

自動車重量軽減によりCO₂排出量を削減するナノテク高強度鋼板 NANOハイテン™

JFEスチール株式会社

スチール研究所 自動車鋼板研究部

○有賀珠子、小林聡雄、横田毅、船川義正、瀬戸一洋、田中靖

1. 緒言

近年、自動車の燃費向上によりCO₂排出量を削減するため、車体軽量化が急速に進められようとしている。車体を軽量化するためには、用いる鋼板の厚さを薄くすることが有効であり、その場合でも従来と同等の強度、安全性を保つために、自動車用鋼板の高強度化にはよりいっそうの拍車がかかった。この急激な高強度化の波に対しては、従来技術は不十分であり、まったく新しいコンセプトの高強度鋼板の開発が必要となった。

JFEスチール（株）では、このような状況に鑑みて鋭意開発を進めた結果、ナノサイズの微細な析出物を用いることにより、高強度とともに優れた加工性を有する高強度鋼板の開発に成功し、これをNANOハイテン™（New Application of Nano Obstacles for dislocation movement）と名づけた。

2. NANOハイテン開発の思想

従来より多用されている590MPa級の自動車用高強度鋼板は、軟らかいフェライト中に、高温のオーステナイトと呼ばれる状態から焼入れすることで生じる硬いマルテンサイトを分散させた組織を有している（フェライト+マルテンサイト複合組織鋼板）。この複合組織鋼板の特徴は、軟質のフェライトで加工性、硬質のマルテンサイトで強度を出していることである。従って、複合組織鋼板の強度を上げるためには、硬質のマルテンサイトの分率を上げなければならないが、それは同時にフェライト分率の減少を意味し、高強度化に伴う加工性の低下は避けられなかった。そこで強化方法の発想を変え、加工性に富んだフェライトそのものを高強度化することで、加工性に優れた780MPa級、およびそれを超える強度の鋼板を開発することに挑戦した。本開発の技術的な課題は、通常引張強さで300MPa程度であるフェライトの780MPa級への強化を達成することである。

フェライトを強化する方法として、硬いセラミックス（Ti炭化物）をフェライト中に分散させることとした。このTiの炭化物が微細であるほど、フェライトを強化することができる。鋼中にTi炭化物を分散させるには、高温のオーステナイト中にTi炭化物を溶解させ、冷却してフェライト中に析出させる手法がある。しかし、この析出制御では、得られるTi炭化物の大きさは20～30nm程度であり、引張強さを100MPa程度上昇させることは不可能であった。また、Ti炭化物の析出と同時に加工性を劣化させる粗大なセメンタイト（Fe炭化物）も析出してしまい、加工性も劣悪なものであった。

そこで、微量のMoを添加し、セメンタイトの析出を抑制するとともに、Tiを積極的に添加することでTiの炭化物を微細化できないかと考えた。

3. NANOハイテンの組織と特性

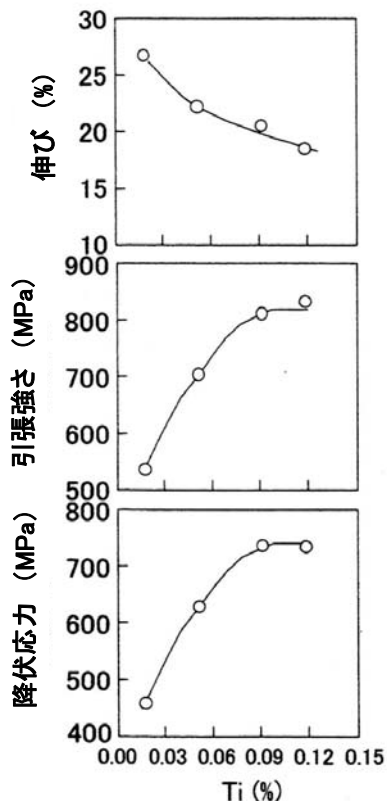


図1 Ti含有量の増加に伴う引張特性の変化

0.04%C-1.5%Mn鋼にTiとMoを添加した鋼を溶製して、実験室にて熱間圧延を行った。得られた熱延板より引張試験片を切り出して引張試験を行った(図1)。引張強さはTi添加量の増大に伴って急激に上昇し、目標の780MPaを超えたり。この鋼を実生産ラインで試作したところ、図2に示すように、従来の複合組織鋼と比べて優れた加工性を示した。

