

自動車排気系部品のスピニング加工条件と変形挙動のCAE解析

CAE Analysis of Spinning Conditions and Deformation Behavior on Automotive Exhaust Parts

尾崎 芳宏 OZAKI Yoshihiro JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員 (課長)
石渡 亮伸 ISHIWATARI Akinobu JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
玉井 良清 TAMAI Yoshikiyo JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部長・博士 (工学)

要旨

コンバータケースやサブマフラー等の自動車排気系部品の想定し、フェライト系ステンレス鋼パイプをスピニング加工で口絞り縮径する実験から、加工条件が板厚分布や不具合の発生に及ぼす影響を明らかにした。またスピニング加工についてのCAEシミュレーションモデルを開発し、加工条件の影響を計算と実験で系統的に比較することにより、板厚分布のみならず座屈のような不具合発生の様子についても計算で精度良く再現できることを確認し、実機でのスピニング加工条件の最適化や不具合の抑制対策にCAEシミュレーションが活用できることを示した。

Abstract:

Experiments were conducted on pipe diameter reduction of automotive exhaust parts, such as catalytic converters and sub-mufflers by spinning process with ferritic stainless steels. Effects of several forming factors on the geometrical property and defects of the parts are clarified. The computer aided engineering (CAE) simulation model for spinning was also developed. Calculated results were in good agreement with actual spinning formed specimens not only in thickness distribution but also in shape of buckling defect. The results suggest that CAE simulation could be a helpful tool to obtain optimum forming conditions.

1. はじめに

スピニング加工は回転させた金属素材にヘラやロール状の工具を押し付けて加工する逐次成形方法で、近年ではNC制御されたスピニング加工機でフェライト系ステンレス鋼パイプを口絞り縮径したコンバータケースやマフラーシェルなどの自動車排気系部品が増えている¹⁻⁶⁾。また、金属素材を固定してロール工具を回転させるワーク固定・工具回転式のスピニング加工機が開発されたことにより、軸対称形状のみならず、加工部が素材の中心軸から偏芯や傾斜した部品の成形が可能となり、部品の設計自由度が拡大されている⁷⁻⁹⁾。一方、軽量化を目的として素材の薄肉化が指向され、板厚1.2~1.5 mmあるいはそれ以下の薄い素材が使われるようになると、スピニング加工でのワレや座屈が顕在化し、問題視されるようになった^{10,11)}。このような背景から、パラメータが多く複雑なスピニング加工条件が板厚分布や形状に及ぼす影響を整理し、明確化することを目指した。

2. 単軸スピニング加工

2.1 単軸スピニング加工の実験方法

実験に用いたスピニング加工の模式図を図1に示す。ワーク固定・工具回転式でロール工具数は2本とした。供試材

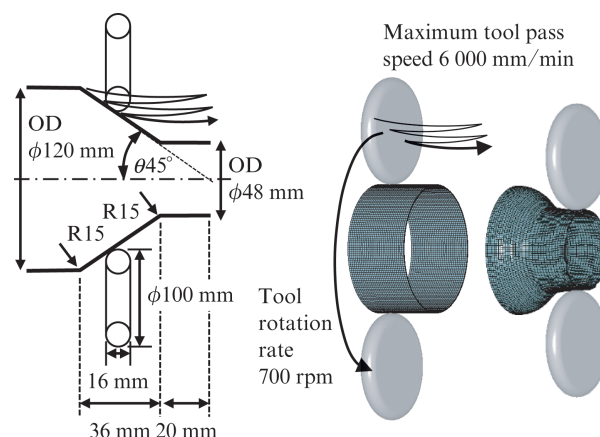


図1 ワーク固定・工具回転式スピニング加工の模式図

Fig. 1 Schematic drawing of configuration of tool rotation type spinning

表 1 スピニング加工実験用のステンレス鋼の機械的特性

Table 1 Mechanical property of stainless steel for spinning experiment

	Thickness (mm)	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	n-value (5-10%)	r-value (at 15%)
Steel A (JFE439L)	1.15	300	441	37	0.22	1.65
Steel B (JFE429EX)	1.51	324	478	39	0.22	1.60

表 2 単軸スピニング加工の実験条件

Table 2 Experimental conditions for uni-axial symmetric spinning

Condition No.	Number of tool pass	Tool rotation rate (rpm)	Taper angle (degree)
① (Base)	19	700	45
②	19	600	45
③	19	500	45
⑥	37	700	45
⑦	25	700	45
⑧	15	700	45
⑨	13	700	45
⑱	19	700	35
⑳	19	700	55

