

環境調和型鉄鋼製品による JFE スチールの社会貢献

Social Contribution through JFE Steel's Environment-Friendly Steel Products

津山 青史 TSUYAMA Seishi JFE スチール 専務執行役員 スチール研究所長・工博
遠藤 茂 ENDO Shigeru JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部長・工博
瀬戸 一洋 SETO Kazuhiro JFE スチール スチール研究所 薄板研究部長・工博

要旨

JFE スチールは独自技術で開発した高機能鋼材を通じて輸送機器の軽量化による省エネルギーと排出 CO₂ の削減、および高強度化による構造物の軽量化と省資源化など、環境負荷低減に貢献している。本稿では特徴ある製品として、高強度船舶用鋼材、高強度建産機用鋼材、高性能建築用鋼材、高強度ラインパイプ用鋼材、高耐食性シームレス鋼管、外板パネル・車体骨格・足回りなど用途ごとに最適化された自動車用先進ハイテン、高性能電磁鋼板などを紹介する。

Abstract:

JFE Steel makes a great contribution to environmental preservation through environment-friendly steel products, which make it possible to reduce required energy and CO₂ emission of transportation, and to reduce the resources and the weight of construction. This paper introduces typical high-end products of high strength steel plates for vessels, construction and line-pipes, advanced high strength steel sheets for automobiles, enhanced corrosion-resistant seamless pipes, and advanced electrical steel sheets.

1. はじめに

JFE スチールは、独自技術で開発した高機能鋼材をお客さまに提供し、輸送機器の軽量化による省エネルギーと排出 CO₂ の削減、ならびに高強度化による構造物の軽量化と省資源化、安全性向上による環境負荷低減に貢献している。本論ではそのような鋼材の製造技術とその特徴などについて概説する。

鋼材分野では、環境調和型の鋼材として、軽量化による省エネルギーと排出 CO₂ の削減を可能にした高強度船舶ならびに建産機用鋼材、高強度化による構造物の軽量化と省資源化を達成している高性能建築用鋼材、安全性向上による環境負荷低減を目指している高強度ラインパイプなどがある。それぞれの鋼材について、当社独自の加工熱処理技術 (TMCP: thermo-mechanical controlled processing) の適用による組織・材質制御技術と鋼材の特徴を紹介する。また、シームレス鋼管のうち高温・高圧下の厳しい腐食環境で使用可能なマルテンサイト系ステンレス油井用鋼管のラインアップを紹介する。合わせて、ラインパイプ向け 13%Cr 系のマルテンサイト系ステンレス鋼管を紹介する。

薄板分野では、自動車用鋼板の高強度化 (薄肉化) を行なうことで車体を軽量化し、走行時の排出 CO₂ を削減する


動きが進んでいる。一般に材料の強度が上がるとプレス成形時の加工性 (伸び、穴広げ性) が低下するため、加工性に優れた高強度鋼板 (ハイテン) の開発が急務である。本報では当社が開発した特徴ある自動車用ハイテンを取り上げ、材料設計の考え方や適用事例を紹介する。さらに、EV/HEV (電気自動車/ハイブリッド電気自動車) モータ用電磁鋼板と高周波機器用高けい素鋼板を紹介する。

2. 鋼材製品

2.1 大型輸送用機器の省エネルギーを可能にする高強度鋼材

2.1.1 船舶用高機能鋼材

—大入熱溶接対応 YP460 MPa 級鋼—

近年、造船分野においては、コンテナによる遠距離貨物輸送量の増大を背景にコンテナ船の大型化が急速に進んでいる¹⁾。最近では、15 000 TEU (twenty-feet equivalent unit: 20 フィートコンテナ換算個数、)²⁾ を超える超々大型コンテナ船の建造も始まっている。コンテナ船は、開口部が広い構造ゆえに、ハッチコーミングやシアーストレーキなどの部材に高強度かつ厚肉材が用いられ、YP390 MPa 級 (YP: 降伏点) で最大板厚 65 mm 以上の鋼板が使用されてきた³⁾。上述のような大型のコンテナ船では、船体の軽量化・板厚低減による作業効率の向上を可能にするより高強度の鋼材

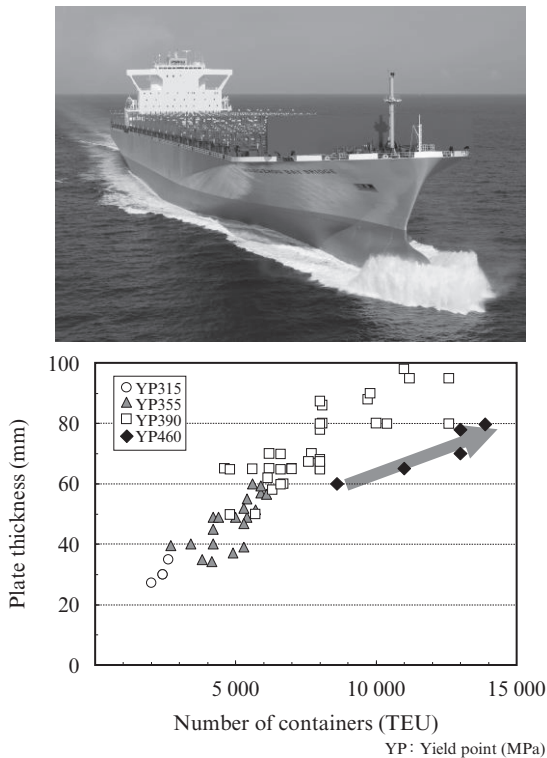


図1 コンテナ船の外観²⁾とコンテナ積載数の増加に伴う板厚、鋼材強度変遷

Fig. 1 Outlook of container ship and change of plate thickness and steel grades used for container ships

(YP460 MPa 級鋼) へのニーズが高まっている。

コンテナ船に用いられる高強度の厚肉材の溶接には高効率立向き溶接方法であるエレクトログスアーク溶接 (EGW: electrogas arc welding) が適用されている。このような大入熱溶接においては、溶接熱影響部 (HAZ: heat affected zone) の組織は粗大化しやすく、継手部の靱性が劣化しやすいという問題がある。このような課題に対応するために、加工熱処理と高度なマイクロロイニング制御を用いた大入熱溶接熱影響部靱性向上技術「JFE EWEL[®]」にさらなる改良を加え、大入熱溶接継手特性に優れた YP460 MPa 級鋼を開発している⁴⁾。開発した鋼材の HAZ の優れた靱性は粗粒域幅極小化と内部の組織の微細化により達成されている。

さらに、大型コンテナ船の安全性確保のため、産官学連携で大規模な大型実験を含む共同研究がなされ⁵⁾、一般財団法人日本海事協会から 2009 年に「脆性亀裂アレスト設計指針」⁶⁾ が発行された。この指針はアレスト設計がなされるコンテナ船の板厚 50 mm を超えるハッチサイドコーミングなどに適用される。このような背景から、JFE スチールでは船舶の大型化に対応した大入熱溶接の特性に優れた YP460 MPa 級の開発に加えて、高アレスト性 (高 Kca 値) を具備した YP390 MPa 超の鋼板も開発している (図 2⁷⁾)。開発された鋼板は、実船への適用も進んでいる⁴⁾。

