

複数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}
久門 統^{*2}, 尾崎 一雄^{*3}

Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging Using a Few Spherical Rollers

Hideo ISEKI, Kazunori KATO,
Hajime KUMON and Kazuo OZAKI

A flexible and incremental sheet metal bulging machine using a few spherical rollers has been developed for the small-batch manufacture of nonsymmetrical shallow shells, and for eliminating the necessity of the forming die and punch. The hand-operated bulging machine performed a wide range of sheet metal shaping of complex shapes, for example, pyramidal shells, shells of the frustum of a pyramid, shallow pans and embossed panels. An approximate calculation method for the distribution of thickness strain and the maximum bulging height of the shell was proposed using the fracture limit from the incremental bulging test with a ball punch and a geometrical plane-strain deformation model. The predictions for the shell of the frustum of a quadrangular pyramid and the shell of the frustum of a right circular cone were in reasonably good agreement with experimental values for the annealed aluminum sheet.

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

1. 緒 言

薄板プレス成形の技術開発における最近の動向はコンピュータ支援による省人化, 知能化, 数値シミュレーション化やフレキシブル化などに徐々に移行しているのが現状である。製品精度や生産速度では世界をリードしている日本の薄板プレス加工業界にも, (1)金型コストの削減を計りたい, (2)消費者ニーズの多様化に対応できる成形技術を開発したい, (3)製品の設計段階において実物の試作品を用いて強度や機能性を事前評価したい, (4)打出し板金技法における荒仕上げ曲面の機械化を進めたい, (5)コンピュータ時代の人達にも魅力ある職場にしたい, などの潜在的な要求がある。これらの問題の解決策の一つとして, 情報社会に順応したコンピュータ制御によるフレキシブルな曲面成形法についての基礎的研究も必要になってきている。

これまでも活版印刷の活字を組む方法でパンチや

ダイスなどの工具面形状を離散化してフレキシブルな集合金型を構成する試みも行われていた。針金束⁽¹⁾, 標準工具の組立型⁽²⁾, 単位工具のブロック型^{(3)~(8)}やユニバーサル多点プレス型^{(9)~(13)}などの研究が挙げられる。また, 習字の運筆やグラフィックプロッタのような方法で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行われていた。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⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾, ボールローラによる転動加工⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾, 棒状工具による揺動回転成形⁽¹⁸⁾などがある。非回転対称の曲面形状については, ショットピーニング成形⁽¹⁹⁾, 局所加熱成形⁽²⁰⁾, ボールによる逐次成形⁽²¹⁾などが挙げられる。

最近, 著者⁽²²⁾らはパンチ工具にボールローラを用いたコンピュータ制御の逐次張出し成形機を試作し, ダイス孔からのアルミニウム薄板の逐次張出しを行い, 成形品の多様性や成形限界などを検討した。そしてダイス孔形のすい台形状にあらかじめ張り出した後, さらに成形を行って段付き形状のシェル製品が得られることを見出した。逐次成形ではひずみ硬化したシェルの剛性だけで製品の形状維持が可能であり, ダイスやブランクホルダの支持がなくてもシェル成形ができそうだという感触をもった。

本論文では, 高さと間隔を変えられるボール支持工

* 平成4年10月2日第43回塑性加工連合講演会において講演, 原稿受付 平成5年3月16日。

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

^{*2} 東京工業大学大学院。

^{*3} 東京工業大学。

具を取付けた回転工具台を考案し、金型工具の省略を目的とした複数ボールローラによる逐次張出し成形法を提案する。手動ではあるが8軸移動の逐次張出し成形装置を試作し、アルミニウム焼鈍板を用いて成形実験を行い、2～3個のボールローラでも多様なシェルの形状が成形できることを示す。また製品のひずみ分布の傾向や成形限界の特徴を調べ、基本的な形状である溝形およびすい台形状製品の板厚ひずみ分布や最大張出し高さの簡易算出法を提示する。

