

管材のレデューサ圧延における 3次元シミュレーションと厚肉鋼管製造技術

曾谷 保博*・平川 智之*²・生井 賢治*³・畑中 政之*³・森 謙一郎*⁴

Three-dimensional Simulation of Tubes in Stretch Reducing Mill
and the Production Technology of Thick-walled Tubes

Yasuhiro SODANI, Tomoyuki HIRAKAWA, Kenji IKUI, Masayuki HATANAKA and Ken-ichiro MORI

Synopsis : Three-dimensional deformation of tubes in stretch reducing mill is simulated both by rigid-plastic finite-element method and by rolling experiments with a single three-roll stand. The mechanism responsible for circumferential wall thickness variation, so-called polygonization of the tube bore is clarified :

- (1) The wall is thinned at the groove root and is thickened at the flange after a single-pass rolling.
- (2) The degree of polygonization increases as the t/D ratio, the reduction in diameter and the ovality of the roll groove increase. It decreases as the front or/and back tension increases. The position of the neutral line which is closely related to the stress-strain distribution in the tube has a great influence on the degree of polygonization.
- (3) The finite element analysis on the polygon formation appeared in a multi-pass rolling reveals that the circumferential position of the thickest wall lies between the groove root and the flange side. The degree of polygonization after each pass is also calculated.

The rolling conditions such as the reduction in diameter, the ovality of the roll groove and the magnitude of inter-stand tension are optimized to suppress the polygon formation. This leads to the expansion of the product range of thick-walled tubes of which the t/D ratio exceeds 30% in a small-diameter seamless tube mill.

Key words : tube rolling ; stretch reducing mill ; groove rolling ; rigid-plastic FEM ; three-dimensional deformation ; numerical analysis ; model material ; dimensional accuracy ; wall thickness variation.

1. 緒言

近年、自動車軽量化のための棒材の中空化やボイラーの高圧化などの動きにともない小径サイズを中心に t/D (肉厚/外径) $>20\sim30\%$ の厚肉鋼管の需要が増加している。溶接鋼管ではこれらの厚肉鋼管の成形が困難になるため小径継目無鋼管プロセスで製造技術を確立することは重要である。小径継目無鋼管の代表的製造プロセスでは最終段階で外径と肉厚を仕上げるためにストレッチレデューサで連続圧延がなされる。ストレッチレデューサは通常3ロールを有するスタンドが連続的に20~30スタンド配列され、管に張力を加えながら外表面を孔型ロールによって圧延する。しかしこの圧延において特徴的に発生する管内面の角張りと呼ばれる円周方向肉厚変動、および先後端部での増肉による長手方向肉厚変動が製品品質および歩留りを低下させる原因となる。

後者の長手方向肉厚変動に関しては、多スタンド圧延解

析シミュレーションにより管端増肉の発生原因が明らかにされ、ロール回転数制御などによりこれを低減させる方法が採られている¹⁾。他方前者の円周方向肉厚変動に関しては、従来円周方向の圧下率分布に基づく説明²⁾³⁾があったが管内面の角張り発生機構を正しく説明しているとは言えず、圧延条件の角張りに与える影響に関しても不明確な点が多かった。

最近、有限要素法の発達とともに3次元塑性変形解析が行われるようになり、ストレッチレデューサ圧延に対しても詳細な解析が行われている^{4)~8)}。またモデル材料を用いた基礎的な実験も行われて^{9)~12)}、ストレッチレデューサにおける内面角張り現象が³解明されてきている。本報告はこれらの研究で明らかになった角張り発生機構と角張りに及ぼす圧延変数の影響を述べるとともに、これらの結果を実機の操業条件に反映することで、従来困難であった厚肉鋼管を良好な寸法精度で製造するための圧延技術について報告する。

平成4年7月14日受付 平成4年12月8日受理 (Received on July 14, 1992 ; Accepted on Dec. 8, 1992)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials and Processing Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

* 2 NKK総合材料技術研究所 (現: 京浜製鉄所) (Material and Processing Research Center, now Keihin Works, NKK Corporation)

* 3 NKK京浜製鉄所 (Keihin Works, NKK Corporation)

* 4 大阪大学基礎工学部 (Faculty of Engineering Science, Osaka University)

2. 内面角張り発生機構

2・1 実験条件および計算条件

鉛モデル単スタンド圧延実験装置¹⁰⁾¹²⁾の概略をFig. 1に示す。前方・後方張力は油圧サーボ制御により3%以内の精度で独立に付加できる。Table 1には実験条件を示す。ロール形状は真円と楕円の2種類のカリバ(孔型)を使用した。管の肉厚は水浸式の超音波肉厚計により円周方向に連続測定を行った。

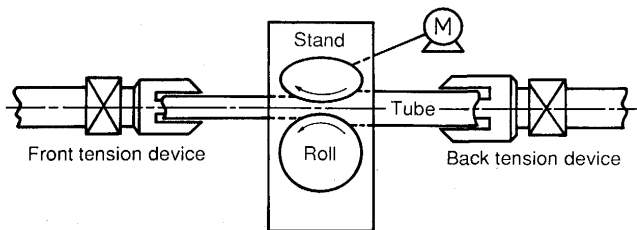


Fig. 1. Schematic representation of the experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions.

