

|||||
論 文
|||||

角形鋼管のコーナー部断面形状に及ぼすロール径の影響

中村大輔* 仲子武文** 長町拓夫***

Effect of Roll Diameter on Cross-Sectional Corner Shape of Square Steel Pipe

Daisuke Nakamura, Takefumi Nakako, Takuo Nagamachi

Synopsis:

Square steel pipes formed by roll forming are used in various structure and building components. When welding these structural parts, corner shapes are important to guarantee the quality of welding. Therefore, high dimensional accuracy is required for the corner shapes of square steel pipes.

In order to improve the accuracy of corner shapes, we examined the effect of the diameter and position of forming rolls on the dimensional accuracy.

This report presents our verification both with experiment and FEM analysis.

The summary of this report is as follows;

- 1) Corner shapes are out of balance, because the contact start sections are different on the top and side face in longitudinal direction, in case that the diameters of top rolls and side rolls are different.
- 2) With increasing the ratio of diameter of top rolls and side rolls, the balance of the corner shapes gets worse.
- 3) The inequality of the corner shapes is improved by offsetting the small diameter side rolls to the upstream side of the forming line when the diameters of top rolls and side rolls are different.

1. 緒言

溶接鋼管をロール成形によって成形した角形鋼管は、各種の構造物や建築物の構造部材として広く用いられている。このような用途において構造部材を溶接接合する場合、寸法に偏差があると溶接不良や建築物の性能低下を招くことがある。このため、角形鋼管のコーナー形状には高い寸法精度が要求される。

角形鋼管は、通常10スタンド以上で構成されるロール成形機に鋼帯が通板されて円管に成形された後、引続いて複数の角形鋼管成形スタンドにより角形断面に成形される。角形鋼管の成形には、上下左右に設置されたロールを一組とした、上下ロール駆動によるタンデム方式の成形機が用いられる。角形鋼管成形機の設備構成の特

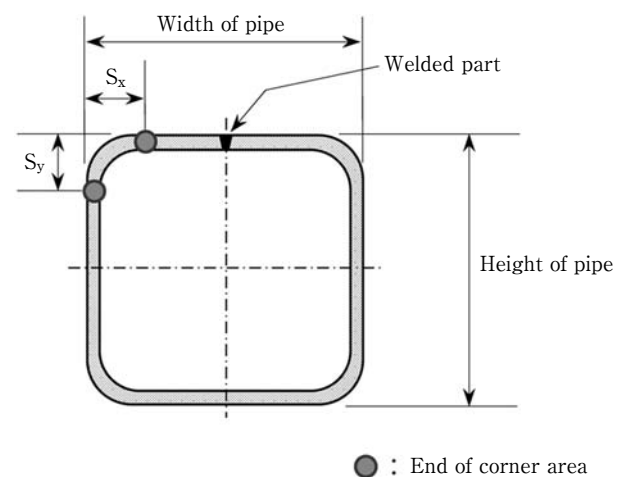


Fig. 1 Cross-sectional shape of square pipe.

*技術研究所 加工技術研究部加工第一研究チーム

**技術研究所 加工技術研究部加工第一研究チーム 主任研究員

***徳島大学 ソシオテクノサイエンス研究部 講師

徴として、駆動軸の干渉を回避するため上下ロールの径をサイドロールの径よりも大きくする場合が多い。

角形鋼管のコーナー形状はJIS規格 (JIS G 3466) で規定される。本研究ではコーナー部の幅および高さ寸法「S」をS寸法と定義し、Fig. 1 に示すように上下面側のS寸法を S_x 、側面側のS寸法を S_y とする。当社グループの特定の設備で製造された角形鋼管のコーナー形状を調査すると、 S_x は S_y よりも10%程度大きくなる傾向が認められた。そこで、このロール成形設備の上下ロールとサイドロールの径が異なることに着目し、角形鋼管のコーナー形状に対する種々の成形条件の影響について調査を行った。

これまでの角形鋼管の研究では、木内らの実験による研究¹⁾ および小野田らのFEM解析による研究²⁾ が行われているが、ロール径がコーナー形状に及ぼす影響は明らかではない。

筆者らは、正方形角形鋼管のロール成形過程において、コーナー形状の改善を目的に実験ならびにFEM解析で検討を行った。本報でこれらの結果を報告する。

2. 実験およびFEM解析方法

2.1 実験方法

実験では、Fig. 2 に示す3組の無駆動ロールスタンドで構成される角形鋼管成形装置に円管を押し込むことにより、正方形角形鋼管を成形した。

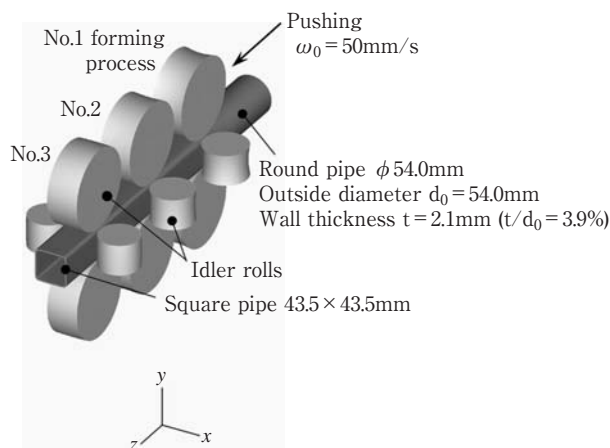


Fig. 2 Schematic illustration of forming processes.

