

高強度鋼板のせん断加工技術

Shearing Technology for High Tensile Strength Steel

安 富 隆*	西 村 隆 一	米 村 繁
Takashi YASUTOMI	Ryuichi NISHIMURA	Shigeru YONEMURA
中 田 匡 浩	吉 田 亨	水 村 正 昭
Masahiro NAKATA	Tohru YOSHIDA	Masaaki MIZUMURA

抄 録

自動車部品の高強度化に伴い、プレス成形工程に含まれるせん断加工では、従来の伸びフランジ成形性に関する課題に加えて、水素脆化による亀裂の発生、端面不良および工具の損傷等の課題が重要となってきた。水素脆化による亀裂の発生に対しては、新たに開発したスクラップを活用したコイニング手法と、削り抜き法の効果を検討した。端面不良については、過大なばりの発生を抑制する金型機構を開発した。工具の損傷については、高強度鋼板をせん断加工した際に発生する刃先変形の要因を明らかにするとともに、被膜処理を施した工具の耐久性について検討した。

Abstract

Hydrogen embrittlement cracking, burr and tool wear in shearing process are becoming more important issues to apply high strength steel sheets for automotive body parts. In this paper, new coining method with aid of scrap parts and cut-off punching process were introduced. And developed trimming die structure for suppressing the occurrence of burr on sheared surface was introduced. In addition, the mechanism of tool wear of shearing tool for high strength steel was discussed, and the effect of coating on shearing tool life was investigated.

1. 緒 言

自動車用部品には、衝突安全性の向上と燃費の改善の両立を目的として、高強度な鋼板の適用が行われている。特に骨格部品を中心に適用鋼板の高強度化が急速に進展しており、冷間プレスを前提としても1180MPa級の鋼板が開発され、自動車部品として実用化されている^{1,2)}。

自動車用部品に用いられる鋼板は、ブランク工程において、コイルの状態からブランク型を使用してブランク形状に切断され、その後、プレス成形によって所定の製品形状に成形される。また、成形後にトリム型を用いて製品形状以外の部分の切断や穴抜きが行われる。これら自動車部品を製造する工程において、鋼板に形成されるエッジ部(以下、せん断端面と記す)は、上述の切断工程においてひずみや残留応力が生じるため、母材と比較して諸特性が低下しており注意が必要である。これまで、このようなせん断端面では、伸びフランジ成形性が低下することが指摘されてきた³⁾。1GPaを超える高強度鋼板のせん断端面において

は、これに加え、水素脆化による亀裂の発生や、予期せぬ亀裂の発生と進展によるせん断端面の不良が懸念される。また、鋼板の強度が工具鋼の強度に近づいているため、切断工具の損傷が顕著となり、生産コストの増加を招く可能性がある。

これらの課題を解決するためには、材料面でのアプローチに加え、加工技術面からのアプローチも重要である。せん断加工法による対策のうち、伸びフランジ性についての検討は、これまでも行われてきた^{4,7)}。ここでは、せん断端面の水素脆化特性、端面不良および切断工具の損傷等の、1GPaを超える高強度鋼板において特に重要となる課題について、取り組み内容の紹介を行う。

2. 高強度鋼板のせん断端面の課題とその対策技術

2.1 せん断端面の水素脆化特性を向上させる技術

水素脆化による破壊は、静的な応力が負荷された状態で、鋼中に一定以上の水素が侵入することで鋼板が脆性的に破壊する現象である。せん断端面では、加工による引張残留

* 鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

応力が残留する。この状態で、自動車用部品の製造工程や実車使用環境下において水素が侵入するため、水素脆化による亀裂の発生が懸念される。水素脆化による亀裂の発生を防ぐためには、侵入する水素量を低減するとともに、加工技術によって引張残留応力を低減する必要がある。ここでは、引張残留応力を低減させる手法として、せん断加工の際に生じるスクラップを活用した簡易なコイニング工法と、削り抜き法⁸⁾を高強度鋼板に適用した事例を紹介する。

