

(論文)

# 熱間仕上連続圧延における圧延オペレータ支援システム

## Decision Support System for Operator in Hot Strip Mill



小林正宜<sup>\*1</sup>(博士(工学))  
Dr. Masanori KOBAYASHI



柳 修介<sup>\*2</sup>(博士(工学))  
Dr. Shusuke YANAGI



森本禎夫<sup>\*3</sup>(博士(工学))  
Dr. Yoshio MORIMOTO



豊田 崇<sup>\*4</sup>  
Takashi TOYODA



石川孝司<sup>\*5</sup>(工博)  
Dr. Takashi ISHIKAWA

A decision support system was developed recently and is being used in selecting draft schedules in the hot finishing mill at Kakogawa Works. It helps the operator to determine a better schedule based on the past results of actual rolling operations. After applying the system, the variations in draft schedules and sheet crown ratio schedules for the finish rolling have been narrowed down to smaller ranges than before. It is thought that this is the result of the preferences of operators as they selected draft schedules for finish rolling with edge wave strip shapes. This system has now become essential to the operator in the hot strip mill, and contributes to the trouble-free operation of finish rolling.

まえがき = 熱延鋼板の製造において、タンデム圧延機による熱間仕上連続圧延（以下、熱間仕上圧延という）は板材の板厚および板クラウンを造り込むための重要な工程である。実圧延に際しては、これら板厚の制御に加えて、スタンド間の板形状を良好に保持しながら安定した通板状態を確保することも求められている。これまでに、圧延スタンドごとのワークロール（以下、WRという）プロファイルの適正化、WRプロファイルに応じたパススケジュールの設定、およびパススケジュールごとの圧延を実現するためのミルセッティングに関する技術開発が数多くなされてきている。とくに、パススケジュールに関しては、初期のパワーカーブを用いた設定法<sup>1)</sup>に始まり、圧延理論に基づいた設定法<sup>2), 3)</sup>が開発され、その発展形としてファジイ多目的計画法やエキスパートシステムなどによりパススケジュールを最適化する手法<sup>4), 5)</sup>が提案されている。

当社においては、これらの圧延パススケジュール設定法の実機適用を試みてきたが、WRプロファイルや圧延荷重などのモデル式の精度不足や高強度鋼板を始めとする新たな難圧延材の出現などの理由によって、実圧延作業での定着には到っていない。

しかしながら、パススケジュール設定の適正化は、今後ますます増加すると考えられる難圧延材や厚幅サイズジャンプ材に対応し、かつ、若年層への世代交代が進む圧延オペレータの経験不足をカバーしていく上で早急に達成しなければならない課題であった。

こうしたことから、最適化手法を含めたモデル化を主体とした今までのパススケジュール設定法のレベルアップではなく、板材ごとのパススケジュールを設定する際、圧延オペレータの経験不足をカバーしつつ、過去の経験則の適用可能な支援システムの開発を行った。

### 1. 圧延オペレータ支援システムの基本構想

当社加古川製鉄所熱延工場における熱間仕上圧延機の概要を表1に示す。F1からF7の全7スタンドを有し、前段のF1からF3はWRに上下左右非対称なプロファイルを付与したショートストロークのWRシフトミル、後段のF4以降は一般的なプロファイルを持つロングストロークのWRシフトミルという構成になっている。また、全スタンドともWRベンダを装備している。

この熱間仕上圧延機のパススケジュール設定に関して、板材の板厚・板クラウンとスタンド間形状に大きく影響し、かつ調整頻度が高い圧下スケジュール設定（各圧延スタンドの出側板厚と圧延荷重の関係）と各圧延スタンドのWRベンダ設定を決める際の意味決定をオペレータ支援の対象とした。また、この意思決定を行うために必要となる有効な情報を提供することを目的とし、以下の方策を具体化した。

- ① 圧下スケジュールは、過去の実績圧下スケジュールのばらつきの中から圧延オペレータが適正と判断し

表1 熱延工場諸元  
Table 1 Specifications of hot strip mills

Number of stands	7	
Mill type	4 high mill with work roll shift	
Maximum rolling load	39,000 kN	
Work roll shifting	F1 to F3	± 100 mm
	F4 to F7	0-600 mm
Work roll bending force	2,060 kN/chock	
Work roll diameter	F1 to F3	700-805 mm
	F4 to F7	650-750 mm
Work roll profile	F1 to F3	Asymmetric curve
	F4 to F7	Sine curve