Tube material	Lead (0.9%Antimony)
Tube size	70φ×6~24t×1600mm
Reduction in diameter	5.0%
Groove ovality	0%, 6.5%
Tension stress	$\sigma_r, \sigma_b = 0 \sim 14\text{MPa}$
Roll radius	160mm
Roll rotational speed	0.8rpm

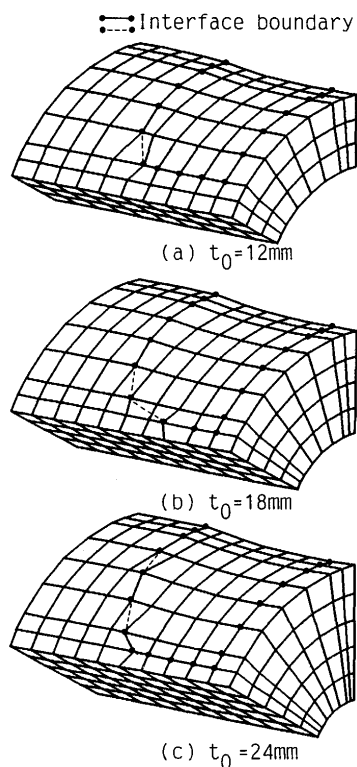


Fig. 2. Finite element meshes of tubes in the steady state of the first pass ($r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$, $D_0=70\text{mm}$).

3次元変形シミュレーションはMoriら¹³⁾によって開発された圧縮性を考慮した3次元剛塑性有限要素法により行った。計算は定常変形を対象にし混合解析法¹⁴⁾により行った。混合解析法は変形を非定常的に少しずつ進めて計算する方法であり、ロールとの接触面が複雑な形状をしている孔型圧延に対して有効である。素材を8節点六面体アイソパラメトリック要素に分割した。Fig. 2は単スタンド圧延定常変形時の3次元要素分割である。計算は対称性により1/6の領域について行った。Table 2に計算条件を示す。素材の変形抵抗式は実験に供した鉛材を平面歪圧縮試験して求めたものである。Fig. 3はレデュースの孔型を示すもので、外径圧下率 r および楕円率 O_v を次式で定義する。

$$r = \frac{D_0 - B - H}{D_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$O_v = \frac{B - H}{H} \dots\dots\dots (2)$$

Table 2. Rolling conditions used for simulation of three-dimensional deformation in reducing mill.

Outside diameter of unrolled tube ; D_0 (mm)	70
Wall thickness of unrolled tube ; t_0 (mm)	12, 18, 24
Flow stress (MPa)	$46.1\epsilon^{0.21}\bar{\epsilon}^{0.041}$
Friction coefficient	0.25
Reduction in diameter ; r (%)	4.5, 3.0, 1.0
Groove ovality ; O_v (%)	6.5, 3.0, 1.0
Roll radius ; R (mm)	160

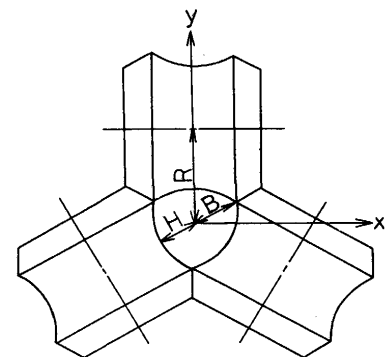


Fig. 3. Reducing mill with three grooved rolls.

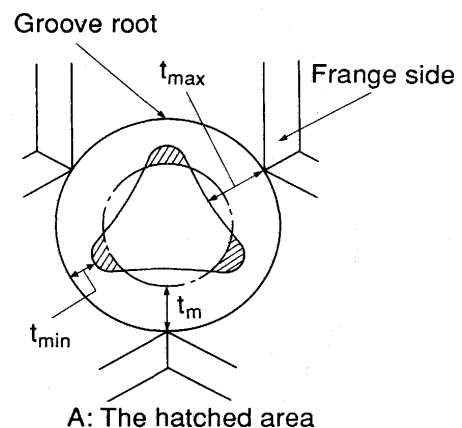


Fig. 4. Definition of polygonal magnitude and ratio.

