

軸受鋼管の残留応力低減に関する検討

笠井 貴之^{*1}・高須 一郎^{*2}

Research on reduction of residual stress on bearing steel tubes
Takayuki Kasai and Ichiro Takasu

Synopsis: Bearing steel tubes in Sanyo Special Steel have been dedicated to customers as long steel tubes or cut rings (formed and fabricated materials). They are processed into bearing races at the customer. While the long steel tubes are cut in rings, they are sometimes distorted. This causes inferior goods because of roundness failure.

In order to improve the roundness of cut rings, effects of each process after cold pilger rolling were investigated. Consequently, the followings were found;

- In order to improve roundness of cut rings, changing the set-up condition of the multi-roll straightening to large offset and small crash was effective and made residual stress of tubes reduced and roundness of cut rings.
- As a result of CAE analysis with stress and strain in the multi-roll straightening, axial direction strain was mainly influenced by the offset of the multi-roll straightening conditions and circumferential direction strain was mainly influenced by the crash conditions. Moreover, it became theoretically clear that residual stress can be reduced by the set-up condition of large offset and small crash.

1. 緒言

ベアリングは、自動車、飛行機、または家電製品など、身の回りで使われている物の多くに使われている。この内、ボールベアリングはレースとボールで構成される。レースとボールは負荷を受けながら転がり運動をするため、使用される材料には、良好な転動疲労寿命や対摩耗性が要求され、形状的には、静粛性の観点から、数ミクロンオーダーのベアリング製品の真円度が要求される。このレースの中には、鋼管から製造されるものがあり、当社の軸受鋼管も長尺鋼管または切断リング素形材として客先に納められている。これらのベアリングレース製造時、例えば、長尺鋼管のリングへの切断時に、ひずむという問題があり、切断リングの真円度改善はベアリングレース製造コストの観点から重要な課題である。

本報では、長尺鋼管製造時の矯正工程に着目し、矯正条件の最適化による切断リングの真円度改善を試みたので報告する。

2. 現状把握

2・1 長尺鋼管および切断リングの真円度、残留応力
現状把握として、まず長尺鋼管と切断リングの真円度および残留応力を測定した。

真円度の測定方法には、半径法と直径法の2種類あり、半径法では最大半径と最小半径の差、直径法では最大直径と最小直径の差を真円度として表し、その数値が小さいほど真円度が良好であることを示す。例として、Fig.1に半径法による真円度の定義を示す。Fig.2に示すように、一般に、半径法は専用の真円度測定機で測定し、直径法はダイヤルゲージやノギスなどの汎用測定機を用いて測定する。半径法は、円周方向を連続的に測定し、測定機により自動的に偏心補正および傾斜補正されるため、人による誤差が少なく、再現性が高く、作業効率も良い。それに対し、直径法は、目視読み取りのため、人による誤差が大きく、再現性も低い。そこで本報では、直径法よりも精度の高い半径法を採用した。真円度測定機には、テラーホブソン社製のタリロンドを使用した。

タリロンドでの真円度測定には、測定試料の長さの制約がある。長尺鋼管での調査では、試料切断による残留応力の変化及び変形の恐れがあるため、残留応力の変化を生じ

*1 研究・開発センター プロセス開発グループ

*2 研究・開発センター プロセス開発グループ長, PhD

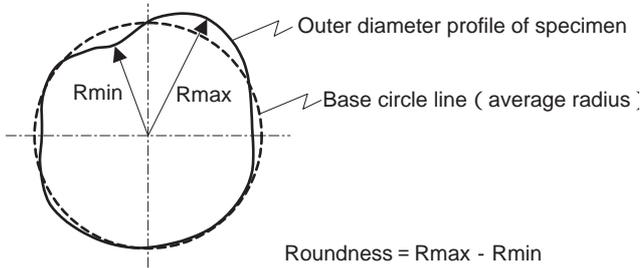
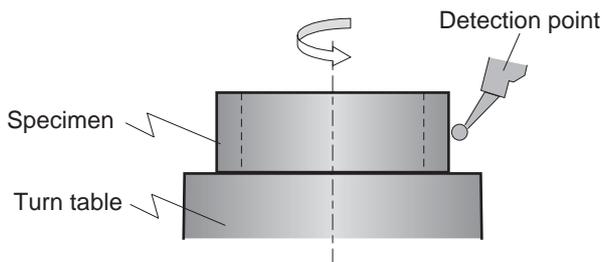
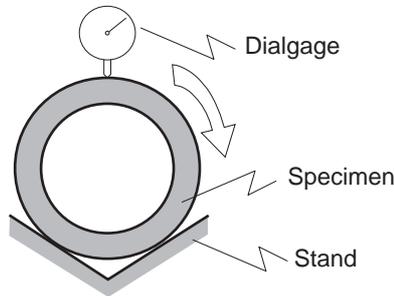


Fig. 1. Definition of roundness.



(a) Radius method



(b) Diameter method

Fig. 2. Schematic diagrams of radius method and diameter method.

