

弾性工具を用いた逐次プレス成形法による薄板の曲面成形*

(第1報, 成形法の提案と基本曲面の成形)

松原正基*¹, 田中繁一*², 中村 保*²

Development of Incremental Sheet-Metal-Forming System Using Elastic Tools

(1st Report, Principle of Forming Process and Formation of Some Fundamental Curved Shapes)

Masaki MATSUBARA, Shigekazu TANAKA and Tamotsu NAKAMURA

A new technique for flexible sheet metal forming in small batches was proposed. To realize the formation process, a forming machine was designed and manufactured. The forming machine is numerically controlled by computer. A sheet metal blank is formed locally by the set of rigid or elastic standard tools, and the local forming operation is repeated incrementally while the sheet metal is transferred regularly. As a result, the blank can be formed into various shapes. Forming processes for spheric, elliptic and hyperbolic shapes were examined. It has been confirmed that products of various fundamental shapes are successfully formed with good geometric accuracy and surface roughness, by adjusting different sequences of incremental forming and several forming parameters.

Key Words: Plastic Forming, Formability, Flexible Manufacturing System, Incremental Forming, Elastic Tools, Sheet Metal Forming

1. 緒 言

最近の多品種少量生産への要求が高まるにつれ、高価な金型を必要としない低コストでフレキシブルな塑性加工法の開発が重要な課題となっている。そのため、特に板材成形の分野では、フレキシブル成形に関する研究がさまざまな方面から行われている。その代表的なものとしては、マトリックス状に配列したシリンダなどによってコントロールするフレキシブルダイスを用いる方法や、ろくろ加工の人間の指を模倣した工具あるいはボールローラ等を用いる逐次張出し成形などがある⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

本研究では、弾性工具を用いた逐次プレス方式による薄板の成形法を提案し、これにより比較的緩やかな自由曲面を自在に成形することができるシステムの完成を目指している。

本報では、まず自由曲面を構成する基本要素である球面、だ円面および双曲面の成形法を提案し、これらの曲面を表面性状、形状精度ともに良好に成形できることを確認した。さらに形状精度向上および形状制御

を目的として成形パラメータおよびプロセスが製品形状に及ぼす影響について検討を加え、今後の自由曲面の成形の基礎資料とした。

2. 成形法概要

本成形法の概要を図1に示す。加工の基本単位は剛体あるいは弾性体ポンチと弾性体ダイスで板素材を挟み込む操作であり、この操作を逐次的に素材全体に繰返すことにより曲面の成形が行われる。工具に弾性体を用いることにより素材の変形にあいまいさを与え、圧痕の接続を滑らかにするとともに得られる形状の多様性を確保する。製品形状はポンチ押込み量、押込み間隔および工具の形状等の成形パラメータや、工具押

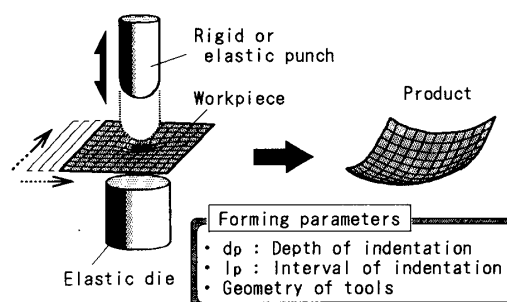


図1 逐次プレス成形法概要

* 原稿受付 平成5年9月20日。

*¹ 准員, 静岡大学大学院 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

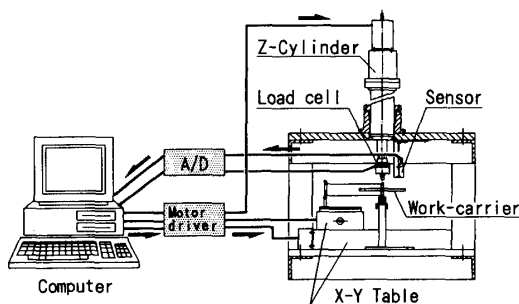
*² 正員, 静岡大学工学部。

込み順序などの成形プロセスの選択によって制御される。

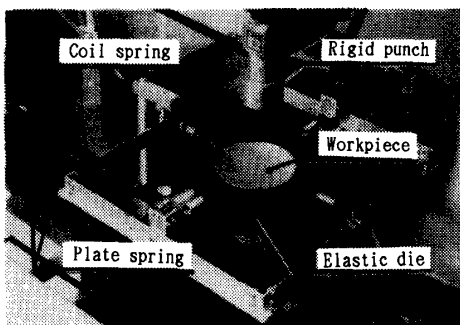
3. 実験装置

加工実験に用いた図2の装置は素材の位置決めを行うXYテーブル, ポンチの押し込みを行うZ軸シリンダおよび形状測定のためのレーザ変位計などから構成され, これらの動作はすべてコンピュータで制御される。このXYテーブルおよびZ軸シリンダはステップモータによる駆動で, 0.01 mmの分解能で制御される。移動範囲は, XY方向が各400 mm, Z方向が約300 mmである。また, Z軸シリンダの加工荷重は最大4.2 kNである。成形後の形状は, レーザ変位計とXYテーブルの走査により, 各軸とも0.01 mmの分解能で計測される。

