

サスペンション，シャシー部品用高強度鋼板 成形性と耐久性に優れた重要保安部品用高強度熱間圧延鋼板

High Strength Steel Sheets for Automobile Suspensions and Chassis Use —Hot-Rolled High Strength Steel Sheets

Having Excellent Press Formability and Durability for Critical Safety Parts—

清水 哲雄 SHIMIZU Tetsuo JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 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 薄板研究部 主任研究員(副課長)

要旨

JFE スチールはサスペンションやシャシーなどの自動車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伸びと高い穴広げ率を併せ持った析出強化型新熱間圧延高強度鋼板「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新高強度熱間圧延鋼板「BHT 鋼板 (bake hardenable steel with tensile strength increase)」を開発した。本稿では鋼板の特徴と特性について述べる。

Abstract:

JFE Steel succeeded in developing the following two types of new hot-rolled high strength steel sheet for automobile suspension and chassis use: (1)“NANO-Hiten”, which is strengthened by precipitates refined to the size of several nanometers, gives an excellent balance of elongation and hole-expansion ratio, and (2)“BHT steel (bake hardenable steel with tensile strength increase)”, which uses strain aging, gives lower strength and high formability during forming and a large increase in tensile strength after paint baking, resulting in higher fatigue limit and crashworthiness.

1. はじめに

自動車の走行エネルギー消費低減方策として、パワートレーンの効率改善や新システムへの移行¹⁾などとともに、車両の軽量化は極めて重要であり、車両重量の約25%を占める車体の軽量化が重要な技術課題となっている²⁻⁴⁾。

一方で、自動車の衝突安全規制の強化や衝突試験結果の情報公開の開始にともない、耐衝突特性に優れた車体の開発が進められている。これらの車体では、板厚の上昇や補強部材の増加などに起因して車体重量は増加傾向にある⁵⁾。

これらの社会的背景から、車両の軽量化と耐衝突特性の向上に対して、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おり、高強度鋼板の適用拡大は自動車車体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。

車体部品の中で、サスペンションやシャシーは重要保安部品として位置付けられており、部品としての機能の他に

高い信頼性を要求される。これら部品への高強度鋼板の適用は単なる車体重量の軽減効果だけでなく、乗り心地、操縦安定性の向上などの効果も生む。一方、実際の適用には複雑な部品形状を作り上げるための優れたプレス成形性に加えて、組み立て時の溶接性、完成車としての耐食性や耐疲労特性、さらには衝突時の耐衝撃特性など多機能な高強度鋼板が必要とされる。

本報告ではサスペンションやシャシーなどの自動車部品への使用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て高い伸びと高い穴広げ率をともに実現した析出強化型新熱延高強度鋼板「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新高強度熱間圧延鋼板「BHT 鋼板」の二つを紹介する。

2. 析出強化型新熱間圧延高強度鋼板 「NANO ハイテン」

2.1 NANO ハイテンの原理と特徴

サスペンションやシャシーなどの足回り部品では張り

出しとパーリングなどの伸びフランジ加工が複合した成形が多用されるため、鋼板には伸びと穴広げ率の二つの特性が求められる。これらの課題を解決するため、新たな視点で 780 MPa 級高強度熱間圧延鋼板の開発に取り組み、ユニークな特性を持つ鋼板、NANO (new application of nano obstacles for dislocation movement) ハイテンの開発・商品化に成功した⁶⁾。

NANO ハイテンの特長は以下の 3 点である。

- (1) 加工性に優れたフェライト単相組織を有する。
- (2) 数ナノメートル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。

伸び・穴広げ率バランスに及ぼす組織の影響を Fig. 1 に示す。dual phase 鋼に代表される複合組織では、高い伸びが得られる反面、穴広げ率が低い。一方、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い。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率に着目し、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⁷⁾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 として析出する 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

