

技術資料

ステンレス鋼管のスピニング加工における板厚減少に及ぼす加工条件の影響

安藤 彰 啓* 狩野 忍**

Influence of Forming Conditions on Thickness Decrease of
Welded Stainless Steel Pipes in Spinning Forming

Akihiro Ando, Shinobu Karino

Synopsis:

A spinning process for reducing diameter of pipes has recently come to be applied to manufacture shell cases for automotive exhaust systems, such as muffler and catalytic converter. Influence of the spinning forming conditions on thickness decrease in spinning formed area were investigated for welded ferritic stainless steel pipes, with both forming experiment and finite element simulation.

The summary of this report is as follows;

- 1) Wall thickness of spinning formed area showed the minimum in middle of tapered area, and beyond, increased toward pipe end.
- 2) Spinning forming conditions, such as tapered angle, number of forming passes and forming pass schedule, have influence on thickness decrease in spinning formed area. The thickness decrease is considered to be caused by tensile stress in axial direction of pipe and to get larger with increase of ironing forming of pipe with forming rollers. To avoid thickness decrease, it is important to reduce tensile stress in axial direction of pipe.
- 3) The results of simulations and experiments were in good agreement. The combination of experiment and simulation will provide useful information to understand the deformation of reduction in diameter by pipe spinning and to predict the suitable spinning forming conditions.

1. 緒言

自動車排気系システムにおいて、マフラーや排気ガス浄化用の触媒コンバーター、DPF（ディーゼル微粒子捕集フィルター）、尿素を利用した排気ガス浄化用触媒（尿素SCR：選択触媒還元）などのケース部材は、消音特性や排気ガス浄化特性を高めるために容量を大きくする必要や軽量化の要求がある。そのため素材として大径・薄肉の鋼管が多く使用されている。

Fig. 1 に自動車排気系システムへのスピニング加工品の適用例を示す。ケース部材として使用する鋼管の両端には、センターパイプなどの小径の排気管と接続するための小径部が必要となる。従来、これらの小径部は鋼板

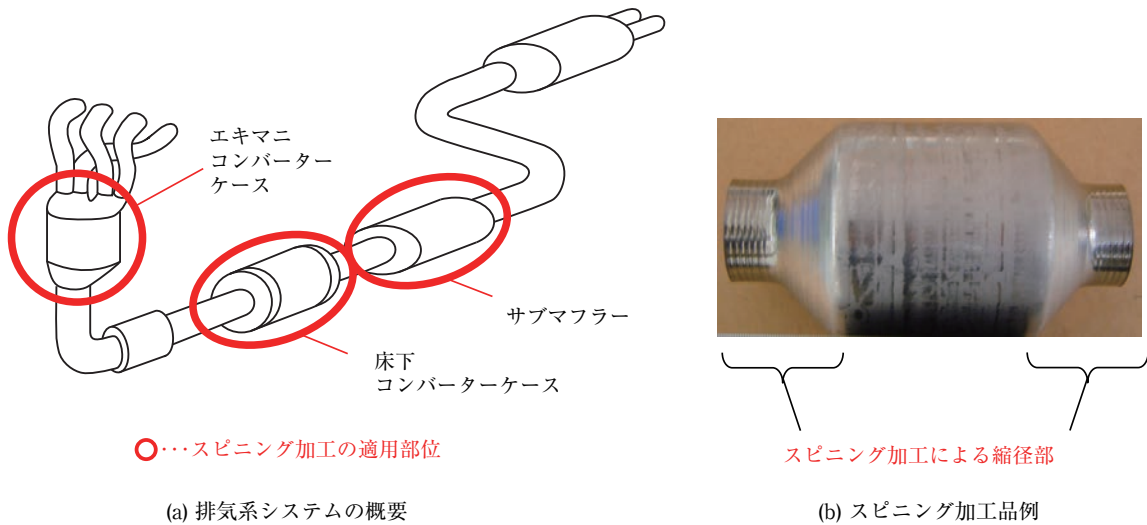
をプレス加工した部品を大径の鋼管と溶接接合することにより製造されていたが、近年、大径の鋼管内部にマフラーの消音材や排気ガス浄化用の触媒などの内臓物を挿入した後、スピニング加工により鋼管の両端を直接縮径加工し一体成形する例が増加している。

Fig. 2 に管材のスピニング加工の概要を示す。スピニング加工は、被加工管の周囲に配置した加工ローラと被加工管とを相対的に回転させながら、加工ローラを被加工管の軸方向に往復移動させるとともに、徐々に被加工管の半径方向に押込むことにより、被加工管を縮径加工する方法である。

大径鋼管の縮径加工方法にスピニング加工が適用される理由としては、従来の鋼板をプレス加工した後に溶接接合する方法と比較して、

*加工技術研究部 加工第二研究チーム 主任研究員

**加工技術研究部 加工第二研究チーム



(a) 排気系システムの概要

(b) スピニング加工品例

図1 自動車排気系システムへのスピニング加工品の適用例
Fig. 1 Application example of spinning formed part for automotive exhaust system.

