

## 伸びフランジ成形性の評価方法と対策技術

## Evaluation and Improving Method of Stretch Flange-ability

吉田 博 司\*  
Hiroshi YOSHIDA  
松野 崇  
Takashi MATSUNO

吉田 亨  
Tohru YOSHIDA  
新田 淳  
Jun NITTA

佐藤 浩 一  
Koichi SATO

高橋 雄 三  
Yuzo TAKAHASHI

## 抄 録

自動車骨格部品や足回り部品の高強度化により、プレス成形時のバーリング加工部や伸びフランジ成形部での割れ発生が課題となってきた。切断条件や不均一な応力・歪分布など割れの発生因子は複雑であるが、これを評価可能な部材試験やサイドバンド試験、伸びフランジ限界曲面法を開発した。また、割れ対策技術として切断面性状を改善する金型形状や打抜き工法を開発した。

## Abstract

**By using of high strength steel sheets for autobody parts and chassis parts, crack initiation of burring process and stretched flange is one of the most important problems in sheet metal forming. Although the factor of crack initiation is complicated procedure due to various cutting conditions and inhomogeneous distribution of stress or strain, we could evaluate this phenomenon by developing forming method of the parts, side bending test method and "limit diagram of stretch flange-ability". To prevent from crack initiation of burring process, we also developed original die shape and piercing methods for improving condition of the cutting edge.**

## 1. 緒 言

自動車は環境問題を背景とした軽量化や衝突安全性の確保という課題に直面しており、これらを解決するために車体に使用される鋼材の高強度化が進んでいる。しかしながら、強度上昇にともなう延性の低下はプレス成形時の破断の危険性を高めるなど課題も多く、金型修正回数増加や型製作コスト増大のため、大きな技術課題となっている。これに対し、延性に優れた高張力鋼板の開発も進んでいるが、加工技術面からのアプローチも非常に重要である。高張力鋼板を冷間でプレスする場合に通常強度の鋼板と比べて、成形中に伸びフランジ成形となる部位のエッジからき裂が発生しやすくなるため、十分な注意が必要である。これはブランク加工時に打ち抜き端面に導入されるひずみによりエッジ部のみ加工硬化が進んでしまうことに起因し、打ち抜き条件の最適化も重要となってくる。そこで、高張力鋼板の加工時に問題となる伸びフランジ破断について、各種の評価方法と対策技術について紹介する。

## 2. 伸びフランジ成形時の割れ評価方法

## 2.1 伸びフランジ成形性評価試験方法

従来から伸びフランジ成形性に対応した材料評価試験法は穴広げ試験であった。穴広げ試験は周方向のひずみがほとんど分布せずに破断に至るが、実際の部品の加工ではひずみ分布が存在するため、破断部周辺のひずみや応力の勾配による破断限界への影響が存在する<sup>1)</sup>。また、穴広げ試験は軸対称であるため、延性の低い方向から破断が生じてしまうので、引張試験のように材料異方性を考慮した評価が困難である。従来から、延性破壊条件や塑性不安定条件などによる評価方法も提案されているが<sup>2,3)</sup>、端面の硬化層の見積の影響が大きく、実用で使用するには注意が必要となる。

そこで、高張力鋼板の伸びフランジ限界を評価する実用的な試験法を開発した。具体的には、直線部と円弧部からなる伸びフランジ形状を模擬した鞍型形状の成形品をプレス加工することにより、伸びフランジの加工限界を評価した<sup>4)</sup>。円弧部のコーナーの曲率半径 $R$ や開き角 $\theta$ の水準を変える

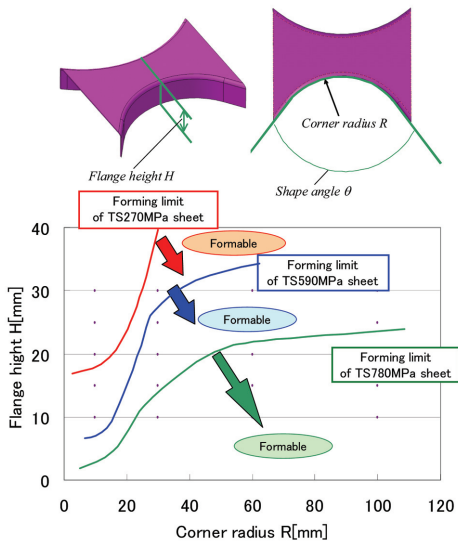


図1 鞍型伸びフランジ試験形状と成形可能範囲マップ  
Stretch flange-ability of saddle shape parts and formability map