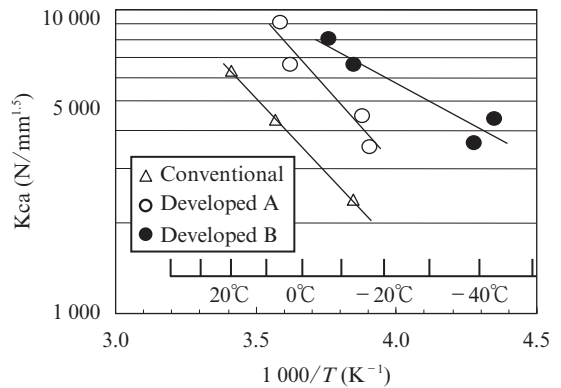


図2 開発 YP390 MPa のアレスト特性 (Kca 値)

Fig. 2 Brittle Crack arrestability of YP390 MPa steels developed

2.1.2 建設・産業機械用高機能鋼材

— 「JFE-HYD[®]960LE」, 「JFE-HYD[®]1100LE」 —

近年の建設・産業機械の大型化および使用環境の過酷化に伴う使用鋼材の高強度化・高靱性化のニーズの高まりに対応して、JFE スチールでは、優れた低温靱性を有する建設・産業機械用超高強度厚板「JFE-HYD[®]960LE」および「JFE-HYD[®]1100LE」を開発した⁸⁾。本開発鋼は、材質設計に加工硬化オーステナイトからの直接焼入処理であるオースフォームを適用するとともに、当社の独自技術であるオンライン熱処理プロセス「HOP[®] (Heat-treatment On-line Process)」を用いた急速加熱焼もどし (従来のオフライン熱処理の場合に比べ、昇温速度が 1~2 桁大きい) を適用することによって、有効結晶粒を微細化させ、さらに、

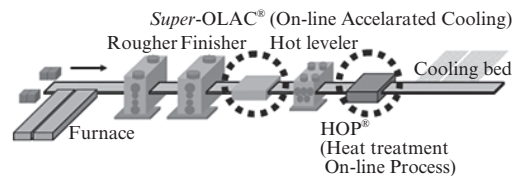


図3 オンライン熱処理プロセスのレイアウト

Fig. 3 Layout of online heat-treatment facilities of West Japan Works (Fukuyama)

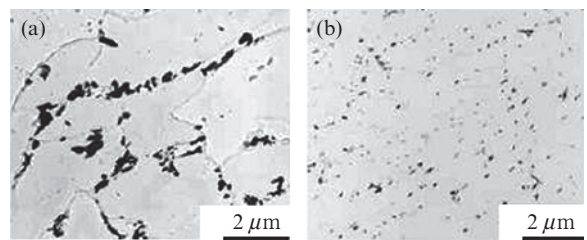


写真1 直接焼入-焼もどした引張強度 610 MPa 級鋼のセメントタイトの分布; (a) 霧面気炉焼もどし (b) HOP 焼もどし

Photo 1 Uniform dispersion of fine cementite by rapid heating and tempering

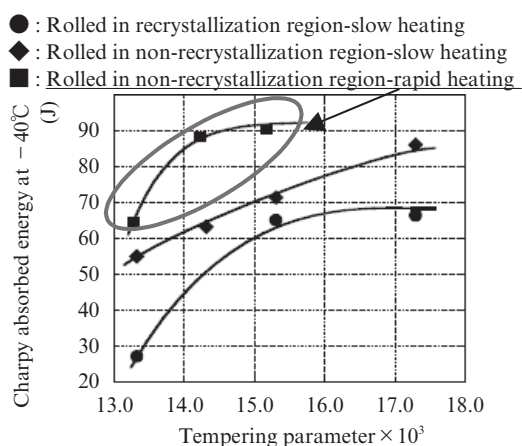


図4 オースフォームおよび急速加熱焼戻しによる低温靱性の向上 (HYD1100LE)

Fig. 4 Improvement of low temperature toughness by ausforming and rapid heating and tempering of HYD1100LE steel

写真1に示すように鋼材中のセメントイトを均一微細分散するなどの特徴を有する。

これらの組織制御により、本開発鋼は、図4に示すように優れた低温靱性を有するとともに、超高強度鋼の実用化に重要な耐遅れ破壊特性に優れ、かつ低成分設計のため優れた溶接性を実現している。

HOP[®]によるこのような炭化物の形態制御技術と材質制御技術は、JFE-HITEN610U2、JFE-HITEN780LEなど、引張強度600MPa以上の高強度ハイテンに広く適用されている¹⁰⁾。

2.2 構造物の軽量化省資源化と安全性向上による環境負荷低減を可能にする高機能鋼材

2.2.1 建築用高機能鋼材

—低 YR550~780 N/mm² 級高強度鋼—

近年、高層建築物の大型化や長スパン化への要求が増加し、建築構造用鋼として高強度鋼板の適用が拡大している。一般に、高強度鋼材を使用すると、必要部材断面の減少を

可能にする。これにより鋼材重量および溶接材料重量の軽減、鉄骨加工、運搬・建方負荷の軽減がもたらされるため、部材断面積の大きくなる高層建築ほど高強度鋼材が採用されている。現在では、母材性能や溶接性、製造コストなどの制約から、主に引張強度590MPa級（国土交通大臣認定取得鋼材SA440）までの鋼板が採用されている¹¹⁾。建築構造用鋼として優れた耐震性能を保有するために、降伏比(YR、(降伏強度)/(引張強度))を低くすることが重要である。多くの場合鋼材の高強度化は降伏比の上昇を伴うため、590MPa級鋼板においても安定して低YRを確保することは容易でない¹²⁾。このため、低YR590MPa級鋼板の製造に際しては、複雑なオフライン多段熱処理を施すことが一般的である。

耐震性に優れた建築用低YR高張力鋼は、550~590MPa級が多く使用されてきており、550MPa級鋼材で累計120000トン、590MPa級鋼材で累計46000トンを超える製造実績がある(表1)。

また、これまでオフライン多段熱処理の適用が不可欠であると考えられてきた低YR780MPa級鋼板の製造に関して、新しい組織制御技術、製造プロセスが開発されている¹³⁾。開発された低YR780MPa級鋼は、TMCPと誘導加熱型のオンライン熱処理HOP[®]を活用し、鋼板のマイクロ組織をベイナイト主体組織と、微細な島状マルテンサイト(M-A: martensite-austenite constituent)の複相組織とすることにより、建築構造用鋼として優れた母材部の機械的特性と優れた溶接性および溶接部靱性を達成している。780MPa級鋼そのものの普及は低YR鋼、高YR鋼によらず始まったばかりであり、600トン程度の実績に止まっているが、至近、大手町計画の超高層ビルに超高強度コンクリートを充填した溶接4面BOX柱として、熱処理型の複相組織低YR鋼が400トン適用されている(図5¹⁴⁾)。

