

# 「船舶（技術トピックス編）」\*

山口 欣 弥\*\*



Shipbuilding (Technical Topics)\*

by YAMAGUCHI Yoshiya\*\*

**キーワード** 高機能鋼, TMCP, 耐食鋼, 高張力鋼, 脆性破壊, 疲労, 腐食, PSPC

## 1. はじめに

世界的規模で海上輸送量が増大する中、高まる環境保護要求や燃料費の高騰の対応として、環境負荷や運行コストの低減を目的とした船舶の大型化、高性能化のニーズが高まっている。このような状況の中、TMCP [Thermo-Mechanical Controlled Processing (熱加工制御)] 技術を活用した高機能鋼板が開発され、上記ニーズに貢献している。図1に、日本で開発された造船用の高機能鋼板の概要を示す。これらはいずれも、日本の製鉄所の最先端技術を活用して開発されたものであるが、その実用化に際しては、日本の造船所、製鉄所、船級協会が一体となった実用化研究を実施し、日本の造船技術の差別化に大きく寄与している。

ここでは、これら高機能鋼板を中心に、最近注目されている新しい造船技術について紹介する。

## 2. 船舶の大型化への対応（使用鋼板の極厚化への対応）

### 2.1 YP47 鋼板の実用化

燃料費高騰の中、単位貨物あたりの輸送コストの低減を目的とした船舶の大型化の傾向が強まっている。とりわけ、輸送コストに占める燃料費の割合が高いコンテナ船は、その傾向が顕著である。

図2に大型コンテナ船の船体中央断面図の例を示す。コンテナ船は、荷役の効率化の目的で強力甲板に大きな開口を有する。そのため、大型コンテナ船の強力甲板部構造（ハ

ッチサイドコーミング、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁）においては、限定された縦通部材で船体縦強度を確保する必要があることから、従来、厚手の鋼板を使用する傾向にある。図3に、コンテナ船のハッチサイドコーミングに使用される船体用鋼板の厚手化の状況を示す。最近のコンテナ船では70mmを超える極厚鋼板が使用されている。

