

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

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造技術研究部門

上級主任研究員 荒井裕彦

(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012003)

キーワード：スピニング，回転加工，逐次成形

1. 研究の目的と背景

回転する板材や管材に加工ローラを押し付けて成形するスピニング加工は、型コストが低くリードタイムが短いため、多品種少量生産や小ロットの試作などに有利である。従来のスピニング加工は断面が円形の製品しか成形できなかったが、フレキシブルで付加価値の高い加工を実現するために、断面形状が楕円形や多角形など円形ではない異形断面形状が成形できるスピニング加工法の開発が進められている^{1~4)}。

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、電気機器管体など様々な用途がある。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、力制御でマンドレルに素材を押し付ける力制御スピニング^{1,2)}や、異形ワークの回転に同期してローラを動かす同期スピニング^{3,4)}を用いて、異形断面形状の成形が実現されている。しかしマンドレルに沿って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 sine 則に従うため、側面が主軸と平行な筒型の形状を成形することはできない。

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開発する^{5~7)}。これはワークの回転角と同期して加工ローラを駆動する同期スピニング加工と、ローラをマンドレル表面とブランク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加工を組み合わせたものである(図 1)。従来の絞りスピニングでは中間段階の絞りパスを試行錯誤的な経験に依存して設定していた。そこで、絞りパスを自動的に生成することを目指し、条件設定の指針を得るため、絞りパスによる加工特性の変化を調べる。角筒形状をアルミニウム板から成形し、絞りパス形状を変化させた時の成形可否や板厚分布への影響を比較する。

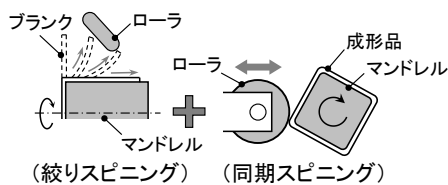


図 1 同期絞りスピニング

2. 実験方法

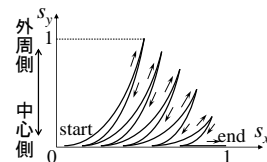
2.1 同期絞りスピニングの概要

同期絞りスピニングでは、半径方向のローラ変位を回転角と同期して制御しながら、多サイクルで平板ブ

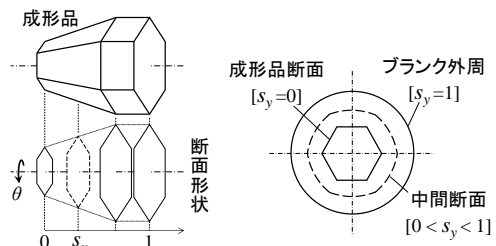
ランクから段階的に成形を進める。異形断面形状のスピニング加工では、ローラの動きが、ワークの回転角、軸方向、半径方向の三次元データで表される。成形品の形状データは、成形品をいくつかの主要な断面で輪切りにし、各断面について 1 回転を多数に分割して、それぞれの角度でローラが成形品に接触する位置の座標で表わす。

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が問題となる。最終段階でマンドレル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、ブランク外周形状に従う工具軌道が求められる。一方、この工具軌道は、試作を通して調整されるため、作業による編集が容易でなくてはならない。従来の丸物の絞りスピニングと同様の感覚で、図形上で直観的に工具軌道を設定できることが望ましい。

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、成形品とブランク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 $0 \sim 1$ 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。 $s_y=1$ のときローラはブランク外周に沿って動き、 $s_y=0$ のときは成形品に沿って動く。成形品の形状を複数の代表的な断面で表わし、 s_x を補間係数として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ブランク外周形状を補間し、途中段階での断面形状を求める(図 2 (c))。



(a) 絞りパス



(b) 成形品断面の補間 (c) 成形品とブランクの補間

図 2 同期絞りスピニングの工具軌道計算

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、ブランク外周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ブランクの形状データを交換するだけで成形が可能である。

2.2 絞りパスの設定

絞りパスは、マンドレルの高さ方向と半径方向に正規化された二次元座標において定義され、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される。パス要素を複数組み合わせ、ブランク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、終点、主軸回転速度、送りピッチで設定される。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では、マンドレル付近においてはローラをマンドレル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していく。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、成形品をマンドレルに押し付けるために、マンドレル高さ方向に一定の速度で送りつつ、マンドレル半径方向に力制御を行うパス要素である。力覚センサによるフィードバック制御で押付け力の制御を実現した。設定内容としては終点の高さ s_x 、目標押し付け力、主軸回転速度、送りピッチとした。

