

非鉄金属の電縫管の成形シミュレーション

Simulation of Electric Welded Pipes of Non-Ferrous Materials

木内 学*・張 海洲*・新谷 賢*

Manabu KIUCHI, Haizhou ZHANG and Ken SHINTANI

1. ま え が き

筆者らは、ロールフォーミングシミュレーターを開発し、これを用いて軟鋼、ステンレス鋼の電縫管の成形について、様々な条件の下での素板の変形挙動、特に縁伸びの挙動について系統的な検討を行い、実際の生産現場に有用な多くの指針を与えてきた^{1)~4)}。近年、非鉄金属材料のアルミニウム (Al)、銅 (Cu) 及びチタニウム (Ti) の電縫管は生産量が急激に増大しつつあるが、その成形時の素板の変形特性についてはまだ不明な点が多い。そこで本研究では Al、Cu 及び Ti の電縫管の成形について一連のシミュレーションを行い、主として素板縁部に発生する長手方向膜ひずみの最大値の平均値 $\overline{(Ex_0)_{max}}$ に与える管外径 D と板厚 t およびスタンド間距離 SL の影響について、検討した結果を報告する。

2. 解 析 手 法

解析手法は既報¹⁾の通りであるが、ここでその基本的な考え方を述べる。

図1のように、素板の板厚方向中央(中立)面が各スタンド間で呈する3次元の曲面形状を形状関数 $S(X)$ を導入して次式で表す。

$$\begin{cases} X = X \\ Y = Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot S(X) \\ Z = Z_1 + (Z_2 - Z_1) \cdot S(X) \end{cases} \quad (1)$$

形状関数 $S(X)$ とは、素板の一点 P が #i スタンドのロールプロファイルの点 $P_i(X_1, Y_1, Z_1)$ から #i+1 スタンドのロールプロファイルの点 $P_{i+1}(X_2, Y_2, Z_2)$ 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。

*東京大学生産技術研究所 第2部

ここでは、次のような関数を使う。

$$S(X) = \sin \left\{ \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \left(\frac{X}{SL} \right)^n \right\} \quad (2)$$

SL: スタンド間距離

形状関数 $S(X)$ に含まれるパラメータ n が大きい場合、素板各部の流線は #i+1 スタンドの直前で急激な変位を起し、n が小さい場合には変位がゆるやかになる。n の値の決定には、エネルギー法を適用し、素板の全変形仕事率が最小となるように決める。

成形前の素板に、長手 (X) 方向に ΔX_0 の長さを有し、幅方向に帯状をなす要素を考え、成形過程において、この帯状要素が仮定した変形曲面に沿って成形されていく過程を考える。その際、(1) この要素の横断面の各点は成形中常に同一平面内にあり、その平面は X 軸に垂直である、(2) この帯状要素に発生する長手方向応力は、長手方向の力の釣合条件を満足する、と考える。計算手順としては、仮定した n の値に対応する曲面に沿って帯状要素が成形

