

Report



H. Arai

同期絞りスピニング加工による 異形断面形状の成形法の研究

荒井 裕彦 *

1. はじめに

従来、スピニング加工は断面が円形の製品の成形に限られていたが、付加価値の高い加工を柔軟に実現するために、楕円形や多角形など異形断面形状が成形できるスピニング加工法が開発されている^{1)~3)}。一枚の板材から継ぎ目なく作られた角筒形状の容器には、液体容器、電池ケース、電気機器筐体など様々な用途がある。このような形状の標準的な製法として、プレス機による角筒絞り加工が用いられるが、少量生産では金型コストが大きいという問題がある。本研究はこうした角筒形状をスピニング加工によって成形することを目指す。これまで、力制御で金型に素材を押し付ける力制御スピニング⁴⁾⁵⁾や、異形ワークの回転に同期して加工ローラを動かす同期スピニング^{6)~8)}を用いて、異形断面形状のスピニングによる成形が実現されている。しかし金型に沿って1パスでローラを動かすしごきスピニングでは、成形品の板厚が $\sin$ 則に従うため、側面が主軸と平行な筒型の形状は成形できない。

本研究では、有底の角筒形状など側面が主軸と平行な異形断面形状を板材から成形する方法として、同期絞りスピニング加工法を取り上げる^{9)~12)}。これはワーク回転角と同期してローラを駆動する同期スピニングと、ローラを金型表面と素板外周の間で往復させてワーク形状を徐々に変化させる絞りスピニングを組み合わせたものである(図1)。

ワークの段階的な変形を決定する絞りパスを自動的に生成することを目指し、絞りパスと加工特性の関係を調べた。角筒形状を平板から成形し、絞りパス形状を変化させた時の成形可否や板厚分布を比較した^{10,11)}。またワーク周方向の材料流動に着目し、工具軌道計算法の改良により、ひずみや板厚分布の均等化を試みた¹²⁾。

2. 同期絞りスピニング

同期絞りスピニングでは、半径方向のローラ変位をワークの回転角と同期して制御しながら、多サイクルで平板の状態から段階的に板を傾けて成形を進める。異形断面形状のスピニング加工では、ローラの動きが、ワークの回転角、主軸方向、半径方向の三次元データで表される。成形品の形状データは、成形品をいくつかの主要な断面で輪切りにし、各断面について1回転を多数に分割して、それぞれの角度でローラが成形品に接触する位置の座標で表わす。

ここで初期状態の平板から製品形状までの三次元の工具

軌道をどのように与えるかを考える。最終段階で金型に素材を密着させるためには、成形品の完成形状に沿った工具軌道が必要になる。また加工初期の段階では、ワーク全体を変形させるため、素板外周形状に従う工具軌道が求められる。一方、作業者がこの工具軌道を試作により調整するために、従来の丸物の絞りスピニングと同様の感覚で、図形上で直観的に設定・編集可能なことが望ましい。

以上を考慮して、仮想的な二次元平面上で絞りパスを設定し、成形品と素板外周の間をパスに沿って線形補間することで、工具軌道を生成する。ワークの高さ方向 s_x 、半径方向 s_y をそれぞれ 0~1 に正規化した平面内で、多サイクルの絞りパスを表現する(図2(a))。 $s_x=0$ は成形品上端、 $s_x=1$ は下端を表わす。 $s_y=1$ のときローラは素板外周に沿って動き、 $s_y=0$ のときは成形品に沿って動く。成形品の断面形状を補間し、 s_x に対応する高さでの断面形状を求める(図2(b))。次に s_y を補間係数として成形品断面形状と素板外周形状を補間し、途中段階での断面形状を求める(図2(c))。半径方向変位 s_y に対応する工具変位 y_R は素板外周

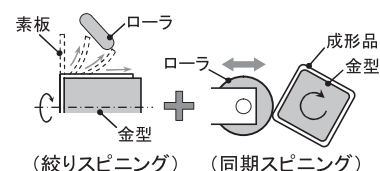
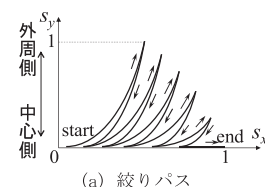
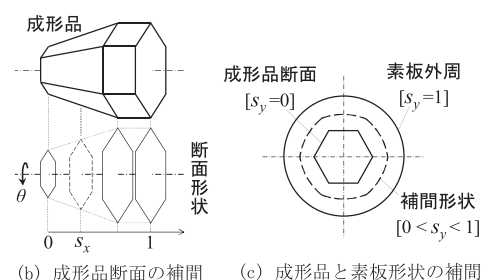


