

---

製鉄プロセス制御へのファジィ理論の適用

Application of Fuzzy Theory to Ironmaking Process Control

牧 勇之輔(Yunosuke Maki) 高島 暢宏(Nobuhiro Takashima) 小幡 昊志(Hiroshi Obata) 飯田 修(Osamu Iida) 中島 一磨(Kazuma Nakashima) 沢田 寿郎(Toshiro Sawada)

---

要旨：

製鉄プロセスのうち、焼結工場における幅方向均一焼成制御と熱風炉における燃焼ガス量の設定制御にファジィ制御を適用した。熱結工場のファジィ制御システムでは、パレット幅方向の熱成速度を、5分割されたサブゲートを用いて、原料の充填密度を変化させることによって制御する。その分布は同方向に配置された排ガス温度計で検出する。結果として熱成の均一性が向上した。熱風炉のファジィ制御システムでは、燃焼ガスの量とカロリーを各炉の残熱量とレンガ温度分布を観測することによって制御する。結果として熱風炉のレンガ温度分布のばらつきが減少し、熱効率が向上した。

---

Synopsis：

In ironmaking process, Kawasaki Steel has developed a uniform burning control system in the pallet width direction of the sintering machine and a set-point control system of hot stove combustion by applying fuzzy control. In the fuzzy control system of the sintering machine, burning speed in the pallet width direction is controlled by varying filling density using the 5-split sub-gates. The distribution is detected by observing the waste gas temperature with thermometers installed in the same direction. It resulted in the improvement of uniform sintering. In the fuzzy control system of hot stove, combustion gas flow rate and calorie are controlled by observing the residual heat value and the brick temperature distribution of each stove. As a result, brick temperature dispersion has been decreased and hot stove thermal efficiency increased.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Application of Fuzzy Theory to Ironmaking Process Control



牧 勇之輔  
Yunosuke Maki  
千葉製鉄所 設備技術  
部 電気・計装技術室  
主査(掛長)



高島 暢宏  
Nobuhiro Takashima  
千葉製鉄所 製鉄部製  
鉄課 主任部員(掛長)



小幡 昊志  
Hiroshi Obata  
千葉製鉄所 製鉄部長



飯田 修  
Osamu Iida  
水島製鉄所 電気・計装  
部 電気・計装技術室  
主査(掛長)



中島 一磨  
Kazuma Nakashima  
水島製鉄所 製鉄部製  
鉄技術室 主査(課長  
補)



沢田 寿郎  
Toshiro Sawada  
水島製鉄所 製鉄部製  
鉄技術室 主査(掛長)

要旨

製鉄プロセスのうち、焼結工場における幅方向均一焼成制御と熱風炉における燃焼ガス量の設定制御にファジィ制御を適用した。焼結工場のファジィ制御システムでは、パレット幅方向の焼成速度を、5分割されたサブゲートを用いて、原料の充填密度を変化させることによって制御する。その分布は同方向に配置された排ガス温度計で検出する。結果として焼成の均一性が向上した。熱風炉のファジィ制御システムでは、燃焼ガスの量とカロリーを各炉の残熱量とレンガ温度分布を観測することによって制御する。結果として熱風炉のレンガ温度分布のばらつきが減少し、熱効率が向上した。

Synopsis:

In ironmaking process, Kawasaki Steel has developed a uniform burning control system in the pallet width direction of the sintering machine and a set-point control system of hot stove combustion by applying fuzzy control. In the fuzzy control system of the sintering machine, burning speed in the pallet width direction is controlled by varying filling density using the 5-split sub-gates. The distribution is detected by observing the waste gas temperature with thermometers installed in the same direction. It resulted in the improvement of uniform sintering. In the fuzzy control system of hot stove, combustion gas flow rate and calorie are controlled by observing the residual heat value and the brick temperature distribution of each stove. As a result, brick temperature dispersion has been decreased and hot stove thermal efficiency increased.

1 緒 言

近年、人間の定性的であいまいな評価や判断を数値的に扱うことのできるファジィ(あいまい)理論<sup>1)</sup>が脚光を浴びている。なかでもファジィ制御は、経験的制御知識をプロダクションルールの形で表現し推論することにより、プラントを制御しようとする方法であり、従来難しいとされてきた非線形な系、厳密な数学モデルを作りにくい系、動特性の変動する系などが制御対象として適しているといわれている。ファジィ制御の実プラントへの適用事例も急激に増加する傾向にあり<sup>2,3)</sup>、当社でもいくつかのプロセス制御分野にファジィ制御を適用してきた。

本論文では、製鉄所への製鉄プロセスにおける2つの事例<sup>4,5)</sup>を紹介するとともにファジィ制御の有効性や今後の課題について述べる。

2 焼結均一焼成制御への適用<sup>4)</sup>

2.1 プロセス概要と従来の問題点

焼結プロセスは高炉用原料の前処理工程の1つであり、その概要を Fig. 1 に示す。原料槽から切り出された鉱石等の原料は、ミキサーで混合された後、給鉱槽へ運ばれ、ドラムフィーダーによって焼結機のパレット上に給鉱される。パレット上の原料は点火炉で表面に着火され、原料中の粉コークスが燃焼、発熱することにより焼結反応が起こる。焼結反応は空気の吸引によって原料の上層から下層へ焼給機の移動とともに進行していく。これを焼成過程と呼び、焼結鉱の品質を安定させ、かつ製造コストの低減を図るためには、焼結機の長手方向および幅方向で焼成速度を均一に保つ必要がある。長手方向では、焼成が完了する点(BTP: Burning Through Point)を排鉱部に近づけるとともに、幅方向では焼成完了点のばらつきを少なくすることが望ましい。

