

## プラネタリ・ボール・ローリング(PBR)加工による 円管内外表面同時仕上げ\*

森 敏彦<sup>\*1</sup>, 広田健治<sup>\*1</sup>, 千田進幸<sup>\*1</sup>

### Simultaneous Finishing of Inner and Outer Surfaces of Tube by Planetary Ball Rolling Process

Toshihiko MORI<sup>\*2</sup>, Kenji HIROTA and Shinko SENDA

<sup>\*2</sup> Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Previously proposed "Planetary Conical Rolling" (PCR) is a new ironing process carried on between a cylinder die and rollers supported by inner race. Excellent features of PCR such as extremely high thickness reduction, mirror finishing of outer tube surface, no sliding between tool and material, supplement of high pressure in the radial direction were demonstrated. It was also reported that this process could be applied to pressure welding and thread forming. However, inner surface of tube after PCR was considerably rough because of indentation of roller edge on the material. In order to overcome this defect, "Planetary ball rolling", in which rollers in PCR tools were replaced with balls, is proposed. Performance of PBR was compared with PCR by the use of aluminum alloy tubes. As a result, roughness of inner surface of the tube was extremely improved by PBR. Influence of ball diameter on forming limit and surface finishing was investigated. It was found that forming limit was assumed with maximum contact angle and large ball diameter was advantageous. Additionally, large ball was also effective to reduce surface roughness of both the inner and outer sides of tube. This was due to enlargement of deformation zone, which caused sufficient deformation on outer tube surface and reduced pilling up on the inner tube surface. Obtained tube had good quality and simultaneous finishing of inner and outer surfaces of a tube by PBR was demonstrated.

**Key Words:** Plastic Forming, Formability, Bearing, Planetary Ball Rolling, Planetary Conical Rolling, High Reduction Tube Forming

#### 1. 緒 論

塑性加工のみによって高機能表面を形成する方法としてしごき加工があり, 複写機ドラム感光面への適用が試みられている。しかし, 工具材料間はずり接触となるため, 加工度が増すと焼付きや破断といった欠陥が生じやすく, これまでに様々な検討がなされてきた<sup>①</sup>。こうした課題に対して, 既報<sup>②-④</sup>ではテーパローラ列により逐次的にパイプの減肉を行う PCR 加工(プラネタリ・コンカル・ローリング)を開発し報告してきた。その中で, 極めて高い壁厚減少率, 良好な寸法精度および管外表面への転写性能を示すことを実証しており, また, この特長を生かして異種材質円管の重ね圧接<sup>⑤</sup>や管外表面への形状創成<sup>⑥</sup>など, 減肉加工

以外への可能性を実証してきた。一方で, PCR 加工では管内表面側にローラによる圧下痕が螺旋状に残ることが課題として残されている。二層円管など管の内外面に良好な表面性状が求められる場合もあり, その克服は本加工法の適用範囲拡大のためにも不可欠である。

この問題に対して, 本報では PCR 加工におけるローラをボールに変えた PBR 加工(プラネタリ・ボール・ローリング)を新たに提案し, PCR 加工との性能比較を行った。その結果, 加工限界はやや低下するものの, 内表面性状は大幅に改善できることが分かり PBR 加工の有効性が確認された。また, 両加工法の違いを幾何学モデルから考察し, ボール径の拡大によりさらなる性能向上を期待できることが見いだされた。アルミニウム合金の押し出し円管を試料として検証を行った結果, 加工限界および外表面性状に関しても PCR 加工に匹敵する程度まで向上させられることが

\* 原稿受付 2002年2月21日。

<sup>\*1</sup> 正員, 名古屋大学工学部(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。

E-mail: mori@mech.nagoya-u.ac.jp

判明し、提案した PBR 加工により円管内外表面の同時仕上げ加工の可能性が示された。

## 2. 加工原理

**2.1 加工原理** 図1に PCR 加工の原理を示す。加工素材を納めたダイスを回転させ、その中にバックアップレースで支持された多数のテーパローラを軸方向に送り込むことで行われる。ローラは自転しつつ管内壁を公転し、ダイスとローラとの間で管肉厚を圧下していく。PCR 加工ではこれまでに以下のような特徴が明らかにされている。