図1 同期絞りスピニング



(a) 絞りパス



(b) 成形品断面の補間 (c) 成形品と素板形状の補間

図2 同期絞りスピニングの工具軌道計算

* 産業技術総合研究所 製造技術研究部門 上級主任研究員

形状 y_B とワーク回転角 θ の関数である成形品断面形状 $y_P(\theta)$ を用いて次のように表わされる。

$$y_R = s_y y_B + (1 - s_y) y_P(\theta) \quad (1)$$

この方法では、絞りパスが無次元の正規化されたデータで設定されているので、絞りパス、成形品形状、素板外形形状を独立して扱える。このため、いったん成形可能な絞りパスが得られると、類似の形状であれば成形品や素板の形状データを交換するだけで成形が可能である。

3. 絞りパスの形状と加工特性

3.1 絞りパスの設定

絞りパスは、少ない試行回数で成形に成功し、短時間での成形が可能なパスが望ましい。こうしたパスが自動的に生成できるような条件設定の指針を得るため、加工限界の調査を行った。加工条件のうち、成形性に大きな影響を及ぼす絞りパスの形状に注目した。

二次元平面内の絞りパスを、直線パス、曲線パス、力制御パスの3通りのパス要素から構成する。パス要素を複数組み合わせ、素板から最終形状まで加工を行う多サイクルのパス群の全体をパスセットと呼ぶ。直線パスおよび曲線パスは始点と終点の位置で定義する。主軸回転速度と送りピッチもパスに付随して設定する。ただし工具軌道は連続でなくてはならないため、2パス目以降の始点は直前のパス要素の終点とする。直線パスは、始点と終点間を直線で結ぶ。曲線パスは、円弧の一部を高さ方向・半径方向に伸縮した曲線である。従来の絞りスピニングのパスでは、金型付近においてはローラを金型側面にほぼ接する方向に動かし、外周に近づくにつれて主軸に対する角度を大きくする。この曲線を参考に曲線パスの基準形状として中心角 60° の円弧を採用した。

力制御パスは、成形品を金型に押し付けるために、金型高さ方向に一定の速度で送りつつ、金型半径方向に力制御を行うパス要素である。力センサによるフィードバック制御で押付力の制御を実現した。設定内容としては終点の高さ s_y 、目標押付力、主軸回転速度、送りピッチとした。

3.2 実験の方法

実験に用いたスピニング加工機を図3に示す。加工ローラは6軸力センサを介し 45° の角度でXYテーブルに取り付けてある。XYテーブルのボールねじ(5mm/rev)をACサーボモータ(400 W)で駆動する。主軸は1/21の減速機を介しACサーボモータ(400 W)で駆動する。入出力ボードでパーソナルコンピュータと接続し、位置制御・力制御を行う。制御周期は1msecである。ローラは直径70mm、丸みR8mm、工具鋼(SKD11)である。60mm角の正方形断面、丸みR1mmの角柱金型(S45C焼入)を使用した。素板は直径120mm、

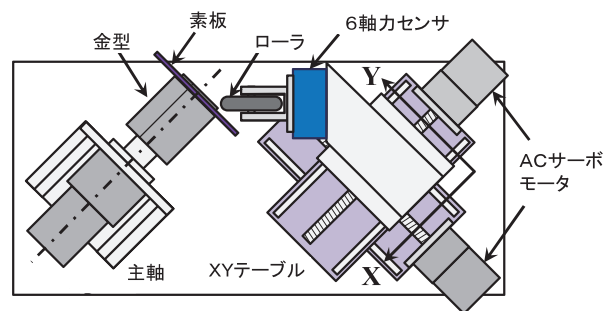


図3 力制御スピニング加工機

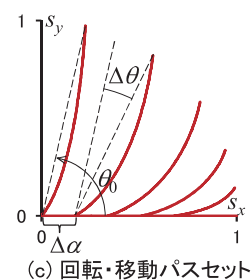
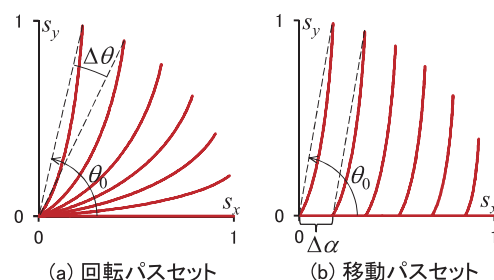


