

CCD カメラとデータベースを用いた板材のハンマリング逐次成形*

森 謙一郎^{*1}, 大津 雅 亮^{*2}
藤 原 直 之^{*3}, 小坂田 宏 造^{*2}Hammering Incremental Forming of Sheet Metals Using
CCD Camera and DatabaseKen-ichiro MORI, Masaaki OTSU,
Naoyuki FUJIWARA and Kozo OSAKADA

An incremental forming system is developed as flexible forming of sheet metals. In this system, the sheets are bent into desired shapes by repeating local deformation due to the hammering. The forming process is divided into roughing and finishing operations. In the roughing operation, the sheet is hammered in accordance with a sequence stored in a database. On the other hand, the roughly formed shape is corrected into a desired one by hammering at points of large differences of shape in the finishing operation. The three-dimensional shape of the sheet during the forming is calculated from the distortion of grid pattern measured by a CCD camera system by means of the Fourier transform grid method. Aluminum square sheets are formed by an incremental forming machine with a set of hemispherical punch and rubber die. The sheet is moved by a rectangular coordinate robot to change the position for the local bending with the punch. The sheets are successfully formed into a sphere, frustum of cone, paraboloid and hyperboloid.

Key Words: Plastic Forming, Press Working, Measurement and Control, Image Processing, Shape Measurement, Incremental Forming, Hammering Forming, CCD Camera, Database, Three-Dimensional Shape

1. 緒 言

塑性加工は多量生産に適した方法であり、通常一つの製品に対して一組の工具が必要になる。しかしながら、近年多品種少量生産の傾向が強まり、フレキシブルな塑性加工法の開発が望まれている。逐次成形は局部変形を繰返すことによって製品を所定の形状に成形する方法であり、一組の工具で各種の製品に対応でき、しかも局部変形であるために加工力が小さい。逐次成形は板材成形、鍛造加工、スピニング加工などに応用されている。

逐次成形において最もフレキシブルな方法はハンマリング成形法であり、素材をハンマで連続的に叩くことによって所定の形状に成形し、板材の曲げ加工に利用されている。ハンマリング成形は、成形の自由度が大きいためハンマで叩く経路を決定することは容易ではなく、成形条件は熟練者の経験によって決定されているのが現状である。長谷部ら⁽¹⁾は、ハンマリング

成形における単純な経路の変形挙動を有限要素法および上界法によって解析している。一方、松原ら⁽²⁾は特定の形状に対してハンマが叩く経路を示している。また、著者ら⁽³⁾は遺伝的アルゴリズムを基礎としたハンマが叩く順番を決定する方法を提案している。ハンマリング成形を工業的に利用するためには、任意の製品形状に対して成形条件を設定できる方法を開発する必要がある。

最近 CCD カメラの性能向上と価格低下により、CCD カメラが各種の分野に応用されるようになり、塑性加工の分野でも使用されている。坂本ら⁽⁴⁾は CCD カメラによって成形された板材の形状およびひずみ分布を測定している。また、Oenoki ら⁽⁵⁾は曲げ加工において板材の形状をオンラインで測定し、スプリングバックの補正を行って所定の形状に成形している。CCD カメラは、ビジュアルセンサとして形状、ひずみなどの分布情報が得られるために、オンライン制御に対して有効である。CCD カメラを逐次成形に応用すると制御に必要な情報が得られ、自動成形システムを開発できる可能性がある。

本研究では、板材のハンマリング成形において CCD カメラを応用して成形中の形状をオンラインで測定し、自動成形を試みる。成形プロセスを粗成形と

* 原稿受付 1997年8月1日。

^{*1} 正員、豊橋技術科学大学生産システム工学系(☎441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。^{*2} 正員、大阪大学大学院基礎工学研究科(☎560-8531 豊中市待兼山町1-3)。^{*3} 大阪大学大学院。

仕上げ成形に分け、データベース化された成形経路と CCD カメラによる形状測定をそれぞれに応用する。

2. データベースを用いた粗成形

2.1 成形プロセス ハンマリング成形では、板材を工具で局部的に変形させ、それを繰り返すことによって板材を所定の形状に成形する。所定の形状に板材を成形するためには、成形する経路を適当に制御する必要があるが、成形経路は自由度が大きく、その決定は一般に容易ではない。本研究では、ハンマリング成形において経路を決定して自動成形を試みる。

