



Y. Abe

超高張力鋼板のプレス成形における割れ発生に及ぼす せん断加工の影響と割れ発生防止

安部 洋平*

1. まえがき

近年、地球温暖化防止の観点から自動車の二酸化炭素排出量の削減と燃費の向上が要求されている。そのため自動車軽量化が望まれており、車両重量の1/3程度を占めるプレス車体部品の軽量化が重要になっている¹⁾。軽量化のために自動車用プレス部品へ比強度の大きな高張力鋼板の適用が拡大してきており、外板のパネル類は440MPa級、サイドメンバーなどの骨格部材では590MPa～780MPa級が主流となりつつある。乗員保護の観点から高強度が必要なバンパーレインフォースやドアビームなどの部材には引張強さが1GPaを超える超高張力鋼板も使われている^{2),3)}。

高張力鋼板や超高張力鋼板は高強度のためにプレス成形荷重が大きく、プレス部品の形状凍結性も低く、更に、低延性のため割れが生じやすい。一般的にプレス部品はブランキング、絞り加工、せん断加工、フランジ成形が組み合わされて製造されている⁴⁾。フランジ成形や穴抜き加工時には板角端部や穴縁が伸びフランジ変形となって引張応力が発生し、割れを生じる場合がある⁵⁾。軟鋼板では延性が十分であるために問題とならないが、高張力鋼板や超高張力鋼板では割れが生じやすい。

割れの生じる部分は、成形前にせん断加工されており、せん断加工条件により切口面が影響される。せん断条件によって切口の変形量も異なり⁶⁾、延性の低下が生じて割れを起し易く、高張力鋼板の穴抜き加工の割れについていくつか報告されている^{7),8)}。

伸びフランジ成形における応力分布は、曲げ線から板角端部に向かうにつれて板端部の長手方向の引張応力と引張ひずみが増加して板角端部で最大⁹⁾になっているため、板角端部の変形を小さくして割れを防止できる。変形を小さくするには、曲げ角度の減少、長手方向の角度の低減、ブランク形状の修正があるが、製品形状が変わってしまうために容易でない。

本研究では、超高張力鋼板の穴抜き加工とフランジ成形における割れとせん断された切口面の関係を調査した。また、逐次接触パンチによる伸びフランジ成形法と凹型パンチによる2段伸びフランジ成形法を提案してフランジ成形にて板角端部に生じる引張応力を分散させてフランジ割れを防止した。

2. 穴抜き加工された穴の穴抜き加工性

2.1 超高張力鋼板

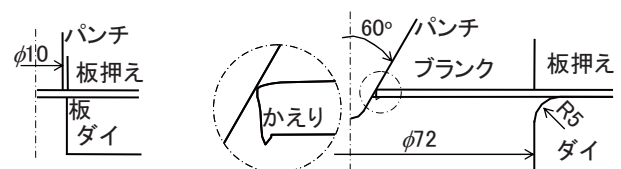
鋼板には公称板厚が1.4mmの980MPa級超高張力鋼板、390MPa級から780MPa級の超高張力鋼板と軟鋼板を用いた。780MPa級と980MPa級の鋼板は二層強化型である。引張試験により得られた板材の材料特性を表1に示す。

表1 引張試験により得られた鋼板の材料特性

板材	板厚 /mm	引張強さ /MPa	伸び /%	n 値
980MPa 級	1.41	1027	18.7	0.12
780MPa 級	1.41	823	19.0	0.12
590MPa 級	1.40	600	26.2	0.14
440MPa 級	1.41	455	33.8	0.18
390MPa 級	1.39	389	35.8	0.18
SPCC	1.39	333	41.2	0.19

2.2 穴抜き加工と穴抜き加工条件

穴抜き加工条件と穴抜き加工条件を図1に示す。パンチとダイスの間隙を初期板厚で除した穴抜きクリアランス比は $c=4\sim 30\%$ に設定し、パンチ直径を10mmに固定してダイ直径を変化させて得た。穴抜き加工速度は30mm/sである。鋼板は130mm×120mmの矩形であり、板材に防錆油を塗布した。穴抜き加工された穴に図1(b)に示すように円錐パンチを押込むことによって、穴抜き加工を行う。円錐パンチの頂角は60°であり、かえりを下にしてパンチと接触しない条件で穴抜き加工を行った。