図4 パスセットの形状

板厚1mmのアルミニウム(A1050P-H24)円板である。

パスセットの形状として、回転パスセット(図4(a))、移動パスセット(同(b))、回転・移動パスセット(同(c))の3種類のパスセットを採用した。回転パスセットでは、曲線パスの始点を固定して、始点と終点を結ぶ線分の主軸に対する角度を、初期角度 θ_0 から一定値 $\Delta\theta$ ずつ減らしていく。移動パスセットでは、曲線パスの始点を一定値 $\Delta\alpha$ ずつ並進させていく。始点を移動する際、成形品に沿ってローラを加圧する力制御パスが入る。回転・移動パスセットは、回転パスセットと移動パスセットの組み合わせであり、1往復ごとに角度を減らしつつ、始点を移動させていく。

加工途中の曲線パスの素板外周側の終点は、原点を中心とする半径1の円弧上にあるとした。成形品を金型に押し付ける力制御パスの目標加工力は500 Nとした。送りピッチはすべて1mm/revとした。主軸回転速度は、力制御パスにおいては15 rpm、それ以外は30 rpmとした。

パスセットの角度増分 $\Delta\theta$ 、移動量 $\Delta\alpha$ 、成形高さ h を変化させて加工限界を評価する。成形高さ h とは、図2(b)の成形品形状の高さの設定値であり、図4でパスセットの横軸方向の動作範囲($s_x=0\sim1$)を実寸に変換した長さとなる。

3.3 実験結果

回転パスセット：パスの初期角度 θ_0 を 80° とし、成形

高さ h を 25~40mm, 角度増分 $\Delta\theta$ を 3~6° で変化させた. 成形品の一例を図 5 に示す.

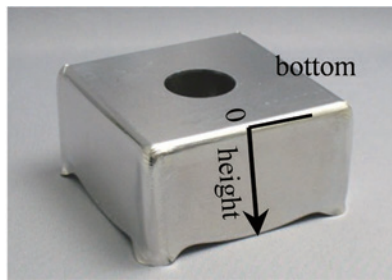


図 5 回転パスセットによる角筒形状の成形品

成形可否の結果を図 6 に示す. 回転パスセットは角度増分を大きくするとしわが生じやすく, パス数が多くなるため成形に時間がかかる. 成形高さ h が小さいほうが角度増分を大きく取ることができる. 辺の中央部分での高さ方向の板厚分布を図 7 に示す. 最小板厚は 0.9mm 以上で元の板厚がほぼ維持されたまま成形できている.

移動パスセット: 曲線パスの初期角度 θ_0 を 62°, 80° の 2 通りとし, 移動量 $\Delta\alpha$ を 0.05~0.15, 成形高さ h を 25~40mm と変化させた. 初期角度 $\theta_0=80^\circ$ の時の成形品の例を図 8 に示す. 成形可否の結果を図 9 に示す. 初期角度 $\theta_0=80^\circ$ の場合, 成形高さが小さいと破断, 大きいとしわが生じやすい. $\theta_0=62^\circ$ では移動量を大きく取れるが, しわが発生しやすくなる. フランジ外周が主軸に対して垂直に近い角度になると, しわが抑制される.

辺の中央部分の板厚分布は上端・下端よりも中間の高さで薄くなる傾向がある. $\theta_0=80^\circ$ の時 (図 10) は板厚が大きく減少し, 最も薄いところで約 0.35 mm となった. 一方で $\theta_0=62^\circ$ (図 11) では移動量 $\Delta\alpha$ が大きくても板厚減少は抑えられ, 最小板厚 0.7mm 以上となった.

回転・移動パスセット: パスの初期角度 θ_0 を 80°, 成形高さ h を 30 mm に固定して, 角度増分 $\Delta\theta$ を 0~8°, 移動量 $\Delta\alpha$ を 0~0.09 で変化させ, 破断やしわの発生の有無を調べた. 成形品の外観をそれぞれ図 12 に示す. 移動量がゼロすなわち回転パスセットである(a)は, 角度増分 $\Delta\theta=5^\circ$ でしわが発生しているが, 移動量 $\Delta\alpha$ を 0.01 にした(b)では

