

成形ロール設計ツールの開発 (第1報)

Development of User Friendly Roll Design System-1st Report

木 内 学*・谷 明 広*

Manabu KIUCHI and Akihiro TANI

1. はじめに

近年、ロールフォーミング加工の分野においても、高品質・高精度な製品を高い生産性をもって製造し得る成形技術への要求が高まっている。高い生産性を確保する技術としては、生産性を支配する最も重要な要因であるロール交換回数を減らすべく、各スタンド内における成形ロールの設定位置を回転移動あるいは平行移動させることにより、ロールの兼用範囲の拡大を図ることを目的としたFFミル、ケージロールミルなどの開発がなされている。成形ロールの兼用範囲を拡大させるためには、対象となる全製品サイズについて、ロール直下における素板の変形形状を想定したロール設計を行うことが必要である。しかしながら、ブレイクダウン成形のようにロールによる素板への拘束が少ない成形においては、ロール直下における素板の変形形状を的確に予測することは難しく、また成形ロールのカリバーに素板が完全になじんで変形すると仮定することには無理があり好ましくないと考えられる。

本報では、ブレイクダウン成形におけるロール直下での素板の曲げ変形形状を予測する近似的手法として、平面ひずみ曲げ理論を用いた解析システムを構築し、これを用いて求めた曲げ変形形状をロール直下における素板の横断面形状として、素板の変形挙動に及ぼすロール設定位置の影響をロールフォーミング汎用シミュレータ¹⁾により解析し検討した結果を報告する。

2. ロール直下での素板の変形形状の解析手法

以後の説明では、成形方向をX軸、板幅方向をY軸とする。

2.1 解析モデルの概要

図1に最も基本となる円弧ロールによる成形のモデル図を示す。下円弧ロールの設定位置を任意に与え、上円弧ロールによって素板を最終位置まで圧下しつつ幅方向

*東京大学生産技術研究所 第2部

に曲げていく過程を考える。ただし、既述のように、変形は平面ひずみ変形として取り扱う。

成形過程のk段階において、板幅方向に分割したj番目の微小要素に作用する応力(増分)・ひずみ(増分)を算出し、内部応力に起因する曲げモーメントを求め、外力による曲げモーメントとの釣合条件を満足させつつ板幅方向全体の曲げ変形形状を求める。このような解析を最終の曲げ成形過程(すなわち設定ロール位置)まで段階的に進め、成形ロール直下での素板の変形形状を求める。

2.2 基礎式

ロール直下における素板の曲げ変形は、ひずみ増分論を用いるが、その際の仮定をおく。

- a) 素板の変形は平面ひずみ曲げ変形である ($\epsilon_x = 0$).
- b) 素板内に発生するせん断ひずみおよびせん断応力を無視する。
- c) 素板は直線硬化性を有する弾塑性体とする。

以上の仮定を用いつつ、弾性変形過程、弾塑性変形過程におけるひずみ増分、応力増分を以下に示す式により算出する。

ひずみ増分は、中立面の移動を無視し、板厚中央面からの距離を η として、次式より求める。

$$(d\epsilon_y)_{k,j} = \eta \left(\frac{1}{(\rho_0)_{k,j}} - \frac{1}{(\rho_0)_{k-1,j}} \right) \quad (1)$$

弾性変形過程における応力-ひずみ関係式としては次式を用いる。

$$d\sigma_x = \frac{\nu E}{1-\nu^2} d\epsilon_y, \quad d\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} d\epsilon_y \quad (2)$$

弾塑性変形過程における応力-ひずみ関係式としては次式を用いる。

$$d\sigma_x = \frac{E}{A} (-\sigma_x' \sigma_y' + 2\nu B) d\epsilon_y$$

$$d\sigma_y = \frac{E}{A} (\sigma_y'^2 + 2B) d\epsilon_y \quad (3)$$

式(1)~(3)中の定数A, Bは次式により表される。

研究 速 報

表 1 計算条件

1. 2次元曲げの解析				
条件	板厚(mm)	S(mm)	θ(°)	材質
1	3.2	0	0	A
2	3.2	5	0	A
3	3.2	15	0	A
4	3.2	0	5	A
5	3.2	0	10	A
6	1.2	0	0	A
7	6.0	0	0	A
8	3.2	0	0	B

