研究論文

電磁予成形されたアルミニウムおよびアルミニウム合金板材の深絞り性に対するポンチ形状の影響*

阿部 佑二**・田尻 彰**・川並 高雄***

Effect of punch geometry on deep drawability of aluminum alloy sheets preformed by electromagnetic forming*

Yuuji ABE**, Akira TAJIRI** and Takao KAWANAMI***

This investigation is to evaluate the possibility to combine the electromagnetic forming and the original deep drawing. The effect of punch geometry on deep drawability of aluminum alloy sheets preformed by the electromagnetic forming is compared with those preformed by the punch or unpreformed. The results are as follows: (1) Deep drawability of aluminum alloy sheets preformed by the electromagnetic forming is better than those preformed by the punch or unpreformed. This tendency is clear in case of the flat punch and elliptical punches, but not clear in case of gently elliptical punch and spherical punch. (2) Especially with the sharp elliptical punches as the ratio of axis length $r_y/r_x=2.5, 3$, deep drawability of A1100-O aluminum sheets preformed by the electromagnetic forming is evaluated much better than unpreformed ones. (3) The breaking strength of aluminum alloy sheets preformed by the electromagnetic forming is higher than those of preformed by the punch due to the high rate of increase of hardness with thickness strain. Good deep drawability of the former with the sharp elliptical punches and the flat punch is caused by the higher strength of aluminum alloy sheets of the former at center part and near die-r part.

Keywords: electromagnetic forming, deep drawability

(Received February 18, 1994)

1. 緒 言

電磁成形法は良導体であるアルミニウムや銅に適した加工法であるが、主に管材に適用され^{1),2)}、板材への適用例^{3),4)}は少ない。板材にはスパイラル型電磁コイルが適している。しかし、スパイラル型コイルにはコイルを保護する磁束集中器がないため、使用エネルギー量が限られ、十分な加工量が得られないこと、また、磁束の制御が任意にできないので、加工の量や形状を簡単には制御できないこと等が適用例の少ない理由になっている。

ところで、電磁成形法の加工速度や型の簡便さ、良導体に適する等の特徴は他の加工法では得られないものである。電磁成形法をプレスの子加工法として適用した場合、加工時間が $10^{-3} \sim 10^{-2}$ sであることから、プレス加工のサイクルタイムにほとんど影響を与えないで、単一の型内で複合した成形が可能になるものと期待される。

そこで本研究では、電磁成形をプレス加工に組込むことの可能性を調べる目的で、電磁予成形したアルミニウム板材の深絞り性に対するポンチ形状の影響について検

討した結果を報告⁵⁾する。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には、板厚0.8 mmの市販のアルミニウム(A1100-O)およびアルミニウム合金(A3004-O, A5182-O)板材を用いた。供試材の機械的性質をTable 1に示す。

Table 1 Mechanical properties of materials (thickness 0.8 mm)

Material	Mechanical properties				Conductivity (IACS %)
	T.S. (MPa)	Y.S. (MPa)	EL. (%)	n	
A1100-O	98	29	34	0.27	59
A3004-O	176	74	23	0.23	42
A5182-O	292	148	24	0.33	30

* 第39回塑性加工連合講演会(1988年)にて一部発表。

** スカイアルミニウム(株)技術研究所(深谷市)。Technical Research Laboratory, Sky Aluminum Co. Ltd. (Fukaya-shi, Saitama)。

*** 金沢工業大学機械工学科(金沢市)。Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology (Kanazawa-shi, Ishikawa)。

Fig. 1 Combinations of preforming ways and deep drawing.

Fig. 2 Outline of electric circuit.

Fig. 3 Outline of E.M.F. coil.

