The Japan Society of Mechanical Engineers

日本機械学会論文集(C編)
76巻762号(2010-2)

論文 No. 09-0566

湾曲同期ダイレススピニング加工法の開発と評価*

関口明生*1, 荒井裕彦*2

Development and Evaluation of Curved Synchronous Die-Less Spinning

Akio SEKIGUCHI*3 and Hirohiko ARAI

*3 Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennohdai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8577 Japan

Products formed by metal spinning have been inherently limited to straight-axis and circular-sectional shapes. In this study, we succeeded in making curved-axis and non-axisymmetric shells by synchronizing the roller motion in the axial and radial direction with the rotation of the spindle axis, and without using forming dies. A hemi-spherical head tool and straight/inclined-shape mandrels are designed for a use of general purpose. A numerically-controlled spinning machine moves the tool along a spiral trajectory on the surface of the product. The trajectory is calculated from the desired shape considering contact with the tool. Curved cones up to 60 degree bended and curved non-axisymmetric shapes are experimentally formed from aluminum sheet. An equation is proposed to estimate the wall thickness of products, based on curved shear deformation model. It is verified that the model nearly coincides with measured thicknesses of products. Twisting distortion of the product shape is suppressed by switching direction of the spindle rotation alternately.

Key Words: Metal Spinning, Plastic Working, Numerical Control, Tool Trajectory, Formability

1. 緒　　言

スピニング加工(Metal Spinning)は，塑性加工技術のなかでもとくに特注品や試作品の低コスト生産，多品種少量生産に適した回転成形法であり，金属を材料とする軸対称シェル状製品の成形に幅広く用いられる．

近年のスピニング加工技術は，加工機の構造改良や知能化技術によって，多品種化や加工のフレキシブル化が進んでいる．たとえば，島ら(1)の「フレキシブルスピニング加工」や，荒井(2)，新藤ら(3)の提案がある．これに対して，松原(4)の逐次張出し成形における加工事例もある．これらの従来研究の長所は，

- 軸が湾曲・傾斜した形状が成形できる
- 異形断面をもつ形状が成形できる
- 板材成形において専用の成形型を必要としない
- 所望の形状が適切に与えられる

という点にある．これらを併せもったスピニング加工法を開発できれば，工業的にも有用である．

本稿では，湾曲した形状が専用型無しで成形できるスピニング加工について，加工に用いたマンドレル，工具，工具軌道算出アルゴリズムを示す．湾曲した円錐や異形断面錐の成形実験を通して，製品形状，肉厚分布，成形限界など，加工法の基本的特徴を明らかにし，肉厚分布の予測式を提案する．

2. 加工法の概要

荒井ら(5)は，加工ローラを主軸の回転に同期して半径方向に動かすことで，断面が円形でない管状製品を成形した．本研究では，これをもとにして，図1のように，主軸の回転に同期して軸方向と半径方向に加工ローラを動かすことによって主軸とは別の仮想的な湾曲軸に沿った形状が与えられるような，板材のスピニング加工法を開発する．成形中，傾いたワークのフランジ部分は主軸の回転によって揺動されるので，主軸の角度と加工ローラの位置は図2のように同期して制御される必要がある．

従来のスピニング加工には，製品の形状が工具の相対的な運動によって与えられる螺旋状の工具接触線の包絡面形状に仕上がるという特徴がみられる．このため，本加工法における工具の軌道もこれに倣って，工

* 原稿受付　2009年6月18日.
*1 学生員，筑波大学大学院システム情報工学研究科(〒305-8577 つくば市天王台1-1-1).
*2 正員，(独)産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門(〒305-8564 つくば市並木1-2-1).
E-mail: a.sekiguchi@aist.go.jp