(a) 穴抜き加工

(b) 穴抜き加工

図1 穴抜き加工条件と穴抜き加工条件

穴抜き加工性は次式で示す限界穴抜き率 λ で評価した。

$$\lambda = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (1)$$

ここで d_0 と d_1 はそれぞれ穴抜き加工前の穴直径とクラックが切口面の板厚を貫通した時の穴直径である。パン

チの押し込み速度を約1mm/sと低速にしてクラックを目視により観察し、クラックが板厚を貫通した時点で割れとしてパンチの押し込みを停止した。限界穴抜け率は3回行った平均とした。

2.3 切口面と穴抜け加工性¹⁰⁾

切口面性状の割合と穴抜きクリアランス比の関係を図2に示す。目視により切口面性状が周方向に均一であることを確認して代表的な断面を測定した。980MPa級鋼板では、390MPa級鋼板と比べて低い延性のためにせん断面とだれの割合が小さく、破断面の割合が大きい。穴抜きクリアランス比の増加とともに、だれは増加しており、 $c = 25\%$ 以上ではかえりが生じている。

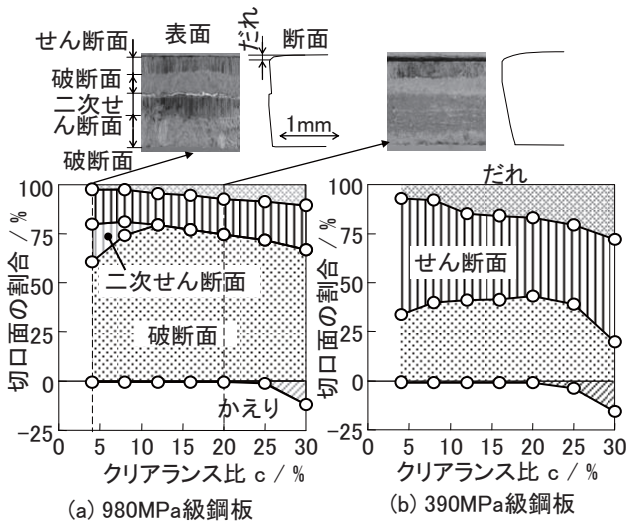


図2 切口面性状の割合と穴抜きクリアランス比の関係

限界穴抜け率と穴抜きクリアランス比の関係を図3に示す。鋼板組織の制御により穴抜け加工性を向上できる¹¹⁾が、本実験で用いた鋼板では鋼板強度の増加とともに限界穴抜け率は低下しており高強度な鋼板の成形においてフランジ割れが問題となりやすい。また、それぞれの鋼板強度において限界穴抜け率が最大になる穴抜きクリアランス比が存在する。

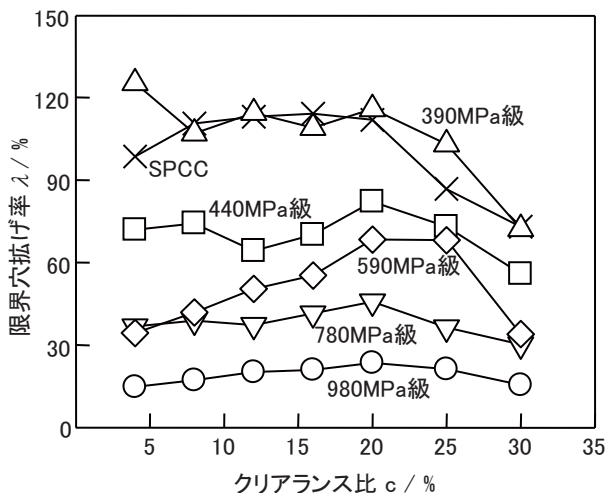


図3 限界穴抜け率と穴抜きクリアランス比の関係

980MPa級鋼板における限界穴抜け率に及ぼす圧延方向の切口面の最大硬さと切口面の最大高低差の影響を図4に示す。切口面における硬さの増加とともに、限界穴抜け率が減少している。また、切口面の高低差が大きくなるとともに、応力が集中しやすくなって限界穴抜け率は減少しており、延性が小さい超高張力鋼板の穴抜け加工性には巨視的な高低差が影響を及ぼしている。

