

切込み動作制御による板材の精密せん断加工に関する研究

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科
教授 廣田 健治
(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021021-B3)

キーワード：せん断加工，分離面性状，アクチュエータ

1. 研究の目的と背景

せん断加工では破壊に至るまでの大変形が輪郭断面付近に生じ，一般的な慣用せん断加工による切口面には図 1(a) のように破断面やかえりなどの欠陥が生じる．ファインプランキングやシェービングのように破断面を抑制しうる工法が知られているが，図 1(b) のように平滑面の延長としてひれ状のかえりが生じる．かえりは，かえりが生じる側の端部にだれ込みを生じさせれば抑制でき，上下抜き¹⁾のように半せん断後にせん断方向を逆転させたり，突起を押し込むことで実現できる．ただし，図 1(c) のように板厚中央部に破断が生じたり，破断を抑制できても側方に飛び出しや段差が生じることがある．微小クリアランスを設定して板鍛造のような手法を用いれば，図 1(d) のように破断面，かえりを抑制し，且つ，段差や飛び出しのない切口面を得ることも可能と考えられるが，高精度な金型と十分な材料拘束力を付与できるプレス装置が必要となる．

本研究では慣用せん断加工のクリアランスにおいて，上下のパンチを同期させて駆動することで様々な切込み動作を与え，図 1(d) のように側面に破断および段差のない切口面を実現することを目指す．

2. 実験方法

2・1 実験装置

製作した二軸駆動のプレス装置を図 2 に示す．4 本の支柱で連結された上下のプレートに加圧能力 6.3kN の直

動アクチュエータを対向して設置している．下側のプレートにはダイセットの下型をボルトで固定している．図 3 にダイセット内の金型部の寸法を示す．上側のアクチュエータのロッドは上型を介して上パンチに，下側のアクチュエータのロッドは逆押さえにそれぞれ接続されている．板押さえは上方向にせん断する際のダイの役割も兼ねるようにする．このため，被加工材を設置した後に板押さえをダイにボルトで固定し，上向きの切込みに対して後退しないようにした．せん断時の荷重はアクチュエータのトルク出力から換算し，半せん断の切込み量は写真のようにレーザー変位計を設置して上型の変位から算出した．

