

# アカデミックオープンプログラム報告書

管端のネッキング時の成形条件がしわの発生に及ぼす影響

期間 平成21年6月～平成23年5月

香川高等専門学校  
機械工学科

木原茂文

# 目 次

1 . 緒言	・ ・ ・ ・ 2
2 . 実験および計算方法件	・ ・ ・ ・ 3
3 . 結果および考察	・ ・ ・ ・ 5
3.1 2ローラー成形による変形形状	・ ・ ・ ・ 5
3.2 ローラー総接触回数と真円度との関係	・ ・ ・ ・ 9
4 . 結言	・ ・ ・ ・ 1 1
参考文献	・ ・ ・ ・ 1 1

## 1. 緒 言

ネッキングは、管材の胴部や端部を外側から絞ってくびれを作る回転成形法の一つであり、自動車用排気部品あるいは家電製品等の円管形状部品の製造に用いられている<sup>1)</sup>。近年、これらの製品に対するニーズの多様化から多品種少量生産が求められる一方、製造コスト削減の要請は非常に強い<sup>2), 3)</sup>。ネッキングに使用されるローラー工具の負荷は通常のプレス成形に比べてかなり小さいため、使用される工具および設備の小型化が可能であり、製作費を低く抑えることが可能となる。これらのことから管材のネッキングは、製造コスト削減や多品種少量生産への対応が容易な成形技術として注目されている。

ネッキングされる素材はローラーに接触していない自由表面領域が広いいため、その変形は複雑となる。また、他の成形法に比べて成形条件因子が多いため、しわや割れ等の欠陥に対して適切な成形条件を見出すことは難しい。これまでに、管胴部あるいは管端のネッキング時の成形条件と加工精度について、実験的研究<sup>1), 2), 4)</sup>および数値シミュレーションによる解析<sup>5)-7)</sup>が行われている。しかし、素材の変形挙動については未だに不明な点が多く、特にしわの発生メカニズムについては十分に明らかになっていない。

本研究では、自動車用排気管を対象とした管端のネッキング時の実験およびシミュレーションを行い<sup>8), 9)</sup>、それらの結果から、素材の変形機構およびしわの発生機構に対する考察を行った。そして、ローラーと素材との総接触回数を定義することで、しわに対する成形限界条件について検討を行った。

## 2. 実験および計算方法

Fig. 1 および Fig. 2 に成形方法の模式図を示す。Fig. 1 (a)および(b)に示すように、外径 120.0 mm、肉厚 1.5 mm の管端を縮径部の外径 54.0 mm、テーパ角  $28.8^\circ$  にネッキングする。縮径部の縮管率は 0.45 である。外径 100.0 mm、先端曲率半径 8.0 mm のローラーが、ジグにより固定された円管の周りを螺旋運動しながら軸方向に往復し、さらに半径方向に移動することによりネッキングを行う。r-z 平面内のローラー先端の軌跡を Fig. 1 (c) に示す。ローラーが 1 回転公転運動する間の軸方向の移動量（軸方向の成形リード）を  $L$  とし、軸方向に 1 往復する間の半径方向の移動量（半径方向の成形ピッチ）を  $P$  とする。ローラーは、図に示すように第 1 パスから第  $N$  パスまで  $N$  回往復移動し、その後縮径部の外径になるように最終パスの成形が行われる。成形開始から終了するまでのローラーの半径方向の移動量  $r_p$  は 33.0 mm であり、パス数  $N$  は  $N = \text{int}(r_p / P) + 1$  となる。ここで  $\text{int}(X)$  は実数  $X$  の整数部を表す記号である。成形に使用するローラー数  $N_R$  は 1 ~ 3 の 3 条件である。Fig.2 に示すようにローラー数  $N_R$  が 2（2 ローラー成形）の場合は  $180^\circ$  間隔に配置し、ローラー数  $N_R$  が 3（3 ローラー成形）の場合は  $120^\circ$  間隔に配置する。これらのローラーはそれぞれの

