

ロールフォーミングに関する解析的研究 第5報

Analytical Study on Roll Forming Process 5th Report

——スタンド間の素材の変形曲面形状に関する検討(1)——

—Investigation on the shape of deformed sheet metal between neighbouring forming roll stands—

木 内 学*

Manabu KIUCHI

1. ま え が き

ロールフォーミングではその加工法上の特質から成形過程にある素材に断面成形のための幅方向曲げ歪のみならず長手 (x) 方向・幅 (y) 方向・板厚 (z) 方向から曲げ歪・伸び歪・圧縮歪などの付加的歪が加わる。これら付加的歪成分の成形過程における挙動・分布形態を把握し、断面成形のための曲げ加工に与える影響を解明することがロールフォーミングの基本的問題となる。しかしながら成形時の境界条件が、不確定であることもあって、成形過程にある素材の応力・歪状態を全体的に解析することは非常に困難である。既に第1・2・4報において、上下成形ロールにかみ込まれている比較的狭い領域 A_i に注目し、各種の変形形態を個別的・全体的に抽出して解析し各付加的歪成分の影響を明らかにした。本報ではスタンド間で、3次元的空间曲面を呈している領域 B_i (図1参照) に注目し、素材の変形曲面形状の検討と素材に加わる付加的歪成分の分布形態と推移およびその際の応力状態に関する解析の結果について報告する。

めることは非常に困難である。そこで空間固定の直交座標 (X, Y, Z) において、領域 B_i の上流側・下流側の境界の X 座標を $X_1 \cdot X_2$ とし、素材の一点が成形過程において X_1 における境界値から X_2 における境界値に向けて空間的軌跡を描いて近づく割合を示す関数 $S(X)$ を導入する。この $S(X)$ と境界値を組合わせて領域 B_i の変形曲面の形状を近似する。但し $S(X)$ は X に対して唯一的に定まる関数ではなく、幾つかのパラメータ関数を含み実際の必要の範囲内で任意の空間的軌跡を近似し得るものでなくてはならない。この $S(X)$ を一般化すると次の条件、(1) $S(X_1)=0, S'(X_1)=0$, (2) $S(X_2)=1.0, S'(X_2)=A$, 但し A は素材各部が成形ロールに進入する角度を示す、を満し且つ $X_1 \sim X_2$ の範囲で必要な形状を示し得るものであればよい。(図3参照)

本報では $S(X)$ として次の関数を導入する。

$$S(X) = \left[\frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{X_2 - X_1} \left\{ X - \frac{X_1 + X_2}{2} \right\} + \frac{1}{2} + \nu (X_2 - X) (X - X_1) \right] \times e^{-\nu (X_2 - X_1 + A/\nu) (X_2 - X)} \quad (1)$$

(1)式が上記の条件を満していることは明らかである。一般的には $\nu \cdot A$ は素材の幅方向に異なる値をとるべき性質のものであるが、ここでは $A=0, \nu$ =一定の場合の解析を行なう。 ν が変化する場合の $S(X)$ の形状を図2に示す。

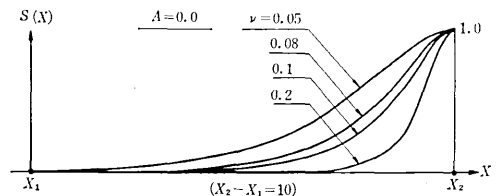


図2 形状関数 $S(X)$

3. 境 界 値

領域 B_i の $X=X_1 \cdot X_2$ における境界条件は実際の成形時には極めて複雑で明確ではないが、ここでは境界の断面形状はロールプロフィールに等しく、 X 方向の変位の変化率は $0 (=A)$ と考えておく。素材に固定した座標を (x, y) とし、変形曲面の各点の座標を (X, Y, Z) で