実験には直径54mm、肉厚2.1mmの垂鉛めつき鋼板を素材とした円管を使用した。目標とする角形鋼管の寸法は、辺部寸法が43.5mm、S寸法が4mmである。Table 1

Table 1 Mechanical properties of round pipe

Young's modulus/GPa	207
Yield strength/MPa	388
Tensile strength/MPa	447
Elongation/%	59

に円管から切り出した試験片の引張試験から求めた機械的性質を示す。

Table 2 に実験およびFEM解析に用いた上下ロールおよびサイドロールの寸法ならびに組合せを示す。Table 2 (a)に示すように上下ロールは直径 (ロール胴長中央部における直径、以下同様) が約160mm (Roll-A), サイドロールは直径が約160mm (Roll-A) および約105mm (Roll-B), 54mm (Roll-C) のものを使用した。Table 2 (b)にロールプロフィールおよび円管からの外形寸法減少率 (リダクション $r_i = (d_0 - 2H_i) / d_0$) を示す。No. 3 スタンド

Table 2 Forming roll conditions of the experiment and simulation

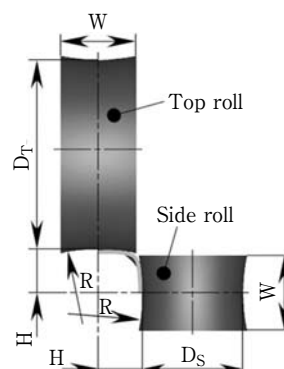
(a) Diameters of forming rolls				
Process	Roll diameter /mm			
	Roll-A	Roll-B	Roll-C	
No.1	161.5	101.9	54.0	
No.2	161.5	104.5	54.0	
No.3	162.1	106.9	54.0	

(b) Dimensions of rolls and reduction schedule in forming process				
Process	R/mm	W/mm	H/mm	Reduction/%
No.1	97.50	40.70	23.70	12.2
No.2	236.86	40.98	22.38	17.1
No.3	-531.46	41.02	21.72	19.6

(c) Sets of side rolls			
Case	Side Rolls		
	No.1	No.2	No.3
1	Roll-A	Roll-A	Roll-A
2	<i>Roll-B,C</i>		
3	Roll-A	<i>Roll-B,C</i>	<i>Roll-B,C</i>
4		Roll-A	
5	<i>Roll-B,C</i>	<i>Roll-B,C</i>	

Top rolls: A (in all cases)

Italic shows small diameter rolls



のロールプロフィールの曲率半径は負の値となっているが、これは辺部の形状矯正用に凸ロールを用いたためである。Table 2 (c)に実験を行ったサイドロールの組み合わせを示す。全スタンドのサイドロールにRoll-Aを使用する場合を基準条件とし、Case 1とした。基準条件のCase 1に対してコーナー形状に最も影響を及ぼすスタンドを調査するため、No.1スタンドのサイドロールにのみRoll-BまたはRoll-Cを用いる場合をCase 2とした。同様にNo. 2, No. 3スタンドのサイドロールにのみRoll-BまたはRoll-Cを用いる場合をそれぞれCase 3, 4とし、全スタンドのサイドロールにRoll-BまたはRoll-Cを用いる場合をCase 5とした。なお、上下ロールには全条件でRoll-Aを使用した。

2.2 コーナー形状の定義

形状測定に用いるサンプルは、サンプル中央部においてロール直下での圧下の影響や、管端部での開口変形の影響を受けないような、長手方向に均一の断面形状が得られる長さで切断した。サンプル切断後、周方向の断面形状を評価するため、三次元座標測定機でサンプルの形状測定を行った。

三次元座標データから、Fig. 3 に示す周方向の曲率分布を得た。横軸は周方向の相対位置を示し、側面側辺部

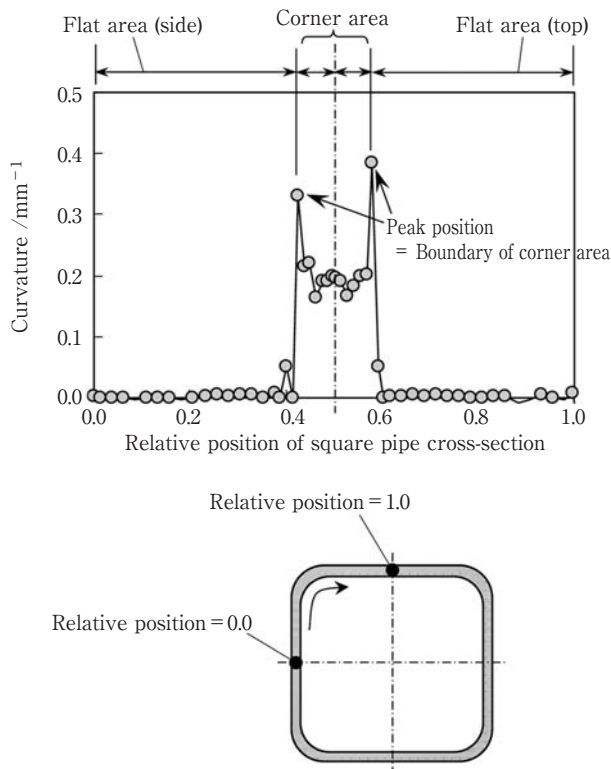


Fig. 3 Curvature of square pipe cross-section.

