

流動床ごみ焼却炉の動特性解析とファジィ燃焼制御

宮本 裕一^{*}、横山 賢一^{**}、南部 栄一郎^{**}

^{*} 川崎重工業株式会社 技術開発本部
明石市川崎町1-1

^{**} 川崎重工業株式会社 エキスパート事業部
大阪市北区天神橋2-5-25

概要

熱プラントは多入力多出力系を構成しており、燃焼制御を精度良く行おうとすると対象の特性把握が重要である。しかし、ごみ焼却炉のように燃料性状が安定せず、かつ環境汚染物質の抑制が必要なプラントでは、センサ・制御技術を含めた総合的な視点からの最適化・効率化も要求される。特に、流動床ごみ焼却炉の場合、ストーカ炉に比べて燃焼完結時間が数分の一と短く、また層内燃焼プロセスが存在するため動特性解析による特性把握が有効である。このため、筆者らは運用中の流動床ごみ焼却炉を対象に、既設センサからの燃料供給状態の推論と空燃比制御をファジィシステムを用いて構成し、低CO・低NOx運転を実現した。さらに、数式モデルからなるシミュレータにより推論結果の評価・制御則の決定を容易とし、ファジィ制御の調整法を提案している。

キーワード

流動床燃焼 ごみ焼却炉 動特性 ファジィ 低CO運転 低NOx運転

1. はじめに

ごみ焼却プラントには、大別してストーカ炉と流動床炉があり、流動床炉は都市ごみをはじめとして、各種産業廃棄物、污泥、プラスチックなどの燃焼に優れた特性を有するため、最近各方面での採用が進んでいる。流動床炉の優れた特性の一つに燃焼速度が大きいことがあげられる。そのため、起動・停止が短時間で可能な反面、燃焼制御が難しく、ごみ特性の変化に対応した公害抑制技術の開発が課題となっていた。本報では、流動床ごみ焼却炉の動特性解析により低CO、低NOx運転を実現するための考察を行い、ファジィ燃焼制御を用いてごみ特性の変化を吸収することを提案し、実炉で実証した。

2. 解析モデル

流動床ごみ焼却炉は、図1のように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が、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ものである。また、不燃物は層内を沈降し、焼却残さとして砂粒とともに抜き出される。

これらの流動床ごみ焼却炉の特徴を考慮し、筆者らが石炭焚き流動床ボイラの開発時に作成した数学モデル¹⁾²⁾を基本として、以下の仮定のもとで解析モデルを作成した。

- ① 流動層燃焼部、フリーボード燃焼部、ガス冷却部の3部分に分け、エネルギーバランス、マスバランスを数式で記述する。
- ② ごみが層上部より供給されるためフリーボード燃焼も考える。
- ③ 供給されたごみは揮発分と固定分に別れ、固定分は層内での滞留を考慮する。
- ④ CO、NOx濃度は各部温度、空気比などを用いた実験式により記述する。

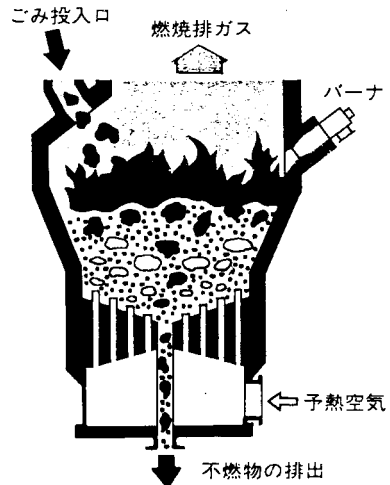


図1 流動床ごみ焼却炉の概念

この仮定に基づいたエネルギーバランスを図2に示し、エネルギー、マスバランスを式(2-1)~(2-4)とする。

$$d(C_B W_B + C_R W_R) T_a / dt = Q_R + Q_a + Q_c - Q_a + Q_{BI} - Q_{BO} - Q_P \quad (2-1)$$

$$Q_a + Q_J + Q_T = Q_U \quad (2-2)$$

$$Q_U = Q_{S0} + Q_L \quad (2-3)$$

$$dW_R / dt = K G_R - \eta W_R \quad (2-4)$$

- Q_c : 層内燃焼発熱量(kcal/h)
- Q_a : 層内供給空気顕熱(kcal/h)
- Q_T : 層上供給空気顕熱(kcal/h)
- Q_{SP} : ガス冷却水蒸発潜熱(kcal/h)
- Q_J : フリーボード部以降燃焼発熱量(kcal/h)
- Q_L : ガス冷却部以降排ガス顕熱(kcal/h)
- Q_a : 排ガス顕熱(kcal/h) T_a : 層温度(°C)
- Q_{BO} : 層物質抜き出し顕熱(kcal/h)
- Q_{BI} : 層物質持込み顕熱(kcal/h)
- Q_P : プラント水蒸発潜熱(kcal/h)
- Q_R : ごみ供給持込み顕熱(kcal/h)
- Q_U : 排ガス顕熱(kcal/h) K : 層内燃焼割合
- C_B : 層物質比熱(kcal/kg°C)
- C_R : ごみ比熱(kcal/kg°C)
- W_B : 層物質重量(kg) W_R : 層内ごみ滞留量(kg)
- G_R : ごみ供給量(kg/h) η : 層内燃焼速度(1/h)