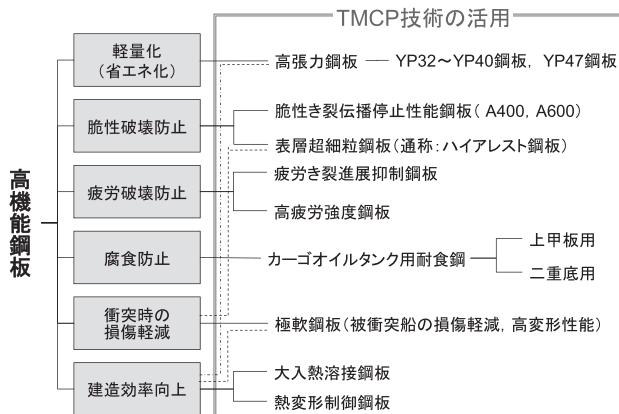


図1 造船用に開発された高機能鋼板

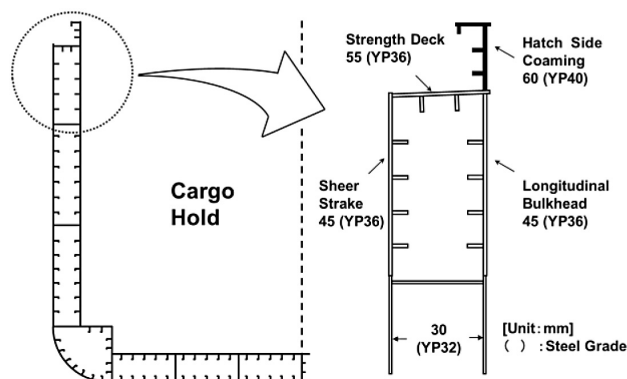


図2 大型コンテナ船の船体中央断面図の例

\*原稿受付 平成24年6月18日

\*\*正 員 一般財団法人 日本海事協会 Member, Nippon Kaiji Kyokai

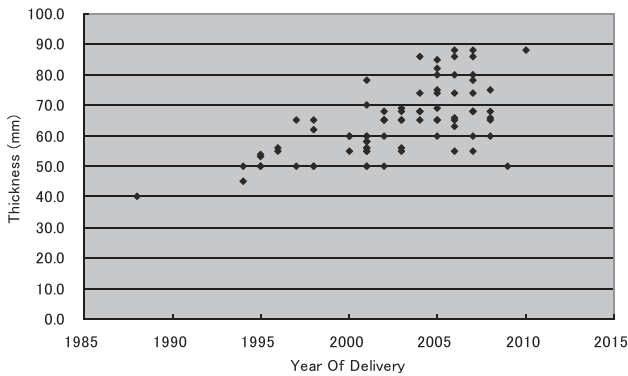


図3 引き渡し年とハッチサイドコーミングウェブ厚さ<sup>1)</sup>

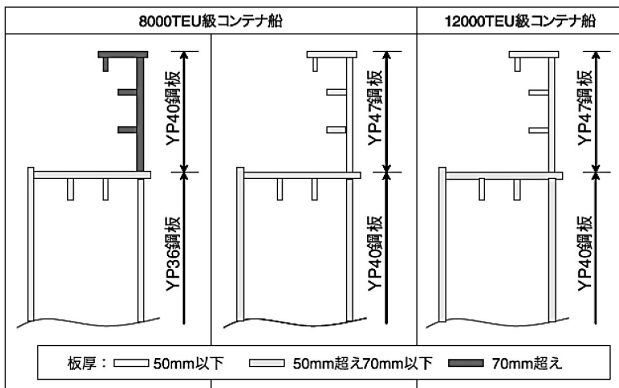


図4 超大型コンテナ船の強力甲板部構造例 (YP47 鋼板の配置例)

この対応として、三菱重工業、新日本製鐵、日本海事協会は、それまで使用していた規格降伏点 40 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板 (以下、YP40 鋼板という) より 2 割程度規格降伏点を高めた規格降伏点 47 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板 (以下、YP47 鋼板という) の実用化研究を 2001 年から実施した<sup>2-4)</sup>。図 4 は、超大型コンテナ船の強力甲板部構造への YP47 鋼板の配置例である。8,000 TEU 級及び 12,000 TEU 級コンテナ船のいずれについても、YP47 鋼板の適用により、ハッチサイドコーミングの超極厚化を抑制すると同時に、船体構造の軽量化と重心低下により、コンテナ積載能力の増加が見込まれる。

この研究成果を基に、2007 年 6 月、世界で初めて同鋼を船体構造に使用した大型コンテナ船が建造された。その後、YP47 鋼はコンテナ船の大型化には不可欠な鋼材として認識されるようになり、海外主要造船所で今後建造予定の多くの超大型コンテナ船においても、YP47 鋼板の使用が計画されている。

2.2 脆性き裂伝播停止性能鋼板の実用化

通常使用される鋼板では、板厚あるいは強度が増すと靱性が低下する傾向がある。図 5 に、鋼板の強度と板厚に対する破壊靱性の関係についての基本概念を示す。そのため、大型コンテナ船に使用される極厚鋼板については、使用鋼板の強度の増加と板厚の増加による靱性低下に対して特段の配慮を行う必要がある。すなわち、脆性破壊の発生防止や万一発生した脆性き裂の伝播停止について十分な信頼性を確保しなければならない。