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

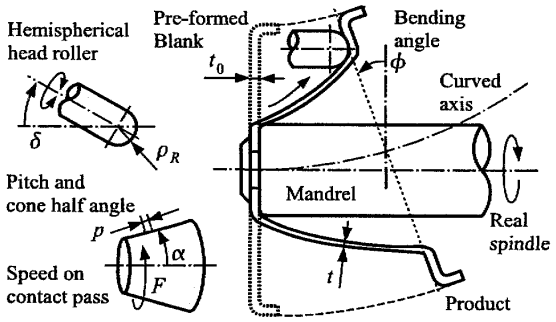


Fig. 1 Notation of curved synchronous spinning

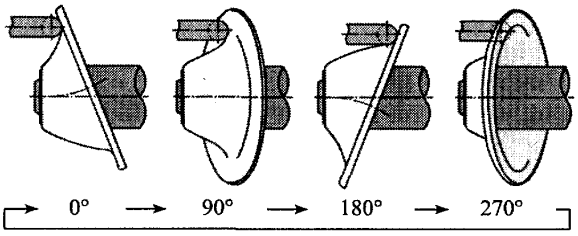


Fig. 2 Procedure of curved synchronous spinning

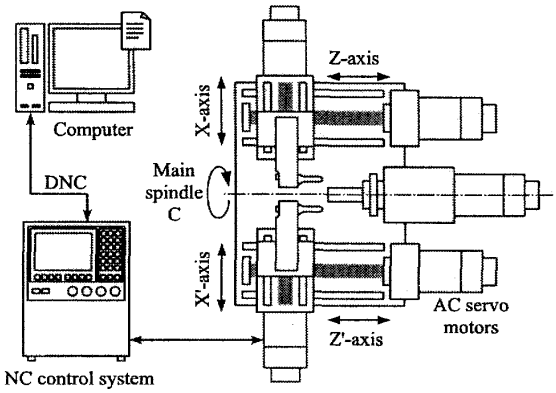
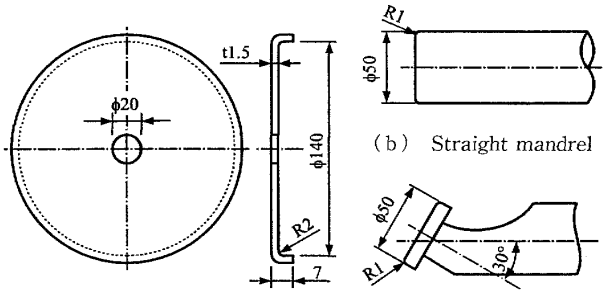


Fig. 3 NC 2-roller synchronous spinning system



(a) Pre-formed blank (b) Straight mandrel (c) Inclined mandrel

Fig. 4 Blank and mandrels

具とワークの接触点の軌道が前記の湾曲軸に沿って螺旋状に進行するものとした．湾曲軸に対する螺旋軌道を実際の主軸の回転と軸方向と半径方向の工具の運動に変換すれば，機械における工具軌道が得られる．

また，成形中にフランジ部分にしわが発生することは，加工力が不均一になるなど成形上好ましくない．設定した形状通りに加工するには，ワークのフランジ部の平面が成形完了まで保たれる必要があるので，素板の縁を曲げてフランジ部の剛性を高め，しわを抑制する．

3. 加工装置と予備実験

3・1 2ローラ同期スピニング加工機 成形には図3に示す2ローラ同期スピニング加工機のうち，片側の1ローラと主軸を用いる．この加工機は，ブランク(素板)とマンドレル(成形型)を取り付ける回転軸1つとローラ位置決めのための XY テーブル2組の計5軸からなる．

各軸の位置・速度指令は，NCコードのファイルとしてパソコンに置かれ，制御盤のDNC機能により加工中に順次読み込まれる．本稿では1回転あたりのデータ点数を，円形断面の場合60 pts/rev，異形断面の場合120 pts/revとした．データ点間は機械座標で直線補間される．

3・2 ブランク・マンドレル・潤滑など ブランクは図4(a)に示す純アルミニウム板(A1050P-H24，公称板厚1.5 mm)で，あらかじめ単純絞りスピニング加工[6]により縁部を曲げたものを用いる．

マンドレルは先端部の直径が50 mmで，直線形状と，先端が30°傾斜した形状を用意したが，物理的制約のない範囲では前者を用いた［図4(b)，(c)］．

加工前には汎用潤滑剤CRC5-56を工具とブランクに噴霧した．1回転あたりの送りピッチは円錐あるいは異形断面錐の最急勾配方向に $p=0.2$ mm/revに設定し，加工中は湾曲軸上で一定とした．どのような工具接触条件であっても剝離を生じにくい工具接触点の相対速度 F はおよそ8 000 mm/minであった．

3・3 球頭状工具 成形実験に取り組む前に，スピニング加工で一般的に用いられる円盤状の加工ローラを用いて，曲げ角が $\phi=10°$ 程度の湾曲円錐形状を試作した．この結果，破断などの成形不良は生じず，加工ローラが接触した製品の壁面には光沢が表れて，加工には成功した．しかし，傾き角が大きくなるにつれ，ワークと加工ローラの接触部の速度差によってフランジに擦れ痕が発生した．また，解析的な工具形状の補正が比較的難しいので，あらかじめ定められた製品の形状から工具軌道を導出することが困難である．

