時に収録された観測値の時系列データから自己回帰モデル（ARモデル）を求め¹⁾、そのモデルをベースに設計された最適制御系を、我々はACC+ARモデル協調制御系と呼んでいる。ACC+ARモデル協調制御は予測的・多変数の制御であり、都市ごみ焼却炉のNOx濃度、ボイラ蒸発量の同時制御に適している。ARモデルは対象炉ごとに同定実験を行い作成するため、手間がかかる反面、炉に合わせた最適制御系を設計することができる。報告2)では操作変数に非線形性を持つ炉を対象として制御実験を行ったが、本報告では線形性の強い炉で同定実験を行った。また、ACC+ARモデル協調制御の実用性を検討するために長期間の燃焼制御実験を実施し、その期間中に負荷の変更や悪質ごみの投入を行って制御系の堅牢さを調べた。

2 実験対象炉と同定実験

報告2)の炉をA炉、本実験に供した炉をB炉とすると、A炉では空気量関係をダンパ開度で操作したが、B炉では操作端にダンパ開度調節用PID制御を備えるため直接空気量で操作できる。ストーカも同様で、操作端に油圧ポンプ調整用PID制御を備えるためストローク速度で操作できる。このようにB炉ではカスケード方式を採用しているため、操作指令値と実際の操作量との間に線形性が保たれている。

同定実験では操作信号に意図的にノイズを加え、そのノイズに対するシステムの応答を収録する。操作変数として燃焼空気量(CTFAR)、後燃焼空気量(BOFPV)、炉冷却空気量(CDF)、燃焼ストーカ速度(CTS)を選び、それぞれの同定ノイズを用意した。A炉と同様に、空気供給関係のノイズは高周波成分を含むようにし、燃焼ストーカ速度のノイズは低周波成分を強調するため「手動操作+ARノイズ」とした。運転条件は定格負荷（ボイラ蒸発量が36.8ton/hr）であり、低酸素濃度（酸素濃度10%）を目標にした。同定ノイズは出力周期90秒で出力し、30秒のサンプリング周期で計測値を収録した。実験期間は2日間（5760データ）とした。

3 ARモデルの作成とシステム解析

被制御変数（制御される変数）としてNOx濃度(NOX)、ボイラ蒸発量(STM)、参考変数（システムの状態を把握する上で必要な変数）として第一燃焼室ガス温度(GT4)、後燃焼段上ガス温度(GT7)、酸素濃度(O2)を選び、上述の操作変数とあわせて9変数のARモデルを作成した結果、モデル次数が13次となった。ARモデルから求めたステップ応答シミュレーションを図1に示す。この図から以下のことがわかる。

