

技術資料

ホットストリップミルの計算制御*

岡 本 豊 彦**

Computer Control of Hot Strip Mills

Toyoshiko OKAMOTO

1. ま え が き

1960年代初頭にホットストリップミルの計算制御が始めて試みられて以来表1に示すごとく数多くの計算機が導入され、新設の新鋭ホットストリップミルを計算制御により運転することはもはや常識となつた。当初計算制御の焦点は仕上圧延機にありその部分だけを制御範囲とするシステムも2, 3あつたが最近では加熱炉の入測からコイル秤量機までを支配するシステムが大部分であり、さらに製鉄所全体を管理する生産管理システムが完備するに伴いそのサブシステムとして上位計算機との間でオンラインのデータ授受が行なわれるようになるなど機能が拡張されてきている。上位のオンライン生産管理用計算機と圧延プロセスを支配するプロセス制御用計算機との関係は図1に示されているが本報ではこのプロセス制御用計算機の機能について述べるのが目的である。

2. スラブラッキング

プロセス制御のためには各種のプログラムが必要であるがこれらプログラムを適正な時点で作動させるためにはまず材料の位置を正しく計算機が認識しなければならない。したがって各機能プログラムの上にトラッキングプログラムが必要となる²⁾。

2.1 初期データの入手とマッチング

スラブに関するデータおよび製品仕様に関するデータはテープ・カードによつて与えられる場合ももちろんあるが上位計算機よりダイレクトに伝送されることもある³⁾。Granite City Steelの方式⁴⁾はデパイラーから炉入側テーブルにスラブを移すときにカードを読み込ませ、そのデータが実スラブのものと一致していることを確認したのちに確認ボタンを押してマッチングをとるといふものである。B. S. C. (英国鉄鋼公社) Abbey Worksでは炉入れ前に正確なデータが得られないという操業の実態および加熱炉制御は将来の課題として残すという方針から在炉中に正しいデータカードを作成して読み込ませ炉出側からトラッキングを始めるという方式を採用した⁵⁾。B. S. C. Spencer Worksではテープで入力し炉入

れのときにマッチングをとつている⁶⁾。住友金属鹿島製鉄所ではスラブ段取場において圧延順位の確定したスラブに対するデータをプッシャープルピットに設置された「リクエストコンソール」によつて上位計算機に要求しこのデータをダイレクトに制御用計算機に格納する方式を採用している。確定した圧延順位が急変変更されることもあるので炉入側テーブル内のスラブ秤量機で秤量されるときにデータと実スラブのマッチングをとつている。さらにバックアップとして前述の Abbey Worksの方式と同じく在炉中にカードを読み込ませ炉出側からトラッキングをすることも可能な方式となつている。

いずれにしても最初にデータと実スラブのマッチングを正しく行なうことが当然のことながら制御の大前提で

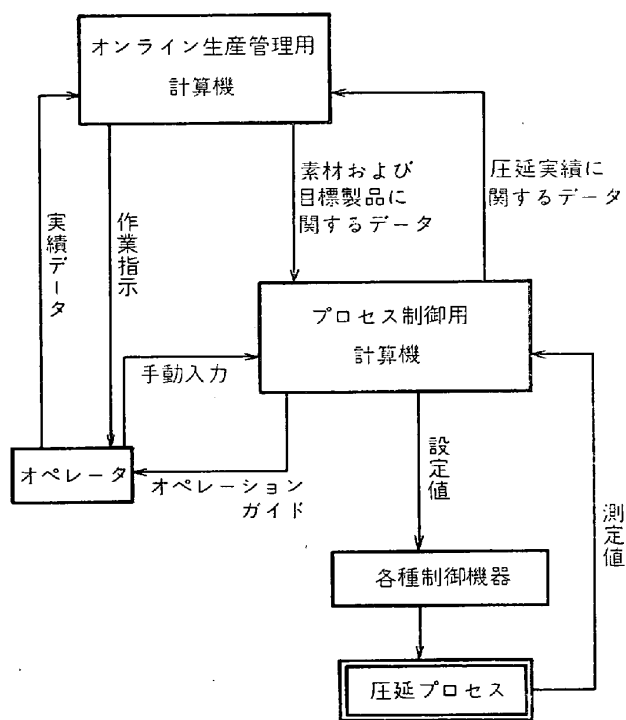
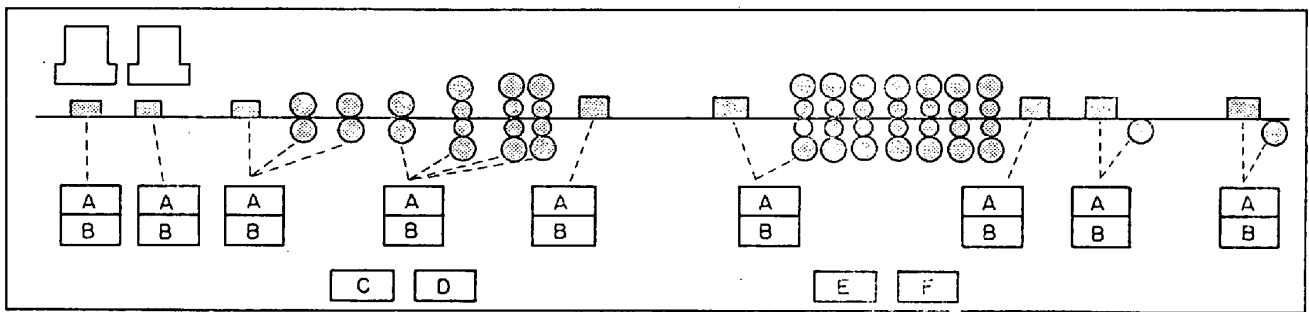


図1 システム概略図

* 昭和46年3月3日 受付 (依頼技術資料)
 ** 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博

表1 ホットストリップミル計算制御実施例

会 社 名		設 置 年	機 種
National Steel Corp.	Great Lakes	1961	Daystrom
McLouth	Detroit	1962	GE-312
B. S. C.	Spencer	1964	GE-412
Inland Steel Co.	East Chicago	1964	PRODAC-580
Wheeling Steel Co.	Wheeling	1964	PRODAC-580
F. Krupp AG	Bochum	1966	GE-412
J & L Steel Corp.	Cleveland	1966	GEPAC 4 000
U. S. Steel Corp.	Gary	1966	GEPAC 4 000
Bethlehem Steel Corp.	Burns Harbor	1966	PRODAC-580
Republic Steel Corp.	Gadsden	1966	PRODAC-550
Youngstown S. & T. Co.	East Chicago	1966	PRODAC-550
B. S. C.	Abbey	1966	GE-412
新日鉄	堺	1966	GEPAC-4 040
Armco Steel Corp.	Middletown	1967	PRODAC-550
Granite City Steel Co.	Granite City	1967	GEPAC-4 000
Kaiser Steel Co.	Fontana	1967	GEPAC-4 000
川 鉄	千 葉	1968	TOSBAC-7 000
住 金	和 歌 山	1968	HITAC-7 250
新日鉄	君 津	1968	TOSBAC-7 000
住 金	鹿 島	1969	HITAC-7 250
日本鋼管	福 山	1969	TOSBAC-7 000



