
鋼構造物の信頼性向上と経済性追求に貢献する高性能厚鋼板

Development of High Performance Steel Plates in Terms of Reliability and Economy of Steel Structures

谷川 治(Osamu Tanigawa) 郡山 猛(Takeshi Kohriyama) 天野 虔一(Keniti Amano)

要旨：

近年、鋼構造物の分野において、信頼性向上のためのアプローチがなされるとともに、トータルコスト削減の観点から、従来のような鋼重の削減あるいは工作コストの低減ばかりでなく、LCC (life cycle cost) の考え方の導入が進みつつある。当社でもそれらを踏まえて新しいコンセプトを持つ高性能厚鋼板の開発が進められてきた。自由な板厚形状を有するLP 鋼板、海浜部でも裸使用が可能な耐候性鋼板そして新たな鋼の組織制御技術を活用し溶接における予熱フリーを実現した極低炭素ベイナイト鋼シリーズなどである。これら新製品の開発経緯と今後の技術課題を展望する。

Synopsis：

Steel structures are now evaluated from the viewpoint of reliability and economy. When the economy is concerned, the cost is evaluated in total, which means that not only the costs related to the fabrication and the weight but also the life cycle cost of the structure is taken into consideration. According to this industrial trend, Kawasaki Steel has developed a new type of high performance steels such as a steel plate having various profiles in the longitudinal direction (LP plate), a new weathering steel which can be used in coastal regions without painting and an extremely-low carbon bainitic steel manufactured on the basis of microstructure-controlling technology, which can be welded without pre-heating. This paper reviews these high performance steels and summarizes technological subjects in the future.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

鋼構造物の信頼性向上と経済性追求に貢献する 高性能厚鋼板*

川崎製鉄技報
32 (2000) 3, 198-204

Development of High Performance Steel Plates in Terms of Reliability and Economy of Steel Structures



谷川 治
Osamu Tanigawa
厚板セクター室長



郡山 猛
Takeshi Kohriyama
水島製鉄所 厚板・鋳
鍛部長



天野 虔一
Keniti Amano
技術研究所 厚板・条
鋼研究部門長・工博

要旨

近年、鋼構造物の分野において、信頼性向上のためのアプローチがなされるとともに、トータルコスト削減の観点から、従来のような鋼重の削減あるいは工作コストの低減ばかりでなく、LCC (life cycle cost) の考え方の導入が進みつつある。当社でもそれらを踏まえて新しいコンセプトを持つ高性能厚鋼板の開発が進められてきた。自由な板厚形状を有するLP鋼板、海浜部でも裸使用が可能な耐候性鋼板そして新たな鋼の組織制御技術を活用し溶接における予熱フリーを実現した極低炭素ベイナイト鋼シリーズなどである。これら新製品の開発経緯と今後の技術課題を展望する。

Synopsis:

Steel structures are now evaluated from the viewpoint of reliability and economy. When the economy is concerned, the cost is evaluated in total, which means that not only the costs related to the fabrication and the weight but also the life cycle cost of the structure is taken into consideration. According to this industrial trend, Kawasaki Steel has developed a new type of high performance steels such as a steel plate having various profiles in the longitudinal direction (LP plate), a new weathering steel which can be used in coastal regions without painting and an extremely-low carbon bainitic steel manufactured on the basis of microstructure-controlling technology, which can be welded without pre-heating. This paper reviews these high performance steels and summarizes technological subjects in the future.

1 緒 言

厚鋼板は、あらゆる種類の巨大構造物を構成する主たる部材として使用されており、その役割は 21 世紀になっても変わらないと思われる。このためあらゆる環境に適合させるべく、高強度、極厚、氷海域で使用可能、あるいはサワー環境に耐えるなど、種々の特性を具備した高性能厚鋼板が開発されてきている。

さらに、近年では構造物のトータルコスト削減の観点から、(1) 溶接性を阻害しないで高強度化を行い鋼重削減を図る、(2) 組立て時の省工程あるいは溶接における予熱低減などで作業負担を軽減する、(3) 構造物の寿命までのメンテナンスコストを削減するなどのアプローチがなされている。また、溶接部を含む構造物の信頼性についても従来以上のレベルが求められている。

これらの動向を踏まえ、川崎製鉄は種々の基礎研究を行うとともに、それをベースにして各分野における新商品の開発を実施してきた。本報告では、実用化途上にある課題も含め、それら新商品の開発経緯とその特徴を紹介する。

2 鋼構造物における技術動向と研究課題

2.1 構造物における継手疲労

溶接構造物用鋼の高強度化が進む一方で、溶接継手の疲労強度は鋼板強度に依存せずに低いことが、高強度鋼の構造物への適用を阻害してきた。溶接継手の低疲労強度の原因には、溶接部に存在する引張の残留応力や形状不連続による応力集中などがある。その対策として溶接後の応力除去焼なまし、ハンマーピーニング処理、グライNDER処理などがあるが、経済性の観点からは必ずしも最善の方法ではない。

近年、溶接金属の冷却過程におけるマルテンサイト変態膨張を利用することにより、溶接のままで高疲労強度を達成できる可能性が示された。Fig. 1 に示すように、Ms 点の低い溶接材料を用いることにより、室温付近で変態膨張を起こさせ、溶接部に圧縮残留応力を導入することができる。この考えのもとに、科学技術庁金属材料技術研究所殿とともに低変態温度溶接ワイヤの創製に取り組み、10Cr-10Ni 系のワイヤを開発した。さらに、そのワイヤを用いた溶接継手の疲労強度は向上した¹⁾。また、この溶接材料は耐溶接割れ性の向上にも有効である²⁾。低変態温度溶接材料 (10Cr-10Ni 系)

