

分流現象を伴う平押し法の厚板材穴抜き加工への適用についての研究

岐阜工業高等専門学校 機械工学科

教授 加藤 浩三

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016011)

キーワード：分流方式型鍛造，かえりなしせん断法，平押し法，穴抜き

1. 研究の目的と背景

平押し法は、せん断分離面のかえりを抑制するせん断方法であり、この適用条件の拡大を意図した研究が行われてきている¹⁾⁻³⁾。平押し法の実現を妨げるひとつの要因として、2ステップ目の押し戻し工程において、分離されるべきせん断変形部分が締結状態になり分離を妨げる場合がある。著者らは、平押し法の穴抜きへの適用拡大を目的とした検討を行ってきている^{4),5)}。穴抜きへの適用の特徴としては、ブランク中央部はスクラップとして排除される不要部分であるため、工程途中の塑性流動の観点から、打抜きの場合より工程設計に自由度の増加が生じうる。一方で、別の観点から、型鍛造の塑性流動技術として分流方式型鍛造が適用されており、バルクな型鍛造のみならず板鍛造分野にも広く適用されつつある^{6),7)}。

以上の観点から、本研究では、厚手金属板材の穴抜きに焦点を絞り、かえりの発生しない穴抜き方法を研究シーズとして開発することを目的としている。具体的には、従来技術の平押し法と分流方式型鍛造の両概念を結合した新たな加工工程に着目する。検討に際しては、第1ステップとして、有限要素法によるシミュレーションを行い、提案する新たな穴抜き法の適用可能条件を定量的に評価し、さらに第2ステップではシミュレーション結果を踏まえた実験により成形機構を定性的に考察した。

2. 有限要素法による検討

2.1 提案する加工工程の概要

Fig. 1 は提案する穴抜き工程の概要図である。全体は平押し法を基本としており、半せん断工程と押し戻し工程の2つの工程から構成されている。半せん断前のブランクには予穴が設けられており、半せん断工程中にブランクに分流現象を発生させ、押し戻し工程における締結を抑制し、分離を促進することが期待されている。

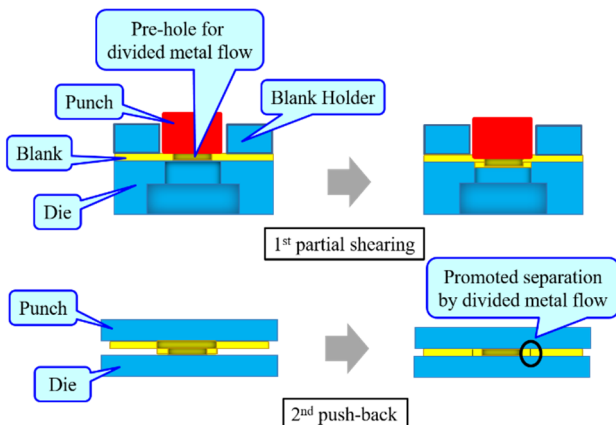


Fig. 1 Schematic view of concise reciprocal punching process with divided metal flow

2.2 有限要素解析の概要

Fig. 2 は第1番目の半せん断工程をシミュレーションするためのモデルの概要図である。解析には商用の剛塑性有限要素法解析ソフトウェア Deform-3D を用いている。なお、同ソフトウェアは変形解析のみならず、損傷評価に基づくせん断のシミュレーション機能を備えているが、本検討では、変形解析機能のみを利用することとし、せん断・分離のシミュレーションを実施しないこととしている。

工具セットはパンチ、ダイ、板さえ、及び穴あきダイクッションから構成されている。穴あきのブランクの要素数は約 10000 であり、4 節点 4 面体要素を用いており、パンチと接触する部分の要素分割を局所的に細かくする機能を用いている。またダイクッションについては、Deform の『スライディングダイ』機能を用いて、ダイクッションがブランク底部に接触したまま追従して降下するようにしている。Table 1 に半せん断工程におけるシミュレーション条件をまとめて示した。加工のシミュレーションに際しては、上部のパンチを可動工具としている。また、圧下量は板厚の 50% としており、これを 50 ステップで計算した。