A ロット No B ロット内スラブ No C 粗厚 D 粗幅 E 仕上厚 F 仕上幅

図2 トラッキングボード

あり各ミルの操業の実状に合わせた方式を採用しなければならぬ。

2.2 加熱炉

加熱炉は 2~4 基あるのが通例でしかも 1 基につき 2 列の装入が可能であるからどの列へ装入されたかを確認する必要がある。もちろんスラブヤードからテーブルへ搬入されたときに計算機により炉番列番が指定されその通りローカルな自動制御装置により実行されれば問題はないが加熱炉の状態による炉番列番のオペレータによる修正が可能なシステムはもちろん必要であろう。

炉出側においてはすでに在炉スラブの位置は計算機に正しく記憶されているからトラッキングとして問題になることは少ない。

2.3 圧延ライン

圧延ラインは一直線であるからトラッキングは比較的容易でありロードセル・H. M. D. (ホットメタルディテクタ)・温度計などにより材料位置を確認することができる。住友金属鹿島の場合は圧延ラインを 12 ゾーンに分け材料の先端がどのゾーンに入っているかを上記検

出器により認識している。もちろん検出器の故障に対処するため十分な合理性チェックをしつつゾーンを飛び越えて進むことも可能である。

圧延ラインで材料がリジェクトされラインオフする場合にはオペレータの手動入力が必要である。仕上圧延機入側のクランプシャで材料が 2~3 分割されることがあり初期データで指定されている場合は別としてそうでなく緊急に行なわれる場合にはやはりオペレータの手動入力が必要である。

2.4 トラッキングボード

計算機はそのトラッキング機能によりデータと実スラブとの対応を常に把握し材料の位置を認識してゆくが、その状況をオペレータに報知することはとくに手動運転されている圧延機に計算機を導入するときにオペレータの信頼感を高める効果があり重要である。住金鹿島では図2のごときトラッキングボードを各プルピットに設置し各プルピットにおいてどのスラブがどこにあるかを知ることができるようにした。

3. 加熱炉周辺の制御

3.1 装入・抽出作業

加熱炉周辺の作業は、①装入列番の決定、②テーブルの定位置停止、③プッシャーstrookの決定、④抽出列番の決定、⑤エキストラクタstrookの決定などがおもなものである。もちろん炉がウォーキングビームタイプかプッシャータイプか、ローカルな自動制御装置がどのように機能するかにより計算機の機能範囲もおのずから変わってくる。住金鹿島の場合にはスラブ秤量の時点で上記①が行なわれ②は C. M. D. (コールドメタルディテクター) を用いたローカルな自動制御装置により行なわれ③が計算機から行なわれるとオペレータの発信によりローカルな自動制御装置が前スラブとの間隔を与えられた値にするように装入が行なわれる。ウォーキングビーム自動制御装置は常に炉出側スラブを所定位置に送っているから④⑤が計算機から行なわれるとオペレータの発信または計算機の指令により抽出作業が開始される。

加熱炉周辺の自動化はスラブ位置検出器の成否に負うところが多く Granite City Steel では図3のごとき検出器により装入作業の自動化に成功している。

3.2 抽出タイミング

ホットストリップミル全体の生産の最適化に関して考慮されなければならないのは仕上入口の板厚(粗厚)とギャップタイム(仕上第1スタンドを材料後端が抜けてから次の材料がかみ込むまでの時間)である。前者については粗圧延機と仕上圧延機の RMS (ルートミーンスクエア) 負荷がマッチしバランスするように定めるべきことが指摘されているが実際には初期データまたはオペレータのキーインまたはテーブルルックアップなどで簡単に定められることが多い。したがって最適化の問題は適切な抽出タイミングをエキストラクターに与えることに主眼が置かれることになる。B. S. C. Spencer Works⁶⁾ ではスラブの抽出から仕上圧延機までの所要時間を求めてオペレータにより指定されたギャップタイムになるように抽出タイミングを定めプッシャーピットに表示するようになっている。

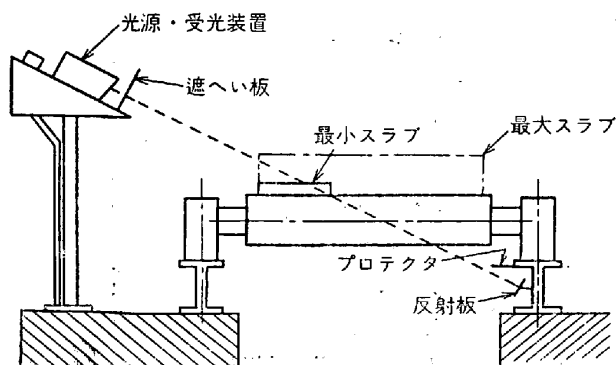


図3 Granite City Steel のスラブ検出器

住金鹿島では抽出タイミングは2つのモードのいずれかによつて与えられるシステムをもっている。第1のモードはいわゆるギャップタイム一定モードであり Spencer Works と同様の思想で行なわれる。第2のモードは抽出後最初に通る V. S. B. (垂直ロール) の通過時間間隔を一定に保つものである。現在第2のモードで行なわれているが近い将来加熱炉の増設が行なわれたときに第1のモードが生かされる予定である。抽出作業は手動・半自動・自動の3種のいずれかで行なわれて抽出タイミングの指令のみが半自動、指令と同時にエキストラクターが起動されるのが自動である。

4. 粗圧延機の制御

4.1 粗水平ロールセットアップ

粗圧延機水平ロールのロール開度決定の計算方式についてはその概略が2・3発表されている。Inland 社で採用されている方式の基本はまず使用されるスタンドが決定されたあとでできる限り仕上圧延機に近いスタンドから各制約条件を満たす最大の圧下量を各スタンドに振りあてるといふものでそのフローチャートは図4のごときものである。Spencer Works では各スタンドの負荷配分をオペレータが指定することによりドラフトスケジュールが定められロール開度が決定される。

