

熱延ドラフトスケジュールのエキスパートシステム

村上 史敏*・古川 高人*・小土井 章夫*・梅田 浩*・岡崎 雪彦*

Development of Expert System for the Hot Strip Mill Draft-scheduling

Shitoshi MURAKAMI, Takato FURUKAWA, Akio KODOI, Hiroshi UMEDA and Yukihiro OKAZAKI

Synopsis : Draft-schedule in hot strip mill is made by the computer automatically with theoretical model. But in some cases, especially in case of material with high deforming resistance or thin gage material, supplemental operator's manual operation is needed to cope with the higher level problem, such as the transversal movement in the direction of strip width or the strip shape fluctuation between the stands.

So we introduced the expert system in the finishing mill set-up system at No.2 hot strip mill in NKK Fukuyama Works to ensure the fully automatic computing at the last stage. In this system, we summarized the operator's know-how to avoid the above mentioned higher level problem in two major control items. One is the planning to vary the load distribution over the stands in one cycle, and the other is the restriction of main motor current distribution over the stands and roll gap difference between the neighboring stands.

In a feasibility test, the prototype system was 90% applicable to the real process, and we have developed the real-time guidance system.

Key words : hot strip mill ; expert system ; draft schedule ; load distribution over stands ; main motor current distribution.

1. 緒言

熱延におけるドラフトスケジュール（各スタンドに圧下量を配分するスケジューリング）は、かつては、その専門家がパワーカーブ等の図面上でノウハウを元に線を引いたが、現在では、理論的なモデルに従って計算機で自動的に作成する様になっている。しかし、仕上連続ミルの各スタンドの状態を正確に把握できないため、モデル精度には自ずから限界があり、実操業上では手動修正等オペレータの補助を必要としている。特に薄物、特殊鋼等の難通板材では、この補助動作にオペレータの中でもベテランが必要となっており完全自動化のニーズが高まっている。

そこで、福山製鉄所第2熱延工場では、難圧延材を対象に仕上ミルドラフトスケジュールの自動化を目標として、エキスパートシステムを導入し、ガイダンスシステムを構築した。

2. エキスパートシステム導入の背景

本論に入る前に、ここで、1. 本論文ではドラフトスケジュールのどの部分を対象としているか、2. 手段としてなぜ理論モデルの高精度化でなく、エキスパートシステムを選択したか、に触れておこう。

なお、当該工場の仕上ミルの構成はFig. 1の様にF1～F7

の7スタンドであり、F1～F3側を前段、F5～F7側を後段と呼んでいる。

2・1 ドラフトスケジュールの中のシステム化対象項目

対象としている難圧延材とは、一般的に、1. 板厚が薄い(1.2mmが代表)、2. 変形抵抗が大きい(高カーボン材、SUS等)材料であり、圧延上の問題としては次のようなものが顕在化する。

(1)通板難…蛇行、曲り、走行性

(2)形状悪化…最終形状、スタンド間形状変動

この中で特にストリップ尾部の蛇行、曲りの問題が大きく、それに要求される精度は、Fig. 2の様に入側無拘束、速度8m/sで約5m走行する間の蛇行量を、20～30mm以内に抑えるというものであり、これは運転室から目視もできない量を制御する困難な問題である。これらの問題の本質的な解決方法としてセンサーや、制御設備の開発という方向もあるが、本論文ではあくまでソフト面からの対応を目指すこととした。

この様な材料を圧延する際、当所では、Fig. 3の実圧延の例の様に、圧延の負荷の指標として主電動機電流を用いている。ある場合は前段側の負荷を重くし、ある場合は後段側の負荷を重くしている。この様にすると通板、形状等の点で良好な圧延状態を再現できるのが現実である。これ等の操作は理論的にはモデル化はできないものの、定性的には説明できる要素が多いため、このような操作を計算機で

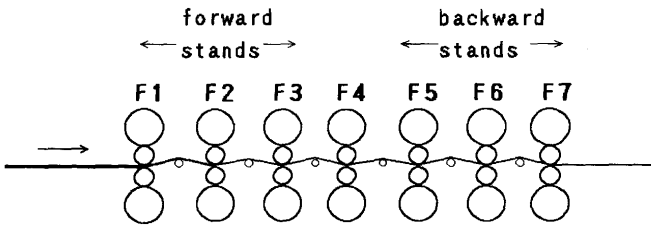


Fig. 1. Configuration of the hot strip mill.

