

# 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13報)

## ——広幅断面の解析——

Study of Computational Simulation Method of Cold-Roll-Forming Process-13th 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<sup>1)</sup>では、成形中の素板に発生する面内せん断ひずみと、幅方向応力の釣り合いを考慮した拡張解析モデルを提案し、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解析結果が得られることを示した。

本報では、拡張解析モデルを用いて、幅方向の局所的な伸びひずみや面内せん断ひずみを特に無視できない、広幅断面材の成形過程の解析を行った結果について報告する。

### 2. 拡張モデルの概要

本モデルでは、成形過程において素板の板厚方向中央面の呈する3次元的な変形曲面形状を、関数近似により表示し、その曲面に沿って素板要素が成形される過程を考える(図1参照)。そして、

1) 長手方向に分割された長手方向分割要素に作用する長手方向合力の各成形段階における釣り合い、2) 長手方向分割要素をさらに幅方向に細分割した細分割要素に関する幅方向応力の釣り合い、3) 素板縁部における幅方向応力=0の条件、を満たすように応力・ひずみ履歴

を決定して、その場合の変形仕事率を算出し、さらに、上記変形曲面形状の修正を繰り返しつつ、変形仕事率が最小となる変形曲面形状を求め、これを実際の変形の近似解とする、という方法を用いている。

計算式、その他の詳細は、既報<sup>1-2)</sup>を参照にされたい。

### 3. 解析結果

#### 3-1 解析対象とした成形条件

表1に成形条件を示す。ただし、本報では入口ガイドから#1スタンドまでの成形を解析対象とする。表1に示した各条件因子が変形仕事率、長手方向膜ひずみ、幅方向膜ひずみ等に与える影響を調べるために、表1中のNo.1の条件を基準として、各条件因子を実際の成形が行

表1 成形条件一覧表

No.	パスライン $\alpha$	ウェーブ W/mm	平担部 L/mm	フランジ F/mm	曲げ角度 $\theta$ /度	曲げ半径 R/mm	板厚 t/mm	材質
1	H	40	240	40	20	10	1.0	SS41
2	H/2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
3	0	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
4	H	240	240	↓	↓	↓	↓	↓
5	↓	↓	↓	10	↓	↓	↓	↓
6	↓	↓	↓	20	↓	↓	↓	↓
7	↓	↓	↓	40	↓	↓	↓	↓
8	↓	↓	↓	↓	5	↓	↓	↓
9	↓	↓	↓	↓	10	↓	↓	↓
10	↓	↓	↓	↓	20	↓	↓	↓
11	↓	↓	↓	↓	↓	5	↓	↓
12	↓	↓	↓	↓	↓	15	0.5	↓
13	↓	↓	↓	↓	↓	10	1.5	A材
14	↓	↓	↓	↓	↓	↓	1.0	B材

入口ガイド $\gamma=1$ 間距離: 300mm(一定)  
成形速度: 40m/min(一定)  
要素分割数: 10(長手方向)×任意(幅方向)×6(板厚方向)

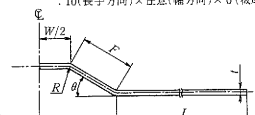
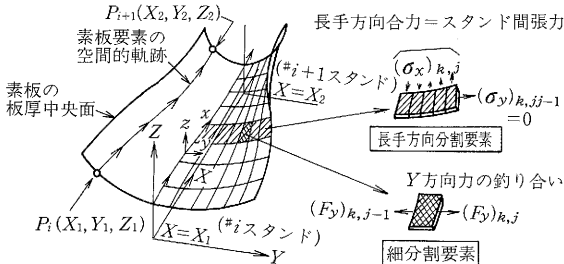