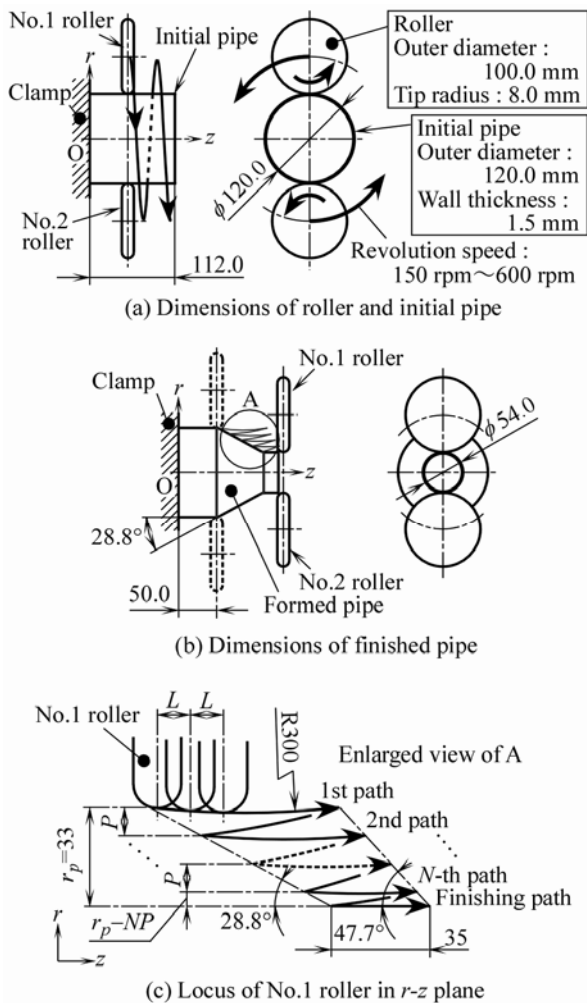


Fig. 1 Schematic illustration of necking process

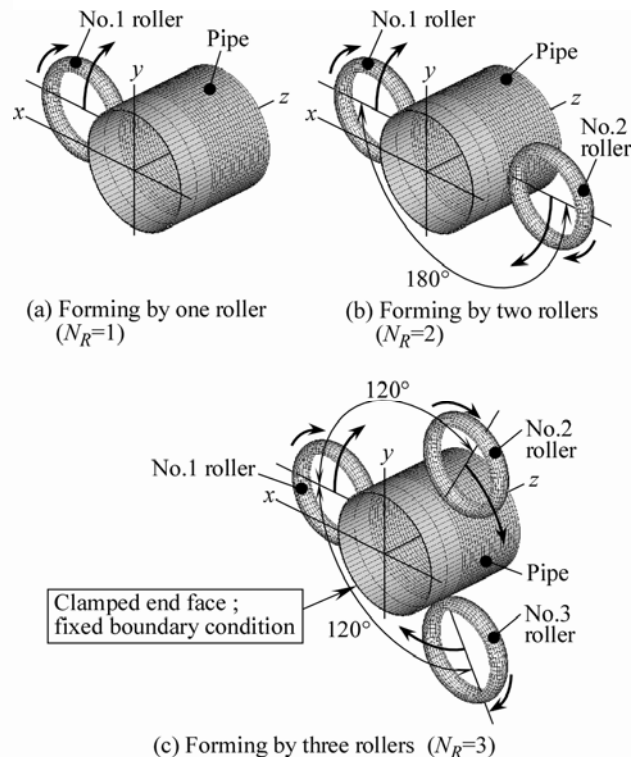


Fig. 2 Initial model for finite element analysis

間隔を保ったまま螺旋運動と往復運動が行われる。したがって、軸方向の成形ピッチはローラー数が多いほど小さくなり、軸方向の成形ピッチ = 軸方向の成形リード  $L$  / ローラー数  $N_R$  の関係となる。

Table 1 に成形条件を示す。2 ローラー成形の場合は実験とシミュレーションを行い、1 ローラー成形および3 ローラー成形の場合はシミュレーションのみを行う。

Table 2 に円管の機械的性質を示す。円管材料はフェライト系ステンレス鋼 (SUS409) であり、Table 2 に示す機械的性質は、円管から切り出された JIS Z 2201 の 13B 号の試験片を引張試験することにより求めたものである。