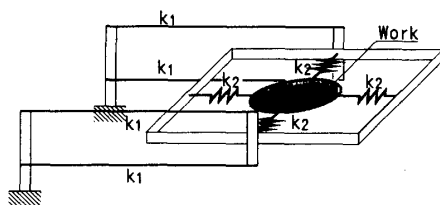
図2(b)は加工装置の主要部であるが, 板素材はXYテーブル上に設置された機構(Work-Carrier)で保持され位置決めされる。素材の保持動作とポンチの



(a) 装置概要



(b) 主要部



(c) 素材保持機構

図2 実験装置

押し込み動作の不適合が不自然な変形をもたらさないように素材は柔軟に支持されている必要があるが, この保持機構ではばね系によりこれに対応している。図2(c)はこの保持機構の概略であるが, k_2 で板の変形に, $k_1(k_2)$ でプレス時の上下動と傾斜に対応している。ここでは k_2 にはコイルばねを, k_1 には平行板ばね機構を用いた。ここで, ポンチ押し込み位置は, 成形前の板素材(平板)上で定義される公称の押し込み位置を基準として加工を行っている。

また, 用いた工具の材質は剛体工具はS45C, 弾性体工具には硬さがJIS A硬度約70の天然ゴムおよびクロロプレンゴムを用いた。成形用薄板素材(以下素材と称す)は直径60 mm, 板厚0.4 mmのアルミニウムA1050焼鈍材を基本とした。

4. 基本曲面の成形

4.1 球面

4.1.1 球面の成形法 球面の成形は, 微小な球面状の圧痕を素材全体に接続していくことにより可能となる。用いた工具は図3に示す頭部曲率半径 R_p mmの球頭の剛体ポンチと, 上端面が平坦な弾性体ゴムダイスである。また, 加工経路は図4に示す三とおりについて成形を試みた。

図5は, ポンチの押し込み量 $d_p=3.0$ mm, 押し込み間隔 $l_p=3.0$ mm, およびポンチ頭部曲率半径 $R_p=30$ mmという同一条件で, 三とおりの加工経路により得られた形状を, 等高線および断面形状で比較したものである。

Aの反復直線走査経路では, 製品は図5(1)に示すだ円的曲面となる。図6は, 図3の工具を用いて薄板素材の中央部を加工した例で, ポンチ押し込み点を x 軸方向へ直線的に移動させたときの素材の変形過程を示したものである。ポンチの押し込みにより, 素材には局所的な圧痕の生成と同時に素材全体に及ぶ曲げ変形が生じている。この曲げ変形の方法は初期段階では定まっていなかったが, 加工が進むにつれて徐々に加工の進行方向に安定している。つまり, Aの経路では経路が x

