

# ホ ッ ト タ ン デ ム ミ ル

Hot Tandem Mill

## 一連続圧延機の最適のパススケジュールの計算法・第1報一

—On the Method of Optimum Pass Schedules for Tandem Mills・1st report—

鈴 木 弘\*・岡 戸 克\*\*

Hiromu SUZUKI and Masaru OKADO

### 1. ま え が き

ホットタンデムミルにおける圧延作業で、各スタンドのロール設定間隙とロール設定周速とを決める、いわゆるミルセットアップは非常に重要である。それにもかかわらず数年前までは、経験にたよる方法しかなく、最近になり圧延動力等の各スタンドへの配分パターンをあらかじめ数量的に与えて、解析的に求める方法が提案されている<sup>1),2)</sup>。しかし定性的に与えられた特定の方針にしたがい最適のミルセットアップを決定する一般的手法は求められていない。そこで筆者らは、ホットタンデムミルについて何らかの方針に基づいた評価基準が選定されたとき、最適のパススケジュールを求める計算法を開発したので、その計算法と、製品の寸法精度の向上を目的とした6スタンドホットタンデムミルへの応用例とを報告する。

### 2. 記 号

$H$ : ロール入口板厚	$r$ : 圧下率
$h$ : ロール出口板厚(平均)	$S$ : ロール設定間隙
$h_c$ : 出口中央部板厚	$Sh$ : 形状係数
$h_e$ : 出口端部板厚	$T$ : 材料温度
$i$ : スタンドを表わす添字	$U$ : 材料体積速度
$K$ : 圧延機剛性率	$V$ : ロール設定周速
$k$ : 材料平均変形抵抗	$v$ : 材料ロール出口速度
$N$ : スタンド数	$G$ : 評価関数
$P$ : 圧延荷重	$g$ : 各スタンド毎の評価関数
$\alpha, \beta, \gamma$ : 重み係数	

### 3. ダイナミックプログラミングによる定式化

製品の寸法精度の向上を目標とする場合として、寸法に関する品質の評価関数に下記を用い、これらの評価関数を最小にする最適パススケジュールを求める。

#### (a) 製品板厚の長手方向変動

粗材の板厚変動・各スタンドロール間隙の変動・粗材の温度変動など各種外乱が発生した際の、製品板厚の材料長手方向変動率と粗材板厚の長手方向変動率との比である。

$$G_1 = \frac{\text{製品板厚変動率}}{\text{粗材板厚変動率}} = \left( \frac{dh_N}{h_N} \right) / \left( \frac{dH_1}{H_1} \right) \quad (1)$$

#### (b) 製品形状

定常的圧延状態において、スタンド出口の材料中央部板厚と端部板厚との差の、出口平均板厚に対する割合を形状係数  $Sh_i$  と定義する。

$$Sh_i = (h_c - h_e) / h$$

同様にして粗材の形状係数を  $Sh_0$  とすると、

$$Sh_0 = (H_{1c} - H_{1e}) / H_1$$

となる。粗材と各スタンド出口板との材料断面の形状が相似のとき、製品形状は良好と考えられるから、各スタンドごとに、その相似からの偏倚の和で製品形状を代表する。ただし現場作業上の要求、圧延機の特性を考慮してスタンドごとの重みを定める。

$$G_2 = \sum_{i=1}^N \{ \alpha_i' (Sh_i - Sh_0) \} \quad (2)$$

#### (c) 製品形状の長手方向変動

前記の (a) と同様の外乱が発生した際、圧延荷重の変動により、ロールのたわみ、および表面の弾性変位が変動して各スタンド出口板の形状係数が変動する。したがって全スタンドについて重みを考慮した形状係数の変動分の和をもって、これらの外乱による製品形状の長手方向変動を表わす。

$$G_3 = \sum_{i=1}^N (\alpha \cdot dSh)_i \quad (3)$$

また2条件を同時に考慮した評価関数として、以下の2種類を定める。

#### (d) 製品板厚および形状の長手方向変動

前記 (a) および (c) の評価関数に重みを考慮した和をもって定める。

$$G_4 = \gamma_1 \cdot G_1 + \gamma_2 \cdot G_3 \quad (4)$$

#### (e) 製品板厚の長手方向変動および製品形状

前記 (a) および (b) の評価関数に重みを考慮した和をもって定める。

$$G_5 = \gamma_3 \cdot G_1 + \gamma_4 \cdot G_2 \quad (5)$$

以上の5種類の評価関数の下で、最適パススケジュールを求める計算方法について述べる。

圧下力による圧延機の弾性変形は

$$h_i = S_i + \frac{P_i}{K_i} \quad (6)$$

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

\*\* 日本鋼管KK

であり、圧延荷重を表わす塑性特性は、

$$P_i = P_i(H, h, T, V) \quad (7)$$

と表わされる。(6),(7)より微小な外乱による圧延荷重の変化分を求め、(1-1)~(1-5)へ代入し、各スタンド体積速度一定の条件

$$h_i \cdot v_i = U \quad (i=1 \sim N)$$

を用いると、各評価関数は次式に整理される。

$$G_j = \sum_{i=1}^N g_{ji} \left( dS_i, dT_i, dH_i; \frac{\partial P}{\partial H_i}, \frac{\partial P_i}{\partial h_i}, \frac{\partial P_i}{\partial T_i} \right) \quad (j=1 \sim 5) \quad (8)$$