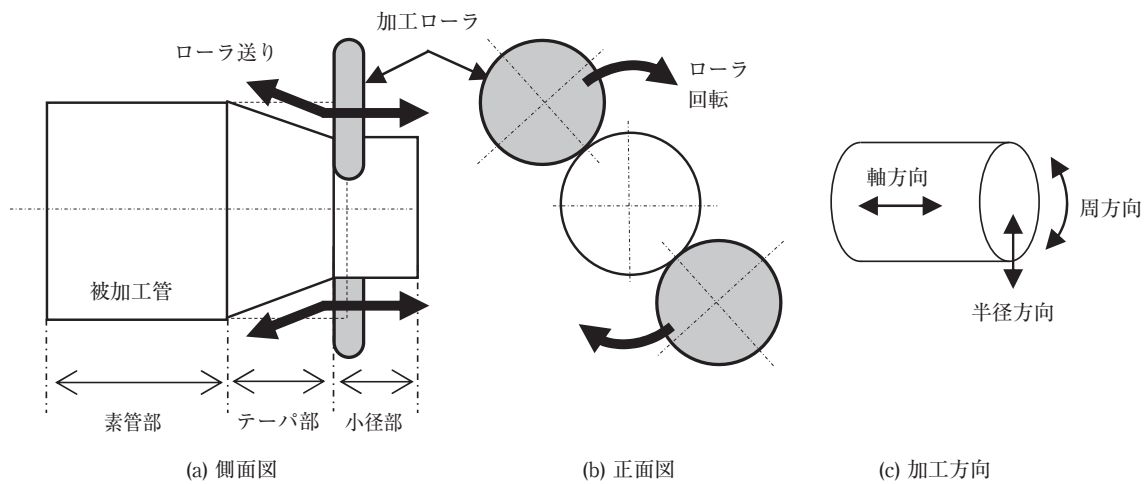


図2 スピニング加工の概要
Fig. 2 Scheme of spinning forming.

- ① 一体成形であるため材料歩留まりが高く、部品点数削減・溶接工程省略・軽量化が可能である、
 - ② 加工ローラの数値制御 (NC) による加工であるため、部品形状ごとの金型が不要で開発および製造に要する費用・期間の削減が可能である、
 - ③ 微小変形の積み重ねによる逐次加工であるため、高縮径加工が可能である、
- などの特長がある。

一方、スピニング加工の課題としては、①管端に発生する割れや座屈、②テーパ部での板厚減少、③逐次加工のため加工時間が長いことなどが挙げられる。排気系シ

ステムはエンジン直下の高温環境あるいは腐食性凝縮水を含む高腐食性環境で使用されるため、そのケース材には耐熱性や耐食性などを確保することが求められる。そのため各自動車メーカーでは加工品の下限板厚が設定されており、スピニング加工におけるテーパ部の板厚減少を抑制することは重要な技術課題である。

これまでスピニング加工における材料変形や成形性の評価は実験的手法によるもの^{1,2)}が主流であったが、最近ではFEM解析 (以下、解析と記す) による評価も報告されるようになってきている^{3~5)}。しかしながら、加工部の板厚減少に及ぼす加工条件の影響を詳細に検討し

た例は少なく、特に板厚減少が20%以上となるような厳しい加工条件についての解析による報告例はほとんどない。そこで、本報では、実験および解析を行ない、スピニング加工における板厚減少に及ぼす加工条件の影響を検討した結果について報告する。

2. 実験および解析方法

2.1 スピニング加工条件

実験には外径φ89mmまたはφ100mm、板厚1.2mmのフェライト系ステンレス(NSS409M1)のTIG溶接鋼管を使用した。Table 1に機械的性質を示す。

Table 2にスピニング加工条件を示す。各種スピニング加工条件が加工部の板厚変化に及ぼす影響について調査した。Fig. 3に加工条件の模式図を示す。加工条件は加工部の形状、加工工具、および加工ローラのNC制御に着目し、①加工部の形状としてテーパ部が素管部の延長線となす角度(以下、テーパ角と記す)、②加工工具として加工ローラ先端半径、および③加工ローラのNC制御による加工パス条件として加工ローラの軸方向の送り速度、周方向の回転速度(以下、それぞれ加工ローラ送り速度、加工ローラ回転速度と記す)、加工ローラの軸方向への往復移動の回数と経路(以下、それぞれ加工パス数、加工パススケジュールと記す)を変化させ、板厚減少に及ぼす影響を調査した。

