

# 熱延操業支援エージェント構築のための 操業診断と圧延操作方法

小西 正躬\*・中野 孝一\*・今井 純\*

Methods of Diagnosis and Intervention for Agent of Hot Rolling Operation Support

Masami KONISHI, Koichi NAKANO and Jun IMAI

**Synopsis :** In the last two decades, it becomes possible to automate operations of various steel plants especially in rolling mills. As the results, stabilization of productivity and improvement of product quality have been attained. On the while, in these years, many skilled engineers and operators who actively promoted economical growth of steel industries will retire due to their age limits. Thus, the inheritance of the high level technology and know-how has becomes a serious problem. To overcome the problem, it is necessary to extract knowledge of the skilled persons and make technical textbook reducing tacit knowledge. In this paper, rules are extracted from the operation data of hot strip rolling applicable to the operation diagnosis and intervention during operation. To attain the object, agent based simulator of hot strip rolling has been developed to prepare various rolling data for extraction of diagnosis and intervention rules in rolling operations. As for the selection of normal and abnormal data, SVM algorithm is tested before rules extraction. Rules are written in Fuzzy logic forms and its parameters are optimized by GA algorithm. These technologies are involved in the operation support agent system of hot strip rolling mills together with RNN for automatic gain tuning of mill controller.

**Key words:** diagnosis; agent system; human intervention; hot strip rolling; rule extraction; genetic algorithm; support vector machine.

## 1. はじめに

近年、IT技術と制御技術の進展に伴い多くの鉄鋼プロセスでの自動運転が可能となり、自動化による操業の安定化と製品品質の向上が図られている。一方、日本鉄鋼業の高度成長を支えてきた熟練者が大量退職の時期に入っており、熟練技術の伝承が重要な課題となっている。この課題を克服するためには、熟練者が保有している知識をできるだけ抽出し技術標準や作業標準の形で整理することが必要である。筆者らは、日本鉄鋼協会研究会「製鉄所「現場力」の維持・発展に向けたエージェント技術の適用」に参加してエージェントをベースとした熱延の操業支援技術の研究を行っている<sup>1-2)</sup>。本稿では、その成果として得られた、熱延の操業状態を分析・診断し必要に応じて操業に介入する操業支援エージェントの構成とその適用について報告する。

熱延の操業では、不適切なミルセッティングによる圧延通板時の不安定現象、設備劣化によるミル剛性や油圧圧下系時定数の変化による圧延機特性と制御性能の低下が問題である。したがって、これら操業の問題の原因を診断して原因に応じた対応を助言する機能が必要である。

筆者らは、制御系の特性を監視し制御ゲインを調整する

技術をRNN<sup>3)</sup>(リカレントニューラルネット)を用いて構成した。また、圧延データを見て現在の圧延が正常なのか、異常なのかを判定(類別)する方法についてSVM<sup>4)</sup>(サポートベクターマシンの)の有効性を検討した。SVMでは適用目的に沿った判別関数が必要である。このため、適用対象の熱延プロセスについて正常と異常を示す教師データを作成してSVMモデルの判別関数を同定した。その際、圧延データを生成するために熱延シミュレータを開発し利用した。数値実験によりSVMが熱延操業の診断でも有効であることを確認した。一方、操業支援では異常の発生が検出されると介入修正を行うが、この修正にファジイルール<sup>5)</sup>を利用した。このルールは人間知識の抽出に広く用いられているが、適用対象と目的に応じて、ルールの前件部と後件部のしきい値(パラメータ)の設定が必要である。本研究では、GA法<sup>6)</sup>(遺伝的アルゴリズム)を用いてこれらのパラメータを最適化した。このルールにより、熱延の操業データから圧延の異常を検出し、介入修正方法を提示することにした。提案方法の検証をするために、数値実験を行って機能確認を行った。以下で、これらの内容について報告する。

## 2. 熱延操業での診断・操作支援エージェント

熱延操業における設備故障・不具合の例としては、制御系の性能劣化、油の供給弁の摩耗や油の粘度変化による油圧下系の特性劣化、ライナー摩耗によるミル剛性低下、母材加熱不良による温度むら、ロール熱膨張や摩耗による板形状の悪化、駆動伝達系のガタによるロール回転むらなどがある。これらの設備故障に対しては、圧延方法の修正による緊急的な対応が必要であるが、やはり定期的な設備保全や原因に則した根本的な設備修理が必要である。

一方、操業の不具合には、ミルペーシングの崩れによる母材温度低下、設定ミスによる通板時スタンド間板ループの過大・過小による圧延の不安定化、速度設定およびロール間隙設定不良による、板厚外れ・温度不良・負荷バランスの崩れ・板の断面形状や平坦度の悪化などがある。これらの操業の不具合については圧延中の操業介入や次圧延での設定修正などの修正が必要である。

本研究では7スタンドの熱延ミルを取り上げた。操作介入例としては、たとえば、#1-2スタンド間の板ループが過大ならば、#2,3スタンドのロール間隙を減少させ(ex.  $\Delta S_2 = -100 \mu\text{m}$ ;  $\Delta S_3 = -100 \mu\text{m}$ )、#3-4スタンド間で圧延材の幅方向の駆動側の板波が大ならば、#3スタンドの駆動側のロール間隙を  $\Delta S_{d3}$  増加し、作業側のロール間隙を  $\Delta S_{w3}$  減少させるなどである。

