

(技術資料)

高延性980MPa級冷延鋼板の成形性

Formability Characteristics of Newly Developed 980MPa Cold-rolled Steel Sheets with High Elongation Properties



中屋道治*
Michiharu Nakaya



向井陽一*
Youichi Mukai

In recent years, 980MPa grade cold-rolled steel sheets have been increasingly applied in automotive parts to improve impact safety performance and to reduce part weight. Kobe steel developed a new 980MPa cold-rolled steel sheet with high elongation properties that has higher stretch-formability and draw-ability characteristics than conventional dual-phase steel sheets. The newly developed steel's excellent formability was achieved by controlling the retained austenite morphology to create a lath-type formation instead of increasing the steel's carbon content.

まえがき = 当社では早くから 980MPa 級冷延鋼板の実用化を進め、バンパリアインフォース、ドアガードパー用としては 1980 年代に製品化を果たしてきた^{1),2)}。しかし近年、車体の軽量化と衝突安全性の両立ニーズはますます高まっており、ピラー類を始めとしたボディ骨格部品、シート部品への採用などその適用範囲は大きく拡大している³⁾。

980MPa 級鋼板部品の実用化に当たっては、寸法精度対策を始めとした加工技術面での進展が重要な役割を担っている⁴⁾ ことはもちろんであるが、成形性、溶接性、耐食性などユーザが抱える課題に対応した種々の高強度鋼板の開発が果たしている役割は大きい^{5),6)}。なかでも、プレスにより加工される自動車用高強度鋼板の場合、高成形性に対するニーズは非常に高い。当社では、例えば、張出し、絞り部品が主体であるボディ骨格部品向けには、それに適した低降伏比高伸び特性を有するタイプ(絞りタイプ³⁾)を提供することでユーザより好評を博してきた。しかし適用部品拡大の観点、部品一体化やプレス工程数削減などのコストダウンの観点から、一層の高成形性が望まれている状況に変化はない。

本稿では、より高い加工性を有する新開発の高延性 980MPa 級冷延ハイテンについて、高延性確保の考え方およびその成形性の評価例を報告する。

1. 高延性確保の考え方

980MPa 級冷延鋼板の多くはフェライト + マルテンサイト組織鋼 (Dual-Phase 鋼: 以下 DP 鋼) である。高延性を確保するためには、フェライト相を最大化し、微細で硬質なマルテンサイトを適量分散させるのが基本的な考え方であるが、現状 DP 鋼は、種々の検討により、伸びの大幅な向上に関しては限界に近い状態に到達していると考えられる。

高延性を発揮するハイテンとして残留オーステナイト

の加工誘起変態を利用した TRIP (transformation induced plasticity) 鋼が開発されている。2 相域焼鈍後の緩冷却によりポリゴナルフェライトの成長を促進、さらにベイナイト変態を経ることで炭素をオーステナイト中に濃縮し、Ms 点を常温以下にすることが製造上のポイントである。このポリゴナルフェライト母相の TRIP 鋼は、590MPa および 780MPa クラスでは実用化されているが、980MPa 級以上での実用化は遅れている。残留オーステナイトを確保したうえで高強度化を達成するためには、炭素の増量が有効である。これまでの研究では、引張強さ 980MPa 級の場合、炭素量 0.20% 以上を中心に検討されており^{7),8)}、スポット溶接性が必須である自動車用鋼板としての実用化阻害要因の一つと考える。

一方、当社では、母相をベイニティックフェライトとし、ラス状の残留オーステナイトを分散させた新しいミクロ組織鋼 (TRIP aided bainitic ferrite 鋼: 以下 TBF 鋼) の開発を進めている。この鋼板は、優れた局部変形能を示す特長を生かし、主に高伸びフランジ型高強度鋼板として検討されている^{9),10)} が、伸びの優位性についての報告は少ない。しかし、この鋼板が含有するラス状の残留オーステナイトは、体積率や炭素濃度が同じブロック状の残留オーステナイトに比べ安定で、変形後期まで TRIP 効果を発揮することが示されており^{11),12)}、炭素量を増加させずに高伸びを発揮させる点で有効と考えられる。そこで、TBF 鋼開発過程において蓄積したオーステナイト形態のコントロール技術を活用し、より低炭素での高延性型 980MPa 級鋼板の開発を検討した。指針として重視したのは、以下の 3 点である。

