ボールローラによるフレキシブルな
逐次張出し成形に関する研究*井 関 日出男^{*1}, 加 藤 和 典^{*1}, 坂 本 誠一郎^{*2}Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging
using a Path-Controlled Spherical Roller

Hideo ISEKI, Kazunori KATO and Seiichirou SAKAMOTO

A flexible and incremental sheet metal bulging machine using a path-controlled spherical roller has been developed for the small-batch manufacture of nonsymmetrical shallow shells. The computer operations-controlled bulging machine performed a wide range of sheet metal shaping on complex shapes, for example, pyramidal shells, shells of the frustum of a pyramid, shallow pans and embossed panels. In order to predict the forming limit of incremental shaping, a new incremental bulging test by a ball punch was performed on an annealed aluminum sheet, and the experimental results showed that fracture occurred when the thickness strain reached a constant value. An approximate calculation method for the maximum bulging height of the shell was proposed, using this fracture limit and a geometrical deformation model. The predictions for the shell of the frustum of a quadrangular pyramid and the quadrangular pyramidal shell were in reasonably good agreement with experimental values for the annealed aluminum sheet.

Key Words: Nontraditional Machining, Plastic Forming, Formability, Incremental Forming, Flexible Forming, Fracture Limit Diagram, Ductile Fracture, Fracture Criterion

1. 結 言

最近の消費者ニーズの傾向が個性化, 希少化, 高品質化を指向するに伴い, 広範囲に多様化した製品が求められており, 板金プレス加工においても多品種少量生産に対応できるフレキシブルな生産システムや成形技術が要請されている。少品種大量生産に適した成形法として発展している板金プレス加工は, 金型の設計, 製作, 修正およびトライアルに多大な時間とコストを必要とすることから, 多品種少量生産への対応は困難とされてきた。しかしながら, パンチやダイスの曲面形状を離散化してフレキシブルな集合金型を創成する試みもこれまでに行われており, 中島の針金束⁽¹⁾, 中島の標準工具の組立型⁽²⁾, Hardt ら⁽³⁾や著者ら⁽⁴⁾の単位ブロック工具型, 北野⁽⁵⁾, 西岡ら⁽⁶⁾や渡辺⁽⁷⁾らのユニバーサル多点プレス型の研究が挙げられる。一方, 平面形状の薄板を部分的に逐次加工して曲面形状を成形する試みもこれまでに行われており, 回転対称形状についてはストレッチローラなどのスピニング⁽⁸⁾⁽⁹⁾,

Mason ら⁽¹⁰⁾や古川ら⁽¹¹⁾のボールローラによる転動加工, 北澤らの棒状工具による揺動回転成形⁽¹²⁾などがあり, 非回転曲面形状については近藤らのショットピーニング成形⁽¹³⁾, 局部加熱成形⁽¹⁴⁾や著者らのボールローラによる逐次張出し成形⁽¹⁵⁾などが挙げられる。また, これらの成形法の組合せや複合化を行い, 両者の長所を取入れたフレキシブルな逐次成形技術の開発⁽¹⁶⁾にも大きな期待が寄せられており, さらに薄板の逐次成形における変形様式, 成形可能な曲面形状や成形限界についての研究も必要になってきている。

ところで, パンチ工具としてボールローラを用いた薄板の張出し成形法は, (1)パンチ工具の移動経路をNC工作機械やロボット技術で制御して三次元成形曲面を創成できること, (2)レーザや放電加工により周辺固定部のダイス孔形状を製作できること, (3)集合金型をバックアップ曲面ダイスとして利用できること, (4)タレットパンチのようにボールローラの形状を変更できることなど, 既存の加工技術の集積システムとして構築可能であり, フレキシブルな薄板成形技術として将来有望と思われる。しかしながら, 複雑な曲面形状シェルを対象とした, ボールローラによるフレキシブルな逐次張出し成形に関する基礎的研究はほとんど行われていないようである。

* 平成3年5月11日 平成3年度 塑性加工春季講演会において講演, 原稿受付 平成4年3月27日。

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部機械工学科(●152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 全日本空輸(株)(●286 成田市加良部5-12)。