外乱  $dS_i, dH_i$  を与え、 $dH_i (i=2 \sim N), dT_i$  および各スタンド材料温度  $T_i$  には初期近似値を用いると、(8)は次式で表わされる。

$$G_j = \sum_{i=1}^N g_{ji}(H_i, r_i) \quad (j=1 \sim 5) \quad (9)$$

ここで  $G_j$  を最小にする最適手法として、ダイナミックプログラミングの多段決定過程の理論<sup>3)</sup>を用いる。その特徴は、1) 二点境界値問題が容易に解ける。2) 制限条件が多いほど簡単になる。3) デジタル計算機による数値計算に適す、などいずれも本研究に適用される。したがって製品の寸法に関する品質の“悪さ”を  $f$  で表わすと、

$$f_{(m)}(H_{(m)}) = M_{in} \{ g_{(m)}(H, r) + f_{(m-1)}(H_{(m-1)}) \} \quad (10)$$

と定式化される。ここで添字  $(m)$  は圧延下流より上流に向かって逆に数えたスタンド番号である。(10)を  $m=1 \sim N$  まで順に漸化してデジタル計算機を用いて数値計算を行なうことにより、あるパススケジュールが決定する。ここで近似値の収束計算の結果、最適パススケジ

表1 計算に先だち与えるべき条件

粗材板厚	$H_1$
仕上板厚	$h_N$
材料幅	$B$
粗材温度	$T_0$
最終スタンドロール速度	$V_N$
ワークロール半径	$R_i, i=1 \sim N$
圧延機剛性率	$K_i, i=1 \sim N$
材料変形抵抗曲線	$\mu V, iV$
ロール設定速度上, 下限	$1 \sim N$
制限馬力	$HP_i, i=1 \sim N$
各種外乱量	

表2 得られる解

スタンド出口板厚	$h_i, i=1 \sim N$
設定ロール間隙	$So_i, i=1 \sim N$
設定ロール速度	$V_i, i=1 \sim N$
圧延荷重	$P_i, i=1 \sim N$
スタンド所要動力	$HP_i, i=1 \sim N$
スタンド材料温度	$T_i, i=1 \sim N$
体積速度	$U$
評価関数値	$G_j, g_{ji}, i=1 \sim N, j=1 \sim 5$

表3 計算条件

スタンド番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
ワークロール半径 mm	300	300	300	300	300	300
圧延機剛性率 ton/mm	500	500	500	500	500	500
ロール設定速度 上限 mm/sec	3110	4820	6930	9350	15200	16800
ロール設定速度 下限 mm/sec	1030	1970	2830	3820	6680	7640
制限馬力 HP	8000	8000	8000	8000	8000	5400
粗材温度 °C	956					材料幅 mm 1000
材料平均変形抵抗 kg/mm <sup>2</sup>	$k=1.70 r^{0.2} \epsilon^{0.086}$					$\exp(2852/(273+T))$

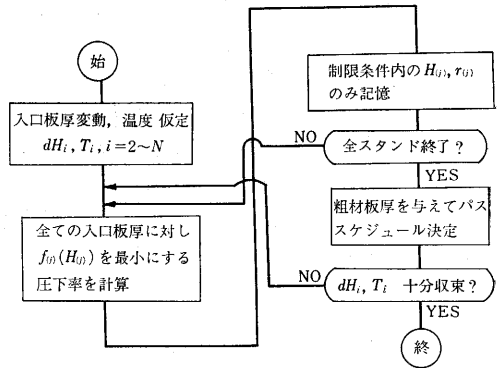


図1

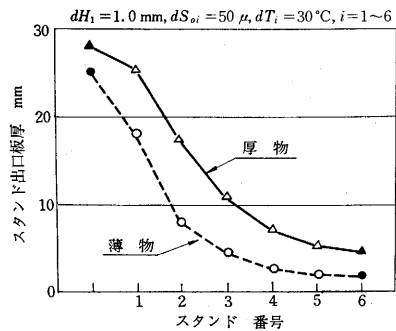


図2

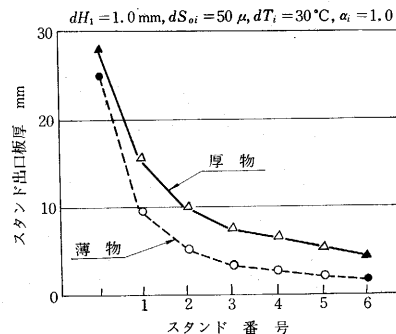


図3

研究速報

ュールが求まる. 表 1, 2 に計算に先だち与えるべき条件と得られる解を示す. また計算の流れを図 1 に示す.