<sup>\*1</sup> 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部 <sup>\*2</sup> 技術開発本部 材料研究所 <sup>\*3</sup> 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部 (現 ㈱コベルコ科研)  
<sup>\*4</sup> 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 薄板部 <sup>\*5</sup> 名古屋大学大学院 工学研究科

たものを選択できるようにする。

- ②各圧延スタンドのWRベンダ設定も圧下スケジュールと同様に、過去実績のばらつきの中から良いと思えるものを選択できるようにする。
- ③圧下スケジュールとWRベンダ設定における過去実績のばらつきは、圧延サイズ、圧延温度および圧延時のWRの状態などの圧延条件が類似しており、かつ、時系列的にも近い板材のものが用いられるようにする。

## 2. 圧延オペレータ支援システムの構築

当社熱延工場における熱間仕上圧延の圧下スケジュールおよびWRベンダの設定方法は、板材の厚さ、幅および鋼種で層別されたテーブル方式によるものであり、その時々板厚や板クラウンの実績値、通板状況に応じて、圧延オペレータによる介入調整が必要となっている。そのため、オペレータの経験や技量によって圧延結果に差が生じることが多々あり、圧下スケジュールとWRベンダの設定の確度が一定水準以上となるような支援システムが求められていた。

### 2.1 圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールの過去実績抽出方法

#### 2.1.1 圧下スケジュールのばらつき

圧下スケジュールは、板厚、板幅、鋼種および圧延温度などの板材の特徴量でほぼ層別できることが経験上知られている。そこで、圧下スケジュールのばらつきを定量的に取り扱うため、式(1)に示すように、板材の特徴量から、圧下スケジュール設定対象の板材が中心となるように、ユークリッド距離による基準空間を過去に圧延された板材の実績データを用いて作成する。同式に用いる特徴量はすべて、その平均値と標準偏差で正規化している。鋼種を示す特徴量は、C、Si、Mnなどの化学成分で代表させた。正規化した特徴量の重み係数に関しては、圧延荷重への影響度合いを考慮して決定した。

$$d_j = \sum_{i=1}^N a_i \cdot (x_{i,j} - x_{igt_i})^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $d_j$ ：過去の $j$ 番目板材と対象板材のユークリッド距離、 $x_{i,j}$ ：過去の $j$ 番目板材における $i$ 番目特徴量、 $x_{igt_i}$ ：対象板材における $i$ 番目特徴量、 $a_i$ ： $i$ 番目特徴量の重み係数、 $N$ ：板材における特徴量の数である。

つぎに、式(2)による類似度がしきい値を満足する板材を時系列的に並べたときの直近のM本を抽出する。抽出された板材の圧下スケジュールの上下界をとることによって圧下スケジュールのばらつきを求める。

$$w_j = \exp(- (d_j/c)^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $w_j$ ：過去の $j$ 番目板材と対象板材の類似度、 $c$ ：類似度計算の調整係数である。

図1は、式(1)、(2)を用いて求めた圧延サイズ2.3mm厚×1,100~1,200mm幅(以下1,200mm幅という)の軟鋼における圧下スケジュールのばらつきを示した例であり、圧下スケジュールのばらつきはある程度の範囲に収まっている。圧延オペレータは、経験則と近々の圧

延状況を踏まえてこのばらつきの中から適正と考えられる圧下スケジュールを選択することはさほど困難ではないように見える。

#### 2.1.2 WRベンダ設定のばらつき

図2は、圧延サイズ1.8~2.8mm厚×1,200mm幅の軟鋼における各スタンドのWRベンダ設定の実績値を示したものである。いずれのスタンドも実績値は大きくばらついており、この中から適正なWRベンダ設定値を選択することはほぼ不可能である。WRベンダ設定のばらつきは、圧下スケジュールのように板材の特徴量を用いて直接的に表すことができない。

しかし、圧延オペレータの介入調整によってスタンド間の板形状が改善されるという事実から、圧延オペレータにはベンダ調整の暗黙知が存在していると考えられる。この暗黙知を形式知化するため、実績の圧下スケジュール、WRベンダ設定値およびロールの状態から各圧延スタンドの板クラウン比率(出側板クラウン/出側板厚)を算定し整理した。その結果、例えばF1スタンドのWRベンダ設定の実績分布の尖度は-0.55であるのに