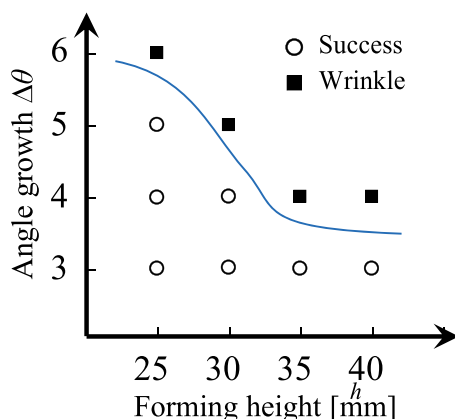


図 6 回転パスセットによる角筒形状の成形可否

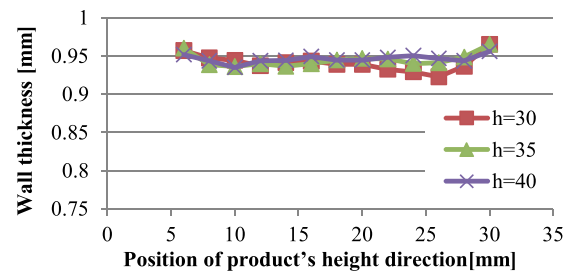


図 7 回転パスセットによる成形品の板厚分布

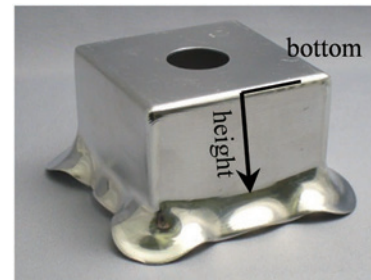
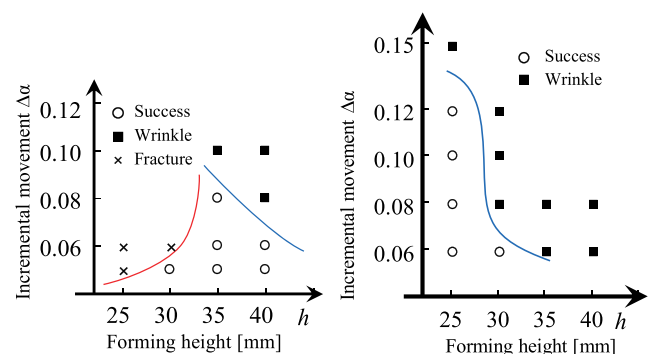


図 8 移動パスセットによる角筒形状の成形品

角度増分 $\Delta\theta=7^\circ$ でもしわや破断の発生なく成形が完了した. 成形に成功した(b)と(d)を比較すると, 素材の伸びが異なっている. これは(b)は回転パスセット, (d)は移動パスセットの影響が強いためである.



(a) 初期角度 80° (b) 初期角度 62°

図 9 移動パスセットによる角筒形状の成形可否

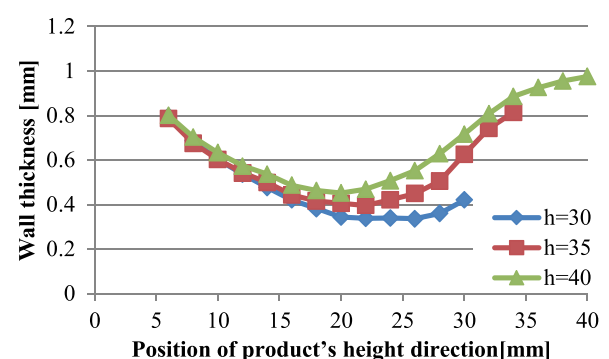


図 10 初期角度 80° の移動パスセットによる板厚分布

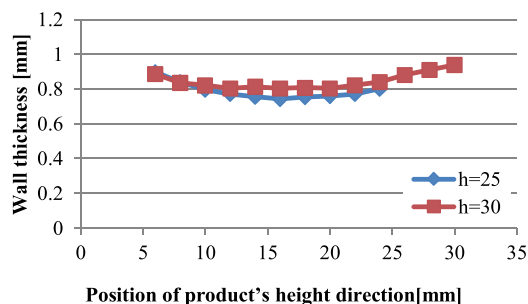
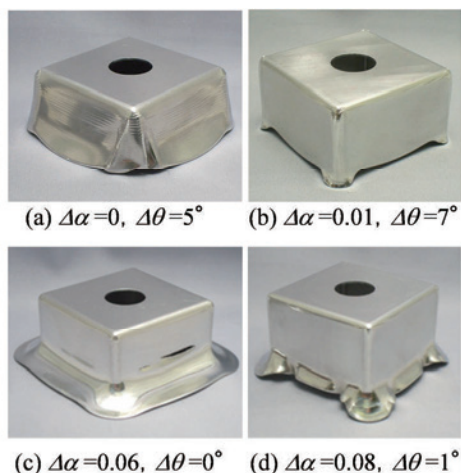
図 11 初期角度 62° の移動パスセットによる板厚分布

