

# 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(2) ——C形鋼・ハット形鋼の解析——

Study of Computational Simulation Method of Cold Roll Forming Process (2nd Report)

木 内 学\*・高田橋 俊夫\*  
Manabu KIUCHI and Toshio KOUABASHI

## 1. ま え が き

筆者らは、ロールフォーミング加工におけるロールプロフィールの設計を合理的に行うべく、任意の製品断面の成形過程において素材に作用する応力・歪みの分布を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。<sup>1)</sup> 前報では、スタンド間で素材が呈する三次元的な変形曲面形状のモデル化と解析手法を示し、電縫管についての具体的な数値計算を行い、この手法の有効性を示した。本報では、形鋼のなかでも代表的な製品断面形状である C 形鋼、ハット形鋼の近似解析を行っ

たので以下にその結果を報告する。

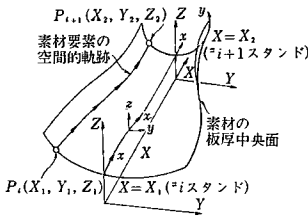
## 2. 解 析 手 法

ここでは、前報で報告した近似解析手法の概要を示すにとどめる。詳細については、前報を参照されたい。

### 2.1 解析手法の特徴

(形式関数の導入)変形曲面形状を関数近似するものとして(1)式のような最適化パラメータ  $n$  を含む形状関数  $S(\dot{X})$  を導入する。

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



- (1) Y座標に適用する場合  
変形曲面上の座標  $Y = Y_i + (Y_2 - Y_1) \cdot S(X)$
- (2) Z座標に適用する場合  
変形曲面上の座標  $Z = Z_i + (Z_2 - Z_1) \cdot S(X)$

図1 形状関数  $S(X)$  の定義

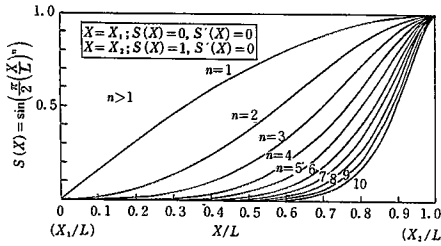
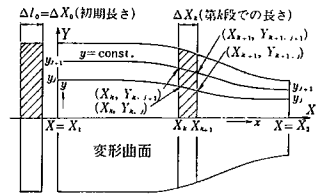


図2 形状関数  $S(X)$  の計算例



変形の形態を規定する拘束条件  
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り、その平面はX軸に垂直である

力学的拘束条件  
1) 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

図3 変形曲面に沿う微小要素の変形過程の追跡

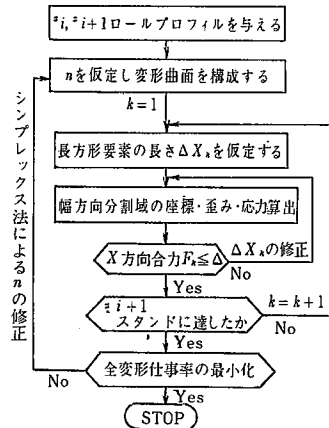


図4 全体的な計算のフロー

表1 C形鋼の計算条件

成形サイズ	100×50×20×t 3.2 (素板3.2×t 219.0)
素材の応力・歪み・特性	ヤング率 $E=21000\text{kg/mm}^2$ , 加工硬化係数 $H=80\text{kg/mm}^2$ , 初期降伏応力 $\sigma_0=31.5\text{kg/mm}^2$
成形条件	スタンド間距離=600mm, 成形速度=40m/min, パスライン=ボトムラインコンスタント
ロールプロフィール(素材板厚中央面寸法)	
スタンドNo.	#1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8
CASE (A)	15° 40° 90° 10° 25° 60°
CASE (B)	30° 60° 90° 20° 40° 60° 75° 90°
CASE (C)	45° 80° 90° 30° 55° 60°

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

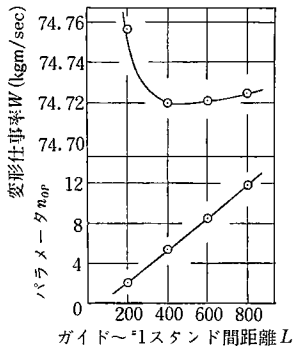


図5 Lの $n_{op}$ , Wに与える影響

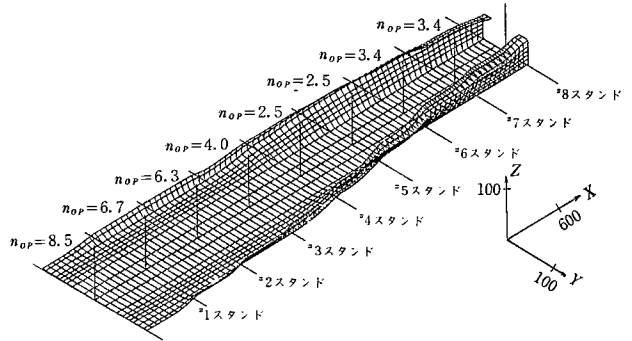


図7 C形鋼の変形曲面形状 (CASE(B))