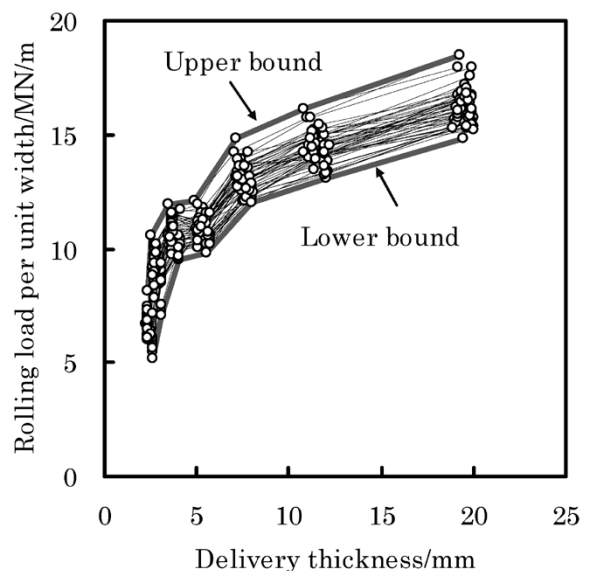


図1 圧下スケジュールのばらつき(軟鋼, 2.3mm<sup>t</sup>×1,100~1,200mm<sup>w</sup>)

Fig. 1 Variation of draft schedule in mild steel strip of size 2.3mm<sup>t</sup>×1,100-1,200mm<sup>w</sup>

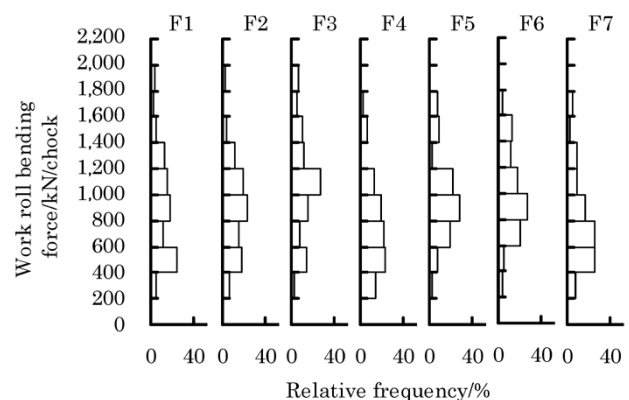


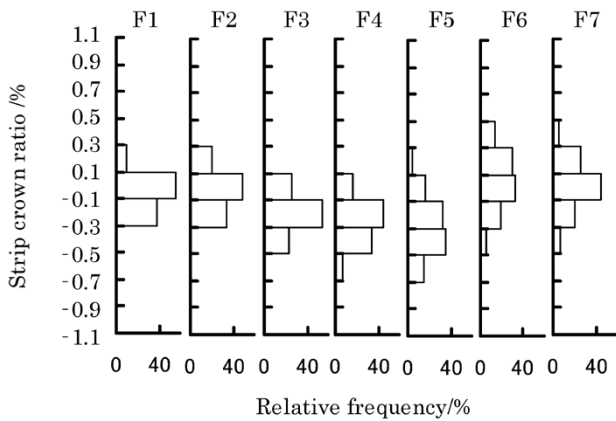
図2 ワークロールベンディング力のばらつき(軟鋼, 1.8~2.8mm<sup>t</sup>×1,100~1,200mm<sup>w</sup>)

Fig. 2 Variation of work-roll bending force in mild-steel strip of size 1.8-2.8mm<sup>t</sup>×1,100-1,200mm<sup>w</sup>

対し、板クラウン比率の実績分布の尖度は0.75となるなど、**図3**に示すように、圧延オペレータの狙いの板クラウン比率スケジュールがそのばらつきを含めて抽出された。すなわち、WRベンダ設定のばらつきは、板クラウン比率スケジュールのそれと置換することができ、板材の特徴量で層別された板クラウン比率スケジュールのばらつきの中から圧延オペレータに適正と考えるスケジュールを選択させることでWRベンダ設定を適正化することができる。

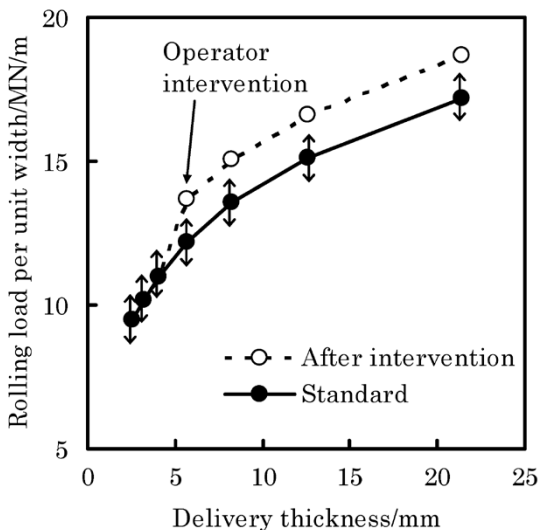
## 2.2 圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールの基準とそれらへの介入調整

