密閉形水中放電成形法によるアルミニウム箔の 深絞り成形に関する実験的研究[†]

横井 真* 桐村 剛**
長谷部 忠司*** 今井田 豊***

Experimental Study on Deep Drawing of Aluminum Foil by Using Closed Type Hydro Spark Forming Method

by

Makoto YOKOI*, Tsuyoshi KIRIMURA**, Tadashi HASEBE***
and Yutaka IMAIDA***

This study investigates the deep drawing of aluminum foil by using the closed type hydro spark forming method. The effects of several forming conditions on thickness distribution and limiting drawing height (LDH) of product are extensively investigated. Forming conditions are chosen to be the distance between electrodes, condenser capacity, exploding wire position, closed volume and inclination of blank holder surface. The charging energy significantly affects formability, i. e., the conditions with not only larger but also smaller charging energies result in breakage of blanks. The appropriate charging energy condition yields the largest amount of blank drawn into die. The explosion rate, represented by the full width at half maximum (FWHM) of electric power wave, is found to have an optimum value for obtaining the largest LDH. The optimum FWHM is applied to a forming condition with small LDH, and the LDH can be successfully improved by controlling FWHM.

Key words: High energy rate forming, Hydro spark forming, High speed deformation, Deep drawing, Impact, Exploding wire, Aluminum foil, Shock wave

1 緒 言

極薄板の深絞り成形では、極薄化により、材料の破断限界が著しく減少し、その成形は一般に容易でない。放電成形法は複雑かつ精密な加工に対して、大きな可能性を持つと思われる。放電成形法では、ポンチを使用する必要がないため、ポンチによる引張変形が軽減され、ポンチによる成形時に最も破断の生じやすいポンチ肩部では板厚減少が抑えられることが期待できる。加えて、プランクを高速で成形する液中放電成形は最適条件の下ではスプリングバックが小さく製品精度の向上をはかることが可能であり、材料によっては延性が向上することなどが報告されている。

金属箔に関する研究は、山口らの極薄板の引張試験に関する研究²⁾、板厚の成形性への影響を検討した長坂らの研究³⁾、ダイスを超音波振動させ、35 μm の JIS 5052-O 材相当品の破断限界向上としわの抑制を検討した岡崎の研究⁴⁾、ゴムリング上にプランクを重ねて圧縮しゴムリングが中心方向に移動する際に発生する摩擦を利用して深絞りを行う高倉らの研究⁵⁾、さらに丸茂らのステンレス箔とアルミニウム薄板の重ね板の深絞りを行い限界絞り比を向上させる研究などが行われている。しかし、液中放電成形法については、その成形過程が非常に短時間の

うちに終了し、また、成形を途中で止め成形過程を観察することが困難であることなどからあまり多くの研究はなされておらず、特に液中放電成形法による箔の深絞りに関する研究は見当たらない。

水中放電成形では、プランクの成形状態は密閉容器の形状、コンデンサ容量などに大きく依存するため、充電エネルギー条件によってほとんど成形されず破断してしまう場合が生じる。最適な成形条件を選択すれば成形高さが向上し、同一成形高さでは均一な板厚分布の成形品の成形が可能となると考えられる。そこで本研究では、密閉型水中放電成形による深絞りの特徴を調べるため、電極間距離、コンデンサ容量、導細線位置、密閉容量、およびしわ押さえ面の傾斜角を種々変化させ、それらが成形限界高さに与える影響について詳細に調べることを目的とした。さらに、電力波形から圧力波の伝ば速度が成形限界高さに及ぼす影響についても調べ、成形限界高さが向上する最適な成形条件について考察を加えた。

2 実験装置および実験方法

2・1 密閉型水中放電成形法

本研究で使用した装置を Fig. 1 に示す。主要な成形条件を Table I に示す。なお、導細線には直径 0.25 mm のアルミニウム細線を使用し、試験片を成形する際の圧