筆者らが取り組んでいる熱延の操業支援エージェントの構成を Fig. 1 に示す。図に示すように、熱延での計測データが情報処理され、実績データとしてデータベースに蓄積される。蓄積データと情報処理されたデータから現在の圧延状態が評価される。同時に上位の操業支援エージェントが総合的な判定を行い必要なアクションを出力する。本研究の目的は、この操業支援エージェントの構築と機能の確認である。

さて、高温での圧延状況をセンシングする方法としては、温度、圧力、速度などの直接計測に加え、計測量から類推

して圧延状態を認識するソフトセンシングが併用される。たとえば、途中スタンドでの出側板厚については、マスフォロー計算やゲージメータ式があるが、人間はスタンド間のループ状況から類推して板厚の過大あるいは過小を知ることがもできる。筆者らは、これを仮想センシングと呼んでいる。本研究では、熱延シミュレータを開発し圧延現象を机上で再現した。これにより、設備故障を人工的に起こし圧延データとしてどのような変化が見られるかが検討できる。

## 3. 異常データの類別と異常への対応方法

本研究では、圧延データの類別にSVM(サポートベクターマシン)を応用した。SVMは種々の画像や観測波形の識別での適用<sup>7,8)</sup>が多く報告されている技術であり、本研究で目標とする人間知識のモデル化に沿う技術と考え、この方法の有効性を検討した。すなわち、圧延データの正常あるいは異常を自動的に識別する課題に対し、SVMの結果を熟練者が保有する経験知識と比較することにより知識の定量化へのヒントが得られると考えている。なお、SVMモデルを同定するうえで必要な、正常あるいは異常な圧延のデータについては、熱間タンデムミルの総合特性シミュレータ<sup>9)</sup>を開発し、設定した圧延条件について種々の外乱を発生させ正常から異常に至る過程を再現した<sup>10)</sup>。

### 3.1 熱延シミュレータによる圧延データの生成

熱延ミルの操業支援エージェントシステムの開発に際しては、実績データの利用と同時に圧延現象を再現するシミュレーション技術の確立が必要である。熱延ミルのスタンド数やロール諸元は工場によりさまざまである。制御方法についても、従来からのPID制御だけでなく近年は種々の新しい制御方式が搭載されている。この事情は計測装置についても同様である。これらのことから、ミルによらず、また制御装置によらず圧延現象のシミュレーションを行うためには圧延機や制御装置を部品化し自由に交換可能な形にすることが望ましい。エージェントシミュレーションは、この要請に応える有力な方法である。

筆者らは熱延のエージェントシミュレータを開発し、正常と異常の識別モデルの構築と同時に操業支援法の開発とその機能確認を机上で行い、オフラインで種々の検討ができるようにした。

Fig. 2には基本的な熱延ミルの#iスタンドについて制御系の構成を示す。図に示すように、本研究の目的は新しい制御方式の開発ではないため、従来からのPID制御を研究対象とし、そのゲイン調整を研究対象とした。

また、Fig. 3にはこれらの制御系を盛り込んだ熱延のエージェントシミュレータの概略の構成を示している。図には、熱延タンデムミルのスタンド間での板厚伝播と圧延制御についての計算方法が示されている。図に示すように、

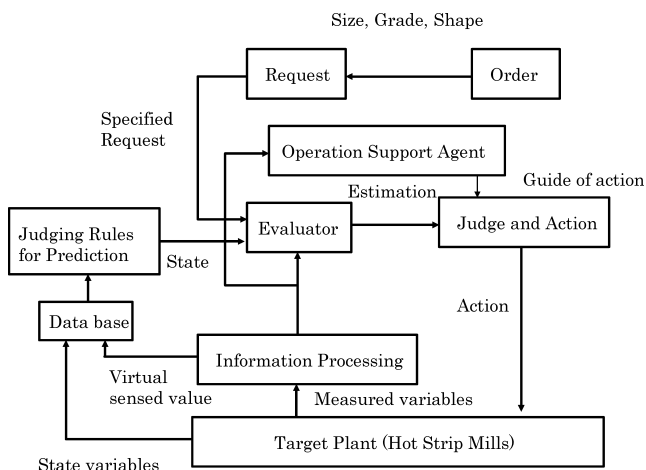


Fig. 1. Construction of Agent for Mill Operation.

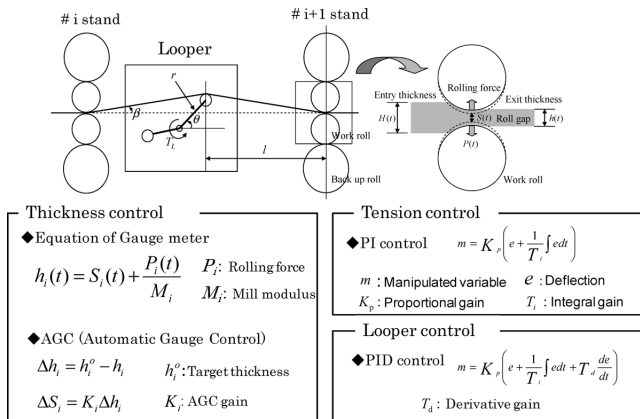


Fig. 2. Mill control system for #i stand.