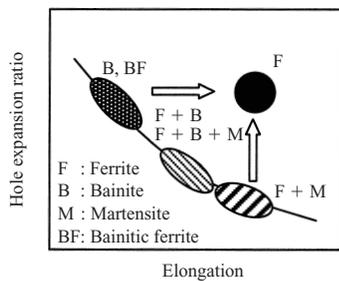


Fig. 1 Effect of microstructure on elongation-hole expansion ratio balance

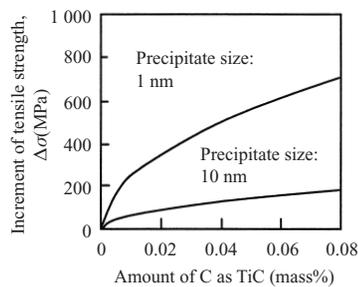


Fig. 2 Effects of size and amount of precipitates on the increment of tensile strength

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⁸⁾。

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。組織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。EDX および ICP 分析の結果から、この析出物は (Ti, Mo)C と確認された。

Fig. 3 は鋼板を 650 に再加熱し、等温保持した後の常温での引張強度の低下量 (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度の大幅な低下が認められるのに対し、NANO ハイテンでは 80×10^3 s 保持しても引張強度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。

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何ら変わりはなく、600 以上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

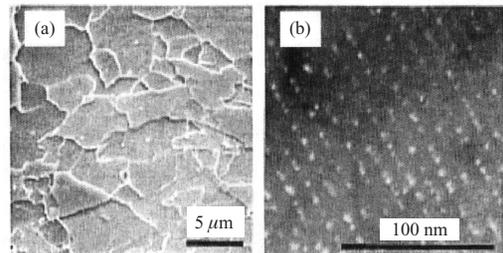


Photo 1 Microstructure (a) and precipitates (b) of NANO HITEN

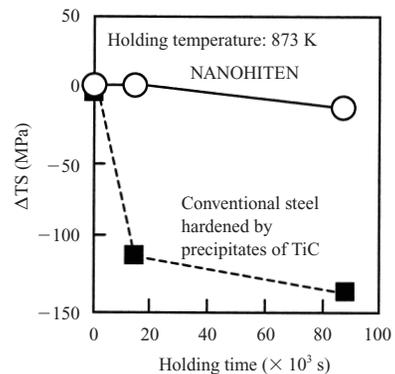


Fig. 3 Comparison in thermal stability of strength between NANO HITEN and conventional HSLA steel

ライト変態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、熱間圧延中には析出が生じないため、780 MPa 級 NANO ハイテンの圧延荷重は従来の 540-590 MPa 級鋼相当と小さく、従来の 780 MPa 級鋼に比べて板厚が薄く、かつ幅の広い商品が製造できるのも特長である。

2.2 NANO ハイテンの諸特性と適用状況

NANO ハイテンの伸び・穴広げ率バランスを従来の析出強化鋼板および高伸びフランジ熱間圧延高強度鋼板と比較した結果を Fig. 4 に示す。NANO ハイテンは従来鋼と比較して非常に優れた伸び・穴広げ率バランスを示す。これは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。

Fig. 5 に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す。一般に母材強度が高くなるにつれて疲労限は上昇する。しかしながら、従来の熱間圧延鋼板では 590 MPa を超えると母材強度の上昇に対す

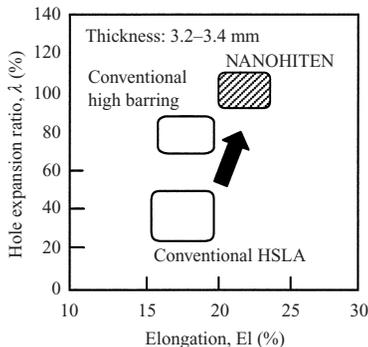


Fig. 4 Comparison of El-λ balance in 780 MPa grade hot-rolled steels

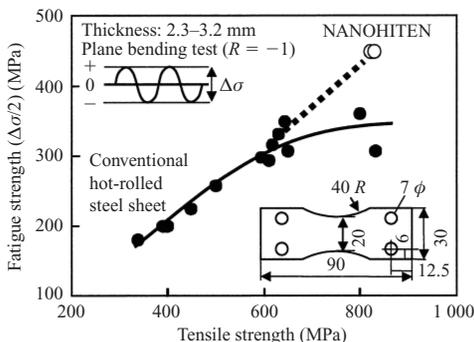


Fig. 5 Comparison of fatigue strength between NANO HITEN and conventional HSLA steel

