1050 アルミニウム板の NC サーボプレスを用いた 振動深絞り加工としごき加工

古閑 伸裕*・浅賀 将義**・クンラチャート ジュンラペン**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 57, No. 6 (2007), pp. 240-244

Deep-drawing and ironing of 1050 aluminum sheets loaded with vibration using NC servo press machine

Nobuhiro KOGA*, Masayoshi ASAKA** and Kunlachart JUNLAPEN**

Recently, high-torque AC servomotors have been developed, and NC servo press machines equipped with these servomotors have become commercially available in Japan. The NC servo press machine has a programmable function for fully controlling the position and velocity of the slide on the machine, as well as for setting its motion such that the slide descends while it is vertically vibrating. In this study, we carried out forming experiments on a 1050 aluminum sheet by vibratory deep-drawing and vibratory ironing using the low-frequency vibration motion of the slide, and experimentally examined the improvement effects of vibration load on the forming limit during each machining process. As results, when the NC servo press machine was used in conventional die machining, (1) the limiting drawing ratio increased by 0.15 during vibratory deep-drawing and (2) the limiting ironing rate increased by approximately 10% during vibratory ironing, without using a special vibration machine. For deep-drawing, the occurrence of wrinkles was prevented when vibration was applied.

(Received January 15, 2007 Accepted March 12, 2007)

Keywords: deep-drawing, ironing, aluminum, servo press machine, vibration

1. 緒 言

板材プレス加工の分野において、超音波振動や機械的振動を負荷した振動深絞り加工の研究がこれまで数多く行われている¹⁾²⁾。これら研究の成果によれば、振動の負荷により、成形限界の向上や成形荷重の低減、さらには成形品の板厚精度向上やしわ発生抑制などの効果が得られることが明らかにされている。しかし、このような振動を負荷するプレス加工を行う場合は、特殊な振動発生装置の設置や金型構造の複雑化、さらには作業性の悪化など、大きな制約が強られる。また、超音波を負荷する場合は、周波数、振幅、潤滑油などの条件が適正に選定されなければ上述したような効果が十分発揮されないため、加工前の煩雑な適正条件の選定や加工中のその維持が不可欠である。また、振動発生装置の制限から高速加工や大物部品の加工への振動成形の適用は困難とされている。したがって、大量生産される部品や大物部品のプレス加工に、これら振動負荷による加工が適用されるケースは少なく、その利用は特殊な用途に限られている。

最近、ストローク内でスライドの位置や速度が正確にコントロールできる NC サーボプレス³⁾が開発され、大きな注目を集めている。サーボプレスの開発は、中川らにより開発さ

れたボールねじ直接駆動の粉末成形用プレス⁴⁾が始まりとされており、その後、様々なタイプのサーボプレスが開発された。すなわち、通常の機械プレスの駆動をサーボモータ駆動に変えた小型のサーボプレスや、リンク機構や油圧の倍力機構と組合せた大型のサーボプレスが登場した。そして最近、高トルクの NC サーボモータが開発されたことから、これを駆動源とし、ギヤを介してクランク軸に直結することで、スライドの位置や速度が自在に、しかも正確にコントロールできる、大型の板金加工用 NC サーボプレス⁵⁾が登場した。すなわち、従来の機械式プレス機械では、一定の速度で回転するクランク軸に連結されたスライドは一定の周期で上下動を繰返す動きをするのみであった。これに対し、NC サーボプレスではスライドを周期的に速度変化させながら、または上下動（振動）をさせながら下降させることができるなど、自在にその動きをコントロールすることができる。すなわち、この NC サーボプレスを用いれば、特殊な振動発生装置を用いず、慣用の金型を用いた低周波振動負荷成形が容易に行えることが期待できる。

本研究では、アルミニウム板の代表的な成形法である、深絞り加工としごき加工について、上記 NC サーボプレスの振動モーション³⁾を利用した加工を行い、その有用性を実験的

* 日本工業大学機械工学科 (〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)。Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology (4-1 Gakuendai, Miyashiro-machi, Minamisaitama-gun, Saitama 345-8501).

** 日本工業大学大学院生 (南埼玉郡)。Graduate student of Nippon Institute of Technology (Minamisaitama-gun, Saitama).

Fig. 1 Driver of NC servo press machine.