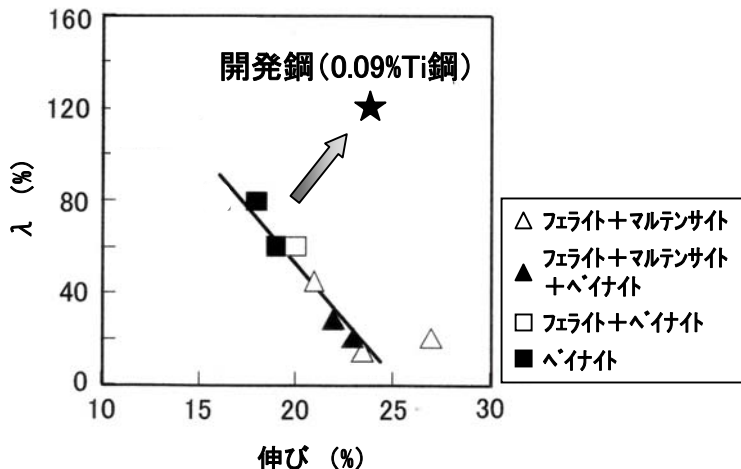


図2 複合組織鋼板と比較した開発鋼(0.09%Ti鋼)の伸びと穴拡げ率

走査型電子顕微鏡で撮影した開発鋼の断面組織を図3に示す。目標とするフェライト単一組織であった。また、鋼中の析出物の透過型電子顕微鏡写真(暗視野像)を図4に示す。従来の制御方法によるTi炭化物の1/10程度の大きさの極めて微細なナノメートルサイズの添加物が整列していた。この析出物は、TiとMoを含有する複合炭化物(Ti,Mo)Cであり、フェライト中にこのような析出物を析出させたのは本開発鋼が世界で初めてである。0.04%のCを含む通常のフェライトの引張強さは、450MPa程度であることから、(Ti,Mo)Cによる強度上昇量は300MPa以上となり、従来の粗大な炭化物による強化技術の3倍以上の強化量を得ることに成功したことになる。我々は、この鋼をその炭化物の大きさからNANOハイテンと名づけた。

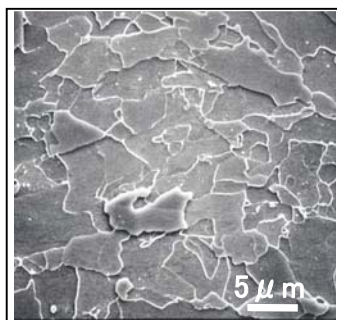


図3 開発鋼(0.09%Ti鋼)の断面組織(走査型電子顕微鏡写真)

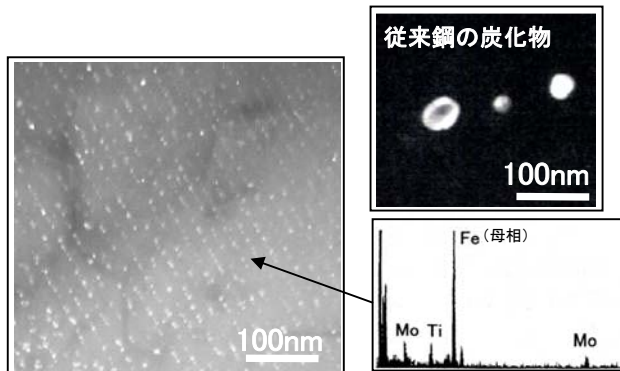


図4 開発鋼(0.09%Ti鋼)の微細析出物と組成分析結果(透過型電子顕微鏡写真、エネルギー分散型X線分析結果)

4. さらなる高強度化への挑戦

従来の1/10の大きさのナノメートルサイズの析出物を用いることで、780MPa級を超える980MPa級、1180MPa級鋼の開発にも着手した。その結果、ナノ析出技術の活用により、従来技術ではその強度を想像すらできなかつた980MPa級、1180MPa級のフェライト単一組織鋼の開発に成功した²⁾。走査型電子顕微鏡で撮影した1180MPa級NANOハイテンの断面組織を図5に示す。図3に示した780MPa級同様、フェライト単一組織となっている。

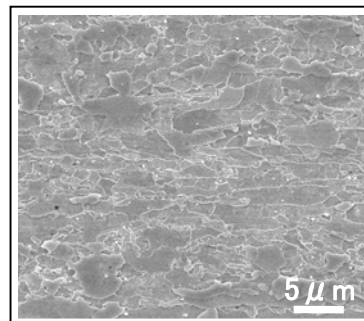


図5 1180MPa級NANOハイテンの断面組織(走査型電子顕微鏡写真)