2. 複数ボールローラによる逐次張出し成形装置の試作

2.1 少ないボールローラによる薄板の曲面成形法

複数の単位工具やボールローラを用いて薄板から曲面形状を成形する方法はたくさんあるが、制御する軸数が少なく、かつ多様な薄板曲面をフレキシブルに成形できるものが好ましい。図1(a)に示すように、1個の成形ボールローラに対し1個の支持ボールローラを使用するのが最も単純な逐次成形法と考えられるが、曲線部を成形することができない。そこで支持ボールローラの支持棒を回転させ、さらに回転台上を移動させれば曲線的な段形状を成形することができる。一方、平板に凹凸状の模様をつけて曲げ剛性や強度を向上させる成形法としてエンボス加工があり、おもに溝形状が多用されている。図1(b)に示すように3個のボールローラを使用すると溝形状を比較的容易に成形することができる。これらの基本的な成形方法をベースにした複数ボールローラによる逐次張出し成形法の概略を図2に示す。

2.2 2～3個のボールローラによる逐次張出し成形装置 試作した複数ボールローラによるフレキシブルな逐次張出し装置を図3に示す。装置は、成形ボールローラに z 軸(鉛直)方向の動きを与える z 軸移動

台($z = \pm 30$ mm)、薄板を固定し $x-y$ 方向に移動できる $x-y$ 移動テーブル($x, y = \pm 60$ mm)、上下移動と水平移動が可能な2個の支持ボールローラを取付けた回転工具台から構成されている。手動ではあるが、 $x-y$ 方向の面内2軸、 z 方向の面外3軸、回転台上の面内2軸および回転1軸からなる8軸移動の逐次張出し成形装置になっている。図4は3個の支持ボールローラを取付けた場合の回転工具台であり、ボールの径、位置および間隔を変えることができる。

3. 逐次張出し成形実験

3.1 成形条件 成形ボールローラの直径 $2R_w$ は9.5 mm、支持ボールローラの直径 $2R_s$ は10 mmであり、2個の支持ボールローラの間隔 d (ボールの中心間距離)は22 mmである。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、周辺部を辺長112 mmの正方形に固定した。引張試験による応力-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。Lan-