- (1) 転がり接触のため焼付きや破断が生じにくい。
- (2) 軸剛性が高いこと、逐次加工であることから、板厚方向に局部的に高圧圧を負荷することができる。
- (3) (1),(2)より破断することなく極めて大きな壁厚減少を与えることができる。
- (4) (2)より管外表面への転写性が良好となり、鏡面化や形状付与が可能である。

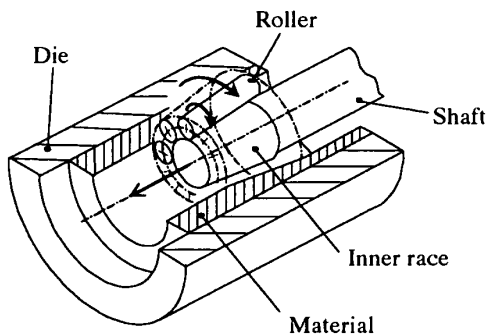


Fig.1 Outline of "Planetary Conical Rolling" (termed PCR)

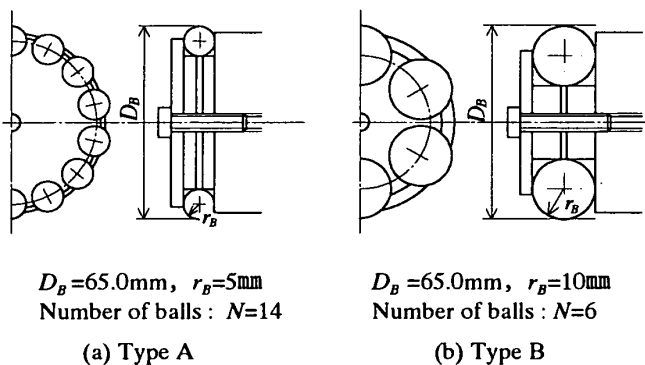


Fig.2 Schematics of tools for PBR

Table 1 Mechanical properties of tested material

Material	$\sigma_B$ (MPa)	$\delta_U$ (%)	$n$	HV
A5052-H14	251	5.2	0.09	114

$\sigma_B$ : Tensile strength       $\delta_U$ : Uniform elongation  
 $n$ : Strain hardening exponent      HV: Vickers hardness

- (5) (2),(3)より板厚方向に十分な塑性変形と圧縮応力を付加でき、円管同士の重ね圧接が実現できる。
- (6) 管内表面側には螺旋状の圧下痕が残留する。

本報で提案する PBR 加工は、PCR 加工工具におけるローラをボールに変えたものである。ローラをボールに変えることで管内表面と緩かな曲面で接触するようになり、上記(6)の改善が期待できる。また、工具配置や加工方法は基本的に同じであるため、(1)~(5)の長所も大きくは損なわれない。類似の加工法として、遊星ボールダイスによる縮管加工<sup>6)</sup>があるが、PBR 加工は PCR 加工から派生した減肉と鏡面化を目標とする加工法であり、区別して本報で取り上げることにした。

## 2.2 実験装置

加工機械には汎用旋盤を用い、主轴のチャックにダイスを、芯押し台に回転するテーパローラ工具またはボール工具を固定した。芯押し台はモータで駆動され、送り速度は任意に調節できるようになっている。ダイスは内径 69.0mm の円筒で、製品取出しを容易にするため縦半割構造となっている。

PCR 加工用のテーパローラ工具は既報<sup>9)</sup>と同じで NTN 製の円錐ころ軸受け (ローラ個数  $N=14$ , ローラ角  $\theta=125^\circ$  最外包絡円径  $D_c=64.6\text{mm}$ ) を使用した。また、PBR 加工用のボール工具は図 2 に示す 2 種類の工具 (最外包絡円径  $D_B=65.0\text{mm}$ ) を自作した。(a) はボールの径と個数を PCR 加工のテーパローラ工具と同一にし、(b) はボール径を (a) の 2 倍に設計した。