Table 1. Chemical compositions of specimen

(mass%)								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.984	0.18	0.40	0.008	0.006	0.08	1.40	0.02	0.14

ない適切な試料長さを検討した。実験的また理論的検討から、円筒試料長手方向の中央部の残留応力は、長さL、直径をDとおくと、 $L > 2D$ であれば試料長さの影響を受けないことが知られている¹⁾。そこで、長尺鋼管の測定試料の長さは、直径の2倍以上とした。調査対象は、SUJ2 アッセル圧延 - コールドビルガー圧延鋼管（以下CA鋼管と呼ぶ）の外径90.60mm、肉厚6.20mm（直径D / 肉厚T = 14.6）とした。Table 1に、対象材の化学成分を示す。長尺鋼管と切断リングの真円度は、Fig. 3に示すように、長さ300mmに切断し、長手方向中央付近の5カ所を幅18mm間隔で測定し、これを長尺鋼管の真円度とした。その後、測定位置が中央部になるように、幅15mmに切断し、この切断リングを用いて、長尺鋼管での測定位置の真円度を再度測定し、その測定値を切断リングの真円度とした。Fig. 4に、長尺鋼管および切断リングの真円度を示す。Fig. 4では、長尺鋼管の真円度の平均値を1として、各条件の真円度を相対的に表し、最大値と最小値をエラーバーで表した。Fig. 4より、切断リングの真円度は、長尺鋼管の真円度に比べ悪化し、バラツキも大きくなることが分かった。

次に、切断リングの残留応力を測定した。残留応力の測定方法は、X線、レーザー光線および中性子などを使う非破壊式と、ザックス法³⁾やスリット法⁴⁾などの破壊式があ

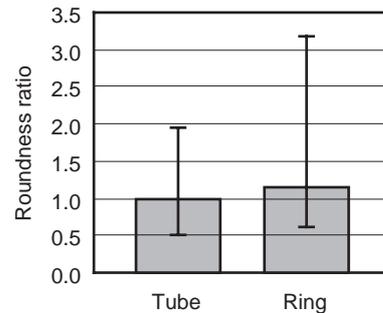


Fig. 4. Roundness of tubes and rings.

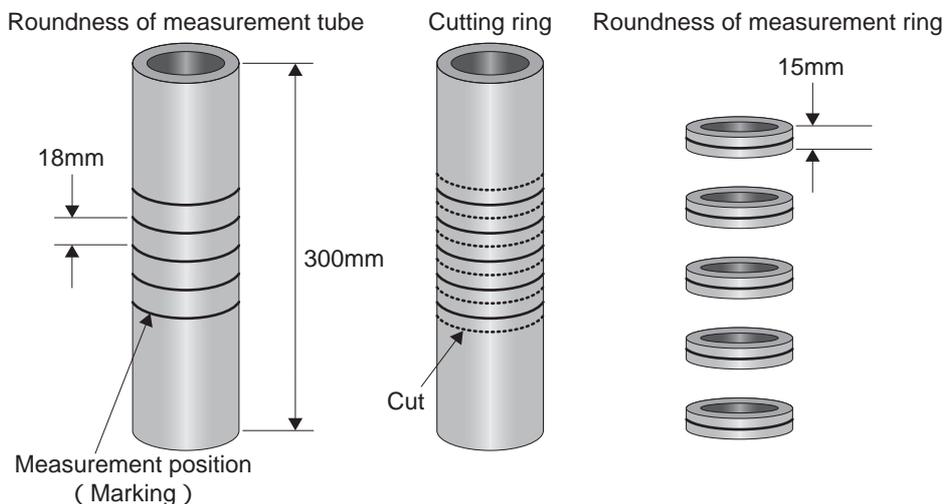


Fig. 3. Measuring method of roundness.

る。本報では、Fig.5に示すスリット法により残留応力を評価した。スリット法は、リングに幅3mmスリットを加工し、スリット加工前後の外径変化率により残留応力を評価する方法で、残留応力（外径変化率）は、スリット加工前の直径を D_0 、スリット加工後の直径を D とすると、 $(D - D_0) / D_0 * 100\%$ で表される。この値が正であると、試料全体の平均の残留応力が引張りであり、その値が大きいほど残留応力が大きいことを意味する。スリット法では、試料全体の平均的な残留応力の状態を検出することとなるが、測定に高度な技術を要せず、測定時間も短いことが利点である。Fig.6に、真円度変化率と切断リングの残留応力（外径変化率）の関係を示す。ここで、真円度変化率は、長尺鋼管の真円度： R_{tube} 、切断リング（当該長尺鋼管に対応）での真円度： R_{ring} とすると、 $(R_{ring} - R_{tube}) / R_{tube}$ で表される値である。Fig.6より残留応力（外径変化率）と真円度変化率との間には相関があり、残留応力が大きいと、真円度変化率が大きくなった。このことから、長尺鋼管が切断時にひずむ原因は、長尺鋼管をリング状に切断する際の試料中の残留応力変化と考えられる。

2・2 各工程における真円度および残留応力の調査

切断リングの残留応力低減の指針を得るため、当社の長尺鋼管の各製造工程での真円度および残留応力を調査した。Fig.7に、本対象材であるSUJ2 CA鋼管の外径

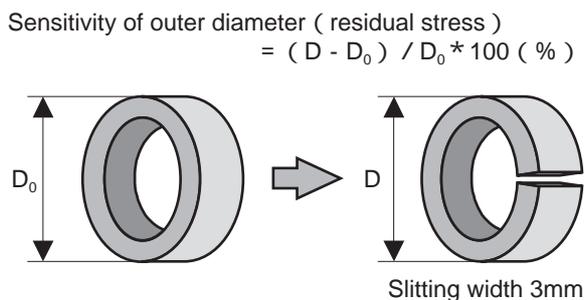


Fig.5. Slitting method.

