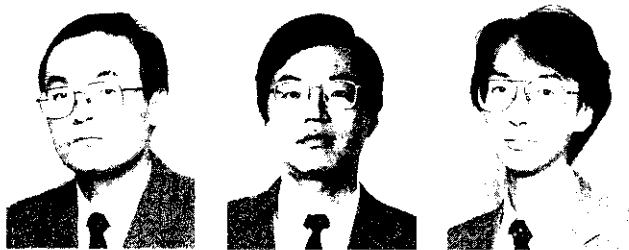


## Highly Formable Sheet Steels for Automobile through Advanced Microstructure Control Technology



坂田 敬  
Kei Sakata

技術研究所  
薄板研究部門長

松岡 才三  
Saiji Matsuoka

技術研究所  
薄板研究部門 主任研  
究員(課長)・工博

瀬戸 洋  
Kazuhiro Seto

技術研究所  
薄板研究部門  
主任研究員(課長)

### 要旨

川崎製鉄は、自動車用鋼板開発の過程で、高強度鋼板の成形性や諸特性向上をめざしてきた。その代表的な例として、塗装焼付処理で降伏強度のみならず引張強度も上昇する BHT 鋼板や、動的再結晶による結晶粒微細化で伸びと穴伸び性を高い次元で両立させた Super HSLA 鋼板を開発した。いずれの鋼板も 1995 年に稼動した千葉製鉄所第 3 熱間圧延工場の新技術をベースに、まったく新しい金属学的な知見を組み合わせ、高度な鋼組織の制御を行った結果得られた。

### Synopsis:

In the process of developing steel sheets for automobiles, Kawasaki Steel has been aiming at the obtainment of favorable formability of high strength steel sheets and the improvement of other various properties. Typical examples of the development includes, a new bake hardenable steel (BHT steel) sheet having characteristics in that not only yield strength but also tensile strength are multiplied by baking after coating, and Super HSLA steel sheet having excellent elongation and hole expansion property, both at a high dimension, through the refining of crystal grains brought about by dynamic recrystallization. Both steel sheets have been secured as the results of the sophisticated control of steel structure, performed at the application of completely new metallurgical findings, combined, as their basis, with new technology devised at the No. 3 hot strip mill in Chiba Works which initiated its operation in 1995.

### 1 緒 言

全地球的な環境問題に対する関心の高まりと衝突安全性向上の消費者ニーズを受け、自動車車体にはより軽く、より強くの二律背反の機能が求められている。燃料電池自動車の実用化のような技術革新により、長期的には自動車の機能やコンセプトが大きく変化する可能性があり、車体を構成する材料に関してもその例外ではない。また、アルミニウムやマグネシウム、樹脂など種々の軽量材料の提案がなされ、特定の車や限定された部位に関しては実用化も進んでいる。しかし、コストに加えて成形性や信頼性、リサイクル性などの課題が残り、大幅な採用には至っていない。このような状況で、自動車の軽量化と衝突安全性の向上に対して、車体の主要な構成材料である鉄鋼材料への期待は、従来に増して高くなっている。

車体用鉄鋼材料に要求される特性としては、優れたプレス成形性に加えて、組み立て時に要求される溶接性、完成車としての耐食性、疲労などの部品としての強度、さらには衝突時の耐衝撃特性などがある。これらの特性は鋼板そのものの機能として要求されるものに加えて、車体全体の機能として評価される場合が多く、鉄鋼材料の

利用技術の開発が重要な役割を占めるのは言うまでもない。鉄鋼材料は汎用材料との認識があるが、自動車車体の各部材で要求特性が異なるため、板厚寸法、強度、成形グレード、めっきの有無などの点で同一のものはないと言っても過言ではない。

このような状況において、高強度鋼板は自動車の軽量化と衝突安全性を確保する上で極めて重要である。現在、成形性に加えて溶接性や疲労特性などの特性を高めることにより、種々の強度レベルで高強度鋼板の実用化が進みつつある。一般に鋼の強化法としては、固溶強化、細粒化強化、変態組織強化、析出強化、歪み時効硬化などがあり、添加元素の選択と加工熱処理の活用により、これらの強化法が単独ないしは複合で用いられる。しかし、一方では高強度化にともなって諸特性の低下が起こる場合が多く、さらなる諸特性の改善が望まれている。

