都市ごみ焼却炉の自動制御

平岡 正勝*・津村 和志**・藤原 健史***

1. はじめに

初めて建設された頃の都市ごみ焼却炉は小規模であり、主要操作部に配置された運転員がひとりひとりの判断で操作していた。そのため運転員には専門的な知識が要求され、作業の負担も大きかった。それが高度成長時代に入ると処理量が増大し、ごみの種類が多様化するに従って、都市ごみ処理炉は大型化・複雑化した。人間の操作だけでは対応できなくなり、必要に応じて自動化が取り込まれるようになった。この時点では、自動燃焼制御 (Automatic Combustion Control ; ACC) は目標焼却量を燃やし切ることと熱効減量を守ることを主たる目的としていた。次いで低経済成長の時代に入り、省資源・省エネルギー・省力化のニーズが高まると、ごみの燃焼に際して発生する熱エネルギーの積極的な利用が求められた。炉出口に廃熱ボイラを設置し、生成する蒸気を使って発電するようになった。電力は場内で消費されるほか、余った電力は電力会社に売電されるようになった。このため自動燃焼制御は安定した燃焼状態を長時間維持し、ボイラ蒸発量を一定に保つことが新たな目的となった。一方、燃焼以外のクレーン操作や灰押し出し操作などについても集中監視室で情報収集および操作することができるようになり、燃焼の安定化、運転員の操業の安全化が達成された。そして近年では環境問題がクローズアップされるに従い、自動燃焼制御に NOx 制御が組み込まれるようになってきている。

次に自動制御の歴史を計装から見ると、初期の空気式計装が電子式に代わって計算機でデータを収録できるようになり、それがさらに発展して自動制御に結び付くようになった。そしてその計装制御の方式が、アナログ自動計装制御、計算機 DDC 自動計装制御を経て、分散型デジタル自動計装制御に変わってきている。

分散型デジタル自動計装制御は、高性能マイクロプロセッサやメモリで構成したコンパクトコントローラを各プロセスごとに分散配置し、それをさらに上位計算機で管理する方式であり、コストパフォーマンスに優れているほか、設計・運転・メンテナンスがしやすいという長所を持っている。¹⁾

本稿では、自動制御の中でもますます複雑化してゆく自動燃焼制御に焦点を当てる。まず都市ごみ焼却炉の構造と自動燃焼制御について述べ、次に新しい制御技術である AR モデルによる制御について解説する。

2. 都市ごみ焼却炉の構造と自動燃焼制御

都市ごみ焼却炉の構造を燃焼過程の違いから大きく分けると、(a)乾燥・燃焼・おき燃焼の各プロセスが分離している階段式ストーカ炉、(b)乾燥と燃焼がほぼ同時に起こり、燃焼とおき燃焼が連続している逆送り式ストーカ炉、(c)乾燥・燃焼・おき燃焼の各プロセスが連続している回転式ストーカ炉、の3つのタイプに分けられる。自動燃焼制御は炉の構造にあわせて開発されているため、これらのタイプによって多少異なる。ここではまず階段式ストーカ炉の構造と自動燃焼制御について説明し、そのあとで他の2つのタイプについて違いをみる。

2.1 炉の構造

階段式ストーカ炉の一般的な構造を図-1に示す。ホッパから投入されたごみはフィーダで切り出される。乾燥ストーカ上で乾燥したごみは燃焼ストーカ上に落下して炎燃焼し、下流方向へ移動しながらやがて炎燃焼を終了する。この終了の位置を燃え切り点という。灰と一部燃え残ったごみは後燃焼ストーカ上に落下しておき燃焼し、燃えきった灰が灰ホッパに落下する。

燃焼用空気は、乾燥・燃焼・後燃焼の各ストーカの下から吹き込まれる。燃焼後の排ガスは燃焼室を通って廃熱ボイラに至る。燃焼室には二次空気を吹き込み、二次燃焼を促進している。

* 京都大学工学部教授 Masakatsu HIRAOKA

” ” Kazushi TSUMURA, TaKeshi FUJIWARA

図-1 階段式ストーカ炉の構造

2.2 主制御

目標焼却量を燃やし切ること、熱効減量を一定値以下に保つことが当初の制御目的であったが、蒸気で発電するようになるとボイラ蒸発量制御がACCの主制御となった。一般的な蒸発量制御のアルゴリズムを図-2に示す。ボイラ蒸発量の設定値は直接与えられることもあるが、目標焼却量で与えられることもある。このときは目標焼却量と推定ごみ発熱量の積である燃焼発生熱量を計算し、その燃焼発生熱量に見合ったボイラ蒸発量をボイラ蒸発量設定値とする。ただしこの推定ごみ発熱量はあらかじめ設定される場合と、過去数時間の炉の周りの熱収支から計算され随時更新される場合がある。次に、ストーカ速度基準量が燃焼発生熱量から、燃焼用空気量が空気過剰率と燃焼発生熱量から