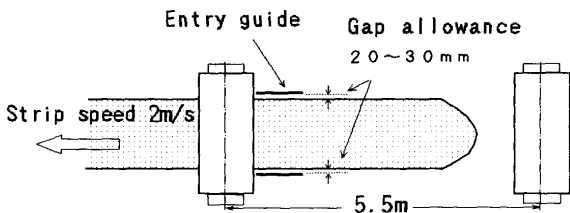


Fig. 2. Allowance of transversal movement at tail of strip.

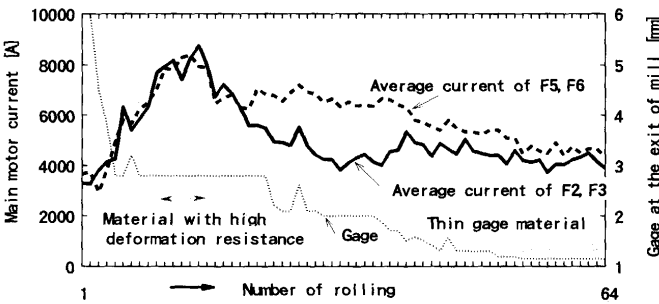


Fig. 3. Load distribution over stands in one cycle.

実現しようというのが本論のテーマである。

なお、当該工場では、おおよその様な操作状態をひっくりめて、ローカルな言葉で「圧下バランス」と言っており、以下、良好なスタンド間圧下量配分状態を示す指標を「圧下バランス」と呼ばせていただく。

2・2 現状モデルの精度限界

仕上ドラフトスケジュールのモデルとしては、動力カーブ¹⁾²⁾が代表的であるが、ローカルな設備特有の要素が多く一般的な研究は進んでいない。そこで一般的議論を進めるために、仕上ドラフトスケジュール問題の中で、まず圧延のモデルと数値計算で解を求める方法の問題とを分け、後者は最適化問題になるものとして、前者のモデルの問題に注目する。そうすると、仕上ドラフトスケジュール計算はFig. 4のように粗ミル出側の板厚、クラウンと、仕上ミル出側の目標板厚、クラウンを結ぶ各スタンドの板厚、クラウンの最適なルートを決める問題ということもでき、この制約条件は

- (1) まず、各スタンド出側の材料温度を目標範囲内とするように速度が決まる。
- (2) 温度、板厚より荷重が決まる。
- (3) 荷重、クラウンより、形状制御量（ペンダ等）が決

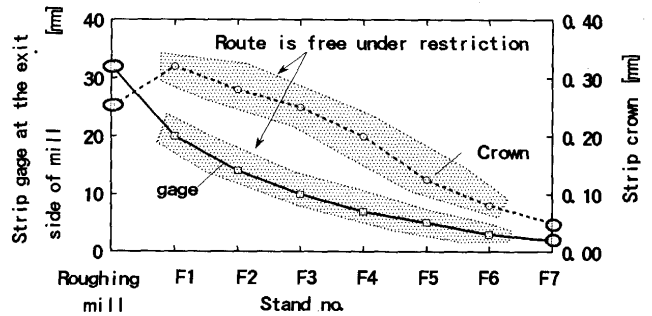


Fig. 4. Routing problem in draft scheduling of finishing mill.