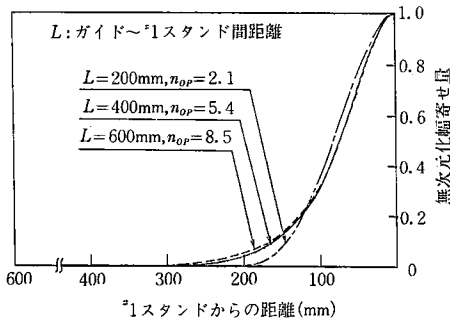


図6 変形曲面形状のX-Y座標 (CASE(B))

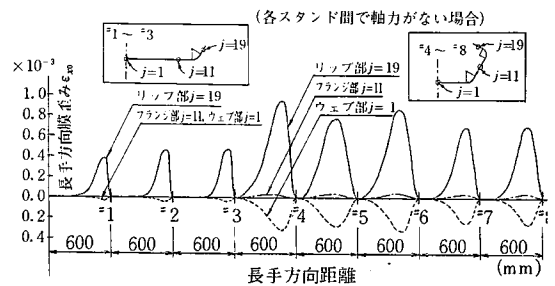


図8 幅方向各位置における長手方向膜歪みの推移 (CASE(B))

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  $P_i(X_1, Y_1, Z_1)$  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)。図2にパラメータ  $n$  を変化させた場合の  $S(X)$  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こり、 $n$  が小さいと変化はゆるやかになる。 $n$  の決定にはエネルギー法を適用する。

(変形曲面に沿う微小要素の変形過程の追跡) 図3に示すように、成形前の素材の長手 ( $X$ ) 方向に  $\Delta l_0$  の長さを有し、幅方向に帯状をなす微小要素(長方形要素)が図中の拘束条件を満足しつつ変形曲面に沿って成形されていく過程を段階を追って決定し、歪み増分・応力増分を次々と求め加えることにより、スタンド間での応力・歪み分布の推移を求める。

### 2.2 計算の流れ

図4に本解析手法の計算のフローチャートを示す。与えられた各スタンドのロールプロフィールに対して、まず最適化パラメータ  $n$  の初期値を与え、変形パターンを仮定する。次に各成形過程における歪み・応力成分を長手方向合力の拘束条件を満足しつつ決定していき、スタンド間での変形仕事率  $W$  を求める。同様の計算を繰り返していき、 $W$  を最小化ならしめるパラメータ  $n$  を決定

し、その時の変形曲面形状、歪み・応力成分を実際の現象の近似解とするものである。

### 3. 計算結果および考察

C形鋼, ハット形鋼のような角曲げでは、コーナーアール部の曲げ変形に要するエネルギーが全変形エネルギーの大部分を占め、かつ、コーナーアール部のスタンド間での変位量が一般に小さいために、わずかな計算誤差がパラメータ  $n$  の最適値  $n_{op}$  に影響を与える。C形鋼での計算の結果、 $n_{op}$  に対して初期値によるばらつきがなく物理的に意味があると思われる解を得るには、曲げ(幅方向曲げ+長手方向曲げ)の塑性変形仕事率を最適化の評価関数にとれば良いことが判明した。したがって本報では、評価関数(変形仕事率  $W$ ) = 曲げ塑性変形仕事率として数値計算を行った。

#### 3.1 C形鋼の解析

C形鋼の解析に使用した計算条件をまとめて表1に示す。

図5にガイド~#1スタンド間距離  $L$  のパラメータ  $n_{op}$  変形仕事率  $W$  に与える影響を示し、図6にそのときの変形曲面形状のX-Y座標を示す。図5の変形仕事率  $W$  を最小にする  $L=400$  mm は、ガイドがないとしたときの予変形域長さ(#1スタンドから素材の変位が起こり始める点までの距離)であると考えられる。また、

研究速報

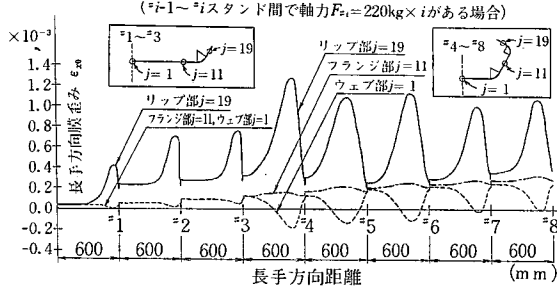


図9 幅方向各位置における長手方向膜歪みの推移 (CASE (B))