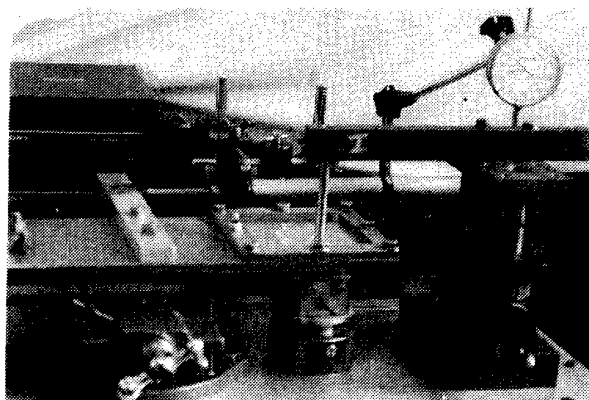


図3 ボールローラによるフレキシブルな逐次張出し装置

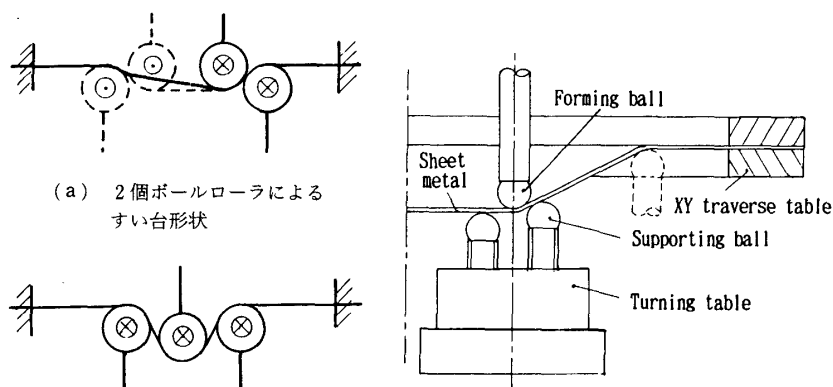


図2 複数ボールローラによる逐次張出し成形法

図1 基本的な逐次成形法

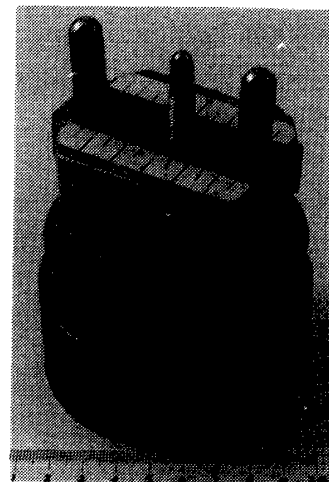


図4 回転工具台

kford 値は $r_0=0.74$, $r_{45}=0.96$, $r_{90}=0.77$ であったが、複数ボールローラの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かった。ボールローラとアルミニウム板との間には市販のさび止め潤滑剤を使用して摩擦力の影響を小さくし、また薄板と x - y テーブルとの接触面はアセトンで脱脂して周辺での絞り込みをなくした。

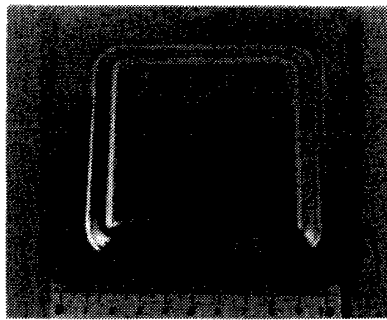
3・2 成形形状の多様性 成形と支持用の 2 個のボールローラで成形した一様高さのすい台形状の製品例を図 5 に示す。図 6 は円すい台の場合のボールローラの成形経路の概略である。成形ボールローラに角度増分 $\Delta\theta=10^\circ$ と x , y 方向の増分経路 Δx , Δy を与えて近似的な円形経路(破線)とし、一周ごとに z 方向(高さ方向)の成形ピッチ p_z を与えている。

成形(1個)と支持(2個)用の 3 個のボールローラで成形した一様高さの溝付き形状の製品例を図 7 に示す。図 8 は溝付き正方形形状における成形経路の概略である。角部では成形された溝形状が壊されないように、内側の支持ボールローラを下げてから工具台を 90° 回転させ、溝形状が壊されない位置まで成形してから元の高さにもどしている。図 9 は、経路増分 Δx , Δy , Δz , 角度増分 $\Delta\theta$ およびボールの間隔増分 Δd を適当に組合せて逐次成形した製品例である。さらにボール間

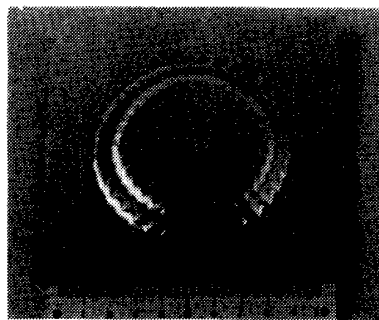
隔やボール径を変えて成形した製品例を図 10 に示す。

3・3 製品のひずみ分布 基本的な製品形状として、2 個ボールローラによるすい台形状と 3 個ボールローラによる溝付き形状を取上げ、成形ピッチ $p_z=1$ mm で成形高さ $h=7$ mm のときのひずみ分布を格子法(#1 mm)で測定した。製品がおおむね対称的に成形されていることや板面内のせん断変形が小さいことを考慮して、変形前後の格子の長さから算出した対数ひずみ ϵ_x , ϵ_y を採用し、板厚ひずみ ϵ_t は体積一定の条件から算出した。

3・3・1 すい台形状 図 11 は四角すい台形状の x 軸上のひずみ分布である。成形ボールローラの正方形経路の辺長は 60 mm, 図中の一点鎖線は成形ボールの中心を、また二点鎖線は支持ボールの中心を示す。ひずみはボールローラとの接触部付近に集中し、平面ひずみ状態になっており、成形ボール側のひずみ分布が支持ボール側のものよりも大きくなる傾向にある。対角線上のひずみ分布は、 x 軸上の成形ボールローラ側のひずみが等ひずみ状態になったものに近く、紙面の都合で省略した。図 12 は円すい台形状の x 軸上のひずみ分布である。成形ボールローラの円形経路の直径は 60 mm, ひずみ分布の傾向や特徴は四角すい台形状のものと同様である。