2.1.1 スクラップを活用したコイニング工法

通常のコイニング加工は、量産における課題が存在する。すなわち、パンチ形状により改善効果に変化するため、せん断端面の形状に応じて、適切なパンチ形状を選定する必要があることに加え、工具と切断線の位置を高い精度で一致させる必要がある。そこで、切断後に排出されるスクラップをコイニングパンチとして活用した簡易なコイニング手法を考案した^{9,10)}。提案工法の概要を図1に示す。ピアスやトリムなどのせん断加工では、一般に、ブランキングの際に抜き落とし部はスクラップとして排出するが、提案工法ではこのスクラップを活用する。せん断加工によって鋼板を切断した際、スクラップと製品側の破断面の角度はせん断条件によらず一致する。そこで、せん断加工後にスクラップ側の鋼板をコイニングパンチとして用い、クッションピンなどでスクラップ側の破断面を製品側に押し付け、そのときのコイニング効果によってせん断端面の引張残留応力を低下させる。

提案工法の効果を検討するため、簡易的に打抜き加工後のスクラップを製品に押し付け、コイニング前後のせん断端面の残留応力を測定した。供試材は、板厚1.6mmの引張強さ1289MPaの鋼板とした。サーボプレス機を用いて直径10mmの穴を抜き、鋼板を製品とスクラップに分離した。この際、パンチとダイス間のクリアランスの板厚に対する比率(以下、CL/tと記す)を10%とした。その後、スクラップを製品の穴抜き部に配置し、穴抜き時の工具を用いて荷重を負荷し、穴抜き部をコイニング加工した。ここでは、コイニングストロークとせん断端面の残留応力の関係を調査するため、穴抜きままの状態(S₀)から、スクラップと製品が同じ高さとなるストローク(S₁)、およびスクラップが製品穴を貫通するストローク(S₂)まで、スクラップを穴抜き部に押し込んだ後、除去した。

各試験条件において、穴抜き部の板厚中央の残留応力を、X線により測定した。スポット径は500μmとし、sin²ψ法を用いて測定した。また、スクラップを製品の高さまで押し込んだストローク(S₁)において、せん断端面の水素脆化特性をチオシアン酸アンモニウムへの浸漬試験により評価した。コイニング工程における、板厚方向と周方向の残留応力を図2に示す。穴抜きまま(S₀)のせん断端面では、板厚方向と周方向ともに、鋼板の引張強さに近い引張残留

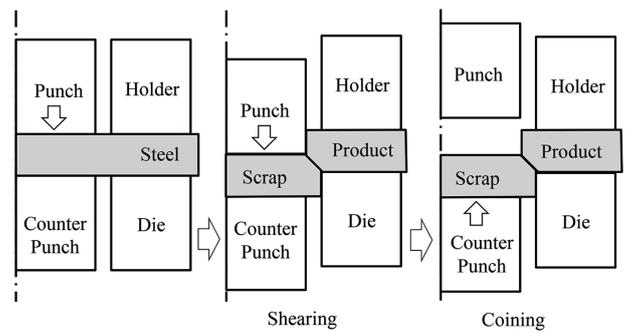


図1 スクラップを活用したコイニング手法の模式図
Schematic of coining method with aid of scrap

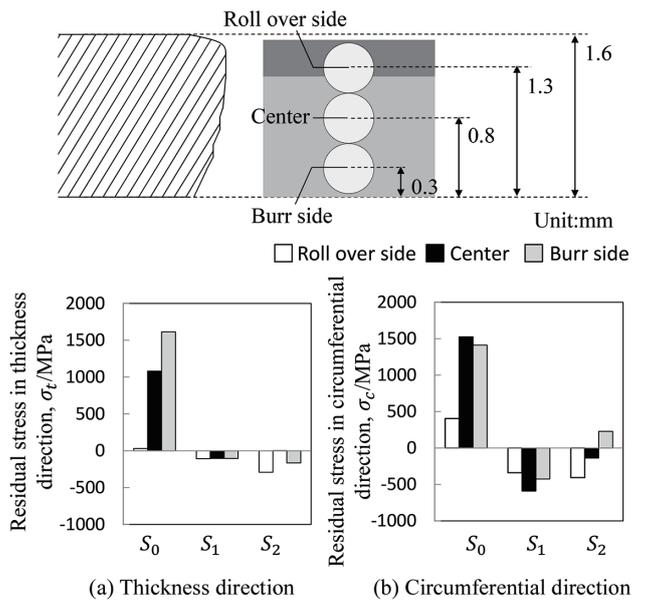


図2 各ストロークにおけるせん断端面の残留応力
Residual stress at each coining stroke

応力が計測された。一方、スクラップによるコイニング加工を実施した後(S₁, S₂)のせん断端面では、引張残留応力は大きく低下した。また、チオシアン酸アンモニウムへの浸漬試験によって水素脆化特性を評価した結果、穴抜きまま(S₀)に対して、提案手法によりコイニング加工した後(S₁, S₂)のせん断端面では、耐水素脆化特性が大幅に改善した。以上に示した通り、本工法は、押し込み量の変動に対してロバスト性があることが確認できた。本論文では、穴抜き部を対象に提案工法の効果を示した。今後は、穴抜き以外の切断線形状における効果の検証と、量産適用に適した金型構造の検討に取り組む。

