

# 異形管のロール成形に関する実験的研究 — 第10報 —

## — パススケジュールに関する一考察 —

Experimental Study on Roll Forming Process on Non-Circular Pipe · 10th Report  
— Investigation into Pass-Schedule —

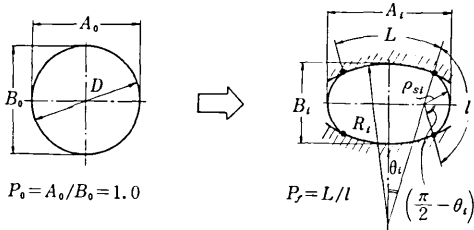
木内 学\*・新谷 賢\*・戸沢 正孝\*  
Manabu KIUCHI, Ken SHINTANI and Masataka TOZAWA

### 1. ま え が き

円管から角管・楕円管等の異形管を再成形するプロセスにおいて、最も基本的かつ重要な問題の一つであるパススケジュールの決定法については未だ系統的な考え方が示されていないが、筆者らは、成形中の管の断面形状および管とロールとの接触状態に関して簡略化したモデルを導入し、種々の寸法・形状を有する管とロールの組合せについて、幾何学的関係から可能な圧下率(成形量)を求め、さらに実験的に求めた管表面のくぼみの発生限界線概念を成形プロセスの評価基準として用いて、正常な製品を得るための好ましいパススケジュールの決定方法について考察したので以下に報告する。<sup>1)~4)</sup>

### 2. 成形の幾何学的モデル (図1参照)

以下、本報告では、一对のロールによる上下方向からの成形に関して議論を進めるが、左右方向からの成形が同時に行われる場合も、基本的には同様の検討が可能である。さらに、ロールプロフィールは Single Radius, すなわち単一の円弧で構成される場合を対象とするが、Double Radius であっても同様の取扱いが可能と考えられる。以下モデルの特徴を列挙すると、(1)ロール直下における管の断面形状は、2種の円弧の連なったものとする。(2)上下辺に相当する部分は上下ロールに接触



- $A_0$  : 素管の(長)径
- $A_i$  : 長円の長径
- $B_0$  : 素管の(短)径
- $B_i$  : 長円の短径
- $D$  : 素管径(既知)
- $L, l$  : 弧の長さ
- $R_i$  : ロール曲げ半径
- $\rho_{si}$  : 側部曲げ半径
- $\theta_i$  : ロール接触領域半角
- $P_f$  : 辺長比

図1 成形の幾何学的モデル

し、その円弧の半径はロールプロフィールの曲げ半径に一致する。(3)左右辺に相当する部分はフリー(あるいは左右ロールまたはフランジロールの拘束を受ける)と考えるが、その円弧の半径は幾何学的関係(またはロールの形状)より定まる。(4)上述の2種の円弧の節点、すなわち上下ロールとの接触開始点が最終製品のコーナー部に相当する。(5)成形中に管断面の周方向の伸縮はなく、成形後の弾性回復もない。(6)したがって、所定の縦横比をもつ矩形管を成形する場合、ロール直下における管断面の辺長比  $P_f = L/l$  ( $L$ =上下ロールとの接触長さ、 $l$ =非接触長さ)はパスが変わっても一定値を保ちその値は所定の縦横比に等しい。

### 3. 幾何学的関係と圧下率(最大圧下率)(図2参照)

成形の度合を評価するパラメータとして圧下率  $r$  を用いるが、その定義は、ロールの圧下量  $\Delta B$  (管断面の垂直方向の中心線上でみたロール間隙の変化量)の素管径  $D$  に対する割合とする。たとえばロール設定間隙が第1パスで  $B_1$ 、第2パスで  $B_2$  の場合、第1パスの圧下率  $r_1 = \frac{D-B_1}{D}$ 、第2パスでは  $r_2 = \frac{B_1-B_2}{D}$  である。

いま、素管径  $D$ 、製品の縦横比=管断面の辺長比  $P_f$ 、各パスにおけるロールの曲げ半径  $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots$  が与えられると、左右辺はフリーとして、各パスにおけるロールの可能な最大圧下量、すなわち最大圧下率が次のように求められる。