2.2 実験装置

実験装置とプロセスの概略を Fig. 1 に示す。ポンチとダイス、ブランクホルダよりなる通常のプレス型のノックアウトの位置にスパイラル型電磁コイルを組込んでいる。スパイラル型電磁コイルの回路図を Fig. 2 に、形状を Fig. 3 に示す。

実験 1 には平頭から楕円尖頭まで 5 種類のポンチを使用し、実験 2 には更に楕円軸比の大きな尖頭の 2 種類を使用した。ダイスとブランクホルダは各 1 種類とし、共通に使用した。またブランクホルダには最大 11.76 kN のスプリングを使用した。これらの金型寸法を Table 2 に示す。

2.3 実験方法

電磁予成形法と通常のプレス成形法について主に実験

し、ポンチ予成形法についても一部実験した。

電磁予成形法とは、最初にダイスとブランクホルダ間に供試材の円形ブランクをはさみ、衝撃電流をスパイラル型電磁コイルに流し、発生する電磁力で供試材を予成形し、その後、所定の頭部形状のポンチで深絞りする方法である。

通常法とは、予成形することなく通常のプレス加工と同じにポンチとダイス、ブランクホルダを使用し、1 ストロークで深絞りする方法である。

またポンチ予成形法とは、電磁成形と類似した形状と同じ高さまで楕円軸比 $r_y/r_x=1.5$ の尖頭ポンチで予成形

Table 2 Dimensions of die-set (mm)

Item	Diameter	Radius	r_y/r_x
Die	52.4	5	--
Flat bottomed punch	50.0	4	0
Gently elliptical punch	50.0	--	0.5
Spherical punch	50.0	--	1.0
Sharp elliptical punch	50.0	--	1.5
Sharp elliptical punch	50.0	--	2.0
Sharp elliptical punch	50.0	--	2.5
Sharp elliptical punch	50.0	--	3.0

r_y/r_x : ratio of elliptical axial length with punch head

し、電磁予成形法と同じ方向に面を置換えて、所定の頭部形状のポンチで深絞りする方法である。

これらの方法を Fig. 1 に示す。ブランク径は 5 mm 間隔とした。潤滑には、水溶性ワックスのジョンソックス 700 番の 3 倍希釈液を初回成形時に板の両面に塗布して使用した。

3. 実験結果

3.1 実験 1 ポンチ形状の影響

電磁予成形法と通常法およびポンチ予成形法のポンチ頭部形状による限界絞り比を供試材別に Fig. 4 に示す。

通常法の場合、限界絞り比は軸比 $r_y/r_x = 0.5 \sim 1.0$ の扁平楕円や球頭ポンチで最大となり、軸比 $r_y/r_x = 0$ の平頭ポンチではやや低くなり、 $r_y/r_x = 1.5, 2.0$ の尖頭楕円ポンチで急激に低下する。これらの結果は河合らの報告⁶⁾の深絞りにおけるポンチ形状の影響の結果と類似していることから、一般性のある結果と考えられる。

電磁予成形法の場合、限界絞り比は軸比 $r_y/r_x = 0, 0.5 \sim 1.0$ の平頭から球頭ポンチで最大となり、軸比 $r_y/r_x = 1.5 \sim 2.0$ の尖頭楕円ポンチで徐々に低下する。

電磁予成形法と通常法を比較すると、扁平楕円と球頭ポンチでは同じ限界深絞り比であるが、平頭と尖頭楕円ポンチでは電磁成形法の限界深絞り比が大きい。

なお、各供試合金のポンチ形状による限界絞り比の変

Fig. 4 Influence of punch geometry on L.D.R. of aluminum alloy sheets with ordinary deep drawing and preformed by E.M.F., preformed by punch.

$r_y/r_x = 1.0$ (spherical)
L.D.R. = 2.10

$r_y/r_x = 1.5$ (elliptical)
L.D.R. = 2.0

$r_y/r_x = 2.0$ (sharp elliptical)
L.D.R. = 1.8

Fig. 5 Appearance of drawn cups preformed by E.M.F. (A1100-O).

Fig. 6 Influence of sharp elliptical punches on L.D.R. of A1100-O aluminum sheets with ordinary deep drawing and preformed by E.M.F.

Fig. 7 Contour of $\phi 110$ mm blanks preformed by E.M.F. with electromagnetic energy 8 kJ (200 μ F, 9.2 kV).