2.3 実験装置

実験に用いたスピニング加工機の概略図を図3に示す。加工ローラは6軸力センサを介して、 45° の角度をなすようにXYテーブルに取り付けられている。XYテーブルは5mmピッチのボールねじで構成され、ロータリエンコーダ付きの400WのACサーボモータで制御される。主軸は減速比21の遊星歯車機構を介して、XYテーブルと同等のACサーボモータで制御さ

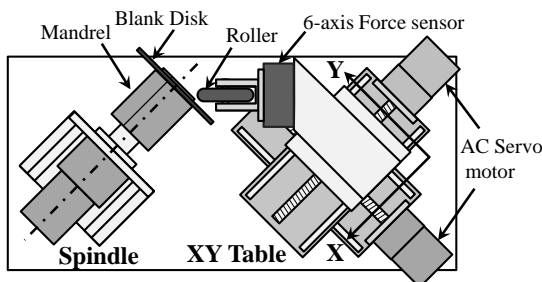


図3 力制御スピニング加工機

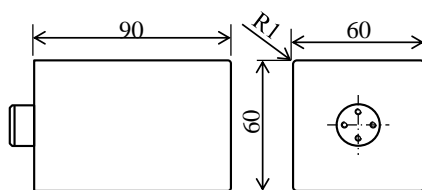


図4 角筒形状のマンドレル

れる。6軸力センサやエンコーダの信号は入出力ボードを介して、パーソナルコンピュータに取り込まれる。サーボモータへの電圧指令はD/Aボードを介して、モータドライバに送られる。制御周期は1msである。

ローラは直径70mm、丸み半径8mm、材質はSKD11である。図4に示した角柱形状のマンドレルを使用した。60mm四方の正方形の底面を持ち、角はR1で丸められている。ブランクは、直径120mm、板厚1mmの純アルミニウム(A1050-H24材)を用いた。

2.4 パスセット形状と加工特性の関係

同期絞りスピニング加工において、工具軌道に着目し、異形断面形状の加工特性を調べる。絞りパスを自動で生成する際に、少ない試行回数で成形に成功し、短時間での成形が可能でパスが望ましい。こうした条件設定の指針を得るため、加工条件のうち最も成形性に影響を及ぼすと思われるパスセットの形状に注目して加工限界などの調査を行った。

パスセットの形状として、文献⁸⁾を参考に基本となる3種類のパスセットを採用した。

- 回転パスセット (図5上)
- 移動パスセット (同中)
- 回転移動パスセット (同下)

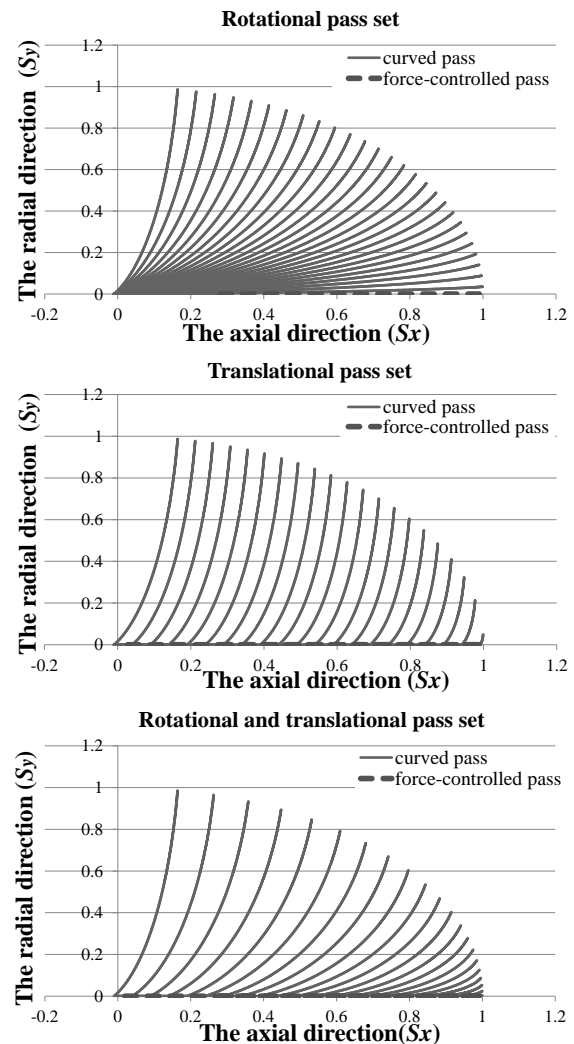


図5 パスセット形状の例：回転パスセット(上)、移動パスセット(中)、回転移動パスセット(下)