ことで、形状に影響されるひずみや応力の勾配を考慮できるようにした。図1に打ち抜きで作製した各鋼種の試験片に対して、成形可能なフランジ高さ $H$ とコーナー半径 $R$ の関係を示した伸びフランジ性評価マップを示す。マップ上において成形可能領域と不可領域の境界を確認することが可能である。これらのデータは部品設計段階における形状設定の指針として活用することができ、試作・量産時の不良発生によるコスト増大を抑制するのに有用と考えられる。

さらに、この評価法に対応する成形のFEM解析を実施し、破断発生時のひずみを評価した。下死点での成形品伸びフランジ縁部中央での最大主ひずみを成形ひずみ $\epsilon_1$ とする。また鉄鋼連盟規格にて別途穴引き試験を実施し、得られた穴引き率を対数ひずみに換算した値を穴引き限界ひずみ $\epsilon_{cr}$ とする。数値解析の結果得た $\epsilon_1$ と $\epsilon_{cr}$ を比較し、 $\epsilon_1 \geq \epsilon_{cr}$ が満たされる場合に破断に至ると判断した。

解析の結果得られた伸びフランジ部形状の違いはひずみ分布の違いとして現れる。図2にフランジ高さ $H=10\text{mm}$ の解析結果から得た最大主ひずみ分布を等高線で示した。いずれの形状も伸びフランジ端部で最大主ひずみを生じる点は同じであるが、大きなひずみを生じる領域の広さが変化している。

図3(a)に示すように実験から得られた伸びフランジ性評価マップでは $R$ が大きいくほど成形可能条件が広がっている。また $\epsilon_{cr}$ を伸びフランジ成形限界値として数値解析結果に適用して得られた伸びフランジ性評価マップを図3(b)示す。実用評価試験に近い $C/t=11.0\%$ ( $C$ :クリアランス, $t$ :板厚)では図3(a)の実験結果に近い評価結果を得ており、伸びフランジ成形限界予測には打抜きクリアランスの影響の考慮が不可欠であり、従来のFLD(Forming Limit Diagram)による破断評価では適切な割れ

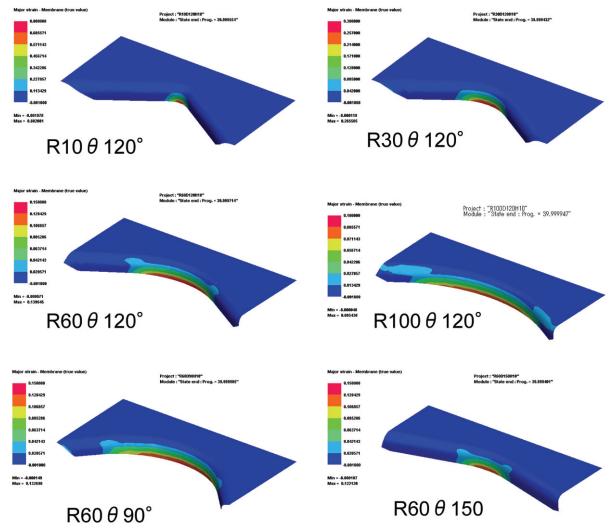


図2 各種の伸びフランジ形状での最大主歪分布の解析結果  
FEA results of contour of major strain in various shapes of stretch flange (flange height  $H=10\text{mm}$ )

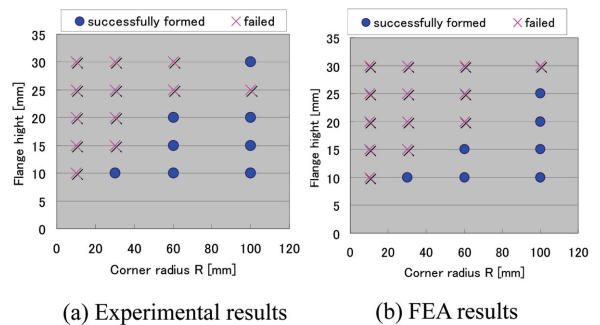


図3 伸びフランジ成形性の評価結果( $C/t=11.0\%$ )  
Stretch flange-ability evaluation map ( $C/t=11.0\%$ )

予測ができないことが判る。

## 2.2 サイドバンド試験法

実部品での伸びフランジ成形部の特性評価を精密に模擬した評価のために、サイドバンド試験機による伸びフランジ性評価について検討した。サイドバンド試験の概念は従来からあるが<sup>5)</sup>、本検討では画像処理システムを加え、高張力材のフランジ性評価用に新たに装置を開発した<sup>6)</sup>。サイドバンド試験装置の概要を図4に示す。試験機は油圧サーボシリンダを駆動とし、シリンダヘッドを高精度に位置制御させることで、ジグを通じて適切な変形力を試験片に与える。