従来、長手方向に対する制御は実施されていたが、幅方向の均一焼成制御は、制御に必要な操作端および検出端の問題や制御方法が

\* 平成2年4月19日原稿受付

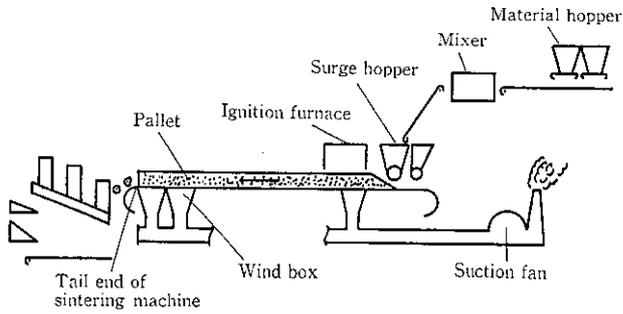


Fig. 1 Sintering process

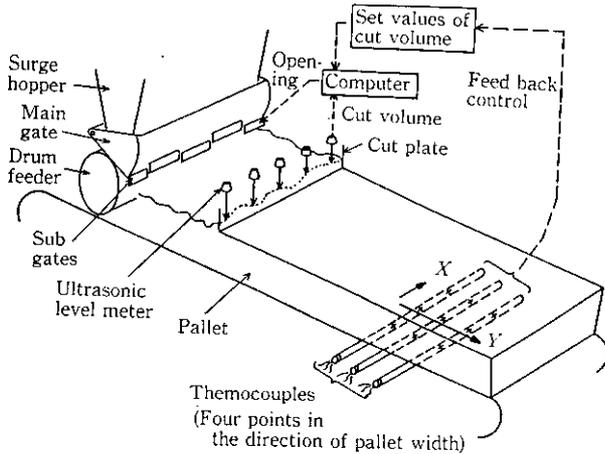


Fig. 2 Burning speed control system in the direction of pallet width

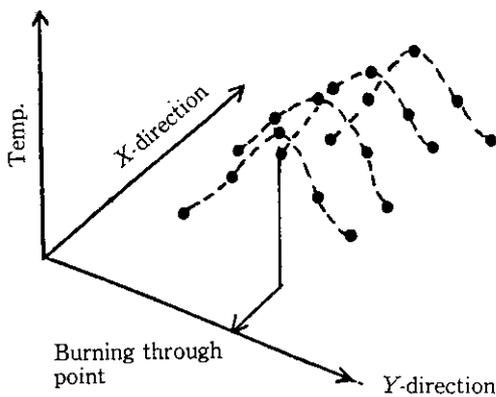


Fig. 3 Waste gas temperature distribution

難しいことから、あまり実施された例がなかった。当社水島製鉄所第3焼結工場では、この幅方向均一焼成制御にファジィ制御を適用することを試みた。

Fig. 2 に均一焼成制御の概要を示す。焼成完了点の位置および焼成の幅方向における均一性を見るために、パレット直下に幅方向4点、長手方向5列にわたって排ガス温度計を設置し、幅方向4点の温度のばらつきを均一焼成の指標とした。Fig. 3 に現状の排ガス温度のばらつきの例を示す。焼成速度の幅方向の分布は、原料の充填密度を幅方向にわたって変化させることによって操作される。充填密度は、カットプレートと呼ばれる原料表面を均一にする板の盛上がり量（カット量）によって表される。このカット量は手前に設置した5台の超音波レベル計で測定され、ドラムフィーダーから原料

切出し量を調節する5分割サブゲートによって操作される。

## 2.2 ファジィ制御系の構成

均一焼成制御系の構成は Fig. 4 のようなカスケード制御系となっている。2次側はサブゲートを操作端とした焼結機幅方向の充填密度（カット量）制御であり、サンプルPI制御をDDCで構築している。1次側が本制御系の中心となる部分であり、焼成速度の幅方向のばらつきを前記排ガス温度計を用いて検出し、ファジィ制御則によりばらつきが小さくなるように、幅方向充填密度制御システム設定値を出力する。この制御対象は無駄時間が40分前後あるうえに、多入力多出力の複雑な相互干渉系であるため、従来の制御方法では難しいと判断し、オペレータの経験則を用いたファジィ制御を適用した。1次側はすべてプロセス計算機を用いて構築した。

ファジィ制御に用いたファジィ集合は入出力共通で下記の7通りであり、Fig. 5 のような山型のメンバシップ関数をそれぞれの入出力項目ごとに定義した。7つのファジィ変数は次のような意味をもつ。