残留オーステナイトは、伸長した形状とし組織中に微細分散させる。

低成分で 980MPa 級の引張強さを得るため、強度を低下させる粗大ポリゴナルフェライトの生成を避ける。

* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

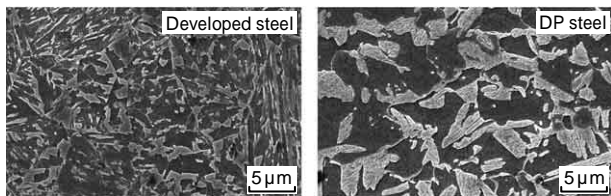


写真 1 開発鋼および DP 鋼の代表的マイクロ組織 (SEM)

Photo 1 Typical SEM microstructure of developed steel and DP steel

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

Type	YS(MPa)	TS(MPa)	El.(%)
Developed steel	689	1,027	21
DP (Drawing type)	644	1,037	17
DP (Bending type)	837	1,001	13
590DP	401	644	25

Thickness : 1.2mm, JIS No.5 specimen

実用的なスポット溶接性を確保可能な炭素量とする。

写真 1 に開発鋼のマイクロ組織写真を DP 鋼と比較して示した。開発鋼は、指針どおり微細フェライト中に微細伸長残留オーステナイトが均一に分散した組織が主体となっていることがわかる。

2. 開発鋼の成形性

開発鋼を対象に、薄板の 4 つの主要な成形様式である張出し、深絞り、伸びフランジ、曲げの各成形性を調べた。比較材には、既存 980MPa 級冷延鋼板の DP 鋼の伸びを重視したタイプ (絞りタイプ)、伸びフランジ性を重視したタイプ (曲げタイプ) および 590MPa 級 DP 鋼を用いた。板厚はいずれも 1.2mm である。

表 1 に供試材の機械的特性値を示す。開発鋼は 590MPa 級には及ばないものの、980MPa 級 DP 鋼に比べ高い伸びを有している。

2.1 張出し成形性

張出し成形性は、球頭パンチによる最大成形高さにて評価した。試験条件を図 1 に示した。最大成形高さは破断発生時の成形高さとした。

図 2 に伸びと成形高さの関係を示す。最大成形高さは伸びに比例して向上しており、高伸びを狙うことで張出し性を向上できることが確認できた。高伸びを有する開発鋼は、DP 鋼に比べ高い張出し成形性を有している。

980MPa 級鋼板の最大成形高さにおけるひずみ分布を図 3 に示した。ひずみは、スクライブドサークル法 (径 1/4 インチ) を用い、頭頂部を通る直線上を測定した。いずれの鋼種においても、ひずみは頭頂付近で最も大きく、立上がり部に向かって減少する傾向を示している。開発鋼は、頭頂部から離れた部分で DP 鋼よりもひずみが大きく、き裂が発生するまでに頭頂部以外での変形も進行していることがわかる。

TBF 組織を有する鋼板は、特に等 2 軸変形領域で高い成形性を発揮することが報告されている¹⁰⁾。開発鋼では、伸長残留オーステナイトの TRIP 効果による加工硬化能が頭頂部におけるひずみの集中を抑制し、変形を促進したものと考えられる。図 3 に示した分布のひずみを合計したものと最大成形高さの関係を図 4 に示した。ひ

Punch : 50mm, $r_p = 25$ mm
Die : 53.4mm, $r_d = 8$ mm
Lubricant : Noxrust 550
Blank holding force : 118kN
Blank size : 140 × 140mm

