

2 回打抜きによる薄鋼板の伸びフランジ性向上

岩谷二郎*・岡野洋一郎*・上野行一**

*加古川製鉄所・技術研究センター **トヨタ自動車㈱

Stretch Flangeability Improvement in Sheared Edge Steel Sheets with "Double Punching"

Jiro Iwaya・Yoichiro Okano・Koichi Ueno

A great deal of effort has been made to develop a technique to improve the formability of sheared edges. There appears to be no simple method for this problem. "Double punching" was investigated in this paper as a simple method for improving sheared edge hole deformability in regards to its effect on cut-off width, and punching clearance during the second punching stage.

まえがき = 薄鋼板の加工では、一度せん断加工された面が後工程で伸び変形を受け、破断に至る例はきわめて多く問題となっている。その代表的なものに、穴拡げ試験のような伸びフランジ加工がある。この伸びフランジ加工性は、素板のせん断縁端面の表面性状やせん断近傍の加工硬化層の影響を受け、通常、切削縁の伸びフランジ性よりも劣ることが知られている¹⁾。そこで、伸びフランジ性の向上を目的として材料面での検討はもとより、素板の加工技術上の検討もおこなわれており、「レーザー切断法²⁾」や切削に近いものとしての「削り抜き法³⁾」などによる素板の加工法が提案されている。

上記対策技術の中でも、プレス装置を使用するものが生産性の面で優れているが、従来法では伸びフランジ性の向上は大きいものの、金型製作の時間やコスト、維持管理の煩雑さ、さらには、水平力による材料の逃げに起因する端切りの困難さなどの問題点がある。したがって本研究では、金型製作や維持管理の容易性に重点を置き、より実用化しやすい簡便な方法として、2回打抜き（取りしるが比較的大きい打抜き）による素板の伸びフランジ性向上法について検討をおこなった。

1. 実験方法

1.1 供試材

伸びフランジ加工用途に供されることが比較的多い熱延鋼板のせん断縁の延性を調べるため、板厚(t)が2.8mmの軟鋼、およびフェライト+ベイナイト(F+B)組織系でtが2.6mmの590MPa級材や、tが3.3mmの780MPa級材をもちいた。供試材の機械的性質を第1表に示す。

1.2 伸びフランジ試験

直径50mmで頂角が60°の円錐パンチをもちい、穴拡げ試験にて伸びフランジ性を評価した工具条件を第1図に示す。このとき、打抜き穴のかえりをパンチ側に向けて試験をおこない、穴拡がり限界の判定は板厚方向に巨視的な割れが貫通した時点とした。限界穴拡がり率(%)は通常つぎのような式により定義される。

$$= (D_B - D_i) / D_i \times 100(\%) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 D_i : 初期穴径

D_B : 破断時の穴径

試験は各条件で5枚づつおこない、その平均値で求めた。

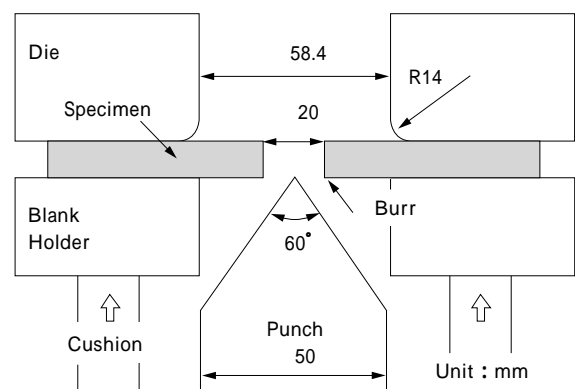
1.3 初期穴の加工法

本研究においては、プレス加工前の素板のせん断縁の延性を改善することが目的であるため、穴拡げ試験前の初期穴の加工方法が重要となる。ここでは初期穴径を20mmとし、まず、1次の打抜きで直径が20mm以下の下穴を打抜き、つづく2次打抜きでは1次打抜きと同じ位置を20mmのパンチで打抜く方法を検討した。本法

第1表 供試材の機械的性質

Table 1 Mechanical properties of tested steels

Steels	t mm	YS MPa	TS MPa	E _l %
Mild Steel	2.8	235	337	50
590N	2.6	517	590	25
780N	3.3	714	780	21

