PCR 加工における拡張の影響*

森 敏彦^{*1}, 斉藤雄二^{*2}, 中島邦彦^{*3}

Influence of Radial Expansion on PCR Forming

Toshihiko MORI, Yuji SAITO and Kunihiko NAKASHIMA

A new process for tube ironing, the "planetary conical rolling" (PCR) process, is proposed. A number of rollers rotate around the cone while revolving around their respective axes, preventing sliding friction which is the main cause of galling and breakage in the conventional ironing process. In the case of marked thinning, bulging occurs at the inlet, producing an unsteady process. In this study, PCR forming is improved by suppressing bulging during radial expansion. Keeping the reduction constant, $R=0.42$, the radial expansion ratio E was varied as 0.025 and 0.049. Two motions, forward and backward, of the tube and die, were tested. The deformation characteristics were discussed based on the strain measurements and stress conditions on the equilibrium equation. From the discussions it was clarified that bulging is suppressed by the bending tensile stress and circumferential extension. Furthermore, the optimum conditions for suppressing bulging and the mechanism of producing a mirror finish were discussed.

Key Words: Plastic Forming, Friction, Formability, Bearing, Planetary Conical Rolling, Radial Expansion, Bulging, Mirror Finish

1. 緒 言

既報において、塑性加工のみによって平滑な表面を有する高機能円管を作成する“プラネタリ・コンカル・ローリング”(PCR 加工)を開発し、報告した⁽¹⁾。この加工によって、通常のしごき加工に見られる問題点、すなわち、工具表面と素材表面の間の滑り摩擦による焼付き、破断といった欠陥が克服された。しかも得られる表面性状はしごき加工によるよりも高性能で、原理的には100%近くの高断面減少率の加工が可能という別の大きな利点もある。類似の加工法である回転しごき加工に比べても、「(1)小径管の加工も可能である。(2)工具であるローラを支える軸には横力が作用しない。(3)支持軸径はほぼ製品内径に等しくとれる。(4)軸の剛性が高いために高い製品精度が期待できる。(5)ローラと素材の間の周方向の滑りが零である」などの利点がある。

ところが、本 PCR 加工においても、回転しごき加工においてと同様に、大きな壁厚減少率、速い送り速

度の場合、ロール前面に素材の一部が盛り上がるのが見られ、これが加工中成長し変形が非定常となる原因となる。このとき、加工力増大や製品精度劣化などの悪影響を及ぼすことになる。回転しごき加工における盛り上がり抑制策としては、素材に前方張力を付加し、盛り上がりを誘起する圧縮雰囲気を軽減する方法などがとられている⁽²⁾。

本報では、盛り上がり圧縮雰囲気を容易に軽減する一つの方策として、拡張を加えた PCR 加工を提案し、拡張が変形状態に与える影響を実験的に調べた。拡張を行えば盛り上がりは消滅するが、拡張率を増すに従って軸力は増加するため、壁厚減少率に応じて適切な拡張率が存在すること、拡張と PCR 加工との間に変形遷移が存在すること等を指摘した。また、PCR 加工による平滑面形成に新たな知見を加えた。

2. 加工原理および実験装置

2・1 加工原理 図1に本報で提案する拡張を加えた PCR 加工の加工原理を示す。PCR 加工は、回転するダイスに加工素材を納め、軸方向に多数列のテーパローラを送り、素材とテーパローラ間に摩擦力を作用させ、ローラを自転と同時に公転させて管壁をしごく加工法である。

* 原稿受付 1996年1月8日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 准員, 名古屋大学大学院。^{*3} 名古屋大学大学院。

2・2 実験装置 実験装置は既報⁽¹⁾と同一のものをを用いた。ダイス(内径 66.0 mm)は, SKD 11 を焼入れ後に円筒内面研削することにより軸方向の中心線平均粗さが 0.03 μm に仕上げられている。製品外径はこのダイス内径に規定される。また, 加工終了後の製品

Fig.1 Forming principle of planetary conical rolling with expansion

Fig. 2 Bulging in planetary conical rolling

(a) Forward process (b) Backward process

Fig. 3 Process types

加工機械には普通旋盤を用い、主軸のチャックにダイスを固定し、心押し台に取付けた円すいローラ軸受用ホルダを自動送りした。ローラにはごく少量の切削油を塗布し、試料とダイス内面はアセトン洗浄した。