2.1.2 削り抜き法

削り抜き法⁸⁾は、簡易なシェービング法として知られており、加工硬化層の厚みを抑制することで優れた伸びフランジ成形性を得ることができる。ここでは、高強度鋼板の穴抜きを対象に、削り抜き法による加工面の穴広げ率と水素脆化特性を検討した。供試材には、板厚1.6mmの引張

表 1 打抜き加工条件
Punching conditions

No.	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	Cut-off width [mm]
1	10.32	-	0
2	10.32	10.48	0.08
3	10.00		0.24
4	9.68		0.40

D₁: Punch diameter in the first step
D₂: Punch diameter in the second step

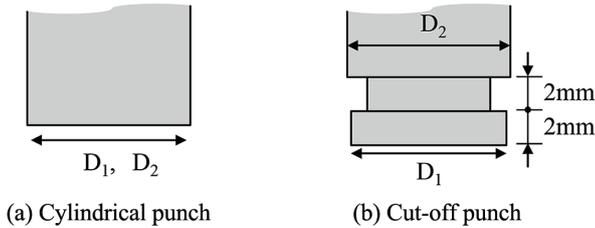


図 3 打抜き工具の模式図
Schematic figure of piecing tools

強さ 1289MPa の鋼板を用いた。穴広げ率に及ぼす削り幅の影響を調べるため、ダイスの直径を 10.64mm とし、表 1 に示す径を有する円筒パンチ (図 3 (a)) を用いて、二工程の打抜きによる削り抜きを行った。さらに、図 3 (b) に示す形状のパンチを用いて、No.3 の条件の削り抜きを一工程で行った。打抜き後、すべての条件で、穴抜き部の穴広げ率を測定した。また、No.1 および 3 の条件で、X 線による残留応力の測定とチオシアン酸アンモニウムへの浸漬試験を実施した。

通常の打抜き加工面 (No.1) と削り抜き法による加工面 (No.3) のせん断端面の例を図 4 に示す。通常の打抜き加工面では、せん断面が少なく、破断面の比率が大きいのに対し、削り抜き法による加工面ではせん断面の割合が大きい。図 5 に CL/t が 10% の通常の打抜き加工面に対する削り抜き法による加工面の穴広げ率を示す。CL/t が 10% の通常の打抜き加工穴に対し、削り抜き法による加工面の穴広げ率は大幅に向上した。また、図 3 (b) に示すパンチを用いて加工した穴では、削り抜きを一工程で行ったために周方向に均一な端面が得られ、CL/t を 10% とした通常の打抜き加工穴に対して約 3 倍の穴広げ率が測定された。

通常の打抜き加工面 (No.1) と削り抜き法による加工面 (No.3) における、残留応力測定の結果を図 6 に示す。通常の打抜き加工面では、破断面において引張強さを越える残留応力が生じているのに対し、削り抜き法による加工面では、引張残留応力が大きく減少した。

また、チオシアン酸アンモニウムへの浸漬試験によって水素脆化特性を評価した結果、通常の打抜きに対して、削り抜き法による加工面では、耐水素脆化特性が大幅に改善した。以上に示した通り、削り抜き法による加工面は、高

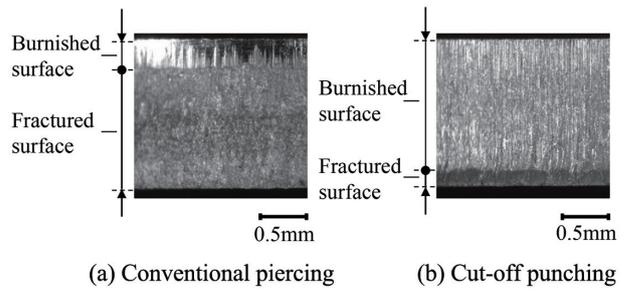


図 4 従来法と削り抜き法のせん断端面
Sheared surface of conventional piercing and cut-off punching