図1 変形曲面形状と各要素内での力の釣り合い

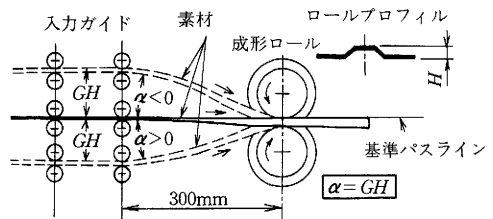


図2 パスライン( $\alpha$ )の定義

\*東京大学生産技術研究所 第2部

られる程度の範囲で変化させてある。

3-2 長手方向膜ひずみ, 幅方向膜ひずみに与えるパスラインの影響

ここでは, 図2で定義するように, 素板(変形曲面)幅方向中心の, 入口ガイドと#1スタンドにおけるZ座標の差をもって, パスラインを表示する。

図3には, 図中に示す条件のもとで, パスラインを変化させた場合の長手方向膜ひずみの最大値の幅方向分布を示す。 $\alpha=H$ の場合は, いわゆるボトムライン一定の成形に相当し, この場合, ウェブ部では, 平坦部と比較して流線の軌跡長が長くなり, 長手方向に大きな伸びひずみが発生する。 $\alpha=H/2$ の場合には, ウェブ部の長手方向膜ひずみは伸びから圧縮に変化し,  $\alpha=0$ すなわちトップライン一定の場合には, 平坦部の軌跡長の増加に対応して, ウェブ部の長手方向膜ひずみはさらに大きな圧縮となる。一方, パスラインの変化に伴う平坦部の長手方向膜ひずみの変化は, ウェブ部に比べて小さい。このように, 平坦部がウェブ部に対して相対的に寸法が大きく, 剛性も高く, 結果としてウェブ部に変形が集中することが広幅断面の成形の特徴である。

同じ成形条件のもとで, パスラインを変化させた場合の幅方向膜ひずみの最大値の幅方向分布を図4に示す。長手方向と同様に, 幅方向膜ひずみについても, ウェブ部における変化が大きく, 平坦部における変化は小さい。また, 曲げ部において生じる幅方向膜ひずみの最大値は, 変形曲面形状や曲げ部周辺における長手方向膜ひずみに大きく左右されるため, パスラインの影響を直接的に判別することは難しい。たとえば $\alpha=H$ におけるウェブ部~フランジ部間の曲げ部では, 長手方向膜ひずみが大きく, 長手方向の伸びに伴って幅方向に縮む変形が同時に起こるため, 総体的には幅方向への伸びひずみが小さくなっている。

3-3 長手方向膜ひずみ, 幅方向膜ひずみおよび面内せん断ひずみに与えるウェブ幅の影響

ウェブ幅を40mmおよび240mmとした場合の長手方向膜ひずみの最大値の幅方向分布を図5に, 同じく幅方向膜ひずみの最大値の幅方向分布を図6に示す。ウェブ幅以外の成形条件は一定とし, その値を図中に示す。

