

(解説)

自動車用高強度鋼板の開発と今後の動向

大宮良信

鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター

Developments and Trends related to High-strength Steel Sheet for Automotive Use

Yoshinobu Omiya

In 1984, Kobe Steel developed and began selling highly ductile 980MPa grade cold rolled steel characterized by a transformed microstructure. Recently, by applying the knowledge and technology obtained by producing this steel advanced high-strength steels - such as Dual-phase hot dip galvanized steel; hot and cold rolled steel including retained austenite; and excellent stretch flangeability hot rolled steel - have been developed. Over the past few years and increasingly now, the demand for such steels has risen dramatically in the auto industry to reduce car body weight .

まえがき = 自動車車体の軽量化は、1970 年代のオイルショックから CAFE 規制法案、そして最近では二酸化炭素排出量削減規制を契機として、主に燃費改善の目的でその取組みが強化されてきた。材料面では、これまでに車体軽量化のためアルミニウムやプラスチックなどの鉄代替素材の検討もなされてきた。しかし、コストや生産技術上の課題が壁となり適用は一部の車種、部品に止まっている。したがって量産車種においては、依然、鉄が主流で、わけても高強度鋼板（以下ハイテンと称す）の採用による部品の薄肉化を中心に検討が進められている。

さらに近年、衝突時キャビンの変形を防ぎ、乗員の安全を確保する必要から部品強度を高めるためにもハイテンの適用は拡大傾向にあり、その実用化が急務となっている。当社は 1970 年代後半に薄板に進出して以来、常にこの自動車用ハイテンの技術開発に注力しており、とくに近年は引張強度が 590MPa 以上の組織強化型ハイテンの実用化において、ユーザから高い評価をいただいている。以下にここに至るまでの技術開発の歴史と今後の展望について概説する。

1. 高延性 980MPa 級複合組織冷延鋼板の開発

当社の組織強化型ハイテンの基礎を築き、この分野での当社の技術力評価を高めたのが「100 キロハイテン」と呼ばれる高延性 980MPa 級複合組織冷延鋼板である¹⁾²⁾。開発に着手した 1984 年当時、980MPa 級冷延鋼板は伸び 10% 強程度で軽加工用途が一般的であった。そうしたなかで自動車メーカーの要請により、輸出車のドアガードバー用として複雑なプレス加工に耐えうる 20% の伸びを有する 980MPa 級鋼板の開発に着手した。ドアガードバーは、車体側面への衝突から乗員を保護するために写真 1 に示すようにドア内部に装着されている補強部品である。当時は第 1 図に示すように中央のビード部にみに曲げ加工した 980MPa 級鋼板を適用し、両端のブラケット部と分割して成形した後、溶接によって一体化していた。これを一体成形することによって、剛性向上と軽量化の両立を図るいっぽうで、そのために

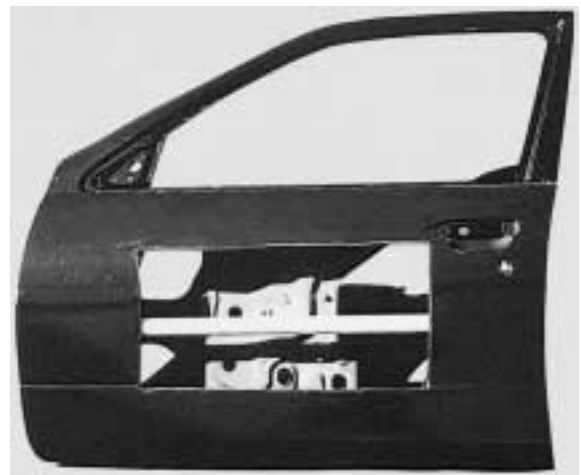
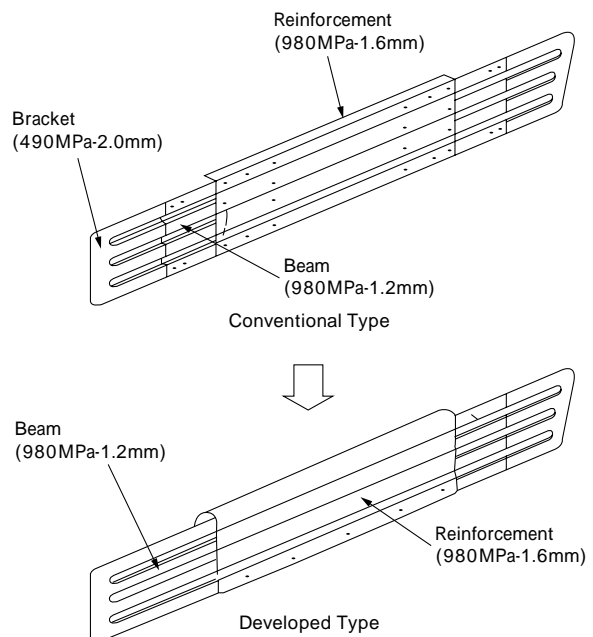


