

# ロールフォーミング汎用シミュレーターの開発に関する研究 (3)

## —— ロールフラワーの自動設計 (手法) ——

Study of Computational Simulation Method of Cold Roll Forming Process · 3 rd Report

木 内 学\*・高田橋 俊 夫\*

Manabu KIUCHI and Toshio KOUHABASHI

### 1. ま え が き

筆者らは、ロール成形におけるロールプロフィールの設計を、任意の製品断面について合理的に行うことのできる汎用シミュレーターの開発に取り組んでいる。第1報、<sup>1)</sup>第2報、<sup>2)</sup>では、スタンド間で素材が呈する三次元的な変形曲面形状、素材に作用する応力・歪の分布を求めるための解析手法を説明し、電縫管・C形鋼等についての具体的な数値計算を行い、この手法の有効性を示した。本報では、この解析手法をロール設計に発展させて、ロールフラワーの自動設計法を開発したので、以下にその設計手法と具体的な設計の一例を報告する。

### 2. 用語の定義

<sup>i</sup> スタンドの曲げ角度  $\theta^{*i}$ 、<sup>i-1</sup>~<sup>i</sup> スタンド間曲げ角度増分  $\Delta\theta^{*i}$ 、<sup>i-1</sup>~<sup>i</sup> スタンド間平均曲げ角度  $\Theta^{*i}$  を図1のように定義する。

ここで、

$$\Theta^{*i} = \theta^{*i-1} + \frac{1}{2} \Delta\theta^{*i} \quad (1)$$

ロールフラワーを直線と円弧の線素に分け、その境界点をプロフィール基準点  $P_m$  と定義する (図2参照)。各スタンドのロールフラワーの幾何学的形状は、次に示すプロフィールマトリックス  $Q_{\#i}$  により決定される。

$$Q_{\#i} = \begin{bmatrix} Y_1^{*i}, Z_1^{*i}, A_1^{*i}, R_1^{*i}, C_{y1}^{*i}, C_{z1}^{*i} \\ Y_2^{*i}, Z_2^{*i}, A_2^{*i}, R_2^{*i}, C_{y2}^{*i}, C_{z2}^{*i} \\ \vdots \\ Y_m^{*i}, Z_m^{*i}, A_m^{*i}, R_m^{*i}, C_{ym}^{*i}, C_{zm}^{*i} \\ \vdots \\ Y_M^{*i}, Z_M^{*i}, A_M^{*i}, R_M^{*i}, C_{yM}^{*i}, C_{zM}^{*i} \end{bmatrix}$$

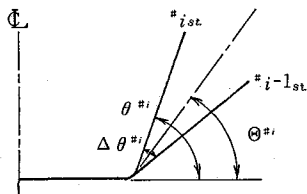


図1  $\theta^{*i}$ ,  $\Delta\theta^{*i}$ ,  $\Theta^{*i}$  の定義

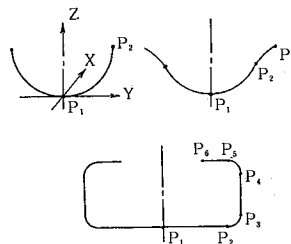


図2 プロフィール基準点  $P_m$  の定義

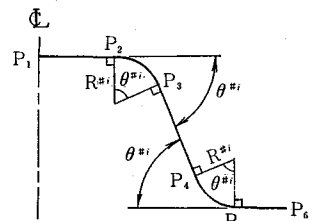


図3 設計条件の説明図

ここで、

$Y_m, Z_m$  = 点  $P_m$  の  $Y, Z$  座標

$A_m = P_m \rightarrow P_{m+1}$  の線素が直線か円弧かの識別 index

$R_m = P_m \rightarrow P_{m+1}$  の線素が円弧の場合の円の半径

$C_{ym}, C_{zm} = P_m \rightarrow P_{m+1}$  の線素が円弧の場合の中心の  $Y, Z$  座標

### 3. 設計条件

本報では、以下のような条件の下でのロールフラワーの設計を考える。(1) 幅方向に対称な製品断面形状を取り扱う。(2) ロールフラワーを構成している線素に関して、隣り合う円弧、直線と円弧は、境界点  $P_m$  において互いに接する (図3)。(3) 曲げ方式としてはどのようなものでも良いが、ここでは曲げ弧長一定方式を採用する。すなわち、各曲げ部のコーナーアール寸法は、各スタンドの曲げ角度  $\theta^{*i}$  が与えられれば、次式より決定されるものとする (図3)。

