

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12報) ——解析モデルの拡張 (その2) ——

Study of Computational Simulation Method of Cold-Roll-Forming Process-12th Report

木内 学*・千葉 和裕*
Manabu KIUCHI and Kazuhiro CHIBA

1. はじめに

筆者らは、ロールフォーミングの成形過程で発生する素板の変形挙動、ならびに各部のひずみ履歴・応力分布等を、総合的に解析することを可能とするロールフォーミング汎用シミュレータの開発を行っている。

前報¹⁾より、このシミュレータの機能の拡張を図るため、素板面内のせん断変形をも考慮した解析モデルについて検討を進めている。この様な解析モデルの拡張により、解析精度の向上、および面内せん断ひずみの影響を無視できない広幅断面の成形過程の解析等、適用範囲の拡大を目指している。

本報では、拡張したモデルにより、面内せん断ひずみ成分と、幅方向応力の釣合いを考慮した解析を行い、実際の成形過程で生じる素板の変形曲面形状、素板各部の応力・ひずみ履歴などに関し、従来以上に妥当と思われる結果を得たので報告する。

2. 主な使用記号

- (X, Y, Z) : 空間固定の座標
- (x, y, z) : 素板の板厚中央面に固定の座標
- $\epsilon_{x0} \cdot \sigma_x$: 長手方向膜ひずみ, 長手方向応力
- $\epsilon_{y0} \cdot \sigma_y$: 幅方向膜ひずみ, 幅方向応力
- $\gamma_{xy} \cdot \tau_{xy}$: 面内せん断ひずみ, せん断応力

3. 拡張モデルの概要

拡張解析モデルの基本的考え方は以下のとおりである。

1) 素板面内のせん断ひずみ, せん断応力を考慮する。面内せん断ひずみの定義は前報と同じである。また, その値は細分割要素内では一様とする。

2) 細分割要素に発生する長手方向膜ひずみは, 長手方向全体の力の釣合い条件より決定され, 幅方向膜ひずみは, 細分割要素に作用する幅方向の力の釣合い条件より決定されるものとする。図1に示すように, 細分割要素

には, 長手方向応力, 幅方向応力, および面内せん断応力が作用する。それらの応力の合力として生じる幅方向の力が釣合うように幅方向膜ひずみを決定する。

3) $j = 1$ の要素では $(\sigma_y)_{k,0}$ の値が未知であるが, この値は, 素板縁部の境界条件より定める。すなわち, まず, $(\sigma_y)_{k,0}$ の値を仮定し, $j = 1$ の細分割要素から計算を始め, 素材縁部まで各細分割要素について順次幅方向膜ひずみの算出を行う。素材縁部は自由端であり, 幅方向応力 $(\sigma_y)_{k,j-1}$ が 0 でなければならないが, この条件が満足されなければ, $j = 1$ の要素に戻り, $(\sigma_y)_{k,0}$ の値を仮定し直して, 計算をやり直す。この操作を, 縁部の条件が満足されるまで繰り返す。

4) 弾性変形過程と塑性変形過程においてそれぞれ以下の式より板厚方向ひずみを算出する。

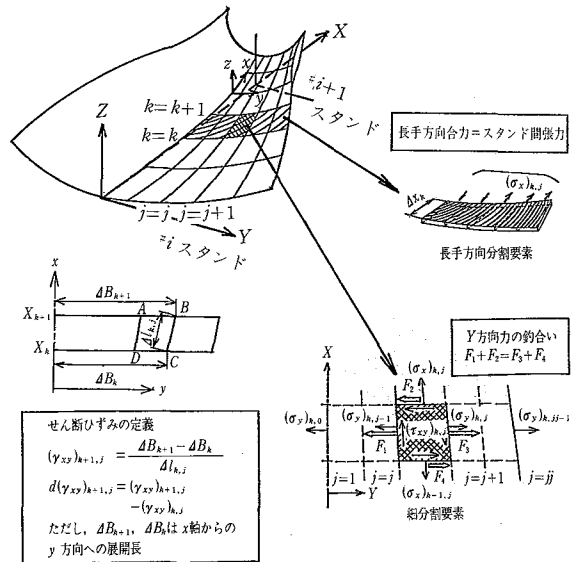


図1 細分割要素内での力の釣合い (模式図)

