

ロールフォーミング汎用シミュレータの開発に関する研究 (第9報)

——電縫管成形時のロール径の影響について——

Study of Computational Simulation Method of Cold-Roll-Forming Process-9th Report

木 内 学*・元 木 健 一*
Manabu KIUCHI and Ken-ichi MOTOGI

1. は じ め に

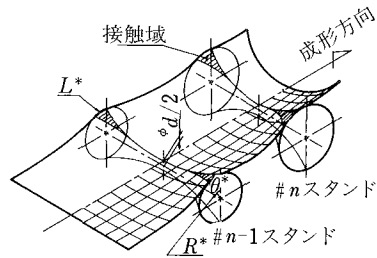
筆者らは、ロールフォーミング汎用シミュレータの開発を目指して一連の研究を進めているが、前報¹⁾までに、開発したシミュレータを用い、電縫管・形鋼について、曲げ方式・曲げ角度配分・ロール段数・パスライン等、パススケジュールの最適化について検討を行い、ロールフォーミング加工の成形プロセスの設計に有益な多くの指針を得てきた。

本報では、本シミュレータの応用として、従来考慮されていなかったロール径が素板の変形挙動に与える影響について、電縫管成形を例にとり、長手方向膜ひずみおよび接触長さ等の面から基礎的な検討を行った。この結果について以下に報告する。

2. 解 析 方 針

本報では、曲げ方式としては、サーキュラバンド方式を対象とし、ブレイクダウンロールによる成形について検討する。具体的には、図1に示すように、素板が凹ロールに巻きついて進入していく状態を想定し、凹ロールによる拘束の問題を取り扱う。また、前報までのロールによる拘束を考慮しない解析法をモデル1、本報の解析法をモデル2と称する。

図2に全体的な計算のフローを示す。モデル2がモデル1と異なる点は、2つの新しい形状関数を用いる点にある。モデル2ではまず、ロールによる拘束を考慮しない状態で(1)式による形状関数の制御パラメータ N の最適化を行い²⁾、変形曲面形状を決定する。この結果から、変形曲面形状と凹ロールとの干渉の有無を考慮して、凹ロールとの接触角度・接触長さを求める。次に、後述する接触を考慮した形状関数(2)、(3)式を用いて変形曲面形状を表示し、その中に含まれる制御パラメータ k の最適化を行って最終的な変形曲面形状を決定する。その他の計算手法は、モデル1に準ずる²⁾。



θ^* : 接触角度
 R^* : 接触点でのロール半径
 L^* : 接触長さ(縁部の長さにて表す)
 $\phi d/2$: ロール最小部半径

図1 解析モデル

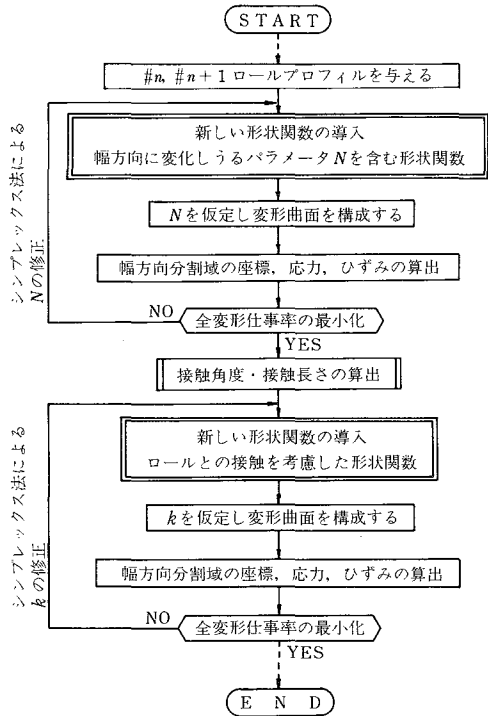


図2 全体的な計算のフロー

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

3. 新しい形状関数の導入と接触点の算出

3.1 幅方向に変化するパラメータNを含む形状関数

前報までは、素板の変形曲面形状を、 $S(X) = \sin(\pi/2 \cdot (X)^N)$ (N : 制御パラメータ, X : X 座標無次元値)なる形状関数²⁾を用い表示してきた。その際、幅方向に一定な n を想定したが、本報では、実際の現象をより精度よく解析するために、幅方向に変化するパラメータ N を有する次式の形状関数を導入し、それを用いて表示した変形曲面形状に基づいて、ロールとの接触の検討を行った。