当社では以上のような背景を受けて、鉄鋼材料の利用技術の開発に加えて、鋼板の組織制御の精度を一段と高め、諸特性を顕著に改善した各種自動車用材料を開発している。

本論文では実用化例として、(1) 焼付塗装により引張強度の上昇を可能にした歪み時効活用新高強度熱延鋼板 (BHT)、(2) 動的再結晶による結晶粒微細化技術を活用した高加工性高強度熱間圧延鋼板 (Super HSLA)、の二つを紹介する。これらは、得られる特性に加えて、得られた組織やその達成手段、冶金原理において極めて斬新

\*平成14年3月5日原稿受付

であり、鉄鋼材料の今後のさらなる進化を期待させる

## 2 歪み時効活用新高強度熱間圧延鋼板 (BHT 鋼板)

### 2.1 BHT 鋼板の特徴と製造原理

成形性には低強度で加工性に優れ、塗装焼付け処理後には高い引張強度上昇を示し、かつ耐常時時効性の良好な歪み時効活用新高強度熱延鋼板の開発に成功した<sup>1)</sup> Fig. 1 に開発鋼板の歪み時効処理後の応力-歪み線図を模式的に示す。開発鋼板は、歪み時効処理を施すことにより降伏強度が著しく上昇するとともに、引張強度も上昇することが大きな特徴である。従来の BH 鋼板との大きな違いは引張強度が上昇することであり、このような特性は、衝突時の吸収エネルギーを高めることに有効であり、自動車の構造部材への幅広い適用が期待される。

本開発鋼は、C に比較して熱間圧延温度域での固溶度の大きい N を利用して高い歪み時効硬化能を実現している。鋼板中の固溶 N を確保するため、熱間圧延後の冷却条件を制御して AlN の析出を抑制している。さらに N の拡散に起因した室温時効劣化を抑制するため、熱間圧延直後の急冷により結晶粒径を微細化して粒界面積を増加させ、固溶 N を安定な存在位置である結晶粒界へ偏析させる。このようにして、高い歪み時効硬化能と室温時効性の両立に成功した。これらは、千葉製鉄所の新熱間圧延工場の高精度冷却技術を活用し安定して製造されている。

### 2.2 開発鋼板の歪み時効硬化特性と引張強度上昇機構

開発鋼板について、一軸引張により 0~15% の予歪みを付与した後、オイルバスにて 170°C × 20 min の焼付け処理を施したときの BH 量および BHT 量に及ぼす予歪み量の影響を従来鋼板と比較して Fig. 2 に示す。BH 量および BHT 量はそれぞれ塗装焼付け処理による降伏強度の上昇量、引張強度の上昇量であり、その定義は Fig. 1 中に示す通りである。

従来鋼板の BH 量および BHT 量はいずれも低く、塗装焼付け処理による強度上昇はほとんど認められない。一方、開発鋼板の BH 量は 2% の予歪み量で約 100 MPa の高い値を示すことに加え、BHT すなわち TS が顕著に上昇することに大きな特徴がある。BHT 量は予歪み量の増加とともに上昇し、予歪み量が 10% の時には約 60 MPa の値を示す。なお、10% 以上の予歪み量の増加による BHT 量の変化は小さい。

著者らは、開発鋼板の塗装焼付け処理による引張強度の上昇機構を明らかにするため、以下の検討を行った。

Photo 1 に、開発鋼板の引張試験後の TEM 組織に及ぼす塗装焼

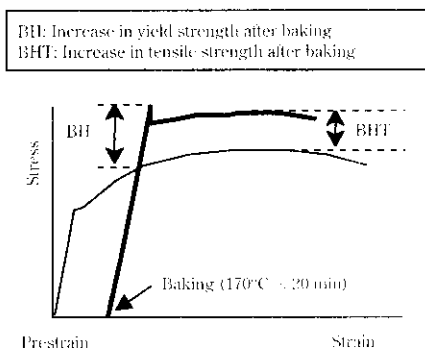


Fig. 1 Stress-strain relationship of newly developed steel after strain aging

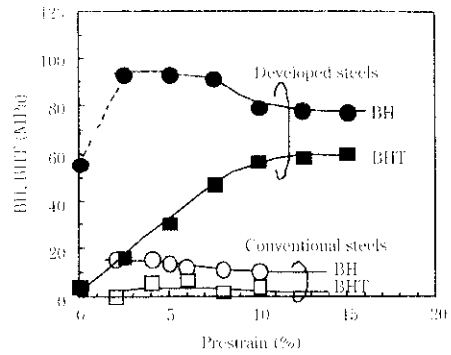


Fig. 2 Effect of prestrain on BH and BHT of newly developed steels after strain aging ( $t = 1.4 \text{ mm}$ )

