

# 圧電素子駆動による鍛金加工に関する研究

笹田 昌弘

## 1. はじめに

多品種少量生産では、特定の金型を使用せず多様な成形を可能にする「インクリメンタルフォーミング」への期待が大きくなってきている。インクリメンタルフォーミングとは、単一の工具を移動させながら行う加工方法であり、成形自由度が高い加工法である。鍛金加工はインクリメンタルフォーミングの一つであり、ハンマーにより板材を叩いて伸ばし、叩く位置を変えながら加工を行う方法である。

これまでの鍛金加工に関する研究では、鍛金加工の数値制御化が検討されている<sup>1)</sup>。また、ハンマーの叩き方に対する局所部分の変形挙動などが検討されている<sup>2)</sup>。本報では、著者らがこれまでに検討してきた汎用NCフライス盤を利用した鍛金加工について紹介する。

## 2. ハンマーの試作

### 2.1 ハンマー

鍛金加工により立体形状の創成を行うためには、ハンマーを移動させながら材料を繰り返し叩くことが必要となる。つまり、ハンマーの移動及びハンマーにより材料を叩く運動の2つが求められる。ハンマーの移動は、汎用NCフライス盤のスピンドルヘッドにハンマーを取り付けることで可能となる。一方、ハンマーはスピンドルヘッドに取付け可能な大きさであることが必要となる。そこで、小型化を実現するため、ハンマーの駆動源として圧電素子の伸縮を利用することとした。圧電素子に印加する電圧波形を変化させることでハンマーの発生力及び材料を繰り返し叩く速度を変化させることが可能となる。試作したハンマーを図1に示す。打抜き加工へ圧電素子を適用した研究<sup>3)</sup>を参考にし、変位拡大機構を利用して圧電素子の発生変位を拡大し、ピンを運動させることとした。上部が拘束されているため圧電素子はZ軸のマイナス方向に膨張し、C部がZ軸のマイナス方向に移動する。これにより、a''はa'を支点として回転運動することになる。つまり、A部は回転運動することになる。同様にB部も圧電素子の膨張により回転運動することになる。A部及びB部が回転運動することでD部は直動しながらZ軸のマイナス方向に移動する。材料を叩くためのピンをD部に取り付けることで、鍛金加工のハンマーとして利用する。D部に取り付けたピンの先端はR0.5の球状になっており材

質は硬鋼線材(SWRH42A)である。変位拡大機構の材質はS50Cである。使用した圧電素子は、TOKIN製のNLA-10×10×18であり、2個を直列にして使用した。圧電素子の特性を表1に示す。

### 2.2 ハンマーの特性

試作したハンマーの特性を把握するため、圧電素子に印加した電圧とD部の変位及び発生力の関係を調べた。発生力の測定に関しては、ハンマーのピン先端と被加工材の隙間の発生力への影響を調べるため、先端部Dと荷重計の初期隙間hの発生力への影響も確認した。図2にハンマーの変位及び発生力と印加電圧の関係を示す。1個の圧電素子に100V印加した場合に発生する変位が15 $\mu\text{m}$ であるのに対し、変位拡大機構を用いることにより、90Vの電圧を印加することで250 $\mu\text{m}$ の変位が発生している。一方、発生力に関しては、同じ電圧を印加した場合、初期隙間が小さいほど発生力が大きいことがわかる。

## 3. 鍛金加工

### 3.1 加工装置

加工装置の概略図を図3に示す。以下、本加工装置を1号加工装置と呼ぶこととする。ハンマーとサポートアームを小型NCフライス盤(ローランド社製

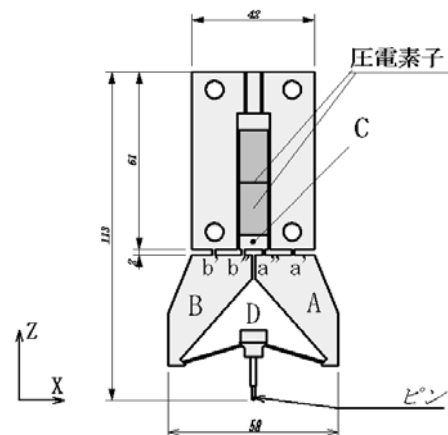


図1 圧電素子を内蔵したハンマーの概略図

表1 圧電素子の特性

寸法	10×10×18 mm
容量	6.5 $\mu\text{F}$
変位	15 $\mu\text{m}$ / 100V
発生力	3430 N / 100V

CAMM-3)のスピンドルヘッドに取り付けることで、Z方向に移動させながら加工を行う。サポートアームには、ハンマーの先端と同様に先端が球状 (R1) であるピンを取り付けた。つまり、サポートアームに取り付けられたピンの先端の上でハンマーの先端に取り付けたピンにより被加工材が叩かれることになる。被加工材支持台はNCフライス盤のXYテーブルに取り付けられる。支持台は中央に円形の穴(直径80mm)の開いた平板(100mm×100mm×5mm)であり、この上に被加工材を固定して加工を行う。成形は加工ピンの加工動作、加工部のZ方向移動、XYテーブルの材料移動により行われる。加工部及び材料移動はプログラム制御による。

