

(論文)

# 熱延ハイテンにおける打抜穴疲労特性の改善

## Improvement of Fatigue Strength of High-tensile Strength Steel Sheet with a pierced hole



十代田哲夫\*  
Tetsuo Soshiroda



三浦正明\*  
Masaaki Miura



中屋道治\*\*  
Michiharu Nakaya

The effects of piercing and coining on fatigue strength were investigated for 590MPa grade hot rolled high-tensile strength steel sheet. Decreasing the piercing clearance improved the fatigue strength as a result of decreased fracture surface roughness and lowered residual stress. Coining the fringe of a pierced hole improved the fatigue strength because residual stress decreases as the coining load increases. Results showed that coining at larger loads and the use of a coining punch with a smaller nose angle are effective in improving overall fatigue strength.

まえがき = 近年、環境への観点などから自動車の軽量化が推し進められ、足回り部品に対しても高強度薄鋼板適用の検討が進められつつある。プレス成形性に加えて高い疲労強度が要求される足回り部材についても、部位に応じた特性を具備した種々の高強度熱延鋼板が開発され<sup>1)~4)</sup>、実用化されている。

これら足回り部品においては、溶接部、打抜穴、シャ-切断面などにおいて疲労強度の低下が懸念され、特に高強度鋼板を用いた場合には、それら応力集中などによる疲労強度の劣化が問題となることが多い。これまでに、打抜穴を有する部材の疲労強度は母材に比較して劣化すること<sup>5)~7)</sup>、また打抜穴部にコイニング加工を施すことにより、疲労強度の改善が可能であること<sup>5)</sup>などが報告されているが、コイニング条件の影響など、詳細については十分には解明されていない。そこで本報告では、打抜穴部の疲労強度に及ぼす打抜条件・コイニング条件の影響について調査した結果を示す。

### 1. 実験方法

自動車足回り部品に適用される鋼板は、高い伸びフランジ性が要求される場合が多い。そこで今回の実験には、高伸びフランジ型の440、590および780MPa級鋼板を用いた。これら鋼板の機械的性質を表1に示す。全ての供試材は板厚2.9mmである。また、打抜条件、コイニング条件を変えた実験を、590MPa級鋼板を用いて行った。

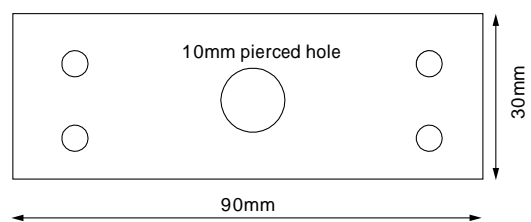
疲労試験用サンプルの形状を図1に示す。打抜き、コイニングの影響を調査するために、試験片中央部に10mmの穿孔を有する形状(a)、および母材の疲労強度を調査するための形状(b)を用いた。疲労試験は応力比  $R = -1$  の平面曲げにて行った。

打抜きは、板厚比5~20%クリアランスの金型にて行った。コイニングは、頂角30°と60°の円錐パンチ、および35mmの球頭パンチを用い、打抜穴のバリ側より荷重1~3tonにて行った。コイニングに用いた金型形状を図2に模式的に示す。

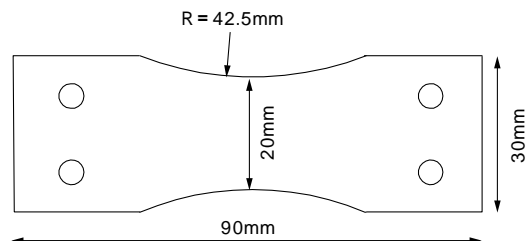
打抜穴周囲の残留応力は、試料表面の穴縁円周方向に

表1 供試材の機械的性質  
Table 1 Mechanical properties of specimens

TS grade	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	(%)
440MPa	330	454	35	62
590MPa	523	597	25	58
780MPa	710	802	18	50