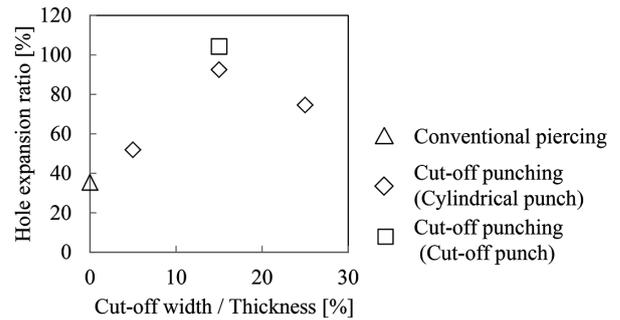


図 5 削り抜き法による加工面の穴広げ率の改善効果
Hole-expansion ratio of cut-off punched hole

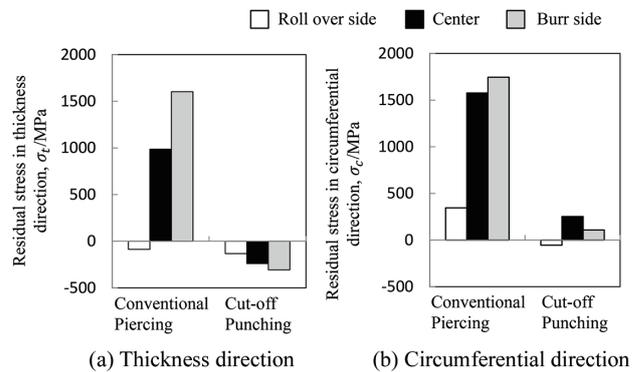


図 6 残留応力測定結果
Measurement result of residual stress

強度鋼板であっても優れた伸びフランジ性と水素脆化特性を両立できる。削り抜き法は、削りくずの発生等の量産課題が存在するが、これらを解決することで、高強度鋼板の端面特性の飛躍的な向上が期待できる。

2.2 せん断端面不良を抑制する技術

せん断加工の際、CL/t を適切な値に設定した場合、せん断端面は、だれ、せん断面および破断面で構成されている。これに対し、CL/t が過大な場合、ダイス側に突出部 (ばり) が生じることがある。ここでは、高強度鋼板を対象とし、各切断線形状において、ばりが発生する CL/t の範囲を示す。さらに、より広い CL/t 範囲で、ばりの発生を抑制できる打抜き金型構造を紹介する。なお、本論文では、ばりのうち、

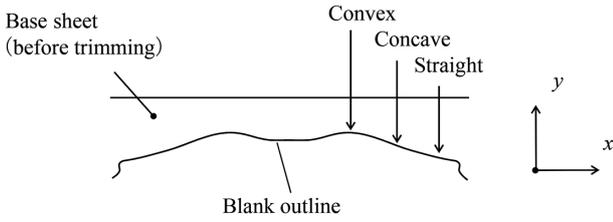


図7 切断線形状
Cutting line shape

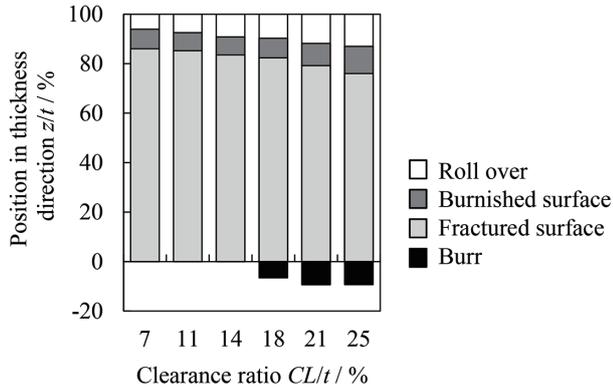


図8 せん断端面品質に与える打抜きクリアランスの影響
Effect of piercing clearance on pierced edge quality

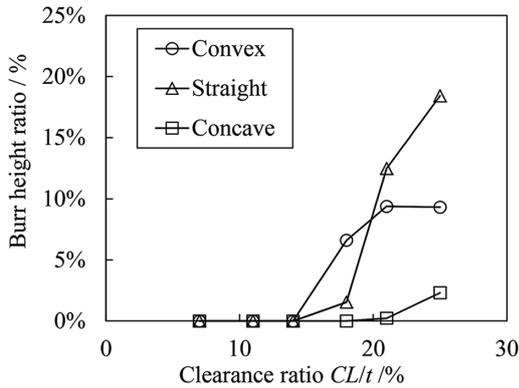


図9 各切断線形状におけるバリ高さに与える打抜きクリアランスの影響
Comparison of effect of shearing clearance on burr height among different trimming line curvatures