決められる。そして変動分に対応するため、ボイラ蒸発量設定値とリアルタイムに測定されたボイラ蒸発量測定値との偏差から補正量が計算され、ストーカ速度基準値と燃焼用空気量基準値に加えられて出力される。燃焼用空気量を操作するとボイラ蒸発量に早く応答が現れることから、変動周期が短いものは燃焼用空気量操作で、周期が長い場合にはストーカ速度操作で対応するようにPID制御が組まれている。

2.3 副制御

ごみは発熱量が均一でないため、ボイラ蒸発量を一定にする制御だけでは燃焼状態が変化してゆき、不都合なことが起こる。例えば燃えきり点が下流側へ大幅に移動すると熱効減量が悪化する。炉温が上昇し過ぎると灰が溶融し、ストーカの隙間に入り込んでストーカの動きを妨げる。そして炉壁に生成したクリンカはごみの流れを妨害する。また燃焼用空気が過剰に投入されると、NOxが上昇する。自動燃焼制御ではボイラ蒸発量だけでなく、燃焼状態全体を安定化することを目的としているため、安定燃焼の指標となる部分に制御ループを設け、ストーカ速度や燃焼用空気量に補正を加えている。以下に代表的な制御を示す。

(1) ごみ層厚制御

燃焼段へ絶えず安定したごみ量が供給されるようにごみ層厚を制御する。ごみ層厚の検出には、ストーカの上部と下部の差圧から推定する方法²⁾や、フィーダから乾燥段、乾燥段から燃焼段への落ち口に設けた超音波レベル計で、ごみが一定の高さに達して

図-2 ボイラ蒸発量制御のフロー

いるかどうかを知る方法³⁾などがあり、どちらもストーカ速度に補正をかける。

(2) 燃え切り点制御

燃え切り点の位置を検出し、それを一定の範囲に維持するようにストーカ速度と燃焼用空気量を補正する。燃え切り点の検出には、炎部分と灰部分の光度差を利用したものが多い。例えば、光量センサで燃焼段の中央付近と後燃焼段近くの光量を取り込みその差から判断する方法³⁾や、ITV カメラで取り込んだ燃え切り点付近の画像を画像処理して、燃焼帯と灰との境を検出する方法⁴⁾などがある。最近では、カラー画像を取り込んで温度分布の推定や火炎の領域を検出する燃焼監視装置も開発されている。⁵⁾

(3) NO_x制御

通常、ごみを燃焼するとNO_xが生成する。しかしごみを低酸素条件で燃焼するとNO_xを還元するNH₃等の物質も生成するため、両者の発生をうまくコントロールできればNO_xを低く抑えることができる。還元二段燃焼法⁶⁾は、乾燥段の空気を絞り還元性ガスを多量に発生させて炉内で自己脱硝させる方法であるが、自動燃焼制御にこの考え方を取り込んでる炉が多い。また一時的なNO_x上昇に対しては、二次空気量や燃焼空気量を減らすようなアルゴリズムが組み込まれている。最近ではNO_xと炉温の制御のために水噴射や排ガス再循環の設備を備える炉もあり、その操作が自動燃焼制御に組み込まれるようになってきている。

(4) 炉温制御

最近のごみは高分子化合物を多く含み発熱量が高くなってきている。そのため、炉温が高くなり過ぎる傾向にある。炉温制御は、急激な温度上昇時に空気を吹き込んで炉温を下げる操作である。空気量が多すぎるとNO_x濃度が上昇するため、吹き込み量は最小限に押える必要がある。

2.4 他のタイプの炉の自動燃焼制御

図-3はフィーダと逆送り式ストーカより構成される炉⁷⁾である。逆送りストーカは攪拌に優れており非常によく燃える。フィーダから燃焼段への落ち口には主燃焼ゾーンが形成され、ごみが供給されると速やかに乾燥し燃焼する。ごみ送りが燃焼状態に極めて速く影響を及ぼすため、フィーダとストーカのON・OFF切り替え操作によりボイラ蒸発量や炉出口ガス温度を制御している。燃焼効率がよいので細かい燃焼用空気量操作はせず、燃焼用空気は燃焼ストーカ下から一定の分