(a) Notched specimen



(b) Smooth specimen

図1 疲労試験片形状  
Fig. 1 Shape of fatigue specimen

\*鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター \*\*鉄鋼部門 薄板商品技術部

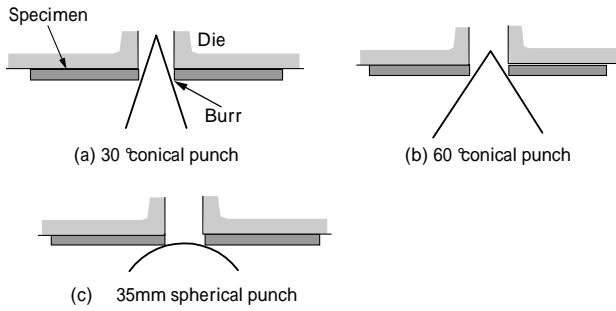


図2 コイニングパンチ形状  
Fig. 2 Schematic illustration of coining punch

沿って歪ゲージを貼付し、歪ゲージを含む微小部位を周囲より切断して拘束を開放することにより生じる変位から換算して求めた。

## 2. 実験結果および考察

### 2.1 疲労強度に及ぼす母材強度の影響

各供試材の母材および打抜穴材の疲労強度と母材引張強度 (TS) との関係を図3に示す。以下、疲労強度は $10^7$  サイクルでの値で議論する。母材、打抜穴材ともに疲労強度はTSに比例して上昇するが、TSに対する依存性が異なり、打抜穴材の疲労強度上昇量は母材に比較して小さい。従って、高強度になるほど打抜穴による疲労強度の劣化が著しいと言える。

### 2.2 疲労強度に及ぼす打抜クリアランスの影響

590MPa 級鋼板について、打抜金型のクリアランスと疲労強度の関係を調査した結果を図4に示す。疲労強度はクリアランスが増加するとともに減少する。

写真1は疲労破面の写真である。クリアランス5~10%の場合、ダレ側が主に疲労破壊の起点となるのに対し、クリアランス20%ではバリ側が主に起点となる。

打抜クリアランスが増加すると破断面の粗度が大きくなり、その結果疲労強度が低下するという報告があるが<sup>7)</sup>、本研究の結果は、クリアランスが小さい場合、せん断面より疲労破壊が発生する傾向にあり、この説明をそのまま適用することはできない。そこで、破断面の粗度 ( $R_{max}$ ) およびダレ側・バリ側の残留応力に及ぼすクリアランスの影響を調査した。結果を図5に示す。破断面の粗度はクリアランスが増加するとともに著しく増大する。残留応力についてもクリアランスの増加とともに増大し、バリ側が圧縮応力であるのに対し、ダレ側はも