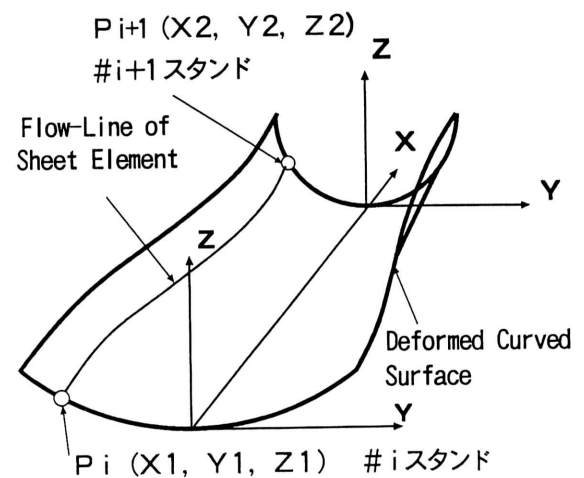


図1 形状関数 $S(X)$ の定義

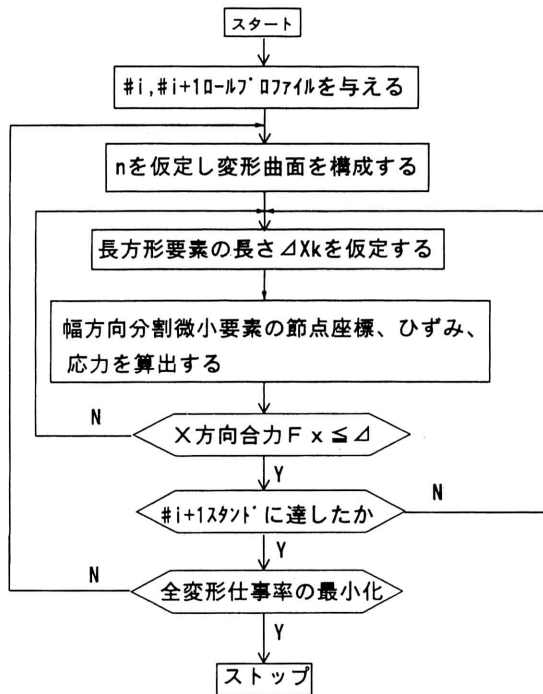


図 2 全体的な計算フロー

されていくとし、帯状要素を幅方向に分割して得られる各微小要素について、ひずみ増分、応力増分を次々と計算し加えることにより、スタンド間の各段階で素板各部に発生するひずみと応力の分布ならびにその推移を求める。更に、これらのひずみ分布、応力分布より、素板の変形に要する全変形仕事率 \dot{W} を算出する。

全体のフローを図 2 に示す。与えられた各スタンドのロールプロファイルに対して、各スタンド間でパラメータ n の初期値を与え、変形曲面形状を構成し、この曲面に沿って各微小要素に発生するひずみ成分と、応力成分を、長手方向合力の釣合条件を満足しながら計算して、求めたひずみ増分及び応力により、スタンド間での素板の全変形仕事率 \dot{W} を求め、 n の値を変化させて同様の計算を繰り返し、 \dot{W} を最小ならしめるパラメータの最適値の n_{opt} を決定し、その時の変形曲面形状、ひずみ分布、応力分布を実際の成形時の近似値とする。

具体的な計算方法は省略する。

3. 計算条件

図 3 に計算に用いた製品断面寸法を示す。他の計算条件は表 1 に示す。

4. 計算結果及び考察

4.1 スタンド間距離 SL が $(Ex_0)_{max}$ に与える影響

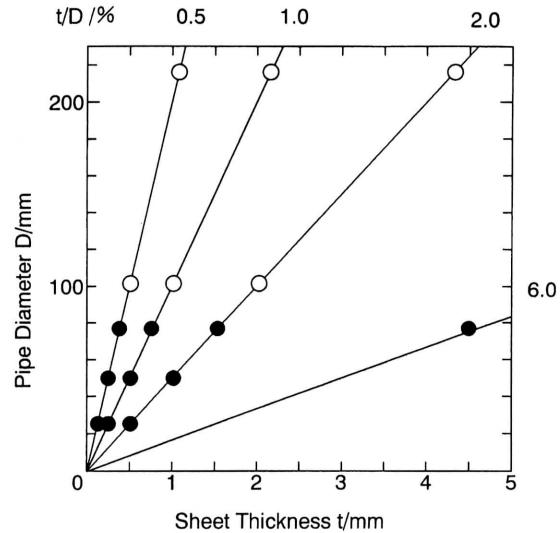


図 3 製品断面寸法

表 1 計算条件

1. Sheet Properties	Al: E=71000 N/mm ² H=376 N/mm ² $\alpha=26$ N/mm ² $\nu=0.33$						
	Cu: E=110000 N/mm ² H=930 N/mm ² $\alpha=60$ N/mm ² $\nu=0.364$						
		Ti: E=120000 N/mm ² H=1300 N/mm ² $\alpha=500$ N/mm ² $\nu=0.30$					
2. Bending Method	Circular Bending						
3. Number of Stands	6						
4. Inter-Stand Distance	Changeable						
5. Forming Speed	500mm/s						
6. Pass Line	Bottom Constant						
7. Shape Function	$S(X) = \sin((\pi/2) \cdot X)$						
8. Bending Angle and Bending Radius	St. No.	1	2	3	4	5	6
	θ	25	53	81	109	137	165
	R (D25.4)	91.4	43.1	28.2	21.0	16.7	13.91
	R (D50.0)	180.0	84.9	55.6	41.3	32.9	27.3
	R (D76.3)	274.7	129.6	84.8	63.0	50.1	41.6

図 4 に、各スタンド間で素板の縁部に発生する長手方向の $(Ex_0)_{max}$ とスタンド間距離 SL の関係を表す。この結果より、次のことが分かる。①各場合とも SL が增大すると、 $(Ex_0)_{max}$ が減少する。但し、この SL の効果は Al, Cu 管の場合よりも、Ti 管の場合の方が急速に飽和する傾向がある。②SL の変化に応じて各材質に発生する膜ひずみの大小関係は変化し、