本報ではこれらの研究の手始めとして、コンピュータ制御の逐次張出し成形機を試作し、基本的なダイス孔形からのアルミニウム薄板の面外張出しを行い、成形の多様性やひずみ分布と成形限界に及ぼすボールローラの移動経路の影響を実験的に検討した。さらにボール接触を受ける金属薄板の破断限界と幾何学的変形モデルを用いて薄板の最大張出し形状の算出法の提示を行った。

2. ボールローラによる逐次張出し成形装置の試作

2・1 成形装置の概要 ボールローラによるフレキシブルな逐次張出し成形法の概略を図1に示す。回転可能な鋼球(ボールローラ)をパンチ工具とし、それに水平面内(x - y 面)と鉛直方向(z 軸)の動きを与え、ダイスと支持板で周辺を固定された薄板に部分的に逐次張出し変形を付与させている。前述したようにこの成形法は、NC工作機械、ロボット技術やタレットパンチングマシンを適用することも可能であるが、本研究では図2の写真に示すような安価で簡便な逐次張出し成形装置を試作した。フレームに x - y 移動装置を固定し、そのテーブル上にダイス、支持板および成形する薄板を保持し、可動させることによって、ボールローラが x - y 面内で相対的に移動するようになっている。 z 軸方向の移動には、ストロークを制御できる油圧アクチュエータを使用し、工具の相対的な三軸方向の動きをコンピュータで制御して逐次成形を可能にした。

2・2 成形装置の駆動と制御および性能 x - y テーブルの駆動機構の構成要素は、コンピュータ、コントローラ、ドライバ、サーボモータ、エンコーダおよび移動テーブルであり、 z 軸方向の駆動機構は、油圧ポンプ、アキュムレータ、サーボバルブ、油圧アクチ

ュエータ、デジタル変位測定器、D/A変換器およびコンピュータからなっている。

ボールローラの相対移動に市販の x - y テーブル(ストローク 200 mm×300 mm)と自作のアクチュエータ(ストローク 100 mm)を使用し、その移動速度は約 30 mm/sである。水平方向と鉛直方向にそれぞれ ± 0.025 mm(負荷荷重 0.5 kN)、 ± 0.2 mm(負荷荷重 2 kN)の位置決め精度となっている。

制御プログラムには、支持棒とダイスの接触破損を防ぐコードを内蔵しており、ボールローラの移動経路の変更はサブルーチンプログラムによって容易に行えるようになっている。また、成形状態を把握するためにボールローラの移動軌跡をディスプレイに表示できるようになっている。

3. 逐次張出し成形実験

3・1 実験条件 ボールローラの直径 $2R_b$ は 10 mmであり、薄板固定用の孔形状は正方形(31.4 mm×31.4 mm)、円形(31.4 mm)、菱形(41.6 mm×28.6 mm)およびだ円形(41.4 mm×26.8 mm)である。孔縁の肩半径 R_d は 3~3.3 mmである。ボールローラと薄板の間には市販のさび止め潤滑剤を使用し、ダイスおよび支持板との接触面はアセトンで脱脂し、無潤滑状態にしてある。実験には板厚 $t_0=0.3$ mmのアルミニウム焼鈍板を使用した。引っ張り試験による応力-ひずみ曲線を実験式 $\sigma=F\epsilon^n$ にあてはめて求めた塑性係数 F は 164 MPa、ひずみ硬化指数 n は 0.26であった。Lankford値は $r_0=0.74$ 、 $r_{45}=0.96$ 、 $r_{90}=0.77$ であったが、逐次張出し成形に及ぼす塑性異方性の影響はあまり大きくないようである。

