

ファジィ制御を利用した都市ごみ焼却炉の燃焼制御

Combustion Control System Applying Fuzzy Control for Refuse Incineration Plant.

奥 秀一
Shuichi Oku

(株)荏原製作所・環境プラント事業部/〒108 東京都港区港南1-6-27
Environmental Plant Division.
EBARA corporation/1-6-27 Kohnan, Minatoku, Tokyo 108, Japan

Abstract

Recently, dioxins in exhaust gas of a municipal refuse incineration plant that emitted to the environment has become social problem. Achievement of complete combustion is effective for reducing dioxins, because dioxins are substantially a kind of unburnt substance. Therefore, we need to develop combustion control for reducing carbon monoxide (CO) which is one of the index for complete combustion and other pollutants in exhaust gas. Then we supplied a city with Fuzzy Auto Combustion Control (Fuzzy ACC) as a new combustion control method for municipal refuse incineration plant. As a result, Fuzzy ACC realize the stable operation (especially CO density represents) for 12~24 hours without operator's manipulation. Usually ACC is made of calculative formula, so we had consumed much time in order to set up ACC parameters. On the other hand, we can easily set up fuzzy rules through a veteran operator's knowledge in Fuzzy ACC. Moreover immediately after we change fuzzy rules and so, we can examine the condition of combustion control by the hitting rules and the results of fuzzy inference. Consequently, Fuzzy ACC is one of a new technique to our ACC.

Key words : fuzzy control, municipal refuse incineration plant, dioxins, veteran operator, fuzzy rules

1. はじめに

ダイオキシンを初めとした排ガス中の微量有害物質については規制が厳しくなる傾向にあり、都市ごみ焼却炉においては厳密な完全燃焼が要求され、それに対応した燃焼制御が必要になっている。

都市ごみ焼却炉の燃焼制御では、ごみ質の変動等引起的燃焼状態の変動をとらえ、常に最適な燃焼空気量と、最適なごみ供給量の設定制御を行う必要があり、いわゆるごみの安定燃焼制御には、これらの設定制御を確実に行うことが必要不可欠となる。しかしながら、運転員にとって、一定短時間周期で焼却炉の多くのプロセス測定値を把握し、常に最適な燃焼空気量と、ごみ供給量の設定を手動で行うことは非常に困難な作業である。こ

れら操炉作業の負担を軽減させるには、熟練した運転員が行っている操炉作業を踏襲した燃焼制御の自動化をしなければならない。しかし、熟練した運転員の操炉作業は、過去の経験に基づく制御規則に従ってその時々判断を下すが、その判断も数値的に厳密なものではなく、大体のレベルとか傾向といった対象の動特性に関するおおまかな認識に基づいていることがほとんどである。

以上のことを加味した自動燃焼制御には、ファジィ制御が適していると考え、ファジィACCの開発を行った。これにより安定燃焼制御を達成し、運転員の操炉作業の負担を軽減し、微量有害物質の排出も最小限にすることを目的としている(図1参照)。