(1) $SL/D < 4 \sim 5$ の時

$$Al > Cu > Ti$$

(2) $SL/D > 4 \sim 5$ の時

$$Al < Cu < Ti$$

の関係がみられる。

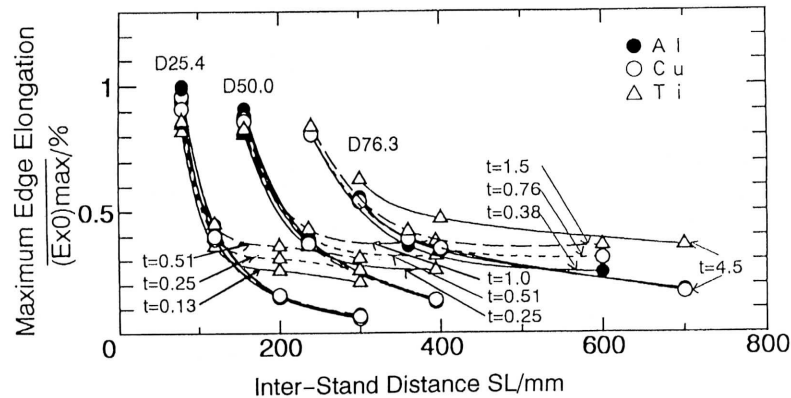


図 4 スタンド間距離 SL と $(Ex0)_{max}$ の関係

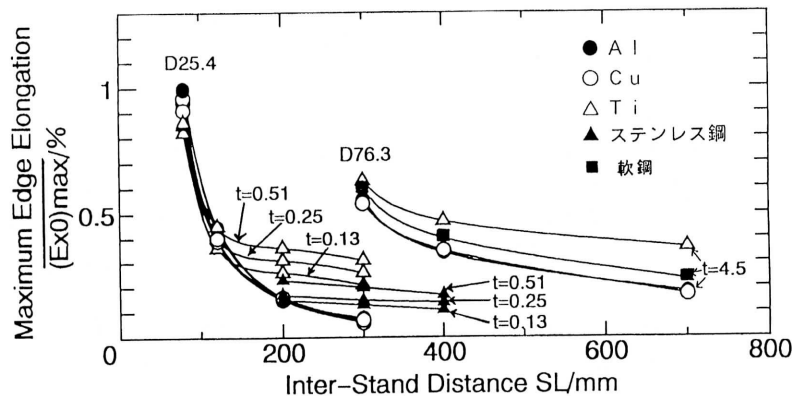


図 5 非鉄金属と軟鋼, ステンレス鋼の比較

重要な結果として以下の点が指摘できる。すなわち、 SL/D が一定の値 $(SL/D)^*$ より小さい場合に $(Ex0)_{max}$ が急激に増大する。本例で $(SL/D)^*$ は 5.5~7.0 の範囲であり、管外径 D が小さいほど $(SL/D)^*$ が小さくなる傾向がある。

4.2 軟鋼及びステンレス鋼との計算結果の比較

図 5 に本研究で計算した Al, Cu および Ti 管に関する結果と過去に筆者らが行った軟鋼, ステンレス鋼管に関する計算結果との比較を示す。これによって成形条件が同一の場合、軟鋼およびステンレス鋼管の成形時に発生する $(Ex0)_{max}$ のレベルは Ti 管と Al, Cu 管の場合の $(Ex0)_{max}$ の中間値であるということが分かる。

4.3 板厚 t が $(Ex0)_{max}$ に与える影響

図 6 にスタンド間距離 SL と管外径 D を固定して整理した $(Ex0)_{max}$ と板厚 t との関係を示す。これにより、Al, Cu 管の場合の $(Ex0)_{max}$ がほとんど t とは関係がないこと、Ti 管の場合には、 t が増大すれば $(Ex0)_{max}$ も増大すること、などが分かる。

4.4 $(Ex0)_{max}$ を一定とする管外径 D とスタンド間距離 SL との関係

図 7 に $(Ex0)_{max}$ を一定とする管外径 D とスタンド間距離 SL との関係を表す。

これにより、同じサイズの管を成形する時、長手方向膜ひずみの最大値の平均値 $(Ex0)_{max}$ を一定の値以下に抑えるためには、Al, Cu 管の場合より、Ti 管の場合の方が SL を大きくする必要があること、そして、SL の変更により $(Ex0)_{max}$ を制御するのは Al, Cu 管の場合より、Ti 管の場合が難しいと思われること、などが分かる。すなわち Ti 管の場合は、 $(Ex0)_{max}$ を少し変化させようとする際に、例えば $(Ex0)_{max}$ を 0.3% から 0.2% へ変化させようとする場合、 D の変化に対して SL を大きく変化させることが必要であることが分かる。また、一定の加工条件下すなわち一定の SL の条件下では、Al, Cu 管の場合より Ti 管の場合の方が、縁伸びをある一定以下に制御し得る D の範囲が小さいといえる。