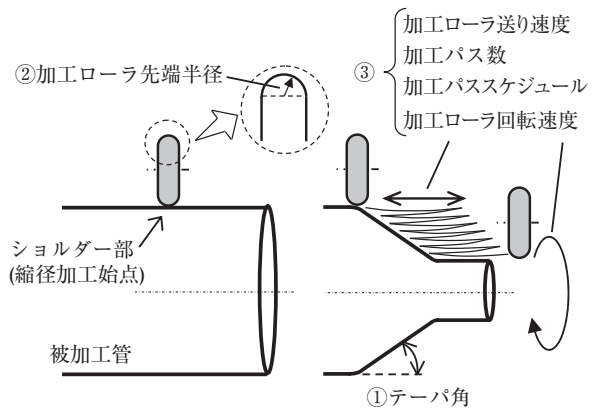


図3 スピニング加工条件の模式図
Fig. 3 Illustration of spinning forming conditions.

Fig. 4およびTable 3に加工パススケジュールについて示す。被加工管の素管部側から端部に向かう経路を「往路」、逆向きを「復路」とする。往路、復路の経路の曲率半径 R_g 、 R_b 、および往路での加工ローラの被加工管半径方向の押込み量 δ_g (以下、往路加工量と記す)の影響を調査した。

なお、加工ローラの個数は2個、縮径率は55%で一定とした。それぞれ当該加工条件の影響を評価する項目以外では、加工ローラ先端半径は8mm、加工ローラ送り速度は4,500mm/min、加工ローラ回転速度は600min⁻¹、加工パススケジュールはCase1で共通とした。また、本研

表1 供試板材の機械的性質

Table 1 Mechanical properties of sheet material

0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	n値	r値
292	464	32	0.21	1.4

表2 スピニング加工条件

Table 2 Spinning forming conditions

テーパ角 (°)	30, 45, 60
加工ローラ先端半径 (mm)	4, 8, 12
加工ローラ送り速度 (mm/min)	4500, 6000
加工ローラ回転速度 (min ⁻¹)	450, 600
加工パス数	5, 9, 13
加工パススケジュール	Case1, 2, 3
加工ローラ個数	2
縮径率 (%)	55

：共通の加工条件

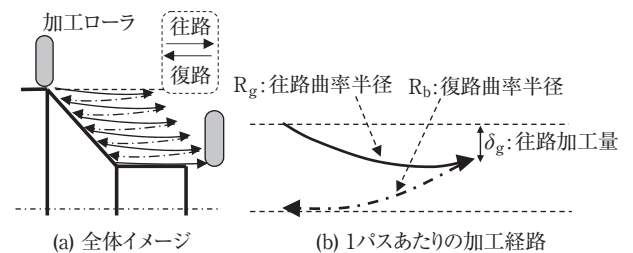


図4 加工パススケジュールの模式図
Fig. 4 Illustration of forming pass schedule.

表3 加工パススケジュール条件

Table 3 Forming pass schedule conditions

Case	往路曲率半径 Rg (mm)	復路曲率半径 Rb (mm)	往路加工量 δ_g (mm)
1	300	300	0
2	300	300	1.4
3	∞ (直線)	70	1.4

究では、Fig. 2 に示す、固定した被加工管の周囲で加工ローラを回転・移動させるタイプの加工機を使用した。

2.2 解析モデル

解析ソルバーには汎用の3次元有限要素法ソフトウェアのLS-DYNAを用いた。Fig. 5 に解析モデルの例を示す。被加工管は弾塑性体のシェル要素でモデル化し、変形抵抗は指数則近似で $\sigma = 783\varepsilon^{0.21}$ とした (σ : 真応力, ε : 真歪み)。被加工管が加工機のパイプチャック部で固定される端面位置に変位固定の条件を与えた。加工ローラは剛体とし、実際のスピニング加工実験の加工条件を再現するように加工ローラに3次元の変位条件を与えた。加工ローラと鋼管との摩擦はクーロン摩擦で、摩擦係数を0.1とした。

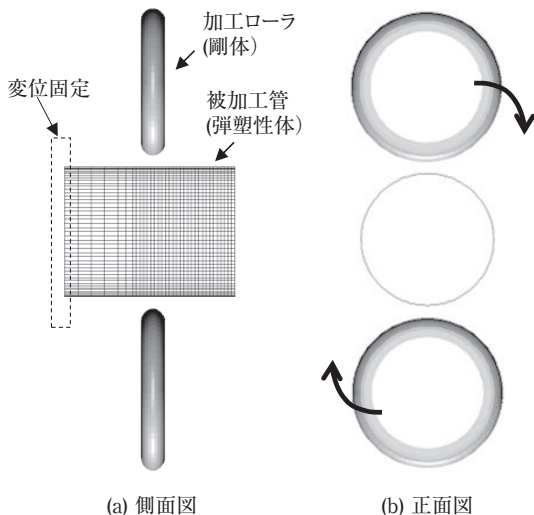


図5 FEM解析モデル
Fig. 5 FEM simulation model.