- NB: Negative Big
- NM: Negative Medium
- NS: Negative Small
- ZO: Zero
- PS: Positive Small
- PM: Positive Medium
- PB: Positive Big

ファジィ制御の入力は、まず長手方向で平均排ガス温度が最大とな

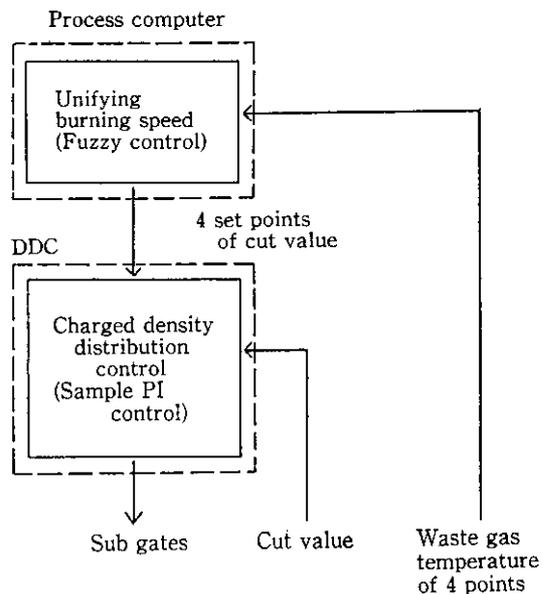


Fig. 4 Configuration of burning speed control

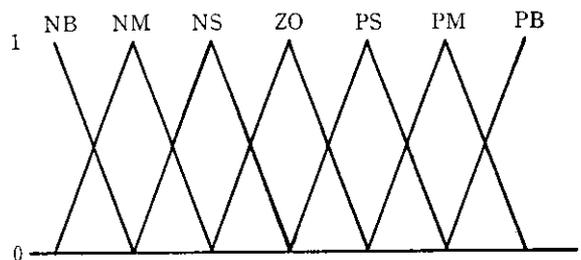


Fig. 5 Membership function

る位置を焼成完了点とみなし、その幅方向温度4点について平均値からの偏差を計算したものをを用いた。出力は、カット量が5点存在するが、中央のカット量を基準としてそこからのカット量差を操作しているの、実質的には4点ある。

ファジ制御はプロダクションルール形式で以下に例を示す。  
 if (温度計1の偏差がPB) then (カット量1をNBとする) …  
 …(カット量4をNSとする) …………… (1)

前件部 (IF 推論部) は幅方向4点の温度のうち前記偏差が最も大きい点を制御するようにした。ルール数は合計28個である。

2.3 制御結果

シミュレーションによって機能確認を行った後、本制御を実プロセスに適用した。その制御結果を Fig. 6 に示す。幅方向4点の排ガス温度の最大値と最小値を長手方向にトレースしたもので、本制御実施前の手動制御と実施後の自動制御において、幅方向温度のばらつきを比較した。自動制御によって幅方向のばらつきが長手方向各点で小さくなっており、焼成速度の均一性が向上していることがわかる。本制御は1987年5月よりオンライン稼働を続けている。

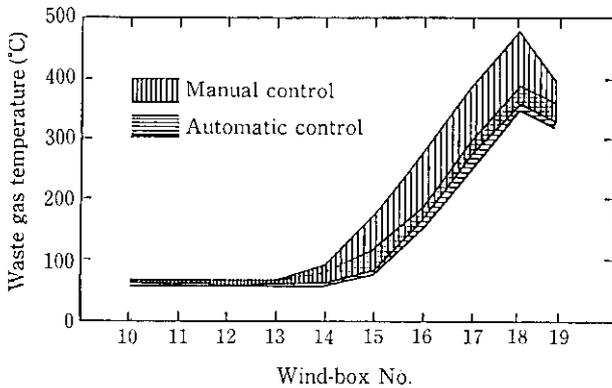


Fig. 6 Comparison of temperature differences in four measuring points between in manual and automatic controls

3 熱風炉燃焼制御への適用<sup>5)</sup>

3.1 プロセス概要と従来の問題点

熱風炉は、高炉へ熱風を供給する蓄熱型の熱交換装置である。通常3基ないしは4基で構成され、燃料ガスを焼成し、レンガを加熱昇温する燃焼期と、高温になったレンガに冷風を通し、高炉へ一定温度の熱風を供給する送風期とがあり、それを交互にくり返す操作を行っている。

Fig. 7 に千葉製鉄所第6高炉における燃焼期のプロセスフローと制御システムを示す。燃料ガスとしてはBガスとCガスを混合したMガスを使っているが、炉ごとの熱レベル偏差を調整するために、2次的にCガス (2次Cガス) をさらに添加できるようになっている。Fig. 8 は2基の炉によるパラレル送風の概念図である。送風温度は2基送風の場合、それぞれの炉を通過する風量を冷風調節弁 (CB) によって調節し、制御する方法が一般的である。また、熱風炉の蓄熱室要素には珪石レンガが用いられており、その上端温度をドーム温度、下端温度を珪石境界温度と呼んで管理している。