に調査検討する。

2. 実験条件および方法

2.1 NC サーボプレス

実験には加圧能力 600kN の NC サーボプレス（アマダプレステック製, SDE6016）を使用する。このプレス機械は、Fig. 1 に示すような、低速回転時においても高トルクが得られる AC サーボモータとクランク機構のダイレクトドライブ構造である。この機構の実現により、従来の機械式プレスでは必要不可欠であったクラッチ機構部とフライホイールが不要になり、構造がシンプルなものになっている。

さらに、加工中のスライドの急激な速度の変化や、緊急時の急停止にも対応できるよう、高性能ブレーキが装備されており、また、最大で 50kN の加圧能力を有するダイクッション装置を備えている。

加工時には、操作パネルからプログラムモーションを選択し、スライドの位置や速度のデータを入力する。この場合、スライドの位置は 1/100mm 単位で設定でき、速度は 0mm/s（停止）から 373mm/s（最高速度）の範囲内で設定が行える。

2.2 被加工材

深絞り加工としごき加工のいずれの加工においても、被加工材には、板厚 $t=0.6\text{mm}$ の 1050 純アルミニウム板を用いた。この被加工材の化学成分と機械的性質を Table 1, Table 2 に示す。

2.3 深絞り加工

Fig. 2 に実験に用いた深絞り金型の構造概略図を示す。この金型は、内径 $\phi 61.6\text{mm}$ のダイ（肩アール半径：5mm）を上型に、外径 $\phi 60.0\text{mm}$ のパンチ（先端アール半径：5mm）としわ抑えを下型にそれぞれ備えた構造であり、片側クリアランスを $C=0.8\text{mm}$ に設定した。この金型の上型をプレススライドに取付けることで、ダイを上下動させながら振動深絞り加工を行う。この場合、しわ抑え力 Ph はダイクッションにより作用させることとし、その力は 0 から 1kN 単位で 50kN まで変化させることができる。

Fig. 3 に振動深絞りにおけるスライドのモーション線図（ストロークー時間線図）を示す。本実験では成形開始から成形終了時まで、上昇移動量 Ad と下降移動量 Dd の組合せを $0.01\text{mm} \leq Ad \leq 5.0\text{mm}$, $0.5\text{mm} \leq Dd \leq 6.0\text{mm}$ の範囲でそれぞれ選択し、振動を負荷した加工を行った。この場合の周波数は、 Ad が小さいほど、または Dd が大きいほど高くなるが、上記選択した Ad と Dd の条件域での周波数は 2.9~12.4Hz で

Table 1 Chemical composition of 1050 aluminum sheet used in experiments (mass%)

Material	Si	Fe	Zn	Ti	V	Al
A1050	0.1	0.28	0.01	0.03	0.01	bal.

Table 2 Mechanical properties of 1050 aluminum sheet used in experiments

Material	Tensile strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Elongation (%)
A1050	112	82.0	25.2

Fig. 2 Schematic of die structure used in deep-drawing experiment.

Fig. 3 Motion diagram of slide in vibratory deep-drawing.

ある。

この深絞り加工には、水溶性工作油（S-1330，動粘度：275mm²/s，日本工作油）を潤滑油として用いた。

2.4 しごき加工

Fig. 4 に示すしごき加工用金型を用い、スライドに固定したパンチを振動させながら下降させ、しごき加工を行った。この実験には、直径 $\phi 25\text{mm}$ のパンチ（先端アール半径：2mm）と、内径の異なる 6 種類のテーパダイ（ダイ半角：6°，ベアリング長さ：1mm）を用いた。振動負荷時の Ad と Dd の設定範囲は、 $0.01\text{mm} \leq Ad \leq 0.5\text{mm}$, $0.1\text{mm} \leq Dd \leq 0.6\text{mm}$ とした。この場合の周波数は 12.1~12.4Hz である。しごき加工には、深絞り試験機により絞り比 1.7 の条件で成形した円筒容器を供した。これを上記しごき金型内にセットし、しごき率 $\delta=38.2, 42.7, 46.9, 50.8, 53.3, 59.3\%$ のそれぞれの条件で振

Fig. 4 Schematic of die structure used in ironing experiment.