## 3. 実験方法および実験条件

**3.1 加工素材** 既報<sup>9)</sup>と同様で高強度の固溶強化形アルミニウム合金 A5052-H14 の押し出しパイプを用いた。表 1 に機械的性質を示す。引張強さは 251MPa と高く、延性尺度の  $n$  値は 0.088 と比較的低い。

**3.2 ダイス回転数, 工具送り速度, 潤滑条件** PCR 加工において良好な結果の得られた条件を参照し、ダイス回転数を 350rpm (角速度  $\omega=36.7\text{rad/s}$ ) , 工具送り速度  $V_0$  を 1.16mm/s に選定した。また、潤滑は 2-1 (1) の特徴により無潤滑とした。

**3.3 素材寸法および壁厚減少率** 素管寸法を図 3 に示す。管端  $l$  の部分が加工域となる。加工率は既報と同様に壁厚減少率  $R$  で定義し、素管壁厚を  $t_0$ 、製品壁厚を  $t$  とすれば(1)式で与えられる。

$$R = \frac{t_0 - t}{t_0} \dots\dots\dots (1)$$

製品外径はダイス内径  $D_d$  に等しく 69.0mm である。一方、製品内径は工具包絡円径により決まり、PCR 工具では  $D_c=64.6\text{mm}$ , PBR 工具では  $D_B=65.0\text{mm}$  で

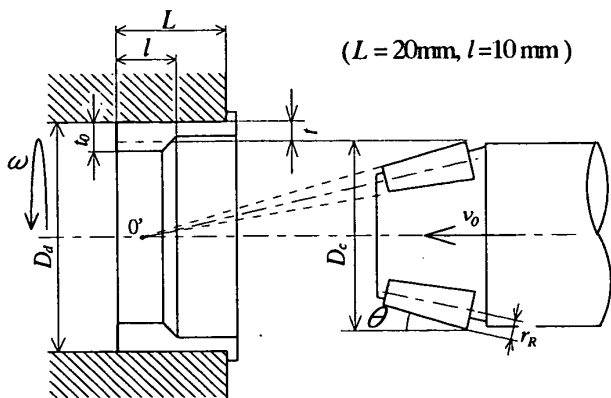


Fig.3 Dimension of tool for PCR and raw tube

ある。わずかに  $D_B > D_C$ としたのは、PCR 加工後の内表面を PBR 工具で後続仕上げする可能性を想定して設計したためである。この差により製品板厚  $t$  は PCR 加工で 22mm, PBR 加工で 20mm となる。したがって、加工度となる壁厚減少率は素管肉厚  $t_0$  を変えることにより変更した。

4 実験結果および考察

4.1 加工機構

4.1.1 PCR加工 各ローラは管素材内壁に対して周方向に  $V_\theta$ で公転し、軸方向には工具送り速度  $V_0$ で進むため螺旋運動をする。この様子を図4に模式的に示す。ローラ2がローラ1の位置に達する時には図示の  $dv$ だけ軸方向に前進しているため、ローラ1により形成された面をさらに ACBBだけ圧下する。ここで、 $dv$ はローラの管内壁に対する公転周期を  $T$ 、ローラ数を  $N$ として(2)式で得られる。また、 $T$ は図3に示した記号を用いて(3)式で与えられる。ローラ後端部と材料との接触状態に注目すると、図4(b)のように  $\triangle ACB$ の部分は圧下されずに残留する。このため、後続ローラが次々にピッチ  $dv$ で通過すると、図の点線のような粗さ形状が管内表面に残る。高さ  $h_c$ は個々のローラによる板厚方向の圧下量  $\delta_c$ とほぼ等しく  $dv$ とローラ角  $\theta$ により(4)式で計算できる。また、PCR 加工ではローラの包絡円錐中心と素材の回転中心が一致しているため(図3の点  $O'$ )、ローラと素材の接触部において両者の回転半径比は一定となり、相対すべりはほとんど生じない。