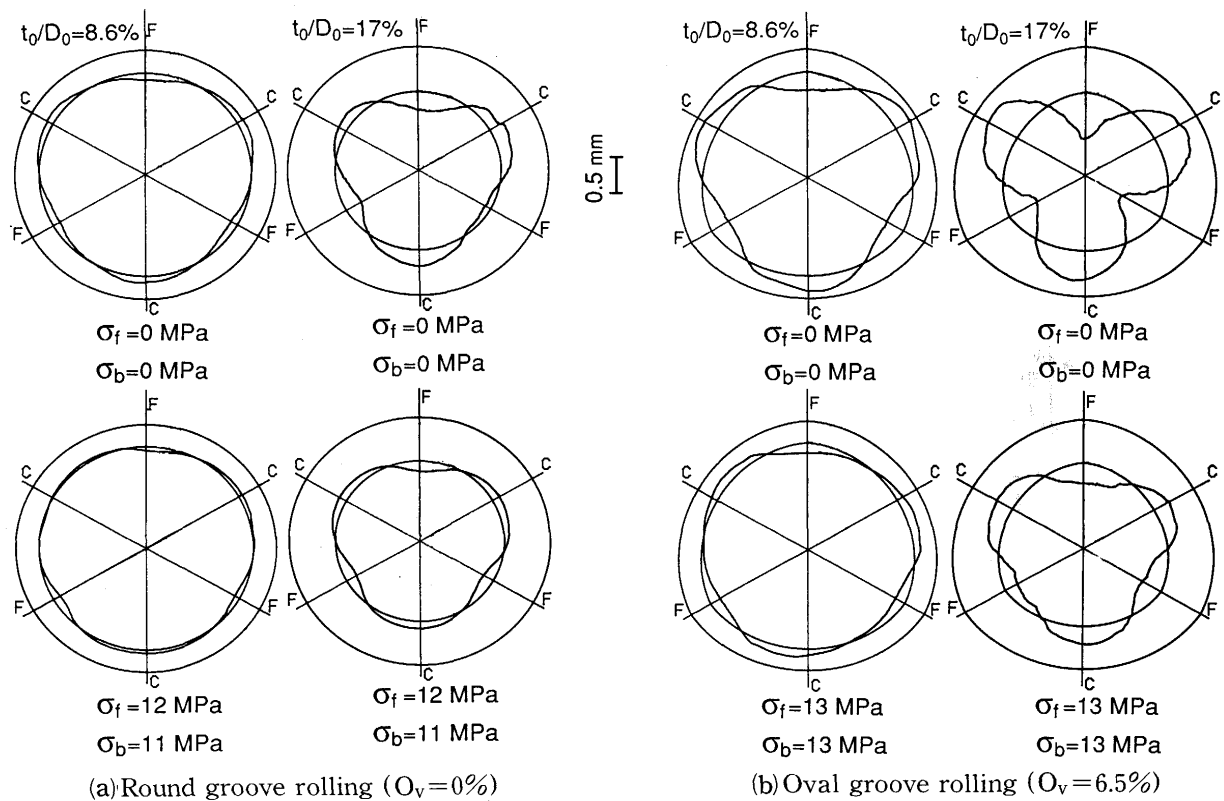


Fig. 5. Transverse variation in wall thickness after single-stand rolling.

ここで D_0 は圧延前の素管外径である。

圧延後の管内面の角張り度合いを表すために、Fig. 4を参照して角張り率 e を次式で定義する。

$$e = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_m} \dots\dots\dots (3)$$

また一部同図中に示すように角張り面積 A で角張り量を評価した。

2・2 単スタンド圧延後の角張り

Fig. 5は真円の鉛管(外径70φ)を圧延実験した際に生じた円周方向肉厚分布である。いずれの場合もフランジ側(F)で厚肉、カリバ底(C)で薄肉の角張りパターンを示す。真円カリバにおいても角張りが発生する。素管 t_0/D_0 が大きいほど、あるいは楕円カリバの方がより大きな角張りの発生が見られる。張力レベルを増加すると角張りは減少する。Fig. 6に前方・後方張力を独立に変化させた場合の角張り量を角張り面積 A で表す。前方・後方張力ともに増加させると角張り量は減少するが、前方張力と後方張力の差が大きくなるほど角張り量の減少は大きい。さらに前方張力を増加させて管が引抜き状態になったときに角張り量は最小となる。

単スタンド圧延における角張りの発生はロールバイト中の中立線分布に基づいて説明される⁹⁾¹⁰⁾。すなわちロール幅方向にロール周速度が一定でないためにフランジ側がカリバ底に対しよりロール出側方向に中立線が分布する。これによりロール面圧、応力が分布を生ずる。これらの結果は

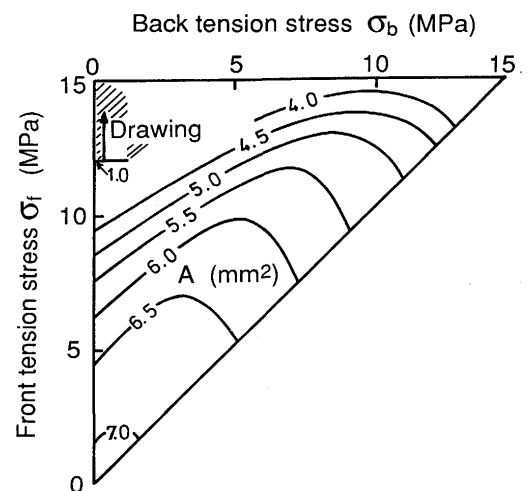


Fig. 6. Influence of front/back tension on polygonning ($t_0/D_0=17\%$, $r=5\%$, $O_v=0\%$).