90.60mm、肉厚6.20mmの製造工程を示す。本調査では、コールドピルガー圧延後、焼鈍（以下LA=Low temperature Annealingと呼ぶ）後および矯正後からサンプルを採取した。

Fig.8に、各工程での真円度および残留応力を示す。Fig.8では、コールドピルガー後の真円度の平均値を1として、各工程の真円度を相対的に表した。残留応力は、コールドピルガー後に、ある程度発生し、LAによりほぼ0となり、その後の矯正により大きい残留応力が発生していた。また、真円度は、LAによりコールドピルガー圧延での残留応力が解放されるために形状が変化し、LA後の真円度は、コールドピルガー後の真円度より悪化し、バラツキも大きくなる。そして、その後の矯正により真円度が改善する。以上のことから、矯正は、一般に真直度向上のために行われるが、真円度改善にも効果があり、真円度はコールドピルガー圧延後の真円度と同程度まで回復する。

以上より、切断リングの真円度向上の方策としては、「矯正工程における残留応力の低減」が有効であると考えられる。また、「コールドピルガー後における長尺鋼管の真円度向上対策」により、矯正後の長尺鋼管の真円度が

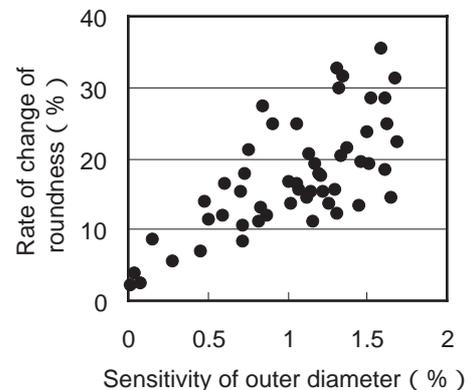


Fig.6. Relationship between changing rate of roundness and sensitivity of outer diameter.

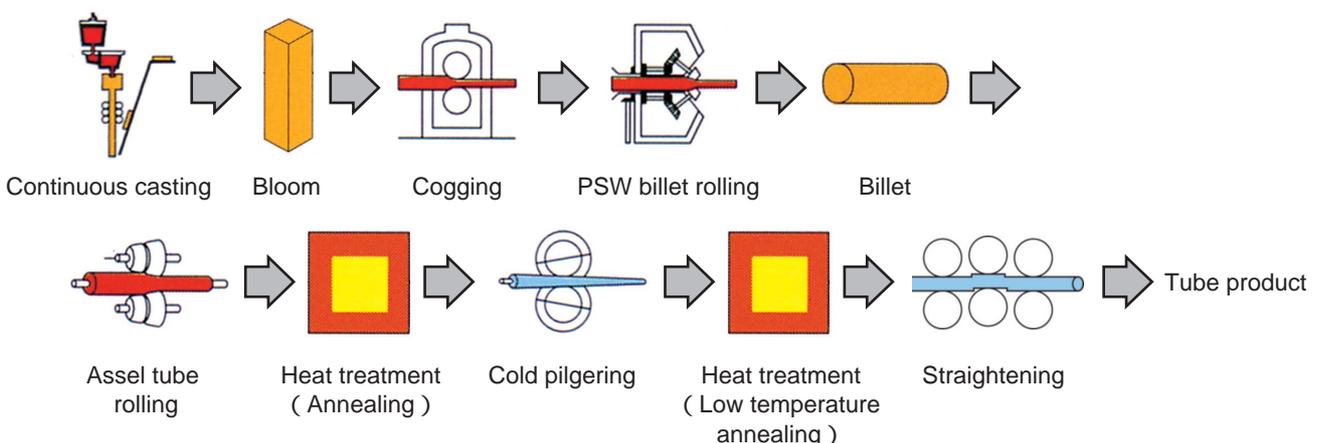


Fig.7. Tube forming process.