中央を相対位置0.0、上面側辺部中央を相対位置1.0とした。周方向の相対位置が約0.4および0.6付近で曲率の立ち上がり（以後、立ち上がりの頂点をピークとする）が認められる。このピークの位置はコーナー部と辺部の境界であり、以後肩部と定義する。

2.3 FEM解析方法

角形鋼管のロール成形における変形挙動について、FEM解析によって検討を行った。FEM解析は静的陰解法による弾塑性非定常解析で行い、No. 1～3の各スタンドでの成形をそれぞれ1/4対称モデルでFEM解析を行った。パイプとロールの摩擦は一定とし、クーロン摩擦係数 $\mu = 0.12$ を用いた³⁾。

検討に先立ち、No. 1 からNo. 3 スタンドまでを連続的に成形するタンデム成形によるFEM解析と、No. 1 スタンドから順に単スタンドごとに成形するFEM解析結果を比較し、タンデム成形と単スタンド成形では各スタンドで成形されたパイプの断面形状に差異がないことが確認されたことから、解析時間の短縮を図るために単スタンドごとにFEM解析を行った。

Fig. 4 に解析手順を示す。まず、Fig. 4 (a)に示すようにロール間隔を成形時よりも広く設置したロールの穴型内にパイプを設置し、境界条件としてパイプ先端および後端面で長手方向に拘束し、ロールを回転しない状態で成形時の間隔になるまで移動させた。次に、パイプ先端面の拘束を解除し、パイプ後端面に長手方向への速度を

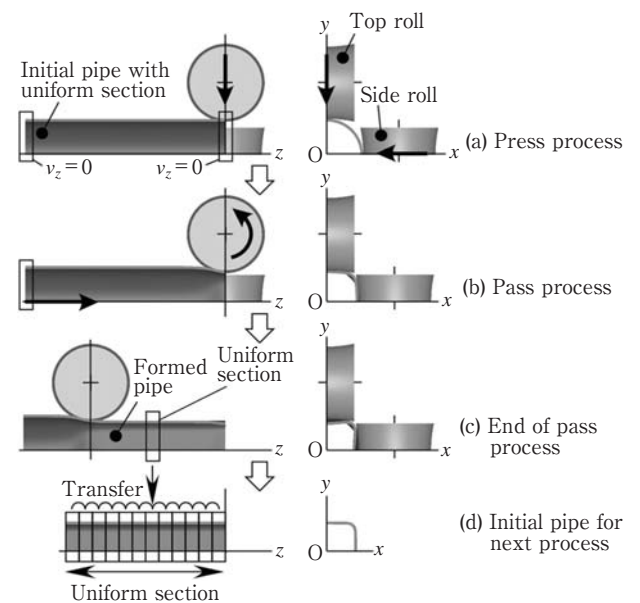


Fig. 4 Procedure of calculation.

与えると同時にロールを回転させ、角形鋼管成形を行った (Fig. 4 (b))。このときロールの回転速度はロールの回転トルクが0になるように算出した。Fig. 4 (c)に長手方向への成形が終了したときの状態を示す。

引続き次のNo. 2 スタンドあるいはNo. 3 スタンドでFEM解析を行う場合には、長手方向に定常状態が得られた角形鋼管の一部を抽出し、Fig. 4 (d)に示すように抽出された部分を長手方向へとコピーすることにより必要長さの定常部を得、次スタンドでFEM解析する際の初期パイプとした³⁾。

パイプのメッシュは8節点6面体のソリッド要素を使用し、肉厚方向には3要素とした。ひずみが集中するコーナー部には周方向にメッシュを多く配分した。各スタンドでの全要素数はそれぞれ15,000から20,000要素とした。FEM解析には汎用ソルバー-DEFORM-3Dを用いた。

以上のFEM解析方法を用い、Table 2に示した3種類の径のロールを適宜組み合わせるFEM解析を行い、コーナー形状に及ぼすロール径の影響を調査した。

3. 実験結果およびFEM解析結果

3.1 ロール径が角形鋼管の断面形状に及ぼす影響

Fig. 5にNo. 3 スタンド成形後におけるコーナー部のS寸法の実験結果を示す。全スタンドでサイドロールにRoll-Aを用いた基準条件Case 1およびNo. 3 スタンドのみサイドロールにRoll-Bを用いたCase 4では、 S_x と S_y は

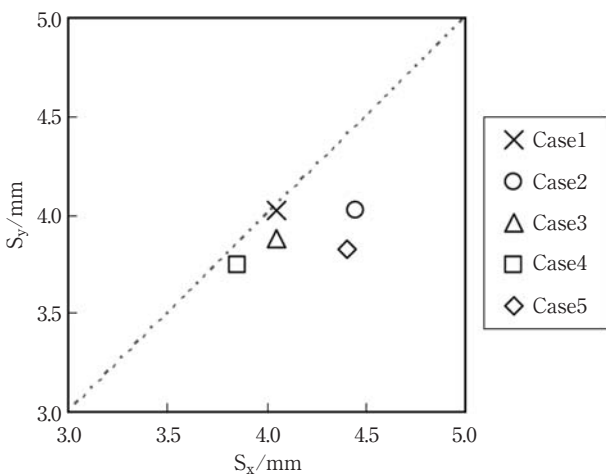
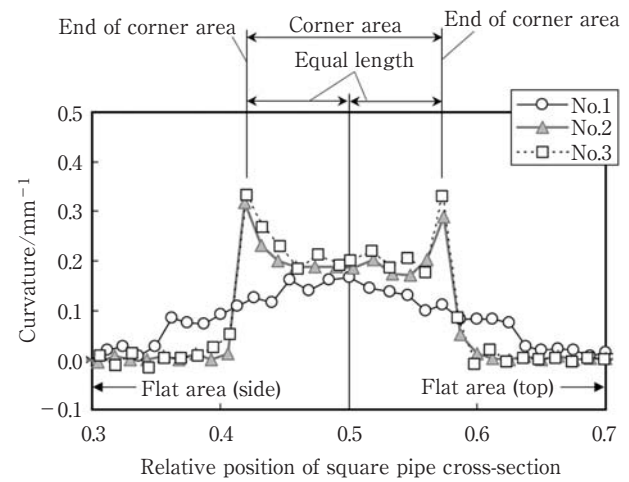