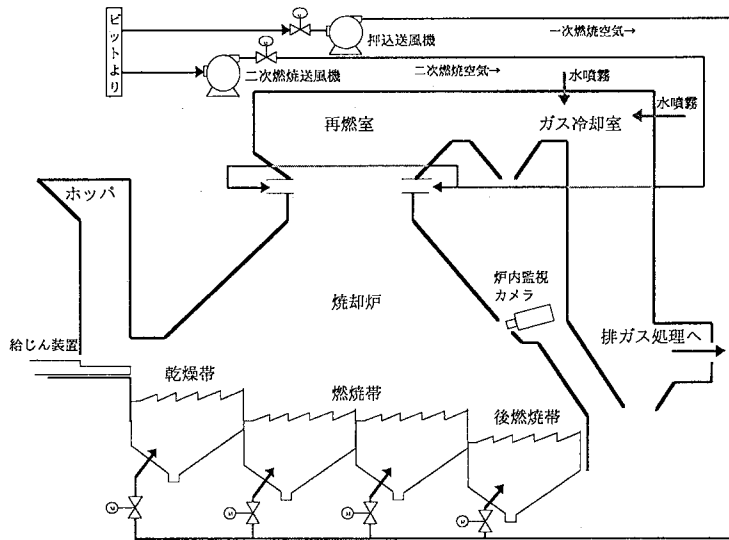


図1 プラントの概略フロー図

2. 都市ごみ焼却炉の操炉方法と燃焼制御

近年の都市ごみ焼却炉における監視制御システム的方式として、コンピュータ（DCS）による自動制御方式となっており、運転員が運転状況を炉内監視カメラからの映像やDCSの画面上での各プロセスデータの表示から判断し、画面上（タッチパネル操作）でプロセスの設定値の変更やダンパの開閉等の操炉操作を行う。

そこで熟練した運転員がごみの安定燃焼制御を目指す場合、主にごみの燃焼状態のどのような部分を監視し、操炉を行うかを120トン/1日の焼却炉2炉を用い検証した。

以下では運転員が操炉操作を行うときに、どのようなプロセス状態に注視しているかを列記した。

- (1) 焼却炉出口の排ガス温度
- (2) ストーカ上での燃焼完結点（燃焼燃え切り点）
- (3) 各ストーカ上のごみ層圧（特に乾燥ストーカと、燃焼ストーカ）
- (4) ガス冷却室出口ガス温度
- (5) 排ガス中の O_2 、CO濃度

上記のような燃焼状態から、その状態が常に運転員が適切であるという範囲に収めるために主に以下のような操作を行っている。

- (A) 燃焼空気として、ストーカ下部から炉内に供給す

る一次燃焼空気量の設定

- (B) 主に未燃焼ガスの再燃焼用として、炉出口付近で炉内に供給する二次燃焼空気量の設定

- (C) 炉内へごみを供給する給じん装置の駆動速度の設定

- (D) 乾燥ストーカの駆動速度の設定

- (E) 燃焼ストーカの駆動速度の設定

このように熟練した運転員の操炉方法を把握すると、多数の入力値を総合的に判断し多数の設定値の変更（出力操作）といった作業を行う。このような多入力多出力制御にはファジィ制御が適していると考え、以下のように適用を試みた（図2参照）。

3. 燃焼制御へのファジィの適用方法

3.1 燃焼空気量

ファジィ演算により最適な燃焼空気量の設定を与える際、以下の項目をファジィへの入力、つまり前件部としている。

- (1) 排ガス O_2 濃度の予測値を算出し、その予測値と設定値の偏差
- (2) ガス冷却用の水噴射水量の予測変化率
- (3) 炉出口ガス温度の予想値を算出し、その予測値と設定値の偏差

(4) ガス冷却室出口温度の予測値を算出し、その予測値と設定値の偏差

その出力先は上記(1)、(2)、(3)を前件部とした、ファジィ1による(S1)総燃焼空気量の設定値(一次燃焼空気量と二次燃焼空気量の設定値の和)及び上記(1)、(3)、(4)を前件部とした、ファジィ2による(S2)二次燃焼空気量の設定値としている(図3参照)。

3.1.1 総燃焼空気量

(S1)への変更において、(S1)は一次燃焼空気量と二次燃焼空気量にある比率で振り分けられているので、ファジィ1の出力によって一次燃焼空気量と二次燃焼空気量の設定値を変更することとなる。これは、ごみを燃焼させるため炉下から吹き込む一次燃焼空気と、未燃焼ガスの再燃焼用として吹き込む二次燃焼空気の量をあらかじめ設定している比率を保ったまま、設定変更を行う