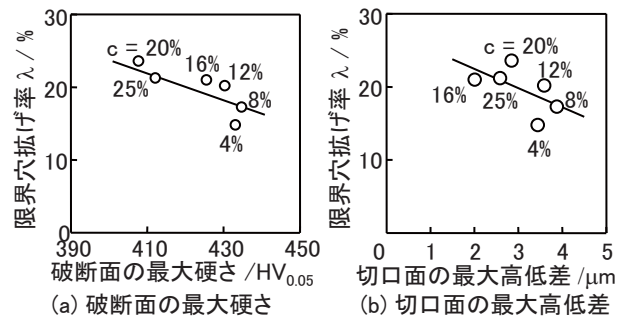


図4 980MPa級鋼板における限界穴抜け率に及ぼす切口面の最大硬さと切口面の最大高低差の影響

2.4 平滑加工による穴抜け加工性の向上¹²⁾

穴抜け加工性の向上には、穴周囲を除去してしまう削抜き¹³⁾、穴周囲を焼きなまして延性を向上させる方法¹⁴⁾、破断面に圧縮を付加するコイニング¹⁵⁾などが提案されている。前章に示すように巨視的な高低差が穴抜け加工性を低下させているため、980MPa級鋼板において穴抜き加工後の破断面をコイニング加工した。ここでは、破断面を平滑にする加工法として平滑加工と呼ぶ。

円錐パンチによる切口面の平滑加工を図5に示す。980MPa級鋼板の最大限界穴抜け率である $c=20\%$ において、円錐パンチによってせん断変形と圧縮変形を加える。円錐パンチの角度は板材の破断面の傾斜に近い 30° にし、破断面だけを変形させるようにダイ直径を設定した。パンチ荷重が大きすぎると切口面が大きく変形してパンチとダイが干渉するため、荷重は最大で22kNとした。ここでは、1.4mm厚さの2層強化型鋼板であり、材料特性を表2に示す。

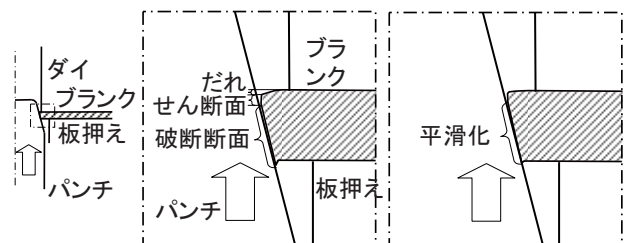


図5 円錐パンチによる切口面の平滑加工

表2 980MPa級鋼板の材料特性

圧延方向 /°	0	45	90
引張強さ /MPa	1029	1012	1056
伸び /%	17	17	16
n 値	0.12	0.13	0.12

穴抜き加工，ドリル加工，放電加工，平滑加工された980MPa級鋼板の穴の限界穴抜け率を図6に示す。ドリル加工では切削痕が，放電加工では放電による凹凸面がそれぞれ生じている。一方，平滑加工では，平滑加工によって破断面は光沢のある面に仕上げられている。放電加工とドリル加工では限界値は大きい，穴抜き加工では放電加工の半分程である。平滑加工によってドリル加工と同等まで向上できている。

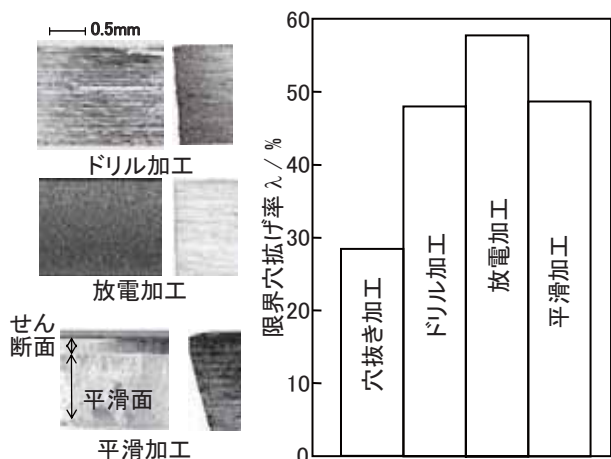


図6 穴抜き加工，ドリル加工，放電加工，平滑加工された980MPa級鋼板の穴の限界穴抜け率

3. 伸びフランジ成形性

3.1 伸びフランジ成形性に及ぼすせん断クリアランス比の影響

一般的に高張力鋼板は複雑な形状の車体部品へ成形されるが，単純化して図7に示すせん断加工とフランジ成形の2段の成形を行った。1段目ではブランクを凹形にせん断加工して，2段目では伸びフランジ成形を行い，ブランク中央角部が伸びフランジ変形となる。