* 平成12年6月21日原稿受付

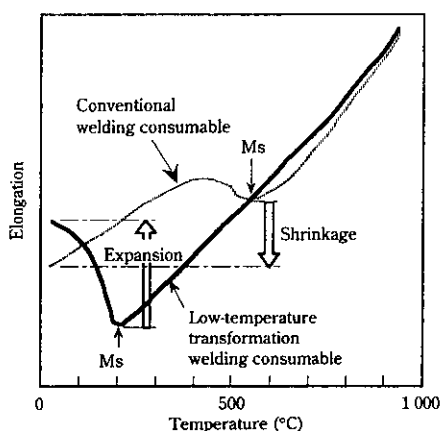


Fig. 1 Relationship between elongation and temperature of weld metal

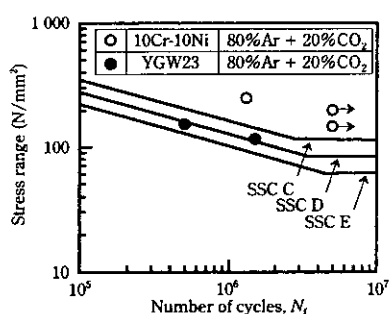


Fig. 2 S-N curve of welded joint

を適用した荷重非伝達型十字溶接継手の疲労強度³⁾を Fig. 2 に示すが、従来継手 (YGW23) に比べて、疲労強度が飛躍的に向上している。現在、本材料の実用化に向けた研究を金属材料技術研究所殿と共同で継続している。

2.2 予熱低減に関する新しいアプローチ

溶接構造物の大型化、あるいは製作コストの低減にともない、高強度かつ靱性、溶接性、経済性に優れた鋼材が求められている。しかし、炭素当量の増大による高張力化は、溶接熱影響部 (HAZ) の硬化による低温割れ感受性の上昇をとまなう。これらを克服すべく制御圧延と加速冷却を組み合わせた TMCP (thermo-mechanical control process) 技術の適用による低炭素当量での高張力鋼の開発が進められてきた。

当社はこれらの考え方をさらに発展させ、特に炭素含有量が約 0.02 mass% 未満の極低炭素鋼のベイナイト組織および変態挙動に注目した。

Fig. 3 に 0.016% C-1.58% Mn 系極低炭素ベイナイト鋼の加工 CCT 図を示す。0.13~23°C/s の広い冷却速度範囲でベイナイト変態だけがおこる特徴的な挙動を示す。これを利用することにより、板厚の大きい 570 MPa 級高張力鋼板が非調質で製造可能となる。

Fig. 4 にこの極低炭素ベイナイト鋼を用いた、JIS Z3101 による溶接熱影響部の最高硬さ試験結果を示す⁴⁾。極低炭素ベイナイト鋼は試験溶接ビードが短い場合でもほとんど HAZ の硬さ上昇が認められず、アークタイム 1s の点付溶接においてもビッカース硬さ 268 ポイントと、従来鋼の 330~380 ポイントに比べて極めて低い。この卓越した耐溶接硬化性を示す極低炭素ベイナイト鋼の適用により、板厚の大きい 570 MPa 級高張力鋼板においても溶接施工にお

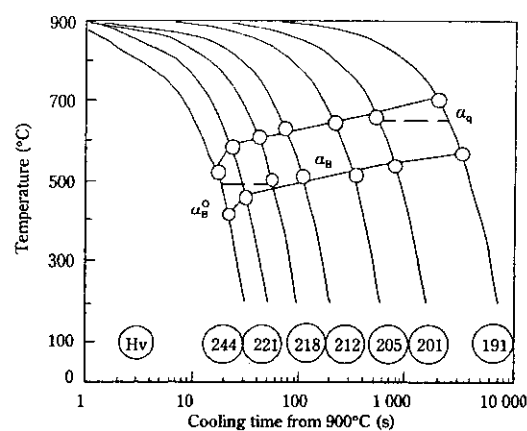


Fig. 3 CCT diagram of extremely-low carbon bainitic steel

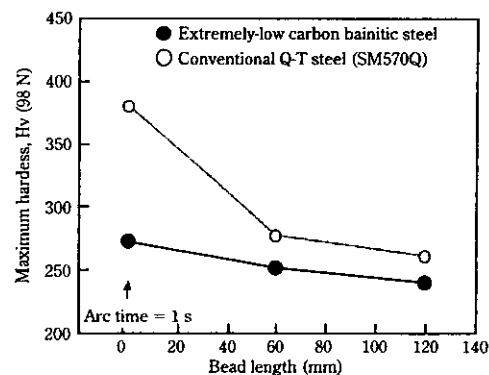


Fig. 4 Results of maximum hardness test

ける完全予熱フリー化が可能となった⁵⁾。

2.3 耐候性鋼の現状と新しい鋼材

耐候性鋼 (JIS-SMA 鋼) では、大気環境において、長時間かけて鋼材表面に保護性のある緻密な安定さび層が形成され、腐食速度が低減する。この防食効果を利用した無塗装耐候性鋼橋梁は初期塗装や塗り替え塗装を省略でき、LCC (life cycle cost) の低減に寄与する。日本での鋼橋梁材の年間需要約 60~70 万トンに占める耐候性鋼の適用比率は増加傾向にあり、現在では約 12% にまで達した。