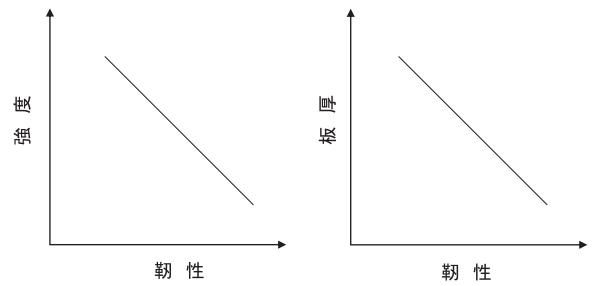


図5 鋼板の強度、板厚と靱性の関係

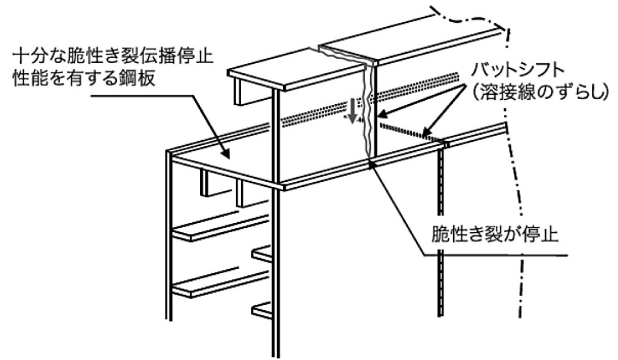


図6 脆性き裂アレスト設計の一例

表 1 脆性き裂伝播停止特性が特別に考慮された鋼材規格

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)	脆性き裂伝播停止靱性値 Kca (N/mm <sup>1.5</sup> )
船体用 圧延鋼材	KE, KE32, KF32	A400	-10	4000以上
	KE36, KF36 KE40, KF40	A600	-10	6000以上

昔のリベットで鋼板を接合する船舶では、脆性き裂が発生しても、リベット接合部の構造の不連続により脆性き裂が停止し、脆性破壊による大規模破壊を防止することができた。しかしながら、現在の全溶接船では脆性き裂の伝播を途中で停止させることが極めて困難である。そのため、脆性き裂を伝播停止させるクラックアレスターとして、高靱性の鋼板を玄側厚板や梁上側板に配置する脆性亀裂アレスト設計の適用が有効となる。すなわち、万一き裂が発生・伝播しても、適切な部材で停止させるバックアップアレスト機能を持たせる設計である<sup>5-7)</sup>。

図 6 に、大型コンテナ船の脆性き裂アレスト設計の例を示す。この例では、ハッチサイドコーミングの溶接継手部で発生した脆性き裂を、強力甲板に配した十分な脆性亀裂伝播停止性能を有する鋼板で停止させる設計となっている。このような脆性き裂アレスト設計の適用においては、脆性き裂伝播停止性能を有する鋼板 (以下、脆性き裂伝播停止性能鋼板という) の開発とその定量的な評価が必要となる<sup>8)</sup>。表 1 に、日本海事協会が定める規格を示す。ここでは、これまでの研究で得られた知見を参考に、アレスト特性に係る特性区分として、船舶の最低使用温度である -10°C における脆性き裂伝播停止靱性値 Kca が 4,000 N/mm<sup>1.5</sup> 以上と

6,000 N/mm<sup>1.5</sup>以上の2種類の特性区分 (A400 と A600) を設けている。

現在、大型コンテナ船に適用するアレスト設計及び必要なアレスト特性については、主要船級協会の加盟組織である国際船級協会連合 (通称, IACS) にて検討されており、国際規格として制定される予定である。また、鋼板のアレスト性能の評価方法については、ISO 規格化を目指し日本溶接協会が検討が進められている。

### 3. 船舶の腐食問題への対応

#### 3.1 塗装性能基準 (PSPC) によるバラスタククの防食

船舶は、就航後、海水や貨物による腐食環境に晒されるため、全損傷の内腐食による船体構造の損傷が最も多くなっている。図7 (参考写真) に、船舶の復元性、強度確保のために用いられる海水 (バラスタ水) 用のバラスタククの腐食例を示す。

船舶の腐食問題については、長い間、国際海事機構



図7 腐食したバラスタククの一例

(International Maritime Organization, 通称, IMO.) にて審議され、2006年12月にバラスタククの塗装義務化に関する SOLAS 条約改正とその塗装性能基準 (Performance Standard of Protective Coatings, 通称, PSPC.) が採択された。PSPC は、エポキシ系塗料の使用を前提に、塗装システムの認定試験、造船所での塗装作業、有資格者による検査等について厳しい要求を設けている。表2に、PSPC で要求される塗装要件の概要を示す。PSPC では、溶接部に対しても、溶接ビートのグラインダ処理並びに溶接スパッタ及びその他の表面汚れの除去実施等の要件が定められている。このため、塗料メーカーはもちろん、造船所においても新基準に適合すべく表面処理、エッジ処理や塗膜検査に多大な労力を割くようになった。