そこで，図1のような，先端が球頭状の加工ローラ[7]を新たに設計し，加工部以外の干渉を防ぐとともに，正しい工具軌道が与えられるように工夫した．材

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

質は工具鋼(SKD11, 焼入れ硬さ HRC60)で，先端球面をバフ仕上げし，根元部分を軸受けによって自由回転するよう支持した．工具先端部の丸み半径 ρ_R は 8 mm で，主軸に対する取付け角 δ は，加工する形状によって 0° あるいは 45° としたが，湾曲した形状を成形する上では物理的に後者のほうが都合がよかった．

3・4 工具パスプログラミング 湾曲スピニング加工の実施にあたり，目的形状に合った工具軌道，すなわち各軸の位置指令を適切に定めることが肝要である．そこで，図5のような演算手順で，製品形状をもとに工具パスを NC 指令値として出力するプログラムを作成した．設定された工具接触点の速度 F あるいは製品形状に対する工具速度をもとにして，加工所要時間の推定値も同時に算出される．

この方法では，成形品の形状や工具軌道の条件を，送りの関数 $f_{SF}(s)$，湾曲軸の関数 $f_{CS}(s_{SF})$，断面形状の関数 $f_{XS}(s_{SF}, t_{SF})$，という3つの関数と定数パラメータで表わす．例として，頂部と基部の半径が r_0, r_1 で円錐半角が α の円錐台の軸が，仮想的な円弧状の湾曲軸に沿って曲げ角 ϕ だけ曲げられた形状を N 回転の螺旋で表現する場合，それぞれの関数は以下のようになる．演算結果の一例を図6に示す．

$$\begin{bmatrix} s_{SF} \\ t_{SF} \end{bmatrix} = f_{SF}(s) = \begin{bmatrix} s \\ 2\pi N_s \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\begin{bmatrix} z_{CS} \\ r_{CS} \\ \phi_{CS} \end{bmatrix} = f_{CS}(s_{SF}) = \begin{bmatrix} \dfrac{r_1 - r_0)}{\phi \tan\alpha}\sin(\phi s_{SF}) \\ \dfrac{(r_1 - r_0)}{\phi \tan\alpha}\{1-\cos(\phi s_{SF})\} \\ \phi s_{SF} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\begin{bmatrix} r_{XS} \\ \theta_{XS} \end{bmatrix} = f_{XS}(s_{SF}, t_{SF}) = \begin{bmatrix} r_0 + (r_1 - r_0)s_{SF} \\ t_{SF} \end{bmatrix} \quad \cdots(3)$$

送りの関数 $f_{SF}(s)$ は，加工の進行度 s に対する正規化された軸送り s_{SF} と円周送り t_{SF} の関係を表現する．この関数を工夫することで，回転方向を動的に切り替えたり，加工時間を低減するために湾曲軸方向の送りピッチを可変にしたりするなどの表現が可能である．湾曲軸の関数 $f_{CS}(s_{SF})$ は，軸送り s_{SF} に対する湾曲軸の形状［軸方向位置 z_{CS}，半径方向位置 r_{CS}，接触点の位置する断面の傾き $\phi_{CS} = \tan^{-1}(dr_{CS}/dz_{CS})$］を表す関数で，直線形状や円弧形状など，自由な形状を表現できる．断面形状の関数 $f_{XS}(s_{SF}, t_{SF})$ は，軸送り s_{SF} と円周送り t_{SF} に対して，湾曲軸に垂直で湾曲軸上の点を原点とする，接触点の位置する面上の形状(面内の半径方向の位置 r_{XS} と回転角 θ_{XS})の関係を表す関数である．この関数により，円から多角形に変化する断面形状の表現や，周方向の接触点の配分の調整ができる．

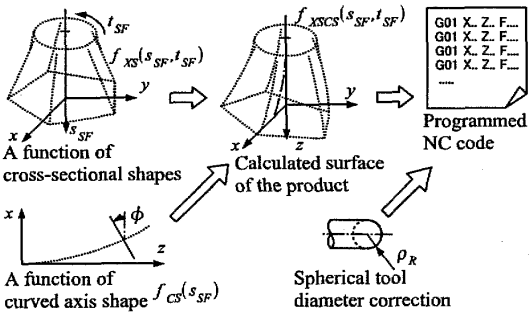


Fig. 5 Procedure of the tool pass programming

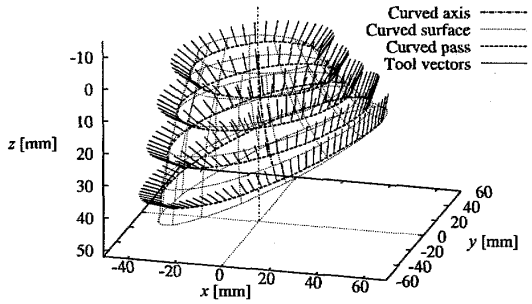


Fig. 6 An example of a tool pass along the surface of the curved axis product

以上により，面に対する法線ベクトルを演算しながら，加工進行度 s を0から1まで繰り返し演算すれば，工具とワークの接触線が製品面上で湾曲軸に対して螺旋を描くような工具軌道を求めることができる．