2.3 送り力, 円周方向接線力の測定 円すいローラ軸受用ホルダに作用する軸方向送り力 P と円周方向接線力 T は, ホルダ中間薄肉部の変形をひずみゲージで取出すことにより測定した。測定された P , T 両成分力は滑り抵抗抗変位計で取出したローラストロークに対して, X - Y レコーダに記録した。

実験条件を表1にまとめて示す。

3・1 加工素材 既報⁽¹⁾と同一の高強度の固溶強化形アルミニウム合金 A 5052-H 14 の押し出しパイプ (外径 70 mm, 内径 60 mm) を試験用素材とした。表 2 に機械的性質を示すが, 引張強さは 251 MPa と高く, 延性尺度の n 値は 0.088 と比較的低い。

3・2 ダイスの回転数，ローラの送り速度 ダイ
スの回転数は 400 rpm 一定とした。また，円すいロー
ラ軸受用ホルダの送りも 40 mm/min 一定としたの
で，ローラの送り速度は 0.1 mm/rev となる。

3.3 素材寸法, 壁厚減少率・ R , 拡張率・ E およびしごき付加尺度・ L 表3に素材外径, 内径, 壁厚減少率, 拡張率およびしごき付加尺度を示す。製品内径はローラ包絡円径の64.6 mm一定となる。製品外径は拡張終了後に多少ともしごきがあれば, 66.0 mm一定となる。ところが, 拡張終了後に66.0 mm以下で

Table 1 Working conditions

Process type: Forward, Backward
Workpiece: A5052-H14, Bearing type: 32306
Die revolution: 400 rpm, Roller feed: 0.1 mm/rev.

Table 2 Tensile properties of material used

Materials	σ_B /MPa	δ_U /%	δ_T /%	q_0 /%	n	F /MPa
A5052-H14	251	5.2	8.1	34	0.088	352

σ_B : Tensile strength,	δ_U : Uniform elongation,
δ_U : Total elongation,	q_0 : Reduction of area,
n : Strain hardening exponent,	F : Plastic coefficient

あれば、しごきも加わらずこの値が製品外径となる。
この相対関係等を念頭において壁厚減少率・ R 、拡張率・ E は決めなければならない。また、拡張後のしごき付加尺度・ L も考慮する。

図4に拡張を加えたPCR加工における寸法図を示す。図中の記号は以下の幾何学寸法である。

$r_{i,o}, r_{o,o}$: 素材内半径および外半径

$r_{i,f}, r_{o,f}$: 製品内半径および外半径

t_o, t_f : 素材および拡張後の壁厚

また、工具幾何学寸法を

$r_d = 33.0 \text{ mm}$: ダイス内半径

$r_R = 32.3 \text{ mm}$: ローラ包絡円外半径

$t_\theta = 0.7 \text{ mm}$: ダイス・ローラ包絡円間のすきま、しごき加わる場合の製品壁厚とする。

まず、ダイスがない拡張のみを仮想的に考える。この場合、軸方向に伸縮はないと便宜的に考え、体積一定則により次式を得る。ただし、この仮定は後述の結果で示すように厳密には成立しない。

$$r_{o,o}^2 - r_{i,o}^2 = r_{o,f}^2 - r_{i,f}^2$$

$$\therefore \frac{t_f}{t_o} = \frac{r_{i,o}}{r_R} = \frac{r_{i,o}}{32.3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

この関係式を用いて R, E は

$$R = 1 - \frac{t_f}{t_o} = 1 - \frac{r_{i,o}}{32.3},$$

$$E = \frac{r_{o,f}}{r_{o,o}} - 1 = \frac{32.3 - r_{i,o}}{r_{o,o}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と素材寸法のみで与えられる。

$t_f < t_\theta$, すなわち, $r_{i,o} \cdot t_o < 22.61$ の場合にはしごき加わらず, 式(2)で R, E が与えられる。このときには $L=0$ とする。

$r_{i,o} \cdot t_o \geq 22.61$ の場合にはしごき加わり、製品の壁厚は t_θ , 外半径は r_d となり, R, E は

$$R = 1 - \frac{0.7}{t_o}, E = \frac{33.0}{r_{o,o}} - 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。また, L は

$$L = \frac{t_f}{t_\theta} - 1 = \frac{r_{i,o} \cdot t_o}{22.61} - 1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