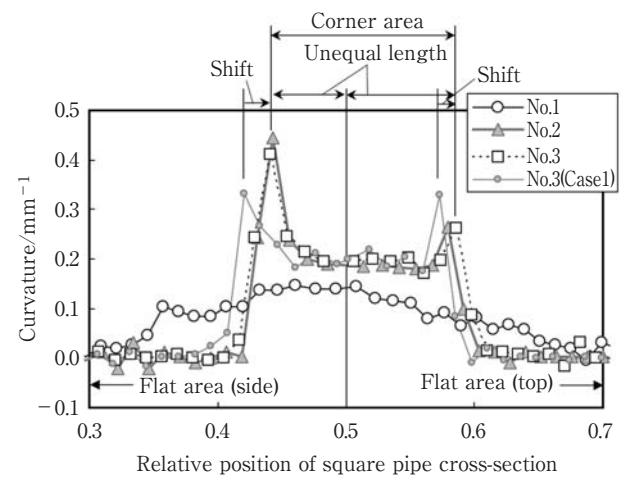
Fig. 5 Effect of roll diameter on S value of square pipe cross-section (experiment).

ほぼ等しくなった。しかしながら、No. 1 スタンドとNo. 2 スタンドのいずれか一方または両方のサイドロールにRoll-Bを用いたCase 2, 3, 5の条件では、 $S_x > S_y$ となった。以後、 $S_x \neq S_y$ となる現象を、S寸法の偏りと呼ぶ。S寸法の偏りが著しかった実験条件から順にCase 5 (全スタンドのサイドロールがRoll-B)、Case 2 (No. 1 スタンドのサイドロールのみRoll-B)、Case 3 (No. 2 スタンドのサイドロールのみRoll-B)であった。

Fig. 6に角形鋼管の外面上における周方向の曲率分布の実験結果を示す。全スタンドでサイドロールにRoll-Aを使用したCase 1では、肩部を示すピークの位置はコーナー部中心 (相対長さ0.5) から左右対称となるのに対し



(a) Case1



(b) Case5

Fig. 6 Effect of roll diameter on curvature of square pipe cross-section (experiment).

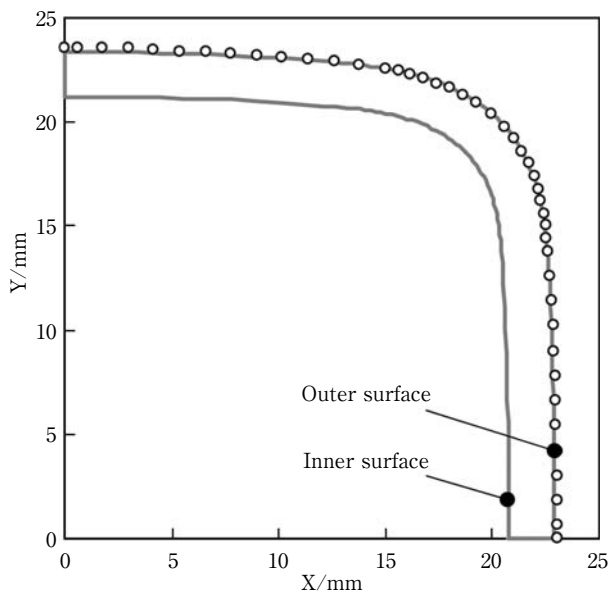
し、全スタンドでサイドロールにRoll-Bを使用したCase 5では、ピークの位置が側面側から上面側へと移動した。上下ロールとサイドロールの径が異なると、ピークの周方向位置はコーナー部中心に対して対称ではない曲率分布となり、S寸法に偏りが発生した。

また、コーナー部の周方向の曲率はS寸法の偏りの有無によらず、No.2およびNo.3スタンドの成形後においてほぼ等しく、コーナー部の成形はNo.1スタンドおよびNo.2スタンドでほぼ完了していることがわかった。No.3スタンドでは直辺部の形状のみが矯正されると考えられる。

以上の実験結果から、小径サイドロールを使用するとS寸法の偏りが生じること、およびS寸法の偏りの大小は小径サイドロールを使用するスタンドの影響を受けることを確認した。

3.2 ロール成形過程におけるコーナー部変形挙動

Fig. 7にNo.1スタンドで成形されたパイプの断面形状の実験結果と解析結果を示す。解析結果は実験結果とよく一致しており、実際の成形状態を十分に予測していると考えられた。そこで本FEM解析の結果を用い、S寸法の偏りの原因について考察を行った。



	Roll		Case	Result by
	Top	Side		
○	A	B	5	Experiment
—	A	B	5	Simulation

Fig. 7 Cross-sectional profiles of formed pipe by No.1 process.

Fig. 8にパイプとロールが接触の様子を3次的に1/4対称モデルで示す。パイプが上下ロールおよびサイドロールに接触している長手方向の領域をArea-A、パイプが上下ロールのみと接触しサイドロールと接触していない領域をArea-Bとする。またSection 1は上下ロールがパイプに接触を開始する位置を、Section 2はサイドロールがパイプに接触を開始する位置を示す。Section 3は上下ロールおよびサイドロールの中心位置を示し、Section 3を通過するとそのスタンドでの成形が完了する。

Fig. 8 (a)に全スタンドでサイドロールにRoll-Aを用いたCase 1による成形の様子を示す。上下ロールとサイドロールの径が同じ場合、パイプの上面側と側面側とでロールと接触を開始する位置はSection 1とSection 2とで等しく、パイプは上面側と側面側で対称的にロールと