試験片サイズを図5(a)に、治具を含めた試験片の動作模式図を図5(b)に示す。試験片は一例を図示しており、 $100\text{mm} \times 35\text{mm}$ の矩形ブランクに対し、 $30\text{mm}$ 径の半円切欠きを施したものである。切欠き形状・条件は目的とする伸びフランジ部のブランク形状に応じ適切に選択することができる。また、試験片の両端部を治具でチャックし、両端部の治具はシリンダヘッドによって支点を中心として回転することで、試験片に回転を伴う張力を発生させ、伸

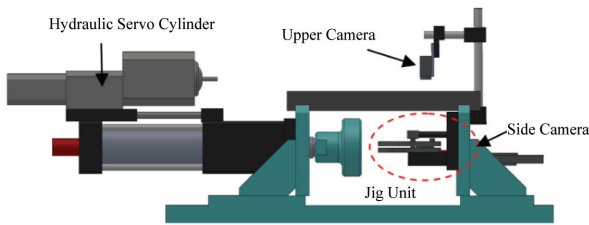


図4 サイドベンド試験機の模式図  
Schematic view of the side bending test machine

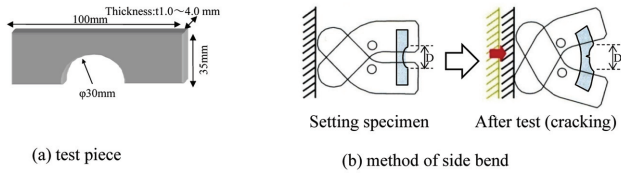


図5 サイドベンド試験の試験片の一例と破断状態  
Schematic view of test piece and method of the side bending test

びフランジ変形させる。

試験における伸びフランジ破断は亀裂が板厚方向に貫通したタイミングとし、その時点での板表面の歪の値から伸びフランジ成形限界値を得る。グリッドによる測定方法として、高精度に且つばらつきが少ない測定を行うべく、伸びフランジ部の板端部およびグリッド転写を施された板表面を2台のカメラでシリンダヘッドと同期させながらインライン測定している。一例として、590MPa鋼板( $t:3.2\text{mm}$ )に対し、図5(a)の形状(打ち抜きクリアランス $C/t=20\%$ )の試験片で、サイドベンド試験を行った結果を図6に示す。端面カメラから試験前の端面状態から亀裂発生前後の挙動が観察され、また端面カメラと同期させた上面カメラからの画像にて、板厚貫通した時点での限界歪が測定できることが分かる。

このサイドベンド試験装置について試験精度やその有効性を確認するため、2種類(Material A, B)の鋼材(板厚 $3.2\text{mm}$ )について試験を行った。2種類の鋼材の強度 $TS=590\text{MPa}$ 程度、伸び特性はほぼ同等であるが、穴広げ性 $\lambda$ 値(Material A=75%, Material B=51%)が異なる。試験片は図2(a)の形状(クリアランス $C/t=20\%$ )で、圧延方向(L方向)、圧延直角方向(C方向)、 $45^\circ$ 方向(X方向)を採取し、サイドベンド試験を実施した。試験結果は、図7のようになり、図中○印は測定回数( $n=10$ )の平均

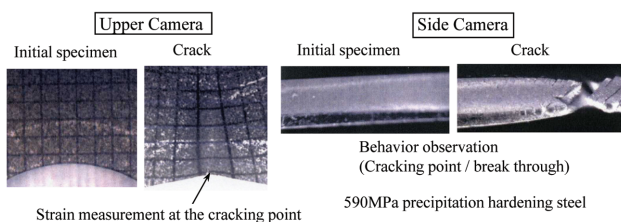


図6 サイドベンド試験での歪測定  
Identification of strain and observation of crack initiation

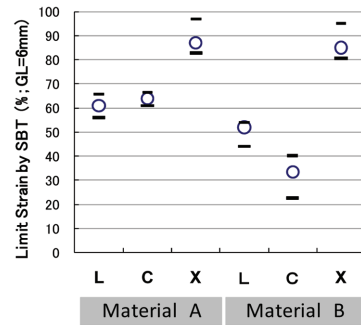


図7 サイドベンド試験による材料影響  
Difference of the limit strain of two materials

値を、エラーバーは測定中の最大・最小値(ばらつき)を表示している。

測定の結果、A材はL, C方向ともに同様の限界値を示している一方、B材はL方向に比べ、C方向が低い値を示している。このことから、A材、B材の穴広げ値( $\lambda$ )の差異はC方向特性の差が要因となっているものと考えられる。