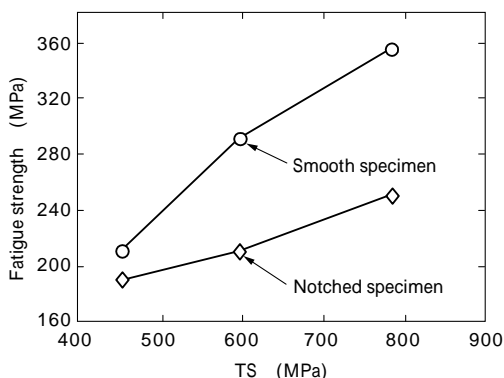


図3 疲労強度と静的強度の関係  
Fig. 3 Relation between fatigue strength and TS

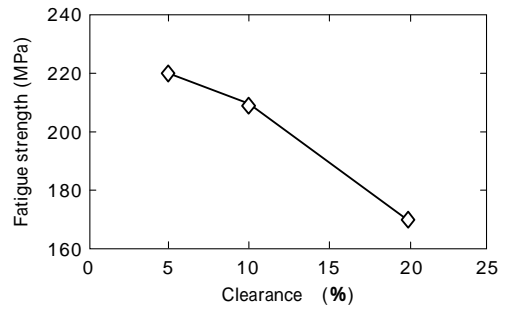


図4 打抜穴疲労強度に及ぼす打抜クリアランスの影響  
Fig. 4 Change in fatigue strength with clearance

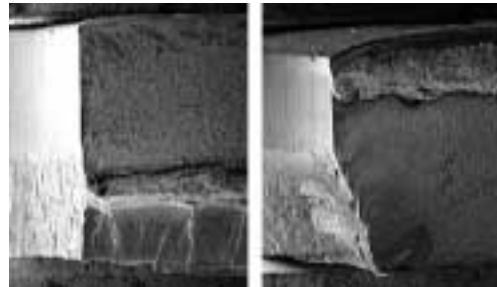


写真1 疲労破面のSEM写真例  
Photo 1 Examples of the fracture appearance

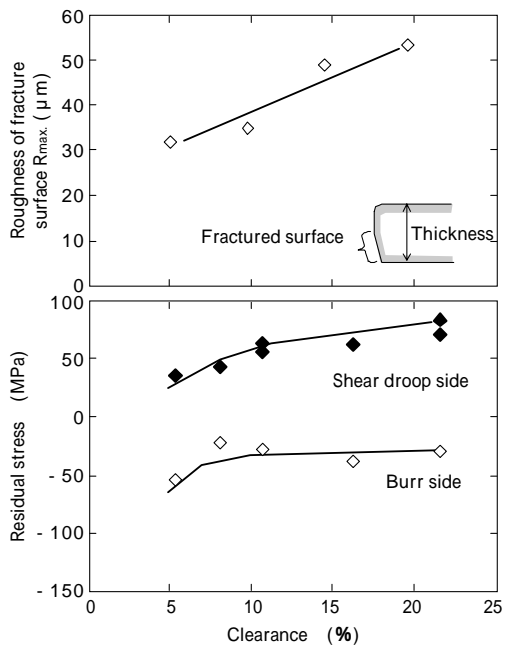


図5 打抜面の粗さと残留応力に及ぼす打抜クリアランスの影響  
Fig. 5 Changes in residual stress and roughness of fractured surfaces with clearance

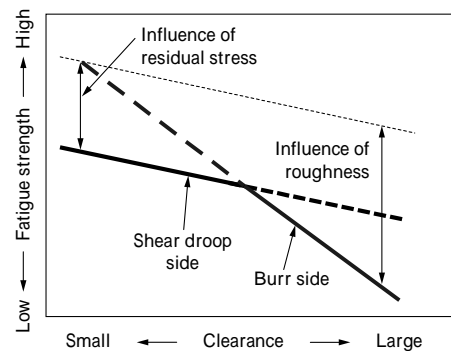


図6 ダレ側とバリ側の疲労強度と打抜クリアランスの関係(模式図)  
Fig. 6 Explanation of changes in fatigue strength of shear droop side and burr side

っぱら引張応力となっている。図6は、クリアランスが変化した場合、これら粗度と残留応力が疲労強度に及ぼす影響について模式的に示したものである。クリアランスが比較的小さい場合は、バリ側、つまり破断面側の残留応力が圧縮となるため疲労破壊の起点がダレ側となる。一方、クリアランスが比較的大きい場合は粗度の影響が顕著となり、バリ側より疲労破壊が開始すると考えられる。

### 2.3 疲労強度に及ぼすコイニングの影響

図7に、打抜クリアランス10%材に対して頂角60°の円錐パンチにてコイニングを行った場合の、コイニング荷重と疲労強度の関係を示す。疲労強度は、コイニング荷重の増加とともに増大する。疲労破面外観を写真2に示す。コイニング荷重の大小にかかわらず、疲労破壊の起点はほぼダレ側であった。一般にコイニングの目的は、疲労強度を劣化させるバリやポイドなどの欠陥を除去することにある。本実験においては、コイニング材の疲労破壊起点はせん断側、つまりコイニング面の反対側であるにもかかわらず疲労強度がコイニング荷重依存性を示すことから、上述の効果以外の要因を考える必要がある。図8にダレ側の残留応力に及ぼすコイニング荷重の影響を示す。残留応力はコイニングの荷重増加とともに減少し、疲労強度の変化と定性的に一致することから、コイニングを行った場合の疲労強度は残留応力に支配される傾向にあると考えられる。