板厚の5%を超える比較的大きなばりを“過大ばり”と呼ぶこととする。

供試材には、板厚1.4mmの980MPa級鋼板を用いた。図7に示す切断線形状に対し、 CL/t を7~25%として外形抜きを行った際のせん断端面の構成比率(だれ、せん断面、破断面およびばりの板厚比率)を調べた。図8に外形抜き凸形状部における結果を示す。 $CL/t \geq 18\%$ の条件で、過大ばりが観測された。

次に、バリ高さに及ぼす CL/t の影響を切断線形状間で比較した(図9)。過大ばりが生じる最小の CL/t は、凸および直線形状では、それぞれ18%および21%であるのに

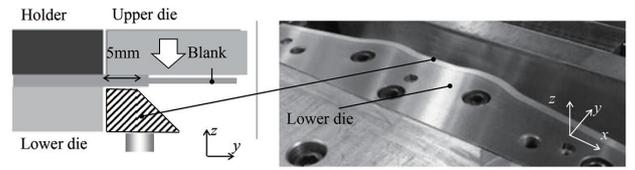


図10 過大ばり発生を抑制する金型構造
Developed trimming die structure for suppressing excessive bending behavior around trim edge line

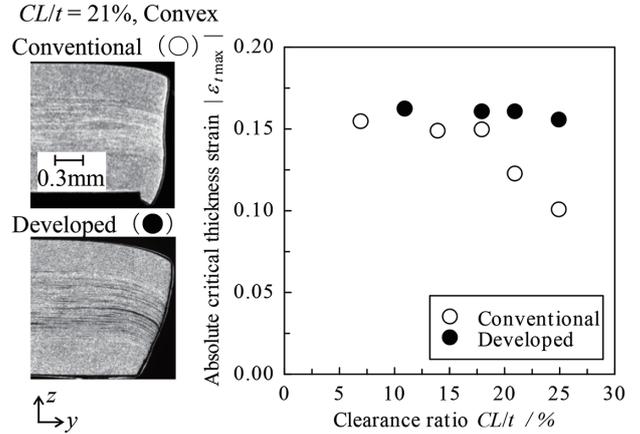


図11 フランジ成形性に与える提案金型構造の効果
Effect of developed trimming die structure on flange-up formability

対し、凹部では、 $CL/t=25\%$ でも過大ばりが観測されなかった。これより、凸および直線形状では、凹部と比較して過大なばりが生じやすいことが分かる。図示しないが、本要因は、切断線が直線状またはブランク端に近い場合、過大ばりを引き起こす過度な素材倒れこみが生じるためと推定される。

供試材において、異なる CL/t の伸びフランジ成形性をフランジアップ成形で評価した結果、過大ばりが生じる条件では、伸びフランジ成形性が顕著に低下した。図10に、 CL/t が大きい条件での過大ばり発生を抑制するために考案した外形抜き金型構造を示す。過大ばりの要因となる過度な素材の倒れこみを低減するため、抜き落とされる部位の素材下面をガスシリンダに直結した金型によって加圧しながら打ち抜く構造とした。図11にフランジアップ成形における限界板厚ひずみの絶対値と CL/t の関係を示す。考案した打抜き金型構造により、 CL/t 大の条件においても過大ばりが抑制され、安定した良好な成形性が実現可能となった¹²⁾。

3. 高強度鋼板の切断工具耐久性に関する取り組み

高強度鋼板は、鋼板の硬さが工具鋼の硬さに近づいており、せん断加工において著しい工具の損傷が懸念される。せん断端面に生じるばりの高さは、せん断加工時の刃先の寿命を評価する1つの指標であるが、ばり高さが増加する主要因は工具刃先の形状変化と、工具側面の摩耗による

