

(技術資料)

## 高El. 高 型980MPa級冷延鋼板の特性

Cold-rolled, 980MPa Grade Sheet Steels with Excellent Elongation and Elongation Reduction Value Characteristics



三浦正明\*  
Masaaki Miura



中屋道治\*  
Michiharu Nakaya



向井陽一\*  
Youichi Mukai

In recent years, ultra-high strength sheet steels have been increasingly used in automotive body parts to increase crash worthiness, and simultaneously decrease body weight (resulting in reduced gas emissions and improved environmental protection). In response to these requirements, Kobe Steel has developed several types of 980MPa grade cold-rolled sheet steels. This article describes the features of two kinds of newly developed 980MPa grade cold-rolled sheet steels. They are characterized by excellent formability characteristics with a superior balance between stretchability and stretch flangeability. These newly developed steels also exhibit satisfactory performance including weldability and phosphatability, which are required for practical applications.

まえがき = 自動車の衝突安全基準強化および排出ガス削減のための軽量化を目的として、車体構造部材への高強度鋼板の適用が進んでいる。当社はこれまで、部材形状に応じて加工特性を最適化した複数の980MPa級冷延鋼板を提供することによりユーザからの高い評価を得ているが<sup>1)</sup>、これら超高強度鋼板の使用部位拡大に伴い、さらなる加工性の向上が望まれている。そこで今回、超高強度鋼板において一般的には実現が困難であった延性 (Elongation : El.) と値に代表される伸びフランジ性の高次元での両立方策について2種のアプローチを試み、従来材の特性バランスを上回る980MPa級冷延鋼板を開発した。以下に開発材の組織制御の考え方および主要特性について述べる。

### 1. 超高強度鋼板の高El. 高 化のための組織制御指針

自動車部材用途としての加工性を確保しながら、スポット溶接性や化成処理性などの実用特性に弊害を生じない合金成分設計のもとで980MPa級以上の超高強度鋼板を得るためには、通常、鋼板中にマルテンサイト相を導入することが必要となる。しかしながら、マルテンサイト単相鋼板では、車体部材のプレス成形に必要な延性を確保することが一般的に困難である。そのため、軟質なフェライト相との複合組織化、さらには成形時にマルテンサイト相に変態して歪伝播性を増加させる残留オーステナイト( )相の導入など、延性向上のための組織制御方策が開発されてきた。

#### 1.1 高El. 高 型 DP タイプ鋼板の開発

主としてフェライト相とマルテンサイト相から構成される複合組織鋼板、いわゆる Dual phase (DP) 鋼板の加

工性向上方策について、当社は精力的に検討を行ってきており、水焼入れタイプの連続焼鈍装置を用いてマルテンサイト相の体積率と硬度を独立に制御することにより、El. と のバランスが異なる980MPa級冷延鋼板を製造する技術を確認している<sup>1)-4)</sup>。これらの開発経緯は、主としてマルテンサイト相とフェライト相の硬度差を低減することにより、DP鋼板の弱点であった伸びフランジ性不足を改善する方向に主眼を置くものであった。

ところで、DP鋼板をはじめとする複合組織高強度鋼板の延性または伸びフランジ性改善の代表的手法としては、上述を含めて図1に示す各種方策<sup>5)6)</sup>が知られている。しかしながら、その多くが延性と伸びフランジ性に対して相反する影響を及ぼすため、双方を高次元で両立させることが困難であった。

このような状況において、今回、高延性化のために固溶強化されたフェライト相を相当量確保しつつ、マルテンサイト相の微細化および分散状態を制御することにより、El. バランスを改善することを試みた<sup>7)</sup>。具体的には、従来型 DP鋼板<sup>4)</sup>をベースとして、以下の組織制御技術を適用、開発した。

- 1) C量によるマルテンサイト相体積率の制御
- 2) 固溶強化元素添加によるフェライト相硬度の制御
- 3) 熱延板の組織制御<sup>8)</sup>
- 4) 連続焼鈍工程での各相の体積率制御<sup>1)</sup>

これらの適用により、固溶強化されたフェライト相の体積率を増加させながら連結を抑制し、フェライト粒界に微細に分散したマルテンサイト相を有する鋼板の製造技術を確認した。