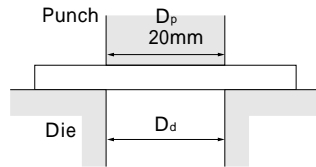


$$= \frac{D_B - D_i}{D_i} \times 100\%$$

= Hole Expanding Limit
 D_i = Initial Hole Diameter
 D_B = Fracture Hole Diameter

第1図 穴拡げ試験の工具条件

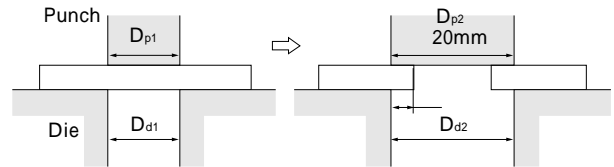
Fig. 1 Tool dimensions of hole expanding test



第2図 通常打抜きと2回打抜きの工程図

Fig. 2 Diagram of conventional piercing and double punching

Conventional Piercing



(a) 1st

(b) 2nd
Cut-off Punching

Double Punching

$$= (D_{p2} - D_{p1})/2, \quad \text{Cut-off Width}$$

第2表 通常打抜きと2回打抜き工程の工具寸法

Table 2 Tool conditions of conventional piercing and double punching process

	1st		2nd		Cut-off Width
	Punch Dia. (D_{p1}) / Die Dia. (D_{d1})	Punch Dia. (D_{p2}) / Die Dia. (D_{d2})	Punch Dia. (D_{p2}) / Die Dia. (D_{d2})	Cut-off Width	
Conventional Piercing	—	20 / 20.15 ~ 23	20.15 ~ 23	0	
Double Punching	18 / 18.15 17 / 17.60 14 / 14.30	20 / 20.15 ~ 23	20.15 ~ 23	1.0 1.5 3.0	

を「2回打抜き」ということとする。本2回打抜きにおいては、1次と2次の打抜きが同心円状におこなえるようにX-Y位置決めゲージを使用した。

また、金型の製作や維持管理がより簡便におこなえることを考慮し、2次打抜き時の取りしろ()を比較的大きなものとした。このため、「削り抜き法」のように取りしろが小さく、1~2工程間で同一のダイをもちいると、本法では1次打抜き時にパンチとダイ間のクリアランスが過大となり、だれやかえりが大きくなることが予想されるので、ここでは1次と2次の各打抜きパンチ径に見合った、直径の異なる2種類のダイをもちいた2工程の打抜きを実施した。また、金型クリアランスの影響を調べる目的で、2次打抜きでは直径が20.15~23mmのダイももちいた。

比較のために、直径が20mmのパンチをもちいた通常の1回打抜き(以後通常打抜き)もおこなった。2回打抜きの工程概要および工具寸法を、それぞれ第2図、第2表に示す。

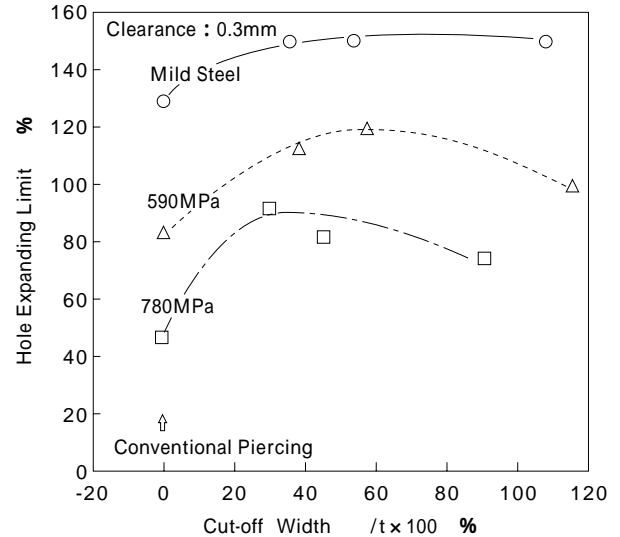
2. 実験結果

2.1 限界穴拡がり率に及ぼす2回打抜き時の取りしろの影響

各供試材の に及ぼす2回打抜き時の取りしろの影響を第3図に示す。いずれの材料においても2回打抜きにより は向上する。また、 は取りしろの影響も受け、本実験範囲での最小取りしろ(/t=約30%)で最大値を示す傾向にある。さらに、本2回打抜き技術により、590MPa材が通常打抜きの軟鋼と、780MPa材が通常打抜きの590MPa材と同等の伸びフランジ性にまで向上させることが可能であることがわかる。