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

弾性変形過程：

$$d(\epsilon_x)^e = -\frac{\nu}{1-\nu} (d(\epsilon_x)^e + d(\epsilon_y)^e) \quad (1)$$

塑性変形過程：

$$d(\epsilon_x)^p = - (d(\epsilon_x)^p + d(\epsilon_y)^p) \quad (2)$$

その他の計算手法は既報²⁾に準じる。拡張した解析モデル全体の計算の流れを図2に示す。

4. 解析結果および考案

4-1 電縫管成形の解析例

拡張した解析モデルを電縫管成形のシミュレーション

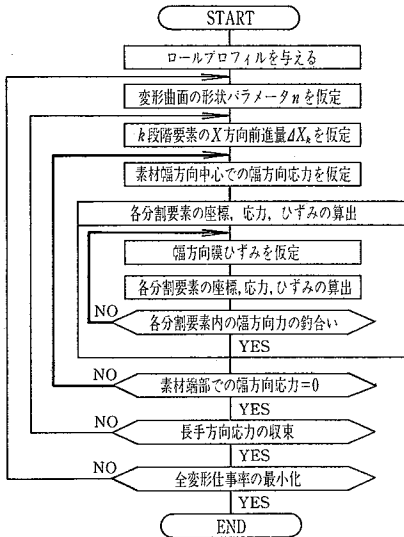


図2 全体的な計算のフローチャート

に適用した結果を示す。4.5×φ76.3の電縫管の成形を、センターバンド方式およびサーキュラーバンド方式の二つの曲げ方式で行う場合について検討する。表1に計算条件を、図3に解析によって得られた変形曲面形状を示す。

図4に、センターバンド方式の場合の、入口ガイド～#2スタンド間での(ε_{x0}), (ε_{y0}), (γ_{xy})の推移を示す。(ε_{x0}), (ε_{y0})に関しては、比較のために旧モデル²⁾による解析結果についても示す。

(ε_{x0})については、拡張モデルと旧モデルとによる解析結果にはほとんど差がない。一方、(ε_{y0})についてみると両モデルによる解析結果の間の差が大きい。すなわち、拡張モデルによる結果をみると、円弧曲げを受ける部分で、(ε_{y0})の増加が認めらる。

表1 電縫管の計算条件

1. 製品断面寸法	4.5×φ76.3	
2. 素板寸法	110mm	
3. 曲げ方式	a. センターバンド方式 b. サーキュラーバンド方式	
4. スタンド段数	2 段	
5. スタンド間距離	500mm	
6. 曲げ角度	#1	#2
	30°	60°
7. パスライン	Bottomline-Const.	
8. 成形速度	40m/min	
9. 素材特性	ヤング率 : E = 21000kgf/mm ² 加工硬化係数 : H = 80.0kgf/mm ² 初期降伏応力 : σ ₀ = 31.5kgf/mm ² ポアソン比 : ν = 0.3	
10. 要素分割数	10(長手方向)×12(幅方向)×10(板厚方向)	

