

ファジィ制御による連続鋼板熱処理ラインの 速度設定システム

Automatic Line Speed Operation System by Fuzzy Control
for Continuous Steel Heat Treatment Line

広島製作所 吉川和彦*1
エレクトロニクス事業部 田内邦明*2 亀田浩二*3

連続鋼板熱処理ラインではライン入、出側のハンドリング時間を確保するため、鋼板を一時貯留するループが設置され、連続運転を可能にしている。必要以上にループ量が減少するとライン停止を防ぐためラインを減速する。しかし、ライン速度の変化は板温制御の外乱となるため、人手でループ管理と板温管理を同時に行うのは非常に困難であった。そこで、ループ管理をファジィ制御にて行いライン速度を設定するとともに、板温実績値に基づくファジィ制御により速度を補正するライン速度自動設定システムを開発した。本システムにより板温制御仕様(±20℃)を満足するラインの自動運転が可能となった。

Loopers are steel buffering sections, placed at each end of a continuous steel heat treatment line. They absorb the flow of steel while steel at some other point on the line is being handled statically in order that the line can be driven at a constant speed for a time. This paper presents fuzzy controllers which change the line speed based on steel temperature in addition to looper allowance to extend the static handling allowance time. The automatic line driving system can be complete, and the efficiency of strip temperature control (allowance ±20℃) obtained.

1. ま え が き

CAL^{#1}、CGL^{#2}、AP^{#3}等の連続鋼板熱処理ラインにおいて、入、出側のコイルハンドリング(次コイルの頭出し、溶接、切断等)時にもラインを停止させることなく鋼板の連続処理を行うため、鋼板を一時的に蓄えるループが設置されている。ところが、ハンドリングに要する時間は溶接機の調整状況、操作員の技量等により左右される。したがって、ラインの運転員は現在のハンドリング作業状況を監視し、作業完了時間を予測し、ループ量に応じたライン速度の減速を行っている。さらに、CAL、AP等所定の熱処理を行うための板温制御を伴うプロセスラインでは板温外れを防止するため、ライン速度を加減速させる場合がある。

連続鋼板熱処理ラインにおいては運転員が入、出側ループ量、板温を常時監視しながら、経験と勘に基づきライン速度を手動設定している。この運転員の負担を軽減し、省人化が可能なライン速度の自動運転システムの開発が望まれていた。

そこで、運転員が経験的に体得した知識を計算機で自動化する場合に有効なファジィ制御を適用した。本報では、運転員の負担軽減、省人化を目的とした、ファジィ制御を用いたライン速度自

動設定システムを開発し、実機に適用した例を紹介する。

- 注1：CAL (Continuous Annealing Line)…連続焼鈍設備
2：CGL (Continuous Galvanizing Line)…連続めっき設備
3：AP (Annealing and Pickling line)…連続焼鈍・酸洗設備

2. CAL 概要

2.1 設備概要

図1に連続鋼板熱処理ラインの一例として、CALの全体配置図を示す⁽¹⁾。前工程から運ばれてきたコイルはペイオフロールに装着され、先行コイル尾端部と後行コイル先端部が溶接されて通板される。入側ループは溶接時の入側ライン停止の間も炉部速度を一定に保つことが可能なように、停止時間に相当するストリップ(鋼板)量を定常作業中あらかじめ貯蔵している。炉部は加熱部、冷却部から構成され、所定の温度でストリップを焼鈍する。炉部を出たストリップは出側ループを経て、出側設備にて分割、検査、巻取り等の処理がなされる。この時、出側ラインが停止する間も炉部速度を一定に運転するため、ストリップは出側ループに貯蔵される。