[†] 原稿受理 平成 6 年 8 月 5 日 Received Aug. 5, 1994

* 同志社大学大学院 〒610-03 京都府綴喜郡田辺町, Graduate Student, Doshisha Univ., Tuduki-gun, Kyoto, 610-03

** 三菱電機(株) 〒661 尼崎市塚口本町, Mitsubishi Elect. Ltd., Tsukaguchihonmachi, Amagasaki, 661

*** 正 会 員 同志社大学工学部機械システム工学科 〒610-03 京都府綴喜郡田辺町, Dept. of Mech. & Systems Eng., Doshisha Univ., Tuduki-gun, Kyoto, 610-03

- ① Piston a ⑤ Exploding wire
 ② Die ⑥ Electrodes
 ③ Blank ⑦ Piston b
 ④ Water vessel ⑧ O-ring

Fig. 1. Closed pressure vessel for hydro spark forming.

Table I. Forming conditions.

Condenser capacity	Space of electrodes	Position of wire	Volume of vessel	Blank holder angle
$C = 80 \mu\text{F}$	$D = 5 \text{ mm}$	$L = 30 \text{ mm}$	$B = 50 \text{ mm}$	$\theta = 0^\circ$
$120 \mu\text{F}$	10 mm	60 mm	80 mm	5°
$160 \mu\text{F}$	15 mm	90 mm	110 mm	15°
$200 \mu\text{F}$	20 mm			30°

力媒体には水を使用した。

2.2 成形型

本研究で用いた成形型は、ピストン a (射影部) を移動させることにより一つの型でさまざまな高さの成形品をつくることができる。しわ押さえは密閉容器に 4 本のボルトで固定され、成形型としわ押さえの間にブランクと適度な隙間を設けるためにスペーサ (ブランクの約 1.5 倍の厚さのもの) をはさみ成形型を 4 本のボルトで密閉容器に固定し、真空ポンプで減圧した後成形を行った。成形型内径よりピストン外径を直径で 0.1 mm 小さくし、隙間からピストン a を通じ真空ポンプで減圧できるようにした。このことにより、空気抜き穴がない成形品を作ることが可能となった。

2.3 ブランク

本研究で使用したブランクの材質は工業用純アルミニウム A-1050 であり、板厚 0.1 mm、直径は 46 mm とした。寸法加工後 390°C で 1 時間の焼なましを施し、実験に供した。ブランクの形状・寸法を Fig. 2 に示す。成形前のブランクには、Fig. 2(a) に示すようにブランクの絞り込み量やひずみなどの測定を行うための 2 mm 幅の格子テープを転写した。

2.4 成形品形状・寸法測定方法

各種成形条件下での成形限界高さを調べるために成形型のピストンを 0.5 mm ずつ移動し成形高さ H を変化

Fig. 2. Schematics of blank showing (a) grid on blank surface before forming and (b) shape and dimensions of blank after forming.

させ、成形が不可能 (破断または壁面にしわが生じる、あるいはブランクが型に十分沿わないなど) になるまで実験を行い、成形が可能であった最高の高さを成形限界高さ H とした。ここで、Fig. 2(b) に示すように壁面部とフランジ部の境界を W 点と称する。ブランク上の格子から、成形前後での W 点のブランク中心方向への移動距離を読みとり、ブランクが型に絞り込まれた量を調べた。各ひずみについては、次のようにして求めた。板厚方向ひずみ ε_t は、格子中心での板厚をポイントマイクロメータにより測定することにより求め、また半径方向ひずみ ε_r は成形前後での格子の変位量から算出した。さらに、体積不変則より円周方向ひずみ ε_θ を算出した。

3 実験結果および考察

3.1 密閉型水中放電成形法による深絞りの特徴

密閉型水中放電成形法による深絞りに関する研究例は見当たらない。そこで、その特徴を知るため、充電エネルギーを変化させた場合の成形状態とひずみ分布について調べ考察を加えた。