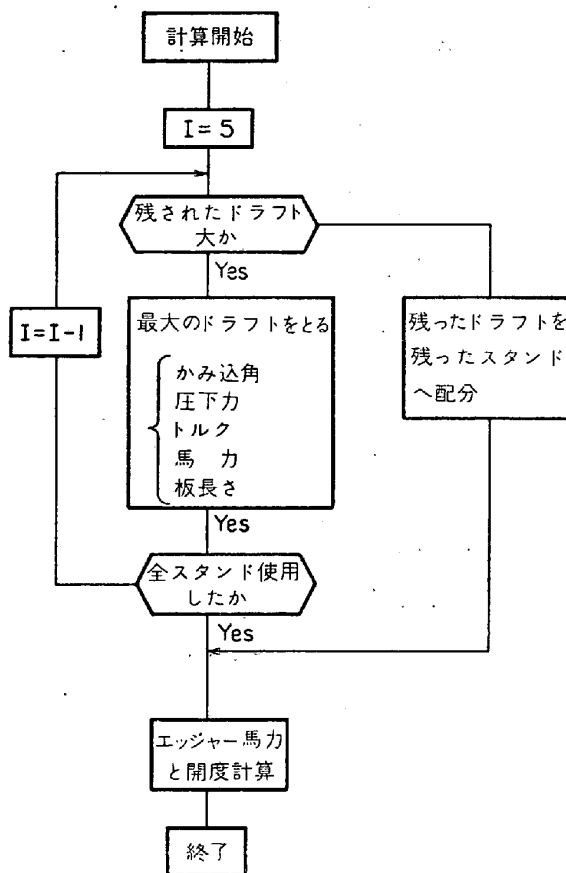


図4 Inland 社の粗圧延機ドラフトスケジュール計算フロー

住金鹿島の方式では次の2つのモードのいずれかによつてドラフトが定められる。第1のモードは使用スタンドをオペレータが指定しこれらスタンドに与えられた負荷比率で負荷がかかるようにドラフトを定めるもので Spencer Works の方式と似ている。第2のモードは使用スタンド数を計算機が定めるものであり優先度の低いスタンドはダミースタンドとなる。もちろんこの場合でも Inland 社のごとく最大の圧下量をとるのではなく与えられた負荷配分の比率は守られている。図5に概略フローチャートを示す。計算は抽出されるスラブが確定した時点で実行され直ちに自動設定装置に出力されるが前スラブがまだ通過していないスタンドは通過後に出力プログラムが CALL される。ドラフトスケジュール決定後圧延荷重を算出する方法は基本的には後述の仕上圧延機の制御の場合と同一である。

粗圧延機はいわば中間製品の圧延であるから厚板圧延などと異なり板の形状(平坦度)に関し厳しい条件がつけられることは少ないが、厚板圧延の方式を粗圧延に用いることは当然考えられる。住金鹿島の厚板圧延計算制御において採用されている形状を正しく圧延する独特の方式を図6に示す。

4.2 粗垂直ロールセットアップ

垂直ロール(エッジャー)のセットアップは成品の幅精度に直接関連するから重要な機能である。水平ロールと同様に負荷を配分するという考え方でロール開度を定

めている場合もあるが、住金鹿島では V. S. B. 以外のエッジャー (E_2, E_3, E_4, E_5, E_6) のロール開度は原則として一定にしている。この一定値は最終スタンドの水平ロールによる幅拡がり为目标粗板幅から差し引いた値である。V. S. B. での幅殺し量はスラブ寸法によつて定まっているからスラブ幅が過大であれば E_2, E_3 においてかみ込み角・モータ馬力の制約により前述の一定値では圧延不能になることがあり、その場合 E_2, E_3 は修正される。逆にスラブ幅が過小であれば E_2, E_3 がそのままでは空通しになる場合もありこのときは軽く接するようにロール開度は修正される。もちろん粗圧延機列後の幅計によりフィードバックが実施され幅精度の向上がはかられている。

エッジャーに関する研究は比較的少なく幅拡がりの計算にしても過大のエッジングを行なつた際のドッグボーンの影響など今後の実際的な研究が期待される。

水平ロールは通常 AC モータであり一定速度であるがエッジャーは DC モータであり水平ロールでの圧下率との関連で速度が定められる(ドラフト補償)。さらにエッジャーの途度トルク特性を考慮して計算機が出力する無負荷ロール速度が定められねばならない。

