

サーボプレスを利用した省エネ型プレス加工技術の開発

日本工業大学 機械工学科

教授 古閑 伸裕

(平成 17 年度研究開発助成 AF-2005001)

キーワード：板材成形，せん断，深絞り，しごき，かえり無し，成形限界，サーボプレス

1. 研究の目的と背景

スライドの位置や速度を正確にコントロールできる NC サーボプレス¹⁾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ネジ直接駆動の粉末成形用プレス²⁾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み合わ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 サーボプレスが市販されるようになった。

この NC サーボプレスを利用した加工を行えば、従来多くの工程を経て製造されていた各種部品がより少ない工程で製作できるなど、プレス加工における省エネ化の実現が期待できる。

本研究では、まず、従来の方法では高価な金型や多くの工程を必要としていた「かえり無しせん断」を、慣用単抜き金型を用いた 1 工程加工の実現の可能性を探る。さらに、スライドを低周波振動させながら加工を行うサーボプレス特有のモード設定で、深絞り加工やしごき加工における成形限界や製品精度に及ぼす影響を調査検討し、これら加工における振動成形の有効性を探る。

2. かえり無しせん断加工

2.1 実験条件および方法

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、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り、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）から最大ストローク数 70spm 設定時の速度（平均速度：373mm/s）の範囲内で設定が行える。

図 1 に実験に用いた金型の構造概略図を示す。この金型は 10% t と 5% t の 2 種類の比較的大きなクリアランスが設定可能な単抜き型である。この金型内のパンチには、 $\phi 30.00\text{mm}$ ($C=10\%t$) と $\phi 30.15\text{mm}$ ($C=5\%t$) の 2 種類の円形パンチを準備し、これらのうちのいずれかと $\phi 30.30\text{mm}$ のダイとの組み合わせ工具を用いて加工を行うこととした。また、ダイ内部には押戻し時にパンチの役目をする $\phi 30.26\text{mm}$ の逆押えを設置した。なお、これら工具はいずれも SKD11 製の焼入れ工具（HRC 58）とした。

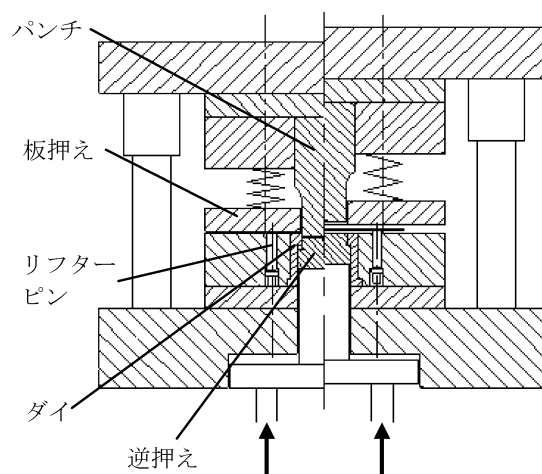


図 1 かえり無しせん断実験金型の構造概略図

この単抜き型を NC サーボプレスに取付け、プログラムにより図 2 に示すようなスライドの動きを実現し、半抜き（第 1 ステップ）、押戻し（第 2 ステップ）、抜き落とし（第 3 ステップ）の 3 ステップで加工を行うこととした。第 1 ステップでは、パンチ側とダイ側からクラックが発生せず、材料が分離しない工具食込み量 KI の設定

