

サスペンション, シャシー部品用高強度熱間圧延鋼板 「NANO ハイテン」, 「BHT[®] 鋼板」

Hot Rolled High Strength Steels for Suspension and Chassis Parts “NANO HITEN,” “BHT[®] Steel”

瀬戸 一洋 SETO Kazuhiro JFE スチール スチール研究所 自動車鋼板研究部 主任研究員(副部長)
船川 義正 FUNAKAWA Yoshimasa JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(課長)・工博
金子真次郎 KANEKO Shinjiro JFE スチール スチール研究所 自動車鋼板研究部 主任研究員(副課長)

要旨

サスペンションやシャシーなどの自動車部品ではバーリング加工が多用されるため、使用される鋼板には強度のほか、穴広げ性が要求とされる。「NANO ハイテン」は軟質なフェライト単相組織をベースとし、数ナノメートルの超微細炭化物で析出強化することで強度と穴広げ性を両立させることに成功した。一方、「BHT[®] 鋼板」は固溶限の大きな N のひずみ時効を活用することによって、より高強度の鋼板を使用したのと同じ効果を得ることができる。

Abstract:

In the application of hot rolled steel sheets for automobile suspension and chassis parts, hole expansionability is required in addition to the strength since burring is frequently used. “NANO HITEN” is a variety of precipitation hardened steels with ferrite single phase matrices and ultra fine carbides of single nanometer size, which lead to higher strength and excellent hole expansionability. “BHT[®] Steel” provides almost the same effect as higher strength steel because of the large increase of tensile strength based on the strain aging effect of N.

1. はじめに

自動車部品の中で、サスペンションやシャシーなどのいわゆる「足回り部品」は強度・剛性のほかに疲労や腐食などの耐久性が要求されることから、冷間圧延鋼板が主体の車体とは異なり、主として板厚の厚い熱間圧延鋼板が用いられる。軽量化の進行にともない、最近ではこの分野でも軟鋼から引張強さ 440~590 MPa 級へと高強度化が進んでいる。

一方、サスペンションのレイアウト制約や大入力時の部品干渉を避けるため部品形状は複雑化する傾向があり、足回り部品にはバーリングなどの伸びフランジ加工と張出しが複合した成形が多用される。したがって、鋼板にはこれらの成形モードに対応した穴広げ性と伸びが要求されるが、両者は一般に背反することが知られている。

高い伸びを示すことで知られる複合組織 (DP) 鋼板や低

合金残留オーステナイト (TRIP) 鋼板は、軟質なポリゴナルフェライトからなる主相とマルテンサイトなど硬質な第 2 相との硬度差が大きいと、打抜加工時にこれらの界面からボイドが発生して穴広げ性の向上を図るのは困難であった。このため、主相と第 2 相の硬度差を軽減することを目的としてベイナイト単相やベイニティックフェライト単相の鋼板が開発されてきたが、特に引張強さ 780 MPa 級以上となると強度と穴広げ性のバランスは十分とはいえず、また Si を多用するため赤スケールといわれる表面の凹凸や内部酸化が顕著となり、疲労特性や化成処理性・耐食性の低下が問題となる場合があった¹⁾。

本報告では、サスペンションやシャシーなどの自動車足回り部品に適した新しい高強度熱間圧延鋼板として、(1) 析出物を数ナノメートルまで微細化し高い穴広げ性と高い伸びを両立させた析出強化型高強度熱間圧延鋼板「NANO ハイテン」、(2) 焼付塗装により引張強さの上昇が可能となるひずみ時効活用型高強度熱間圧延鋼板「BHT[®] 鋼板」の二つを紹介する。

2. 析出強化型高強度熱間圧延鋼板 「NANO ハイテン」

2.1 NANO ハイテンの強化機構と特徴

NANO (New Application of Nano Obstacles for Dislocation Movement) ハイテンは、ナノメートルサイズの析出物を使って鋼板を強化することにより、前述した穴広げ性と伸びを両立させたハイテンで、以下の特長がある。

- (1) 加工性に優れたフェライトを母相とする単相組織である。
- (2) 数ナノメートルサイズまで微細化した析出物で強化されている。
- (3) 析出物の熱的安定性が極めて高い。
- (4) 析出強化分が非常に大きいため、固溶強化元素のSiを無添加とすることが可能である。