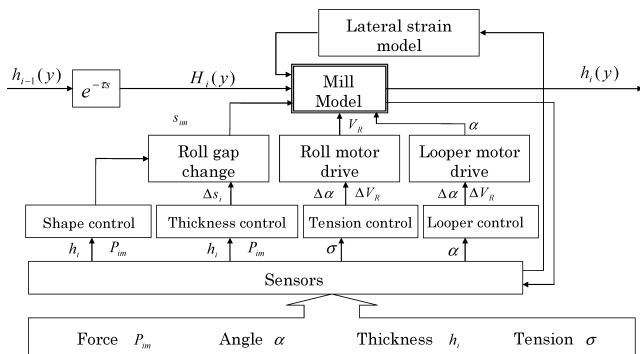


Fig. 3. Construction of rolling simulator.

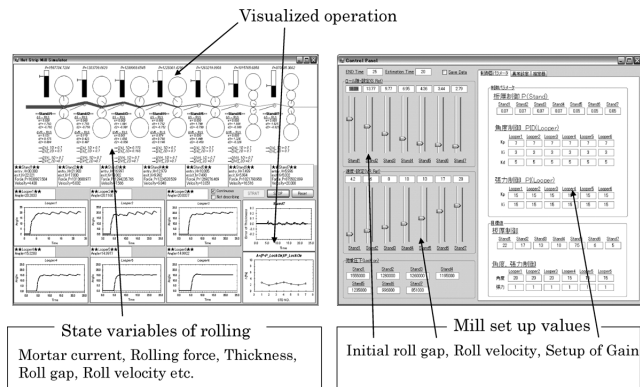


Fig. 4. Interface of rolling simulator.

熱延シミュレータの構成要素は、圧延機、圧延機操作部、圧延機制御器および計測器であり、それぞれが数学モデル<sup>11)</sup>で記述されている。Fig. 4には、筆者らが開発した熱延シミュレータの表示画面が示されている。図の右半分は、各スタンドのロール間隙、圧延速度などに圧延機の実操作量と各制御系のパラメータを設定する入力インターフェイスである。これに対し、Fig. 4の左半分は、シミュレーション結果を可視化して出力する表示部である。

このシミュレータでは、圧延材の板幅方向の中心部の圧延方向での圧延変数の時間変動を計算するだけでなく、板幅方向の中央部および端部での圧延変数についても計算

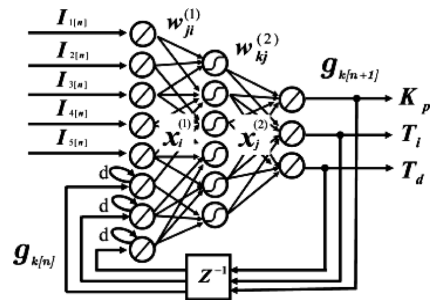


Fig. 5. Construction of RNN Model.

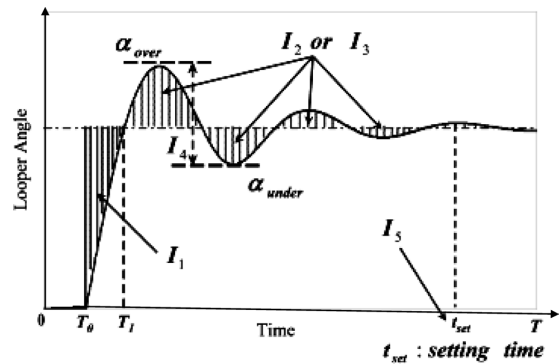


Fig. 6. Estimation of control performance.

を行うので、シミュレーションを行うことにより板厚変化と同時に圧延形状の変化についてのデータを得ることができる。

### 3・2 RNNによる圧延状況判定と制御系調整

本研究では、圧延制御系の診断と調整について、RNNを適用することにした。筆者らの提案した調整モデル<sup>12,13)</sup>では、圧延データを評価器に入力し制御性能を複数の評価関数で定量評価した結果をRNNの入力とする。また、RNNの出力としては、制御系のゲインとした。Fig. 5にRNNモデルの構成を示す。

RNNの入力に用いている評価関数 $I_k$ 値の意味は、熱延ループ制御を例にとるとFig. 6に示すようになる。また、これらを式で書くと式(1)~(5)で与えられる。

$$I_1 = \int_{T_0}^{T_1} \left| \frac{\alpha}{\alpha^o} - 1 \right| dt \dots\dots\dots(1)$$

$$I_2 = \int_{T_1}^T \left| \frac{\alpha}{\alpha^o} - 1 \right| dt \dots\dots\dots(2)$$

$$I_3 = \frac{1}{T - T_1} \int_{T_1}^T t \left| \frac{\alpha}{\alpha^o} - 1 \right| dt \dots\dots\dots(3)$$

$$I_4 = \frac{\alpha_{over} - \alpha_{under}}{\alpha^o} \dots\dots\dots(4)$$

$$I_5 = \frac{t}{T - T_1} \quad t: \text{setting time} \dots\dots\dots(5)$$

このRNNを制御系の診断および調整エージェントに適用

する方法を示したのがFig. 7である。RNNモデルの結合係数の決定法については筆者らの研究報告<sup>13)</sup>を参照されたい。

この図の上半分は実圧延を示し、図の下部には圧延状態の診断部とRNNを用いたゲイン調整部が示されている。Fig. 7に示すように、下半分では実圧延を模擬する圧延シミュレータと制御系からなる熱延プロセスを机上で再現する。これを上半分の実圧延に対応させるため同一の入力に対する出力が実機に合致するように圧延シミュレータモデルの学習を行う。

