

NANO ハイテン[®] の金属学的特徴と温間成形の適用

Metallurgical Feature of NANO-HITEN and Its Application to Warm Stamping

船川 義正 FUNAKAWA Yoshimasa 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)・博士 (工学)
(現研究企画部 主任部員)

藤田 毅 FUJITA Takeshi JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
(現西日本製鉄所 薄板商品技術部自動車室 主任部員)

山田 克美 YAMADA Katsumi JFE スチール スチール研究所 分析・物性研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)

要旨

NANO ハイテン[®]は、フェライト組織を超微細炭化物で高強度化することで、440 MPa 級鋼板と同等の伸びフランジ加工性を維持したまま 780 MPa 級の高強度を実現した。NANO ハイテン[®]の微細炭化物は相界面析出現象で均一な大ききでフェライト中に分散する。この炭化物は従来の TiC と比べて 1/10 の大ききで、析出強化量は 300 MPa にもものぼる。この NANO ハイテン[®]の微細炭化物は加熱に対して粗大化しにくいことから、ハイテンには適用できなかった温間成形にも適していると考えられる。そこで、980 MPa 級 NANO ハイテン[®]の温間成形性を調査したところ、980 MPa 級 NANO ハイテン[®]は温間成形で 590 MPa 級と同等の成形性を発現することが分かった。

Abstract:

NANO-HITEN in 780 MPa grade of tensile strength has achieved excellent stretch flange formability as the same level of 440 MPa grade with strengthening ferrite grains by nanometer-sized carbides. Uniform fine carbides in NANO-HITEN are dispersed into ferrite grains by interphase-precipitation phenomena. The diameter of the fine carbides became 1/10 compared with the conventional TiC, and the amount of precipitation-strengthening increased to 300 MPa. Since fine carbides in NANO-HITEN are hardly coarsened, NANO-HITEN is suitable to warm stamping. Experimental results of warm stamping indicated that warm stamped NANO-HITEN with 980 MPa grades showed good formability at the same level of cold stamped high strength steel with 590 MPa grade.

1. はじめに

自動車シャシ部品 (サスペンションやフレームなどの部品) は冷間圧延鋼板が主体のボディ部品とは異なり、板厚の厚い熱間圧延鋼板や鋳造品が用いられており、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。重量のあるこれらのシャシ部品の軽量化を目的として、厚さ 2.6 ~ 4 mm で引張強さ 440 ~ 590 MPa 級の鋼板が一般的に用いられるようになってきた。シャシ部品のプレス成形には、鋼板の伸びフランジ加工性が特に重要であり、現在でも優れた伸びフランジ加工性を追求した開発が行われている。

伸びフランジ加工性の向上策として、高い伸びを示すことで知られる複合組織 (Dual phase) 鋼板や低合金残留オーステナイト (TRIP) 鋼板の各相の分率や局所的な硬さ分布の改良が行われてきたが、いずれも本質的な解決には至っていない。また、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 級以上となると高強度化が困難であったり、伸びフランジ加工性が向上しても伸びが顕著に低下してしまうなどの弊害が避けられず、実用面での問題を多く抱えていた。

この状況に対し、全く新しい組織設計思想のもとシャシ部品に適した高強度熱間圧延鋼板を開発した。JFE スチールはこれを NANO ハイテン[®]と命名している。NANO ハイテン[®]は、ナノメートルサイズの超微細炭化物を分散させたフェライト結晶粒で構成される組織を有する高強度熱間圧延鋼板であり、従来のフェライト相と硬質相とで構成される Dual phase 鋼板や TRIP 鋼板に代表される組織制御型高強度鋼板とは異なる機械的性質を実現した。このユニークな特性は、当初の目標であったシャシ部品への適用に留まらず、NANO ハイテン[®]をボディ部品でも使用可能なものとしている。

本稿では、780 MPa 級 NANO ハイテン[®]を中心に述べた後に、さらなる高強度への展開と温間成形について言及し、シャシ部品からボディ部品への適用拡大にも触れる。

2. NANO ハイテン[®]の特徴

2.1 NANO ハイテン[®]の組織

NANO (New application of nano obstacles for dislocation movement) ハイテン[®]は、炭化物を用いてフェライト結晶粒そのものを硬化させることで鋼板を強化しており、次に示す特長がある。

- (1) 加工性に優れたフェライト単一組織である。
- (2) 数ナノメートルにまで微細化した炭化物で強化されている。
- (3) 炭化物の熱的安定性が極めて高い。
- (4) 析出強化で高強度化するため Si などの固溶強化元素を無添加とすることが可能である。