なお、スピニング加工においては、板厚方向に大きなせん断応力が発生するため、本来は被加工管をソリッド要素でモデル化することが望ましい。しかし、本研究ではスピニング加工における材料変形挙動の基本的な理解を得ることを目的として、ソリッド要素に比べ安定した解が得られ、解析時間も短縮可能なシェル要素を使用した。

3. 実験および解析結果

3.1 加工部の板厚変化

3.1.1 テーパ角の影響

Fig. 6 およびFig. 7 に素管径 $\phi 89\text{mm}$ 、加工パス数 9

パスにおける、加工部の形状と板厚分布に及ぼす加工部のテーパ角の影響を実験と解析とにおいて比較した結果を示す。板厚は被加工管の素管部側の加工開始点であるショルダー部 (Fig. 3 参照) を基点として加工部の形状に沿って測定した。

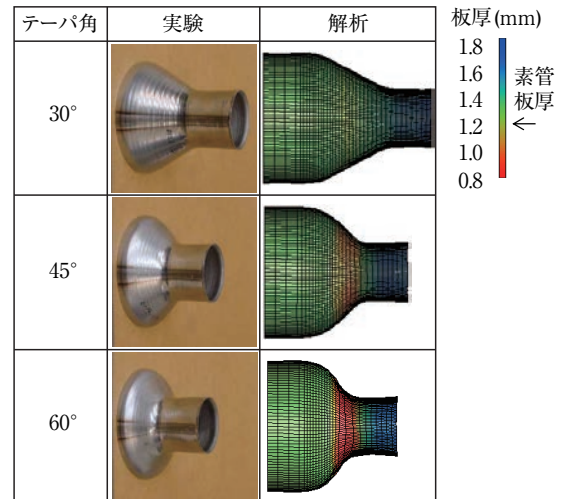


図6 加工品外観と板厚分布
Fig. 6 Formed shape at pipe end and thickness distribution.

加工部の板厚は、素管部からテーパ部にかけて一度減少して最小値を示した後、管端に向かって増加し、小径部では素管板厚より厚くなった。これは、スピニング加工による管端の縮径加工特有の板厚変化である。

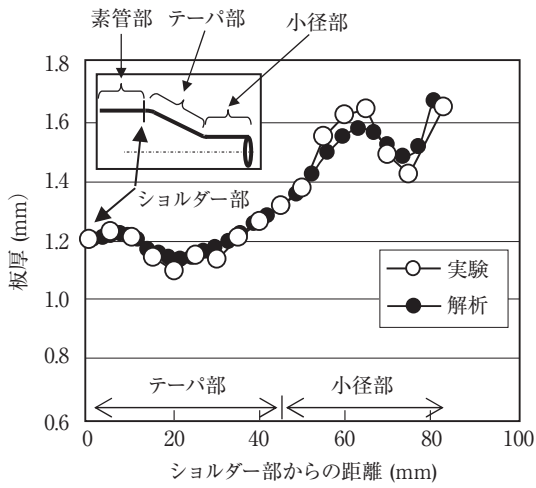
Fig. 7 に示すように、テーパ角が大きいくほど、テーパ部における板厚減少は大きかった。実験による加工部の最大板厚減少率は、テーパ角が30°の場合に約8%、45°で約17%、60°で約38%であり、テーパ角が大きくなると急激に板厚減少が増大した。また、板厚減少が最大となる位置は、いずれもショルダー部からの距離が約25mmの位置であるが、テーパ角が30°の場合はテーパ部の中央付近であるのに対し、テーパ角が大きくなると小径部側となる。

解析結果は、いずれのテーパ角においても実験での板厚分布を精度よく再現した。

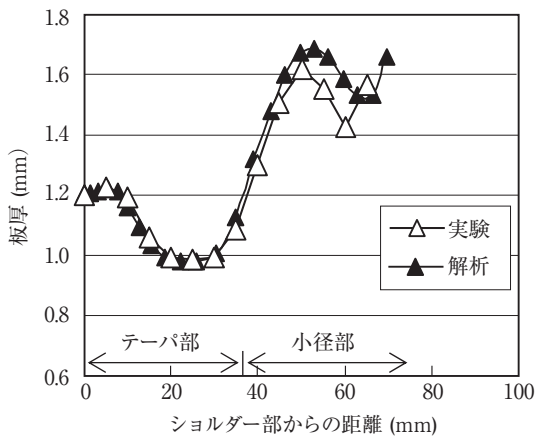
3.1.2 加工ローラ先端半径の影響

Fig. 8 に素管径 $\phi 100\text{mm}$ 、テーパ角60°、加工パス数5パスにおける、加工部の板厚分布に及ぼす加工ローラ先端半径の影響を示す。