3・2 成形形状の多様性 一様高さのすい台形状

図1 ボールローラによる逐次張出し成形法

図2 ボールローラによる逐次張出し成形装置

に張出しを行った場合の成形品の例を図3に示す。成形品の外側表面は梨地状になるが、ボールローラと接触した内側表面はパニング効果によって図4のような光沢面になっている。製品を反転して外側表面を再成形することができれば、寸法精度の向上と表面状態の高品質化を期待できるのであるが、シェルの剛性強化やローラの経路指定などのかなり難しい問題も残っているようである。すい台形状にあらかじめ成形した後、さらに成形を行い、段付き形状にした成形品の例を図5に示す。段付き製品を総形金型で成形するにはかなりの経験と時間を必要とするが、移動ピッチや表面精度にもよるが、およそ15分間で成形できている。周辺部から中心に向かって、順次張出し高さが大きくなる移動経路を採用して成形したすい状およびドーム状の成形品の例を図6に示す。ダイス孔形と異なるすい台形状として、正方形のダイス孔形から長方形や円形のすい台形状を、また円形のダイス孔形から三角形や星形のすい台形状を張出した例を図7に示す。ダイス孔とすい台の間の部分に少したわみが生じるが、シェルの形状精度があまり問題とならない場合や成形ブ

ランクを反転し、支え工具やボール径の小さい仕上げローラを用いて修正加工できる場合には、すい台の底面形状にもかなりのフレキシブル性を期待できる。図8のように成形品の表面にボールローラの跡を積極的に残すことにより、表面模様とすることや曲げ剛性の向上が可能であり、装飾性の高い製品やエンボス加工品に適用できそうである。

3・3 成形品のひずみ分布 逐次張出しによる成形品の板厚分布は形状やボールローラの移動経路によって変化する。予備実験の結果を考慮し、基本的な形状として四角すい台と四角すいを取上げ、また移動経路として、四角すい台の場合には正方形と渦巻状経路を、四角すいの場合には縮小正方形経路を採用した。図9に移動経路、座標系、各方向のピッチ p および縮小ピッチ δ を示す。実験では x 軸に薄板の圧延方向を一致させている。

ひずみ測定には格子法(#1mm)を用いており、張出し形状がおおむね対称的に成形されていることや表面のせん断変形があまり大きくないことを考慮して、伸びひずみには変形前後の格子の長さから算出した対

(a) 正方形

(b) ひし形

(c) だ円形

図3 すい台形状の成形例

図4 ボールローラとの接触面

(a) 正方形

(b) ひし形

(c) だ円形

(d) オイルパン形

図5 段付き形状の成形例

(a) 正方形

(b) ひし形

(c) だ円形

(d) 円形ドーム

図6 すい状およびドーム状の成形例

数ひずみ ε_x , ε_y を, せん断ひずみにはラジアン表示のせん断角 θ_s を, また板厚方向ひずみ ε_z には伸びひずみの和を採用し, ひずみ分布を近似的に表示した。

3・3・1 四角すい台形状 ボール中心の軌跡である底面の辺長 $2l_0$ を 20 mm とし, ボールの張出し高さ h を 6.0 mm にしたときの正方形経路($p_x=0.5$ mm)と渦巻状経路($p_x=p_y=0.2$ mm, $p_z=0.5$ mm)による x 軸上のひずみ分布を図 10(a), (b) に示す。正方形および渦巻状経路において z 軸方向ピッチ p_z ($=0.5$ mm) が小さいときには x 軸上の変形はおおむね平面ひずみ状態になっているようである。移動経路が一定方向のためせん断変形が生じているが, 一周ごとに逆方向に移動させれば, せん断変形の影響はかなり小

さくになると考えられる。図 10(b) の渦巻状経路による四角すい台の中央部ではほとんど変形が生じていなかったため, p_z を大きくしたところ($p_z=h=7.5$ mm), 図 10(c) に示すような x 軸上のひずみ分布を得た。なお, これらの対角線上のひずみ分布はおおむね等二軸の伸びひずみ状態で, x 軸上の ε_x の分布に似ている測定結果を得たが, 紙面の都合上省略した。

3・3・2 四角すい形状 [図 6(a) 参照] 初期辺長 $2l_0$ を 20 mm, p_z を 0.5 mm とし, 破断が生じる前に正方形経路の縮小ピッチ $\delta=1$ mm を与え, $h=17.5$ mm まで成形した四角すい形状の x 軸上のひずみ分布を図 11 に示す。半辺長 l_0 を段階的に縮小した正四角すい台($l_0-\delta$)のひずみ分布を繰返し加え合せたよ