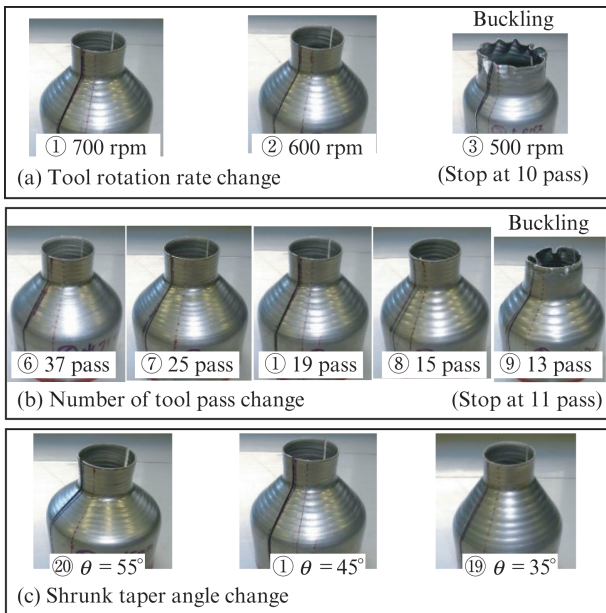
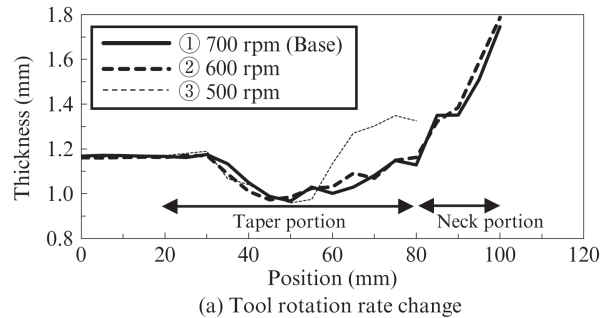


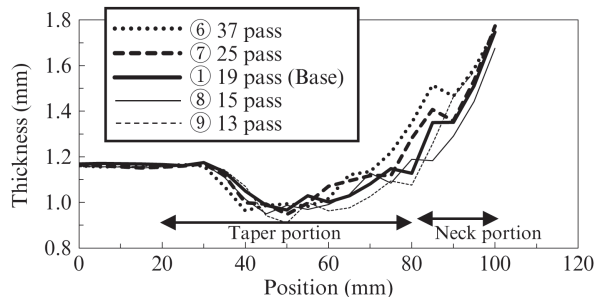
図 2 単軸スピニング加工の実験サンプルの外観

Fig. 2 Appearance of uni-axial symmetric spinning formed specimen

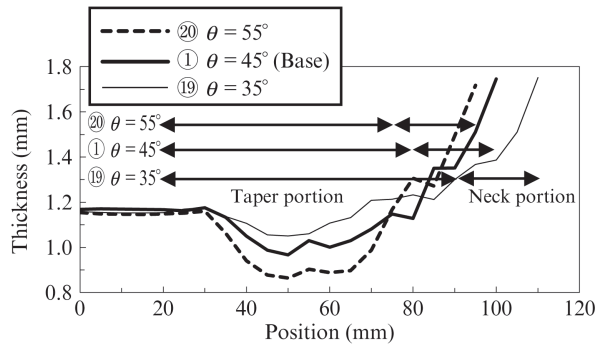
は鋼 A: JFE439L (SUS430LX, 18 % Cr-0.3 % Ti) と鋼 B: JFE429EX (Type429, 15 % Cr-0.4 % Nb) の 2 鋼種で、ともに自動車排気系部品に使用されるフェライト系ステンレス鋼である。供試鋼の機械的特性を表 1 に示す。TIG 溶接で外径 $\phi 120$ mm の素管とし、自動車排気系部品を想定した口絞り縮径で $\phi 48$ mm (縮径率 60%), テーパー角 45 度, 平行首長さ 20 mm を基本の目標形状として単軸スピニング加工した。また表 2 に示す条件①を基本条件とし、回転速度、