ハンマリング成形では、板材を局部的に変形させ、それを繰り返すことによって所定の形状に成形するが、それぞれの局部変形において工具で変形させた部分だけでなく、その周りも変形するため成形が困難になる。局部だけの変形では、形状差の大きい部分を変形させることを繰り返せば所定の形状になるが、周りの部分も変形するためにその方法では所定の形状には成形できない。著者ら⁽⁶⁾は周りの変形の影響を考慮した成形経路の決定法を提案しているが、非常に組合せが多いことおよび変形を単純化したことによって成形精度は高くない。これは計算だけで成形経路を決定することが困難なことを示唆している。

本研究では、知識処理と計測技術を用いて制御を行い、ハンマリング成形の自動化を行う。ハンマリング成形では、熟練者は経験によって得られた一連の経路

に従って成形を行っている。そこで、各種の形状に対する成形経路をデータベース化し、それを参照することによって自動成形を達成することを考える。しかしながら、材料特性、板厚などによって参照した成形経路だけでは多少の誤差が生じるため、最後に所定の形状との差が大きい部分だけを修正して仕上げを行う。参照した経路に従う工程を粗成形、誤差を修正する工程を仕上げ成形とする。

2.2 データベースの構築 粗成形に用いる経路のデータベースを構築する。本研究では、簡単化のために軸対称製品を対象とし、球面および円すい台面を取扱う。図1に示すように、板材を円形経路に沿って工具で連続的に変形させる。工具で変形する円形経路の順番 n 、工具の押込み量 u 、工具で変形する間隔 a 、円形経路の間隔 b などが成形パラメータになる。

予備実験において、成形パラメータを表1に示すように変化させて、データベースに蓄積する情報を収集する。板材は円形経路に沿って板材の外周から中心に向かって成形される。これは板の外周を先に拘束することによって、成形された形状の凹凸を少なくするためである。しかしながら、円すい台面の場合は角部を成形するために、外周から角部まで成形しその後中心から角部まで成形する。成形された形状の凹凸を少なくするために、各円周経路において工具による押込みを開始する点を 90° ずつ移動させる。

2.3 成形経路の決定 粗成形における成形経路は、データベースの中から似た形状を検索することによって決定する。球面および円すい台面の目標形状に対して、図2に示すように形状を正規化し、斜線部の面積に対して比較を行って、目標形状に近い経路を選択する。

データベースに蓄積した経路は、板材を連続的に成形していくため全体的な情報を考慮したものである。ハンマリング成形では、全体的な形状を考慮しながら加工を行わないと特定の形状に成形できないため、基

Table 1 Parameters in preliminary experiment used for construction of database

Path sequence	
Sphere	15-11, 9, 7, 5, 3
Frustum of cone	15- n_c , 0, 3-(n_c-1) $n_c=8, 9, 10, 11, 12$
Distance between hammering points a /mm	9
Distance between paths b /mm	2
Punch displacement u /mm	1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

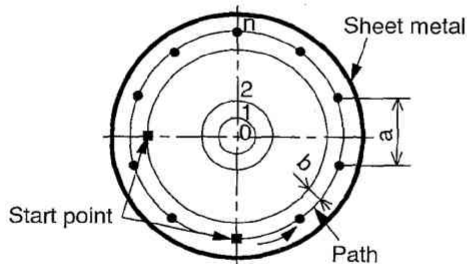


Fig. 1 Hammering paths and parameters for axisymmetrical part

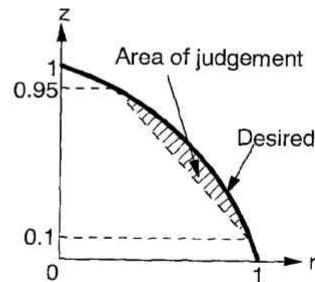


Fig. 2 Normalization of cross-sectional shape of desired part

本的な経路をデータベース化している。熟練者の経験から得られた成形パターンをデータベースに入れると、熟練者の成形方法を模倣でき、高度な成形が行える。

3. CCD カメラを用いた仕上げ成形

3.1 仕上げ成形 粗成形された板材は仕上げ成形で所定の形状に仕上げられる。仕上げ成形では、成形中の板材の形状を逐次測定して目標形状との差を求め、その差を小さくするように板材を目標形状に仕上げる。この場合、粗成形と異なって工具で連続的に成形するのではなく、形状差の大きい部分だけを工具で変形させて形状を修正していく。