まず、辺長比一定、管断面周長不変の条件より  
$$P_f = L/l, 2l + 2L = \pi D \dots\dots\dots (1)$$

(1)の関係より  
$$l = \frac{\pi D}{2(1+P_f)}, L = \frac{P_f \cdot \pi D}{2(1+P_f)} \dots\dots\dots (2)$$

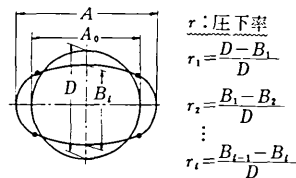


図2 圧下率の定義

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

この関係と図1より

$$\theta_i = \frac{P_f \cdot \pi D}{4R_i(1+P_f)}, \quad \rho_{si} = \frac{R_i \cdot \pi D}{2R_i \pi(1+P_f) - P_f \cdot \pi D} \quad \dots\dots\dots (3)$$

さらにこの場合のロール設定間隙、すなわち管断面の高さ  $B_i$  は、

$$B_i = 2\rho_{si} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right) + 2R_i(1 - \cos \theta_i) \\ = \frac{P_f \cdot \pi D}{2R_i \cdot \pi D(1+P_f) - P_f \cdot \pi D} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{P_f \cdot \pi D}{4R_i(1+P_f)}\right) \\ + 2R_i \left\{ 1 - \cos\left(\frac{P_f \cdot \pi D}{4R_i(1+P_f)}\right) \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、第  $i$  パスの圧下率 (最大圧下率  $r_i$ ) は、

$$r_i = \frac{B_{i-1} - B_i}{D} \\ = \frac{1}{D} \left[ \frac{2R_{i-1} \cdot \pi D}{2R_{i-1} \cdot \pi(1+P_f) - P_f \cdot \pi D} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{P_f \cdot \pi D}{4R_{i-1}(1+P_f)}\right) - \frac{2R_i \cdot \pi D}{2R_i \cdot \pi(1+P_f) - P_f \cdot \pi D} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{P_f \cdot \pi D}{4R_i(1+P_f)}\right) \right] \\ + 2R_{i-1} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{P_f \cdot \pi D}{4R_{i-1}(1+P_f)}\right) \right\} - 2R_i \left\{ 1 - \cos\left(\frac{P_f \cdot \pi D}{4R_i(1+P_f)}\right) \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、上式で、 $B_0$  に対しては  $R_0 = \frac{1}{2}D$  とおく。すると次式のように  $B_0 = D$  となる。

$$B_0 = \frac{D \cdot \pi D}{D\pi(1+P_f) - P_f \cdot \pi D} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{P_f \cdot \pi D}{2D(1+P_f)}\right) \\ + D \left\{ 1 - \cos\left(\frac{P_f \cdot \pi D}{2D(1+P_f)}\right) \right\} \\ = D \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \frac{P_f}{1+P_f}\right) \\ + D \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{P_f}{1+P_f}\right) \right\} = D \quad \dots\dots\dots (6)$$

4. 最大圧下率線図とくぼみ発生限界線

図3~10には辺長比  $P_f = 1.0 \sim 5.0, \infty$  の場合の(最大)圧下率  $r$  と素管・ロール径比 (第1パスでは  $\frac{D}{2}/R_1$ 、第2パス以降では  $R_{i-1}/R_i$ ) の関係を示す。図に示すように  $P_f = 1.0$  は正方形断面の成形に、 $P_f = \infty$  はリップ形断面の成形に対応する。さらに  $\frac{D}{2}/R = 0$  ( $R_{i-1}/R_i = 0$ ) は平ロールによる成形を表す。また  $\frac{D}{2}/R = 1.0$  ( $R_{i-1}/R_i = 1.0$ ) は管断面と一致するプロフィールをもつロールによる成形を意味し、したがって圧下率  $r = 0$  となる。図3の曲線群のパラメータは  $P_f$  であるが、図4以降は各々の  $P_f$  に関して、前パスでの素管・ロール径比  $\frac{D}{2}/R_1$  等をパラメータとし、第2パス以降における管断面上下辺での素管・ロール径比 (=前パスと現パスのロール曲げ半径比  $R_{i-1}/R_i$  に相当する) と圧下率  $r$  の関係を示していることに注意されたい。

