

「船舶（材料編）」*



船津裕二**

Structural Steels for Ships (Materials)*

by FUNATSU Yuuji**

キーワード 船体用, 造船, 強度, 靱性, 船級, TMCP

1. はじめに

現在、船舶は船級登録船のみで世界で約3万隻、10億総トンと言われる。1総トンで約300kgの鋼材を消費するため、鋼材の使用量は3億トンに達する。船舶の平均寿命を約20年とすると、リプレース需要のみで1500万トン/年の需要が見込まれる大きな市場である。

図1に新造船受注実績を示す¹⁾。主にアジアの経済成長にともない、受注量は順調に増加してきたが、2003年以降特に急激な伸びを示し、2007年には1億4000万総トンという過去最大の受注量となった。その後、リーマンショックによる世界経済の停滞、および船腹の過剰感から受注は低迷し、足元は4000万総トン/年前後で推移している。

船舶用鋼材といっても、ボイラー用や、低温タンク用など種々あるが、本稿では船体構造用鋼板（船体用鋼板）に関して解説する。

2. 適用材料と製造プロセス

2.1 船級協会および規則

船舶用鋼材は船級規則に従って製造される。主な船級としては、NK（日本海事協会）、ABS（アメリカ船級協会）、LR（ロイド船級協会）、DNV（ノルウェー船級協会）などがあり、登録船ではNKがトップシェアである。

表1から表6に船体用鋼板に関する主要な規則に関し、NK規則²⁾を抜粋・編集したものを示す。各船級規則は、IACS（国際船級協会）を通じ、その統一化が進められており、鋼材に関しては各船級間で大きな差異はない。

以下に、表1から表6の内容につき解説する。表中の規定は板厚50mmまでであり、50mmを超えるものについては別途規則が定められている。

なお、TMCPに関しては既に本誌にて詳細が紹介されており³⁾、そちらを参照されたい。

表1：船体用圧延鋼材としては、降伏点235（軟鋼）、315（YP32）、355（YP36）、390（YP40）、460（YP47）N/mm²の5段階が制定されている。シャルピー衝撃試験の最小平均エネルギーもL方向（Longitudinal：圧延方向に平行）とT方向（Transverse：圧延方向に直角）で定められており、通常はL方向で試験が実施される。前述した5段階の鋼材のハイテン係数は、それぞれ1.0、0.78、0.72、0.68、0.62である。ハイテン係数とは軟鋼を1とした場合、鋼材の降伏点に応じ、どの程度板厚を低減することができるかを示したもので、YP36（ハイテン係数0.72）の場合、板厚を軟鋼の72%まで減じることができる。ハイテン係数は公称降伏強度に対し線形ではなく、強度が高くなるほど強度的に余裕がある設定となっている。各鋼のうち、YP47の採用が最も新しく、2007年に第

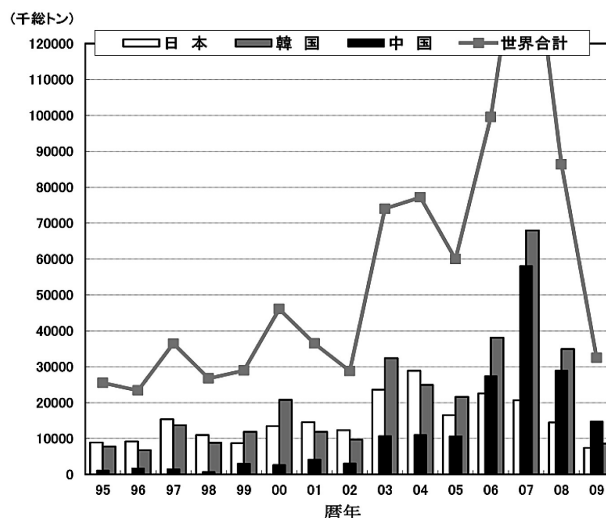


図1 船舶受注実績

*原稿受付 平成24年3月9日

**正員 新日本製鐵(株) Member, Nippon Steel Corporation

1 船が完工している。YP47 は現状ではガイドラインで運用されており、今後規則に取り込まれる予定である。

表 2 : LPG 輸送船の場合、船体が二次防壁を兼ねる場合が多く、船体構造に低温用鋼が採用される。シャルピー試験温度は設計温度により異なるが、 $-50 \sim -60^{\circ}\text{C}$ の場合が多く、船体用鋼板に要求されるものとしては最も低温である。