入側ライン停止時の運転方法の一例を以下に示す。

- (1) 一定の減速率で入側ラインを減速し、停止させる。この間、

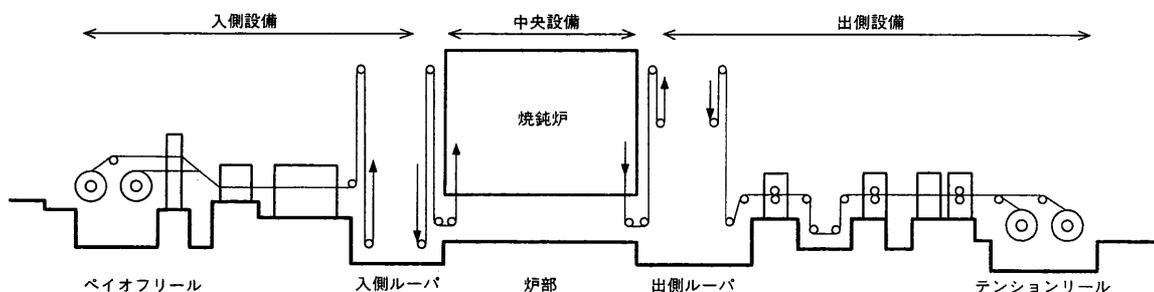


図1 CAL全体配置図 CAL、CGL、AP等製鉄プロセスラインの一例。
General composition of CAL (Continuous Annealing Line)

*1 製鉄機械設計部制御装置課

*3 開発・製造部制御システム三課

*2 開発・製造部制御システム三課主務

炉部ラインは所定速度で運転しているため、入側ループ量は減少し始める。

(2) 溶接が完了した時点で入側ラインを加速し、炉部速度を上回った時点で入側ループ量は増加に転じる。

(3) 一定量以上の入側ループ量を確保した後、入側ラインは連動運転（炉部速度と同速度）に入る。

従来の運転では、入側又は出側ラインの停止が所定時間より長くなり、ループ量が著しく減少する場合、運転員の判断により炉部ラインを減速する。

2.2 板温制御システム⁽²⁾

板温制御システムは上位管理システムと下位 DDC システムの間に位置し、CAL の効率的な運転を行う。本システムの構成概要を図 2 に示す。以下、板温制御システムの機能につき述べる。

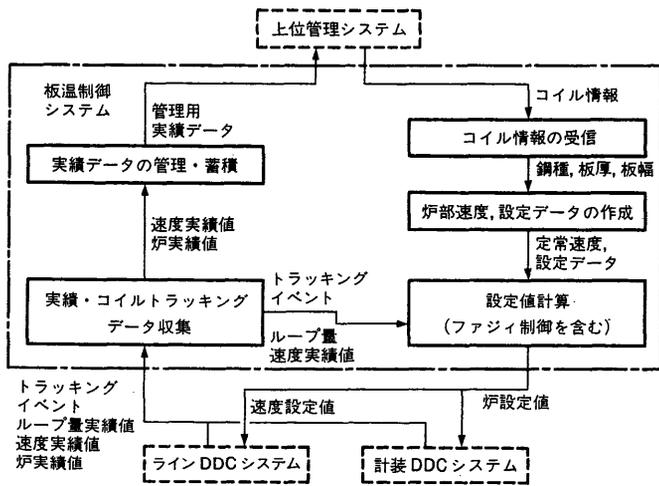


図 2 システム構成概要 CAL 板温制御システムの概略機能フローを示す。
System configuration of CAL temperature control

2.2.1 コイル情報の受信

上位管理システムから、本ラインで処理されるコイルの製造情報をコイル個別に一括受信し、蓄積する。

2.2.2 炉部速度、設定データの作成

定常速度や炉設定値計算に用いるコイル単位の設定データを計算、作成する。

2.2.3 設定値計算

ライン自動運転のための速度設定値をライン DDC システムに送信する。また、速度に応じた加熱部、冷却部の炉設定値（バーナ流量、炉温等）を計算し、計装 DDC システムに送信する。本報のファジィ制御は本機能に含まれる。ファジィ制御は入、出側ループ量実績値、板温実績値、炉部速度実績値からファジィ演算により、炉部速度設定値を計算する。炉設定値計算により、炉部速度設定値にて所定の板温となるようなバーナ流量、炉温等の炉設定値が計算される。

2.2.4 実績・コイルトラッキングデータ収集

製品コイルの操業データ、品質データ等の実績データを計装 DDC システムから収集する。また、炉設定値計算のタイミングのためのコイルトラッキングデータをライン DDC システムから収集する。