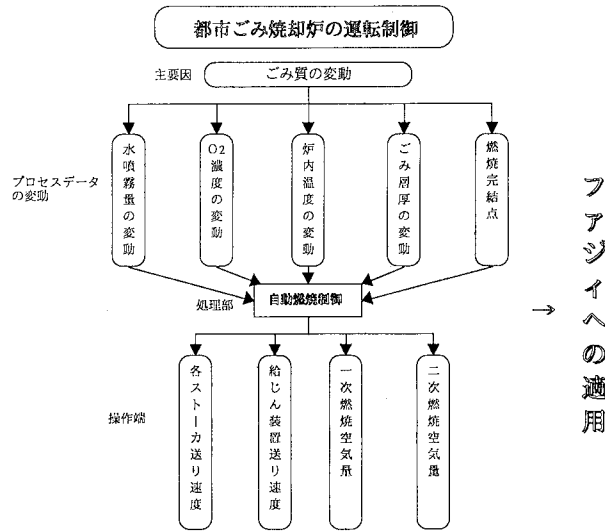


図2 燃焼制御の概念図

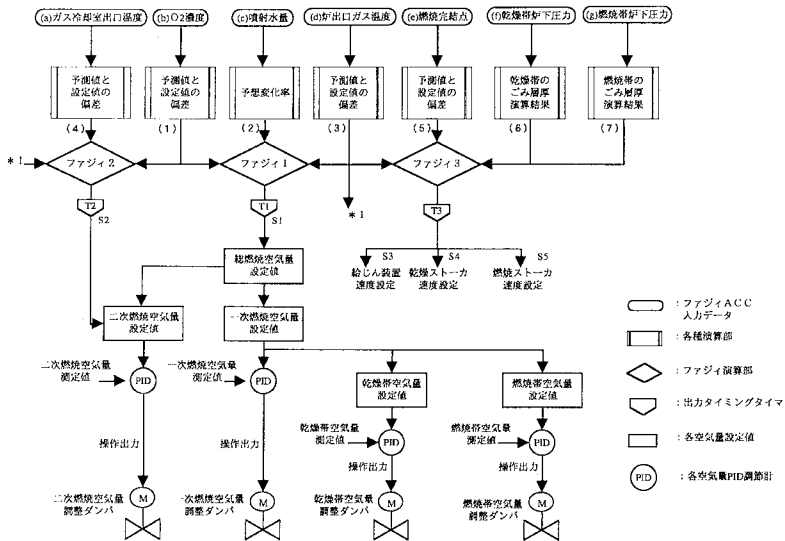


図3 制御フローの概略図

という制御方法である。

さらに、一次燃焼空気量は、乾燥ストーカ下部より供給する空気と燃焼ストーカの下部より供給する空気としてある比率で振り分けられるので、(S1)への出力はこれらの空気量の比率も保ったままその設定値を全て変更することになる。

また、上記の各空気量の比率はファジィACCの起動中であっても、運転員の介入操作によりその変更ができるようになってきている。

3.1.2 二次燃焼空気量

(S2)への変更において、(S2)はファジィ1の出力と同時に振り分け比率により自動的に変更されるが、ファジィ2の出力でさらに細かく変更を行う制御方法である。よって、燃焼空気量へ最適な設定値を与える制御とは、一次燃焼空気量と二次燃焼空気量の空気比率を保ったまま、そのとき燃焼しているごみの要求する総燃焼空気量を設定することと、その後発生した排ガス中に含まれる未燃焼ガスを完全に燃焼させるために、さらに細かく二次燃焼空気量の設定をすることである。

3.2 ごみ供給量

ファジィ出力により最適なごみ供給量の設定を与える際、以下の項目をファジィの入力、つまり前件部としている。

- (3) 炉出口ガス温度の予想値を算出し、その予測値と設定値の偏差
- (5) 燃焼完結点の予測値を演算し、その予測値と設定値の偏差
- (6) 乾燥ストーカ上のごみ層厚
- (7) 燃焼ストーカ上のごみ層厚

その出力先は上記の項目全てを前件部としたファジィ3による以下の項目となる。

- (S3) 給じん装置の駆動速度の設定値
- (S4) 乾燥ストーカの駆動速度の設定値
- (S5) 燃焼ストーカの駆動速度の設定値(図3参照)

3-2-1 給じん装置の駆動速度

給じん装置はホッパから投入されたごみを炉内へ最初に送り込む装置である、(S3)の変更をごみ質にうまく対応させ、ごみの送り量を適切にすることが後のストーカ上での燃焼状態を良くする最大の要因となる。特に(3)、(6)の入力が(S3)への変更出力の大きな要因となるように制御規則の設定がなされている。