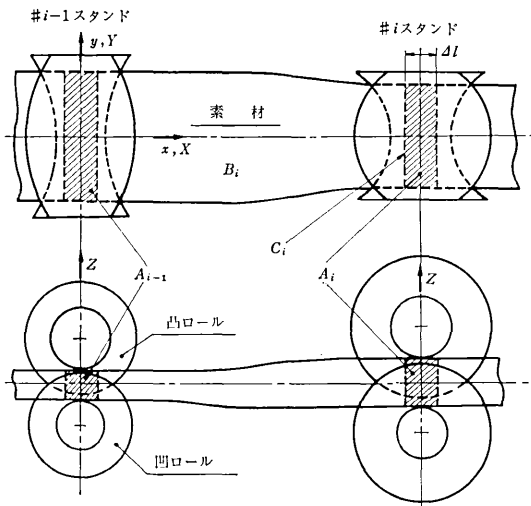


図1 解析的研究における素材領域分割説明図

2. 形状関数 $S(X)$ の設定

領域 B_i の3次元の変形曲面の形状を直接解析的に求

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報
表示すると、 $X=X_1 \cdot X_2$ における境界値は $x \cdot y$ の関数として次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X=X_1: X_1 &= F_1(x_1), Y_1 = F_2(x_1, y), \\ Z_1 &= F_3(x_1, y) \\ X=X_2: X_2 &= F_1(x_2), Y_2 = F_2(x_2, y), \\ Z_2 &= F_3(x_2, y) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

関数 $F_i(x_1, y)$, $F_i(x_2, y)$ は成形ロールプロフィールにより定まると考える。後に示す数値計算例の場合には平板から円弧形への成形を考える。そこで $F_i(x_i, y)$ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= F_1(x_1) = x_1, Y_1 = F_2(x_1, y) = y, \\ Z_1 &= F_3(x_1, y) = 0 \\ X_2 &= F_1(x_2), Y_2 = F_2(x_2, y) = r_1 \sin(y/r_2), \\ Z_2 &= F_3(x_2, y) = C_1 - r_1 \cos(y/r_2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

但し r_2 は円弧形断面の半径、 C_2 は円弧の中心位置を示す Z 方向の座標の値である (図3参照)。

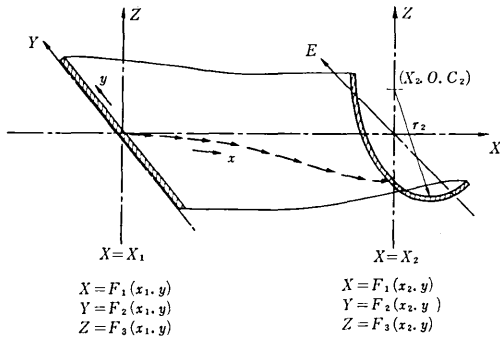


図3 境界値を与える関数 $F_i(x_i, y)$

4. 基準曲面関数と変形過程

上記の $S(X)$ と $F_i(x_i, y)$ を用いて領域 B_i の変形曲面 (以下基準曲面と呼ぶ) の形状を次式で近似する。ただし基準曲面は素材の中央面のなす曲面である。

$$\left. \begin{aligned} X &= F_1(x, y) \\ Y &= F_2(x, y) = F_2(x_1, y) + \{F_2(x_2, y) - F_2(x_1, y)\}S(X) \\ Z &= F_3(x, y) = F_3(x_1, y) + \{F_3(x_2, y) - F_3(x_1, y)\}S(X) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

次に成形前の素材に長手方向 Δl の長さを有する帯状の微小領域を考え、基準曲面に沿ってこの微小領域が漸進的に成形されていく過程を考える (図4参照)。その際最初 X 軸に垂直な成形断面は成形過程において垂直性を保つと仮定する。微小領域の変形を規定する拘束条件としてこの領域に生じる応力の X 方向成分の合力 F が 0 または一定であるとする。したがって Δl は成形の各段階で $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_i, \dots$ と変化する。拘束条件を満たす微小領域の変形状態を段階を追って決定し、歪増分・応力増分を求めて次々と加算することにより、境界 X_1 から X_2 に至る領域 B_i 内の応力と歪の分布形態および

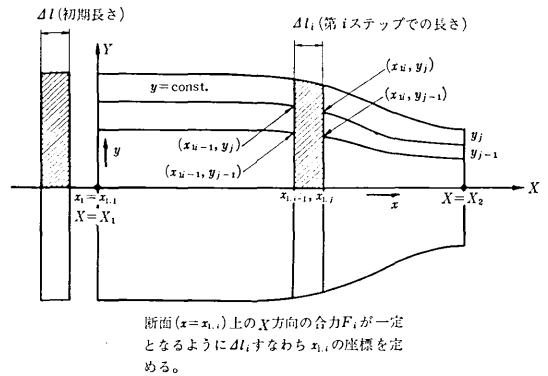


図4 数値計算のための変形曲面の分割

その推移を知ることができる。実際の計算の場合には微小領域を y 方向に等分割し、分割された領域内では応力・歪状態が一樣であるとみなす。 Δl と y 方向の分割を十分細かくとれば仮定した条件の範囲内で必要な精度を得ることができる。