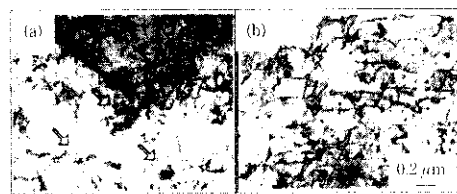


Photo 1 Dislocation networks of developed steel induced by tensile strain with or without baking treatment

付け処理の影響を示す。Photo 1 (a) は、10% の予歪み付与後、塗装焼付け処理を施し、さらに 4.5% の歪みを付与したときの TEM 観察結果であり、Photo 1 (b) は、塗装焼付け処理を施さず 14.5% まで変形させた場合である。塗装焼付け処理をした材料には、転位ループや転位のタンゲリングが明瞭に観察され、転位密度が増加していることが分かる。一方、塗装焼付け処理を施さない材料の転位密度は、変形量が同じにもかかわらず低い。これは、予歪みにより導入された転位が、塗装焼付け処理時に固溶元素により強固に固着されたため、塗装焼付け後の塑性変形時に、転位の増殖が促進されたためであると考えられる。転位の増殖に必要な外力は、転位が転位源に強く固着されるほど大きく、また、転位が増殖した転位群の中を運動するのに必要な外力は、転位密度が高いほど大きい。これらの作用により、塑性変形時の応力が高くなるため引張強度が上昇したと考えられる。

この現象を検証するため、X 線回折半幅幅により、塗装焼付け処理による転位密度変化を評価した。なお、X 線回折半幅幅は、(222) ヒーク半幅幅 ( $d$ ) を測定し、無加工材に対する半幅幅の増加率 ( $\Delta d/d$ ) で評価した。Fig. 3 に、10% の予歪みを付与した後、塗装焼付け処理を施し、さらに 11.5% の歪みを付与した材料と、塗装焼付け処理を施さずに 21.5% の歪みを付与した材料の結果を示す。塗装焼付け処理を施すことにより、X 線回折ヒークの半幅幅は大きくなり、塗装焼付け処理による転位密度の増加が確認された。

以上のように、開発鋼板はプレス成形後の塗装焼付け処理により安定して大きな強度上昇を確保することが可能である。

### 2.3 開発鋼板の諸特性と適用状況

実機で製造した TS440MPa 級開発鋼板の機械的特性の一例を、従来の TS440MPa 級の熱間圧延鋼板と比較して Table 1 に示す。開発鋼板は従来鋼板と同等の機械的特性を示しながら、高い歪み時効硬化特性を有する。開発鋼板の成形型寸法精度などのプレス成形性を調査した結果にも、開発鋼板は従来鋼板と同等の特性を示

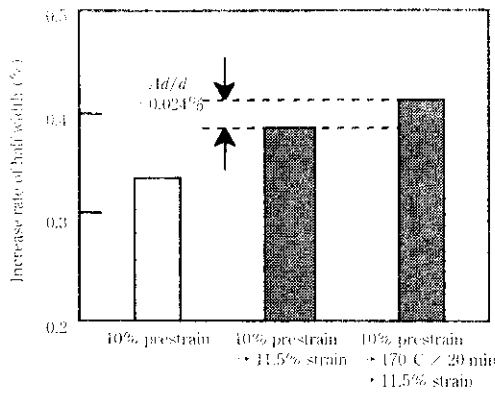


Fig. 3 Effect of baking treatment on (222) peak half-width of developed steel

Table 1 Typical mechanical properties of developed steel (*t* = 1.4 mm)

	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	BH <sup>①</sup> (MPa)	BHT <sup>②③</sup> (MPa)
Developed steel	370	478	34	95	57
Conventional steel	347	480	34	14	9

①Increase in yield strength by aging at 170°C for 20 min after 2% prestrain

②③Increase in tensile strength by aging at 170°C for 20 min after 10% prestrain

すことが確認されている

自動車用鋼板の耐衝突特性を評価するため、歪み速度を約 2000 s<sup>-1</sup>とした高速引張試験を実施し、高速変形特性を調べた。試験は原板まま、および 10% の予歪みを付与後、170°C×20 min の塗装焼付け処理を施したものについて行ない、応力値を歪み量 15% まで積分して吸収エネルギーを算出した