3.1.1 充電エネルギーを変化させたときの成形状態について ある決まった成形高さ ($H = 14 \text{ mm}$) のもとで、成形条件 (電極間距離 $D = 15 \text{ mm}$ 、コンデンサ容量 $C = 160 \mu\text{F}$ 、ブランク—電極間距離 $L = 60 \text{ mm}$ 、ブランク—密閉容器底面距離 $B = 80 \text{ mm}$ 、しわ押さえ角 $\theta = 15^\circ$) を一定にし、充電エネルギー $E = 23 \text{ J}$, 37 J , 75 J , 130 J , 145 J , 185 J と変化させ、充電エネルギーが成形品に与える影響を調べた。

各条件下で得られた成形品を Fig. 3 に示す。 $E = 23 \text{ J}$ では成形型の球頭部および壁面部にブランクが達しておらず、ドーム状になっており破断していない。 $E = 37 \text{ J}$ および 75 J ではブランクの一部分は型に沿っているが、球頭部から壁面部にかけて破断している。 $E = 130 \text{ J}$ では破断せず型にほぼ沿っており、T 点付近で型に密着せず少し丸くなっている。 $E = 145 \text{ J}$ で破断せず型に沿っており、成形が完了している。 $E = 195 \text{ J}$ ではブランクは複雑に変形し、型と反対方向に折れ曲がっている。ここで、ブランクが型に絞り込まれている程度を調べるために、W 点の移動距離と充電エネルギーの関係を Fig. 4 に示す。同図から、ブランクが型に達しなかったり、一部型に沿ってはいるが破断した $E = 75 \text{ J}$ 以下では、W 点の移動距離は 19 mm 前後となっている。それに対し、ブランクが型に沿った $E = 145 \text{ J}$ では W 点の移動距離は 20.3 mm となっており、ブランクが型と反対方向に折れ曲がった $E = 185 \text{ J}$ では W 点の移動距離は最も小

Fig. 3. Products obtained under various charging energies.

さい値となっている。つまり、充電エネルギーが低い条件では、プランクが型にあまり絞り込まれず、ドーム状で成形が終了するかプランクの伸びに限界が生じ破断する。しかし、充電エネルギーが成形に適度な値の条件になるとプランクが型に絞り込まれ、伸びが破断の限界まで達しないため破断せず成形が完了する。それ以上の充電エネルギーでは、再びプランクが型に絞り込まれず破断すると考えられる。また、プランクが型に完全に沿う充電エネルギーより高い充電エネルギーの場合、低い場合と異なり型と反対方向にプランクが破断している。これは、W 点の移動距離が特に小さい値となっていることから、成形中、比較的初期でプランクがあまり絞り込まれない時点で破断が生じたこと、および、充電エネルギーが大きいため、プランクが破断した後型で反射した水流により、プランクが反対方向に押しやられたためと考えられる。

3・1・2 ひずみ分布について Fig. 5 は水中放電成形法により得られた深絞り成形品のひずみ分布を示したものである。代表例として成形高さ $H=14$ mm (充電エネルギー $E=135$ J, 電極間距離 $D=15$ mm, コンデンサ容量 $C=160$ μ F, プランク-電極間距離 $L=60$ mm,

プランク-密閉容器底面距離 $B=80$ mm, しわ押さえ角 $\theta=15^\circ$) の場合を示した。

水中放電成形法による深絞りのひずみ分布を通常の球頭ポンチを用いた深絞りにより得られるひずみ分布と比較すると、球頭部分の板厚ひずみが水中放電成形法による成形の場合とポンチによる成形の場合とで異なっている。ポンチによる成形では、ポンチとの摩擦の影響により、一般に中心から離れた位置で板厚減少が最も大きくなる。これに対して、水中放電成形法により得られた深絞り成形品の板厚ひずみは、Fig. 5 より、中心部で最も小さい値をとり、端部へ向かうに従い大きくなっている。これは、水中放電成形ではポンチとの摩擦がなくプランクが型に達するまで自由に変形できるためと考えられる。またポンチによる成形でみられるポンチ肩部での板厚ひずみの減少は、水中放電成形ではほとんど生じていない。このことは、極薄板の成形において特に有利な点であると考えられる。