(a) 正四角すい台



(b) 円すい台

図 5 すい台形状の製品例

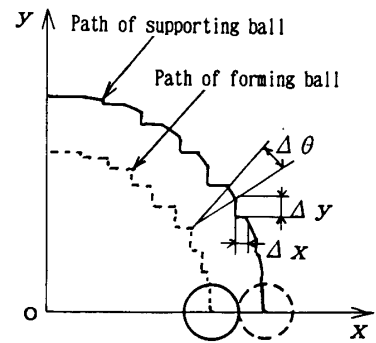
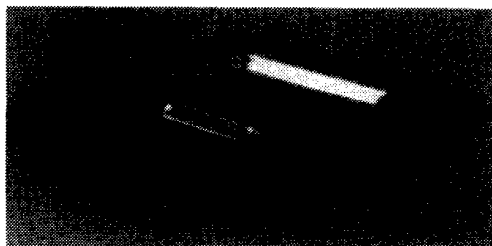
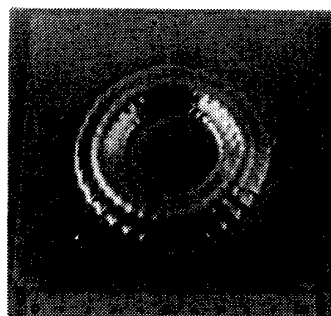


図 6 円すい台形状におけるボールローラの成形経路



(a) 溝付き正方形形状



(b) 溝付き円形状

図 7 溝付き形状の製品例

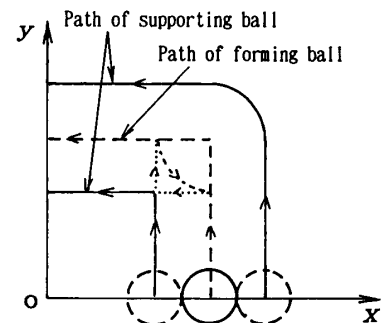
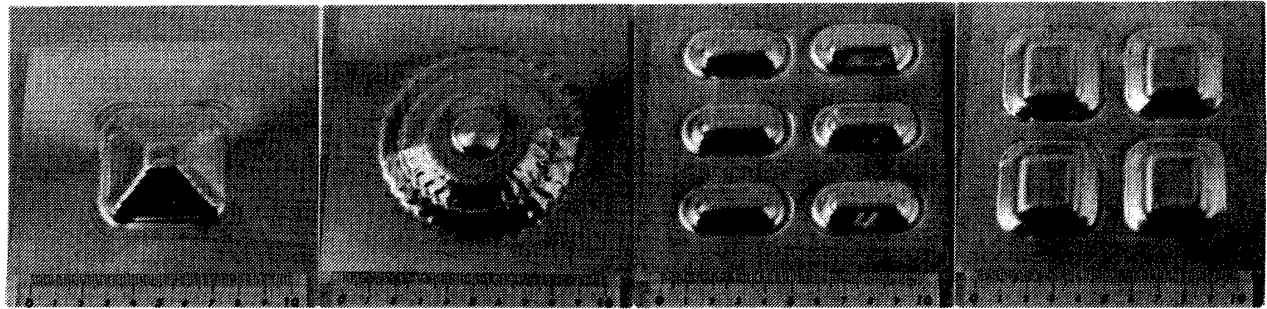
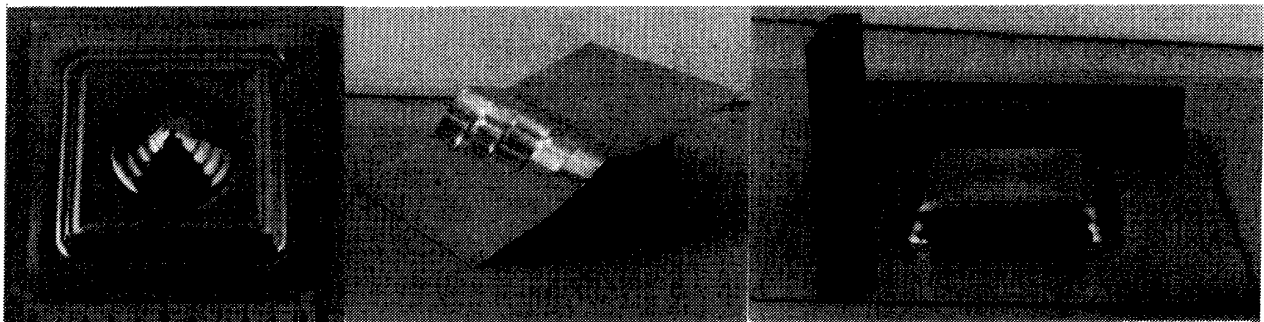