このようにサイドベンド試験を用いることで、高精度でより実部品の伸びフランジ部に近い成形性評価が可能であることを示した。また、リアルタイム測定によりフランジ部の内割れとエッジ割れが容易に観察できることも本装置の特徴である。これにより、エッジ部の特性と母材部の特性比較を実施することも可能であり、実部品の要求特性が明確になる。このほか量産もしくは立上げ調整時において成形前のブランク材から伸びフランジ部対象部を切り出し、サイドベンド試験を行うことで、実プレス部品の打ち抜き条件(クリアランス・シャープ角)や材料選定・切り出し方向の最適化評価が可能になる。

### 2.3 伸びフランジ割れ限界曲面法

プレス成形時の伸びフランジ変形は、板端面付近に着目すると、図8(a)のようになっていると考えられる。まず、端面から板内部に向かう方向の歪の変化を歪垂直勾配として、この勾配が大きくなると端部からのき裂発生抑制効果があると考えられる。一方で、端部に沿う方向の歪の変化を歪集中勾配としてみると、この勾配が大きくなると見かけのき裂発生の促進の影響が現れると考えられる。従っ

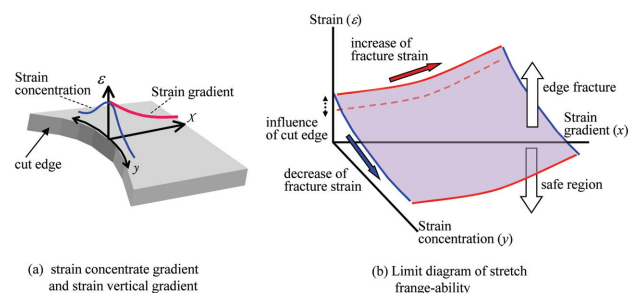


図8 歪垂直勾配、歪集中勾配と伸びフランジ割れ限界曲面  
Effect of strain gradient and limit diagram of stretch flange-ability



て、歪垂直勾配による割れ難さと歪集中勾配による割れ易さが競合するため、これらの影響度合いで端部の割れ発生時の歪が様々に変化すると予想され、これが伸びフランジ成形時の割れの挙動を複雑にしていると考えられる。

そこで、この歪垂直勾配と歪集中勾配の2つを変数として、破断歪を捉えると図8(b)のような伸びフランジ割れ限界曲面を定義することが出来ると考えられる<sup>7)</sup>。この曲面により、歪垂直勾配による破断歪の向上効果と歪集中勾配による破断歪の低下の影響を同時に考慮することができ、これらの影響が複合する領域での破断歪を同定することが可能となる。実際の部品での伸びフランジ成形では、ほとんどの場合、歪垂直勾配と歪集中勾配が複合した領域での成形となることが予想される。従って、実部品の成形試験やFEM成形解析に、この伸びフランジ割れ限界曲面を適用することで、様々な成形条件での伸びフランジ割れの予測が可能になると考えられる。また、伸びフランジ割れは端面の性状の影響が大きいため、打ち抜きクリアランスの変化などで限界曲面が変動することが予想される。

以上から、2.2節で示したサイドバンド試験で各種の試験片形状の試験と、穴広げ試験や打ち抜き端面の引張試験を組合わせて、様々な歪垂直勾配と歪集中勾配での破断歪を実測することで伸びフランジ割れ限界曲面を同定した。試験材は、板厚1.4mmの590MPa級の3鋼種(steel A, B, C)である。測定結果は、図9に示すように各鋼種で比較すると限界曲面に特徴的な差が表れているのが分かる。steel Aは歪集中勾配によって破断歪が低下してしまうため、様々な伸びフランジ成形で破断しやすくなると予想される。steel Bは、歪集中勾配が大きいときの破断歪の低下が比較的少ないため、切り欠き状に変形が集中するような伸びフランジ成形では比較的有利と考えられる。また、steel Cは歪垂直勾配が大きい領域での破断歪が大きいため、穴広げ加工のような成形では比較的有利で、歪集中勾配が大きい個所では破断歪のため不利となる場合があると考えられる。

### 3. 伸びフランジ成形性を向上させる対策技術

成形技術の観点から、削り抜きや対向ダイスせん断等による穴広げ性の改善が報告されてきたが、いずれもコスト・工数がかかるために広くは普及していない。このような背景から、簡易的に行うことが可能な穴広げ性向上穴抜き手法として、“突起付きパンチ”と、刃先を大きく面取りした“大面取りダイ”を用いる穴抜き手法について紹介する。