2・2 実験条件

被加工材には板厚 1mm の純アルミニウム板材を使用する．引張試験から得られた圧延方向の機械的性質を表 1 に示す．一様伸びと全伸びの数値から，加工硬化が少な

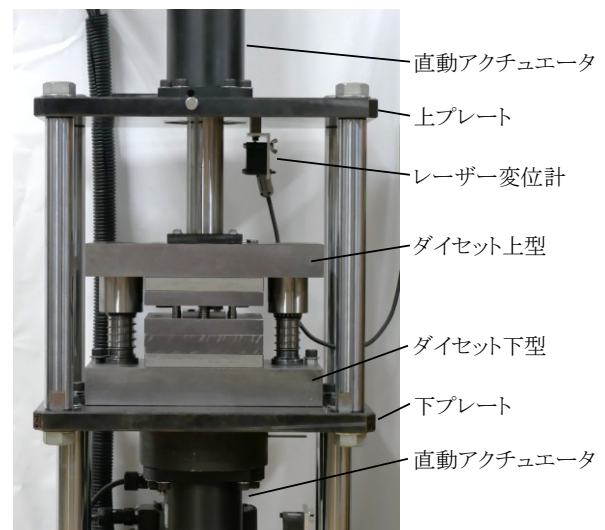


図 2 製作した二軸駆動プレスの外観

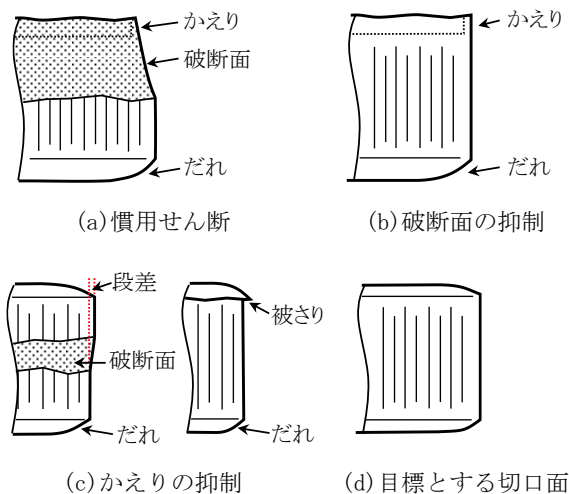


図 1 せん断切口面の分類

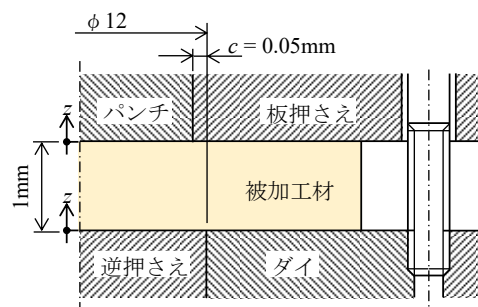


図 3 せん断部の輪郭と工具の寸法

く延性が乏しい材料であることがわかる。試片は一辺 30mm の正方形とし、その中央部から図 3 のように直径 12mm の円形輪郭を打ち抜く。クリアランスは慣用せん断加工で用いられる数値を参考に板厚の 5% とした。潤滑剤には非塩素系のプレス加工油を用いた。

本研究では下方向だけでなく上方向にも切込みを与える。このため、試片は板押さえおよび逆押さえで拘束し、上方向の切込みでは逆押さえがパンチ、板押さえがダイの役割をそれぞれ果たす。板押さえは前述のようにボルトでダイに固定し、上下のアクチュエータには同じ動作を与えてパンチと逆押さえを駆動する。パンチの切込み動作については、以降の章で結果と併せて述べる。

表 1 被加工材の引張試験結果 (圧延方向)

材種 (JIS)	引張強さ	一様伸び	全伸び
A1100-H14	137 MPa	1.7 %	3.3 %

3. 振動を伴う切込み動作の検討²⁾

3・1 先行研究

ガラスエポキシ積層板に対して、振動を加えながらせん断を行う「振動仕上げ抜き³⁾」による穴抜き事例が報告されている。母材となる樹脂は脆性材料であり、通常のせん断加工では凹凸の激しい破断面となる。振動仕上げ抜きでは上下のパンチで挟んだ状態で振動を加えている。穴の内面は最初は荒れた破面となるが、振動を続けると破面同士が擦過されて摩擦発熱する。その熱で樹脂が軟化し、破碎したガラス繊維と樹脂が混成されて平滑に仕上げられることが示されている。

金属板材に対しても振動を加えながら穴抜きを行うことで切口面が改善された事例がある⁴⁾。ただし、この場合はパンチ側からの打撃のような振動であり、せん断方向の逆転はない。除荷しながら逐次的に切込みが進むことでパンチと被加工材の間に潤滑剤が供給されることが改善要因の一つと説明されている。

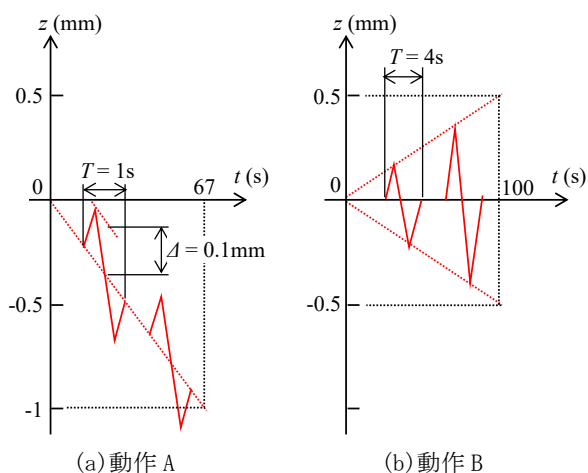


図 4 切込み動作

3・2 切込み動作

振動仕上げ抜きを参考に図 4 に示す 2 通りの振動動作を与える。縦軸の原点は図 3 に示すようにパンチと逆押さえの初期位置としている。動作 A は破線で示す慣用せん断のパンチの下降動作に一定の振幅の振動を重ね合わせたものである。周期は $T=1s$ 、振幅は $\Delta = 0.1mm$ とし、1 回の振動で 0.015mm ずつ切込みが進むようにした。