実験に使用する成形機は、素材が固定式のパイプ成形機 (VF-SR150-CNC4-T4: 日本スピンドル製造 (株) 製) である。ネッキングされた管端の寸法精度を検証するために、縮径部の断面形状を測定し、最大内接円中心法により真円度  $\Delta r$  を算出する。シミュレーションは、動的陽解法で定式化された有限要素解析ソフト RADIOSS (アルテアエンジニアリング (株) 製) を用いる。円管を肉厚方向に 3 要素の総要素数 5520 の 6 面体要素でモデル化し、境界条件としてクランプされる端面を固定とする。ローラーは剛体として取り扱い、円管とローラーとの間の摩擦係数は、0.15 と仮定する。ローラーは、シミュレーションにおいても、円管との接触により自転するため同期している。動的陽解法による計算を行うにあたり、事前に素材の密度を種々の値に仮想的に設定して計算を試み、計算中の全エネルギーに対する運動エネルギーの比率を求めると共に算出される応力値を比較した。さらに、算出された円管の長手方向肉厚分布を実験による実測値と比較した。これらの結果と計算効率を考慮し、密度は  $7.8 \times 10^{-4} \text{ kg/mm}^3$  とした。この時の全エネルギーに対する運動エネルギーの比率は 1% 以下であった。本計算で算出される応力値は、静的陰解法 (RADIOSS の陰解法モード) で算出した値とほぼ同程度であることを確認している。静的陰解法の場合、計算時間が膨大に必要であったため、本研究では、動的陽解法を用いることとした。動的陽解法での計算時間は、1 条件あたり約 80 時間 (Xeon-3.6GHz の 2CPU を使用) であった。

**Table 1** Forming conditions

Number of rollers $N_R$	Radial pitch $P$ / mm	Axial lead $L$ / mm
1	2.4	8.0, 10.0, 12.0, 15.0
2	1.6	6.0, 12.0, 24.0, 30.0
	2.4	6.0, 12.0, 20.0, 24.0, 30.0
	3.0	6.0, 12.0, 16.0, 24.0
	5.0	6.0, 12.0, 16.0
	7.0	6.0, 12.0, 16.0
3	2.4	24.0, 30.0, 36.0, 45.0

**Table 2** Mechanical properties of initial pipe

Young's modulus : 210.0 GPa
Poisson's ratio : 0.3
0.2% proof stress : 230.0 MPa
$n$ value : 0.250
Flow stress : $\bar{\sigma} = 280.0 \bar{\epsilon}^{0.250} + 110.0$ MPa

### 3. 結果および考察

#### 3.1 2ローラー成形による変形形状

Fig. 3 に半径方向の成形ピッチ  $P=2.4$  mm の条件下で、軸方向の成形リード  $L=6.0$  mm および  $L=30.0$  mm で成形した場合の実験およびシミュレーションによって得られた円管の外観図をそれぞれ示す。軸方向の成形リード  $L$  が小さい  $L=6.0$  mm では、縮径部の真円度  $\Delta r$  の実測値は  $0.13$  mm、シミュレーションによるその値は  $0.14$  mm であり、Fig. 3 (a) に示すようにどちらも良好な寸法精度にネックングされた。しかし、 $L$  が大きい  $L=30.0$  mm では、Fig. 3 (b) に示すように実験およびシミュレーションのいずれの場合も縮径部に大きなしわが発生した。 $L=30.0$  mm の場合のシミュレーションにおいて、成形初期の半径  $r=50$  mm の成形中の管端に凹凸変形が生じ始め、この変形が顕著なしわへ進展する様子が観察された。葉山<sup>1)</sup> は、管端の等ピッチネックングの実験において、送り速度が小さく、ピッチが大きい場合にネック部の壁厚減少が大きくなり破断に至ると述べている。また、管端のテーパリングにおいては、送り速度やピッチが大きくなるとテーパ部の先端にへこみが生じると述べている。本研究では、いずれの成形条件においても割れは認められなかったが、ピッチ  $P$  やリード  $L$  が大きい条件で管端にしわが生じた。そこで、半径が  $50$  mm 近傍の成形初期の縮径部の変形に着目して考察を行う。

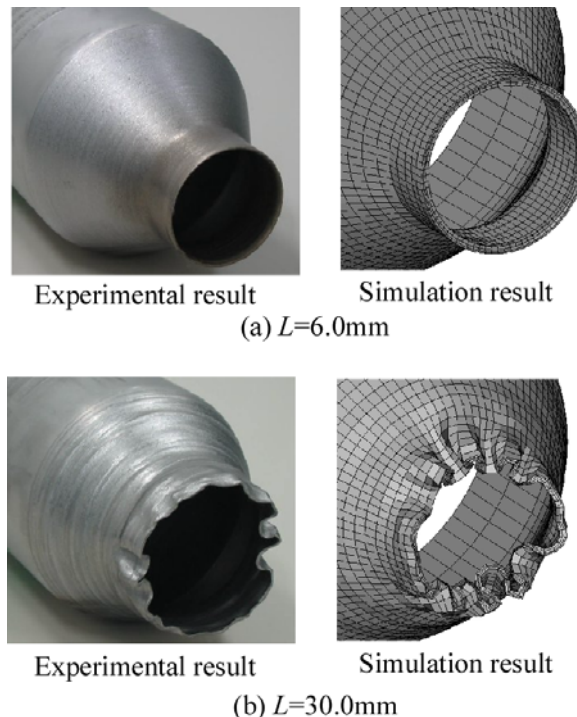


Fig. 3 Appearance of formed pipe ( $P=2.4$ mm)