$$dv = \frac{V_0 \cdot T}{N} \dots\dots\dots (2)$$

$$T = \frac{2D_C - 4r_C}{D_C - 4r_C} \cdot \frac{2\pi}{\omega} \dots\dots\dots (3)$$

$$h_c \cong \delta_c = dv \cdot \tan \theta \dots\dots\dots (4)$$

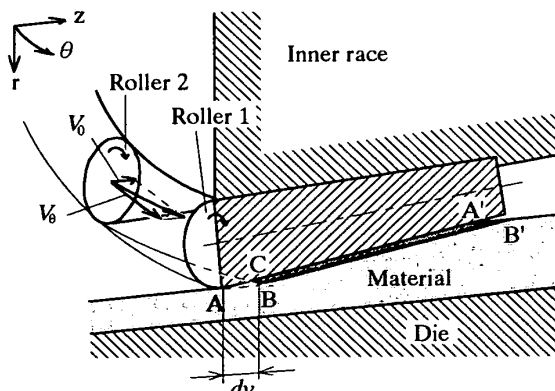
4.1.2 PBR加工 PBR 加工は PCR 加工のローラをボールに変えたもので、工具の動きは同じである。 $dv$ は(2)~(4)式でローラ工具寸法をボール工具寸法に置き換えれば計算できる。圧下の様子を図4(b)にならって図5に示す。濃い灰色の領域が後続のボールによって圧下される部分である。図から1つのボールによる板厚方向の圧下量  $\delta_B$ は接触位置によって変化し、壁厚減少率  $R$ の影響も受けることが分かる。また、ボールと素材の接触部において、両者の回転半径比は接触位置により異なるため相対すべりが生じる。

圧下痕は点線のような形で残り、その高さ  $h_B$ は幾何学的に(5)式で得られる。

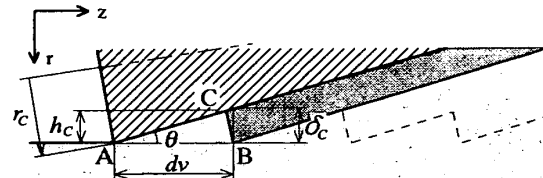
$$h_B = r_B - \sqrt{r_B^2 - \left(\frac{dv}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (5)$$

4.2 加工限界

4.2.1 PCR加工との比較 ボール半径と個数を PCR 加工工具と同一にした図2(a)の工具を用いて PCR 加工との比較を行った。なお、3.3で述べた工具包絡円径の違いは素材外径寸法に対して十分小さく、加工力や加工限界に対して両加工法の本質的な差とはならないと考えられる。



(a) Depression of tube thickness by each roller



(b) Formation of feed mark on inner surface of tube  
Fig.4 Deformation mechanism of PCR

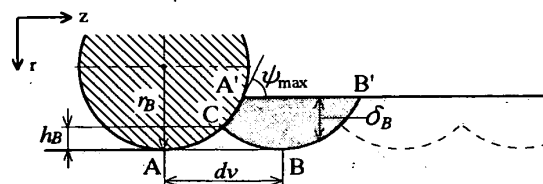


Fig.5 Formation of feed mark in the case of PBR

図6に行程中の軸加工力を示す。両加工法とも行程中期では定常加工となり軸力は一定となった。図7に壁厚減少率 $R$ と定常加工力 $F_s$ の関係を示す。PBR加工では $R$ に対する $F_s$ の増加が顕著であり、 $R=0.45$ で工具が破損し加工不能となった。また、その時の試料を見るとボール前方に大きな盛り上がりが見られた。一方、PCR加工では純アルミニウムを用いた実験で $R=0.9$ 近くまで加工可能であることが示されており<sup>9</sup>、本実験においても $R=0.45$ で問題なく加工できた。