る疲労限の上昇量が小さくなる。これに対し、NANO ハイテンは母材強度に見合う疲労強度が得られる。これは Si 添加量の低減による良好な表面性状によるものと考えられる。

780 MPa 級 NANO ハイテンは、前述したような優れた特徴からシャシー、アーム部品を中心に採用が進んでいる。現在数百トン/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、590, 980 MPa 級や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. ひずみ時効活用新高強度熱延鋼板「BHT 鋼板」

3.1 BHT 鋼板の原理と特徴

熱間圧延後の高精度の冷却制御により、鋼中の固溶 N 量を適正に調整するとともに結晶粒径の微細化を施すことにより、成形時には低強度で加工性に優れ、塗装焼付け処理後には大きな引張強度上昇を示し、かつ耐常温時効性の良好な熱間圧延鋼板、BHT (bake hardenable steel with tensile strength increase) 鋼板を開発した⁹⁻¹⁴⁾。すなわち、BHT 鋼板は従来鋼板とまったく同様のプレス成形性を有し、部品としては従来鋼板を上回る高強度のハイテンを適用したのに匹敵する性能を容易に得ることができる。

440 MPa 級の BHT 鋼板の代表的な組成を Table 1 に、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 2 に示す。

BHT 鋼板は、C に比較して熱間圧延温度域での固溶度の大きい N を利用して高いひずみ時効硬化能を実現している。そのため鋼板中の固溶 N を確保する目的で、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

Table 1 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	0.0068

Table 2 Typical mechanical properties of TS 440 MPa grade BHT steel (Thickness: 1.4 mm)

	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	BH* (MPa)	BHT** (MPa)
Developed steel	370	478	34	95	57
Conventional steel	347	480	34	14	9

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

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

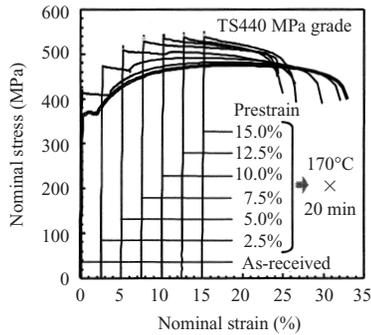


Fig. 6 Stress-strain curves for TS 440 MPa grade BHT steel with different amount of prestrain after strain aging

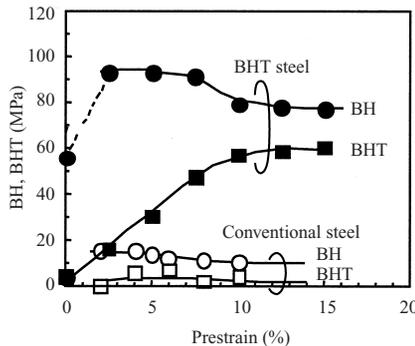


Fig. 7 Effect of prestraining on BH and BHT values for BHT steel after strain aging ($t = 1.4 \text{ mm}$)

偏析させている。

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。開発鋼板は従来の BH 鋼板とは異なり、ひず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。

BHT 鋼板に一軸引張により 0-15% の予歪を付与した後、オイルバスにて $170 \times 20 \text{ min}$ の焼付け処理を施した時の BH 量および BHT 量に及ぼす予歪量の影響を従来鋼板と比較して Fig. 7 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、引張強度の上昇量である。