2.2.2 ラインパイプ用高機能鋼

—高強度高変形ラインパイプ JFE-HIPER[®]—

近年のパイプラインの敷設地域は、寒冷地、地震地帯、深海、あるいは、硫化水素ガス環境といった過酷な地域へ

表1 高強度建築用鋼の開発状況実績(例)

Table 1 High strength steels for buildings developed and application records of the steels

強度グレード	鋼種の記号	製造プロセス	板厚 (mm)	引張特性			適用実績
				降伏強度 (YS) (MPa)	引張強度 (TS) (MPa)	降伏比 (YR) (%)	
550 MPa 級	HBL385	TMCP	19~100	385~505	550~670	≤80	約10万トン
	HBL385-L		12~19				
590 MPa 級	SA440	熱処理 (2相域焼入)	19~100	440~540	590~740	≤80	約5万トン
	HBL440	TMCP	19~50				
780 MPa 級	JFE-HITEN780T	熱処理 (2相域焼入)	22~100	670~750	780~930	≤85	約1千トン
	HBL630-L	TMCP (HOP [®])	12~40				
	H-SA700	熱処理, TMCP	6~50				



(a) 完成予想図 (b) 施工中の超高強度 BOX 柱

図5 低降伏比 (YR) 780 MPa 級鋼が採用される予定の超高層ビル (仮称: 大手町 1-6 計画)

Fig. 5 New skyscraper planned to use low yield to tensile ratio (YR) 780 MPa grade steels



写真2 X100 グレードラインパイプの敷設状況

Photo 2 Construction Scenery of long distance pipeline used X100 grade linepipes

と広がっている。カナダにおける敷設の状況を写真2に示す。

地震地帯および不連続凍土地帯におけるパイプラインでは、地盤変動による大規模なラインパイプの塑性変形が発生することがある。最近では、これらの地震地帯および不連続凍土地帯におけるパイプライン敷設に用いる、ひずみベース設計と呼ばれる新しい設計手法が開発されている¹⁵⁾。この設計では、用いられるラインパイプに高い圧縮および引張ひずみに耐える高い変形性能が必要とされる。このようなパイプライン用途として、高い変形性能を有し、パイプラインの安全性を高めることが可能な高強度高変形ラインパイプ「JFE-HIPER[®]」を開発した¹⁶⁾。JFE-HIPER[®]はベイナイト母相中に硬質なMAを分散させる新しい鋼の2相組織制御技術を適用し製造される。この組織制御はTMCPと誘導加熱型オンライン熱処理プロセスHOP[®]の組み合わせにより製造することができる。HOP[®]を適用して開発された鋼管はAPI (アメリカ石油協会) 規格でX70~X100グレードである。

変形性能の一つの指標として圧縮変形時の限界座屈ひずみがあり、図6に示すようにパイプの形状パラメーターであ

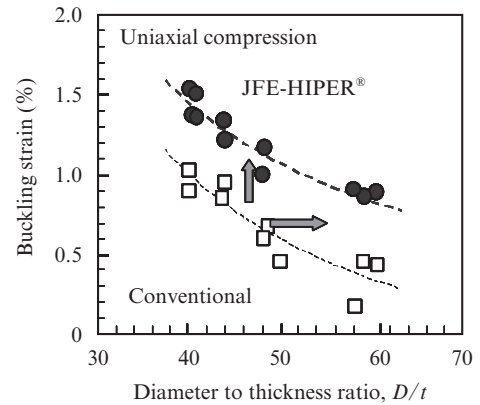


図6 鋼管の圧縮限界座屈ひずみとサイズ (D/t) との関係と JFE-HIPER[®]の座屈ひずみ

Fig. 6 Relationship between buckling strain of by axial compression and pipe diameter to thickness ratio (D/t)

る D/t (外径 (D) と管厚 (t) の比) が増加すると座屈ひずみは低下する。JFE-HIPER[®]は従来材に比べて高い限界座屈ひずみを有しており、同じ形状のラインパイプ (D/t 一定) であれば従来材に安全性の向上が期待できる。また、 D/t を大きくしても管厚の厚い従来鋼管と同等の座屈ひずみを得ることが可能で、管厚の低下、鋼材量の低下が期待できる。JFE-HIPER[®]は日本国内だけでなく、X65~X80クラスを中心として、中国¹⁷⁾および北米¹⁸⁾で陸上ラインパイプとして、20000トンを超える製造実績がある。X100も含めて、今後、地震地帯の東シベリア (ロシア) のプロジェクトなどへの適用拡大が期待されている。

3. シームレス鋼管製品

—耐食性に優れる高Crシームレス鋼管—

湿潤CO₂ガス環境下の石油・ガス田に、汎用のカーボン系シームレス鋼管を用いた場合、メサ・コロージョンが起き、使用中に孔があいてしまうことがある¹⁹⁾。湿潤CO₂環境に使用可能な油井用鋼管として、アメリカ石油協会 (American Petroleum Institute, API) は、13%Cr系マルテンサイトステンレス鋼管 (API-13Cr) を規格化している。13%Cr鋼管は優れた耐CO₂腐食性を有することから、その需要は年々増加しており、JFEスチールは、API L80-13Crを供給できる主要ミルのひとつとして、世界の油田・ガス田に向け、数多くの販売実績をもつ。

一方で、石油・ガス田の掘削環境はより厳しくなり、API-13Cr鋼管でも、適用困難な環境が増えてきた。そのような腐食環境の油井においては、22%Cr系二相ステンレス鋼管あるいはそれ以上の高合金鋼管が使用されている。しかし、二相ステンレス鋼管や高合金鋼管の強度が低いため、冷牽加工で油井管に必要な高強度を具備させる必要があり、コストと納期に問題があった。そのため、API-13Cr鋼管以上

表 2 JFE スチールの油井用鋼管向け、Cr 系シームレス鋼管ラインアップ

Table 2 JFE Steel's lineup of Cr seamless pipes for OCTG

Material grade	Specified minimum yield strength	80 ksi	85 ksi	95 ksi	110 ksi	125 ksi	140 ksi
	Chemical composition	(552 MPa)	(586 MPa)	(655 MPa)	(758 MPa)	(862 MPa)	(965 MPa)
13CR	0.2C-13Cr						
11CR	0.01C-11Cr-2Ni						
HP1-13CR	0.04C-13Cr-4Ni-1Mo						
HP2-13CR	0.04C-13Cr-5Ni-2Mo						
HP2-13CR-M	0.01C-12.5Cr-6Ni-2Mo						
UHP [®] -15CR	0.03C-15Cr-6Ni-2Mo-1Cu-Nb						
UHP [®] -17CR	0.03C-17Cr-4Ni-2.5Mo-1W-1Cu						