このような結果について以下に考察する。両方法ともダイスによる外周拘束により、圧下された材料は軸方向へ流動しようとする。材料と工具の接触角度を $\psi$ とすると、PCR加工では図4(b)より $\psi$ はローラ角 $\theta$ に等しく、これは接触位置や壁厚減少率によらず一定である。また、本実験ではその値も $125^\circ$ と小さい。ゆえに材料は軸方向へ様に流動しやすく、圧下による壁厚減少が円滑に行われる。これに対し、PBR加工では工具はボールの円弧で材料と接するため、 $\psi$ は接触位置により変化し、図5のA点で最大となる。その最大値 $\psi_{max}$ は壁厚減少率とともに大きくなり、ボールの転動による壁厚圧下が困難になる。この条件では、ボール前方に盛り上がりが発生し、盛り上がり分だけ壁厚減少率 $R$ が増えて $\psi_{max}$ はさらに大きくなる。この

ようにして、盛り上がり生成が加速的に増し、加工限界に至ると推察される。

**4.2.2 ボール径拡大の効果** PBR加工において図2(b)の工具を用いて加工を行った。図8にボール径の違いによる $F_s$ の変化を示す。図中の縦線は各ボール径に対する限界の壁厚減少率を表すが、 $r_B=10\text{mm}$ では $F_s$ の増加が抑えられ、加工限界も $R=0.65$ まで向上している。

PBR加工では $R$ の増加とともに $\psi_{max}$ が増加し、これがある限度を越えるとボールの転動による壁厚圧下が困難になり、前節で述べた過程により加工限界に至ると考えられる。そこで $\psi_{max}$ に注目して結果を整理してみる。 $\psi_{max}$ は図5より幾何学的に(6)式で計算でき、 $R$ に対する変化を求めると図9のようになる。

$$\psi_{max} = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{R}{1-R} \cdot \frac{l}{r_B} \right) \quad \dots\dots (6)$$

同一の $R$ に対しては $r_B$ が大きいほど $\psi_{max}$ が小さくなる。図9には図8における加工限界を $\times$ でプロットしてあるが、ほぼ同一の $\psi_{max} \approx 50^\circ$ で限界に至っている。これより、加工限界に至る $\psi_{max}$ が一定であるとすれば、この線図から所望の圧下率に対して必要なボール径をある程度予測できると考えられる。

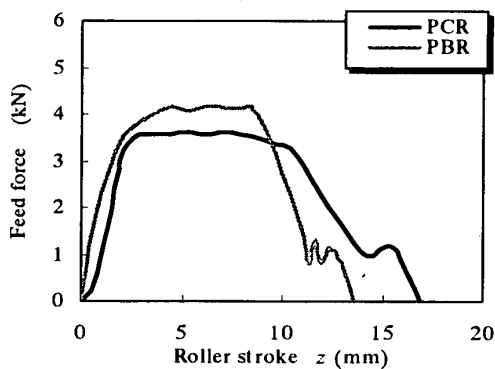


Fig.6 Feed force -stroke diagram ( $r_B=r_C=5\text{mm}$ ,  $R=0.2$ )