表 3 : 各強度毎に A, D, E, F (軟鋼は, A, B, D, E) の 4 種類の靱性グレードが制定され、それぞれ、 $0, -20, -40, -60^{\circ}\text{C}$ (軟鋼は, $20, 0, -20, -40^{\circ}\text{C}$) でのシャルピー試験が要求される。最小平均エネルギーは試験温度にかかわらず一定である。

表 4 : 各構造部材に対する高張力鋼の使用区分を示す。使用部位や範囲、板厚に応じ必要な靱性グレードが細かく規定されている。表中 L_1 は船の長さであり、大型船や厚手材で D, E グレードが要求されていることが分かる。図 2 に船級の要求靱性の考え方を模式

図で示す。板厚が増加すると、力学的に破壊靱性が低下するため、それを補完するよう、より低温で最小平均エネルギーを保証した鋼板の使用を要求するという考え方に基づいている。これらの最小平均エネルギーは各強度毎に、所定の作用応力下で、 -10°C で、母材で概ね 400 mm 、溶接部で概ね 60 mm 以上の貫通き裂を許容できるものとなっている。

表 5 : 鋼材の脱酸形式、化学成分につき規定されている。炭素当量 (Ceq) は国内で使用される高張力鋼は全て TMCP または TMCP 相当の CR 材であり、表中に示す Ceq 上限値が遵守されている。

表 6 : 熱処理 (製造方法) も強度や脱酸形式に応じ定められている。

AR (圧延のまま) は TMCP 可とされており、前述したように国内の高張力鋼は実質的に全て TMCP である。

表 1 船体用圧延鋼材の種類 (NK 規則を編集)

材料	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	衝撃試験最小平均エネルギー (J)
KA,KB,KD,KE	≥ 235	400~520	圧延方向(L):27 圧延に直角方向(T):20
KA32,KD32,KE32,KF32	≥ 315	440~590	L:31 T:22
KA36,KD36,KE36,KF36	≥ 355	490~620	L:34 T:24
KA40,KD40,KE40,KF40	≥ 390	510~650	L:39 T:26
KE47	≥ 460	570~720	L:53 T:37

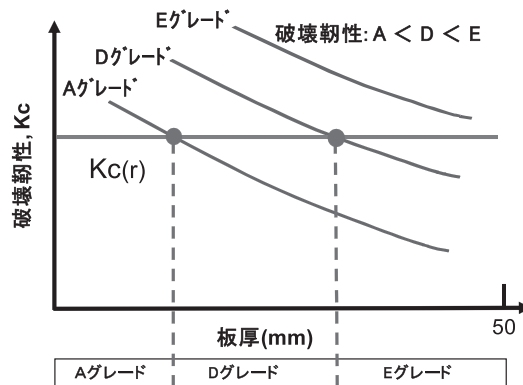


図 2 靱性要求の考え方

表 2 低温用圧延鋼材の強度と靱性 (NK 規則を編集)

材料	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	試験温度 (°C)	衝撃試験最小平均エネルギー (J)
KL24A	≥ 235	400~510	設計温度により異なる 概ね $-50 \sim -60^{\circ}\text{C}$	L:41 T:27
KL24B				
KL27	≥ 265	420~540		
KL33	≥ 325	440~560		
KL37	≥ 360	490~610		

表 3 船体用圧延鋼材の靱性グレード (NK 規則を抜粋)

材料	グレード	試験温度 (°C)	衝撃試験最小平均エネルギー (J)
K36	A	0	L:34 T:24
	D	-20	
	E	-40	
	F	-60	

表4 各構造部材に対する高張力鋼の使用区分 (NK 規則を抜粋)

部材名称		適用範囲		厚さ(mm)					
				15以下	15を超え 20以下	20を超え 25以下	25を超え 30以下	30を超え 40以下	40を超え 50以下
外板	強力甲板の舷側厚板	中央部0.4L間	L1 ≤ 250m	A		D		E	
			L1 > 250m	E					
		上記を除く中央部0.6L間		A		D		E	
	上記以外		A				D		
船側外板	中央部0.4L間	強力甲板の下面から 0.1Dの範囲		A		D		E	
		上記以外		A				D	

表5 鋼材の種類, 脱酸形式及び化学成分 (NK 規則を抜粋・編集)