伸び-穴広げ性バランスに及ぼす組織の影響を Fig. 1 に模式的に示す。F + M などの複合組織では、高い伸びが得られる反面、穴広げ率が低く、ベイナイト単相鋼のような単相組織では穴広げ率は高いが伸びが低くなる。NANO ハイテンではフェライトの高い伸びと単相組織の高い穴広げ性に着目し、組織をフェライト単相とすることで、高い伸びを維持しながら穴広げ率の向上を図った。しかしながら、従来の方法ではフェライト単相組織の鋼で 780 MPa 級以上の強度を達成することは容易ではない。

Fig. 2 は Orowan-Ashby 機構を仮定し、析出物の量と析出強化量との関係を従来の析出強化鋼中の析出物径 10 nm と 1 nm の場合について計算したものの²⁾である。強化量は析出物間隔で決まるため、析出物の量とともに径の影響が大きい。たとえば、TiC として析出している C 量が 0.08 mass% の時、析出物の径を 1 nm まで微細化すると 700 MPa の析出強化が可能である。この結果に基づき、NANO ハイテンでは析出物を数ナノメートルまで微細化し、析出強化を極限まで利用することを目指した。ただし、析出物が微細でも熱的に不安定であると、製造条件の変動によって容易に粗大化し、強度の低下やばらつきを招くた

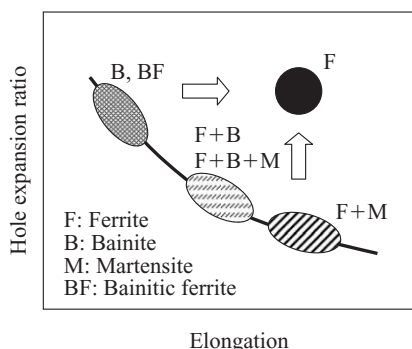


Fig. 1 Effect of microstructure on elongation and hole expansion ratio

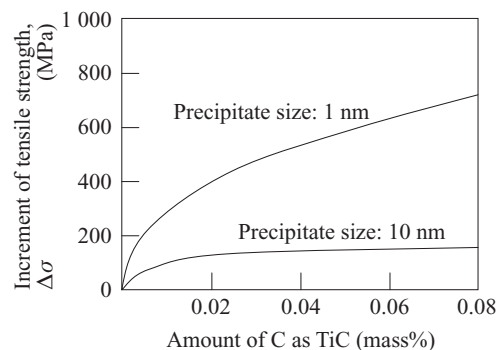


Fig. 2 Effect of size and amount of precipitates on the increment of tensile strength

め、析出物には熱的に安定であることが求められる。

そこで、NANO ハイテンでは、析出物を数ナノメートルまで微細化し、さらに熱的安定性を高める工夫がなされている。具体的には、X-Y-C の三元系炭化物に着目し、X、Y の組み合わせを検討した結果、0.04C-1.3Mn 鋼をベースに Ti と Mo を適量加えた系において極めて微細な析出物が析出し、熱的にも非常に安定であることを発見した³⁾。

NANO ハイテンの組織の SEM 観察結果および析出物の TEM 観察結果(暗視野像)を Photo 1 に示す。母相はフェライト単相であり、3 nm 程度の超微細析出物が列状に多数析出している。EDS および X 線回折の結果から、この析出物は (Ti, Mo)C であり、TiC とほぼ同じ格子定数 (0.431 nm) を有することが確認された。また、反射暗視野像などの観察結果から、TiC と同様に母相と Baker-Nutting の関係を持ちながら整合析出しているものと考えられる。

Fig. 3 は NANO ハイテンと従来の TiC による析出強化鋼板を 650°C に再加熱・等温保持した後の常温での引張強さの低下量 (ΔTS) を測定した結果である。TiC の析出強化を利用した従来鋼板では 15×10^3 s 保持すると TiC の粗大化にともなって引張強さの大幅な低下が認められるのに対し、(Ti, Mo)C の析出強化を主体とする NANO ハイテンでは 80×10^3 s 保持しても引張強さはほとんど低下せず、NANO ハイテンにおける析出物は熱的にも極めて安定なことが分かる⁴⁾。NANO ハイテンを 700°C 以上の高温に保持し、粗大化した (Ti, Mo)C の大きさと Ti/Mo 原子濃度比を測定すると、Fig. 4 のような結果が得られる。これは拡散元素として Ti が支配的であることを示唆しており、固溶