開発鋼のミクロ組織の一例を、写真1-a)に示す。比較

\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

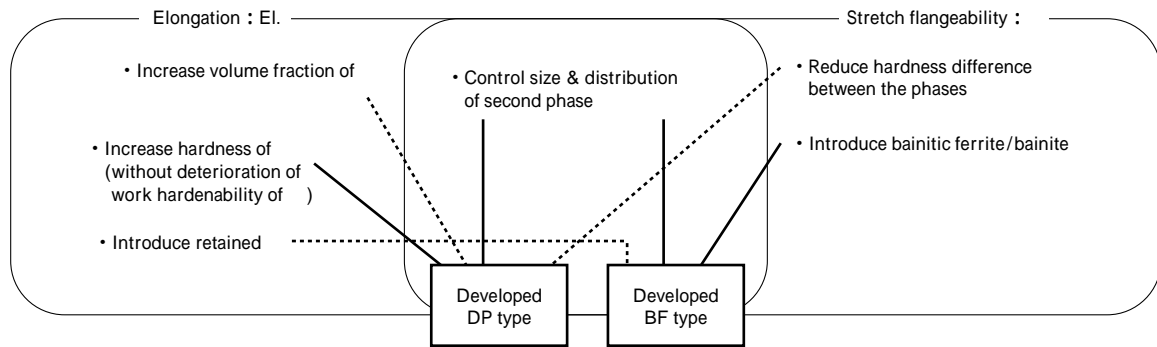


図1 複合組織鋼板の高 El. / 高 化のための組織制御方策

Fig. 1 Metallurgical concepts for improving El. and -value in multi-phase high strength sheet steel

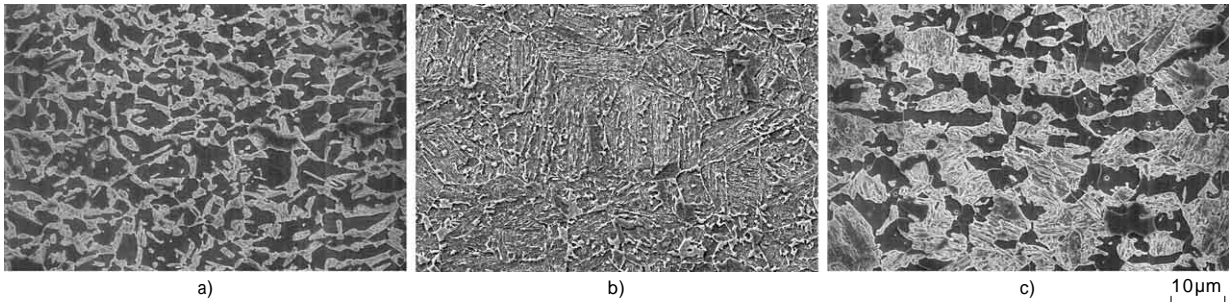


写真1 a) 開発鋼 DP タイプ, b) 開発鋼 BF タイプおよび c) 従来鋼の代表的組織写真

Photo 1 Microstructure of a) DP type developed steel, b) BF type developed steel, c) conventional steel (DP-bending type)

表 1 980MPa 級冷延鋼板の代表成分と機械的性質

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of 980MPa grade cold rolled sheet steels

( $t$ : 1.2mm)

			C (mass%)	Si (mass%)	Mn (mass%)	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	(%)
a)	Developed steel	DP type	0.09	1.3	2.0	760	1,010	15	60
b)		BF type	0.16	1.3	2.2	770	1,020	15	60
c)	Conventional steel	Bending type	0.16	1.3	2.0	770	1,010	12	65
d)		Moderate type	0.16	1.3	2.0	690	1,030	14	40
e)		Drawing type	0.16	1.3	2.0	610	1,010	17	25

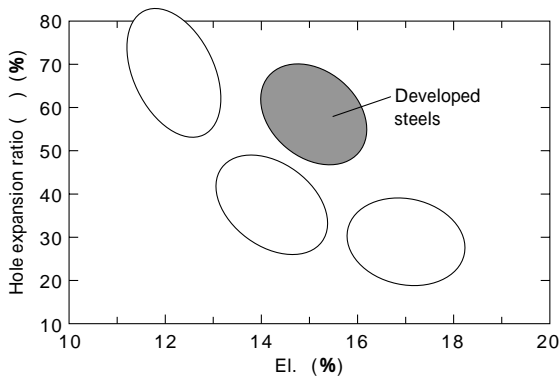


図2 980MPa 級冷延鋼板の El. - 値バランス

Fig. 2 Elongation and -value of 980MPa grade cold rolled sheet steels

として、写真 1-c) に従来型 DP 鋼板のミクロ組織を示すが、開発材の組織はマルテンサイト相が微細であり、またフェライト相の体積率は従来材の約 40% から約 60% へと増加しているにもかかわらず、連続して存在するフェライト粒が減少する傾向にある。このような組織形態、すなわち、フェライト相の周囲に比較的連結したマルテンサイト相が存在する状態においては、変形中のフェライトの内部応力が増加して変形後期まで高加工硬化率を保持することにより、El. が改善されると考えられる<sup>9)</sup>。また、伸びフランジ成形時にマルテンサイト相と