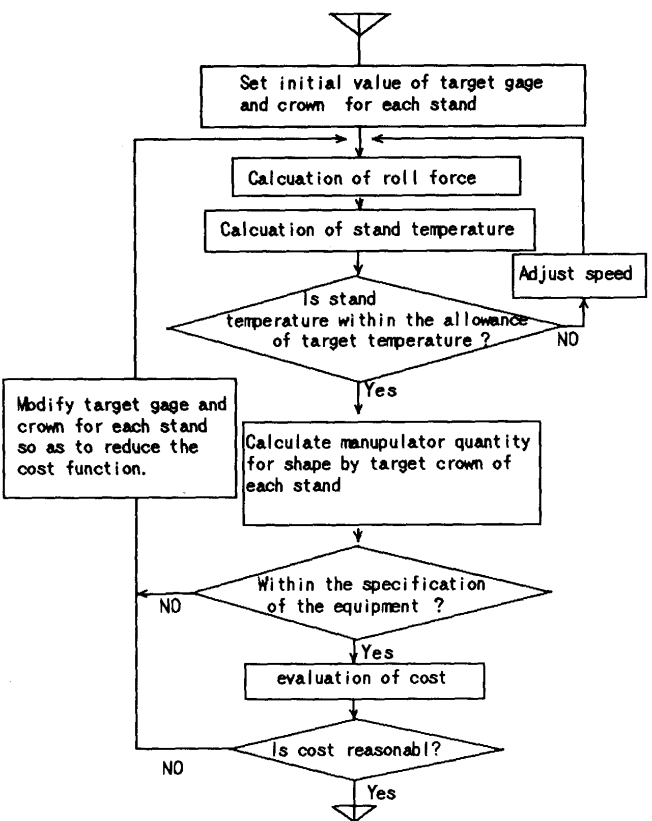


Fig. 5. Flow of draft-scheduling.

まる。

(4) トルク、荷重、速度、形状制御操作量等の範囲が設備制約内。

(5) 仕上ミル出側およびスタンド間の形状が目標値内。であり、これ等により原理的には評価関数を導入し、Fig. 5のようなフローでコストを最少にする最適解を求めることができる。

この様な方法で最適解を求めようとすると、次の2つの問題がある。

- (1) モデルの精度が不足している。
- (2) 理論的に確立しているモデルの範囲で、評価関数を決めると、解は、ある範囲内で自由な経路をとれ、一意でなくなる。

通常の材料では(1)(2)が特に問題になることもなく圧

延できるが、難圧延材に於いては全ての条件が厳しくなるため、まず(1)のモデル精度が問題となる。特に形状の評価では、板クラウンの精度は後段ミルで板厚の0.1%オーダが必要となり(例、板厚1mmで1 μ m)、しかも、スタンド間での差で効くため、中間スタンドも含めてモデル精度が要求される。しかし現状中間スタンドにはセンサがほとんど無いためモデル精度の確保は困難である。

更に、(2)では、評価関数に通板性(走行、蛇行等)、クロップ形状等を評価する量を導入する必要がある、これ等はまだ理論的にも確立していないため、正攻法でモデルにより「圧下バランス」を制御するまでには遠い道のりがある。

2・3 エキスパートシステムの利点

この様なモデルの誤差があっても、オペレータの補助を加えることにより計算機のセットアップが使えるのは、計算機モデルの誤差をオペレータがある程度予測できることにある。計算機に無い、オペレータの能力として

(1)目視情報という、より次元の高い情報(特に形状)がある。

(2)自己発見的に良い圧延状態を見出し、更に改善していく。

はもちろんあるが、現実的な問題で

(3)原因は特定できないが、何かがある(例;どこかの設備とか計算機のモデル誤差に、ある癖がある)のを知っており、その場合の対応方法も知っている。

ということがある。この(3)の部分だけでも計算機システムに取り込めば操業安定に結びつけられる。そこで、主に(3)の部分システム化することを狙い、将来センサが充実して計算機のモデル精度が上がるまでの間の次善の策として、エキスパートシステムの導入を検討した。