2.2.5 実績データの管理・蓄積

製品コイルの操業データ、品質データ等の実績データを加工し、製品コイルデータを上位管理システムに送信する。

3. ファジィ制御系の設計

3.1 ファジィ制御概要

ファジィ制御は、制御対象のモデル化が困難なシステム、非線形性の強いシステム、熟練者によって操作されていて従来自動化が困難であった複雑なシステムの制御に極めて有効であることが実証されている。ここでは、ファジィ制御には Max-Min 合成及び重心法による推論方式を採用した。推論方式を以下に示す。

(1) 入力変数（状態量）を $\{x_1, x_2\}$ 、出力（操作量）を y とし、図 3(a) に示すメンバーシップ関数により、各ファジィ集合の適合度合を定義する。

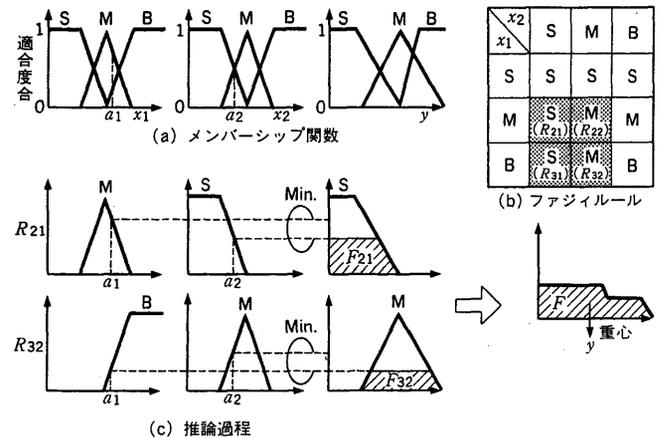


図 3 ファジィ推論アルゴリズム例 Max-Min 合成及び重心法を用いたアルゴリズムを示す。
Fuzzy process (Example)

(2) IF-THEN 形式で記述された制御ルール

$$R_{11} : \text{IF } x_1 \text{ is S and } x_2 \text{ is S THEN } y \text{ is S}$$

$$R_{33} : \text{IF } x_1 \text{ is B and } x_2 \text{ is B THEN } y \text{ is B}$$

を作成する [図 3(b)].

(3) 入力変数が $\{a_1, a_2\}$ の場合、図 3(b) の四つのルールが適用され、前件部の適合度合の最小値を用いてルールの適合度合を表す各ファジィ集合 $F_{21}, F_{22}, F_{31}, F_{32}$ を求める。

(4) 四つのファジィ集合 F_{ij} の最大値演算を行いルールを統合化し、ファジィ集合 F を求める。

(5) ファジィ集合 F の重心をとることにより非ファジィ化を行い、出力（操作量） y を求める。

以上の推論過程を図 3(c) に示す。

3.2 ファジィ制御系の設計手順

ファジィ制御系を設計するには、入出力変数、制御ルール、メンバーシップ関数を決定する必要がある。ここでは、自動速度設定システムにファジィ制御を適用する際の設計手順を述べる。

3.2.1 入出力変数の決定

ループ制御に関して、運転員は“〔ループ量が少ない。〕かつ〔減少しつつある。〕”といった現象をもとに現状速度からの減速を行っている。また、板温制御では、プロセスとしての温度変化の時定数が大きいため、板温とその変化量を監視することが重要である。一方、定常速度は炉能力、焼鈍条件によりあらかじめ決まっており、ループ量等の制約がない時は定常速度にて運転される。よって、入出力変数はプロセス値とその変化量、出力変数は操作量（炉部速度）の変化分とした。

すなわち、ルーバ制御系は、
 入力：{ループ量，ループ量変化量}
 出力：{炉部速度変化量}
 また、板温制御系は、
 入力：{板温，板温変化量}
 出力：{炉部速度変化量}
 とした。

3.2.2 制御ルールの決定

(1) ルーバ制御系

コイルハンドリング時間が所定時間より長くなる場合には、ループ量不足のためライン停止するのを防ぐために炉部速度を下げる。しかし、生産量を確保するためにはなるべく炉部速度は下げたくない。したがって、“ループ量が十分あるとき又はループ量が増加していないとき、炉部速度は変更しない。”“ループ量が復帰しつつある場合、炉部速度をなるべく早く所定の速度に復帰させる。”等操業上の操作方法からルールを作成した。