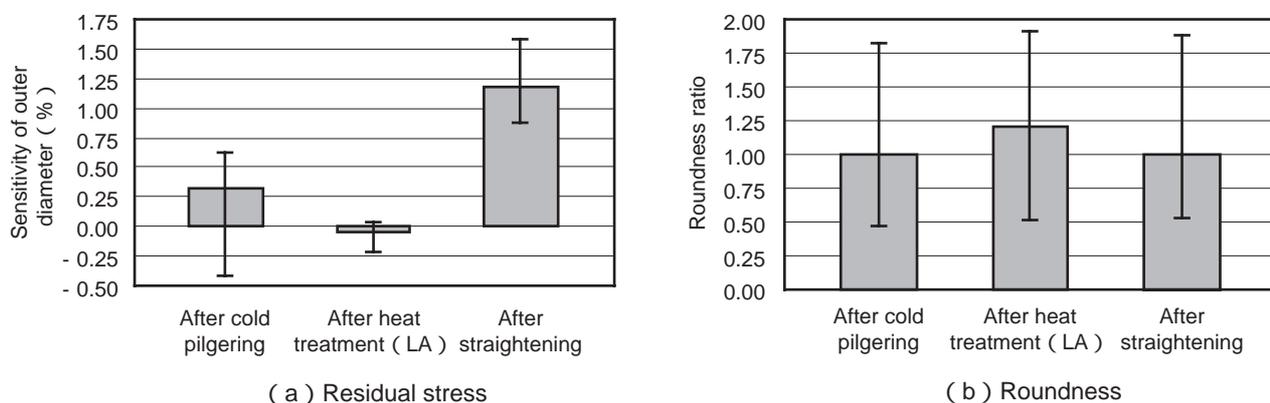


Fig.8. Roundness and residual stress in each processes.

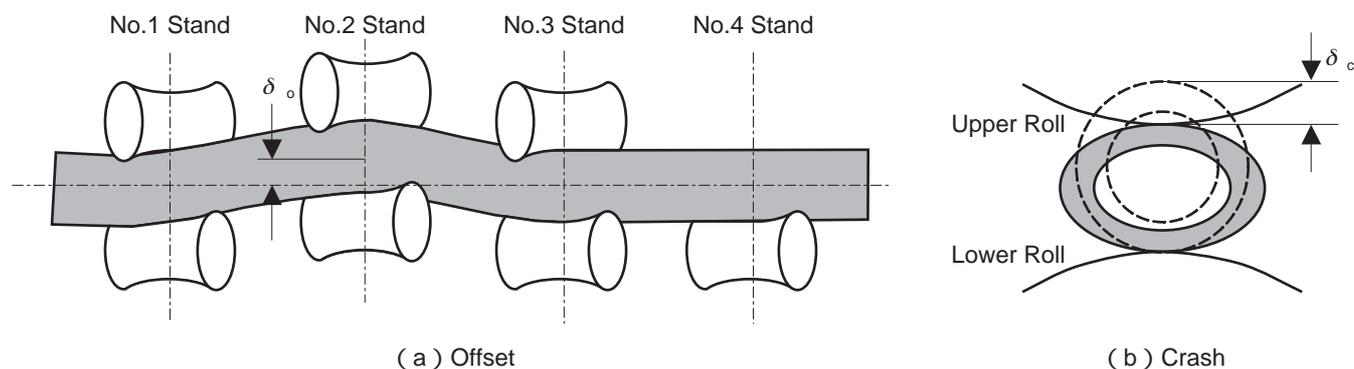


Fig.9. Schematic diagram of offset and crash.

向上し、切断リングの真円度向上につながるものと期待される。そこで、上記の2項目について、以下に検討を行った。

3. 切断リング真円度向上に関する検討

3.1 残留応力低減の検討

これまでの調査により、矯正後の残留応力が最も大きいことが分かったことから、矯正での残留応力低減を検討した。当社のSUJ2 CA鋼管は、ロータリストレーナ形式⁵⁾の多ロール矯正機と2ロール矯正機により矯正が行われる。両矯正機は、素材を長手方向の送りに合わせて曲げ面を回転させる方式であり、素材進行方向に斜交するロールで素材に回転送りを与え、真直度を向上させる^{6)~8)}。多ロール矯正機のロールはすべて鼓形で、必要荷重が小さいことから薄肉管にも適し、ロールの斜交角度が大きいことから高速での処理が可能であるが、精度は2ロール形式ほど良好でなく、また管端の曲がりを取り除くことはできない。一方、2ロール矯正機は、鼓形と直円筒形の2ロールを対向させ、その間で曲げを与える方式で、その構造から、多ロール式よりも素材端部や短い曲がりの矯正に適している。当社では、多ロール矯正後、鋼管端部付近の真直度向上を目的に、2ロール矯正機でさらに矯正を行っている。多ロール矯正機は荒矯正、2ロール矯正機で仕上げ矯正と

いう構成で、多ロール矯正機は、2ロール矯正機に比べ、残留応力の発生量が大きいと想定されることから、多ロール矯正機に着目し、残留応力に及ぼす多ロール矯正条件の影響について調査を行った。

当社の多ロール矯正機は、7つのロール（上ロール3個、下ロール4個）で構成され、鋼管のサイズや元の曲がり量に応じて、オフセット量、クラッシュ量およびロール角度を調整している。特に残留応力に影響を及ぼすと考えられる項目としては、Fig.9に示すオフセット量 δ_o とクラッシュ量 δ_c がある。オフセット量とは、中央スタンドの上昇量を意味し、オフセットにより鋼管に曲げ変形を与える。クラッシュ量とは、被矯正材の外径への圧下量に相当し、各スタンドにおいて上ロールの昇降により設定し、鋼管断面に楕円変形を与える。そこで、このオフセット量およびクラッシュ量について、残留応力との関係を調査した。実験条件をTable2に示す。