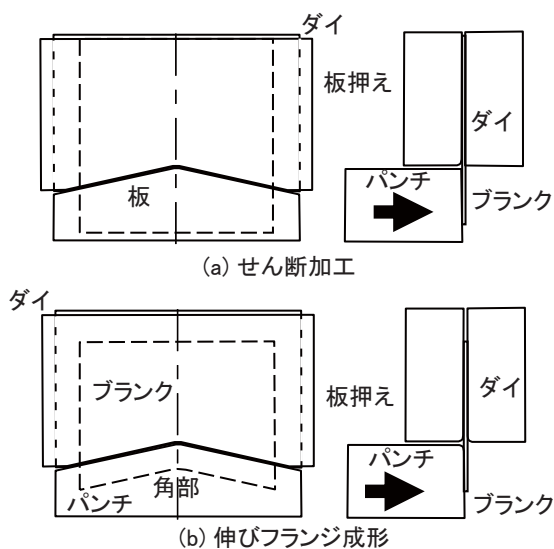


図7 せん断加工と伸びフランジ成形

伸びフランジ成形条件を図8に示す。凹形にせん断されたブランクを伸びフランジ成形して角部に引張応力を発生させる。角部の引張応力はフランジ長さLにより変化させ，その変化量は1mm毎とした。ブランク角端部には伸びフランジ率の算出のためにけがき線を入れた。前章に示したように穴抜き加工において限界穴抜け率が大きくなる最適なクリアランスがあったためにせん断加工においてせん断クリアランス比cを10%から25%に変化させて種々の切口面を得た。本節と次節で用いたブランクは幅 $W_0=200\text{mm}$ の鋼板であり，材料特性を表3に示す。

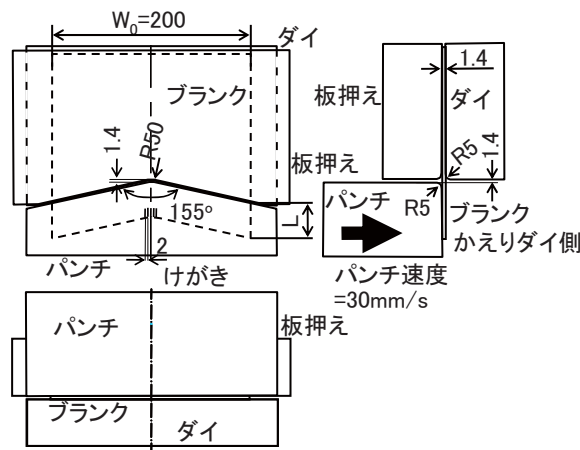


図8 伸びフランジ成形条件

表3 鋼板の材料特性

板材	JSC980	JSC780	JSC1180
板厚 /mm	1.4	1.4	1.2
引張強さ /MPa	1014	847	1209
伸び /%	16.4	18.8	10.8
絞り /%	45	66	46
n 値	0.15	0.15	0.14

980MPa級鋼板におけるフランジ割れを図9に示す。せん断クリアランス比 $c=20\%$ では角部端部にて引張応力により割れを生じているが $c=15\%$ では発生していない。

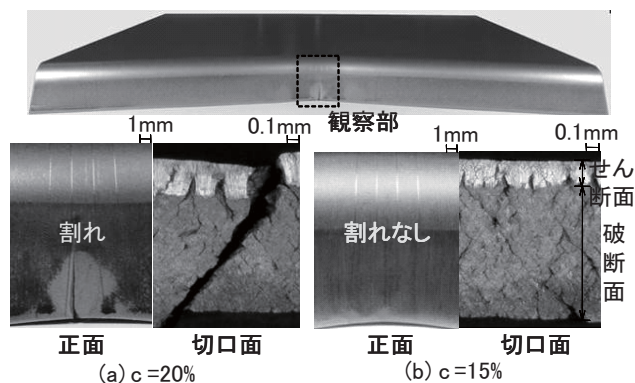


図9 実験による伸びフランジ成形後の角部 ($L=15\text{mm}$, 980MPa級鋼板)

限界伸びフランジ率とせん断クリアランス比の関係を図 10 に示す。限界伸びフランジ率は、フランジ割れの生ずる直前の曲げ長さにおける最大の伸びフランジ率である。図 3 と同様にそれぞれの鋼板において限界伸びフランジ率が最大になるせん断クリアランス比が存在し、最適なせん断クリアランス比に設定することにより限界伸びフランジ率が向上できる。