熱風炉の理想的な操業は、設備保護の観点から蓄熱レンガの温度分布を管理しながら、より少ないガス量で所定の温度まで空気を昇温し、エネルギーコストを最小にするところにあつて、そのポイントは燃焼期の燃料ガス量をいかに最適値に設定するかにある。特に、900°Cを割るような低送風温度操作を行っている第6高炉では、送風温度を維持するのに必要な最低限の熱量管理だけでなく、珪石レンガの変態点 (350°C以下) での体積膨張によるクラック発生防止のために、送風末期の珪石境界温度下限に限界値をもうけるとともに、ガスの未着火防止のために同じく送風末期のドーム温度下限に限界値をもうけて投入熱量を管理する必要がある。従来、熱風炉燃料ガス量の自動設定をする場合、炉ごとの熱収支を多くの計測データをもとに計算し、蓄熱レンガの送風終了時点の蓄熱量 (残熱量) を求め、それをもとに設定する方法が必要と考えられていた。しかし、計算による残熱量推定とレンガ温度分布制御の双方を

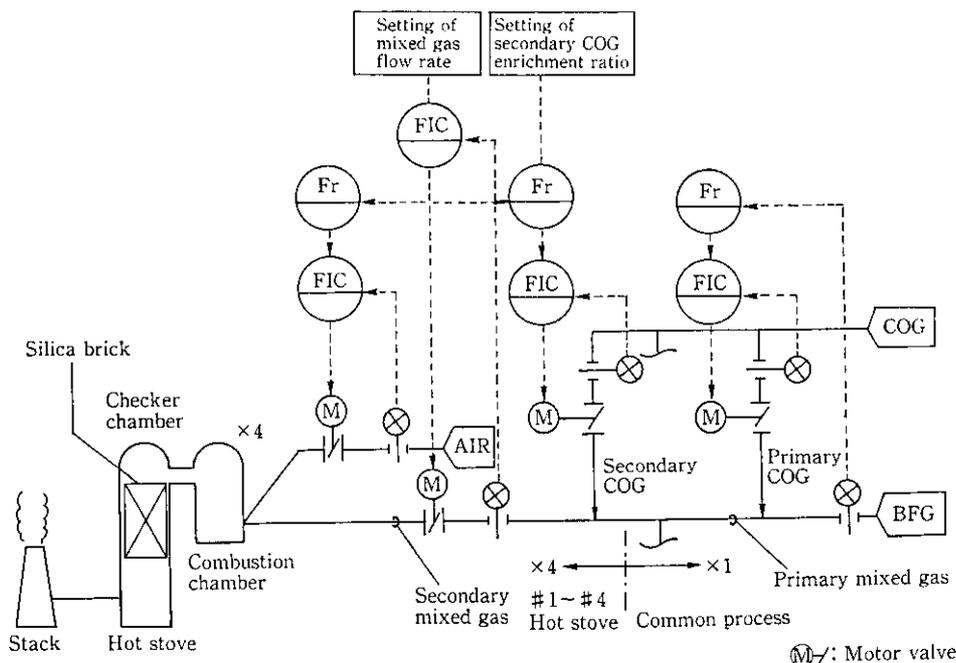


Fig. 7 Flow diagram of hot stove combustion process and its control system

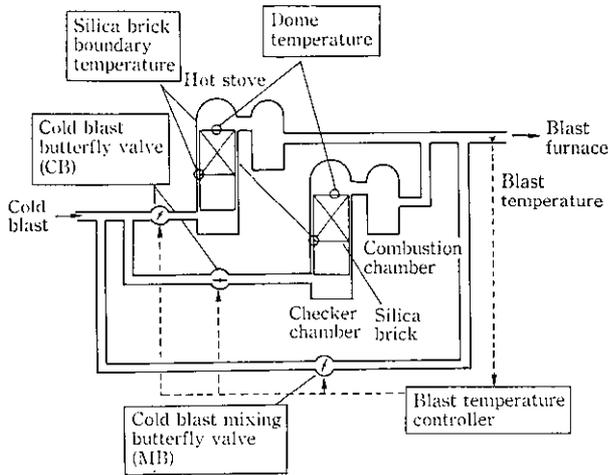


Fig. 8 Blast temperature control system in the parallel blast-ing operation

満足する精度の良い数式モデルがなく、燃焼ガス量の設定は送風から燃焼に切り換わるたびごとに手動で行われていた。定量的指標がなく、そのためアクションのばらつきも大きくなり、一方でオペレータの負荷も高いという問題点があった。燃焼ガス量の設定が多次元の観測情報と熟練オペレータの経験的知識をベースにしているところに着目し、燃焼ガス量の設定にファジィ制御を適用することを試みた。

3.2 ファジィ制御システム

千葉製鉄所第6高炉では、Mガス量とそれに富加される2次Cガスの比率を炉ごとに調整することができる。ガス流量制御系はすでにDDCで構築されており、本システムはそれに設定値を与えるべくプロセス計算機に組み込んだ。

Fig. 9に基本フローチャートを示す。送風終了から次回燃焼が開始されるまでの間にガス量設定値を出力する。計算は次の4stepから構成され、ファジィ制御はStep 2および3に適用している。