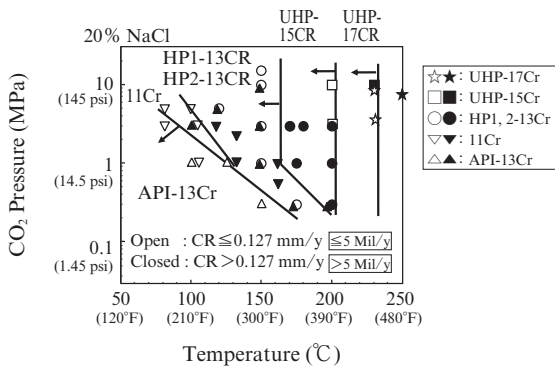


図 7 JFE スチールの油井用鋼管 耐 CO₂ 腐食マップ

Fig. 7 Domain map of CO₂ corrosion-resistance in JFE steel's OCTG

の高耐食性を有し、かつ、2相ステンレス鋼に比べて経済的な新しい油井用鋼管が求められていた。

これらの要求に対し、JFE スチールでは、代替可能な材料選択の候補として、耐 CO₂ 腐食性、および耐 SSC 性（耐硫化物応力割れ性）を改善し、かつ高強度化を実現した、新しい組成のマルテンサイト系ステンレス鋼管を開発し、販売を開始している。表 2 に示すように、JFE-11CR-110 ksi 級鋼管²⁰、JFE-HP1-13CR-95 ksi 級および 110 ksi 級鋼管²¹、JFE-HP2-13CR-95 ksi 級および 110 ksi 級鋼管²¹、JFE-HP2-13CR-M-95 ksi 級鋼管、JFE-UHP[®]-15CR-125 ksi 級鋼管²²、JFE-UHP[®]-17CR-110 ksi および 125 ksi 級鋼管^{23, 24} のラインアップを揃え、石油・ガスメーカーから提示される実井戸条件に見合った材料提案を行なっている。これらの製品の特徴は、Cr, Mo, Ni, Cu などの添加、および、製造条件の最適化によって、より厳しい腐食環境に耐えられるように、不動態皮膜を安定化させ、高強度化した点にある。これにより、所定の強度を有し、耐 CO₂ 腐食性の向上、および、耐 SSC 性の向上が達成されている。

一例として、20%NaCl 溶液環境における、CO₂ 腐食に関するデータを図 7 に示す。CO₂ : 3 MPa の条件における使用可能限界温度で比較すると、API-13Cr 鋼管が 100℃、HP 系 13CR が 160℃、UHP[®]-15CR が 200℃、UHP[®]-17CR で 230℃

まで適用可能となる²³。

また、同様な技術思想のもと、ラインパイプ用のシームレス鋼管として、13%Cr 系マルテンサイトステンレス材料がある。従来の適用鋼種は、カーボン系ラインパイプ+インヒビター（腐食抑制薬剤）の組み合わせあるいは 2 相ステンレス鋼ベースのラインパイプ材料が使われていた。JFE スチールでは、代替可能な材料選択の候補として、適度な耐 CO₂ 腐食性を示し、2 相ステンレス鋼に比べコストが低い 13% Cr ベースのラインパイプ材料の開発を行なった。成分設計の基本は、Mo, Ni 添加の最適化による不動態皮膜の安定化と、溶接性かつ HAZ 部の耐 IGSCC 性の確保のため、C, N, Ti 添加量の最適化である²⁵。現在は、ノルウェー船級協会 (Det Norske Veritas, DNV) で DNV-13CR として規格化されている。DNV-13CR は Offshore の海底敷設向けのラインパイプ材料として、実フィールドでの適用事例が増えてきている。

4. 薄板製品

4.1 自動車の軽量化を可能にする先進ハイテン

4.1.1 外板パネル用 440 MPa 級焼付硬化型ハイテン—ユニハイテン[®]—

自動車の外板パネルは外観品質が第一に求められ、プレス加工時に生じるゆがみ（面ひずみ）が鋼板の降伏強度に比例するため、ハイテン化が難しい部品である。この問題を解決するために開発されたのが塗装・焼付工程の熱を利用して硬化する焼付硬化型（BH）鋼板であり、最近では 340 MPa 級の BH 鋼板が主流になりつつある。

JFE スチールが新たに開発したユニハイテン[®] は、プレス加工前の降伏強度を 340 MPa 級 BH 鋼板と同等のレベルに低く抑えながら、塗装焼付後には一般の 440 MPa 級と同等の降伏強度が得られる高強度の BH 鋼板であり、耐デント性（凹みにくさ）を 340 MPa 級比で 20% 向上させることに成功した²⁶（図 8）。

一般に 340 MPa 級までの BH 鋼板はフェライト単相鋼である IF (interstitial free) 鋼をベースにししながら微量の固溶

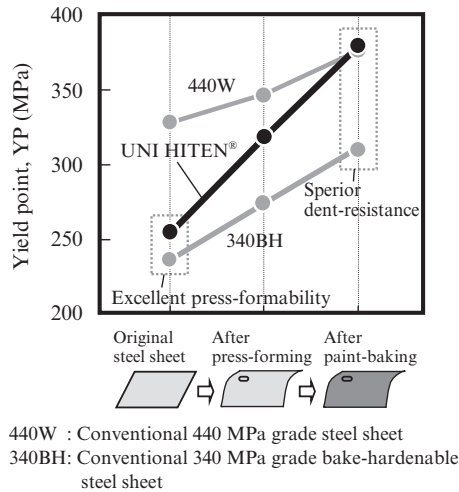


図8 自動車の製造工程における各鋼の降伏強度 (YP) の変化
 Fig. 8 Change in yield point (YP) of panel steels during car production process

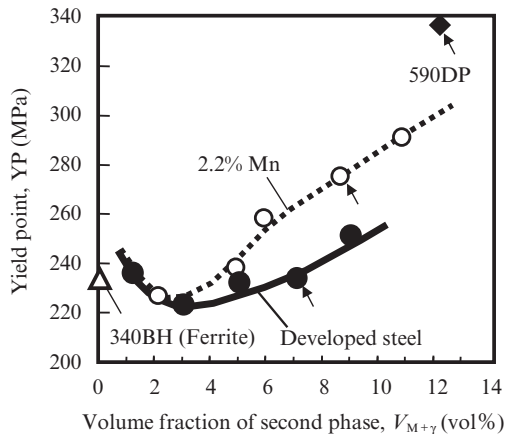


図9 各鋼の降伏強度 (YP) と第2相分率の関係
 Fig. 9 Relationship between yield point (YP) and volume fraction of second phase