図 7 孔と異なるすい台形状の成形例

図 8 模様付けをした成形品

図 9 ボールローラの移動経路

 図 10 四角すい台の x 軸上のひずみ分布

うなひずみ状態になっている。

4. 四角すい台および四角すい形状の成形限界

4.1 逐次変形の破断限界 薄板のプレス成形においては、破断(変形)限界図を用いて製品が成形可能かどうかを検討されることが多い。またその平面ひずみ状態の破断ひずみ ϵ_{PB} はひずみ硬化指数程度になることが知られている。図 10(a), (b)の x 軸上の平面ひずみの値は $n=0.26$ よりかなり大きくなっており、逐次成形の破断限界図は従来のものと異なることが予想される。そこで、図 12 に示すように、正方形ダイスを用いて一方向または直交する二方向にボールローラを移動させて張出し破壊を生じさせ、比較的容易に測定できる中央部分の主ひずみ ϵ_1 , ϵ_2 を採用して得られた破断限界図を図 13 に示す。試験片の圧延方向と x 軸のなす角 θ_u を 0° , 45° および 90° に変えて実験を行い、結果をプロットしたところほぼ $\epsilon_1 + \epsilon_2 = \text{一定}$ となる直線関係が得られた。これは板厚ひずみ ϵ_t が一定値に達すると破断を生じる可能性があることを意味しており、この実験に用いたアルミニウム板の一定値 ϵ_{tB} はおよそ -0.7 になっていた。

4.2 幾何学的変形モデルによる最大張出し高さの算出法 ボールローラによる正四角すい台の張出し成形において、成形限界を決める破断はまず対角線上のダイス孔角部で起こり、続いてダイス孔の直辺部付近に生じる。破断限界図と数値シミュレーションから成形限界を求めることは現時点ではかなり難しいと考えられるので、ダイス孔角部と直辺部での破断はほぼ同時に生じるものとして、 x 軸上のひずみ分布から最

 図 11 四角すいの x 軸上のひずみ分布 (縮小正方形経路)

図 12 ボールローラの移動経路と破断状態

大張出し高さを近似的に算出することを試みた。

4・2・1 正方形経路および p_z が小さい渦巻状経路による四角すい台形状の場合 p_z が大きいときすなわち図 10(c) の $p_z = 7.5 \text{ mm}$ の場合を除くと, x 軸上のひずみはボールローラが周辺に沿って移動する部分のみ集中している[図 10(a), (b) 参照]。そこで接触部の変形は平面ひずみ状態で, かつ x 軸方向のひずみ ε_x は接触部に沿って一様に展伸する幾何学的変形モデルを想定する。図 14 において, 接触角を θ , ダイスの肩半径を R_d , ダイス孔の辺長を $2L$, ボールローラの張出し高さおよび中心の位置をそれぞれ h , x_b とすれば, 幾何学的な関係から次式が成立する。

$$\begin{aligned}\theta &= \sin^{-1}[(\rho_b + \rho_d)/(h_x^2 + h_z^2)^{1/2}] \\ &\quad - \tan^{-1}(h_z/h_x) \\ \rho_b &= R_b + t_0/2, \quad \rho_d = R_d + t_0/2 \\ h_x &= L + R_d - x_b, \quad h_z = \rho_b + \rho_d - h \\ l_1 &= x_b, \quad l_2 = \rho_b \theta \\ l_3 &= h_x \cos \theta - h_z \sin \theta + \rho_d \theta\end{aligned}$$

接触弧 l_2 部分のみで展伸変形しているとして, x 軸上のひずみ ε_x , ε_y および ε_z は次のように表される。

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= -\varepsilon_z = \ln[l_2/(L + R_d - l_1 - l_3)] \quad \dots\dots\dots (1) \\ \varepsilon_y &= 0\end{aligned}$$