#### 3.1 突起付きパンチを用いた打ち抜き穴広げ性の改善

歪勾配が大きい場合、打ち抜き穴広げ性は端面のき裂の発生・進展挙動に依存し、打ち抜き時に導入された端面の塑性歪が小さいほど改善することが知られている<sup>8)</sup>。これ

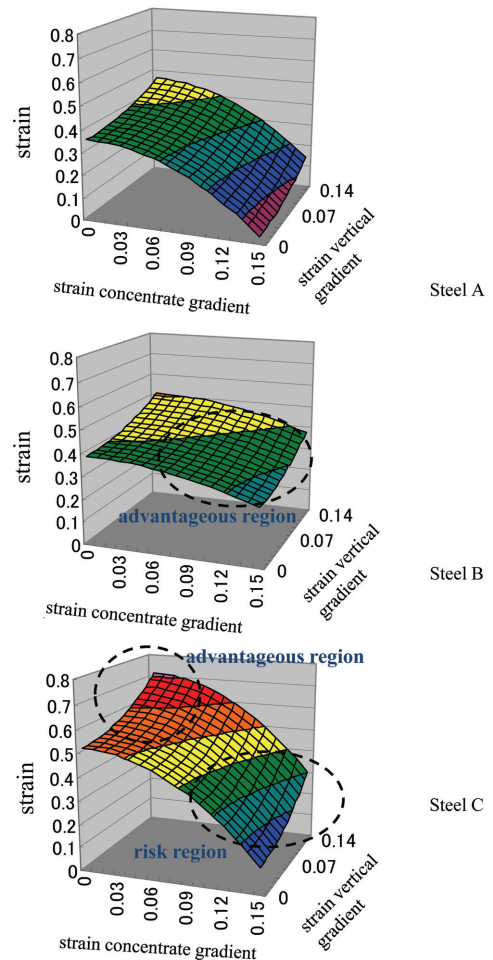


図9 各鋼種での伸びフランジ割れ限界曲面  
Limit diagram of stretch flange-ability of respective steels

は、破壊力学に基づいた打ち抜き穴広げ性のメカニズムの考察からも推定される<sup>9)</sup>。そこで、打ち抜き穴広げ性の改善に向け、端面の塑性歪の抑制を図る打ち抜き方法を開発した<sup>10)</sup>。

打ち抜き端面の塑性歪はせん断面の形成段階で形成されるため、打ち抜き中にパンチ切刃先端での延性破壊を促進しそこでのき裂の発生を促進することにより、打ち抜き端面の塑性歪は低減可能である。延性破壊の発生は応力多軸度に依存し、それが大きいほどより小さい相当塑性歪で延性破壊は生じる<sup>11)</sup>。従って、パンチ切刃先端の材料の応力多軸度を増加させることによりそこでの延性破壊を促進可能であり、それによって打ち抜き端面の塑性歪は低減可能と考えられる。そこで、パンチ底に図10に示すような突起を付け、切刃先端に張力を加え、応力多軸度を増加させた場合の延性破壊の促進効果についてFEM解析により評価した。

図11に突起付きパンチ及び比較の平底パンチの場合の打ち抜き時の平均応力の分布を示す。図から、突起付きパンチを用いた場合、平底パンチと比べて、パンチ切刃肩近傍の材料の平均応力は大きくなっていることが分かる。以上の解析に基づいて、図10に示す打ち抜きパンチを用い、

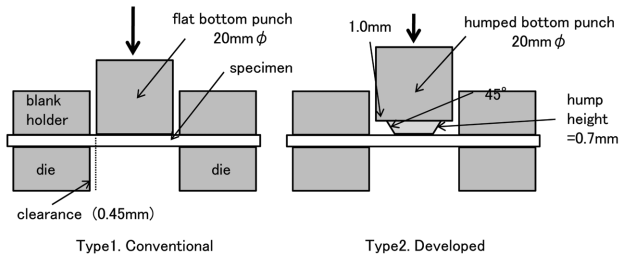


図10 従来打ち抜き法と突起付きパンチによる打ち抜き法  
Schematic diagram of piercing tools used in this study