図6に780MPa級、980MPa級、1180MPa級NANOハイテンの析出物の透過型電子顕微鏡写真(明視野像)を示す。いずれもナノメートルサイズの微細析出物が密に整列しており、引張強さの上昇に伴って、より密に析出物が析出していることが分かる。1180MPa級においては、従来の粗大な析出物による強化に比べて、7倍もの強化量を達成したことになる。

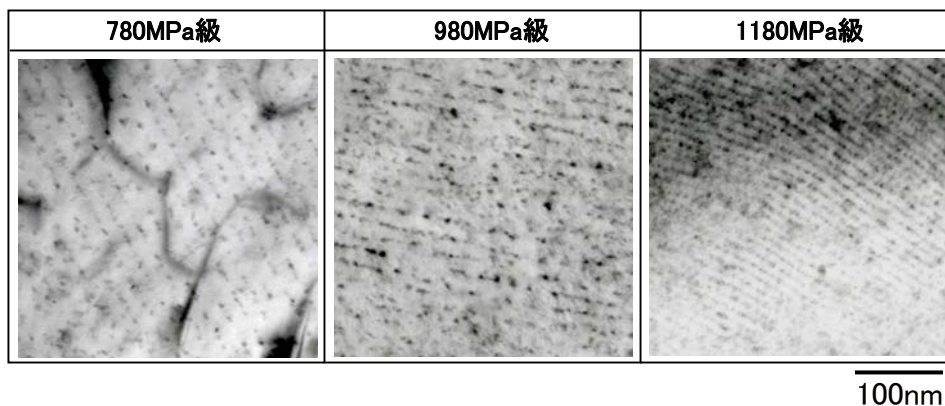


図6 780, 980, 1180MPa級NANOハイテン中の微細析出物(透過型電子顕微鏡写真)

1180MPa級NANOハイテンの優れた加工性を、プレス成形事例をもって示す。図7は、引張強さ1180MPa級の複合組織鋼板と、1180MPa級NANOハイテンのプレス成形試験結果である。これらの鋼板を、自動車が高強度化が必要な部品形状を用いてプレス試験を実施したところ、複合組織鋼板ではプレス割れが生じたのに対し、NANOハイテンではプレス割れは認められず、良好な加工性を示した。

このように、NANOハイテンを高強度化する微細析出物形成技術により、従来材を凌駕する加工性が実現できた。



1180MPa級複合組織鋼板	1180MPa級NANOハイテン

図7 1180MPa級NANOハイテンのプレス成形結果

図8 a) に780MPa級NANOハイテンの適用部品例を、b) に1180MPa級NANOハイテンのプレス試作部品を示す。780MPa級では、優れた加工性を活かした複雑形状の実部品が作製できた。



a) 780MPa級NANOハイテンの適用実部品例



b) 1180MPa級NANOハイテンの試作プレス部品例

図8 NANOハイテンの適用実部品例と試作プレス部品例

優れた加工性のほか、NANOハイテンの特徴の一つに、衝突エネルギー吸収に優れていることがある。近年、特に欧州では、軟らかい板を加熱しプレス金型内で焼入れを行う、いわゆるダイクエンチ工法による引張強さ1470MPa級の部品が一部で使用され始めているが、冷却の均一性を確保することが難しいため、強度が部位ごとに異なり、1470MPa級の強度を部品全体で均一に得ることが難しい。

これに対し、1470MPa級と同等の降伏強度を有する1180MPa級NANOハイテンは、ダイクエンチ材と同等のエネルギー吸収量を示すことから、強度の安定した耐衝突部材として期待される。部品のプレス成形についても、加熱を必要としないことから、部品一つ当たりの製造工程で排出されるCO₂量も少なく、また、NANOハイテンを適用することにより、例えば図8 a) のような部品で、590 MPa級の素材を780MPa級とすることにより、約20%の部品重量低減が見込まれるものである。

5. まとめ

新コンセプトで開発されたNANOハイテンは、従来鋼板にない優れた加工性と、従来鋼板になり高強度（高降伏強度）を有し、自動車軽量化によるCO₂排出量の低減に貢献できる。

NANOハイテンは、社会の基盤産業である鉄鋼においても、まだ未知の特性を持つ素材を作り出す無限の可能性を示してあり、その開発意義はたいへん大きいものと思われる。

参考文献

- 1) Y.Funakawa et.al. : ISIJ International, vol.44(2004), No.11, p.1945-1951
- 2) JFEスチールニュースリリース : www.jfe-holdings.co.jp/release/index.html [2007.09.13]