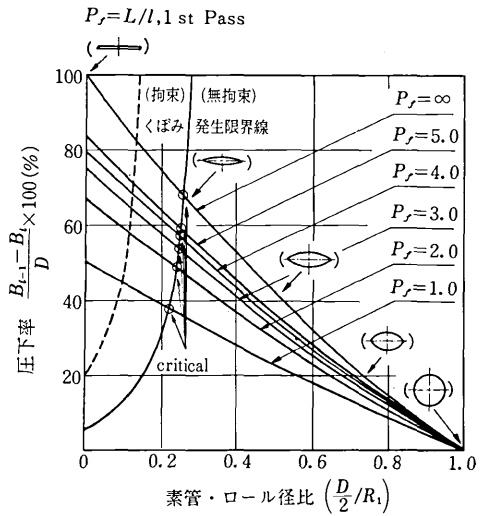


図3 最大圧下率線図

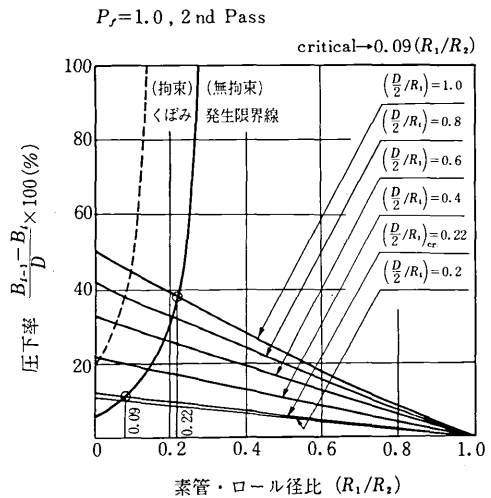


図4 最大圧下率線図

一方、図中に示した上下辺部のくぼみ発生限界線は、未焼鈍管についてこれまで筆者らが行ってきた一連の円弧形2・ロール、ボックス形2・ロールによる成形実験を通して得たものであり、この限界線の右側(下側)が正常な成形条件域、左側(上側)がくぼみが発生する可能性がある成形条件域である。さらに実線で示した限界線は、成形時に左右方向がフリーの場合、破線は左右方向から成形ロールまたはフランジロール等により拘束を加えた場合であり、図から明らかなように、左右方向からの拘束がある場合には上下辺にくぼみが発生しにくくなることを示している。なお、この限界線は厳密にはここでいう第1パスに対応するものであるが、第2パス以降も同様な限界線が適用できるものと仮定して検討を進