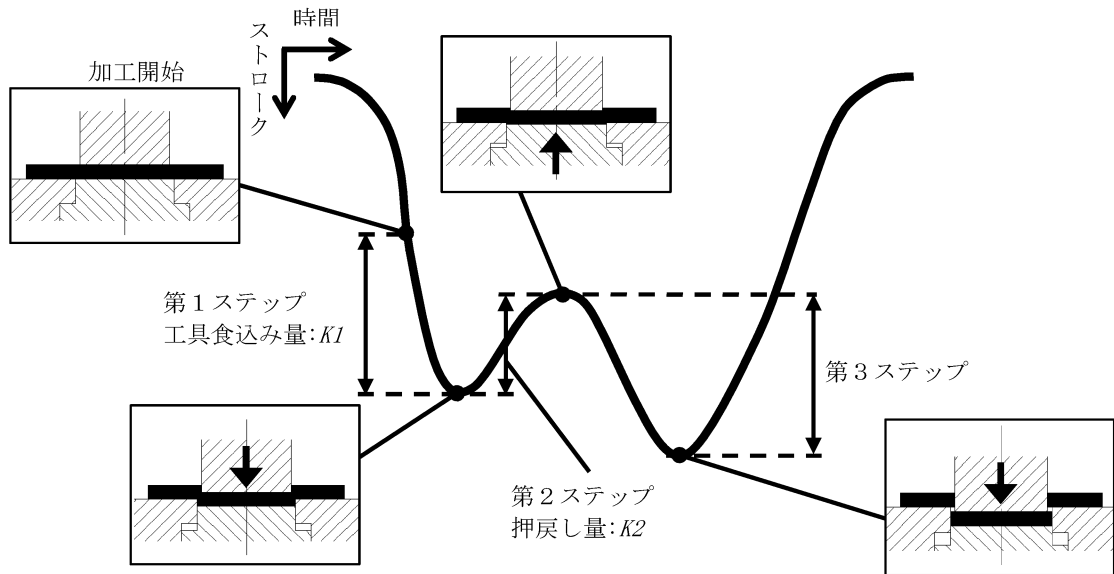


図2 サーボプレスによる1工程かえり無しせん断の加工工程図

が必要であることから、本実験においては、この $K1$ を $10\%t$ から材料分離が発生する直前まで $10\%t$ 間隔で増加させ実験を行うことにした。また第2ステップの押戻し量 $K2$ は、設定した $K1$ を最大値とし、 $10\%t$ から $10\%t$ の間隔で大きくなるよう設定した。

被加工材には、押戻し力を負荷するダイクッション力の制限から、表1に示す化学成分と機械的性質の、板厚 $t=1.5\text{mm}$ のA5052 アルミニウム合金板を用いた。

表1 被加工材の化学成分と機械的性質 (A5052, $t=1.5\text{mm}$)

化学成分 (mass%)			
Si	Fe	Cu	Mn
0.08	0.27	0.01	0.00
Mg	Cr	Zn	Al
2.62	0.18	0.00	Bal.
機械的性質			
引張強さ / MPa			258.9
耐力 / MPa			189.1
伸び / %			11.8

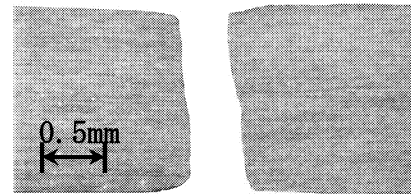


図3 $C=10\%t$ でかえり無しせん断された切口部横断面形状 ($K1=30\%t$, $K2=20\%t$)

表2 $C=10\%t$ でかえり無しせん断した切口面の評価結果

		第1工程工具食込み量 ($K1$) / % t			
		10	20	30	40
第2工程押戻し量 ($K2$) / % t	10	×	×	×	×
	20		×	○	○
	30			△	△
	40				△

○：かえり発生無し ×：かえり発生
△：かえり発生無し、針状くず発生

2.2 実験結果および考察

(a) アール無し (慣用) 工具によるかえり無しせん断

まず、 $C=10\%t$ のクリアランスで、 $K1$ と $K2$ を種々変化させて打抜き実験を行った。その結果、 $K1$ が $50\%t$ 以上になると、半抜き時に材料分離が行われるため、 $K1=40\%t$ までの工具食込みをそれぞれ与え実験を行った。

この $C=10\%t$ の条件では、図3に示すような切口両角部にかえりの発生が認められない切口面が、表2中○印で示す条件で得られることがわかった。しかし、同表から