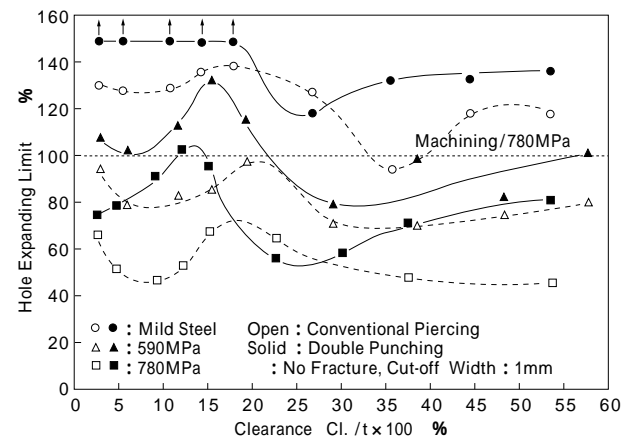
2.2 に及ぼすクリアランスの影響

通常打抜き材および2回打抜き材について、クリアランスが に及ぼす影響を第4図に示す。いずれの材料強度においてもクリアランスの変化にともない が変化することがわかる。



第3図 限界穴拡がり率()と取りしろ(/t×100)の関係

Fig. 3 Relationships between cut-off width (/t×100) and hole expanding limit ()



第4図 限界穴拡がり率()に及ぼす金型クリアランス(Cl./t×100)の影響

Fig. 4 Effects of clearance(Cl./t×100) on hole expanding limit ()

通常打抜き材において、いずれの材料も約20%のクリアランスで はピークを示す。通常、打抜き時の金型クリアランスは10%前後が推奨されることが多いが、伸びフランジ成形性のみを考えれば、約20%に管理すべきといえる。

いっぽう、2回打抜き材の が最大値を示すクリアランスは、通常打抜き材のそれよりも小さい側にシフトしており、材料強度が高いほど小さい側によっている。

また、第4図では780MPa材についてのみ示すが、クリアランスが10~15%の2回打抜き材の は切削で加工した初期穴の に近い値まで向上しており、簡便法と

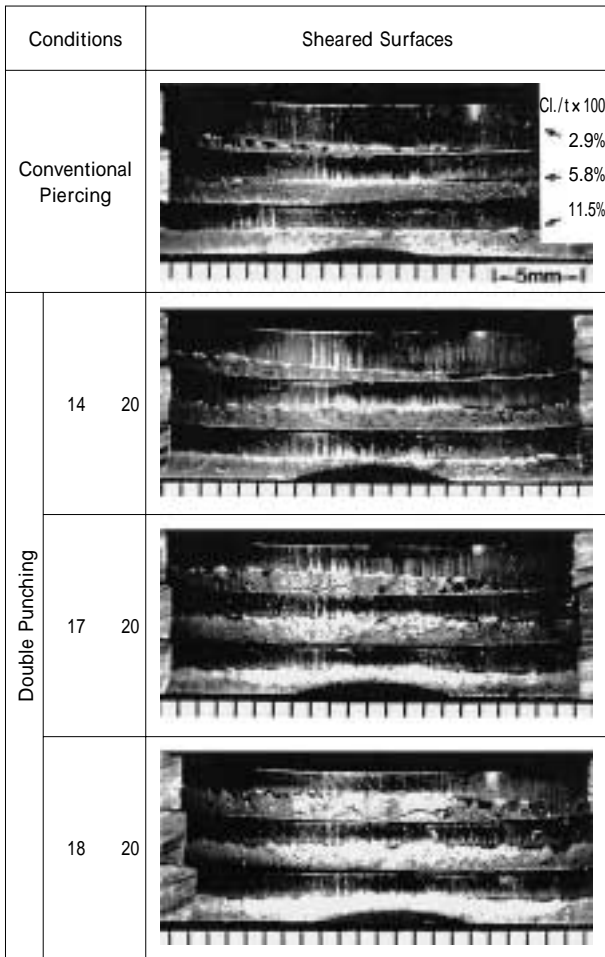


写真1 590MPa 材の2回打抜き後の破面性状
Photo.1 Sheared surface appearances of 590MPa steel after double punching