図 8 溝付き正方形形状におけるボールローラの成形経路



(a) ピラミッド (b) 円ドーム (c) 溝形エンボス (d) 四角すい台エンボス
 図9 すい状, ドーム状およびエンボス製品例



(a) ドーム付き四角すい台 (b) V字状曲面 (c) ボール展伸による四角筒製品

図10 ボールの径や間隔を変えて成形した製品例

3・3・2 溝付き形状 図13は溝付き正方形の x 軸上のひずみ分布である。成形ボールローラの正方形経路の辺長は 60 mm である。ひずみはボールローラとの接触部付近に集中し、平面ひずみ状態になっている。ひずみ分布は成形ボールローラを中心にしてほぼ対称となり、成形ボールローラ側のひずみ分布は支持ボールローラ側のものよりも大きくなる傾向にある。対角線上のひずみ分布は、内側支持ボールローラ側と成形ボールローラ側のひずみ分布が等ひずみ状態になったものに近く、紙面の都合で省略した。図14は溝付き円形状の x 軸上のひずみ分布である。成形ボールローラの円形経路の直径は 60 mm であり、曲率の影響を若干受けているが、ひずみ分布の傾向は溝付き正方形形状のものによく似ている。

**4. 四角すい台および溝付き正方形の板厚
 ひずみと最大張出し高さの簡易算出法**

4・1 幾何学的平面ひずみ変形モデル 図11~14によれば、 x 軸上のひずみはボールローラが経路に沿って移動する部分に集中している。そこで、(1)図15に示すような接触部付近(l_1, l_2, l_4, l_5 領域)だけで平面ひずみ状態で変形する、(2) x 軸方向ひずみ ϵ_{xw} (成形ボール側)および ϵ_{xs} (支持ボール側)は一様に展伸し、

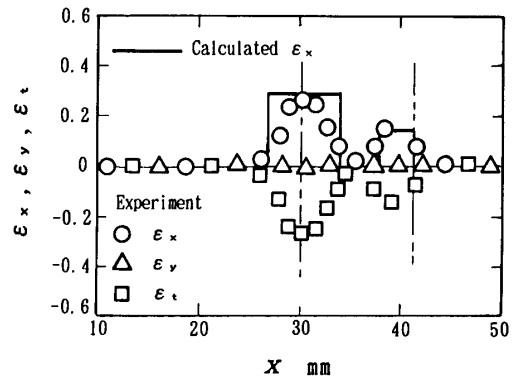


図11 四角すい台形状の x 軸上のひずみ分布

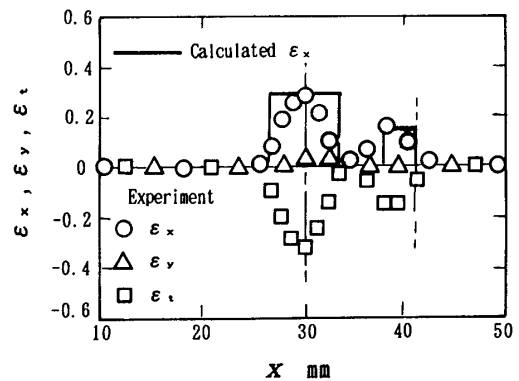


図12 円すい台形状の x 軸上のひずみ分布

$\epsilon_{xs} = \lambda \epsilon_{xw}$ の状態を保つ、(3)変形領域 l_1, l_5 の長さは接触弧 l_2, l_4 の x 軸上への正射影長に等しくなる、という幾何学的平面ひずみ変形モデルを想定する。接触角を θ 、成形ボールローラおよび支持ボールローラの半径をそれぞれ R_w, R_s とし、ボールローラの張出し高さおよび中心間の距離の成分をそれぞれ h, h_x, h_z とすれば、幾何学的な関係から次式が成立する。