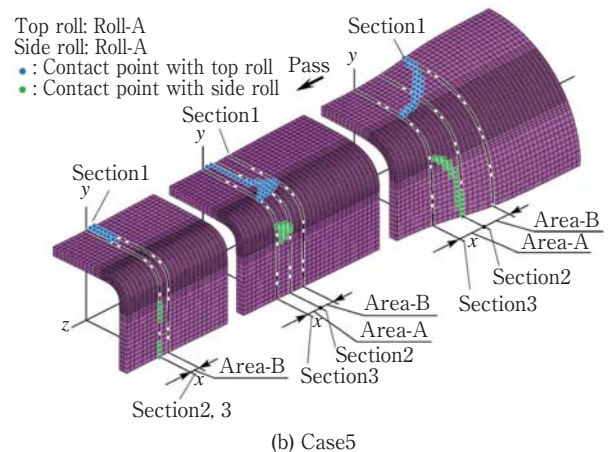
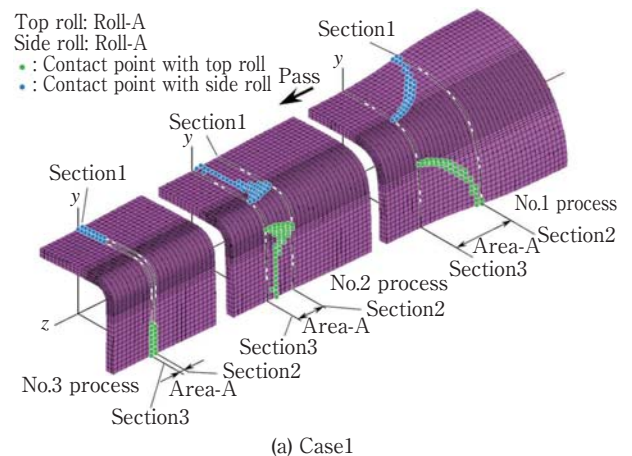
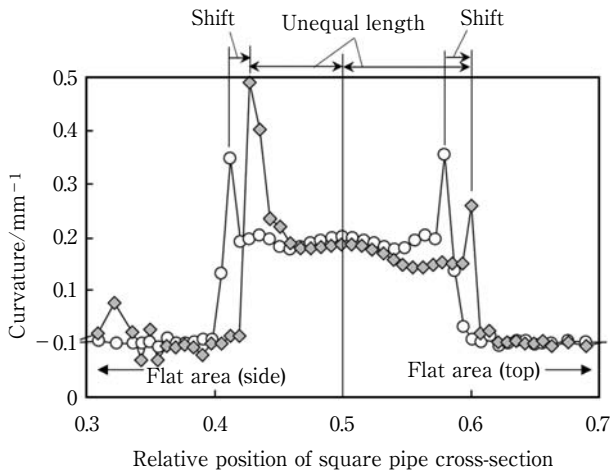


Fig. 8 3-dimensional shapes and contact areas (simulation).

接触して成形される。

Fig. 8 (b)にはCase 1 との違いを明確にするため、Case 5で、ロールの組合せは上下ロールとサイドロールの径の比が最も大きい条件となる上下ロールにRoll-A、サイドロールにRoll-Cを用いた場合の成形の様子を示す。サイドロールの径を小さくすると、パイプ側面側のArea-Aよりも上流側にパイプがサイドロールと接触しない領域Area-Bが生じた。パイプはSection 1で上ロールとのみ接触を開始するが、Area-Bではサイドロールとは接触しない。その後、成形が進むとSection 2でサイドロールと接触を開始しArea-Aで示すように上下ロールおよびサイドロールによって成形が行われる。このように上下ロールとサイドロールで径が異なる場合、パイプは上面側と側面側で非対称的に接触しながら成形される。

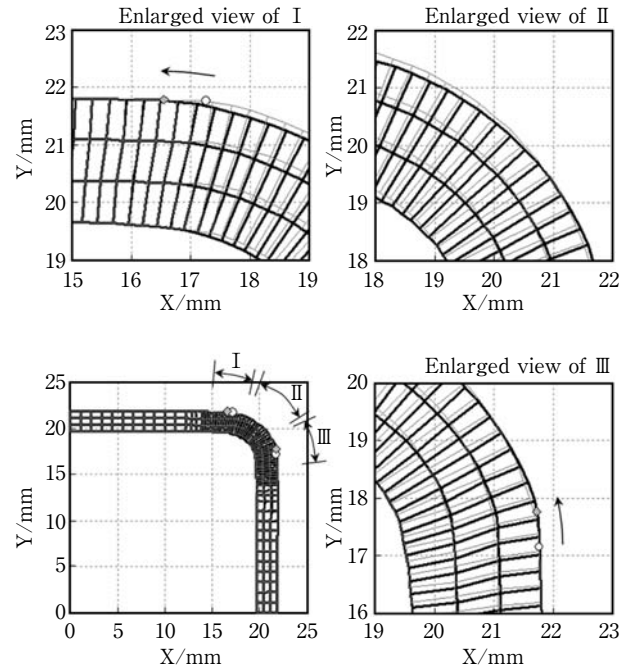
全スタンドでサイドロールにRoll-Aを用いたCase 1と全スタンドでサイドロールにRoll-Cを用いたCase 5の場合における、No. 3 スタンド成形後の周方向曲率分布の解析結果をFig. 9に示す。Case 1では肩部がコーナー部中心から左右対称となったのに対し、Case 5では肩部がパイプの側面側から上面側へと移動しコーナー部中心に対して非対称となり、S寸法の偏りが発生し



	Roll		Case
	Top	Side	
○	A	A	1
◇	A	C	5

Fig. 9 Effect of roll diameter on curvature of square pipe cross-section by No.3 process (simulation).

た。このときの断面形状をFig.10に示す。Case 5の場合、Case 1に比べて上面側肩部は上面の辺中央寄りに位置し、また側面側肩部はコーナー中央寄りに位置した⁴⁾。



○, ◇: End of corner area

	Roll		Case	D _T /D _S
	Top	Side		
○	A	A	1	1.0
◇	A	C	5	3.0

Fig.10 Formed pipe cross-section by No.3 process (simulation).