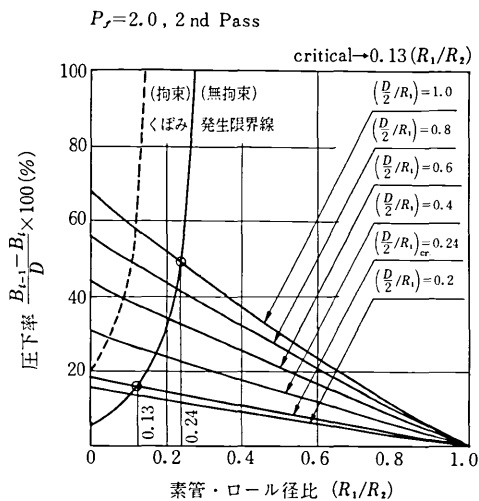


図5 最大圧下率線図

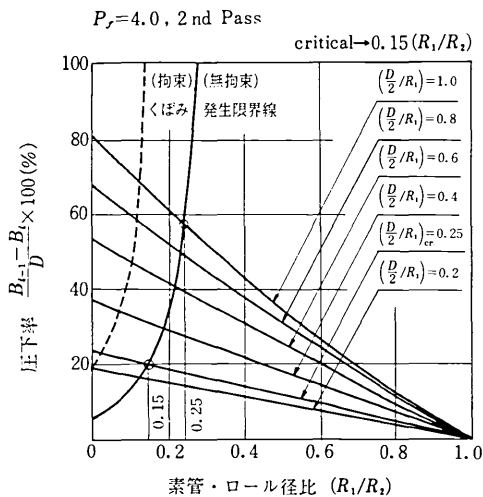


図7 最大圧下率線図

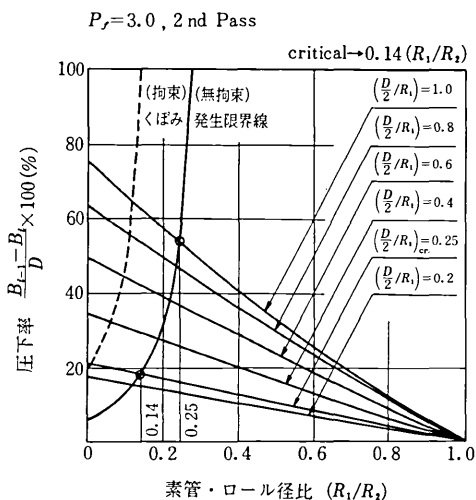


図6 最大圧下率線図

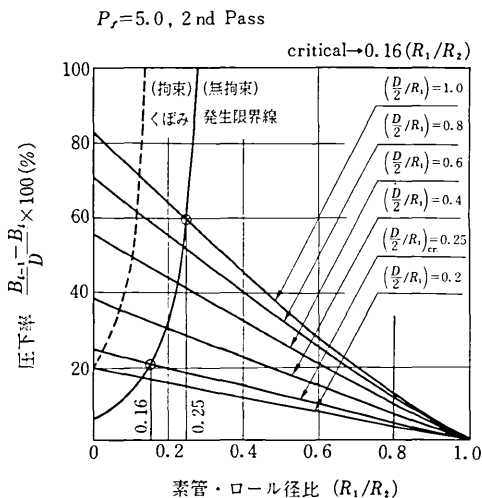


図8 最大圧下率線図

める。

くぼみ発生限界線の特性として、素管の機械的特性、 $D/t$  等により影響を受けることが当然予想される。筆者らの実験の範囲内では、素管を焼鈍した場合、 $D/t$  が増大した場合には、限界線が右下に移動しくぼみ発生域が広がる傾向がある。

5. パススケジュールの決定法

最大圧下率線図とくぼみ発生限界線とからパススケジュールを決定する手順は次のように行う。一般に  $P_f$  の値が増大する程正常成形域内できりうる最大圧下率は見掛け上増加するが、同時に用い得るロールの曲げ半径  $R_1$

は減少し、辺部を一度に急激に押しつぶすことは危険になる。以下、 $P_f = 5.0$  (左右の拘束なし) の場合を例にとると、まず第1パスについては (図3参照) 最大圧下率線と限界線との交点の  $D/2/R_1$  の値は約 0.25 で、これが可能な最小値となる。もちろん、 $D/2/R_1$  の値を選択しうるが最も効率的に成形を行うためにはこの最小値を目標とすることが望ましい。第2パスでは (図8参照)、第1パスで  $D/2/R_1 = 0.25$  を選択したとすると採用しうる限界の素管ロール径比  $R_1/R_2$  は 0.16 となる。同様にして第3パスでは (図9参照)、第2パスでの  $R_1/R_2 = 0.16$  であることを考慮して、この場合の最大圧下率線図を求

研究速報

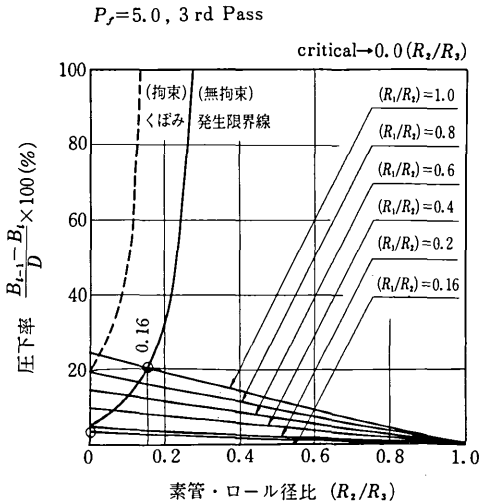


図9 最大圧下率線図

めると、この線図はくぼみ発生限界線と交わらず  $R_2/R_3 = 0$  の縦軸と交わる。これは第3パスではフラットロールを用いてもくぼみが発生しないことを意味しており、けっきょく、 $P_f = 5.0$  の製品は3パスで成形を終了できることを意味している。