3・5 ブランクの縁曲げによる効果 板材を成形型を用いず加工して，フランジ部分にしわを生ぜずに所望の製品形状に成形するための条件[1][8]は，成形中にフランジ部分の幅(剛性)が十分にある場合や，送りピッチが小さい場合であることが知られている．したがって，素板の縁を曲げてスピニング加工することにすれば，フランジ部分の剛性が保たれ，正常に成形できるだろう．

この縁曲げによる効果を確かめるために，円錐半角が $\alpha = 20 \sim 80°$ の単純な直線の円錐形状の成形を試みた．この結果，成形が完了するまでフランジは平面と外径を保ち，浅い形状のためスプリングバックを生じやすい $\alpha = 80°$ を除いて，ほぼ設定形状通りの外形状が得られた．また，成形品の側面の肉厚 t は，素板板厚 t_0 と半角 α に対する肉厚の理論式として知られる sine 則 $t = t_0 \sin\alpha$ に従った．

4. 成 形 実 験

4・1 湾曲円錐形状の成形 加工法の評価のため，

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

半角 α の円錐台の軸が円弧状の湾曲軸に沿って曲げ角 ϕ だけ湾曲した湾曲円錐形状を，以上の加工装置と加工条件のもとで成形した．

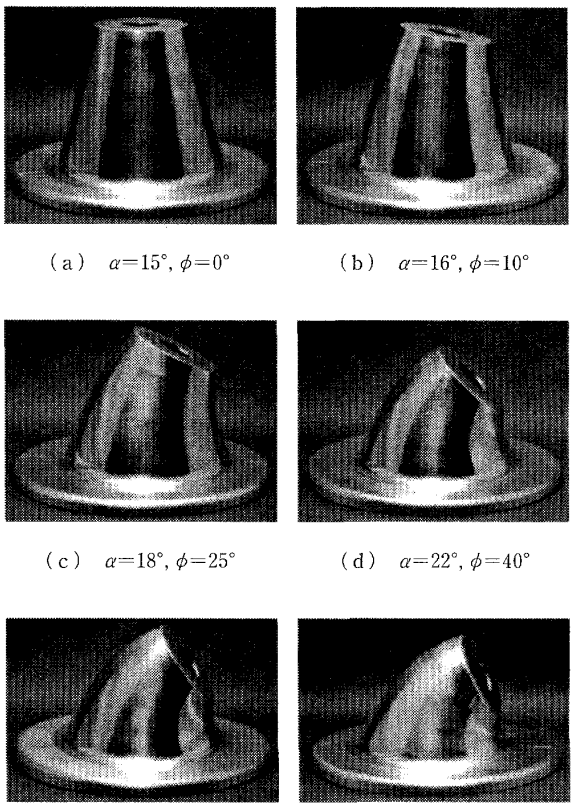
製品の外観を図7に示す．いずれの形状においても，球頭状工具によってなぞらえた部分には光沢が出て，表面の擦り傷やローラ送り痕による目立った凹凸は見られなかった．実験のため，工具接触点の移動速度 F をやや保守的 ($F=8\,000$ mm/min) に設定したので，成形にはそれぞれ12分程度を要した．半角 α にもよるが，図7中(d)から(f)の形状のように曲げ角が大きくなると，ワークが直線形状のマンドレル［図4(b)］に干渉し成形できない．このため，これらの形状の成形には初期傾斜のあるマンドレル［図4(c)］を用いたが，干渉しないための制約から，設定できる最大曲げ角は60°であった．

4・2 成形不良の形態 湾曲円錐形状の成形を，さまざまな円錐半角 α と曲げ角 ϕ において試みる上で発生した成形不良の例を図8に示す．成形不良は主に破断と剝離であった．加工条件は4・1節および4・5節と同様であるが，一連の加工中にマンドレルを取り換えるための原点出しにより位置誤差があることや，素板の取付け方向などが毎回確実に同じ向きでないことから，破断については同じ円錐半角と曲げ角であっても状況の異なる場合があった．しかし，破断には一定の傾向が見られた．

図8(a)は円錐上部での破断で，円錐半径 α が小さい場合に多くみられた．ほとんどは曲げの内外に関係なく，円周方向かつ素板の圧延された方向に発生した．成形可能な円錐半角はおもにこの破断によって律せられた．このような破断は，ワークの側壁が，減肉しにくい円錐の頂部とフランジ面に加わる加工力により引き伸ばされて発生している．