回転パスセットは、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 $\Delta\theta$ ずつ減らしていくパスセットである。移動パスセットは、曲線パスの始点を一定値 $\Delta\alpha$ ずつ並進させていくパスセットである。始点を移動する際、マンドレルに沿って素材を押し延ばすパス要素が入る。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パスごとに角度を減らしつつ、始点を移動させていくパスセットである。

素材のねじれを防ぐため、パスが外周部で折り返すたびに主軸の回転方向を反転させた。また加工途中の曲線パスのブランク外周側の終点は、原点を中心とする半径1の円弧上にあるとした。位置制御のパス要素はすべて曲線パスとした。曲線パスで角度 0° または $s_x=1$ に到達した後は、 $s_x=0.18$ から $s_x=1$ までの力制御パスを行う。この力制御パスの目標加工力は500Nとした。送りピッチは1mm/revとした。主軸回転速度は、力制御パスにおいては15rpm、それ以外はすべて30rpm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5でパスセットの横軸方向の動作範囲($s_x=0\sim 1$)を実寸に変換した長さとなる。

3. 実験結果

3.1 回転パスセットの場合

回転パスセットの評価ではパスの初期角度 θ_0 を 80° とし、成形高さ h を25~40mm、角度増分 $\Delta\theta$ を3~6 $^\circ$ で変化させた。成形品の一例を図6に示す。角の伸びは小さく、比較的小さな成形品となった。辺の中央部分は底面から約33mmである。

成形可否の結果を図7に示す。成形高さ h が小さいほうが角度増分を大きくできることが分かった。成形高さ $h=25\text{mm}$ の時は、初期角度 $\theta_0=80^\circ$ で角度増分 $\Delta\theta$ の最大が5 $^\circ$ であることから、最小でも17往復は必要である。角度増分 $\Delta\theta=3^\circ$ の時の板厚分布を図8に

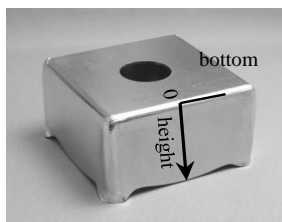


図6 回転パスセットによる角筒形状の成形品

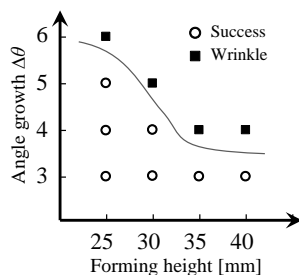


図7 回転パスセットによる角筒形状の成形可否

示す。いずれの成形高さにおいても大きな違いはなく、いずれも板厚がほぼ維持されたまま成形できている。

3.2 移動パスセットの場合

角筒形状の移動パスセットの評価ではパスの初期角度 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9に示す。成形品の外周部は、回転パスセットの時に比べて、非常に大きく伸びている。一方で、角の部分の板厚増加は抑えられている。また、成形可否の結果を図10に示す。初期角度 $\theta_0=80^\circ$ の時は、成形高さ $h=35\text{mm}$ の時に最も成形しやすく、それ以下の場合破断が生じ、それ以上の場合しわが発生するという結果が得られた。破断した成形品を観察すると、フランジ外周がほぼ平面のまま成形されており、その手前で亀裂が生じていた。これより材料の伸びに対して、工具軌道が短く、外周部まで成形出来なかったため、しごきスピニング加工のような変形が生じ、破断が生じたと考えられる。また、成形高さ h を大きくすると、より積極的に材料を倒そうとするため、しわが生じたものと考えられる。