過去実績のばらつきの中から、圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールを選択する際、基準となるスケジュールが必要である。ここでは、ばらつきの上下界の中央を通るものを単純に基準スケジュールとして採用した。さらに、基準スケジュールへの介入調整のやり方として、圧下スケジュールについてはF1～F7スタンドの圧延荷重を個々に上げ下げできるようにしている(**図4**)。また、圧下スケジュールの連続性のある程度維持するため、あるスタンドの荷重を修正したときはそれ



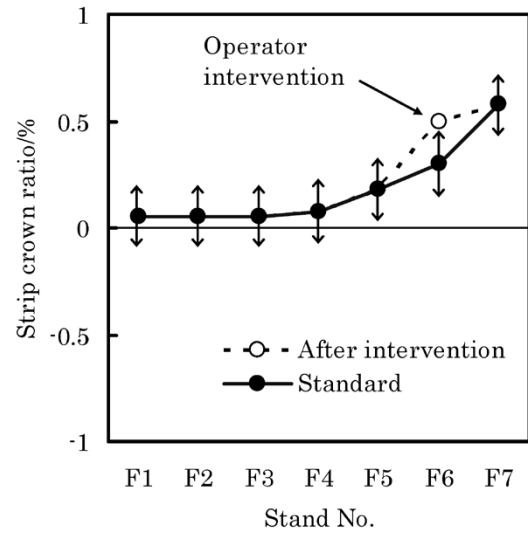
**図3** 板クラウン比率のばらつき (軟鋼, 1.8~2.8mm<sup>t</sup>×1,100~1,200mm<sup>w</sup>)

**Fig. 3** Variation of strip crown ratio in mild steel strip of size 1.8-2.8mm<sup>t</sup>×1,100-1,200mm<sup>w</sup>



**図4** 圧下スケジュールへの手介入例

**Fig. 4** Example of operator intervention for draft schedule



**図5** 板クラウン比率スケジュールへの手介入例

**Fig. 5** Example of operator intervention for scheduling sheet crown ratio

より前段のスタンドの荷重も連動して変化するようにになっている。

一方、板クラウン比率スケジュールへの介入は、**図5**に示すように、F1～F7スタンドの板クラウンを個々に上下することでできるようにした。板クラウン比率スケジュールについては、前スタンドの板クラウン比率との大小によってスタンド間の板形状が決まるため、圧下スケジュールのような前段スタンドの連動修正は行わない。

## 2.3 システム構成と圧延オペレータへの情報提示

圧延オペレータ支援システムは、**図6**に示すように、既存の圧延プロセスコンピュータの下位に接続したパーソナルコンピュータに搭載している。支援システム用パーソナルコンピュータ内には板材の圧延実績がデータベースとして保存されている。このデータベースと圧延プロセスコンピュータからリアルタイムで受け取る圧延材のデータを用いて、圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールのばらつき、各スケジュールの基準およびWRベンダの設定値を計算し、圧延オペレータへの情報提示を行う。圧延オペレータは、この情報を参照しつつ基準スケジュールに介入し、板材を圧延する際の圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュール (WRベンダ設定値に相当) を決定する。

実圧延に採用された圧下と板クラウン比率スケジュールは、最新の圧延実績データとしてデータベースに順次保存され、次材以降の各スケジュールのばらつき計算に反映されていく。

圧延オペレータに提示する画面は**図7**に示すとおりである。圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールのばらつきと同時に、最終的に圧延オペレータが決めた圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールおよびそれによるWRベンダ設定値を表示している。同画面にはさらに、圧延オペレータが意思決定する際の判断材料となり得るWRシフト位置、サーマルや摩耗のWRプロフィールの情報も表示している。