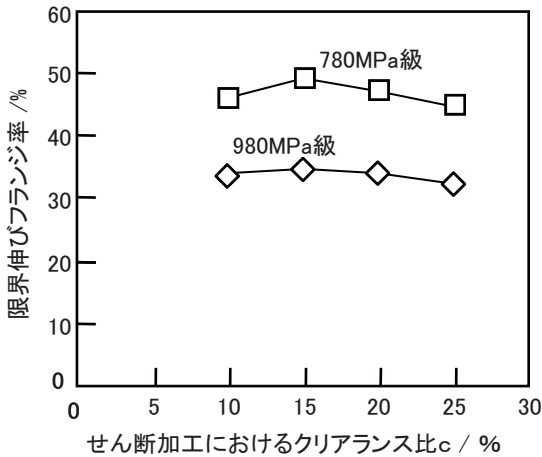


図 10 限界伸びフランジ率とせん断クリアランス比の関係

3.2 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形性の向上¹⁶⁾

逐次接触パンチによる伸びフランジ成形性の向上法を図 11 に示す。従来の伸びフランジ成形では凹状板材を一樣に曲げるために板端角部に引張応力が生じて割れが発生することがある。逐次接触パンチでは角部付近のパンチに傾斜をつけて板材の外側から角部へ逐次的に曲げる

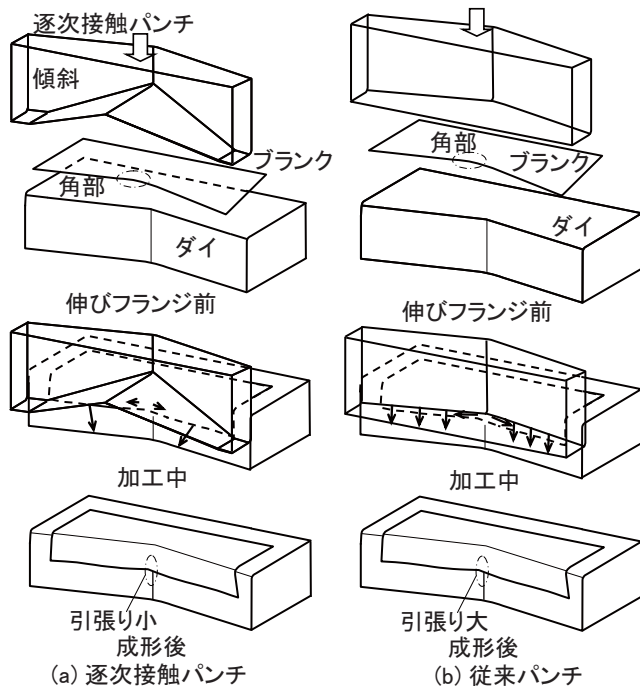


図 11 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形性の向上法

ことにより角部でのフランジ縁に沿う方向の引張応力を低減させてフランジ割れを防止する。

980MPa 級鋼板の $W/W_0=9.2$, $L=16\text{mm}$ における有限要素シミュレーションされた板材の変形挙動を図 12 に示す。成形条件は図 8 と同様であり、パンチ傾斜幅が W でパンチ傾斜角度が α の逐次接触パンチを用いた。 $\alpha=0^\circ$ は、従来の平坦なパンチである。また、最終的なパンチストローク s_e はパンチ形状とフランジ長さにより変化するために、パンチストローク s と最終的なパンチストロークの比により示している。 $\alpha=0^\circ$ ではパンチが一樣に板材に接触するため一樣に板材は曲げられているが、 $\alpha=10^\circ$ ではパンチが外側から接触するため外側から逐次曲げられている。