一般的なエキスパートシステムの利点は当システムでも当てはまり、

(1)操業安定化により即効果を期待できる。

(2)低クラウン材では設備的に形状制御能力が不足するためスタンド間形状をあえてフラットにしない操業も行っており、エキスパートシステムで現状モデルの枠をはずれている部分もカバーできる。

(3)ベテランオペレータのノウハウ顕在化により技術の伝承を図れる。

がある。しかし、オペレータがより本質的なモデルを持っていると期待するのは危険であり、あくまでローカルな状況(設備、操業)のもとで、周囲状況を固めて良好な圧延状態を再現させようとしていると解釈すべきである。それ故、次の段階に進むためにも、ノウハウをできるだけ理論モデルで解釈し、新モデル構築への手掛かりにしようとしている。なお、以下のエキスパートシステムの内容はオペレータのノウハウを集大成したものであり、必ずしも理論的に最適な方法ではなく、大いに当該工場のローカルな設

備、操業、開発経緯に基づいたものである。新モデルのヒントを与える事例として読んでいただきたい。

3. エキスパートシステム

3・1 構成

(1)全体構成

当該工場の仕上設定計算のシステムはFig. 6のようになっており、前材のモデル誤差と当材の粗ミル実績を元に、計算機でドラフトスケジュールを作成し、それをオペレータがリアルタイムで補正できるようになっている。補正項目としては、各スタンドの負荷変更量(5%刻み)7個、と粗ミル出側の板厚変更量の計8個である。今回のエキスパートシステムでは、この操作量をガイダンス表示している。

(2)ハードウェア構成

エキスパートシステムのハードウェア構成はFig. 7のようになっており、エキスパートシステムはワークステーションで動かし、推論に必要なデータはプロセスコンピュータからリアルタイムで受け取っている。なお図中の中継装置は、装置間での伝送速度差の調整と、ワークステーションの障害をオンライン系に波及させない目的で配置している。

エキスパートシステムの情報量としては、ロール組み替え時に24項目×圧延予定本数、材料1本毎に56項目を入力し、約8秒で推論を終え結果を表示している。

なお、エキスパートシステムのソフトウェアツールは、市販のツールであり、また、使い方も前向き推論のみであるので(推論の一般的方法是文献^{9)~5)}に詳しく述べられているので参照されたい)、ここではツールの内容については触れない。

3・2 推論フロー

3・2・1 ブロック構成

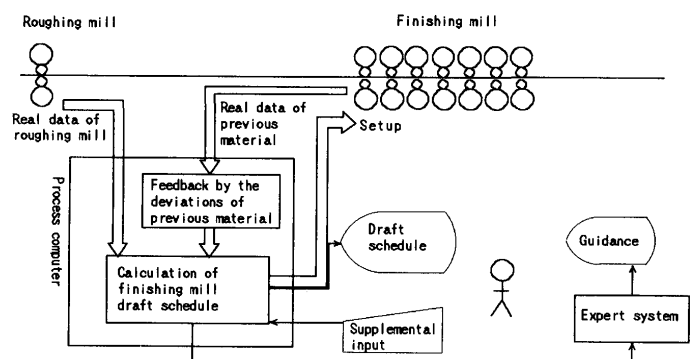


Fig. 6. Block diagram of finishing mill setup system.

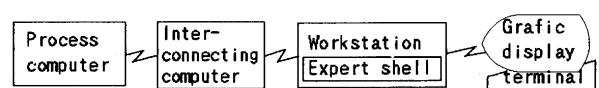


Fig. 7. Hardware configuration of expert-system.