Fig. 4 に高速変形時の吸収エネルギーにおよぼす塗装焼付け処理の影響を示す。熱間圧延ままの吸収エネルギーは、原板の TS の増加とともに上昇し、開発鋼板は従来鋼板と同一の相関関係上にある。一方、10% の予歪みを付与後、塗装焼付け処理を施した場合にも、吸収エネルギーと原板の TS とは正の相関を示すが、その絶対値は開発鋼板の方が従来鋼板に比較して高い値を示す。従来鋼板では、加工硬化により吸収エネルギーが上昇するが、開発鋼板では加工硬化に加え、歪み時効硬化による引張強度上昇の寄与がある。この歪み時効硬化による寄与は、原板の TS 上昇量に換算すると約 60 MPa に相当し、通常の引張試験により測定される引張強度上昇

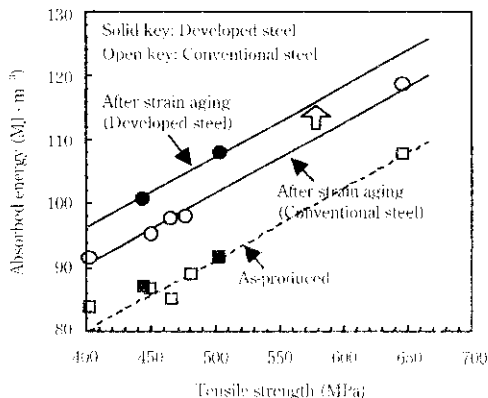


Fig. 4 Absorbed energy at high strain rate tensile tests of newly developed steel and conventional steel

(BHT) が高速変形時にも同様の効果として表れている

本試験でのデータを基にした FEM 解析での、開発鋼板の適用による部材の耐衝突特性向上効果の検討結果によれば、開発鋼板の歪み時効硬化の寄与は板厚では熱間圧延鋼板のワークエッジ (0.1mm) に、TS では 60~70 MPa に相当し、板厚低減による軽量化、あるいは難成形部品に対する成形性確保 (強度レベルダウン) などへ寄与することが明らかになっている

歪み時効硬化特性を有する従来鋼板は、室温保持による機械的特性の劣化が問題となる。開発鋼板は、1y 室温保持した場合でも、TS はほとんど変化せず、YS の上昇は約 30 MPa、EI の低下は高々 1% と特性変化は極めて小さい

開発鋼板では鋼組成と結晶粒径を制御することにより、常温時効による特性の劣化を抑制しつつ、大きな歪み時効硬化を実現させているのが特徴である

本開発鋼板を適用することにより、車体重量を増加させることなく耐衝突特性の向上、あるいは耐衝突特性を維持したままでの車体の軽量化が可能となり、自動車に要求されている安全性、環境問題に対して貢献するものと期待できる。そして、本開発鋼板を耐衝突部材に採用することにより、実車において 10% 以上の部品軽量化が達成されている。今後、開発鋼板の自動車用鋼板への適用がますます拡大すると考えられる

### 3 動的再結晶による結晶粒微細化技術を活用した良成形性高強度熱間圧延鋼板 (Super HSLA 鋼板)

#### 3.1 開発鋼の冶金原理

高強度熱間圧延鋼板は自動車の足まわりに用いられることが多い。足まわり部品には打ち抜き穴にフランジを立てる、いわゆる穴抜き (パリング) 加工が多用されるため、この用途の熱間圧延鋼板には伸びの他に穴抜き性が要求される。一般に、穴抜き性は鋼板の結晶粒径を小さくすることで向上することが知られており、現在いかにして微細粒化するか、国内外でさまざまな研究が活発に行われている

今回開発した SuperHSLA 鋼板<sup>①②</sup>は、薄鋼板製造プロセスでの微細粒化手法として、熱間圧延工程での動的再結晶を利用する。動的再結晶とは、高温変形中に加工と同時に転位密度の低い結晶粒の生成と成長を生じる現象<sup>③</sup>である。動的再結晶粒は微細・等軸で、特に低温・高歪速度領域で得られた結晶粒は比較的長時間成長せずに安定して存在できる。しかし、一般的動的再結晶は、高温変形でもよく用いられる Z (Zener-Hollomon) 因子