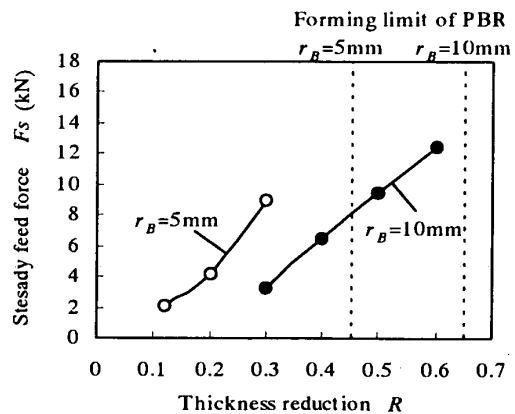


Fig.8 Influence of ball radius on feed force in PBR

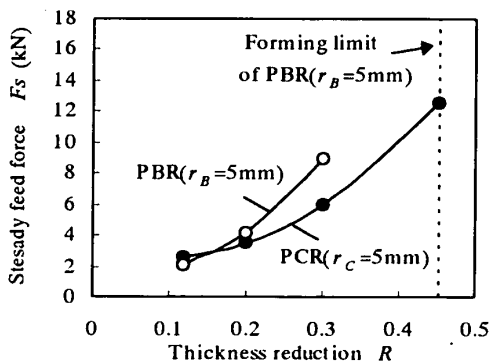


Fig.7 Comparison of feed force between PCR and PBR

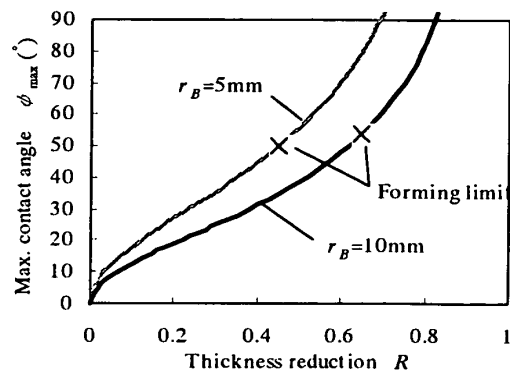


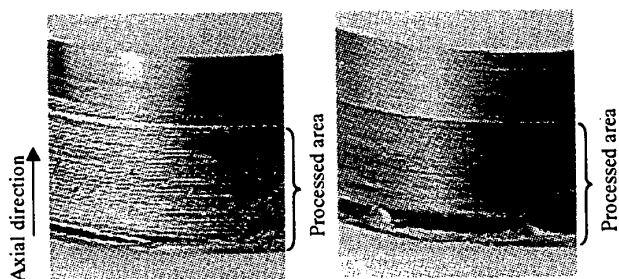
Fig.9 Relation between  $\psi_{max}$  and  $R$  in PBR

4.3 内表面性状

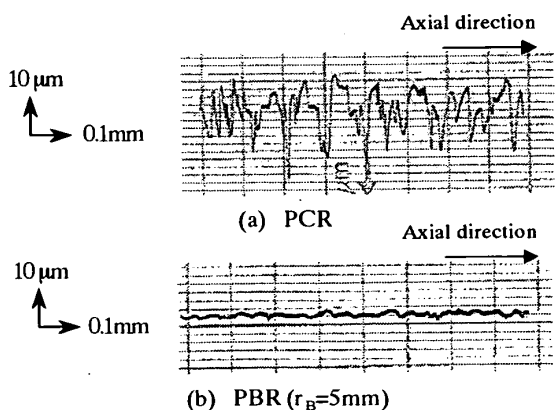
4.3.1 PCR加工との比較

図 10 および図 11 に加工内表面の外観と軸方向の粗さ曲線を示す。両加工法とも筋状の圧下痕が認められるが、その凹凸は PBR 加工の方がはるかに小さい。ここで (2)~(5) 式に本実験条件の数値を代入して幾何学的な圧下痕高さを求めると  $h_c=5.3\mu\text{m}$ ,  $h_B=0.015\mu\text{m}$  となる。しかし、測定された最大粗さは PCR 加工で  $27\mu\text{m}$ , PBR 加工で  $3\mu\text{m}$  となり計算値よりもかなり大きい。PBR 加工に関しては相対すべりが生じて公転周期  $T$  が長くなり、(5) 式の  $dv$  が増加し  $h_B$  が大きくなったことが考えられる。また、両加工法に共通の原因として、圧下された材料の周辺への盛り上がりと考えられる。両加工法とも圧下により材料は軸方向へ流動するが、隣接工具間の未加工域がその伸びを拘束する。このことは本加工法が板厚方向に局所的に高面圧を負荷できる所以であるが、一方で工具近傍の自由表面にも変形が及びやすくなる。特に PCR 加工ではローラ後端の角丸みが小さいため局所的な押し込み変形となり、大きな盛り上がりが生じて鮮明な筋状痕が形成されたと考えられる。一方、PBR 加工では小さな曲率の球面で接するため、PCR 加工に比べて盛り上がり領域は分散されてなだらかな凹凸面になる。

4.3.2 ボール径拡大の効果 PBR 加工においてボール径による内表面性状の差を図 12 に示す。倍



(a) PCR (b) PBR ( $r_B=5\text{mm}$ )  
Fig.10 Appearance of inner surface after processing