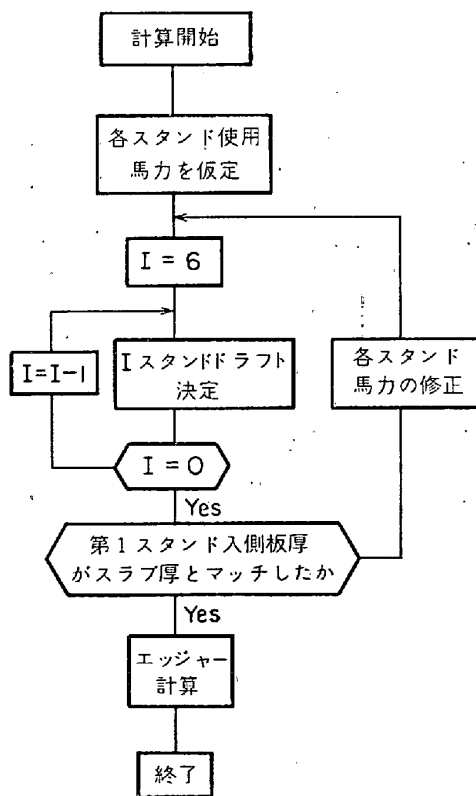


図5 住金鹿島の粗圧延機ドラフトスケジュール計算フロー

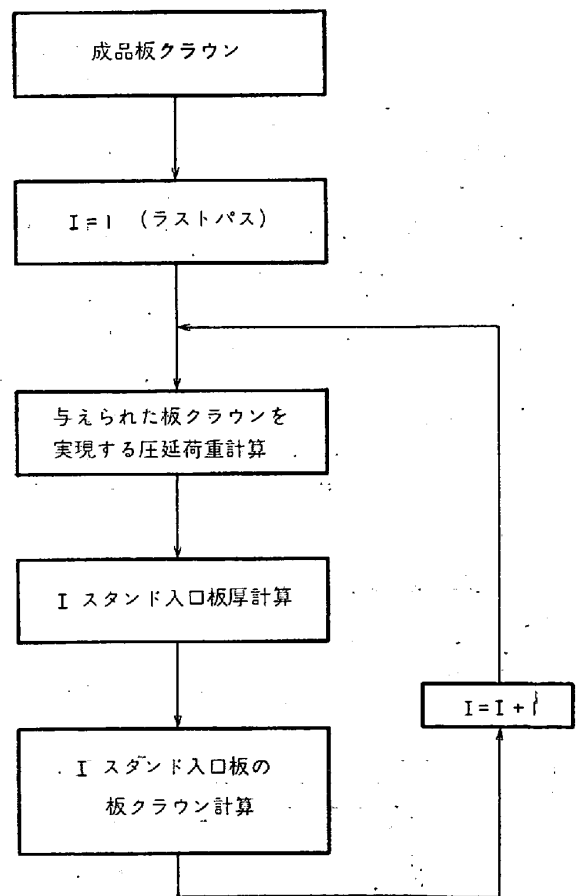


図6 住金鹿島厚板計算制御のドラフトスケジュール計算フロー

4.3 幅計・厚計のセットアップ

仕上圧延機での製造板幅から計算された値に粗幅計が設定され、粗厚は前述のごとく初期データ・テーブルルックアップなどで定められた値に設定される。

5. 仕上圧延機の制御

仕上圧延機の制御結果は直接製品の良否に関連するので粗圧延機の制御に比し複雑である。まずセットアップ、アダプティブフィードフォワード、フィードバックに分けて述べることにする。

5.1 セットアップ

与えられた条件からロール開度(圧下スクリウ位置)とロール速度を求める方式は図7に概略が示されている。この方式を忠実に実行しホットストリップミルのシミュレーションを行なったのが Canada G. E. の WRIGHT らである。彼らは R. B. Sims の圧延理論を用いて圧延荷重・先進率などの計算をしまた変形抵抗には BISRA の Cook-McCrum のデータを用いるなど理論的背景をもつプログラムで計算を行ないこの複雑なプロセスの最適化への道を示唆した。仕上圧延機のセットアップ数式モデルとして G. E. 社 (General Electric), W. H. 社 (Westinghouse) そして住金-日立の方式があるが細部についてももちろん異同があるが基本的には図7に示すフローが基本となっている。

5.1.1 各スタンド出口板厚の決定

各スタンドの板厚(ドラフトスケジュール)は数基の圧延機をもつとも有効に使うという考え方から荷重配分

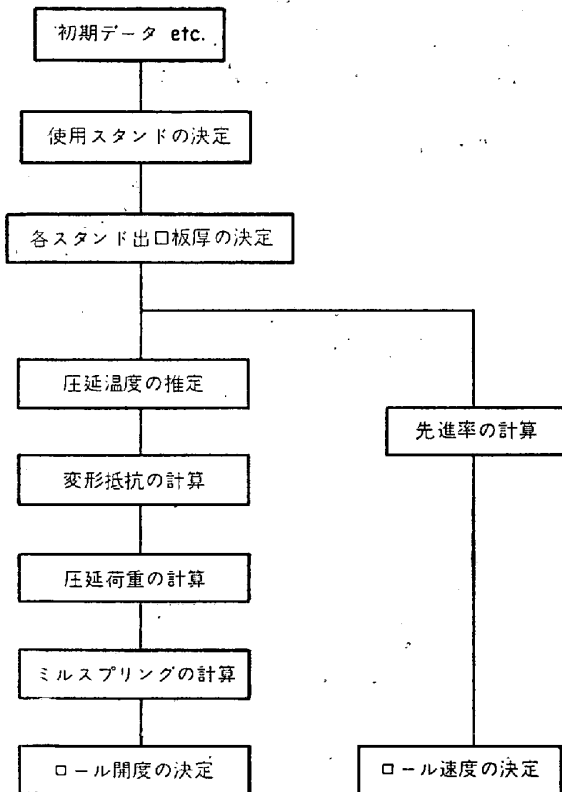


図7 セットアップの基本フロー

を与えて定められるのが普通でありこのときいわゆる動力曲線 (HHT 曲線) が使われる。今井によれば動力曲線は(1)式で与えられこれからドラフトスケジュールは(2)式で求められる¹⁰⁾。

$$E_i = E_0 \{ (h_0/h_i)^m - 1 \} \dots\dots\dots (1)$$

$$h_i = \frac{h_0 \cdot h_f}{\{ \epsilon_i \cdot h_0^m + (1 - \epsilon_i) h_f^m \}^{1/m}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで h_0 は粗厚, h_f は仕上げ厚, ϵ_i は 1~i スタンドまでの累積荷重比率, m は定数である。G.E. 社によれば同様の動力曲線は(3)式で表わされるとしている¹¹⁾。

$$E_i = \frac{b_0}{b_1 + h_i} + b_2 \dots\dots\dots (3)$$

いずれにしても動力曲線からドラフトスケジュールを求める場合標準の荷重配分比率はあらかじめ与えられているが、その時々々の圧延機の状況により修正して板の平坦度のよい圧延ができるようにしなければならない。形状を考慮してドラフトスケジュールを定めることは仕上圧延機についても重要であり厚板圧延の場合と同様の考え方が適用可能であるが⁹⁾ 現在までそのような試みは発表されていない。

5.1.2 圧延荷重の計算

W. H. 社の方式は文献によれば板厚決定後、スタンド速度の決定・圧下率の計算・接触弧長の計算・圧延温度の計算・平均圧延圧力の計算・圧延荷重の計算と進められている⁹⁾。平均圧延圧力については次のごとき実験式が提案されている¹²⁾。

$$\begin{aligned} \log_e p = & b_0 + b_1 \log_e \left(\frac{R}{h_1} \right) + b_2 \log_e \left(\frac{\Delta h}{h_1} \right) \\ & + b_3 \log_e \left(\frac{\Delta h}{h_1} \right) \cdot \log_e \left(\frac{R}{h_1} \right) + b_4 \frac{T}{1000} \\ & + b_5 \frac{T}{1000} \cdot \log_e \left(\frac{\Delta h}{h_1} \right) \\ & + b_6 \log_e \left(\frac{\Delta h}{h_1} \right) \cdot \left(\log_e \left(\frac{R}{h_1} \right) \right)^2 + b_7 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 \\ & \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで p は平均圧延圧力, R はロール半径, T は圧延温度, h_1 は入口板厚, Δh は圧下量である。