動作 B は、振動の中立位置は変化させずに振幅を徐々に拡大する動作である。アクチュエータの動作速度の制約から周期は $T = 4s$ とし、1 回の振動で振幅が上下に 0.02mm ずつ拡大するように振動させる。全振幅 2Δ が板厚と同じ 1mm に達するまで振動を続けた後、下方にパンチを移動させて分離する。比較のために、振動を与えない慣用せん断も実施した。

3・3 分離面の比較

動作 A、B および慣用せん断により得られた切口面を図 5 に示す。慣用せん断では、切り込み方向となる下端にだけが見られ、平滑面の途中から破断面となっている。

動作 A では慣用せん断と類似した切口面となっているが、破断面を拡大した図 5 (b) を見ると、慣用せん断では延性破壊特有のディンプルが見られるのに対し、動作 A ではディンプルに被さるように板厚方向に筋状の凹凸が見られる。これは製品側とスクラップ側の破断面が振動により擦過されたためと考えられる。また、動作 A では慣用せん断よりもだれが少なく、平滑面がダイの側面で上下に擦られてだれが押し戻されたことが推察される。

動作 B では平滑面はなく切口面全体が破断面となっており、破断面には動作 A のように筋状の凹凸が見られる。動作 B では振幅が切込みとともに上下に拡大するため、振動の途中で生じた破断面がスクラップ側の破断面と擦られて切口面全域に広がったためと考えられる。