前節で述べたように, 平坦部長さの増大は, ウェブ部の剛性を相対的に低下させるので, 長手方向および幅方向の変形がウェブ部に集中する傾向が強まる。一方, ウェ

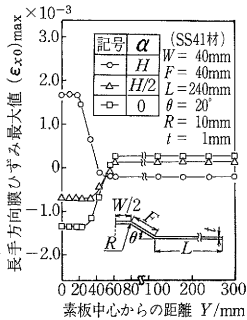


図3 長手方向膜ひずみの幅方向分布に与えるパスラインの影響

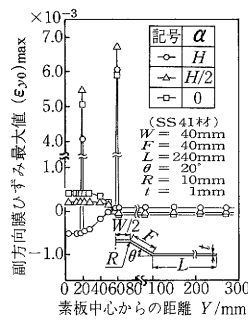


図4 幅方向膜ひずみの幅方向分布に与えるパスラインの影響

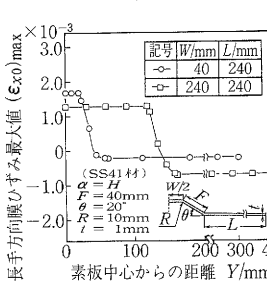


図5 長手方向膜ひずみの幅方向分布に与えるウェブ幅の影響

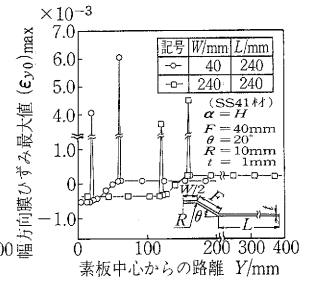


図6 幅方向膜ひずみの幅方向分布に与えるウェブ幅の影響

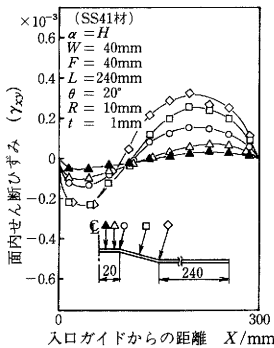


図7 ウェブ部フランジ部における面内せん断ひずみの推移 ( $W=40$ )

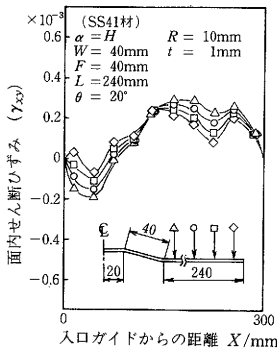


図8 平坦部における面内せん断ひずみの推移 ( $W=40$ )

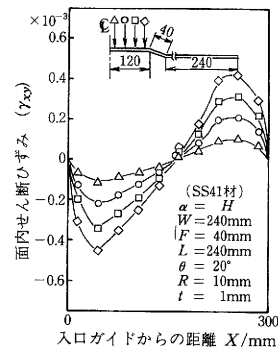


図9 ウェブにおける面内せん断ひずみの推移 ( $W=240$ )

研究速報

幅の増大は逆にウェブ部の剛性を相対的に大きくするため、ウェブ部における長手方向膜ひずみ、幅方向膜ひずみともに減少する。

図7～9に、上記の成形条件の場合におけるせん断ひずみの推移を示す。図7はウェブ幅が40mmの場合におけるウェブ部からフランジ部にかけての部分、図8は同じ場合における平坦部での推移を示し、図9は、ウェブ幅が240mmの場合におけるウェブ部での推移を示す。いずれの場合にも、ひずみの正負が成形途中で逆転しており、当初入口ガイドから素板が進行するとともに、板幅を縮める(幅寄せを促進する)方向に作用していた面内せん断応力が、ロール近くまでくると逆に板幅を広げる(幅寄せを解消する)方向に作用することがわかる。

図7に示す結果より、素板幅方向中心の要素から素板縁部に向かって面内せん断ひずみが増加するが、この増加傾向はフランジ部～平坦部間の曲げ部まで続き、この曲げ部で面内せん断ひずみが最大となる。逆に平坦部においては、面内せん断ひずみは、図8に示されるように

縁部に向かって減少する。一般に素板の受ける面内せん断変形は、素板中央から縁部に向かってしだいに大きくなるとは単純に考えることができず、材質、断面形状により変化すること<sup>3)</sup>、特に本解析で対象としている断面のような場合には、平坦部の中でもフランジ部近傍の領域に集中的に面内せん断ひずみが発生する例<sup>4)</sup>が報告されており、これらの実験結果とも今回の結果は一致する。

また、図9に示したようにウェブ幅の増加に伴い、せん断ひずみの絶対値は増加する。

3-4 長手方向膜ひずみ、幅方向膜ひずみに与えるフランジ高さ、曲げ角度の影響

フランジ高さを変えた場合の長手方向膜ひずみの最大値、幅方向膜ひずみの最大値の推移をそれぞれ図10、11に示す。また、曲げ角度を変えた場合のそれらの推移をそれぞれ図12、13に示す。フランジ高さ、曲げ角度以外の成形条件は一定とし、その値を図中に示す。

フランジ高さや曲げ角度が増加すると、#1スタンドで成形される断面高さが高くなり、また素板縁部の幅寄せ量も大きくなる。この場合、長手方向膜ひずみの最大値は、ウェブ部中央に発生するが、その値は断面高さが高