4・2・2 p_z が大きい渦巻状経路による四角すい台形状の場合 図 10(c) ような渦巻状経路の場合には, 図 15 の破線で示すようにボール状パンチで高さ $h (= p_z = 7.5 \text{ mm})$ に張出されてから, 等二軸ひずみ状態で展伸変形になると考える。前項の式に $x_b = 0$ を代入し, θ' を薄板とボールローラおよびダイス肩との接触角とすると, 幾何学的な関係から次式を得る。

$$\begin{aligned}\theta' &= \sin^{-1}[(\rho_b + \rho_d)/(h_x'^2 + h_z'^2)^{1/2}] \\ &\quad - \tan^{-1}(h_z'/h_x') \\ h_x' &= L + R_d, \quad h_z' = \rho_b + \rho_d - h \\ l_1' &= \rho_b \theta'\end{aligned}$$

図 13 逐次変形における破断限界図

$$\begin{aligned}l_2' + l_3' &= h_x' \cos \theta' - h_z' \sin \theta' \\ &\quad + \rho_d \theta'\end{aligned}$$

中央部では等二軸引っ張り, 周辺で平面ひずみ状態となるひずみ分布を考え, x 軸上の初期長さ $(L + R_d)$ が $(l_1' + l_2' + l_3')$ に一様に伸びる変形モデルを想定し, 次の近似的なひずみ分布を得る(図 15 のひずみ分布モデル参照)。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{x1} &= \ln[(l_1' + l_2' + l_3')/(L + R_d)] \\ \varepsilon_{y1} &= \varepsilon_{x1} [1 - x/(L + R_d)] \\ \varepsilon_{z1} &= -(\varepsilon_{x1} + \varepsilon_{y1})\end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

さらにボールの中心点が, $x=0$ から x_b へ移動し, 位置 $o_b(x_b, h - \rho_b)$ になり, また接触角 θ' が θ になったとする。図 10(c) のひずみ分布を参考にして, $l_1 = l_1'$, $l_3 = l_3'$ の関係を保ちながら l_2 部分が l_2 に等二軸引っ張り状態で展伸されていると想定して次式を得

図 14 正方形経路および小さい p_z の渦巻状経路に対する平面ひずみ変形モデル

図 15 大きい p_z の渦巻状経路に対する等二軸展伸変形モデル

る。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{x2} &= \varepsilon_{y2} = \ln(l_2/l'_2) \\ \varepsilon_{t2} &= -(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{y2}) \dots\dots\dots (3)\end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}l_1 &= l'_1 = \rho_b \theta' \\ l_2 &= x_b + (\theta - \theta') \rho_b \\ l_3 &= l'_3 = h_x \cos \theta - h_z \sin \theta + \rho_d \theta \\ h_x &= L + R_d - x_b, \quad h_z = \rho_b + \rho_d - h \\ \theta &= \sin^{-1}[(\rho_b + \rho_d)/(h_x^2 + h_z^2)^{1/2}] \\ &\quad - \tan^{-1}(h_z/h_x) \\ l'_2 &= (l'_2 + l'_3) - l_3 \\ &= h'_x \cos \theta' - h'_z \sin \theta' + \rho_d \theta' \\ &\quad - h_x \cos \theta + h_z \sin \theta + \rho_d \theta\end{aligned}$$

成形品のひずみは、中央部への張出しと周辺部分への展伸変形の和として算出している。

$$\left. \begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_{y1} + \varepsilon_{y2} \\ \varepsilon_t &= -(\varepsilon_x + \varepsilon_y)\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

4・2・3 縮小正方形経路による四角すい形状の場合
正方形経路の辺長を 2δ だけ繰返し縮小しながら正四角すいを成形する場合、第1回めの成形については四角すい台と同様の変形モデルを適用し、式(1)から次式を得る。

$$\left. \begin{aligned}\varepsilon_{x1} &= -\varepsilon_{t1} = \ln[l_2/(L + R_d - l_1 - l_3)] \\ \varepsilon_{y1} &= 0\end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