はいえ、本2回打抜き技術の効果は大きいことがわかる。

3. 考察

590MPa 材をもちいて、初期穴に関する各種の調査をおこなった。

3.1 初期穴の破面性状に及ぼす取りしろの影響

観察部位と打抜き時の金型との位置関係を各材料とも一定として、打抜き破面を観察した結果を写真1に示す。取りしろが大きい場合の2回打抜きによる破面は、通常打抜きとほぼ同様の性状を示すが、取りしろが小さくなると、せん断面比率が小さくなる傾向を示し、クラックの発生が早まっていることが予想される。

また、打抜き時にパンチストロークを途中で止め、材料のメタルフローを投影機にて観察した結果を写真2に示す。ここでも、取りしろが大きい場合の2回打抜き材は通常打抜き材とほぼ同様のせん断変形状態を示すが、取りしろが小さくなると、パンチの押し込み量に対してパンチ底の材料の突出量が小さくなり、せん断変形の程度が軽減されていることがうかがえる。さらに、その変形領域は「抜きカス側(取りしろ側)」に集中しているように観察される。

3.2 初期穴の破面性状に及ぼすクリアランスの影響

取りしろが1mmの2回打抜きにおいて、2次打抜き時の金型クリアランスを種々変化させたときの、せん断線のだれ、せん断面、およびかえりの、板厚に対する

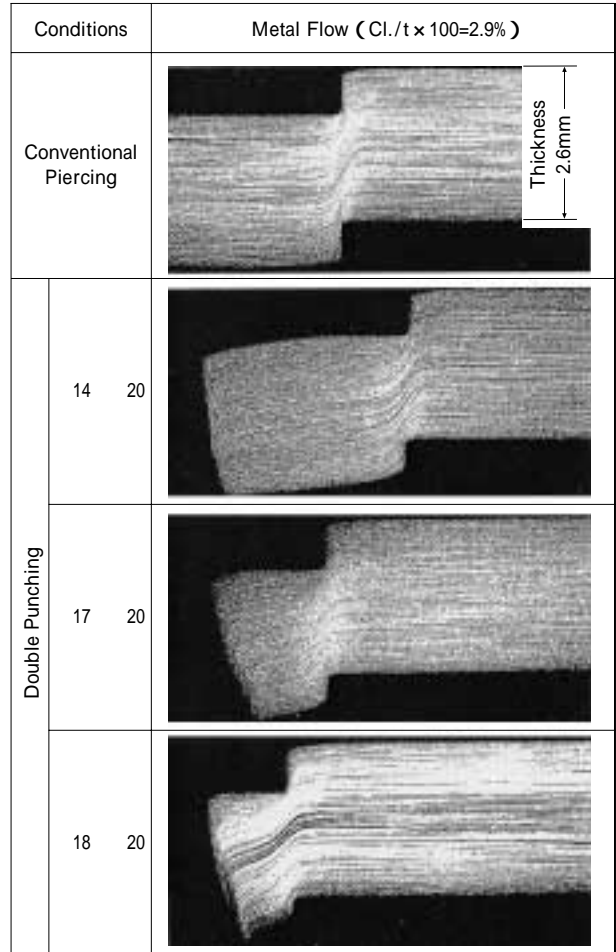
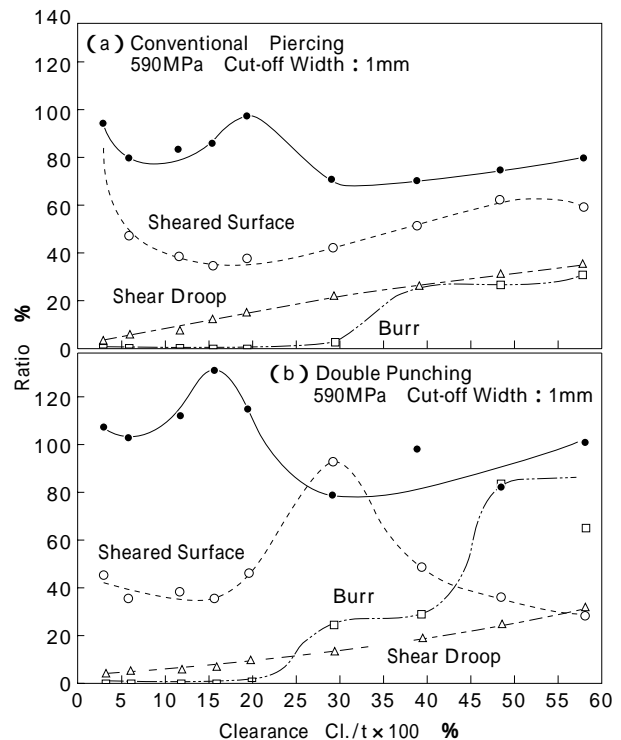