つぎに、圧延状態を評価して5種類の評価関数値 $I_k$ を計算する。この評価値がRNNへの入力になる。RNNにより時々刻々制御系のPIDゲインが修正されるので、その更新値を制御系に適用する。RNNにより十分な学習が行われると、評価値が理想状態値に近づくので、圧延状況の診断と制御系の調整が自動的に行われることになる。この診断および調整モデルが操業支援エージェントの主要な機能の一つである。以上に述べたRNNを用いた方法のメリットは評価関数を工夫し、熟練の設備技術者と同様に多面的な評価とその調整への反映が行えることである。

Fig. 8に、RNNの適用効果が示されている。図の縦軸は

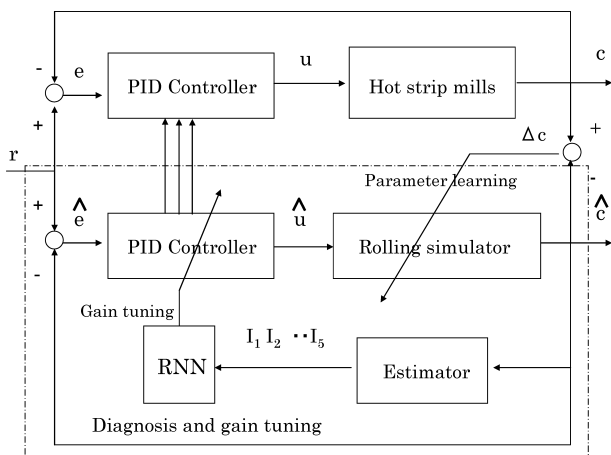


Fig. 7. Gain tuning system by RNN.

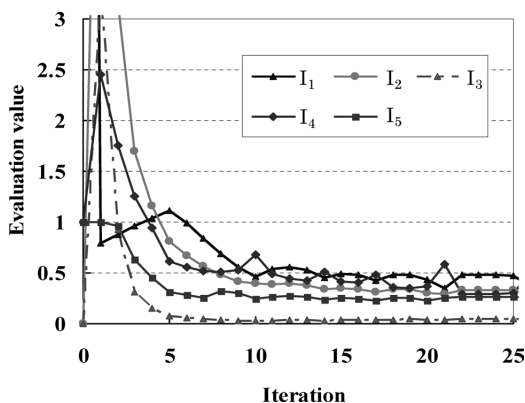


Fig. 8. Transition of estimation value.

それぞれの評価関数値( $I_k; k=1,2,\dots,5$ )であり、横軸はRNNによる学習の繰り返し回数である。図からわかるように、繰り返しによりそれぞれの評価関数値が減少しており学習効果が認められる。

### 3.3 SVMによる圧延データの識別

SVMはデータの類別を自動的に行う上位概念の学習で用いられる方法の一つである。理論的な詳細は解明されており、種々の用途で効果も確認されている<sup>14)</sup>。SVMを用いて正常と異常の類別を行う判別モデルが同定できると、それを利用して次の圧延での圧延操作変更による圧延特性改善が可能になる。

この方法を用いると入力データの集合 $\{x\}$ を識別関数 $f(x)$ により+1と-1に分類することができる。Fig. 9には判別関数 $f(x)$ のイメージが示されている。異常判別を行う識別関数のパラメータは教師データを用いて学習する。本研究では、SVMの適用に必要な識別関数は、圧延力、板厚、スタンド間のループ角などの圧延変数を用いて定義される。本研究では異常操業の類別機能を調査した。

さて、SVMでは用いられるカーネル関数により類別結果が異なるものになる。本研究では非線形SVMを用い非線形変換にガウシアンカーネル関数を用い、類別機能を高めるためにソフトマージン法を用いている。本研究で用いたSVMにおける識別関数とガウシアンカーネルを式(6)、(7)に示している。

$$f(x) = \text{sgn} \left( \sum_{n=1}^N a_n t_n K(x_n, x) + b \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$K(x_i, x_j) = \exp \left( - \frac{\|x_i - x_j\|^2}{C_{rbf}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

上式で、 $t_n$ は教師データである。すなわち、異常である場合には $t_n$ は1であり、正常である場合は-1である。 $N$ と $b$ はそれぞれデータ数としきい値を示す。 $C_{rbf}$ はその影響の程度を示すスケールパラメータである。識別関数を求め、パラメータ $a_j (j=1\sim N)$ を決定するためには、非線形最適化法により次の二次計画問題を解けばよい<sup>15)</sup>。ここで、 $C$ は識別関数を生成するときのしきい値である。

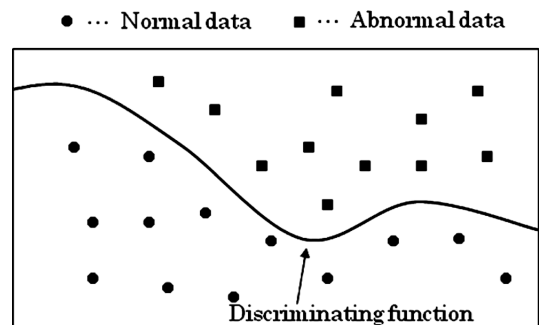


Fig. 9. Discrimination function.