写真 1 ドア用補強部材（焼入れパイプ）
Photo 1 Door impact beam (quenched pipe)



第 1 図 ドアガードバー模式図
Fig. 1 Schematic illustration of door guard bar

より厳しくなる加工形状に耐えられる 980MPa 級鋼板の開発が必要とされた。

鋼の強化法としては、固溶強化、析出強化などの手法が一般的に知られているが、自動車用薄鋼板としては、強度だけでなく加工性をも兼ねさせる必要があり、引張強度が590MPaを超える場合にはこれらの強化法では十分な加工性が確保できない。そこでマルテンサイトやベイナイトなどの低温変態生成物による組織強化を活用し、軟質なフェライト相中に硬質なマルテンサイト相を微細分散させ、強度と加工性を両立させたデュアルフェイズ鋼と呼ばれる組織制御鋼が開発されてきた。

しかし引張強度980MPaで伸び20%という目標を達成するためには、デュアルフェイズ鋼の組織制御の最適解を求めることとそれを達成する合金設計とプロセス条件を明らかにすることが最大の課題であった。この解決に向け1983年から開発に着手し、実に1年近くを要して組織制御に加えて、当時添加が一般的ではなかったSiの固溶強化を併用することで商品化を果たした³⁾⁴⁾。この開発期間こそは当社にとって現在でも活用している組織強化鋼板の生産技術を十分に蓄積できたという点で意義のあるものであった。具体的には、従来にない高合金系高強度鋼の製造法として、

高Si含有鋼の連続鋳造スラブに生じやすい割れの防止技術の開発

高Si含有鋼に特有の粒界酸化防止技術の確立

高強度鋼板の形状、寸法精度向上技術の開発

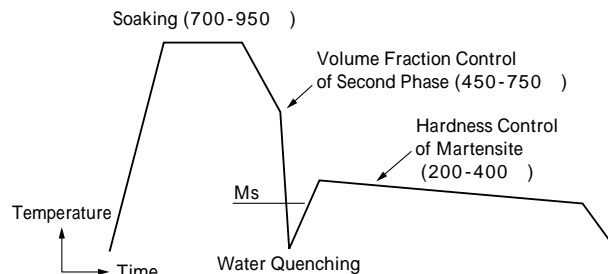
焼鈍条件への材料試験情報の迅速フィードバック体制の構築

などである。これらの技術とその開発過程で蓄積されたノウハウによって、その後のハイテンの開発を大きく前進させることが可能となった。

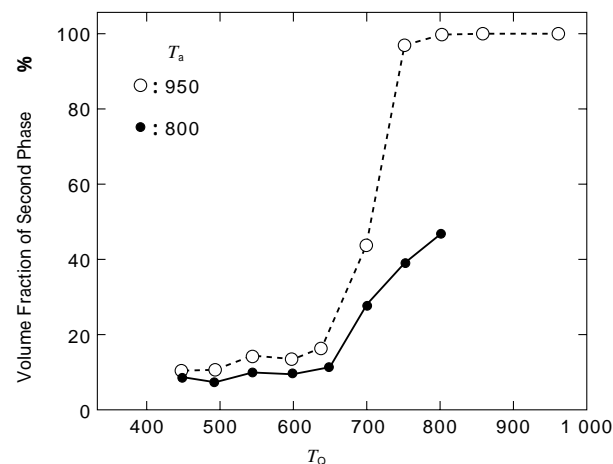
ここで高延性980MPa級冷延鋼板の開発において重要な役割を果たした連続焼鈍ライン(Continuous Annealing Line: CAL)について触れてみたい。