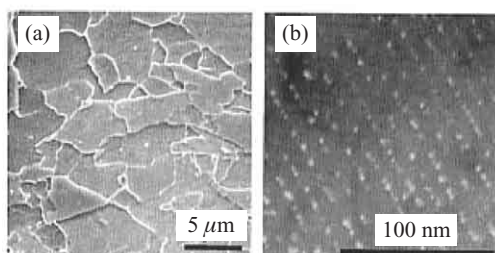


Photo 1 Microstructure (a) and precipitates (b) of NANO HITEN

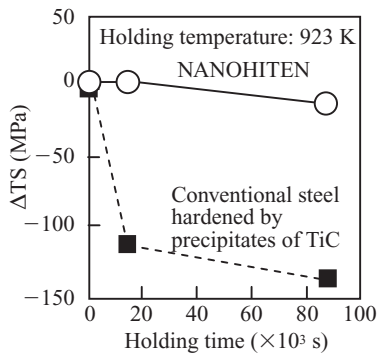


Fig. 3 Comparison of the thermal stability of strength between NANO HITTEN and conventional HSLA steel

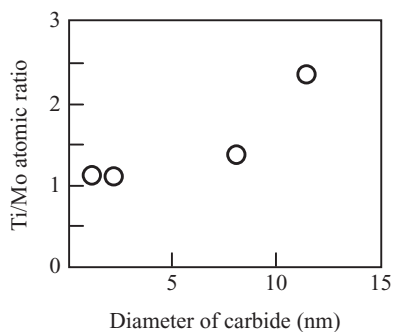


Fig. 4 Change in Ti/Mo atomic concentration ratio of (Ti, Mo)C with coarsening

Tiを低減することによって析出物の粗大化が抑制されることが実験で確認されている⁵⁾。

NANO ハイテンを製造する熱間圧延工程は、一般鋼を製造する通常の工程とほとんど変わりはなく、一般鋼と同等の巻取温度で析出強化されたフェライト単相組織が容易に得られる。従来の析出強化鋼をこのような高温巻取するとパーライトを生じることが多いが、NANO ハイテンではC含有量を低く抑え、またパーライト変態を抑制するMoを添加しているため、安定してフェライト単相組織が得られる。これに加え、巻取条件によって強度が変動しやすい複合組織鋼板や従来の析出強化鋼板とは異なり、フェライト単相であることと析出物が安定なことが相まってNANO ハイテンの引張強度のばらつきは非常に小さい。これはプレス成型時のスプリングバック量の変動が少ないことを意味する。

また、NANO 析出物による大幅な強度上昇は熱間圧延後の巻取工程で生じるため、熱間圧延中は780 MPa級NANO ハイテンの場合で540~590 MPa級鋼相当と軟質で、従来の780 MPa級鋼では困難であった板厚1.8 mm以下の薄物や、1000 mmを超える広幅の鋼板を製造できる。

2.2 NANO ハイテンの諸特性と適用状況

780 MPa級NANO ハイテンの代表的な組成および機械的性質を、従来の高伸びフランジ型高強度熱間圧延鋼板と比較して、Table 1に示す。NANO ハイテンは従来鋼と比

Table 1 Typical chemical composition and mechanical properties of NANO HITTEN and conventional high barring steel in TS 780 MPa grade

	Chemical composition (mass%)				Mechanical properties			
	C	Si	Mn	Others	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	λ (%)
NANO-HITTEN	0.04	Tr.	1.4	Ti, Mo	745	805	20	100
Conventional high barring steel	0.07	0.99	1.54	Ti	696	810	18	79

YS: Yield strength, TS: Tensile strength, El: Elongation, λ: Hole expansion ratio

較して、非常に優れた伸び-穴広げ性バランスを有する。これは特長の(1)、(2)にあげた「フェライト単相化」と「析出物の超微細化」の効果と考えられる。

析出物超微細化のもう一つの効果として得られる非常に高い降伏強度(YS)も、NANO ハイテンの特長のひとつである。自動車の側面衝突に対応する曲げ圧壊強度はYSが支配的であり、熱間圧延鋼板でありながら薄物が製造可能であること、後述するように合金化溶解亜鉛めっきが可能であることなどから、NANO ハイテンは足回りのみならず車体骨格部品への適用可能性も秘めている。

一方、特長の(4)にあげたSi無添加の成分設計は表面品質の向上に効果がある。

一般に、鋼板の強度が590 MPa級を超えるとSiの添加が必須となり、表面にSiが濃化して化成処理性を低下させることがあるが、Siをまったく含まないNANO ハイテンの化成処理性は軟鋼とほぼ同等である。