2. 3次元汎用シミュレータの解析				
1. ロール形状: ブレックダウン#1スタンドは、 2次元曲げ解析の解析結果を使用				
2. スタンドピッチ: 1000(mm)				
3. ラインスピード: 40.0(m/min)				
4. パスライン: ボトムコンスタント				
5. その他: 2次元曲げ解析の解析条件に準じる。				

3. 材料特性				
A 材 B 材				
ヤング率: E (Kg/mm ²): 21000 19700				
加工硬化係数: n: 80.0 179.8				
初期硬化力: K ₀ (Kg/mm ²): 31.5 37.4				
ポアソン比: ν: 0.3 0.3				

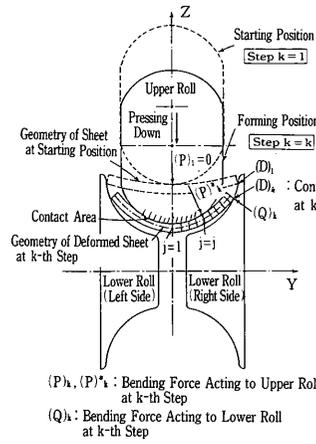


図 1 解析モデル図

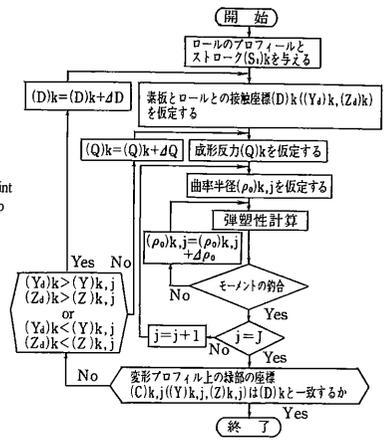


図 2 全体的な解析フロー

$$A = C + 2(1 - \nu^2)B$$

$$B = \frac{2H\bar{\sigma}^2}{9(E - H)} \quad (4)$$

$$C = \sigma_x'^2 + 2\nu\sigma_x'\sigma_y' + \sigma_y'^2$$

ただし、E, H, ν, $\bar{\sigma}$ はそれぞれヤング率、加工硬化係数、ポアソン比、相当応力であり、 σ_x' , σ_y' は偏差応力である。

以上に示したロール直下での曲げ素板の変形形状の解析手法をまとめ、全体的な解析のフローチャートを図2に示す。

3. 計算結果および考察

表1に計算条件を示す。以後の説明においては、条件1の場合を下ロールの基準位置とする。

3.1 ロール位置がロール直下での素板の曲げ変形形状に及ぼす影響

図3に下ロール位置を変化させた場合の、ロール直下における素板の変形形状を、板幅方向の曲げ曲率分布により示す。いずれの場合も、上ロールは最終位置（最下位置）まで押し込んだ場合である。

基準位置に対し下ロールを平行移動させた場合、素板の上ロールへの巻き付き領域の広がりならびに巻き付き領域近傍での曲率分布が変化する。また、弾塑性変形領域における曲率分布は、下ロールを平行もしくは回転移動した場合とも、基準位置の場合の曲率分布とほぼ同様の傾向を示しているものの、基準位置の場合に比較して、よりなだらかな曲率分布が得られている。このように、同じプロファイルをもつロールを用いても、ロールの位置を変化させることにより素板に作用する力の方向が変化するため、ロール直下における素板の変形は異なる曲率