これに対し、溶接材料メーカーでは、例えば、耐ピット性能に優れた溶接材料、スパッタを低減した溶接材料、1パスで大脚長溶接可能な (表面状態が良好な) 溶接材料等、PSPC の厳しい要求に対して対応する溶接材料の開発が進められている。

#### 3.2 貨物油タンク用耐食鋼による防食

欧州でのエリカ号 (1999年) やプレステージ号 (2002年) などの油タンカー座礁事故を背景に、原油タンカーの貨物油タンクに対する防食要件についても IMO において審議され、バラスタククと同様の塗装義務化に関する SOLAS 条約改正とその塗装基準 (及びその代替防食手段) が2010年5月に採択された。この改正条約の特徴は、日本の製鉄所で開発された貨物油タンクの腐食環境において優れた耐腐食性を有する鋼板が、塗装による防食の代替手段として認められた点である。

図8に、原油タンカーのカーゴタンクの腐食環境とそれによる腐食形態を示す。上甲板裏面の腐食は、イナートガスと原油から揮発する腐食性ガス (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>) と、上甲板の昼夜の温度変化と乾湿の繰り返しが主要な因子となる全面腐食である。これに対し、二重底表面の腐食は、底板を覆う原油の重質成分で防食性を有するオイルコートの一部に保護性の低い欠陥部分ができ、発生した孔食で

表2 バラスタクク塗装性能基準の内容

主たる項目	IMOによる塗装性能基準 (PSPC)	従来 (造船所毎の標準)
鋼板の一時表面処理	ブラストSa2 1/2 (ISO8501)、 表面粗度30-75µm (ISO8503-1/3)	同左
塩分濃度 (NaCl)	≤50mg/m <sup>2</sup> (ISO8502-9)	特に規定なし
ショッププライマー	エチルジシロケート (inhibitor free)	造船所毎の標準
二次表面処理 (ショッププライマー鋼板)		
ダメージ/溶接ビード部	ブラストSa2 1/2 (ISO8501)	大半がパワーツール処理
補修	ピンホール、気泡、空隙等の欠陥は適切に補修し、記録。	造船所毎の標準
健全部	・健全塗膜の70%のブラスト除去。 ・または事前承認試験で合格した健全なショッププライマーは、 サンドスイープ、または高圧水洗によるクリーニングを行い、 残存可能。	大半がパワーツール処理
塗装系/膜厚	エポキシベース (明るい色) /320µm	タールエポキシ /200-500µm
塗料の事前承認制	事前認証制の導入 (第三者機関)	規制なし
塗装検査	建造時NACEおよびFROSIO等有資格者の検査	規制なし
塗装技術ファイル (CTF) の作成義務	バラスタククに塗装検査記録CTFを作成し 監督官庁の検閲後本船に常備する。	規制なし

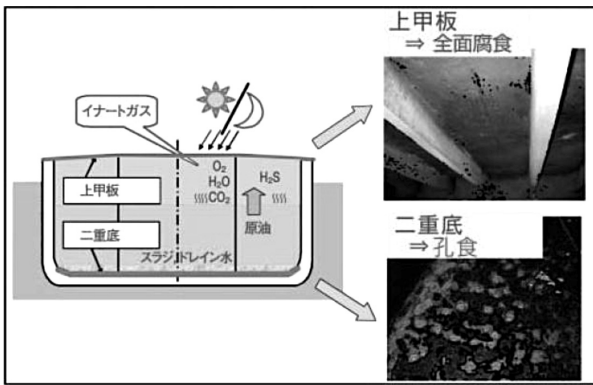


図8 原油タンカーのカーゴタンクの腐食環境と腐食形態

ある。特に、二重底表面の腐食では、オイルコート欠陥部分で、原油に混入している塩水環境において酸性化し、局部的に腐食され孔食が成長するため、その腐食速度は数mm/年となり、数年で板厚15mm程度の二重底板を貫通する危険性を有している。

