

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(1) — スタンド間変形曲面形状のモデル化と計算手法 —

Study of Computational Simulation Method of Cold Roll Forming Process · 1st Report

木 内 学* · 高田橋 俊 夫* · 江 藤 文 夫*
Manabu KIUCHI, Toshio KOUJABASHI and Fumio ETOU

1. ま え が き

筆者らは、ロールフォーミングの成形過程において素材に作用する応力・歪みの分布を任意の製品断面について解析的に求める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。応力・歪みの分布を求めるためには、スタンド間で素材が呈する三次元的な変形曲面形状を決定しなければならないが、この変形曲面を直接解析的に求めることは困難であり実際的に有効な手段は見当たらない。そこで本研究では、変形曲面形状を制御パラメータを含む形状関数 $S(X)$ なるもので表示し、エネルギー法でこのパラメータを決定するという手法を含む近似解析法を開発したので以下に報告する。

2. 変形曲面形状のモデル化と計算手法

2.1 形状関数 $S(X)$ の導入 空間固定の座標軸 (X, Y, Z), 素材の板厚中央面に固定の座標軸 (x, y, z) を図1のようにとる。ここでは、変形曲面形状を関数近似するものとして形状関数 $S(X)$ を以下のように定義する。形状関数 $S(X)$ とは、素材上の一点が i スタンドのロールプロフィール上の点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ から $i+1$ スタンドのロールプロフィール上の点 $P_{i+1}(X_2, Y_2, Z_2)$ へと移行する際に描く空間的軌跡の形状を規定する関数である (図1参照)。

本報では次のような形状関数を導入する。

$$S(X) = \sin\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{X}{L}\right)^n\right), \quad L = X_2 - X_1 = \text{スタンド間距離} \quad (1)$$

この式を用いて変形曲面上の Y, Z 座標は後出の式 (2) (3) により表される。図2にパラメータ n を変化した場合の $S(X)$ の計算例を示す。 n が大きいほど $i+1$ スタンド直前で急激な変位が起り、 n が小さいと変位はゆるやかになる。本報では n は幅方向によらず一定とし、 n の決定にはエネルギー法を適用する。

2.2 変形曲面に沿う微小要素の変形過程 成形前の

素材の長手 (X) 方向に Δl_0 の長さを有し、幅方向に帯状をなす微小要素 (長方形要素) を考え、成形過程においてこの要素が変形曲面に沿って成形されていく過程を考える (図3参照)。変形の形態を規定する拘束条件および力学的な拘束条件としてそれぞれ次の仮定を考える。(1) 微小要素の横断面の各点は成形中常に同一平面内にあ

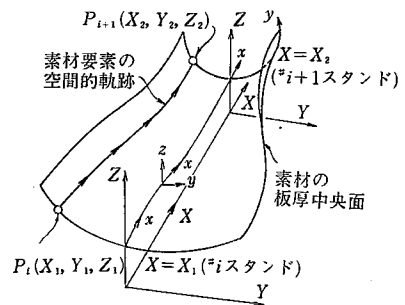


図1 $S(X)$ の定義

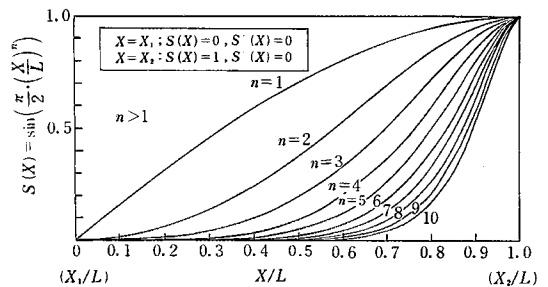


図2 形状関数 $S(X)$ の計算例

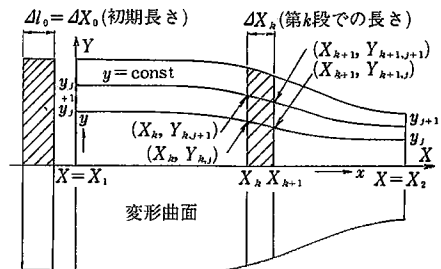


図3 変形曲面に沿う微小要素の変形

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

り、その平面は X 軸に垂直である。(2) 微小要素に生じる内部応力の X 方向の合力は成形の各過程で零、または一定である。これらの拘束条件を満足する微小要素の変形状態を段階を追って決定することにより、素材に作用する応力・歪みの分布、パラメータ n の最適化に必要な変形仕事率を求めることができる。実際の計算では微小要素をさらに素材幅 (y) 方向に分割し、再分割された領域では応力・歪みが一樣であると見なす。