Fig. 4 (a) に  $P=7.0$  mm で  $L$  が小さい  $L=6.0$  mm の条件のシミュレーションによって算出された縮径部の周方向曲率分布の推移を示す．曲率は図中の模式図に示すように，管端から  $4.0$  mm の位置である  $z_m=117.0$  mm の断面内における外表面の3つの節点座標から求めたものである．ローラーの設定位置を表す変数として先端の半径方向座標（縮管設定半径）を  $r_R$ ，長手方向座標を  $z_R$ ，軸心の角度を  $\alpha$  とし， $r_R=45.6$  mm， $z_R=112.6$  mm ~  $115.0$  mm， $\alpha=36^\circ \sim 180^\circ$  の範囲について示している．Fig.4 (a) において横軸の周方向位置  $\theta = 72^\circ$  の曲率  $\rho^{-1}$  に着目すると，ローラーの位置が  $\alpha=36^\circ$  では  $\rho^{-1}=0.022$  mm $^{-1}$  であるのに対し， $\alpha=72^\circ$  ではローラーの接触により  $\rho^{-1}=0.016$  mm $^{-1}$  にいったん減少する．しかし  $\alpha=108^\circ$  では  $\rho^{-1}=0.024$  mm $^{-1}$  まで再び増加し， $\alpha=144^\circ$  ではほぼ縮管設定半径の曲率の値  $r_R^{-1}=0.022$  mm $^{-1}$  となる．すなわち，ローラーの接触によりローラー形状に沿うための曲率の減少（曲げ戻し）とローラーから離れた後の閉断面である円管形状を保つための曲率の増加（曲げ）を

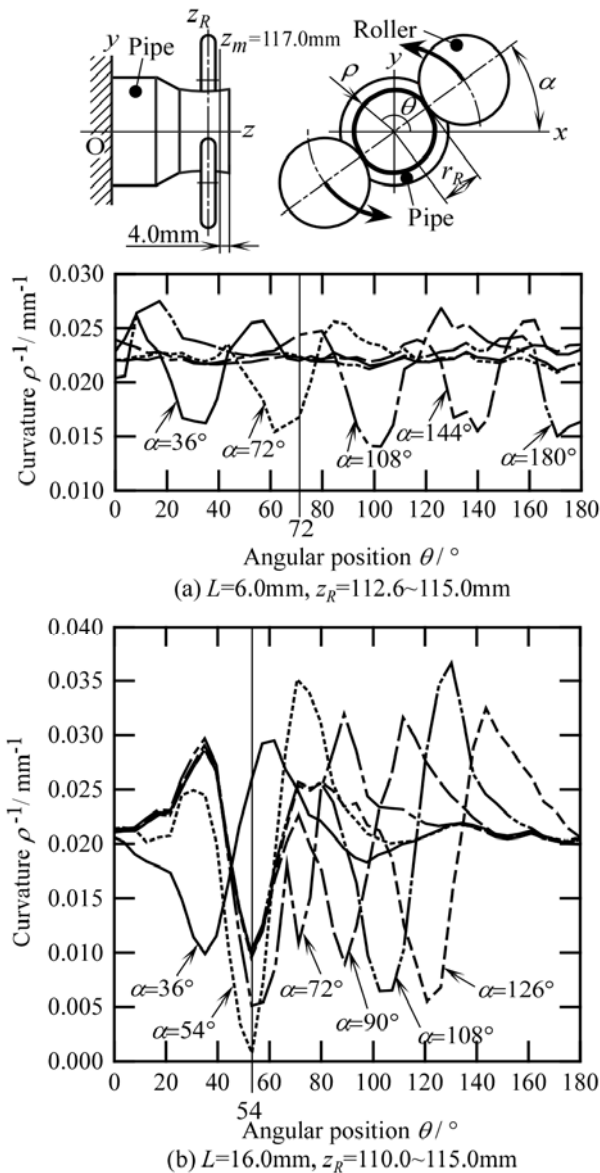


Fig. 4 Transition of curvature distribution in cross section at  $z=z_m=117.0$  mm ( $P=7.0$  mm,  $r_R=45.6$  mm, simulation result)