表3には式(2)~(4)で求めた、いわば公称の R, E, L も示した。なお、幾何学寸法は内、外半径の2変数、したがって、 R, E, L を全く独立には決められない。実験番号1は拡張のみでしごきに伴わないもの、実験番号3, 4, 5は $R=0.42$ 一定として E を0.02強ずつ変化させたもの、実験番号2, 3は $E=0.049$ 一定としてしごきの有無を比較したものである。

4. 実験結果および考察

4.1 変形状態

4.1.1 主要な変形状態(盛り上がり) 図5に拡張およびPCR加工 ($R=0.42, E=0.049, L=0.62$, 後方加工)を受けている材料部位の縦断面写真を示す。拡張部においては、材料とローラが接触する領域Cより前にすでに管が広がり始める領域Bが存在し、その領域の軸長さは領域Cの長さに匹敵する。領域Cにかかるまでの管内壁には盛り上がりの兆候は見られず、本研究の目的は達せられている。

他の条件についても拡張を行った $E=0.025, 0.049$ では、前方、後方にかかわらず盛り上がりは見られなかった。ただし、拡張を行わない $E=0$ では、明確にローラ前面に盛り上がりが生じていた。

4.1.2 ひずみ分布 次に、各部の変形状態をさ

Table 3 Dimension of tube-blank, reduction, expanding rate and ironing degree

Test No.	Before Forming		After Forming		R	E	L
	2r _{o,o} /mm	2r _{i,o} /mm	2r _{o,f} /mm	2r _{i,f} /mm			
1	62.9	61.7	65.5	64.6	0.045	0.041	0
2	62.9	61.4	66.0	64.6	0.067	0.049	0.018
3	62.9	60.5	66.0	64.6	0.42	0.049	0.61
4	64.4	62.0	66.0	64.6	0.42	0.025	0.65
5	65.8	63.4	66.0	64.6	0.42	0.003	0.68

Fig. 4 Dimension symbols of workpiece

Fig. 5 Longitudinal section of formed part

らに明確に知るために、この断面形状測定を基にしてひずみ分布ないしひずみ速度分布を求める。各ひずみ値を定義するために、以下の幾何学寸法の記号を図4に追加する。

z : 軸方向の位置

$r_{i,j}, r_{o,j}$: 加工途中の材料内半径および外半径

$\phi_{i,j}, \phi_{o,j}$: 材料内面および外面の軸に対する傾き

これらの測定値を用いて材料内外での円周ひずみ ε_θ 、せん断ひずみ γ_{zr} および平均としての半径ひずみ ε_r は以下のように求められる。ただし、 $\varepsilon_\theta, \gamma_{zr}$ は内側のみを表式する。

$$(\varepsilon_\theta)_i = \ln\left(\frac{r_{i,j}}{r_{i,o}}\right),$$

$$(\gamma_{zr})_i = \phi_{i,j}, \quad \varepsilon_r = \ln\left(\frac{r_{o,j} - r_{i,j}}{r_{o,o} - r_{i,o}}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

さらに、軸方向のひずみ ε_z は体積一定則から求められる。

図6に、軸方向位置に対して各垂直ひずみをとったひずみ分布を示す。条件は前方加工、 $E=0.049$ の場合である。横軸原点は領域CとDとの境界、すなわち、ダイスとの接触開始点とした。 z 軸のマイナス側が領域A、B、C、の素管、拡張部で、プラス側はしごき部である。拡張終了後の $z=0$ までは、各ひずみとも0.05以下と低いが、 $z>0$ になるとしごき加工を受け、板厚が減少し、軸方向に伸ばされる。

図7に拡張が同時に行われるPCR各加工条件における管内壁のせん断ひずみ分布を示す。ローラの傾き角に対応した $\gamma_{zr} \approx 0.2$ 一定値となる部分で、材料はローラと接触している。その領域(図1, 5ではC, D)は $E=0.049$ でほぼ -4 mm, $E=0.025$ でほぼ -1 mm で接触し始め、ローラ後端のほぼ2 mm で接触が終了している。図5でも見るように、管内壁はローラ接触開始端で急激に曲げられるのではなく、 -8 mm 辺りから徐々に曲げられ、拡張が始まっている。

Fig. 6 Normal strain distributions
(Forward process, $E=0.049$)