また、Si添加鋼では熱間圧延中に赤スケールと呼ばれる表面に濃化したSiの酸化物層に起因するスケール跡(凹凸)が発生することがある。Fig. 5は各種熱間圧延鋼板の母材TSと平面曲げ疲労試験による疲労限との関係を示したものであるが、590 MPaを超えると母材強度の上昇に対する疲労限の上昇量が小さくなるのはこのような表面粗度の影響であると考えられる。Siを含まないNANO ハイテンはこの

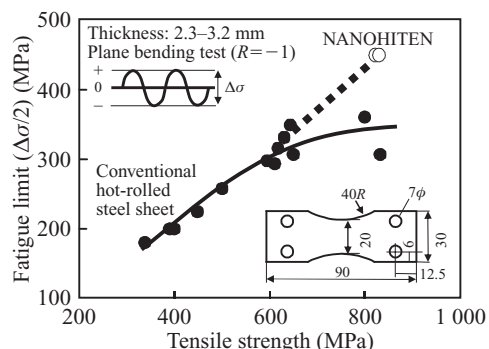


Fig. 5 Comparison of the fatigue limit between NANO HITTEN and conventional high strength low alloy (HSLA) steel

ような赤スケールの発生はなく、強度に見合った疲労限の上昇が期待できる。

さらに、NANO ハイテンは Si 無添加であることを生かして熱間圧延後に合金化溶融亜鉛めっきを施すことも可能で、特長の (3) にあげたように「析出物が高温でも安定」なことから、めっき後も熱間圧延後とほとんど変わらない機械的性質が得られる。析出強化を極限まで高めたことで添加 C 量も少なく、スポット溶接などの溶接性にも優れ、溶接部の硬化が少ないことからテーラードブランクの適用にも有利である。

780 MPa 級 NANO ハイテンはこれまで述べたような特長から、シャシー、アームなどの足回り部品のほか、車体骨格部品や安全部品などへの採用が進んでいる。現在千トン/月以上を量産中であり、今後もさらに適用範囲が拡大していくものと期待される。また、本稿では 780 MPa 級を中心に紹介したが、980 MPa 級や前述した合金化溶融亜鉛めっき鋼板の品揃えもあり、部品の要求特性に応じた選択が可能である。

3. ひずみ時効活用型高強度熱間圧延鋼板「BHT 鋼板」

3.1 BHT とその発現機構

BHT (Bake Hardenable Steel with Tensile Strength Increase) 鋼板は部品の製造工程における加工・塗装焼付処理によって引張強度が上昇するまったく新しいタイプの熱間圧延ハイテンである^{6~10)}。

従来から知られている「BH 鋼板」は、固溶 C によるひずみ時効硬化を活用して加工・塗装焼付処理後に降伏強度を上昇させる鋼板で、主として耐デント性の改善を目的として外板パネルに多用されている。BHT 鋼板は C に比べて固溶限の大きな N を活用することによって、降伏強さのみならず引張強さも上昇させた点に特徴がある。

熱間圧延後の冷却プロセスで AlN が析出すると固溶 N が失われるため、BHT 鋼板では冷却条件を制御して AlN の析出を抑制している。また、従来固溶 N は時効劣化を引き起こしやすいという問題があったが、熱間圧延後の急冷により結晶粒径を微細化して固溶 N を粒界へ偏析させることによって室温での N の拡散移動を防ぐことに成功した。

Fig. 6 に BHT 鋼板のひずみ時効処理後の応力-ひずみ線図を示す。BHT 鋼板は、従来の BH 鋼板に比べて時効処理後の降伏強度の上昇量が大きいのに加えて、引張強さも上昇することが分かる。引張強さの上昇は、後述するように疲労や衝撃吸収能に大きな効果を発揮する。

Fig. 7 は BHT 鋼板に一軸引張により 0~15% の予ひずみを付与した後、オイルバスにて 170°C × 20 min の焼付処理を施したときの BH 量および BHT 量に及ぼす予ひずみ量の影響を従来鋼板と比較して示したものである。BH 量