3.2 CCD カメラによる測定 仕上げ成形では、板材の三次元形状の測定結果を基にして、成形形状を修正する。三次元形状の測定は、一般に触針、レーザ光線などを局部に当て、それを走査することによって行っている。しかしながら、走査式は測定時間が長くなり、装置も単純でない。そこで、CCD カメラによって面積報を取り込み、その情報を画像処理することによって三次元形状を求める。CCD カメラはコンピュータと組合せることが容易であり、リアルタイムでの測定が可能になる。

CCD カメラによる測定では、図3に示すように板材に直交格子を投影することによって三次元形状を求める。基準平面に格子を投影すると格子のゆがみはないが、変形された板材では格子がゆがみ、二つの画像の差、すなわち変位から三次元形状を画像処理によって求める。

3.3 フーリエ変換格子法⁽⁶⁾ CCD カメラでは、画素ごとに情報が得られるため、測定精度が従来の走査式のものよりも低下する。測定精度を向上させるために、図4に示すように測定された画素ごとの濃度情

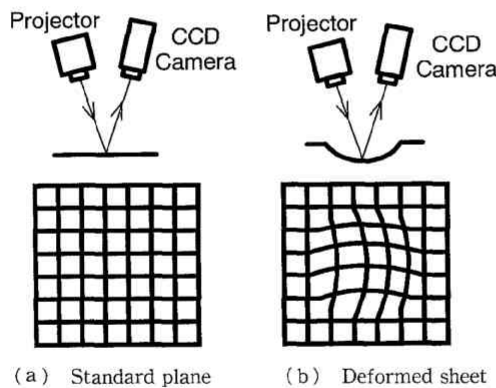


Fig. 3 Distortion of grid pattern projected on deformed sheet

報をフーリエ変換によってなめらかな曲線に補間して変位分布を求める。このような補間を行うことによって変位分布が連続して求まり、画素よりも小さな解像度を持つことになる。

CCD カメラで撮影された格子画像は二次元であり、それぞれの方向に対してフーリエ変換を行う。基準平面の格子画像に対する x 方向の濃度分布 $f(x)$ をフーリエ級数展開すると、次式が得られる。

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp \{jn\omega_0(x-x_0)\} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_n = 2C_0 \sin(n\omega_0 b_0/2) / (n\omega_0 b_0)$$

$$\omega_0 = 2\pi/p_0$$

ここで、 p_0 は格子のピッチ、 b_0 は格子線の幅、 C_0 は零次調和波の振幅の半分である。変形された板材の格子画像に対する x 方向の濃度分布 $g(x)$ は、式(1)で表される変形前の濃度分布を変位 $u(x)$ だけ移動させたものになり、フーリエ級数展開すると、次式が得られる。

$$g(x) = f\{x-u(x)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp \{jn\theta(x)\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\theta(x)$ は位相値である。

$$\theta(x) = \omega_0 \{x-u(x)-x_0\} \dots\dots\dots (3)$$

フーリエ級数展開において、最も周波数の大きい余弦波を表す一次調和波 $g_1(x)$ によって濃度分布を補間する。

$$g_1(x) = C_1 \exp \{j\theta(x)\} \dots\dots\dots (4)$$

測定された濃度分布から一次調和波を直接抽出するのは困難であるため、濃度分布をフーリエ変換して周波数スペクトルを求める。そして、一次調和波の部分だけを逆フーリエ変換すると、位相値の実部 $R\{g_1(x)\}$ と虚部 $I\{g_1(x)\}$ が得られる。

$$\theta(x) = \tan^{-1} \frac{I\{g_1(x)\}}{R\{g_1(x)\}} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)に式(3)を代入すると、変位分布は次のように表される。

$$u(x) = x - x_0 - \left[\tan^{-1} \frac{I\{g_1(x)\}}{R\{g_1(x)\}} \right] / \omega_0 \dots\dots\dots (6)$$