図8(b)は成形中の材料表面の剝離と，剝離の進行に伴なう破断である．剝離は，工具の加工部が棒状工具に垂直な方向に接して工具が回転しない場合や，潤滑不良など接触条件が悪い場合，工具接触点の移動速度が速い場合に発生した．ただし，円錐半角が大きいなど壁部の肉厚に余裕があると破断には至らず，剝離と剝離片の転写により表面が荒れて成形された．

図8(c)は成形終了間近での頂部の破断である．この破断は，たとえばマンドレルを取り換える際の工具の軌道を算出する原点の位置誤差により，あらかじめ減肉して成形されたワーク支持部付近の壁部に対して，工具の加工力が間接的に引張力として作用することで，破断を引き起こしたものと考えられる．したがって，専用の成形型を用いずに目的形状を得るには，

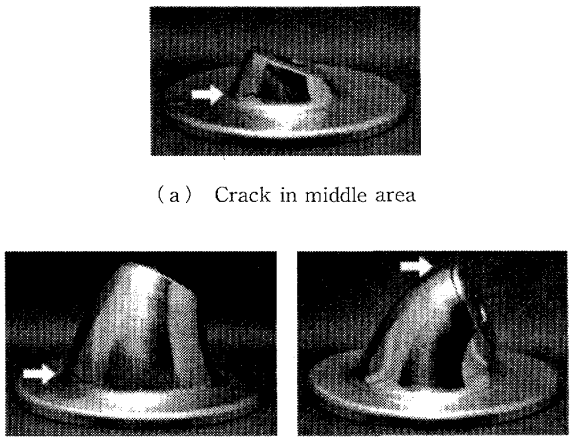


(a) $\alpha=15°, \phi=0°$ (b) $\alpha=16°, \phi=10°$

(c) $\alpha=18°, \phi=25°$ (d) $\alpha=22°, \phi=40°$

(e) $\alpha=22°, \phi=50°$ (f) $\alpha=22°, \phi=60°$

Fig. 7 Cone shells in each bending angle



(a) Crack in middle area

(b) Peeling and crack (c) Crack in top

Fig. 8 Failures in forming

成形品全体が成形型で支えられないことから，加工部以外の部分にも力が及ぶことを考慮する必要がある．

4・3 製品形状 工具取付角を $\delta=45°$ として成形した，円錐半角が $\alpha=30°$ で曲げ角が $\phi=20°$ の湾曲円錐製品の外形状を，レーザ形状測定器により測定した結果を図9に示す．グラフ中の点線は，工具軌道算出の際に設定した目的形状である．加工時間は約8分を要した．現在知られている湾曲シェルの逐次成形

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

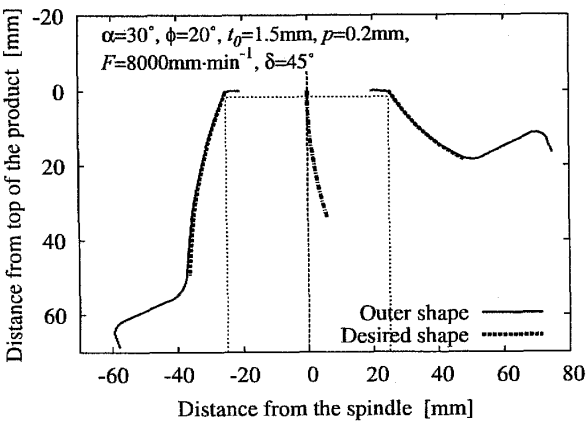


Fig. 9 Profile of a curved cone

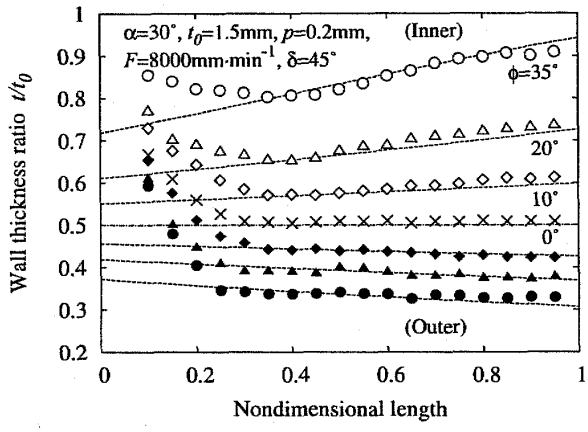


Fig. 10 Wall thickness distribution along outer and inner lines of bending

法[4]は，目的の湾曲形状を得るための工具軌道の設定法が明らかでないという難点があったが，本加工法ではほぼ設定形状通りの形状が得られた．曲げ部外側に生じた誤差は，ローラの位置決め誤差よりも，ワーク被加工部におけるスプリングバックが強く影響していると考えられる．