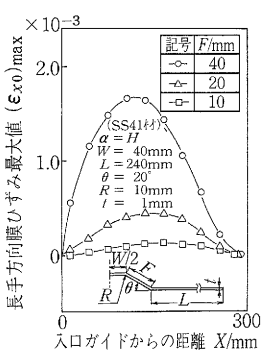


図10 長手方向膜ひずみの最大値に与えるフランジ高さの影響

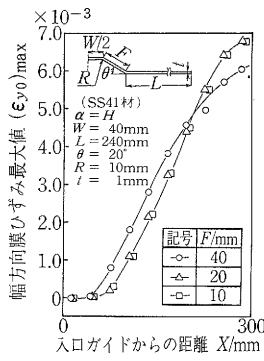


図11 幅方向膜ひずみの最大値に与えるフランジ高さの影響

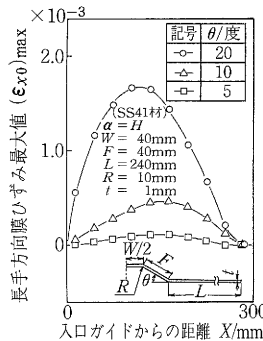


図12 長手方向膜ひずみの最大値に与える曲げ角度の影響

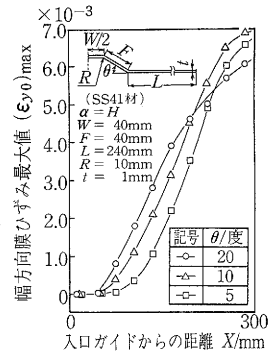


図13 幅方向膜ひずみの最大値に与える曲げ角度の影響

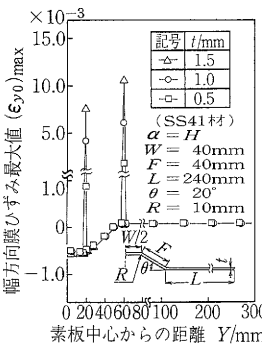


図14 幅方向膜ひずみの幅方向分布に与える板厚の影響

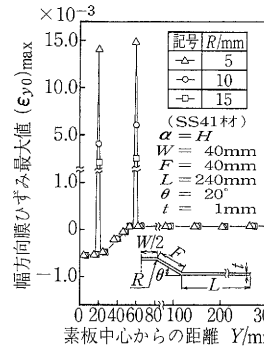


図15 幅方向膜ひずみの幅方向分布に与える曲げ半径の影響

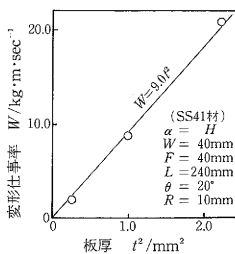


図16 板厚と変形仕事率の関係

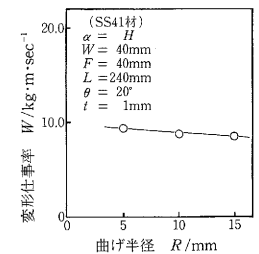


図17 曲げ半径と変形仕事率の関係

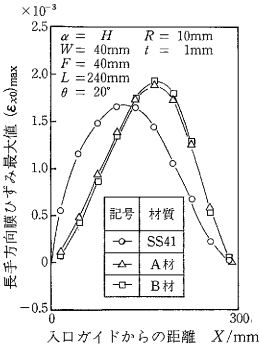


図18 長手方向膜ひずみの最大値に与える材質の影響

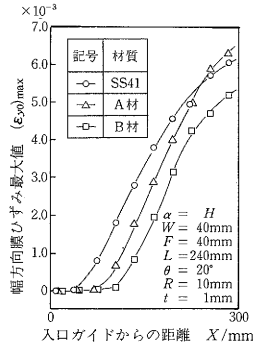


図19 幅方向膜ひずみの最大値に与える材質の影響

表2 A材, B材の機械的性質

材質	$\sigma_s / \text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	$E / \text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	$H / \text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$
SS41	31.5	21000	80
A材	15.0	7200	24
B材	54.5	21000	150