$$\text{minimize: } \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N a_n a_m t_n t_m K(x_n, x_m) - \sum_{n=1}^N a_n \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{subject to: } 0 \leq a_n \leq C \quad (n=1 \sim N) \dots\dots\dots(9)$$

$$\sum_{n=1}^N a_n t_n = 1 \dots\dots\dots(10)$$

SVMを用いた圧延中の操業データの診断を行ったところ、各圧延スタンドにおける負荷バランス、最終板厚、各スタンドの動力バランスを用いて圧延の評価関数を形成し異常状態を診断することができた。

本研究での評価関数  $F_1$ ,  $F_2$  および  $F_3$  をそれぞれ式(11)から(13)に示す。式からわかるように、 $F_1$ は各圧延スタンドでの荷重(負荷)バランスを、 $F_2$ は最終スタンドの出側板厚偏差を、 $F_3$ は各圧延スタンドでの電流(動力)バランスを表現している。

$$F_1 = \frac{1}{T_f} \sum_{j=1}^7 \int_0^{T_f} |r_{opj}(t) - r_{pj}(t)| dt \dots\dots\dots(11)$$

$$\left( r_{opj} = \frac{(r_{p7} - r_{p1})(j-1)}{6} + 1, r_{pi} = \frac{P_i}{P_1} \right)$$

$$F_2 = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} |h_{ref7}(t) - h_7(t)| dt \dots\dots\dots(12)$$

$$F_3 = \frac{1}{T_f} \sum_{j=1}^7 \int_0^{T_f} |r_{ojj}(t) - r_{ij}(t)| dt \dots\dots\dots(13)$$

$$\left( r_{ojj} = \frac{1}{7} \sum_{n=1}^7 r_{in}, r_{ij} = \frac{I_j}{I_1} \right)$$

なお、式(11)から(13)で、 $T_f$ ,  $r_{opj}$ ,  $r_{pj}$ ,  $j$ ,  $h_{ref}$ ,  $h$ ,  $r_{ojj}$  および  $r_{ij}$  はそれぞれ、評価時間、理想とする負荷バランス、実際の負荷(荷重)バランス、スタンド番号、目標板厚、得られた板厚、動力(電流)バランスの目標値と実際の値を示す。入力関数  $F_1, F_2, F_3$  を作成するためには、まず教師用のデータが必要であり、このデータを得るために圧延シミュレータが用いられた。診断における各スタンドの板厚偏差については、セッティングが異常であると診断する診断余裕を5%以上に設定した。そして、正常であるとの診断のための誤差余裕として、1%以下に設定した。

まず、Fig.10に示すように、教師データとして正常な20データと異常な30データをサンプルとして準備した。

図は横軸に評価関数  $F_1$  の値をとり、縦軸に評価関数  $F_2$  をとって教師データをプロットしたものである。図に示すように、正常なデータを四角印で、異常データを三角印で示している。識別関数はその平均値を中心値とするように変換している。これらの教師データから求めた識別関数を用いたSVM適用結果をFig.11に示す。

図で、圧延データの類別に用いたカーネル関数  $K(x_i, x_j)$  のスケールパラメータ  $C_{rbf}$  の値は  $5.0 \times 10^{-6}$  とした。この図

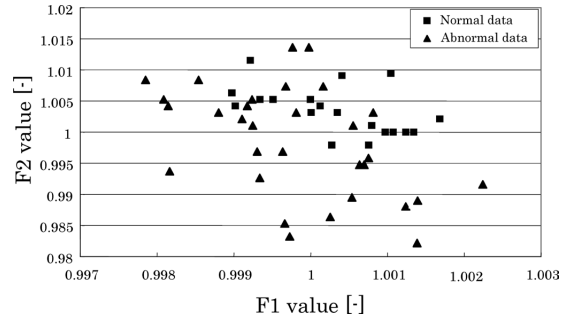


Fig. 10. Teaching data for modeling.

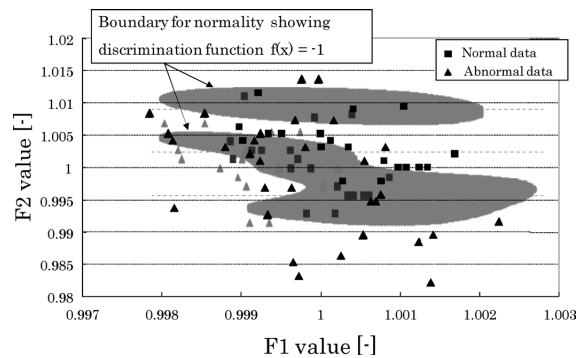


Fig. 11. Applied result of SVM ( $5.0E-6$ ).

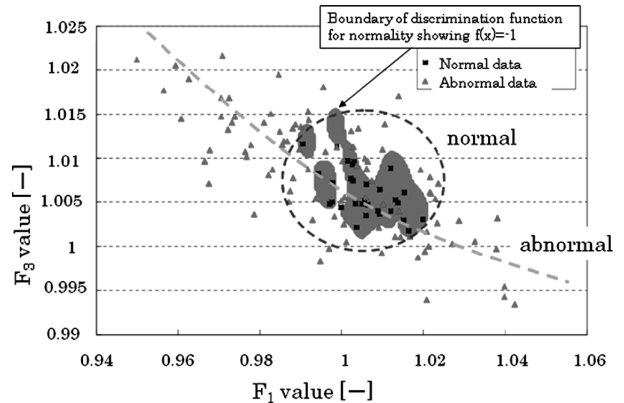


Fig. 12. Relations between  $F_1$  and  $F_3$  values.