4・4 肉厚分布と変形モデル 円錐半角 $\alpha=30°$ で曲げ角が $\phi=0, 10, 20, 35°$ の製品において，曲げ部内側と外側における肉厚分布を測定し，円錐の頭部を0，基部を1とする無次元長さで整理した結果を図10に示す．測定には両球面マイクロメータを用いた．$\phi=0°$ の直線形状では，肉厚比 t/t_0 は sine 則に従って0.5となるが，曲げ角 ϕ が大きくなると，フランジに対して曲げ部内側で肉厚減少が緩和，外側では肉厚減少が促進する傾向にある．

ところで，あらかじめブランク背面に同心円・放射状の網模様を薄く罫書いて加工を行ったところ，円周方向の材料流動は目立たず，フランジ部も変形や偏心することなく成形されている様子が確認できた．したがって，素材の材料は湾曲軸に対する法平面の列に沿って投影される位置に，軸方向のみの流動をしているものと考えられる．実際の変形過程は単純ではないが，この様子を図11のような，曲率半径が R_0 の湾曲軸に沿った円輪状のせん断によるものであるとモデル化する．材料の変形が湾曲軸の方向のみに限られていると仮定すると，図11中のワーク壁部の微小片における肉厚比 t/t_0 は，軸上の微小送り長さ $R_0 d\phi$ で右辺の分母分子を割って，以下のように表すことができる．

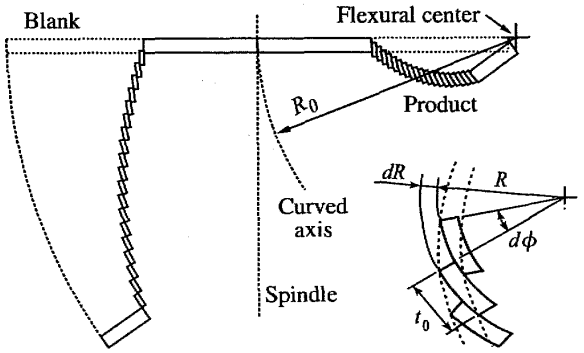


Fig. 11 Curved shear forming around a flexual center

$$\frac{t}{t_0}=\frac{dR}{\sqrt{(Rd\phi)^2+dR^2}}=\frac{\tan\alpha}{\sqrt{(R/R_0)^2+\tan^2\alpha}} \cdots (4)$$

湾曲軸の曲率半径に対する湾曲中心から半径の比を $\eta=R/R_0$ とすると，被加工部全域について，従来の sine 則に相当する，湾曲円錐の肉厚予測式は以下のように解釈できる．

$$t=t_0\left[1+\left(\frac{\eta}{\tan\alpha}\right)^2\right]^{-1/2} \cdots\cdots (5)$$

グラフ中の点線はこの式による計算値である．この式によれば，被加工部の肉厚 t は素板板厚 t_0 を超えられないが，η によりフランジに対して傾斜の厳しい部分の肉厚減少が抑制されることがわかり，その肉厚が定量的に予測できるという特徴がみられる．

4・5 曲げ角による成形限界 各円錐半角 α と曲げ角 ϕ に対して破断せずに成形が可能であるか，実験的に求めた結果を図12に示す．黒塗りの点が破断した条件である．同じ半角 α では，曲げ角 ϕ が大きくなるほど肉厚の最小値が小さくなるので，破断限界は傾向としてこれに従うと考えるのは妥当であろう．右上がりの線は式(5)から求めた最小肉厚比 $t/t_0|_{min}$ の計算値である．直線形状のマンドレルの場合は $t/t_0|_{min}=0.235$（単純な肉厚方向のひずみで $\varepsilon_t=1.45$ に相当）が成形限界を示しているようであったが，初期傾向のあるマンドレルではこれに従わなかった．また，今回