(a) Tool rotation rate change



(b) Number of tool pass change



(c) Shrunk taper angle change

図 3 単軸スピニング加工実験サンプルの板厚分布

Fig. 3 Thickness distribution of uni-axial symmetric spinning formed specimen

加工パス数, テーパー角をそれぞれ変更した条件で比較した。

2.2 単軸スピニング加工の実験結果

鋼 A の素管を単軸スピニング加工したサンプルの外観を図 2 に示す。図 3 には長手方向に沿って測定した板厚分布を、図 4 には最小板厚値を示す。

2.2.1 回転速度の影響

回転速度を変更したサンプルの外観および板厚分布を

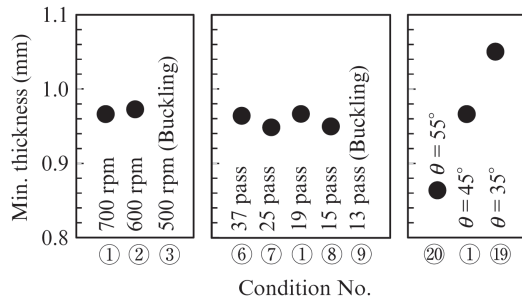


図4 単軸スピニング加工実験サンプルの最小板厚

Fig. 4 Minimum thickness of uni-axis symmetric spinning formed specimen

図2 (a), 図3 (a) に示す。回転速度が700 rpm, 600 rpm では顕著な差異は認められなかったが, 500 rpm まで低速にした条件③では, 管端部の座屈により途中の10パス目で加工を停止した。スピニング加工は, 回転する工具をパイプ素材の表面に押し付けながら螺旋状に進行させて行く。工具の進行距離は回転速度に比例し, 低速回転では短い進行距離で急激に縮径されるため座屈を生じたと考えられる。

2.2.2 加工パス数の影響

加工パス数を変更したサンプルの外観および板厚分布を図2 (b), 図3 (b) に示す。加工パス数が少ないとテーパ部の工具痕の凹凸が目立つようになった。板厚分布 (図3) の比較ではパス数が多いほど板厚減少が抑制される傾向が見られたが, 最小板厚への影響は不明瞭であった (図4)。加工パス数が少なく1パスあたりの押し込み量が増えて工具が強く押し付けられると, 材料の軸方向への伸長が助長され板厚が薄くなったと考えられる。加工パス数を13パスまで少なくした条件⑨では管端部の座屈が顕著となり, 途中の11パス目で加工を停止した。これは前述の図2 (a) の条件③と同様に, 加工パス数を減らしたことで短い進行距離で急激に縮径されるためと考えられる。基本条件とした条件①に較べて低速回転の条件③では進行距離は500 rpm/700 rpm=0.71, 加工パス回数を減らした条件⑨では13パス/19パス=0.68であることから, 基本条件に対しておおむね0.7倍まで進行距離が短くなると座屈が生じると考えられる。

2.2.3 テーパー角の影響

テーパ角を変更したサンプルの外観および板厚分布を図2 (c), 図3 (c) に示す。テーパ角を大きくすると, 板厚分布 (図3), 最小板厚 (図4) とも, テーパー部で顕著に減少することがわかる。スピニング加工では, 縮径で円周長が短くなることによる板厚増加の作用と, 軸方向の線長が長くなることによる板厚減少の作用がある。縮径率が同じであればテーパ角が大きい方が軸方向の線長増加率が大きくなるため, 板厚減少が助長されたと考えられる。

2.3 スピニング加工条件の最適化指針

上記の実験結果からスピニング加工条件による板厚分布および形状への影響について以下のことがわかった。

- 回転速度が過度に遅いと座屈が発生する。
- 加工パス数が多いほど板厚減少が抑制され, 加工パス数が過度に少ないと座屈が発生する。
- テーパー角が小さいほど板厚減少は抑制される。