本研究の課題は、拡張を加えることにより盛り上がり度をどの程度抑制できるかである。それには、ダイスに材料が接触する前の状態(図6では、 $z<0$ の状態)を子細に検討する必要がある。それで、図8に $z<0$ における各垂直ひずみの表示を10倍にして分布を示す。前方、後方、 $E=0.025, 0.049$ の組合せで4条件の場合を示す。

全体に共通して見られる特徴としては、拡張により円周方向には伸び、 $z=0$ ではほぼ設定拡張率の値となっており、軸方向には縮んでいることである。

一方、条件を変えたことによる明確な相違が四つの図相互に見られる。

後方加工の板厚ひずみ、軸ひずみはマイナス側から $z=0$ に向けておおむねスムーズに増減しているのに対し、前方加工のそれらのひずみは軸方向に亘って周期的(周期はほぼ2 mm)に変動している。前方加工の素管部は拘束されていないため、その部分はある程度首振っているものと思われる。したがって、管周全体の平均は変動の中心で見るとべきものとなる。この平均で見ると板厚ひずみは、前方加工、 $E=0.025$ において $z=-8$ mm までほぼ零、それより $z=0$ に向け、若干縮み変形となる。拡張率をさらに上げて $E=0.049$ すると縮み変形の量は大きくなる。ところが、後方加工になると、 $E=0.025$ において明らかな伸び変形、すなわち、板厚増となっている。 $E=0.049$ にして始めて零もしくはマイナスひずみとなる。

円周ひずみの $z=-15 \sim -10$ mm における接触部に遠い材料部に着目すると、前方、後方にかかわらず $E=0.025$ では零ひずみであるのに対し、 $E=0.049$ ではすでに0.01以上のひずみとなっている。前方加工の方が、 $E=0.025$ ではひずみ始める位置が早く、 $E=0.049$ では $z=-10$ mm におけるひずみの値が大きい。

4・1・3 ひずみ速度分布 本加工は、加工初期と加工終期を除けばほぼ定常加工である。このような定常加工に対しては、材料内のひずみ速度分布全体を一

Fig. 7 Shear strain distributions of inner surface

(a) Forward process, $E=0.025$ (b) Forward process, $E=0.049$ (c) Backward process, $E=0.025$ (d) Backward process, $E=0.049$ Fig. 8 Normal strain distributions in expanding region ($z < 0$)

Fig. 9 Distributions of shear strain rate of inner surface

(a) Forward process, $E=0.025$ (b) Forward process, $E=0.049$ (c) Backward process, $E=0.025$ (d) Backward process, $E=0.049$ Fig. 10 Distributions of normal strain rate in expanding region ($r < 0$)

つの流動パターンから求めることができる。仮に材料縦断面に格子が描かれていたとする。定常変形であれば、各格子点が次の格子点に移動する時間 $d\tau$ (変形前の材料が dz_0 進む) はすべて同一である。流動パターン上で各格子点のひずみを近傍の格子点との相対位置関係により計算すると、一つの流線 PP' に沿ってひずみ分布が得られる。このひずみ分布曲線上で、格子点間のひずみ増分は時間増分 $d\tau$ において生ずる。したがって、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_\theta$ は

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{d\epsilon_\theta}{d\tau} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここで、 $d\tau$ の代わりに dz_0 を時間の単位とし、さらに

$$dz = e^{\epsilon_z} dz_0 = (1 + \epsilon_z) dz_0 \dots\dots\dots (7)$$

の関係式を使うと、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_\theta$ は

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{d\epsilon_\theta}{dz_0} = (1 + \epsilon_z) \frac{d\epsilon_\theta}{dz} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。

円管内側表面の $\dot{\gamma}_{zr}$ ひずみ速度分布を求め、各条件をまとめて示すと図9となる。ひずみ速度の単位はローラ進行増分あたりのひずみ増分量であり、 mm^{-1} となる。このひずみ速度の図によって各箇所における変形が明りょうに読取れる。自由表面でローラに近づくにつれ $\dot{\gamma}_{zr}$ が増すこと、各拡張率ごとにほぼ同様の曲げ、ただし、後方加工が若干早い、ローラに接触すれば、この変形は止まることなどがわかる。