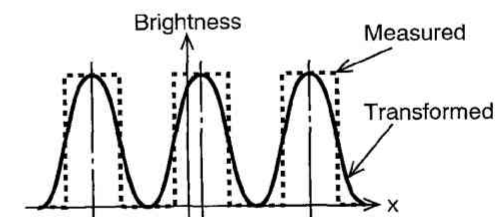


Fig. 4 Transform of distribution of measured brightness into smooth curve

式(6)より、濃度分布が変位分布に変換され、連続的な変位分布が求まる。

3.4 原点の自動探索 ある点を位相値の原点として変位を求めるが、その原点の目印を板材に投影するとそれも画像処理されるために誤差が生じる。また、ハンマリング成形を自動で行うためには、原点も自動的に見つける必要がある。

原点を自動的に探索する手順を図5に示す。原点を格子線の交点の一つに置き、その大きさは測定されるノイズよりも十分大きいものとする。取り込んだ画像を2値化 [図5(a)] し、原点が十分とぎれるまで白色格子点の周囲にある8個の格子点を白色に変える [図5(b)]。次に格子線を1画素になるまで細線化していき、格子線のとぎれた4箇所の平均の画素を基準点とする。ノイズは小さいため、とぎれなくこの処理で除かれる [図5(c)]。その後変位分布を求めるために、元の画像において原点の白い部分を周囲の格子線の輝度値に置き換える [図5(d)]。

3.5 三次元形状計算法 フーリエ変換格子法か

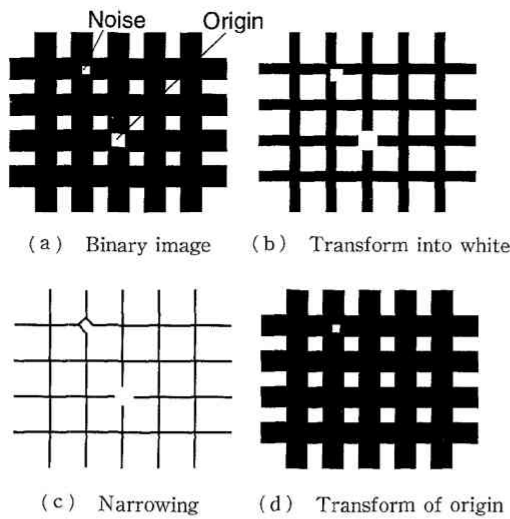


Fig.5 Treatment for searching origin of measured image

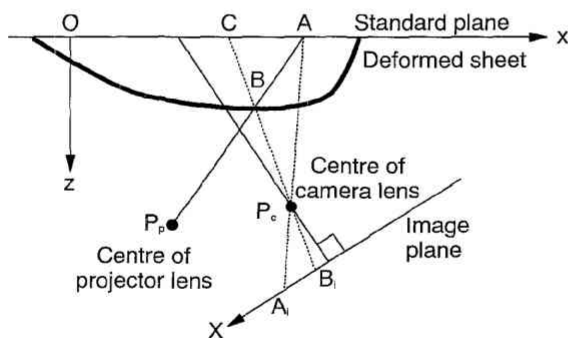


Fig.6 Method for calculating three-dimensional shape

ら得られた変位分布を用いて、板材の三次元形状を計算する。この場合、プロジェクタと CCD カメラのレンズ中心 P_p, P_c の位置は測定されているものとする。

得られた変位分布から三次元形状を計算する原理を図6に示す。プロジェクタから投影された格子に対して、基準平面上では点 A になるが、そこに板材を置くとそれに対応する点は点 B になり、それが投影された画像平面上では点 A_i が変位して点 B_i になる。画像平面上の点 A_i と B_i を座標変換して、基準平面上の点 A と C の位置を求める。線 $A-P_p$ と $C-P_c$ の交点から点 B の z 座標が得られる。この処理を画像全面について行うことにより、板材の三次元形状が計算できる。本測定法で直径 100 mm の円筒を測定した結果、最大誤差は 0.71 mm, 平均誤差は 0.29 mm であった。