写真2 590MPa 材の2回打抜き途中でのメタルフロー
Photo.2 Metal flow of 590MPa steel in midway of double punching



第5図 限界穴拡がり率()、だれ、剪断面、かえりの各板厚に対する比率に及ぼす金型クリアランス(Cl./t × 100)の影響
Fig. 5 Effects of clearance(Cl./t × 100) on hole expanding limit (), ratio of shear droop, sheared surface and burr

比率とクリアランスとの関係を、通常打抜きとともに第5図に示す。

通常打抜きでは、クリアランスが小さい領域でせん断面比率が大きく、だれは小さい。また、クリアランスが大きくなるにつれてせん断面比率が小さくなり、せん断面比率が最小となるクリアランス約 20% で が最大値を示す。

2 回打抜きでも、 はせん断面比率が最小値を示すクリアランス約 15% で最大値を示し、せん断面比率が最大となるクリアランス約 30% で最小となる。クリアランスが大きい領域ではせん断面比率が小さいにもかかわらず が必ずしも高くない。この領域ではだれが大きくなっていることから、加工硬化層の大きさと硬化度合いのバランスが を決定付ける重要な因子と推定される。

3.3 初期穴の加工硬化層に及ぼす打抜き条件の影響

せん断縁の伸びフランジ性は、せん断加工後のせん断縁の延性に支配されると考えられ、この延性に関する検討が重要と思われる。ここでは簡略化のために、せん断縁の加工硬化挙動を延性の逆指標とみなし、せん断加工により導入されるせん断縁の加工硬化層の検討をおこなった。

加工硬化層の大きさを検討するため、打抜き後の供試材に 730 × 1h の熱処理を施し、歪み粒成長が生じた領域を加工硬化領域と仮定した。写真 3 に熱処理後のせん断縁近傍の組織写真（打抜き後の穴縁の、金型に対する位置関係を各供試材ともに揃えて切断したもの）を示すが、写真中白っぽく見える部分が粒成長した部位で、ここではこの部分を硬化層と仮定した。

打抜き時の金型クリアランスが大きくなるにつれ、硬化層が大きくなるとともに、だれ部の曲げ表面近傍やかえり部にも硬化層が生成されることがわかる。また、2 回打抜き材は通常打抜き材よりも硬化層が小さいようにみえる。さらに、この硬化層の大きさ（せん断面からの深さが 0.2~1.2mm）からわかるように、本 2 回打抜きは 2 次打抜き時の取りしろが比較的大きいため、1 次打抜きで生じた硬化層を 2 次打抜きですべて除去し、2 次打抜きで新たな硬化層を生成させる技術であることがわかる。

これらの断面写真より粒成長が生じた面積を画像解析により求め、だれ比率やせん断面比率との関係を調査した。ただし、クリアランスが大きい領域で生じる、曲げ表面部の硬化層は穴縁の変形に直接的には影響しないと考えられること、また、かえり部の硬化層は、穴抜き試験時にパンチによりつぶされることから、これらの硬化層は に直接的には影響しないと考えられ、ここでは除外して測定した。