分布を持つことがわかる。

図4には、これらの状況をより明確に理解できるようにするために、ロール直下においてロールから素板へ加わる拘束の形態と、素板の曲げ変形形状の例を示す。

図5には、図3に示すロール直下の変形状態から弾性回復した後の素板の変形形状を、幅方向の曲率分布によって示す。図より、ロール設定位置の影響は、弾性回復後の形状に増幅されて表れてくることがわかる。

3.2 ロール直下における素板の変形形状がブレイクダウン成形過程の変形特性に及ぼす影響

前節の解析により得られた素板の変形形状を#1ブレイクダウンロール直下の素板の横断面形状と仮定し、ロールフォーミング汎用シミュレータにより解析し検討した結果を以下に示す。

3.2.1 長手方向膜ひずみの発生に与えるロール設定位置の影響

ブレイクダウン成形過程における、入口ガイドから#1ロールへ至る成形過程での長手方向膜ひずみの発生状況を解析した例を以下に示す。

図6に、各場合に素板縁部に発生する長手方向膜ひずみ（すなわち、長手方向膜ひずみの最大値）を示す。縁部に発生する長手方向膜ひずみは、#1スタンドでの曲げ変形量が大きくなるロールの設定位置を選んだ場合ほど、その最大値が大きいことがわかる。

以上の結果が示すように、ロールの設定位置を変化させることにより、成形過程で素板に発生する長手方向膜ひずみは大きく変化する。したがって、同一のロールを兼用化して成形を行う場合のロール設計においては、ロール直下の素板の変形形状と合わせて、素板の全体的な変形挙動を十分に検討する必要があることがわかる。