3.2.2 乾燥ストーカの駆動速度

給じん装置からのごみはまず乾燥帯ストーカ上に送られ、ここで十分乾燥されつつ次の工程へ送られねばならない、ここでは十分にごみの乾燥が行われるように(S4)の変更を適切に行う必要がある。特に(3)、(6)、(7)の入力が(S4)への変更出力の大きな要因となるように制御規則の設定がなされている。

3.2.3 燃焼ストーカの駆動速度

乾燥帯ストーカで十分乾燥されたごみは燃焼帯ストーカ上へ送られ、燃焼帯上の設定された位置で燃焼の完結点(燃え切り点)が得られるように、(S5)の変更を適切に行う必要がある。特に(3)、(5)、(7)の入力が(S5)への変更出力の大きな要因となるように制御規則の設定がなされている。

3.3 制御フロー概要

図3において、最上部(a)~(g)は、次の段階で各種演算を行うために、ファジィACCに取り込まれる測定値である。ファジィ1、2、3の出力はそれぞれT1、T2、T3の設定変更タイミングタイマを保有しており、全て変更タイミングが同時にならないようにその間隔が決められている。同時になった場合、悪影響となる可能性があるからである。このタイミングタイマをそれぞれの操作端の特性に合わせた制御周期にすることも、重要なチューニングの対象となる。また、図のPIDとは各燃焼用空気量のPID調節計を表している。

4. ファジィ制御の機能

今回採用したファジィ制御ソフトは、自動制御を行っているDCSの標準のパッケージソフトであり、以下の機能を有している。

- (1) 最大128通りの制御規則を登録できる。
- (2) 制御規則及び前件部、結論部のメンバーシップ関数は、オンライン、リアルタイムで変更できる。
- (3) オンライン、リアルタイムで推論結果を見ながら制御規則等のチューニングが可能である。

今回のファジィ制御用に設定を行った、前件部メンバーシップ関数、結論部メンバーシップ関数、制御規則の一部を図4に示す。ファジィACCのパラメータの調整では、特にこのファジィ制御規則の設定において、いかに熟練運転員のノウハウを反映することができるかが鍵となる。

図5は、ファジィの推論状況を表示する画面の一例である。この画面において現在のプロセス状況におけるファジィ演算の出力の結果（ファジィ推論状況）と、そのとき適合した制御規則の表示をする。制御規則等のパラ

