

塗装焼付け処理により引張強度が上昇する 新高強度熱間圧延鋼板「BHT 鋼板」*

川崎製鉄技報
35 (2003) 1, 28-32

Development of Hot-Rolled Sheet Steel with Significantly Increased Tensile Strength Induced by Strain Age Hardening



金子 真次郎
Shinjiro Kaneko

技術研究所
薄板研究部門
主任研究員(主席掛長)



平本 治郎
Jiro Hiramoto

技術研究所
加工技術開発センター
主任研究員(課長)



石川 孝
Takashi Ishikawa

千葉製鉄所
商品技術部薄板室
室長(課長)

要旨

歪み時効硬化を活用することにより、著しい引張強度の上昇を示す新しいタイプの高強度熱間圧延鋼板(BHT 鋼板)を開発した。開発鋼板は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強度上昇を示すため衝突吸収エネルギーや疲労特性を著しく向上させることができる。熱間圧延プロセスにおいて固溶N量の適正化および結晶粒の微細化を施すことにより、高い歪み時効硬化能と耐常温時効性を両立させている。本鋼板を自動車の構造部材に適用することにより、プレス成形性を損なうことなく自動車の耐衝突特性や耐久性能の向上が可能であり、車体の軽量化にも寄与することができる。

Synopsis:

A new type of bake-hardenable high strength hot-rolled sheet steel has been developed, which shows remarkable increase in tensile strength as well as yield strength after strain age hardening. The new sheet steel possesses excellent crashworthiness and high fatigue strength, and also shows good formability equal to that of conventional high strength sheet steels. This unique combination of properties makes it possible to reduce the weight of the car body by using thinner gauge material when the new sheet steel is applied as crash-resistant parts and underbody parts.

1 緒 言

近年、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う、自動車メーカー各社において耐衝突特性に優れた車体構造の開発が行なわれている。これらの車体構造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¹⁾。一方では、環境問題の観点からCO₂の排出規制が強化されており、燃費向上を目的とした車体軽量化の要求がある²⁻⁴⁾。これらの課題に対して、部材の強度上昇と板厚低減による軽量化が可能であることから、車体構造部品への高強度鋼板の適用が検討されている⁵⁻⁸⁾。しかし、一般に鋼板強度の上昇とともに成形性は低下するため⁹⁻¹¹⁾、強度と成形性を兼ね備えた鋼板の開発が強く望まれている。

当社では、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を開発した¹²⁻¹⁶⁾。開発鋼板の歪み時効処理後の応力-歪み線図を従来のBH鋼板¹⁷⁻¹⁹⁾と比較してFig. 1に模式的に示す。従来のBH鋼板では塗装焼付け処理により降伏強度が上昇するが、塑性変形領域での変形

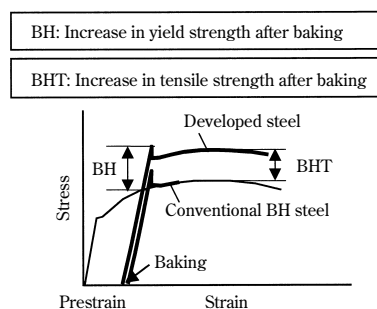


Fig. 1 Stress-strain relationship of developed steel after strain aging

応力は原板と同等になってしまう。このため従来のBH鋼板は耐デント性が必要な自動車の外板への適用のみに限定されていた。一方、開発鋼板は歪み時効処理を施すことにより従来のBH鋼板を上回る著しい降伏強度の上昇を示すとともに、引張強度も上昇することが大きな特長である。したがって本開発鋼板では耐衝突特性や疲労特性が必要な自動車の構造部材への適用が可能となっている。