従来鋼板の BH 量および BHT 量はいずれも低いものであり、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% の予歪量で約 100 MPa 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 量は予歪量の増加とともに上昇し、予歪量が 10% では約 60 MPa の値を示す。なお、10% 以上の予歪量の増加による BHT 量の変化は小さい。

Photo 2 に、BHT 鋼板の引張試験後の TEM 組織に及ぼす塗装焼付け処理の影響を示す。Photo 2 (a) は、10% の予歪を付与した BHT 鋼板を塗装焼付け処理した後、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、塗装焼付け処理をしないで 14.5% まで変形させた場合である。塗装焼付け処理をした材料には、転

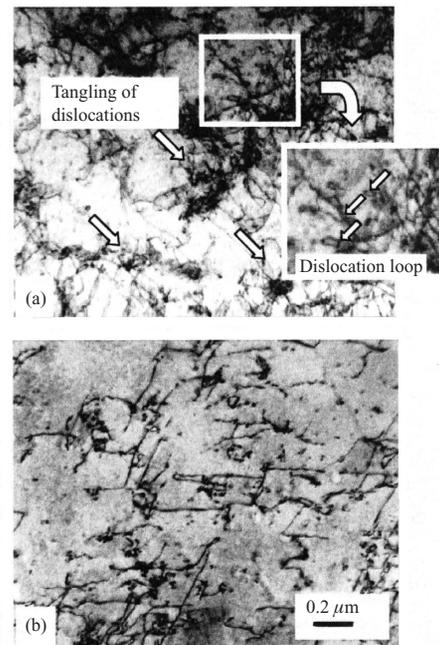


Photo 2 TEM images showing dislocation networks induced by tensile strain with or without baking treatment in BHT steel (a) 10% prestrain $170^\circ\text{C} - 20 \text{ min}$ 4.5% strain, (b) 14.5% strain

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、塗装焼付け処理を施していない材料の転位密度は、変形量が同じであるにもかかわらず低い。これは、予歪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、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。

以上のように、BHT 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。

3.2 BHT 鋼板の諸特性と適用状況

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 の引張強度上昇がある。この TS 上昇による疲労特性、耐衝突特性の向上が期待される。

440 MPa 級 BHT 鋼板の平面曲げ疲労試験による S-N 線図を、ひずみ時効処理の有無で比較して Fig. 8 に示す。10% の予歪を付与した後、 $170 \times 20 \text{ min}$ の塗装焼付け処理をすることにより、疲労強度は低サイクルから高サイクルのいずれの領域においても約 60 MPa 上昇した。疲労限は、原板では 221 MPa であったものが、ひずみ時効処理により 276 MPa まで上昇した。同時に、耐久比も原板で

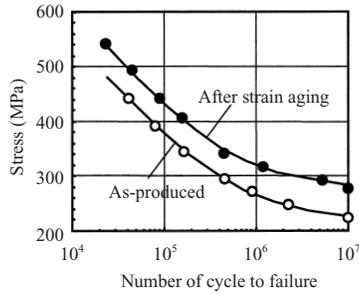


Fig. 8 Influence of strain age hardening on fatigue strength for BHT steel

は0.44であるのに対し、ひずみ時効処理により0.50に上昇し、ひずみ時効硬化により疲労特性が著しく向上する。

耐衝突特性を評価するため、ひずみ速度を約 2000 s^{-1} とした高速引張試験により高速変形特性を調べた。試験は原板まま、および10%の予歪を付与後、 $170 \times 20 \text{ min}$ の塗装焼付け処理したものについて行い、応力値をひずみ量15%まで積分して吸収エネルギーを算出した。Fig. 9に高速変形時の吸収エネルギーに及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、BHT鋼板は従来鋼板と同一の相関関係上にある。一方、10%の予歪を付与した後、塗装焼付け処理した場合にも、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BHT鋼板の方が従来鋼板に比較して高い値を示す。