研究速報

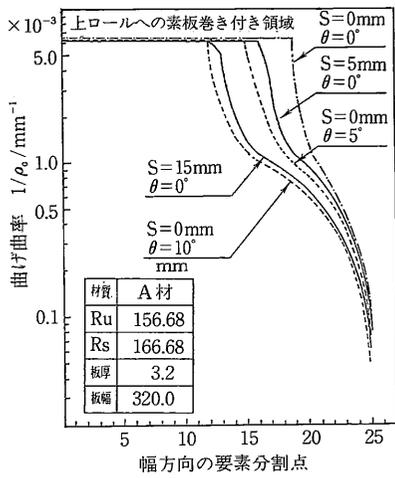


図3 板幅方向の曲げ曲率分布

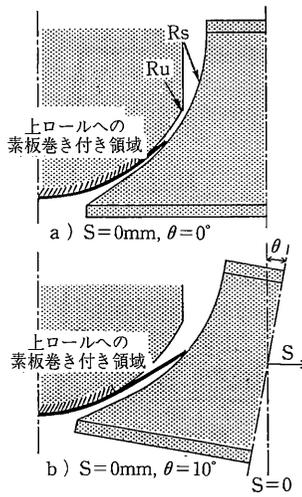


図4 素板の曲げ変形形状

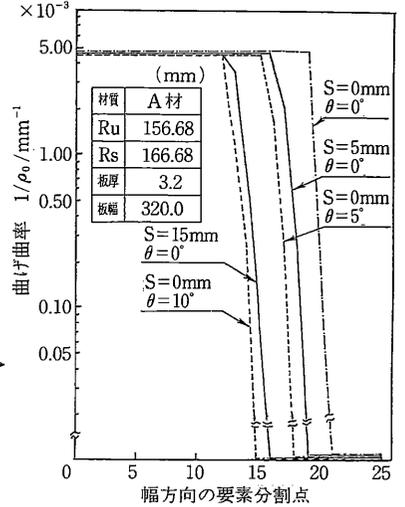


図5 弾性回復後の板幅方向曲率分布

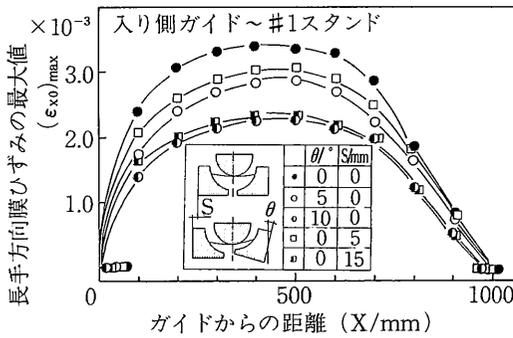


図6 素板縁部に発生する長手方向膜ひずみの挙動

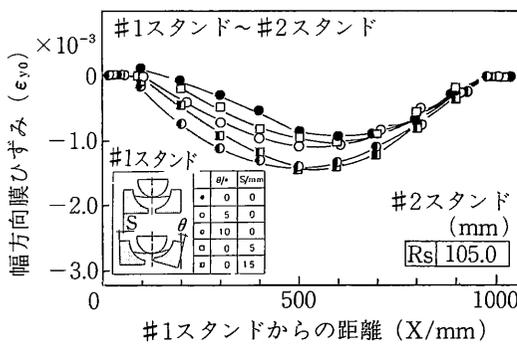


図7 素板中央に発生する幅方向膜ひずみの推移

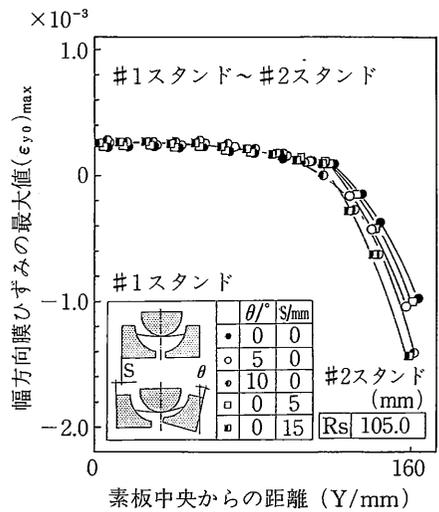


図8 幅方向膜ひずみの最大値の板幅方向分布

3・2・2 下流側の成形に与えるロール設定位置の影響

#1スタンドロール直下での素板曲げ変形形状として図3に示す曲率分布に想定した場合、#1スタンドから#2スタンドへ至る成形過程における板幅方向膜ひずみの発生について解析を行った結果を以下に示す。図7に素板中