本報では、開発鋼板の種々の材料特性について紹介するとともに、自動車車体への開発鋼板の適用について検討した結果を述べる。

* 平成14年7月22日原稿受付

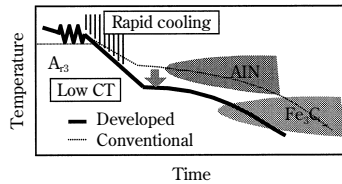
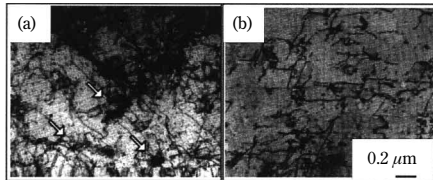


Fig. 2 Schematic diagram of hot-rolling cooling process



(a) 10% prestrain → 170°C × 20 min → 4.5% strain
(b) 14.5% strain

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

2 開発鋼板の製造原理と引張強度上昇機構

本開発鋼板は、C に比較して熱間圧延温度域での固溶度の大きい N を利用して高い歪み時効硬化能を実現している。開発鋼板の熱間圧延プロセスの模式図を Fig. 2 に示す。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 AIN の析出を抑制している。さらに室温時効劣化を抑制するため、熱間圧延後に急速冷却を施すことにより結晶粒径を微細化して、固溶 N を安定な存在位置である結晶粒界へ偏析させている。このようにして、高い歪み時効硬化能と室温時効性を両立させている。

著者は、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転位下部組織におよぼす塗装焼付け処理の影響を示す。Photo 1 (a) は、10% の歪み付与後、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、図中に矢印で示すように転位ループや転位のタングリングが明瞭に観察され、塗装焼付け処理をしていない場合と比較して転位密度が増加していることが分かる。これは、歪みにより導入された転位が、塗装焼付け処理時に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かつ密に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。歪み付与後に時効処理を施した段階で、転位上に微細な析出物が存在しているのが確認された。転位のタングリング領域では、これらの析出物が転位の固着、増殖源として存在していると推定される。

転位密度の増加により X 線回折半価幅が大きくなることから、塗装焼付け処理の有無による X 線回折半価幅の変化を測定することで、この現象を検証した。なお、X 線回折半価幅は、(222) ピーク半価幅を測定し、無加工材に対する半価幅の増加率 ($\Delta d/d$) で評価した。X 線回折半価幅におよぼす塗装焼付け処理の影響を Fig. 3 に示す。塗装焼付け処理を施すことにより、X 線回折ピークの半価

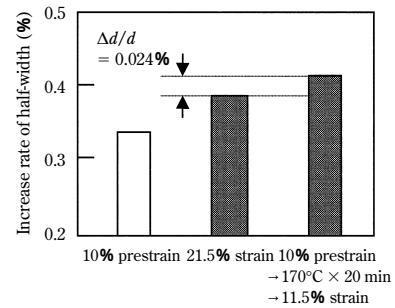


Fig. 3 Effect of baking treatment on (222) peak half-width of developed steel

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示唆された。

3 開発鋼板の諸特性

開発鋼板の自動車の構造部品への適用に対する基礎的な機能評価を目的として歪み時効硬化特性、成形性、高速変形特性、疲労特性、常温時効性について調査した。

3.1 供試鋼

実機において製造された TS440MPa 級の開発鋼板を供試鋼として各試験に用いた。その機械的性質の一例を Table 1 に示す。

3.2 歪み時効硬化特性

板厚 1.4 mm の開発鋼板から圧延方向に平行に JIS5 号引張試験片を採取し、引張試験に供した。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 の焼付け相当処理を施し、再度引張試験を行なった。このときの BH 量、BHT 量を測定し歪み時効特性を調査した。BH 量、BHT 量の定義は Fig. 1 に示す通りであり、BH 量は焼付け相当処理後の再引張試験時の降伏応力から予歪み付与時の応力を差し引いたものである。BHT 量は焼付け相当処理後の再引張試験時の引張応力から原板の引張応力を差し引いたものである。開発鋼板の 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. 4 に示す。従来鋼板の BH

Table 1 Typical mechanical property of developed steel ($t = 1.4$ mm)

YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	BH* (MPa)	BHT** (MPa)
370	478	34	95	57