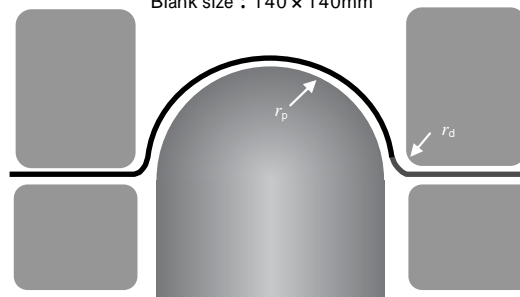


図 1 張出し成形試験条件

Fig. 1 Experimental apparatus for stretch formability

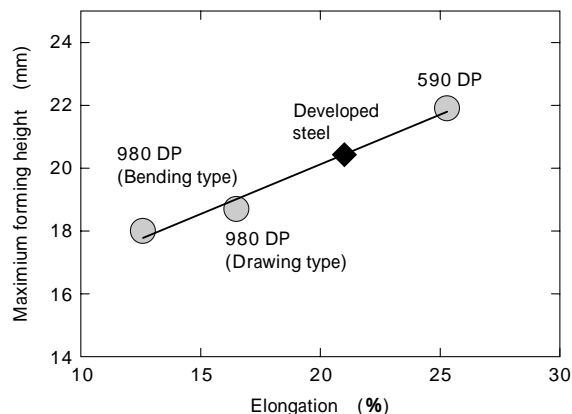


図 2 伸びと最大成形高さの関係

Fig. 2 Relation between elongation and maximum forming height

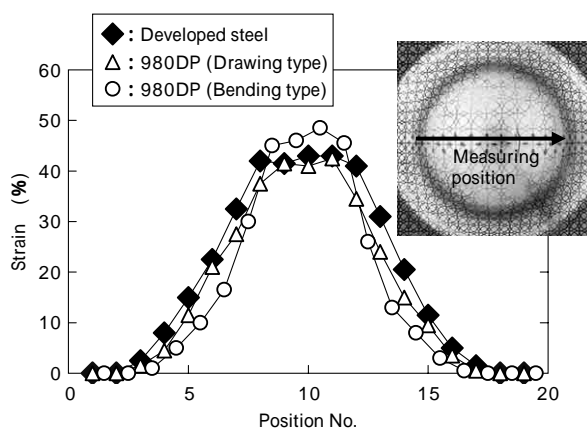


図 3 最大成形高さにおけるひずみ分布

Fig. 3 Strain distribution at maximum forming height

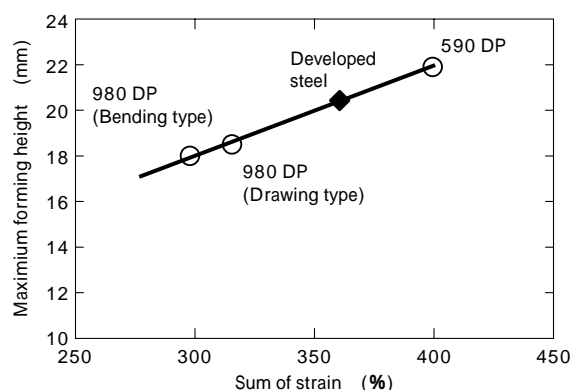


図 4 変形領域のひずみ合計と最大成形高さの関係

Fig. 4 Relation between sum of strain and maximum forming height

Punch : 50mm, $r_p = 8$ mm
 Die : 53.4mm, $r_d = 8$ mm
 Lubricant : Noxrust 550
 Blank holding force : 9.8kN