NANO ハイテン[®]のミクロ組織と比較として従来の組織強化型高強度鋼板の走査型電子顕微鏡写真を**写真1**に示す。従来の高強度鋼板はフェライト結晶粒間に大きき数マイクロメートルのマルテンサイトなどの硬質相を分散させることで高強度化を達成しているのに対し、NANO ハイテン[®]は加工性に富んだフェライト結晶粒のみが観察される。そして、NANO ハイテン[®]のフェライト結晶粒は従来の高強度鋼板と比べて微細である。

NANO ハイテン[®]を高強度化しているナノメートルサイズの炭化物について述べる。炭化物を含まないフェライト組織、たとえば軟鋼の強度は引張強さで 300 MPa 程度しかない。これを 780 MPa 級にまで高強度にしているのがフェライト結晶粒内に分散するナノメートルサイズの炭化物である。NANO ハイテン[®]のフェライト結晶粒内の炭化物の透過型電子顕微鏡写真を**写真2**に示す。比較として従来の高強度鋼板中に析出させた場合の炭化物も示した。NANO ハイテン[®]の写真の左上から右下に列状に並んで観察される数ナノメートルの大きさの点状のコントラストが NANO ハイテン[®]の炭化物で、従来の高強度鋼板の数十ナノメートルの大きさの粗大な炭化物と比べると顕著に微細化しているこ

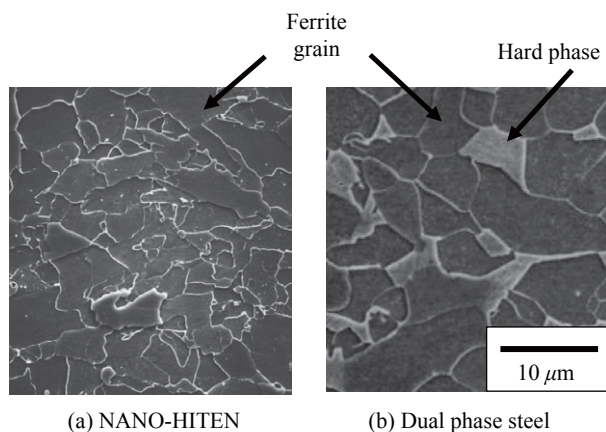


写真1 組織の走査型電子顕微鏡写真

Photo 1 Scanning electron micrographs showing microstructures

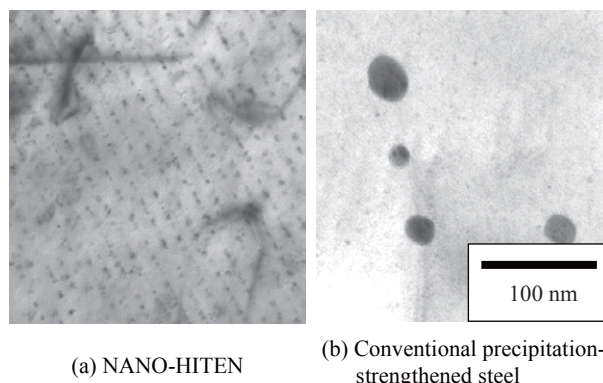


写真2 鋼中の炭化物を示す透過型電子顕微鏡写真

Photo 2 Transmission electron micrographs showing carbides

とが確認できる。炭化物が列状を呈するのは、炭化物が相界面析出という現象で析出したことを示している。相界面析出は、高温のオーステナイトから低温のフェライトに相変態するとき、オーステナイト-フェライト界面に炭化物が析出する現象であり、Morrison²⁾により初めて報告された現象である。

NANO ハイテン[®]の炭化物をさらなる高倍率で観察したときの透過型電子顕微鏡写真を**写真3**に示す。炭化物は円盤状の形態であり、写真3は円盤の厚さ方向が紙面と平行となる方向から観察している。炭化物はフェライト結晶と Baker-Nutting の関係³⁾ ($(001)\text{carbide} // (001)\text{ferrite}$, $\langle 100 \rangle\text{carbide} // \langle 110 \rangle\text{ferrite}$) にあり、円盤状の炭化物の上下面とフェライトとの界面で原子は一対一に対応しており、整合と呼ばれる界面を形成している。

上記のナノメートルサイズへの炭化物微細化により高強度が得られることを描いた模式図を**図1**に示す。強化量の計算では、Ashby-Orowan の式⁴⁾、Pickering の固溶強化量の経験式⁵⁾を仮定して降伏強度を算出した後に降伏比を 0.9 と仮定して引張強さを計算した。図1では、従来の高強度