繰り返しながら徐々に縮径成形が行われる．瀧澤ら<sup>10)</sup>は，管材のヘリカルロール加工の有限要素解析と実験において，円周方向の曲げ変形がロールとの接触の前後で方向が逆転し，この変形は余剰変形であると述べている．本研究においても同様な曲げ戻しと曲げ変形が繰り返され，Fig. 4 (a)に示す成形条件では，余剰な曲げ戻し変形は成形後に残留していない．この成形条件の製品における縮径部の真円度 $\Delta r$ の実測値は0.12 mmであり，良好な寸法精度にネッキングされた．同様に Fig. 4 (b) に  $P=7.0$  mm で  $L$  が大きい  $L=16.0$  mm の条件の周方向曲率分布の推移について， $r_R=45.6$  mm， $z_R=110.0$  mm ~ 115.0 mm， $\alpha=36^\circ \sim 126^\circ$  の範囲について示す．横軸の周方向位置 $\theta=54^\circ$  の曲率 $\rho^{-1}$ に着目すると，ローラーの位置 $\alpha=36^\circ$  では $\rho^{-1}=0.025$  mm<sup>-1</sup>であるのに対し， $\alpha=54^\circ$  では $\rho^{-1}=0.001$  mm<sup>-1</sup>にまで急激に減少している． $\alpha=90^\circ$  では $\rho^{-1}=0.010$  mm<sup>-1</sup>のままほぼ一定値となり， $r_R^{-1}=0.022$  mm<sup>-1</sup>まで増加しない．すなわち  $L$  が大きい場合，ローラーの接触により急激な曲げ戻し変形が行われ，その変形が残留する箇所が部分的に生じ，周方向に不均一な形状となる．引き続きシミュレーションを行った結果，成形が進むにつれて $\theta=54^\circ$  の位置でくぼみが発生し，顕著なしわへと進展した．この成形条件の製品における縮径部の真円度 $\Delta r$ の実測値は14.3 mmであり，成形不良となった．

余剰変形である曲げ戻しと曲げの変形挙動をさらに詳細に調べるため，シミュレーションによって算出された応力について考察を行う．Fig. 5 にローラー接触領域とその近傍の周方向応力 $\sigma_p$ および長手方向応力 $\sigma_l$ の分布をそれぞれ示す．これらの応力は，要素を構成する節点座標から変形形状に沿った周方向と長手方向を決定し，算出された応力成分を変形形状に

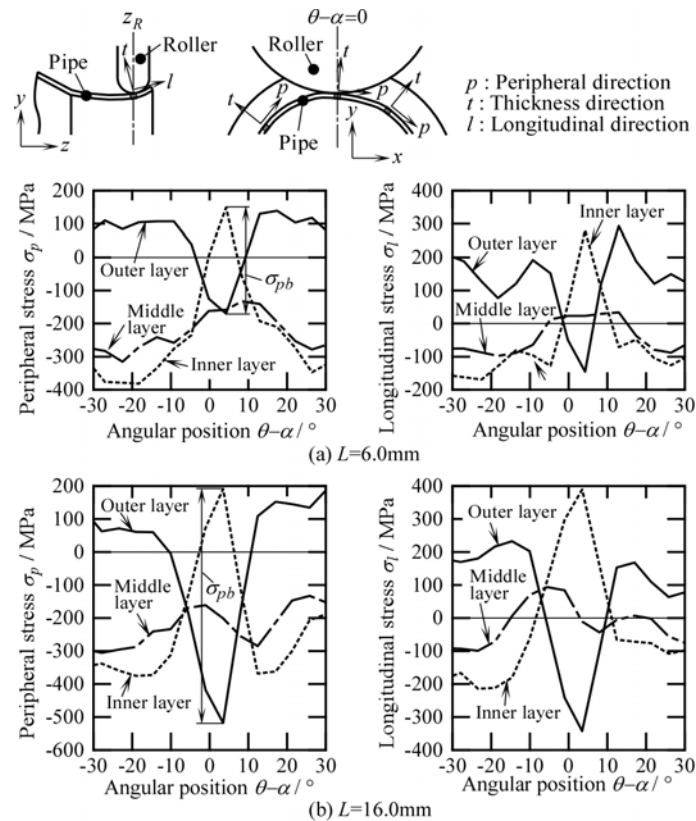
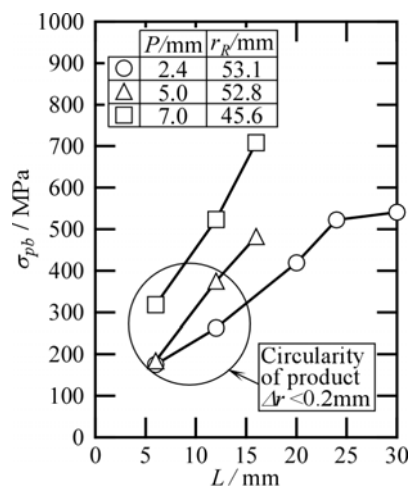