耐候性鋼の問題点の一つは、海浜地域では安定さび層が形成されず、腐食速度が低減しない場合があることである。このため、1993 年には建設省土木研究所他の指針において海浜地域での裸使用が制限された⁶⁾。また、近年、非海浜地域においても冬期に路面凍結防止剤を散布するような環境で、同様の問題が指摘されている⁷⁾。

海浜地域など塩化物を多く含む環境で安定さび層が形成されない原因として、(1) 塩化物の潮解性による腐食の進行、(2) さびの結晶化 (粗大化)、(3) さび層—地鉄界面での Cl の濃化、(4) Fe_3O_4 、 β - FeOOH の生成促進などがあげられる。

塩化物のこれらの作用を防止すべく、0.02% C 鋼中に Ni, Cu, Cr, Mo, P などの合金元素を添加し、海水散布試験でその効果を評価した。Fig. 5 に海水散布試験における鋼材腐食量に及ぼす Ni 量の影響を示す。Ni 量の増加にしたがい腐食量は減少し、かつ腐食が飽和する傾向を示した。0.02% C 鋼に Ni を 2.5% 添加した海浜用新耐候性鋼のさび層の特徴は、(1) 消光層の連続性が高く、(2) 非晶質さびの比率が高く、(3) さび層—地鉄界面での Cl 量が少なかった。

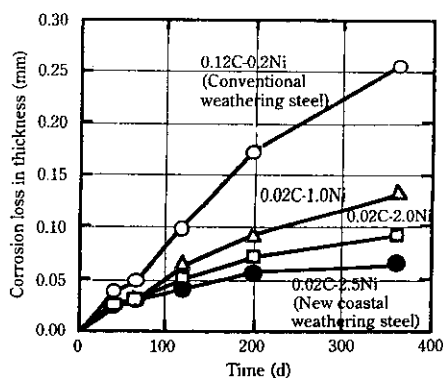


Fig. 5 Effect of Ni content on corrosion curve in seawater spray test (Place: Mizushima Works quay, Spray time: 1 h, Frequency: twice a week)

したがって、Ni は塩化物存在下でさびの結晶化（粗大化）を抑制し、Cl の地鉄界面での濃化を抑制する効果がある。

2.4 鋼材と溶接のマッチングによる溶接部の性能向上

鋼構造物の性能は溶接部性能に律速される場合が多い。近年ではさらなる溶接部の高性能化に対応するため、鋼材、溶接材料および溶接方法すべてを総合的に開発することが必要となっている。ここでは、揚水発電所ペンストック用 HT980 鋼の溶接に関する開発例を示す。

まず、溶接金属において炭素当量適正化による目標強度・靱性の確保、低 C 化による低温割れ感受性の低減効果を明らかにし、その実現のために鋼材と溶接材料のマッチングをはかり予熱低減と強度・靱性を両立させた⁹⁾。

また、狭間先 TIG + MAG 溶接方法の適用を前提とした鋼材と溶接材料のマッチングについても検討し、Fig. 6 に示すように、溶接金属強度を 900 N/mm² に低減しても目標溶接継手強度を満足できることを明らかにした⁹⁾。さらに、Fig. 7 に示すように、溶接金属の強度低減と酸素量低減により靱性が大きく向上することを明らかにした。溶接材料および溶接シールドガス組成の最適化を図った開発 TIG + MAG 溶接継手においては従来溶接継手¹⁰⁾の約 2 倍のシャルビ吸収エネルギーを達成した⁹⁾。

溶接継手性能向上に対しては、このような総合的な開発が非常に有効であり、今後も積極的な取り組みが必要である。

2.5 溶接熱影響部の特性制御

溶接構造用厚鋼板には、1~100 kJ/mm² に渡る広範囲の入熱による溶接施工が適用されており、鋼材の高強度化の発展とともに優れた HAZ 靱性への要求も強い。以下に当社における HAZ 靱性制御の基本的考え方を述べる。これらは、後述の造船用鋼板ならびに海洋構造物用鋼板のみならず、低温タンク用厚鋼板などにも適用されている。

2.5.1 粗粒域 HAZ 靱性の向上技術

大入熱溶接 HAZ で靱性が劣化するのは粗粒域の HAZ であり、その靱性向上には、 γ 粒成長抑制のためのピーニング効果の利用が不可欠である。そのために最適な Ti/N 比制御による TiN および、より高温加熱域を制御するための REM (O, S) の利用技術を確認した。さらに、変態後の上部ベイナイト生成や針状の島状マルテンサイト生成抑制のための最適 Nb 量制御などを組み合わせることで靱性が向上する。

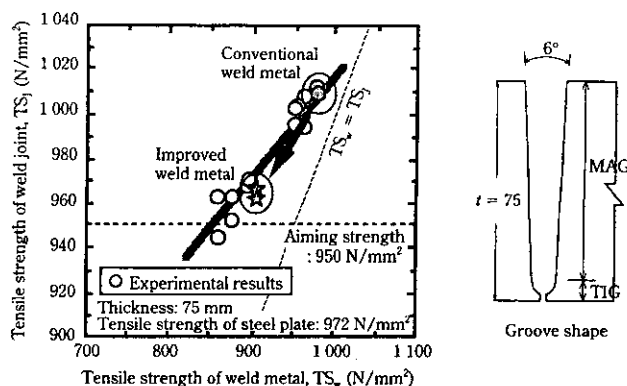


Fig. 6 Relation between tensile strength of weld metal and TIG + MAG weld joint with rectangle specimen in accordance with JIS Z 3121