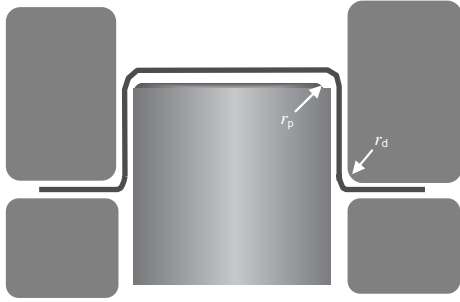


図5 深絞り試験条件

Fig. 5 Experimental apparatus for deep drawing test

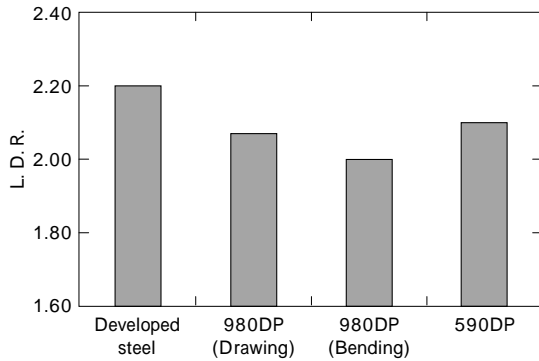


図6 限界絞り比

Fig. 6 Limited drawing ratio of steels

ずみの合計値と最大成形高さは良い相関を示している。

2.2 深絞り成形性

深絞り成形性は、限界絞り比 (limited drawing ratio : L. D. R.) にて評価した。図5に試験条件を示す。

図6に各供試材のL.D.R.を示す。開発鋼は供試材の中でも最も高い値を示しており、深絞り成形性に優れていることがわかる。TRIP鋼は、 r 値0.9程度ながら高い深絞り性を示すことが報告されている⁷⁾。これは、加工誘起変態(マルテンサイト変態)が体積膨張を伴うため、圧縮応力下の縮みフランジ部では変態が抑制されるのに対し、引張応力下のパンチ肩付近では変態が促進されて破断抵抗を増加させるためと考えられている。本開発鋼も、残留オーステナイトの存在が同様の現象を生じさせているものと考えられる。

2.3 伸びフランジ成形性および曲げ成形性

伸びフランジ性は、穴拡げ試験にて評価した。試験条件は、日本鉄鋼連盟規格JFST1001に準じた。開発鋼の伸びフランジ成形性は、DP鋼絞りタイプとほぼ同等の値を示す(図7)。伸びと伸びフランジ性は、高強度鋼板において多くの場合トレードオフとなることが知られている。本開発鋼が、伸びの向上を実現しつつも伸びフランジ性の低下を避けることができたのは、マイクロ組織の微細化が局部変形に対してプラスの影響を与えているためと考えられる。

曲げ成形性は、V曲げ試験(パンチ角度60°)にて曲げ部外側のき裂発生状況により評価した。曲げ方向は圧延と垂直方向である。試験結果を表2に示す。開発鋼は、DP鋼絞りタイプと同等以上の最小曲げ半径を有し

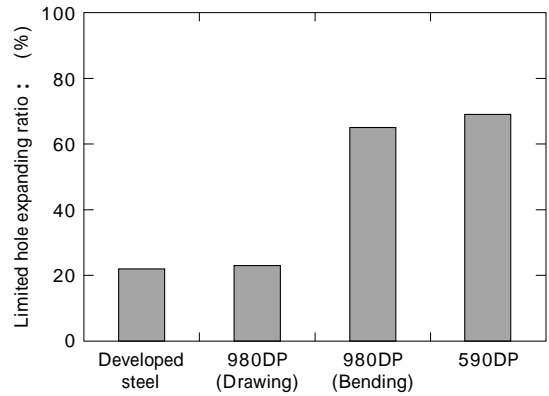


図7 限界穴拡げ率

Fig. 7 Limited hole expanding ratio of steels

表2 曲げ特性
Table 2 Bendability of steels

	60°		
	R = 2mm	R = 1.5mm	R = 1mm
Developed steel			
DP (Drawing type)			
DP (Bending type)			
590DP			

: Good : Hair crack

表3 プレストテスト結果
Table 3 Results of press test

Forming height	10mm	15mm	20mm	25mm	30mm
Developed steel				x	x x
DP (Drawing type)			x x	x x	x x
DP (Bending type)		x x	x x	-	-

: Good x : Fracture

表4 スポット溶接性
Table 4 Spot weldability

	Welding current		Spot welded joint strength		
	4.25 t	Expulsion	TSS (kN)	CTS (kN)	Nugget dia. (mm)
Developed steel	5.5kA	7.5kA	18.3	7.4	5.5
DP (Drawing type)	5.5kA	7.5kA	18.9	7.3	5.6

Electrode : dome type Tip diameter : 6mm
 Electrode force : 3,750N
 Welding time : 12cycle (60Hz)

ており、ボディ骨格部品に要求される曲げ加工性レベルは十分に満足しているものと考えられる。

2.4 複合成形性

実際のプレス部品は、複数の成形様式の組み合わせからなる。開発鋼が狙いとする部品は、張出し、絞り成形を主体にした部品であり、これらが複合している成形部品の例として、写真2に示した形状でプレス成形性評価を行った。工法はドロー成形(しわ押さえ力:BHF=588kN)とし、5mmピッチで成形高さを変えてプレスを行い、割れ危険部位である端部での割れ発生の有無を確認した。表3にプレス結果を、また写真3に成形性の例を示す。開発鋼は、DP鋼に比べ、割れ発生なく成形高さを得ることが可能となっている。