### 3.2 成形方法と成形条件

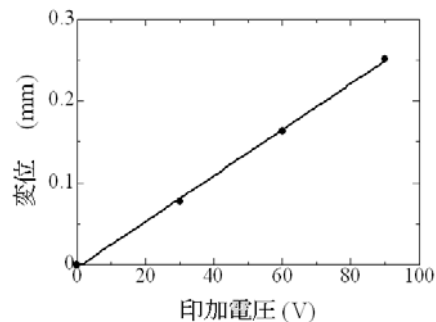
被加工材には厚さ 0.1mm、85mm×85mm の銅の板材 (JIS:C1020P 1/4H) を使用した。まず円筒形状の成形を試みた。加工条件を表 2 に示す。圧電素子への印加電圧は、周波数 5Hz のサイン波形により与えた。半径増分ごとに円を描きながら、円筒の最外径より中心方向に移動させ、深さ方向へ移動した後、円筒の中心より最外径方向に移動させるツールパスを繰り返すことで加工を行った。

半球形状とドーナツ形状の成形も試みた。半球形状とドーナツ形状の成形における加工条件を表 3 に示す。ドーナツ形状の成形におけるツールパスに関しては、まず外径 10mm、深さ 3mm の形状を加工する。続いて加工された内側を直径 5mm の円筒状に成形しながら深さ 0mm の位置まで戻る経路をとる。半球体は徐々に直径を小さくしながら深くして成形する。

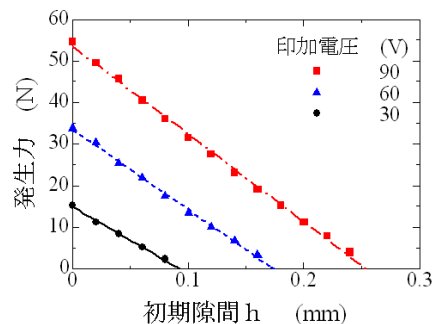
### 3.3 実験結果

円筒形状成形品の一例を図 4 に示す。また、形状測定器により計測した結果を図 5 に示す。目標形状とは寸法がやや異なるが、成形された形状は円筒形状になっている。円筒の先端部分 A は目標形状に近い形状が成形されているが、円筒の根元部分 B に近づくとつれて異なることがわかる。ドーナツ形状成形品の一例を図 6 に示す。また、形状を測定した結果を図 7 に示す。図 8 及び図 9 に半球形状の成形品を示す。直径 9mm の半球形状を目標形状として加工した場合、成形された製品の深さは 4.49mm であり、設定値(4.5mm)とほぼ同じ値が得られた。

以上より、本研究で用いたツールパスにより角部を有するような凹凸の厳しい形状を成形するためには、材料を局部的に大きく引き伸ばすことが必要となり成形が困難になると考えられる。一方、球形のように角部を有さない形状を成形する場合には、材料を局部的に大きく引き伸ばす必要がないため、目標形状に近い形状が成形可能であると考えられる。



(a) 印加電圧と変位の関係



(b) 印加電圧と発生力の関係

図 2 ハンマーの特性

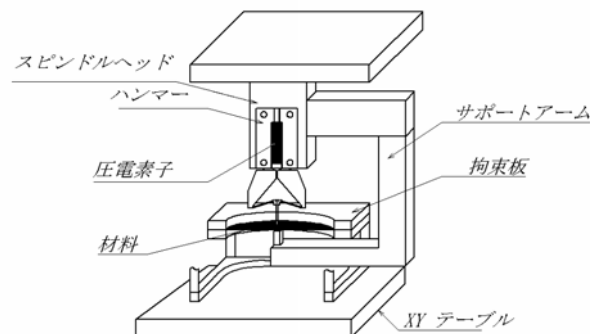


図 3 加工装置の概略図 (1号加工装置)

表 2 加工条件 (円筒形状)

印加電圧 (V)	80
周波数 (Hz)	5
半径方向増分 $R_p$ (mm)	0.25
深さ方向増分 $Z_p$ (mm)	0.2

表 3 加工条件 (ドーナツ及び半球形状)

印加電圧 (V)	80
周波数 (Hz)	5
半径方向増分 $R_p$ (mm)	0.1
深さ方向増分 $Z_p$ (mm)	0.1

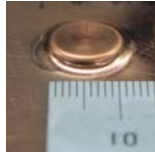


図4 円筒形状の製品 (外径: 10mm)