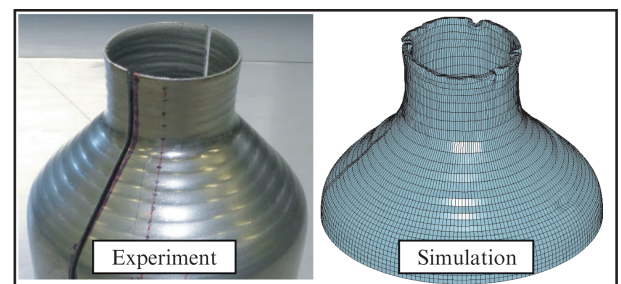
3. シミュレーション計算

3.1 シミュレーション計算方法

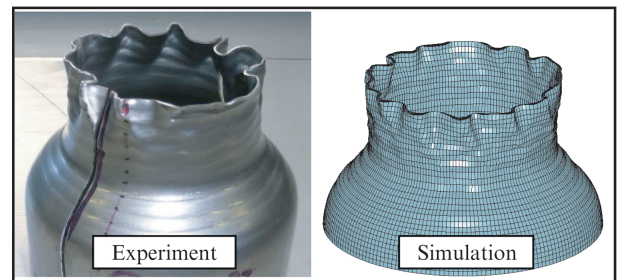
単軸スピニング加工実験の素材, 加工方法および形状に準じたシミュレーションモデルを作成し, ソルバーには汎用のソフトウェアLS-DYNA[®]を用い, 有限要素・動的陽解法でHillの降伏条件を用いた解析を実施した。材料の応力-歪み曲線は素管から採取した試験片で常温での引張試験に基づくSwift近似式とした。工具はshell要素とし, ワークは板厚方向に5層のsolid要素で構成した。シミュレーションモデルは図1に示した実験と同じワーク固定・工具回転式で, 工具に回転と軸方向・径方向の動作を与えてスピニング加工を再現した。

3.2 管端部の座屈

条件①および条件③での実験サンプルとシミュレーション計算結果の外観比較を図5に示す。条件①ではシミュレー



(a) Condition ①: Tool rotation 700 rpm



(b) Condition ③: Tool rotation 500 rpm
(Buckling arose, stopped at 10 pass)

図5 実験とシミュレーションでの外観比較

Fig. 5 Comparison of calculated result shape with experimental specimen

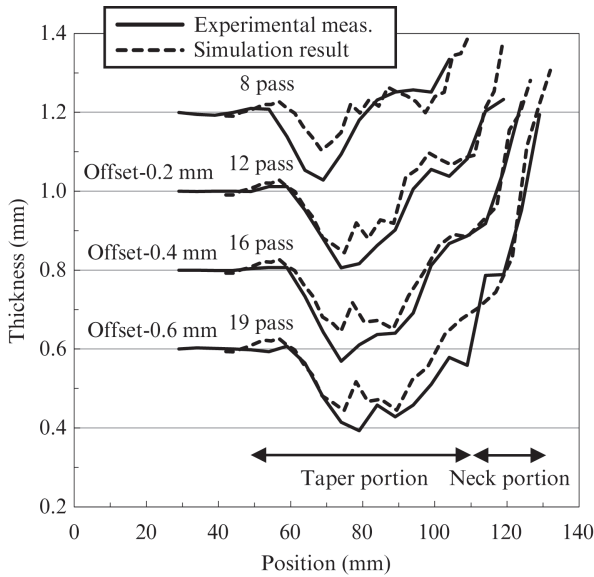


図6 実験とシミュレーションでのパスごとの板厚分布比較
Fig. 6 Thickness distribution in each pass of uni-axis symmetric spinning formed specimen

シミュレーション計算結果で管端に軽微なシワが発生したものの、実験と同様におおむね良好な形状が得られた。また前述のとおり実験では低速回転としたことで座屈が顕著だった条件③ではシミュレーション計算でも同じく管端部が座屈し、外観については座屈発生の変形も含めよい一致が得られていることがわかる。

3.3 板厚分布の変化

条件①での実験サンプルとシミュレーション計算結果の板厚分布の比較を、スピニング加工の途中の8パス目、12パス目、16パス目、および終了する19パス目について図6に示す。シミュレーション計算による板厚分布およびパスごとの推移は実験結果と良い一致を示した。テーパ部の板厚は母材より薄くなり、加工が進むにつれてチャック側から管端方向に板厚減少が進展する。また平行首部は縮径により顕著に板厚増加していることがわかる。