図-3 逆送り式ストーカ炉の構造

図-4 回転式ストーカ式炉の構造

配比率で供給している。乾燥過程の短いこの燃焼方式は、炉内での自己脱硝が起こらずNO_x濃度が高くなる。そこでこの炉では、NO_xの濃度制御および総量制御を組み込んでいる。

図-4はフィーダと7つの回転ストーカから構成される炉⁸⁾である。ごみはフィーダで切り出され、ストーカの回転により下流側へ移動してゆく。ストーカの回転速度は独立に操作できるため、ごみ層厚を自由に調整できるという長所をもっているが、各段ごとの落差がないためにごみを攪拌しにくい面もある。燃焼用空気は各ストーカごとに供給することができ、速い変動の外乱に対して燃焼用空気量の分配操作で燃焼速度（又は発生熱量）を調節している。この炉は乾燥過程の時間が十分とれるため、還元二段燃焼が可能である。

3. ARモデルによる制御

都市ごみ焼却炉の自動燃焼制御はボイラ蒸発量だけを制御するのではなく、安定した燃焼状態を維持する

ことを目的とするため、燃え切り点や炉温としてNOxなどの制御も同時に行う必要があることを述べた。そのためには燃焼状態を示す情報をより多く取り込み、目的とする複数の制御を同時に達成するような最適な操作が行われなければならない。しかし、制御目的と取り込む情報が多くなれば多くなるほど制御系は複雑となる。そこで多変数制御を達成する1つの方法として、ARモデルによる最適制御を紹介する。これはまず焼却炉プロセスの数学モデルを作成し、そのモデルからフィードバック制御系を設計する方法である。

3.1 ARモデルのあてはめ

都市ごみ焼却炉では、ごみという発熱量の不均一な物質を燃やしているため、その計算値には多くのノイズを含んでおり、変数間の真の関係をつかむことは容易ではない。そこで焼却炉プラントをブラックボックスと考え、収集したデータを統計的に扱うことによって次式に示すような簡単な線形モデルを作成する。

$$\mathbf{X}(s) = \sum_{m=1}^M \mathbf{A}(m) \mathbf{X}(s-m) + \mathbf{U}(s)$$

このモデルを自己回帰モデル (Auto-Regressive model: ARモデル) と言う。Mはモデル次数、 $\mathbf{X}(s)$ はあらかじめ定常値を差し引いた時刻sの計測値 $x_i(s)$ ($i=1, 2, \dots, k$) のベクトル、 $\mathbf{A}(m)$ は自己回帰係数のマトリックス、そして $\mathbf{U}(s)$ は時刻sにおける計測値のホワイトノイズのベクトルである。この式は現在の状態量 $\mathbf{X}(s)$ が過去の状態量 $\mathbf{X}(s-1)$, $\mathbf{X}(s-2)$, ..., $\mathbf{X}(s-M)$ の線形結合部分とそれ以外の部分(雑音部分) $\mathbf{U}(s)$ の和で表されることを意味する。モデル次数Mは赤池のMFPE(M) (最終予測誤差規範)⁹⁾によって決定されるため、作成されたモデルはプラント本来の動きに最も近い動きをするモデルとなっている。

3.2 ARモデルによる解析

ARモデルは複数の変数間の関係を線形近似したものであるから、そのモデルを使って簡単にインパルス応答やステップ応答が計算できる。ノイズ寄与率⁹⁾は、ある変数の持つパワースペクトルのうちで他の変数の固有雑音に起因する部分の割合を周波数ごとに計算したものであり、操作変数から被制御変数への影響を評価することができる。このように作成されたARモデルが焼却炉プラントと同じ動きをしているかどうかを視覚的に判断できるほか、生データのままで解析できなかった変数間の関係を明瞭に示すことができる。

3.3 最適制御系の設計

ARモデルの式は現在及び過去の状態量がわかると

1ステップ先の将来の状態量を計算することができることを示しているから、さらにこれを繰り返せば燃焼状態がどのように変化してゆくかを予測することができる。このことを利用すれば、遠い時点での燃焼状態の安定性までも考慮に入れて現在投入すべき操作量を計算することができる。⁹⁾これは現代制御理論の領域であり、まずARモデルを状態空間表現へ変形し、次に「現在から将来にわたる(非制御変数の)状態量と(操作変数の)操作量を自乗和した値」を二次評価基準として、それを極小にするような現在の操作量を求める。結果として現在の最適操作量は現在の状態量の一次変換となり、その変換行列がフィードバックゲイン行列である。制御の効果は、制御シミュレーションを行って被制御変数の分散値で評価できる。