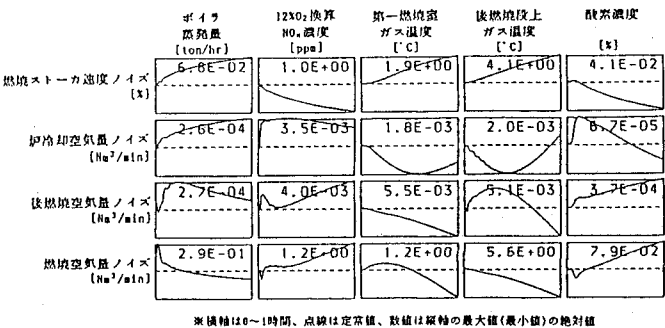


図1 ステップ応答シミュレーション

※左の変数が単位ステップ変化したときの、上の変数の変化のグラフ

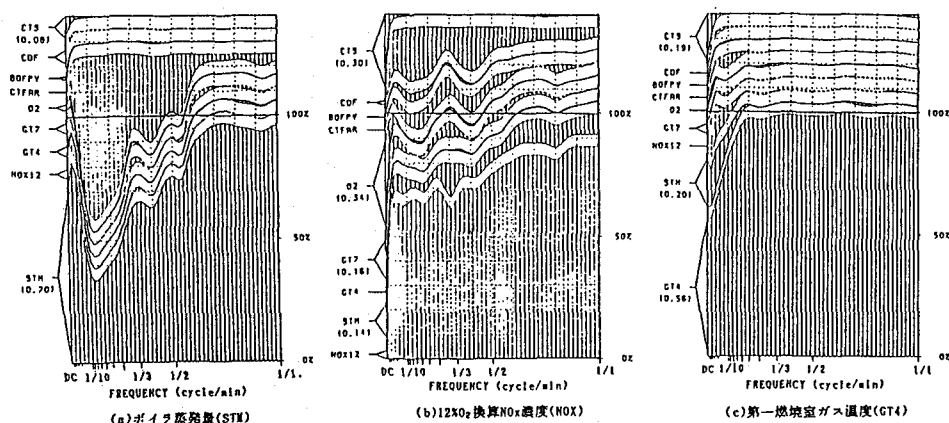


図2 ノイズ寄与率

- ・ 燃焼ストーカ速度を上げるとボイラ蒸発量と炉温は上昇し、酸素濃度と NO_x 濃度は下降する。
- ・ 冷却空気量を増やすと NO_x 濃度は増え、ボイラ蒸発量は上昇する。冷却効果は吹き込み時に大きい。
- ・ 後燃焼空気量を増やすと後燃焼段上ガス温度が上昇する。
- ・ 燃焼空気量を増やすと、ボイラ蒸発量は急激に増えてすぐに通常に戻る。

A炉のステップ応答シミュレーションと比べると、燃焼ストーカ速度に対する状態変数の応答は一致しているが、冷却空気量や燃焼空気量(A炉では燃焼制御ダンパ)に対する状態変数の応答は異なっている。

次に、ARモデルから求めたノイズ寄与率を図2に示す。この図から以下のことがわかる。

- ・ ボイラ蒸発量： 直流分では固有ノイズからの寄与が大きい。低周波から高周波にかけては燃焼空気量の寄与が特に大きい。A炉の場合と比べて寄与が大きい理由は、操作量を直接の空気流量で扱うために線形性が確保され、寄与が正しく同定されたからと考えられる。
- ・ NO_x 濃度： 直流分で燃焼ストーカ速度ノイズからの寄与が大きい。低周波から高周波にかけて炉冷却空気量ノイズからの寄与が大きい。A炉の2cycle/min付近にあるボイラ蒸発量からの寄与がなくなっている。
- ・ 後燃焼段上ガス温度： 直流分では、後燃焼段上ガス温度自身の寄与、燃焼ストーカ速度ノイズからの寄与が大きい。直流分以外では、ほとんど固有ノイズからの寄与である。

4 最適制御系設計と制御実験

ボイラ蒸発量と NO_x 濃度を同時に制御する最適制御のフィードバックゲインを計算し、そのゲインで制御シミュレーションを行ったところ、ボイラ蒸発量と NO_x 濃度のそれぞれの分散値が、 $2.31(\text{ton/hr})^2$ 、 111ppm^2 となった。

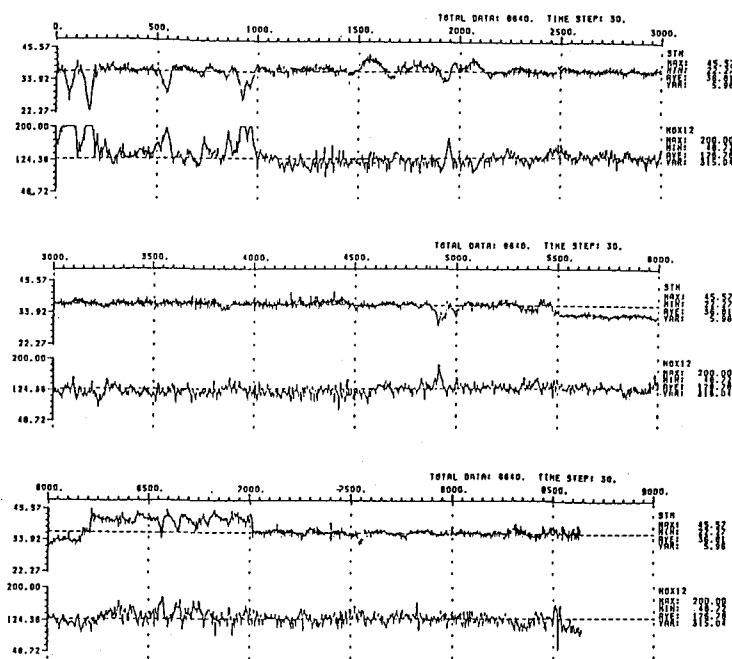
計算したゲインで、まず定格負荷で12時間(実験a)と110%負荷で10時間(実験b)の短期制御実験を行った。その結果、ボイラ蒸発量、 NO_x 濃度、第一燃焼室ガス温度のそれぞれの分散値は、実験aでは $1.07(\text{ton/hr})^2$ 、 332ppm^2 、 829°C^2 、実験bでは $0.803(\text{ton/hr})^2$ 、 170ppm^2 、 1650°C^2 であった。