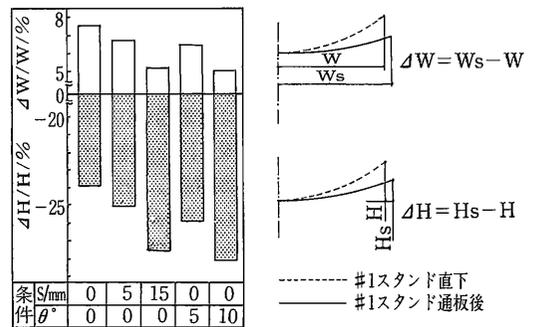


図9 弾性回復による素板形状の変化量

研究速報

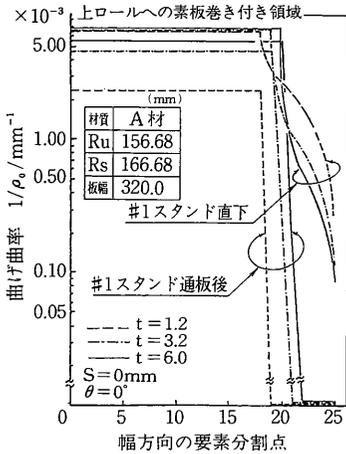


図10 板厚を変化させた場合のロール直下および通板後の板幅方向曲率分布

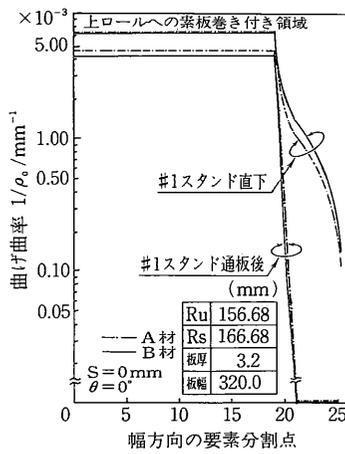


図11 材質を変化させた場合のロール直下および通板後の板幅方向曲率分布

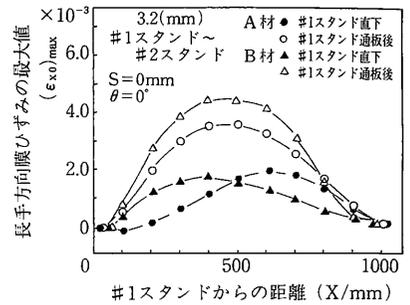


図12 素板形状に弾性回復を考慮した場合の長手方向膜ひずみの推移

央に発生する幅方向膜ひずみの推移を、図8には成形過程での幅方向膜ひずみの最大値の板幅方向分布を示す。

#1スタンでのロール設定位置の影響としては、#1スタンでの成形量が少ない設定条件ほど、#2スタンへ至る成形過程における幅方向膜ひずみの最大値が幅方向にみて大きな変化を示していること、また、板縁近傍で幅方向膜ひずみが急激な変化をしていることなどがわかる。

3・2・3 ロール通過後の弾性回復が下流側の成形に及ぼす影響

ロール設計では、ロール直下における素板の変形形状の推定とともに、ロール直下通過後の素板の弾性回復による影響をいかに取り入れるかが重要な課題である。本報では、#1ブレイクダウンロール通過後の素板の変形形状を弾性回復計算をとおして求め、弾性回復が#2ブレイクダウン成形に与える影響について検討した。

まず図9には、各場合についての、#1ブレイクダウンロール通過後の、弾性回復による素板の横断面の板幅方向、高さ方向の寸法の変化量を示す。

次に、ロール位置を基準状態とし、素板板厚を1.2mm, 3.2mm, 6.0mmと変化させた場合の、ロール直下および通過後の板幅方向にみた横断面の曲率分布を図10に示す。さらに、板厚を3.2mmに固定し、材質を変えた場合について、同様な板幅方向の曲率分布の変化を図11に示す。当然のことながら、板厚が薄く素板の初期降伏応力が大きいほど弾性回復変形が大きくなっている。

図12に、2種類の素板(板厚3.2mm)について、弾性回復後の素板形状を#1スタン通過後の素板の横断面形

状とした場合と弾性回復を考慮しない場合について、#1スタンから#2スタンへの成形過程での、素板縁部に発生する長手方向膜ひずみの推移を示す。弾性回復を考慮すると、ピーク値が高くなるとともにピーク値の発生位置は#1スタン側にずれてくる。この傾向は弾性回復量の大きい材質ほど顕著である。

以上の結果より、材質、板厚の異なる製品についてロールを兼用しようとする場合には、前スタンのロール直下の曲げ変形形状の予測のみならず、ロール出側の弾性回復による素板の形状の予測もロール設計において考慮することが必要であることがわかる。

4.まとめ

本報では、平面曲げ解析法により推定したロール直下での素板の変形形状をロール直下における断面形状と考えることにより、ロールの設定位置を変化させた場合の素板の変形挙動について基本的な解析を行い、解析手法の妥当性について検討するとともに、ロール設定位置変化によるロール兼用化の可能性について調べ、ロールの兼用化を図る際に注意すべきいくつかの事項、特に、ロール直下での素板の変形形状とロール通過後の弾性回復変形について考慮することの重要性を示した。

今後は、ブレイクダウン成形のみならず、他の各種ロールによる成形、ならびにダブルベント成形などにも検討範囲を拡張していく予定である。(1991年6月25日受理)

参考文献

1) 木内, 高田橋: 塑性と加工, 27-308, (1986), 1091.