もわかるように、かえり発生のない切口面の得られる成功条件域は $K1=30\%t$, $K2=20\%t$ と $K1=40\%t$, $K2=20\%t$ の2条件のみと極めて狭いこと、さらに同表中△印で示す条件で加工された穴側切口面には、針状の屑が発生する現象が認められた。この針状の屑は、 $C=10\%t$ という大きなクリアランス条件下では、板面に対する切口面の直角度が悪い (大きく傾斜している) ことから、クラックの会合がスムーズになされず停留クラックが残存し、これが加工途中で脱落したか、押戻し時に切口面同士がこすれ

あったために発生したものと推察される。

そこでつぎに、上述したような屑の発生を回避するため、クラックの成長がより板面に垂直な方向にスムーズになされることで、直角度のよい切口面が得られ、停留クラックの発生や押戻し時の切口面同士のこすれも低減できることが予想できる $C=5\%t$ の条件で $C=10\%t$ と同様の実験を行った。

その結果、切口面の板面に対する直角度は向上し、いずれの条件においても針状の屑の発生は認められなくなった。しかし、 $C=5\%t$ の場合も $C=10\%t$ の場合に比べ、 $K1$ が $50\%t$ まで大きく設定できるようになったものの、かえり発生のない切口面が得られる成功条件域は $C=10\%t$ の場合と同様、極めて狭いものであった。

(b) アール付き工具によるかえり無しせん断

クラック発生の抑制やその成長方向を制御することで、製品切口面にせん断面の割合を増加させることができる精密せん断法として、仕上げ抜き法³⁾がある。このせん断法は、クリアランスを小さく設定し、さらに穴側が製品になる穴あけ加工ではパンチ刃先に、抜き落とされる側が製品になる打抜き加工ではダイ刃先に、それぞれ小さな丸み(アール)または面取りを施し、加工を行うせん断法である。この刃先にアールまたは面取りが施された工具により、被加工材にせん断変形を与えると、刃先近傍の被加工材内部が大きな圧縮応力場により支配されるため、クラックの発生が抑制され、結果的にクラックの合会による分離時期を遅らせることができる。また、加工中に相対する側のシャープエッジを有する工具の刃先からクラックが発生しても、このクラックは穴抜きの場合はスクラップとなる抜き落とされる側へ、打抜きの場合は穴側へそれぞれクラックが成長するため、製品側切口面の大半または全てが、平滑なせん断面により形成される。

本かえり無しせん断においても、上述の工具刃先にアールを設ける方法を採用すれば、比較的大きなクリアランス設定がなされる慣用打抜き型を用いた場合においても、かえり無し切口面が得られる成功条件域を拡大できることが予想される。

そこでまず、どの程度の半径のアールを工具刃先に設ければかえり無しせん断の成功条件域拡大に効果が得ら

表3 刃先にアールをつけた工具(パンチ)を用いてかえり無しせん断を行った場合の切口面評価結果 ($C=5\%t$, $\Delta=0.07\text{mm}$)

		R=0.1mm					R=0.2mm					R=0.3mm					
		第1工程工具食込み量 (K1) / %t															
		10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	
第2工程押戻し量 (K2) / %t	10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	20		×	×	×	○		×	×	×	○		×	×	×	○	
	30			×	×	○			×	○	○			×	○	○	
	40				×	×					○	○				○	○
	50					×					○					○	

○：かえり発生無し ×：かえり発生

れるかといった観点から、 $R=0.1\text{mm}$, 0.2mm , 0.3mm の半径のアールを設けた3種類のパンチによる実験を行った。

表3に示すように、 $R=0.1\text{mm}$ ではシャープエッジの工具を用いた場合(表2)と同様に狭い成功条件域であったが、 $R=0.2\text{mm}$ 以上の条件では製品となる穴側切口面のかえり無しせん断が行える成功条件域が大きく拡大した。これは、第1ステップの半抜き時に大きな工具食い込みを与えることができるようになったことや、第2ステップの押戻し時に早期に材料分離がなされなくなり、切口角部にだれを形成できるようになったためと考えられる。