これら3パスに対応する最大圧下率線図とくぼみの発生限界線線をまとめて示した結果が図10である。各パスで採りうる  $D/2/R_1, R_1/R_2, R_2/R_3$  の関係は上述の通りであるが、ここで注意すべき点は、各パスでの限界値に対応する最大圧下率の総和は、第1パスで  $D/2/R_1 = 0$  とした場合の理論上可能な最大圧下率に等しくなることである。このことは本報告で用いた変形の幾何学的モデルより説明されるが、別の表現を用いれば、第2パスでの最大圧下率線図は、第1パスの最大圧下率線図のうちくぼみ発生域内の部分 ( $0.0 \leq D/2/R_1 \leq 0.25$ ) について、横軸のスケールを変換し新たに  $0 \leq R_1/R_2 \leq 1.0$  の範囲に展開して示したものと考えることができ、第3パスの最大圧下率線図と第2パスの最大圧下率線図の関係も同様と言える。

ところで、以上の結果は、くぼみの発生限界線は各パスについて変わらないとの仮定の下で得たものである。言うまでもなくこの仮定の是非については未だ検討の余地は多い。たとえば、第2パスでの素管断面の上下辺の半径は  $R_1$  と考えているが、明らかに  $2R_1 > D$  である。他方、既述のように  $D/t$  によりくぼみ発生限界線は影響される傾向が得られている。したがって、第2パス以降では  $R_{i-1}/R_i$  の値として、ここに示したものよりやや大きめに選択することが必要となる可能性もあり、そのため、成形終了までに3パスではなく4パスが必要となる可能性もある。

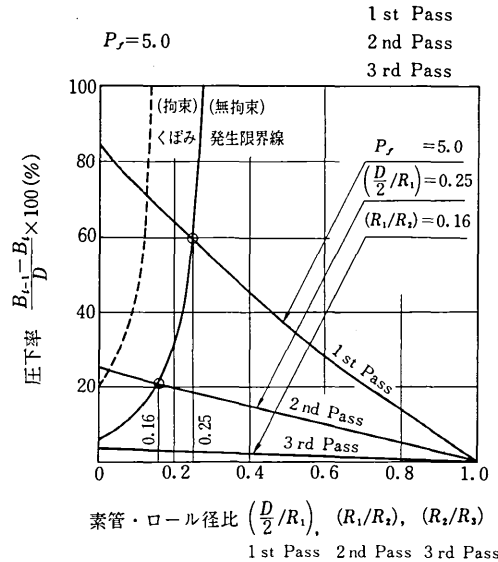


図10 最大圧下率線図

6. 実生産のパススケジュールとの比較

以上の結果と実生産の場で採用されているパススケジュールとを比較した結果、それらはいずれもここでいう正常領域に位置し、かつ、パススケジュールとして改善の可能性が残されていることが指摘された。このことから、上記の手法が実生産のパススケジュールの評価に有効であることが判った。

7. まとめ

本報告では、異形管のパススケジュールの決定法について検討した。この問題については、従来統一的な考え方が示されていないが、筆者らが提案した最大圧下率線図とくぼみ発生限界線の組合せにより、パススケジュールの設計およびその評価が、一定の手順に従い、論理的に行い得るようになるものと考えられる。ただし、くぼみ発生限界線については、(1)各種条件因子がどのような影響を与えるか、(2)評価基準として、くぼみの発生限界の他に何を考慮するか、という2点からより深く検討を進める必要がある。(1)についてはより広範な実験と併せて解析的なアプローチを、(2)については角形管の場合のコーナー部の成形度、断面の絞り率等が考えられるが、いずれも今後の課題としたい。

(1978年9月18日受理)

参考文献

- 1) 木内・新谷・三浦・岩崎；第25 塑加連講論集(133)
- 2) 木内・新谷・岩崎；昭50 塑加春講論集(377)
- 3) 木内・新谷・岩崎；第26 塑加連講論集(9)
- 4) 木内・新谷・戸沢；第29 塑加連講論集(372)