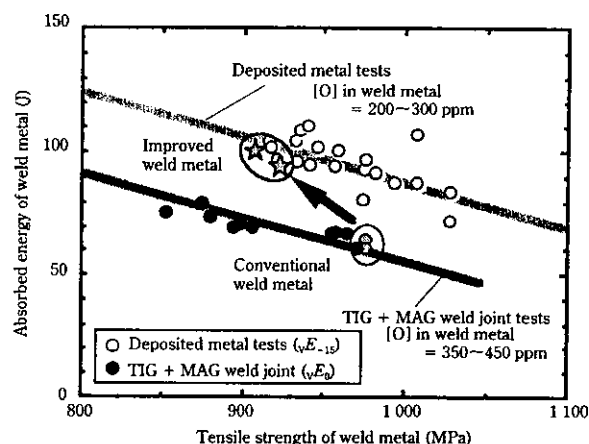


Fig. 7 Relation between tensile strength and Charpy absorbed energy of weld metal

2.5.2 局所脆化域靱性の向上技術

多層溶接では多重熱サイクルにより生成する局所脆化域の改善が重要である。特に前述の粗粒域を前組織とした、部分的逆変態温度加熱域では、島状マルテンサイトによる著しい靱性劣化を抑制するため、Fig. 8 に示す低 Si 化が有効である¹¹⁾。また、未変態析出温度加熱域の靱性は析出炭窒化物形成元素 (Nb, V) の極小化によって向上する。

2.5.3 低温タンク用厚鋼板への適用技術

LNG (沸点 -162°C) の貯蔵タンク用鋼板では、溶接継手部からの脆性き裂発生抑制と、万一脆性き裂が発生した場合の母材における伝播停止という、高度な安全性保証が必要とされる。加えて、近年のタンク大型化による鋼板板厚の増加も同時に要求されている。

こうした高度の母材の強度と靱性および HAZ 靱性の要求を実現するために、低 C 化の追求や合金元素の調整による島状マルテンサイトの生成抑制手法を積極的に適用した。LNG タンク用として開発した 50 mm 厚の 9%Ni 鋼の例では¹²⁾、0.010% の微量 Nb 添加と 0.08% までの Si 量低減を図った。微量 Nb 添加により、析出による鋼板の高強度化と、Fig. 9 に示す結晶粒微細化による HAZ の高靱性化を両立させることができる。

2.6 新しいプロセス技術の開発

LP (longitudinally profiled) 圧延は、長手方向に連続的に板厚を変

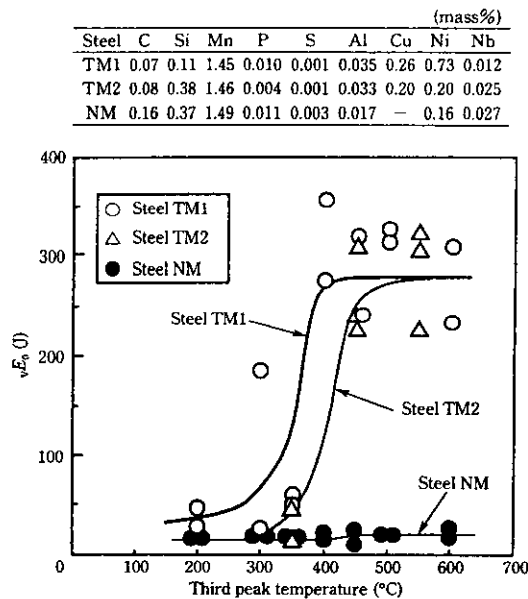


Fig. 8 Effect of the third reheating peak temperature on the toughness of the ICCGHAZ (The first and second reheating peak temperatures of simulated ICCGHAZs were 1400°C and 800°C, respectively.)

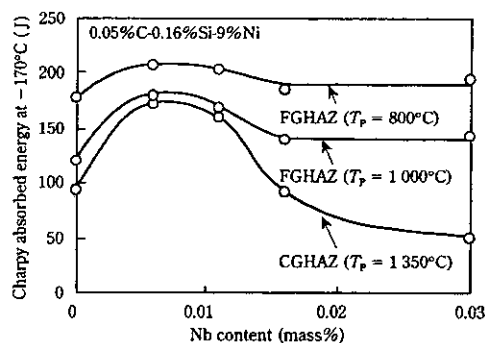


Fig. 9 Effect of Nb content on toughness of synthetic heat affected zones of 9%Ni steel

化させた厚鋼板を製造するプロセスである。

LP 鋼板の板厚制御は、圧延パス中に精度良く板厚修正を行う MAS 圧延法¹³⁾の技術が基本となっている。Fig. 10 に LP 鋼板の板厚制御システムの概要を示す。パススケジュール計算、各パスで付与するテーパ形状などを決定するプロセスコンピュータ、長手方向位置をトラッキングしながらロール開度設定量を決定する圧下 DDC (direct digital controller)、油圧圧下シリンダ位置を制御する油圧圧下コントローラにより構成されている¹⁴⁾。LP 鋼板には、さらに、制御冷却、熱間矯正、剪断についてもそれぞれ新技術を導入している¹⁵⁾。