ただし (7) の  $P$  は Sims の式<sup>4)</sup> により, 材料の温度降下は Wenzel<sup>5)</sup> によった.

4. 計算結果

表 3 に示す 6 スタンドホットタンデムミルの諸定数を用いた 3 種類の圧延条件を対象として, ①製品板厚の長手方向変動最小, ②製品形状の長手方向変動最小, にする最適パススケジュールを求めた結果を図 2, 3 に示す.

また製品板厚および形状の長手方向変動を最小にする最適パススケジュールと, 実際操業データとの比較を図 4, 5 に示す.

5. むすび

従来, 最適性の概念の取り入れられていなかったホットタンデムミルのパススケジュール計算法に, 製品品質(寸法精度)を最良にする. 最適の考えを入れてあらたな計算法を開発し, その計算例を示した.

(1969年 3月17日受理)

文 献

- 1) 鈴木弘・鎌田正誠: タンデム圧延機のパススケジュールの新しい計算法 (第 1 報) 塑性と加工 8-80 (1967) 460
- 2) 鈴木弘・鎌田正誠: 同期 (第 2 報) 塑性と加工 9-85 (1968) 86
- 3) Bellman, R. E. Dynamic Programming, Princeton, 1957

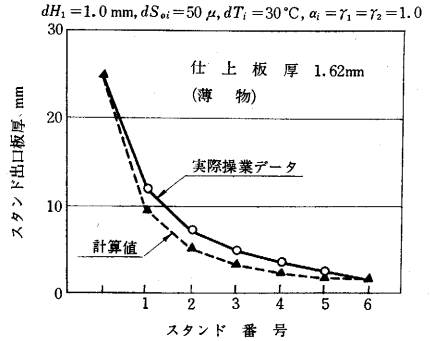


図 4

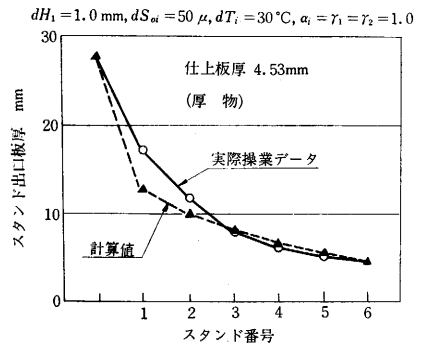


図 5

- 4) Sims, R. B., The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills, J. of Instn. Mech. Engr., 1954 (168)
- 5) Wenzel, H., Praktische Energiekunde Jg. 1965 (13)

(p. 29 よりつづく)

大変位(変位ベクトルの絶対値の最大)を図 4 に示した. なお変位の最大値は, いずれも西端ラーメンに生じている.

純ラーメン 1 方向入力の場合には 2~6cm の応答変位であるが 2 方向入力の場合 20cm 近い応答を示す例がみられ, 入力のおおきさおよび形式により応答変位が非常に異なることがわかる. 南北方向のみ壁を考慮した場合には 1 方向入力力で 4 cm 前後, 2 方向入力力で 5~9 cm となった. 東西, 南北 2 方向の壁を考慮した場合には前 2 者と比較して地震波の相異による応答最大変位の差異が少なく, 八戸地震波に対して 3 cm 前後, 八戸地震波を 1.5 倍に拡大した場合および EL CENTRO, TAFT 地震波に対して 4~7 cm の応答を示した.

4. ま と め

以上の検討の結果と被害状況から判断すると, この建物は 200~300 gal 程度の地震動により塑性範囲に入る

可能性があり, 塑性域において骨組の層間変位が降伏点変位(図 3 の Y 点の変位でこの建物の場合は約 2 cm)の数倍(弾性降伏点変位を基準とするとさらにその 2 倍)に達する振動をうけて破壊に至ったものと推定される. これらの検討は多くの仮定に基づいたものであり, なお検討の余地があるがこの種の解析法によりこの建物の地震時の挙動を一応把握することができたと考え報告する次第である.

(1969年 3月25日受理)

文 献

- 1) 田中・岡田「十勝沖地震における建築物の被害」生産研究第20巻第12号昭和43年 pp. 44/55
- 2) 日本建築学会「1968 年十勝沖地震災害調査」昭和 43 年 pp. 432/459
- 3) 武藤清「耐震設計シリーズ 4-構造物の動的解析」丸善昭和41年 pp. 67/69