$$S'(X) = \sin(\pi/2 \cdot (X)^N), \quad N = n + (1+J)^m \quad (1)$$

ここで、 N , (n)は制御パラメータ、 J は幅方向無次元値(J = 幅方向分割長さ/素板幅/2, $0 \leq J \leq 1$), m はスタンドピッチ・ロール径・材料幅等によって定まる定数($m \geq 0$)であるとする。図3に $S'(X)$ の値を示す。

3.2 ロールとの接触を考慮した形状関数

ロールとの接触を考慮した解析モデルを図4に示す。このモデルでは、素板の変形曲面を領域1、領域2に分け、おのおの領域で形状関数を使い分ける。素板は、ロールとの接触点Cにおいて傾き(A)をなして進入し、領域2では、C、G点を結ぶ楕円上を通ると仮定する。ただし、C点において連続であるという境界条件を適用することにより、(2)式、(3)式の形状関数を導入し、これらを用いてスタンド間全領域の変形曲面形状を表示する。

領域1: $S_1(X) = \{ (1/2) \cdot \sin(\pi \cdot (X^* - 1/2)) + 1/2 + k \cdot (1 - X^*) \cdot X^* \} \cdot \exp\{ -(k+A) \cdot (1 - X^*) \} \quad (2)$

領域2: $S_2(X) = (R/a) \cdot \sqrt{a^2 - (1 - X^*)^2} - Z_j \quad (3)$

(X^* , R , a は図4参照)

ここで k は素板上の各点の空間的軌跡を規定する制御パ

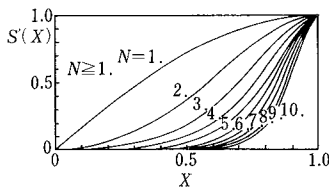


図3 形状関数 $S'(X)$ の値

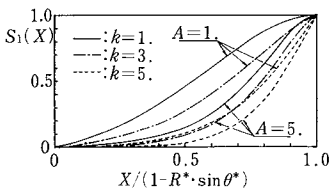


図5 形状関数 $S_1(X)$ の値

ラメータであり、(1)式の $N(n)$ に対応する。 A はC点におけるロールへの進入角度である。図5に $S_1(X)$ の値を示す。接触角度が大きくなるほど、素板はロール直前での立ち上がりが急になり、しかもロールへ直線的に進入していくことがわかる。

3.3 接触角度、接触長さの算出

n スタンドにおいて、幅方向分割点 j におけるロールプロフィール上の点Gの座標を(1, Y, Z), (1)式を用いて表示した変形曲面上の点Cの座標を(X^* , Y^* , Z^*)とし、この点で接触が始まるとして、 Y^* におけるロールの半径を R^* とすると、接触開始点Cでは、

$$(1 - X^*)^2 + (Z^* + \phi d/2)^2 = R^{*2} \quad (4)$$

が成立する。ただし、 $\phi d/2$ はロール最小部半径である。

$$\theta^* = \sin^{-1}(1 - X^*)/R^* \quad (5)$$

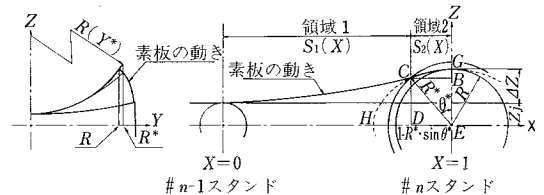
$$L^{*2} = (1 - X^*)^2 + (Y - Y^*)^2 + (Z - Z^*)^2 \quad (6)$$