G. E. 社の圧延荷重計算方式は実測の圧延荷重から動力曲線と同様の概念に基づく荷重曲線を(5)式のごとく作成しこれを基本に圧延荷重を算出するものである。

$$F_i = \frac{C_0}{C_1 + h_i} + C_2 \dots\dots\dots (5)$$

F_i は第1スタンドからの圧延荷重の累積値であつて基本鋼種について標準温度に対して F_i 曲線が作られる。もちろん仕上げ板厚が変われば大幅に圧延荷重が変化するからすべてのサイズについて一本の曲線で表わされるわけではなく仕上げ板厚別に(5)式の曲線群が必要になるわけである。動力曲線が各スタンドの温度を無視して作成されるように荷重曲線も各スタンドの温度は暗黙のうちに層別された仕上げ板厚に考慮されることになるか

ら前述の標準温度は仕上げ入側の温度と考えられる。(5)式から求まる(6)式によつて各スタンドの圧延荷重が計算されるがこれはいわば基本鋼種・標準温度に対応するもので条件の変化(鋼種の変化・温度の変化・速度の変化)についてはおのおの(7)式によつて修正される。

$$(F_{BASE})_i = F_i - F_{i-1} \dots\dots\dots (6)$$

$$F'_i = (F_{BASE})_i \cdot W \cdot K_G \cdot \left[1 + K_V \left(\frac{MF_B - MF}{MF_B} \right) \right] \times [1 + K_T (T_B - T)] \dots\dots\dots (7)$$

Wは板幅, MFは体積速度, Tは温度でありサフィックスBは標準状態に対応する。K_Gは鋼種の変化・K_Vは速度の変化・K_Tは温度の変化に対する修正係数である。

住金-日立方式は WRIGHT ら⁹⁾のごとく変形抵抗とSIMSの圧延理論を用い(8)式により荷重を求めるものである。

$$P = 1.15 K_{fm} \cdot b \cdot \sqrt{R'(H-h)} \cdot Q_p \dots\dots\dots (8)$$

ここでPは圧延荷重, K_{fm}は平均変形抵抗, bは板幅, R'は扁平ロール半径, Hはスタンド入口板厚, hは出口板厚, Q_pは圧下力関数である。K_{fm}については温度, 圧下率, ひずみ速度などの関数であることは古くから知られていたがその値自身はCOOKとMcCRUMのごとく図表で与えられていた。その不便さを克服するためにあらためて実測を行ない炭素鋼の場合については次のとき, K_{fm}算出の一般式を作成した¹³⁾。

$$K_{fm} = \exp \left(0.126 - 1.75C + 0.594C^2 + \frac{2851 + 2968C - 1120C^2}{T_K} \right) \cdot \epsilon^{0.21} \cdot \dot{\epsilon}^{0.13} \dots\dots\dots (9)$$

ここでCは炭素含有量, T_Kは絶対温度, εはひずみ(対数), ε̇はひずみ速度である。またQ_pについてはSIMSの式を近似化して(10)式のごとき使いやすい形にした。

$$Q_p = 0.8062 - 0.3923r + (0.0419 + 0.4055r - 0.2246r^2) \cdot \sqrt{R'/h} \dots\dots\dots (10)$$

ここでrは圧下率, hは出口板厚である。

(8), (10)式で必要となるR'の計算のためにはたとえば次の式が利用できる。

$$R' = -14.6 + R + 0.27 \frac{K_{fm} \cdot R}{h} + \frac{1}{r} \left\{ 2.53 - 0.143 \frac{K_{fm}^2}{h} + 0.00056 \frac{K_{fm}^2 \cdot R}{h} - 0.00000144 K_{fm}^2 \cdot R \right\}$$

いずれにしても以上のごとき数式モデルだけで要求される寸法精度を実現することは実際問題として不可能であり後述のごときモデルの修正が必要となる。したがつてモデルは簡単であるべきとの議論もなされるがモデル修正が成功するためにはモデル自体がかなり精度高く圧

延現象を表現している必要があり十分な検討の上によつて決定すべきである。

5.1.3 ロール開度の決定

圧延荷重の計算が終わると目標の出口板厚を実現するためのロール開度を決定することになるが圧延機特有のミル剛性曲線が与えられればこの計算は図8によつて自明のごとく容易である。すなわちロールを締め込んでP_cなる荷重になつたときをロール開度の零点とすれば, 板厚hを実現するためには(このとき荷重Pが予想されているとする)ロール開度を次のように設定しなければならない。

$$\text{ロール開度} = \text{板厚} + \text{締込量} - \text{ミルスプリング} \dots\dots\dots (11)$$

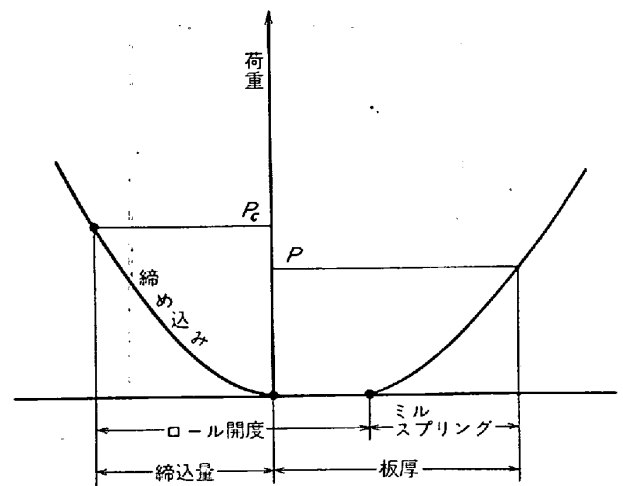
締込時のミル剛性曲線とある板幅の板を圧延するときのミル剛性曲線は異なるから図8の左右の曲線は同じではない。圧延時のミル剛性はさらに板幅の関数であることも注意しなければならない。

5.1.4 ロール速度の決定

ロール速度の決定は体積速度一定の原則から容易に行なえるが一つの難問は先進率の計算である。先進率は最終スタンドで2%, その他で5%というように定数化している例もあるが¹¹⁾これはやや乱暴である。先進率は圧延理論によれば少なくとも圧下率の関数であり第1スタンドでは8~15%の値となる。したがつてこれを定数化しておく条件の大幅な変更(大幅な段取替)時にかなり大きな影響をもたらすべくに後述のフィードバックに対し悪影響をもつてくると考えられる。

住金-日立方式では次のごとき式を用いて計算を行なっている。これはSIMSの理論式を近似化したものである。

$$f = 0.001862 + 0.2183r + \left[0.2008 - 6.503 \frac{h}{R'} + 73.97 \left(\frac{h}{R'} \right)^2 \right] \cdot r^2 \dots\dots\dots (12)$$