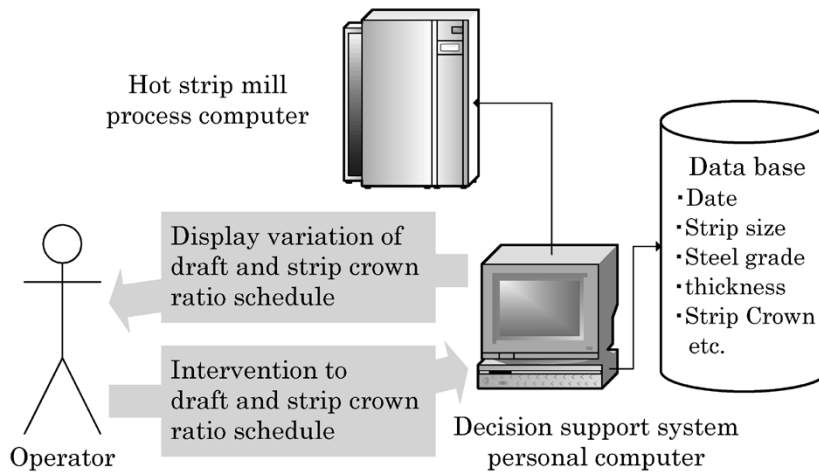
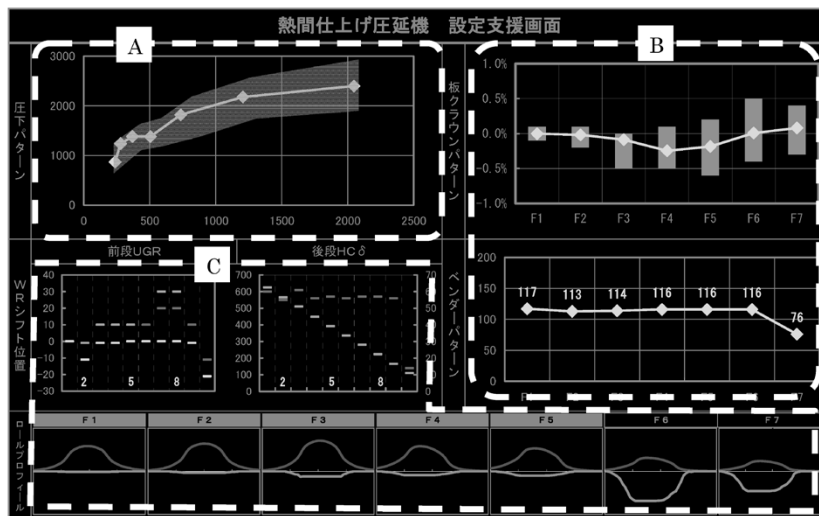


図6 熱延オペレータ支援システムの構成  
Fig. 6 Configuration of decision support system for operating hot strip mills



A : Draft schedule  
B : Strip crown schedule and work roll bending force  
C : Others ( work roll profile, work roll shift position etc.)

図7 熱延オペレータ支援システムの画面例  
Fig. 7 Screenshot example of decision support system

### 3. 実機適用結果と考察

今回新たに開発した圧延オペレータ支援システムを実機適用した結果、実圧延の圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールの選定に生じた変化について以下に記す。

サイズ：2.3mm厚×1,200mm幅、鋼種：軟鋼の板材を対象とした支援システム導入前後の圧下スケジュールのばらつきを比較した(図8)。F4、F3スタンドの圧延荷重のばらつきが小さくなったものの、総じて、圧下スケジュールばらつきが改善されたようには見えない。

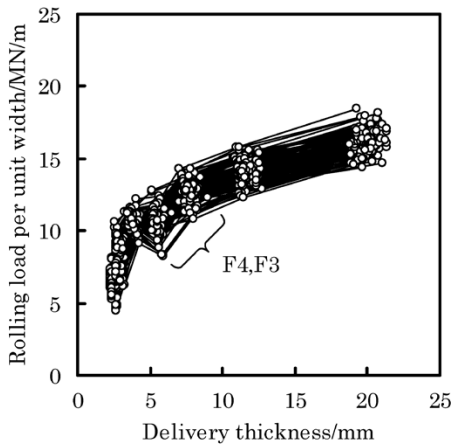
この圧下スケジュールばらつきの中から、代表的なスケジュールを抜き出すために、k-means法<sup>6)</sup>による圧下スケジュールばらつきの非階層的クラスタ分析を行った。本方法は、多次元データ(属性ベクトル)をk個の層別(クラスタ)に分類する方法であり、クラスタの数kはあらかじめ与えておく必要がある。個々の属性ベクトルは、各クラスタの重心(クラスタ内の属性ベクトルの平均値)からの距離に応じて、最も近いクラスタに

属するように分類される。このような分析に際して、属性ベクトルは、式(3)に示すように、圧下スケジュールと同値である各圧延スタンドの圧下量を要素とする7次元ベクトル、また、クラスタ重心と属性ベクトル間距離はユークリッド距離を採用した。また、k-means法では、事前に分類するクラスタの数kを決めることが求められるが、ここではkは、妥当と思われる圧下スケジュール分類が得られるまで2から順に増やしていった(今回はk=3)。