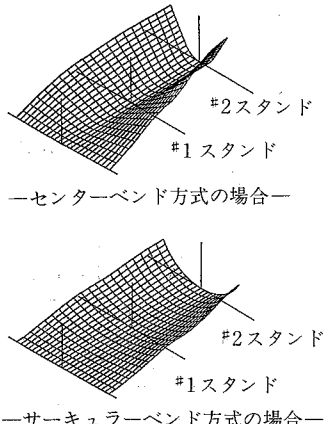


図3 電縫管成形における変形曲面形状

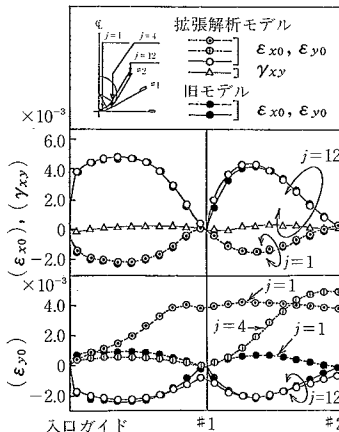


図4 電縫管成形における(ε_{x0}), (ε_{y0}), (γ_{xy})の推移
—センターバンド方式の場合—

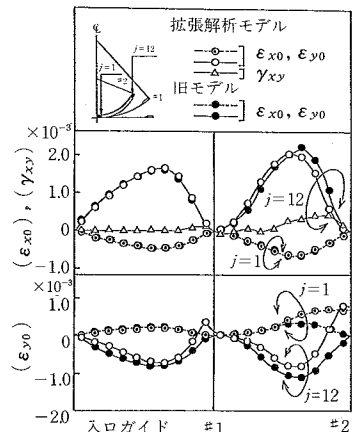


図5 電縫管成形における(ε_{x0}), (ε_{y0}), (γ_{xy})の推移
—サーキュラーバンド方式の場合—

旧解析モデルにおいては、幅方向・長手方向の膜ひずみ増分 ($d\epsilon_{y0}$) と ($d\epsilon_{x0}$) との比が一定であると仮定していたが、拡張解析モデルにおいては、($d\epsilon_{y0}$) を細分割要素に作用する幅方向合力の釣合い条件より求めている。このために $j=1$ における (ϵ_{y0}) の推移にも見られるように、長手方向の膜ひずみ ($d\epsilon_{x0}$) の挙動や長手方向の釣合条件とは直接的には結び付けない形で、応力-ひずみ関係式と細分割要素の釣合条件とから (ϵ_{y0}) を求めることができ、また、成形中に発生する ($d\epsilon_{y0}$) の累積を考慮することにより、巨視的にみた素板の幅広がりなどを評価しつつ解析を進めることができる。

また、本図より、センターバンド方式における (γ_{xy}) は、(ϵ_{x0}) および (ϵ_{y0}) と比べて非常に小さいこともわかる。

図 5 に、サーキュラーバンド方式の場合の (ϵ_{x0})、(ϵ_{y0})、(γ_{xy}) の推移を示す。(ϵ_{y0}) に関しては、旧モデルによる結果と、拡張モデルによる結果との差異が認められる。これは、拡張モデルが、センターバンド方式の場合と同様、成形の進行に伴う円弧曲げの増加によって、幅方向に伸びひずみが発生する、すなわち (ϵ_{y0}) も増加することを表していることと対応している。ただし、本解析の範囲では、サーキュラーバンド方式のほうがセンターバンド方式に比べると、加えられる円弧曲げが小さく、そのことが (ϵ_{y0}) の絶対値の差となっている。

図 6 にセンターバンド方式の場合の、入口ガイド～#1 スタンド間で、素板各部に発生した ($d\epsilon_{x0}$) と ($d\epsilon_{y0}$) との対応関係を示す。旧モデルにおいては、

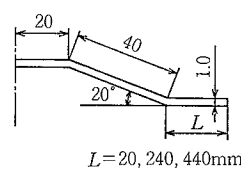
$$\lambda = -\frac{(d\epsilon_{y0})}{(d\epsilon_{x0})} = 0.5 \quad (3)$$

と仮定していたが、図から、 $j=4\sim 12$ の幅方向各位置に

おいては、ほぼ $\lambda=0.3$ であり、平面応力状態下の弾性変形に対応する膜ひずみの関係が成立している。すなわち、これらの位置では、主として、長手方向からの単純引張りを受ける弾性変形が発生していると考えられる。一方、 $j=1$ の位置、すなわち、素板中央では、($d\epsilon_{y0}$) が、ロール入側近傍の 1 点を除いてすべて正であり、素板中央で幅方向伸びが発生することがわかる。

図 7 にサーキュラーバンド方式の場合の、同様な ($d\epsilon_{x0}$) と ($d\epsilon_{y0}$) との関係を示す。 $j=1\sim 9$ までの位置で、 $\lambda=0.5$ となっており、これらの位置での変形は、長手方向に単純引張りの塑性変形が加えられた場合に相当