2.3 各分割点の座標の関係式 長手方向 k 段階、幅方向 j 分割域における分割点の座標を $(X_k, Y_{k,j}, Z_{k,j})$ とする。まず X_k に関しては、前述の拘束条件により規定され、以下のような数値計算により求める。最初に X_k の初期値を仮定しその場合の幅方向の各分割域における歪み増分・応力増分を求め、その結果得られた X 方向の合力が零、または一定にならなければ X_k の値を修正して計算をやり直し、 X 方向の合力が収束するまで計算をくり返す。 $Y_{k,j}$ については、形状関数 $S(X)$ を使って次式により求められる。

$$Y_{k,j} = Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot S(X_k) \quad (2)$$

$Z_{k,j}$ は $Y_{k,j}$ に対し独立ではなく次の幾可学的関係式により $Y_{k,j}$ と関係づけられる。

$$(Z_{k,j} - Z_{k,j-1})^2 = \Delta b_{k,j}^2 - (Y_{k,j} - Y_{k,j-1})^2 \quad (3)$$

ここで、 $\Delta b_{k,j-1}$ は再分割域の幅方向の線素の長さであり後出の式(5)により与えられる。

2.4 歪み増分の関係式 y = 一定になる空間曲線に沿う x 方向膜歪みの第 k 段階、第 j 分割域における増分 $(d\epsilon_{y0})_{k,j}$ 、同様に x = 一定になる空間曲線に沿う y 方向膜歪みの第 k 段階、第 j 分割域における増分 $(d\epsilon_{x0})_{k,j}$ は次式により与えられる。

$$(d\epsilon_{x0})_{k,j} = (\Delta l_{k,j} - \Delta l_{k-1,j}) / \Delta l_{k-1,j} \quad (4)$$

$$(d\epsilon_{y0})_{k,j} = (\Delta b_{k,j} - \Delta b_{k-1,j}) / \Delta b_{k-1,j}$$

$$\text{ただし、} \Delta l_{k,j} = (\Delta X^2_{k,j} + \Delta Y^2_{k,j} + \Delta Z^2_{k,j})^{1/2}$$

$$\Delta b_{k,j} = \Delta b_{k-1,j} \{1.0 - \lambda(d\epsilon_{x0})_{k-1,j}\} \quad (\lambda = 0 \sim 1.0)$$

$$\Delta X_{k,j} = X_{k,j} - X_{k-1,j} \quad \Delta Y_{k,j} = Y_{k,j} - Y_{k-1,j}$$

$$\Delta Z_{k,j} = Z_{k,j} - Z_{k-1,j} \quad (5)$$

また、 x 方向、 y 方向の曲げ歪み増分 $(d\epsilon_{xb})_{k,j}$ 、 $(d\epsilon_{yb})_{k,j}$ は素材の板厚中央面からの距離 η を用いて次式で与えられる (図4参照)。

$$(d\epsilon_{xb})_{k,j} = \eta(1/(\rho_x)_{k,j} - 1/(\rho_x)_{k-1,j})$$

$$(d\epsilon_{yb})_{k,j} = \eta(1/(\rho_y)_{k,j} - 1/(\rho_y)_{k-1,j}) \quad (6)$$

ただし、 x 方向、 y 方向の曲率は変形曲面の一次、二次の規格量¹⁾ E, G, L, N を用いて次式で与えられる。

$$1/\rho_x = L/E, \quad 1/\rho_y = N/G \quad (7)$$

2.5 応力・歪み関係式 応力・歪み関係式としては歪み増分論を用いるが、その際次の仮定をおく。(1) 変形曲面上の x, y 方向を主方向と考え、剪断歪み・剪断応

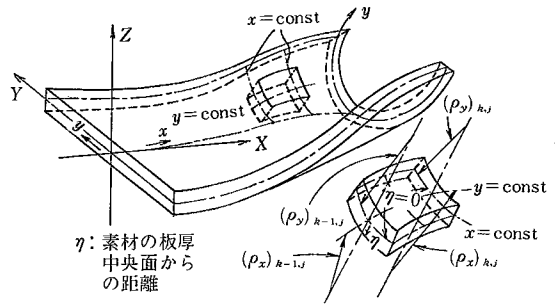


図4 微小分割領域、曲率、 η の説明

力成分を無視する。(2) 板厚方向の応力 σ_z は小と考え $\sigma_z = 0$ とする。(3) 曲げ歪みと膜歪みは重ね合わせが可能である。以上の仮定より次の諸式を用いる。