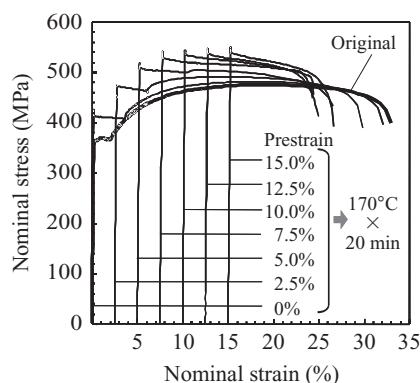


Fig. 6 Stress-strain curves of TS 440 MPa grade BHT steel with different amount of prestrain after strain aging

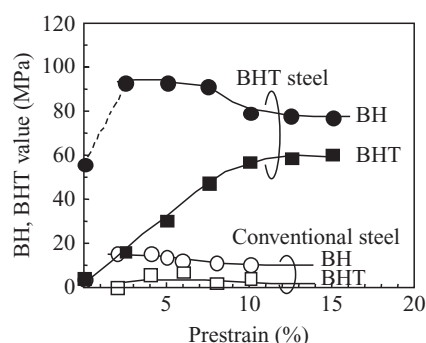


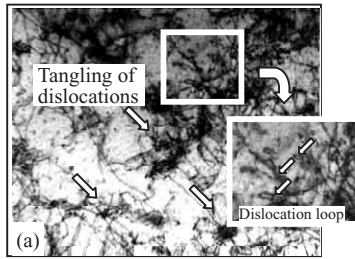
Fig. 7 Effect of prestrain on BH and BHT value for BHT steel after strain aging ($t = 1.4 \text{ mm}$)

および BHT 量はそれぞれ塗装焼付処理による降伏強度、引張強さの上昇量を意味する。

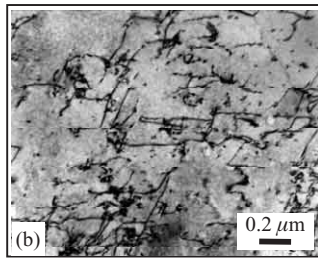
従来鋼板の BH 量および BHT 量はいずれも低く、塗装焼付処理による強度上昇はほとんど認められない。一方、BHT 鋼板の BH 量は 2% の予ひずみ量で約 100 MPa と高い値を示すことに加え、BHT 量が高い、すなわち、TS が顕著に上昇している。BHT 量は予ひずみ量の増加とともに上昇し、予ひずみ量が 10% では約 60 MPa の値を示す。10% 以上の予ひずみ量の増加による BHT 量の変化は小さい。

BHT の発現機構は、従来の BH 鋼板で認められる固溶元素による転位の固着がベースであるが、BH 鋼板に比べて固着力が強く、大きな BH 量が得られるとともにその後の転位の増殖にも有利に作用するものと考えられる。

Photo 2 に BHT 鋼板の引張試験後の TEM 組織に及ぼす塗装焼付処理の影響を示す。Photo 2(a) は、10% の予ひずみ付与後、塗装焼付処理後、さらに 4.5% のひずみを付与した時の TEM 観察結果であり、Photo 2(b) は、塗装焼付処理をしないで 14.5% まで変形させた場合である。塗装焼付処理をした材料には、転位ループや転位のタング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、塗装焼付処理を施していない材料の転位密度は、変形量と同じであるにもかかわらず低い。これは、予ひずみにより導入された転位が、塗装焼付処理時に固溶元素に



(a) 10% prestrain → 170°C-20 min baking → 4.5% strain



(b) 14.5% strain

Photo 2 TEM images showing dislocation networks induced by tensile strain with or without baking treatment in BHT steel

より強固に固着されたため、塗装焼付後の塑性変形時に、新たな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なか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さが上昇したと考えられる。

以上のように、BHT 鋼板は、プレス成形後の塗装焼付処理により、安定して大きな強度上昇の確保が可能である。

3.2 BHT 鋼板の諸特性と適用状況

440 MPa 級の BHT 鋼板の代表的な組成を Table 2 に、また、機械的特性の一例を、従来の TS440 MPa 級の熱間圧延鋼板と比較して Table 3 に示す。母材の成形性は従来鋼板とまったく変わらない。Fig. 8 はスプリングバックによる口開き量 (W) を示したものであるが、BHT 鋼板母材の TS- W の関係は従来鋼板の線上に乗ることが分かる¹¹⁾。