$$\begin{aligned} \rho_w &= R_w + t_0/2, & \rho_s &= R_s + t_0/2, \\ h_z &= \rho_w + \rho_s - h, & l_1 &= \rho_w \sin \theta, & l_2 &= \rho_w \theta, \\ l_3 &= h_x \cos \theta - h_z \sin \theta, & l_4 &= \rho_s \theta, & l_5 &= \rho_s \sin \theta, \\ \theta &= \sin^{-1} [(\rho_w + \rho_s) / (h_x^2 + h_z^2)^{1/2}] - \tan^{-1} (h_z/h_x) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

支持ボールローラ側および成形ボールローラ側において一様な展伸変形をしている部分の変形前の長さ l_{s0} および l_{w0} は次式で表される。

$$\begin{aligned} l_{s0} &= (l_4 + l_5) \exp(-\lambda \epsilon_{xw}) \\ l_{w0} &= l_1 + h_x + l_5 - l_3 - l_{s0} \end{aligned}$$

したがって、成形ボールローラ側のひずみ $\epsilon_{xw}, \epsilon_{yw}$ および ϵ_{tw} は次のように表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_{xw} = -\epsilon_{tw} &= \ln [(l_1 + l_2) / l_{w0}] \quad \dots\dots\dots (2) \\ \epsilon_{yw} &= 0 \end{aligned}$$

また、支持ボールローラの接触弧部分での一様な伸びひずみ $\epsilon_{xs}, \epsilon_{ys}$ および ϵ_{ts} は、展伸ひずみ比 $\lambda (=$

$\epsilon_{xs}/\epsilon_{xw})$ を用いて次のように表される。

$$\epsilon_{xs} = -\epsilon_{ts} = \lambda \epsilon_{xw}, \quad \epsilon_{ys} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上の式において、ボール間隔 h_x と張出し高さ h を与え、 h_z と θ を算出し、次に展伸ひずみ比 $\lambda=0$ と仮定して l_{s0} を計算し、 ϵ_{xw} が後述する逐次変形における破断限界ひずみ ϵ_{tB} に収束するまで繰返し計算を行う。

4.2 逐次変形における展伸ひずみ比 λ および破断ひずみ 幾何学的平面ひずみ変形モデルにおいて支持ボール側の接触部付近における展伸変形がない場合には展伸ひずみ比 $\lambda=0$ であり、成形ボール側と同じように変形すれば $\lambda=1$ になる。実験のひずみ分布状態を考慮し、展伸ひずみ比 λ は 0 と 1 の中間にあると考えられるので、その平均値 $\lambda=0.5$ を採用して計算を行った。

ボールローラによる逐次成形においては、平面ひずみ状態における破断ひずみが従来の塑性不安定理論⁽²³⁾⁽²⁴⁾に基づく変形限界図によるものよりもかなり大きくなることを前報⁽²²⁾で指摘した。そしてボールローラの平行移動による工業的張出し試験を提案し、くびれ発生限界と破壊限界の間のひずみを採用して破断限界図を描き、ほぼ $\epsilon_1 = \beta \epsilon_2 + \epsilon_{tB}$ となる直線関係になることを示した。この実験に用いたアルミニウム焼鈍板の ϵ_{tB} はおよそ 0.7 になっており、4.1 節の式(2)の ϵ_{xw} が $\epsilon_{tB}(=0.7)$ になったときの張出し高さを最大張出し高さ h_{max} とした。

4.3 最大張出し高さの実験値と計算値の比較

四角すい台および溝形の張出し高さと z 軸方向の逐次成形ピッチ p_z の関係を図 16 および 17 に示す。白丸印は一定の成形ピッチ p_z で成形できたことを示し、各 p_z の最上方の白丸印の次の成形ステップ(破断ステップ)で破断が生じている。この破断ステップ中の最大張出し高さを近似的に測定するために、各 p_z の値で白丸印の成形を行った後に $p_z=1$ mm に変更して逐次