動しごき加工を行った。この場合も、潤滑油には深絞り実験に使用したものと同一のプレス工作油を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 深絞り加工

まず、どのような振動モードで成形を行えば、どの程度の効果が得られるかといった観点から、上記設定範囲内で Ad と Dd をそれぞれ変化させた振動深絞り加工を行った。この場合、絞り比は $DR=2.2$ 一定とし、しわ抑え力 Ph は、福井、吉田、阿部によって提案された実験式⁶⁾ により求めた値を目安に $Ph=17\text{ kN}$ 一定とした。

まず、比較のため、振動を负荷しない慣用深絞り加工により上記条件による成形を行った。その結果、材料破断は発生せず成形は行えたが、フランジ部から側壁部にかけて、顕著なしわの発生が認められた。これに対し、振動深絞り加工の場合は、Fig. 5 中 ○印で示す $Ad=3.5\text{ mm}$, $Dd=4.0\text{ mm}$ と $Ad=4.5\text{ mm}$, $Dd=5.0\text{ mm}$ の2つの条件で、目視上ほとんどしわの発生のない成形品を得ることができた。すなわち、深絞り加工においては、 $Dd \geq 4.0\text{ mm}$ の比較的大きな下降移動量 Dd とし、これの値より 0.5 mm 少ない比較的大きな上昇移動量 Ad を設定すれば、しわの発生を抑制する効果が高くなることが明らかになった。

つぎに、このしわ発生の抑制効果をより詳細に把握するため、 $DR=2.0$ の条件で Ph を種々変化させた成形実験を行った。この場合の振動负荷条件は、上記実験でしわ発生の抑制効果が認められた $Ad=4.5\text{ mm}$, $Dd=5.0\text{ mm}$ とした。

Fig. 6 にしわ抑え力のしわ高さに及ぼす影響を示す。なお、しわ高さ Wh とは深さ 35 mm まで深絞りした円筒容器のフランジ部の厚みを平面マイクロメータで測定した値であり、この値が 0.75 mm 以上になると目視上しわの発生が顕著に認められたことから、フランジ部の厚みがこの値以下の場合をしわ発生が抑制され良好な成形品が得られたと判断することとした。その結果、慣用深絞りでは、 Ph を 22 kN 以上負荷しなければしわ発生を抑制することができないのに対し、振動を负荷すると、わずか $Ph=8\text{ kN}$ と小さなしわ抑え力でもしわ発生のない成形品が得られることがわかった。

すなわち、慣用深絞り加工においてしわ発生のない成形品を得るためには、より高い Ph の設定が必要である。これに対し、振動深絞り加工においては Ph を小さく設定できることから、より大きな絞り比においてもしわ発生のない成形品

Fig. 5 Evaluation results of range of conditions under which forming by vibratory deep-drawing is possible ($DR=2.2$, $Ph=17\text{ kN}$).

Fig. 6 Comparison of wrinkle occurrence in cups formed by conventional and vibratory deep-drawing ($DR=2.0$, $Ad=4.5\text{ mm}$, $Dd=5.0\text{ mm}$).

が得られることが予想できる。そこでさらに、 Ph を大きくした慣用深絞り加工と、 Ph を小さくした振動深絞り加工を行い、それぞれの加工においてしわ発生や材料破断が発生しない成形限界 (LDR) を調査した。その結果、慣用深絞り加工では $Ph=30\text{ kN}$ でしわ発生のない成形品が得られる最大の絞り比は 2.2 であった。これに対し、振動深絞り加工では、 $Ph=8\text{ kN}$ の条件下で限界絞り比 $LDR=2.35$ の成形品を得ることができた。

以上の結果から、NC サーボプレスによる低周波振動を负荷した深絞り加工においては、一定のしわ抑え力を付与した条件下では、慣用深絞り に比べ LDR の大きな向上は認められなかった。しかし、低周波振動の负荷はフランジ部や側壁部に発生するしわの発生防止効果が高いことから、しわ抑え力の低減による成形限界の向上、さらには成形に必要なしわ抑え力の大きな低減による大幅な加工力の低減効果が得られることがわかった。なお、低周波振動のパンチ力に及ぼす影響については今後の検討課題とする。

3.2 しごき加工

しごき加工においても、どのような振動モードで成形を行えば、どの程度の効果が得られるかといった点を探るため、各種しごき率で、 Ad と Dd をそれぞれ変化させた振動しごき加工を行った。

まず比較のため、慣用しごき加工による限界しごき率の調査実験を行った。その結果、Fig. 7(a) に示すような限界しごき率 $\delta_{max}=46.9\%$ の成形品を得ることができた。つぎに、

振動しごき加工を行った。この場合は、**Fig. 8**に○印で示す条件域では材料破断が発生することなく成形が行われ、**Fig. 7(b)**に示すような $\delta_{max}=59.3\%$ の容器を成形することができ、慣用しごき加工に比べ δ_{max} が10%以上向上できることが明らかになった。

しかし、振動しごき加工においては、材料破断が発生せずに加工が行われても、同図中に示す△印の条件で成形された成形品の側壁部には**Fig. 9**に示すようなリング状の模様の発生が認められた。