化は通常法と電磁予成形法の各成形法別に類似している。

ポンチ予成形法はA1100-OとA5182-Oについて軸比 $r_y/r_x = 1.5 \sim 2.0$ の尖頭楕円ポンチについて実験したが、限界絞り比は通常法と同じである。

A1100-O の直径105 mm のブランクの予絞り込み量は、電磁予成形法では直径当たり3.27 mm、ポンチ予成形法では2.03 mmであった。

電磁予成形による深絞り品の外観写真を Fig. 5 に示す。

破断位置と方向はポンチ形状により変化した。軸比 $r_y/r_x = 0, 0.5$ ではポンチ頭部 R の直下のポンチとの非接触部で周方向に破断し、軸比 $r_y/r_x = 1.0 \sim 3.0$ ではポンチ頭部との接触部内の中心を外れた位置で周方向に破断した。成形法や供試合金による破断位置の変化は少なく、類似していた。

3.2 実験2 尖頭形状ポンチの実験

実験1で、電磁予成形法では尖頭楕円ポンチで限界絞り比の向上が認められた。尖頭楕円形状の深絞り成形は通常のプレス成形では成形限界が低く、成形が難しい領

Fig. 8 Relation between preformed height and electromagnetic energy with aluminum alloy sheets $\phi 110$ mm blanks.

Fig. 9 Distribution of hardness and thickness strain with A1100-O aluminum sheets preformed by E.M.F. and by punch.

域とされ、多段成形が適用されることが多い。そこで軸比 $C = 2.5, 3.0$ と更に尖頭楕円形状での電磁予成形法と通常法の限界深絞り比を調査実験した。実験結果を実験1と併せて Fig. 6 に示す。ポンチ頭部形状が尖頭になるに従い、電磁予成形の限界絞り比は通常法より大きい。

4. 考 察

電磁予成形品の形状測定結果を供試合金3種類について Fig. 7 に示す。電磁力は同一条件であるが、合金により変形高さや形状は大きく異なり、たとえば、A1100-O は A5182-O の約2倍の高さで、かつ中央部分が突出す形状となっている。供試材3種類の電磁予成形による変形高さや電磁エネルギーの関係を Fig. 8 に示す。同図中の変形高さ H (mm) と電磁エネルギー E_n (J)、耐力 σ_y の関係は、定数 C を用いて次式で与えられる。

Fig. 10 Relation between hardness and thickness strain with A1100-O aluminum sheets preformed by E.M.F. and by punch.

$$H = C \frac{E n^{1/2}}{\sigma_y^{1/3}}$$

なお、電気的特性の影響調査のため、追加実験をした A1100-H18 材 (Y.S. 169 Mpa, IACS57%) は A5182-O と同等の高さであった。供試材の範囲では変形高さに対する導電率の影響は大きくないと考えられる。

平頭ポンチによる反復深絞り法では、予絞込みによる限界絞り比の向上と、特定な条件下で荷重負担部に板厚増加と硬度増加を生じるために限界絞り比が向上することが報告⁷⁾されている。しかし、Fig. 4 の結果では、ポンチ予成形と通常法の限界深絞り比は同じである。実験のブランク径間隔が大きいため、微妙な違いを検出していないことも考えられるが、尖頭楕円形状のポンチでは反復成形時において、板を子午線方向に圧縮する分力が小さいので、板厚の増加が少ないためと考えられる。形状的に類似した電磁予成形品も同様に反復深絞り時、板厚の増加は少ないものと考えられる。

A1100 の電磁予成形品とポンチ予成形品の硬度と板厚ひずみ分布を Fig. 9 に示す。測定点は中央からダイ R までの 10 等分点と、同距離のダイ R の外側 1 点である。電磁予成形品の硬度は中央部とダイ R 近傍が高い。電磁予成形品の板厚ひずみは中央が最も大きく、ダイ R まで直線的に減少している。またポンチ予成形品の硬度はポンチの接触境界近傍が最も高い。ポンチ予成形品の板厚ひずみはポンチの接触境界近傍が大きく、電磁予成形品の約 2 倍となっている。他の供試材の硬度と板厚ひずみ分布も Fig. 9 に類似している。

電磁予成形品とポンチ予成形品の板厚ひずみと硬度の関係を図 10 に示す。電磁成形では、成形部に不均一な力が動的に作用して、板の変形は板押え近傍の周辺部より進行するため、衝撃的で大きな引込み力が作用し、絞込み量が大きく、板厚ひずみが小さくなる³⁾と考えられている。本実験でも同様に、ポンチ予成形に比べ電磁

Fig. 11 Distribution of ratio with breaking force of aluminum alloy sheets preformed by E.M.F. and by punch.