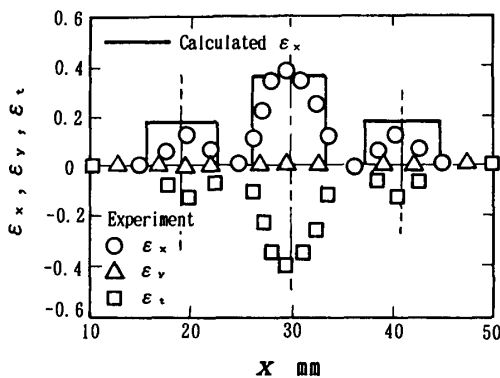


図 13 溝付き正方形の x 軸上のひずみ分布

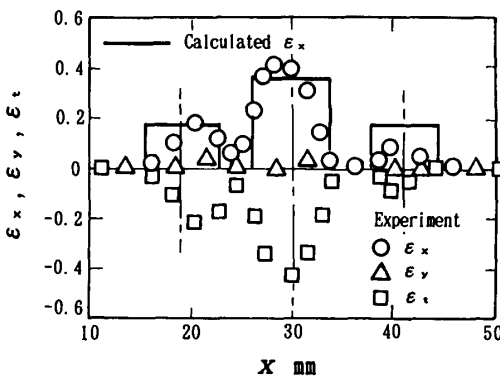


図 14 溝付き円形状の x 軸上のひずみ分布

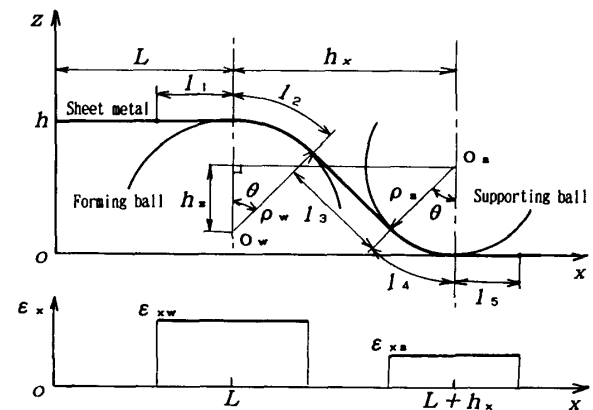


図 15 幾何学的平面ひずみ変形モデルとひずみ分布

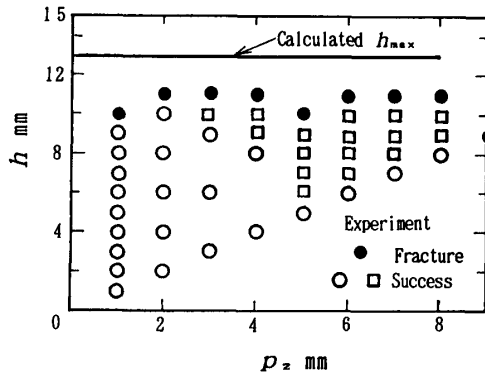


図 16 四角すい台形状の張出し高さと成形ピッチの関係

成形を行った。四角印は成形できた場合であり、黒丸印はそのときの破断を示し、最大張出し高さはこれらの中間にあるとしている。四角すい台の破断は角部で生じ、すぐに平面ひずみ状態の直辺部に移り、溝形状の場合は直辺部で生じた。四角すい台形状の最大張出し高さ h_{max} はおよそ 10.5 mm、溝形の h_{max} は 7.5 mm 程度であり、破断ステップの成形ピッチのみを小さくして得られる最大張出し高さに及ぼす成形ピッチ p_z の影響は小さい。