メータを変更しその直後に、出力状況とその制御規則の適合度がどの程度であるかを、この画面により検証を行うことができる。

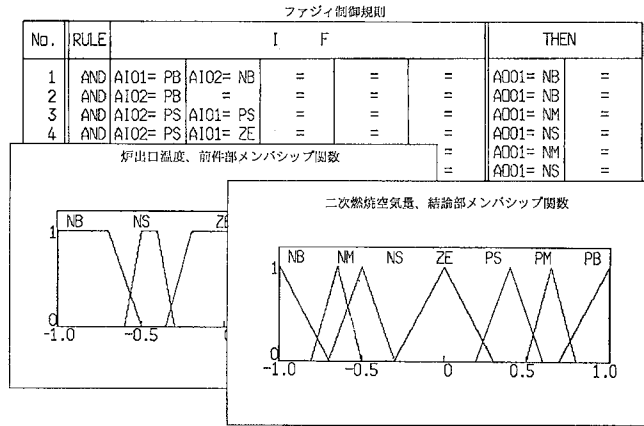


図4 ファジィ制御規則とメンバーシップ関数

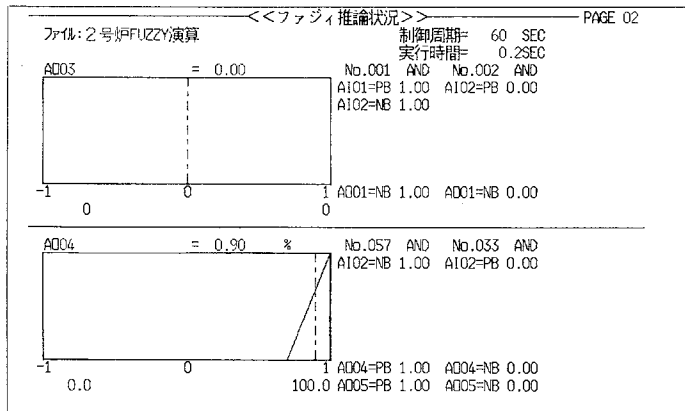


図5 ファジィ推論の状況表示画面

5. 本制御におけるファジィの出力とその効果

5. 1 ファジィ演算による出力状況

図6はファジィの演算結果により、自動的に各空気量の設定値がそれぞれ設定されたタイミングで変更されている様子を示している。

図7では同様に、給じん装置、乾燥ストーカ、燃焼ストーカの駆動速度が、設定されたタイミングで自動的に変更している様子を示している。

これらのことから、ファジィ制御によりあたかも熟練した運転員が細かく最適な空気量の設定を行い、最適なごみ供給量の設定を行っているように制御される。

5-2 ファジィ演算による運転状況

図8、図9はファジィACCの試運転中（ファジィ制御規則等のチューニング中）にファジィACCを使用しない運転管理とファジィACCによる自動運転とを、排ガス中に含まれるO₂濃度、CO濃度について比較した

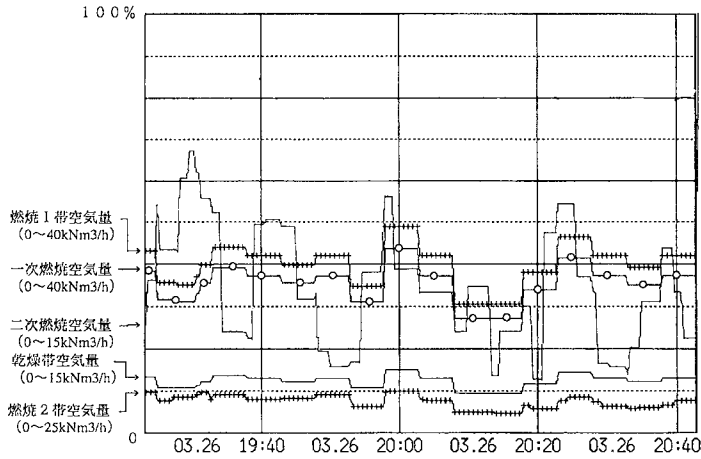


図6 ファジィ出力による燃焼空気の自動変更状況

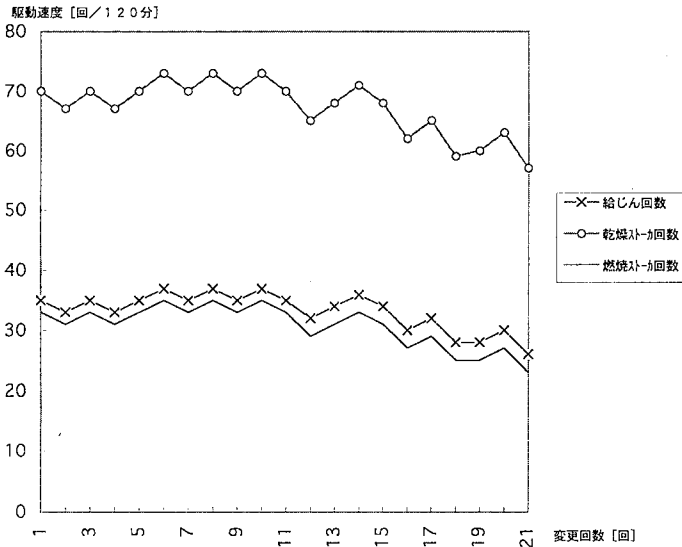


図7 ファジィ出力による給じん、各ストークの駆動速度の自動変更状況

グラフである。この比較では1号炉をファジィACCによる運転とし運転員による介入操作が行われる18時間程度までのグラフを表し、2号炉をファジィACCを使用しない運転管理であり、空気量の設定はその都度、運転員の判断によりPID調節計の設定空気量を変更し、給じん装置及び各ストークの速度設定も同様に運転員による判断で、その回数を変更している。なお、この比較は