フェライト相の界面に生ずるき裂の進展が抑制されることにより、も改善されると推測される。

開発鋼の代表成分と板厚 1.2mm 材の機械的性質を表 1-a) に示す。比較材として従来型 DP 鋼板の曲げタイプ、中間タイプ、絞りタイプ<sup>3)4)</sup>の代表成分と機械的性質を同表 c) e) に、また、これら鋼種の El. - バランスを図 2 に示す。開発鋼は従来型 DP 鋼板に比較して優れた El. - バランス特性を有しており、El. 14%、50% を安定して確保することが可能である。

## 1.2 高 El. 高 型 BF タイプ鋼板の開発

残留 を含有する鋼板においては、加工時の変態誘起塑性 (Transformation Induced Plasticity: TRIP) 効果により高延性を得ることが可能であるが、DP 鋼板と同様に伸びフランジ性に劣ることが弱点であった<sup>6),10)</sup>。一方、当社では、伸びフランジ性に優れた高強度鋼板の組織として、ベイニティックフェライト (Bainitic Ferrite: BF) の有効性に早くから着目しており<sup>11)</sup>、これらの利点を兼ね備えた超高強度鋼板として、BF を母相とし、ラス間に微細な残留 を含有する TRIP 型 BF (TBF) 鋼板を開発した<sup>12)</sup>。

今回、これらの知見に基づき、1) 連続焼鈍過程におけるオーステナイト域からの高速冷却による BF 組織制御技術、および、2) 合金元素添加量とオーステンバ温度に

よる残留 の体積率 / 形態制御技術, を開発することにより, 高EI. 高型BF鋼板の製造技術を確立した。開発鋼のマイクロ組織を写真1-b)に示す。サブミクロンサイズのラス組織からなるBFを母相としており, また, ラス間にはフィルム状の残留 を含有することを透過型電子顕微鏡観察により確認している。

開発鋼の代表成分と機械的性質を表1-b)に示す。EI. - バランスとしては, 図2に示したDPタイプ同様に従来材の特性を上回り, EI. 14%, 50%を安定して確保することが可能である。

## 2. 開発鋼板の実用特性

### 2.1 成形性

薄鋼板のプレス成形は, 伸びフランジ, 曲げ, 張出し, 深絞り の4モードに大別される。伸びフランジ性の指標である値については前章にて詳述したので, 以下, 開発材の曲げ性, 張出し性, 深絞り性の調査結果を記す。

曲げ性は, 図3に示す金型に30×100mm(板厚1.2mm)の試料を配置し, 先端Rが0~2.5mmの90°パンチを圧下した際, 試料にクラックを生じない最小半径を指標とした。曲げ方向は, 圧延方向に対して垂直であり, 比較材として, 従来型DP鋼板の中間タイプと曲げタイプ(表1)を用いた。結果を図4に示す。開発鋼DP