### 2.4 疲労強度に及ぼすコイニング型形状の影響

図9は本研究に用いた3種のコイニング型により、クリアランス10%打抜材を荷重3tonでコイニングした供試材の疲労強度をS-Nカーブで示した図である。疲労強度は全てのコイニング型により改善するが、円錐パンチと球頭パンチでは、その改善効果に差異が見られる。

図10は、各コイニング型について、疲労破壊の起点となるダレ側の残留応力に及ぼすコイニング荷重の影響を示す図である。35mm球頭、60°円錐パンチ、30°円錐パンチと、先端の角度が急峻になるにつれて、同一荷重での残留応力が減少する。

### 2.5 残留応力と疲労強度との関係

図11は、コイニング条件により残留応力が変化した供試材の疲労強度を示した図である。疲労強度と残留応

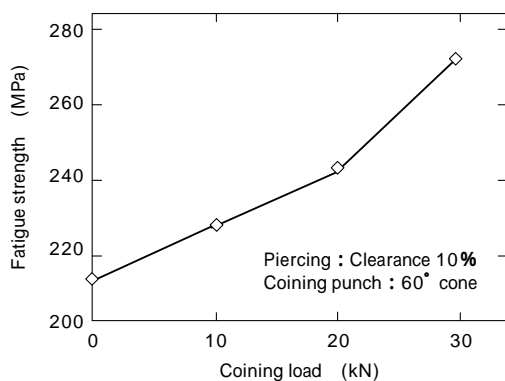


図7 打抜穴疲労強度とコイニング荷重の関係  
Fig. 7 Effect of coining load on fatigue strength

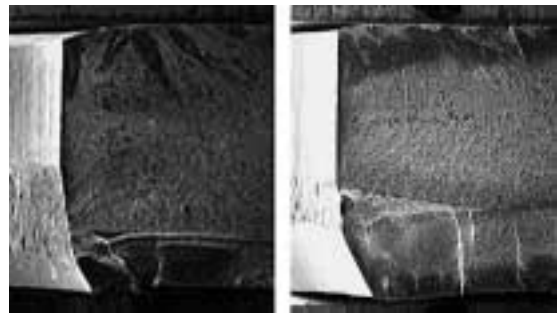


写真2 疲労破面のSEM写真例  
Photo 2 Examples of the fracture appearance

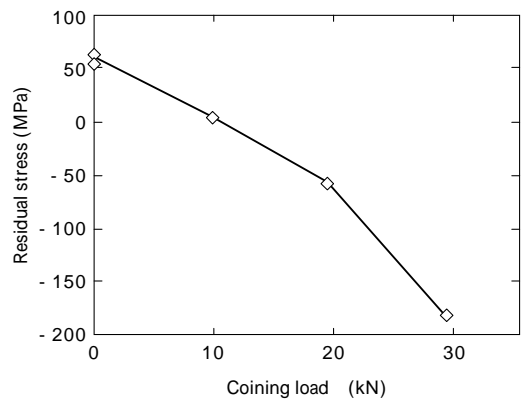


図8 ダレ側残留応力に及ぼすコイニング荷重の影響  
(打抜クリアランス10% コイニングパンチ; 60°コーン型)  
Fig. 8 Changes in residual stress on shear droop side with coining load (Clearance10% Coining punch; 60° cone)