Fig.11に上下ロールの径がサイドロールの径よりも大きい場合の成形を模式的に示す。Fig.11(a)はパイプがロールに接触する様子を3次元的に示す。Fig. 8で示したように、パイプは上面側のSection 1で大径の上下ロールと先に接触し、Area-Bでは上下ロールのみと接触し成形される。次いで側面側のSection 2で小径のサイドロールと接触し、Area-Aでは上下およびサイドロールにより成形された後、Section 3で同時に上下およびサイドロールから離れて成形が終了する。成形初期のArea-BにおいてはFig.11(b)に示すように、パイプは上下ロールによってのみ成形されるため、パイプの断面形状は幅方向に扁平し、コーナー形状は上面側と側面

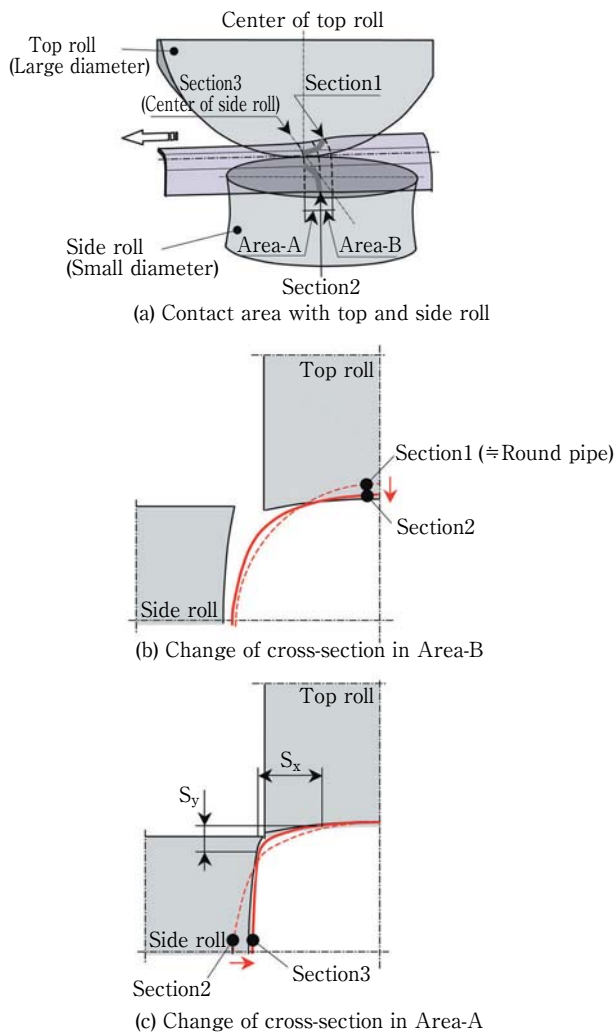


Fig.11 Schematic illustration of roll contact and formed pipe cross-section in conventional method.

側で非対称な楕円状になると考えられる。成形後期のArea-AにおいてはFig.11(c)に示すように、パイプは小径のサイドロールとも接触し幅方向からも圧下され、パイプ全体の断面形状としては対称的な正方形に成形されるが、コーナー部においてはパイプとロールが接触していないため、Area-Bでの楕円形状をArea-Aで完全に対称にすることができず、S寸法の偏りとして現れると考えられる⁵⁾。

4. コーナー形状に及ぼすロールオフセットの影響

大径上下ロールと小径サイドロールを組合わせて角形鋼管を成形すると、パイプがロールに接触を開始する位

置が上下ロールとサイドロールとで異なるため、S寸法の偏りが生じることがわかった。

そこで、パイプと上下ロールおよびサイドロールとの位置を調整して接触開始位置の影響を小さくし、Fig.11(b)に示したArea-Bにおける幅広がりの変形を抑制することがS寸法の偏りを低減するために有効であると考え、小径サイドロールをパイプの長手方向上流側にオフセットして成形する方式を考案した。Fig.12に小径のサイドロールをオフセットした成形について、パイプが大径上下ロールと小径サイドロールと同じタイミングで接触するようにサイドロールをオフセットした場合の例を模式的に示す。Fig.12(a)はパイプがロールに接触の様子を3次的に示す。サイドロールをオフセットした結果、Fig.11(a)で示したSection 1とSection 2が一致してSection 4となり、パイプが上下ロールとのみ接触する領域Area-Bが消滅している。Fig.12(b)に示すようにパイプはSection 4でロールの上面側と側面側に同時に接触し、成形初期段階から上下および左右のロールにより成形されるため、Section 5ではS寸法の偏りが低減して成形されることが期待される。

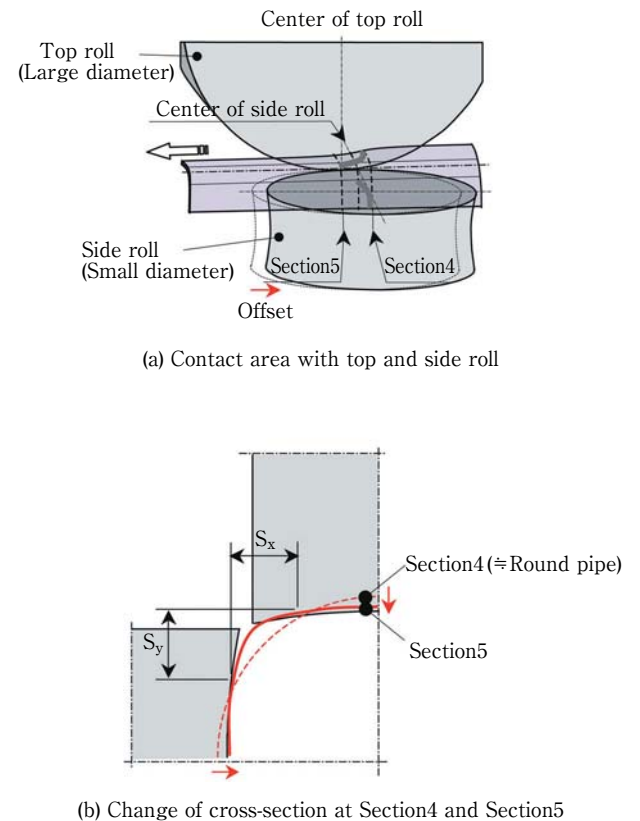


Fig.12 Schematic illustration of roll contact and formed pipe cross-section in offset method.