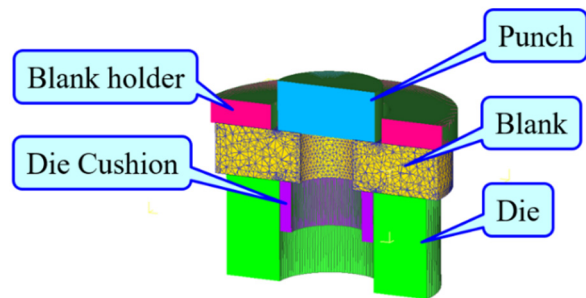


Fig. 2 Simulation model for 1st partial shearing process with pre-hole

Table 1 Simulation condition for partial shearing process

Blank	Diameter : $\phi 50$ mm Thickness : 10 mm $\sigma = 168e^{0.067}$ MPa Pre-hole diameter : 12, 16, 18 mm
Punch	Punch profile radius : 0.0 mm Clearance : -5 %
Die	Inner Diameter : $\phi 21.3$ mm
Blank holder	Inner Diameter : $\phi 25.0$ mm
Die cushion	Diameter : $\phi 21.3$ mm Inner diameter : $\phi 16$ mm
Lubrication condition	Shear friction assumption $\tau_f = mk$ Shear friction coefficient $m = 0.02$

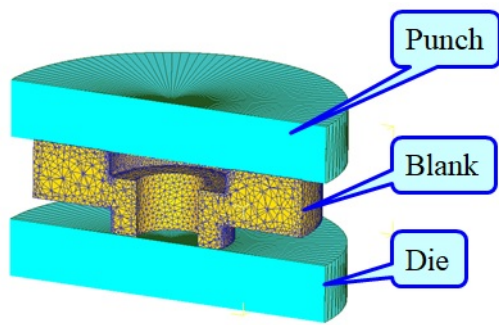


Fig. 3 Simulation model for 2nd push back process

Fig. 3 は第2番目の半せん断工程をシミュレーションするためのモデルの概要図である。本工程の工具構成は単純であり、上下の円盤形状工具でブランクを圧縮する工程である。シミュレーションに際しては、上部工具のパンチのみを可動工具としている。また、本工程で用いるブランクモデルは、前の半せん断工程の形状のみならず、加工硬化特性も引継いでいる。

なお、本研究では Fig. 1 に示した工程手順の他に、半せん断工程前ではなく、半せん断後の押し戻し工程の前のタイミングに逃がし穴を設ける方法も検討した。この際も損傷評価に基づくせん断・分離のシミュレーションは実施しないで、中実の半せん断後のブランクについて、中央部の要素を単に除去する方法を適用している。この要素の除去には Deform のプリプロセッサの『ブーリアン機能』を適用した。

2・3 半せん断工程のシミュレーション結果

Fig. 4 は Deform のポスト処理の一例であり、半せん断工程における予穴直径が、分流の中立面位置に及ぼす影響を示したものである。圧下量が板厚の50%の場合の結果である。まず、図中の左の図は予穴直径が16mmの結果であり、工具構成とブランクを併せて示しており、中心軸上の断面について、変位ベクトルの分布を矢印で表示している。ブランクの下方に自由表面が多いため、総じて変位ベクトルの向きは下向きではあるが、ベクトルの矢印の向きが左右に分かれている部分があり、この部分を分流現象の中立面と見なして破線を描いている。一方、図中の右列は上から順に、予穴直径12mm、16mm、及び18mmの結果であり、上記の観点から分流の中立面位置と見なした位置に破線を描いて、各予穴直径条件の中立面位置を比較して示している。