各垂直ひずみ分布を各条件ごとに示すと、図10となる。 $\dot{\epsilon}_\theta$ は材料がローラに接触すると一定値のほぼ 0.005 mm^{-1} となり、それまでは徐々に増加する。 $\dot{\epsilon}_z$ は $E=0.025$ で零ないし若干の正、すなわち、板厚増、 $E=0.049$ で負となっている。 $\dot{\epsilon}_z$ はすべての条件でおおむね負であり、 $E=0.025$ でローラと接触している部分のみ、 $E=0.049$ ではローラに接触する前より負、すなわち、軸方向に縮んでいる。以上をまとめると、拡張による円周方向の伸び変形によって板厚減となるよりも、むしろ軸方向の縮み変形となる。

4・1・4 材料内各要素の変形状態 図1の材料右

側断面にはひずみ速度実測などを基にして、こうむる主たる変形様式で材料を領域分けした。A は変形前の素管、B は自由変形状態における拡張、C はローラで束縛された状態における拡張、D はしごき部、E は変形後の製品部である。これらの中で変形中の領域 B、C、D における変形状態を、図11に微小要素の形状変化で示した。破線輪郭が着目領域における変形前、実線輪郭が変形後である。各領域における主たる変形は、領域 B では曲げ、領域 C では拡張、領域 D ではしごきである。

4・2 本加工における力学状態 図12に領域 B、C、D における応力状態を示し、その応力状態の特徴を以下に記す。

(1) 領域 B

この領域には領域 C より半径力がせん断力 f として伝わり、それが円周軸周りの曲げモーメント m を生じさせるが、両者の関係は

$$\left. \begin{aligned} \frac{dm}{dz} &= f \\ f &= \tau_{zr} dA_z, \quad m = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_z \rho r d\theta d\rho \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

で表される。この曲げモーメントは管内側の z 軸方向に引張応力 σ_z を生じさせ、盛り上がりを引き起こす圧縮応力を打消す。これが、本研究で PCR 加工を安定化させるために拡張を加える目的である。

なお、半径方向の釣合いにより円周方向垂直応力 σ_θ は

$$\sigma_\theta = r \frac{d\tau_{zr}}{dz} \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。

なお、後方加工の場合には素管の先端にフランジがあって、そこで送り力の一部を負担、すなわち、この領域においても平均的に z 軸方向の圧縮応力 σ_z が伝ばし、拡張による盛り上がり抑制効果を下げることとなる。

(2) 領域 C

この領域では拡張が行われ、円周方向垂直応力 σ_θ はローラからの面圧の半径方向成分 σ_R により

Fig. 11 Deformation states

Fig. 12 Stress states

Fig. 13 Feed force vs roller stroke in forward process

Fig. 14 Feed force vs roller stroke in backward process

$$\sigma_{\theta} = \frac{r}{l} \sigma_R \quad \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。

(3) 領域 D

この領域では、ローラからの半径力 n と軸力 p によりしごきが行われる。

4.3 送り力 P および円周方向接線力 T 図 13, 14 に送り力 P -ローラストローク s 経過線図を示す。前方加工の場合、加工初期、素管のフランジ部をローラ終端が通り過ぎるまでは P は著しく増加し、それ以降減少する。一方、後方加工では加工初期に最大値をとらない。そこで、加工がある程度安定した加工初期以降の $s=15 \sim 25$ mm で送り力線図を比較する。前方の場合、 $E=0$ でも P はほぼ一定で若干の盛り上がりによる影響は小さい。 $E=0.049$ では加工初期における材料へのかみ込みに要する力が大きいせいこの行程時期でも P は減少している。一方、後方の場合には、ひずみ測定でも予測されるように $E=0.049$ でも若干の増加傾向を示す。後方加工における増加傾向は盛り上がりというよりも素管、拡張部が徐々に加工硬化することも要因となる。

次に、条件を変えたことによる P の相違を $s=20$ mm における値で、図 15 に比較する。また、図 16 に

Fig. 15 Feed force at $s=20$ mm Fig. 16 Tangential force at $s=20$ mm

(a) Inner surface of die

(b) Outer surface of original tube

(c) Free surface deformed by tube expansion (Forward, $L=0$) (d) Ironed smooth surface (Backward, $L=0.65$)