成形された板材に対して画像処理を行ったプロセスを図7に示す。基準平面に成形された板材を置くと図7(b)に示すように格子がゆがみ、それを逆フーリエ変換すると図7(c)が得られる。位相値、変位分布が計算されて最終的に z 座標の分布が求まり、色が薄い

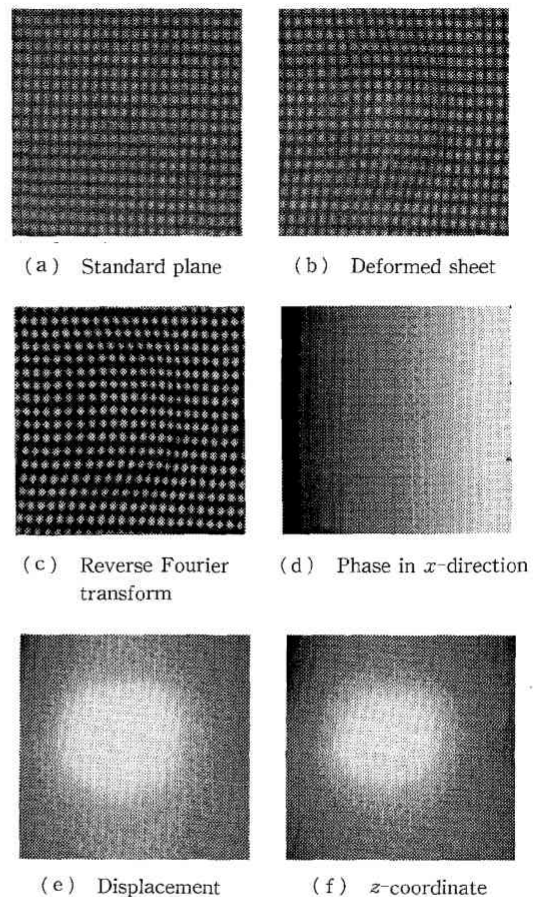


Fig.7 Calculation of three-dimensional shape by image processing

ほどz座標が大きい。

4. 実験方法

4.1 成形装置 CCDカメラを用いたハンマリング成形装置を図8に示す。ポンチは鋼製の球頭であり、板材を曲げやすくするためにダイスはゴム製である。板材は曲がることできるように、保持フレームにはばねで取付けられている。ポンチは油圧で駆動され

Table 2 Conditions for measurement of three-dimensional shape of sheet using CCD camera

Grid pitch /mm	2.0
Black and white ratio of grid	1:1
Number of pixels /pixel	256x256
Number of colors	256
Number of measuring points	400

Table 3 Conditions used for incremental forming of aluminum square sheet

Dimension of sheet /mm	80x80x1
Punch displacement /mm	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
Roughing	1.0
Finishing	1.0
Distance between hammering points /mm	3.0
Radius of sphere /mm	67
Frustum of cone /mm (h:height, r ₁ :upper radius, r ₂ : lower radius)	h=12, 14, r ₁ =12, r ₂ =30
Paraboloid r, z /mm	$z = -0.015r^2$
Hyperboloid r, z /mm	$(r/20)^2 - (z/16)^2 = -1$

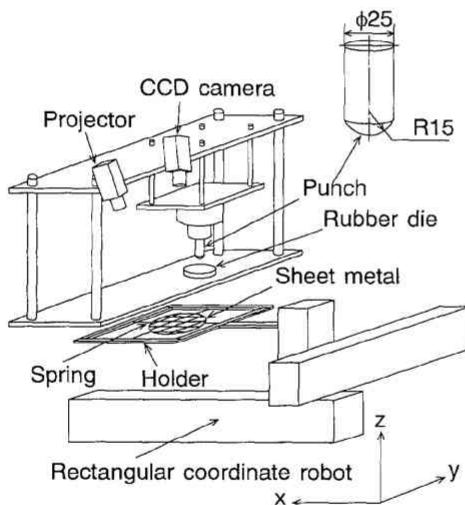


Fig. 8 Incremental forming machine with hemispherical steel punch and rubber die

ており、押し込み量を調節できる。保持フレームを直交形ロボットで動かし、板材の任意の点をポンチで押し込む。

ポンチで成形する場所で格子を投影して CCDカメラで測定を行うのは困難であるため、ロボットによって板材を装置の外に一度移動させて測定を行う。CCDカメラの測定条件を表2に示す。CCDカメラで測定された情報はパーソナルコンピュータに送られて三次元形状が計算され、それに対して直交形ロボットを動かして所定の点を成形する。