5. 基礎関係式

(1) 歪増分の定義式: $y=y_j$ の空間曲線に沿う x 方向膜歪の第 i 段階第 j 分割の領域における増分 $(\Delta e_{xx})_{ij}$ は次式で与えられる。

$$(\Delta e_{xx})_{ij} = (\Delta l_{ij} - \Delta l_{i-1, j}) / \Delta l_{i-1, j} \quad (5)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_{ij} &= (\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta Z_{ij}^2) \\ \Delta X_{ij} &= X(x_{1, i, y_j}) - X(x_{1, i-1, y_j}), \\ \Delta Y_{ij} &= Y(x_{1, i, y_j}) - Y(x_{1, i-1, y_j}), \\ \Delta Z_{ij} &= Z(x_{1, i, y_j}) - Z(x_{1, i-1, y_j}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

x 方向・ y 方向の曲げ歪の増分は板の中央面からの距離を η として次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} (\Delta e_{xx})_{ij} &= \eta(1/(\rho_x)_{ij} - 1/(\rho_x)_{i-1, j}) \\ (\Delta e_{yy})_{ij} &= \eta(1/(\rho_y)_{ij} - 1/(\rho_y)_{i-1, j}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし、一般に法曲率は $1/\rho_x = L/E$, $1/\rho_y = N/G$, ($E \cdot G \cdot L \cdot N$ は曲面の1次・2次の規格量) で与えられる (図5参照)。

(2) 応力・歪関係式: 応力-歪関係式は歪増分論を用いるが、その際次の仮定をおく。(i) 基準曲面上の $x-y$ 座標軸のゆがみを無視する。(ii) 剪断歪・剪断応力の成分を無視する。曲げの曲率半径は板厚に比して大であるので板厚方向応力 $\sigma_z = 0$ とする。(iii) 曲げの中立面の移動を無視し $\eta = 0$ の面と中央面は一致する。(iv) 膜歪と曲げ歪は重ね合わせが可能である。以上の仮定に基づき、弾性変形過程では次式を用いる。

$$\begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} de_x \\ de_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし、 E : 弾性係数

ν : ポアソン比

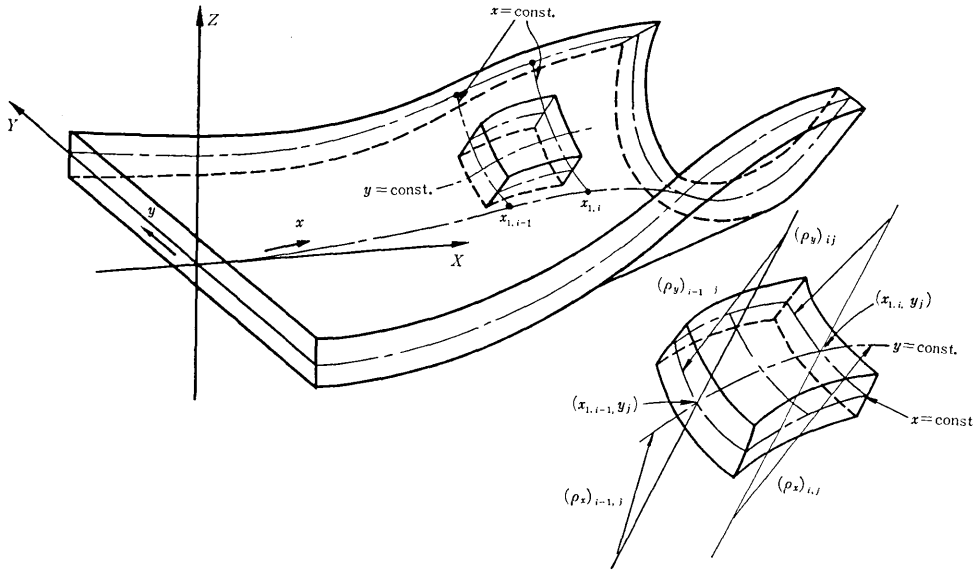


図5 変形曲面の分割と曲げ半径の考え方

塑性変形過程では次式を用いる。

$$\begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \end{bmatrix} = \frac{E}{Q} \begin{bmatrix} \sigma_y'^2 + 2P & -\sigma_x'\sigma_y' + 2\nu P \\ -\sigma_x'\sigma_y' + 2\nu P & \sigma_x'^2 + 2P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} de_x \\ de_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} P &= 2H'/9E \cdot \bar{\sigma}^2, & Q &= R + 2(1-\nu^2)P \\ R &= \sigma_x'^2 + 2\nu\sigma_x'\sigma_y' + \sigma_y'^2, \\ \bar{\sigma} &= \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_x'^2 + \sigma_x'\sigma_y' + \sigma_y'^2)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