CL/t の変化である。ここでは、高強度鋼板において、工具刃先の形状が変化するメカニズムとそれに対するせん断加工条件の影響について述べた後、工具側面の摩擦抑制に有効な各種被膜処理の耐久性試験の結果を示す。

3.1 高強度鋼板におけるせん断工具の損傷要因

高強度鋼板の刃先の形状変化に与える要因について検討した。せん断加工中の刃先の変形状態を観察するため、パンチに対して3°傾斜した鋼板に対し、直径10mmの穴抜きを行い、パンチ先端が鋼板に食い込んだ状態の試料を作成して工具断面を観察した。供試材には、板厚1.4mmの590MPa級鋼板および1180MPa級鋼板を用いた。図12に工具刃先の観察結果を示す。590MPa級鋼板を切断した工具では、刃先の変形がほとんど認められないが、1180MPa級鋼板を切断した工具では、刃先の明瞭な形状変化が認められる。1ショット目で形状の変化が生じたことから、これは、従来指摘されている刃先の低サイクル疲労や被加工材との凝着により刃先部が引きはがされるものとは異なり、工具鋼の塑性変形によるものであると考えられる。

刃先の塑性変形に及ぼす、各種せん断加工条件の影響を検討するため、有限要素法による数値シミュレーションを行った。ソルバーには、静的陰解法FEMコードのABAQUS/Standardを用いた。工具は弾性体とし、ヤング率206GPa、ポアソン比0.3とした。工具刃先のメッシュへの侵入を防ぐため、刃先には丸みを設けた。各種せん断加工条件の影響を検討するため、基準条件に対して、各解析因子を表2に示す範囲でそれぞれ変化させた。せん断加工中の刃先へ

の負荷は、塑性変形と関連のある相当応力の最大値で評価した。

各せん断加工条件において、工具刃先に生じる相当応力の最大値を図13に示す。各解析条件における結果は、基準条件の結果で正規化して示した。まず、板厚を変化させた結果(図13(a))より、板厚が増加しても、工具に作用する応力は大きく変化しないことが分かる。次に、工具刃先の曲率半径を変化させた結果(図13(b))より、工具刃先の曲率半径を大きくすると、刃先に生じる応力は減少し、塑性変形を抑制することが可能であることが分かる。次に、CL/tを変化させた結果(図13(c))より、刃先に生じる応力はCL/tにほとんど依存しないことが分かる。最後に、ブランク傾斜角度 θ を変化させた結果(図13(d))より、刃先に生じる応力は、ブランク傾斜角度 θ の影響を強く受け、ブランクの傾斜が無い場合と比較して、20°程度の傾斜がつくと、刃先への負荷が約1.5倍に増加することが分かる。

以上に述べた通り、せん断工具刃先に生じる変形の抑制には、刃先形状の変更によって刃先に生じる応力を低減するとともに、ブランクの傾斜角度を抑制することが重要である。刃先形状を変更する場合は、工具の耐久性とせん断端面に求められる諸特性を両立させる必要がある。また、コイル材のブランキング工程では、ブランクの傾斜がほとんど生じないのに対して、成形後のトリム工程では、傾斜した状態のブランクを切断する必要がある。また、スプリングバックによる成形品の形状変化により金型と部品の形状に差異がある場合、ブランクの傾斜がさらに大きくなる。これを抑えるためには、既報¹³⁾で紹介したようなスプリングバックの対策技術の活用とその進化が必要である。

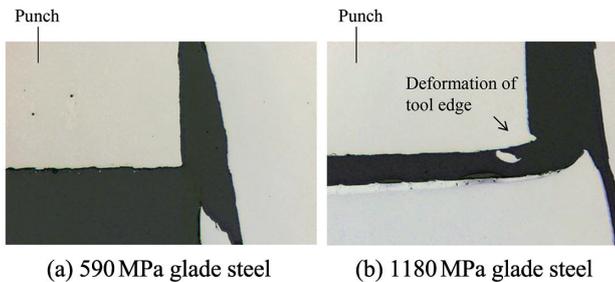


図12 せん断工具刃先の変形
Deformation of sheared tool edge

表2 解析条件
Analysis conditions

Shearing conditions	Reference conditions	Analysis conditions
Thickness, t [mm]	1.6	0.8 - 2.4
Clearance/Thickness, CL/t [%]	10	1 - 30
Blank inclination angle, θ [°]	0	0 - 20
Curvature radius of tool edge, R [mm]	0.1	0.02 - 0.5