種類	材料記号	脱酸形式	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	Nb	V	Ti	Ceq(TMCP)	
高張力鋼	KA32	細粒 キルド	0.18	0.50	0.90	0.035	0.035	0.35	0.20	0.40	0.08	0.015	0.02	0.02	0.02	0.36	
	KD32		以下	以下	~	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以上	~	~	以下	以下	
	KE32				1.60									0.05	0.1		
	KA36												単独若しくは組み合わせて 添加				0.38
	KD36												合計の添加量は0.12%以下				以下
	KE36																
	KA40																0.40
	KD40																以下
KE40																	

表6 熱処理 (NK 規則を抜粋)

材料記号	脱酸形式	厚さt(mm)	熱処理
KA32	細粒キルド [*] (Nb・V添加有り)	t ≤ 12.5	AR(TMCP可)
		12.5 < t ≤ 50	TMCP,N(TMCP可),CR(TMCP可)
KA36	細粒キルド [*] (Nb・V添加有り)	t ≤ 20	AR(TMCP可)
		20 < t ≤ 35	TMCP,N(TMCP可),CR(TMCP可)
		35 < t ≤ 50	TMCP,N(TMCP可),CR(TMCP可)

AR: 圧延のまま CR: 温度制御圧延 N: 焼きならし TMCP: 熱加工制御法

2.2 船体用鋼板の使用上の特徴

国内で使用される船体用鋼板の使用上の特徴は, 造船所でのコスト低減や生産性向上のため, ①大入熱溶接が多用され, 溶接部靱性の確保に高度な技術が要求される。また, 高強度・厚手材であっても予熱は実施しないことが前提であり, 溶接硬化性を低く抑える必要がある。鋼板製造面では②発注量(ロット)が大きく, 高度の生産安定性が必要である, ということである。従って, 製造方法は少なくともハイテンはTMCPが必須となり, 大入熱溶接部の靱性の確保のため, 種々の技術が投入される。

2.3 溶接部高靱性化技術

鋼材は溶接時の入熱により結晶粒が粗大化し, 靱性や強度が低下するが, 入熱が大きいほどその低下代も大きくなる。また, 高強度鋼になるほど, 設計応力が高くなるため, 当然シャルピー試験の最小平均エネルギーや破壊靱性の要求値も高くなる。さらに, 強度対策として添加元素が多くなり, 添加元素が多くなれば, 一般的には溶接部の靱性は低下する傾向にある。

これらの課題を解決するために, 従来のTiN処理に加え, 微細で, かつ高温でも安定な酸化物や硫化物を鋼中に分散させ, それらを障害物とすることによる結晶粒の粗大化防止(ピンニング)や⁵⁻⁷⁾ B添加によるフェライトの形態制御(有害なフェライトの低減)などの技術が採用されている^{8, 9)}。

溶接の熱影響を受ける部分はHeat Affected Zone (HAZ)と呼ばれ, なかでも最も厳しい熱影響を受ける溶接金属と

の境界部分はFusion Line (FL) と呼ばれる。

以下, 結晶粒の粗大化を防止し, さらにフェライトの形態を制御するという観点から, このFL部の靱性改善策について述べる。

2.3.1 従来知見

溶接部靱性を向上させるためには, ①マトリックスの高靱化, ②破壊の起点となる脆化相の低減, ③結晶粒径の微細化と有害な組織の低減, の3点がある。

①マトリックス靱性に影響を及ぼす因子としては, 固溶Niや固溶Nが知られている。固溶Niは, 低温域における転位の交差すべりを助長することにより, マトリックス靱性を向上させる¹⁰⁾とされている。ただし, この効果を明瞭に発揮させるには1%を超える添加が必要とされ, 製造コストの点から積極的に使用されることは少ない。

Niとは逆に, 固溶Nは靱性を著しく低下させる¹¹⁾。この原因としては, N原子が転位に固着することにより, 塑性変形が抑制される効果や, M-A混合物(Martensite-Austenite Constituent)の生成促進による靱性低下などが提唱されている。

ただし, 大入熱溶接を施されるほとんどの鋼材は, ピンニング粒子としてTiNが使用(併用)されており¹²⁾, 単にN量を低減するのではなく, TiNを必要量確保するという点から, Ti量とバランスを取りながら, 過剰なNを低減することが重要である。