3・2 各成形条件下での成形限界

本節では、成形条件を変化させ成形限界高さに与える影響を調べた。成形条件のうち充電エネルギー (コンデン

Fig. 4. Relation between W point and charging energy. ($H=14$ mm, $D=15$ mm, $C=160$ μ F, $L=60$ mm, $B=80$ mm, $\theta=15^\circ$). Fig. 5. Strain distribution of blank. ($E=135$ J, $H=14$ mm, $D=15$ mm, $C=160$ μ F, $L=60$ mm, $B=80$ mm, $\theta=15^\circ$).

Fig. 6. Definition of FWHM.

サ容量, 充電電圧)を変化させて放電を行うと電力波形が変化する⁷⁾。電力波形の立ち上がりが鋭くなると細線の爆発速度が大きくなり, 発生圧力の伝ば速度が大きくなることが梶原らにより報告されている。実験は設定された条件に対して充電エネルギーを変化させながら各条件における成形限界高さを求めた。そして, そのときの電力波形の半波幅を求めて, 半波幅と成形限界高さの関係を調べた。Fig. 6に電力波形に対する半波幅の定義を示す。

3・2・1 電極間距離を変化させた場合 電極間距離 $D=5\text{ mm}$, 10 mm , 15 mm , 20 mm と変化させ, その他の条件はコンデンサ容量 $C=160\text{ }\mu\text{F}$, ブランク-導細線距離 $L=60\text{ mm}$, ブランク-密閉容器底面距離 $B=80\text{ mm}$, しわ押さえ角 $\theta=15^\circ$ とした。Fig. 7に電極間距離と成形限界高さおよび半波幅との関係を示す。 $D=15\text{ mm}$ の場合に最も成形限界高さの大きい成形品 (15.5 mm) が得られ, $D=5\text{ mm}$ および 20 mm において最も成形限度高さが小さく (14.5 mm) になっている。また, 半波幅は D の増加に伴い減少する傾向がみられる。成形限界高さが最大となるときの半波幅は約 $3.5\text{ }\mu\text{s}$ である。

3・2・2 コンデンサ容量を変化させた場合 コンデンサ容量 $C=80\text{ }\mu\text{F}$, $120\text{ }\mu\text{F}$, $160\text{ }\mu\text{F}$, $200\text{ }\mu\text{F}$ と変化

Fig. 7. Variations of limiting drawing height and full width at half maximum with distance between electrodes. ($C=160\text{ }\mu\text{F}$, $L=60\text{ mm}$, $B=80\text{ mm}$, $\theta=15^\circ$).

Fig. 8. Variations of limiting drawing height and full width at half maximum with condenser capacity. ($D=15\text{ mm}$, $L=60\text{ mm}$, $B=80\text{ mm}$, $\theta=15^\circ$).

させ, その他の条件は電極間距離 $D=15\text{ mm}$, ブランク-導細線距離 $L=60\text{ mm}$, ブランク-密閉容器底面距離 $B=80\text{ mm}$, しわ押さえ角 $\theta=15^\circ$ とした。Fig. 8にコンデンサ容量と成形限界高さおよび半波幅との関係を示す。成形限界高さは $C=120\text{ }\mu\text{F}$ および $160\text{ }\mu\text{F}$ で最も高い値 ($H=15.5\text{ mm}$) を示している。一方, 半波幅は, C の増加に伴い増加する傾向を示し, 大きい成形限界高さが得られた $C=120\text{ }\mu\text{F}$ および $160\text{ }\mu\text{F}$ において $3.5\text{ }\mu\text{s}$ 前後の値となっている。