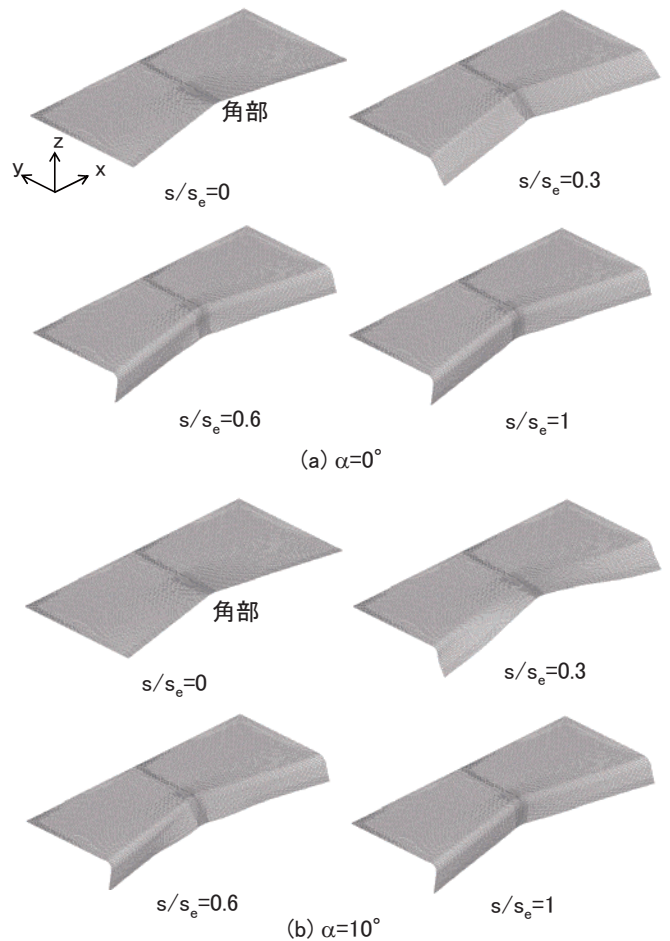


図 12 980MPa 級鋼板の $W/W_0=9.2$, $L=16\text{mm}$ における計算された板材の変形挙動

$W/W_0=9.2$, $L=16\text{mm}$ における計算された x 方向の引張ひずみ分布を図 13 に示す。 $\alpha=0^\circ$ では、 $s/s_e=0.6$ にて角部において大きな x 方向のひずみが発生している。一方、 $\alpha=10^\circ$, $s/s_e=0.6$ ではひずみが小さく、 $s/s_e=1$ においても $\alpha=0^\circ$ のパンチより引張ひずみが低減されている。

$W/W_0=9.2$ におけるフランジ成形後の 980MPa 級鋼成形品を図 14 に示す。 $\alpha=0^\circ$ では板端角部にフランジ割れが生じているのに対して、 $\alpha=10^\circ$ では防止できている。

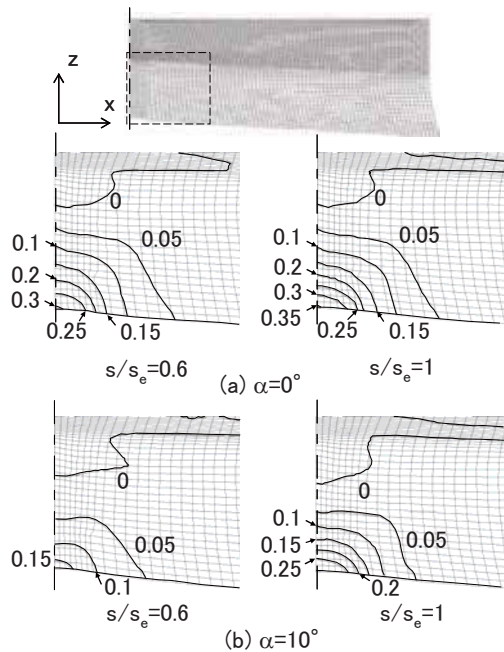


図 13 $W/W_0=9.2$, $L=16\text{mm}$ における計算された x 方向の引張ひずみ分布

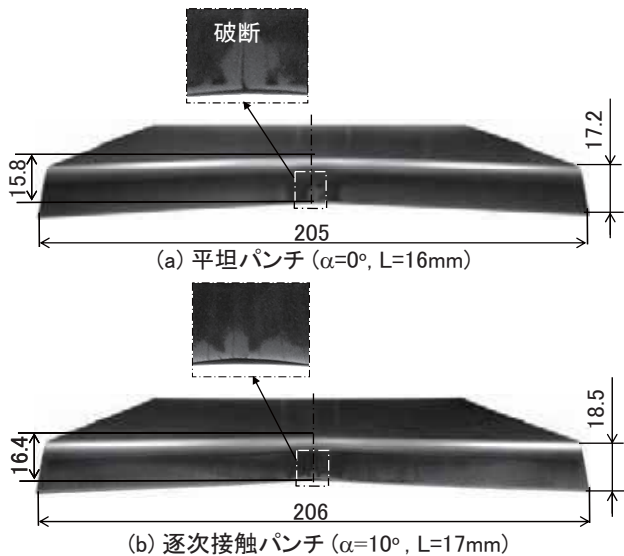


図 14 $W/W_0=9.2$ におけるフランジ成形後の 980MPa 級鋼成形品

角端部の伸びフランジ率に及ぼすパンチ傾斜角度とパンチ傾斜幅の影響を図 15 に示す。実線は、実験の行える条件で、破線は実験が行えない条件である。パンチ傾斜角度と傾斜幅が大きいほど角端部の伸びフランジ率が小さくなっているが、角度が大きい場合でも幅が狭すぎるとひずみが分散されず、大きな伸びフランジ率となっている。実験のできる最適なパンチ形状は $W/W_0=1.8$, $\alpha=45^\circ$ であった。