従来鋼板では主に加工硬化により吸収エネルギーが約 10 MJm^{-3} 上昇するが、BHT鋼板では加工硬化に加えて、ひずみ時効硬化による強度上昇の寄与があるため、約 16 MJm^{-3} 上昇する。この吸収エネルギーの上昇に対するひずみ時効硬化の寄与は、原板の引張強度上昇量に換算すると約60 MPaに相当する。これは先に示した引張試験により測定される強度上昇(BHT量)が、高速変形時にも同様の効果として現われていることを示している。

本試験でのデータを基にしたFEM解析での、BHT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¹⁵⁾によれば、BHT鋼板のひずみ時効硬化の寄与は板厚では熱間圧延鋼板のハーフゲージ(0.1 mm)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されている。

ひず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。BHT鋼板は、1年間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、Elの低下は高々2%と特性変化は極めて小さい。BHT鋼板では固溶Nの粒界への偏析が確認されており、結晶粒の微細化による粒界面積の増大で、粒内のN量が低減し、室温時効が抑制されたものと推察される。

本稿では440 MPa級を中心に紹介したが、同様の原理で370 MPa級から590 MPa級までの範囲の品揃えが完了

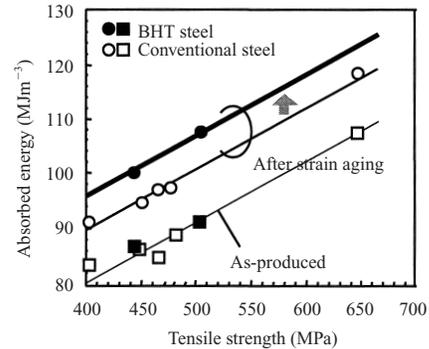


Fig. 9 Comparison in absorbed energy under high strain rate tensile testing between BHT steel and conventional steel

しており、合金化溶解亜鉛めっきも可能である。

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。今後、開発鋼板の自動車への適用がますます拡大すると考えられる。

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、二つの鋼板を紹介した。

- (1)「NANO ハイテン」: 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ともに実現した析出強化型新熱延高強度鋼板
- (2)「BHT鋼板」: 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新高強度熱間圧延鋼板

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る。また自動車車体用鉄鋼材料の今後のさらなる進化を期待させるものであり、鉄鋼材料による自動車車体の高機能化、信頼性向上を予見させる。

参考文献

- 1) 榎直人. 製品開発におけるCO₂削減への取り組み. トヨタ技術. vol. 47, no. 2, 1997, p. 8-13.
- 2) 大橋正昭. これからの自動車と高強度薄鋼板. 鉄と鋼. vol. 68, no. 9, 1982, p. 1136-1146.
- 3) 大久保宣夫ほか. 車体軽量化の考え方と車体材料. 塑性と加工. vol. 21, no. 229, 1980, p. 92-104.
- 4) 濱中隆夫. 自動車軽量化と素材. 塑性と加工. vol. 33, no. 375, 1992, p. 337.
- 5) 栗山幸久ほか. 高強度鋼材を用いた車の軽量化の現状と今後の動向. 自動車技術. vol. 55, no. 4, 2001, p. 51-57.
- 6) 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780 MPa級NANOハイテンの開発. まてりあ. vol. 42, no. 1, 2003,

- p. 70-72 .
- 7) Gladman, Terry 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.
 - 8) Funakawa, Yoshimasa et al. Development of high strength hot-rolled steel sheet consisting of ferrite and nanometer-sized precipitates. Submitted to ISIJ Int.
 - 9) 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 440 MPa 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.
 - 10) 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, 20015140, 2001 .
 - 11) 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．材料とプロセス．vol. 14, 2001, p. 1386 .
 - 12) 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．まてりあ．vol. 41, no. 1, 2002, p. 48-50 .
 - 13) Kaneko, Shinjiro 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.
 - 14) 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 .
 - 15) 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, 20015138, 2001 .



清水 哲雄



船川 義正



金子真次郎