3.2.1 Step 1 設備保護強制アクション

珪石レンガ温度が目標をはずれて下限限界値に達した場合は、設備保護を最優先して十分多めのガス量設定値を強制的に出力する。

3.2.2 Step 2 プロセス情報の判定

オペレータは送風終了時の炉の熱レベル現在値(残熱量)、その過去数サイクル前から現在までの推移、ドーム温度および珪石境界温度の4つの情報に基づいて判定している。炉熱レベルは直接測定できないので送風温度制御用調節弁(現在はMB)開度で評価するが、熱不足の場合は送風終了前に弁開度が下限値に到達して温度制御不能となるため、下限値割れから送風終了までの時間で程度を示すことにした。熱レベル推移は過去3サイクルのMB開度やレンガ温度をもとに増加傾向にあるのか、減少傾向にあるのかを示す区間[-1, 1]の値となるよう指数化したものを用いる。

これら4項目のプロセス情報から、人間が「高い」、「適している」、「低い」と判定しているのと類似させて、Fig. 10のような台形型メンバーシップ関数を用いて3段階のファジィ集合を定義する。ファジィ変数は2.2章の定義におけるPB<sub>i</sub>, ZO<sub>i</sub>, NB<sub>i</sub> (i=1~4)とした。

3.2.3 Step 3 アクション量の推論

アクションは、最終出力であるMガス量と2次Cガス富加率に対応させて、燃焼期の投入熱量および単位体積当りのガスカロリーに

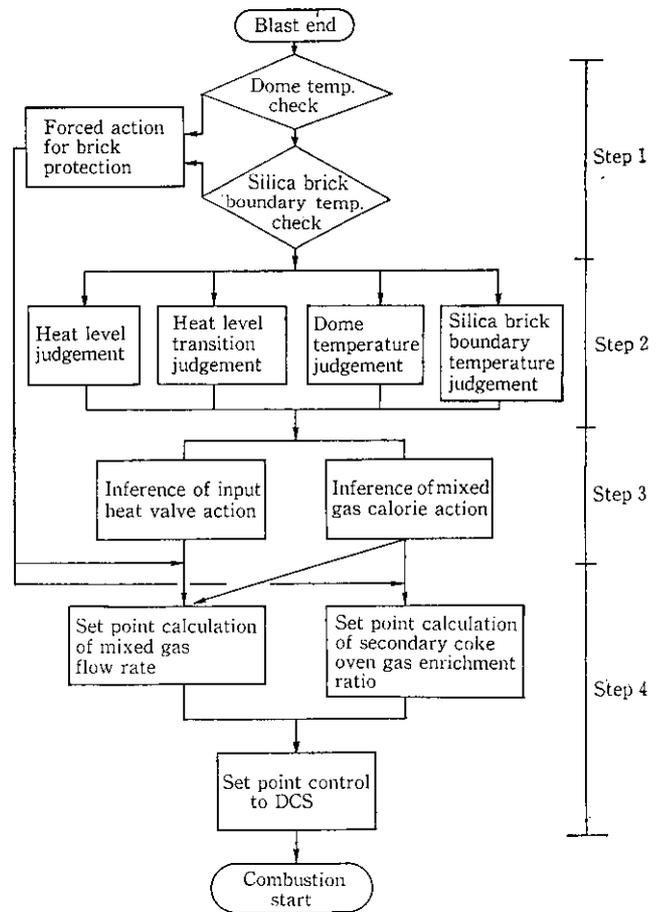


Fig. 9 General flow chart of fuzzy control model

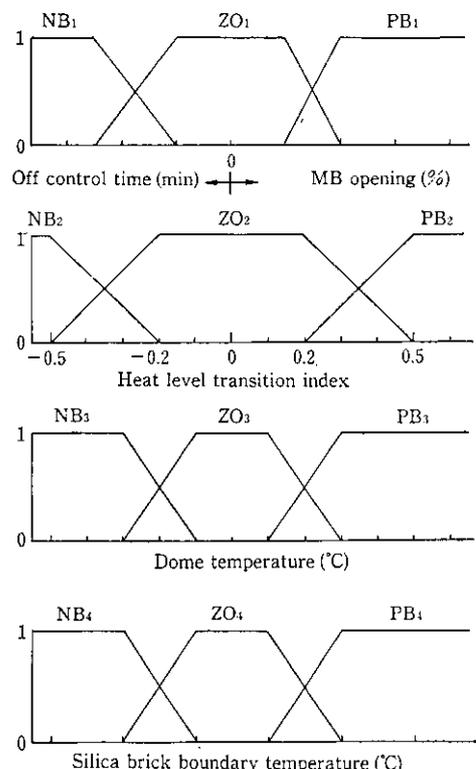


Fig. 10 Membership functions for process information judgement

より行う。Fig. 11 にオペレータの操業を概念的に示す。

送風終了時の残熱量を最小にするため、現炉熱レベルと熱レベル推移を観測し、Fig. 11 (a) のようなアクションをとっている。また、送風終了時のレンガ温度制御のため、ドーム温度と珪石境界温度を観測し、Fig. 11 (b) のようなアクションをとっている。両レンガ温度については、送風終了時のそれぞれの温度が下限限界値よりもわずかに高いところにくるのが、省エネルギー上、望ましい。