4. 偏芯傾斜スピニング加工

4.1 偏芯傾斜スピニング加工での板厚分布

単軸スピニング加工と偏芯傾斜スピニング加工を比較し

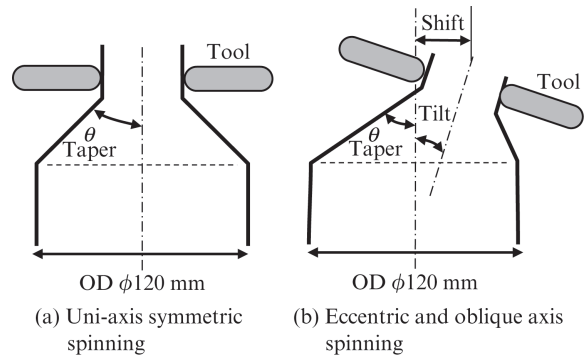


図7 ワーク固定・工具回転式スピニング加工の模式図
Fig. 7 Schematic drawing of configuration of tool rotation type spinning

た模式図を図7に示す。素管の中心軸に対称な従来の単軸スピニング加工(図7(a))に対し、偏芯傾斜スピニング加工(図7(b))は加工部の対称軸が偏芯あるいは傾斜していることが特徴である。ワーク回転式スピニング加工では単軸対称形状の加工しかできないのに対し、本報の実験で用いた工具回転式スピニング加工では工具の回転軸を素管中心軸からずらすことで偏芯傾斜スピニング加工が可能である。

鋼Aおよび鋼Bの素管を用い、表3の条件で偏芯傾斜スピニング加工および単軸スピニング加工を行い比較した。前述の単軸スピニング加工と同様に、外径φ120mmの素管から外径φ48mm(縮径率60%)に口絞り加工した。実験サンプルの外観を図8に、板厚分布の測定結果を図9に示す。偏芯傾斜スピニング加工したサンプルはテーパ角θ(図7)が最大の方角で板厚測定した。工具の動作や加工時間が異なり単純には比較できないが、単軸スピニング加工に比べて偏芯傾斜スピニング加工での板厚減少が大きいことがわかる。条件①の単軸スピニング加工が19パスであったのに対し、偏芯傾斜スピニングでは75パスを要した。さらにテーパ角θは条件④では最大の方角で52.5度、条件⑤では57.4度と大きく、また部分的には素管からの材料の移動量から縮径率100%以上に相当すると考えられる。偏芯傾斜スピニング加工の外側部はテーパ角が大きく、縮径率が大きいスピニング加工に相当するため板厚減少が大きくなるという傾向は前述の実験結果と一致する。

表3 偏芯傾斜スピニング加工の実験条件

Table 3 Experimental conditions for eccentric and oblique axis spinning

Condition No.	Number of tool pass	Tool rotation rate (rpm)	Taper angle (deg.)	Neck length (mm)	Tool rotation axis	
					Tilt (deg.)	Shift (mm)
① (Base)	19	700	45	20	0	0
④	75	700	52.5	20	15	25
⑤	75	700	57.4	20	15	35