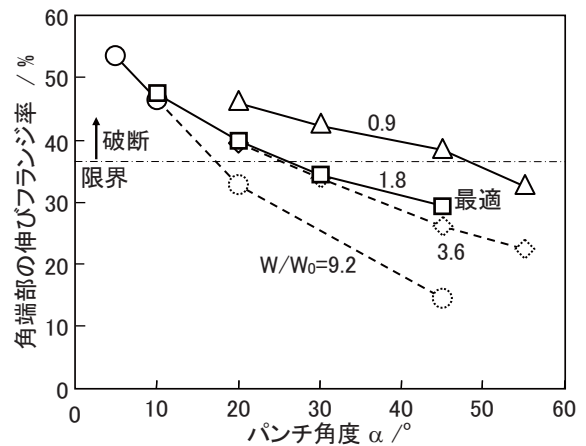


図 15 角端部の伸びフランジ率に及ぼすパンチ傾斜角度とパンチ傾斜幅の影響 ($L=20\text{mm}$, 980MPa 級鋼板, 計算)

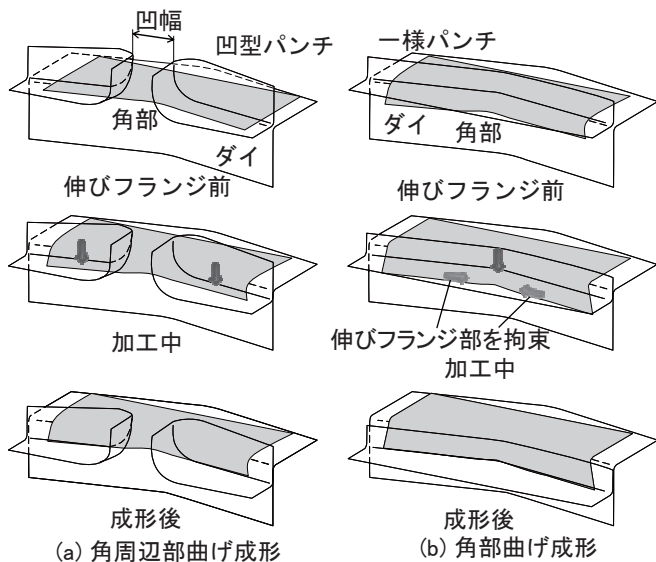
最適パンチによる限界フランジ長さにおける 980MPa 級鋼板と 1180MPa 級鋼板の製品の形状を図 16 に示す。1180MPa 級においても図 15 と同様の計算を行った。1180MPa 級において計算した範囲では同じ $W/W_0=1.8$, $\alpha=45^\circ$ で最適となった。最適なパンチにより 980MPa 級と 1180MPa 級鋼板では傾斜なしと比べて製品高さをそれぞれ約 1.3 倍と約 1.2 倍に高くできている。



図 16 最適パンチによる限界フランジ長さにおける 980MPa 級鋼と 1180MPa 級鋼成形品

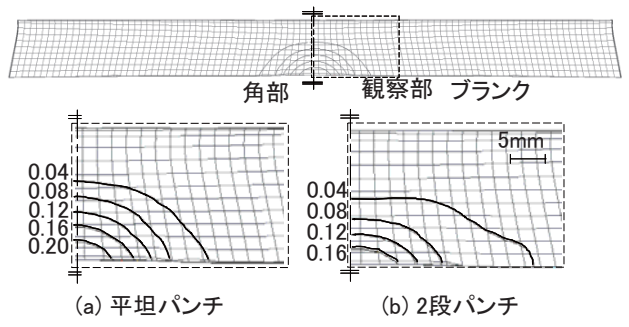
3.3 2 段パンチによる伸びフランジ性の向上

前節の逐次接触パンチにより板端角部に引張応力を低減して割れを抑制できたが、パンチの高さが大きくなってしまい、プレス機への取り付けが容易でなく、また、金型費も大きくなる。一方、実成形において車体プレス部品は多段で成形されることが多い。そこで、凹型パンチによる 2 段伸びフランジ成形法を図 17 に示す。本成形法は角周辺部曲げ成形と角部曲げ成形からなり、1 段目において隙間を有するパンチにより角周辺部を曲げて、2 段目において一様パンチにより角部を曲げる。1 段目において角周辺部が曲げられているために角周辺部が拘束されて角部の引張応力が低減される。1.2mm 厚さの 980MPa 級と 1180MPa 級の鋼板に対して図 8 に示した金型のパンチを凹型にして角周辺部曲げ成形を行なって、平らなパンチで角部曲げ成形を行った。