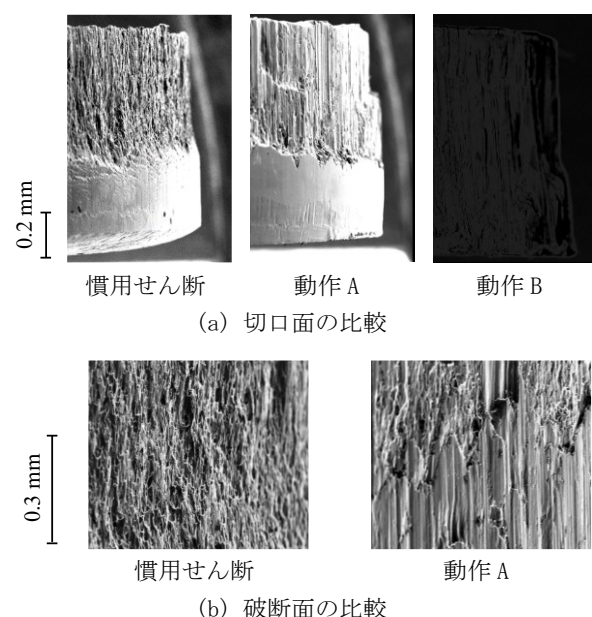


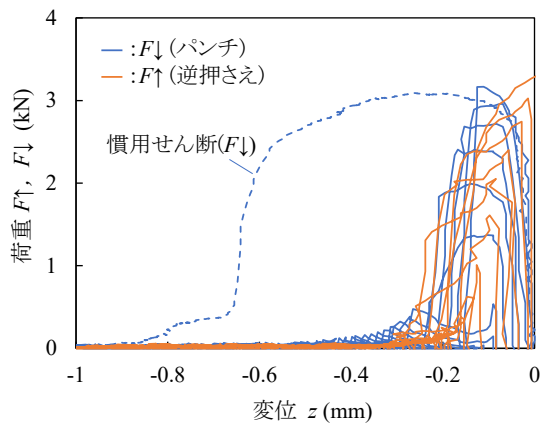
図 5 切込み動作による切口面の違い

3・4 せん断荷重の比較

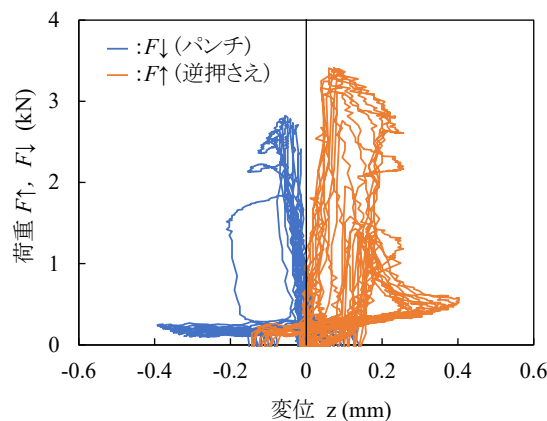
図 6 に荷重線図を示す．縦軸の荷重はアクチュエータの加圧方向を正としており，凡例に負荷方向を矢印で示している．横軸は図 1 の座標軸の向きに対応しており，下向きにせん断する方向が負となる．

図 6(a) の青色の破線は慣用せん断の荷重曲線である． $z \approx -0.6\text{mm}$ で荷重が急減しており破断分離したことがうかがえる．動作 A と動作 B ではパンチによる下向きの荷重 $F\downarrow$ 以外に，逆押さえによる上向きの荷重 $F\uparrow$ も生じる．また，振動により変位と荷重が変動するため，曲線が同じ箇所に重なって描かれる結果となった．振動との対応を把握するために時間に対する変化として表すと図 7 のようになる．どちらの動作も下向きと上向きの荷重のピークが交互に現れており，荷重が最大となる振動時では点線で示すようにそれぞれ下死点と上死点の変位に対応している．動作 B では上死点と下死点の変位が正と負に分かれるため，図 6(b) において $F\downarrow$ と $F\uparrow$ の荷重曲線は第 1 象限と第 2 象限に分かれている．

図 7(a) の動作 A は振動とともに下方方向に切込みが進む． $F\downarrow$ は 1 回目の振動で最大となり徐々に低下し，7 回目の振動で急減している．対応する変位は $z \approx -0.3\text{mm}$ であり，図 6(a) の荷重曲線も $z > -0.3\text{mm}$ の範囲で重なっ