3.4 に及ぼす加工硬化層の影響

前述のように、せん断縁の加工硬化層を延性の逆指標と見なし、本報では、硬化層の面積と硬度をもちいて、延性の逆指標（硬化層の強度）を次式で表現した。ここでの硬度は、硬化層内の平均的なものとするため、板厚の中心部で、端面から 0.15mm の箇所 で 5 点測定し、その平均値とした。

$$\text{硬化層の強度} = (\text{HV}/3) \times S \dots\dots\dots (2)$$

ここに、HV：ピッカース硬度（荷重 = 0.049 N）

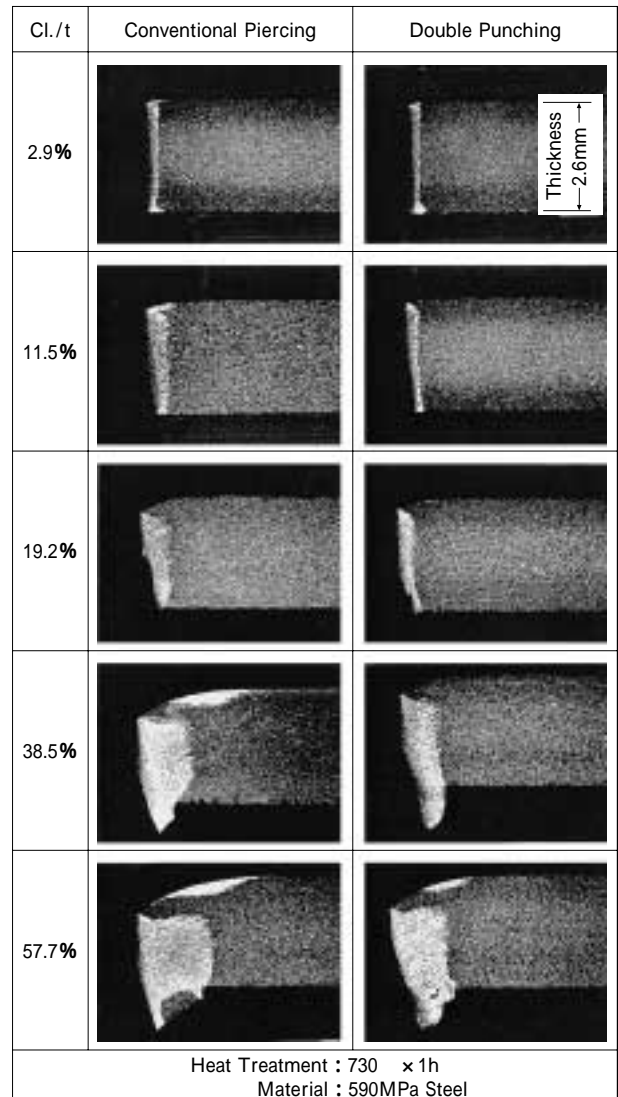
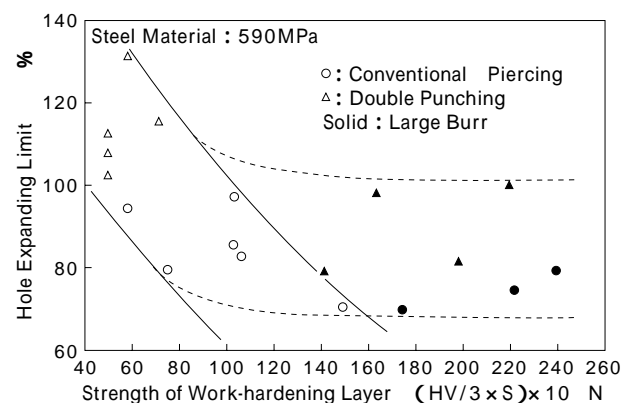


写真 3 熱処理後の穴縁近傍の組織

Photo.3 Cross-sectional microstructures after heat treatment



第 6 図 限界穴抜き率 () と加工硬化層の強度 (HV/3 × S, S : 加工硬化層の面積) の関係

Fig. 6 Relationship between strength of work-hardening layer (HV/3 × S, S : Area of work-hardening) and hole expanding limit ()