2.5 スポット溶接性

表4に、ナゲット径4.25 tとなる溶接電流、およびチ

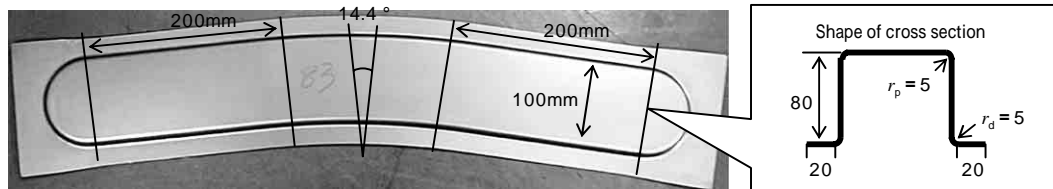


写真2 プレス形状
Photo 2 Shape of test part

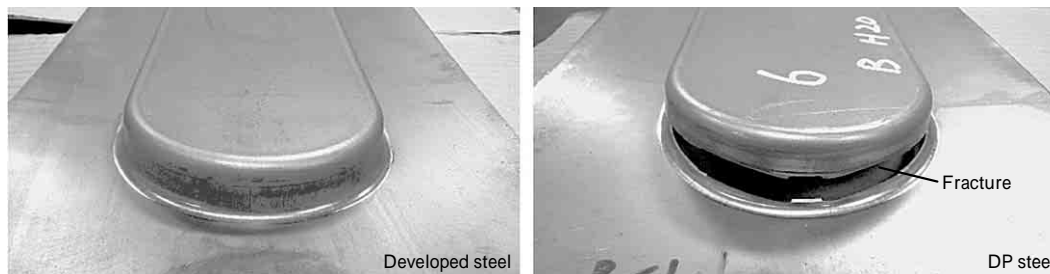


写真3 プレス成形例（成形高さ：20mm）
Photo 3 Examples of press test part (Forming height : 20mm)

り発生時の電流値を示した。この適正溶接電流範囲として、開発鋼は DP 鋼と同等の 2.0kA を確保している。また、表 4 には合わせてこの電流範囲内における引張せん断強度 (TSS), 十字引張強度 (CTS) を示しているが、開発鋼は、DP 鋼と同等の継手強度を示していることがわかる。

むすび = 高延性型 980MPa 級高強度鋼板について、高伸び達成の考え方および基礎的な成形性について紹介した。微細伸長オーステナイトおよび微細フェライトからなる組織は、スポット溶接可能な炭素量での 980MPa 級かつ高延性の実現を可能にした。

成形性は、特に深絞り、張出成形性に優れ、またそれらの成形性が複合している形状でも優れた加工性を有していることが確認できた。

衝突安全性向上と軽量化の両立は今後とも重要な課題であり、当社も多方面から継続して取組みを行っていく

方針である。薄鋼板分野においても、本稿における開発鋼のように、設計自由度向上に貢献できるような成形性余裕度が高い鋼板を提供していくことはもちろんのこと、多様化するユーザの抱える課題に対して材料面からのアプローチを図っていく所存である。

参考文献

- 1) 宮原征行ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.35, No.4(1985) p.92.
- 2) 大宮良信：R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3(2000) p.20.
- 3) 田村享昭ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3(2002) p.6.
- 4) 岩谷二郎：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3(2002) p.23.
- 5) 向井陽一：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3(2002) p.30.
- 6) 野村正裕ほか：鉄と鋼, Vol.92, No.6(2006) p.22.
- 7) 松村 理ほか：鉄と鋼, Vol.77, No.8(1991) p.1312.
- 8) 松村 理ほか：鉄と鋼, Vol.79, No.2(1993) p.209.
- 9) 中屋道治ほか：CAMP-ISIJ Vol.18(2005) p.1484.
- 10) K.Sugimoto et al: ISIJ International, Vol.40(2000) No.9, p.920.
- 11) 橋本俊一ほか：鉄と鋼, Vol.88, No.7(2002) p.400.
- 12) 鹿島高弘ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3(2002) p.19.