(a) 慣用せん断および動作 A

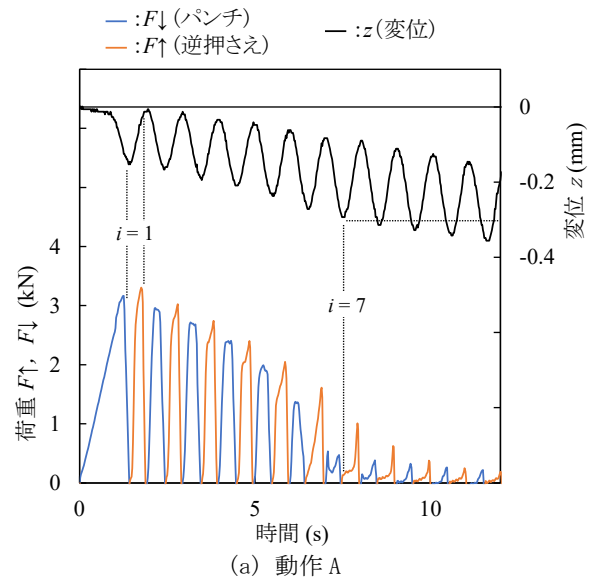


(b) 動作 B

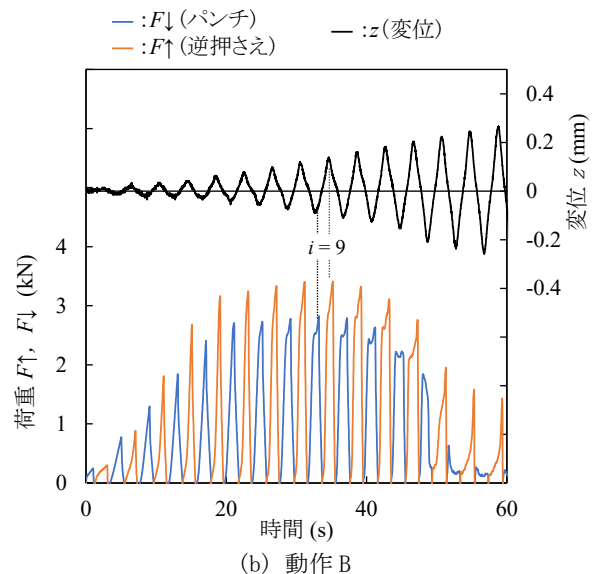
図 6 荷重線図

ている．慣用せん断の荷重曲線と比較すると少ない切込みが繰り返されて破断したことがわかる．一方，図 7(b) の動作 B は初期位置から上下対称に徐々に切込みが生じ，動作 A に比べて切込みの増加が遅い．このため， $F\downarrow$ と $F\uparrow$ のピークは振動とともに徐々に増加した後，10 回目の振動から減少に転じるような変化を描いている．

動作 A と動作 B の下向きの最大荷重は慣用せん断とほぼ等しい．また，振動毎のピーク荷重を比べると， $F\uparrow$ の方が $F\downarrow$ よりもやや大きく，動作 B の方がその差が大きい．動作 A では $z < 0$ なので上向きの切込みでは被加工材の内部への押し戻ししか起こらないが，動作 B では $z > 0$ となり，押し戻しにとどまらずさらに板押さえのエッジをダイとして上向きの切込みが生じる．図 3 に示したように板押さえの径はダイの径よりも小さいため，上向きの切込みではクリアランス部にある材料を圧縮しながらせん断変形を与えることになる．このことが，動作 A よりも $F\uparrow$ を増加させていると考えられる．



(a) 動作 A



(b) 動作 B

図 7 時間に対する変位と荷重の変化

4. 押し抜き分の分離行程に振動を付与する動作の検討⁵⁾

4・1 先行研究

上下抜きはせん断方向を反転させて上下の端部にだれを形成することでかえりを抑制する。原著論文¹⁾によれば、ダイと板押さえの径を等しくし、パンチと逆押さえの径によって上下の切込みに対するクリアランスを与えている。このため、抜き落とす際に破断が生じたり、平滑面同士が干渉してかえりが生じることがある。一方、板押さえの径をダイの径より小さくして上向きの切込みを与えれば、図8(a)のように破断を生じさせず深い切り込みを与えることができ、「押し抜き」として報告されている⁶⁾。この状態から平板間で押し戻せば、半せん断で形成された面同士が擦ることなく分離が行われ、かえりも確実に抑制できる。この方法は国内では平押し法として知られている⁷⁾。被加工材とせん断条件によっては破断面とかえりを抑制することができるが、図1(c)のような飛び出しが残留する⁸⁾。近年、工具条件と切込み量を最適化することで、この飛び出しを非常に小さく抑えた一工程押し抜きが報告されている⁹⁾。ただし、完全に飛び出しを抑制するには至っていない。

4・2 切込み動作

本章では一工程押し抜きの分離行程で振動を付与する動作Cを検討する。具体的な行程を図8(b)に示す。上向きに h_1 の切込みを与えた後、厚さ $t_1 = t_0 - h_1$ の接続部に振動を加えてから下方へ抜き落とす。なお、図のように振動回数を数えると、最後の n 回目の振動は半周期となる。振動の周期 T は1s、振動回数 n は1と10とし、切込み量 h_1 と全振幅 2Δ を変化させる。