つぎに、抜き落とされるものが製品となる打抜き加工においても同様の成功条件域の拡大が行えるか、という点を明らかにするため、ダイに半径 $R=0.3\text{mm}$ のアールを設け、同様のせん断実験を行った。その結果、図4(a)に示すようなかえり発生のない切口面を、抜き輪郭全域にわたり得ることができ、かえり発生のない広い成功条件域の存在が確認された。なお、図4(b)中○印で示す、アールを設けた工具の端面直下または直上に位置するスクラップ側には、凸状の変形が発生している。これら変形は工具のアールを設けた刃先に沿って被加工材が変形し発生したものであり、スクラップ側(穴側)にのみに発生し、製品側の切口面性状に悪影響を与える現象は認められなかった。

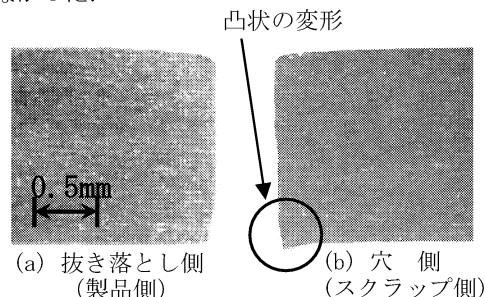


図4 刃先にアールを設けたダイを用いたかえり無しせん断により得られた切口部の横断面形状 ($R=0.3\text{mm}$, $C=5\%t$, $K1=50\%t$, $K2=30\%t$, $\Delta=0.07\text{mm}$)

3. 深絞り加工としごき加工

3.1 実験条件および方法

深絞り加工としごき加工のいずれの実験にも、かえり無しせん断に用いたプレス機械と同一のNCサーボプレスを使用する。また、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 A1050 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表 4 に示す。

表 4 被加工材の化学成分と機械的性質
(A1050, $t=0.6\text{mm}$)

化学成分 (mass%)			
Si	Fe	Zn	Ti
0.1	0.28	0.01	0.03
V	Al		
0.01	Bal		
機械的性質			
引張強さ / MPa			112
耐力 / MPa			82
伸び / %			25.2

図 5 に深絞り実験に用いた金型の構造概略図を示す。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 $t=0.8\text{mm}$ 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。

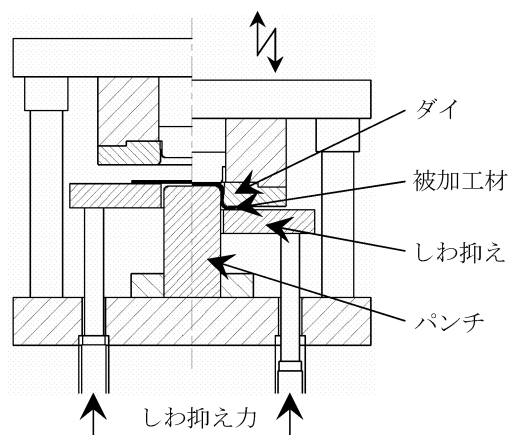


図 5 深絞り加工実験金型の構造概略図

図 6 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 の組み合わせを $0.01\text{mm} \leq Ad \leq 5.0\text{mm}$, $0.5\text{mm} \leq Dd \leq 6.0\text{mm}$ の範囲でそれぞれ選択し、振動を负荷した加工を行った。こ

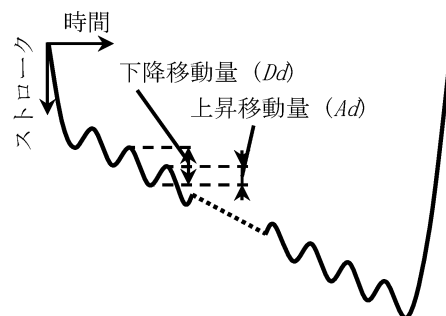


図 6 振動 (パルス 1) モーション線図

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 $2.9\text{--}12.4\text{Hz}$ である。