3.4 ACCとの協調性

さらにこの制御系の特徴は、従来のPID制御と組み合わせることができることである。¹⁰⁾ACCと組み合わせることによりACCの制御効果を損なうことなく、ACC信号を補正する方式での制御が可能となる。図-5はその制御のフローを示す。ACCの積分型制御とAR制御の予測型制御を併せ持つことからACC-AR協調制御と呼んでいる。

3.5 制御実験例¹¹⁾

焼却量が200 (ton/day)の階段式ストーカ炉でACC-AR協調制御を行った(図-6)。制御開始直後、ボイラ蒸発量、NOxの低周波変動は起きた。結果はボイラ蒸発量とNOxの分散値はそれぞれ0.588(ton/min)²、40.4(ppm)²となり、通常ACCの場合と比べると0.51倍、0.47倍という良い結果を得た。

3.6 制御達成のポイント

以上、焼却炉プラントにおけるARモデルのあてはめから制御実験までを述べたが、最適な制御を達成するための最も重要な部分はシステムの同定実験であると言える。操作端に適切な雑音を入れシステムを励振させることによって、操作とシステム応答との関係が

図-5 ACC-AR協調制御ブロック線図

図-6 ACC-AR協調制御実験結果

明確に現れるデータを作成する。もしこの時に、ごみ質の変化によるシステムの応答をとらえることができたならば、ごみ質変化に対する予測的操作が可能となる。次に重要な点は、数多くある焼却炉プラントの計測点のうちで、どの計測点をARモデルの変数とするかを定めることである。このとき、被制御変数の動きを説明することのできる計測点を選ばなければいけない。実験対象とした焼却炉プラントでは、後燃焼段上ガス温度がNO_xと関係が深いことを見出し、それを参考変数とした。最後に、実際の制御実験では操作端の非線形性やACCとAR制御の調整が問題となった。¹¹⁾これらの解決方法は炉の構造やACCの特徴と係わるため、その条件にあわせた対応策を考える必要がある。

4. おわりに

自動燃焼制御は炉の構造によって若干違うものの蒸発量制御が主制御となっており、副制御としてのごみ層厚制御、燃え切り点制御、NO_x制御、炉温制御などが働くことによって安定した燃焼状態が維持されている。この自動燃焼制御とAR制御を組み合わせたACC-AR協調制御では多変数系の予測制御が可能となる。これは、最近開発されているAIを導入した自動燃焼制御¹²⁾とは全く別の新しい方向を示している。この方法は都市ごみ焼却炉の制御に限らず、雑音を含み多変数系である他の環境システムにも適用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 西島 衛ほか、ごみ焼却プラントの総合監視制御システム、PPM、28-37、1982/2
- 2) 森 弘行ほか、ごみ焼却炉の計算機による制御(第2報)、日立造船技報、vol. 37, No 3, 1976/9
- 3) 広富 元ほか、ごみ焼却炉における計装制御と最近の動向、計装、vol. 29, No 3, 46-54、1986
- 4) 鍋島淑朗ほか、燃焼状況判別方法について、都市清掃、vol. 37, No 138, 30-32、1984/2
- 5) 黒崎泰充ほか、カラー画像処理技術を応用したごみ焼却プラント用自動燃焼制御(ACC)システム開発、川崎重工技報、vol. 90、1985/10
- 6) 平岡正勝ほか、ごみ焼却炉の自動燃焼制御とNO_x制御運転について、環境技術、vol. 8, No 12, 1130-1143、1979
- 7) 奥田澄雄ほか、三菱マルチンごみ焼却炉の自動制御システム、環境創造、43-49、1980/9
- 8) 井手義弘ほか、都市ごみ焼却炉の自動燃焼制御装置について〔第1報〕、都市と廃棄物、vol. 13, No 10, 42-50
- 9) 赤池弘次ほか、ダイタミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社、1983
- 10) 中村秀雄、火力発電所の最適制御に関する研究、九州大学工学部博士論文、1980
- 11) 藤原健史ほか、都市ごみ焼却炉のACCとAR制御の協調による蒸発量及びNO_xの同時制御に関する研究、環境衛生工学研究、vol. 1, 17-25、1987
- 12) 大西 巍ほか、ファジィ制御による都市ごみ焼却炉の燃焼方式の一案、第29回自動制御連合講演会講演集、545-546、1986