*Increase in yield strength after strain aging (2% prestrain → 170°C × 20 min)

**Increase in tensile strength after strain aging (10% prestrain → 170°C × 20 min)

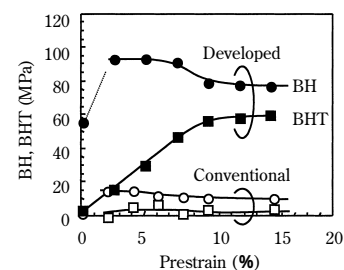


Fig. 4 Effect of prestrain on BH and BHT of developed steel

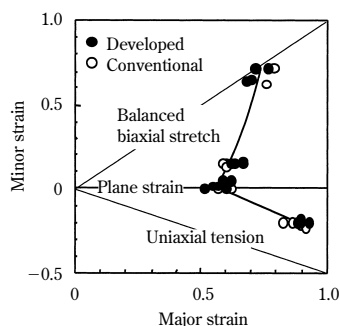


Fig. 5 Forming limit diagram of developed steel compared with that of conventional steel (Thickness: 1.6 mm)

量は予歪み量の増加とともに低下する傾向にあり、その値は高く 20 MPa である。一方、開発鋼板の BH 量は 2% の予歪み量において約 100 MPa の値を示す。BH 量は従来鋼板と同様に予歪み量が大きくなると低下する傾向にあるが、10% 以上の予歪み量においても約 80 MPa の高い値を示す。

また、従来鋼板の BHT 量は予歪み量によらず無視できる程度 of 小さいものであるのに対し、開発鋼板の BHT 量は予歪み量の増加とともに上昇し、予歪み量が 10% のときには約 60 MPa の値を示す。なお 10% 以上の予歪み量の増加による BHT の変化は小さい。

以上のように、開発鋼板に 10% 以上の歪みを付与することにより、焼付け相当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。

3.3 成形性

成形性を評価するために板厚 1.6 mm の開発鋼板を用いて種々のひずみ比にて成形試験を実施し、成形限界点を求め成形限界曲線図 (FLD: forming limit diagram) を作成した。ブランク材には 6 mm 径のスクライプドサークルを転写し、ひずみの測定は破断部測定法により行った。

開発鋼板の FLD を TS440MPa 級の従来鋼板と比較して Fig. 5 に示す。等 2 軸成形領域～平面歪み成形領域～1 軸成形領域のいずれの変形経路での成形においても、開発鋼板の成形限界点は従来鋼板のそれと同等であり、その成形性に遜色がないことが分かる。

すなわち、開発鋼板は高い歪み時効硬化能を有しながら、プレス成形時には同一強度レベルの従来鋼板と同等の成形性を有するといえる。

3.4 疲労特性

板厚 1.6 mm の開発鋼板について、両振りの平面曲げ疲労試験を実施した。試験は原板および一軸引張により 10% の予歪みを付与し、オイルバスにて 170°C × 20 min の焼付け相当処理を施したものについて行ない、S-N 線図を作成するとともに疲労限を求めた。

開発鋼板の S-N 線図を歪み時効処理の有無で比較して Fig. 6 に示す。10% の予歪みを付与した後、170°C で 20 min の焼付け相当処理を施すことにより、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 上昇する。開発鋼板の疲労特性の一覧を Table 2 に示す。疲労限は、原板の状態では 221 MPa であったものが、歪み時効処理を施すことにより 276 MPa まで上昇する。同時に耐久比も原板の状態では 0.44 であるのに対し、歪み時効処理を施すことにより 0.50 に上昇し、歪み時効硬化により疲労特性が著しく向上することが分かる。