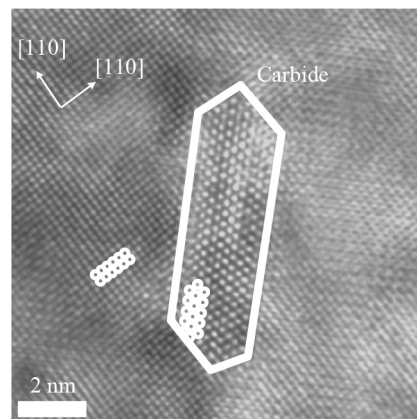


写真3 NANO ハイテン[®]の炭化物を示す高解像度透過型電子顕微鏡写真

Photo 3 Transmission electron micrographs showing carbide in NANO-HITEN

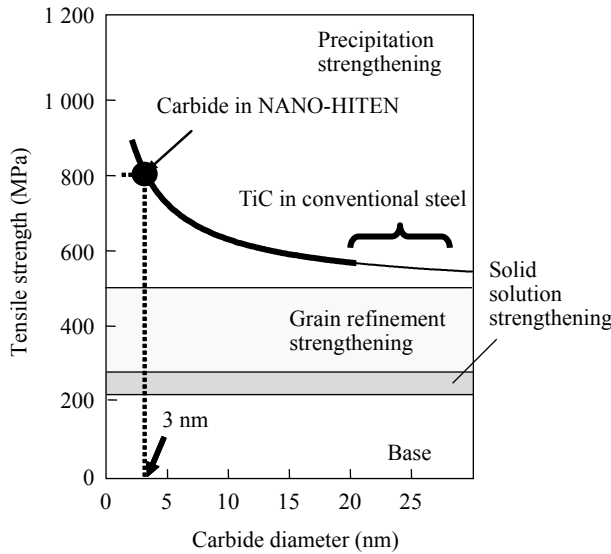


図1 炭化物径と引張強さの関係を示す模式図

Fig. 1 Schematic diagram of relationship between amount of tensile strength and carbide diameter

鋼板中に析出する炭化物では 100 MPa 程度の析出強化量しか得られないのに対し、NANO ハイテン[®]の析出強化量は 300 MPa と高く、これにより引張強さで 780 MPa 級の高強度を実現した。

これら微細炭化物は一般的には Ostwald 成長で顕著に粗大化すると考えられてきたが、NANO ハイテン[®]の炭化物は超微細でありながら熱的に安定である。

これは、従来の TiC や NbC のような 1 種類の炭化物構成元素による炭化物ではなく、2 種類以上の炭化物構成元素による炭化物を用いることで初めて実現できた技術である⁶⁾。図 2 に、NANO ハイテン[®]および実験室での理想的な熱履歴を与えて NANO ハイテン[®]と同様な微細 TiC を分散させた鋼を 650℃ で一定時間保持した後の常温での硬さを示す。NANO ハイテン[®]の硬さは 650℃での 24 時間の保持でも硬さの低下はほとんど認められないのに対し、TiC で強化した鋼板の硬さは顕著に低下した。以上より、NANO ハイテン[®]

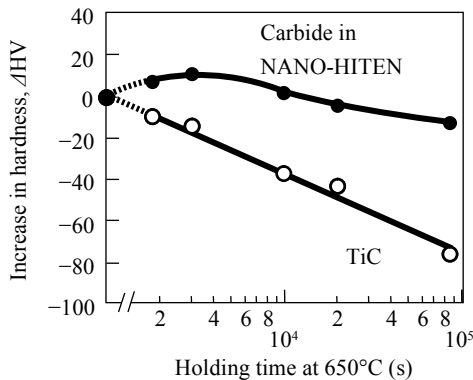


図2 650℃保持後の硬さ変化

Fig. 2 Change in hardness of sample after holding at 650°C

のナノメートルサイズの炭化物は熱安定性も優れていることが明らかとなった。

2.2 NANO ハイテン[®]の加工性

従来の組織制御型高強度鋼板では、高強度化にともない伸びフランジ加工性は顕著に低下する。これは、組織制御型鋼板では、440 MPa 級から高強度化するために硬質相の体積率を増加させているためである。この状況を説明する模式図を図 3 に示す。伸びフランジ加工性の指標には日本鉄鋼連盟規格 (JFS) にある穴拡げ率を用いた。穴拡げ試験では、穴拡げに先立ち鋼板に打ち抜き穴を開けるが、この打ち抜き時にフェライトと硬質相との界面よりポイドが発生してしまう。続く穴拡げ時にこのポイドの連結で割れが発生しやすくなることから、穴拡げ率を向上させるにはポイドの発生を抑制することが必要で、これにはフェライトと硬質相の硬さの比を低減することが有効である⁷⁾。NANO ハイテン[®]は硬質相を含まないことから、仮想的に硬質相の硬さをフェライトと同一の物としたと考えることで優れた穴拡げ率が得られたと考えられる。