これに対し、日本の各製鉄所では、それぞれの技術を駆使した独自の耐食性鋼板を開発し、その一部は既に実船に適用されている。これらは、添加元素の最適化とTMCP技術を応用することにより、従来の鋼板と同様の機械的性質、加工性、溶接性を有しながら、腐食速度を抑えた画期的な鋼板である。この原油タンカーの貨物油タンク用耐食鋼がSOLAS条約で塗装に代わる代替手段として認められたことにより、船舶建造の生産性向上、船舶のメンテナンスコスト削減、環境負荷の低減等種々の観点から、より適切な技術を採用することが可能となり、今後の普及が期待されている<sup>9, 10)</sup>。

#### 4. 船舶の疲労問題への対応

##### 4.1 疲労亀裂進展抑制鋼板の実用化

船舶は、陸上構造物と異なり、海水による腐食環境下で過酷な波浪荷重を受ける。また、その船体構造が複雑であるがゆえに、多くの応力集中部を有しており、疲労強度上、最も厳しい大型溶接構造物であるといっても過言でない。

従来から、鋼板の疲労き裂進展速度は、その鋼種による影響をほとんど受けないとされ、疲労強度の確保(疲労損傷防止対策)は、当該部位においてき裂発生条件をいかに抑制するかとの観点から、主に構造部材の寸法・形状や施工に係る配慮がなされてきた。しかし、TMCP技術を駆使することで、ミクロ組織を適正に制御し、従来に比べ疲労き裂の進展速度を抑制可能な新しい高張力鋼板が開発・実用されている<sup>11)</sup>。

図9に、この鋼板を実船に適用するにあたり、その構造部材の検討例(一部実用例を含む)を示す。同鋼板を実用することで、仮に当該部位に疲労き裂が発生したとしても、損傷の進展が遅く、かつ軽微な損傷状態での保守が可能となり、船舶の安全性、信頼性の向上がさらに期待される。

##### 4.2 超音波ピーニングの実用化

鋼材そのものの疲労強度は、一般に平滑材の場合、鋼材

船種	構造部材	
ばら積み運搬船 (コンテナ船)	強力甲板の ハッチコーナ一部	
油タンカー	船側縦通肋骨と船側横桁 及び横隔壁との取合部	
	横隔壁の バックアップブラケット	
自動車運搬船	部分横隔壁の開口部	

図9 疲労亀裂進展抑制鋼板の適用検討例

強度に応じて強くなることが知られているが、溶接継手の疲労強度は、鋼材強度にほとんど依存せず、溶接継手の形式に依存することが知られている。特に、高強度材料を用いた設計では、作用応力レベルを高く許容することになるので、疲労強度上の配慮が必要となる。

造船においても、疲労強度が重要となる箇所には、グラインダ処理を行う等の対策が講じられてきたが、近年では、新たな疲労強度向上の方法として超音波ピーニングが注目を集めている。ここでいう超音波ピーニングとは、超音波振動の共振現象を用いてピーニング打撃子を振動させることにより溶接止端部を打撃し、疲労亀裂が生じやすい溶接止端部近傍における疲労強度を向上させる手法である。

超音波ピーニングによる疲労き裂発生抑制のメカニズムは、①ピンを押し付けたことによる塑性流動により圧縮残留応力が処理部に導入され繰返し負荷の平均応力を低下させる効果(図10参照)、②先端に曲率を持ったピンの形状が塑性流動に伴い転写されたことにより溶接止端部の曲率が拡大し、止端部近傍の応力集中が低減される効果、そして③処理部表面の結晶粒微細化による硬度向上の効果、のそれぞれが重畳したものであることが推定されている<sup>12)</sup>。

超音波ピーニングは、従来のグラインダ処理に比べ、より効率的な疲労強度向上対策となるものと期待されている。超音波ピーニングの特長として、ハンマピーニングやグラインダ処理と比べ騒音が小さく、処理も高速で粉塵が少ない等、作業員への負荷が小さいこと、また、作業が容