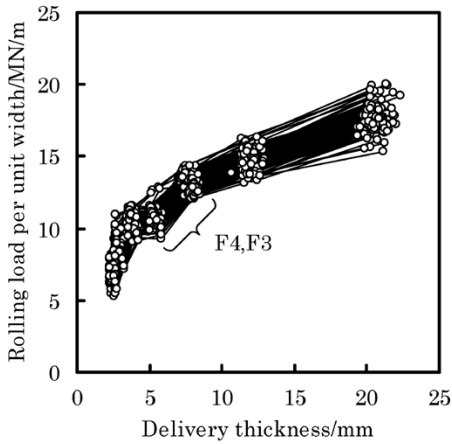
$$v = \{\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4, \Delta h_5, \Delta h_6, \Delta h_7\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、v：板材の圧下スケジュールの属性ベクトル、 $\Delta h_1 \sim \Delta h_7$ ：F1～F7スタンドの圧下量である。

支援システム導入前後の圧下スケジュールばらつきのクラスタリング結果を図9に示す。導入前の圧下スケジュールにはA、B、Cの3クラスタが存在しているが、導入後にはCのクラスタが淘汰されてA、Bの二つのクラスタしか残存しなくなっていることがわかる。Cクラスタを形成する圧下スケジュールは、圧延荷重がF5スタンドで立ち上がった後、F6、F7スタンドで急激に下



(a) Before introduction of decision support system



(b) After introduction of decision support system

図8 熱延オペレータ支援システム導入前後の压下スケジュールの比較 (軟鋼, 2.3mm<sup>t</sup>×1,100~1,200mm<sup>w</sup>)

Fig. 8 Comparison in variation of draft schedule in mild steel strip of size 2.3mm<sup>t</sup>×1,100-1,200mm<sup>w</sup> before and after introduction of decision support system

がる。このため、板材のスタンド間形状がF5出側で耳波大となりF6, F7出側で中波に移行しやすいスケジュールである。これに対し、残りの2クラスタ内の压下スケジュールは、各スタンド間形状として耳波からほぼ平坦(へいたん)あるいは耳波のままを維持しやすいスケジュールである。圧延オペレータには元来、通板時の板材の絞り、蛇行および曲がりなどの圧延トラブルのリスクを回避しやすいという理由から、板材のスタンド間形状を耳波にしようとする傾向がある。このため、今回の支援システムの導入によって通板時の耳波指向が加速され、AあるいはBのクラスタ内の压下スケジュールが選択される頻度が劇的に増加したものと推察される。

さらに、板クラウン比率スケジュールのばらつきについても压下スケジュールの場合と同様な分析を行った結果、図10に示すように支援システムの導入前後でばらつきを形成するクラスタに違いが出ていることがわかる。導入前に存在したA', B', C'の3クラスタのうち、C'のクラスタが導入後に消滅し、板クラウン比率スケジュールのばらつきはA', B'の二つのクラスタに収斂(しゅうれん)した。さらに、A'クラスタ内の板クラウン比率スケジュールにおけるF7とF6スタンドの板クラウン比率を見ると、支援システムの導入後、その差が小さくなっていることがわかる。支援システム導入後に残ったA'とB'のクラスタの板クラウン比率スケジュールは、F6とF7スタンドの板クラウン比率の変化からすると、F7スタンド出側の板形状が平坦あるいは耳波になりやすいスケジュールである。これは、仕上圧延後の板形状についても、ランアウトテーブル上での水冷時に板上水の排出性を高めて冷却むらを避けたいとの理由から、圧延オペレータは耳波願望を持っていることによる。すなわ