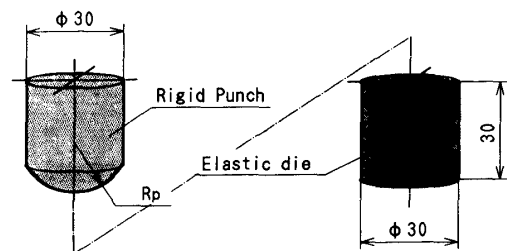


図3 球面成形用工具

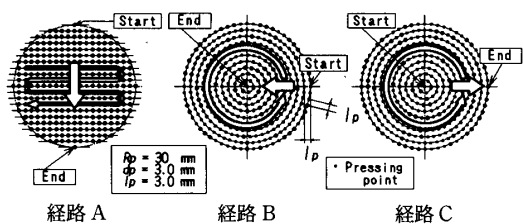


図4 逐次成形経路

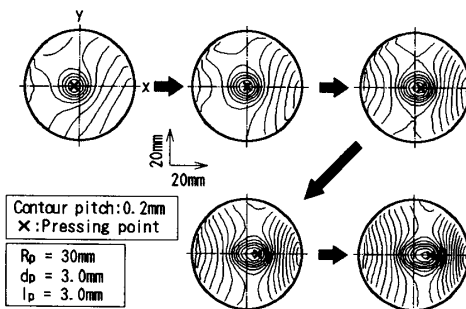
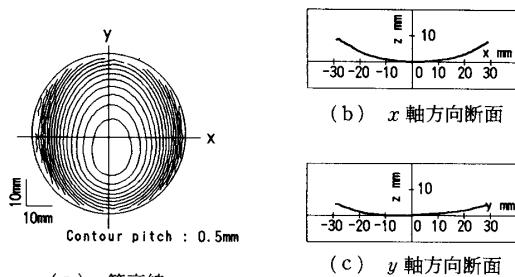
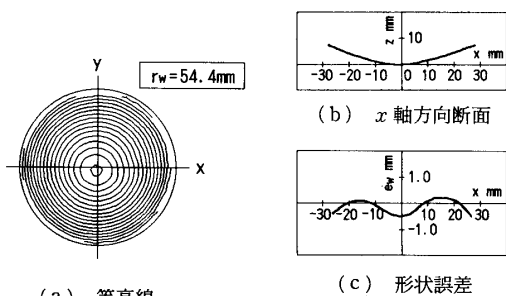


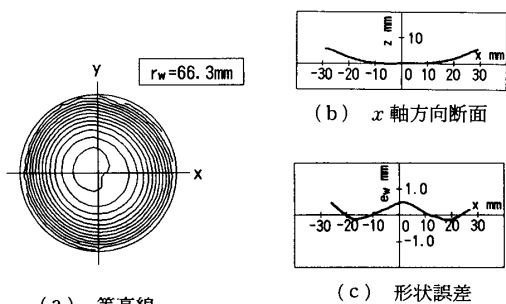
図6 押込み点の直線移動による素材の変形



(1) 経路 A



(2) 経路 B



(3) 経路 C

図5 成形経路による製品形状の違い

軸方向に直線的に連続するために、曲げ変形が x 軸方向に強く蓄積されてだ円的な形状が得られる。

一方、B は外周→内周、C は内周→外周の周回経路である。これらによる成形では、 z 軸に対して軸対称な形状が得られている。

ここで、B と C では得られた形状に対して最小二乗法を用いて次式を当てはめ、曲率半径を算出した。

$$x^2 + y^2 + z^2 = r_w^2 \dots \dots \dots (1)$$

さらに得られた r_w を用いて計算上の理想球面と実際の形状の z 方向の誤差 e_w を、形状誤差と定義して示したのが(c)である。

得られた形状は、経路 B では中心付近の曲率半径が小さく、すり鉢状であるのに対し、経路 C では逆に中心付近の曲率半径が大きく、皿状になっている。これらの形状が得られるまでの素材の変形過程を示したのが図7である。図7(a)、(b)は加工形状を等高線および x 軸方向の断面で示したもので、(c)は各段階間の变形増分である。また図中の一点鎖線の円は各段階の加工点の周回軌道である。

図8は、成形経路 B の初期段階である中心部から半径 24 mm の円周上で押込み点を移動させた場合の、素材の変形過程を示したものである。この周回加工では、最初の段階で曲げ変形が生じており、その曲げの方向は加工の進行により回転している。しかし押込みが1周終了した時点では、その曲げ変形は不特定な方向で複雑に残留している。図7より、その後は加工が中心へ向けて進行するにつれこの曲げが消滅し、最終的に軸対称な形状に安定している。また、形状が球面に近づくにつれて、外周部の剛性が増しており、中心付近の加工段階では変形域はほぼ中心部のみに限られている。

一方、成形経路 C では初期段階である中心付近の加工時に、素材は球面的に変形せず平坦に加工されている。さらに加工が進行するにつれ外周部が起き上がり、しわを生じている。このしわは外周部の加工により伸ばされて、最終的に消滅する。

4・1・2 諸加工条件が製品形状に及ぼす影響 図9～12は、成形経路 B について各加工パラメータが製品の曲率半径および形状誤差に及ぼす影響を示したものである。まず図9は、押込み量 d_p による影響である。単一のポンチでも押込み量を調節することにより広範囲の曲率を製品に与えることができる。また、ポンチの曲率半径 R_p が小さいほど製品の曲率半径は小