図 12 回転・移動パスセットによる角筒形状の成形品

成形の可否を図 13 に示す。横軸上は移動パスセット、縦軸上は回転パスセットの成形結果になる。回転・移動パスセットでは、回転パスセットや移動パスセットと比べて、角度増分 $\Delta\theta$ や移動量 $\Delta\alpha$ をわずかも加えると、成形可能な範囲が広がる。移動量 $\Delta\alpha$ を増やすにつれて、成形可能な角度増分 $\Delta\theta$ は右肩下がりになる。図 14 に各成形品の板厚分布を示す。角度増分 $\Delta\theta$ の大きいパスセットで成形を行ったものは板厚減少が抑えられている。移動量 $\Delta\alpha$ を大きくすると加工時間は短縮される一方、中間部での板厚減少は大きくなる。すなわち、角度増分 $\Delta\theta$ や移動量 $\Delta\alpha$ を調整することで、板厚分布と加工時間を調整可能である。

いずれのパスセットでも、成形に成功するには適切な長さの曲線パスの設定が不可欠である。曲線パスが短すぎると余ったフランジ根元が引き伸ばされて破断する一方、長すぎる曲線パスはしわが発生しやすい。このため、素材の伸びに対して、素板の外周まで到達する長さの曲線パスが得られるように成形高さ h を設定することが重要である。

4. 角筒成形における材料流動の均等化

4.1 角部への材料集中

次に同期絞りスピニングにおける周方向の材料流動に着目する。円板から角筒形状を成形する際、角部に材料が集中して板厚の局所的な増加が観察される。文献⁹⁾の実験では、角付近が他の部分と比べて約 2 倍に板厚が増加する場合があった。これは、素板が金型に絞られていく過程において、素材が角部に寄せられたためだと考えられる。また

加工終端では角部に素板が余って耳が形成された。素板裏面にマーカーを記して成形すると、角付近は材料のひずみが他の部分と比べて著しく大きくなっていた。材料の歩留まりを向上するために耳の発生を抑制するとともに、角部のひずみを緩和して、材料に加えられるひずみをできるだけ一様にするのが望ましい。

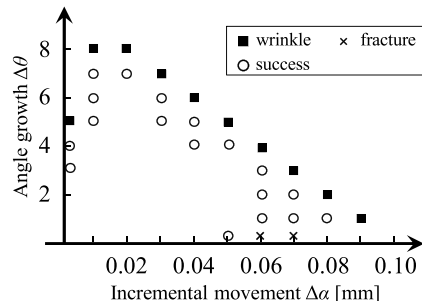


図 13 回転・移動パスセットによる角筒形状の成形可否

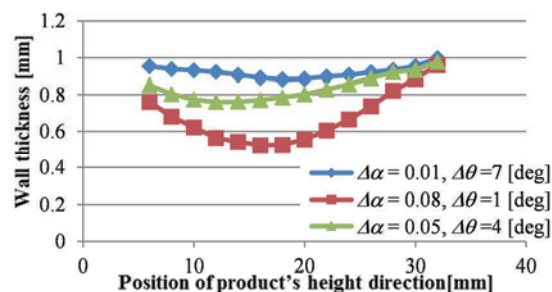


図 14 回転・移動パスセットによる成形品の板厚分布

スピニング加工による管材の異形断面成形¹⁴⁾においては、円管から角管に口絞り成形しても、角部の板厚は他の部分とさほど変わらない。また角部のみが軸方向に大きく伸びる現象は見られない。管の縮径は板材からの絞り成形とは材料の流れ方が異なると思われる。そこで平板から絞りスピニングでいったん円筒形状を成形し、そののち円筒部分を角筒形状に縮管すれば、角部への材料の集中が避けられると考えた。

まず予備実験としてこうした二段階の成形を試みた。角柱金型を用い、アルミニウム円板を下半分が円筒状となるように同期絞りスピニングで成形し(図 15)、さらにこの中間形状を金型に押し付けて角筒形状を成形した。従来の同期絞りスピニングと比べて、二段階の成形では角部の耳の高さが約 2/3 に減少し、円筒形状を経由することで耳の形成を抑制可能なことが確認できた。

4.2 中間断面形状の導入

二段階で成形を行う場合、予め円筒部分を含む中間形状を成形する必要がある。しかし底面だけで金型に固定した薄肉の円筒は不安定で、成形の際にしわが生じやすい。また正方形の底面から円筒形状までの移行部分では従来の同期絞りスピニングと類似した工具軌道となるため、そこでは角付近の材料の流れ方もあまり変わらない。そのため材料流動の均等化の効果も限定的なものとなっている。