3・2・3 導細線位置を変化させた場合 ブランク-導細線距離 $L=30\text{ mm}$, 60 mm , 90 mm と変化させ, その他の条件はブランク-密閉容器底面距離 B を常に導細線下方 20 mm とし, 電極間距離 $D=15\text{ mm}$, コンデンサ容量 $C=160\text{ }\mu\text{F}$, ブランク-密閉容器底面距離 $B=L+20\text{ mm}$, しわ押さえ角 $\theta=15^\circ$ とした。Fig. 9にブランク-導細線距離と成形限界高さおよび半波幅との関係

Fig. 9. Variations of limiting drawing height and full width at half maximum with distance between blank and exploding wire. ($D=15\text{ mm}$, $C=160\text{ }\mu\text{F}$, $B=L+20\text{ mm}$, $\theta=15^\circ$).

Fig. 10. Variations of limiting drawing height and full width at half maximum with distance between blank and bottom of closed pressure vessel. ($D=15$ mm, $C=160$ μ F, $L=30$ mm, $\theta=15^\circ$).

を示す。成形限界高さは、 $L=30$ mm の場合に最も小さく、 $L=60$ mm および 90 mm では、互いに等しい成形限界高さが得られた。成形時にブランクが受ける圧力は、 L が大きい条件ほどより等分布的になると考えられる。また、Fig. 9 から半波幅は L が増加するに伴い減少する傾向がみられる。これは、電極間距離、コンデンサ容量等が一定で、充電エネルギーを大きくすると電力波形が鋭くなり半波幅は減少するためである。すなわち、 L が大きくなると成形に必要な充電エネルギーも大きくなり、その結果、半波幅が小さくなったためであると考えられる。同図より、大きい成形限界高さが得られた条件では半波幅が 3.5 μ s に近づくことがわかる。

3・2・4 密閉容器容量を変化させた場合 ブランク-密閉容器底面距離を Fig. 1 のピストン b により $B=50$ mm, 80 mm, 110 mm と変化させ、その他の条件は電極間距離 $D=15$ mm, コンデンサ容量 $C=160$ μ F, ブランク-導細線距離 $L=30$ mm, しわ押さえ角 $\theta=15^\circ$ とした。Fig. 10 にブランク-密閉容器底面距離と成形限界高さおよび半波幅との関係を示す。成形限界高さは、 $B=50$ mm に比べ $B=80$ mm および 110 mm の場合に大きな値 ($H=16$ mm) を示している。また、成形時にブランクに作用する圧力波は、 $B=80$ mm および 110 mm の場合では、 $B=50$ mm の場合と比べてより等分布的になっていると考えられ、このことと 3・2・3 項の結果とあわせて考えると、ブランクに作用する圧力分布は等分布的になる方が大きい成形限界高さが得られやすいと考えられる。Fig. 10 より、成形限界高さが大きくなると半波幅は 3.5 μ s に近づくことがわかる。

3・2・5 成形型のしわ押さえ面の傾斜角を変化させた場合 しわ押さえ角 $\theta=0^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ および 30° と変化させ、その他の条件は電極間距離 $D=15$ mm, コンデンサ容量 $C=160$ μ F, ブランク-導細線距離 $L=30$ mm, ブランク-密閉容器底面距離 $B=80$ mm とした。Fig. 11

Fig. 11. Variations of limiting drawing height and full width at half maximum with inclination of blank holder surface. ($D=15$ mm, $C=160$ μ F, $L=60$ mm, $B=80$ mm).