②脆化相の例としては, 非金属介在物, 析出物, M-Aなどが挙げられる。これらは一般にマトリックスよりも硬い

ため、塑性変形を受けるとマトリックスと脆化相との界面に歪の集中が生じてマイクロき裂を生成し、これが引き金となって劈開破壊が発生する。脆性き裂発生特性を向上させるには、これらの脆化相をできる限り少なくするか、サイズを小さくすることが有効である。具体的には、非金属介在物の低減策として、製鋼二次精錬での表層スラグへの吸着、連続鋳造時の浮上促進（低速での鋳造）、さらに、析出物としては硫化物、窒化物が主体であることから、Caなどによる脱硫処理・球状化处理（有害度の低減）、大気からのN混入を防止するためのArなどによる断気操業などが行われている。

また、M-A対策としては、オーステナイト→フェライト変態時のオーステナイトへのCの拡散と濃縮を避けるためのC量の低減や、セメンタイトやパーライトの析出を促進し、M-Aを低減するための低Si化が対策として取られている¹³⁾。

③結晶粒径は、小さいほど脆性き裂発生特性は向上することが知られている。

これは、塑性変形により粒界近傍に堆積した転位に起因する応力集中の程度が、結晶粒径に依存するためと考えられている。また、き裂の起点となる組織の低減も重要である。

図3に典型的な溶接部の組織を示す。図3中、Ferrite Side Plate (FSP) と Grain Boundary Ferrite (GBF) は有害であり、溶接部靱性の向上を図るためには、これら組織の低減も重要である。以降、結晶粒径の微細化と有害な組織の低減につき解説する。

2.3.2 結晶粒径の微細化と有害な組織の低減

脆性き裂は、通常は組織が粗大で、かつ応力集中部を有する溶接部から発生することが多い。造船所は前述のようにエレクトロガスアーク溶接やサブマージドアーク溶接など、大入熱の1パス溶接を採用することが多く、FL部の組織は粗大化し、靱性が低下する。

したがって、FL部の脆性き裂発生特性を向上させるためには、組織微細化の観点から、①高温に長時間さらされる場合でもオーステナイト粒の粗大化を抑制する。②オーステナイト粒界および粒内におけるフェライト変態を制御して、粗大なGBFやFSPの生成を抑制する。といった手段を講じると同時に、脆化相であるM-Aを低減するための成分設計を行う必要がある。

1) 酸化物・硫化物活用によるオーステナイト細粒化

前述したように、HAZのオーステナイト粒粗大化を抑制することで脆性き裂発生特性を高めた鋼材としては、TiN粒子によるピンニング効果を利用したTiN鋼が広く実用化されている。しかし、TiNは1200℃以上の温度で溶解し始め、ピンニング効果が小さくなるために、大入熱溶接用としては適用に限界があった。そこで、さらに強力なピンニング粒子の検討が行われ、高温でも安定な、CaやMg等の酸化物・硫化物を微細かつ高密度に分散させた鋼材が開発・実用化されている。これらの粒子は数十nm～数百nmと非常に小さく、その数は数十万～百万個/mm³と非常に多い。