省プロセスが図れる連続鋳造プロセスにより極厚鋼板を製造するため、当社では連続鋳造スラブに鍛造工程を付与する技術を開発し、内質の良好な鋼板の製造が可能となることを明らかにした¹⁶⁾。またスラブ幅方向に一度圧下した後、スラブ厚方向へ鍛造圧下を行う 2 方向鍛造法の適用は、連続鋳造スラブに必然的に存在するセンターポロシティの圧着に効果的であり、内質と機械的特性の極めて優れた極厚鋼板の製造が可能となる¹⁷⁾。さらに連続鋳造スラブの中心偏析を軽減するため、鍛造加熱保持時間を延長した製造プロセスにおいては、板厚中心位置での低温靱性あるいは焼戻し脆化感受性など

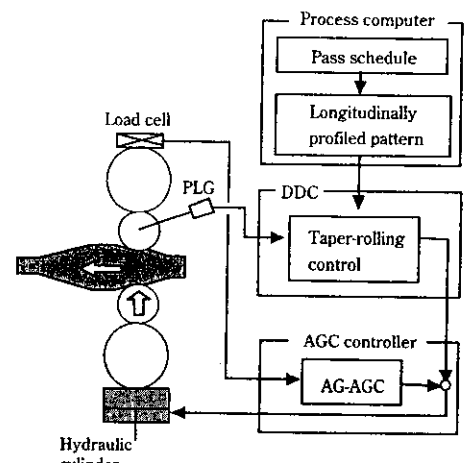


Fig. 10 System configuration for LP plate rolling

Table 1 Results of V-notch Charpy absorbed energy at the mid-thickness of 110 mm thick SCM4 steel

Case	Homogenizing treatment	Forging ratio (%)		vTrs
		Widthwise	Thicknesswise	
1		Not applied		-49°C
2	1270°C × 14 h	4	21	-76°C
3	1270°C × 41 h	4	28	-84°C

を著しく改善することができる¹⁸⁾。本プロセスを適用した 110 mm 厚の SCM4 鋼において、板厚中心位置の vTrs は、Table 1 に示すように大きく向上する。

3 高性能厚鋼板新商品とその特性

3.1 造船および海洋構造物用厚鋼板

造船分野において大量に採用されるに至った新商品として、LP 鋼板があげられる¹⁹⁾。1993 年にバルクキャリアのトランスバルクヘッドとして適用が開始された。Fig. 11 に示すように、同厚の鋼板から差厚鋼板に、さらに LP 鋼板を使用することにより溶接個所の削減が可能になる。

Fig. 11 の場合は、Fig. 12 に示す Type 1 と称するものであるが、その後バルクキャリアの船底部に Type 2 の鋼板が使用されている。

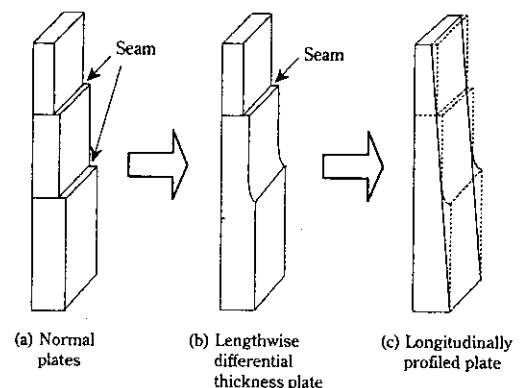


Fig. 11 Example of an omission of seams and reduction of weight using LP plate

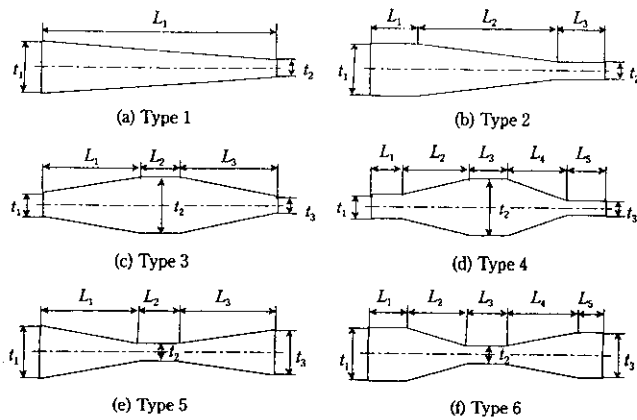


Fig. 12 Various profiles of longitudinally profiled plates

造船分野における大きなニーズとしては、厚肉高強度大入熱対策鋼、塗装メンテナンスが不要となる鋼板あるいは高い継手疲労強度などの困難な課題が残されており¹⁹⁾、当社としても開発を継続していく。

なお、超高速水中翼船（ジェットフォイル）の水中翼用に開発した、マルテンサイト系ステンレス鋼である 13%Cr-5%Ni-1%Mo 鋼板²⁰⁾は、将来のテクノスーパーライナー用の水中翼用にも適用が可能である。

海洋構造物の分野では、板厚 101.2 mm の YP420MPa 級の厚鋼板を開発した¹⁹⁾。最近では、氷海域での使用を考慮した -40°C での CTOD 値 0.30 mm 以上を保証できる板厚 75 mm の鋼板を開発した²¹⁾。従来の低 C、低 N、低 Si、低 P、REM-Ti 処理などの HAZ 靱性対策に加え、低温での靱性を確保すべく Ni を 1.1% 添加した。