(a) PCR (b) PBR ( $r_B=5\text{mm}$ )  
Fig.11 Profile of inner surface

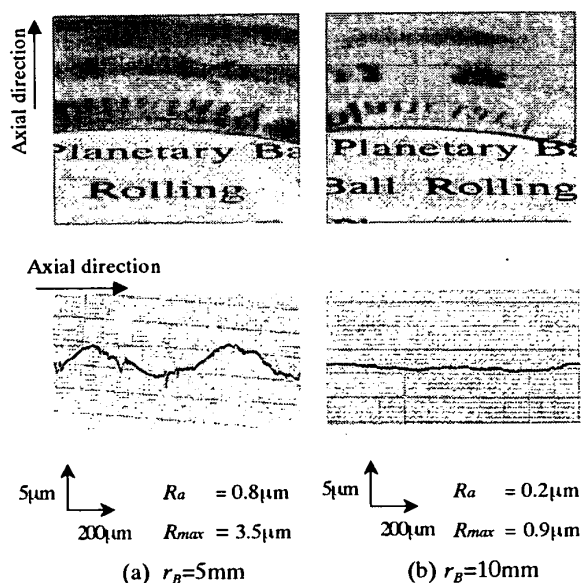
率は図 11 よりも拡大してある。 $r_B=10\text{mm}$ の方が光沢のある平滑面が得られ、最大粗さ、平均粗さともに  $r_B=5\text{mm}$  の場合の約 1/4 にまで低減された。ただし、この場合も(5)式で計算した圧下痕高さよりも大きく、4.3.1 で述べたような要因が考えられる。盛り上がりに関しては、ボール径が大きいほど変形域が管裏面まで貫通し易く、軸伸びも生じやすくなるため低減される。また、接触面積が大きくなるため盛り上がり領域はさらに分散されて目立たなくなり、加えて、広がった領域の盛りを後続のボールが修正しやすい。ボール径が大きくなると含有しうるボール個数が少なくなり圧下痕のピッチ  $dv$  が大きくなるが、それよりも上記のボール径が大きくなった効果の方が大きいと考えられる。

4.4 外表面性状

PCR 加工で管外表面の鏡面化を達成できることは実証されている。ここでは PBR 加工においても同等の効果が得られるかを検証した。図 13 にボール径による管外表面の様子と軸方向の粗さ曲線を示す。比較のために加工前の切削試料の粗さも示す。切削による粗さは PBR 加工を施すことでほぼ除去されている。また、同一圧下率でボール径が大きい方が外表面粗さは向上している。この理由は 4.3.2 で述べたようにボール径が大きいほど塑性変形域が広くなり、管裏面まで十分な圧縮応力が及び、ダイス面の転写性が向上したためと考えられる。

4.5 内外表面同時仕上げ

図 14 に PBR 加工において  $r_B=10\text{mm}$  で壁厚減少率を変化させた場合の内外表面粗さを示す。壁厚減少率を大きくしても粗さの顕著な変化は認められない。また、内外表面の粗さにはばらつきがあるもののほぼ等しくなっている。工具



(a)  $r_B=5\text{mm}$  (b)  $r_B=10\text{mm}$   
Fig.12 Appearance and profile of inner surface finished by PBR ( $R=0.3$ )

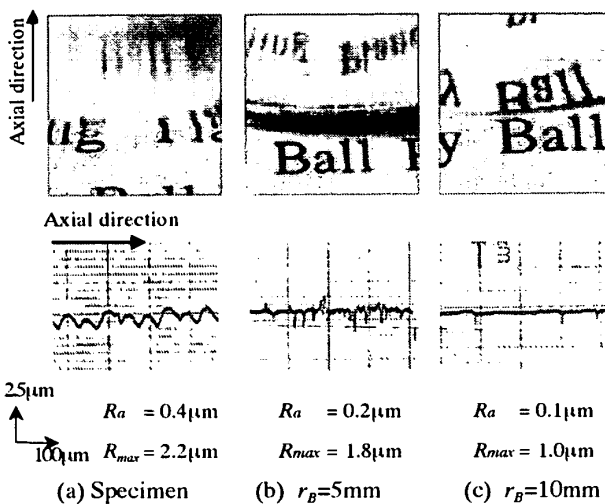


Fig.13 Appearance and profile of outer surface finished by PBR ( $R=0.3$ )