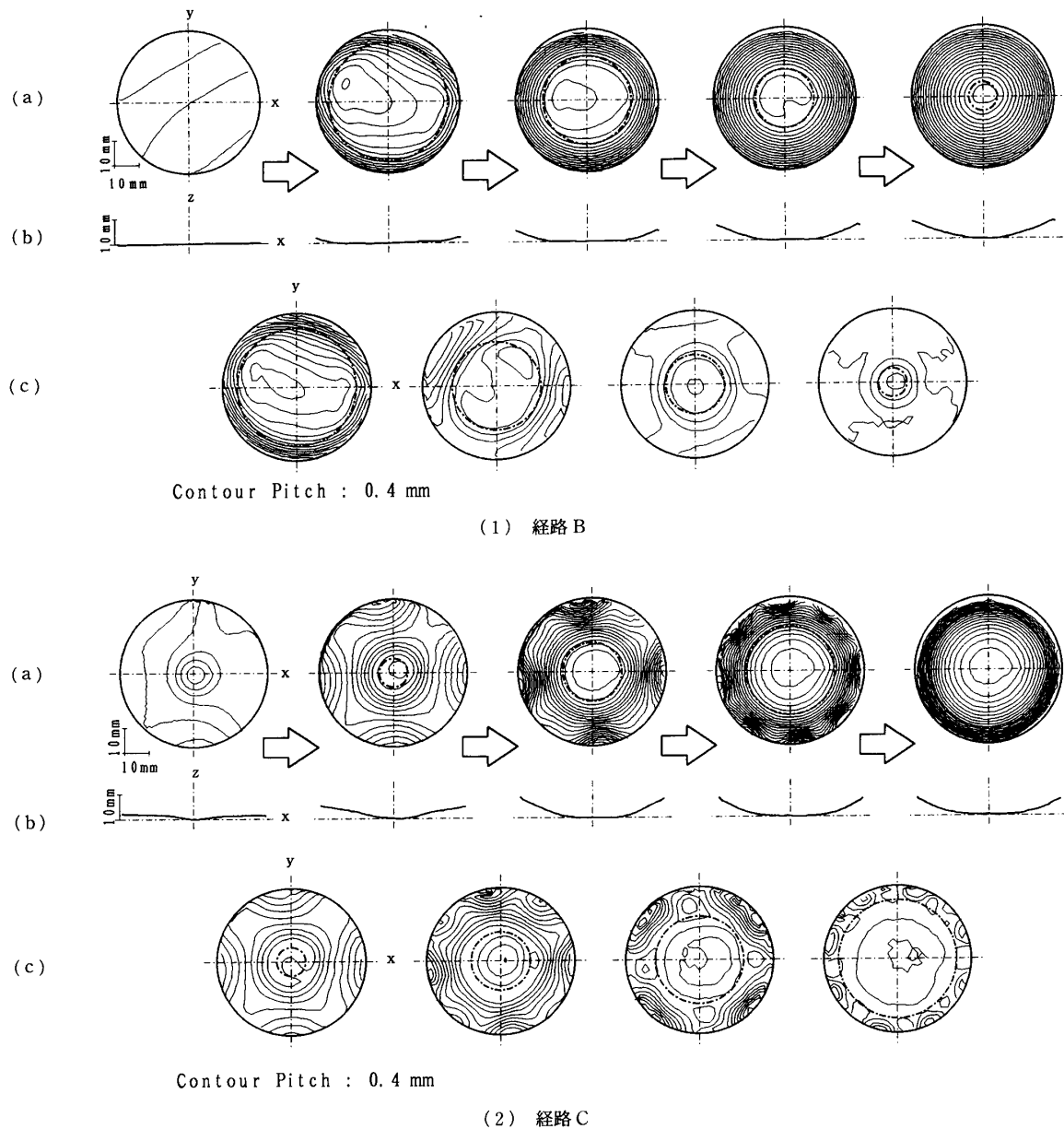


図 7 球面成形時の素材の変形過程

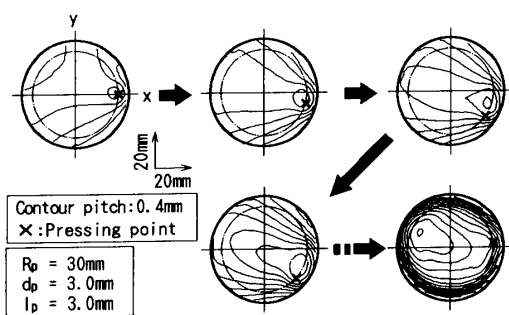


図 8 押込み点の周回移動による素材の変形

さくなる。破線は、図 5 (c) で示した形状誤差の最大値であるが、ポンチの曲率半径 R_p が小さいものほど球面からの逸脱が大きい。

図 10 はポンチの押込み量が製品のうねり形状に及ぼす影響を示したものである。このうねり形状は、製品断面の形状データをもとに最小二乗法を用いて五次関数を当てはめ、その近似曲線と製品形状とのずれ量を示したものである。 $d_p=3.0\text{mm}$ ではポンチと素材の接触領域の半径は約 $6.0\text{mm} (>l_p)$ であり、このときのうねり形状の最大振幅は約 0.01mm であるが、 $d_p=0.5\text{mm}$ ではこの接触域半径は約 $2.2\text{mm} (<l_p)$ 、うねり形状の最大振幅は 0.02mm 以上になっている。したがって、ポンチと素材の接触領域が押込み間隔より小さくなるようなポンチ押込み量の選択は、圧痕が滑らかに接続されず、うねりが大きくなるので成形には適さない。