以上のように優れた加工性を有する NANO ハイテン[®]はシャシ部品の 780 MPa 級化を推し進め、複数種類の自動車にすでに搭載されており、軽量化に大きく寄与している。

2.3 NANO ハイテン[®]の高強度化

NANO ハイテン[®]は微細炭化物で高強度化しているため、炭化物量を増やすことでさらなる高強度を得ることができる。図 4 に 780 から 980 MPa 級や 1 180 MPa 級への高強度化の模式図を示す。縦軸は降伏強度であり各強度水準での強化量の内訳を示している。微細炭化物による析出強化量の増大により、1 180 MPa 級までの高強度化に成功している。

また、NANO ハイテン[®]は固溶強化元素を低減していることから熱間圧延性に優れ、高強度熱間圧延鋼板でありながら 2 mm 以下の厚さの鋼板の製造も可能である。図 4 に示した

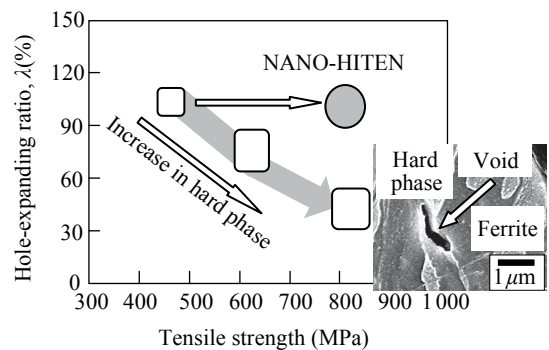


図3 高強度化にともなう穴拡げ率の低下と NANO ハイテン[®]の穴拡げ率

Fig. 3 Change in hole-expanding ratio of dual phase steel with increase in tensile strength and that of NANO-HITEN

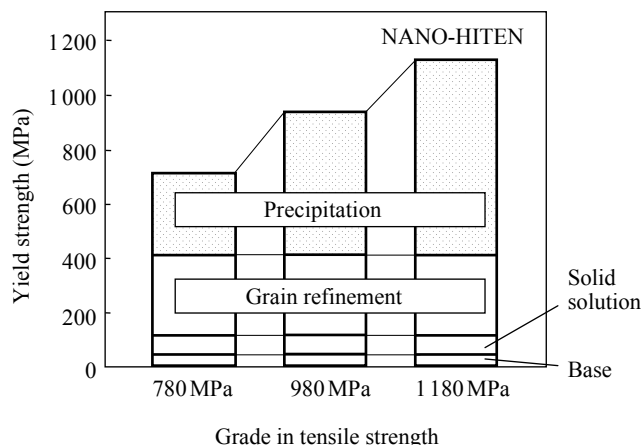


図4 各強度における析出強化量

Fig. 4 Change in precipitation-strengthening with increase in tensile strength

高い降伏強度を有するNANO ハイテン[®]，たとえば1180 MPa級NANO ハイテン[®]を骨格部品に適用することでホットスタンプ材と同等の曲げ圧壊吸収エネルギーをも得ることができる。

3章では骨格部品を対象としてNANO ハイテン[®]の特徴的な温間成形技術を適用した事例について言及する。

3. NANO ハイテン[®]の温間成形技術

3.1 温間成形技術とNANO ハイテン[®]

温間成形は，プレス前の鋼板をおよそ200℃から700℃程度まで加熱した後，直ちに金型でプレスする技術である。したがって，冷間成形と比べると，加熱した鋼板をプレス成形するため低いプレス荷重で成形できる特徴がある。また，近年適用拡大が見られるホットスタンプ技術と比べると，金型内での冷却がさほど必要とされないため，ホットスタンプではプレス時に必要である下死点保持も不要である。このため，特殊なプレス機を導入する必要もなく，生産性も高い。この技術は，すでに相変態のないステンレス鋼板やアルミニウムなどの軽金属板の分野では用いられているが，従来型の高強度鋼板に使用した場合，プレス前の加熱工程で組織が変化してしまい必要な鋼板強度が得られなくなる。このため，従来型の高強度鋼板では温間成形を行うことができなかった。