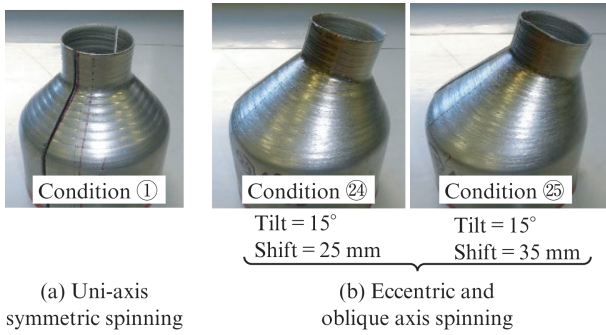


図 8 スピニング加工実験サンプルの外観

Fig. 8 Appearance of spinning formed specimen

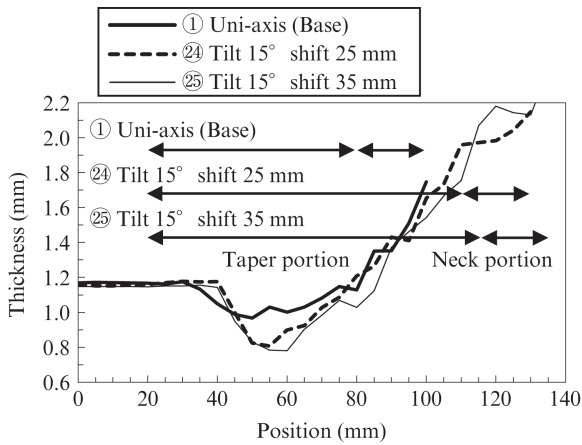


図 9 スピニング加工実験サンプルの板厚分布

Fig. 9 Thickness distribution of spinning formed specimen

4.2 偏芯傾斜スピニング加工での温度上昇

表 3 の条件①の単軸スピニング加工, 条件③の偏芯傾斜スピニング加工の鋼 A, 鋼 B のサンプル外観を図 10 に示す。偏芯傾斜スピニング加工では温度上昇による着色 (テンパーカラー) が見られ, 特に鋼 B で著しかった。そこで図 11 に示すとおり素管の先端から 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm の位置に熱電対 TC10, TC20, TC30, TC40, TC50 を付けテーパ角の最大方向でスピニング加工中の温度を測定した。先端 10 mm 位置の温度測定結果を図 12 に示す。単軸スピニング加工より偏芯傾斜スピニング加工の温度上昇が大きく, また鋼 A よりも鋼 B の温度上昇が大きいことがわかる。着色が顕著な鋼 B の偏芯傾斜スピニング加工では 540 °C 以上に到達した。さらに鋼 B の偏芯傾斜スピニング加工における各測定点の温度を図 13 に示す。加工開始直後はいずれの測定点も同様に温度上昇するが, 先端から遠い側から加工が終了し, TC50 → TC40 → TC30 → TC20 → TC10 の順で温度上昇が停止し, その後は温度低下に転じる。最後まで加工が続く先端 10 mm の測定点 TC10 が最も高温に達した。単軸スピニング加工は時間が短く温度上昇が速く, 一方で偏芯傾斜スピニング加工では

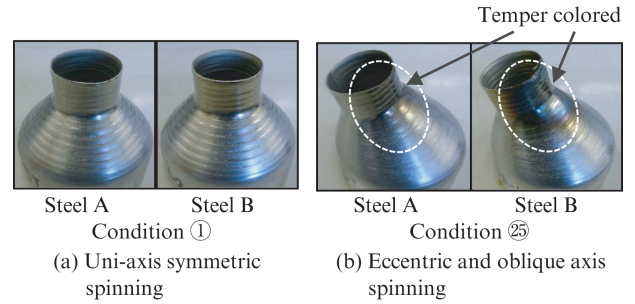


図 10 スピニング加工実験サンプルの外観

Fig. 10 Appearance of spinning formed specimen

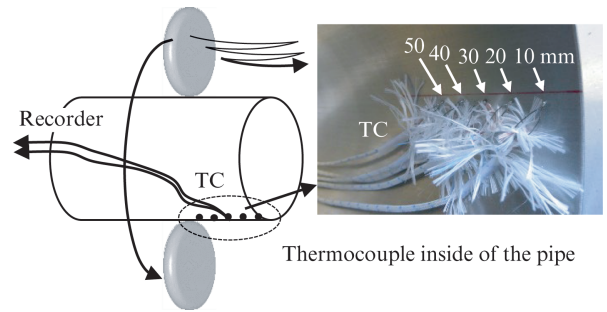


図 11 スピニング加工中のサンプル温度測定の方法

Fig. 11 Experimental method of temperature measurement during the spinning

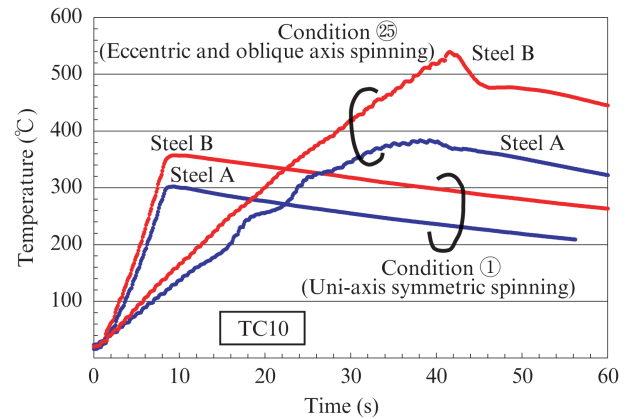


図 12 スピニング加工中のサンプルの温度変化

Fig. 12 Temperature change of specimen during spinning

時間が長いので温度上昇は緩やかであるが, 最終的な変形量が大きいので到達温度は高い。スピニング加工中の温度は摩擦発熱, 加工発熱, 雰囲気や工具への抜熱, 未加工部やチャックへの熱伝導などが関係した状況は複雑である。しかし, 素材が薄板であり工具との接触面積も小さいことから, 加工発熱と雰囲気への放熱が支配的と考えられる。形状が同じであれば単位重量あたりの加工発熱量は同程度であるので, 温度上昇は板厚によらず同程度になるが, その際の蓄熱量は板厚が厚い方が大きい。一方で表面積が同じであれば雰囲気への放熱量は同程度になり板厚が厚い方が蓄熱量に対して相対的に放熱量が少ないため, 鋼 B の方が高温