このようなオペレータの操作をファジィ推論によってシステム化する。まず、アクション量についても、投入熱量とガスカロリーそれぞれについて、Fig. 12 のようなメンバシップ関数を用いて複数のファジィ集合を定義しておく。推論は if~then 形式のファジィプロダクションルールで記述された制御則による。Fig. 11 の操業方法および Step 2 で求めた 3 段階のファジィ集合に基づく、ルールは一般的に次のように表現できる。ルール数は各アクションで 18 個ずつ、計 36 個ある。

$$\text{if } x_1=A_{1k} \text{ and } x_2=A_{2k} \text{ then } y=B_k \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $x_1$ : 熱レベルまたはドーム温度

$x_2$ : 熱レベル推移または珪石境界温度

$A_{1k}, A_{2k}$ : ファジィ変数すなわち  $PB_i, ZO_i, NB_i$

$B_k$ : アクションのファジィ変数

$y$ : 投入熱量アクションまたはガスカロリーアクション

$k$  は 1 つの出力を求めるのに関与するルール数だけある。

ファジィ推論は、ファジィ関係の合成則に基づく方法を用いた。各ルールどうしは OR 結合していると考え、投入熱量とガスカロリーそれぞれについて以下のようにしてアクション量のファジィ集合を求める。式のファジィ変数  $A_{1k}, A_{2k}, B_k$  に対応するメンバシップ関数を  $h_{A_{1k}}(x_1), h_{A_{2k}}(x_2), h_{B_k}(y)$  とすると、出力となるアクションのメンバシップ関数  $h_B(y)$  はある計測量  $x_1^0, x_2^0$  に対して次式で決まる。

$$h_B(y) = \bigvee_k [ [h_{A_{1k}}(x_1^0) \wedge h_{A_{2k}}(x_2^0)] \wedge h_{B_k}(y) ] \\ = \max_k [ \min( \min( h_{A_{1k}}(x_1^0), h_{A_{2k}}(x_2^0) ), h_{B_k}(y) ) ] \dots (3)$$

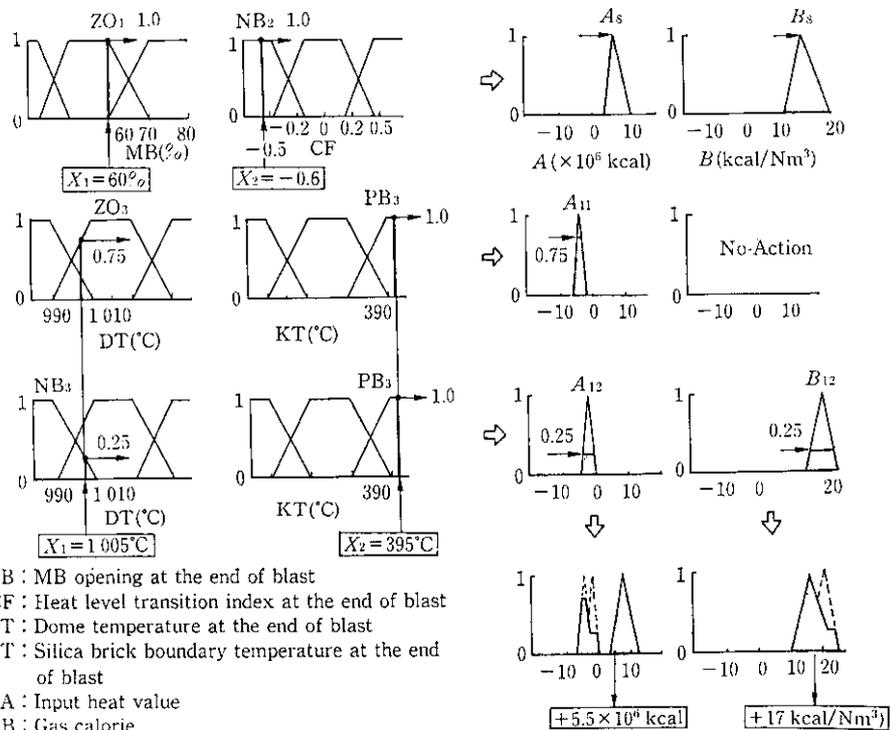


Fig. 13 Example of fuzzy inference

MB : MB opening at the end of blast  
 CF : Heat level transition index at the end of blast  
 DT : Dome temperature at the end of blast  
 KT : Silica brick boundary temperature at the end of blast  
 A : Input heat value  
 B : Gas calorie