これらの粒子は非常に効果的であり、図4に示すように、TiN鋼が1400℃で急激に粗大化するのに対し、開発鋼

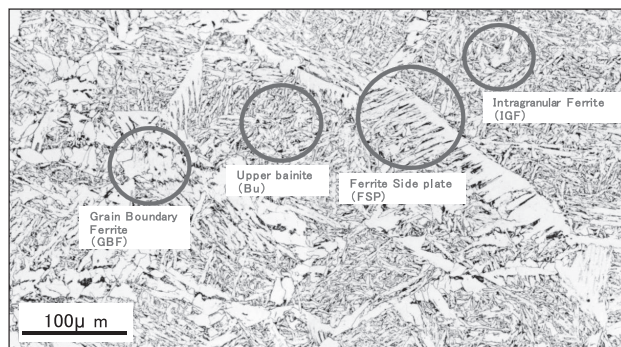


図3 溶接部の組織と名称

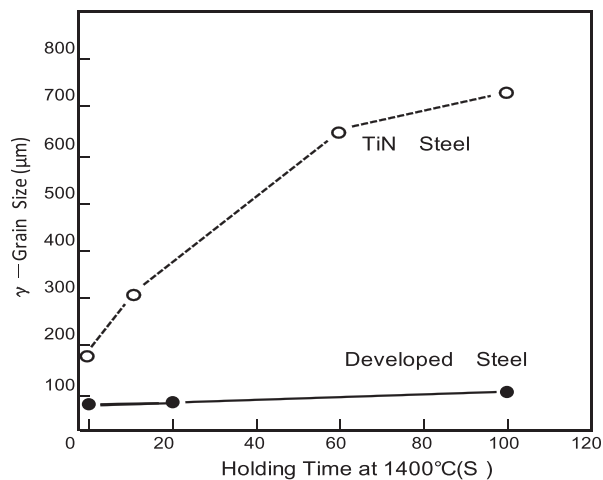


図4 恒温保持時の結晶粒の成長

では100秒間保持しても100μm以下のオーステナイト粒を維持している。

2) 有害な組織の低減 (B添加によるFSP, GBFの制御)

前節で述べた技術はオーステナイト粒の微細化に有効であるが、オーステナイト粒の微細化は単位体積当たりの結晶粒界面積を高めてしまい、また、三重点などのフェライト発生サイトを増加させることから、逆にGBF分率が増加し、靱性が低下する可能性もある。

そこで、前述したように、Bを添加することにより、フェライトの形態を制御する技術が開発された。本技術のポイントは、いかに有害な形態のフェライトを発生させないようにするかということであり、GBFの分断とIGF (Intragranular Ferrite)の生成に有効なBNと、GBFの粗大化抑制に有効な固溶Bをそれぞれ適正量確保するために、溶接条件に応じて、B、Nや他の合金元素量を適正範囲に制御することである。以上の内、IGFは小さく無害であり、GBFが小さければ、発生するFSPも小さくなり、有害度が減少する。

図5に、固溶Bと延性・脆性遷移温度との関係を示す。オーステナイト中の固溶Bが増加すると粗大なGBFが減少して靱性は向上するが、固溶Bが過剰になると硬さが上昇するために靱性は劣化する。BNが多い条件の下で固溶Bが最適存在量とすると、到達できる靱性のレベルが更に向上している。図中に得られた組織をあわせて示す。組織的には、(a)は固溶B、BNともに含まれていないため、旧オ