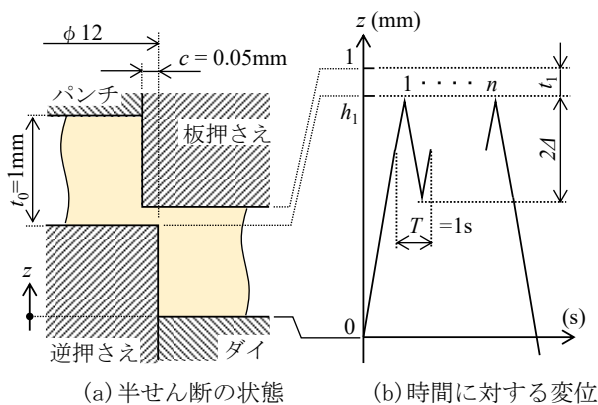
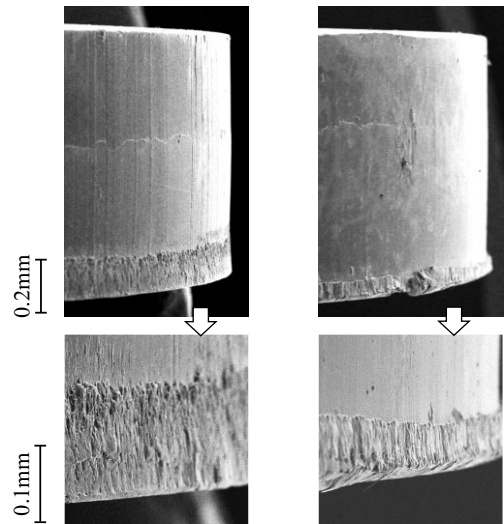


図8 動作Cの切込み動作

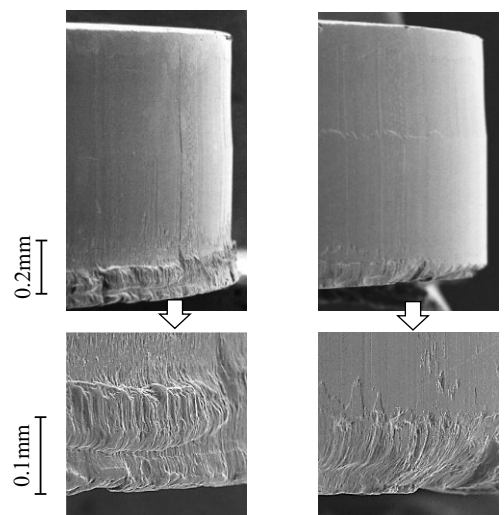
4・3 一工程押し抜きにおける分離面

図8(b)において $n = 1$ とした場合が一工程押し抜きとなる。図9に切込み量 h_1 を変えた場合の切口面を示す。切口面の大部分は図8(a)において板押さえの側面で形成された面であり、深い切込みに対しても破断のない平滑な面が得られている。また、上下方向に切込みを与えたことで上下の端部にはだれ込みが生じ、かえりが抑制されている。下端部は図8(a)の状態からパンチで下方に抜



(a) $h_1 = 0.85\text{mm}$ (b) $h_1 = 0.92\text{mm}$

図9 一工程押し抜きによる切口面



(a) $h_1 = 0.85\text{mm}$ (b) $h_1 = 0.92\text{mm}$

$2\Delta = 0.5\text{mm}$ $2\Delta = 0.7\text{mm}$

図10 動作Cにおける切口面 ($T = 1\text{s}$, $n = 10$)

き落とす際に形成された部位である。切込み量 h_1 によらず平滑面に被さるような段差が残っており、その厚さは h_1 が大きい方が薄い。また、段差部分には破断が見られる。破断は h_1 を極限まで大きくすれば抑制できるが、半せん断により残留した部分は図8(a)のクリアランス部で逆方向にせん断されて分離するため、クリアランスが存在する限り側方へ飛び出した部分が残ることは避けられないと考えられる。

4・4 動作Cにおける切口面

h_1 と 2Δ の組み合わせを変えて、図8(a)の状態から $n = 10$ 回の振動を与えて抜き落とす実験を行った。特徴的な切口面を図10に示す。図10(a)は図9(a)と同じ切込み量であり、図9(a)と同様に段差と破断が生じている。ただし、破断部を拡大して比較すると図10(a)の方が破断部の凹凸が粗く、且つ、縦方向に筋が見られる。縦方向