Fig.10およびFig.11に、それぞれ残留応力および切断リングの真円度に及ぼすオフセット量およびクラッシュ量の影響を示す。Fig.10 (b) の真円度は、Condition-1の真円度の平均値を1として、Condition-2の真円度を相対的に表している。また、Fig.11 (b) の真円度は、Condition-3の真円度の平均値を1として、Condition-4の真円度を相対的に表している。実験結果より、オフセット

量が大きい方が、残留応力が小さく、切断リングの真円度も良好になる傾向があることが分かった。また、クラッシュ量については、クラッシュ量が小さいほど残留応力が小さく、切断リングの真円度も良好になることが分かった。以上より、切断リングの真円度改善のためには、多ロール矯正条件のオフセット量を大きくし、クラッシュ量を小さくすることが有効であることが分かった。ただし、オフセット量およびクラッシュ量の最適値については、今後の課題である。

3・2 長尺鋼管の真円度向上の検討

切断リングの真円度向上の方策として、残留応力低減の

他に、長尺鋼管そのものの真円度の改善が考えられる。コールドピルガー圧延までの工程において、長尺鋼管の真円度に影響を及ぼすと考えられる工程は、アッセル圧延工程、および最終サイズに仕上げるコールドピルガー圧延工程である。Fig.12に、アッセル圧延およびコールドピルガー圧延工程での真円度に及ぼす各種要因を示す。これらの要因の中から、真円度を向上させる寄与度が大きく、かつ工程変更の自由度が高いと考えられる、コールドピルガー圧延機出口側のサイジング工程に着目し、真円度に及ぼすサイジング時の精圧代の影響を調査した。また、前節の調査で、多ロール矯正条件（オフセット量およびクラッシュ量）変

Table2. Test conditions of offset and crash change

Condition	Sizing (Cold pilgerling process)	Multi-roll straightening		2-Roll Straightening
	Reduction of diameter	Offset	Crash	Crash
1	Normal	Small	Normal	Normal
2		Large		
3		Normal	Small	
4			Large	

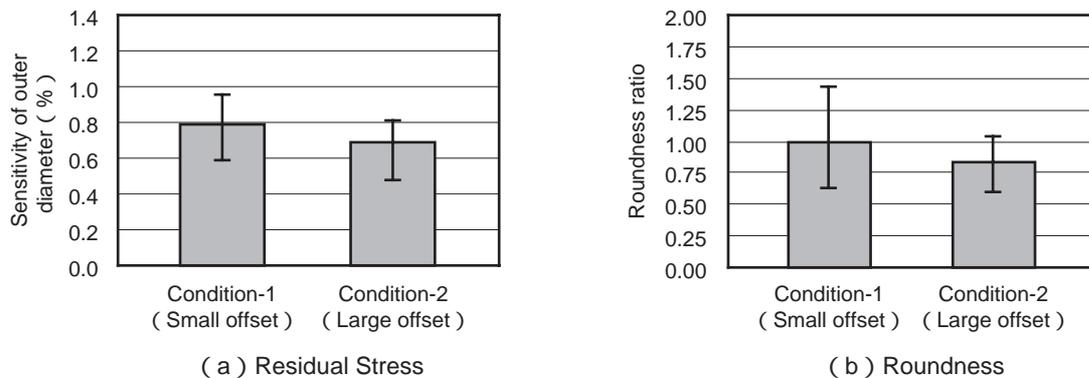


Fig.10. Effects of offset on residual stress and roundness.

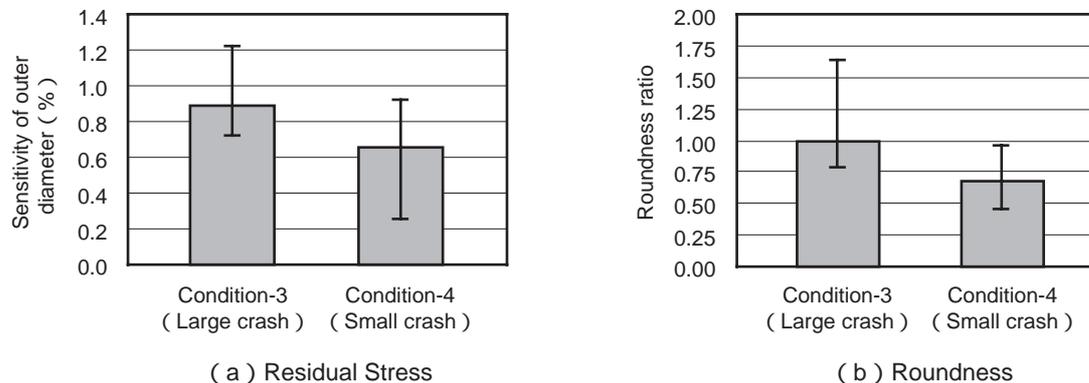


Fig.11. Effects of crash on residual stress and roundness.