同時刻に行ったもので、ごみ質等の条件はほぼ同様と考えられる。

今回の比較で特に安定していたのはO₂濃度であり、CO濃度もファジィACCによらない運転管理よりもファジィACCによる運転の方が、低いレベルで変動幅の少ない安定した推移を見せた。これにより安定燃焼制御が達成されていることが判る。

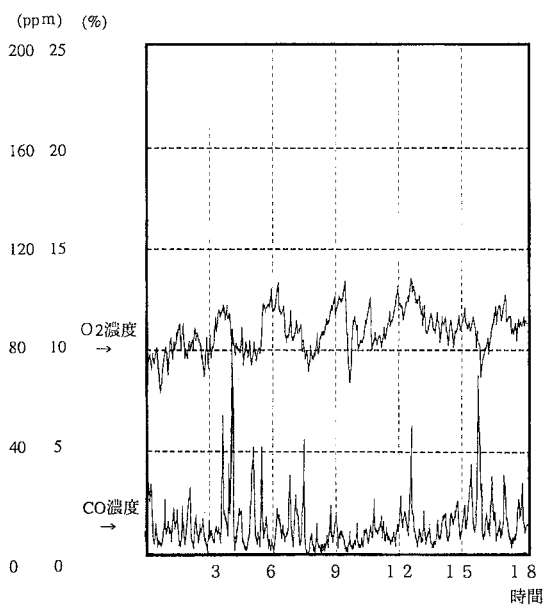


図8 ファジィACCを使わない運転管理

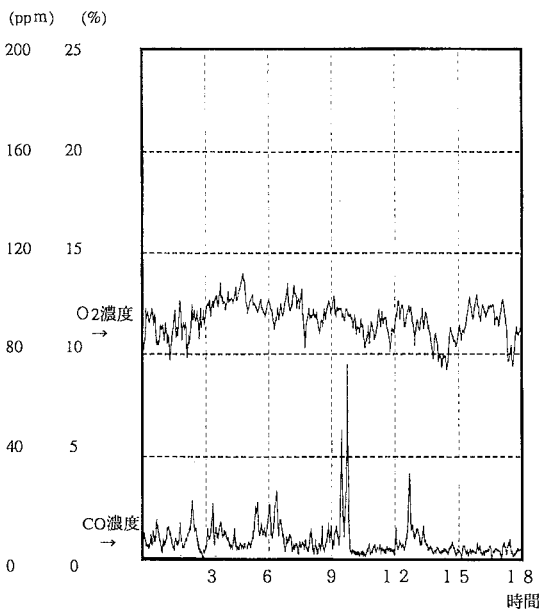


図9 ファジィACCによる運転

また、ファジィ推論による運転では12~24時間程度の間は、オペレータの介入操作が全くなくても比較的安定した燃焼状態を保つことができ、運転員の操炉作業の軽減がはかれることにもなり、さらにCO濃度に見ることができるよう微量有害物質の排出も抑制されている。

ただし、今回の運転はごみ質が比較的安定した冬の季節において行われているので、ごみ質の季節変動がはげしい夏の季節を加味したファジィ制御規則の設定を今後行う必要がある。

6. まとめ

今回の実証炉による運転結果から、都市ごみ焼却炉のファジィ制御による燃焼制御システムが有効であることが実証できた、また今後の課題としては以下のようなことが考えられる。

- (1) 更にデータを採取しファジィ推論の制御規則等の充実を図る。

- (2) ファジィ制御規則等の自動チューニング技術の開発。
- (3) 燃焼制御について、様々なファジィの適用方法を開発する。

特に上記(3)については今回のようなファジィ制御の適用の仕方以外にも、以下のような適用方法が考えられる。

- (1) ごみ層厚等の不確定要素の大きい入力値に対してファジィ推論を適用し、その結果を更にファジィ制御の入力値として利用する。
- (2) 燃焼状態がある範囲を越えたときのみファジィ制御を適用するといった、不連続な利用方法。
- (3) ファジィ制御の出力先をPID調節計のパラメータの補正出力とする利用方法。

その他、多くの適用方法の可能性はあるが、我々は今後とも上記のことを加味し、また都市ごみ焼却炉のみでなく他の焼却プラント等への適用を模索していく所存である。

(受付 1996.12.17)

(受理 1996.2.13)