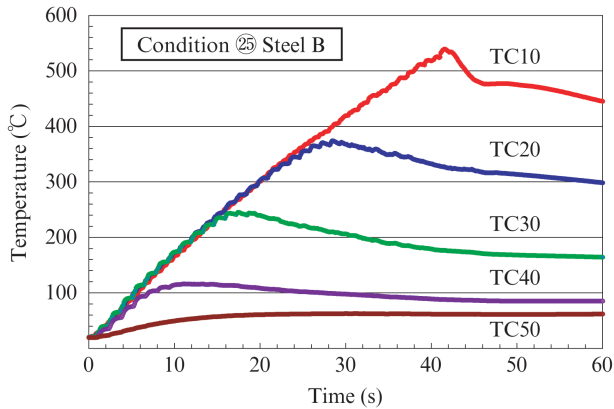


図 13 偏芯傾斜スピニング加工中のサンプルの測定点ごとの温度変化

Fig. 13 Temperature change of specimen at each measuring point during eccentric and oblique axis spinning

になったと考えられる。

4.3 偏芯傾斜スピニング加工での表面欠陥

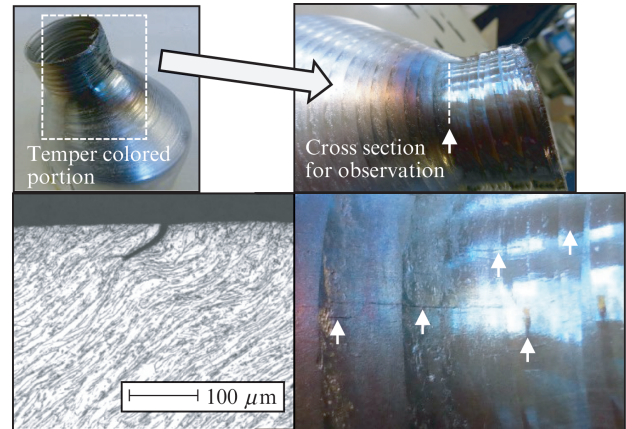
鋼 B で偏芯傾斜スピニング加工したサンプルではテーパ角 θ の最大方向で、テーパ部から平行首部にかけて微小な亀裂状の表面欠陥が観察された。その外観と断面観察写真を図 14 に示す。表面欠陥は板厚貫通しておらず、ごく浅いキズ、あるいはシワであることがわかる。表面欠陥は到達温度の高いテンパー着色部に発生し、正常部と同様に变形していることから、温度上昇および表面の不整形形状に関係するものと考えられる。表面欠陥の形態から原因を推定するため 2 次元断面形状のシミュレーションを試みた。図 15 に示すとおり開口 $100\mu\text{m}$ 、深さ $50\mu\text{m}$ で底部が 90° に開いた不整形形状のある初期の表面状態を仮定した。その上をスピニング加工のロール工具 ($\phi 100\text{mm}$) が通過するときの形状変化を、工具の押し込み量を $50\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ および $12.5\mu\text{m}$ として比較した。不整形形状は消失することなく、開口が閉じるように変形して図 14 と類似した形態になった。しかし、シミュレーション結果をもとに実験の素管あるいは加工途中品を観察しても、原因と思われる不整形形状は見出せなかった。このことから、原因となる不整形形状自体もスピニング加工の終了直前で形成されたものと考えられる。

5. おわりに

スピニング加工の実験とシミュレーション計算により以下の知見を得た。

単軸スピニング加工では

- (1) 工具の回転速度を低速にすると管端部で座屈が発生しやすくなる。
- (2) 加工パス数を多くすると板厚減少が抑制され、逆に過度に加工パス数が少ないと管端部で座屈が発生する。



Condition ② Steel B

図 14 偏芯傾斜スピニング加工サンプルの微小な亀裂状の表面欠陥

Fig. 14 Fine clack defect at surface of eccentric and oblique axis spinning formed specimen