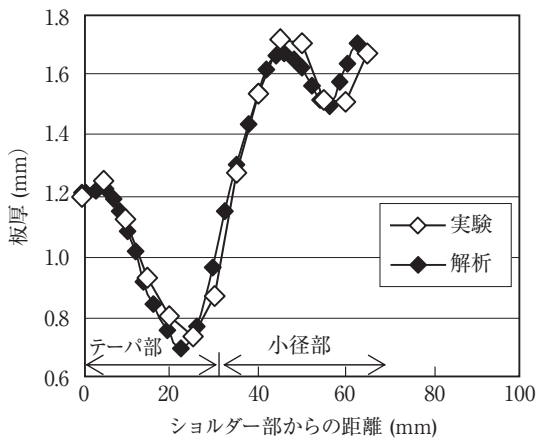
加工ローラ先端半径が4mm、8mmと小さい場合にテーパ部の板厚減少が大きく、最大板厚減少率は約17%であり、大きな差は認められなかった。一方、加工ローラ先端半径が12mmと大きい場合にはテーパ部の板厚減



(a) テーパ角30°



(b) テーパ角45°



(c) テーパ角60°

図7 板厚分布に及ぼすテーパ角の影響
Fig. 7 Influence of tapered angle on thickness distribution.

少は小さく、最大板厚減少率は約4%であった。

3.1.3 加工ローラの移動速度の影響

Fig. 9に素管径φ100mm, テーパ角45°, 加工パス数

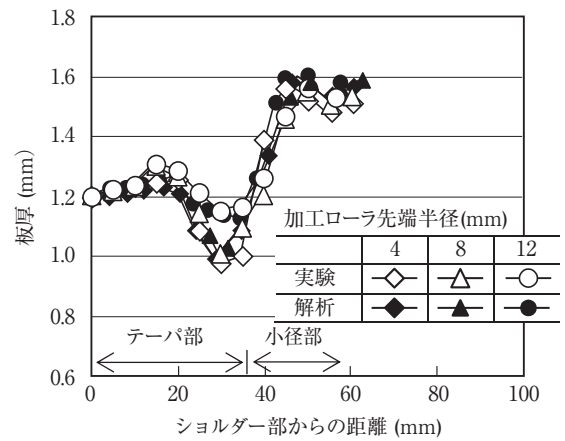
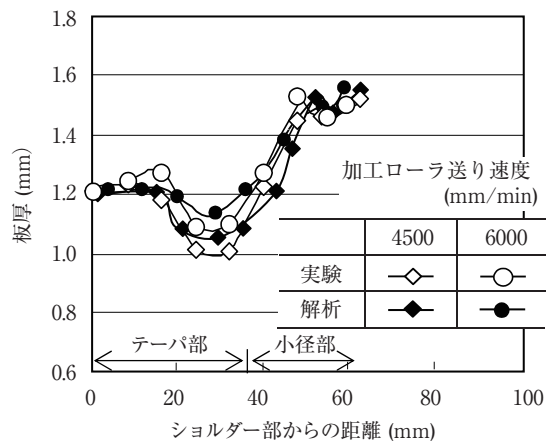
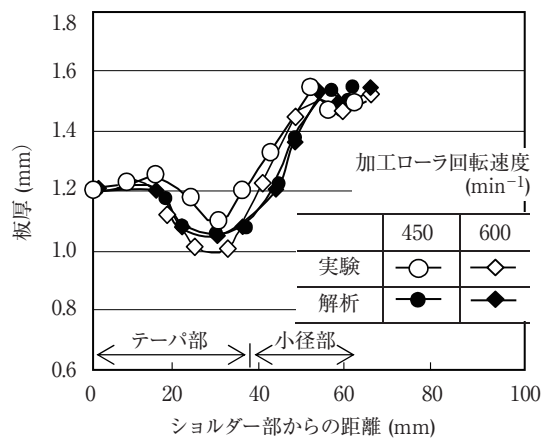


図8 板厚分布に及ぼす加工ローラ先端半径の影響
Fig. 8 Influence of forming roller tip radius on thickness distribution.



(a) 加工ローラ送り速度の影響



(b) 加工ローラ回転速度の影響

図9 板厚分布に及ぼす加工ローラ速度の影響
Fig. 9 Influence of forming roller speed on thickness distribution.