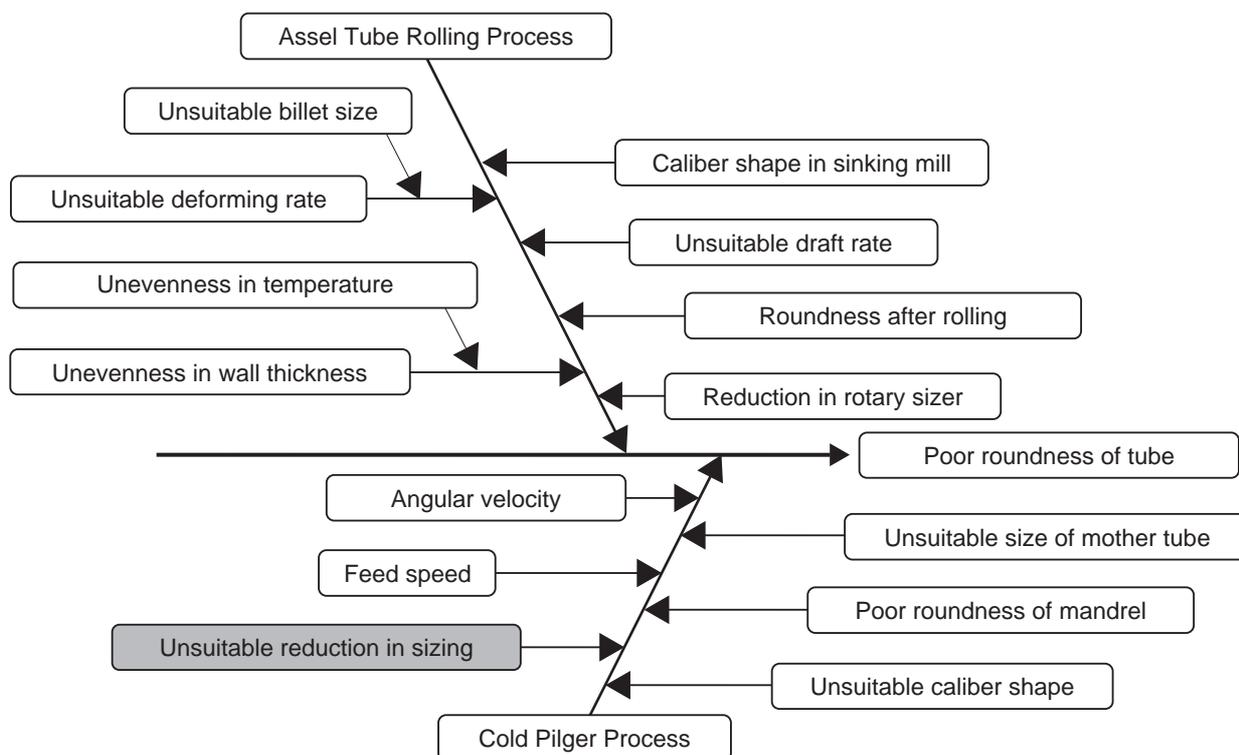


Fig.12. Characteristic diagram in roundness.

Table3. Test conditions of the reduction change in straightening

Condition	Sizing (Cold pilgerling process)	Multi-roll straightening		2-Roll Straightening
	Reduction of diameter	Offset	Crash	
5	Small	Normal	Normal	Normal
6		Large	Small	
7	Large	Normal	Normal	
8		Large	Small	

更により切断リングの真円度が改善されることが分かったため、精圧代に加えて、多ロール矯正条件の影響も調査した。実験条件をTable3に示す。

Table3に示した精圧代および多ロール矯正条件を変更したテストを実施し、矯正終了後にサンプルを採取した。Fig.13に、各サンプルより切り出した切断リングの真円度の測定結果を示す。Fig.13に示す真円度は、Condition-5（精圧代：小）の真円度の平均値を1として、各条件の真円度を相対的に表している。実験結果より、精圧代を大きくすることで切断リングの真円度は改善され、バラツキも小さくなることが分かった。また、多ロール矯正条件をオフセット量：大+クラッシュ量：小とすることで、通常の矯正条件に比べ、真円度は改善され、バラツキも小さくなる傾向が認められた。また、精圧代が大きい場合には、多

ロール矯正条件変更の影響はほとんど認められなかったが、精圧代が小さい場合には、オフセット量：大+クラッシュ量：小（Condition-6）の矯正条件変更により、通常矯正条件よりも約40%程度真円度が改善され、その値は精圧代を大きくした条件（Condition-7およびCondition-8）とほぼ同程度であった。以上のように、精圧代を大きくすると、多ロール矯正条件をオフセット量：大+クラッシュ量：小への矯正条件変更とでは、真円度改善に及ぼす効果が同程度であり、精圧代を大きくし、かつ多ロール矯正条件の変更を行っても、両項目を単独で実施した場合と真円度はほとんど変わらなかった。操業上、精圧代を大きくすると設備負荷が大きくなることから、多ロール矯正条件の変更が真円度改善には、より好ましいと考えられる。

