

Techno Scope

世界をリードする 船舶用鉄鋼材料

中国をはじめとしたアジア諸国の経済成長に伴い、海上物流量が増大し、船舶需要が大幅に伸びている。船舶用厚板に関する技術で世界をリードする日本では、長年にわたり材料や工法の開発を行ってきたが、最近では新たなニーズへの対応が求められ、高機能材料の開発を積極的に進めている。ここでは船舶用鉄鋼材料の最新技術の総論を紹介するが、このテーマに連携したミニ特集「造船用鋼材の最近の進歩」を企画した。各論は以降の該当ページを参照いただきたい。



世界的な建造ラッシュが続く造船業

造船業が活況を呈している。

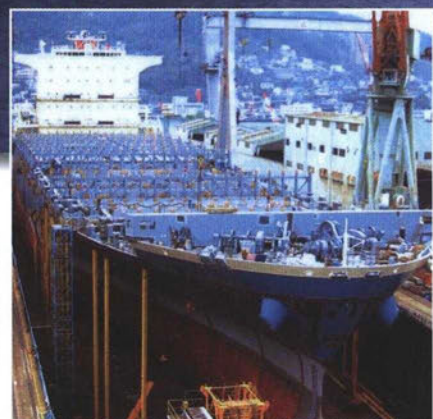
2006年、世界の新造船受注量は9千万総トン*1を超え、竣工量は5千万総トンを超えた。タンカー、LNG船、LPG船、コンテナ船、バルクキャリア、自動車運搬船など、ほとんどの船種の需要が高まっており、国内造船所では3年を超える手持工事量を抱えている状況だ。かつてない受注増に本格的な設備増強を図る造船所も増えており、鉄鋼メーカーにおいてもフル生産体制で船舶用鉄鋼材料を供給している。

世界的な船舶需要の増加を受けて、韓国、中国の造船業が著しい成長を遂げている。現在、韓国、日本、中国の3国で世界の新造船竣工量の8割以上を建造しているが、大量受注、大量建造を推進する韓国、自国における旺盛な需要を背景として生産を伸ばす中国は、近年受注量を飛躍的に伸ばしている。

一方で、船舶の安全性の向上が世界的な課題となっている。IMO (International Maritime Organization, 国際海事機関) では、1989年のアラスカ沖でのエクソン・バルデス号の座礁事故を契機に、タンカーの二重船殻構造(ダブルハル)を義務化した。その後も事故が相次いだため、船舶の安全基準体系の抜本的な見直しを進めている。これと平行してIACS (International

写真上は世界で初めて降伏応力460N/mm²級高強度鋼板を甲板近傍の強度部材に採用した8,100TEUコンテナ船(2007年6月竣工)。写真右は建造中の様子。

(写真提供:三菱重工業(株))



Association of Classification Societies, 国際船級協会連盟)はタンカー、バルカーのCSR(Common Structural Rule, 共通構造規則)を作成した。CSRでは、北大西洋における25年間就航という厳しい設計寿命を定めている。CSRは2006年4月以降契約船から適用されている。

現在、以上のような船舶を取り巻く状況が大きく変化するなか、船舶用鉄鋼材料にも、高まる需要増に応えることに加えて、安全性や信頼性の向上など、要求が高度化している。今号では新たなニーズに応える我が国の高機能材料の開発動向について紹介する。

船舶の大型化を支える高強度鋼板

2006年10月、横浜港に巨大なコンテナ船が初入港した。全長397m、総トン数170,794トン、コンテナ積載量11,000TEU*2の世界最大のコンテナ船で、ひととき大きな船体は話題を呼んだ。

*1 総トン:船の大きさを表す指標。船全体の容積により算定する。

■世界の海上荷動量の推移



※Fearnleys'Review'より作成。06～08年は推定値

■世界の造船竣工量の推移



※Lloyd's Register資料より作成

■世界の造船受注量の推移



※Lloyd's Register資料より作成。2002年以降は修正値

■造船・海洋構造物用普通鋼材消費量の推移



※(社)日本造船工業会調査資料より作成。対象は(社)日本造船工業会会員造船所。18年度は見込み

(出典:(社)日本造船工業会HPより)