Fig. 13 に、入熱 5.0 kJ/mm の SAW 継手部の CTOD 特性を示すが、極めて安定した特性が得られている。

3.2 土木・橋梁用鋼

橋梁製作における合理化推進の動きに対応して、製作施工の効率化を図る上で有効な鋼板の開発を進めた。

2.2 節で述べた極低炭素ベイナイト鋼の製造技術を適用して、570 MPa 級鋼の厚肉材が圧延まま（非調質）で製造可能となった²²⁾。開発鋼は、Pcm が 0.20 mass% 以下であり、溶接施工における予熱作業が不要となる。また、前述したように卓越した低硬化性を有し、さらには線状加熱作業において、 900°C 以上に加熱した後直ちに水冷しても、材質劣化を示さないなどの特性を有することから、本鋼板は、製作施工における工程縮減および省略に大きく寄与する鋼板

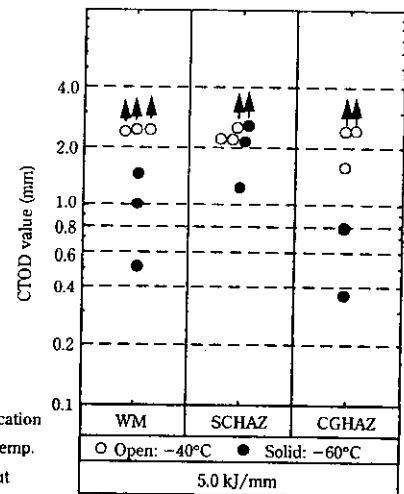


Fig. 13 CTOD test results for SAW welded joints of steel plate developed

としての評価を得ている。

橋梁の LCC 低減の有効な手段の一つとして、耐候性鋼の適用が増加しつつあり、当社は極低炭素ベイナイト鋼をベースにし、新たな鋼板の開発を進めた。

Mn, Cu, Ni および Cr の添加量を JIS の規制範囲内に入るように調整して、非調質極低炭素ベイナイト型 SMA570WTMC 鋼（田園耐候性鋼）を開発した²³⁾。開発鋼は、従来鋼に比べてより優れた溶接性と施工性を有する。

さらに飛来塩分量が $0.05 \text{ mdd} (\text{mg} \cdot \text{dm}^{-2}/\text{d})$ 以上の高飛来塩分地区でも使用可能な耐候性鋼として、2.5 mass% の Ni 量を添加した海浜耐候性鋼を開発した。本鋼は、上記の田園耐候性鋼と同様、非調質極低炭素ベイナイト型であり、400、490、および 570 MPa 級の各鋼板の開発を完了した²⁴⁾。

これらの極低炭素ベイナイト型鋼シリーズの概要を、Table 2 に示す。

長大吊橋である明石海峡大橋の建設に当たっては、桁重量の軽減のため、補剛桁に大量の HT780 鋼が使用された。ここでは、溶接作業の効率化ならびに予熱に起因する熱変形を防止するため、予熱温度 50°C 以下を満足する HT780 鋼の開発が要請された。開発鋼は、B を極力抑えた上で、Nb を添加することにより、Pcm 値を 0.23 mass% 以下に低減する一方、継手強度確保のために Ceq を 0.45 mass% 以上とした²⁵⁾。板厚 34 mm の鋼板は、 30°C 、湿度 80% の環境における y 形溶接割れ試験での割れ阻止温度 50°C 以下を達

Table 2 Production data of extremely-low C bainitic steel plates

Steel	Thickness (mm)	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	vE (J)	Pcm (%)
TS570 Gr. steel	83	(≥ 420)	(≥ 570)	(≥ 47)	0.18
SM570TMC		496	642	314 (-5°C)	
Weathering steel	75	(≥ 430)	(≥ 570)	(≥ 47)	0.16
SMA570WTMC		459	615	292 (-5°C)	
2.5%Ni containing weathering steel	25	(≥ 235)	(≥ 400)	(≥ 47)	0.11
SMA400CW-MOD		395	499	388 (0°C)	
SMA490CW-MOD	25	(≥ 355)	(≥ 490)	341 (0°C)	0.15
SMA570W-MOD	25	(≥ 450)	(≥ 570)	322 (-5°C)	0.15
		514	664		

(); Requirement of JIS G 3106 and 3114

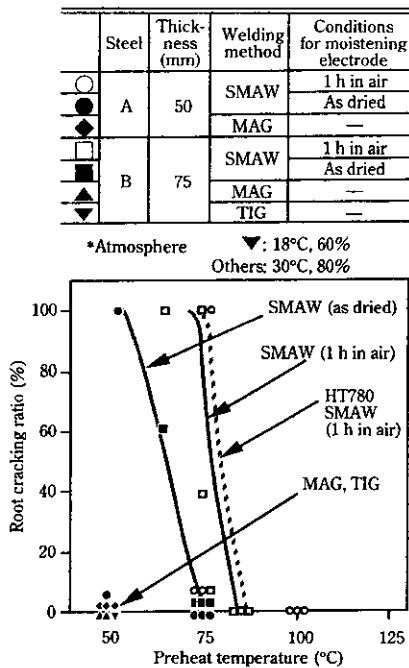


Fig. 14 Results of the y-groove weld cracking test

成するとともに、 -40°C におけるシャルピー試験でも 200J を超える高い靱性値を有している。

LP 鋼板は、構造物で用いると必要断面力に応じた合理的な板厚構成ができるため、重量低減や板継溶接の省略などによるコスト削減が可能となる。

当社は、他社に先駆けて LP 鋼板の製造に取り組み、2.6 節に示した新たな技術を導入した。LP 鋼板は、Fig. 12 に示すように、種々の板厚変化を有する 6 種類の鋼板が製造可能である。鋼種としては、道路橋示方書で指定されているすべての JIS 鋼材規格鋼が製造可能である。当社は、1994 年秋に橋梁用 LP 鋼板を我が国で初めて製造し、それ以来、2000 年 4 月までに、橋梁向け、造船向け合わせて、約 13000t の出荷実績をあげている。