2章において，NANO ハイテン[®]の炭化物は熱的に安定で加熱により常温強度は低下しないことを図2で示した。すなわち，NANO ハイテン[®]の炭化物を用いれば高強度鋼板の温間成形が可能となる。そこで，温間成形の模擬として，各温度での鋼板の引張強さおよび各温度に加熱して5%のひずみを与えた後に常温まで放冷した鋼板の常温での引張強さを調査した。用いた鋼板は980 MPa級NANO ハイテン[®]と従来の980 MPa級組織制御型高強度鋼板(980DP)で，板厚はともに1.6 mmである。加工温度と強度の関係を図5

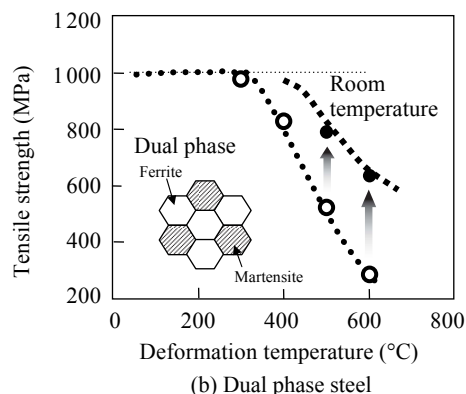
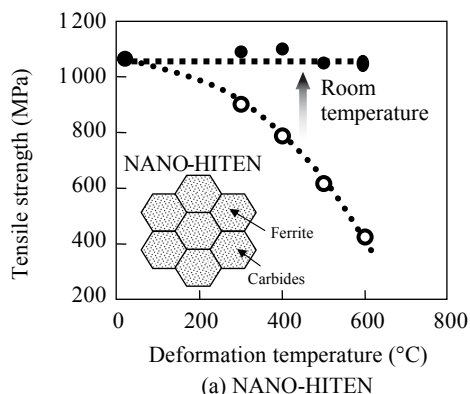


図5 高温での引張強さと加工後常温での引張強さ

Fig. 5 Tensile strength at high temperatures and at room temperature after deformation

に示す。NANO ハイテン[®]は加工温度での引張強さは低下し，加工後の常温強度は素材強度を維持していた。また，同時に加工後の常温での引張でも伸びは素材と同等で，加工ひずみが温間加工では緩和されることが明らかとなった。一方，従来の組織制御型鋼板は加工温度での引張強さの低下はNANO ハイテン[®]と同様に認められるが，加工後の常温強度も低下していた。これは，強度を担うマルテンサイトの焼きもどきが進んでしまったためである。

以上より，NANO ハイテン[®]は従来には存在しなかった温間成形に適した高強度鋼板といえる。

3.2 NANO ハイテン[®]の温間成形性

NANO ハイテン[®]を温間成形することで成形時の強度が低下することから，高強度鋼板の冷間プレス成形で課題となりやすいスプリングバック量やねじれ量の低減も期待される。まず，NANO ハイテン[®]を温間成形してハット部品を作成し，その口開き量を計測した。比較として各強度の組織制御型冷間圧延鋼板を同一金型で冷間プレスした時の口開き量も測定した。成形様式はフォーム成形で，板厚1.6 mmの素材を用いた。成形速度は20 spm (Stamp per minute)の速度とした。鋼板強度と口開き量の関係を図6に示す。980 MPa級NANO ハイテン[®]を500℃で成形した時の口開き量は冷

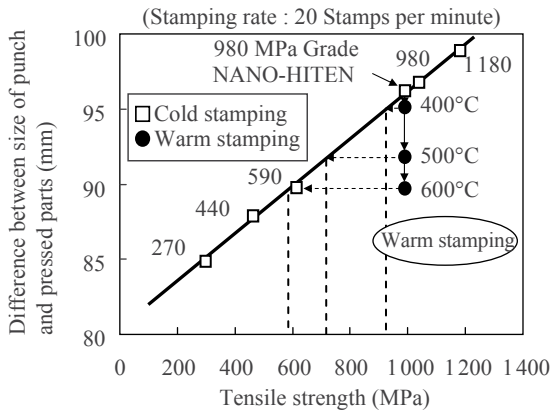


図6 高強度化にともなう金型と成形品の形状の差異の変化

Fig. 6 Change in difference between size of punch and pressed parts with tensile strength