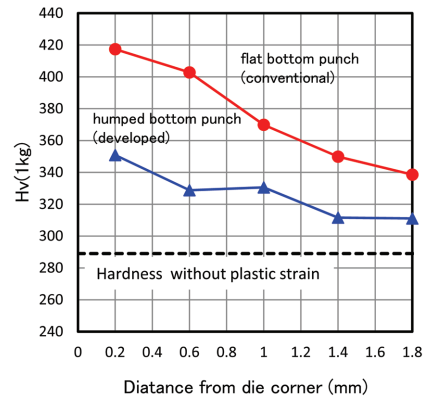


図13 打ち抜き方法による端面の硬度分布の変化  
Hardness distribution near edge after separation

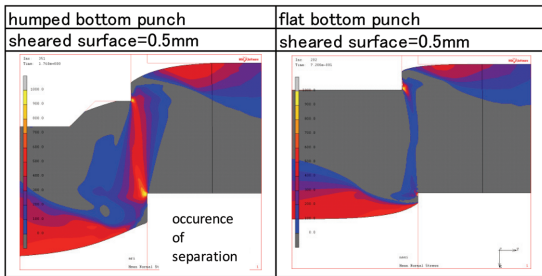


図11 打ち抜き時の平均応力分布の解析結果  
Calculated distribution of mean stress ( $\sigma_m$ ) of cutting process

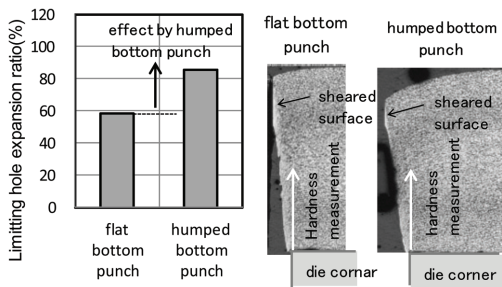


図12 突起付パンチによる穴広げ性の改善  
Effect of limiting hole expansion ratio by humped bottom punch

TSが771MPaである高強度熱延鋼板を供試鋼として打ち抜き穴広げ試験を行い、限界穴広げ率 $\lambda$ を評価した。打ち抜き穴広げ試験では、初期穴径を20mm径とした以外は鉄連規格に従った<sup>12)</sup>。限界穴広げ率 $\lambda$ は3枚の試験片を用いた試験値の平均値とした。

図12に試験で得られた限界穴広げ率を示している。突起付きパンチにより限界打ち抜き穴広げ率は約20%改善されている。図13に、双方のパンチで打ち抜いた後の圧延方向端面の性状と硬さ分布を示している。突起付きパンチの場合、平底パンチでの打ち抜きに比べ、せん断面の比率が低減し、端面硬さが低減している。これから、打ち抜きパンチに所定形状の突起を付けることにより切刃近傍での応力多軸度を増加させ、そこでのき裂発生を促進し、打ち抜き後端面の加工硬化の抑制と打ち抜き穴広げ性の改善を図ることができることが確認された。

### 3.2 穴抜きダイ刃の面取りによる穴広げ性の改善

刃先を大きく面取りした“大面取りダイ”を用いる穴抜

き手法<sup>13)</sup>は穴広げ改善効果のあるハイドロピス<sup>14)</sup>(液圧がダイの役割をする穴抜き)の模擬を試みたものであり、双方の手法ともにダイ刃によるせん断変形が抑制される。そこで、高張力鋼板の穴抜きを対象に、ダイ刃先の面取り量と穴広げ性の相関を調査し、その効果を検証した。

試験材は板厚1.6mmの590MPa級2相組織鋼とし、図14に示す刃先面取りを施したダイを用いて10mm径の穴抜きを行った。刃先の面取り量は図14中のXが異なる5水準とし、その値を $X=0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ とした( $X=0.0$ は刃先面取りを施さない通常のダイである)。また、パンチとダイのクリアランスは2.5%t, 10%t, 15%tの3水準とした。ここで、%tは被加工材の板厚に対する割合を示す。

図15に穴広げ試験結果を示す。全てのクリアランスにおいて、 $X=2.0 \sim 4.0$ の水準で穴広げ限界は通常ダイによる抜き穴よりも大きく改善している。その値は、通常ダイを用いる場合の約1.5倍となっており、ハイドロピスや削り抜き、対向ダイスせん断に匹敵する穴広げ限界の改善効果となった。

面取り量と穴広げ限界の関係を述べれば図15より、穴広げ限界は $X=1.0$ で悪化、または、微増しており、 $X=2.0$ 以上の“大面取りダイ”でなければ穴広げ限界向上の効果は十分に得られていない。また、Xがある一定量以上でその抜き穴の穴広げ限界は一定であることから、大面取りダイを用いた場合の穴広げ限界には上限が存在する。