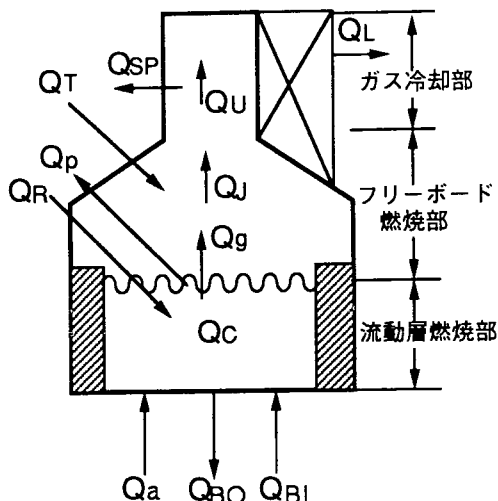


図2 エネルギーバランス

3. 実炉試験結果からの低CO・低NOx運転の条件

図3、図4は実炉運転データをCO、NOxに注目して種々の運転データとの相関関係を整理した結果の一例である。図3は炉出口ガスCO濃度(O₂12%換算)を、炉出口ガス温度T_fと層温度T_aとの差T_f-T_aとの間の相関を整理したものである。図3より、T_f-T_aを大とするほどCOが減少することがわかる。今、解析モデル上で低CO運転を考察すると、層内燃焼割合Kを大としてフリーボード部燃焼を抑制し、かつフリーボード部温度を高温に保つことが必要である。すなわち、ごみ供給量と発熱量のばらつきによるフリーボード部での即燃焼への影響(1-K)G_RをKを大とすることにより抑え、過負荷による過小O₂状態を回避することが効果があるものと考えられる。そのためには、層温度を低としてごみ投入口付近での燃焼を抑制してKを大とする必要がある。また、炉出口ガス温度を高として、一旦発生したCOを二次燃焼によりCO₂とすることも低CO運転に効果がある。これらにより、T_f-T_aを大とするほどCO低となることが理解できる。一方、NOx(炉出口ガス; O₂12%換算)は図4に示すように空気比λ(≒21/(21-o₂))との間に相関関係がある。図4の中で炉出口ガス温度T_f<885℃の範囲では低NOx運転が実現できており、これは供給ごみから生成した還元性ガスがNOxを含むガスと混合反応し、NOxを安定なN₂分子に変換する還元二段燃焼³⁾の効果であると考えられる。

以上の考察により低CO・低NOx運転を行うための炉出口ガス温度、層温度、空気比の条件が、目標とするCO、NOx値より決定できる。

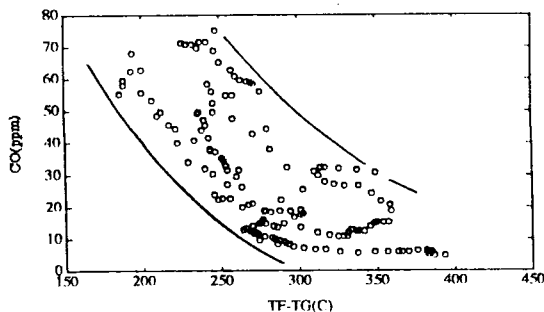


図3 CO濃度と温度差との相関

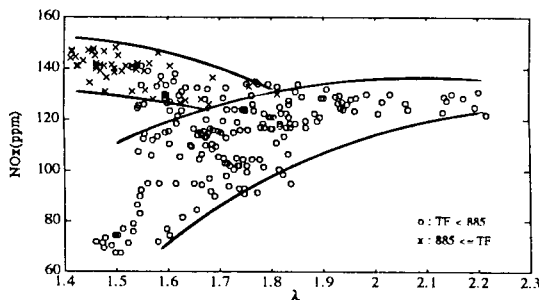


図4 NOx濃度と空気比との相関

4. ファジィ燃焼制御

前節で決定した低CO・低NO_x条件にて運転を行ってもごみ供給量や発熱量変動の吸収には限界がある。ごみ焼却炉の燃焼制御においては、このごみ供給量・発熱量の把握を如何にするかが常に課題となる。特に、流動床ごみ焼却炉の場合短時間での