表 2 広幅断面の計算条件

1. 製品断面寸法	
2. 素材寸法	160, 600, 1000mm
3. 曲げ方式	曲げ弧長一定方式
4. スタンド段数	1 段
5. スタンド間距離	300mm (入口ガイド～#1 スタンド)
6. 曲げ角度	20°
7. パスライン	$a=0.045$ (ボトムライン一定), $a=0.030$
8. 成形速度	40m/min
9. 素材特性	(1) Al-H ヤング率 : $E=7200 \text{ kgf/mm}^2$ 加工硬化係数 : $H: 24.0 \text{ kgf/mm}^2$ 初期降伏応力 : $\sigma_0 = 15.0 \text{ kgf/mm}^2$ ポアソン比 : $\nu = 0.3$ (2) SPCE ㊦ ヤング率 : $E=21000 \text{ kgf/mm}^2$ 加工硬化係数 : $H: 140.0 \text{ kgf/mm}^2$ 初期降伏応力 : $\sigma_0 = 18.5 \text{ kgf/mm}^2$ ポアソン比 : $\nu = 0.3$
10. 要素分割数	10(長手方向) × 任意(幅方向) × 10(板厚方向)

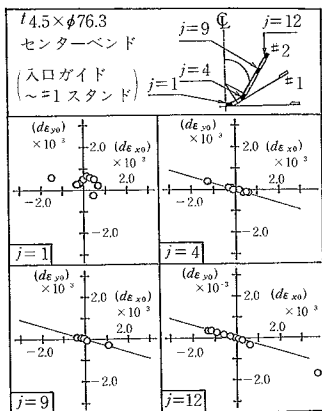


図 6 ($d\epsilon_{x0}$) と ($d\epsilon_{y0}$) との関係
—センターバンド方式の場合—

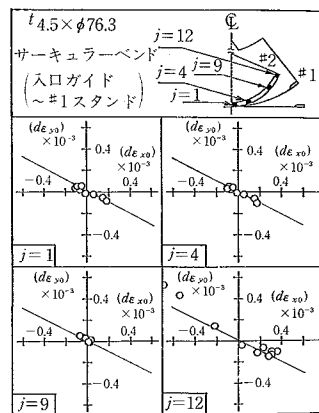


図 7 ($d\epsilon_{x0}$) と ($d\epsilon_{y0}$) との関係
—サーキュラーバンド方式の場合—

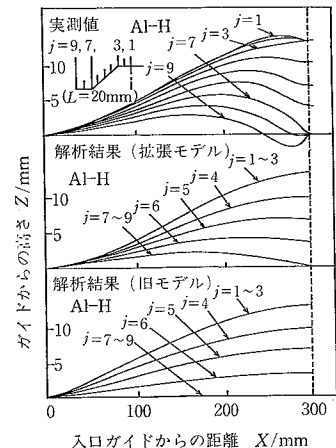


図 8 変形曲面形状 (X-Z座標)
の実測値と解析結果

研 究 速 報

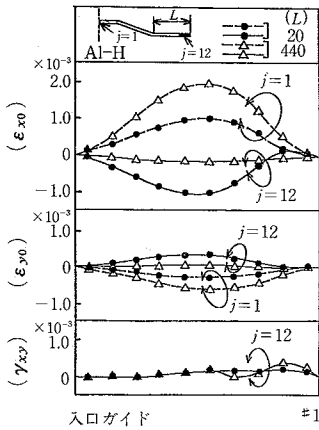


図9 広幅断面成形における (ϵ_{x0}) , (ϵ_{y0}) , (γ_{xy}) の推移

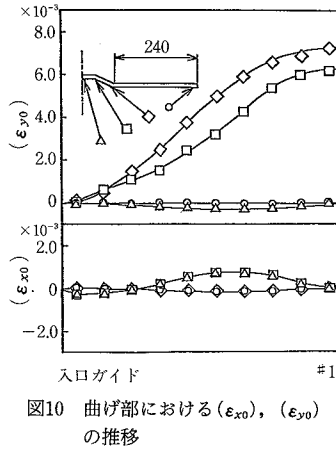


図10 曲げ部における (ϵ_{x0}) , (ϵ_{y0}) の推移

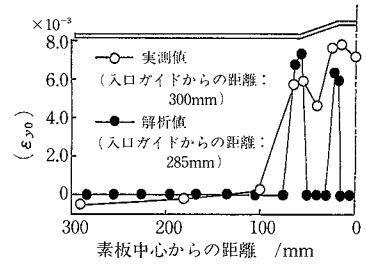


図11 ロール直下近傍における (ϵ_{y0}) の幅方向分布

している。これらの位置においては、加えられる幅方向曲げひずみにより、素板外表面が塑性変形域に入っている。しかしながら各細分割要素では、 (ϵ_{x0}) がかなり大きく、面内塑性変形の主たる成分となっていることがわかる。