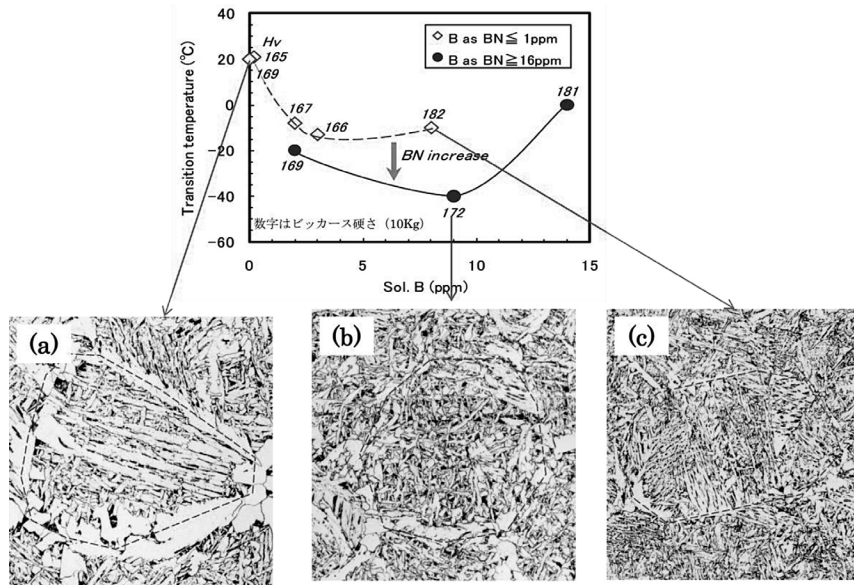


図5 Bの量及び存在状態と靱性、組織への影響

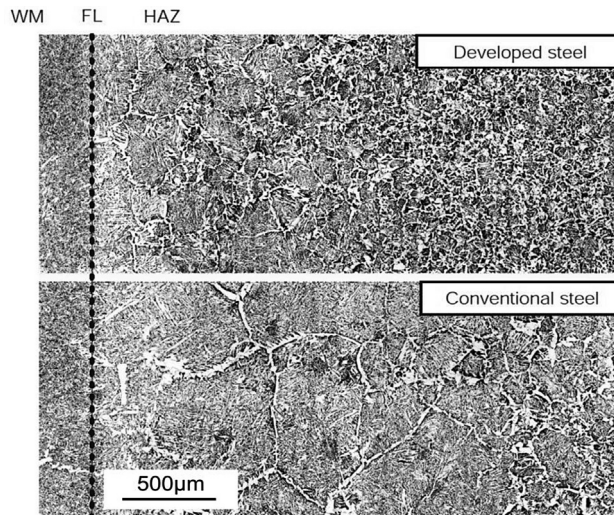


図6 溶接FL部の組織

ーステナイト粒界に沿って粗大なGBFが発生しており、FSPも見られる。(c)は固溶Bの影響により、いわゆる焼きが入った組織となっており、硬さが高く、FSPも発生している。それに対し、(b)はGBFは分断されて小さく、内部の組織も緻密である。

図6に実際の溶接継手FL部の組織写真を示す。開発鋼はConventional (TiN) 鋼に比べ、組織全体が細かく、GBFが小さく制御され、FSPも見当たらない。

大入熱溶接の場合、必ずGBF、IGF、FSPなどのフェライトが発生するが、B添加はそれらフェライトの形態やサイズを最も無害な形態に制御する技術である。

3. 材料の特性と溶接性

船体用鋼板の場合、溶接時に予熱が必要な材料は採用されないし、ほとんどの場合大入熱溶接が採用される。従って、前述したように製鉄側はTMCPによる低Ceq化、溶接部高靱性化技術により造船所の要求に対応している。

ここでは、性能の確保に最も高度な技術を要するLPG船用低温用鋼板(KL33)と厚手・高強度鋼板(YP47Eグレード)の性能を紹介する。

1) LPG船用低温用鋼板の溶接部靱性

LPGの液化温度は-42℃であるが、板厚に応じたシャルピー試験の低温化規定などにより通常は-50~-60℃での試験が要求される。強度的にはKL33が使用されることが多い。板厚は10~20mmのものが多く、サブマージドアーク溶接が適用され、立て向き溶接ではエレクトロガスアーク溶接が採用されることが多い。

1隻当たり1万トン弱の所要があり、要求性能が高度であるばかりでなく、製造において高い品質安定性(操業安定性)が必要とされ、量産高級鋼の代表である。

表7に鋼材の化学成分を、図7にサブマージドアーク溶接のノッチ位置別のシャルピー試験結果を示す。板厚は16mmで、溶接入熱は約80kJ/cmである。

2) 大型コンテナ船用厚手鋼板の溶接部靱性

船体用鋼板の最大板厚は大型のタンカーで25mm程

表7 KL33 鋼の化学成分 (Ladle mass%)

鋼	C	Si	Mn	P	S	Ti,Al	Ceq
KL33	0.08	0.23	1.47	0.005	0.002	添加	0.33

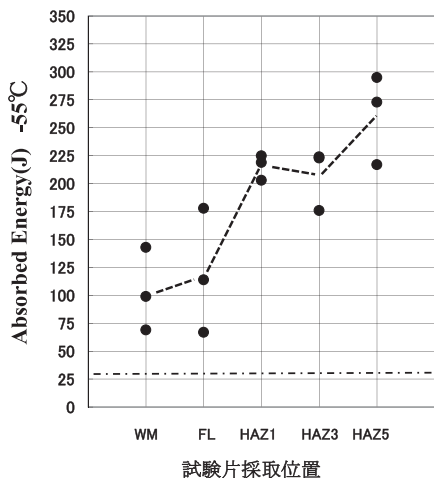


図7 KL33 鋼のノッチ位置別シャルピー試験結果

表8 KE47 鋼の化学成分 (Ladle mass%)