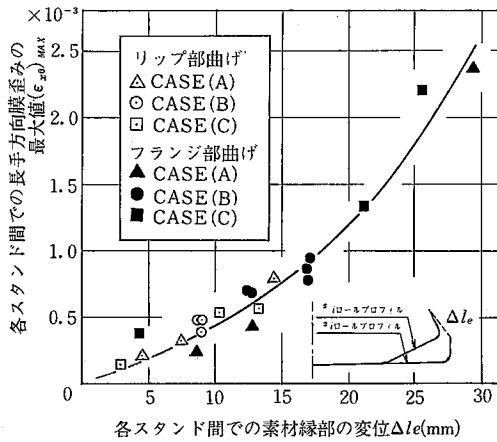


図11  $\Delta l_e$  の  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  に与える影響

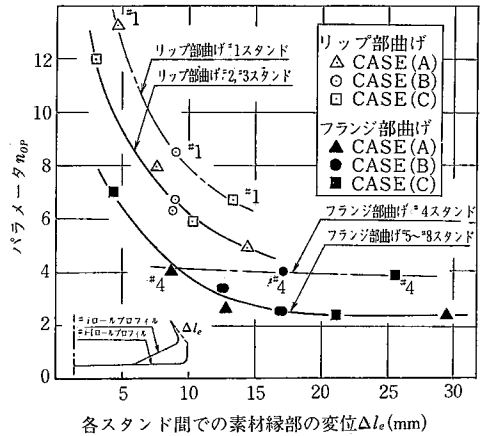


図10  $\Delta l_e$  と  $n_{op}$  の関係

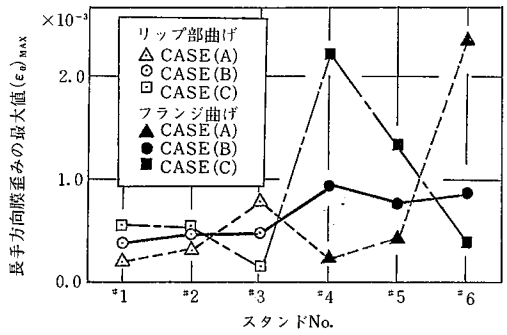


図12 成形量配分の  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  に与える影響

図6より、 $L$ を予変形域長さ400mmより大きくしても変形曲面形状はほとんど変化しないが、 $L$ を予変形域長さより小さくすると、ガイドに拘束されることにより変形曲面形状は変化しているのが見られる。このことは、実際の成形時に見られる現象に一致している。

図7にC形鋼の三次元的な変形曲面形状の一例(CASE(B))を示す。これは各領域分割点の座標をなめらかな曲線で結んで、グラフィックディスプレイ上に描いたものである。ガイド~3スタンド間のリップ部曲げにおいては、スタンド直前で比較的急激な変位が起きているが、\*3~\*8スタンド間のフランジ部曲げでは、比較的ゆるやかな変位となっている。

図8に長手方向の合力を零としたときの幅方向各位置における長手方向膜歪み  $\epsilon_{x0}$  の推移の一例(CASE(B))を示す。 $\epsilon_{x0}$ は、縁部近傍( $j=19$ )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\* $i+1$ スタンド直下でほぼ零になっている。一方、板幅中央部( $j=1$ )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9には各スタンド間で長手方向の合力が一定である

としたときの長手方向膜歪み  $\epsilon_{x0}$  の推移の一例(CASE(B))を示す。この場合は、各スタンド直下で  $\epsilon_{x0}$  は零とはならず、しだいに成長していくのが見られる。

図10は各スタンド間での素材縁部の変位  $\Delta l_e$  とパラメータ  $n_{op}$  の関係を示したものである。リップ部曲げ、フランジ部曲げともに、 $n_{op}$  は  $\Delta l_e$  と比較的良好な対応関係を示し、 $\Delta l_e$  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スタンド直前で急激に行われることになる。同じリップ部曲げ(またはフランジ部曲げ)でも、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ガイド~\*1スタンド間(または\*3~\*4スタンド間)の変形では、 $\Delta l_e$  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は各スタンド間での素材縁部の変位  $\Delta l_e$  と各スタンド間での長手方向膜歪みの最大値  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  の関係を示したものであり、図12は、成形量配分の  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  に与える影響を示したものである。図11に示すように、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  は  $\Delta l_e$  の増加にしたがって比較的急激に増加する傾向にある。したがって図12に示すように、リップ部曲げ、フランジ部曲げともに、3スタンドを通しての  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$