(2) 板温制御系

板温を制御する場合、炉設定値を操作することと炉部速度を操作することが考えられる。炉部速度を操作する方が炉設定値の操作より板温への感度が高くかつ時定数も小さいので、効果が大きい。運転員の操作として、板温が高い場合、まず増速し板温を下げ、次に炉設定値を下げ、徐々に所定速度まで減速する。また、板温が低い場合、まず減速し板温を上げ、次に炉設定値を上げ、徐々に所定速度まで増速する。したがって、“板温が高く、かつさらに高くなりつつあるとき、炉部速度を増速する。”“板温が低く、かつさらに低くなりつつあるとき、炉部速度を減速する。”等の考えから、ルールを作成した。

3.2.3. ファジィ制御系フロー

“入側ルーバ制御系” “出側ルーバ制御系” 及び “板温制御系” の三つのファジィ制御系を統合し、一つのライン速度を決定するロジックとして、図4に示すファジィ制御系を採用した。“入側ルーバ制御系” 出力の速度変化量と現在の炉部速度から基準速度候補を算出する。同様に “出側ルーバ制御系” 出力の速度変化量と現在の炉部速度から基準速度候補を算出する。

“入側ルーバ制御系” の基準速度候補と “出側ルーバ制御系” の基準速度候補にて小さい方を基準速度とする。炉設定値は本値

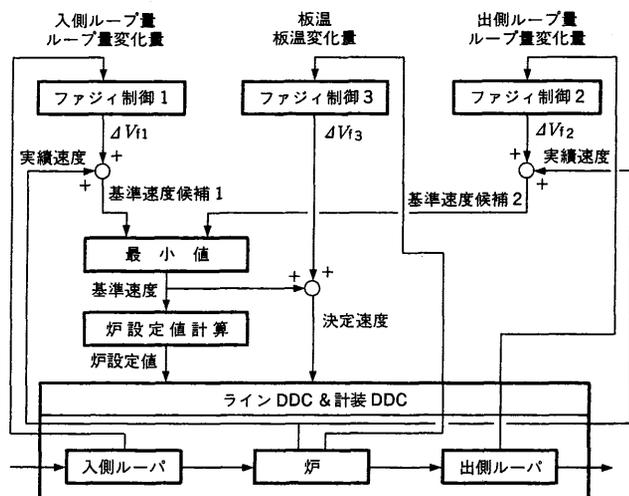


図4 ファジィ制御系 三つの異なるファジィ制御を統合した制御系を示す。
 Fuzzy control system

表1 No.3 AP 炉仕様
 Specification of No.3 AP

(処理材料) 鋼種	SUS 300 及び 400 系 ステンレス鋼ストリップ	(基準ストリップ) 材料	0.7 mm×1 300 mm
板厚	冷間 0.2~2.0 mm	ライン速度	100 m/min
コイル内径	入側 610 mm 出側 508/610 mm	TV 値	70 mm・m/min
コイル外径	最大 2 300 mm 最小 900 mm	(加熱方式)	コンビネーション加熱 (インピンジングバーナ+カップバーナ)
コイル重量	最大 23 000 kg	(バーナ本数)	228 本
(ライン速度) 入側設備	5~180 m/min	(有効炉長)	65.7 m
中央設備	5~137 m/min	(冷却方式)	ガスジェット冷却
出側設備	5~180 m/min	(冷却帯長さ)	51.5 m
(通板量) 最大	14 000 t/月	(炉最大高さ)	53.0 m
設計基準	SUS 304 0.7 mm× 1 300 mm×100 m/min		
ライン全長	248.5 m		