Fig. 5 Distribution of peripheral stress  $\sigma_p$  and longitudinal stress  $\sigma_l$  in cross section at  $z=z_R=115.0$ mm ( $P=7.0$ mm,  $r_R=45.6$ mm, simulation result)

沿った局所座標系に座標変換したものである．応力は外側層，内側層，中間層の値についてそれぞれ示している．横軸の $\theta - \alpha$ は円管とローラーとの位置関係を表し， $\theta - \alpha = 0^\circ$ はローラー直下であることを示す． $P = 7.0 \text{ mm}$ で $L = 6.0 \text{ mm}$ の条件の $r_R = 45.6 \text{ mm}$ ， $z_R = 115.0 \text{ mm}$ の場合の応力分布を Fig. 5 (a) に示す．左図に示す周方向応力 $\sigma_p$ の値は，ローラー接触領域の $\theta - \alpha = 4^\circ$ 近傍において内側層 > 外側層となっている．これは Fig. 4 (a) に示した曲率の減少，すなわち曲げ戻し変形に対応した関係になっている．また $\theta - \alpha < -2^\circ$ の領域では内側層 < 外側層となっており，曲率の増加すなわち曲げ変形に対応した関係になっている．一方，中間層の値は負の値であり，円管は周方向の圧縮力の下で曲げ戻しと曲げの変形が行われていることがわかる．同様に $P = 7.0 \text{ mm}$ で $L$ が大きい $L = 16.0 \text{ mm}$ の応力分布を Fig. 5 (b) に示す．左図に示す周方向応力 $\sigma_p$ の内，外，中間層の関係は $L = 6.0 \text{ mm}$ の場合と同様の傾向である．しかし，ローラー接触領域の $\theta - \alpha = 4^\circ$ 近傍における内側層と外側層の値の差は $L = 6.0 \text{ mm}$ の場合に比べてかなり大きい．そこで，外側層の $\sigma_p$ と内側層の $\sigma_p$ との差を求め，ローラーとの接触領域内の最大値を $\sigma_{pb}$ とし，成形条件が $\sigma_{pb}$ に及ぼす影響を Fig. 6 に示す． $\sigma_{pb}$ は $L$ および $P$ が大きいほど大きくなる．本研究では， $\sigma_{pb}$ が小さい Fig. 6 中で囲まれた範囲内で示される成形条件の場合，成形された製品の縮径部の真円度 $\Delta r$ は $0.2 \text{ mm}$ 以下となり，良好な寸法精度の製品が成形されることを実験およびシミュレーション結果から確認された．以上のことから，しわの発生機構を説明すると次のようになる．ローラーの長手方向リードあるいは半径方向ピッチが大きい場合，ローラーとの接触領域で円管は，周方向に大きな曲げ戻し変形を受け，曲率が一時的に急激に減少する．ローラーから離れた後は曲げ変形を受け，曲率は増加するが，過度の曲げ戻し変形を受けた箇所は縮管設定半径の曲率の値まで増加せず，曲げ戻された変形が残留し，曲率が周方向に不均一となる．円管には周方向に圧縮力が働いているため，残留した曲率の不均一は解消することなく助長され，次第にしわへと進行する．



**Fig. 6** Effect of forming conditions on maximum  $\sigma_{pb}$  of the difference of outer  $\sigma_p$  and inner  $\sigma_p$  in contact area shown in Fig. 5 ( $z_R = 115.0 \text{ mm}$ , simulation result)

Fig. 5 (a) および (b) の右図に,  $L= 6.0$  mm および  $L= 16.0$  mm の場合の長手方向応力 $\sigma$ をそれぞれ示す.  $\sigma$ の中間層の絶対値は全周に渡って 100 MPa 以下となっており,  $\sigma_p$ の中間層の絶対値に比べて小さい.