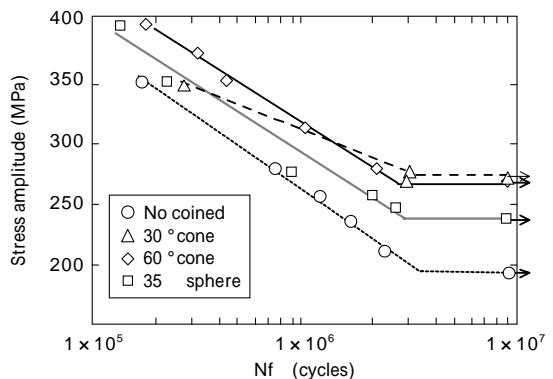


図9 打抜穴試験片の疲労特性に及ぼすコイニングパンチ形状の影響  
Fig. 9 S-N curve of notched specimen coined with different punch shape

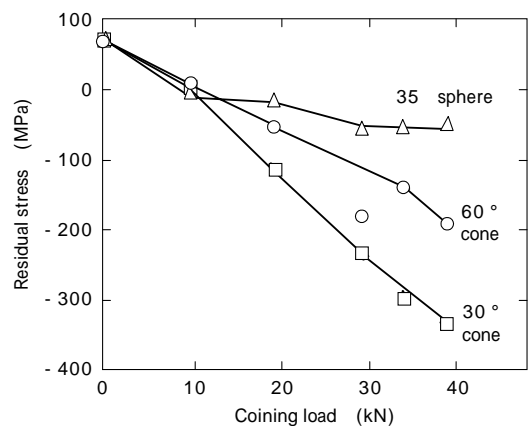


図10 ダレ側残留応力に及ぼすコイニング条件の影響  
Fig.10 Change in residual stress on shear droop side with coining load

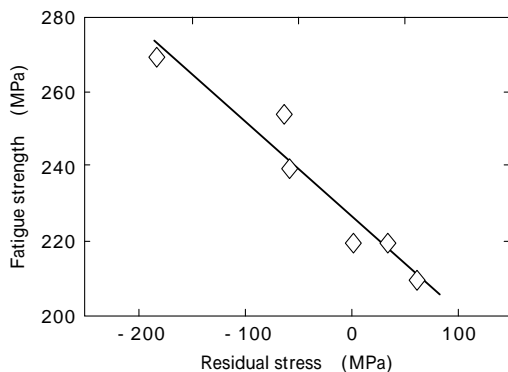


図11 ダレ側残留応力と疲労強度の関係

Fig.11 Relation between fatigue strength and residual stress

力の間には明確な相関関係が見られる。

むすび=打抜穴を有する高強度熱延鋼板について、疲労強度に及ぼす打抜条件およびコイニング条件の影響を調査した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 打抜穴により鋼板の疲労強度は低下し、母材鋼板強度が高くなるにつれてその低下量が增大する。

- 2) 打抜時の金型クリアランスは、破断面の粗度および穴周縁の残留応力に影響を及ぼし、それらの変化を通じて疲労強度に影響を及ぼす。
- 3) 打抜穴縁へのコイニング加工により、疲労強度が改善される。コイニング荷重の増加とともに残留応力が減少し圧縮側となるため、疲労強度が増加する。
- 4) コイニング荷重の増加に加え、コイニング金型先端形状の鋭角化が、より疲労強度改善に効果的である。

#### 参考文献

- 1) H. Hayashi : J. JSTP., 35-404 (1994-9) p.1048.
- 2) 須藤正俊ほか：鉄と鋼，vol.68 (1982) p.1211.
- 3) 河野 治ほか：鉄と鋼，vol.72 (1986) p.s1384.
- 4) I. Tsukatani et al. : ISIJ International, vol.31 (1991) p.992.
- 5) H. Shirasawa : ISIJ International, Vol.34 (1994) No.3, p.285.
- 6) C. S. Shin et al. : Int. J. Fatigue 7, No.2 (1985) p.87.
- 7) 吉武明英ほか：材料とプロセス，Vol.7 (1994) p.749.