近年の傾向として、物流量の増加から輸送効率を上げるため、船舶の大型化が進行している。特にコンテナ船は顕著で、アジア域内だけを就航するという目的から1980年代後半に4,000TEU級のオーバーパナマックス型(パナマ運河を通航できる最大船型を超える船型)が登場して以来、6,000～8,000TEU級が次々と建造されるようになった。最近では、10,000TEU級の超大型船まで登場している。また港も深水バースや大型クレーンを整備するなど、大型船舶を受け入れる環境が整ってきている。

コンテナ船の大型化に不可欠な材料が、高強度鋼板である。コンテナ船は倉口が大きく開口した構造となっており、面積が少ない甲板には高い応力がかかる。強度確保のため、8,000TEUを超える超大型コンテナ船では、最も高い応力がかかる甲板近傍の縦強度部材に、板厚70～80mmの降伏応力390N/mm²級高強度鋼板を使用している。

このような極厚鋼板の使用により造船の効率を低下させないため、溶接には溶接入熱量が50kJ/cmを超える大入熱溶接の採用が一般的となっているが、これに対応しTMCP(Thermo Mechanical Control Process)技術を活用し、高いHAZ(溶接熱影響部)靱性を有する鋼板が開発されている。

鋼板の高強度化も積極的に進められている。最近の例としては、降伏応力460N/mm²級高強度鋼板が開発されている。鋼板の極



LNG船

液化天然ガスを運搬するLNG船は、天然ガスの消費量増加に伴い需要が高まっている。船級規則で船体の部位ごとに必要な靱性グレードが定められているが、LNG船は低温貨物の影響でグレードの高い鋼材が多用されている。

(写真提供:三菱重工業(株))



オイルタンカー

20～30万積載重量トン級のVLCC(Very Large Crude Oil Carrier)が主流となっている。度重なる座礁、油流出事故を受けて規制が強化されており、ダブルハルの義務化に加えて、2006年4月以降の契約船からはCSRが適用されている。

(写真提供:三菱重工業(株))

*2 TEU:twenty foot equivalent unit, コンテナ船の積載量は積貨重量トンではなく、コンテナを何個積みことができるかで表示される。1TEUは、20フィートコンテナ1個分を示す。



コンテナ船

大型化が著しいコンテナ船。写真はデンマークのマースクライン社が新造した11,000TEUの世界最大のコンテナ船。(写真提供: (財)横浜埠頭公社)

厚化が進むと、脆性き裂伝播停止(アレスト)性の確保が課題となるが(アレスト性の詳細は後述参照)、開発鋼は高強度化により板厚の低減を可能としている。開発鋼が適用された8,000TEU級コンテナ船には、50mm厚の鋼板が使用された。船体の軽量化や安全性向上に寄与するものと期待されている。

活発な研究が進む鋼板のアレスト性向上

現在、国際的な課題となっているのが、船舶の安全性向上である。使用される鉄鋼材料においても、いっそうの信頼性向上が求められている。特に最近では、脆性破壊に対する信頼性確保に高い関心が集まっている。脆性破壊は、き裂が1秒間に数百m~千数百mという非常に速い速度で伝播し破壊するもので、条件がそろえば瞬時に壊滅的な被害をもたらすこともある。

脆性破壊事故の有名な事例として、米国戦時標準船がある。第二次世界大戦時、米国は造船の効率を向上させるため、従来のリベット接合ではなく溶接を本格的に導入し、戦時標準船を大量に建造した。貨物船、タンカー等が建造されたが、このうち貨物船に名付けられた「リバティ」という名称が特に知れわたっている。この船は



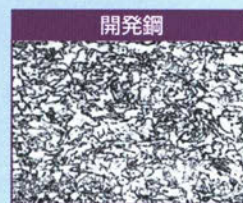
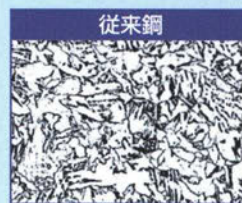
米国戦時標準船の
脆性破壊事故