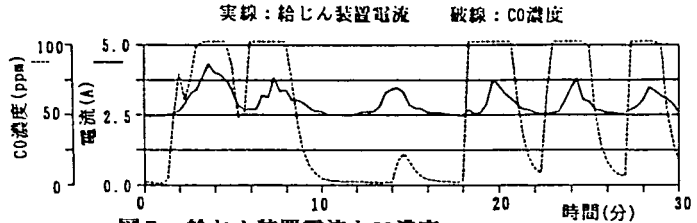


図5 給じん装置電流とCO濃度

瞬時燃焼割合が大きいため燃焼後の出力信号を捉えて行う制御は有効でない。そのため、焼却炉投入前の信号に注目してごみ供給特性の予測を行うことを試みた。実炉試験の結果、給じん装置電流が上昇して3~4分後にCO濃度が上昇するという相関関係が明らかになった。すなわち、図5は給じん装置電流(3分遅らせた値)とCO濃度の関係であるが、高い相関を示しており、これはごみ供給特性の突発的变化により燃焼用空気が不足したためと考えられ、給じん装置電流の変化に注目することにより、ごみ供給特性を推論することが可能であることがわかる。

そこで、前件部を給じん装置電流I(A)と回転数N(rpm)、後件部をごみ供給量としたファジィ推論により推定する。ここで、ごみ発熱量の変動もごみ供給量と絡括して推論することとする。表1にファジィルール、図6にメンバーシップ関数を示す。ファジィ推論は頭切り、重心法を用いた。⁴⁾ここに示したファジィルール、メンバーシップ関数の妥当性については、解析モデルでファジィ推論により得られたごみ供給量入力としてシミュレーションを行いシミュレーション結果と実炉試験データとの比較により検討した。図7はその一例であり、シミュレーション結果(破線)と実炉試験データ(実線)とはよく一致しており、解析モデルとごみ供給量のファジィ推論が妥当であることが確認できた。

表1 ファジィ推論ルール

N \ I	NS	Z	PS	PB
NS		NS		
Z	NS	Z	PS	PS
PS		PS		PB

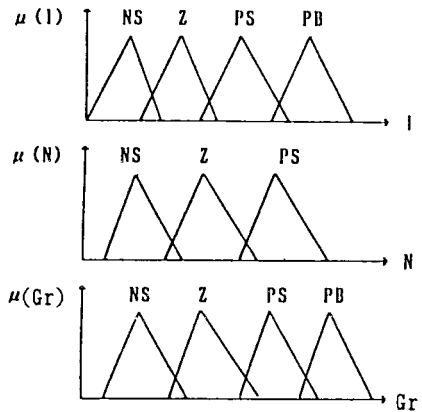


図6 メンバーシップ関数

ファジィ推論により、投入ごみ供給量を約3分前に予測可能なことから、図8のように予測結果に妥当な燃料・空気量補償を従来の燃焼制御系に付加し、低CO・低NO_x運転を可能とするファジィ燃焼制御系を構成した。ファジィシステムの良さは、熟練運転員の経験やカンなどの知識を最新の計算機制御に吸収、活用できることにあるとされてきた。しかし、計算機に入力した知識(メンバーシップ関数やルール)が正しいか否かは実際の運転に適用してみて、その評価を待つことが多く調整にも長時間を要していた。図8の構成を用いると、解析モデルをプラントシミュレータとして活用できることから、メンバーシップ関数やルールの調整のための試行錯誤をシミュレータで吸収し、調整効率を高めることが可能である。