初期角度 $\theta_0=62^\circ$ の場合、成形高さ h が25mmのとき最も成形性がよいが、成形高さ h を増やすと急激に成形ができなくなった。フランジ外周の反り立ちは、成形中にしわ発生を抑制する働きがあると考えられる。

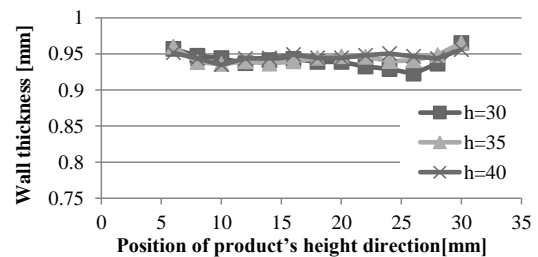


図8 回転パスセットによる成形品の板厚分布

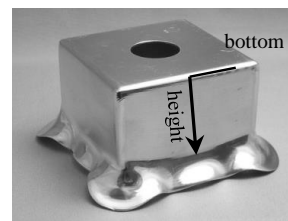
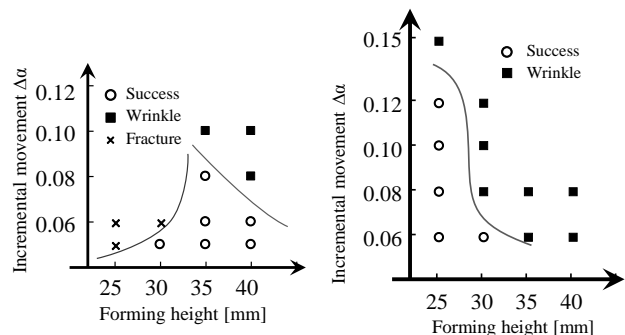


図9 移動パスセットによる角筒形状の成形品



(a) 初期角度 80°

(b) 初期角度 62°

図10 移動パスセットによる角筒形状の成形可否

初期角度 $\theta_0=80^\circ$, 移動量 $\Delta\alpha=0.05$ の時の板厚分布を **図 11** に, 初期角度 $\theta_0=62^\circ$, 移動量 $\Delta\alpha=0.06$ の時の板厚分布を **図 12** に示す. いずれの板厚分布も中間部が薄くなるバスタブ型であるが, 初期角度 $\theta_0=80^\circ$ のときは極めて大きな板厚減少が生じており, 最も薄いところで 0.35 mm 程度まで減少した. 一方で初期角度 $\theta_0=62^\circ$ の時は移動量 $\Delta\alpha$ が大きいにも関わらず板厚減少は抑えられている. 成形高さ h が小さいほど顕著に板厚減少が生じるという共通点が見られた.

3.3 回転移動パスセットの場合

角筒形状の回転移動パスセットの評価ではパスの初期角度 θ_0 を 80° , 成形高さ h を 30 mm に固定して, 角度増分 $\Delta\theta$ を $0\sim 8^\circ$, 移動量 $\Delta\alpha$ を $0\sim 0.09$ で変化させ, 成形実験を行った. 角度増分 $\Delta\theta$ を固定して移動量 $\Delta\alpha$ を徐々に増やし, 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 13** 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.

成形の可否を **図 14** 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. 角度増分 $\Delta\theta$ が 0° と 1° の場合を比較すると, 角度増分 $\Delta\theta$ が小さくても破断を抑制し, 移動量 $\Delta\alpha$ を大きく取ることができると分かった. また, 移動量 $\Delta\alpha$ に関しても同様で, 0 の時と 0.01 の時では成形可能な角度増分 $\Delta\theta$ が異なり, $\Delta\alpha=0.01$ では角度増分 $\Delta\theta$ は 7° まで取ることができた. 移動量を増やすにつれて, 成形可能な角度増分は右肩下がりになっていった.