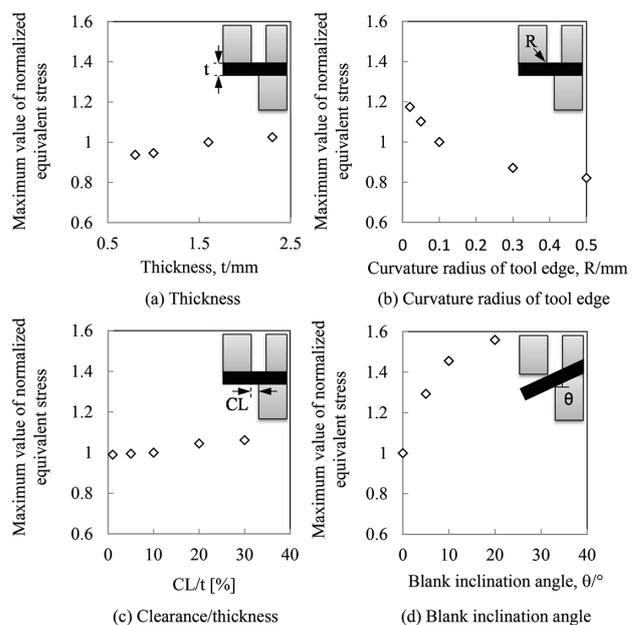


図13 刃先応力に与えるせん断加工条件の影響
Influences of shearing conditions on tool edge stress

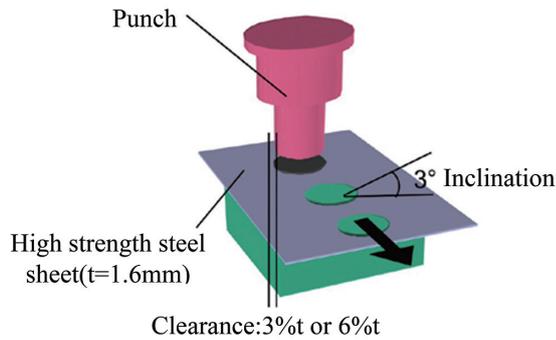


図 14 ピアス加工試験の模式図
Schematic diagram of pierce processing test

3.2 切断刃の耐久性を向上させるコーティング技術
高強度鋼板を加工する冷間プレス金型は、耐摩耗性やかじり防止を目的として、表面処理を施してから使用されることが増えてきた。ここでは、せん断工具を対象として、各種表面処理の被膜寿命を検討する¹⁴⁾。図 14 に冷間ピアス加工試験の模式図を示す。本試験は、CL/t を 3% および 6% に設定し、被加工材を 3° 傾斜させ、無潤滑で行った。試験速度は 50 ~ 55spm に設定し、被加工材には、板厚 1.6mm の 1180MPa 級高強度鋼板を用い、金型用鋼には、冷間工具鋼 (SKD11 改良鋼) を使用した。パンチには、TRD (Thermo Reactive Deposition and Diffusion) 処理、CVD (Chemical Vapor Deposition) 処理、PVD (Physical Vapor Deposition) 処理の 3 種類の被膜処理を実施し、評価した。

PVD 処理については、下地に深さ 50 μ m の窒化処理を施した被膜 (Nitriding+PVD) も評価した。パンチ刃先には、欠損 (チップング) を防ぐために、面取りを行った。各ショットごとに、被加工材のサンプリングを行い、せん断端面を観察した。パンチにかじりが発生すると、せん断面で筋状の模様が認められた。せん断加工における工具寿命は、切り口に生じるかえり高さや切断面の特性によって評価されるため、かじりの発生は必ずしも金型寿命に一致しない。ここでは、被膜寿命の相対的な指標としてせん断面において筋状の模様が発生するまでのショット数を比較した。

図 15 に、各条件における被膜寿命の評価結果を示す。すべての被膜において、CL/t が 3% の場合と比較して、CL/t が 6% の場合のほうが、被膜が長寿命となった。各被膜の寿命を比較すると、PVD 処理被膜 > CVD 処理被膜 > TRD 処理被膜の順に長寿命であった。また、下地窒化処理を実施した PVD 被膜の寿命は、窒化無しの場合と比較して 1.5 倍以上に向上した。高強度鋼板の切断においても、適切な被膜処理により、工具の長寿命化が図れることが分かる。