自動車用鋼板製造を目的に世界最大級の製造可能板幅を有するラインとして1982年に稼動した当社のCALは多くの品種、すなわち一般軟鋼板(270MPa級)から超ハイテン(980MPa級)までを単一のラインで合理的に製造する⁵⁾との基本的な考え方にに基づき、冷却方式として世界で初めてのロール冷却設備と水焼入れ設備を採用した⁶⁾。この水焼入れ設備こそ組織強化鋼板の省合金、低コストでの製造を可能にする設備であり、その機能を最大限活用することで高延性980MPa級鋼板の商品化を果たすことができたのである。その熱サイクルの考え方は第2図に示すとおりであり、温度条件によりデュアルフェイズ鋼の特性に大きく影響する硬質な第2相の体積率(第3図¹⁾)と硬さを自在に制御することができる。この設備機能と前掲の技術によって理想的な組織制御を実現し、高延性980MPa級冷延鋼板の量産化が可能となり、後述する用途に応じた材質の造り込み技術が確立された。

実現された高延性980MPa級冷延鋼板は、プレストライにおいても結果を残し、高い評価をえた。しかし一般に実用化に際しては材料特性だけでなく、加工方法も重要な因子である。ハイテン材をプレスする際に、強度



第2図 CAL熱サイクル
Fig. 2 Schematic thermal cycle of CAL



第3図 第2相体積率に及ぼす均熱温度(T_a)と水焼入れ温度(T_Q)の影響

Fig. 3 Effects of soaking (T_a) and water quenching (T_Q) temperatures on volume fraction of second phase



写真2 ドアガードバー成形品
Photo 2 Application to door guard bar

が高いため低下する加工性をどのように加工法で補うかだけでなく、残留応力に起因して成形品に生ずるねじれやスプリングバックといった寸法精度の悪化要因をどのように解決するかも含めて考えなければならない。当社はプレストライ当初からユーザと一体となったプレス技術の共同研究をおこなって、上記の課題を克服できる加工手法を技術確立し、それを金型の設計にも反映してきた^{7)~9)}。こうした活動を通じてハイテン適用部品の安定製造と拡大を可能にしてきたのである。写真2はフランジ部にビードを付与し、ねじれを改善した成形品の一例である。

いっぽう、高延性980MPa級冷延鋼板の適用はドアガードバーに止まらず、その後バンパーラインフォースメントなど他の部品への横展開が検討された。ここに至

り、加工技術だけでなく材料特性面からも加工形状に応じて組織の造り分けをおこなう必要が生じてきた。たとえば、強度 980MPa で伸び 20% の材料は張出し成形や絞り成形には適するが、典型的なデュアルフェイズ鋼であるため歪みが局所的に集中すると軟質なフェライトと硬質なマルテンサイト相の界面でポイドが生成しやすく、曲げ加工や伸びフランジ成形には不向きである。

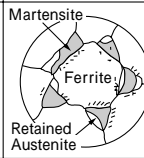
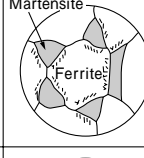
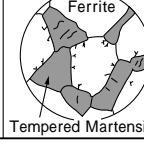
この課題に対し前述したように当社は CAL の熱サイクルを活用し、第 2 相の体積率を増すとともにマルテンサイトを焼戻して軟質化することにより、同一強度で伸びは高くないが曲げ加工性に優れた材料の開発、および伸びと伸びフランジ性を両立させた材料の開発に成功した^{10)~12)}。第 4 図に各加工法に適した組織の模式図と加工性を示す。こうしたユーザの要望に合った 980MPa 級鋼板の造り分けによって、部品形状に適した材料の提案と加工技術支援が可能となった。

高延性 980MPa 級冷延鋼板は 1980 年代半ばから現在に至るまで安定して高い生産量を維持しつづけている。まさに代表的な「神戸製鋼のハイテン」であり、それは性能、品質、ユーザの評価のみならず、上述したように品質設計、生産技術、利用技術など当社のハイテンに関する技術ポテンシャルの向上にその開発活動が貢献した点で大きな価値があった。当社のハイテンは、ここに基礎を置き開発されてきた。次章では最近開発された組織制御型ハイテンについて紹介する。

2. 最近の組織強化型ハイテンの開発状況

環境保護、衝突安全重視の市場ニーズもあり、1990 年代半ばから車体はより軽く、衝撃に対しより安全な構造が望まれ、キャビンまわりの主要な骨格部材に 590MPa 以上のハイテンの適用が検討され始めている。こうした動きに対応し近年、種々のハイテンの開発に成功している。