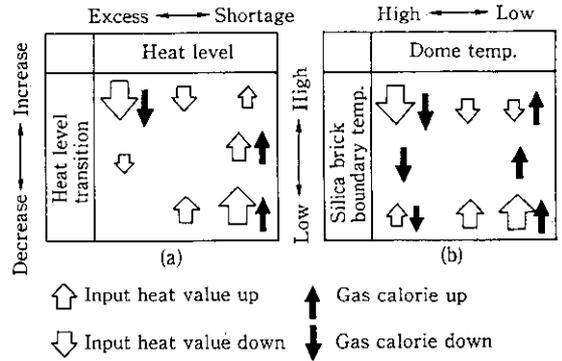


Fig. 11 Conceptual diagram of conventional operation

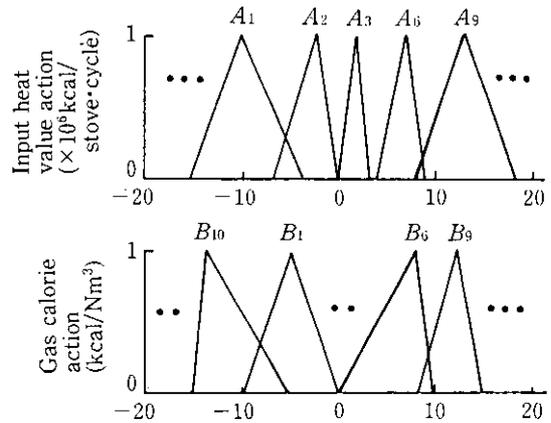


Fig. 12 Examples of membership function for action value

$\wedge$  は AND に対応する t-ノルム、 $\vee$  は OR に対応する s-ノルムである。推論の出力は非ファジィ化しなければならない。ここでは、メンバシップ関数の重心をとる方法を採用し、出力  $y^0$  を求めている。

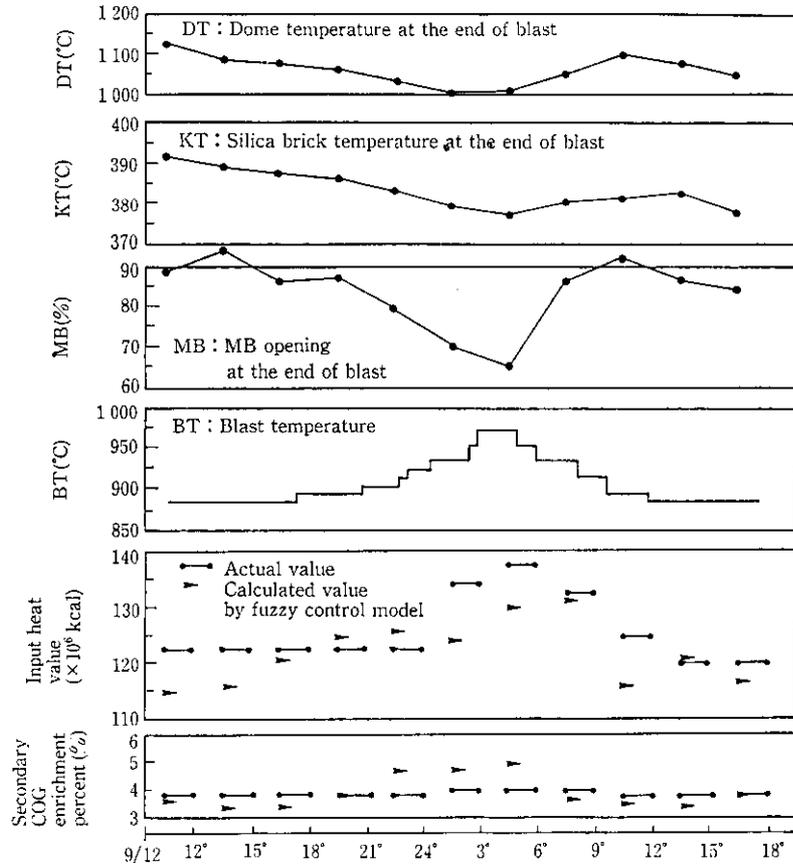


Fig. 14 Result of simulation test

$$y^0 = \frac{\int h_B(y) y dy}{\int h_B(y) dy} \dots \dots \dots (4)$$

ファジィ推論の例を Fig. 13 に示す。

3.2.4 Step 4 設定値計算

求めた投入熱量とガスカロリーのアクション量より、Mガス流量と2次Cガス富加率の設定値を計算する。炉ごとの投入熱量と離熱量の特性および送風条件を考慮して求めている。

3.3 制御結果

オンライン制御を実施する前に、まずオフラインで操業者の判断と比較するシミュレーションを行った。結果を Fig. 14 に示す。送風温度を増減するアクションを高炉側でとっており、そのため熱風炉の熱レベルとレンガ温度も変動している。オペレータは前半、炉

の熱レベルに余裕があるので送風温度を上げて熱風炉燃焼のアクションをとらず、あるところで急に投入熱量を大きくする操作をしている。これに対し、ファジィ制御はなめらかに投入熱量とガスカロリーアクションをとっており、オペレータよりも正確でしかもきめ細かい制御結果を示すことがわかった。

1988年2月より、すべて自動で設定値を与える操業を実施し、機能を確認した。その結果、設備トラブルや高炉休風前後の非定常状態を除いて全自動操業が可能であることがわかった。現在も順調に稼働している。

Fig. 15 に送風終了時珪石境界温度の平均値とばらつきの変化を示す。3基(1基補修中)の炉ともそれぞればらつきが減少して、結果的に温度管理範囲を360~370°Cという下限値ぎりぎりのところまで低下できたことを示している。熱風炉における実績投入量と離熱量の比である熱効率が約3%向上した。