鋼	C	Si	Mn	P	S	Cu,Ni,Ti,Al,Nb	Ceq
KE47	0.07	0.23	1.18	0.008	0.003	添加	0.40

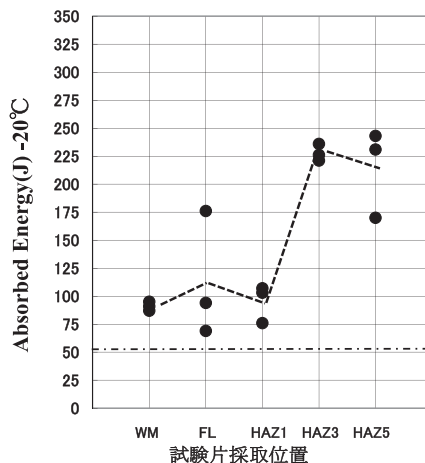


図8 KE47 鋼のノッチ位置別シャルピー試験結果

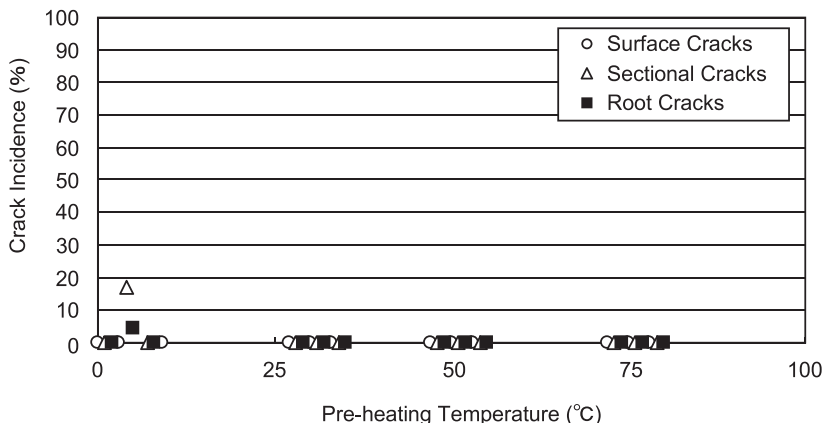


図9 KE47 鋼の斜め Y 形溶接割れ試験結果

表9 脆性亀裂伝播停止特性

鋼材の種類		特性区分	温度勾配型ESSO試験又は温度勾配型二重引張試験	
			評価温度(°C)	脆性亀裂伝播停止靱性値Kca(N/mm ^{1.5})
船体用圧延鋼材	KE,KE32,KF32	A400	-10	4000以上
	KE36,KF36	A500	-10	5000以上
	KE40,KF40	A600	-10	6000以上

度, 大型の鉱石運搬船で 35 mm 程度であるが, コンテナ船は船体上面の開口が大きいため, 強度が船体角部に集中し, 更に船船の大型化が著しいため, YP40 鋼板を使用しても 70~80 mm の厚手材が必要であった。これに対応するため YP47 鋼板が開発され, 2007年に 1 番船が完工している。YP47 鋼板にも当然大入熱溶接が適用される。表 8 に鋼材の化学成分を, 図 8 にエレクトロガスアーク溶接 (2 電極 VEGA) のノッチ位置別のシャルピー試験結果を示す。板厚は 70 mm で, 溶接入熱は約 420 kJ/cm である。YP47 鋼板は大型コンテナ船に採用され, 1 隻当り 500~800t が使用される。

3) 耐溶接割れ性の例 (YP47E グレード)

前述したように船体用鋼板は予熱無しが前提である。図

9 に例として, YP47 鋼板の板厚 70 mm での斜め Y 形溶接割れ試験結果を示す。化学成分は表 8 と同じである。割れ停止温度は 30°C であり, 船体溶接時の拘束の程度がさほど厳しくないことを考えると, 十分予熱の省略が可能と考えられる。実際, YP47 鋼板は 12,000t 以上の出荷実績があるが, 溶接割れの発生などの不具合は報告されていない。

4) 高アレスト鋼板

アレスト性能 (脆性き裂伝播停止性能) は溶接性能とは関係ないが, 最近注目されている性能であり, 簡単に紹介する。従来, 溶接部から脆性き裂が発生しても, 溶接残留応力によりき裂は母材部に逸れ, その良好な靱性により停止すると考えられてきた^{14, 15)}。しかし, それは比較的薄手 (概ね板厚 35 mm 以下) の場合であり, 50 mm を超えるよ

うな板厚では、き裂は溶接部を直進伝播する傾向が強く、また、Eグレード鋼として十分なシャルピー吸収エネルギーを有していても、き裂が停止しない場合があることが明らかとなった^{16, 17)}。本件に関しては、船舶技術研究協会(極厚板大入熱溶接部強度検討FS委員会)やNK(脆性き裂アレスト設計研究委員会)を中心として研究がなされ、構造不連続の程度の影響や、必要なアレスト性能につき明らかにされつつある¹⁸⁾。