そこで、補間による工具軌道計算に中間の円形断面形状

を導入し、工具軌道の主な部分が円形断面に沿う軌道となる方法を考案した。従来の同期絞りスピニングでは、半径方向の工具変位 y_R は素板外周形状 y_B と成形品断面形状 $y_P(\theta)$ から(1)式で計算される(図 16(a))。これに対して提案する方法では、成形品断面の外側に近接して円形の中間断面形状 y_{mid} を設定する(図 16(b) 赤色)。絞りパスの半径方向変位 s_y を区分し、工具変位 y_R を

$$\begin{cases} y_R = \frac{s_y}{s_{mid}} y_{mid} + \left(1 - \frac{s_y}{s_{mid}}\right) y_P(\theta) & (0 \leq s_y < s_{mid}) \\ y_R = \left(1 - \frac{s_y - s_{mid}}{1 - s_{mid}}\right) y_{mid} + \frac{s_y - s_{mid}}{1 - s_{mid}} y_B & (s_{mid} \leq s_y \leq 1) \end{cases} \quad (2)$$

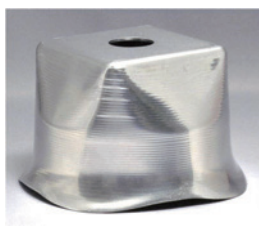


図 15 二段階成形における中間形状

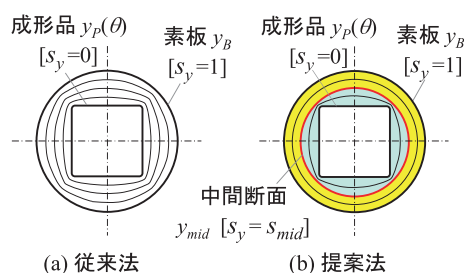


図 16 補間計算における円形中間断面の導入

と計算する。すると、 $0 \leq s_y < s_{mid}$ の範囲(水色部分)では成形品形状と中間円形断面との補間が行われる。 $s_{mid} \leq s_y \leq 1$ の範囲(黄色部分)では工具軌道は円形に沿い、成形している途中の形状は y_{mid} の外側では円形断面となる。この方法では、 y_{mid} の外側の材料は必ず中間円形断面を通過してから角筒形状に成形されるので、円筒形に予備成形するのと同様に、角部への材料の集中を防ぐ効果が期待できる。

4.3 均等化の効果の検証

提案の方法と従来の同期絞りスピニングにより角筒形状を成形して結果を比較した。直径 150mm、板厚 1.5mm の A1050P-H24 円板を素板とし、60mm 角、丸み R5mm の角柱金型(S45C 焼入)を用いた。ローラは直径 70mm、丸み R9.5mm、材質は工具鋼である。図 17 に示す定格推力 1kN のリニアモータ駆動スピニング加工機⁵⁾を用いた。

絞りパスは、前節の回転・移動パスセットに改良を加えたものである。20 往復で曲線パスは金型から外周に向かう一方向のみのパスとした。素材が金型から浮いているパスでは送りピッチ 2mm/rev、主軸回転数 60rpm、金型に素材を押し付けるパスでは送りピッチ 1mm/rev、主軸回転数 15rpm とした。中間円形断面の y_{mid} はローラ先端が $\phi 86.4$

の円に接する値とした。これは金型の最大径の 2.9mm 外側となる。また補間方法の切り換え点は $s_{mid} = 0.25$ とした。絞りパスを図 18 に示す。 $s_y = s_{mid}$ よりも上側の部分の絞りパスは円形断面の工具軌道に変換される。成形結果の写真を図 19 に示す。提案法(右)では従来法(左)と比べて耳の形成が抑制されている。

素板の裏面(金型側)に同心円及び放射状のマーカーを描き、成形品側面の周方向及び半径方向(成形後は軸方向)のひずみを計算した。図 20 は素板上で半径 65mm の位置での対数ひずみを示す。 0° は側面中央、 $\pm 45^\circ$ は角部に対応する。従来法(青色)では角付近が半径方向に大きく