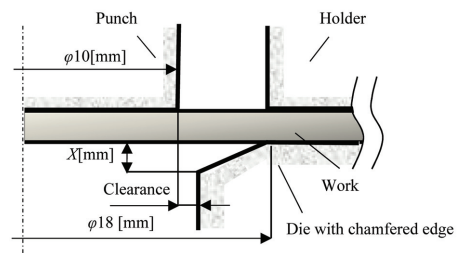


図14 穴抜きダイ刃の面取り条件  
Schematic view of tools condition

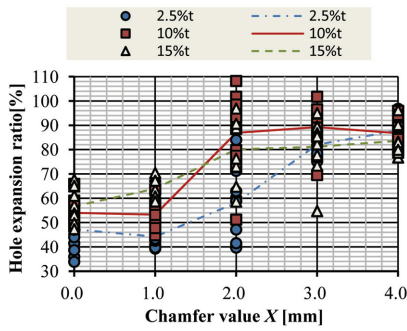


図15 ダイ刃面取り条件による穴広げ性の改善  
Effect of hole expansion ratio by chamfered die edge

さらに、クリアランスが大きいほど $X$ の増加に伴う穴広げ限界は小さい。これは $X=0.0$ の通常ダイで、クリアランスが大きいほど穴広げ限界が高いことに起因している。上述したように、穴広げ限界には上限値が存在し、 $X=3.0, 4.0$ の穴広げ限界はクリアランスの値に関わらずほぼ同じ値である。よって、 $X=0.0$ で穴広げ性が高い大クリアランスでは、大面取りダイによる穴広げ限界向上効果は相対的に小さい。

### 3.3 伸びフランジ性におけるパンチシャー角度の影響

加工力と騒音の低減を目的として、シャー角度を設けた刃(以下、シャー角刃と称する)によるせん断加工が広く行われているが、シャー角刃の角度(シャー角度)と伸びフランジ性の相関を調査した報告はこれまでにほとんどなされていない。2.2節で示したサイドバンド試験を用いて連続値として伸びフランジ性を評価する方法に、シャー角度を変更するような微妙な工具条件の違いを追加して、伸びフランジ性の変化を評価することができると考えられる。

そこで、 $0.0 \sim 2.0^\circ$ までのシャー角度を設けたパンチによる半円状の切り欠きをせん断加工し、サイドバンド試験による伸びフランジ性評価を行うことでシャー角度と伸びフランジ性の関係を調査した<sup>15)</sup>。供試材は、板厚1.6mmで590MPa級の冷間圧延2相組織高張力鋼板を使用した。試験片は、2.2節の図5(a)と同様で、せん断加工には図16に示すような試験片長手方向にシャー角度 $\theta$ を設けたパンチを用いた。シャー角度 $\theta$ は $0.0 \sim 2.0^\circ$ までの5通りとし、クリアランスは供試材板厚の5.0%、10%、15%の3通り

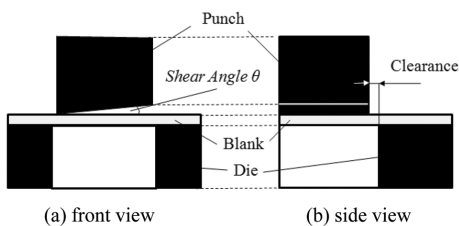
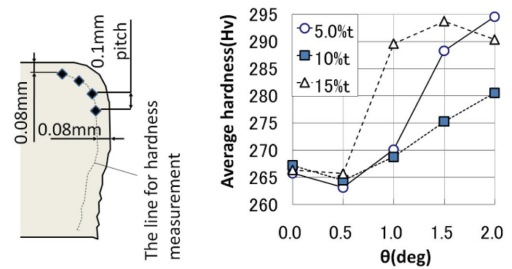


図16 シャー角度をつけたせん断加工条件  
Schematic view of the cutting tool with shear angle



(a) Position of indentation (b) Average hardness of cut edge

図17 シャー角度によるせん断端面の硬度変化  
Hardness distribution of the cut edge

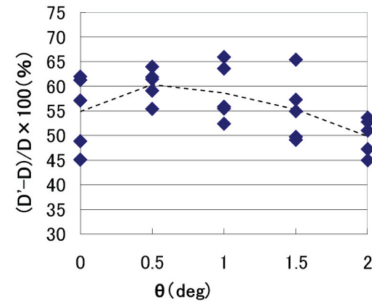


図18 シャー角度によるサイドバンド試験の開口度変化  
Effect of shear angle for the side bending test

とした。

伸びフランジ性は、図5(b)に示す初期の開口端距離 $D$ とサイドバンド試験に伴う半円切り欠き部中央のせん断加工面のき裂が板厚を貫通した際の開口端距離 $D'$ より、 $(D' - D)/D \times 100(\%)$ として算出した。