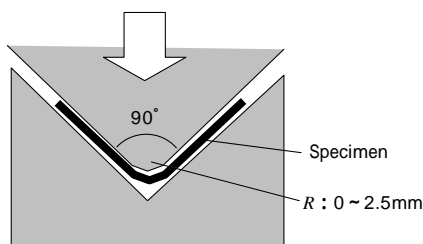


図3 曲げ性試験金型

Fig. 3 Schematic illustration of bendability measurement apparatus

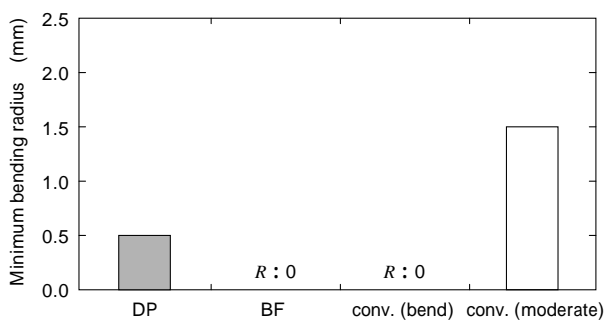


図4 980MPa 級冷延鋼板の曲げ性

Fig. 4 Bendability of 980MPa grade cold rolled sheet steels

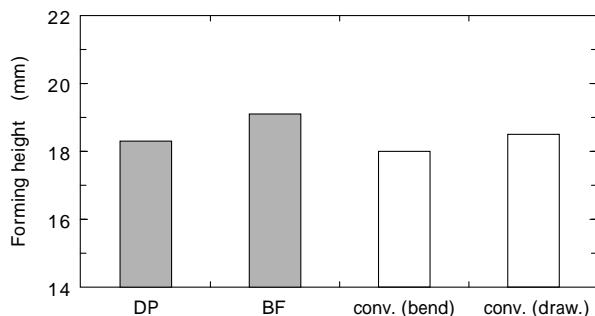


図5 980MPa 級冷延鋼板の張出し性

Fig. 5 Stretch formability of 980MPa grade cold rolled sheet steels

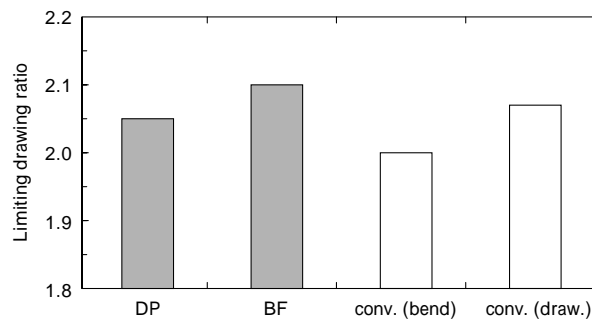


図6 980MPa 級冷延鋼板の深絞り性

Fig. 6 Deep drawability of 980MPa grade cold rolled sheet steels

タイプの最小曲げ半径は従来型DP鋼板中間タイプを大きく上回り, 0.5mmである。またBFタイプはR0曲げにおいてもクラックを生じず, 従来型DP鋼板曲げタイプに比肩する良好な曲げ性を有している。DP鋼板の曲げ性優劣はおおむね値の序列と相関を有し, これは, 鋼板の曲げ性と伸びフランジ性が, とともに局部延性と相関を持つ<sup>3),33)</sup>ことと符合する。一方, 開発鋼BFタイプはほぼ同等の値を有するDP鋼板に対して優れた曲げ性を有しており, これは母相と第2相の分布が非常に微細であることに起因していると考えられる<sup>14)</sup>。

張出し性については, 140×140mmの試験片をしわ押え圧118kNにて保持し, ダイ径53.4mm, パンチ径50.0mmの球頭(R:25mm)金型を用いて成形した際の破断限界高さにて評価した。比較例として用いた従来型DP鋼板の曲げタイプ, 絞りタイプの結果とともに図5に示す。開発鋼DPタイプは比較材として用いた従来型DP鋼板の中間タイプを上回り, 絞りタイプに匹敵する成形高さの確保が可能であり, またBFタイプは従来型絞りタイプより良好な張出し性を有する。BFタイプのEI.値は従来型絞りタイプより小さいにもかかわらず良好な張出し性を有するのは, 残留の加工誘起塑性により, 等二軸変形過程での加工硬化率が増加し, ひずみ分散性に優れていることに起因すると考えられる<sup>14)</sup>。

深絞り性については, ダイ径53.4mm, パンチ径50.0mmの円筒(肩R:8mm)金型を用いて, しわ押え圧9.8kNにて80~140mm材を成形し, 限界絞り比を調査した。試験結果を図6に示す。開発鋼DPタイプは比較材として用いた従来型DP鋼板の曲げタイプと絞りタイプの中間的特性を有し, またBFタイプは従来型絞りタイプより良好な深絞り性を有する。BFタイプについては, 残留の加工誘起変態挙動が変形モードに応じて異なるため, パンチ肩部の加工硬化量に対して縮みフランジ成型荷重が相対的に低下することにより, 優れた深絞り性を有すると考えられる。

### 2.2 スポット溶接性

開発鋼のスポット溶接性については, 表2に示す基本条件にて電流値を5~17kAの範囲で溶接した継手の強度を調査することにより評価した。せん断引張強度および十字引張強度測定結果を図7に示す。せん断引張強度は, DPタイプ, BFタイプともに, ナゲット径4.7mmでのJIS-A級規定荷重:8.78kNを充分満足し, またチリ発生までの適正溶接電流範囲も2.5kA以上の確保が可能

表2 スポット溶接条件  
Table 2 Spot welding conditions

Electrode tip	Dome type Cu-Cr, tip diameter : 6mm
Electrode force	4,000N
Welding time	16cycles (60Hz)
Welding current	5-17kA