第2回めについては、 $l'_1 (= l_1 - \delta)$ 、 l'_2 および l'_3 を図16のように定め、 $(l_2 + l_3)$ と l'_3 との大小関係より、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned}(l_2 + l_3) \geq l'_3 \text{ のとき} \\ \varepsilon_{x2} = -\varepsilon_{t2} = \ln[(l'_2 + l'_3 - l_2 - l_3) / (l_1 - l'_1)] \\ \varepsilon_{y2} = 0\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、ボール接触による変形域が重複する場合には、すでに変形している部分は変形しないとして計算している。

$$\left. \begin{aligned}(l_2 + l_3) < l'_3 \text{ のとき} \\ \varepsilon_{x2} = -\varepsilon_{t2} = \ln[l'_2 / (l_1 + l_2 + l_3 - l'_1 - l'_3)] \\ \varepsilon_{y2} = 0\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

第3回め以降については、 l'_1 、 l'_2 および l'_3 を l_1 、 l_2 および l_3 に置き換えて、同様な計算を繰返す。

最大張出し高さ $h_{\max}$ は、それぞれの成形条件のもとで、式(1)、(4)、(6)および(7)の ε_t が4・1節の破断板厚ひずみ $\varepsilon_{tB} (= -0.7)$ になるときの成形高さとして算出している。

4・3 実験値と計算値の比較

4・3・1 正方形経路による四角すい台の張出し高さ
四角すい台の張出し高さ h と z 軸方向の逐次成形ピッチ p_z の関係を図17に示す。白丸印は成形できた場合を、黒丸印は破断したことを意味しており、各 p_z の最後の白丸印と黒丸印の間で破断が生じている。 p_z が6 mm 以上になると逐次成形が不可能になっていることや最大張出し高さ $h_{\max}$ に及ぼす逐次回数の影響は小さいことを考慮して、実用的な最大張出し高さ $h_{\max}$ の推測値を破線で表示してある。 p_z が0.5~1 mm 付近に $h_{\max}$ が最大となる最適ピッチが存在するが、 $h_{\max}$ に及ぼす p_z の影響は小さいようである。

このときの成形条件は次のようになっている。

$$\begin{aligned}2L &= 31.4 \text{ mm}, \quad R_b = 5 \text{ mm}, \quad R_d = 3.3 \text{ mm}, \\ x &= l_b = 10 \text{ mm}, \quad t_b = 0.3 \text{ mm}, \quad \varepsilon_{tB} = -0.7\end{aligned}$$

これらの値を4・2・1項の各式に代入して最大張出し高さ $h_{\max}$ を求めると、 $h_{\max} = 6.0$ mm になっており、図17に計算値として実線で示してある。

4・3・2 渦巻状経路による四角すい台の張出し高さ
渦巻状経路の場合の h と p_z の関係を図18に示す。丸印が $p_x = p_y = 0.2$ mm、四角印が $p_x = p_y = 2$ mm の場合であるが、実験結果の傾向はほとんど同じである。 p_z が7~7.5 mm 以上になると逐次成形が不可能になっていることを考慮して、実用的な最大張出し高さ

図16 四角すい成形の平面ひずみ変形モデル

図17 四角すい台の張出し高さ h と成形ピッチ p_z の関係(正方形経路)

図 18 四角すい台の張出し高さ h と成形ピッチ p_z の関係(渦巻状経路)

$h_{\max}$ の推測値を破線で表示してある。図 10(b) のように p_z が小さい場合、平面ひずみ変形モデルを適用すると $4 \cdot 3 \cdot 1$ 項の正方形経路の場合と同じになり、 $h_{\max} = 6.0 \text{ mm}$ となる。実験による逐次回数が複数となる p_z の範囲の計算値として実線で表示してある。

p_z が大きくなって、初期に中央部のパンチ張出しを行い、続いて等二軸引っ張り状態で展伸される場合($h = p_z$)には、 $4 \cdot 3 \cdot 1$ 項の成形条件を $4 \cdot 2 \cdot 2$ 項の式(4)などに代入して最大張出し高さを算出すると、 $h_{\max} = 9.5 \text{ mm} (= p_z)$ になる。これは p_z を大きくしてボールローラで渦巻状に押広げ成形したときの $h_{\max}$ の最大値 $7 \sim 7.5 \text{ mm}$ をかなりよく説明できている。