$$R^{*i} = R^e \times (\theta^e / \theta^{*i}) \quad (2)$$

ここで、 $\theta^e, R^e$  は製品断面の曲げ角度およびコーナーアール寸法である。

### 4. 設計手法

#### 4.1 設計方針と制御変数

設計の方針としては、次の2つを考える。(1) 縁波防止の観点から、各スタンド間での素材縁部の長手方向膜歪の最大値  $(\epsilon_{x0})_{MAX}^i$  を均一化して、全スタンドを通しての  $(\epsilon_{x0})_{MAX}^i$  の最大値  $((\epsilon_{x0})_{MAX}^i)_{MAX}$  を最小にする。(2) 各スタンドに要する成形トルクを均一化する。成形トルク = 変形仕事率 + ロール・素材間摩擦仕事率であるが、

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

摩擦仕事率の見積りは今後の課題として、本報では変形仕事率  $W^{#i}$  を均一化する問題を考える。

ロールフラワー最適化の制御変数としては、曲げ角度配分のみとする。ただし、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  を均一化して  $((\epsilon_{x0})_{MAX})_{MAX}$  を一定値以下にする問題、または、 $W^{#i}$  を均一化して  $(W^{#i})_{MAX}$  を一定値以下にする問題を考えることにより、本手法は、トータルスタンド段数の見積りにも容易に拡張可能である。

4.2 計算手順

本設計手法の計算の流れを図4に示す。以下にその主要部分を説明する。

(1) 曲げ角度増分の初期配分算出

各曲げ部の成形に要するスタンド段数を次式により割り振る。

$$N_k = N_T \times (\theta_k^* / \sum \theta_j^*) \quad (3)$$

ここで、 $N_k$  : 第  $k$  曲げ部の成形に要するスタンド段階、  
 $N_T$  : トータルスタンド段数、 $\theta_k^*$  : 第  $k$  曲げ部の最終曲げ角度。次に、後述の曲げ角度増分の修正式を求めるために、各曲げ部の各スタンドの曲げ角度増分を以下のように配分する。a)  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  を均一化する場合、図5のような漸増形の配分、b)  $W^{#i}$  を均一化する場合、

均等形の配分とする。

(2) プロファイルマトリックス  $Q_{#i}$  の算出式

曲げ弧長一定方式では、製品断面寸法、各スタンドの曲げ角度  $\theta_m^{#i}$  より次式で各スタンドのプロファイルマトリックス  $Q_{#i}$  を求めることができる (図6参照)。

$P_m^{#i} \rightarrow P_{m+1}^{#i}$  が直線の場合

$$Y_{m+1}^{#i} = Y_m^{#i} + l_m^* \cdot \cos a_2,$$

$$Z_{m+1}^{#i} = Z_m^{#i} + l_m^* \cdot \sin a_2$$

$P_m^{#i} \rightarrow P_{m+1}^{#i}$  が円弧の場合

$$Y_{m+1}^{#i} = Y_m^{#i} + R_m^{#i} \cdot (\sin a_2 - \sin a_1),$$

$$Z_{m+1}^{#i} = Z_m^{#i} + R_m^{#i} \cdot (\cos a_1 - \cos a_2)$$

$$C_{ym}^{#i} = Y_m^{#i} - R_m^{#i} \cdot \sin a_1,$$

$$C_{zm}^{#i} = Z_m^{#i} \cdot \cos a_1$$

$$R_m^{#i} = R_m^* \cdot (\theta_m^* / \theta_m^{#i}) \quad (4)$$

(3) 曲げ角度増分の修正式

a)  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  の均一化を計る場合

一般に、曲げ角度増分と  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  は図7のような関係にある。そこで今、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  を全スタンドの平均値  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  に近づけることを考え、そのための各スタンドの曲げ角度増分の修正量  $\delta(\Delta\theta^{#i})$  は次式により近似できる。