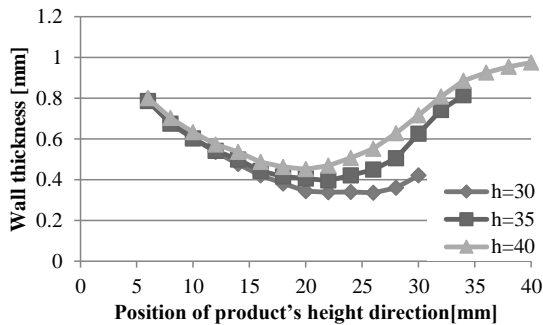


図 11 初期角度 80° の移動パスセットによる成形品の板厚分布

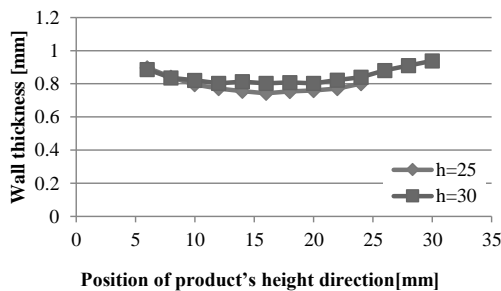


図 12 初期角度 62° の移動パスセットによる成形品の板厚分布

図 15 に, 各成形品の板厚分布を示す. 角度増分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おり, 浅いバスタブ型になっている. 移動量が大きくなるにつれて, 中間部での板厚減少が大きくなる.

成形時間は $\Delta\alpha = 0.01, \Delta\theta = 7^\circ$ のもので約 31 分, $\Delta\alpha = 0.05, \Delta\theta = 4^\circ$ のもので約 30 分, $\Delta\alpha = 0.08, \Delta\theta = 1^\circ$ のもので約 18 分であった. 成形時間は移動量を大きくすることで短縮できることが分かった. 以上の結果から, 板厚分布の仕様と成形時間のトレードオフによって, パスセットを設定しなくてはならないと言える.

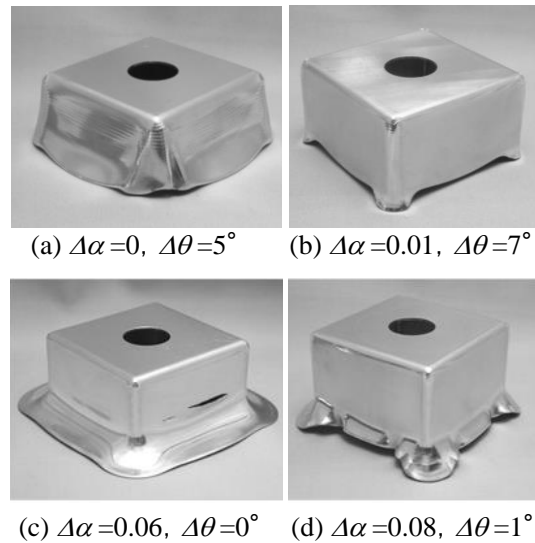


図 13 回転移動パスセットによる角筒形状の成形品

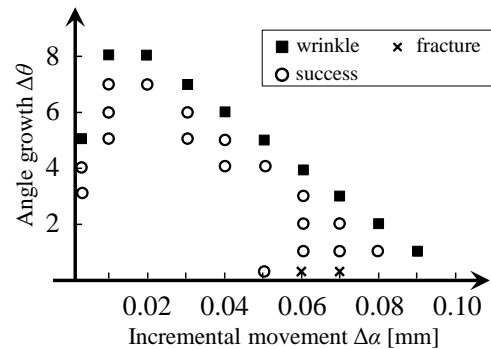


図 14 回転移動パスセットによる角筒形状の成形可否

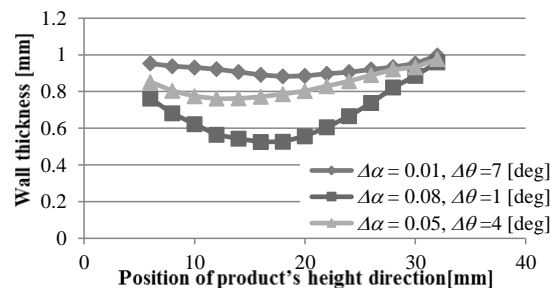


図 15 回転移動パスセットによる成形品の板厚分布

3.4 角筒形状と円筒形状の比較

直径 85mm の円柱状マンドレルを用い、回転パスセットと移動パスセットについて円筒形状の成形実験を行い、角筒形状と比較した。ブランク直径は 130mm である。円筒形状ではどちらのパスセットでも中間部に板厚減少が生じるバスタブ型の板厚分布となった。また移動パスセットの場合、初期角度 80° ではどの条件でも破断が生じて成形不可であり、初期角度 62° で成形を行った。円筒形状と角筒形状の成形性に対してパスセットが与える影響の比較を表 1 にまとめる。