Cを残すよう制御する方法が取られることが多いが、この方法でさらに高強度化すると降伏強度の上昇が避けられない。そこで、ユニハイテン®では発想を転換し、降伏比が低くBHを有するDP (dual phase) 鋼板をベースとして開発を行なった。図9は微量のVを含む従来の590 MPa級DP鋼、それをベースにVの代わりにMnを添加した2.2%Mn鋼およびフェライトの粒成長性と焼入れ性を確保するためにBなどを添加してMnを低減した開発鋼についてC量を調整したときの第2相分率とYPの関係を示したもので、写真3はそれぞれの代表的なSEM (走査型電子顕微鏡) で観察した組織を示したものである²⁶⁾。開発鋼はフェライト粒が粗大であることに加え第2相が均一・粗大に分散し、広い第2相分率範囲で340BH相当の低いYPを示すことが分かる。開発鋼ではCの狭幅制御技術も活用してYPの低い範囲に第2相分率を制御している。

ユニハイテン®は従来の340BHに相当する低いYPと従

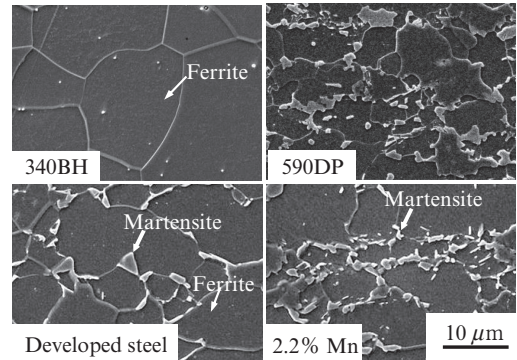


写真3 各鋼の代表的なSEM (走査型電子顕微鏡) で観察した組織

Photo 3 Scanning electron micrographs showing microstructures of conventional and developed steels

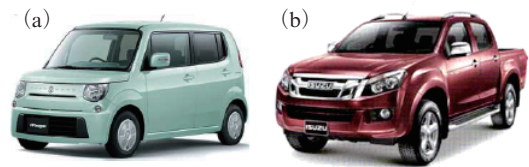


写真4 ユニハイテン®の適用例; (a) 後ドア, (b) フード
 Photo 4 Application of UNI HITEN®; (a) Rear door, (b) Hood

来の440Wと比べて高いEl (伸び), n 値 (加工硬化指数) を有する。さらに2%予ひずみを付与した時の加工硬化量WHおよびBHが高いので、自動車パネルに成形し焼付塗装を施した後の降伏強度 (YP') は340BHより大幅に向上した。

ユニハイテン®は写真4に示す自動車のドアやフードに採用され、冷間圧延材は2010年、GA材は2011年に量産を開始した。ドアでは鋼板の薄肉化により、1.1 kg/台の軽量化を達成している。外板パネルはサイズが大きいため薄肉化による軽量化効果が大きく、ユニハイテン®の適用によりCO₂排出削減に大きく貢献することが期待される。

4.1.2 車体骨格用冷間圧延・GAハイテン

—WQハイテン, 高強度高成形性GAハイテン—

自動車のキャビンは乗員を保護するため、衝突時にも変形しないことが要求され、最近では980 MPa級以上の冷間圧延・GA超ハイテンの適用が進んでいる。

JFE スチールは超ハイテンの製造に必要な連続焼鈍設備を開発し、1970年代にいち早く超ハイテンを商品化した²⁷⁾。これらはCAE (computer aided engineering) を活用した成形加工技術の向上²⁸⁾とあいまって、バンパ・レインフォースやドアインパクトビーム、シートフレーム、ボディ部品などに次々採用され、車体軽量化に寄与している。また、近年は高い防錆性が必要なアンダーボディ部品への超ハイテン適用も始まっており、高強度高成形性GA鋼板の開発・商品化が進んでいる。

JFE スチールでは、キャビン用の冷間圧延超ハイテンにつ

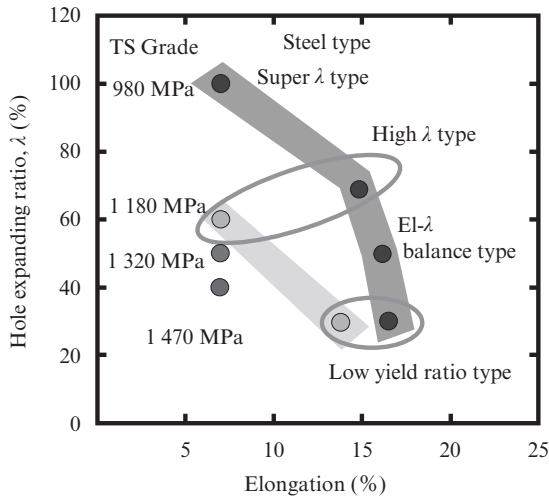


図 10 WQ ハイテンの EI-λ バランス
Fig. 10 EI-λ balance of WQHITEN

いて求められる強度、特性に応じて析出強化鋼、DP 鋼、マルテンサイト鋼、TRIP 鋼を品揃えしている。このうち DP 鋼、マルテンサイト鋼は主として水焼入れ方式の連続焼鈍設備 (WQ-CAL) を用いて製造しており、(1) 伸び (EI) と伸びフランジ性 (λ) のバランスが異なる TS780~1 470 MPa 級の広い品揃え、(2) 低 C 当量成分設計による優れたスポット溶接性と耐遅れ破壊性²⁹⁾、(3) 冷却の均一性とフィード・フォワード管理による材質安定性などの特長を有する。これらの EI-λ バランスを図 10 にまとめて示す。

近年適用拡大が著しい 980 MPa 級については、特に上記特長が生かされている。たとえば、伸びや曲げ加工性に加え塗装後耐食性やスポット溶接性などが要求される車体骨格用途には、これらを兼備した低 YR 型が主として適用される。また、シート骨格部品には形状に応じて EI-λ バランス型と高 λ 型が適用されている。また、超高 λ 型はシートフレームの組立て工程に機械接合法 (TOX 接合法) を適用するために開発された鋼板で、非常に高い局部延性を有し TOX 接合のような強加工でも亀裂を生じにくい特長をもつ³⁰⁾。

WQ ハイテンの 1 180 MPa 級にも低 YR 型と高 λ 型がある。低 YR 型は同強度グレードとしては非常に高い伸びを有し、絞り成形も可能であることから、写真 5 に示すドアインパクトビーム³¹⁾などに適用されている。この部品は従来ホットスタンプで製造されていたが、従来よりも深い断面形状に WQ ハイテンを冷間プレスすることにより、性能同等とすることに成功した。また、この強度以上で懸念される遅れ破壊に関しても JFE スチールが確立した遅れ破壊予測技術³²⁾を用いることにより問題なく使用されている。

冷間圧延の 1 320 MPa 級、1 470 MPa 級は WQ-CAL の特長を最大限活用した自動車用の実用鋼として最高レベルの TS (引張強度) を有する鋼板である。C を極力低減したマルテンサイト単相組織とすることにより、曲げ加工性、スポット溶接性、耐遅れ破壊性に優れ、バンパーレインフォース