(a) 角周辺部曲げ成形
(b) 角部曲げ成形
図 17 凹型パンチによる 2 段伸びフランジ成形法

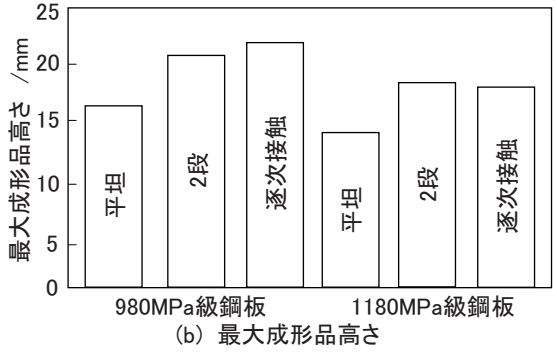
有限要素シミュレーションされた平坦パンチと 2 段成形によるブランク角部の長手方向のひずみ分布を 図 18 に示す。2 段成形では平坦パンチよりも角部のひずみが低減できている。



(a) 平坦パンチ (b) 2 段パンチ
図 18 L=15mm, 980MPa 級鋼板における計算された x 方向のひずみ分布 (パンチ凹幅は 10mm)



(a) 2 段成形により得られた成形品



(b) 最大成形品高さ

図 19 2 段伸びフランジ成形による成形品および最大成形品高さ (パンチ凹幅は 10mm)

2 段伸びフランジ成形による成形品および 最大成形品高さを 図 19 に示す。2 段成形により、最大成形品高さが平坦パンチによる成形品と比較して 980MPa 級鋼板と 1180MPa 級鋼板でそれぞれ 28%と 32%程度向上できている。

4. あとがき

超高張力鋼板は延性が低いために穴抜き加工とフランジ成形における割れが生じやすい。超高張力鋼板の穴抜き加工性とフランジ成形性はせん断加工条件により影響され、最適なクリアランス比により割れ限界が向上できた。超高張力鋼板の穴抜き加工性は破断面平滑加工により向上された。また、フランジ成形では、角部の引張応力を分散させた成形法によって最大成形品高さを増加できた。

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団、スズキ財団、大澤科学技術振興財団の研究助成及び科学研究費補助金若手研究 B (課題番号 21760582) により行われ、感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 林央：プレス技術，44-7(2006)，18-23.
- 2) 福水良太・小池正俊：塑性と加工，46-534(2005)，590-594.
- 3) 杉山隆司：塑性と加工，46-534(2005)，552-555.
- 4) 例えば，鈴木弘：塑性加工，裳華房，(1980)，14.
- 5) 例えば，中川威雄・阿部邦雄・林豊：薄板のプレス加工，実教出版，(1977)，185.
- 6) 柳生聖司・長井美憲・桑田尚：塑性と加工，46-534(2005)，651-655.
- 7) 広瀬洋三・中居修二・福山東成・上野行一：塑性と加工，35-404(1994)，1071-1075.
- 8) 飯塚栄治・比良隆明・吉武明英：塑性と加工，46-534(2005)，625-629.
- 9) 例えば，中川威雄・阿部邦雄・林豊：薄板のプレス加工，実教出版，(1977)，180.
- 10) 安部洋平・森謙一郎・鈴木啓生：塑性と加工，50-580(2009)，414-418.
- 11) 例えば，野中俊樹・後藤貢一・谷口裕一・山崎一正：新日鉄技報，378(2003)，12-14.
- 12) 安部洋平・池田豊・森謙一郎，塑性と加工，52-603(2011)，485-489.
- 13) 中川威雄・吉田清太：塑性と加工，10-104(1968)，665-671.
- 14) 町田輝史・中川威雄：塑性と加工，16-172(1975)，365-370.
- 15) 中川威雄・Vladimir Cupka・高野豊晴・町田輝史：塑性と加工，16-178(1975)，1081-1088.
- 16) 安部洋平・乗田克哉・森謙一郎，塑性と加工，52-604(2011)，569-573.