NKは表9に示すように、設計に関連して、脆性き裂伝播停止性能が特別に考慮された鋼板に対し、規則を定めている他、アレスト設計に関しガイドラインも発行している¹⁹⁾。また、Kcaが6,000 N/mm^{1.5}(試験温度は船舶の最低使用温度である-10℃)以上を保証する鋼板も製造されている。ABSやLRなど大手船級でも本件に関する規則やガイドラインが整備されつつあり、具体的なKca値が記載されているものや、き裂の発生防止を重視したものなど、全体的には不統一感があるが、今後は、IACSなどで内容の統一が図られるものと思われる。

4. 終わりに

船体構造用鋼板といっても、強度や靱性に橋梁用や建築用鋼板と大きな差がある訳ではない。繰り返しになるが、①全ての材料が大入熱溶接の適用や、予熱の省略が前提であり、そのため②国内のハイテン材は全てTMCP鋼であり、通常、溶接部靱性向上のための技術が併用されることが特徴である。また、③発注ロットが大きく、高い生産安定性が要求されることも特徴である。

船舶は国際商品であり、厳しいコスト競争にさらされている。その中、溶接技術の意義は非常に大きい。今後、日本船の付加価値および競争力を高める点で、耐腐食・耐疲労技術の向上、一層のハイテン化は不可欠であり、そのため鋼材・溶接材料・溶接機器・溶接施工の連携は日本の最も得意とするところである。

参考文献

- 1) HIS造船統計に基づき作成。
- 2) 日本海事協会：鋼船規則K編 材料(2010)。
- 3) 白幡浩之：溶接接合教室2-4 溶接構造用鋼，溶接学会誌，第

- 78巻(2009)3号，pp.30-36。
- 4) Guidelines on the Application of YP47 Steel for Hull Structures of Large Container Carrier (2008 NK)。
- 5) 児島明彦他：微細粒子によるHAZ細粒高靱化技術HFUFFの開発，新日鉄技報，第38号(2004)，pp.2-5。
- 6) 皆川昌紀他：大型コンテナ船用大入熱溶接対応降伏強度390MPa級鋼板，新日鉄技報，第380号(2004)，pp.6-8。
- 7) 永原政明他：多目的LPG船用TS530N/mm²級低温用鋼，新日鉄技報，第380号(2004)，pp.9-10。
- 8) 伊藤 実他：低炭素鋼の大入熱溶接HAZ靱性に及ぼすオーステナイト中のボロン存在状態の影響，CAMP-ISIJ，17(2004)，p.1376。
- 9) Hiroyuki Shirahata, *et.al.*: Improvement of Fracture Toughness, Kc, of Welded Joints: Development of Higher Toughness YP47 (460 N/mm²) Class Steel Plates for Ultra-large Container Ships - 2, Proceeding of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference (2011) pp.93-97。
- 10) W. Jolley: Influence of a 3.28 pct Nickel Addition on the Yield and Fracture Behavior of Alpha Iron, Trans. Metal. Soc. AIME, 242 (1968), pp.306-314。
- 11) 佐藤 誠：取鍋精錬技術と厚板の特性，第54・55回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(1978)，pp.175。
- 12) 金沢正午他：微細TiNによる溶接ボンド部靱性の改善と大入熱溶接用鋼の開発，鉄と鋼，61(1975)，pp.2589-2603。
- 13) 大谷泰夫他：ボロン添加と低シリコン化による60kg/mm²級高張力鋼板の大入熱溶接継手ボンド部の靱性改善，鉄と鋼，64(1978)，2205-2214。
- 14) Kanazawa T., *et.al.*: Study on Brittle Crack Arrestor - Considerations on the Arrest of a Very Large Crack -, Selected Paper from the Journal of the Society of Naval Architects of Japan Vol.11 (1972年)，pp.135-147。
- 15) 日本造船研究協会第193研究部会：新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究 総合報告書 第100号(1985年)。
- 16) Inoue T., *et.al.*: Long Crack Arrestability of Heavy-Thick Shipbuilding Steels, Processing of International Offshore and Polar Engineering Conference (2006)，pp.132-136。
- 17) 井上健裕他：厚手造船用鋼における長大脆性き裂伝播挙動，日本船舶海洋工学会講演会論文集(2006年)，pp.359-362。
- 18) 例えば，Y. Yamaguchi, *et.al.*: Development of Guidelines on Brittle Crack Arrest Design - Brittle Crack Arrest Design for Large Container Ships -1 -, Proceeding of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference (2010) pp.71-79。
- 19) Guideline on Brittle Crack Arrest Design (2009 NK)。