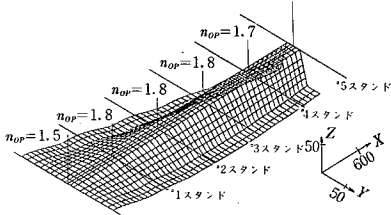


図13 ハット形鋼の変形曲面形状

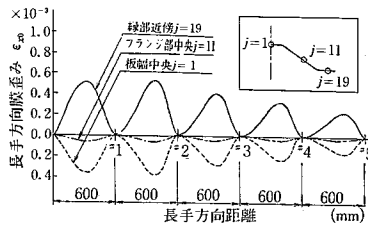


図14 幅方向各位置における長手方向膜歪みの推移

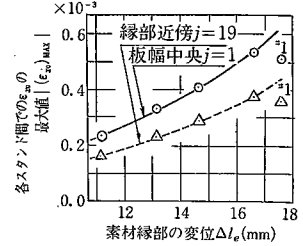


図15 Δl\_e の (ε\_x0)\_MAX に与える影響

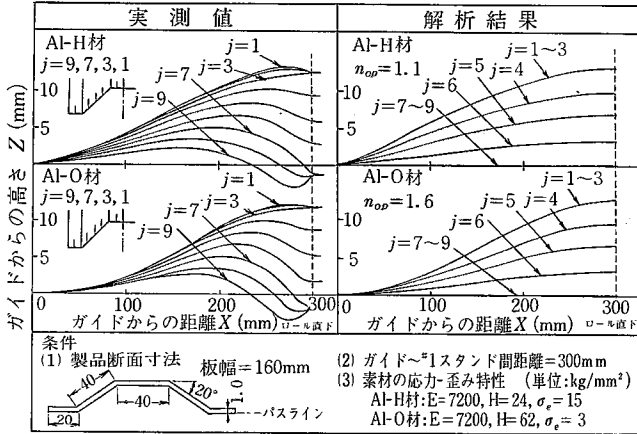


図16 変形曲面形状(X-Z座標)の実測値と解析結果の比較

表2 ハット形鋼の計算条件

成形サイズ	60×30×25×2.3 (素板2.3×192.7)				
素材の応力・歪み特性	C形鋼に同じ	25			
成形条件	スタンド間距離=600mm, パスライン=ウェブ部の高さ一定				
ロールプロファイル(素材の板厚中央面寸法)					
コーナーアール寸法	R = 90/θ · 1.5t (mm), θは下記のとおり				
スタンドNo.	#1	#2	#3	#4	#5
曲げ角度θ	18°	35°	50°	63.5°	75°

$(\epsilon_{x0})_{MAX}$  の最大値は成形量均等配分の CASE(B)が最も小さくなっている。 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  は素材の縁波発生の原因となるため、縁波防止の観点からは均等配分がすぐれていると考えられる。

3.2 ハット形鋼の解析

ハット形鋼の解析に使用した計算条件をまとめて表2に示す。図13はハット形鋼の三次元的な変形曲面形状を示したものである。ハット形鋼では、パラメータ  $n_{op}$  の値は成形量にあまり影響されず、約1.0~2.0程度の値をとり、変形曲面形状はスタンド直下近傍以外ではほぼ直線的な形状を示している。

図14に長手方向の合力を零としたときの幅方向各位置における長手方向膜歪み  $\epsilon_{x0}$  の推移を示し、図15にそのときの各スタンド間での素材縁部の変位  $\Delta l_e$  と  $|(\epsilon_{x0})_{MAX}|$  の関係を示す。長手方向の合力を零としているため、各スタンド直下での  $\epsilon_{x0}$  は幅方向によらずほぼ零となっている。また、 $\Delta l_e$  にほぼ比例して  $|(\epsilon_{x0})_{MAX}|$  が発生しているのが見られる。

図16はAl-H材およびAl-O材を素材としたときのガイド~1スタンド間変形曲面形状の X-Z 座標の<sup>2)</sup>実測値と解析結果を比較したものである。スタンド間での

変位量が最も大きい  $j=1\sim3$  の各点では、H材、O材ともに変形曲面形状の計算値は実測値と比較的良く一致しており、H材の方がO材よりも予変形領域がより発達するという傾向も一致している。一方、 $j=4$  から9の点になると、計算値は実測値とすだいに食い違ってきている。これは図2に示すような単調に増加する関数を形状関数として導入したためである。

4. まとめ

C形鋼、ハット形鋼の解析の結果、スタンド間距離  $L$  と  $n_{op}$  の関係、成形量と  $n_{op}$  の関係、成形量と長手方向膜歪み  $(\epsilon_{x0})_{MAX}$  の関係において実際の現象と傾向的に合致し、本解析手法が形鋼にも適用可能であることが判明した。ただし、実際の現象により近い変形過程をシミュレートするためには、図16の実測値に示すような変形曲面形状を表すことのできる形状関数  $S(X)$  を検討する必要がある。

(1982年9月1日受理)

参考文献

- 1) 木内・高田橋・江藤：昭和57春季塑加講演論，(1982-5)，638
- 2) 鈴木・木内・新谷：塑性と加工，15-162 (1974)，547