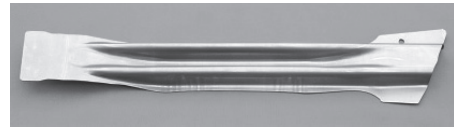


写真 5 WQ ハイテンの適用例 (1 180 MPa 級, ドアインパクトビーム)

Photo 5 Application of WQ HITEN (1 180 MPa Grade, Door impact beam)

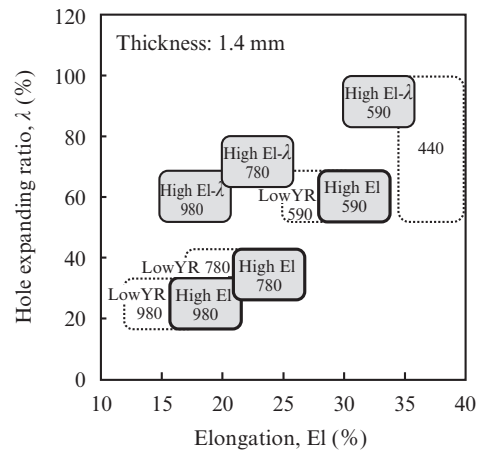


図 11 高成形性 GA ハイテンの EI-λ バランス

Fig. 11 EI-λ balance of high performance GA HITEN

や鋼管ドアビームとして軽量化に寄与している。

次に、JFE スチールにおける高強度高成形性 GA 鋼板の TS と EI, λ の関係を図 11 に示す。GA ハイテンについても 590~1 180 MPa の幅広い TS グレードでさまざまな成形様式に適合するように汎用型、高 EI 型、高 EI-λ 型を品揃えしている。高 EI 型は汎用型に比較して全伸びが 3~5% 高く、1 グレード低位の TS レベルの汎用型とほぼ同等の延性を示す。高 EI 型は 590 MPa 級に続き 780 MPa 級も難成形部品に採用³³⁾され、車体軽量化に寄与している。高 EI-λ 型は高 EI 型と同等の EI を維持しながら λ は汎用型に比較して 4~5 割高位であり、590 MPa 級は 440 MPa 級の λ に、980 MPa 級は 590 MPa 級の λ に匹敵する。今後、伸びフランジ性がネックとなってハイテン化が進んでいない難成形部品への適用が期待される。

4.1.3 足回り・フレーム用熱間圧延ハイテン

—NANO ハイテン®, SB ハイテン—

サスペンション・アームなどの自動車足回り部品は車体骨格部品に比べて板厚が厚いことから、主として熱間圧延鋼板が用いられる。足回り部品には穴広げなどの加工性や強度・剛性のほかに疲労や腐食などに対する耐久性も要求され、現在では TS440~590 MPa 級が用いられることが多いが、さらに強度の高い 780 MPa 級の開発が望まれていた。

NANO ハイテン®はこのような用途に対応するために開発された熱間圧延鋼板で、次のような特徴を持つ³⁴⁾。

- (1) 加工性に優れたフェライト単一組織である。

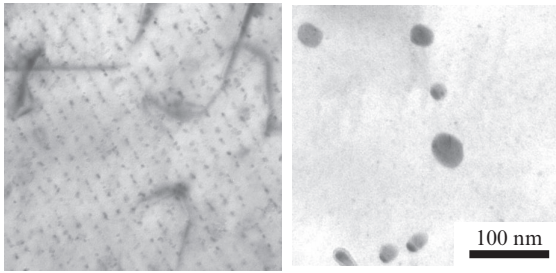


写真6 析出強化鋼における炭化物の形態: (a) NANOハイテン®, (b) 従来鋼

Photo 6 Carbides morphology in precipitation-strengthened steels; (a) NANOHITEN™, (b) Conventional steel



写真7 NANOハイテン®の適用事例

Photo 7 Application of NANOHITEN™

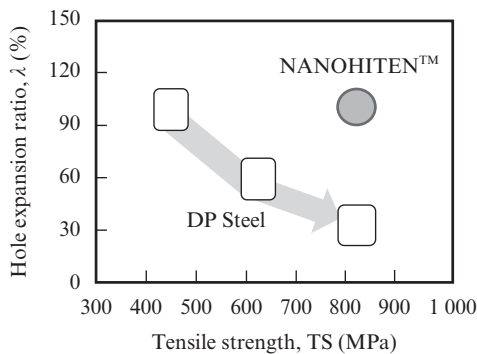


図12 複合組織型ハイテンと NANOハイテン®の穴広げ率

Fig. 12 Hole expanding ratios of NANOHITEN™ and dual phase steel

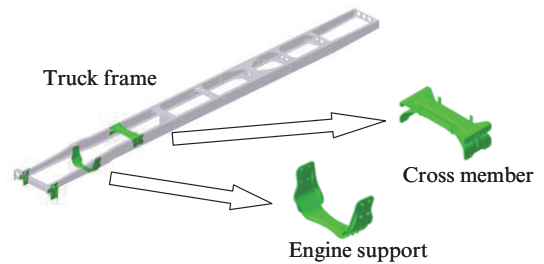


写真8 780SBの適用例

Photo 8 Application of 780SB

(2) 数ナノメートルのサイズまで微細化した炭化物で強化されている (写真6)。

(3) 炭化物の熱的安定性が極めて高い。

(4) 炭化物の微細化により十分な強化が得られるため、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®は図12に示すように従来の複合組織型ハイテンに比べて高い穴広げ性を示すが、これは上記(1)、(2)の特徴を反映したものである。すなわち、複合組織型ハイテンでは軟質相と硬質相の変形能が大きく異なるため、打抜き穴の周辺で軟質相と硬質相の界面からマイクロポイドが発生し、強度を上げると相の硬度差(変形能の差)も大きくなるため穴広げ性が大きく低下するが、フェライト単一相からなるNANOハイテン®ではこのような現象を回避できる。

また、NANOハイテン®では上記(4)の特徴を反映してSiを添加していないため、Si添加した一般の熱間圧延ハイテンに比べて表面性状に優れ、表面の凹凸が性能に影響する疲労強度の面でも有利である。

780MPa級のNANOハイテン®は上述したような優れた加工性と耐久性が評価され、写真7に示すサスペンション・ロア・アームなどの足回り部品を中心に多数採用されている。

NANOハイテン®は微細炭化物の量を増やすことによって強度を上げることができ、現在1180MPa級までの高強

度化に成功している。析出強化の特徴として降伏比(YS/TS)が高い点があげられる。たとえば1180MPa級のNANOハイテン®では1470MPa級のホットスタンプ材とほぼ同等のYSとなり、足回り部品だけでなく、衝突吸収エネルギーが問題となる車体骨格部品への適用拡大も期待される。

さらに、NANOハイテン®は特徴の(3)に対応して200~700℃に鋼板を加熱して成形する温間成形を有利に適用することも可能であり、このような新しい工法との組合せによって適用領域が拡大することも期待されている³⁵⁾。