BHT 鋼板では加工硬化に加え、ひずみ時効硬化による約 60 MPa の引張強さ上昇があり、時効処理後は従来鋼板に比べて疲労特性、耐衝突特性の向上が期待される。

Fig. 9 は BHT 鋼板の 10% 予ひずみ + 170°C × 20 min 時効処理前後での TS と疲労限 (FL) の関係を従来鋼板と比較して示したものである¹¹⁾。BH 鋼板・従来鋼板とも予ひずみ + 時効処理によって母材よりも疲労限が上昇しているが、時効処理後の BHT 鋼板の疲労限は従来鋼板に比べて 40 MPa 程度高い。BHT 鋼板は、時効処理後、疲労限のみならず低サイクル領域での疲労強度も従来鋼板よりも TS に比例して高くなっていることが確認されている。

次に、高速変形時のエネルギー吸収能をホプキンソンプ

Table 2 Typical chemical composition of TS 440 MPa grade BHT steel

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Al	N
0.08	0.10	1.25	0.016	0.003	0.017	0.006 8

Table 3 Typical mechanical properties of TS 440 MPa grade BHT steel

(t = 1.4 mm)					
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	BH* (MPa)	BHT** (MPa)
BHT steel	370	478	34	95	57
Conventional steel	347	480	34	14	9

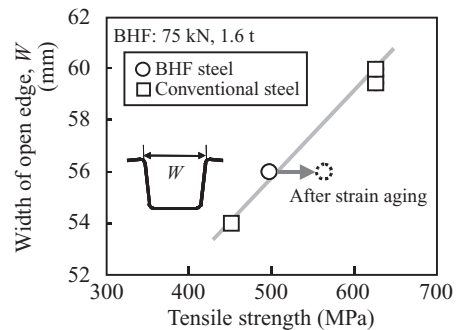


Fig. 8 Shape fix-ability of BHT steel compared with conventional steel

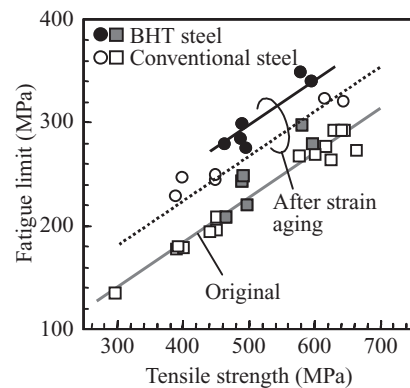


Fig. 9 Fatigue Limit of BHT steel compared with conventional steel

レッシュャーバー法¹²⁾による高速引張試験で比較・評価した結果を示す。Fig. 10 は同法によって得られたひずみ速度約 2000 s⁻¹における応力-ひずみ曲線のひずみ 15% までの応力を積分して算出した吸収エネルギーを BHT 鋼板と従来鋼板で比較したものである¹¹⁾。BHT 鋼板・従来鋼板とも 10% 予ひずみ + 170°C × 20 min 時効処理によって吸収エネルギーが上昇しているが、時効処理後の BHT 鋼板の吸収エネルギーは従来鋼板に比べて約 5 MJm³ 程度高く、より大きな吸収エネルギー上昇効果が認められる。また、試作部品の落錘試験においても BHT 鋼板の有効性が確認

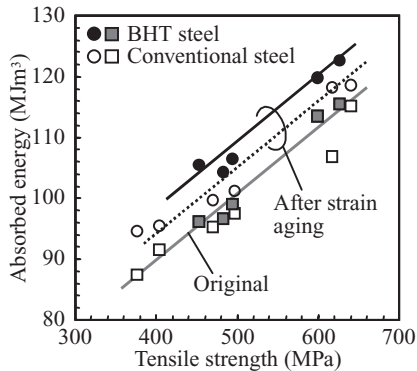


Fig. 10 Absorbed energy at high strain rate tensile testing of BHT steel compared with conventional steel

されているほか、本試験でのデータに基づいたFEM解析¹³⁾でも板厚換算で0.1mm(熱間圧延鋼板のハーフゲージに相当)の軽量化が可能であることが示されている。

以上のような10%予ひずみ+170°C×20min時効処理後のBHT鋼板の疲労限、吸収エネルギーは予ひずみ+時効処理によるTSの上昇に見合うものであり、BHTの効果として説明できる。すなわち、BHT鋼板を使用することによって、成形時は従来鋼板と同等の成形能でありながら加工・塗装焼付後は60MPa程度引張強さの高い従来鋼板を使用したのと同様の性能が得られることを示している。