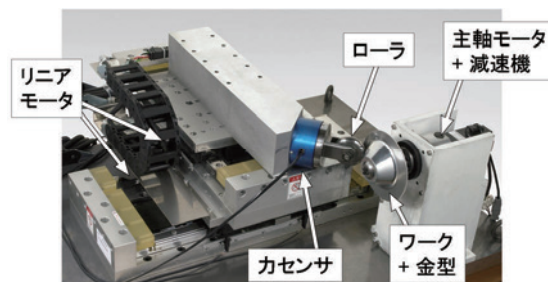


図 17 リニアモータ駆動スピニング加工機

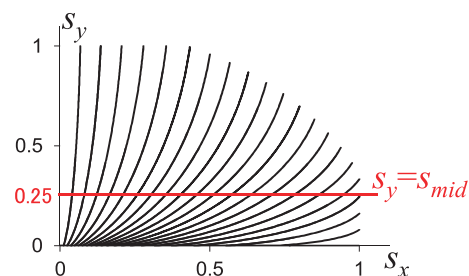


図 18 絞りパスと補間方法の切り換え点

伸び、周方向には圧縮される。一方中央部では引張・圧縮ともにひずみは小さく、角部と大きな差がある。プレス機による角筒絞りと同様に、角部付近では絞り変形となる一方、中央付近では主に曲げ変形となっていると考えられる。それに対し提案法(赤色)では、ひずみ絶対値が角部で減少し、中央部で増加しており、ひずみが均等化されている。また図 21 に底面から 45mm の位置での横方向の板厚分布を示す。従来法(青色)では中央付近の板厚が減少し、角付近では板厚が増加する。板厚は中央で 0.98mm、角部で 1.65mm であり、約 1.7 倍の比率である。提案法(赤色)では全体に従来法よりも薄肉化するが、角部の板厚増加は少なくなり、板厚はより均一になる。板厚は中央で 0.82mm、角部で 0.95mm であり、比率は約 1.2 倍にとどまる。



図 19 従来法(左)と提案法(右)による成形品

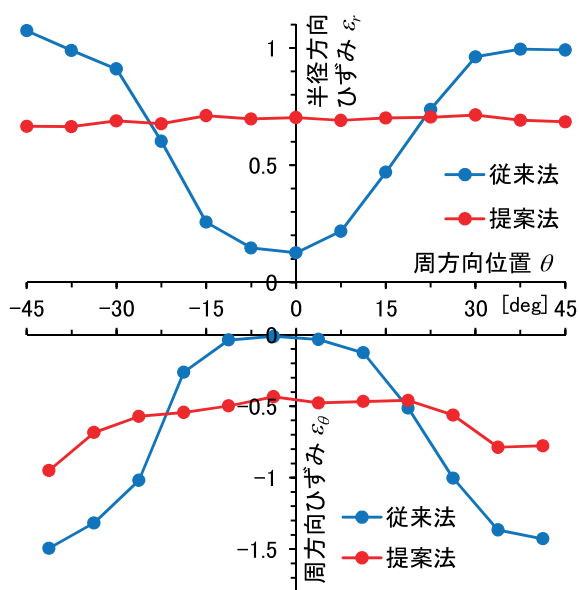


図 20 半径方向／周方向ひずみの比較

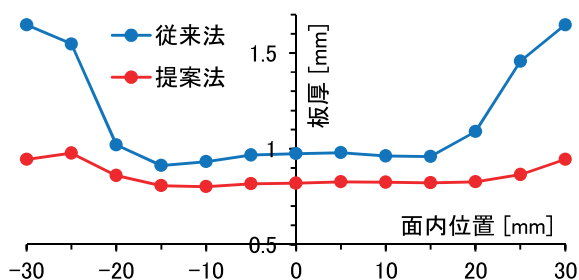


図 21 周方向の板厚分布

次に、5 パス毎に加工を中断して、成形の進行に伴う形状やひずみの変化を調べた。図 22 に 5 パス毎の中間段階のワークを示す。ワークの外周形状に注目すると、従来法では中間段階でもやや四角い形状となっているのに対し、提案法では外周が円形に保たれたまま成形が進む。このことが二段階の成形と同じく円管から角管への縮管と同様な効果をもたらしたと考えられる。図 23 にひずみの変化を示す。従来法（青色）では当初から角部と中央部のひずみの差が拡大してゆくが、提案法（赤色）では 15 パス程度までは角部と中央部のひずみはほぼ同じ変化を示す。ワークが中間断面より小さくなるまでは円形断面として成形が進むためと考えられる。最後に中間断面から角形金型に近づく際に角部と中央部のひずみの差が生ずる。

実験では、中間円形断面の導入による副次的効果として、従来法よりもしわが生じにくい傾向も観察された。従来法では、成形途中でフランジの縁の伸び方が不揃いとなるためにローラとワークが断続的に接触し、しわの原因となる場合がある。提案法ではフランジ外周が円形に近いので、ローラとワークの連続的な接触が安定して保たれる。