の筋は図 5 の動作 A や動作 B の破断部に類似しており振動による擦過の痕跡と考えられる。また、破断部の凹凸は振動の上死点で相手側の破断面と繰り返し接触することで生じたと推察される。

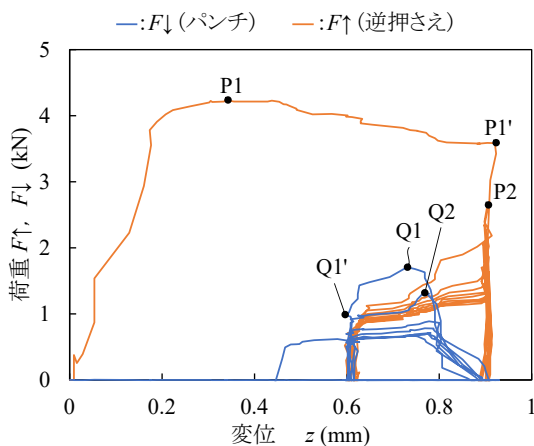
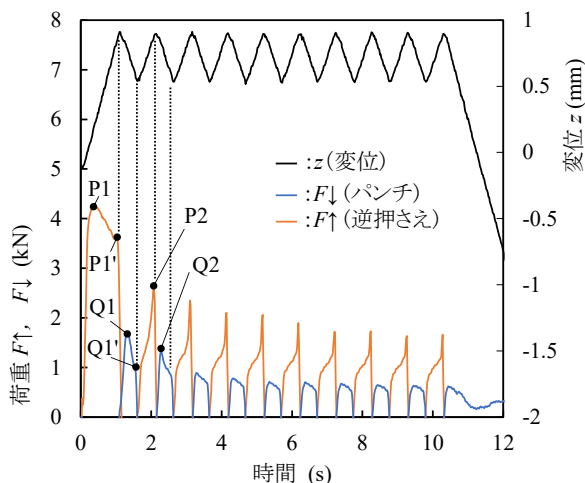
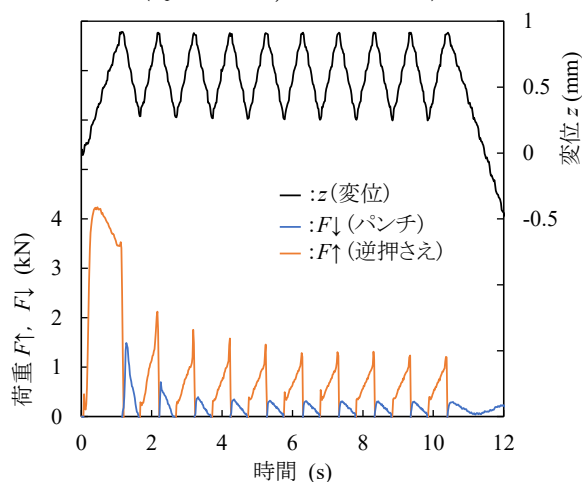


図 11 段差が生じた条件での荷重線図
(動作 C, $h_1 = 0.93\text{mm}$, $2\Delta = 0.33\text{mm}$)



(a) 段差の生じた条件
($h_1 = 0.93\text{mm}$, $2\Delta = 0.33\text{mm}$)



(b) 段差の生じなかった条件
($h_1 = 0.92\text{mm}$, $2\Delta = 0.7\text{mm}$)

図 12 時間に対する変位と荷重の変化 (動作 C)

一方で、図 9(b)のように破断や段差のない切口面も得られた。同じ条件で振動 1 回目の下死点で加工を止めて取り出したところ、既に分離しており図 9(a)のような段差が生じていた。このことから、2 回目以降の振動で段差部分が脱落したことが考えられる。その場合、脱落した段差部分が存在するはずである。同じ条件で再実験を行い、せん断後の切口面付近を注意深く観察したところ、平滑面に潤滑剤で張り付いた針状の細片が認められた。以上のことから、図 10(b)の条件では 1 回目の振動直後に分離して段差が生じるが、2 回目以降の振動で段差部が根元から脱落して段差のない切口面になったと考えられる。