円筒形状においては、回転パスセットによる成形品と移動パスセットによる成形品にはほとんど差異は見られなかった。一方で、角筒形状では回転パスセットと移動パスセットで大きな違いが見られた。特に角筒形状の場合の板厚分布の差は顕著であり、回転パスセットにおいて円筒形状と角筒形状では変形形態が異なることを示唆している。円筒形状は素材全体で絞り変形が起こるが、角筒形状の辺の部分はそのまま板材が折りたたまれるような変形が起こったと考えられる。

移動パスセットにおいては、円筒形状ではすべて破断による成形不良であったが、角筒形状ではしわが発生する場合もあった。角筒形状は接触点の高さ方向の位置や周方向の変形が一定ではないため、円筒形状よりもしわが発生しやすいと考えられる。

4. 結論

異形断面形状の同期絞りスピニングにおいて、絞りパスの自動生成の際の条件設定の指標を得るために、角筒形状をアルミニウム板から成形し、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。得られた結果を以下に示す。

- (1) 回転パスセットは、成形高さが小さいほうが角度増分を大きく取ることができて、パス数を減らせる。
- (2) 曲線パスの初期角度が 90° に近い移動パスセットでは、成形高さが小さいと破断、大きいとしわが生じやすい。初期角度を小さくすると移動量をより大きく取れるが、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、しわが抑制される傾向がある。
- (3) 成形に成功するには、適切な長さの工具軌道の設定、すなわち成形高さの設定が不可欠である。短すぎる工具軌道は外周部を倒せず、破断が生じる一方、長すぎ

表 1 円筒形状と角筒形状の成形実験結果の比較

成形品形状	パスセット	最小往復数	成形不良	板厚分布
円筒形状	回転	9	しわ	バスタブ
	移動	9	破断	バスタブ
角筒形状	回転	21	しわ	一定
	移動	14 / 9	しわ / 破断	バスタブ
	回転移動	10	しわ	バスタブ

る工具軌道は外周部の角度が小さくなるため、しわが発生しやすくなる。また、往復数が少ない積極的な工具軌道はしわが発生する。このため、素材の伸びに対して、ブランクの外周まで到達する十分な工具軌道の長さ、すなわち成形高さの設定は重要と考えられる。

(4) 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、角度増分や移動量を加えると、成形可能な範囲が広がる。移動量を大きくすると加工時間は短縮される一方、板厚減少は大きくなる。この結果は、角度増分や移動量を調整することで、板厚分布と加工時間を調整可能なことを示唆している。

(5) 円筒形状と角筒形状の成形を比較すると、回転パスセットによる板厚分布が、円筒ではバスタブ型になるのに対し角筒ではほぼ一定となる。また角筒形状は円筒形状よりしわが発生しやすい。移動パスセットの成形不良は、円筒では破断に限られ、角筒ではしわが発生する場合もあった。

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。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, “ロボットによるスピニング加工の研究—力制御を用いた非軸対称製品の成形—”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.1 (2006) pp.140-145.
- 2) 荒井裕彦, “リニアモータを用いた力制御スピニング加工機”, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.1 (2008) pp.49-56.
- 3) 天野富男, 田村公男, 森茂樹, “楕円錐スピニング法の開発”, 第 98 回塑性加工シンポジウムテクニスト (1985) pp.69-77.
- 4) 荒井裕彦, 藤村昭造, 岡崎功, “同期スピニング加工による非軸対称断面管の成形”, 第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集 (2005) pp. 687-688.
- 5) 杉田栄彦, 荒井裕彦, “異形断面形状を成形する同期絞りスピニング加工法の開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 767 (2012) pp. 1004-1012.
- 6) Y. Sugita and H. Arai, “Effect of pass-set shape on formability in synchronous multipass spinning”, Proc. of 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014 (2014), pp. 2373-2378.
- 7) Y. Sugita and H. Arai, “Formability in synchronous multipass spinning using simple pass set”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 217 (2015) pp. 336-344.
- 8) 葉山益次郎, 工藤洋明, 篠倉恒樹, “絞りスピニング加工のパススケジュールの研究”, 日本機械学会誌, Vol. 73, No. 614 (1970) pp. 363-370.