また提案法は加工時間の短縮の効果も持つ。異形断面形状の成形ではローラの往復運動をワークの回転に追従させるために主軸回転速度を落とす必要があり、加工時間の増

加につながっていた。提案法では円形の成形を行う範囲が多いため、ここでは従来の円形のスピニングと同様に高速でワークを回転させることができる。

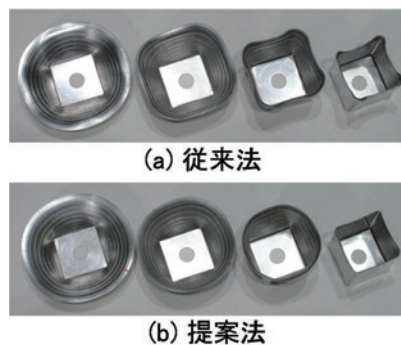


図 22 成形の進行に伴う形状の変化

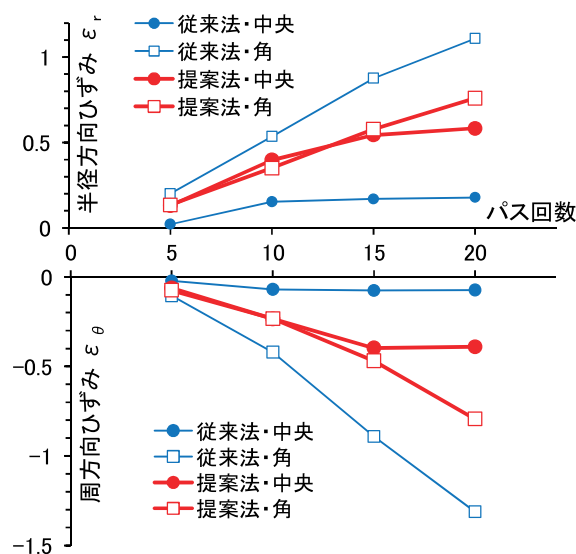


図 23 成形の進行に伴うひずみの変化

5. おわりに

ワーク回転角と同期してローラを往復運動する同期スピニングと、板を徐々に傾ける絞りスピニングを組み合わせ、主軸と平行な筒型の異形断面形状を平板から成形できる同期絞りスピニング加工法の研究を行った。絞りパス生成の自動化を目標として、パスセット形状による成形可否および板厚分布の変化を調べた。回転・移動パスセットでは回転パスセットや移動パスセットよりも破断やしわが発生しない成形可能範囲が広い。加工時間と板厚減少の間にはトレードオフの関係が存在する。また工具軌道の補間計算に中間円形断面を導入することにより、角筒形状の成形の際の角部と中央部の材料流動を均等化した。角部のひずみが緩和され、より均一な板厚分布が得られた。

実用化に向けて、企業と共同開発したリニアモータ駆動式のスピニング加工機¹³⁾に本加工法を実装し、冷延鋼板からの角筒形状の成形も実現している。また成形品形状・ブランク形状・絞りパスの 3 種類のデータから工具軌道を補間計算する方法は、板材のみでなく管材からの成形にも有効である。本加工法をベースとして、管材から異形断面形状¹⁴⁾や湾曲／傾斜形状¹⁵⁾の口絞り成形も実現している。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団平成 24 年度一般研究開発助成により遂行されたものであり、ここに深く感謝の意を表する。また本研究の共同研究者であった筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程の杉田栄彦氏（現・株式会社ミットヨ）に心から感謝する。

参考文献

- 1) 荒井裕彦：素形材, **62-11**, (2011), 47-51.
- 2) 荒井裕彦：プレス技術, **51-11**, (2013), 92-95.
- 3) 荒井裕彦：塑性と加工, **54-628**, (2013), 398-402.
- 4) 荒井裕彦：日本ロボット学会誌, **24-1**, (2006), 140-145.
- 5) 荒井裕彦：日本ロボット学会誌, **26-1**, (2008), 49-56.
- 6) 天野富男・田村公男・森茂樹：第 98 回塑性加工シンポジウムテキスト, (1985), 69-77.
- 7) 荒井裕彦・藤村昭造・岡崎功：第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2005), 687-688.
- 8) I. Shimizu: J. Material Processing Technology, **210-4** (2010), 585-592.
- 9) 杉田栄彦・荒井裕彦：日本機械学会論文集 C 編 **78-787**, (2012), 1004-1012.
- 10) Y. Sugita, H. Arai: J. Material Processing Technology, **217** (2015), 336-344.
- 11) 杉田栄彦：筑波大学博士学位論文, 博甲第 7295 号, (2015).
- 12) 荒井裕彦：塑性と加工, **56-656**, (2015), 787-792.
- 13) 荒井裕彦ほか：日本ロボット学会誌, **28-1**, (2010), 49-50.
- 14) 荒井裕彦：平成 26 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2014), 199-200.
- 15) 荒井裕彦：平成 27 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2015), 171-172.