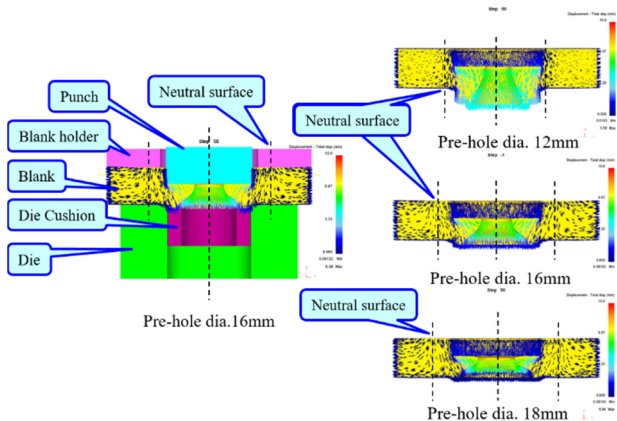


Fig. 4 Schematic view of displacement vectors after partial shearing process with pre-hole diameter as parameter. Penetration depth 50% in thickness.

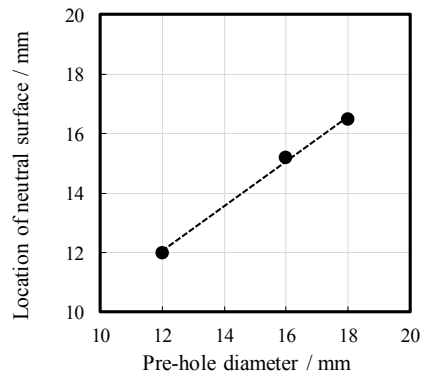


Fig. 5 Influence of pre-hole diameter on location of neutral surface after partial shearing process. Penetration depth 50% in thickness.

Fig. 5 は Fig. 4 を整理し直した図であり、横軸に半せん断工程開始時の予穴直径を取り、縦軸に変位ベクトル分布から読み取った半せん断後の中心軸からの中立面の位置を示したものである。近似曲線を併せて示しているが、本検討における予穴直径条件の範囲では、中立面の位置は予穴直径の増加と共に単調に増加している。この理由は、予穴直径が大きいくほど、分流における求心流が優勢になるためである。

2・4 押し戻し工程のシミュレーション結果

Fig. 6 は Deform のポスト処理の一例であり、押し戻し工程後の変位ベクトルを示した結果である。左の図は、ブランクの位置づけを明確にするため、工具と材料を併せて示したものであり、半せん断工程における予穴直径条件が16mmの場合の結果である。穴抜きにおけるスクラップ部は求心流によって構成された部分である。このため、スクラップ部とこの周囲の製品部の境界面の機械的な締結が緩和されることが期待され、提案する本平押し法における分離が促進されることが期待される。

同図の右列は上から順に、半せん断工程における予穴直径12mm、16mm、及び18mmの結果である。いずれの予穴直径条件においても、中央のスクラップ部は求心流によって構成されており、12mm、及び18mmの場合も16mmの場合と同様にスクラップ部とその周囲の打抜き部の境界面での機械的締結が緩和されることが期待され、分離が促進されることが期待される。

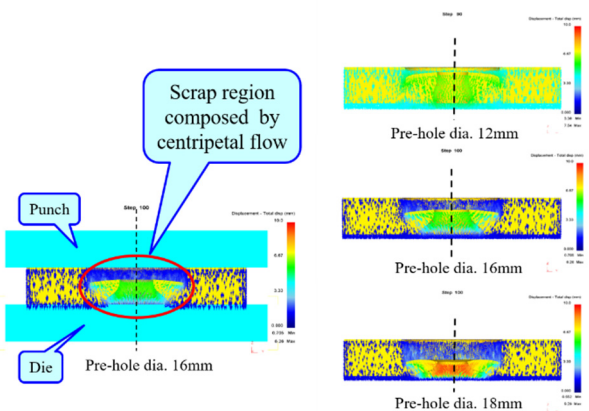


Fig. 6 Schematic view of displacement vectors after partial push back process with pre-hole diameter as parameter. Penetration depth 50% in thickness.