Fig.13に全スタンドのサイドロールに小径のRoll-Bを使用したCase 5の条件で、サイドロールをライン上流側にオフセットした場合のNo.1およびNo.2スタンド成形後のS寸法の解析結果を示す。サイドロールのオフセット量を Z_{0i} で示し、添え字iはオフセットしたロールを表す。No.1ロールのオフセット量 $Z_{01}=0\text{mm}$ の場合は $S_x > S_y$ でS寸法の偏りが生じていたが、 $Z_{01}=4\text{mm}$ の場合は $S_x \approx S_y$ となりS寸法の偏りはほぼ解消された。さらにオフセット量を大きくした $Z_{01}=8\text{mm}$ の場合は $S_x < S_y$ となり、 $Z_{01}=0\text{mm}$ の場合とは逆側にS寸法の偏りが生じた。 $S_x < S_y$ となった原因は、サイドロールを必要以上にオフセットすることでパイプとサイドロールのみが接触し上下ロールが接触しないArea-Cの領域が発生したためと考えられる。

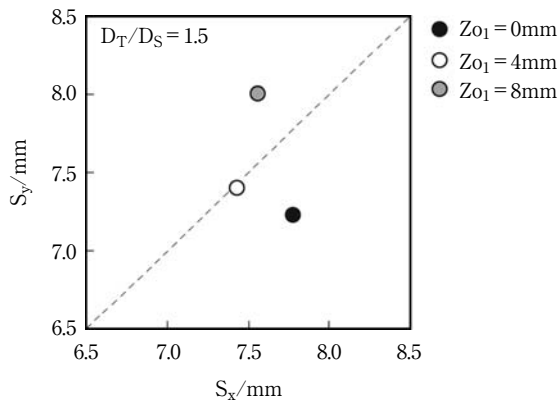


Fig.13 Effect of side roll offset on S value of square pipe cross-section by No.1 process (simulation).

Fig.14にNo.2スタンド成形後のS寸法の解析結果を示す。No.2ロールのみをオフセットした場合 ($Z_{01} = 0\text{mm}$, $Z_{02} = 4, 6\text{mm}$)、およびNo.1ロールで $S_x < S_y$ となる大き

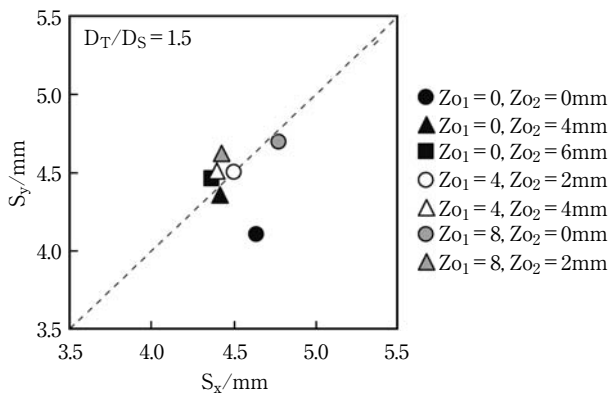
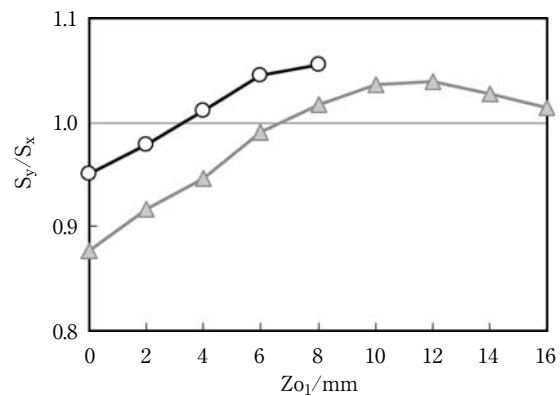


Fig.14 Effect of side roll offset on S value of square pipe cross-section by No.2 process (simulation).

なオフセットを設定した場合 ($Z_{01} = 8\text{mm}$, $Z_{02} = 0, 2\text{mm}$) に $S_x \approx S_y$ となり、コーナー形状を改善することができた。

そこで、ロール径の比と適正なオフセット量の組み合わせについてFEM解析により調査した。全スタンドのサイドロールにRoll-BまたはRoll-Cを使用したCase 5の条件で評価した。なお、本検討では前述のようにコーナー形状はNo.2スタンドまでに形成されるため、No.1ロールおよびNo.2ロールでのオフセット量について検討を行った。

Fig.15にNo.1ロールのオフセット量 Z_{01} とNo.1スタンド成形後におけるS寸法の偏りの関係を示す。Table 2に示したように、 D_T および D_S はそれぞれ上下ロールとサイドロールの径を示す。 $Z_{01} = 0\text{mm}$ の場合では、ロール径の比 D_T/D_S が大きいくほど、No.1スタンド成形後におけるS寸法の偏りが大きかったが、オフセット量 Z_{01} を変化させることにより S_y/S_x の値も変化し、いずれの D_T/D_S の場合でも S_y/S_x が1.0になりS寸法の偏りが解消される条件が存在する。



	Roll		D_T/D_S
	Top	Side	
○	A	B	1.5
△	A	C	3.0

Fig.15 Effect of side roll offset on S_y/S_x ratio of square pipe cross-section by No.1 process (simulation).