以上の結果は、開発鋼板は疲労特性が重要な足回り部品などへの

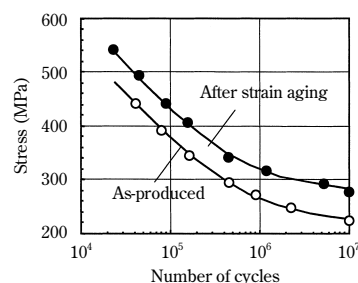


Fig. 6 Influence of strain aging on fatigue strength of developed steel

Table 2 Fatigue property of developed steel

	As received	After baking*
Fatigue limit	221	276 (MPa)
FL/TS	0.44	0.50

*10% Pre-strain → 170°C × 20 min

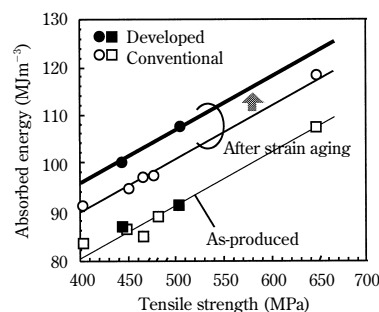


Fig. 7 Absorbed energy at high strain rate tensile testing of developed steel compared with conventional steel

適用に有効であることを示すものである。

3.5 高速変形特性

開発鋼板より平行部幅 2.5 mm、ゲージ長 3.8 mm の試験片を採取しホプキンソンプレスチャーパー方式²⁰⁾を用いた高速引張試験に供した。歪み速度は約 2000 s⁻¹ とした。試験は原板および一軸引張により 10% の予歪みを付与し、オイルバスにて 170°C × 20 min の焼付け相当処理を施したものについて行なった。応力 - 歪み関係より、応力値を歪み量 15% まで積分することにより吸収エネルギーを算出した。

開発鋼板の高速引張試験における吸収エネルギーと原板の TS との相関を従来鋼板と比較して Fig. 7 に示す。原板での吸収エネルギーは 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、170°C × 20 min の焼付け相当処理を施した場合にも、従来鋼板および開発鋼板のいずれも原板の場合と同様に、吸収エネルギーと原板の TS とは正の相関を示す。しかし、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、開発鋼板では加工硬化に加え歪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に対する歪み時効硬化の寄与は、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強度上昇 (BHT) が高速変形時にも同様の効果として現れている。

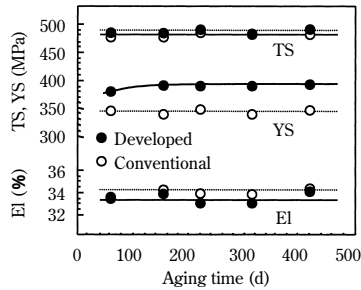


Fig. 8 Variation in mechanical properties during room temperature aging ($t = 1.6$ mm)

以上の結果は、耐衝突部品に対して開発鋼板の適用が有効であることを示すものである。

3.6 常温時効性

開発鋼板について伸び率 1.5% のスキンパス圧延を施した後、室温に放置し、約 3 ヶ月間隔で通年にわたり引張試験を実施し、機械的特性の経時変化を調査した。

開発鋼板の室温保持による機械的性質の変化を従来鋼板と比較して Fig. 8 に示す。1 年間保持した場合でも、TS の変化はほとんどなく、YS の上昇は約 30 MPa、El の低下は高々 2% 程度と特性変化は極めて小さい。

歪み時効硬化を活用した鋼板では、常温における特性の劣化が問題となることが知られていた。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。

4 有限要素法による機能解析

開発鋼板を自動車の構造部材へ適用した場合の耐衝突特性を検証するため、ハット形状の部材を仮定した有限要素法 (FEM) による衝突解析を行った。解析に使用したハット型部材の形状を Fig. 9 に示す。断面形状は 1 辺が 60 mm のハット型であり、コーナー R は 5 mm とした。部材の長さは 300 mm とし、フランジ部は 30 mm ピッチのスポット溶接を仮定している。プレス成形による歪み量と板厚減少は FEM による成形解析より導出した。ハット型部材のコー