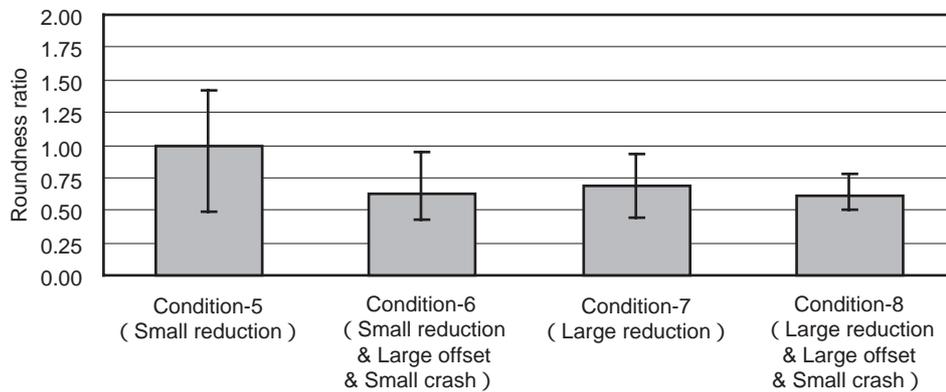


Fig.13. Effects of reduction and straightening condition on roundness.

4. 多ロール矯正の力学的考察 (CAE解析)

実機試験より、残留応力低減のためには、多ロール矯正条件を変更（オフセット量：大、クラッシュ量：小）が有効と分かったが、そのメカニズムをCAE解析を用いて検証した。

多ロール矯正では、鋼管に回転送りし、オフセット量とクラッシュ量を同時に加えて、鋼管の真直度と真円度の向上を図っている。ここで管断面のある1点に注目すると、ロールの回転曲げ送り作用により、引張りと圧縮の繰り返しの応力履歴となっている。このような応力履歴は加工硬化やパウシンガー効果を伴うために、矯正中に起こっている現象は極めて複雑となる。

そのため解析では、曲げ（変位量＝オフセット量）とクラッシング（変位量＝クラッシュ量）に分離し、それぞれ送りと自転を考慮せず解析を実施した⁹⁾。また本解析では、汎用有限要素プログラム「MARC」を用い、Fig.14のような3次元モデルで計算を行った。3次元解析により、鋼管の円周方向のひずみ分布の情報が得られるだけでなく、ロールと鋼管との接触領域を適切に反映させられるため、2次元解析に比べて精度の良い結果が得られる。まず、第一段階として、Fig.14のモデルで、オフセットのみを作用させた場合と、クラッシュのみを作用させた場合の解析を行った。この段階では、鋼管に回転と送りを与えずに、単にオフセットによる曲げとクラッシュによる扁平の変形を独立に負荷し、ひずみ履歴やパウシンガー効果を考慮せずに

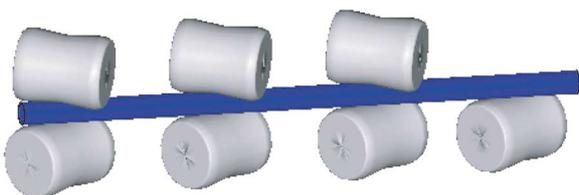


Fig.14. 3D-Analysis model for multi-roll straightening.

行った。以上の前提のもと、ある任意の1点の矯正中のひずみ履歴を求めた。次の段階として、先に求めたオフセットによるひずみとクラッシュによるひずみの重ね合わせが成り立つとして、ひずみ履歴を算出し、得られたひずみ履歴から、移動硬化則にもとづく、パウシンガー効果が考慮された応力-ひずみ関係式により、内径部の1点の応力履歴を求めた。各位置の応力は、式(1)に示した増分形の応力-ひずみ関係式を用い、多ロール矯正の入側から求める位置までの矯正経路に沿って数値積分して求めた。矯正後の残留応力は、矯正経路終点における応力値とした。

$$\left. \begin{array}{l} \text{弾性域: } \{d\sigma\} = [D_e]\{d\varepsilon\} \\ \text{塑性域: } \{d\sigma\} = [D_p]\{d\varepsilon\} \end{array} \right\} \dots (1)$$

$$\text{ここで, } \{d\sigma\} = \begin{Bmatrix} d\sigma_l \\ d\sigma_\theta \end{Bmatrix}, \{d\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} d\varepsilon_l \\ d\varepsilon_\theta \end{Bmatrix},$$

$[D_e]$: 弾性Dマトリックス, $[D_p]$: 塑性Dマトリックス

Fig.15に、オフセットのみを負荷した場合の軸方向ひずみ履歴、およびクラッシュのみを負荷した場合の周方向ひずみ履歴を示す。解析結果より、多ロール矯正では、材料の1点に注目すると、多数回の繰り返し引張圧縮の変形履歴となっており、特にロール直下で大きな塑性変形を受けることが分かった。また、Fig.15にはクラッシュによる軸方向ひずみとオフセットによる周方向ひずみを示さなかったが、これはクラッシュを単独で負荷した場合の軸方向ひずみと、オフセットを単独で負荷した場合の周方向ひずみが、矯正経路に沿ってどちらもほぼ0であったからである。このことから、軸方向ひずみはオフセット量、周方向ひずみはクラッシュ量の影響を大きく受けることが分かった。また、Fig.16に、通常の矯正条件とオフセット量：大+クラッシュ量：小とした矯正条件での残留応力の結果を示す。Fig.16より、クラッシュ量小+オフセット量大の矯正条件では、通常の矯正条件よりも残留応力を低減される結果が得られ、オフセット量：大+クラッシュ量：小で残留応力が低減される現象が確認できた。