しごき加工では、図 7 に示す金型を用い、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。振動负荷時の 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 $12.1\text{--}12.4\text{Hz}$ 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動しごき加工を行った。なお、潤滑油には深絞りとしごきのいずれの実験においても水溶性工作油 (S-1330, 動粘度: $275\text{mm}^2/\text{s}$, 日本工作油) を用いた。

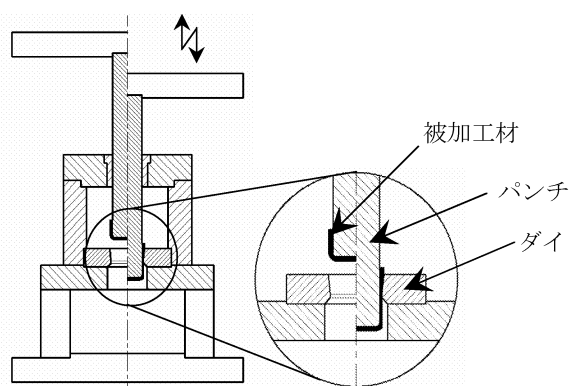


図 7 しごき加工実験金型の構造概略図

3.2 実験結果および考察

(a) 深絞り加工

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うこととした。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⁴⁾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、振動を荷重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、図8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 0.5mm 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得られることが明らかになった。

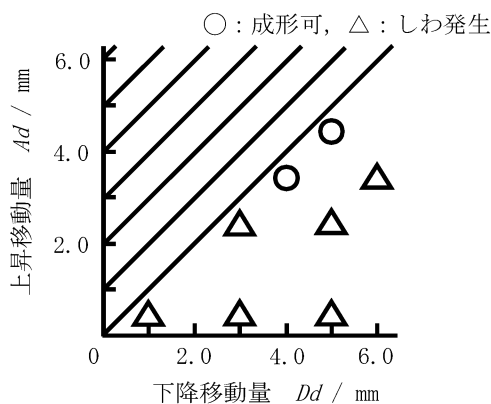


図8 各振動条件における成功域

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。この場合の振動荷重条件は、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。

図9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 35mm 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 0.75mm 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 22kN 以上負荷しなければしわ発生を抑制することができなかったのに対し、振動を荷重すると、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、 $Ph=8\text{kN}$ の条件で限界絞り比 $LDR=2.35$ の成形品を得ることができた。

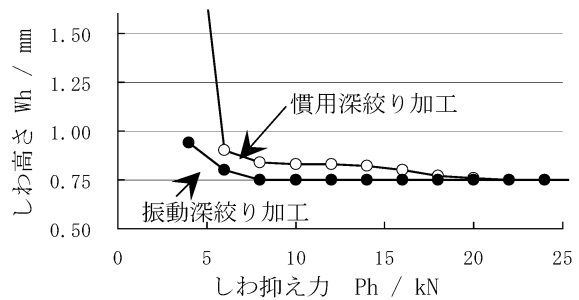
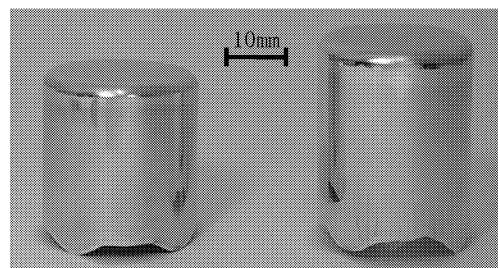


図9 容器フランジ部のしわ高さ調査結果
($DR=2.0$, $Ad=4.5\text{mm}$, $Dd=5.0\text{mm}$)

以上の結果から、NC サーボプレスによる低周波振動を荷重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、慣用深絞り相比べ LDR の大きな向上は認められなかった。しかし、低周波振動の荷重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は、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かといった点を探る



(a) 慣用しごき ($\delta_{\max}=46.9\%$) (b) 振動しごき ($\delta_{\max}=59.3\%$)