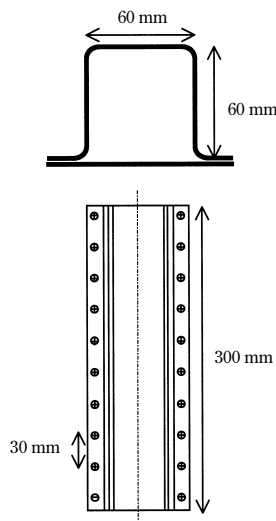


Fig. 9 Configuration of hat square column

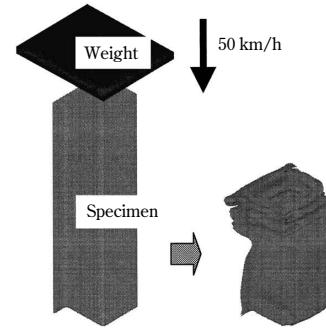


Fig. 10 Model of crash testing

Table 3 Mechanical properties of materials used in FEM analysis

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	
A	263	374	Conventional
B	332	465	Conventional
C	378	628	Conventional
D	387	500	Developed
E	287	400	Developed (Assumed)
F	487	600	Developed (Assumed)

ナー R 部の成形ひずみは 9%、たて壁部の成形ひずみは 0~15% とした。また、コーナー部および一般部の板厚減少率は 0%、たて壁部の板厚減少率は 10% とした。衝突解析は Fig. 10 に示すように、重量約 550 kg の剛体の重りをハット型部材の軸方向に時速 50 km で衝突させる軸圧縮モードの条件で行った。解析に使用した材料の特性値を Table 3 に示す。使用した材料は 370~590 MPa 級の強度レベルの異なる従来鋼板 (steel A~C) と、TS が 500 MPa の開発鋼板 (steel D) である。板厚は 1.4~1.6 mm のものを使用した。解析に使用した応力 - 歪み線図は、JIS5 号試験片によるひずみ速度 0.02 s^{-1} のデータとホプキンソンプレスチャーパー方式によるひずみ速度 2000 s^{-1} のデータを使用した。また、成形歪みの量を考慮するために、0~15% の予歪みを付与し、 $170^\circ \text{C} \times 20 \text{ min}$ の熱処理を行った後に引張試験を行って得られた応力 - 歪み線図を用いた。また、実測した引張強度 500 MPa の開発鋼板の応力ひずみ線図に $\pm 100 \text{ MPa}$ することにより、引張強度 400 MPa および 600 MPa の材料の応力 - 歪み線図を仮想的に作成し (steel E, F)、等価性定量化の解析に用いた。

ハット部材は軸方向の圧縮により上端部よりスポット溶接ピッチに対応したアコーディオン状に変形する (Fig. 10)。典型的な荷重 - 変位線図を Fig. 11 に示すが、荷重 - 変位曲線は衝突と同時に大きな荷重のピークを示した後は、変形の進行とともに蛇腹個々の変形に応じた荷重の振動を示す。このときの吸収エネルギーと母材の TS との関係を示す。吸収エネルギーは荷重 - 変位線図

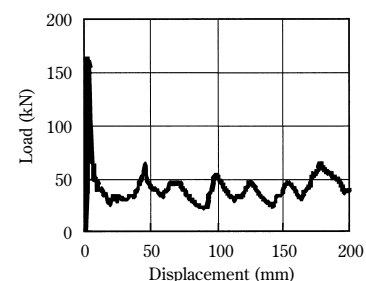


Fig. 11 Typical load-displacement curve of hat square column

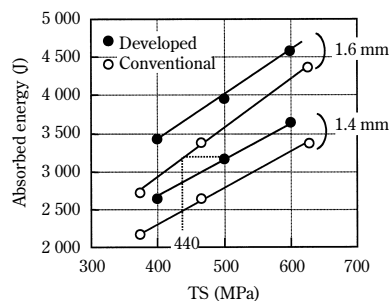


Fig. 12 Relationship between absorbed energy and tensile strength

を変位 60 mm まで積分することにより求めた。いずれの板厚の場合においても、従来鋼板および開発鋼板の吸収エネルギーと原板の TS とは正の相関を示す。しかし、その絶対値は開発鋼板の方が従来鋼板に比べて高い値を示す。高速変形特性から予測されたように、開発鋼板では歪み時効硬化による強度上昇の寄与があるためである。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強度上昇 (BHT) が同様の効果として現れている。また、歪み時効硬化による寄与を板厚に換算すると約 0.1 mm、重量で 7% の軽量化に相当した。