表2 ファジィルール
 Fuzzy rules of fuzzy controller

		ループ量				鋼板温度				
		VS	S	M	B	NB	NS	ZR	PS	PB
ループ量変化率	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NS	ZR	ZR	ZR
	NM	NM	NS	NM	NR	NS	ZR	PS	PS	PS
	NS	NS	NS	NS	ZR	ZR	PS	PS	PS	PM
	ZR	ZR	ZR	PM	PB	PS	PS	PS	PM	PM
	PS	PS	PS	PM	PB	ZR	ZR	PM	PM	PB
	PB	PS	PM	PB	PB	ZR	ZR	PM	PM	PB

ライン速度変化率
 ルール略称
 VS : Very Small
 S : Small
 M : Middle
 B : Big
 NB : Negative Big
 NM : Negative Middle
 NS : Negative Small
 ZR : Zero
 PS : Positive Small
 PM : Positive Middle
 PB : Positive Big

を基に算出される。

次に、“板温制御系” 出力の速度変化量を基準速度に加え、決定速度とし、実際の炉部速度として出力する。決定速度と炉設定値用基準速度の差が“板温制御系” ファジィ制御の効果として、板温外れを補正する。

4 適用例

住友金属工業(株)鹿島ステンレス鋼板製造所に納入した AP 炉に本ファジィ制御機能を適用した。表1に AP 炉の仕様を示す。

4.1 ファジィ制御系の調整

“ルーバ制御系” はルーバモデルシミュレータを用いてファジィルール及びメンバーシップ関数の調整を行った。さらに、実操業において、実際のループ量変動に対する調整を行った。

表2に調整後のファジィルールを示す。

4.2 追加機能

上に述べたファジィ制御の調整のほかに、制御性向上のための機能をファジィ制御系に対し追加した。その一部を紹介する。

(1) C_f 係数機能

3.2.3 項に述べた基準速度にて炉設定値計算を行うと計算結果の設定値は定常状態での設定値なので、速度変更中の場合、未焼鈍又は過焼鈍が起きる。よって、基準速度に“C_f 係数”なる負荷変化量に比例した係数を掛け、炉設定値計算用速度を決定するようにした。