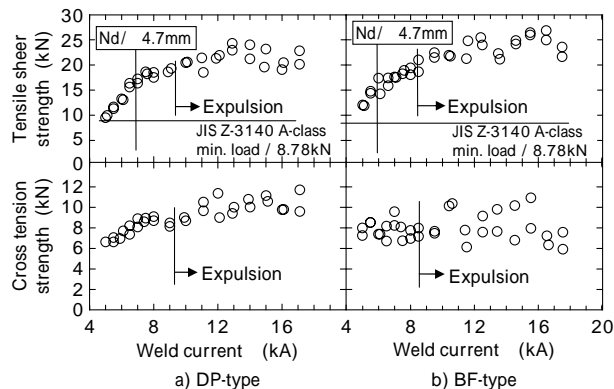


図7 スポット溶接せん断 / 十字引張強度と溶接電流の関係  
Fig. 7 Relation between tensile-shear/cross-tension strength and welding current

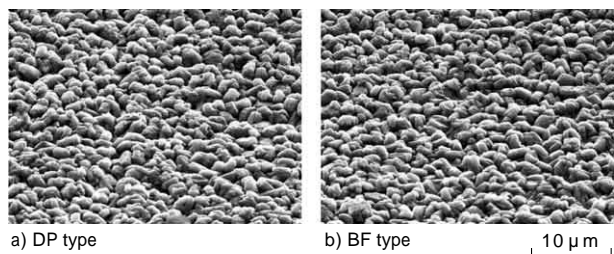


写真2 開発鋼のリン酸塩結晶皮膜

Photo 2 Micrograph of phosphate crystal on developed steels

である。十字引張強度についても、適正溶接電流範囲内での延性比（せん断引張強度に対する割合）がDPタイプで0.45以上、BFタイプで0.40以上と良好な値となっている。一般に、残留Cを含有する鋼板においては、比較的多量のC添加による溶接強度低下が懸念されるが、本開発鋼については、C量の適正化に加えてSiによる継手強度改善効果<sup>15)</sup>を活用することにより、良好な溶接性を確保している。

### 2.3 化成処理性

化成処理性の一例として、市販の処理液（日本パーカ

ライジング(株製：バルボンド L3020)を用いて浸漬により生成した鋼板表面のリン酸塩皮膜を写真2に示す。DPタイプ、BFタイプともにスケは認められず、また結晶粒サイズ、形態も良好である。機械的性質およびスポット溶接性改善効果を有するSiについては、一般に添加量の増加に伴って化成処理性が劣化する傾向にある。当社では表面酸化皮膜の構造解析<sup>16)</sup>を含め、これまでの永年にわたる検討により、高Si鋼の実用特性ならびに製造技術に関する課題を克服してきている<sup>1)</sup>。

むすび=新たに開発した高EI.高型DPタイプ、BFタイプの980MPa級冷延鋼板の特性について述べた。これらのEI.値はほぼ同等であるが、厳しい絞り、張出し成形が必要となる部材に対してはBFタイプが、また製造条件の変動などに対する溶接強度の安定性が求められる場合にはDPタイプが適している。

自動車車体に関しては、今後とも高強度鋼板の適用部位が拡大する傾向にあると考えられる。当社では、本稿にて紹介した高EI.高型980MPa級冷延鋼板をはじめとして、これまでに蓄積した技術に基づき、さらなる加工性、実用特性の向上に取組み、車体軽量化と衝突安全性向上に寄与してゆく所存である。

### 参考文献

- 1) 大宮良信：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50，No.3（2000）p.20.
- 2) 宮原征行ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.35，No.4（1985）p.92.
- 3) 田中福輝ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.42，No.1（1992）p.20.
- 4) 田村享昭ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52，No.3（2002）p.6.
- 5) 友田陽ほか：鉄と鋼，Vol.68，No.9（1982）p.1147.
- 6) 横井浩一：鉄鋼の高強度化と信頼性向上，日本鉄鋼協会，（1997）.
- 7) 向井陽一：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55，No.2（2005）p.30.
- 8) 白沢秀則：鉄と鋼，Vol.73，No.5（1987）p.512.
- 9) 杉本公一ほか：鉄と鋼，Vol.71（1985）p.994.
- 10) 白沢秀則ほか：鉄と鋼，Vol.74，No.2（1988）p.326.
- 11) 鹿島高弘ほか：CAMP-ISIJ，Vol.6（1993）p.1696.
- 12) K. Sugimoto et al：ISIJ-Int.，Vol.40，No.9（2000）p.920.
- 13) 岩谷二郎ほか：塑性と加工，Vol.35，No.404（1994）p.1122.
- 14) 中屋道治ほか：CAMP-ISIJ，Vol.18（2005）p.1484.
- 15) 田中福輝ほか：鉄と鋼，Vol.68，No.9（1982）p.1411.
- 16) 野村正裕ほか：鉄と鋼，Vol.92，No.6（2006）p.378.