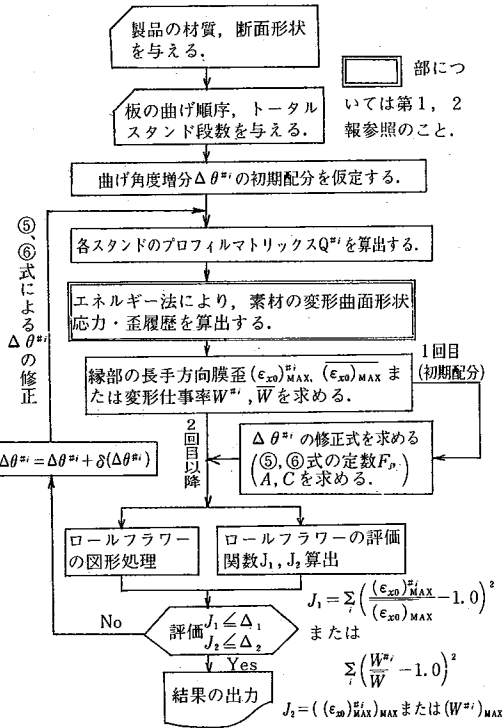


図4 計算の流れ図

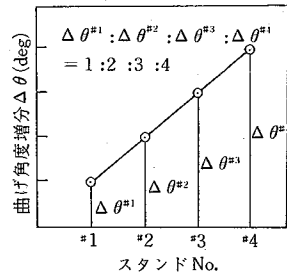
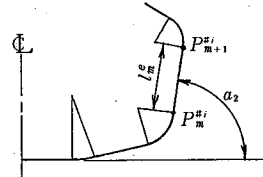
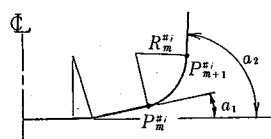


図5 漸増形の  $\Delta\theta^{#i}$  配分

(1)  $P_m^{#i} \rightarrow P_{m+1}^{#i}$  が直線の場合



(2)  $P_m^{#i} \rightarrow P_{m+1}^{#i}$  が円弧の場合.



$$(a_1 = \sum_{j=1}^{m-1} \theta_j^*, a_2 = \sum_{j=1}^m \theta_j^*)$$

図6 プロファイルマトリックスの算出

研 究 速 報

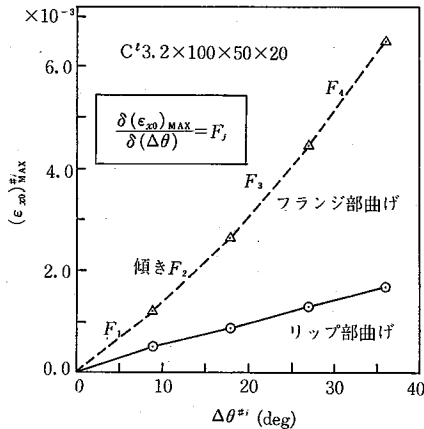


図7  $\Delta\theta^{\#i}$  と  $(\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}$  の関係

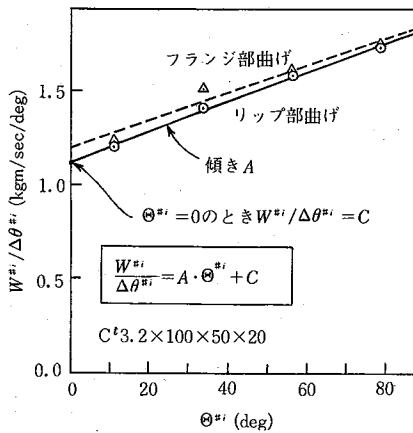


図8  $\theta^{\#i}$  と  $W^{\#i}/\Delta\theta^{\#i}$  の関係

$$\delta(\Delta\theta^{\#i}) = ((\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}} - (\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}^{\#i}) / F_i \quad (5)$$

b)  $W^{\#i}$  の均一化を計る場合

一般に、 $\theta^{\#i}$  と単位曲げ角度当たりの変形仕事率  $W^{\#i}/\Delta\theta^{\#i}$  は図8のような関係にある。a)と同様に  $W^{\#i}$  を全スタンドの平均値  $\bar{W}$  に近づけることを考え、そのための修正量  $\delta(\Delta\theta^{\#i})$  は次式により近似できる。

$$\delta(\Delta\theta^{\#i}) = (\bar{W} - W^{\#i}) / \left\{ A \cdot \left( \theta^{\#i-1} + \frac{\Delta\theta^{\#i}}{2} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} \delta(\Delta\theta^{\#j}) \right) + C \right\} \quad (6)$$