図17(b)より、同じクリアランスで比較すればせん断加工面表層近傍の板厚方向の平均硬さは $\theta = 0.5^\circ$ で最も低くなっており、別途、測定した端面のだれ高さ率、せん断面率が極小値となるシャー角度にほぼ一致していることが分かった。また、 $\theta = 0.5^\circ$ の水準のみが、シャー角度無しの場合よりも硬さが低下した。

図18にサイドバンド試験結果の一例を示す。クリアランス5.0%tでは $\theta = 0.5^\circ$ で開口率は最大となっており、開口率に対して最適となるシャー角度が存在し(以下、単に最適シャー角度)、最適シャー角度以上の $\theta$ を設けたパンチでは、そのせん断加工面の伸びフランジ性はシャー角度無の場合よりも低下することが示唆される。図17と比較して、 $\theta = 0.5^\circ$ のパンチにより半円切り欠き部中央の加工硬化が抑制されることが、 $\theta = 0.5^\circ$ において開口率がシャー角無の場合よりも向上した、もしくは、開口率の低下量が抑制された原因であると考えられる。

## 4. 結 言

本稿では高張力鋼板の成形課題のうち、特に問題とされる伸びフランジ破断について、その機構に基づき評価技術や対策技術を紹介した。これらの技術を組み合わせることで、FEM解析上で破断を防ぐ最適な鋼材選択やプレス工



法，工程設計が可能になると考えられる。今後はサーボプレスなど複雑な制御が可能な加工機との組み合わせ技術や，さらに深化させたシミュレーションを高度利用した最適加工技術の開発を進めることも望まれる。

参考文献

- 1) 吉田 亨: 塑性と加工. 52 (606), 777 (2011)
- 2) 宅田裕彦, 小津慶祐, 浜 孝之, 吉田 亨, 新田 淳: 塑性と加工. 49 (572), 58 (2008)
- 3) 伊藤耿一, 森 尚達, 近藤哲也, 植村 元: 第56回塑性加工連合講演会論文集. 2005, p. 45
- 4) Nitta, J., Yoshida, T., Hashimoto, K., Kuriyama, Y.: Proc. IDDRG 2008. 2008, p. 93
- 5) 長井美憲, 永井康友: PK技報. (6), 14 (1995)
- 6) 佐藤浩一, 吉田 亨, 水村正昭, 末廣正芳, 吉田博司: 第61回塑性加工連合講演会論文集. 2010, p. 407
- 7) 吉田博司, 宮城隆司, 佐藤浩一, 吉田 亨, 水村正昭, 末廣正芳: 第62回塑性加工連合講演会論文集. 2011, p. 379
- 8) 中川威雄, 吉田清太: 理化学研究所報告. 44 (3), 150 (1968)
- 9) Takahashi, Y., Kawano, O., Tanaka, Y., Ohara, M.: Proceedings of the MS&T 2009. Pittsburgh, USA, p. 1317
- 10) 高橋雄三, 河野 治, 堀岡 聡, 小原昌弘: 第62回塑性加工連合講演会論文集. 2011, p. 119
- 11) Hancock, J.W., Mackenzie, A.C.: Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 24 (2), 147 (1976)
- 12) 日本鉄鋼連盟規格“穴広げ試験方法”. JFS T 1001, (1996)
- 13) 松野 崇, 水村正昭, 瀬戸厚司, 末廣正芳: 第62回塑性加工連合講演会論文集. 2011, p. 123
- 14) 水村正昭, 佐藤浩一, 栗山幸久: 第58回塑性加工連合講演会論文集. 2007, p. 403
- 15) 松野 崇, 佐藤浩一, 新田 淳, 瀬戸厚司, 水村正昭, 末廣正芳: 第61回塑性加工連合講演会論文集. 2010, p. 409



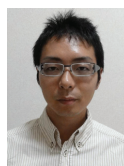
吉田博司 Hiroshi YOSHIDA  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主任研究員 博士 (工学)  
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



高橋雄三 Yuzo TAKAHASHI  
大分技術研究部 主任研究員



吉田 亨 Tohru YOSHIDA  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主幹研究員 博士 (情報科学)



松野 崇 Takashi MATSUNO  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主任研究員



佐藤浩一 Koichi SATO  
名古屋技術研究部 主任研究員  
博士 (情報科学)



新田 淳 Jun NITTA  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
主任研究員 博士 (情報工学)