(曲げ歪みと膜歪みの重ね合わせ)

$$d\epsilon_x = d\epsilon_{x0} + d\epsilon_{xb}, \quad d\epsilon_y = d\epsilon_{y0} + d\epsilon_{yb} \quad (8)$$

$$\text{(弾性式)} \quad d\sigma_x = (d\epsilon_x + \nu d\epsilon_y)E / (1 - \nu^2), \quad d\sigma_y = (\nu d\epsilon_x + d\epsilon_y)E / (1 - \nu^2) \quad (9)$$

$$\text{(塑性式)} \quad d\sigma_x = \{(\sigma_x'^2 + 2P)d\epsilon_x + (-\sigma_x'\sigma_y' + 2\nu P)d\epsilon_y\}E/Q$$

$$d\sigma_y = \{(-\sigma_x'\sigma_y' + 2\nu P)d\epsilon_x + (\sigma_y'^2 + 2P)d\epsilon_y\}E/Q \quad (10)$$

$$\text{ただし、} P = 2H\bar{\sigma}^2/9(E-H), \quad Q = R + 2(1 - \nu^2)P,$$

$$R = \sigma_x'^2 + 2\nu\sigma_x'\sigma_y' + \sigma_y'^2, \quad \bar{\sigma} = (\sigma_x'^2 - \sigma_x'\sigma_y' + \sigma_y'^2)^{1/2},$$

$$\sigma_x' = (2\sigma_x - \sigma_y)/3, \quad \sigma_y' = (2\sigma_y - \sigma_x)/3 \quad (11)$$

E : 弾性係数, ν : ポアソン比, H : 加工硬化係数

2.6 変形仕事率 W 微小時間 ΔT 経過後、微小要素が第 $k-1$ 段階から第 k 段階に成形が進む時のスタンド間での全変形仕事率 W は次式で与えられる。

$$W = \frac{1}{\Delta T} \sum_k \sum_j \sum_m \left\{ \Delta V_{k-1,j,m} \left((dw^p)_{k,j,m} + (dw^e)_{k,j,m} \right) \right\} \quad (12)$$

ただし、 m : 微小領域を板厚方向にも分割したときの分割域番号を表す添字。 ΔT : $\Delta l_0 /$ (成形速度)。

$\Delta V_{k-1,j,m}$: 第 $k-1$ 段階、 j, m 分割域の体積。

$(dw^p)_{k,j,m}$ 、 $(dw^e)_{k,j,m}$: j, m 分割域の第 $k-1 \rightarrow k$ 段階への塑性変形仕事増分ならびに弾性変形仕事増分 (単位体積当たり)。

本研究における全体的な計算のフローを図5に示す。

3. 計算結果および考察

以上の解析手法による具体的な数値計算例を以下に示し、その結果について検討する。ここで使用した計算条件は特にことわらない限り表1のとおりとする。

図6は変形仕事率 W 、パラメータ n の収束計算の各段階での n と W の関係をプロットしたものである。図中3つの計算例のどの場合においても、シンプレックス法

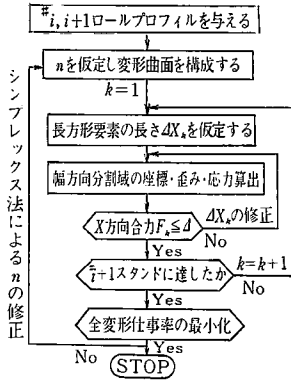


図5 全体的な計算フロー

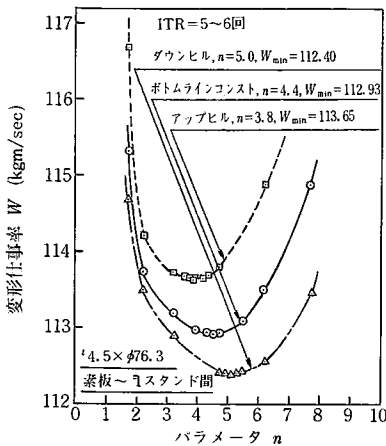


図6 変形仕事率の収束状況

による収束くり返し回数は5~6回程度でそれぞれ一つの最適解 W_{min} に能率よく収束している。

図7は素材の板厚 t と変形仕事率 W_{min} の関係を両対数グラフにプロットしたものである。図7の計算例では $W \propto t^{2.18}$ の関係にあり、一般に曲げ加工が主体であるブレークダウンの粗成形では変形エネルギーが板厚の2乗程度に比例すると言われていることと対応している。図8は板厚変化に伴うパラメータ n の最適値 n_{op} の推移を示す。板厚 t が大きくなるに従って n_{op} が大きくなっており、これは厚肉になるほどスタンド直前より急激な変位を起こすことを表わしている。この傾向は実際の成形時に見られる現象と一致している。