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

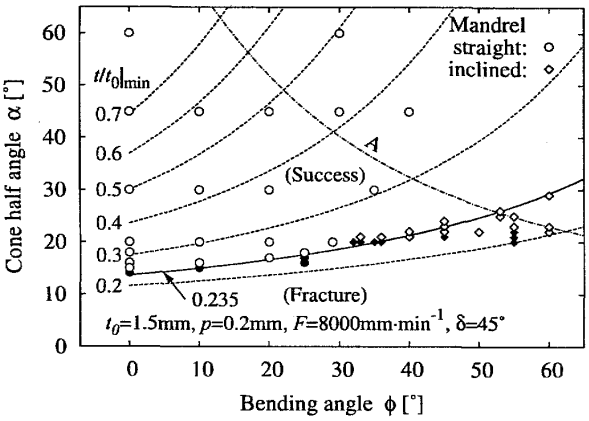
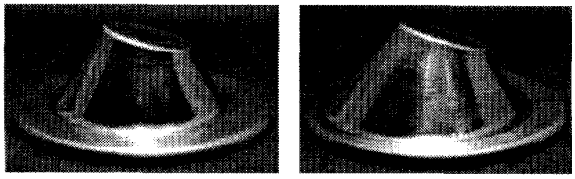


Fig. 12 Forming results in each condition



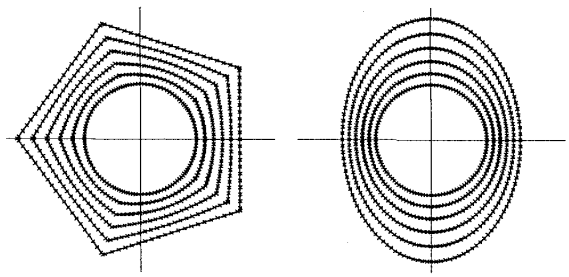
(a) Centered shape (b) Eccentric shape

Fig. 13 Inclined cone shells

の形状設定では，グラフ中のA線を大きく越えるとηが負になる区間が表れて被成形部分が工具側に持ち上がることになるので，曲げ部内側の既加工部が手前にだれるか，フランジが起き上がらずにやや歪んだ．

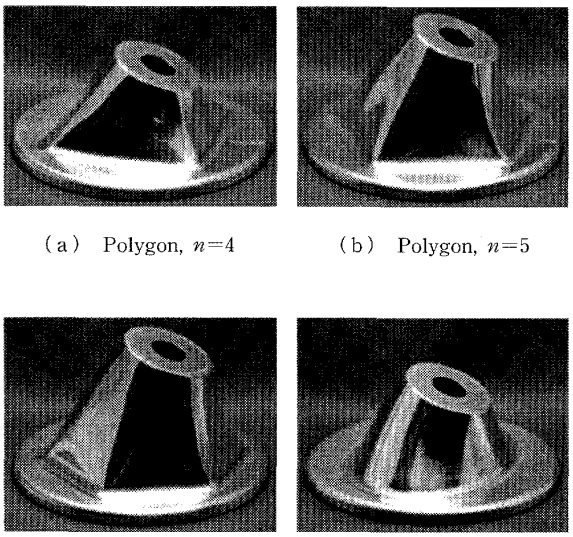
4・6 非円弧軸形状の成形 湾曲した円錐形状は成形法の基本特性を考察する上でおそらく重要であるが，実用上は加工開始部と終了部の断面形状と位置関係・傾きなどから形状を指定する場合が多いと予想される．図13は，離れて傾斜した2つの円を外形状が直線となるように結んだ形状である．2つの円の位置関係によっては図13(b)のようなフランジに対する偏心が発生した．現在のところこの関係については十分明らかでないが，図11に示した変形モデルにおいて，湾曲軸形状が円弧でない場合，すなわち曲率中心が自由に移動する場合に相当するものと予想できる．

4・7 湾曲異形断面形状の成形 前述した工具パスプログラミング方法において，断面形状の関数$f_{XS}(s_{SF}, t_{SF})$を加工製品に適した形状に変えると，多角形，楕円形，偏心といった異形断面形状を持つとともに湾曲したより自由な形状を成形できる．湾曲異形断面形状の評価実験として，1回転あたりのデータ点を120 pts/revとし，図14のように断面が直径50 mmの円形から外接円直径110 mmの正n角形(n=4, 5, 6)に変化する形状と，外接円直径110 mmの楕円形(扁平率f=0.27)に変化する形状それぞれの成形を試みた．ただし，最急勾配方向の半角αを20°，湾曲軸を曲げ角ϕ=20°の円弧とし，製品に対する工具の送り速度を10 000 mm/minとした．