Fig. 17 Profile curve

Fig. 18 Comparison of Roughness Ra with L

は、同一行程での円周方向接線力 T を比較した。前報でも強調したように、 T は極めて小さく、 P の 1/1000 程度である。 P 、 T とともに、前方加工より後方加工のほうが大きくなっている。これは、ローラが同一行程進む間、加工される製品は前方加工より後方加工のほうが長いことよりも理解される。ここで、 P 、 T 両図の比較において興味ある事実は両加工形式とも E の増加とともに P は増加する傾向であるのに対し、 T は減少傾向を示すことである。壁厚減少率は $R=0.42$ に固定しており、 E を変化させれば、しごき付加尺度 L も連動して変化する。図 16 の横軸には L も上に示した。 T は L の増加につれて増加しているともいえる。

以上、材料の変形状態、 P の経過、 P の大きさ、特にデータは示していないが $E=0.075$ で P が急増したことを総合すると、 $R=0.42$ の条件で適切な E は前方加工で 0.025、後方加工で 0.049 となる。

4.4 加工裏面の鏡面化 図 17(a)～(d)に工具であるダイスの内表面、素管の外表面、ダイスと非接触であった製品外表面および接触した製品外表面の断面粗さ曲線を示す。なお、(a)、(d)における粗さの縦倍率は(b)、(c)の 5 倍で記録されている。

図 17(c)に示す $L=0$ の非接触では、加工裏面にあたるこの製品外表面は自由表面荒れにより、(b)の素管粗さ ($Ra=0.2\mu\text{m}$) より大きな粗さ $Ra=0.3\mu\text{m}$ となる。領域 C と領域 D の境界まで粗さはおおむね素管の値が継続され、これより、自由表面荒れは材料がローラ後端を抜ける瞬間(拡張でテーパ状であった外表面が直管になった瞬間)に生じている。なお、この箇所ですせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{sr}$ は最も大きくなっている。

$L>0$ では、ダイス内面の $Ra=0.03\mu\text{m}$ より加工裏面の Ra のほうが小さくなり、また前方加工の $Ra=0.02\mu\text{m}$ より後方加工の $Ra=0.01\mu\text{m}$ のほうが小さく

なっている。 $L=0.03$ では、わずかの偏心で測定位置の違いにより接触・非接触の差が生じ、 Ra は $0.01\sim 0.3\mu\text{m}$ の全範囲でばらつく。この条件は、加工裏面の面圧と加工裏面-ダイス内面間の相対滑りは零に近いので、母材の塑性変形が鏡面化に大きく関係していると思われる。

図 18 に加工裏面(管外表面)における軸方向の中心線平均粗さ Ra の変化を示す。表面形成には実質しごき度が影響するものと思われ、横軸には L をとった。

5. 結 論

ローラ工具流入部の材料盛り上りを抑制するため、拡張を加えた PCR 加工を提案し、実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 壁厚減少率が $R=0.42$ と同一の PCR 加工に、拡張率が $E=0.025$ とわずかの拡張を加えることでも、盛り上りを抑制することができ、定常変形を持続させ得る。
- (2) ローラが接触して直接負荷するかなり前より材料は拡張し始めている。この領域における曲げ、軸方向張力が盛り上りを抑制する。
- (3) 拡張領域において、材料は円周方向に伸びるため、軸方向には縮む。板厚はおおむね減ずるが、後方加工で $E=0.025$ の場合に板厚が増す。
- (4) 拡張を加えた PCR 前方加工の場合、素管が拘束されていないため、わずかの振れ周りを生ずる。
- (5) ローラ接触前の拡張は、ローラによる外向き半径力に対して、曲げモーメントとせん断力が釣合うために生ずる。
- (6) 拡張率を増すに従って、送り力は増加し、円周方向接線力は減少する。拡張率が同一であれば、送り力、円周方向接線力とも前方加工より後方加工のほうが大きい。
- (7) しごきが加わりさえすれば、ダイス内表面の粗さより加工裏面に当たる製品外表面の粗さのほうが小さくなる。
- (8) 拡張のみでしごきが加わらない場合には、製品外表面は自由表面荒れで素管外表面より荒れる。
- (9) 加工裏面の鏡面化はわずかの面圧さえ作用させれば、母材の塑性変形によって著しく促進される。

文 献

- (1) 森敏彦・斉藤雄二、プラネタリ・コニカル・ローリング(PCR)の加工機構、機論, 61-589, C (1995), 3734-3741.
- (2) 葉山益次郎、回転塑性加工学, (1981), 385-449, (近代編集社)。