4. 結 言

鉄鋼材料は、車体軽量化による CO₂ 排出量低減と衝突

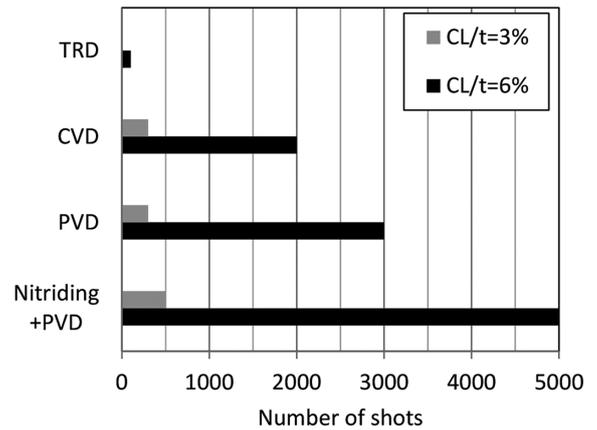


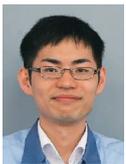
図 15 コーティング被膜寿命の比較
Coating life comparison

安全性の両立のため、高強度化が進められてきた。本論文では、せん断加工に関わる課題のうち、特に 1GPa を越える引張り強さを有する高強度鋼板を切断する上で重要となる、せん断端面の水素脆化による亀裂の発生、端面不良および工具損傷の課題についての取り組み内容を紹介した。今後、さらなる鋼板の高強度化が進む場合には、ここで紹介した技術に加えて、冷間圧延鋼板に対しても、レーザーによる切断技術を含めた検討が必要になると考えられる。今後も、このような技術開発を進め、さらに高性能な鋼板を生み出すとともに、自動車部品への適用を可能とする利用加工技術の開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) 林央：塑性と加工. 58 (673), 99-104 (2017)
- 2) 高橋学：塑性と加工. 58 (673), 105-109 (2017)
- 3) 松野崇, 新田淳, 佐藤浩一, 水村正昭, 末廣正芳：塑性と加工. 54 (632), 819-825 (2013)
- 4) 吉田博司, 吉田亨, 佐藤浩一, 高橋雄三, 松野崇, 新田淳：新日鉄技報. (393), 18-24 (2012)
- 5) 松野崇, 佐藤浩一, 岡本力, 水村正昭, 末廣正芳：塑性と加工. 55 (646), 1018-1023 (2014)
- 6) 松野崇：素形材. 53 (10), 2-7 (2012)
- 7) 高橋雄三, 河野治, 潮田造作：塑性と加工. 55 (638), 248-253 (2014)
- 8) 中川威雄, 吉田清太：塑性と加工. 10 (104), 665-671 (1969)
- 9) 安富隆, 米村繁, 吉田亨, 水村正昭, 樋渡俊二：平成 29 年度塑性加工春季講演会講演論文集. 75-76 (2017)
- 10) 安富隆, 米村繁：第 69 回塑性加工連合講演会講演論文集. 335-336 (2018)
- 11) Yasutomi, T., Yonemura, S., Yoshida, T., Mizumura, M., Hiwatashi, S.: J. Phys.: Conf. Ser. 896, 012098 (2017)
- 12) 西村隆一, 伊藤泰弘, 中田匡浩, 中澤嘉明：塑性と加工. 57 (670), 1062-1069 (2016)

- 13) 吉田亨, 磯貝栄志, 佐藤浩一, 橋本浩二: 新日鉄技報. (393),
4-10 (2012)
- 14) 樋口成起, 増田哲也, 清水崇行, 松野崇, 佐藤浩一: 大同特
殊鋼技報 電気製鋼. 85 (1), 39-46 (2014)



安富 隆 Takashi YASUTOMI
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



中田匡浩 Masahiro NAKATA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
上席主幹研究員



西村隆一 Ryuichi NISHIMURA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員 博士(エネルギー科学)



吉田 亨 Tohru YOSHIDA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
上席主幹研究員 博士(情報科学)



米村 繁 Shigeru YONEMURA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員 博士(工学)



水村正昭 Masaaki MIZUMURA
日鉄テクノロジー(株)
富津事業所 構造力学ソリューション部
統括主幹 博士(工学)
(前 鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
上席主幹研究員)