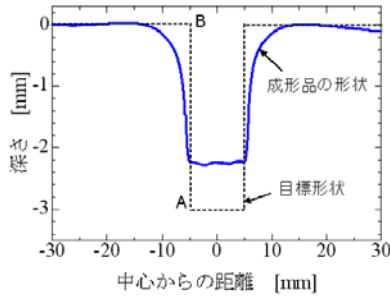


図5 成形品形状と目標形状の比較 (円筒形状)

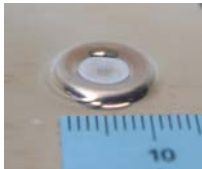


図6 ドーナツ形状の製品 (外径: 10mm, 内径: 5mm)

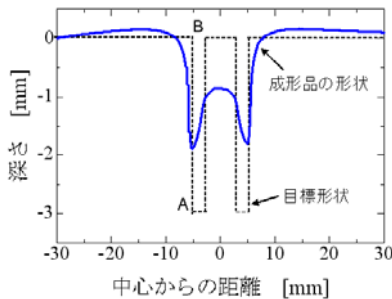
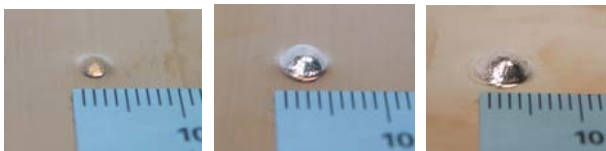


図7 成形品形状と目標形状の比較 (ドーナツ形状)



(a)直径: 3 mm (b)直径: 4 mm (c)直径: 5 mm



(d)直径: 6mm (e)直径: 8mm (f)直径: 9 mm

図8 半球形状の製品

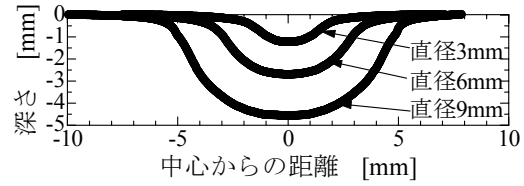


図9 成形品の形状 (半球形状)

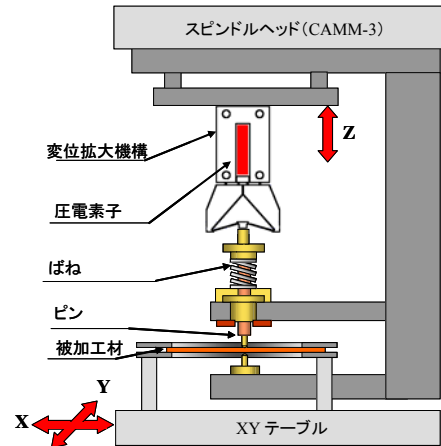


図10 加工装置概略図 (2号加工装置)

#### 4. 加工装置の改良

##### 4.1 加工装置の改良

1号加工装置では、加工ピンが拡大機構に直付け構造であるため、移動中の材料にピンが接触すると、ピンが引きずられる。このため、加工条件によっては、ハンマーに破損が生じ易いなどの問題が確認された。これを解決する方法としては、ハンマーとXYテーブルの運動を制御する方法と、中継装置を利用する方法が考えられる。ここでは、図10のような中継装置を用いた方法による加工結果を紹介する。以下、本装置を2号加工装置と呼ぶこととする。ハンマーによる発生力は中継棒を介して加工ピン(先端丸み1mm)に伝達される。加工ピンに対向する位置に固定ピンが設置され、加工ピンと固定ピンの間で加工が行われる。

2号加工装置で用いた圧電素子は、NECTOKIN製 AE1010D44H40 (寸法: 10×10×40mm, 発生力 3500N, 発生変位 42μm) である。なお、2号加工装置のハンマーでは、変位 0.3mm, 発生力 100N 以上の特性を有していることを実験より確認している。

##### 4.2 成形方法と成形条件

本加工では板厚減少により生じた表面積の拡大で側壁が成形されると考えられる。従って板厚減少を増大させる程成形形状がツールパスに近づくと考えられる。そこで、以下の実験を行った。加工条件は、80V, 50Hz, XYテーブルの送り速度を 120mm/min, 被加工材は 0.1mm 厚, 90mm 四方の銅箔材 (JIS:C1020P 1/4H) である。

### (1) 基礎実験

同じ箇所を複数回加工することによる板厚への影響を調べるため、長さ 20mm の直線上を繰返し加工した。加工を繰返した数(加工回数  $n$ )は、1,5,10,20,30 回である。