FEM解析により詳細に求められている⁵⁾⁶⁾。特に軸方向(z方向)応力は変形が集中するロール入口付近において管内表面でカリバ底がフランジ側に比べより大きな引張になることがわかっている⁶⁾。そのためカリバ底の方がフランジ側よりも圧延方向に伸ばされやすく、カリバ底で薄肉、フランジ側で厚肉の肉厚分布となる。前方張力を増加させると中立線はロール入側に向かって移動してゆき、さらに前方張力を増加させると中立線はロールバイト中に存在しなくなる。張力により中立線が移動する様子はFEM解析⁵⁾によっても確認されている。

Fig. 7はFEM解析により計算された単スタンド圧延後($r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$)の円周方向の肉厚分布である。計算においてもフランジ側(F)で厚肉, カリバ底(C)で薄肉の角張りパターンが現れており, 図中にあわせて示した実験結果と傾向的に良い一致を見ている。

Fig. 8は素管 t_0/D_0 の角張り率 e に与える影響を示す。 t_0/D_0 が大きくなると角張り率は増加する。Fig. 9に $t_0/D_0=17\%$ と 34% の両方の場合に外径圧下率とロール楕円率の角張り率に与える影響をFEM解析により求めた結果を示す。いずれの場合も圧下率が大きくなると角張り率は増加し, また t_0/D_0 が大きいくほど角張り率は大きい。 $t_0/D_0=34\%$ の場合には角張り率のロール楕円率に対する依存性は極めて大きい, $t_0/D_0=17\%$ の場合にはそれほど顕著でない。

2・3 多スタンド圧延後の角張り⁷⁾⁸⁾

通常3ロール・レデュースでは各ロールスタンドの孔型が互いに 60° 位相で回転されて配置されている。このため奇数スタンドでカリバ底で圧延される部分は偶数スタンドではフランジ部で圧延される。Fig.10は $t_0/D_0=17\%$ の素管を

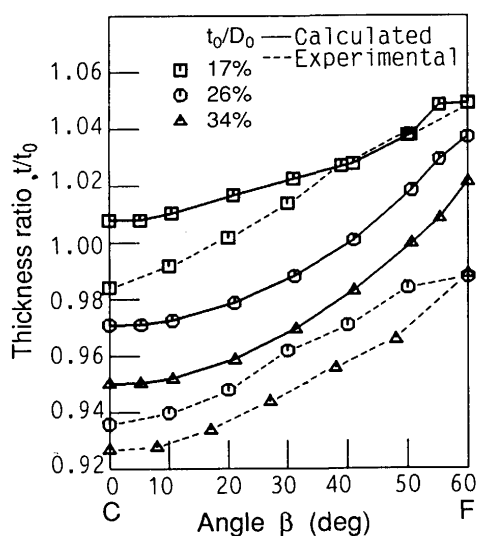


Fig. 7. Variation of wall thickness after the first pass ($r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$).

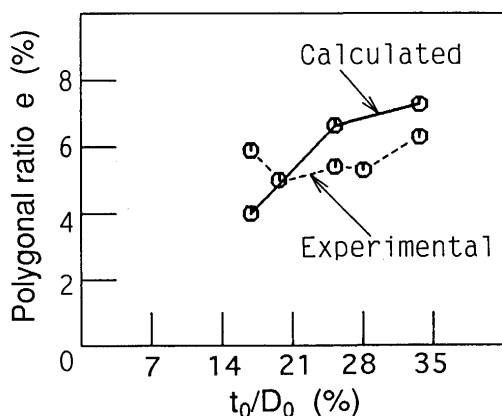


Fig. 8. Relationship between polygonal ratio and t_0/D_0 in the first pass ($r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$).

各スタンド $r=4.5\%$ および $O_v=6.5\%$ の条件で6スタンド圧延を行ったときの円周方向肉厚分布の推移を示す。無張力条件で計算を行っている。平均肉厚はスタンド数が増えるに従って増加している。同図の横軸は管の円周方向の角度を示すが, 奇数スタンドを基準にしている。すなわち図中のCおよびFは奇数スタンドでそれぞれカリバ底およびフランジ側で圧延される部分を示す。奇数スタンドでは $\beta=0^\circ$ のカリバ底で肉厚が最小になるが, 偶数スタンドでは孔型の位相が 60° 回転されるため $\beta=60^\circ$ で最小となる。単スタンドでの肉厚変動のパターンが 60° 位相で加え合わさって, 4スタンドで $\beta=30^\circ$ 付近が最大肉厚になり, 内面が6角張りになる様子が理解される。

Fig.11は $t_0/D_0=34\%$ の素管を各スタンド $r=4.5\%$ および $O_v=6.5\%$ の条件で6スタンド圧延(無張力)を行ったとき