揚水発電用水圧鉄管に使用する鋼材には、これまで、HT780 鋼までの高張力鋼が使用されているが、発電所の大容量化と高落差化に対応するため、さらに高強度の HT980 鋼の適用が検討されている。水圧鉄管の溶接作業はトンネル内で行われるため、溶接時の予熱温度が低い鋼材が要求される。このようなニーズに応えるため、溶接材料を含めた HT980 鋼の総合的開発を行い、板厚 50 と 75 mm の予熱低減型 HT980 鋼板、および SMAW、SAW、MAG と TIG 溶接材料を開発した¹⁰⁾。

開発された鋼板と溶接材料の組み合わせによる y 形溶接割れ試験（雰囲気： 30°C 、湿度：80%）では、Fig. 14 に示すように、SMAW で 75°C 、また、MAG と TIG では 50°C 以下の割れ阻止温度が得られ、通常の HT780 鋼とほぼ同等の耐溶接割れ性能を有していることを確認した。また、破壊靱性に関しても、母材は 0°C で、WES3003A 種基準を満たす脆性破壊停止性能を有し、溶接部は作用応力 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 、 0°C の条件で、長さ 30 mm、深さ 10 mm の表面欠陥からの脆性破壊発生を阻止できる性能を有することが大型試験で明らかになっている。

3.3 建築用鋼

建築構造物の耐震性能を向上させる技術として、制震ダンパーを

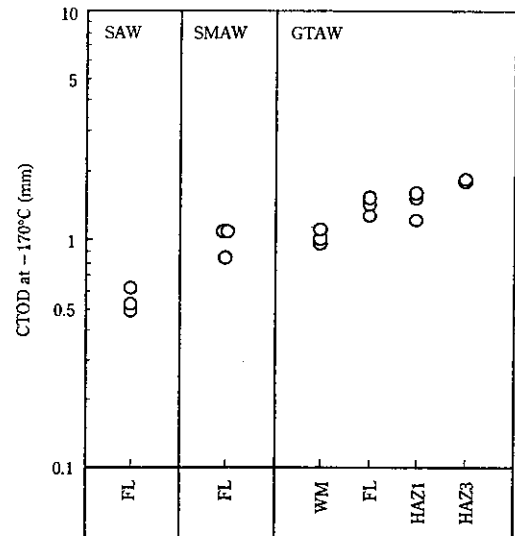


Fig. 15 Resistance to brittle fracture initiation of 9% Ni steel welded joints indicated by CTOD test (WM: Weld metal, FL: Fusion line, HAZ1: HAZ 1 mm, HAZ3: HAZ 3 mm)

組み込んだ制震工法が注目されており、なかでも性能の安定性、コスト、耐久性の面から低降伏点鋼を利用した履歴減衰型ダンパーが多く開発されている。これらは地震時の振動エネルギーを鋼材の塑性エネルギーに変換することによって、柱、梁の主要構造物の振動応答を抑える。

当社では、降伏強さが 100 MPa 級と 235 MPa 級の制震ダンパー用厚鋼板「RIVER FLEX」を開発し、商品化を行っている²⁰⁾。

100 MPa 級鋼板は、純鉄に近い成分に Ti や Nb を添加し、適切な圧延条件と熱処理条件により、結晶粒の粗大化を図った。一方、235 MPa 級鋼板では、C を 0.05% 程度までに添加し、最適な製造条件の選択により、降伏強さのレンジに応じて結晶粒径を制御している。

3.4 圧力容器および貯槽用厚鋼板

低温貯槽分野では、地上式 LNG 貯槽の大型化に対応した板厚 50 mm の高靱性 9%Ni 鋼板を開発した。2.5 節に示したように低 Si 化および微量 Nb 添加を行い、溶接継手においても高い破壊靱性値を得ている¹²⁾。

Fig. 15 に 3 種類の溶接継手における CTOD 試験結果を示す。 -170°C においても、0.49 mm 以上の安定した値が得られた。立向継手の FL 部の混成 ESSO 試験においても、助走板を伝播した脆性き裂は FL に突入後直ちに停止し、得られた K_{IC} 値も $268\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上と十分な値が得られた。

350°C 以下の中・常温域におけるボイラー・圧力容器用鋼材として、JIS G 3119 SBV2 鋼に代わる、より高強度でかつ溶接性に優れた板厚 150 mm の調質厚鋼板を開発した。目標とした特性を Table 3 に示すが、JIS G 3115 の SPV490 を発展させた鋼材で、合金元素を最適化することにより、3 回の PWHT 後にも RT から 350°C の範囲で強度を確保するとともに、優れた溶接性を得ている²⁰⁾。

耐サワー・圧力容器の分野では、HIC（水素誘起割れ；hydrogen-induced cracking）および SOHIC（stress oriented HIC）のメカニズムの検討を通じ、高性能鋼材の開発を行なった²⁰⁾。