4.2 成形条件 ハンマリング成形条件を表3に示す。板材は正方形のアルミニウム板である。粗成形ではポンチの押し込み量を変化させるが、仕上げ成形では一定の小さい値で形状を修正して目標形状に近づけていく。球面および円すい台面のほかに、双曲面およ

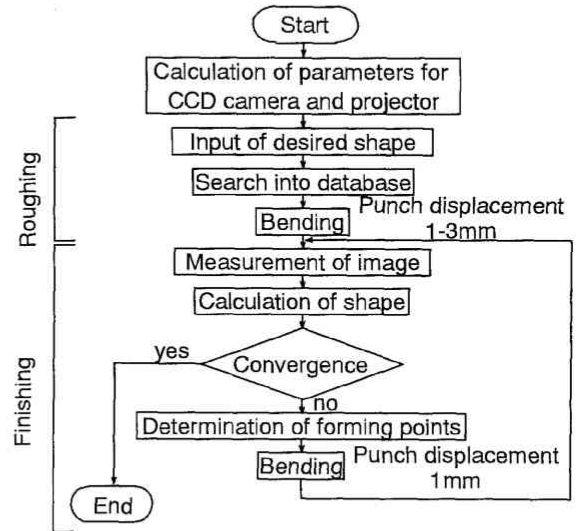


Fig. 9 Flow chart of hammering forming

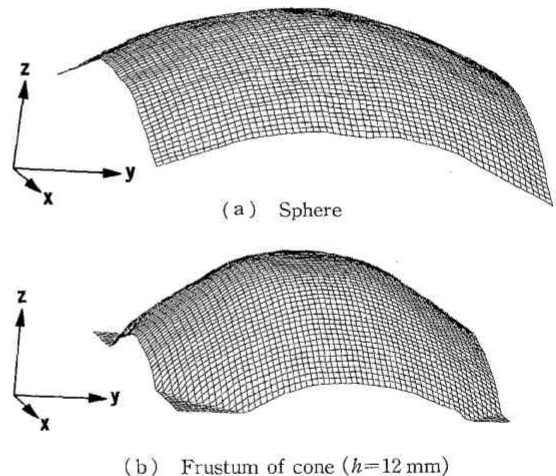


Fig. 10 Measured shapes of formed sheet using laser displacement sensor

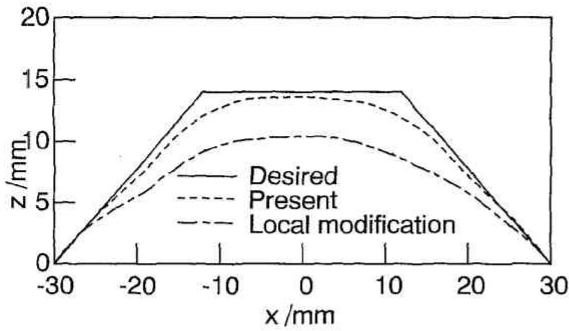


Fig. 11 Central cross-sectional shapes for formed frustum of cone obtained by present and local modification methods ($h=14$ mm)