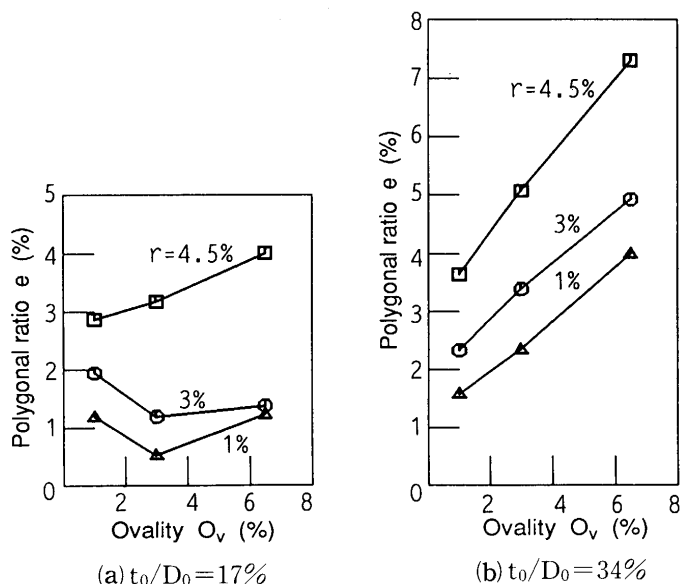


Fig. 9. Dependence of polygonal ratio on t_0/D_0 , reduction and ovality.

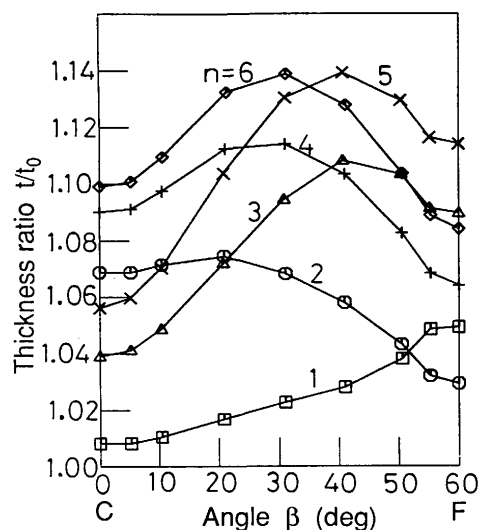


Fig. 10. Variation of wall thickness after each pass in 6 pass rolling ($t_0/D_0=17\%$, $r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$).

の円周方向肉厚分布の推移を示す。平均肉厚はスタンド数が増えるに従って減少している。奇数スタンドと偶数スタンドでは孔型の位相が交互に 60° 回転されるため $\beta = 0^\circ$ と 60° で薄肉となる傾向にあるが、 $t_0/D_0=17\%$ の場合と比較するとNO.1スタンドでの $\beta = 0^\circ$ で最小、 $\beta = 60^\circ$ で最大の肉厚分布がそれ以後のスタンドでも強く残り、奇数スタンドのフランジ側から少し離れた箇所で最大肉厚になる。

Fig.12はFig.10とFig.11の計算結果において $t_0/D_0=17\%$ と 34% の場合の各スタンドにおける角張り率 e の変化である。単スタンド圧延での角張り率は $t_0/D_0=34\%$ のほうが $t_0/D_0=17\%$ より大きいが、NO.2スタンド以降の平均の角張り率は同程度となっている。奇数スタンドでの角張り率は増加し偶数スタンドで減少しているが、その変化の振幅は $t_0/D_0=$

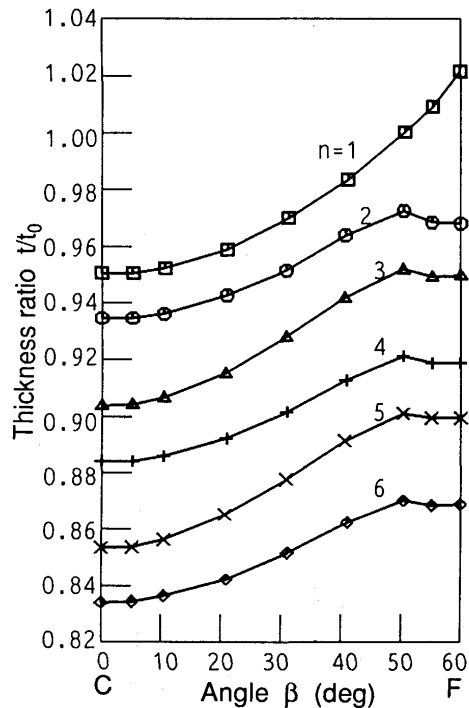


Fig. 11. Variation of wall thickness after each pass in 6 pass rolling ($t_0/D_0=34\%$, $r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$).

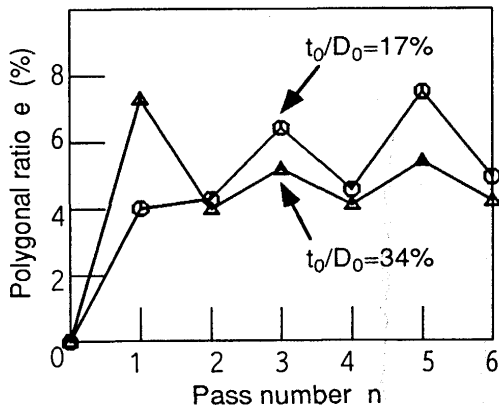


Fig. 12. Variation of polygonal ratio in 6 pass rolling ($r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$).