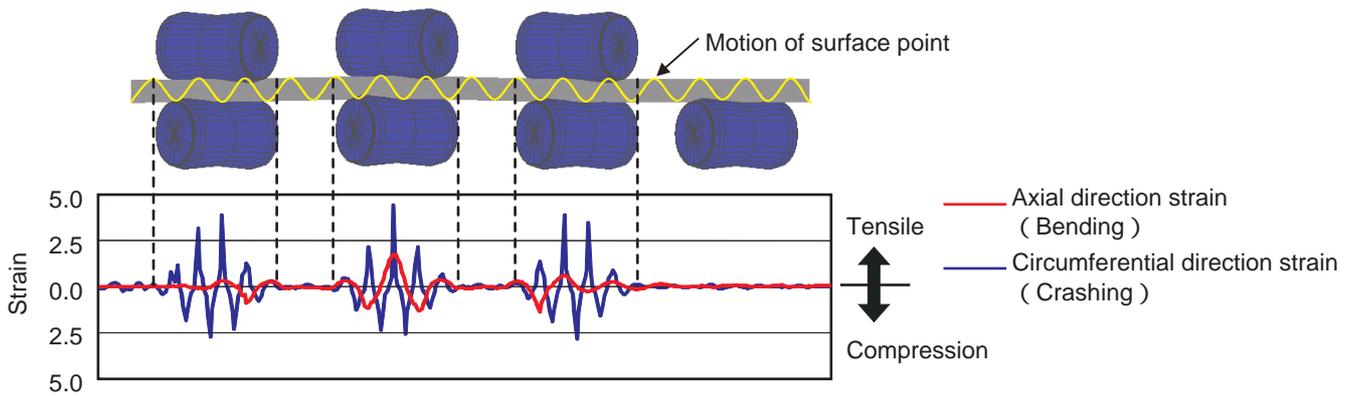


Fig.15. Strain history at straightening (CAE)

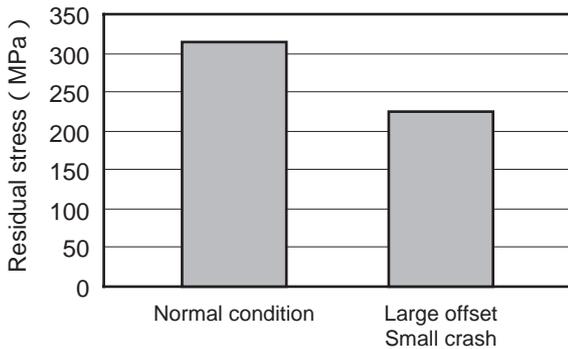


Fig.16. Effects of straightening condition on residual stress (CAE).

いことが分かった。また、オフセット量：大，クラッシュ量：小とした多ロール矯正条件により残留応力を低減できることが理論的にも確認できた。

文献

- 1) 応力測定技術研究社編：応力測定法，朝倉書店，東京，（1960），360.
- 2) 須藤一：残留応力とゆがみ，内田老鶴圃，（1988），35.
- 3) 日本金属学会編：材料検査法，（1978），158.
- 4) 盛中清和，中川元，遠藤達夫，光永公一：材料試験法，養賢堂，（1972），125.
- 5) ASM Metals Handbook, Vol.4,（1969），322.
- 6) S.Wiegerist：Iron & Steel Engineer., Vol.1,（1944），15.
- 7) John B. Sutton, Jr.：Iron & Steel Engineer., Vol.11,（1977），38.
- 8) 日本塑性加工学会編：矯正加工，コロナ社，東京，（1992），132.
- 9) Furugen, M. et al.：Proc. 3rd Int. Conf. on Steel Rolling, Tokyo, Japan, Sept.（1985），497.

5. 結言

コールドピルガー圧延以降の工程に着目し，切断リングの真円度に及ぼす影響について調査を行った。その結果，以下のことが分かった。

- (1) 多ロール矯正条件をオフセット量：大，クラッシュ量：小とすることにより，鋼管の残留応力が低減でき，切断リングでの真円度は良好になる。
- (2) コールドピルガー後のサイジングは，精圧代が大きいほど，長尺鋼管の真円度が向上し，切断リングの真円度は良好になり，その程度は多ロール矯正条件を変更した場合と同程度であった。
- (3) CAE解析を用いて，多ロール矯正中の応力・ひずみについて調査を行った結果，軸方向ひずみはオフセット量，周方向ひずみはクラッシュ量の影響が大きい

著者



笠井 貴之



高須 一郎