H' は塑性係数 (直線近似として一定), $\sigma_x' \cdot \sigma_y'$ は偏差応力であり第 i 段階の計算には第 $i-1$ 段階の値を用いる。弾性変形・塑性変形の判別は, 相当応力増分の符号により行なう。

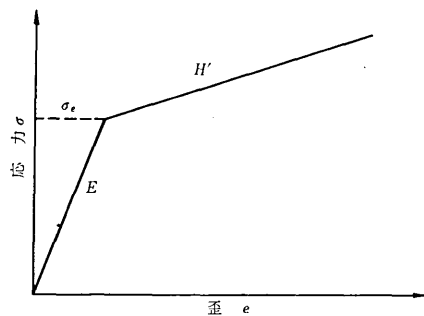
(3): 成形方向の合力 F_i : 第 j 分割域の合力を f_{ij} とすると, $f_{ij} = \Delta y \cdot \int (\sigma_x)_{ij} d\eta$ で与えられるので, F_i は次式で与えられる。

$$F_i = \sum_j (\alpha_y)_j \cdot f_{ij} \quad (11)$$

ただし $(\alpha_y)_j$ は j 分割点を通る $y = \text{const}$ の曲線に沿う接線の X 軸方向の方向余弦である。

6. 数値計算結果および考察

以上の解析に基づき数値計算例を以下に示す。境界条件式 (3) において, $r_2 \cdot C_2$ の値を板厚 $t (= 1.0)$ で無次元化し, $r_2 = 60, C_2 = 30, 70$ の場合につき計算する。素材板幅 $2b = 60$, スタンド間隔 $SD = X_1 - X_2 = 150$ である。また形状関数 $S(X)$ に含まれるパラメータ $A \cdot \nu$ は, $A = 0, \nu = 8 \times 10^{-4}$ とし幅方向に一様とする。これらの数値は本研究で行なわれた実験的研究の際の成形条件の一部に対応させてある。素材の応力-歪関係は図6に示す SS 41 相当熱延板の値を用い, 降伏応力