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \dots \dots \dots (1)$$

の低い粗圧延の領域でしか生じていなかった

仕上げ圧延のような高 Z 領域まで動的再結晶が起きるようにするには、加工前の初期オーステナイト粒径を小さくしてやればよい。本開発鋼ではスラブ加熱中の粒成長を抑制するために TiC を利用した Nb も NbC を形成して同様の効果を有するが、実験的に確認した結果、動的・静的を問わず Ti の方が再結晶を阻害しにくいことが分かっている。これは、万一熱間圧延の最終パス近くで動的再結晶領域から静的再結晶領域に遷移した場合にも、穴抜き性を低下させる展伸粒を生じにくいことを意味する

Fig. 5 は実験室的に準備した Ti 量の異なる組成の鋼を種々の温度に加熱した後、熱間圧延の仕上げ温度域に該当する 850°C で圧延加工した場合の真応力-真歪曲線である。一般に動的再結晶が生じ

Table 2 Mechanical properties of developed steel

Grade	Steel type	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Z* (%)	FL** (MPa)
590 MPa	Super HSLA	480	600	31	120	280
	Conventional HSLA	510	600	27	60	250
780 MPa	Super HSLA	690	790	22	80	370
	Conventional HSLA	710	790	20	40	310

\*Z: Hole expansion ratio  
\*\*FL: Fatigue limit in bending mode

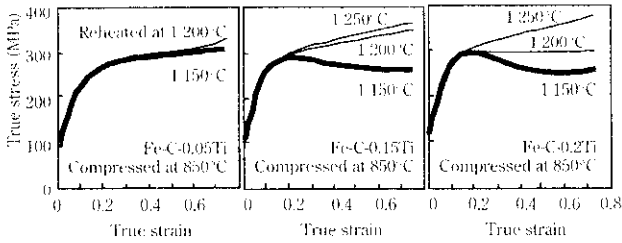


Fig. 5 True stress-true strain curves of steels with different reheating temperatures and Ti contents (in mass%)

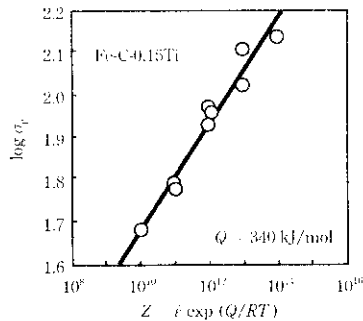


Fig. 6 Relation between peak stress and Z parameter in Ti-added low carbon steels

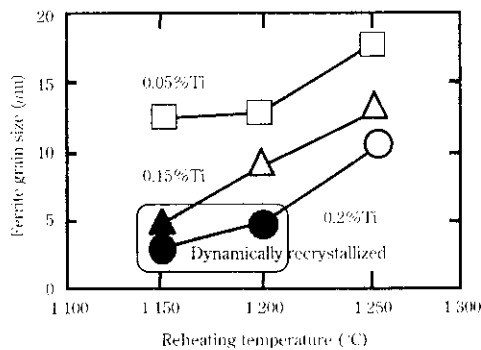


Fig. 7 Effect of heating temperature and Ti content on final ferrite grain size

ると真応力-真歪曲線はピークをもった特有な形を示す。すなわち、応力は一定歪 ( $\epsilon_p$ ) まで増加し、ピーク応力 ( $\sigma_p$ ) を示したあと、減少に転じてある歪以上では定常応力となる。この図から、多量のTiを添加し、さらに低温に加熱した場合に動的再結晶が生じていることが分かる。これは、圧縮試験前の加熱温度を下げるにつれて析出TiC量が増加し、これに対応する形で $\gamma$ 粒径が小さくなるためである。本実験のような低炭素鋼の場合、圧縮試験前のオーステナイト粒径が約  $50\mu\text{m}$  以下のとき仕上圧延領域でも動的再結晶が生じる。

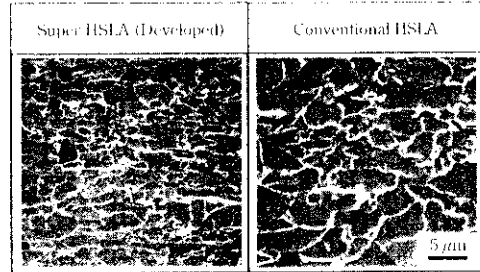


Photo 2 Typical microstructures of developed steel and conventional steel

圧縮試験でピーク応力を示したものについて、これをZ因子で整理した結果を Fig. 6 に示す。この結果をもとにみかけの活性化エネルギーを算出したところ、 $340\text{ kJ/mol}$  と鉄の自己拡散の活性化エネルギー ( $285\text{ kJ/mol}$ ) に近い値が得られ、活性化エネルギーの観点からも動的再結晶が生じていることが矛盾なく説明された。