### 3.2 ローラー総接触回数と真円度との関係

軸方向および半径方向の成形ピッチが小さいほど良好な寸法精度にネッキングできる. しかし成形時間を短縮するためにはそれらは大きい方が望ましい. そこで, 成形時間が短くかつ良好な寸法精度が得られる最適な成形条件を見出すためのパラメータとして, 任意の  $r$ - $z$  平面内の円管とローラーとの総接触回数  $n_C$ を定義する<sup>11)</sup>. 本研究の総接触回数  $n_C$ は, Fig. 1 (c) に示した  $r$ - $z$  平面内のローラー先端の軌跡長から求められる値であり, 算出式を式 (1) に示す.

$$n_C = \frac{N_R}{L} \left[ \left\{ \text{int} \left( \frac{r_p}{P} \right) + 1 \right\} \left( \frac{F_1 + F_N}{2} \right) + \text{int} \left( \frac{r_p}{P} \right) \left( \frac{B_2 + B_N}{2} \right) + (F_F + B_F) \right] \quad (1)$$

式中の変数は Fig. 7 に示される各部の長さを表している. ローラーの往復移動の軌跡長は, 等差数列により表すことができる. 式 (1) 中の大括弧内の第 1 項は第 1 パスから第  $N$  パスまでの往路の軌跡長を表し, 第 2 項は第 2 パスから第  $N$  パスまでの復路の軌跡長を表し, 第 3 項は最終パスの軌跡長を表している. 式 (1) から明らかなように, 総接触回数  $n_C$ はローラー数  $N_R$ に比例し, 軸方向の成形リード  $L$ に反比例し, また半径方向の成形ピッチ  $P$ の増加とともにほぼ反比例して減少する値である.

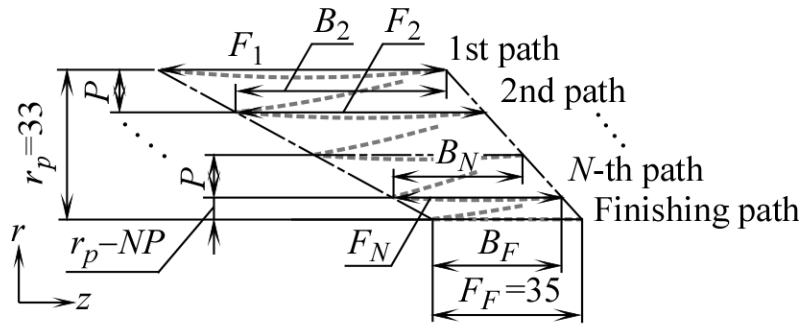


Fig. 7 Notations of locus length shown in Fig. 1(c)

Fig. 8 に 2 ロールー成形 ( $N_R=2$ ) の場合の総接触回数  $n_c$  と製品の縮径部の真円度  $\Delta r$  との関係に及ぼす半径方向の成形ピッチ  $P$  の影響を示す。いずれの  $P$  の場合も  $n_c$  が小さくなると  $\Delta r$  は急激に増加する。 $n_c = 150$  回にて成形された製品の真円度  $\Delta r$  に着目すると、 $P = 3.0$  mm の成形条件では  $\Delta r = 0.5$  mm になるのに対し、 $P = 5.0$  mm では  $\Delta r = 0.2$  mm となっている。したがって本研究の成形条件範囲では、 $P = 5.0$  mm が  $n_c$  が小さくかつ良好な真円度が得られる成形条件であることがわかる。

Fig. 9 に半径方向の成形ピッチ  $P=2.4$  mm の条件下の総接触回数  $n_c$  と製品の縮径部の真円度  $\Delta r$  との関係に及ぼすローラー数  $N_R$  の影響を示す。いずれの  $N_R$  の場合も  $n_c$  に対する  $\Delta r$  の値はほぼ同様な値となっており、 $P$  が一定の条件下では、 $\Delta r$  は  $n_c$  に依存することがわかる。したがって、ローラー数を増加しそれに比例して  $L$  を大きくすることにより成形時間の短縮を図ったとしても、製品の真円度は同程度なものに成形可能であることがわかる。