9パスにおける，加工部の板厚分布に及ぼす加工ローラ送り速度および加工ローラ回転速度の影響を示す。

共通の加工条件である，加工ローラ送り速度4,500mm/min，加工ローラ回転速度600min⁻¹の場合，テーパ部の板厚減少が大きく，最大板厚減少率は約17%であった。加工ローラ送り速度を6,000mm/minと速く，あるいは加工ローラ回転速度を450min⁻¹と遅くした場合，テーパ部の板厚減少は小さく，最大板厚減少率はいずれも約8%であった。

3.1.4 加工パス数の影響

Fig.10に素管径φ89mm，テーパ角60°における，加工部の板厚分布に及ぼす加工パス数の影響を示す。

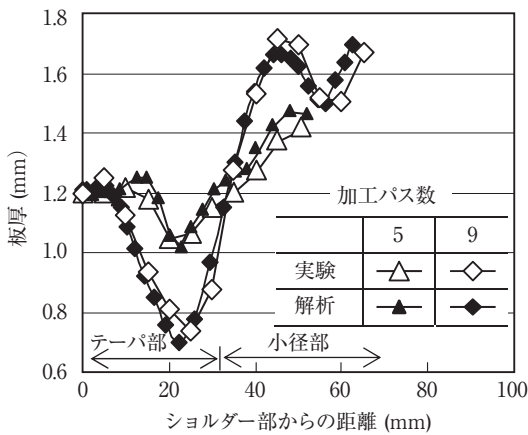


図10 板厚分布に及ぼす加工パス数の影響
Fig.10 Influence of number of forming passes on thickness distribution.

加工パス数が9パスと多い場合，テーパ部の板厚減少は大きく，最大板厚減少率は約38%であった。一方，加工パス数が5パスと少ない場合，テーパ部の板厚減少は小さく，最大板厚減少率は約15%であった。

3.1.5 加工パススケジュールの影響

Fig.11に素管径φ100mm，テーパ角45°，加工パス数13パスにおける，加工部の板厚分布に及ぼす加工パススケジュールの影響を示す。

共通の加工条件であるCase1の場合，テーパ部の板厚減少が大きく，最大板厚減少率は約18%であった。往路加工量δgが大きいCase2や，Case2に加えて復路の曲率半径R_bが小さいCase3では，テーパ部の板厚減少が小さかった。特に，Case3では，最大板厚減少率が約4%と，3.1.2項の加工ローラ先端半径が12mmの場合と同等の小さい値を示した。

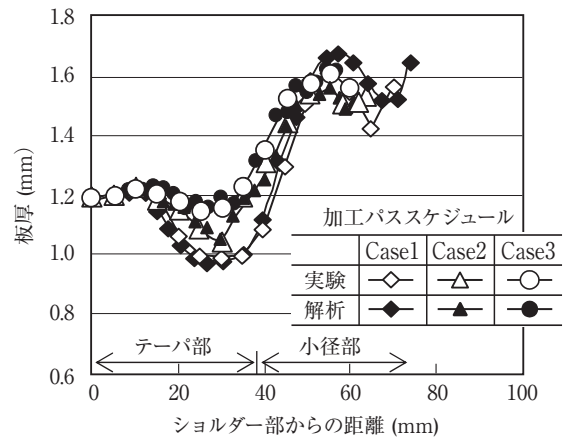


図11 板厚分布に及ぼす加工パススケジュールの影響
Fig.11 Influence of forming pass schedule on thickness distribution.

3.1.6 テーパ部の板厚減少に及ぼす加工条件の影響

前述の結果を基に，テーパ部の板厚減少に及ぼす加工条件の影響をFig.12に整理した。

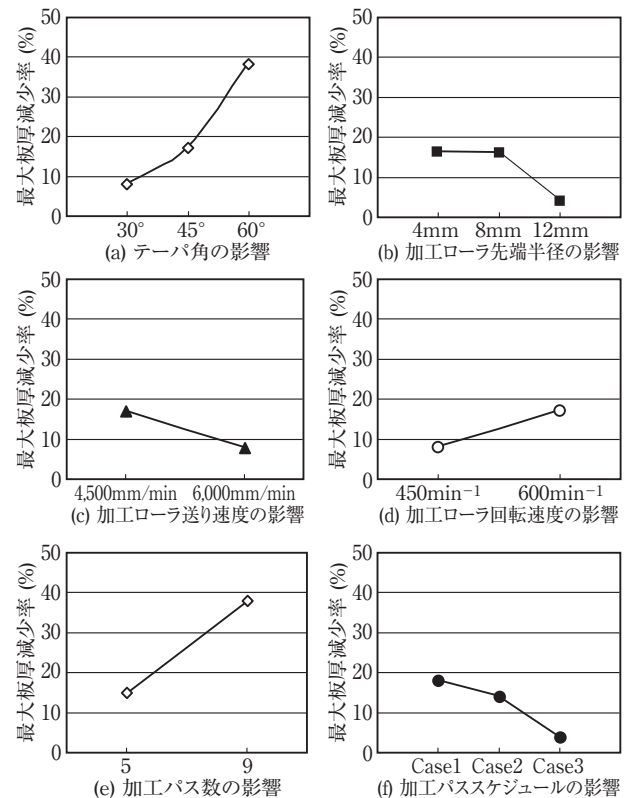


図12 板厚減少に及ぼすスピニング加工条件の影響
Fig.12 Influence of spinning forming conditions on thickness decrease.