まず、デュアルフェイズ組織の高延性 590~780MPa 級合金化溶融亜鉛めっき鋼板を紹介する。本鋼板は第 1 表に示すように優れた延性を有していることに加え、ボディ用素材として必要な特性である良好なスポット溶接性とめっき性を確保している点が特徴である¹³⁾。これには製造ラインとして前述の CAL と同様に温度管理・制御能力に優れ、かつ強冷却設備を有する No.2 合金化溶融亜鉛めっきラインの機能を活用し、高延性 980MPa

Forming Mode	Schematic Microstructure	Elongation	Stretch Flangeability
Drawing		◎	△
Drawing + Bending		○	○
Bending		△	◎

第 4 図 組織と加工性の関係

Fig. 4 Relation between schematic microstructures and formabilities
◎: Excellent ○: Good △: Poor

級冷延鋼板と同様に加工性の観点から理想的な組織制御を省合金設計で達成できたことが大きく寄与している。その結果としてスポット溶接部の破断形態に影響する C や Mn¹⁴⁾、めっき性を阻害するとされる Si、Cr¹⁵⁾などの酸化物形成元素の添加量を最小限に抑えることができています。現在、本材料は自動車メーカで高い評価を受けて 1999 年から量産段階に入っている。

残留オーステナイト鋼は 1990 年代から適用が始まり、当社も 590MPa 級熱延鋼板を中心に量産している。一般に残留オーステナイト組織の変態誘起塑性(Transformation Induced Plasticity)によって優れた延性が確保できるが、適用部品にパーリング加工が多いことを考慮して、フェライト、ベイナイトを含む 3 相の体積分率を適正に制御することによって高い伸びフランジ性をも獲得している。第 2 表に機械的特性の一例を示す。

足廻り部材用に開発した高伸びフランジ型 780MPa 級熱延鋼板は、局所的な歪み集中部位でのポイドの生成を抑制するため、鋼中介在物を可能な限り低減するとともに、強度の高いフェライト(ベイニティックフェライト)単層組織としたことが特徴で^{16),17)}、第 3 表に示すとおり優れた伸びフランジ性を有した商品となっている¹⁸⁾。

いっぽう、ドアガードバー用としては、1990 年代に

第 1 表 590, 780MPa 級合金化溶融亜鉛めっき鋼板の機械的特性

Table 1 Mechanical properties of 590, 780 MPa grade hot dip galvanized steel

Steel	TS grade	YP MPa	TS MPa	EI. %	YR
Developed Steel	780MPa	440	800	23	0.55
	590MPa	350	600	32	0.58
Conventional Steel	590MPa	420	600	25	0.70

JIS NO.5 Specimen, Thickness : 1.4mm

第 2 表 590MPa 級残留オーステナイト熱・冷延鋼板の機械的特性

Table 2 Mechanical properties of 590MPa grade hot and cold rolled steel including retained austenite

Steel		YP MPa	TS MPa	EI. %	λ-value %	Thickness mm
Hot Rolled	Developed Steel	470	610	35	90	2.3
	Conventional Steel	530	610	24	60	
Cold Rolled	Developed Steel	390	600	37	60	1.4
	Conventional Steel	420	600	25	60	

JIS NO.5 Specimen, λ-value : Hole Expansion Ratio

第3表 780MPa級高伸びフランジ性熱延鋼板の機械的特性

Table 3 Mechanical properties of 780 MPa grade excellent stretch flangeability hot rolled steel

Steel	YP MPa	TS MPa	El. %	λ -value %	Thickness mm
Developed Steel	720	810	20	80	2.3
Conventional Steel	730	810	20	60	

JIS NO.5 Specimen, λ -value : Hole Expansion Ratio

入り、さらなる高強度化が指向され、素材強度として1180~1470MPa級冷延鋼板が要望された。この強度クラスでは加工後の残留応力による遅れ破壊を考慮する必要があるが、当社では第5図¹⁹⁾に示すように母材を低炭素量とすることで問題を解決し、耐遅れ破壊特性を高めた1470MPa級までの超ハイテン材をメニュー化している。

3. 今後の開発動向

ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) の影響もあり、車体の軽量化ニーズは従来に増して強く、ハイテンの適用拡大は今後とも検討が進むと考えられる。ハイドロフォームやテラードブランクなどの新しい加工技術に適した材料の開発に加え、組織制御の活用による高加工性の追求、耐衝撃特性などの新機能や独自性の付与が今後の材料開発では必要である。