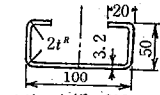
( $i=1, 2, 3, \dots, N_i$ ) 漸化式

また、上記修正後の各曲げ部の最終段曲げ角度が製品曲げ角度になるように、各曲げ部に必要なスタンド段数  $N_k$  の変更、ならびに  $\delta(\Delta\theta^{\#i})$  の再修正を必要に応じて行う。

5. 設 計 例

以上の設計手法によるC形鋼についての具体的な設

表1 C形鋼の計算条件

製品断面寸法	C $^3.2 \times 100 \times 50 \times 20$ 
トータルスタンド段数	8 段
スタンド間距離	400mm
パスライン	ボトムラインコンスタント
成形速度	40m/min
素材の応力-歪特性 (SS41相当)	ヤング率 $E=21000\text{kg/mm}^2$ 加工硬化係数 $H=80\text{kg/mm}^2$ ポアソン比 $\nu=0.3$ 初期降伏応力 $\sigma_e=31.5\text{kg/mm}^2$

繰り返し回数	$J_1$
1	5.237
2	$6.142 \times 10^{-2}$
3	$2.516 \times 10^{-2}$
4	$1.878 \times 10^{-2}$
5	$1.625 \times 10^{-2}$
6	$1.267 \times 10^{-2}$

$$J_1 = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{(\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}}{(\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}} - 1.0 \right)^2$$

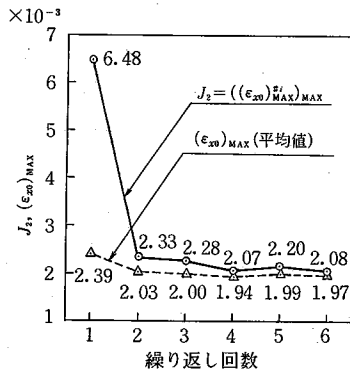


図9  $J_1, J_2, (\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}$  の推移

計例を以下に示す。ここで使用した計算条件をまとめて表1に示す。また、図7、図8は、本設計例の特性曲線(直線)として曲げ角度初期配分により求めたものである。

5.1  $(\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}$  の均一化設計

図9は、評価関数  $J_1, J_2, \text{平均値 } (\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}$  の推移を表したものである。均一化の達成度を表す  $J_1$  は、しだいに能率良く収束していきようすが見られる。一方、 $J_2$  の値は、繰り返し回数4回目ではほぼ最適解が求まっているため、それ以降は必ずしも改善されてはいない。 $J_2$  が最小となっている4回目のロールフラワーを最適解と見なすことにする。平均値  $(\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}$  は曲げ角度配分を変えてもあまり大きな変化は見られない。

図10は、各繰り返し回数における  $\Delta\theta^{\#i}$  と  $(\dot{\epsilon}_{x0}^{\#i})_{\text{MAX}}$  の

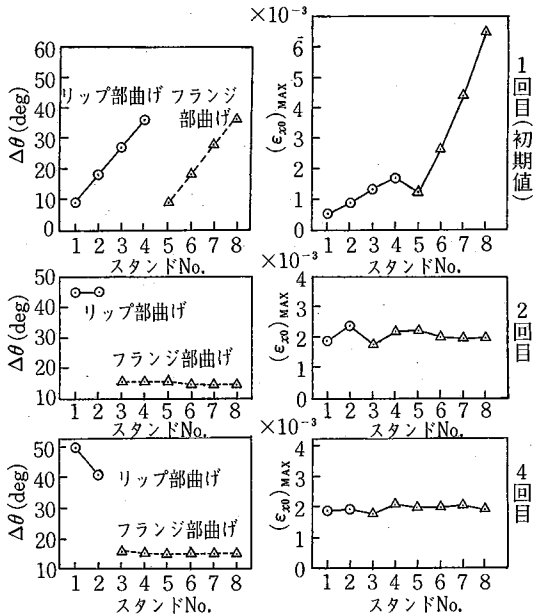


図10  $\Delta\theta^{*i}$  配分および  $(\epsilon_{20})_{MAX}^{*i}$  の推移

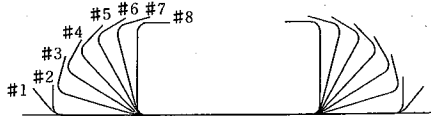


図11 C形鋼のロールフラワー ( $(\epsilon_{20})_{MAX}^{*i}$  の均一化設計)