では識別関数値が-1となる正常判定境界が正常なデータを取り囲む様子が示されている。すなわち、図の識別関数の境界を利用すれば、SVMにより正常と異常の類別が可能と思われる。しかし、識別関数の機能はガウシアンカーネルのスケールパラメータに大きく依存するため、類別結果が熟練者の評価基準にマッチするようにパラメータ値を選択する必要がある。

同じデータを評価関数  $F_1$  と  $F_3$  について整理した結果をFig.12に示す。

前述したように、 $F_1$ は負荷配分を、 $F_3$ は動力配分の評価値である。図から、圧延データがこれらの2つの座標軸上で双曲線に沿って分布しており、さらに、正常な圧延に対応したデータが双曲線の原点に近い位置に集中して分布していることもわかる。すなわち、正常な圧延データが、

$F_1$ と $F_3$ の2つを評価基準とする2目的最適化問題のパレート解に対応していると考えられる。このように、SVMの適用により正常と異常の圧延データの識別が可能であることが確認できる。

#### 4. 操業診断と介入操作ルールの生成

本研究では、操業診断と介入操作のルールはファジィルールの形を用いている。すなわち、複数のルールの集合体で、ファジィ理論にもとづいた $n$ 個の前件部変数と $n$ 個の後件部変数により、IF-THENでルール表現する。ファジィ推定システムでは、複数のルールを選択して、選択されたルールから各設定変数の調整量をファジィ推定で決定する。調整量の決定法は直接法を使用した。

##### 4.1 操業判定と介入修正

熟練者が熱延の途中スタンドでの板厚不良を推定し、介入修正する例を以下に示す。熟練者は、熱延の通板時に前段スタンドで板厚不良を判定し、後段スタンドのロール間隙を修正する知識を、式(14)のようにファジィルール化している。

これらの式に示すルール群の前件(IF)部が操業判定に対応する。操業判定にもとづいて問題解決のためにルールの後件(THEN)部に相当する操業介入が行われる。式(14)は圧延の総合特性からその妥当性が確認されているが詳細は文献11)を参照されたい。

$$\begin{aligned} \text{IF } & \alpha_1 < a_1, \alpha_2 < a_2 \text{ and } \alpha_3 < a_3, \\ \text{THEN } & \Delta S_3 = -b_1, \Delta S_4 = -b_2, \Delta S_5 = -b_3 \\ & \text{and } \Delta S_6 = -b_4. \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

論理的には操業判定の結果、問題があればその原因推定が行われ、原因に応じた操業改善が行われるのであるが、熟練者は経験からこの原因究明を飛ばして状況から対応を行うルールを獲得して使用している。

##### 4.2 操業介入ルールの生成

式(14)に示した操業介入ルールでは、#4スタンドに圧延材の先端部が通板した段階で、前段スタンド間の板ループをチェックし、それらが閾値以下である場合には当該および後段スタンドのロール間隙を修正している。このルールを適用するためには、式(14)に用いられているパラメータ( $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, b_4$ )を適切に設定する必要がある。本研究では、これらの7個のパラメータをGA法により最適化問題を解いて求めている<sup>16)</sup>。

最適化のための評価関数 $J$ は次式で与えた。

$$J = \sum_{i=3}^6 \sum_{j=1}^N |\alpha_i(t_j) - \alpha_i^0(t_j)| \dots\dots\dots(15)$$

GA法を適用するための適合度関数は $5000/J$ とした。式(14)で用いられている7個のパラメータを配列して遺伝子

Table 1. Parameters in Eq.(14).

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.3
[deg]	[deg]	[deg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]

を形成しGA操作により最適解を求めた。その際の突然変異確率は1%、交差率は90%、個体数は20、世代数は50としている。得られたパラメータの値をTable 1に示す。

#### 5. 数値実験

熱延での操業介入には、

- (1) # $k$ スタンドのモータ電流のみが過大→# $k$ スタンドの負荷を分散する。
- (2) 全スタンド間のループが過小でバランスが悪い→# $k$ スタンドの圧下介入と上下流スタンドの圧下を変更する。
- (3) 設定不良でスタンド全体の負荷バランスが崩れる→各スタンドの設定を変更する。
- (4) # $k$ スタンドの出側で片波→# $k$ スタンドの圧下介入と上下流スタンドの圧下を変更する。
- (5) 設定不良でスタンド全体の負荷バランスが崩れる→各スタンドの設定を変更する。
- (6) ロールの熱不良により板形状が悪化→各スタンドの圧下配分を変更する。

などがある。以下では、数値実験例として、(2)ミルバランスの修正、(3)負荷バランスの修正の2項目について説明する。

##### 5.1 ミルバランスの修正

熱間タンデムミルでは、板厚検出器は最終スタンドの出側にのみ設置されている。そこで、通板中に上流スタンドの出側板厚偏差を推定し、下流スタンドで板厚を保証する操作が必要である。熟練オペレータはこの偏差を察知し、圧延のバランスを崩さず、かつ板厚が目標通りになるように下流スタンドの設定を修正する。