板厚 127 mm の ASTM A516-70 級および板厚 50.8 mm の ASTM A841cl. 1 級厚鋼板である²⁰⁾。特に A841cl. 1 については、TMCP を

Table 3 Target values for the advanced SPV490 steel plate

Item	Target value
Thickness (mm)	Maximum 150
Carbon equivalent (mass%)	$Ceq^{*1} \leq 0.52$
Weld cracking parameter (mass%)	$Pcm^{*2} \leq 0.27$
PWHT cracking parameter (mass%)	$\Delta G^{*3} < 0$
Tensile strength (MPa)	≥ 610 (At RT~350°C after triple PWHT)
V-notch Charpy absorbed energy of base metal (J)	$vE_{-30^\circ C} \geq 47$

*1 $Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$ (mass%)

*2 $Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$ (mass%)

*3 $\Delta G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2$ (mass%)

適用しベイナイト主体の組織とすることにより、良好な HIC 特性ばかりでなく、A 溶液を用いた NACE TM0177-96 による引張型 SCC 試験において、0.9SMYS を超える下限応力が得られている。

4 結 言

厚鋼板に対するニーズは高度化するとともに、構造物の LCC を最小にするための新商品、あるいは最近導入が進められている性能規定型設計に対応した新商品の開発が望まれている。一方、従来からの課題である溶接継手の疲労強度あるいはさまざまな環境での耐食性など、今後解決すべき問題点も少なくない。21 世紀においても、厚鋼板は大型構造物の主要部材として使用されていくことは間違いなく、これらのニーズに応える開発を行なうことにより、我国の社会基盤を支えるべく努力していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 太田昭彦, 渡辺 修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島 敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏: 溶接学会論文集, 18(2000)1, 141
- 2) 平岡和雄, 太田昭彦, 志賀千晃, 森影 康, 久保高宏, 安田功一, 天野慶一: 第 4 回超鉄鋼ワークショップ, (2000), 41
- 3) 毛利雅志, 阪野賢治, 森影 康, 久保高宏: 溶接学会全国大会講演概要, 65(1999), 188
- 4) 岡津光浩, 林 透, 川端文丸, 天野慶一, 堀 紀文, 谷川 治, 杉本一郎, 奥村健人: 材料とプロセス, 10(1997), 1430
- 5) 岡津光浩, 板倉教次, 川端文丸, 天野慶一, 堀 紀文, 谷川 治, 奥村健人: 材料とプロセス, 11(1998), 522
- 6) 建設省土木研究所, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会: 「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX)」, (1993. 3)
- 7) (社)日本橋梁建設協会・無塗装橋梁部会, (社)鋼材倶楽部・橋梁研究会・耐候性鋼 WG: 「無塗装耐候性鋼使用橋梁における凍結防止剤の影響」, (1999. 9)
- 8) 池田倫正, 大井健次, 安田功一, 中野善文: 溶接構造シンポジウム '97, (1997), 29
- 9) 池田倫正, 安田功一, 新見健一郎, 岩瀬敏典: 溶接学会全国大会講演概要, 64(1999), 228
- 10) 板倉教次, 安田功一, 青木雅弘: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 174
- 11) 谷川 治, 石井裕昭, 板倉教次, 天野慶一, 中野善文, 川端文丸: 川崎製鉄技報, 25(1993)1, 13
- 12) 久保高宏, 大森章夫, 谷川 治: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 167
- 13) 柳沢忠昭, 三芳 純, 坪田一哉, 菊川裕幸, 池谷尚弘, 磯山 茂, 旭 一郎, 馬場和史: 川崎製鉄技報, 11(1972)2, 168
- 14) 弓削佳徳, 西崎 宏, 折田朝之, 堀 紀文, 柳野公治: 日本鉄鋼協会第 107 回圧延理論部会, 107 圧理-14, (1997)11
- 15) 弓削佳徳, 堀 紀文, 西田俊一: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 137
- 16) 青木雅弘, 谷川 治, 三代祐嗣, 野村朋文, 石井裕昭: CAMP-ISIJ, 8(1995), 1349
- 17) 荒木清己, 郡山 猛, 仲村基志: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 57
- 18) 荒木清己, 弟子丸慎一, 佐藤道夫, 野上慶昭: CAMP-ISIJ, 12(1999), 1097
- 19) 笹島 洋: 「造船業界の厚板使用の現状と厚板製品への要望」, 日本鉄鋼協会第 139 回春季講演大会, (2000)
- 20) 木村達己, 岡 裕, 三代祐嗣: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 148
- 21) 久田光夫, 三宅孝則, 川端文丸: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 142
- 22) 岡津光浩, 林 透, 天野慶一: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 131
- 23) 塩谷和彦, 前田千寿子, 川端文丸, 天野慶一, 牧野光紀, 西田俊一: CAMP-ISIJ, 12(1999), 1194
- 24) 塩谷和彦, 前田千寿子, 矢埜浩史, 川端文丸, 天野慶一, 宮本一範, 西田俊一: CAMP-ISIJ, 13(2000), 509
- 25) 中川一郎, 大井健次, 板倉教次: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 188
- 26) 荒木清己, 谷川 治, 久保高宏: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 186
- 27) 板倉教次, 弟子丸慎一, 中川一郎: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 162
- 28) 川端文丸, 谷川 治, 中川一郎: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 154