図9はパラメータ n に加えて予変形域長さ ($i \sim i+1$ スタンド間の変形において $i+1$ スタンドから素材の変位が起り始める点までの距離) も制御パラメータとして計算した結果である。ダウンヒル、ボトムラインコスト、アップヒルの順に予変形域長さ L_{op} が大きくなっていくが、これはこの順に幅方向の各点がスタンド

表1 計算条件

成形サイズ	電線管 $4.5 \times \phi 76.3$ (素板 $4.5 \times \phi 280$)							
素材の応力・歪み特性	$E = 21000 \text{ kg/mm}^2, H = 80 \text{ kg/mm}^2$ $\nu = 0.3$, 初期降伏応力 $\sigma_0 = 31.5 \text{ kg/mm}^2$							
成形条件	スタンド段数=8段, スタンド間距離=800mm 成形速度=40m/min, ロールプロフィールおよびパスラインは下記の通り(mm)							
項目	スタンドNo. #1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
ロール曲げ角度 θ	30°	60°	90°	120°	150°	160°	170°	175°
ロール曲率 R	229.18	114.59	76.39	57.30	45.84	42.97	40.44	39.29
ボトムラインコンスト	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0
パスライン	-10	-20	-30	-40	-40	-40	-40	-40
アップヒル	+10	+20	+30	+40	+40	+40	+40	+40

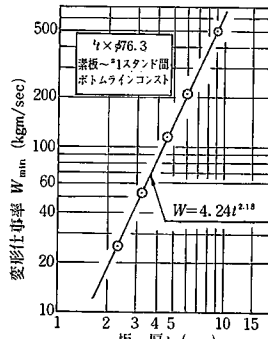


図7 板厚と変形仕事率の関係

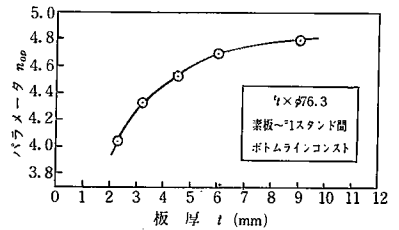


図8 板厚変化に伴うパラメータ n_{op} の推移

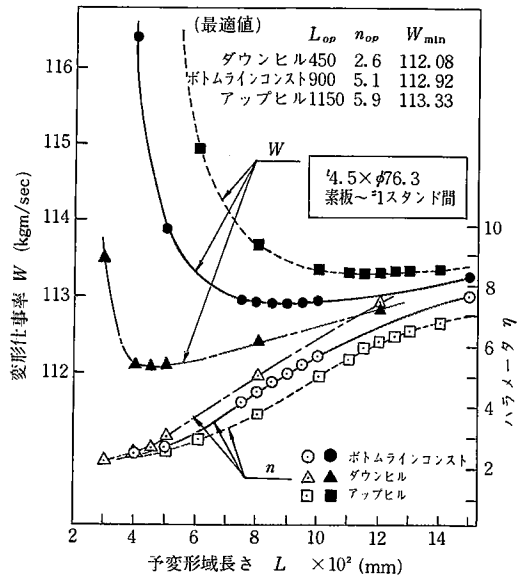


図9 予変形域長さ L の W, n に与える影響

間で変位する量が大きくなっていくためであると考えられる。一方、 L を同一の長さに固定した場合の n の値はダウンヒル、ボトムラインコスト、アップヒルの順に小さくなり、図中最適値 L_{op}, n_{op} をもつ変形曲面に近づこ