4.5 Ti 管の管外径 D と板厚 t の関係

研究速報

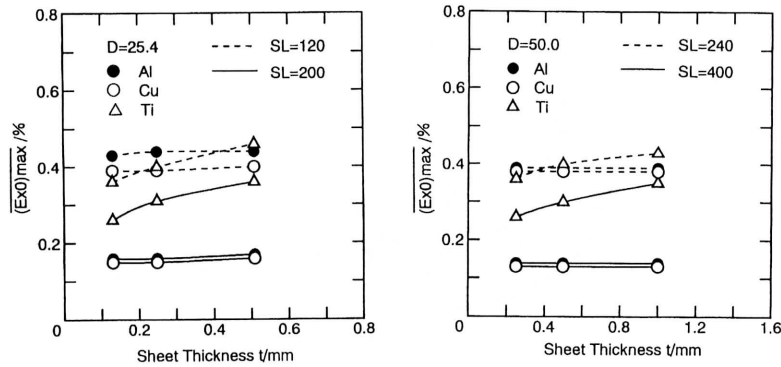


図6 (Ex0)max と板厚 t の関係

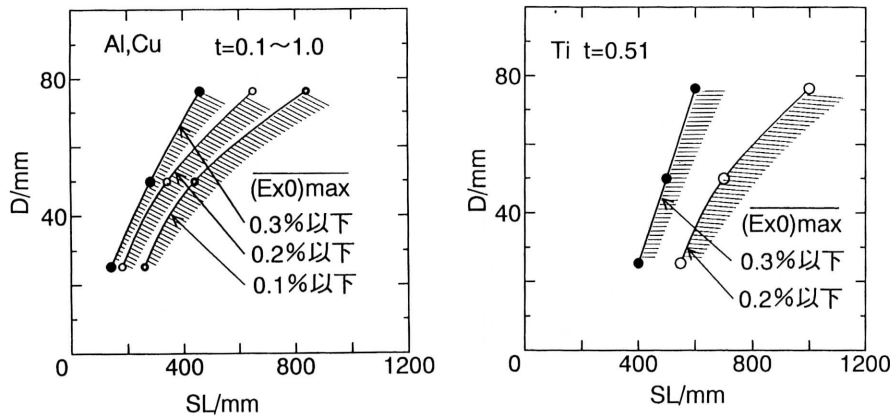


図7 管外径 D とスタンド間距離 SL の関係

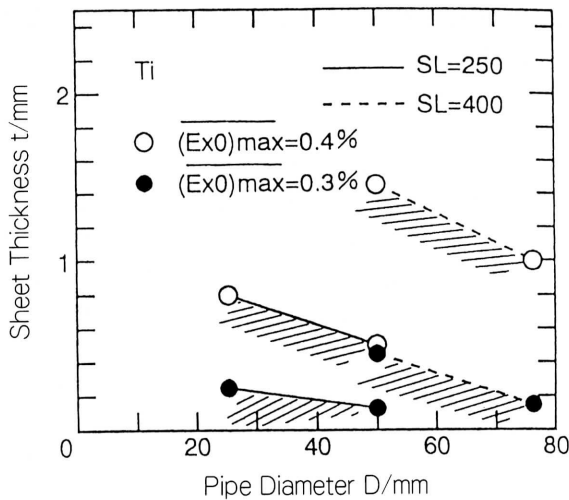


図8 管外径 D と板厚 t の関係

図8にTi管の成形についてスタンド間距離SLと(Ex0)maxを一定とする管外径Dと板厚tとの関係を示す。図の斜線部はこの加工条件の許容され得る製品寸法範囲を

表す。

5. ま と め

本研究では、ロールフォーミングシミュレータを利用して、非鉄金属、特にAl、Cu及びTiの三種の材料の電縫管の成形について一連の数値実験を行い、長手方向膜ひずみの最大値の平均値(Ex0)maxに及ぼすスタンド間距離SL、管外径D及び板厚tの影響を検討した。これらの数値実験を通して、実際の生産に有用な幾つかの知見を得ることが出来た。これらは、今後の非鉄金属の電縫管の生産に貴重な指針となると考えられる。

(1995年3月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学：塑性と加工, 12-120(1971), 352.
- 2) 木内 学・佐藤忠之：生産研究, 37-1(1985), 11.
- 3) 木内 学・高田橋俊夫：塑性と加工, 27-306(1986), 874.
- 4) 木内 学・花 江・新谷 賢：平5春塑加講論, (1993), 831.