実際には、数点の(板厚)×(速度変化量)に対応する C_f 係

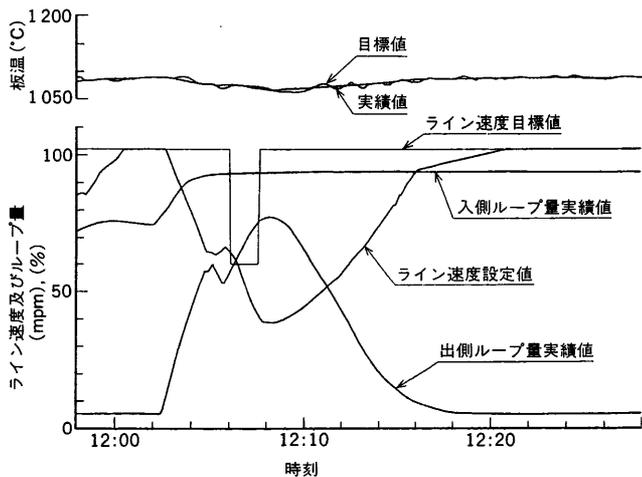


図5 ルーパファジィ制御の結果 ルーパファジィ制御系の有効性を示す。
Result of looper fuzzy control

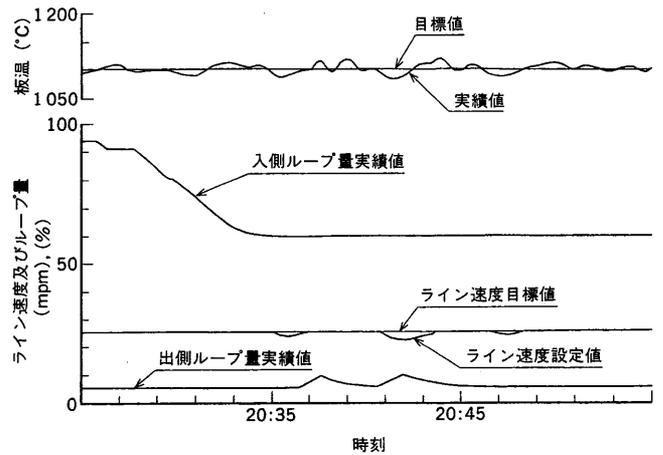


図6 板温ファジィ制御の結果 板温ファジィ制御系の有効性を示す。
Result of temperature fuzzy control

表3 図5, 6の板条件及び操業条件
Condition of strip and operations on Fig. 5 & Fig. 6

(板条件)		(板条件)	
板厚	0.235 mm	板厚	1.96 mm
板幅	1 029 mm	板幅	1 264 mm
目標板温	1 080 °C	目標板温	1 100 °C
(操業条件)		(操業条件)	
定常速度	102 mpm	定常速度	25 mpm
ループ量下限	入側ルーバ 90% 出側ルーバ 10%	ループ量下限	入側ルーバ 25% 出側ルーバ 75%

(a) 図5の条件

(b) 図6の条件

数データを持ち、実際の(板厚) × (基準速度変化量)にて補間計算により“ C_f 係数”を決定している。

(2) ループ量復帰後速度変更機能

ファジィ制御は入、出側ルーバのループ量があるしきい値(下限)を下回ると制御を開始し、下限を復帰すると制御を終了する。本ファジィ制御では出力は速度変化量であるので、ファジィルール及びメンバーシップ関数の設定により、ループ量が下限復帰しても炉部速度はまだ所定速度まで復帰していない場合がある。そこで、速度より先にループ量が復帰した場合、ファジィ制御とは別に増速させる機能を追加した。本機能による増速中も上記の C_f 係数機能は有効としている。

また、本機能を追加したことにより、ループ量変動以外の速度変更(板継時、運転モード変更時等の目標速度の変更)時にも本ファジィ制御を用いることができるようになった。従来の板厚制御は速度変更の際、目標速度に相当する炉設定値を1回変更するのみであったが、ファジィ制御を用いることにより、ライン速度に応じた定周期の炉設定値変更により板温制御精度が向上した。

(3) ステップ速度変更機能

実操業ではファジィ制御しきい値内でもループ量が変動しない(入、出側速度が炉部速度と連動する)場合がある。そこで、ループ量がファジィ制御しきい値内で変動していない場合、ループ量に対応する減速率の速度になるよう機能追加した。本機能はファジィ制御機能と併せて設計した“ステップ速度変更機能”をファジィ制御機能内で実施したものとなった。

4.3 適用結果

(1) ルーパ制御系

図5はルーパファジィ制御機能が顕著な操業データの一例である。板条件と操業条件を表3(a)に示す。出側ループ量が減少する〔ここでは説明の便宜上、(100%-出側ループ量)を出側ループ量とする。〕に従い、定常速度から減速し、ループ量の復帰に伴い、増速している。また、ループ量が下限復帰した後、ファジィ制御とは別の一定加速率にて所定速度まで増速している。この間、ルーパファジィ制御により増減速中であるにもかかわらず、基準速度に C_f 係数にて補正した速度にて定周期に炉設定値を計算し、設定しているので、大きな板温外れは生じていない。

(2) 板温制御系

図6は板温ファジィ制御機能が顕著な操業データの一例である。板条件と操業条件を表3(b)に示す。本例ではループ量下限は入側25(%)、出側75(%)なので、ルーパファジィ制御は機能していない。実績板温が目標板温より大きく低下すると、ファジィ制御にて減速し、未焼鈍を防止している。図では板温外れは±20(°C)となっている。

5. おわりに

ファジィ制御を用いたライン速度自動設定システムを開発し、実機に適用した。これにより、従来、運転員の経験と勘により手動設定されていたライン速度設定を完全自動化することができた。また、ライン速度に応じた定周期の炉設定値変更により、板温制御精度が向上した。今後の課題として、調整機関の短縮のため、メンバーシップ関数等ファジィ制御パラメータの自動チューニング方法を開発する必要がある。また、今回の実績を基にCAL、CGL等適用機種種の拡大に努めたい。

参考文献

- (1) 有村ほか、我が国における最近のコールドストリップ設備及び製造技術の進歩、日本鉄鋼協会
- (2) 川浪克助ほか、製鉄機械の制御技術、三菱重工技報 Vol 29 No.1 (1992) p.42