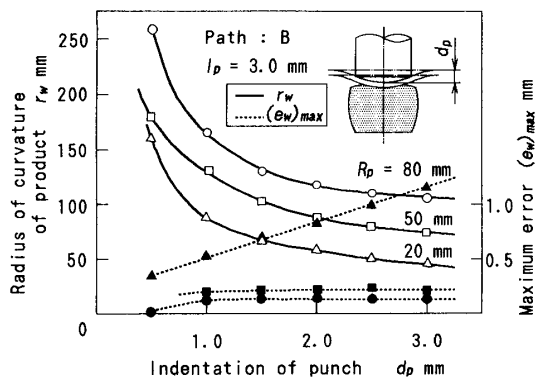


図9 ポンチ押込み量が製品の曲率半径に及ぼす影響

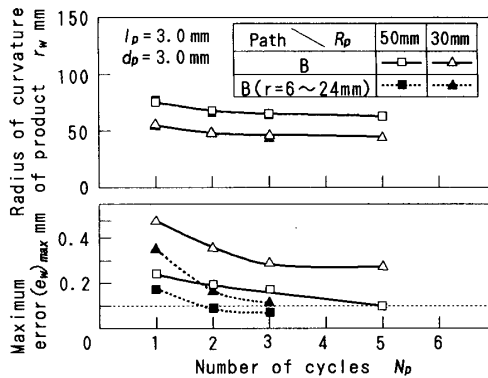


図12 加工サイクル数が製品形状に及ぼす影響

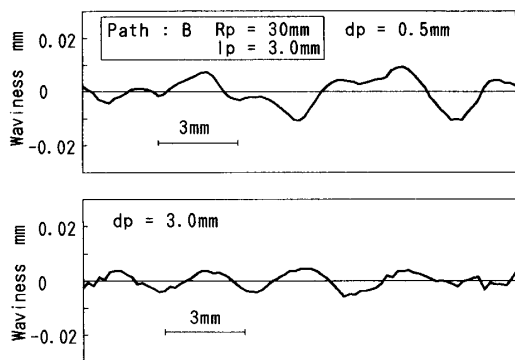


図10 ポンチ押込み量が製品のうねり形状に及ぼす影響

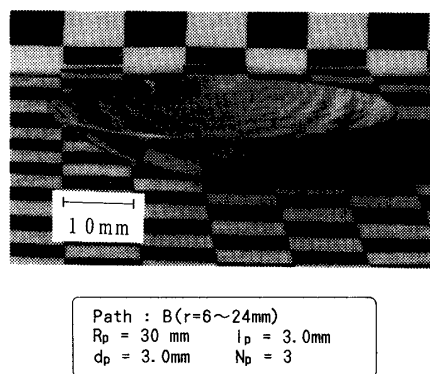


図13 球面成形品例

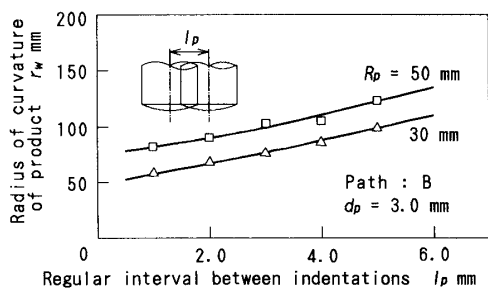


図11 ポンチ押込み間隔が製品曲率半径に及ぼす影響

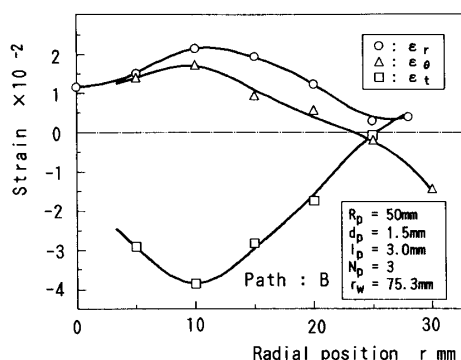


図14 球面成形品のひずみ分布

図11はポンチの押込み間隔 l_p の製品曲率半径への影響を示したものである。工具押込み間隔によっても、曲率半径が制御できる。また、 l_p は製品の表面状態および成形時間に大きく影響する。つまり、 l_p が大き過ぎると表面に圧痕模様が残る、小さければ素材に対する工具押込み回数が増加し、成形時間が増大する。