次に、同じ条件で3日間の長期連続自動運転を試みた。実験中の様子を以下に述べる。

- ・ 昼間の運転： 昼間は、次々と搬入されるごみが攪はん不十分のまま炉内に投入され、ごみ塊となることがある。実験では、ボイラ蒸発量と NO_x 濃度は安定を保っていたが、ごみの状態が極度に悪くなると、燃えきり点が下り後燃焼段で燃焼することがあった。その時は未燃防止のため、オペレータが後燃焼ストーカ速度の手動操作を行った。
- ・ 夜間の運転： 夜間は、昼間に攪はんされて積み上げられた比較的均質で水分の少ないごみが投入されるため、燃焼が安定しやすい。実験においても、オペレータの手動介入の必要はほとんどなかった。

・悪質ごみ塊の投入： ビット底部から引き上げた水分量が多いごみをバッチで投入したところ、ボイラ蒸発量が徐々に下がりゆっくり復帰する動きを見せ、悪質ごみによるその後の悪影響は見られなかった。燃えきり点の位置が一時的に下がることが確認された。

・低負荷と高負荷での運転：モデルとゲインを固定し、ボイラ蒸発量の負荷目標値の変更が可能かどうかを調べた。図3の5500データから6150データは、負荷を90%に下げて制御実験を継続し、6200データから7000データは、負荷を110%に上げて実験を継続した。その結果、この範囲で負荷目標値を変えても運転可能であることがわかった。



*単位は、ボイラ蒸発量(STH)がton/hr、12%O₂換算NOx濃度(NOx)がppm

図3 長期燃焼実験チャート

5 ごみ質悪化時の制御についての考察

燃えきり点が後燃焼段側に来るほどボイラ蒸発量が増加し、NOx濃度が下がる。そのため長期間悪質ごみの投入が続くと、燃えきり点が下流側へシフトした状態で燃焼が安定する。未燃を防止するためには、後燃焼段を長くして滞留時間を確保する方が良い。後燃焼段で滞留時間をとれないときは、燃焼段の滞留時間を長くして十分乾燥させる燃焼方法に切り替える必要があるだろう。実験では、後燃焼段にたまった未燃分は、後燃焼ストーク速度と後燃焼空気量をオペレータが操作することによって燃やし切ることができた。燃えきり点が後燃焼段上に移動してもボイラ蒸発量は比較的安定していることから、オペレータは後燃焼段だけを監視すれば良く、運転の負担は小さくなったと思われる。

6 さいごに

線形性を持つ都市ごみ焼却炉を対象にARモデルを当てはめてシステム解析を行ったところ、非線形性の強い炉の場合よりも、燃焼空気量からボイラ蒸発量に対するノイズ寄与率が大きく明瞭にあらわれた。また、ACC+ARモデル協調制御の3日間連続運転では、負荷を多少変えても燃焼安定を維持できること、ごみ質が変われば燃えきり点の変動として表れるため後燃焼段の監視ができていれば十分であることがわかった。今後の課題は、1年以上の制御実験を行い、季節変化に対する安定性を評価することである。

参考文献

- 1) 藤原健史、津村和志、平岡正勝、自己回帰モデルを用いた都市ごみ焼却炉システムの解析、衛生工学研究論文集、Vol.25、pp47-58、1989
- 2) 藤原健史、津村和志、平岡正勝、高市克己、辻本進一、都市ごみ焼却炉のACCとAR制御の協調による蒸発量及びNOxの同時制御に関する研究、環境衛生工学研究、Vol.1、pp17-25、1987