17%のほうが大きい。

Fig.13は $t_0/D_0=34\%$ の素管の場合に各スタンド $r=4.5\%$ と圧下率は一定で、ロール楕円率を奇数スタンドでは $O_v=6.5\%$ 、偶数スタンドでは $O_v=3\%$ とした場合の円周方向肉厚分布の推移を示す。奇数スタンドでは大きな三角張りが発生するが、偶数スタンドでは肉厚はかなり均一になっている。

3. 小径管工場における厚肉鋼管製造技術

通常、小径管工場のストレッチレデュースは20~30スタンドよりなり種々の外径・肉厚サイズの鋼管を製造する。最終仕上げスタンドでは真円に近いロール孔型形状で軽圧下が行われるが、高圧下をとる中間スタンドではロール楕円率を上げて圧延材のロールフランジ部への噛出しを防止する。厚肉サイズになると噛出しは減少するが管内面の角張りが増加するため、従来では $t/D=20\%$ 程度までの厚肉鋼管の製造が限界であった。上述した3次元FEMシミュレーションおよび単スタンド圧延試験による基礎研究の結果に基づけば、次に示す圧延方法が角張りを抑制して高い肉厚精度の厚肉鋼管を製造するために有効である。

圧下率、ロール楕円率に関しては、

- (1) 単スタンド当たりの圧下率、ロール楕円率を低減する。特に $t/D>25\%$ 程度の厚肉素管で角張りの低減に有効である。
- (2) $t/D>30\%$ の厚肉素管では単スタンド当たりの圧下率

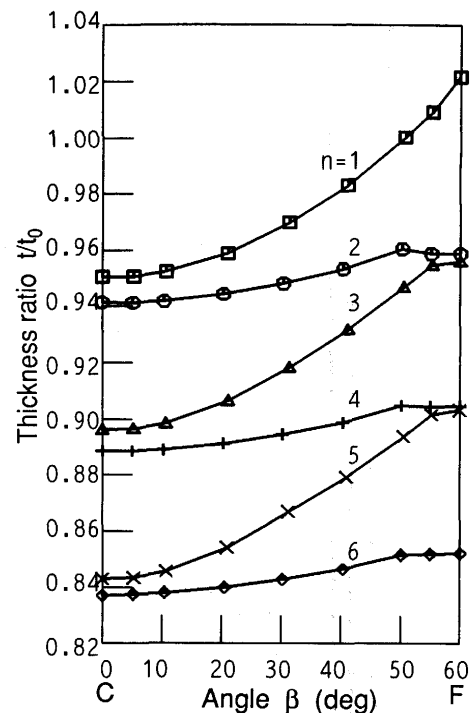


Fig. 13. Variation of wall thickness after each pass in 6 pass rolling ($t_0/D_0=34\%$, $r=4.5\%$, $O_v=6.5\%$ in odd pass, $O_v=3\%$ in even pass).

を大きくとっても偶数スタンドのロール楕円率を低減することで偶数スタンド仕上がり後の角張りを低減できる。

スタンド間張力に関しては、単スタンドで発生する角張りの低減が多スタンド圧延での角張り低減にも有効との推論に立脚すれば、

(3)張力レベルを大きくすれば角張りは低減し、前方張力と後方張力の差を増加させればさらに角張りの低減に有効である。

実際にこれらの方法を操業条件へ反映させることで肉厚精度の向上が達成され、従来では考えられなかった厚肉サイズの鋼管の製造が可能になった。以下には特に上記の(1)の方法を実操業へ適応した例とその結果について述べる。

Fig.14に101.6 ϕ ×28tの素管を用い、水準A($r=2\sim3\%$, $O_v=1\%$)と水準B($r=5\sim7\%$, $O_v=6.5\%$)で3スタンド圧延を行ったときの中止材の円周方向の肉厚分布の変化を示す¹⁵⁾。いずれの水準もスタンド間張力はほぼ無張力の設定となっている。図中横軸の角度0°が奇数スタンドのフランジ側、60°がカリバ底に相当する。水準Aでは新たに生ずる肉厚変動は非常に小さいのに対し、水準BではNO.1スタンドでフランジ側が厚肉になる肉厚変動(角張り率 $e=7\%$)を生じ、NO.2スタンドでは角張り率は減少し、NO.3スタンドで再びフランジ側が厚肉になる角張りを生じている。これらの結果はFig.9、Fig.11およびFig.12の計算結果と傾向的に良く一致している。

ストレッチレデュースでの圧下率パターンを例をFig.15に示す。小径管工場のストレッチレデュースで例えば50.8 ϕ ×15.0tの厚肉鋼管を製造しようとする場合、その前工程のピアサ、マンドレルミルでのローリングスケジュールの関係で素管は $t_0/D_0=17\%$ 程度のもを用い、トータルで約50%の外圧圧下率をとる。従来は図中に示すように、各スタンドの圧下率配分をほぼ均等にして楕円率3~5%のロールで、10数スタンドを用いて圧延した。これに対し新しく採用した圧下率パターンN-1とN-2においては、前段スタンドでは従来とほぼ同様の圧下率と楕円率をとるが、素管がスタンド数とともに増肉してゆき t/D が約25%に達した以降では図中に示すように圧下率を極力低減し、 $O_v=1\%$ 程度の真円カリバに近いロールでより多スタンドを用いて圧延する。N-2では2段階に圧下率と楕円率を低減している。N-1とN-2では従来と同様の大きな張力レベルをとるだけでなく、特に後段スタンドでは前方張力大の設定としている。