図12の白印は、図4の基本経路を1サイクルとし、その繰返し数 N_p の影響を示したもので、サイクル数の増大とともに曲率半径は減少し、形状誤差も減少する。つまり、加工サイクルの繰返しにより結果的に曲率の全体的な均一化がもたらされている。

また、より高精度な球面の形状を得るために、図5(2)-(c)の結果をフィードバックして形状誤差が負

となる中央部と外周部を非加工域とし、加工範囲を $r = 6 \sim 24$ mm に限定したプロセスで成形を試みた。図12の黒印がその結果で、1回だけの加工でも誤差が小さいが、サイクル数の増加に対する誤差の減少率も大きい。図13は $N_p = 3$ で加工を行った製品の写真である。

4.1.3 球面製品のひずみ分布 ひずみゲージを用いて測定した球面製品のひずみ分布を図14に示す。なお製品外周端での ϵ_θ は、成形後の製品外周長の実測値から計算した値である。この球面製品の曲率半径 r_w は75.3 mmである。製品の大部分の領域は $\epsilon_r, \epsilon_\theta$

>0で張出し変形であるが、外周部では $\epsilon_0 < 0$ となり、絞り変形が生じている。本成形法は一般の球面張出し成形と異なり素材外周部の拘束がほとんどないので、このように外周部に絞り変形を生じる。

4・2 だ円的曲面

4・2・1 だ円的曲面の成形法 だ円的曲面とは、一般に異なる二つの主曲率 $\kappa_1, \kappa_2 (=1/\rho_1, 1/\rho_2)$ をもつ曲面であり、分類上は球面もこれに含まれる。ここでは、製品形状の評価のために次のだ円面の式を用いた。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (a, b, c : \text{定数}) \dots\dots\dots (2)$$

図4の経路Aによってもだ円的な曲面を成形できるが、この方式では大きな偏平率を得ることが困難であるので、次のだ円面成形法を試みた。

① 図3の工具を用いて素材を曲率半径が均一な球面に予成形する。

② 図15(a)の工具を用いて予成形球面の x 方向曲率を増大させるとともに、 y 方向曲率を減少させてだ円面を得る。

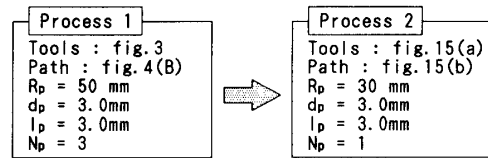
また、ここでは成形後の製品の対称性を考慮し、図15(b)の成形経路を用いた。

成形例を図16に示す。同図(c)から明らかなように、 x, y 軸方向に異なる曲率をもつ良好なだ円面が得られている。図16中の a, b, c の値は、球面の場合と同様に式(2)の曲面を当てはめたときの最適値であり、 ρ_x, ρ_y はこの a, b, c の値を用いて算出した素材中心での主曲率半径である。また、この計算上の理想曲面と、製品の z 軸方向の誤差を x, y 軸上について示したのが(d)である。この成形例での最大誤差は約0.2 mmであり、本方法による成形品は、式(2)で定義されるだ円面の形状によくあてはまる。以下では得

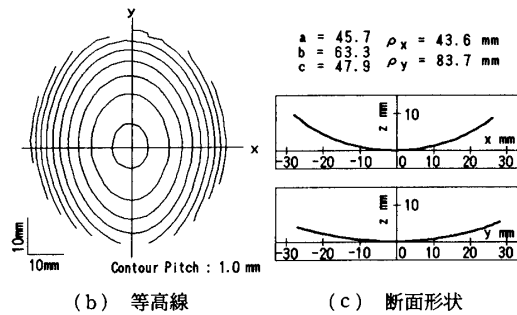
られた形状については ρ_x, ρ_y を用いて評価する。

4・2・2 諸加工条件が製品形状に及ぼす影響 ここではポンチ押し込み量、および球頭ポンチ曲率半径が製品の ρ_x, ρ_y に及ぼす影響を調べ、さまざまな ρ_x, ρ_y を得る方法を考察した。