3. 実験的検討

3・1 実験方法

Fig. 7は実験装置の概要図である。最大能力250KNの複動の油圧プレスにダイセットを設置して実験を実施した。本プレスは上部シリンダ、ロードセル、ダイセット、および下部シリンダによって構成されている。本研究では上部シリンダに設置されたパンチを下降させることにより半せん断工程、あるいは押し戻し工程を実現する。また、材料の取り出しに際しては下部シリンダの上昇機能を利用した。成形中の荷重はロードセル、および変位は変位計によりそれぞれ計測され、表示盤にデジタル表示する。これらの計測データはインターフェースボードを介してパソコンのハードディスクに保存される。

Fig. 8は半せん断工程の工具構成の概要図であり、パンチ、板押えの押え、板押え、プランク、プランク位置決めプレート、ダイ、ダイクッション、およびストロークエンドブロックから構成されている。本半せん断工程用の工具セットをメイン油圧シリンダの下方のプレスボルトスター上に設置し、パンチに荷重を加えることにより半せん断工程を実現する。ストロークエンドブロックは压下量調節の機能を有している。また、Fig. 9は押し戻し工程を行う際の工具構成を示している。押し戻し工程はプランクを端部が平坦な円柱形状の工具で挟んで圧下することにより実現される。

Fig. 10は供試材の概観写真である。材質は工業用純アルミニウム硬質材(A1050P-H24)であり、寸法は外径が50mm、厚みが10mmである。予穴直径は0mmと16mmの2水準であり、同図は16mmの場合のものである。半せん断工程の実験条件をTable 2にまとめて示した。クリアランス条件が押し戻し成形後の分離可否に及ぼす影響を評価するため、表中に示す5水準を設けた。

Table 2 Experimental condition for partial shearing process

Blank	Diameter : $\phi 50$ mm
	Thickness : 10 mm
	Material: Commercial pure aluminum (A1050-H24)
	$\sigma = 168\epsilon^{0.067}$ MPa
Punch	Punch profile radius : 0.0 mm
	Clearance : -5, -7.5, -10, -12.5, -15 %
Die	Inner Diameter : $\phi 21.3$ mm
Blank holder	Inner Diameter : $\phi 25.0$ mm
Die cushion	Diameter : $\phi 21.3$ mm
	Inner diameter : $\phi 16$ mm
Lubricant	Kyodo-Yushi Co., Ltd. "Clear Lub PB 120"

3・2 押し戻し成形後の分離可否の評価方法

Fig. 11は押し戻し実験後のプランクの概観写真であり、それぞれ(a)「分離可」、および(b)「分離不可」の2種を示している。「分離可」は押し戻し工程を実施後に完全に分離したもので、「分離不可」は押し戻し工程を実施後に手で押し出そうとしても全く動かなかったものである。なお、押し戻し工程後に分離はしないものの手で押し出そうと確認されたものを上記の(a)と(b)の境界として、「分離可否の境界」とした。

3・3 プランク分離面の性状

Fig. 12はプランクの分割写真で、(a)は半せん断工程後のもので、予穴の直径 $\phi 15.87$ mm、压下量75.3%、及びクリアランス-14.9%の条件のものである。パンチの押下部直下は、これより下部の領域より、内径が小さくなっておりこの領域では分流の内向き流が実現されていることが確認された。この分離面形状はFig. 4に示したシミュレーション結果とも類似している。