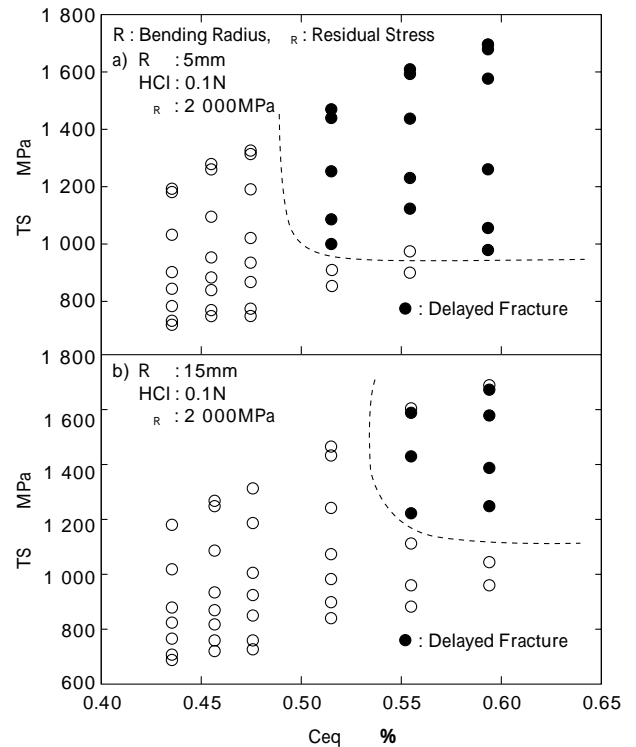
また、自動車業界自体が提携、再編を経てグローバル化するなかで、素材メーカーとしてもハイテンの供給を同じ視野で考えるべきであろう。すでに当社は上述の高延性590~780MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板を含め、米USXとの合併会社であるPRO-TEC COATING社へハイテン製造技術を供与し、日米で同じ材料の供給を可能にしつつある。このためには、日本と欧米の規格体系の違いは考慮しつつ、双方で評価される材料開発を指向する必要がある。

いっぽう、ハイテンをより使いやすい材料とするためにはまだ多くの課題が残っており、加工方法や溶接方法など利用技術面での開発をさらに積極的に推進していかなければならない。また、ユーザの要望を材料開発に反映させるとともに、加工、溶接技術支援のほか、近年急激な進化を見せる成形・圧壊シミュレーションを駆使してハイテン実用化の一助とすることが今後とも大切である。

むすび=自動車車体軽量化の動きのなかでますますハイテンの適用拡大が重要視されている。今後とも自動車メーカー、部品メーカーの指導をいただきながらハイテン実用化に貢献すべく、培った技術の蓄積をもとに材料、利用技術、生産技術の開発をさらに強力に推進していく。

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) H. Shirasawa et al. : Trans. ISIJ, Vol. 26, No.4 (1986) p.310.
- 3) 田中福輝ほか：鉄と鋼，Vol.69, No.13 (1983) S1363.
- 4) 田中福輝ほか：鉄と鋼，Vol.71, No.5 (1985) S633.



第5図 U曲げ試験片の遅れ破壊に及ぼす引張強度(TS)と炭素当量(Ceq)の影響

Fig. 5 Effect of TS and Ceq on delayed fracture of U-bended test piece

- 5) 馬場有三ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.35, No.1(1985) p.89.
- 6) 伴 誠二ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.33, No.4(1983) p.62.
- 7) 岩谷二郎ほか：塑性加工連合講演会講演論文集，(1985) p.309.
- 8) 岩谷二郎ほか：塑性加工連合講演会講演論文集 (1988) p.55.
- 9) M. Miyahara et al. : 14th IDDRG Biennial Congress (1986) p.402.
- 10) 白沢秀則ほか：鉄と鋼，Vol.74, No.2 (1988) p.326.
- 11) 田中福輝ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.42, No.1(1992) p.20.
- 12) 岩谷二郎ほか：塑性と加工，Vol.35, No.404 (1994) p.1122.
- 13) 中屋道治ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.1(2000) p.75.
- 14) 高橋靖雄：軽構造接合加工研究委員会，現場技術者のための抵抗溶接入門講座テキスト，(1993) p.36.
- 15) 飛山洋一ほか：川崎製鉄技報，Vol.31, No.3 (1999) p.37.
- 16) 鹿島高弘ほか：CAMP-ISIJ, Vol.11 (1998) p.404.
- 17) 鹿島高弘ほか：CAMP-ISIJ, Vol.12 (1999) p.1220.
- 18) 鹿島高弘ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.1(2000) p.75.
- 19) 岩谷二郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.47, No.2(1997) p.42.