図17はポンチ先端の曲率半径が $R_p = 30, 40, 50$ mmのときの、ポンチ押し込み量に対する製品中心部の

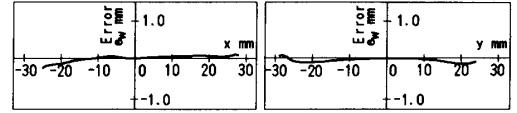


(a) 成形条件

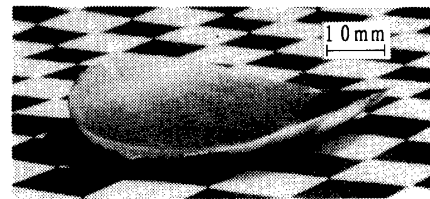


(b) 等高線

(c) 断面形状

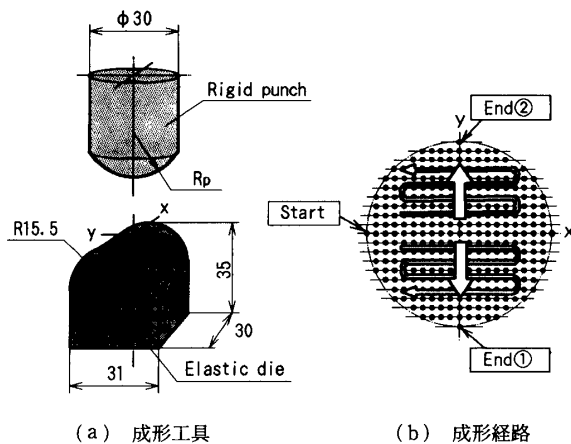


(d) 形状偏差



(e) 成形品

図16 だ円的曲面成形例



(a) 成形工具

(b) 成形経路

図15 だ円面成形工具

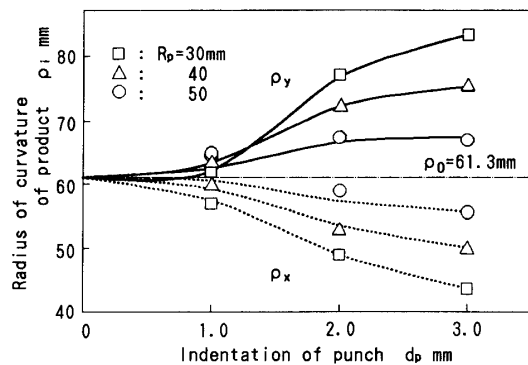


図17 工具押し込み量に対する主曲率半径の変化

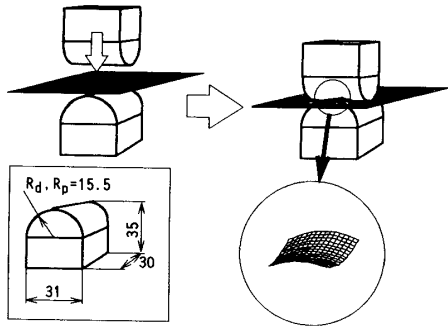


図 18 双曲的曲面成形法

主曲率半径 ρ_x, ρ_y により示したもので、 x, y 軸方向の曲率 ρ_x, ρ_y は、予成形球面の曲率半径 ρ_0 に対してそれぞれほぼ対称に減少および増加している。

以上の結果から、だ円面の成形において任意の主曲率半径 ρ_x, ρ_y が指定された場合、まず $(\rho_x + \rho_y)/2$ の曲率半径をもつ球面に予成形をし、その曲率半径 ρ_0 から $|\rho_x - \rho_y|/2$ に相当する曲率半径の変化を与えられる押し込み量で成形すれば、目的形状の製品を得ることができる。

4.3 双曲的曲面

4.3.1 双曲的曲面の成形法 双曲的曲面とは、面上の任意の点が双曲的(近傍が接平面の両側に存在する)で、一般にくら形と呼ばれる曲面である。ここでは、得られた形状を評価するために、次に示す二次の一葉双曲面の式を用いた。

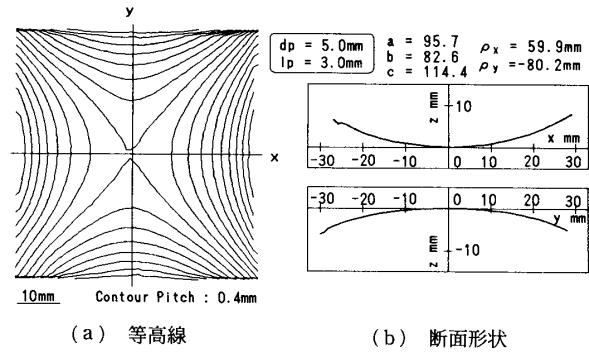
$$-\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (a, b, c : \text{定数}) \quad \dots\dots(3)$$