S : 板厚断面の加工硬化層面積

と硬化層の強度の関係を示す。図より明らかのように、 と硬化層の強度は良い相関を示し、硬化層の強度の増大にともない は低くなる。また、通常打抜き材も 2 回打抜き材も同一線上で整理でき、2 回打抜き材は硬化層の強度が低く、高い を示す傾向にあることがわかる。このことより、打抜き時の取りしろや金

型クリアランスが変化すると、せん断縁のだれやせん断面比率が変化し、加工硬化層の大きさや硬化度合いに影響を与え、せん断縁の延性が変化し、 に影響を及ぼすものと考えられる。また、図中黒塗り記号で示したように、クリアランスが大きい領域で巨大なかえりが発生し始めると、 が改善されるかのように見える。これは、本報のように、かえりをパンチ側に向けた穴拡げ試験では、かえりがパンチにより穴縁に押しつけられて圧縮の静水圧成分を発生させている⁴⁾ことも原因の一つと考えられるが、詳細は不明である。

3.5 2回打抜きによる 向上機構

以上の調査結果より、本2回打抜きにおいてとくに本実験範囲での取りしろが小さい場合(本実験では1mm)の の向上機構に関しては以下のように考えられる。

1) 通常打抜きよりも取りしろが小さいことにより、2次打抜き時に抜きカス側の変形が優先されて穴縁側のせん断変形が緩和されるため、硬化度合いが抑制された新たな硬化層が生成される。

2) そのとき、クラックの発生が早いことで、加工硬化層が抜きカス側により多く配分され、穴縁側の硬化層が小さくなる。

3) 金型クリアランスの影響は複雑であるが、通常打抜きの場合で約20%、2回打抜きの場合で約15%で が最大値を示したのは、ここでの加工硬化層の大きさと硬化度合いのバランスが(2)式で定義した硬化層の強度を下げ、 の向上に有効に寄与したものと考えられる。

4. 本2回打抜き技術の実機確認

写真4に示す自動車の足廻り部品であるサスペンションアームに本2回打抜き技術を適用することで、これまで伸びフランジ部位で破断が発生して加工ができなかった590N材での伸びフランジ加工が可能になり、本技術の有効性が実成形においても確認された。

むすび=伸びフランジ用途に供されることが多い、板厚が2.6~3.1mmの軟鋼およびF+B系の590~780MPa級の熱延鋼板をもちいて、2回打抜き法による伸びフランジ性向上の検討をおこない、以下の知見をえた。

(1) いずれの材料においても2回打抜きにより限界穴拡がり率 は向上するが、本実験範囲ではもっとも取りしろが小さい、板厚の約30%で最大となる傾向を示

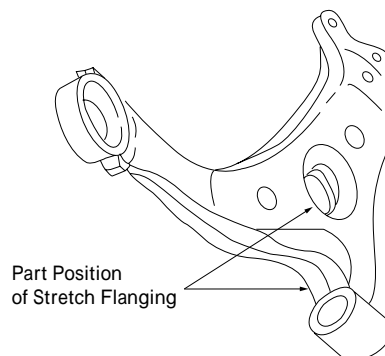


写真4 本2回打抜き技術を適用したサスペンションアーム
Photo.4 Suspension arm formed by double punching

した。

(2) 通常打抜きと同様、2回打抜きにおいても は金型クリアランスの影響を受ける。 が最大値を示すクリアランスは通常打抜き(約20%)よりも小さい約15%であった。

(3) 780MPa材の が切削穴のそれに近い特性を示したことから、簡便法としての本2回打抜き技術は有効であると考えられる。

(4) これは、2次打抜き時に穴縁に新たに導入される加工硬化層の大きさや硬化の度合いが小さく、結果としてせん断縁の強度(加工硬化層の強度=延性の逆指標)の上昇が抑制されるためであり、従来技術と異なったメカニズムによる改善技術であることがわかった。

参考文献

- 1) 中川威雄ほか：理研報告, Vol. 44, No. 150 (1968)
- 2) 白沢秀則ほか：鉄と鋼, Vol. 71, No. 16 (1985), p.1949.
- 3) 中川威雄ほか：塑性と加工, Vol. 10, No. 104 (1969), p.665.
- 4) 日新製鋼技報, No. 23 (1970. Nov.) p.48.