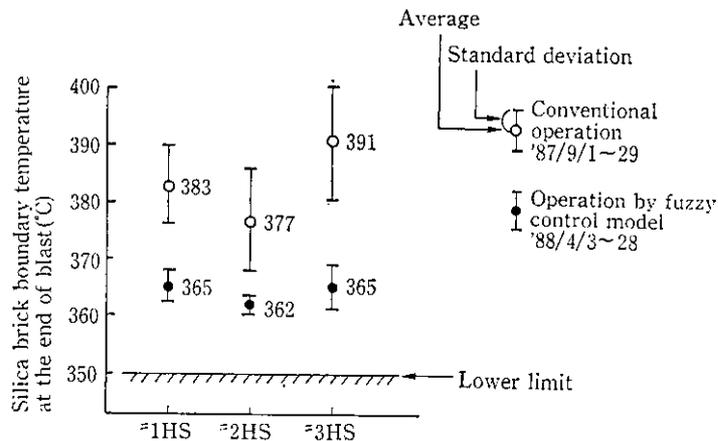


Fig. 15 Decrease of the silica brick temperature fluctuation

#### 4 ファジィ制御の特徴と今後の展望

ファジィ制御を本論文で述べたようなプロセス制御に適用した場合の有効性について以下まとめてみる。

- (1) 非線形な系, 干渉する多入力多出力系, 長いむだ時間や時定数をもつ系など, PID制御やプロセスのモデルをベースとした制御理論を適用することが難しい対象にも適用可能である。制御性も良好である。
- (2) オペレータの経験的知識をルールの形で組み込むことができるので中味が理解されやすく, 人間との親和性がよい。
- (3) ダイナミックな高速応答を要求されない制御対象ならば, 従来型のプログラミング手法で容易にシステム構築ができ, 特殊なハードウェアも必要としない。

しかしながら, 今後さらに鉄鋼プロセスで応用範囲を広げていくためには, 次のような課題に取り組んでいく必要がある。

- (1) 複雑大規模なプロセスの制御へ拡大  
現状ではまだ比較的ルール数が少なく推論も1段階ですむようなアプリケーションが多い。知識の構造化手法やファジィ多段階推論法に関する研究や実用例が乏しいため, 複雑大規模なプロセスの制御システム構築が難しい。
- (2) システムのチューニング  
メンバシップ関数は, 熟練オペレータの知識をもとに比較的容易に決定できる。しかし, 試行錯誤的に調整する場合も多く, プロセスの操業条件が変化した場合にはメンバシップ関数を再設定する必要がある。ニューラルネット技術等により自動調整する研究が必要である。
- (3) システム安定性の検証

ファジィ制御には安定性の理論的検討がまだ十分なされていない。制御システム構築時にはシミュレーション実験が欠かせないステップとなっている。

- (4) 高速情報処理

今回の適用例ではスピードについての問題はなかったが, 将来適用範囲が拡大していった場合, 現在開発が進められているファジィコンピュータ等の利用も必要になってくるだろう。

#### 5 結 言

製鉄プロセスへのファジィ制御の適用例として, 焼結工場の幅方向均一焼成制御と熱風炉の燃焼制御について報告した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 焼結工場における幅方向均一焼成制御では, 幅方向4点, 長手方向5列にもうけた排ガス温度計の情報をもとに, 幅方向に5分割されたサブゲートを操作して充填密度を調節するところにファジィ制御を適用した。温度偏差を前件部, 幅方向各点のカット量を後件部とする28個のファジィプロダクションルールに基づいて推論する。この結果, 幅方向焼成速度の均一性を向上させることができた。
  - (2) 熱風炉における燃焼制御では, 炉の残熱量とレンガ温度分布の情報をもとに, 燃焼時のガス流量とカロリーを設定計算するところにファジィ制御を適用した。36個のルールに基づいてファジィ推論する。この結果, 設備保護を図りながら, ガス量設定の自動化と熱効率の約3%向上を達成することができた。
- ファジィ制御には従来型の制御方法にはない作りやすさや使いやすさがある。今後とも鉄鋼プロセスにおいて適用範囲の拡大を図っていきたい。

#### 参 考 文 献

- 1) L. A. Zadeh: "Fuzzy Sets," *Information and Control*, 8 (1965), 338-353
- 2) 柳下 修, 伊藤 修, 菅野道夫: 「ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用」, システムと制御, 23 (1984) 10, 597-604
- 3) 廣田 薫: 「ファジィ理論の実際とハードウェアへの応用」, 計装, 31 (1988) 5, 6-10
- 4) 飯田 修, 岩村忠昭, 中島一磨, 秋月英美: 「あいまい制御を用いた焼結均一焼成制御」, 第26回 SICE 学術講演会, JS 41-3, (1987)
- 5) Y. Maki, Y. Masuda, T. Sawada, T. Matsumoto, H. Obata, N. Takashima: "Application of Fuzzy Theory for Automatic Control of Hot Stove Combustion Gas Flow Rate", 6th IFAC-3M Symposium, IFAC, Buenos Aires (Argentina), 9 (1989)