4・3・3 四角すい形状の最大張出し高さ $4 \cdot 2 \cdot 3$ 項の式(5)、(6)および(7)と次の成形条件、

$$2L = 31.4 \text{ mm}, R_b = 5 \text{ mm}, R_d = 3.3 \text{ mm},$$

$$x_0 = l_0 = 10 \text{ mm}, \delta = 1, 5 \text{ mm},$$

$$t_0 = 0.3 \text{ mm}, \varepsilon_{tb} = -0.7$$

を用いて算出した四角すいの x 軸上の最大張出し形状を図 19 に示す。計算値は離散的であるが、概略を把握するためにボールの頂点を滑らかに結んだ実線で表示してある。縮小ピッチ δ が 1 および 5 mm のとき、 $h_{\max}$ はそれぞれ 23.5 mm および 16.2 mm になっており、縮小ピッチ δ が小さいほど高さの大きい四角すいが得られる傾向にある。 x が小さくなるにつれて実験値と計算値の差が大きくなっているが、実験では $p_z = 0.5 \text{ mm}$ で張出し、破断したときに新しい試験片を用いて破断しなかった前回のステップまで成形した後、縮小ピッチ δ を与えて最大張出し形状を探索していることなどを考慮すると計算値と実験値はおおむね一致するといえる。

図 19 四角すいの最大張出し形状(縮小正方形経路)

5. 結 論

本研究の結果を以下にまとめる。

(1) パンチ工具を省略できるフレキシブルな薄板成形法として、ボールローラを用いた逐次張出し成形法を提案し、コンピュータ制御の逐次張出し成形機を試作した。

(2) すい台、すい体、段付きおよびドーム形状やダイス孔形と異なるすい台形状、模様付けやエンボス製品などの多様なシェル形状の張出し成形が可能であることや、また表面精度にもよるが本研究の製品程度であればおよそ 15 分以内に成形できることを確かめた。

(3) 逐次接触変形を受けるアルミニウム焼鈍板の破断限界を求める工業試験法と破断板厚ひずみが一定となるクライテリアを提示した。

(4) 逐次接触変形における破断限界と幾何学的変形モデルを用いて、四角すい台および四角すいシェルの最大張出し高さの算出法を提案し、製品設計に必要な概略値を簡便に予測できることを示した。

最後に、ご討論いただいた(株)アマダ技術研究所の遠藤順一所長および東京農工大の西脇信彦教授、堀三計助手に、また装置の試作にご尽力いただいた東京工大の岡田力助手、神保勝久技官に深く感謝する。なお、本研究の一部は平成 2・3 年度文部省科学研究費(総合研究 A)によることを付記し、感謝の意を表す。

文 献

- (1) 中島, 機誌, 72-603(1969), 498.

- (2) 中島, 塑性と加工, **21**-235(1980), 706.
 - (3) Hardt, D. E., ほか3名., *Proc. 9th NAMRC*, (1981), 140.
 - (4) 井関・加藤・高場, 第41回塑加連講論集, (1990-10), 271.
 - (5) 北野, 京都大学学位論文, (1961), 1.
 - (6) 西岡・西牧・松石・田中・安川・山内・東郷, 日本造船学会論文集, 132(1972), 481.
 - (7) 渡辺・桑原・蛭田・柴田, 平成2年度日本塑性加工学会賞受賞研究, (1991-5).
 - (8) 葉山, 塑性と加工, **21**-235(1980), 690.
 - (9) 馬場, 塑性と加工, **29**-324(1988), 13.
 - (10) Mason, B. & Appleton, E., *Proc. 3rd Int. Conf. On Rotary Metalworking Processes*, (1984), 495.
 - (11) 本荘・笠松・古川, 第42回塑加連講論集, (1991-9), 273.
 - (12) 北澤・清野, 平成2年度塑加春講論集, (1990-5), 437.
 - (13) 近藤・中村, 昭和60年度塑加春講論集, (1985-5), 197.
 - (14) 町田, 塑性と加工, **24**-274(1983), 1093.
 - (15) 井関・加藤・坂本, 第40回塑加連講論集, (1989-10), 41.
 - (16) 中村・北澤・小川・井関・松原, 日本塑性加工学会 SMF セミナー, No. 15(1990-10), 51.
-