(a) Polygon, n=5 (b) Ellipse, f=0.27

Fig. 14 Sectional shapes and contact point mappings



(a) Polygon, n=4 (b) Polygon, n=5

(c) Polygon, n=6 (d) Ellipse, f=0.27

Fig. 15 Curved non-axisymmetric products

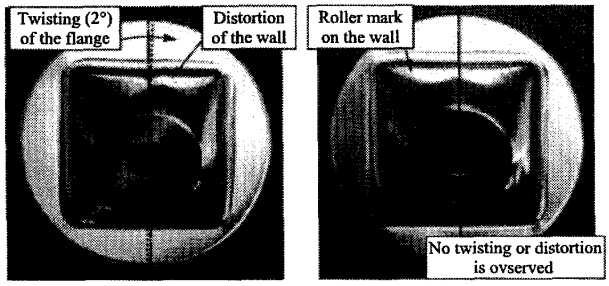
製品の外観を図15に示す．所要成形時間は，n=4の場合で約8分，最も送り長さの長いn=6の場合で約12分であった．この場合も，製品の表面には光沢が出て，ほぼ設定したとおりの断面形状が得られた．

しかし，図16(a)に示すように，特にn=4の場合に，曲げ部外側の壁面に形状不良が生じた．異形断面形状に限らず，加工開始時と終了時のフランジ部に基準線を罫書いたところ，加工終了時のフランジ部は元の取付け角に対して，最大で10°程度ねじれており，形状によっては曲げ面と垂直な方向にも最大で8 mm程度偏心していた．発生するねじれの角度には再現性がみられるが，成形する断面の形状や軸の形状によっても変化するために，定量的な予測が難しい．

4・8 フランジねじれの抑制 フランジ部のねじれや偏心が形状不良の原因になっているものと考え，

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers



(a) Unidirectional (unswitched) pass　(b) Bidirectionally switched pass

Fig. 16 Top views of a same product maked different types of feeding (Polygon, $n=4$)

これを抑制する工具軌道について検討した．ねじれの発生は，工具が1方向の螺旋によって逐次成形を行うことによるので，加工中に工具の回転方向を切り替えることにした．

製品を図16(b)に示す．工具は6回転半ごとに，回転方向を反転するものとした．この結果，製品の表面には回転方向の変化によるフィードマークが避けられなかったが，フランジのねじれや偏心を抑制できるとともに，ねじれによる形状不良を解消できた．

5. 結　言

従来のスピニング加工法では成形が困難であった湾曲異形断面シェル状製品が成形できる，湾曲同期ダイレススピニング加工法を開発した．加工法を実施する上で必要な，加工製品の表現法，成形のための工具，工具パスプログラミング法を示した．

板材の縁部を強化し，主軸の回転に同期して加工ローラを軸方向・半径方向に動かすことで，さまざまな形状がほぼ設定した形状通りに成形できた．軸が円弧状に湾曲した湾曲円錐形状についての成形実験から，成形不良の形態，製品形状，肉厚分布，成形限界を評価して加工法自体の特性を調べるとともに，変形モデルを提案して肉厚の予測式を導出した．フランジ部に生じるねじれを抑制するための工具軌道を検討し，その効果を確かめた．

湾曲同期ダイレススピニング加工における課題は，スプリングバックの抑制や，フランジ部ねじれ・偏心量の予測のための，変形解析と工具軌道の補正である．また，成形所要時間を短縮するためには，潤滑の工夫などにより工具の接触状態を向上して，工具速度を高めても剥離を抑制できるようにする必要がある．

文　献

(1) Shima, S., Inoue, A. and Kotera, H., Flexible Spin-Forming (in Japanese), *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 42, No. 489 (2001), pp. 32-37.

(2) Arai, H., Robotic Metal Spinning—Forming Non-axisymmetric Products Using Force Control—, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 24, No. 1 (2006), pp. 140-145.

(3) Shindo, K., Ishigaki, K., Kato, K. and Irie, T., Development of New Tube Spinning Technology (Spinning Technology for Decentered or Inclined Shape, Report 1) (in Japanese), *The 51st Proceedings of the Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity*, (1999), pp. 173-174.

(4) Matsubara, S., Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal (No. 5)—A Study of Forming System with Numerical Control Machine, Report 15—(in Japanese), *The 46th Proceedings of the Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity*, (1995), pp. 33-34.

(5) Arai, H., Fujimura, S. and Okazaki, I., Forming of Non-axisymmetrical Sectioned Tube with Synchronous Spinning (in Japanese), *The 56th Proceedings of the Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity*, (2005), pp. 687-688.

(6) Hayama, M. and Murota, T., Study of Metal Spinning (1st Report)—Cylindrical shapes—, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 29, No. 5 (1963), pp. 31-38.

(7) Matsubara, S., Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Head Tool—A Study of a Numerical Control Forming System II—, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 35, No. 406 (1994), pp. 1311-1316.

(8) Kawai, K., Yang, L.-N. and Kudo, H., A Flexible Shear Spinning of Truncated Conical Shells with a General-Purpose Mandrel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113 (2001), pp. 28-33.

NII-Electronic Library Service