径の減少に伴い曲げ部の領域自体も小さくなるために、変形仕事率の増加は少ない。

3-6 長手方向膜ひずみ, 幅方向膜ひずみに与える材質の影響

材質(素板の機械的性質)を変化させた場合の長手方向膜ひずみの最大値, 幅方向膜ひずみの最大値の推移をそれぞれ図18, 19に示す。各素板の機械的性質を表2に, 成形条件を各図中に示す。いずれの場合も長手方向膜ひずみの最大値はウェブ部中央において, 幅方向膜ひずみの最大値はフランジ部~平坦部間の曲げ部において発生するが, 図18より, 材質により, 同一の形状, 寸法の製品を目的とする成形であっても, 変形曲面形状が異なり, 長手方向膜ひずみの最大値の発生位置が異なることがわかる。また, 図19からは, 降伏点が高く, 加工硬化係数が大きい場合のほうが幅方向膜ひずみの最大値が小さく, その推移を示す曲線も緩やかとなる傾向がみられる。これは一般にこのような材料では塑性変形が起こりにくくまたひずみの局所化が生じにくい現象と一致する。

4. ま と め

本報では広幅断面材の成形の最も基本的なプロセスと考えられる, 単スタンドにより素板の中央にひとつの台形溝形を成形する場合について, 成形中に素板内に発生する各ひずみ成分の推移, 挙動について系統的な解析を行い, それらに与える断面各部の形状および材質の影響についての知見を得た。

今後, モデルの改良による汎用性の向上, 高精度化を計りながら, タンデムスタンドでの解析, 複数山を有する広幅断面の解析に取り組み, 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, 幅寄せ変形とその影響等に関する体系的な研究を進める予定である。(1988年10月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・千葉: 昭63春塑加講論, (1988), 205
- 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, 15-162 (1974), 574
- 4) 鈴木・木内ほか: 塑性と加工, 18-196 (1977), 365

くなり, ウェブ部の軌跡長が長くなるに伴って増加する。

一方, 幅方向膜ひずみの最大値はほとんどの場合, フランジ部~平坦部間の曲げ部に発生する(ただし, 曲げ角度が5°の場合の幅方向膜ひずみの最大値はウェブ部~フランジ部間の曲げ部で得られるが, 絶対値がほぼ同じであるため, 他の場合との比較のために, ここではフランジ部~平坦部間の曲げ部の値を示した)。図11に示すフランジ高さが40mmの場合, 図12に示す曲げ角度が20°の場合においては, 断面高さが大きくなると逆に幅方向膜ひずみの最大値が若干減少する結果となっていることがわかる。これは, 曲げ部周辺における長手方向膜ひずみが非常に大きくなり, この長手方向伸びに伴う幅方向の縮み効果および塑性変形域の幅方向への拡がりの効果などにより, 曲げ部においてのみの局所的な変形が生じにくくなった結果と考えられる。

3-5 長手方向膜ひずみ, 幅方向膜ひずみ, 変形仕事率に与える板厚および曲げ半径の影響

板厚および曲げ半径を変化させた場合の幅方向膜ひずみの最大値の幅方向分布をそれぞれ図14, 15に示す。板厚, 曲げ半径以外の成形条件は一定とし, その値を図中に示す。

板厚および曲げ半径を変化させても, ウェブ部, フランジ部, 平坦部における幅方向膜ひずみはほぼ同じである。また, 特に図示はしないが, 長手方向膜ひずみの最大値も, 板厚および曲げ半径の影響をあまり受けない。

幅方向膜ひずみは, ふたつの曲げ部において大きな伸びを示すが, その最大値は成形条件が厳しくなるほど, すなわち板厚が厚くなり, 曲げ半径が小さくなるほど大きくなる。

また, 板厚および曲げ半径を変化させた場合の変形仕事率の値をそれぞれ図16, 17に示す。板厚に関してはよく知られるように変形仕事率はほぼ板厚の2乗に比例して増加する。一方, 曲げ半径の影響に関しては, 曲げ半