研究 速 報

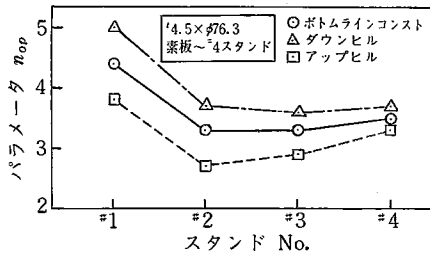


図10 Δl_e の n_{op} に与える影響

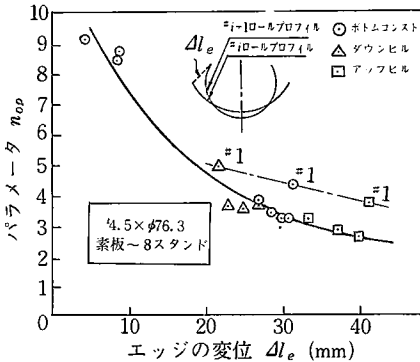


図11 パスラインの n_{op} に与える影響

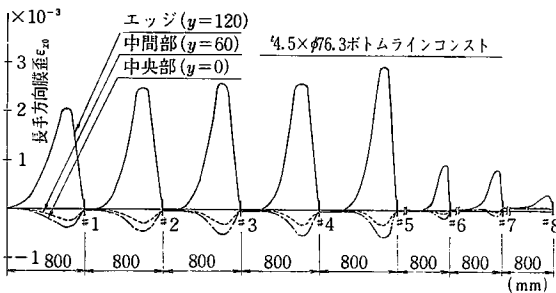


図12 幅方向各位置における長手方向膜歪みの推移

うとしている傾向が見られる。

図10に各スタンド間での素材縁部の変位 Δl_e とパラメータ n_{op} の関係を示す。 n_{op} は Δl_e と比較較的よい対応関係を示し、 Δl_e が小さくなるほど n_{op} は大きくなり予変形領域が発達せず幅方向曲げがロール直下近傍でより急激に行われることになる。弾性変形の占める割合が他のスタンド間の変形に較べて大きい素板から #1 スタンドまでの変形では、 Δl_e と n_{op} の対応関係が他のスタンド間と少し異なった傾向にある。図11はパスラインのパラメータ n_{op} に与える影響を示したものである。同一スタンドでは素材縁部の変位 Δl_e に代表される幅方向各点の変位がダウンヒル、ボトムラインコンスト、アップ

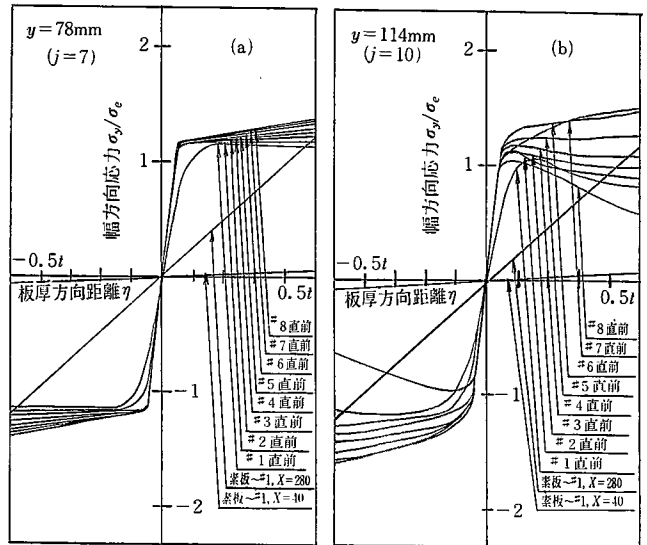


図13 成形過程における幅方向力分布の推移

ヒルの順に大きくなると、予変形領域がより発達するために n_{op} の値はこの順に小さくなっている。

図12, 13に幅方向各位置における長手方向膜歪み ϵ_{x0} の推移ならびに各成形過程における幅方向応力分布 σ_y の推移の一例を示す。一般に ϵ_{x0} は、縁部では i スタンド出側からしだいに増大し、形状関数 $S(X)$ の変曲点において最大値をとり、それから先は減少しながら $i+1$ スタンド直下で ϵ_{x0} はほぼ零になっている。一方、板幅中央部 ($y=0$ mm) と中間部 ($y=60$ mm) でも同様の傾向を示しているが、符号は逆 (圧縮側) である。図13(a)の計算例に代表されるように、素材の幅方向中央部から中間部近傍にかけては幅方向単純曲げの様相を呈しているが、図13(b)に示す縁部近傍の各スタンド直前では σ_y が長手方向鞍形曲げ変形の影響を受けているようが見られる。

4. ま と め

具体的な数値計算の結果、板厚・パスライン・成形量とパラメータ n_{op} の関係において実際の成形時に見られる現象と傾向的によく一致し、本計算手法の有効性が判明した。
(1982年4月5日受理)

参 考 文 献

- 1) 寺沢寛一：数学概論，(1954)，44，岩波書店
- 2) 木内 学：塑性と加工，12-120 (1971-1)，20