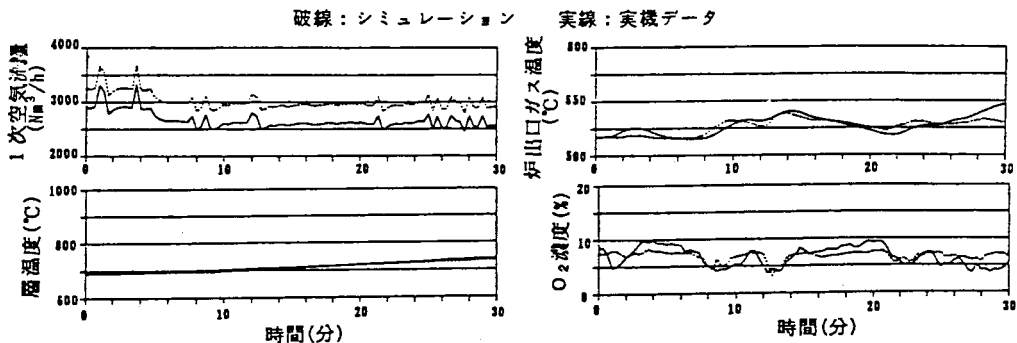


図7 1次空気流量、ごみ供給量変化試験

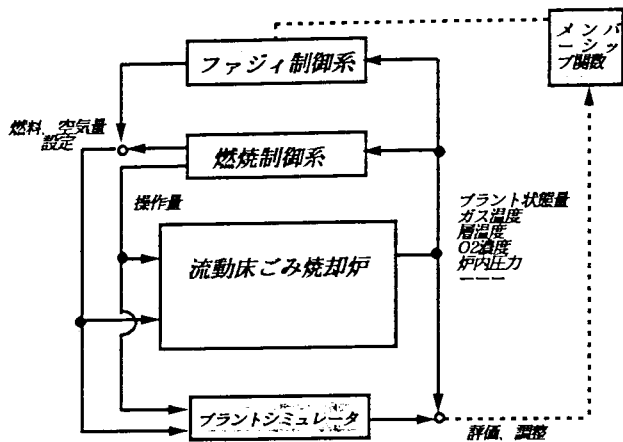


図8 流動床ごみ焼却炉ファジィ燃焼制御系の構成

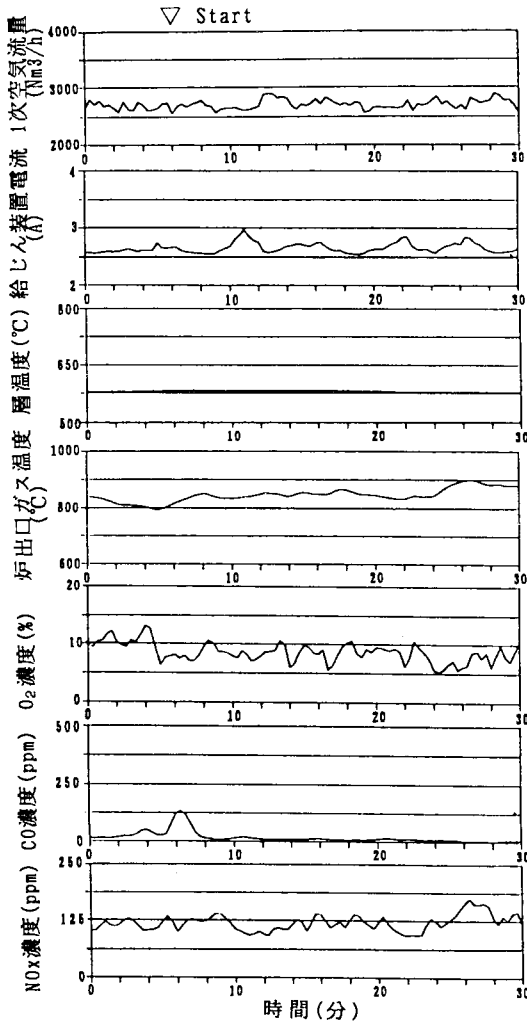


図9 ファジィ燃焼制御適用結果

図9はファジィ燃焼制御を適用した実炉での運用データの一例である。ファジィ制御投入後、給じん装置電流の変化に見られるように、ごみ供給量の変動を吸収すべく、燃料・空気量を操作して、低CO・低NOx運転を実現している。

5. おわりに

流動床ごみ焼却炉における低CO・低NOx運転をファジィ燃焼制御により実現した。ファジィ制御の適用については、産業界の様々な分野でその成果が報告されているが、制御対象の解析を進めた上で従来のシステム制御技術との融合を図るのが効果大きい。特に、流動床ごみ焼却炉の場合、多入力多出力系を構成しており、燃焼制御を精度良く行おうとすると対象の動特性解析による変数間の関係把握が有効である。⁵⁾ 本報では、解析過程で得られたシミュレーションモデルをファジィ制御におけるメンバーシップ関数の調整にも用いてその有効性を示した。

今後、開発した解析手法・システム制御技術のごみ焼却炉への適用を通して、燃焼制御技術の向上に寄与する考えである。

参考文献

- 1) 黒崎、大久保、八木、宮本他：流動床ボイラの動特性と制御、火力原子力発電 Vol. 34 No. 1 (1983)
- 2) K. Tsutsumi, Y. Kurosaki, Y. Miyamoto, & Y. Kohno: Dynamic Characteristic of a Fluidized Bed Combustion Boiler — Combustion Rate and Fluctuation in Bed Temperature—, The Tenth International Conference on FLUIDIZED BED COMBUSTION "FBC TECHNOLOGY OF TODAY" (1989)
- 3) 明石、野津、南部、黒崎、宮本他：ごみ焼却炉の自動燃焼制御とNOx抑制運転について、川崎重工技報73号 (1980)
- 4) 横山、藤山、高田、宮本、下川：流動床炉のCO抑制燃焼技術、機械学会環境工学総合シンポジウム (1992)
- 5) 宮本、西野、林、原田：熱プラントへのファジィ制御の適用、ファジィ学会誌 Vol. 3 No. 2 (1991)