以上の結果から、振動しごき加工においては、下降移動量は $Dd \leq 0.3 \text{ mm}$ と小さくし、上昇移動量も $Ad \leq 0.01 \text{ mm}$ と小さく設定することで δ_{max} の向上や表面不良の発生を防止できることがわかった。

なお、上記リング状の模様は Dd が大きな条件で発生しやすくなる傾向があることや、この部分の表面粗さは周囲と比べ変化がないことがわかった。このリング状の模様の発生原因の解明については今後の検討課題とする。

さらに、この振動しごき加工の実用化を目指し、しごき率 $\delta=38.3\%$ の条件下で100回の連続しごき加工を行った。その結果、慣用しごきでは100回加工後においてもダイの状態や成形品の表面粗さはそれほど大きな変化が認められなかったが、振動しごき加工を行うと、60回加工後頃からダイにはアルミニウムと思われる筋状の凝着物の発生が認められるようになり、成形品の円周方向表面粗さが同回数頃から悪化する傾向が認められた。これは振動により工具と被加工材間の接

触距離が増すため、摩擦による発熱がこのような加工不良を誘引したと考えられる。そこでこの摩擦による発熱の影響を軽減するため、**Fig. 10**にその外観を示す、内部に水路を設けた水冷ダイを用い、再度振動しごき加工を行った。その結果、**Fig. 11**に示す（慣用しごきと慣用ダイによる振動しごきの結果も示す）ように、振動しごきにおいても不良発生のない成形品を安定して成形できるようになった。

4. 結 言

大型の板金加工用 NC サーボプレスの有する低周波振動モーションにより、慣用金型による深絞り加工としごき加工を行い、低周波振動加工の有効性を実験的に調査検討した。

以下に、これら実験研究により得られた結果をまとめる。

(1) NC サーボプレスで設定可能な低周波振動を負荷した振動深絞り加工においても、ダイのみに超音波振動を負荷した場合²⁾と同様に、慣用深絞り加工に対するLDRの顕著な向上は認められなかった。

(2) 低周波振動を負荷した深絞り加工は、成形品に発生するしわの発生防止効果が高いことが判明し、小さなしわ抑え力でもしわ発生のない成形品が得られるようになることから、結果的に成形限界が向上できることが明らかになった。

(3) 振動深絞りにおいては、 $Dd \geq 4.0 \text{ mm}$ の比較的大きな下降移動量 Dd を設定し、この値よりやや小さな比較的大きな上昇移動量 Ad を設定することで効果的にしわの発生を抑制

Fig. 7 Cups obtained by conventional and vibratory ironings at limiting ironing rate.

Fig. 9 Ring-shaped pattern generated on side wall of cup formed by vibratory ironing ($\delta=53.3\%$, $Ad=0.01 \text{ mm}$, $Dd=0.6 \text{ mm}$).

Fig. 8 Evaluation results of range of conditions under which forming by vibratory ironing is possible.

Fig. 10 Appearance photograph of a water-cooled die used for vibratory ironing.

できることが明らかになった。

(4) 低周波振動を负荷したしごき加工を行うと、慣用しごきに比べ、10%以上の限界しごき率の向上が認められた。

(5) 振動しごき加工においては、下降移動量を $Dd \leq 0.3 \text{ mm}$ と小さくし、上昇移動量も $Ad \leq 0.01 \text{ mm}$ と小さく設定することが、限界しごき率の向上や表面不良発生防止に効果的であることが判明した。

最後に、本実験にご協力いただいた、日本工業大学卒研生の金丸清威、佐々木教行、渡邊聡志の諸君に深く感謝する。さらに、本研究の実施にあたり、サーボプレスを貸与いただきました(株)アマダプレステック、および本研究に対し御助成を賜った(財)天田金属加工機械技術振興財団に厚く御

Fig. 11 Surface roughness values for the obtained cup products vs number of ironing operations.

礼申し上げる。

参考文献

- 1) 神馬 敬, 春日幸生, 岩木信宜, 宮澤 修, 森 栄司, 伊藤勝彦, 羽田野甫: 塑性と加工, **23** (1985), 458-464.
- 2) 片岡征二, 木原諄二, 相澤龍彦: 塑性と加工, **34** (1993), 1264-1269.
- 3) 坂口 稔: プレス技術, **44** (2006), 41-49.
- 4) 鶴 英明, 中川威雄: 塑性と加工, **38** (1997), 408-413.
- 5) 中川威雄: プレス技術, **44** (2006), 18-29.
- 6) 宮川松男, 島宗民夫: プレス技術, **10** (1972), 87.