P_c: ゼロイング荷重 P: 圧延荷重

図8 ミル剛性曲線

最終スタンドの速度はオペレータが与えることもありまた仕上温度制御のために計算機が計算することもある。仕上圧延機での温度降下はきわめて複雑な現象であり未だ適確な数式モデルはないようであるが一例として次の式で速度を決めているのがある¹⁴⁾。

$$V_6 = \frac{k_3 T_1 - k_2}{[(T_1 - T_0)\alpha + \beta - k_1] h_6} \dots\dots\dots (13)$$

ここで α は長期にわたるフィードバック、 β は短期のフィードバックによる修正定数、 T_1 は仕上入口温度、 T_0 は仕上出口目標温度、 h_6 は仕上げ板厚、 V_6 は仕上出口速度、 k_1, k_2, k_3 は仕上げ板厚で層別された定数である。

5.2 アダプティブフィードフォワード

セットアップされたロール開度で材料が第1スタンドへかみ込んだときの圧延荷重およびロール開度の実測値から第1スタンドの実際の板厚を求め、これが目標と相異していれば第2スタンド以降のロール開度を修正するという機能がアダプティブフィードフォワードである¹⁴⁾この機能の考え方の基本は図9に示すごとく実際の板厚から P'_A を求めて実測の荷重 P_A と比較し材料の硬さの真の値を推定しこれを後続スタンドの修正に用いることである。ここで実際の板厚とは厚み計で測定されたものではなく(11)式を利用して

$$[\text{板厚}] = [\text{ロール開度}] + [\text{ミルスプリング}] - [\text{締込量}]$$

で求めるいわゆるゲージメータ厚であるがこのゲージメータはいわば計器の零点が刻々変化する絶対精度にとぼしい測定器であること。(このため後述のごとき較正が常に行なわれるのであるがあくまで間接的較正であるので後述する問題がある。)材料の先端における荷重は急変するので信頼すべきデータとするためにはある所定の時間を経過したあとでなければならないこと¹⁵⁾、その他の原因によりこの修正動作も成功するとは限らないとの報告もある¹⁶⁾。

しかしながら段取替一本目の精度については直前のロットのフィードバックが必ずしも完全とはいえないのでこのような機能に負うところが大きいと考えられ今後の

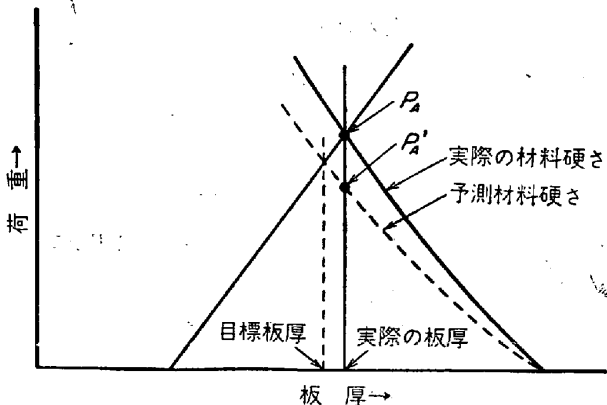


図9 アダプティブフィードフォワードの考え方

検討が期待される。

5.3 フィードバック

セットアップのとき計算に用いられる数式モデルは例えば圧延荷重の項で述べたごとくいろいろの方式があり各々の実際の現象を忠実に表現すべく作られているものの圧延機の状態の変化に応じて修正される必要がある。仕上温度を制御するための適正通板速度を求める(13)式の α, β などその一例である。RAYは仕上圧延機に関して「ゲージフィードバック」、「パワーフィードバック」、「ロールフォースフィードバック」、「ハードネスフィードバック」をあげている¹⁴⁾が板厚精度に関して必須のフィードバックとしてロール開度検出器の較正と圧延荷重式の修正について述べる。

5.3.1 ロール開度検出器の較正

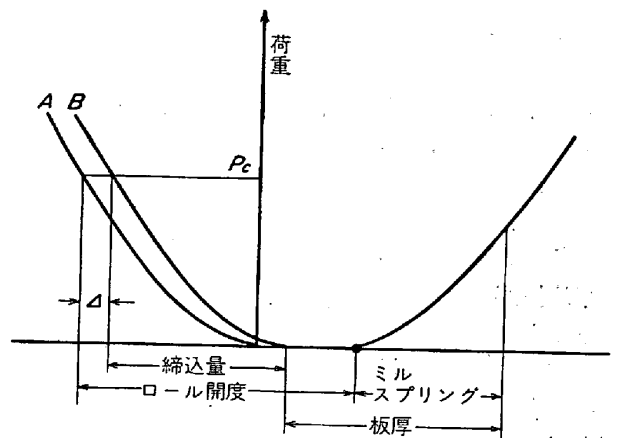
これは前述の「ゲージフィードバック」と同じものであり古くから多くの文献で指摘されている¹⁷⁾¹⁸⁾。例えばロールが熱膨張したときのミル剛性曲線を図10に示す。このとき(11)式の関係は(14)式ようになる。

$$\text{ロール開度} = \text{板厚} + \text{締込量} - \text{ミルスプリング} + \Delta \dots\dots\dots (14)$$

すなわちロール熱膨張が Δ だけ発生したら同じセットアップを行なうのにロール開度(いわゆるセルシン値)は Δ だけ大きな値でなければならない。この Δ を発見するには常に零調をくり返せばもちろんよいがそれは実際的ではない。そこで次の方法をとる。(14)式を書き直すと

$$\Delta = [\text{ロール開度} + \text{ミルスプリング} - \text{締込量}] - \text{板厚} \dots\dots\dots (15)$$

圧延を行なったときにロール開度と圧延荷重を測定すれば右辺の[]内は算出できる。そこで何らかの方法でその時の板厚を測定しえれば(15)式から Δ が算出され零点の変化が推定できる。各スタンドに厚み計を設置するわけにはゆかないのでこの板厚としては最終スタンドのX線厚み計で計った実測板厚 $(h_A)_f$ と各スタンドの



A: 零調時の締め込みミル剛性曲線
B: ロール熱膨張後の締め込みミル剛性曲線
図10 ロール開度検出器の零点変化

ロール周速度の実測値 $(V_A)_i$ から (16) 式で計算される板厚 $(hm)_i$ を用いることとする¹⁴⁾。

$$(hm)_i = \frac{(V_A)_f \cdot (1 + (f_A)_f)}{(V_A)_i \cdot (1 + (f_A)_i)} \cdot (h_A)_f \dots\dots (16)$$