以上の結果から、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車体の軽量化が可能となることが明らかとなった。

5 結 言

新しく開発した歪み時効活用型高強度熱間圧延鋼板 (BHT 鋼板) を用いて種々の材料特性の調査および機能解析の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 開発鋼板における引張強度の上昇は、予歪み時に導入された転位が塗装焼付け処理により強固に固着され、塗装焼付け後の塑性変形時に転位の増殖が促進され、転位が転位群の中を運動するのに必要な外力が上昇したためと考えられる。
- (2) 開発鋼板では、10% 以上の予歪みを付与後、焼付け相当処理を施すことにより、80 MPa 以上の降伏強度の上昇、約 60 MPa の引張強度の上昇を示す。
- (3) 開発鋼板における引張強度上昇効果により、疲労特性が向上するとともに、高速変形時の吸収エネルギーが増加する。
- (4) 開発鋼板は原板 TS レベルが同一の従来鋼板と同等の成形性を有する。
- (5) 開発鋼板では 1 年間の室温保持での YS の上昇は約 30 MPa、El の低下は高々 2% 程度と常温時効劣化は極めて小さい。
- (6) 開発鋼板の衝突特性に対する歪み時効硬化の寄与は板厚では約 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。

本開発鋼板は自動車に要求されている安全性、環境問題に対して大きく貢献するものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 栗山幸久, 高橋 学, 大橋正昭: 自動車技術, 55(2001), 51
- 2) 大橋正昭: 鉄と鋼, 68(1982), 1136
- 3) 大久保宣夫: 塑性と加工, 21(1980)229, 92
- 4) 濱中隆夫: 塑性と加工, 33(1992)375, 337
- 5) 安田 顕, 古君 修, 清野芳一: 川崎製鉄技報, 32(2000)1, 1-6
- 6) 柴田真志: 第 180 回塑性加工シンポジウム, (1998), 9
- 7) 三浦和哉, 高木周作, 加藤俊之, 松田 修, 谷村真治: まてりあ, 35(1996)5, 570
- 8) K. Miura, S. Takagi, T. Hira, and O. Furukimi: SAE Technical Paper, No. 980952
- 9) 林 央: 自動車技術, 49(1995), 5
- 10) 飯塚栄治, 比良隆明, 古君 修: CAMP-ISIJ, 12(1999), 1222
- 11) 飯塚栄治, 平本治郎, 比良隆明, 古君 修: 自動車技術会学術講演会, (1999)81-99, 21
- 12) 金子真次郎, 平本治郎, 松岡才二, 坂田 敬: 自動車技術会学術講演会前刷集, (2001)11-01, 1
- 13) 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, (2001)11-01, 5
- 14) 金子真次郎, 平本治郎, 松岡才二, 坂田 敬: CAMP-ISIJ, 14(2001), 1386
- 15) 金子真次郎, 登坂章男, 坂田 敬, 古角文雄, 菱沼 至: まてりあ, 41(2002), 48
- 16) S. Kaneko, J. Hiramoto, S. Matsuoka, A. Tosaka, and K. Sakata: SAE Technical Paper, No. 2002-01-0040
- 17) 佐藤 進, 入江敏夫, 橋本 修: 鉄と鋼, 68(1981)9, 236
- 18) 黒沢光正, 佐藤 進, 小原隆史, 角山浩三: 川崎製鉄技報, 19(1987)2, 119
- 19) 佐藤 進, 岡田 進, 加藤俊之, 橋本 修, 花澤利健, 恒川裕志: 川崎製鉄技報, 23(1991)4, 293
- 20) 三浦和哉, 高木周作, 古君 修, 谷村真治: 材料, 47(1998)10, 1053