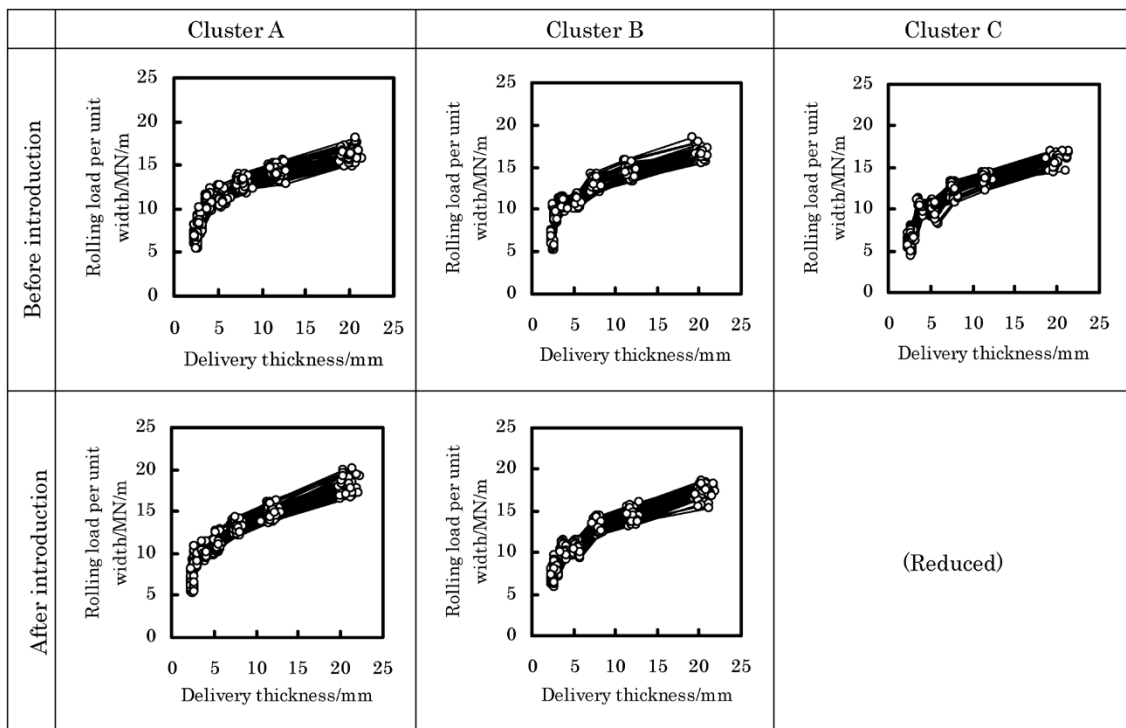


図9 熱延オペレータ支援システム導入前後の压下スケジュールのクラスタリング解析結果 (軟鋼, 2.3mm<sup>t</sup>×1,100~1,200mm<sup>w</sup>)

Fig. 9 Result of cluster analysis of variation in draft schedule of mild steel strip of size 2.3mm<sup>t</sup>×1,100-1,200mm<sup>w</sup> before and after introduction of decision support system