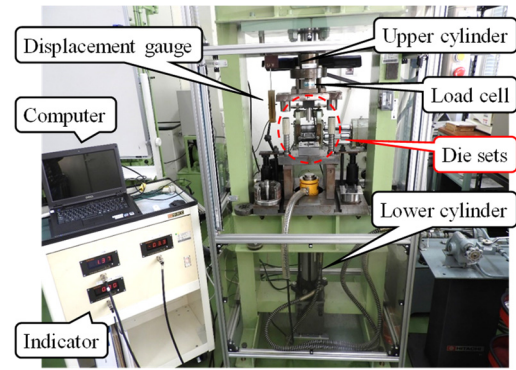


Fig. 7 Schematic view of experimental apparatus

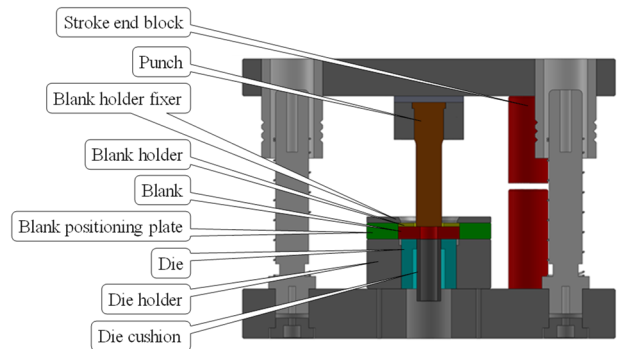


Fig. 8 Cross-section view of 1st partial shearing process

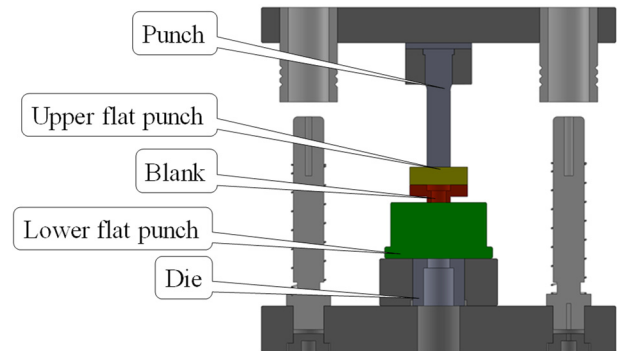


Fig. 9 Cross-section view of 2nd push back process

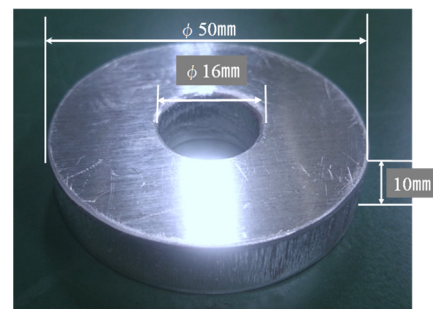


Fig. 10 Schematic of test piece with pre-hole diameter 16mm

(b)は押し戻し工程後に分離が成功したプランクの写真であり、製品とスクラップを併せて示している。前工程の半せん断工程における予穴の直径は $\phi 15.87$ mm、压下量75.9%、及びクリアランス-15.0%の条件のものである。製品側のせん断分離面にはかえりはない。ただし、せん断面、及び破断面が認められる。

3・4 半せん断工程のクリアランスが押し戻し工程後の分離可否に及ぼす影響

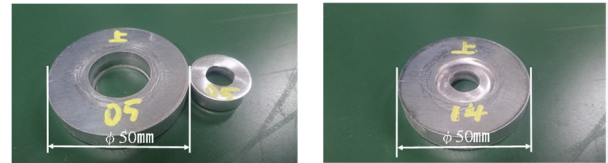
Fig.13 はφ16 mmの予穴を設けたブランクについて、半せん断工程における圧下量とクリアランスが押し戻し後の分離の可否に及ぼす影響を示したものである。縦軸は半せん断工程における圧下量、横軸は半せん断工程におけるクリアランスを示している。なお、各プロットは1つのブランクに対応しており、●印は押し戻し工程後の分離が成功した場合、及び×印は分離が成功しなかった場合を表している。半せん断工程のクリアランスが押し戻し工程後の分離可否に及ぼす影響を評価するために、●印と×印との間に分離可否境界線を描いた。描画された線はクリアランスが-7.5%から-10%の条件において上に凸になっており、このクリアランス領域において、最も分離可能な圧下量領域が狭い。この理由は以下のように推察される。