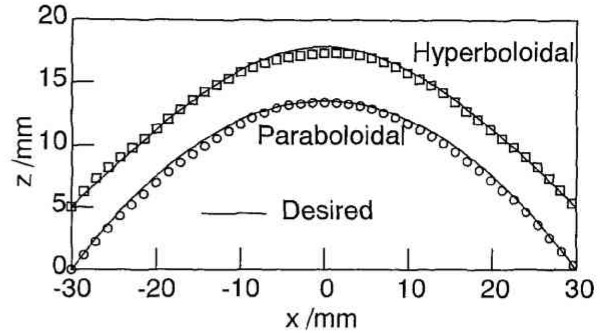


Fig. 13 Central cross-sectional shapes for formed paraboloid and hyperboloid

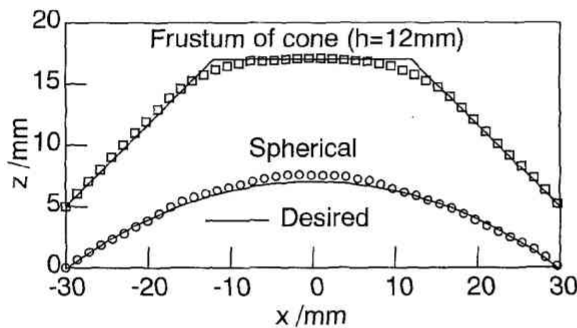


Fig. 12 Central cross-sectional shapes for formed sphere and frustum of cone

び放物面の成形も行った。

ハンマリング成形の手順を図9に示す。データベースの中から目標形状に近いものを選択して成形経路を決定し、それによって粗成形を行う。その後 CCD カメラで形状を測定して形状差の大きい点を5点選んでポンチで押し込んで形状を修正し、それを繰り返すことによって目標形状に成形する。ポンチで5点押し込むごとに CCD カメラで形状を測定する。本実験装置では装置内での測定が困難であったが、装置内で測定が可能になるとポンチで押し込むごとに測定ができ、より高精度な制御が行える。

5. ハンマリング成形

球面および円すい台面にハンマリング成形された形状を図10に示す。レーザ変位計を走査して測定した結果であり、ほぼ所定の形状に成形されている。

仕上げ成形では、形状差の大きい部分を工具で変形させて目標形状に近づけている。成形開始から形状差の大きい部分を局部的に変形していくと目標形状に成形できる可能性がある。局部的に形状を修正する方法は、粗成形におけるデータベースを必要としないため、単純な方法である。局部形状修正法と本解析法によって成形された円すい台を図11において比較する。本

解析法の結果はほぼ円すい台に成形されているが、局部形状修正法では大きな誤差が生じている。データベースに蓄積されたデータは一種の経験とみなすことができ、ハンマリング成形では経験的な知識を利用することが实际的である。

成形された球面と円すい台面の中央断面形状を図12に示す。球面と円すい台面の最大誤差はそれぞれ 0.34 mm と 1.2 mm である。ポンチが球頭であるため、円すい台の角部を鋭利に成形することは困難であり、この部分で誤差が大きくなっている。

データベースには球面および円すい台面に対する成形経路だけを蓄積したが、近い形状も取扱えるかを調べた。双曲面および放物面において成形された中央断面形状を図13に示す。二つの形状に対する最大誤差は約 0.6 mm であり、本成形法はデータベースに蓄積されていなくても近い形状であれば成形が可能である。

6. 結 言

本研究では、板材のハンマリング成形において自動成形の方法を提案した。成形プロセスを粗成形と仕上げ成形に分け、粗成形ではデータベースから近い工程を選択してそれによって成形を行い、仕上げ成形では CCD カメラで板材の三次元形状を測定して形状差の大きい部分を変形させて所定の形状に近づけた。ハンマリング成形の熟練者は、経験から得られた経路に従って成形を行い、逐次成形形状を観察して目標形状にならない部分を修正しており、本成形法は熟練者の成形方法と似ている。本成形法は知識処理と測定技術を組合せたものであり、このような組合せは加工機械の知能化に対して有効である。

文 献

- (1) 長谷部忠司・島進, 塑性と加工, 35-406(1994), 1323-1329.

- (2) 松原正基・田中繁一・中村保, 機論, **60**-573, C(1994), 1835-1842. 92-97.
- (3) 森謙一郎・山本政男・小坂田宏造, 機論, **62**-603, A (1996), 2456-2461. (5) Oenoki, T. and Otani, T., *Proc. 5th Int. Conf. Tech. Plasticity*, **2**(1996), 579-582, Columbus.
- (4) 坂本誠・沢田孚夫・篠塚幸雄, 塑性と加工, **38**-432(1997), (6) 森本吉春, 非破壊検査, **44**-7(1995), 505-514.
-