### (2) 成形実験

加工回数  $n$  の影響を調べるため、以下の 2 種類の実験を行った。成形する目標形状は、直径 5mm、深さ 3mm の円筒である。

①半径方向増分  $R_p$  0.1mm で円中心から外側へ加工する。この 1 工程(加工回数  $n=1$ )の後、スピンドルヘッドを所定量(深さ増分  $Z_p$  0.1mm)移動し、円筒を加工する。

②加工回数が 5 回( $n=5$ )の場合の円筒加工を行った。 $n=1$  の工程後、 $n=2$  の工程として工具を半径方向増分  $R_p$  0.1mm で、外側より円中心へ移動させた。このような工程を 5 回行い、工具を深さ方向へ移動させた。深さ増分  $Z_p$  は 0.1mm である。

## 4.3 実験結果と考察

### (1)繰返し加工の影響

直線加工で得られた板厚ひずみ変化を図 11 に示す。一定の発生力では加工回数が増すにつれ板厚ひずみ増加の割合が低下することがわかる。

### (2)円筒成形における加工条件の影響

加工回数 1 回と 5 回の場合の成形形状を図 12 に、板厚分布を図 13 に示す。加工回数が 1 回の場合と比較すると 5 回の場合、より深く成形されている。また、板厚は加工回数 5 回の方が減少していることがわかる。これらのことから、加工回数が 5 回の場合には円筒側壁を成形するのに十分な表面積拡大が得られ、成形深さが増したと考えられる。

## 5. おわりに

圧電素子駆動によるハンマーを試作し、汎用 NC フライス盤とともに用いて鍛金加工を行った結果を紹介した。本鍛金加工システムでは、半球などを加工する場合には、ある程度の寸法精度で製品が得ら

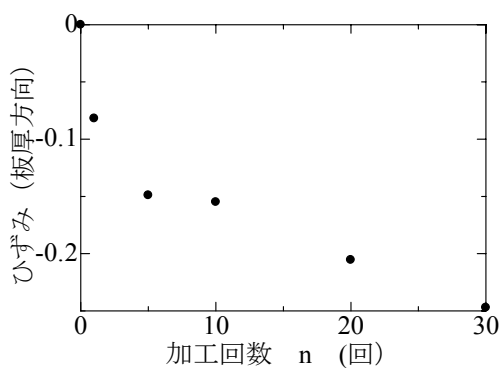


図 11 加工回数とひずみの関係

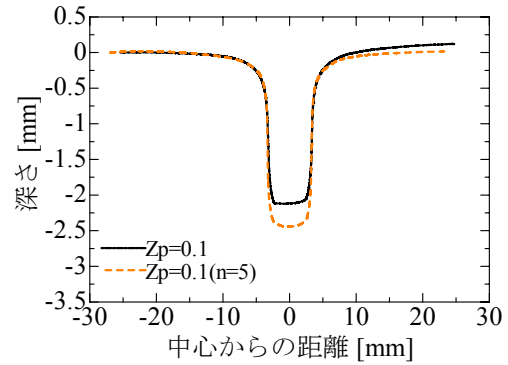


図 12 成形品形状への加工回数  $n$  の影響

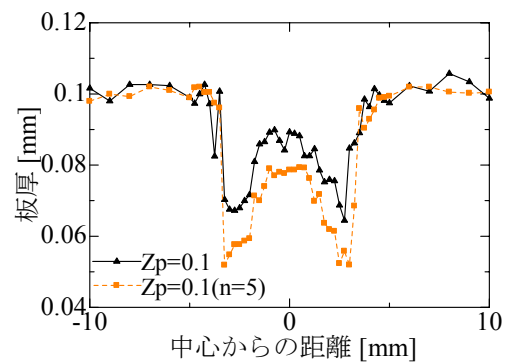


図 13 厚さ分布

れるが、角部などを有する場合の成形では精度が低下する。円筒形状を加工した実験結果より、繰返し加工回数を増やすと、成形品形状がツールパスに近づくことが分かった。今後、ツールパス、半径方向増分、深さ方向増分及び繰返し加工回数等の影響を詳細に調べ、適切な工程設計によりさらなる製品の寸法精度の向上が望まれる。

## 参考文献

- 1) 中島尚正: 鍛金加工の数値制御化, 塑性と加工, 20-223(1979),696-700.
- 2) 長谷部忠司, 島進: ハンマリングによるフレキシブル成形法に関する研究, 塑性と加工, 35-406(1994), 1323-1329.
- 3) I.Aoki, M.Sasada, T.Higuchi, T.Yano: Development of Micro-Piercing System with Punch-Damage Monitoring System, J. Mater. Process. Technol., 125-126(2002), 497-502.

## 謝辞

本研究の実施にあたり財団法人天田金属加工機械技術振興財団の奨励研究助成を賜りましたことを付記し、謝意を表します。