一方、トラックなどのフレーム用途では荷台の重量に耐える静的な強度と疲労強度の両立が重要で、特にフレームの軽量化のため多数開けられる打抜き穴部の疲労強度が問題となる。また、用途上、板厚が3mmを超えるような比較的板厚の厚い鋼板が要求されるため、板厚方向の組織均一性も必要となる。

JFEスチールの780SBはこのような用途を想定して開発されたもので、強化相にベイナイトを用いることで打抜き穴の端面荒れを生じる組織の不均一性を大幅に低減し、打抜き穴の疲労強度を向上させている。また、組織の均一性を

高めたことで、疲労強度のほか、伸びや穴広げ性といった加工性も向上した。

780SB はこれらの特性が評価され、大型トラックのクロスメンバーやエンジンサポートに採用されている³⁶⁾ (写真 8)。

4.2 電気機器の効率化に寄与する電磁鋼板

4.2.1 EV/HEV モータ用電磁鋼板

—JNE, JNP, JNEH—

1990 年代以降、自動車各社では CO₂ 削減の観点から電気自動車 (EV)、ハイブリッド電気自動車 (HEV) などの低燃費車の開発を進めており、急速に普及が進んでいる。EV/HEV では駆動モータが重要な役割を果たしており、モータコア材として用いられる電磁鋼板には低鉄損および高磁束密度が要求されている。電磁鋼板の鉄損低減のためには固有抵抗増大と磁気異方性低減の観点から Si 添加が有効であり、高グレードの電磁鋼板には Si が 3% 程度添加されているが、一方で Si は非磁性元素であることから、飽和磁化の低下により磁束密度が低くなる。このため、従来の Si 添加の手法では磁束密度 - 鉄損特性の両者に優れた材料の製造は困難であった。

これに対し、Si, Al などの合金添加量を適正化するとともに鋼中不純物を低減することにより従来の JN シリーズよりも磁束密度 - 鉄損バランスを改善した JNE シリーズを、また、モータの高トルク化に対応するため、集合組織制御技術を活用し磁束密度を JNE シリーズよりも高めた JNP シリーズを開発した^{37, 38)}。さらに、EV/HEV モータの高速化ニーズに対応するため、薄手化により高周波鉄損を低減した薄電磁鋼板 (JNEH シリーズ) を開発した³⁹⁾。図 13 に EV/HEV モータ用電磁鋼板の製品例を示す。これら材料は、従来の電磁鋼板に比べ磁束密度 - 鉄損バランスが優れており、モータの効率化に大きく寄与できることから、多くの EV/HEV に採用されている。

4.2.2 高周波機器用高い素鋼板—Super Core™—

鋼中に Si を添加した場合、Si 添加量の増加と共に鉄損が

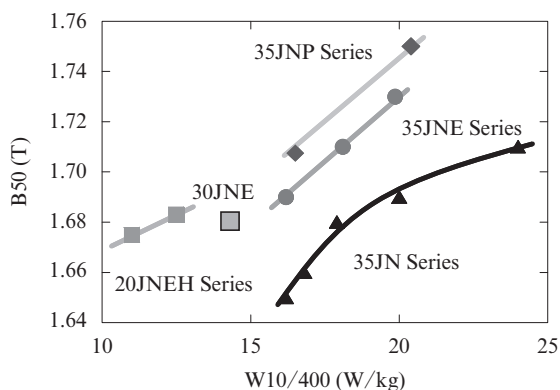


図 13 EV/HEV 用電磁鋼板の磁気特性

Fig. 13 Magnetic properties of electrical steel sheets for EV/HEV

低下し、Si 添加量が 6.5% で磁歪がほぼゼロとなり、透磁率および鉄損が最も優れた値を示すことが知られている⁴⁰⁾。しかし、Si 添加量が増加すると材料の伸びが急激に低下し、圧延により薄鋼板を製造することが困難となるため、従来の最高級電磁鋼板では Si 添加量は 3.5% 程度に制限されていた。

これに対し、JFE スチールでは圧延法に代わり CVD 法 (化学気相蒸着法) による高い素鋼板の製造技術を開発し、世界で初めて 6.5% けい素鋼板の量産に成功した⁴¹⁾。6.5% けい素鋼板は磁歪が低いことから電気機器の低騒音化に効果が大きく、図 14 に示すようにアモルファス、方向性電磁鋼板に比べ著しい低騒音化効果が確認されている⁴²⁾。また、6.5% けい素鋼板は高周波鉄損が低いことから高速モータ用のコア材としても優れた特性が期待できる。図 15 に 6.5% けい素鋼板、薄電磁鋼板 (20JNEH1200) および板厚 0.35 mm の 3% Si 鋼 (35A230) を用いて作製したモデルモータ (IPM モータ, 4 極, 分布巻き, 最大出力 2 kW) の特性を示す⁴³⁾。これより、6.5% けい素鋼板を用いることにより薄電

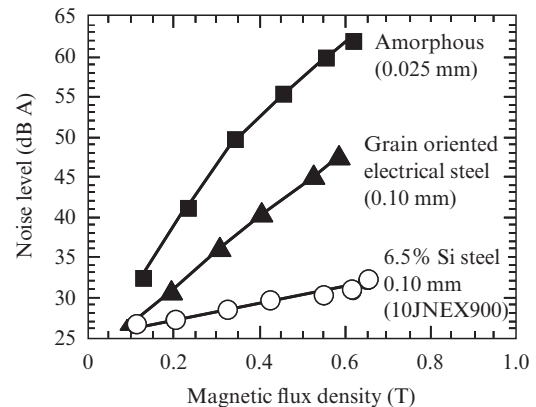


図 14 実験室モデルリアクトルの騒音

Fig. 14 Audible noise of test reactors

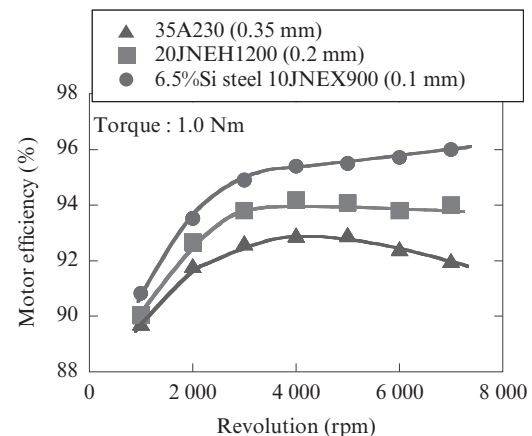


図 15 高速モータの効率に及ぼす材料の影響

Fig. 15 Influence of kind of materials on efficiency of high speed motor

磁鋼板よりもさらに高い効率が得られており、その効果は高回転域になるほど大きくなる事が分かる。

さらに、CVD プロセスを用い板厚方向の Si の濃度勾配を最適化することにより高周波鉄損を低減した HF コアも開発した⁴⁴⁾。HF コアは 5 kHz 以上の周波数領域では 6.5% けい素鋼板を凌ぐ低鉄損特性を示し、加工性にも優れることから、リアクトル以外に高速モータのコア材としても期待されている。