間プレスした引張強さ 700 MPa の鋼板と同等の口開き量、600°C で成形した場合は現在用いられている 590 MPa 級高強度鋼板と同程度の口開き量となった。

次に、センタピラーのモデル金型を用いて行った温間実プレス成形でのねじれの発生量について述べる。センタピラーのモデル金型とねじれの測定方法を図7に示す。次に、この金型を用いて行った場合の部品形状と金型形状との差異を図8に示す。冷間プレスで980 MPa 級 NANO ハイテン[®]を成形した場合 590 MPa 級高強度鋼板よりもねじれが大きいのに対し、600°C で温間成形した 980 MPa 級 NANO ハイテン[®]では、590 MPa 級高強度鋼板と同等のねじれ量であることが明らかとなった。

以上のように、NANO ハイテン[®]によれば部品形状の問題から高強度化できていなかった部品に 980 MPa 級以上の高強度材を適用できる可能性があると考えられる。また、高降伏強度の NANO ハイテン[®]を骨格部品に適用することで、高い部品強度や高い衝突吸収エネルギーを得ることが可能である。たとえば、1180 MPa 級 NANO ハイテン[®]を用い

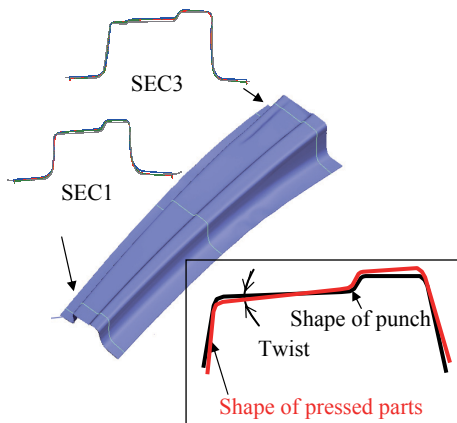


図7 センタピラーのモデル金型形状

Fig. 7 Schematic illustration of model parts of center pillar

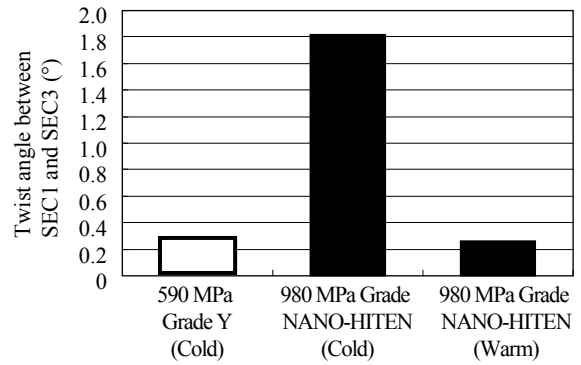


図8 モデル部材実プレス品のねじれ角

Fig. 8 Actual twist angle of model parts

ることで、ホットスタンプ部材と同等の吸収エネルギーを得ることができると考えられる。NANO ハイテン[®]と温間成形の組み合わせにより、自動車部品の高強度化がますます進むと期待される。

4. おわりに

本稿では、NANO ハイテン[®]の特徴を紹介するとともに NANO ハイテン[®]が温間成形に適した高強度鋼板であることを示した。NANO ハイテン[®]は、フェライト粒を超微細炭化物で高強度化する新コンセプトで開発された鋼であり、優れた加工性を有する。そして、NANO ハイテン[®]の特徴を生かした温間成形により、難成形部品への高強度鋼板の適用拡大が期待でき、軽量化に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) Funakawa, Y.; Shiozaki, T. et. al. ISIJ International. 2004, vol. 44, no. 11, p. 1945.
- 2) W.B. Morrison. J. Iron Steel Inst. 1963, vol. 201, p. 317.
- 3) Baker, R.G.; Nutting, J. ISI Special Report. 1959, no. 64, p. 1.
- 4) Gladman, T.; Dulieu, D.; McIvor, I. D. Proc. of Symp. on Microalloying 75. New York, Union Carbide, 1976, p. 32.
- 5) Pickering, F. B. Physical Metallurgy and the Design of Steels. London, Applied Science Publishing, 1978, p. 63.
- 6) Funakawa, Y.; Seto, K. Tetsu-to-Hagané. 2007, vol. 93, no. 1, p. 49.
- 7) Hasegawa, K.; Kawamura, K.; Urabe, T.; Hosoya, Y. ISIJ International. 2004, vol. 44, no. 3, p. 603.



船川 義正



藤田 毅



山田 克美