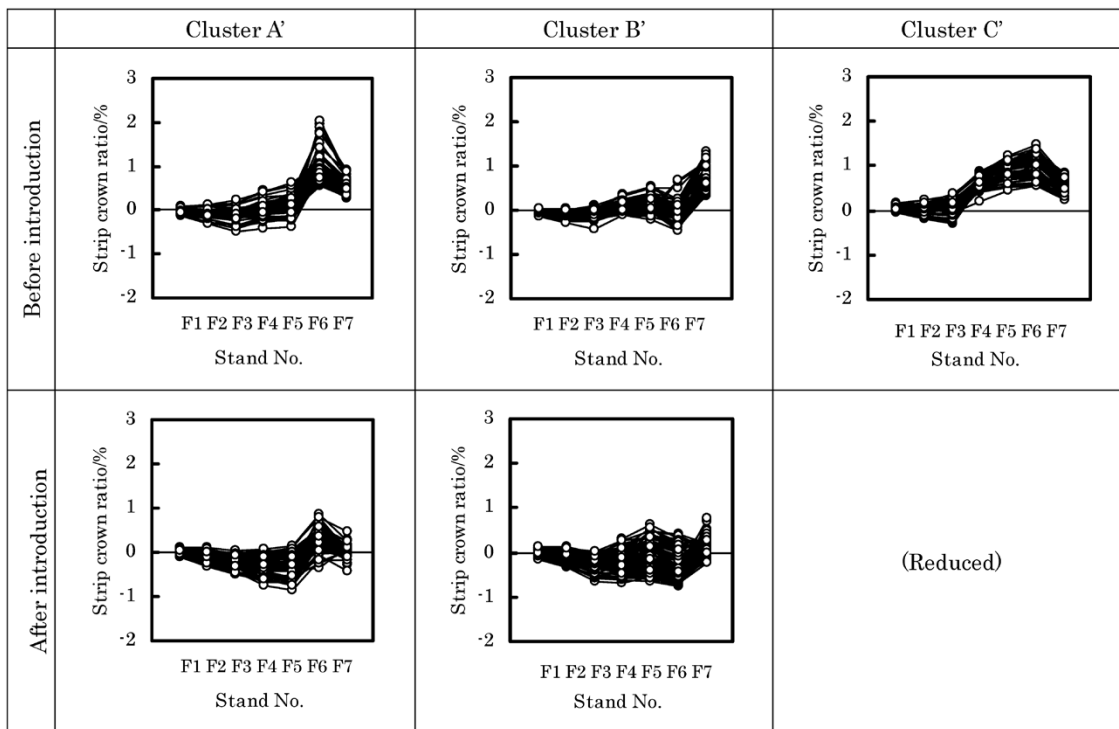


図10 熱延オペレータ支援システム導入前後の板クラウン比率スケジュールのクラスタリング解析結果 (軟鋼, 2.3mm<sup>t</sup>×1,100~1,200mm<sup>w</sup>)  
 Fig.10 Result of cluster analysis of variation in strip crown ratio schedule of mild steel strip of size 2.3mm<sup>t</sup>×1,100-1,200mm<sup>w</sup> before and after introduction of decision support system

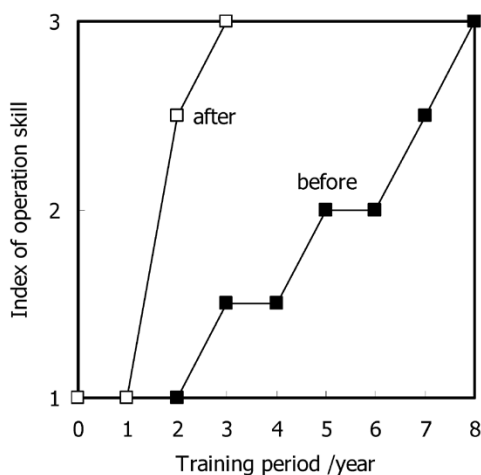


図11 新人熱延オペレータの運転習熟期間の変化  
 Fig.11 Improvement in required training period for new operators for hot finishing mill

ち、今回の支援システムの導入によって、圧延オペレータの耳波指向が明確に板クラウン比率スケジュールの選択に反映されたものと推察される。

若手圧延オペレータを対象に、支援システムの導入によって運転技能の習得度がどのように変わったかを調べた。その結果を図11に示す。習熟度は、経験10年以上のオペレータ複数名が社内基準に従い、レベル1~3の3段階で判定した。レベル1は運転操作不可(イメージトレーニング)の段階、レベル2は運転操作の際に指導者の補助を要する段階、レベル3は指導者の補助なく一人運転対応可能となる段階である。導入前は4名、導入後は2名のオペレータの習熟度の平均をグラフに示した。

仕上圧延オペレータとして認定されるには、レベル3まで運転技能を習得する必要がある。導入前では、圧下

調整作業に関わる運転技能の習熟度がレベル3に達するのに8年間要していたのに対し、導入後は3年間にまで短縮された。

むすび=熱間仕上圧延において、過去実績のばらつきの中から、圧延オペレータが適正と判断した圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールを選択できるようにするための支援システムを開発し、2011年4月から実機適用を開始した。

本支援システムにより、圧延オペレータが選択する圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュール(各圧延スタンドのWRベンダ設定)には、通板時の板形状として耳波指向がより顕著に現れるようになった。また、その結果として、圧下スケジュールと板クラウン比率スケジュールのばらつきが支援システムの適用前に比べてより狭い範囲に収斂した。これにより熱間仕上圧延における板材の通板状態が安定し、板クラウンや板厚の造り込みが容易になったことから、圧延オペレータの運転技能習得期間を短縮することができた。

なお、本稿は「鉄と鋼」Vol.99(2013), No.12で発表した「熱延鋼板の熱間仕上連続圧延における圧延オペレータ支援システムの開発」に加筆したものである。

参考文献

- 1) 今井一郎. 塑性と加工. 1964, Vol.5, No.44, p.573.
- 2) 鈴木 弘ほか. 塑性と加工. 1967, Vol.8, No.80, p.460.
- 3) 鈴木 弘ほか. 塑性と加工. 1968, Vol.9, No.85, p.86.
- 4) 北村 章ほか. 鉄と鋼. 1993, Vol.79, No.3, p.100.
- 5) 村上史敏ほか. 鉄と鋼. 1993, Vol.79, No.3, p.107.
- 6) B. Michaelほか著. 江原 淳ほか訳. データマイニング手法-営業, マーケティング, CRMのための顧客分析(2訂版). 海文堂, 2005, p.324.