図 10(b)を見ると振動で分離した下端部はやや荒れており欠けたような形状となっているが、直角な断面形状の中に収まっているという観点では図 1(d)に示す目標とする切口面が得られたと言える。

4・5 振動に伴う荷重の変化

図 11 に段差の生じた条件 ($h_1 = 0.93\text{mm}$, $2\Delta = 0.33\text{mm}$, ※ 図 10(a)とは異なる条件)の荷重線図を示す。上向きの半せん断では $z = 0.3\text{mm}$ 付近で $F\uparrow$ は最大となり以降では漸減している。振動が加わると全振幅に相当する $z = 0.6 \sim 0.9\text{mm}$ 付近で 2.7kN 未満の $F\uparrow$ と $F\downarrow$ が繰り返し現れている。図 11 を時間に対する変化で表すと図 12(a) になる。点線で結ばれた荷重と変位を見ると、 $P1'$ と $Q1'$ の荷重がそれぞれ振動の上死点と下死点に対応していることがわかる。図 12(a)で振動 2 回目の荷重のピーク $P2$, $Q2$ に注目すると、どちらも上死点付近で最大となっている。4.4 で述べたように 1 回目の振動の下死点で分離して段差が形成される。2 回目以降の振動の $F\uparrow$ は、分離した段差部の破断面どうしが上死点で工具に挟まれたことで生じ、上死点から下死点に向かう動作では押しつけられた破断面どうしが擦過され、その抵抗として $F\downarrow$ が生じていると考えられる。

図 12(b)は段差の生じなかった条件 ($h_1 = 0.92\text{mm}$, $2\Delta = 0.7\text{mm}$) である。荷重は図 12(a)と同様の変化が見られるが $F\downarrow$ が(a)よりもやや低くなっている。4.4 で述べたように 2 回目以降の振動で段差部分が脱落したとすると、上死点で破断面どうしが接触しなくなり、下死点に向かう動作の抵抗が低下して $F\downarrow$ が低くなったと考えられる。

5. おわりに

本研究では、慣用せん断加工のクリアランスにおいてせん断方向の逆転を伴う切込み動作を与えることで、破断面、かえりを抑制し、且つ、側面に段差や飛び出しのない切口面を実現することを目指した。板厚 1mm の純アルミニウム板材を対象として円形打抜き実験を実施し、振動を伴ういくつかの切込み動作を試みた結果、一工程押し抜き分の分離行程に振動を付与することで目標とする切口面を得ることができた。

今後は振動およびせん断の条件 (切込み量、振幅、周

期，クリアランス，刃先の丸み）ならびに被加工材の延性が成否に及ぼす影響について検討を行い，切口面の生成機構と成功要件を明らかにする．また，段差部が脱落することは望ましくないため，段差部をスクラップ側に留められるような工具条件を検討したい．

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成を賜り実施しました．ここに深く感謝の意を表します．

参考文献

1) 前田禎三：機械の研究，10-1(1958)，140.

- 2) 永里直輝・廣田健治：第 74 回塑性加工連合講演会論文集(2023)，170.
- 3) 横井秀俊・中川威雄：塑性と加工，25-279（1984），335.
- 4) 前野智美・菅原稔・森謙一郎：平成 28 年度塑性加工春季講演会論文集(2016)，255.
- 5) 廣田健治・和田航大：2025 年度塑性加工春季講演会論文集(2025)，225.
- 6) 山田通・北島宜誠：プレス技術，4-10(1966)，29.
- 7) 牧野育雄：プレス技術，13-5(1975)，93.
- 8) 廣田健治・稲富康介・竹内康晃・橋口啓也：塑性と加工，55-638（2014），238.
- 9) 森田将貴・古閑伸裕・山口貴史・鈴木洋平：2023 年度塑性加工春季講演会論文集，(2023)，109.