で求められるものとする。なお、記号は図4を参照されたい。

4. 実験結果およびモデル1との比較

4.1 実験結果との比較

本解析法の妥当性を確認するため、鈴木ら^{3),4)}による電縫管成形時のひずみ経路測定結果との比較を#1, #2ロールに対して行った。実験および解析条件を表1に示す。実験と解析では、凹ロールの位置が逆になっていることに注意されたい。図6にロールとの接触長さ(以下 L^* と称す)を示す。接触領域の形に関して、#1ロールで双方に差が見られる。これは、平板から円弧への成形過程で、凹ロールに沿って進入する素板の変形挙動を、本解析モデルによっても必ずしも十分に表示しきれなかったこと



形状関数

領域1: $S_1(X) = (\frac{1}{2} \cdot \sin \pi \cdot (X^* - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} + k \cdot (1 - X^*) \cdot X^*) \cdot \exp\{ -(k+A) \cdot (1 - X^*) \} \quad (2)式$

$$X^* = \frac{X}{1 - R^* \cdot \sin \theta^*}, \quad A = \frac{R^2 \cdot (R^* \cdot \cos \theta^*)^2}{R^{*2} \cdot \cos \theta^* \cdot \sin \theta^*}, \quad \frac{1 - R^* \cdot \sin \theta^*}{\Delta Z - R^* \cdot (1 - \cos \theta^*)}$$

領域2: $S_2(X) = \frac{R}{a} \cdot \sqrt{a^2 - (1 - X^*)^2} - Z_j, \quad a^2 = \frac{(R \cdot R^* \cdot \sin \theta^*)^2}{R^2 - R^{*2} \cdot \cos \theta^{*2}} \quad (3)式$

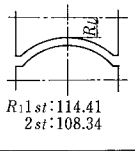
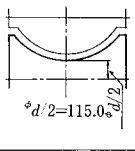
X^* : 接触開始点の X 座標

R : ロールプロフィール上G点におけるロール半径

a : 点E, H間の距離

図4 ロールとの接触を考慮した解析モデル

表 1 実験および解析条件

| | 実験条件 | 解析条件 |
|------------|---|--|
| 1. 素板寸法 | 3.0'×180 | 3.0'×180 |
| 2. 曲げ方式 | Circ. B | Circ. B |
| 3. スタンド段数 | 3 ^{st.} | 2 ^{st.} |
| 4. 曲げ角度 | 30°, 60°, 90° | 30°, 60° |
| 5. スタンドピッチ | 400 mm | 400 mm |
| 6. パスライン | Neutral const. | Bottom line const. |
| 7. 成形速度 | 30 m/min | 40 m/min |
| 8. 素板特性 | SS41 | $E : 21,000 \text{ kg/mm}^2$ $H : 80 \text{ kg/mm}^2$ $\nu : 0.3$ $\sigma_e : 31.5 \text{ kg/mm}^2$ |
| 9. ロール形状 |  |  |

に起因する。しかし、縁部での L^* は、実測値と比較して #1, #2 ロールともほぼ良い対応を示した。

図 7 に長手方向膜ひずみ (以下 (ϵ_{x0}) と称す) の推移を示す。実験では、素板の縁から 10 mm の位置に深さ 0.2 mm の浅い溝を掘りひずみゲージを埋め込むことにより、連続的にひずみを測定する方法を用いている。解析対象とした位置は、縁 ($j=7$) と縁から 15 mm ($j=6$) の点である。スタンド間における長手方向膜をひずみの最大値 (以下 $(\epsilon_{x0})_{\max}$ と称す) の発生点が、実測値の方がロール近傍にあり、解析値との相違が見られるものの $(\epsilon_{x0})_{\max}$ の値や成形に伴い素板が長手方向に伸ばされることなど、 (ϵ_{x0}) の挙動からみた重要な点は良い対応を示している。また、この結果より幅方向にみた (ϵ_{x0}) の分布を見ると、素板縁部近傍では、 (ϵ_{x0}) が急激に増加することがわかる。