論文

- ・ Y.Funakawa et.al. : ISIJ International, vol.44(2004), No.11, p.1945-1951
- ・ 船川, 瀬戸 : 鉄と鋼, Vol.93(2007), No.1, p.46-56

学会発表

- ・ 船川, 塩崎, 富田, 山本, 前田 : CAMP-ISIJ, 15(2002), 1217.
- ・ 塩崎, 船川, 富田, 山本, 前田, 益本 : CAMP-ISIJ, 15(2002), 1218.
- ・ 佐藤, 仲道, 船川, 塩崎 : CAMP-ISIJ, 15(2002), 1219.
- ・ 富田, 船川, 塩崎, 前田, 山本 : まてりあ, 42(2003), 70.
- ・ 船川, 富田 : 特殊鋼, 52(2003), 37.
- ・ 富田, 船川 : 化学と工業, 56(2003), 575.
- ・ 小林, 船川, 瀬戸 : CAMP-ISIJ, 16(2003), 1419.
- ・ 船川, 瀬戸 : CAMP-ISIJ, 16(2003), 1420.
- ・ 瀬戸 : 工業材料, 52(2004), 22.
- ・ 仲道, 佐藤, 船川 : まてりあ, 43(2004), 1037.
- ・ 小林, 船川, 横田, 瀬戸 : CAMP-ISIJ, 18(2005), 1473.
- ・ 横田, 小林, 瀬戸 : CAMP-ISIJ, 19(2006), 496.
- ・ 河野, 名越, 佐藤, 船川, 塩崎 : CAMP-ISIJ, 19(2006), 586.
- ・ 瀬戸, 古君 : 熱処理協会講演大会, (2006), 12月
- ・ 横田, 小林, 瀬戸 : CAMP-ISIJ, 20(2007), 462.
- ・ 有賀, 横田, 瀬戸, 田中 : CAMP-ISIJ, Vol.20(2007), 1213.
- ・ 船川 : CAMP-ISIJ, Vol.20(2007), 1283.
- ・ 船川, 田中 : 日本金属学会講演概要, 143(2008), 216.
- ・ 瀬戸 : 日本金属学会講演概要, 142(2008), 149.
- ・ 船川 : 日本金属学会講演概要, 145(2009), 183.
- ・ 瀬戸, 有賀, 船川 : 日本金属学会講演概要, 145(2009), 185.

国際会議

- Y.Funakawa, T.Shiozaki, K.Tomita, Y.Yamamoto, E.Maeda : International Symposium on Ultrafine Grained Structures(2003), Melbourne, Austraria
- A.Kobatashi, K.Seto, Y.Funakawa. : COM(2004), Hamilton, Ontario, Canada
- T.Yokota, A.Kobatashi, T.Ariga, Y.Funakawa, K.Seto : SAE(2005), Detroit, USA
- Y.Funakawa, K.Seto : THERMEC(2006), vol.539-543, p.4813-4818, Vancouver, Canada
- T.Ariga, T.Yokota, K.Seto : International Symposium on Ultrafine Grained Structures(2007), Kokura, Japan
- Y.Funakawa, K.Seto, H.Nakamichi : THERMEC(2009), vol.638-642, p.3218-3223, Berlin, Germany
- K.Seto, T.Ariga, Y.Funakawa, O.Furukimi : 4th Asian Conference on Heat Treatment and Surface Engineering, (2009), Beijin

解説記事

- 『ナノテクで画期的な析出強化鋼-高張力鋼板の開発』 : 高圧ガス, vol.38(2001), No.10, 15
- 『ナノメートルサイズの物質を分散させたナノテク鋼板～NANOハイテン』, ナノテク活用技術のすべて : 工業調査会, 東京, (2002), 166

表彰関連

- 日本材料学会 技術賞 [2003年5月]
『ナノサイズの超微細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』
- 日本金属学会 技術開発賞 [2003年10月]
『ナノサイズの超微細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』
- 日本鉄鋼協会 澤村論文賞 [2004年度]
『Development of High Strenth Hot-rolled Sheet Steel Consisting of Ferrite and Nanometer Sized Carbides』
- 日本金属学会 金属組織写真賞 [2004年度]
- SAE Aural presentation award 2005 (USA)
- 関東地方発明表彰 [2006年度]
- 全国発明表彰21世紀発明奨励賞 [2007年度]

特許

- 登録特許 : 32件
- 海外出願 : 米、欧、韓国、中国ほか