双曲面の成形では、1回のポンチ押し込みによる圧痕が双曲的になる図18に示す直交関係に配置した一組の半円柱状の弾性ポンチおよびダイスを用いる。

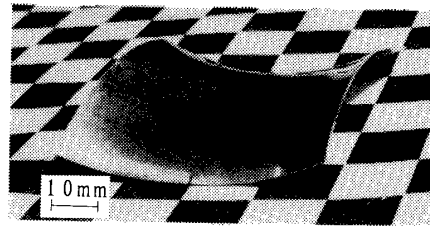
この方式は、2方向の曲率を同時に生成することをねらったものである。同図中の円内は工具1回の押し込みによる材料の変形を示したものであるが、本成形法は局所的なくら形変形を素材全体に柔軟に接続させていくものである。この工具を用いて、図15(b)のプロセスで加工を3サイクル繰返せば図19に示す良好な双曲面形状が得られる。

図19中の a, b, c の値はだ円面の場合と同様に製品の形状に対して最小二乗法を用いて式(3)の曲面を当てはめたときの近似値である。また、 ρ_x, ρ_y は製品の中心における主曲率半径である。

4.3.2 諸加工条件が製品形状に及ぼす影響 図20に、工具の押し込み量に対する製品中心での主曲率半径 ρ_x, ρ_y の変化を示す。工具押し込み量の増加により、 ρ_x, ρ_y はそれぞれ減少しているが、 $d_p = 7.0$ mm 付近



(a) 等高線 (b) 断面形状



(c) 成形品

図 19 双曲的曲面成形例

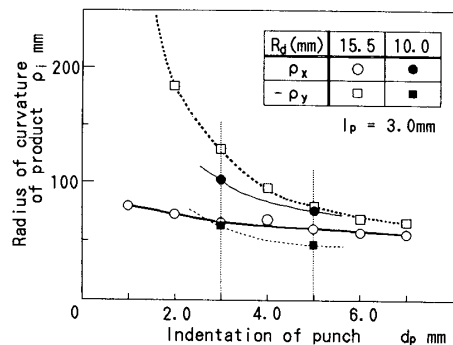


図 20 工具押し込み量に対する主曲率半径の変化

で曲線はほぼ水平になり、この工具を用いた場合に成形できる形状の限界となる。

ここで $\rho_x < \rho_y$ となっているのは、押し込みが x 軸方向に直線的に連続することによる曲げ変形が蓄積するためである。図20中の黒印は、半円柱ダイスの半径を $R_p = 10$ mm に変更した場合(ポンチ側は $R_p = 15.5$ mm)の結果を示したものであるが、 $R_d = 15.5$ mm の場合 $\rho_x < \rho_y$ であるのに対し、 $R_d = 10.0$ mm では逆に $\rho_x > \rho_y$ となる。したがって、押し込み量および上下工具の曲率を適切に調節すれば、 ρ_x, ρ_y を独立に制御することができる。

5. 結 言

本研究では、ダイスあるいはポンチとダイス部に弾性工具を用いる逐次プレス方式の自由曲面成形法を提案し、基本曲面の成形を試みた。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 直線的に連続する加工経路では、曲げ変形が直線方向へ蓄積し、製品形状に大きな影響を及ぼす。

(2) 球面は、(1)の曲げの蓄積が生じない周回経路により成形できる。また、加工域の選択および加工サイクル数の増加により形状精度を向上できる。球面成形時には、中央部では張出し、外周部では絞り変形が生じている。

(3) だ円的曲面は、球面の予成形と、半円柱ダイスによる成形の2工程により成形できる。また、この曲面形状は予成形の曲率半径と第2工程のポンチ押込み量により制御できる。

(4) 双曲的曲面は、稜線が直交関係に配置された半円柱弾性工具対により成形できる。この曲面形状は工具の曲率半径と押込み量により制御できる。

文 献

- (1) 中島, 機誌, 72-603 (1969), 498.
- (2) 李・中村・渡辺・坪, 塑性加工春季講演会論文集, (1992-5), 228.
- (3) 北澤・清野・村田, 塑性加工春季講演会論文集, (1992-5), 232.
- (4) 井関・加藤・坂本, 機論, 58-554, C (1992), 3147.