以上より、本解析法は、素板に対するロール拘束の影響を考慮した解析モデルとして有効であると思われる。

4.2 モデル 1 との比較

本解析法 (モデル 2) とモデル 1 との関係を確認するため、両者の比較を行った。図 8 に (ϵ_{x0}) の推移に関する比較を示す。モデル 2 による縁部での $(\epsilon_{x0})_{\max}$ の値は、モデル 1 に比べ 30~40% 高くなっている。この場合の形状関数の制御パラメータ N (モデル 2) および n (モデル 1) を比べると、モデル 2 のほうが縁部に近づくに

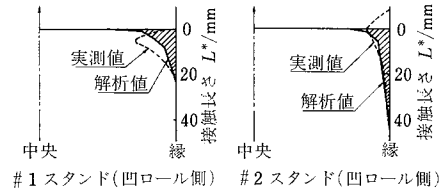


図 6 実験と解析との接触長さの比較

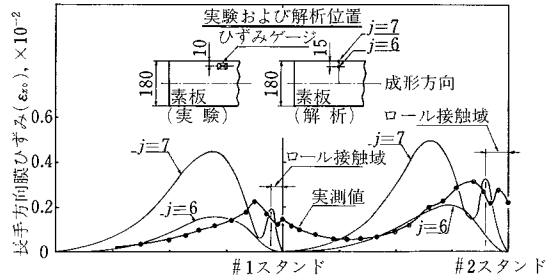


図 7 長手方向膜ひずみにおける実測値と解析値の比較

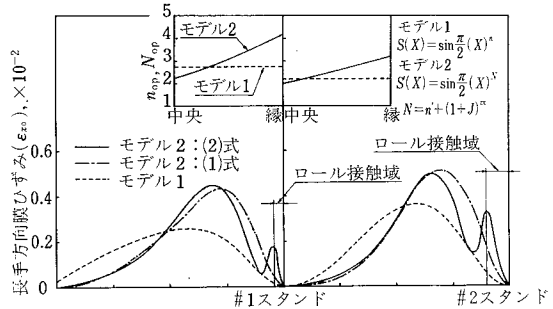


図 8 解析方法の違いによる長手方向膜ひずみの推移

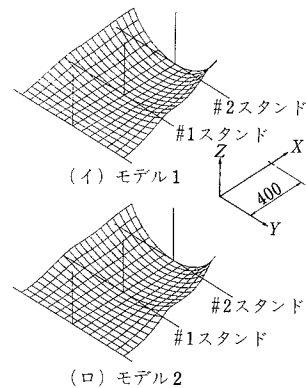


図 9 解析方法の違いによる変形曲面形状

つれ大きく、ロール直前で素板の縁部が急に立ち上がる傾向を強く表していることがわかる。これは、凹ロールによる拘束が的確に考慮された結果であると考えられるが、このようすを明確にするため、図 9 にモデル 1、モデル 2 の変形曲面形状を示した。