図10 限界しごき率における成形品

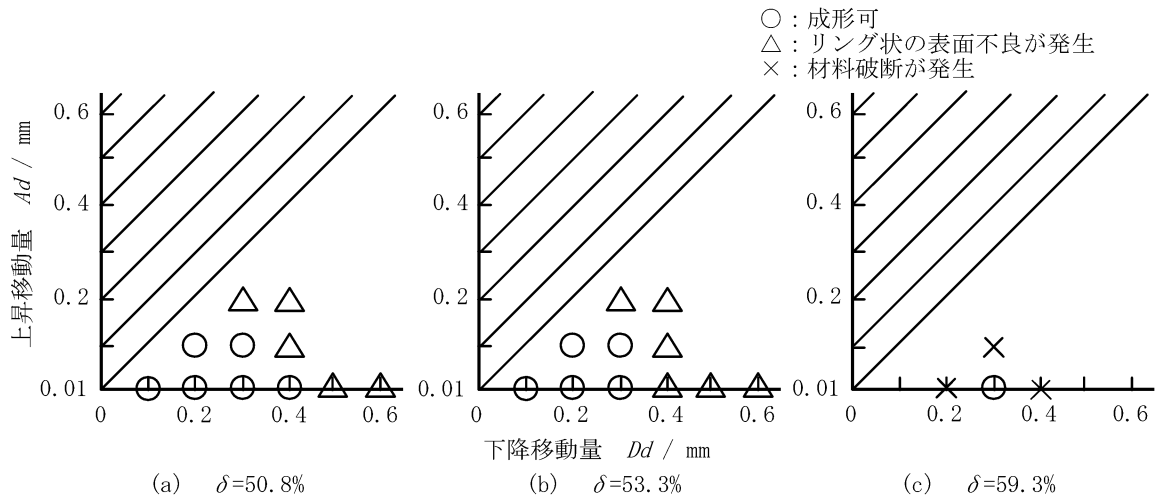


図 11 各しごき率における加工成功域調査結果

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、図 10 (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、図 11 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、図 10 (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図 12 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。

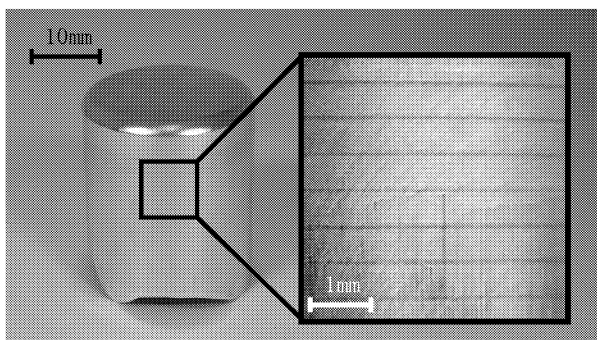


図 12 振動しごき加工により発生したリング状の表面不良

4. おわりに

スライドのモーションパターンが自在に設定可能な NC サーボプレスが開発された。しかし、このプレス機械をどのように活用すれば、プレス加工における環境改善や生産の高能率化、引いては省エネ化が実現できるか、といった点については明らかにされていない。

本助成研究では、まずせん断加工における NC サーボプレスの有効利用の一例として、慣用金型によるかえり無しせん断実現の可能性を明らかにした。さらに、NC サーボプレス特有の振動モードを利用した、深絞り加工としごき加工を行い、それぞれの加工における成形限界向上効果や成形品の精度向上効果などを明らかにした。

これら以外のプレス加工においても NC サーボプレスを利用することで、生産の効率化や製品の高精度化など、プレス加工の高付加価値化や省エネ化が実現できる用途は多く存在するものと思われる。

謝 辞

本研究に対し、多大な助成を賜った、財団法人天田金属加工機械技術振興財団に深く感謝申し上げます。さらに、本研究を実施するに際し、NC サーボプレスを貸与いただいた、株式会社アマダプレステックに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中島良次：プレス技術，42-5 (2004)，34.
- 2) 鶴英明・中川威雄：塑性と加工，38-426 (1997)，408.
- 3) 森田稔・音田一造：同上，2-6 (1961)，79.
- 4) 宮川松男・島宗民夫：同上，10-11 (1972)，87.