連続圧延機が定常状態 (ルーパの上下動もない) の場合には体積速度が一定であるから $(hm)_i$ は i スタンドの出口板厚にひとしい。このとき f_A は先進率であり実測することは不可能なのでたとえば (12) 式を用いるのであるがここに不確定な要素が入るわけである。(15) 式の右辺内 [] をゲージメータ厚 hg , hm をマスフロー厚と称するがこれにより (15) 式は (17) 式となる。

$$\Delta = hg - hm \dots\dots (17)$$

本来 Δ は徐々に変化するものであるから 適当なゲインで指数平滑したものを採用するのが通例である。

5.3.2 圧延荷重式の修正

セットアップ計算で用いられる圧延荷重計算の数式モデルは実際の値とよく合うように作成されているとはいえあくまで平均値に合うよう作られているのであつてその時々状況によりじやつかんずれることは当然考えられる。またたとえば GE 方式のごとくサイズ別に荷重曲線を作成しておいても永久にそれが正しいとはいえない。そこでモデルの修正が必要になるわけである。

モデル修正について具体例を二つ述べよう。一つは住金-日立で採用されている方式で¹⁹⁾ (8) 式モデルを修正するにあたりまず圧延データから (18) 式の z' を計算する。

$$z' = \frac{P_A}{1.15K_{fm} \cdot b \cdot \sqrt{R'}(H-h) \cdot Q_p} \dots\dots (18)$$

ここで P_A は測定された圧延荷重でありその他は (8) 式と同じ意味である。この z' は図 9 の P_A/P'_A と同じである。この z' はスタンドごとに n 個あるのでこれを (19) 式のごとく平均して Z を求める。 n はスタンド数である。

$$Z = \frac{\sum z'}{n} \dots\dots (19)$$

この Z を鋼種別・サイズ別に層別して記憶し次の同様の圧延に用いる。すなわち (20) 式で圧延荷重を求める。

$$P = Z \cdot 1.15K_{fm} \cdot b \cdot \sqrt{R'}(H-h) \cdot Q_p \dots\dots (20)$$

この Z は平均的なモデルの不一致を修正する目的をもつものであるがスタンドごとのモデルからのずれも当然考えなければならない。そこで (21) 式の z を計算する。

$$z = \frac{z'}{Z} \dots\dots (21)$$

z' の平均値が Z であるから z は平均的には 1 であつてスタンドごとの平均値からの変動を表わすことになる。この z は次回スラブの計算に用いられる。

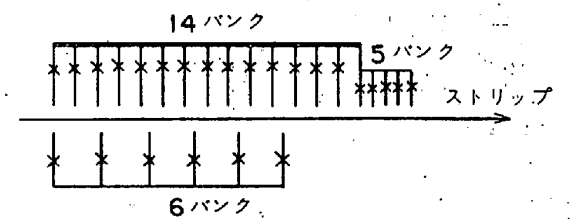
Z はまさにモデル修正、 z はフィードバックと呼ばれるべきであり RAY による long-term-feedback, short-term-feedback に相当する¹⁴⁾。 Z , z とともに指数平滑して使われるのはいうまでもない。

W. H. 社で開発され Republic Steel Corp., Youngstown S & T Co. で使われている方式は数式モデルそのものは全く異なつてもアダプティブコントロールの方式は同じで (18) 式と同じ z' を求めるものである¹⁹⁾。 z' はスタンドごとにそのまま記憶させるよう層別は鋼種・スラブ厚・成品質厚のおおの 5 分類されている。指数平滑のゲインは新しいクラスの圧延のときは大きい。上記両社での経験ではアダプティブコントロールのプログラムはもとの数式モデル自体よりも重要であると報告されている。

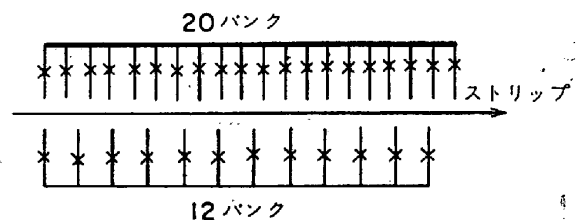
6. ホットランスプレーの制御

ストリップの巻取温度は冶金的性質と大いに関係がありこれを制御してストリップ全長にわたり一定の温度にするかまたはヘッドからテイルにかけてある勾配をもつた温度にすることが要求される。

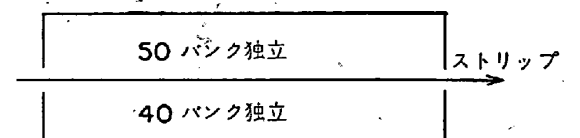
スプレーバンクはしたがつて必要十分な程度に細分化され微細な ON-OFF 制御ができることが望ましいが最近の設備の例を図 11 に示す。最新の例ではトップスプレー 50 分割ボトムスプレー 40 分割という細分化の例がある。細分化により同時にバルブ ON-OFF の応答も早くなるがさらにこれを確実にし制御性能を向上させる目的でバルブは常に開いておきヘッダーとストリップ間



(a) B.S.C. spencer¹⁴⁾



(b) Armco middletown²⁰⁾



(c) Hoogovens²¹⁾

図 11 ホットランスプレーの細分化の例

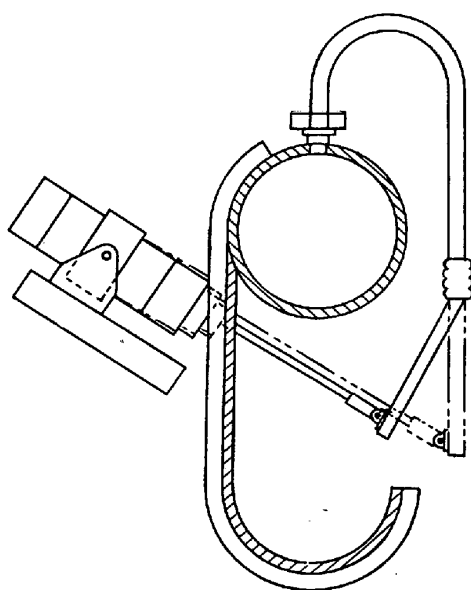


図12 スプレーオンオフ装置

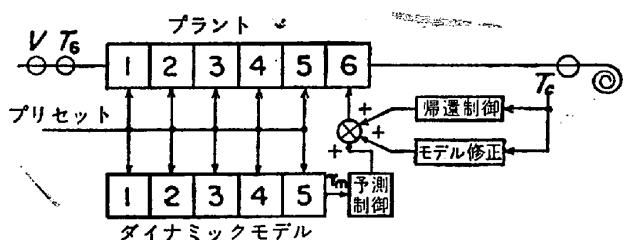


図13 ダイナミックモデルによる巻取温度制御

に遮へい板を設け OFF のときはヘッダーの冷却水吐出方向を変えバイパスさせるといふ図 12 のごとき考案もある²²⁾。

仕上出口温度の変化・ストリップ速度の急激な変化に対処して巻取温度を制御する方式に関し図 13 のごとく粗制御を前半のプリセットバンクで行ない、その結果をダイナミックモデルに入れこのモデルがプリセットバンク出側のストリップ温度をシミュレートすることにより求められた推定温度 T_m によつてコントロールバンクを操作するという実施例がある²³⁾。