すなわち、簡略な板厚異常の推定方法としてスタンド間ループの立ち上がり状態の目視観察がある。たとえば、マスバランスが崩れ、式(16)のように過小ループになる場合と、逆に式(17)のように過大ループになる場合である。なお、これらの式で $h$ はスタンドの出側板厚、 $\Delta h$ はその偏差を示す。

$$0 < \frac{\Delta h_1}{h_1} < \frac{\Delta h_2}{h_2} < \frac{\Delta h_3}{h_3} \dots\dots\dots(16)$$

$$0 > \frac{\Delta h_3}{h_3} > \frac{\Delta h_2}{h_2} > \frac{\Delta h_1}{h_1} \dots\dots\dots(17)$$

この条件は常に成り立つ訳ではなく、以下の式(18)が成立する場合である。(Qは板の塑性定数)

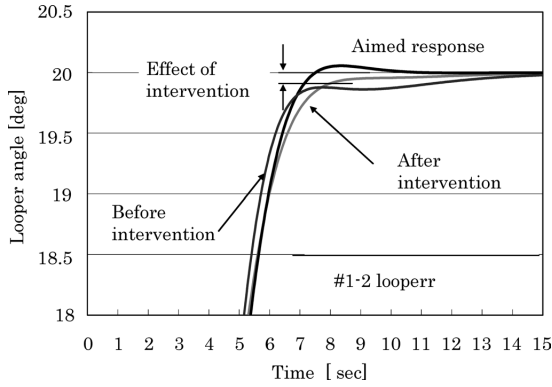


Fig. 13. Strip loops between #1 and #2 STD.

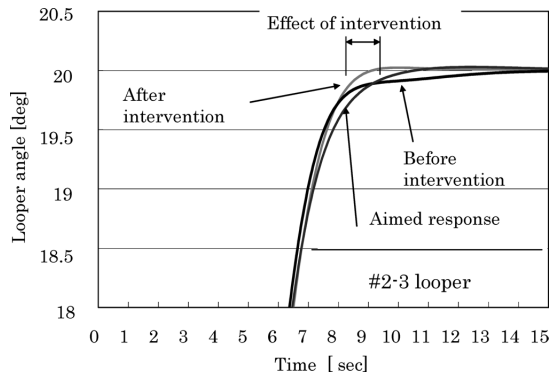


Fig. 14. Strip loops between #2 and #3 STD.

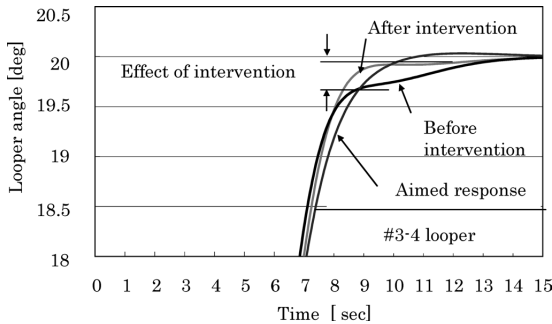


Fig. 15. Strip loops between #3 and #4 STD.

$$\frac{h_1}{h_2} \frac{1}{1 + \frac{M_2}{Q_2}} > 1, \quad \frac{h_2}{h_3} \frac{1}{1 + \frac{M_3}{Q_3}} > 1 \dots\dots\dots(18)$$

すなわち、熱間タンデムミルの上流スタンドで(18)式が満たされる場合は、スタンド間ループの状態を目視して板厚異常が検知できることがわかる。これが仮想センシングの例で、この場合はスタンド間板厚を仮想センシングしていることになる。ミルバランスの修正は前述の式(14)のルールを用いることで実行できる。数値実験結果をFig.13からFig.15に示している。式(14)を用いたことで、スタンド間ループの立ち上がり特性が改善されていることがわかる。

Fig.16には、この修正を行った結果、最終スタンドの板厚が変化の様子を示している。図からわかるように、こ

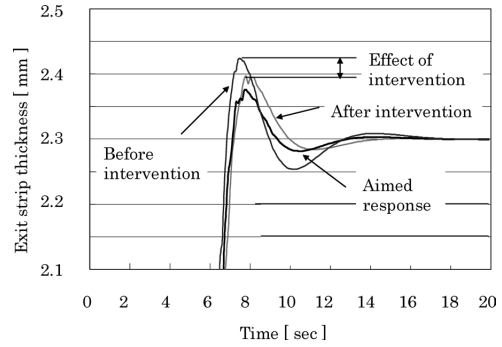


Fig. 16. Effect of proposed intervention.

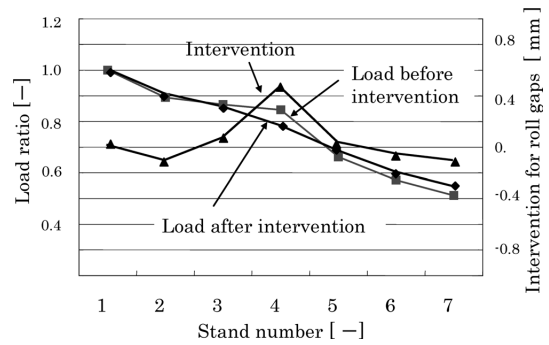


Fig. 17. Intervention for load imbalance.