推移を示したものである。リップ部曲げ，フランジ部曲げ各 4 st. 漸増形の配分から，リップ部曲げ 2 st. フランジ部曲げ 6 st の図のような最終配分になるにしたがって， $(\epsilon_{20})_{MAX}^{*i}$  はしだいに均一化されていくようが見られる。図 11 に，その際の最適ロールフラワーを示す。

5.2  $W^{*i}$  の均一化設計

図 12 に，評価関数  $J_1, J_2$ ，平均値  $\bar{W}$  の推移を示す。 $J_1, J_2$  共に順次改善されている。図 13 に  $\Delta\theta^{*i}$  と  $W^{*i}$  の推移を示す。リップ部曲げ，フランジ部曲げ各 4 st. 均等形の配分から，図のような最終配分になるにしたがって， $W^{*i}$  は均一化されていくようが見られる。図 14 にその際の最適ロールフラワーを示す。最終曲げ角度配分が漸減形になっているのは，コーナーアル部での加工硬化によるものと考えられる。

実生産のロールフラワーは，図 11，図 14 の中間的なものであることが確認されている。

6. ま と め

以上述べた設計手法により， $(\epsilon_{20})_{MAX}^{*i}, W^{*i}$  の均一化を計る上でのロールフラワーの自動設計が可能となった。今後は，C形鋼以外の断面形状にも広く適用していきたい。(1983年4月8日受理)

繰り返し回数	$J_1$
1	$1.403 \times 10^{-1}$
2	$1.437 \times 10^{-3}$
3	$1.331 \times 10^{-3}$
4	$1.307 \times 10^{-3}$

$$J_1 = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{W^{*i}}{\bar{W}} - 1.0 \right)^2$$

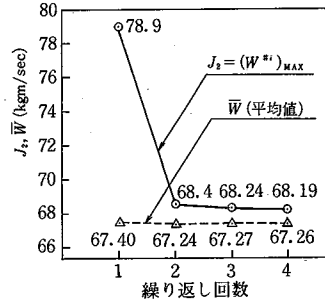


図12  $J_1, J_2, \bar{W}$  の推移

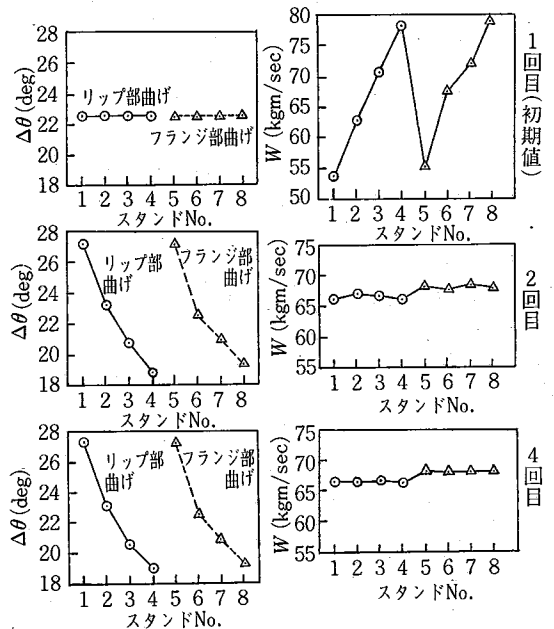


図13  $\Delta\theta^{*i}$  配分および  $W^{*i}$  の推移

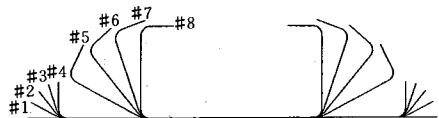


図14 C形鋼のロールフラワー ( $W^{*i}$  の均一化設計)

参 考 文 献

- 1) 木内・高田橋・藤蔭：昭和 57 年春季塑加講演論，1982-5, 683
- 2) 木内・高田橋：第 33 回塑加連講演論，1982-11, 517