次のごとき式により必要なバンク数 N を定めて制御している例もある¹⁴⁾。

$$N = \beta k_1 (mf + \alpha) (T_6 - T_c) + k_2 \dots\dots\dots (22)$$

ここで β はフィードバック、 mf は体積速度、 α はフィードバック、 T_6 は仕上出口温度、 T_c は巻取温度、 $k_1 \cdot k_2$ は板厚で層別された定数である。

RAY は B. S. C. Spencer の経験から巻取温度制御について将来の見通しをのべスラブ加熱の制御を行なつて仕上入口温度を適正化すること、ホットランスプレーの水量・水圧の測定および制御を行なうべきことなどを強調している¹⁴⁾。Youngstown S & T Co. ではアナログコンピュータで制御しているが各バンクの直後に高圧水による水の除去装置があり次のバンクが OFF している

ようなときに前バンクの水が流れ込まないようになつてゐる²⁴⁾。

7. 巻取機の制御

巻取機に対してはサイドガイド・ピンチロール・ラッパロールの開度設定、巻取機の初期速度、巻取中の張力の基準値設定などがおもな計算機の機能でありこれらはとくに数式モデルを必要とせず初期データから簡単に定まる性質のものである。

8. 計算制御の効果

計算機を導入した実効についてじやつかんの報告がある。米国での調査によると板厚精度・幅精度については向上がみとめられるが生産性向上・人件費の節減についてはまだ明確でなく計算機の導入に際してその機能を十分吟味し有効なもののみ取り入れるべきであるとの報告がある²⁵⁾。一方日本においては 15 000 t/月の増産¹⁶⁾、3%の増産²⁶⁾が可能となつたとの報告がある。

最近建設されるミルでは計算機を前提として計画が進められるのが通例で 1967 年に稼動した Granite City Steel¹⁹⁾、1968 年の Armco Steel²⁰⁾、1969 年の新日鉄君津³⁾ いずれも最初から計算制御により操業が始められたと報告されている。

寸法精度に関する報告は抽象的表現が多いが具体的数値のあがつている報告もある³⁾¹⁶⁾²¹⁾²⁷⁾²⁸⁾。単に各社の数値のみによる比較は、そのミルでの製造品種構成・設備の条件・データ採取の方法など各様なので無意味であることが多いがいずれも手動運転に比しかなりの好成績をあげている。

9. あとがき

ホットストリップの計算制御について現在までに公表されている文献をもとに主に数式モデルを中心に概説した。計算機自体の問題・プログラムの問題などシステム全般について述べるとすれば残された問題は数多くあり本報告はさきわめて表面的な記述に終わったが今後各方面での経験の発表を期待したい。

単に従来の概念の設備に計算機を導入するのではなく、計算機操業を前提とした圧延設備の改良・検出器の改良が進められますます高い生産性の工場・高品質の工場の実現を願つてやまない。

文 献

- 1) 野坂康雄: 鉄鋼業のコンピュータ・コントロール (1970), p. 208. [産業図書]
- 2) 同上: p. 222
- 3) 高梨和夫, ほか: 東芝レビュー, 24 (1969) 12, p. 1582~1588
- 4) J. J. TRACE, et al.: Iron Steel Eng., (1970) March, p. 51~62
- 5) H. D. MORGAN, et al.

- 6) R. M. W. MEREDITH: Iron Steel, (1966) April, p. 144
- 7) W. G. WRIGHT, et al. Iron Steel Eng., (1962) March p. 121~129
- 8) R. J. DARNALL: Iron Steel Eng., (1968) April p. 128~134
- 9) 美坂佳助, ほか: International Conference on The Science and Technology of Iron and Steel 1970-9-7~11, Conference Preprints p. 370~371
- 10) 今井一郎: 日本機化学会誌, 74 (1963) 534, p. 938
- 11) 特許公報, 出願公告, 昭 41-9763 (公告, 昭 41-5-25)
- 12) R. G. SCHULTZ, et al.: Iron Steel Eng., (1965) May p. 127~133
- 13) 美坂佳助, ほか: 塑性と加工, 8 (1967) 79, p. 414~422
- 14) D. J. RAY: JISI, (1969) June, p. 907~915
- 15) R. MEREDITH, et al.: International Eisenhütten-tagung 1965 "Automatisierung in Hüttenwerken" Düsseldorf F-3
- 16) 日本鉄鋼協会: 鉄鋼オートメーション国際会議, (1970) 論文集 I (圧延篇) p. 224~238
- 17) H. S. MAXWELL: JISI, (1962) Jan., p. 31~34
- 18) A. W. SMITH: Blast Furn. Steel Pl., (1970) July, p. 484~488
- 19) K. NISHIZAWA, et al.: International Conference on The Science and Technology of Iron and Steel 1970-9-7~11, Conference Preprints p. 402~403
- 20) F. W. BARNES, et al.: Iron Steel Eng., (1970) Jan., p. 59~71
- 21) L. C. den OUDEN, et al.: Iron Steel Eng., (1970) Dec., p. 85~98
- 22) 特許公報: 出願公告, 昭 45-29892 (公告昭 45-9-29)
- 23) 伊佐早恒夫, ほか: 日立評論, 49 (1967) 10, p. 12~15
- 24) E. K. HUTSON: Iron Steel Eng., (1970) Sept., p. 61~67
- 25) H. E. MILLER: Iron Steel Eng., (1969) Sept., p. 67~70
- 26) 日本鉄鋼協会: 鉄鋼オートメーション国際会議 (1970) 論文集 I (圧延篇) p. 201~215
- 27) J. K. EDWARDS, et al.: Blast Furn. Steel Pl., (1970) April, p. 245~252
- 28) R. A. SMITH: Iron Steel Eng., (1969) Sept., p. 70~72