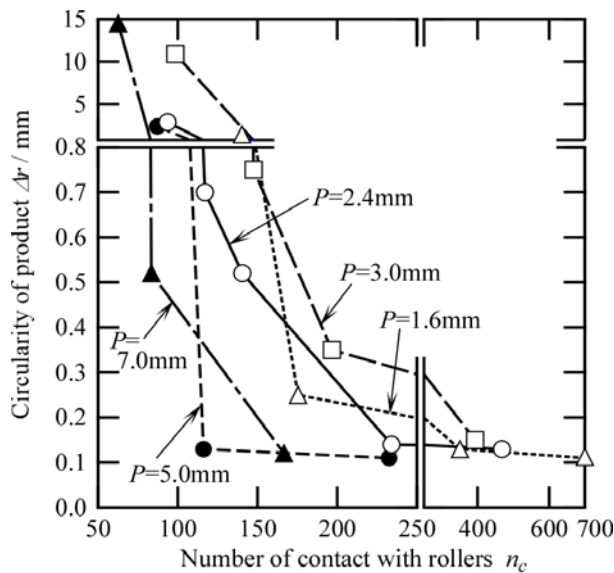


Fig. 8 Effect of radial pitch  $P$  on relationship between circularity of product  $\Delta r$  and number of contact with rollers  $n_c$  ( $N_R=2$ , experimental results)

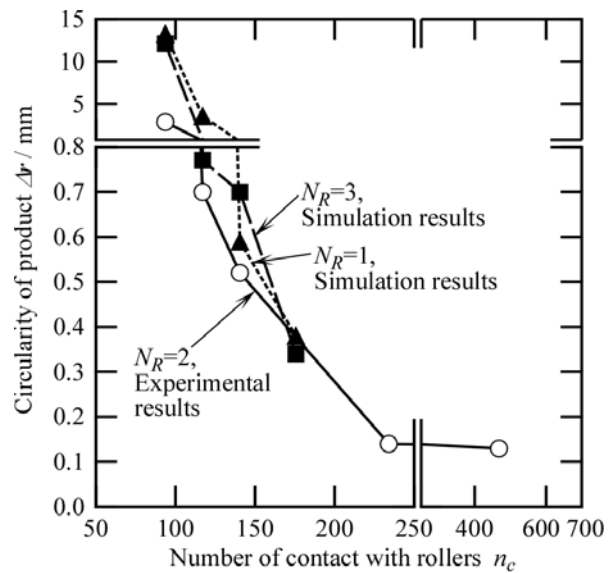


Fig. 9 Effect of number of rollers  $N_R$  on relationship between circularity of product  $\Delta r$  and number of contact with rollers  $n_c$  ( $P=2.4$ mm)

## 4. 結 言

- (1) 円管は周方向の圧縮力の下でローラーの接触による曲率の減少(曲げ戻し)とローラーから離れた後の曲率の増加(曲げ)を繰り返し受けながら徐々に縮径成形される。
- (2) ローラーの軸方向あるいは半径方向の成形ピッチが大きい場合,成形初期の接触領域において,外側で圧縮,内側で引張の大きな周方向応力が生じる。その位置で円管は局所的に過度の曲げ戻し変形を受け,曲率が周方向に不均一となる。円管には周方向に圧縮力が働いているため,残留した曲率の不均一は解消することなく助長され,しわへと進行する。
- (3)  $r$ - $z$  平面内のローラーの総接触回数の算出方法を提案し,総接触回数が多いほど製品の縮径部の真円度は小さくなることを明らかにした。それらの関係から,成形時間が短くかつ良好な寸法精度が得られる最適な管端のネッキング時の成形条件が容易に見出された。

## 参考文献

- 1) 葉山益次郎:新回転加工,(1992),244-259,近代編集社。
- 2) 村田眞・牟田玲子:塑性と加工,42-481(2001),124-128。
- 3) 団野敦:同上,43-502(2002),1023。
- 4) Yao, J. & Murata, M.: J. Mater. Process. Technol., **166**(2005), 405-410。
- 5) 安藤彰啓・坂本和志・狩野忍・原健治:平19 塑加春講論(2007),185-186。
- 6) Xia, Q.X., Cheng, X.Q., Hu, Y. & Ruan, F.: Int. J. Mech. Sci., **48**(2006), 726-735。
- 7) Xia, Q.X., Xie, S.W., Huo, Y.L. & Ruan, F.: J. Mater. Process. Technol., **206**(2008), 500-508。
- 8) 木原茂文・水本宏明・石田博昭・飯尾良夫:平18 塑加春講論(2006),217-218。
- 9) 木原茂文・水本宏明・石田博昭・飯尾良夫・中田雄也:57 回塑加連講論(2006),367-368。
- 10) 瀧澤英男・木村敏郎:塑性と加工,40-465(1999),987-991。
- 11) 瀧澤英男・木村敏郎:同上,40-459(1999),343-347。