素材: SS 41相当熱延板
降伏応力 σ_e : 31.5 kg/mm²
塑性係数 H' : 300 kg/mm²

図6 素材の材料定数

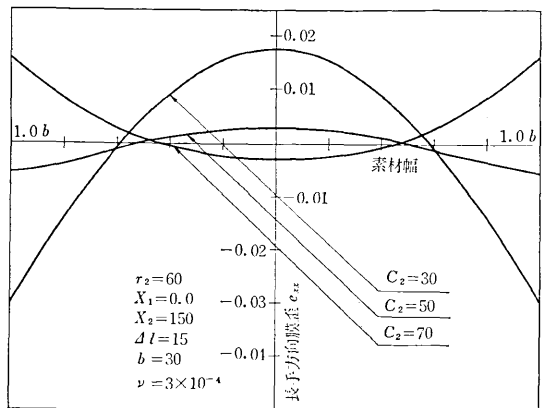


図7 長手方向膜歪 ϵ_{xx} の最終段階の幅方向分布

$\sigma_e = 31.5 \text{ kg/mm}^2$, 塑性係数 $H' = 300 \text{ kg/mm}^2$ である。

図7には成形の最終段階における長手方向膜歪 ϵ_{xx} の分布形態を示す。 $C_2 = 30$ で素材の対ロール進入角 α が

研究速報

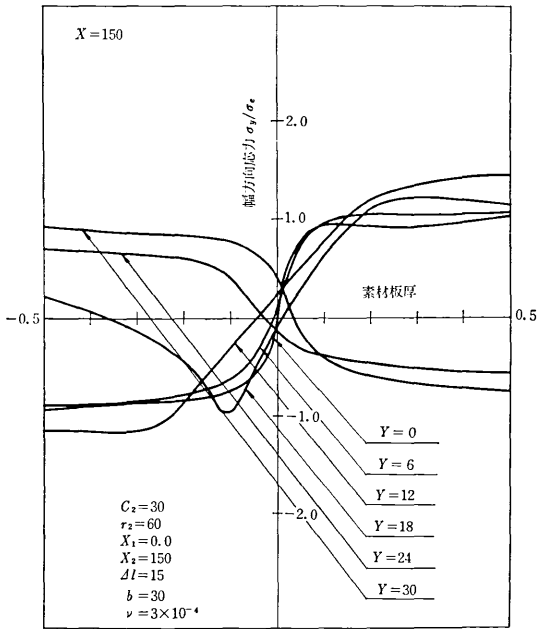


図8 幅方向応力 σ_y の最終段階の板厚方向分布

正の場合には素材の中央部で伸び歪・縁部が圧縮歪を受け、 $C_2=70$ で α が負の場合は中央部が圧縮歪・縁部が伸び歪を受ける結果が得られ、これまでの実験結果と定性的に一致する。図8~10には幅方向の各点における σ_y の板厚方向分布の成形最終段階での分布形態を示す。 $C_2=70$ ($\alpha < 0$) の場合に長手方向の急激な曲げのために応力分布の逆転が起こっている。この σ_y の正負が逆転する度合は中央部で少く、縁部へ移行する程大きくなっており、 α が正から負へ変化するにしたがい、縁部から中央部に向って成形度が次第に改善されるという実験結果と定性的に合致する。

7. 結 言

本報ではロールフォーミングの成形過程において、スタンド間で素材が示す変形曲面形状と変形径路・付加的歪成分の分布状態および、推移を求めるとして、形状関数 $S(X)$ の導入とそれに伴う解析の一般的手法を示した。また 2・3 の計算例を通し、この様な手法により実際の成形時における素材の変形の基本的特質を把握できることを示した。

(1970年2月24日受理)

参 考 文 献

ロールフォーミングに関する解析的研究 第1報 木内「塑性と加工」Vol. 10, No. 104, 1969-9.
 ロールフォーミングに関する解析的研究 第2報 木内「塑性と加工」Vol. 10, No. 104, 1969-9.
 ロールフォーミングに関する解析的研究 第3報 木内 第

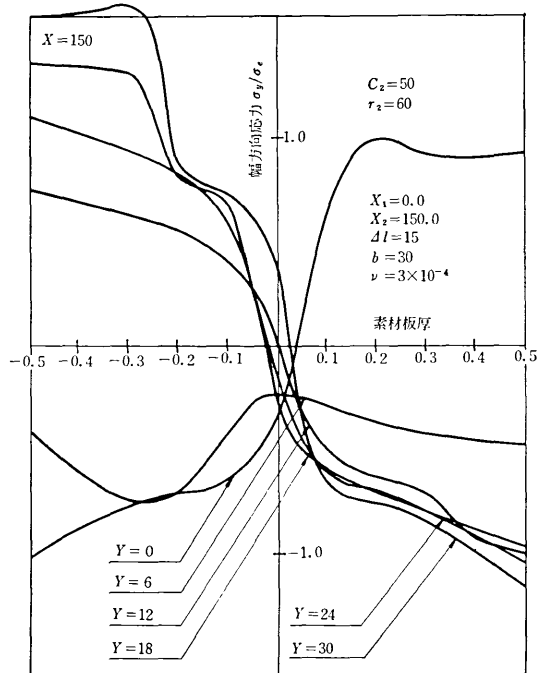


図9 幅方向応力 σ_y の最終段階の板厚方向分布

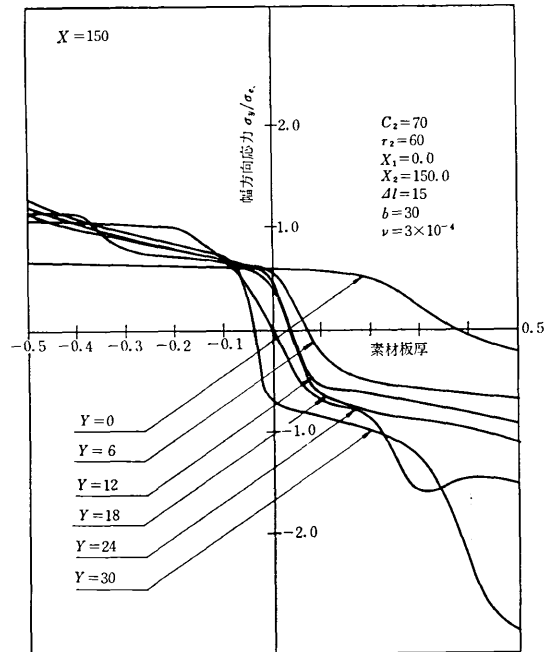


図10 幅方向応力 σ_y の最終段階の板厚方向分布

19 回塑性加工連合講演会前刷集 1968. 11.
 ロールフォーミングに関する解析的研究 第4報 鈴木・木内・木村, 第20回塑性加工連合講演会前刷集 1969. 11
 ロールフォーミングに関する解析的研究 第5報 木内 第20回塑性加工連合講演会前刷集 1969. 11