成形条件より、 $R_w=4.75$ mm、 $R_s=5$ mm、 $h_x=11$ mm、 $t_0=0.3$ mm、 $\lambda=0.5$ として計算した。さらに実験におけるひずみ分布の傾向を考慮し、2 個ボールローラによるすい台形状では $l_s=0$ 、3 個ボールローラによる溝形状では対称性より $l_1=0$ とした。これらの値を 4・1 節の各式に代入し、 $h=7$ mm のときの ϵ_x の計算値を図 11~14 に実線で示す。計算値は実験値の傾向をかなりよく近似している。 $\epsilon_{tB}=0.7$ としたときの最大張出し高さ h_{max} はそれぞれ、12.9 mm および 11.6 mm であり、図 16 および 17 に実線で示す。一様な伸び変形に基づく幾何学的平面ひずみ変形モデルでは、破断近くになってひずみ集中が進むと計算値と実験値の差が大きくなるが、製品設計における概略値としてはおおむね良好と言える。

5. 結 言

本研究の結果を以下にまとめる。

(1) パンチやダイスなどの金型工具を省略できるフレキシブルな薄板成形法として、複数ボールローラによるフレキシブルな逐次張出し成形法を提案し、回転工具台などで構成された手動の 8 軸移動の逐次張出し成形装置を試作した。

(2) ボールローラの増分経路や回転工具台の増分角度を適当に組合せると多様な製品形状ができることを示し、また形状や表面精度にもよるが本研究の製品程度であれば、手動であってもおよそ 40 分以内に成

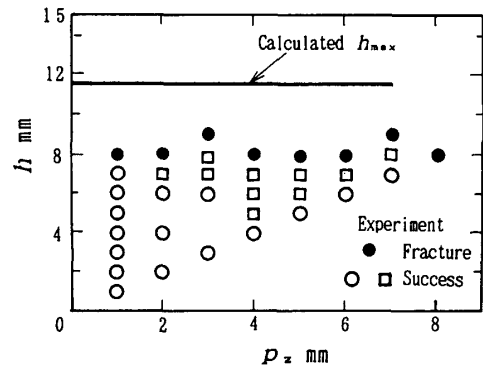


図 17 溝形状の張出し高さと成形ピッチの関係

形できることを確めた。

(3) 薄板とボールローラとの接触部付近においてひずみ集中が生じ、経路の曲率の小さいところでは平面ひずみ状態に、角部では等 2 軸ひずみ状態になる。溝および四角すい台形状の破断ステップの成形ピッチのみを小さくして得られる最大張出し高さは成形ピッチの影響をほとんど受けない。

(4) 逐次接触変形における破断限界と幾何学的平面ひずみ変形モデルを用いて製品の板厚分布や最大張出し高さの簡易算出法を提案し、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。

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), 271.
- (5) 井関・加藤・高場, 第 42 回塑加連講論集, (1991), 265.
- (6) 井関・加藤・高場, 平成 4 年度塑加春講論集, (1992), 527.
- (7) Frickenstein, E. V. and Klener, M., Annals of CIRP, 40-1 (1991), 41.
- (8) Webb, R. D. and Hardt, D. E., Trans. ASME, J. Eng. Ind., 133-1 (1991), 311.
- (9) 北野, 京都大学学位論文, (1961).
- (10) 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.
- (11) 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).
- (12) 岩崎・田浦, 塑性と加工, 20-218 (1979), 165.
- (13) 李・中村・渡辺・埜, 平成 4 年度塑加春講論集, (1992), 523.
- (14) 葉山, 塑性と加工, 21-235 (1980), 690.
- (15) 馬場, 塑性と加工, 29-324 (1988), 13.
- (16) Masson, B. and Appleton, E., Proc. 3rd Int. Conf. Rotary Metalworking Processes, (1984), 495.
- (17) 本荘・笠松・古川, 第 42 回塑加連講論集, (1991), 273.
- (18) 北澤・清野, 平成 2 年度塑加春講論集, (1990), 437.
- (19) 近藤・松崎・平岩・大賀, 機論 (3 部), 44-386 (1978), 3663.
- (20) 町田, 塑性と加工, 27-274 (1983), 1093.
- (21) 田中・中村・平岩・今泉・松原, 平成 4 年度塑加春講論集, (1992), 545.
- (22) 井関・加藤・坂本, 機論, 58-554, C (1992), 3147.
- (23) Swift, H. W., J. Mech. & Phys. Solids, 1 (1952), 1.
- (24) Hill, R., J. Mech. & Phys. Solids, 1 (1952), 19.