研究速報

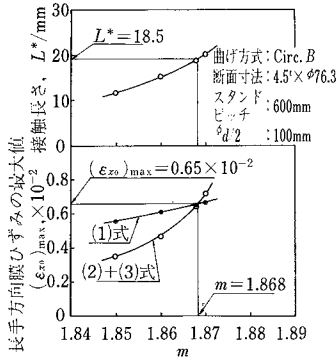


図10 mの決定法

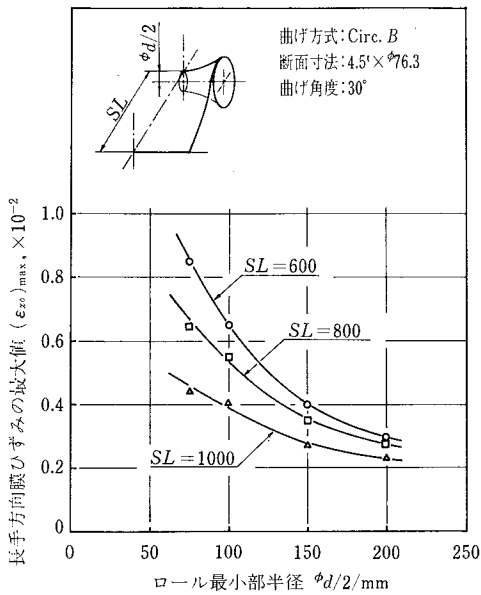


図12 スタンドピッチの違いによるロール径と長手方向膜ひずみの関係

5. 計算結果

本解析法により、ロール径が素板内に発生する $(\epsilon_{xo})_{max}$ に与える影響について検討した結果を以下に示す。断面寸法は $4.5' \times \phi 76.3$ 、スタンドピッチは 600, 800, 1,000 mm とし、他の条件は表 1 の解析条件に準じた。なお、(1)式における m の決定は、図 2 に示す計算フローにおいて、凹ロールとの接触を求めるときの変形曲面形状と、接触を考慮した最終的な変形曲面形状とは本来同一であるべきであるという観点から、(1)式または(2), (3)式による変形曲面形状より算出した $(\epsilon_{xo})_{max}$ を評価基準として、図 10 に示す $(\epsilon_{xo})_{max}$ が等しくなるよ

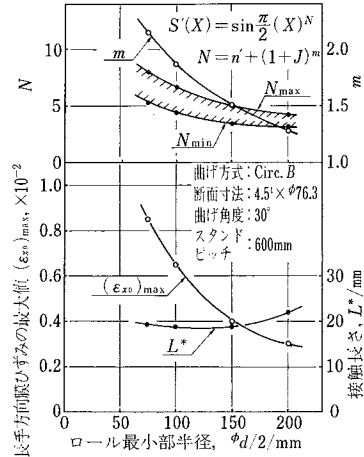


図11 ロール径と長手方向膜ひずみ・接触長さとの関係

うに m の値を選択した。

図11に、入口ガイドからの距離が600mmの場合の#1 スタンドにおけるロール径と $(\epsilon_{xo})_{max}$, L^* の関係を示す。 $(\epsilon_{xo})_{max}$ はロール径の増大により急激に減少することがわかる。しかし、 L^* はロール径が小さくなるやや増加する傾向にある。つまり、ロール径が小さくなるほど(1)式のパラメータ N の値は大きく、素板はロール直前での立ち上がりが急になり、ロールに巻きついた状態にて成形される傾向が強くなる。また、この結果として $(\epsilon_{xo})_{max}$ が増加すると考えられる。

図 12 に、同様に入口ガイド～#1ロール間の距離を、600, 800, 1,000 mm と変化させたときの#1ロール径と $(\epsilon_{xo})_{max}$ の関係を示す。ロール径、入口ガイドからの距離が増加するほど、 $(\epsilon_{xo})_{max}$ が減少し、ある一定値に近づくことがわかる。この結果は、実生産ラインで生じる現象をよく説明している。

6. おわりに

本研究で開発を進めているシミュレータの応用として、ロール径が素板の変動に与える影響について基礎的な検討を行った。解析結果は、実験とほぼ一致し、解析モデルの有効性を示した。今後は、曲げ方式・製品サイズ等に関して解析範囲の拡大を図り、系統的にロール径の影響を検討していく予定である。

(1986年3月25日受理)

参考文献

- 1) 木内・佐藤：昭60 塑加春講演集 511
- 2) 木内・高田橋・江藤：昭57 塑加春講演集 683
- 3) 鈴木・木内ら：塑性と加工, 11-110, (1970), 202
- 4) 鈴木・木内ら：塑性と加工, 11-112, (1970), 315