にしわ押さえ面の傾斜角と成形限界高さおよび半波幅との関係を示す。 θ が大きくなるに伴い成形限界高さも大きくなっている。これは、 θ が大きくなると、ダイス肩部でのブランクの巻付き角が減少し、その結果、摩擦力が軽減されるためであると考えられる。また同図から、 θ が大きくなる条件では半波幅が小さくなることがわかる。これは、同条件下では、成形限界高さが大きくなっているため、成形に必要な充電エネルギーもそれに伴って増加し、その結果、半波幅が小さくなるためと考えられる。ここでも先と同様に、成形限界高さの大きい条件で半波幅が 3.5 μ s 付近に分布している。

3・2・6 電力波形の半波幅を変化させることによる成形限界高さの向上 以上では成形条件を種々変化させた場合について成形限界を調べた。Fig. 12 に各成形条件下での半波幅と成形限界高さとの関係を示す。Fig. 12 より、いずれの条件に対しても、半波幅が 3.5 μ s 付近において成形限界高さが最も大きくなることがわかる。したがって、成形限界高さを大きくするには半波幅をある最適値に近づければよいことがわかる。

そこで本項では、成形限界高さの小さかった条件に対

Fig. 12. Relationship between limiting drawing height and full width at half maximum.

Fig. 13. Variations of full width at half maximum and limiting drawing height with condenser capacity. ($D=15$ mm, $L=30$ mm, $B=50$ mm, $\theta=15^\circ$).

しコンデンサ容量を変化させることで半波幅を変化させ、成形限界高さの向上を試みた。代表例として、ブランク-導細線距離 L を変化させた場合について示す。成形限界高さの小さかった $L=30$ mm の場合 (Fig. 9 参照) はブランク-導細線距離、密閉容器容量がともに小さく、同じ充電エネルギーならば他の条件よりもブランクに作用する圧力も大きくなるものと考えられる。そのため、充電エネルギーを下げなければブランクが破断してしまい、逆に充電エネルギーを下げると、電力波形の半波幅が大きくなり、一層成形限界高さが小さくなるものと考えられる。そこで、ここでは半波幅を小さくするためコンデンサ容量を $C=120 \mu\text{F}$, $160 \mu\text{F}$, $200 \mu\text{F}$ と変化させた。各条件下で得られた成形限界高さの比較を Fig. 13 に示す。これらより、半波幅が $3.5 \mu\text{s}$ に近づくと、

成形限界高さは大きくなっていることがわかる。つまりコンデンサ容量を小さくすることで、半波幅を小さくすることができ、その結果、成形限界高さを向上させることが可能であった。したがって、各条件下において、半波幅を最適値に近づける方向に他の条件を選ぶことによって、成形限界高さの向上を図ることができると考えられる。

4 結 言

(1) 水中放電成形法による深絞りでは、ポンチによる深絞りでも板厚減少の大きいポンチ肩部において、板厚減少が抑えられることが認められた。

(2) 大きい成形限界高さが得られる条件では、半波幅がある一定の値に近づくことが認められた。

(3) 成形限界高さが低い成形条件でも、半波幅を最適値に近づけることにより成形限界が向上することが明らかとなった。

(平成 6 年 5 月 28 日 平成 6 年度塑性加工春季講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 日本塑性加工学会編, “高エネルギー速度加工”, 133 (1993) コロナ社.
- 2) 山口克彦, 高倉章雄, 吹上 忠, 福田正成, 塑性と加工, **17**, 995 (1976).
- 3) 長坂一徳, 梅木好助, 杉本正勝, 塑性と加工, **11**, 38 (1970).
- 4) 岡崎康隆, 塑性と加工, **33**, 1144 (1992).
- 5) 高倉章雄, 今谷勝次, E. Emwady, 山口克彦, 第43回塑性加工連合講演会講演論文集, 137 (1992).
- 6) 丸茂康男, 済木弘行, 坂本英俊, 第42回塑性加工連合講演会講演論文集, 763 (1991).
- 7) 平井恒夫, 今井田 豊, 材料, **34**, 1412 (1985).
- 8) 栖原寿郎, 北島一徳, 福田重久, 塑性と加工, **8**, 279 (1967).