の改善によりスタンド間の板ループの適正化と最終スタンドでの出側板厚の改善が確認できた。

### 5.2 負荷バランスの修正

タンデム圧延では、負荷バランスは重要な操業指標である。負荷バランスと板クラウンは密接に関連しており、負荷バランスがくずれると形状不良が起り、また動力（電流）バランスもくずれるため、設備の制約から加速リミットにかかるなど不具合が生じる。操業者は通板時から負荷バランスをチェックして問題があれば介入修正する。本研究では、負荷バランスの指標として(19)式に定義する $r$ 値を用い、操業ルールとしては(20)式に示すファジイルールをテストした。

$$r_{pk} = \frac{P_k}{P_1} \quad (k=1, 2, \dots, 7) \dots\dots\dots(19)$$

$$\text{IF } r_{pok} - r_{pk} \leq 0.02, \quad \text{THEN } S_k \pm 0.02 \dots\dots\dots(20)$$

なお、(19)式の $P_k$ は $\#k$ スタンドの圧延荷重である。Fig.17には、上記のルールを適用してスタンド間の負荷バランス不良への対応を行った結果が示されている。図に示すように、圧延の際に $\#4$ スタンド負荷が予定より過大になっているとき、エージェントが状況を認識して、 $\#4$ スタンドの圧下を軽くして負荷調整を行い、他スタンドの圧下も調整して板厚を保証する。この結果、負荷バランスが改善されることが示されている。

## 6. おわりに

本研究では、対象プロセスとして熱間タンデムミルを取り上げ、その圧延操業支援システムの構築を目標とした。すなわち、熱延での操業支援について説明するとともに、操業支援エージェントを実現する準備として、操業知識のデータベースとファジイルールを用いた操業判定と介入修正動作について検討した。

すなわち、熱間圧延機を対象とし操業中の診断方法を提案し、エージェントによる操業支援として、制御系の調整問題および、1本のコイル内での操業診断と当該または次コイルでの介入修正について報告した。操業中の圧延状態の監視し介入修正する方法としてファジイルールを用いルール中の閾値をGA法により決定した。また、制御系の調整についてはRNNモデルの適用による修正技術を提案し、適用テストによりその有効性の検討を行った。本報告では予備的な検討に止まったが上流スタンド間のループ形成状況を見て板厚の評価を行い、下流スタンドでロール間隙修正によりコイル先端付近から製品板厚の保証を行うことができる可能性を確認した。本研究で述べた仮想センサの導入により熱延操業の見える化を進めることや、ファジイクラシファイアによる調整ルールの生成とその実用化を実現するためには、今後より本格的な検討を続ける必要がある。SVMによる異常の判別機能や、新たな調整ルールの抽出結果をエージェントシステムへの組み込むことなど多くの課題が残されており、実用化に向け今後研究を加速する必要がある。

## 文 献

- 1) H.Tamaki: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 934.
- 2) H.Tamaki: *CAMP-ISIJ*, **21** (2008), 1094.

- 3) K.S.Narendra and K.Parthasarathy: *IEEE Trans. Neural Networks*, **1** (1990), 4.
- 4) K.R.Mueller, S.Mika, G.Raetsch, K.Tsuda and B.Schoelkopf: *IEEE Trans. Neural Networks*, **12** (2001), 181.
- 5) H.Inoue and K.Kamei: Proc. 2nd Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems, (2004), 15.
- 6) L.I.Kuncheva and L.C.Jain: *Jpn. Soc. Electrical Eng. Trans. D*, **128**, (2008), 940.
- 7) L.H.Lai and I.Sato: *Trans. Jpn. Soc. Geo-Informatica*, **17** (2006), 108.
- 8) K.Kawakami, H.Tanaka and K.Yamamoto: *Tech. Rep. IEICE*, **61** (2004), 25.
- 9) M.Saito, T.Tanimoto, Y.Hayashi, H.Yabuuchi and M.Yamagishi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 422.
- 10) M.Konishi: *CAMP-ISIJ*, **21** (2008), 1098.
- 11) 板圧延の理論と実際, 日本鉄鋼協会圧延理論部会編, 東京, (1984), 120.
- 12) S.Imajo, M.Konishi, J.Imai and T.Nishi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 933.
- 13) K.Abe, M.Konishi, J.Imai, R.Hasegawa, M.Watanabe and Y.Kamijo: *JIEE Trans. D*, **128**(7), (2008), 940.
- 14) S.Shinmura: *Trans. Jpn. Soc. Comput. Statistics*, **20** (2007), 59.
- 15) 志水清孝: システム最適化理論, コロナ社, 東京, (1976), 48.
- 16) 廣田薫編: 知能工学概論, 昭晃堂, 東京, (1996), 98.

Table A1. Fundamental pass schedule treated.

Stand no.	1	2	3	4	5	6	7
h [mm]	17.61	11.04	7.09	4.68	3.50	2.77	2.30
S [mm]	13.78	7.85	3.52	1.56	0.96	0.62	0.21
V [m/s]	1.30	2.23	3.57	5.15	7.12	9.35	11.52
b [mm]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Table A2. Mill dimensions of hot rolling mills.

M	500000 [kgf/mm <sup>2</sup> ]	Mill modulus
L	2.5[m]	Half of distance between stands
R	400[mm]	Work roll radius
Tv	0.05[s]	Time constant of motor drive
Ts	0.05[s]	Time constant of gap set