テーパ部の板厚減少には、テーパ角や加工パス数の影響が大きいことがわかった。

今回適用した解析モデルの検討結果は、テーパ部の板厚減少において、実験結果とほぼ一致しており、実際のスピニング加工を精度よく再現できていると考えられる。また、解析時間も数時間から数日程度であり、実用的な範囲であると考えられる。そこで、本解析モデルを使用して、スピニング加工中の材料の応力状態を把握することを試みた。

3.2 加工部の応力状態

Fig.13に素管径φ89mm、テーパ角30°、加工パス数が全9パス加工における6パス目往路の途中のタイミングでの管外表面側の応力分布を示す。

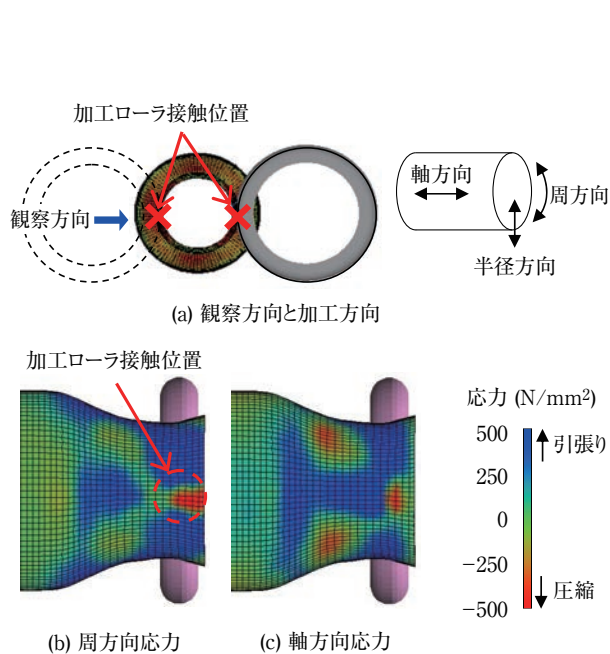


図13 変形時の応力分布 (9パス加工の6パス目)
Fig.13 Stress distribution under deformation. (6th pass in 9 pass forming)

加工ローラ接触位置では、被加工管の周方向と軸方向のいずれにも大きな圧縮応力が生じている。加工ローラの半径方向への押込みに起因する圧縮応力であり、この圧縮応力により縮径変形が生じると考えられる。一方、テーパ部では、比較的広範囲に軸方向の引張り応力が生じている。軸方向の引張り応力は、加工ローラの軸方向への移動と半径方向への押込みに起因するものであり、この引張り応力により軸方向への伸び変形が生じ、板厚減少が起こると考えられる。

Fig.14に素管径φ100mm、テーパ角60°における、板厚減少最大位置での加工中の軸方向の応力変化に及ぼす加工ローラ先端半径と加工パス数の影響を示す。Fig.14 (a)には加工パス数5パス、加工ローラ先端半径4mm、12mmの場合の応力変化を示す。加工ローラ先端半径が小さい方が、加工中に大きな引張り応力が発生している。Fig.14 (b)には加工ローラ先端半径8mm、加工パス数5パス、9パスの場合の応力変化を示す。加工パス数が多い方が、加工中に繰返し多くの回数・長い時間の引張り応力が発生している。以上のことから、より大きな、あるいはより多くの回数・長い時間、軸方向の引張り応力が作用し累積する加工条件において、加工