それぞれの条件で圧延した管の断面形状をFig.16に示す。従来条件によるものでは管の内面に顕著な角張りが発生するのに対し、新しい条件N-1とN-2のいずれによるものも内面の真円度が格段に向上している。Fig.17に多数の素管を圧延した後測定した角張り率を統計的に整理した。従来条件によるものに対し、新しい条件では一桁低い角張り率となっており、飛躍的に肉厚精度が向上したことがわかる。

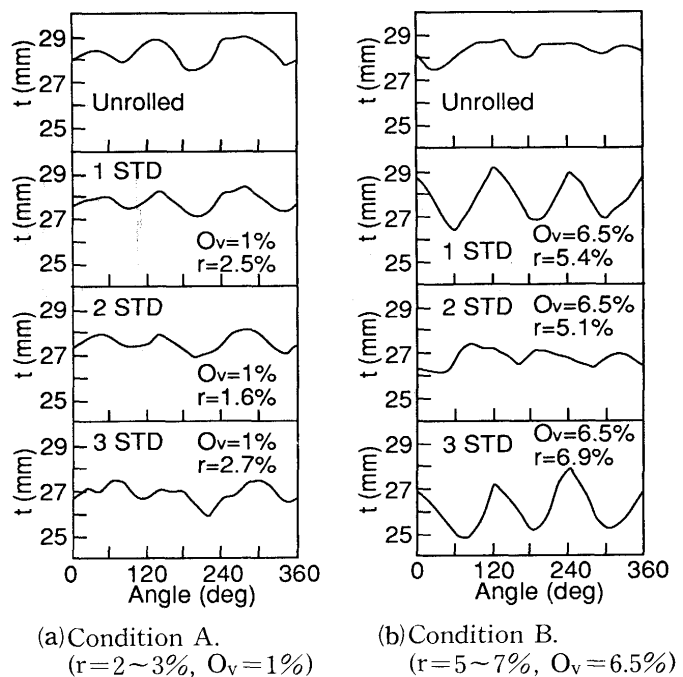


Fig. 14. Variation of wall thickness after each pass in a multi-pass rolling of steel tubes.

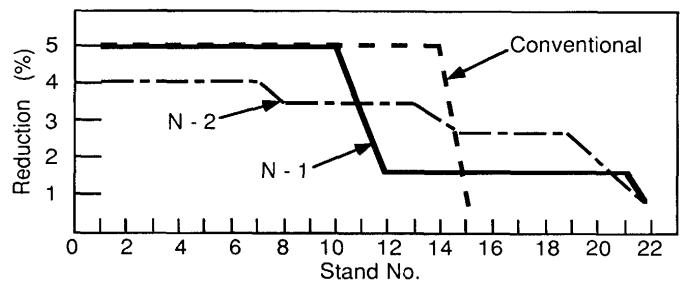


Fig. 15. Reduction patterns in stretch reducing of thick-walled tubes.



(a) Before improved. (b) After improved.

Fig. 16. Rolled tube sections before/after improved.

その他の種々の製品外径における $t/D>20\%$ の厚肉サイズに対しても、同様の圧下率、ロール楕円率および張力配分の適正化を行うことにより角張りの発生が抑制され、高精度の厚肉鋼管の製造が可能となった。これらの技術開発によりNKK小径管工場の製造可能範囲がFig.18に示すように大幅に拡大し、 t/D で30%を超える厚肉鋼管の製造が安定して行えるようになった。

4. 結言

以下に示す総合的な研究開発により小径厚肉・高寸法精

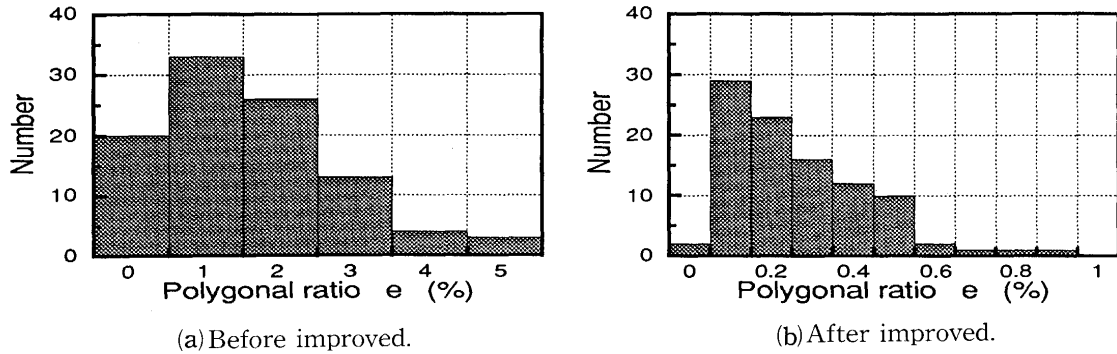


Fig. 17. Statistical distribution of polygonal ratio in stretch reducing of thick-walled tubes.