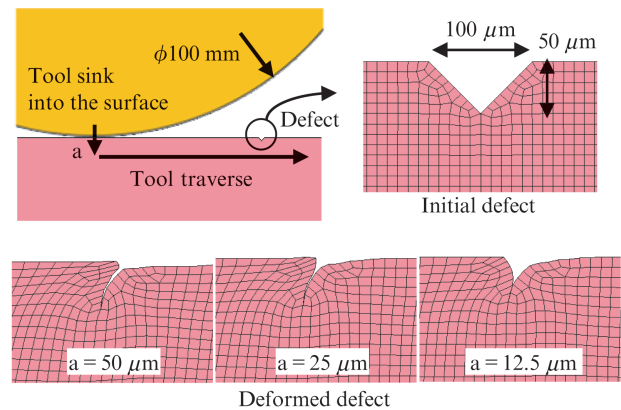


図 15 スピニング加工による表面欠陥の形状変化

Fig. 15 Change of defect shape at spinning formed surface

- (3) テーパー角が小さいほど板厚減少は抑制される。
 - (4) シミュレーション計算結果は実験と良好な一致を示し、板厚変化および座屈についての予測が可能となった。
- 偏芯傾斜スピニング加工では
- (5) 同じ縮径率の加工でも偏芯傾斜スピニング加工では単軸スピニング加工に比べて板厚減少が大きい。
 - (6) 偏芯傾斜スピニング加工では単軸スピニング加工に比べて温度上昇が大きい。
 - (7) スピニング加工の先端部ほど温度上昇は大きい。
 - (8) 素材の板厚が大きいほど温度上昇は大きい。
 - (9) 鋼 B の偏芯傾斜スピニング加工の先端部で最大 540°C に達した。
 - (10) 鋼 B の偏芯傾斜スピニング加工で微小な亀裂状の表面欠陥が発生し、この表面欠陥は板厚貫通していない。
 - (11) シミュレーション計算により、微小な亀裂状の表面欠陥は表面の不整形形状がスピニング加工により変形したものと推定される。

参考文献

- 1) 高橋洋一, 木原茂文, 長町拓夫, 水本宏明, 中田雄也. 管端のネッキング時の成形条件がしわの発生に及ぼす影響. 塑性と加工. 2010, vol. 51, no. 591, p. 348-352.
- 2) Takahashi, Y.; Kihara, S.; Nagamachi, T.; Mizumoto, H.; Nakata, Y. Effects of Forming Conditions on Wrinkling in Necking of Tube End. Materials Transactions. 2011, vol. 52, no. 1, p. 31-36.
- 3) 高田佳昭, 高橋洋一. スピニング技術について. 塑性と加工. 2013, vol. 54, no. 628, p. 403-407.
- 4) 安藤彰啓, 狩野忍. 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. 日新製鋼技報. 2013, no. 94, p. 17-24.
- 5) 村田真, 牟田玲子. 円管のスピニング加工精度に及ぼす肉厚の影響. 塑性と加工. 2001, vol. 42, no. 481, p. 124-128.
- 6) Yao, J.; Murata, M. An experimental study on spinning of taper shape on tube end. Journal of Materials Processing Technology. 2005, no. 166, p. 405-410.
- 7) 新藤健二, 石垣賢三, 加藤和明, 入江徹. 管材の新しいスピニング加工技術の開発. 第50回塑性加工連合講演会講演論文集. 1999, p. 173-174.
- 8) 入江徹, 吉岡真一, 今井孝征. 管材の新しいスピニング加工技術の開発 第2報. 平成12年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2000, p. 465-466.
- 9) Iguchi, T.; Yoshitake, A.; Irie, T.; Morikawa, A. Numerical Simulation and Development of Tube Spinning Process for Exhaust System Components of Motor Vehicles. Materials Processing and Design. Modeling, Simulation and Application, NUMIFORM. 2004, p. 1077-1082.
- 10) 尾崎芳宏, 石渡亮伸, 玉井良清. 自動車排気系部品のスピニング加工での不具合発生要因のCAE成形解析. 自動車技術会論文集. 2017, vol. 48, no. 2, p. 555-561.
- 11) 尾崎芳宏, 石渡亮伸, 玉井良清, 平本治郎. 自動車排気系部品のスピニング加工での不具合発生要因のCAE成形解析. 自動車技術. 2018, vol. 72, no. 10, p. 89-94.



尾崎 芳宏



石渡 亮伸



玉井 良清