5. おわりに

鋼材分野では、輸送機器の軽量化や構造物の安全性向上に寄与できる最新の TMCP 技術を適用し開発された鋼材の特徴を取り上げ、薄板分野では、自動車用鋼板の高強度化(薄肉化)を行なうことで車体の軽量化に寄与できる当社が開発した特徴あるハイテンを取り上げ、材料設計の考え方と適用事例を紹介した。シームレス鋼管分野では、マルテンサイト系ステンレス鋼管を取り上げ、厳しい腐食環境に適用できる油井用鋼管とラインパイプ用鋼管を紹介した。電磁鋼板分野では、EV/HEV モータ用電磁鋼板および高周波機器用高けい素鋼板を取り上げた。

JFE スチールは、今後とも、最先端の材質制御技術を活用した高機能商品の提供を通じて環境負荷低減に貢献して行く所存である。

参考文献

- 1) 長塚誠治. 日本船舶海洋工学会誌. 2007, no. 11, p. 10.
- 2) ジャパン マリンユナイテッド提供.
- 3) 山口欣也, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩. 日本船舶海洋工学会誌. 2005, no. 3, p. 70.
- 4) 一宮克行, 角博幸, 平井龍至. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 13.
- 5) Yamaguchi, Y. et al. ISOPE-2010. p. 71-79.
- 6) 脆性亀裂アレスト設計指針. 日本海事協会, 2009.
- 7) 西村公宏, 半田恒久, 橋本正幸. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 18.
- 8) 長尾彰英, 伊藤高幸, 小日向忠. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 29.
- 9) 藤林晃夫, 小俣一夫. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 8.
- 10) 林謙次, 長尾彰英, 松田稔. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 35-40.
- 11) たとえば, 金子康弘ほか. NKK 技報. 1992, no. 140, p. 1.
- 12) 大森章夫, 志村保美. ふえらむ. 2011, vol. 16, p. 730.
- 13) 植田圭治, 遠藤茂, 伊藤高幸. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 23.
- 14) 大成建設プレスリリース. 「780 N/mm² 鋼と Fc150 N/mm² コンクリートによる最高強度の CFT 柱を実現 —超高層ビル「(仮称) 大手町 1-6 計画」で初適用—」. 2012-07-19. http://www.taisei.co.jp/about_us/release/2012/1329703212966.html
- 15) Zimmerman, T. E. et al. Proc. of OMAE1995. vol. 5, p. 365-378.
- 16) 岡津光浩, 鹿内伸夫, 近藤丈. JFE 技報. 2007, no. 17, p. 20-25.
- 17) Muraoka, R. et al. Proc. of IPC. paper no. IPC2010-31556, Calgary, Canada.
- 18) JFE スチールニュースリリース. 「Trans Canada 向け X80 グレード UOE 鋼管 52,000T の受注」. 2008-03-03.

- 19) 木村光男, 宮田由紀夫, 島本健. JFE 技報. 2007, no. 17, p. 42.
- 20) JFE 技報. 2012, no. 29, p. 61.
- 21) Kimura, M.; Miyata, Y.; Yamane, Y.; Toyooka, T.; Nakano, Y.; Murase, F. CORROSION 1997. paper no. 22.
- 22) Kimura, M.; Yamazaki, Y.; Tamari, T.; Sakata, K.; Mochizuki, R. CORROSION 2005. paper no. 05108.
- 23) Kimura, M.; Shimamoto, K. Eurocorr 2011. p. 180.
- 24) Ishiguro, Y.; Suzuki, T.; Miyata, Y.; Kimura, M.; Nakahashi, T.; Sato, H.; Shimamoto, K. NACE CORROSION 2013. paper no. 2436.
- 25) Miyata, Y.; Kimura, M.; Masamura, K. NACE CORROSION 2007. paper no. 07092.
- 26) 小野義彦, 高橋健二, 岩間隆史, 梶山浩志, 櫻井理孝. まてりあ. 2012, vol. 51, p. 22.
- 27) たとえば, 中岡一秀, 荒木健治, 高田芳一, 能勢二郎. 日本鋼管技報. 1977, vol. 75, p. 11.
- 28) たとえば, 吉武明英, 比良隆明, 平本治郎. JFE 技報. 2007, no. 16, p. 34.
- 29) 細谷佳弘, 津山青史, 長滝康伸, 金藤秀司, 出石智也, 高田康幸. NKK 技報. 1994, vol. 145, p. 33.
- 30) 長谷川浩平, 占部俊明, 山崎善政, 吉武明英, 細谷佳弘. まてりあ. 2003, vol. 42, p. 76.
- 31) 田路勇樹, 長谷川浩平, 河村健二, 川辺英尚, 重本晴美. まてりあ. 2009, vol. 48, p. 129.
- 32) 田路勇樹, 高木周作, 吉野正崇, 長谷川浩平, 田中靖. 鉄と鋼. 2003, vol. 95, p. 76.
- 33) JFE スチールニュースリリース. 「プレス加工性に優れた高伸び型 780 MPa 級高張力合金化溶融亜鉛めっき鋼板が車体骨格部品に初採用」. 2012-11-29.
- 34) たとえば, Funakawa, Y. et al. ISIJ Int. 2004, vol. 44, p. 1945.
- 35) 船川義正, 藤田毅, 山田克美. JFE 技報. 2012, no. 30, p. 1.
- 36) JFE スチールニュースリリース. 「打抜き加工性に優れた 780 MPa 級高張力熱延鋼板「780SB」がトラックフレームに初採用」. 2012-12-20.
- 37) 酒井敬司, 河野正樹, 藤山寿郎. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 2, p. 92.
- 38) 戸田広朗, 尾田善彦, 河野雅昭, 石田昌義, 松岡才二. まてりあ. 2011, vol. 50, p. 33.
- 39) Oda, Yoshihiko; Kohno, Masaaki; Honda, Atsuhito. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, vol. 320, no. 20, p. 2430-2435.
- 40) Bozorth, R. M. "Ferromagnetism." D. Nostrand Co. Inc., N. J., 1951, p. 77.
- 41) 高田芳一, 阿部正広, 田中靖, 岡田和久, 平谷多津彦. まてりあ. 1994, vol. 33, no. 4, p. 423.
- 42) 藤田耕一郎, 高田芳一. 熱処理. 1999, vol. 39, no. 4, p. 200.
- 43) 尾田善彦, 平谷多津彦, 千葉明, 星伸一, 竹本真紹, 小笠原悟司. ふえらむ. 2012, vol. 17, no. 12, p. 9.
- 44) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘. JFE 技報. 2005, no. 8, p. 11.



津山 青史



遠藤 茂



瀬戸 一洋