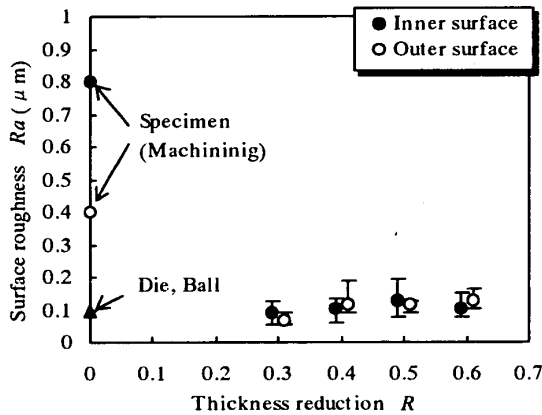
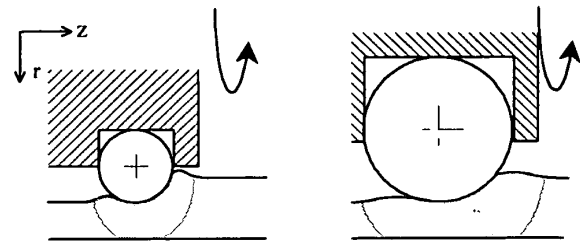


Fig.14 Influence of thickness reduction on surface roughness finished by PBR ( $r_B=10\text{mm}$ )

表面については、ダイス内表面粗さおよびボールの表面粗さはともに  $Ra = 0.1\mu\text{m}$  であった。これに対し管の外表面側はほぼ一致しているが、内表面側は盛りりの影響によりわずかなうねりが残留し工具表面粗さより若干粗くなる場合があった。

以上より、PBR 加工においてボール径の拡大により円管内外表面同時仕上げの可能性が示された。4.3, 4.4 で述べたように内表面と外表面では平滑化の機構が異なる。内外表面を同時に平滑化できることは、ボール径を拡大することがそれぞれの平滑化機構に対して効果的に作用しているためである。すなわち、ボール径を拡大することで、図 15 のように管外表面まで塑性域が貫通し、PCR 加工と同様の機構で外表面の平滑化が促進される。同時に、軸方向への材料流動が



(a) Small ball radius (b) Large ball radius  
Fig.15 Difference in plastic zone depending on ball radius

一様化されるため、内表面側への盛りり変形が緩和、分散され、内表面粗さが改善される。

### 5. 結 論

PBR 加工による円管内外表面同時仕上げについてアルミニウム合金管を用いて検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) ボールとローラの径を同一とした場合、PBR 加工ではPCR加工に比べて加工限界は劣るものの、内表面性状は大幅に改善できる。
- (2) PBR 加工における加工限界および内外表面性状はボール径を拡大することで向上させることができる。前者については管内表面とボールとの最大接触角の増加により、また、後者については塑性変形域の拡大から外表面側は転写性が向上し、内表面側は周辺への材料盛りりが低減されたことによる。
- (3) 使用できる最大ボール径は加工する管内径で決まり、それにより上記効果も制約を受ける。

### 文 献

- (1) 例えば Kawai,N. et al, Research into Mirror Surface Finishing by the Ironing Process, J.Mater. Process Technol,22(1990),123-136
- (2) 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.
- (3) 森敏彦・中島邦彦, PCR加工におけるねじ山形成, 機論,63-612,C (1997),2892-2898
- (4) 森敏彦, PCR 加工による円管の重ね圧接, 機論 64-625,C (1998),3630-3636
- (5) 金山公三・吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成, 遊星ボールダイスによる縮管加工における軸力とトルク, 塑性と加工, 28-319, (1987), 825-832