予成形では、板厚ひずみに対して硬度増加が大きい。これらの結果が破断力を高めているものと考えられる。他の供試材の板厚ひずみと硬度の関係も Fig. 10 に類似している。

破断の位置と方向から、破断形態は α 破断と考えられるため、破断の主要因はポンチ頭部の材料の破断力不足である。

予成形品の破断力 F (N) は直径 D (mm) の位置の板厚を t (mm)、引張強さを σ_B (N/mm²)、定数を K として、

$$F = K \pi D \cdot t \cdot \sigma_B^{(9)}$$

である。アルミニウム板材では $K=0.98^{(9)}$ であるので $K=1$ とする。また、引張強さと硬度 HV は比例関係にある¹⁰⁾ので、定数 M として破断力 F は、

$$F = M \pi D \cdot t \cdot HV$$

と表現できる。同一材料で板厚と硬度の異なる電磁予成形品とポンチ予成形品の同一直径位置の破断力比 f_{EP} は

$$\begin{aligned} f_{EP} &= F_E / F_P = (M \pi D \cdot t_E \cdot HV_E) / (M \pi D \cdot t_P \cdot HV_P) \\ &= (t_E \cdot HV_E) / (t_P \cdot HV_P) \end{aligned}$$

となる。

供試材の破断力比 f_{EP} の分布を図 11 に示す。各供試材とも f_{EP} は中央付近とダイ R 近傍で 1 より大きい。中央付近は尖頭楕円ポンチの荷重負担部で、またダイ R 近傍は平頭ポンチの荷重負担部である。電磁予成形によるこれらの部分の破断力の向上が尖頭楕円ポンチと平頭ポンチでの限界絞り比向上の一因と考えられる。

このほか、電磁予成形のブランクの絞込み量がポンチ予成形より大きいことも電磁予成形法の限界絞り比が高い一因と考えられる。

5. 結 言

電磁予成形をプレス加工に組込むことの可能性を調べ

る目的で、電磁予成形したアルミニウム板材の深絞り性に対するポンチ形状の影響について、通常のプレス法およびポンチ予成形法との比較実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 電磁予成形したアルミニウム板材の深絞り性は平頭ポンチと尖頭楕円ポンチを用いた場合、通常のプレス法やポンチ予成形より優れ、偏平楕円ポンチと球頭ポンチを用いた場合、同等である。

(2) A1100-O について更に尖頭楕円形状の調査を追加した結果、楕円形状の周方向半径を r_x 、軸方向半径を r_y とするとき、軸比 $r_y/r_x = 2.5 \sim 3.0$ の鋭角な尖頭楕円形状ポンチでも電磁予成形により深絞り性が向上する。

(3) 電磁予成形では、ポンチ予成形に比べ、板厚ひずみに対して硬度増加の大きいことが破断力を高めている。

また、中央付近とダイ R 近傍の破断力が高い分布であることが、尖頭楕円ポンチや平頭ポンチでの深絞り性を向上させると考えられる。

おわりに本研究の遂行に当たり、電磁成形について親切に御指導いただいた工業技術院機械技術研究所の皆様

に心から厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 村越庸一, 高橋正春, 佐野利男, 松野建一: 第32回塑性加工連合講演会論文集, (1981), 527.
- 2) 村田 真, 根岸秀明, 鈴木秀雄: 塑性と加工, **23** (1982), 328.
- 3) 高橋正春, 村越庸一, 寺崎正好, 佐野利男, 松野建一: 機械技術研究所所報, **42** (1988), 1.
- 4) 根岸秀明, 鈴木秀雄, 前田禎三: 塑性と加工, **18** (1977), 197.
- 5) 阿部佑二, 田尻 彰: 第39回塑性加工連合講演会論文集, (1988), 29.
- 6) 河合 望, 平岩正至, 荒川昌彦: 塑性と加工, **8** (1967), 28.
- 7) 堤 成晃, 橋本建一, 堀沢 滋: 塑性と加工, **8** (1967), 289.
- 8) 日本塑性加工学会: プレス加工便覧, 丸善, (1975), 347.
- 9) 軽金属学会研究委員会: アルミニウム合金薄板のプレス加工データブック, 軽金属学会, (1991), 35.
- 10) 阿部佑二, 吉田正勝: 軽金属, **44** (1994), 240.