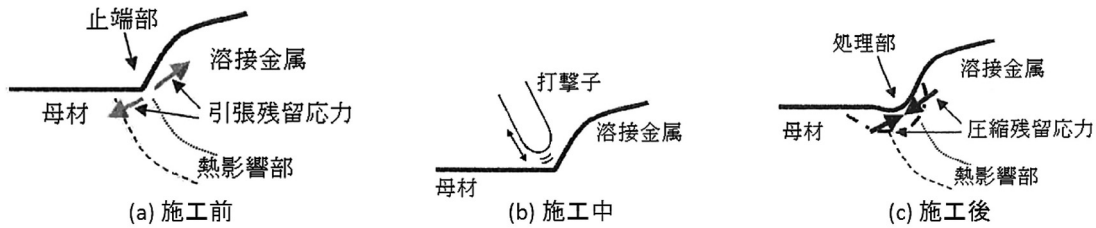


図10 超音波ピーニング施工



図11 超音波ピーニングが適用された鉱石運搬船

易であること等が挙げられる。

最近では、鉱石運搬船(図11)やばら積貨物船等の船舶の疲労強度に配慮が必要となる箇所に超音波ピーニングが適用されている。また、造船分野向けの国内の研究会(大学, NK, 製鉄会社, 造船5社)が設立され、超音波ピーニングの適用に関する関連規定の作成について検討中であり、IACSにおける国際船級規則化も視野に入れた活動を行っている。

## 5. ま と め

最近注目のTMCP技術を活用し開発された高機能鋼板の実用化と新しい造船技術について紹介した。これらは、船主、造船所のニーズを背景に開発されたものであるが、その実用化においては、船級協会等の規格作成と一体になった取り組みが重要となっている。

今後とも、船舶の省エネルギー化・高性能化のニーズを背景に、様々な機能を付加した高機能鋼材や溶接、加工等の関連技術の開発が期待されている。これまで同様、この分野での他に先駆けて高機能鋼板の実用化をリードするには、高い技術力を有する船主、造船所、製鉄所、船級協会が緊密に連携し、戦略的な対応を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 財団法人 日本船舶技術研究協会, 超大型コンテナ船の構造安全対策の検討に係る調査研究 成果概要報告書 2009年3月.
- 2) 廣田一博 他, 世界初の船体用降伏応力 47 kgf/mm<sup>2</sup>級高張力鋼の開発と実船適用, 三菱重工技報 44 (3), 28-32, 2007.
- 3) 白幡浩幸, 船津 裕二 他, 超大型コンテナ船用厚手高靱性 YP47 鋼の開発, まてりあ 51巻, 2号, P.76-78.
- 4) 日本海事協会, 大型コンテナ船の YP47 鋼の使用に関するガイドライン, 2008年10月.
- 5) 松本和幸 他, 鉄鋼材料の材質選定の考え方—船体構造の使用区分—, KANRIN (咸臨) 第24号2009年5月.
- 6) 山口欣弥 他, Development of guidelines on brittle crack arrest design- Brittle crack arrest design for large container ships -1-, Proceedings of the Twentieth(2010) International Offshore and Polar Engineering Conference.
- 7) 日本海事協会, 脆性亀裂アレスト設計指針, 2009年9月.
- 8) 井上健裕 他, Long Crack Arrestability of Heavy -Thick Shipbuilding Steels, Proceeding of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference.
- 9) 日本海事協会, COT用耐食鋼に関するガイドライン, 2010年12月.
- 10) 山口欣弥 他, Development of Guidelines on Corrosion Resistant Steels for Cargo Oil Tanks, OMAE2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- 11) 誉田登 他, 鋼材組織による溶接構造物の疲労寿命改善: 疲労特性に優れた船体用鋼板の開発 第3報, 日本造船学会論文集 (194), 193-200, 2003-12.
- 12) 野瀬哲郎 他, 原理原則に迫る現象解析-2: 疲労トータルソリューション技術, 新日鉄技報 第391号.