ひずみ時効硬化特性を有する従来鋼板は、一般に室温保持による機械的特性の劣化が問題となる。BHT鋼板は1年間室温保持した場合でも、引張強さはほとんど変化せず、YSの上昇は約30MPa、伸びの低下は高々2%と特性変化は極めて小さい。BHT鋼板では前述したように結晶粒の微細化によるNの粒界偏析が確認されており、これが室温における固溶Nの安定化に寄与しているものと考えられる。

このような特長を生かして、疲労強度や耐衝突性能が必要なフロント・サイド・メンバーやロア・アームなどに440MPa級BHT鋼板の適用が進んでいる。

また、本稿では加工後に590MPa級相当となる母材強度が440MPa級のBHT鋼板を中心に紹介したが、同様の原理で母材強度が370MPa級から590MPa級まで範囲の品揃えが完了しており、合金化溶融亜鉛めっき鋼板も製造可能である。

BHT鋼板の適用により、車体重量を増加させることなく疲労特性・耐衝突特性の向上、あるいは疲労特性・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、サスペンション、シャシー部品に要求されている信頼性、安全性、環境問題に対して貢献するものと期待される。

4. おわりに

本報告では、自動車車体の軽量化と衝突安全性の確保を

目的として、特にサスペンションやシャシーなどの重要保安部品に適した高性能な高強度鋼板として、(1)析出物を数ナノメートルまで微細化し高い伸びと高い穴広げ率を合わせもった析出強化型高強度熱間圧延鋼板「NANO ハイテン」、(2)焼付塗装により引張強度の上昇が可能となるひずみ時効活用型高強度熱間圧延鋼板「BHT鋼板」の二つを紹介した。この二つの高強度鋼板は、得られる特性に加えて、鋼板組織やその達成手段、冶金原理において極めて斬新なものであり、今後の適用拡大が期待される。

参考文献

- 1) 瀬戸一洋. サスペンション用高強度熱延鋼板の開発. 鉄鋼協会自動車用材料シンポジウム. 2006, p. 45-52.
- 2) Gladman, T. et al. "Structure-property relationships in high-strength microalloyed steel." Proc. of Symp. on Microalloying 75. New York, 1976, Union Carbide Corp. p. 32-55.
- 3) Funakawa, Y. et al. "Development of high strength hot-rolled steel sheet consisting of ferrite and nanometer-sized precipitates." ISIJ Int. vol. 44, no. 11, 2004, p. 1945-1951.
- 4) 富田邦和ほか. ナノサイズ析出物で強化した熱延高張力鋼板780MPa級NANOハイテンの開発. あたりあ. vol. 42, no. 1, 2003, p. 70-72.
- 5) 船川義正, 瀬戸一洋. 微細炭化物で析出強化した高強度熱延鋼板の強度安定化. 鉄と鋼. vol. 93, no. 1, 2007, p. 49-56.
- 6) 金子真次郎ほか. 歪み時効硬化により高い衝撃吸収エネルギーを示す440MPa級良加工性熱間圧延鋼板. 川崎製鉄技報. vol. 32, no. 1, 2000, p. 67-68.
- 7) 金子真次郎ほか. 歪み時効硬化を活用した新高強度熱延鋼板の開発(第1報) - 開発鋼板の材料特性 -. 自動車技術会学術講演会前刷集. no. 11-01, 2001, 20015140.
- 8) 金子真次郎ほか. 塗装焼付け処理時に引張強度が上昇する新高強度熱延鋼板. あたりあ. vol. 41, no. 1, 2002, p. 48-50.
- 9) Kaneko, S. et al. "Development of hot-rolled sheet steel with the significant increase in tensile strength induced by strain age hardening." Proc. of SAE 2002 World Cong. Pennsylvania, 2002, SAE. no. 2002-01-0040.
- 10) 金子真次郎ほか. 焼付硬化により引張強度が上昇する高強度熱延鋼板の強化機構. 鉄と鋼. vol. 89, no. 10, 2003, p. 1057-1062.
- 11) 持田哲男ほか. 歪み時効活用引張強度上昇型熱延鋼板の自動車部品への適用性. 材料とプロセス. vol. 18, 2005, p. 1471.
- 12) 栗生直樹, 谷村真治. 日本機械学会第2回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集. 1994, p. 17.
- 13) 平本治郎ほか. 歪み時効硬化を活用した新高強度熱延鋼板の開発(第2報) - 有限要素法による機能性解析 -. 自動車技術会学術講演会前刷集. no. 11-02, 2001, 20015138.



瀬戸 一洋



船川 義正



金子真次郎