オペレータの思考パターンに合わせて、次の3ブロックからなっている (Fig. 8 参照)。

(1) サイクル方針推論

ロール組み替え時、サイクルの全材のデータよりサイクル内での大まかな方針を決定する。

(2) 各材バランス推論

中心的な位置を占め、材料毎に一般的な知識に基づき、前材の実績から当材のスケジュールについて相対的補正量 (上げる・下げる) を推論する。

(3) 各材操作量推論

(2) の相対的な補正量を絶対的な出力値 (オペレータが計算機に入力) に変換する。

また、(2) でもれた細かな個別ケースの補正を行なう。ルール数は次のとおりである。

サイクル方針推論	34	ルール
各材バランス推論	49	ルール
各材操作量推論	20	ルール
		計103ルール

3.2.2 ルールの特徴

ルールの中で概念的にまとめたものを次に挙げておく。

(1) 前段/後段負荷比のスケジューリング

前段側の負荷を重くするか、後段側の負荷を重くするかという意味での「圧下バランス」をオペレータは1つのサイクル内で戦略的に変えており、例えばFig. 3のサイクルでの戦略を定性的に図示するとFig. 9の様になる。次に定性的ではあるが説明を加えておく。

i) 一般的に後段側の負荷が重いと通板 (蛇行、形状悪化) の問題で圧延が難しくなるので、難しい材料 (サイクル先頭、高変形抵抗材) は前段の負荷を重くして、圧延を易しくする。しかし、急激な変化をさけるため、高変形抵抗材の前に負荷配分を徐々に変えて行く等のスケジューリングを行なう。

ii) 薄物は設備制約上後段側の負荷を重くせざるを得ないので、通板の対策として、あらかじめ、ロールに摩耗溝を

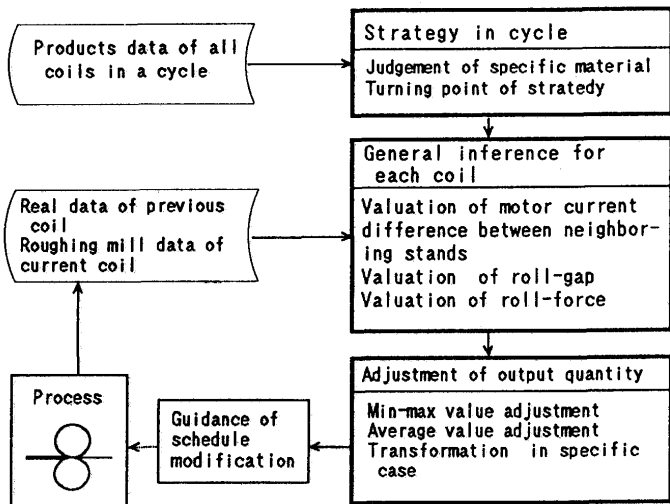


Fig. 8. Inference flow.

作って (図中のカリバー作成部) 通板安定化を図る。

(2) 電流パターン

「圧下バランス」指標として、主電動機の電流を使うのがオペレータにとってわかり易く、実例として、前段強圧下と後段強圧下材の比較をFig.10に示すが、圧延荷重により電流の方が特徴を捕まえ易い。これは理論的にある程度説明がつく。電流はトルクと比例し、 $\text{トルク} = \text{荷重} \times \text{トルクアーム係数} \times (\text{圧下量} \times \text{ロール半径})^{0.5}$ であるため、少なくとも圧下量の0.5乗分は荷重より大きく変化することになる。但し、実際にはこの比より大きく変化し、トルクアーム係数も変化するようにである。

なお、前段 (F1~F3) は減速機が入っているため、実圧延トルクに比し減速比で電流は小さくなっており、オペレータにとっては適度にスケールリングされて見易くなっている面もある。

この電流をオペレータは全スタンド通してパターンとして認識しているわけであるが、あいまいな概念を、数値の特徴量に直すのは難しく、ルール化するに当たっては種々の方式を試行錯誤で探す必要があった。その結果、最も成績の良い、スタンド間の計算方式は、Fig.11の例に示すようなもので、なるべく簡単に整理し易くした。