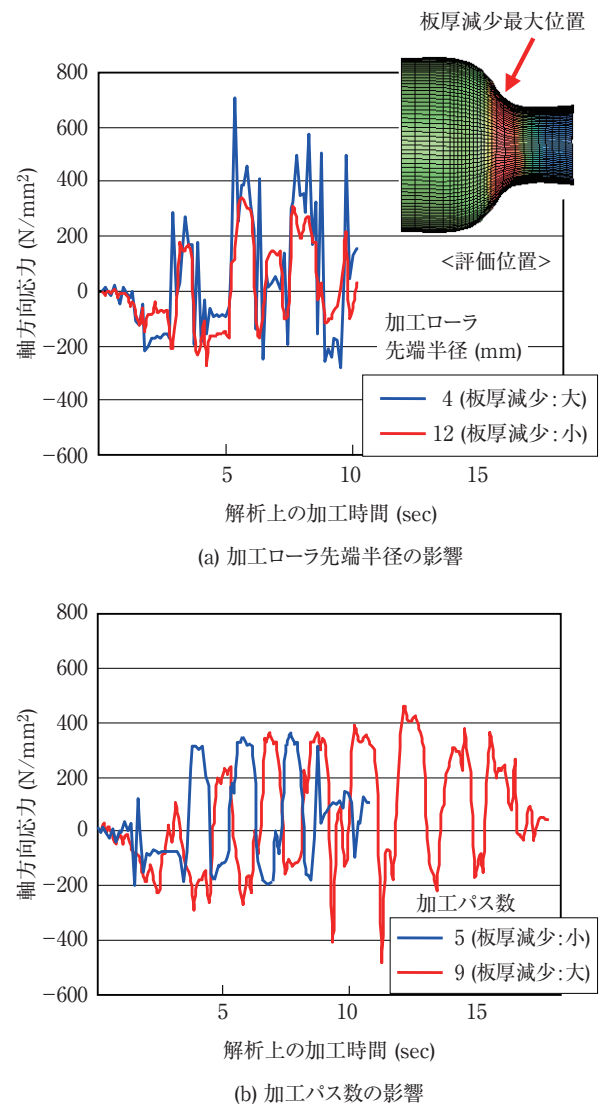


図14 板厚減少最大位置での変形時の応力変化
Fig.14 Stress change under deformation at the most thickness decreased point.

部の軸方向への伸びが大きくなり、テーパ部の板厚減少が増大したと考えられる。

3.3 最適加工条件設定の指針

Table 4 にテーパ部の板厚減少を抑制するための加工条件を示す。

表4 板厚減少を抑制する加工条件

Table 4 Spinning conditions restraining thickness decrease

①	テーパ角	小さくする
②	加工ローラ先端半径	大きくする
③	加工ローラ送り速度	速くする
④	加工ローラ回転数	遅くする
⑤	加工パス数	少なくする
⑥	加工パススケジュール	Rb:小さくする δg:大きくする

テーパ部の板厚減少を抑制するためには、これらの加工条件を可能な範囲で組み合わせるとよい。

しかしながら、スピニング加工のパラメーターは多岐にわたり、1つの加工条件を変更すると他のパラメーターが変わる場合もある。加工部の割れ、座屈や板厚減少の抑制、さらには加工時間の短縮などの要求に対して、全てを満足する最適な加工条件を設定するのは容易ではない。

従来は、実験でのトライアンドエラーによる手法が主であったが、本報で述べたように実験と解析とを組み合わせることにより、加工途中の変形挙動も含めた多くの情報を得ることができ、適正なスピニング加工条件の選定に役立つと考えられる。

なお、実験と解析との組み合わせにより、加工部の板厚減少だけでなく、割れや座屈などの非正常変形も含めた最適加工条件の探索技術を実用化することが、今後の課題である。

4. 結 言

フェライト系ステンレス溶接鋼管のスピニング加工における、板厚減少に及ぼす加工条件の影響について、加工実験とFEM解析により調査した。以下に、得られた結果を示す。

(1) スピニング加工部の板厚は、素管部からテーパ部にかけて一度減少して最小値を示した後、管端の小径部

に向かって増加した。

- (2) 加工部の板厚減少は、テーパ角や加工パス数、加工ローラの移動速度、加工パススケジュールなどの加工条件の影響を受ける。板厚減少は、被加工管の軸方向の引張り応力に起因するものであり、加工ローラによる引張り応力が大きくなる加工条件で増大すると考えられる。板厚減少を抑制するためには、軸方向の引張り応力を小さくするスピニング加工条件の設定が重要である。
- (3) 解析結果は実験結果とほぼ一致した。実験と解析とを組み合わせることにより、加工途中の変形挙動も把握することができ、適正なスピニング加工条件の選定に有用と考えられる。

参考文献

- 1) 葉山益次郎：新回転加工，近代編集社，東京，(1992)，241-256.
- 2) Y.Jianguo and M.Murata：Journal of Materials Processing Technology, 166 (2005), 405-410.
- 3) Q.X.Xia, Sh.W.Xie, Y.L.Huo and F.Ruan：Journal of Materials Processing Technology, 206 (2008), 500-508.
- 4) S.Kihara, H.Ishida, Y.Nakata, H.Mizumoto and Y.Iio：Proc. of the 57th Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity, (2006), 367.
- 5) T.Iguchi, A.Yoshitake, T.Irie and A.Morikawa：Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Application, NUMIFORM2004, (2004), 1077-1082.