Fig.16にNo.2ロールのオフセット量 Z_{02} とNo.2スタンド成形後におけるS寸法の偏りの関係を示す。Fig.16(a)に示すように D_T/D_S が1.5の場合、いずれの Z_{01} に対してもNo.2スタンド成形後のS寸法の偏りが解消される Z_{02} との組み合わせが存在する。一方、Fig.16(b)に示すように D_T/D_S が3.0の場合には、偏りを解消するためには Z_{01}

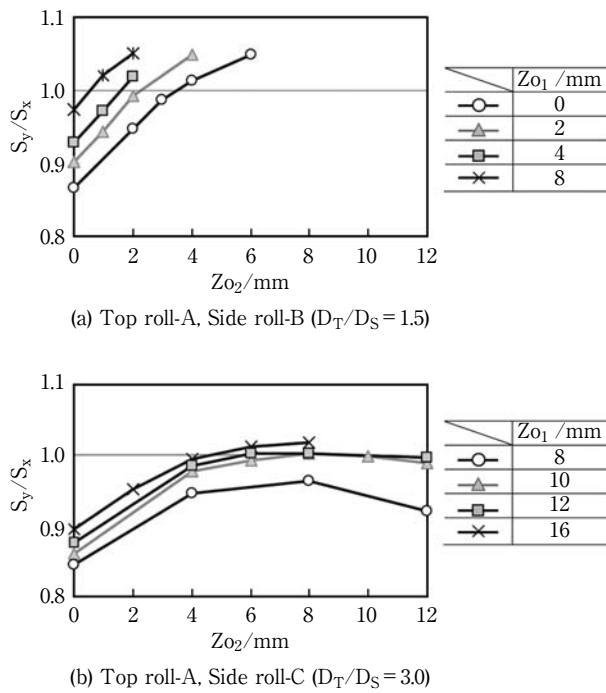


Fig.16 Effect of side roll offset on S_y/S_x ratio of square pipe cross-section by No.2 process (simulation).

を10mm以上とする必要がある。 D_T/D_S が大きい場合には、各スタンドで発生するS寸法の偏りが大きくなるため、No.1ロールのオフセット量を大きくすることが必要になると考えられる。

Fig.17にはNo.3スタンド通過後のコーナー形状が $S_x \approx S_y$ となる、適正オフセット量の組み合わせを示す。

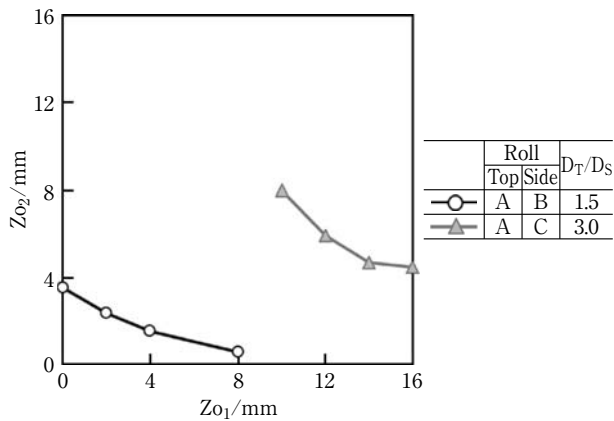


Fig.17 Combination of the best offset of side rolls for $S_x = S_y$ (simulation).

以上に示したように、大径上下ロールと小径サイドロールの組み合わせにより成形される角形鋼管のコーナー形状は、上下ロールとサイドロールの径の違いおよび、パイプがロールに接触する位置の影響を受ける。S寸法の偏りを解消する手法として小径のサイドロールをライン上流側にオフセットさせてパイプとロールの接触開始位置による影響を小さくすることが有効であり、本検討ではNo.1およびNo.2スタンドでのトータルとしてS寸法の偏りが生じるため、S寸法の偏りを改善できるNo.1およびNo.2でのロールオフセット量はロール径によって一義的には決まらず、様々な組み合わせが存在すると考えられる。

5. 結言

正方形角形鋼管のロール成形において、上下ロールとサイドロールの径の違いがコーナー形状に及ぼす影響について実験とFEM解析を用いて検討を行った。さらにコーナー形状の改善を図るため、小径サイドロールを長手方向上流側にオフセットする方法を考案し、その効果を検証した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 大径上下ロールおよび小径サイドロールを用いる場合、パイプがロールと接触する長手方向への接触開始位置に上面側と側面側で差が生じるため、コーナー部のS寸法に偏り（上下面側S寸法と側面側S寸法に差が生じること）が生じる。
- (2) 大径上下ロールのロール径と小径サイドロールのロール径の比が大きくなるほど、S寸法の偏りは大きくなる。
- (3) 大径上下ロールと小径サイドロールを用いる場合、小径サイドロールをライン上流側にオフセットして成形することでS寸法の偏りを改善することができる。

参考文献

- 1) 木内学, 新谷賢, 戸沢正孝: 塑性と加工, 21-231 (1980), 339-346
- 2) 小野田義富, 長町拓夫, 杉山努: 塑性と加工, 36-409 (1995), 149-154
- 3) 長町拓夫, 仲子武文, 中村大輔: 平成19年度塑性加工春季講演会, (2007), 131
- 4) 長町拓夫, 仲子武文, 中村大輔: 第58回塑性加工連合講演会, (2007), 573
- 5) 中村大輔, 仲子武文, 長町拓夫: 平成19年度塑性加工春季講演会, (2007), 129