(3) 圧下量バランス

電流パターンと並んで、オペレータはスタンド間のギャップ (スクリュウ位置) 差を重視しており、板厚、幅に応じて、おおよそのレンジ (最小-最大) に入るべきだという知識がある。スタンド間ギャップの差のレンジは理論的には、(圧延荷重がスタンド間で同じなら) ほぼ圧下量のレンジに相当すると思われる、ある程度理論的根拠も含めてルール化した。

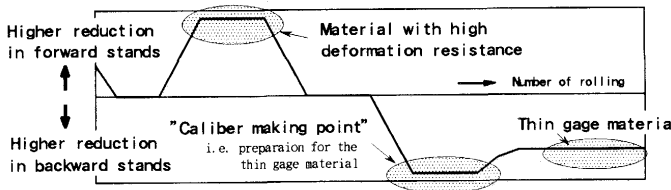


Fig. 9. Strategy of load distribution in Fig. 3 cycle.

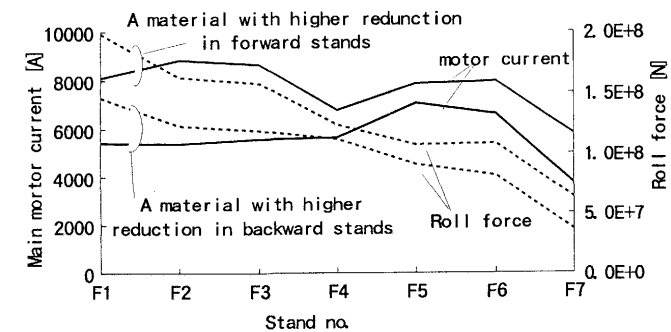


Fig. 10. Comparison between motor current and roll force as the index of load distribution.

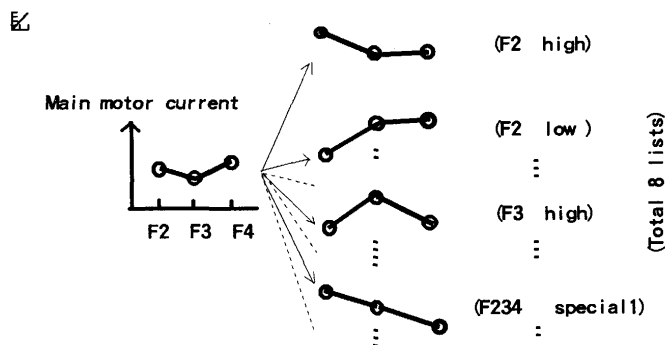


Fig. 11. A example of the way to classify main motor current distribution over F2, F3, F4 stands.

(4) 不都合ケースを補うパターンマッチング

最終出力は原則的に、(1)で決まる判定しきい値に基づいて、(2)(3)で各スタンド毎に圧下量の増減を決め、その圧下変更量を設定計算の補正量に変換するが、実際の場合に適用していくと、予想外の推論結果が出てくる場合があった。もっとも、その多くの場合、方向そのものは正しいが、若干手直しすれば良くなる程度の小問題であった。そのため、推論最終段階で、複数スタンドが都合の悪い特定パターンに一致すると手直しするルールを用意して適用範囲を広げている。このパターン変換例をFig.12に示しておく。

4. 適用結果

実機にて、オペレータにエキスパートシステムの推論結果を評価してもらったところTable 1の様な結果となった。

不明の部分は、オペレータの操作と異なる推論が出ていますが、推論どおりに圧延しても良いか判断できないという意味であり、今後、この部分は更にレベルアップできると考えている。それ故、不明部まで適用可能に含めると90%以上の適用率となる。

また、この評価したサイクルでは実際に起こった圧延不具合(絞り)をエキスパートシステム側があらかじめ予告を出しており、オペレータの注意力を相当分代行できると確信している。