Fig. 7 は真歪で 0.7 まで圧縮試験し、 $50^\circ\text{C/s}$  で冷却した後のフェライト粒径を加熱温度の関数としてまとめたものである。動的再結晶が生じた場合 (図中の中実記号) には、静的再結晶が生じた場合に比べてフェライト粒径が大幅に小さくなり、 $5\mu\text{m}$  以下の非常に微細・均一な組織が得られることが分かる。

### 3.2 開発鋼の材料特性

現在、千葉製鉄所では 590 MPa 級と 780 MPa 級の Super HSLA 鋼板を製造している。なお、いずれの鋼板も仕上圧延中に 10~20% の変形抵抗の減少が確認され、動的再結晶が実際の熱間圧延プロセスで発現することが確認されている。Photo 2 に 780 MPa 級の開発鋼と従来 HSLA 鋼の組織写真の例を示す。従来鋼の平均フェライト粒径は  $6\sim7\mu\text{m}$  あるが、開発鋼の平均粒径は約  $2\mu\text{m}$  と非常に微細な組織となっており、世界で初めて工業規模で超微細粒を有する薄鋼板を製造することに成功した。また、開発鋼の組織は EBSD (electron back scattering diffraction) により隣接する結晶粒界が  $15^\circ$  以上である大傾角粒界であることを確認している。

Table 2 に 590 MPa 級と 780 MPa 級の開発鋼の機械的性質の例を、また Fig. 8 に 780 MPa 級の熱間圧延鋼板の伸び-穴拡げバランスを、従来の HSLA 鋼と比較して示す。開発鋼は従来鋼と比較して伸び、穴拡げ性とも向上し、一般に伸びと穴拡げ性の両立が困難とされてきた熱間圧延高強度鋼板の成形性を大幅に向上させることが可能になった。また、開発鋼は疲労強度の面でも従来 HSLA 鋼よりも優れた特性を実現している。溶接性・耐食性についても従来鋼と同等以上の特性を示し、ロア・アームやロード・ホイールなどの足まわり部品への適用拡大が期待される。

## 4 結 言

自動車車体の軽量化と衝突安全を両立させる観点から、新たに開

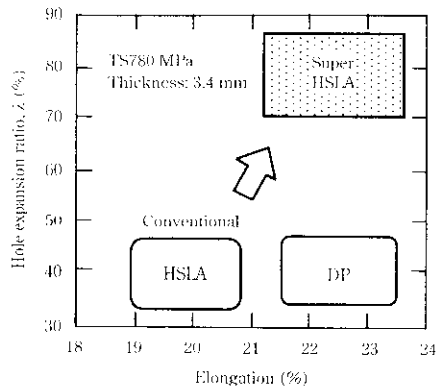


Fig. 8 Elongation and hole expansion ratio of developed steel

発された自動車用鋼板を紹介した。BHT 鋼板は成形時には低強度で加工性に優れ、塗装焼付処理後に高い引張強度上昇を示すまったく新しい鋼板で、近年注目されている衝突時の吸収エネルギーの向上に有効である。また、SuperHSLA 鋼板は、動的再結晶による結晶粒微細化の手法を初めて薄鋼板熱間圧延工程に適用し、これによって足回り用熱間圧延鋼板の穴抜き成形性を格段に向上させることに成功した。

最近発売された自動車では車体のハイテン化率が 50% を超えるものがあり、今後ともさらにその比率が上昇するとともに、鋼板自体の強度も上昇してゆくと予想される。今回紹介した二つの鋼板は、今後も続くこのようなハイテン化のニーズに十分こたえられるものである。

#### 参考文献

- 金子真次郎, 登坂章男, 富永陽一: 川崎製鉄技報, **32**(2000)1, 67
- 金子真次郎, 平本治郎, 松岡孝二, 坂田 敬: 自動車技術会学術講演会前刷集, **48**(2001)
- 平本治郎, 金子真次郎, 比良隆明, 坂田 敬, 阿部英夫: 自動車技術会学術講演会前刷集, **49**(2001)
- 2001 年 10 月 19 日, 鉄鋼新聞他
- 安原英子, 坂田 敬, 古君 修, 古角文雄, 菱沼 至: まてりあ, **40**(2001)1, 82
- 瀬戸 洋, 安原英子, 坂田 敬: 自動車技術, **55**(2001)10, 20
- 酒井 拓: 鉄と鋼, **81**(1995)1, 1