負のクリアランスの絶対値が大きい場合には、後続の押し戻し工程において、破断させるべき『棧』の体積が大きいため、分離し難くなることが予想される。したがって分離可否境界線は右上がりになる。一方、負のクリアランスの絶対値が小さい場合には、後続の押し戻し工程において、製品部分とスクラップ部の距離が遠いため、スクラップ面の鉛直方向のわずかな曲線プロファイルが、機械的な締結を引き起こしやすい。この観点からは、負のクリアランスの絶対値が小さいほど、分離し難くなり、分離可否境界線は右下がりになることが予想される。以上の推察から、Fig. 13 において分離可否境界線が上に凸になった理由は、上記の右上がりになる要因と右下がりになる2つの要因が重ねあわされた結果であると推察される。

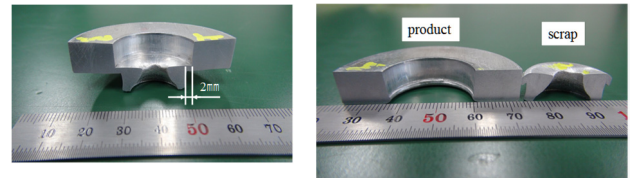
4. 結論

厚手板材のかえりなしせん断(打抜き)について、この適用範囲拡大を図るため、鍛造の分流現象を融合するタイプの加工工程をシーズとして提案し、Deformによる剛塑性有限要素法解析を実施しところ以下の結果が得られた。

1. 半せん断工程前のブランクに予穴を設け、平押し法を解析したところ、半せん断工程において分離面付近で分流現象が確認された。また、予穴直径が増加するに伴い分流の中立面の位置が半径方向外寄りになった。これは予穴直径が大きくなるほど求心流が優勢になることに起因している。
2. 押し戻し工程のスクラップ部は、いずれの予穴直径においても求心流のみで構成されていた。求心流は材料の締結を緩和するため、せん断面における分離を促進されることが期待された。また、実験の結果、以下の結果が得られた。
3. 半せん断工程後のテストピースの分離面の観察から、分流現象の実現が確認され、シミュレーションの結果とも一致していた。また、押し戻し工程後の分離面の観察からかえりの発生が抑制されていることが確認された。
4. φ16 mmの予穴を設けたブランクについて、半せん断工程における圧下量とクリアランスが押し戻し後の分離の可否に及ぼす影響について評価したところ、圧下量についての分離可能領域はクリアランスが-7.5%から-10%の条件において最も狭くなった。
5. 分離加納境界線が上に凸になる理由を、分離容易性に影響を及ぼす2つの要因の観点から考察した。



(a) Separated (b) Unseparated
Fig. 11 Schematic view of blank after push back step



(a) After partial shearing step (b) After push back step
Fig. 12 Cross-section view of test-pieces

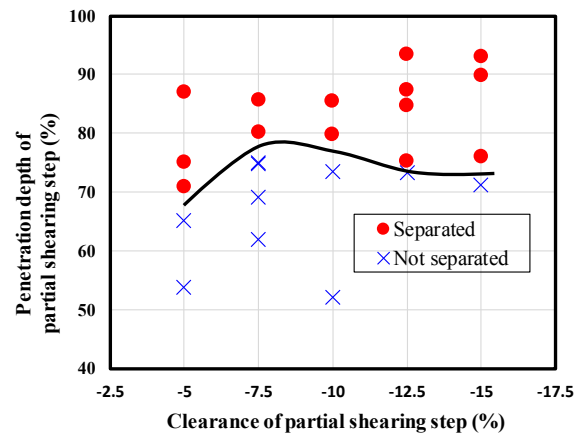


Fig. 13 Influence of clearance in the partial shearing process on capability of separation in push back process

謝辞

本研究の実施に当たり、公益財団法人天田財団殿から多大なご支援を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 前田：機械の研究, 10-1(1958), 140.
- 2) 青木ほか：塑性と加工, 32-364(1991), 621.
- 3) 広田・近藤：塑性と加工, 40-456(1999), 60.
- 4) 加藤・近藤：第66回塑加連講論(2015), 11.
- 5) 加藤・近藤ほか：平成28年度塑加春論(2016), 261.
- 6) 加藤・近藤ほか：機論C, 64-626(1998), 4034.
- 7) 近藤：190回塑加シンポジウムテキスト(2000), 33.