5. 考察

このエキスパートシステムの開発経緯から、ドラフトスケジュールの作り方は、理論モデルを正とした正攻法では限界があるように思われる。それより、モデル誤差とそれによる不透明な状態量の存在を認め、その影響ができるだけ出てこない様な作成方法が現実的であると考えられる。これを実現する手段としては、場合によってキーとなる誤差要因が異なってくるため、数種類の作り方を用意しておき、場合によって切り替えるという仕組みになろう。以下

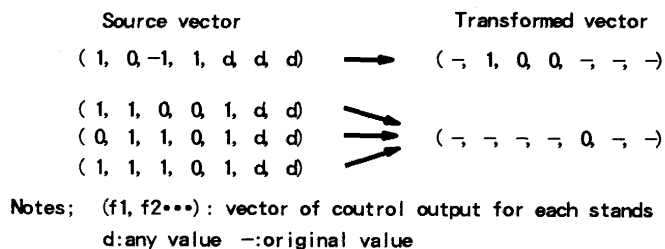


Fig. 12. Minor transformation at the last stage.

Table 1. Evaluation of the expert system.

Evaluation	Case 1	Case 2	Case 3
Good	35%	51%	35%
Difficult to judge	55%	40%	60%
Not good	10%	9%	3%

にそのための方針を記しておく。

(1)ドラフトを評価する指標は第一優先度として通板(尾部の蛇行とスタンド間形状)である。

これに対しては、現状決めてが無く周囲状況を固めるのが効果的である。

(2)電流により制御することは、周囲状況を固める意味で効果がある。但し、理論的に考えて、電流が最適な指標であるとは言い難く、むしろ、荷重、圧下量、計算上でクラウン等の形状を評価する指標で整理すべきである。

この問題はオペレータインターフェースに何を出すかということであり、理論的に効く要因を人間が判断しやすい形で表示すれば、オペレータはより良いノウハウを構築できると考えられる。

(3)前段/後段の負荷配分そのものは本質的な意味は無く、一つの周囲状況と考えられる。副次的な効果として(2)が外乱による影響を受けにくくなる、つまり再現性良く圧延できると考えられる。

(4)荷重、温度、板厚等は他のモデル精度と比し、十分な精度ありとみなせる。

6. 結言

当該熱延工場において仕上ドラフトスケジュールのエキスパートシステムをオンライン化し操業安定に成果を上げている。現在はガイダンスのみであるが、今後は理にかなったものから計算機上の設定計算本体に組み込む予定である。

このシステム開発の過程で、正攻法でなくても周囲状況を固める方法あるいはモデル誤差の影響が少なくなる考え方を設定計算の中に取り込めば早期に全自動化につなげられる知見が得られた。但し、周囲条件を固める事はスケジュールフリー化の方向に大きな制約を課すことになるため、長期的には、正攻法のモデル精度アップ、センサー開発を

すすめていく必要がある。

また今後のエキスパートシステムについては、徐々にセンサ開発によって、フィードバック制御と同時にモデル精度が上がるといふ相乗効果でその座が心配されようが、それ以上に新製品開発競争の速度が早いため、常に従来を越える難圧延材が登場し、標準的に必要なソフトとしての座を占めるものと思われる。

文 献

- 1) R. G. Beadle : Iron Steel Eng., **4** (1964), p. 71
- 2) 諸岡泰男, 谷藤真也 : 板圧延の理論と実際 (日本鉄鋼協会共同研究会圧延理論部会編), (1984), p.187
- 3) 小林重信 : 知識工学, (1986), [照晃堂]
- 4) 中北輝雄, 脇阪信治, 住田伸夫 : 計測と制御, **29** (1990) 6, p.527
- 5) 角崎嘉男, 竹腰篤尚, 橋本絃吉, 青木太一, 脇本一政, 桜井雅昭 : 日本鋼管技報, **119** (1987), p.1