4-2 広幅断面成形の解析例

次に、本拡張解析モデルを、広幅断面材の成形シミュレーションに適用した結果を示す。計算条件を表2に示す。旧モデルでは、実測⁹⁾によって得られた素板の変形曲面形状、特に、素板の一部が他の部分により垂直方向に引き上げられる現象を表現できないという問題点が指摘された⁹⁾。拡張解析モデルでは、素板の変形曲面形状を的確に表示するため、2つのパラメータを用いて、この問題に対処できるようにしてある。図8に示した拡張モデルによる解析結果は、上記の2つの形状パラメータを最適化して得られた形状である。

図9に、広幅断面の平坦部長さを変化させた場合に、素板各部に発生する (ϵ_{x0}) , (ϵ_{y0}) , (γ_{xy}) の推移を示す。これらのひずみの挙動は実測値⁹⁾とよく一致する。一般に、平坦部長さの増大により、ウェブ部に作用する幅方向張力が増大するために、ウェブ部に発生する (ϵ_{x0}) , (ϵ_{y0}) の絶対値が増加する。一方、平坦部長さの増加に伴う平坦部の剛性の相対的な増加により、平坦部の変形は曲げ部あるいはフランジ部からの影響を受けにくくなり、そこに発生する (ϵ_{x0}) , (ϵ_{y0}) の絶対値が減少する。

図10に、SPCE焼鈍材を成形した場合について、曲げ部を含む素板各部に発生する (ϵ_{x0}) , (ϵ_{y0}) の推移を示す。 (ϵ_{y0}) に関しては、両曲げ部において大きな伸びが見られる。このような曲げ部における局所的な幅方向への伸びは、板厚の減少を伴い、プレート類等の広幅製品の発生

産では品質上の大きな問題となることがある。拡張した解析モデルは、この例でもわかるように、曲げ部における局所的な幅方向への伸びを予測し、板厚の減少量を推定することもできる。

図11に、図10で説明した解析結果より得られたロール直下近傍における (ϵ_{y0}) の幅方向分布を示す。ロール直下における (ϵ_{y0}) の実測値⁹⁾との比較により、曲げ部に生じる (ϵ_{y0}) についてほぼ妥当な結果が得られていると言える。なお、実測値のほうは、ウェブ部からフランジ部にかけて全体的に幅方向に大きな伸びが生じているが、これは、 r 値が大というSPCE焼鈍材の特性の影響が強く現れた結果である。

5. ま と め

ロールフォーミング汎用シミュレータの開発研究の一環として、これまで使われてきた解析モデルの拡張を試みた。拡張モデルを用いて、電線管成形、広幅断面成形の解析を行った結果、実際の変形により近い解析結果を得ることができた。

今後、本拡張モデルにより、広幅断面材の成形時に特に問題となるウェブ部およびフランジ部でのポケットウェーブの発生原因となる膜ひずみの挙動や、幅寄せ量に関する体系的な研究を行う予定である。

(1988年5月16日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・元木：昭62春塑加講論
- 2) 木内・高田橋：塑性と加工, 27-306 (1986), 874
- 3) 鈴木・木内ほか：塑性と加工, 11-112 (1970), 315
- 4) 鈴木・木内ほか：塑性と加工, 15-162 (1974), 574
- 5) 木内・高田橋：塑性と加工, 27-308 (1986), 1091
- 6) 鈴木・木内ほか：塑性と加工, 18-194 (1977), 172
- 7) 鈴木・木内ほか：塑性と加工, 18-196 (1977), 365