度鋼管の製造技術を確立した。

(1) レデュース圧延における管内面の角張りの発生機構を3次元剛塑性有限要素法および鉛モデル単スタンド圧延試験により基礎的に解明した。圧下率、ロール楕円率、素管 t/D および張力の角張りに与える影響を定量的に把握した。単スタンド圧延における解析結果と多スタンド圧延における無張力下での角張り発生挙動に関する解析結果をもとに、角張りを防止するために圧延条件を検討した。

(2) 基礎研究の結果を小径管工場のストレッチレデュースの操業条件に反映した。各スタンドの圧下率、ロール楕円率および張力配分の適正化により角張り発生を極小に抑えた高精度の圧延が可能となり厚肉鋼管の製造範囲($t/D > 30\%$)が拡大した。

文 献

- 1) C.Hayashi and T.Yamada: Advanced Technology of Plasticity II, (1984), P.1254 [JSTP and JSPE]
- 2) 第3版鉄鋼便覧III(2)(日本鉄鋼協会編), (1980), p.1042[丸善]
- 3) 平岡宣昭, 秋山政義, 井上 誠: 鉄と鋼, **67** (1981), p.203
- 4) M.Akiyama, C.Hayashi and J.M.Alexander: Proc. 3rd Int. Conf. on Steel Rolling, Tokyo, (1985), p.367
- 5) K.Mori, K.Nakadoi, Y.Mihara, T.Hirakawa, K.Osakada and M.Fukuda: Proc. 3rd Int. Conf. on Steel Rolling, Tokyo, (1985), p.375
- 6) 森謙一郎, 小坂田宏造, 三原 豊, 平川智之, 福田正成: 塑性と加工, **28** (1987), p.1054
- 7) 森謙一郎, 三原 豊, 曾谷保博, 秋田真次: 第40回塑加連講論, (1989), p.393
- 8) 森謙一郎, 三原 豊, 曾谷保博, 秋田真次: 塑性と加工, **32** (1991), p.1262
- 9) 曾谷保博, 平川智之, 三原 豊: 昭60年塑加春講論, (1985), p.81
- 10) 三原 豊, 平川智之, 曾谷保博, 森謙一郎, 秋田真次, 上村治男: 日本鋼管技報, **110** (1985), p.22
- 11) W.Dobrucki and P.Sobkowiak: Proc. 3rd Int. Conf. on Steel Rolling, Tokyo, (1985), p.391

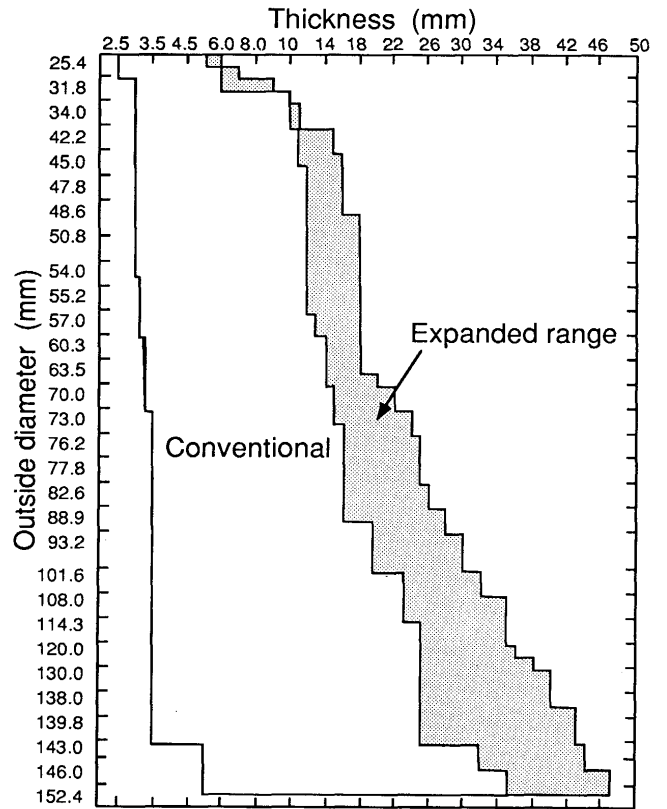


Fig. 18. The diagram of capable size range of NKK Small-Diameter Seamless Tube Mill.

- 12) Y.Sodani, T.Hirakawa and Y.Mihara: Advanced Technology of Plasticity II, ed. by K.Lange, (1987), p.795 [Springer-Verlag]
- 13) K.Mori and K. Osakada: Int. J. Mech. Sci., **26** (1984), p.515
- 14) 森謙一郎, 小坂田宏造: 機論A, **56** (1990), p.1288
- 15) 秋田真次, 生井賢治, 三原 豊, 平川智之: 平2塑加春講論, (1990), p.145