なかには、突如大音響とともに船体が真二つに折損したものもあった。
(出典:「船の科学」船舶技術協会、1948年発行)

■降伏応力460N/mm²級高強度鋼板の開発例

●超大型コンテナ船の船体構造

コンテナ
ハッチサイドコーミング
最も高い応力がかかるため、極厚の高強度鋼板が使用される。



TMCP技術を活用することで、結晶粒を微細化し、鋼板自体のアレスト性も向上。高強度、高靱性を両立させている。

(写真提供:新日本製鐵(株))

1939~1945年の6年間で約2,700隻も建造された。ところが就航後まもなく、損傷事故が多発した。1946年までに1,000件を超える損傷事故が起こり、このうち200隻は沈没かまたは使用不能という甚大な事故であった。原因は溶接継手の低温靱性が低く、溶接欠陥か応力集中箇所を起点として、外力に加えて溶接残留応力が寄与し脆性き裂が発生、進展したと考えられている。この事故をきっかけとして脆性破壊についての知見が世界に示され、これが破壊力学の体系化や溶接技術の向上に繋がった。その後、溶接性に優れた溶接性鋼が開発され、これによって低温靱性の確保が行われた。また破壊力学の導入による脆性破壊の定量的評価が行われ、脆性破壊事故は20世紀末までにはほぼ姿を消すこととなる。このような過去の経験から、造船分野では鋼板および溶接部の靱性確保の重要性は早くから認識され、十分な対応がとられてきた。

しかし近年になって船舶が大型化するとともに、再び脆性破壊に関する問題が顕在化している。脆性破壊の防止には、まず脆性き裂を発生させないこと、そして万一発生してしまった場合、脆性き裂をアレスト(伝播停止)することが重要となるが、コンテナ船の大型化に伴う鋼板の厚肉化によって、十分なアレスト性の確保が難しくなる可能性が指摘されている。

先ごろ行われた高強度極厚鋼板(65mm、70mm厚)の脆性き裂伝播試験では、発生したき裂は溶接継手部に沿って直進し停止することなく、さらに溶接のない母材においての試験でもき裂は停止しない場合があるという結果が報告されている。

このような試験結果を受けて、現在、我が国では世界に先駆けて幾つかの研究プロジェクトが進行している。例えば(財)日本海事協会においては大学、造船メーカー、鉄鋼メーカーとともに「超大型コンテナ船の安全性評価に関する研究(脆性亀裂アレスト設計関係)」

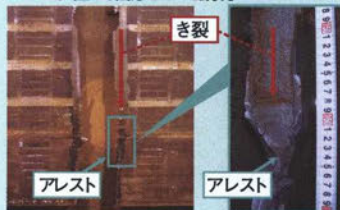
■脆性き裂アレスト性試験の例

●8000トン大型試験機

人工的にき裂を発生させ、アレスト性を確認する



●アレスト性が確認された鋼材

50mm厚
鋼材グレード:EH47
-10℃

(写真提供:新日本製鐵(株))

(2007～2008年度)を進めている。ここでは極厚鋼板の脆性き裂伝播挙動について検討を行い、脆性き裂アレスト設計に関する技術基準の策定を目的としている。現在では、これまでに得られた知見をベースに、大型試験機を用いた試験を実施している。このような大規模な取り組みは世界においても類をみないといわれ、先駆的な試みに注目が集まっている。

アレスト性の向上を図る材料開発も進められている。既に開発・実用化されているのが表面超微細粒鋼板である。これは表層部の結晶粒径を2 μ m程度まで細粒化することで、高いアレスト性を付与している。しかし特殊な製造法を用いるため、製造可能な最大板厚は50mmとなっている。また最近では、TMCP技術を活用することで結晶粒を微細化しアレスト性を向上させた高強度鋼板も開発されている。

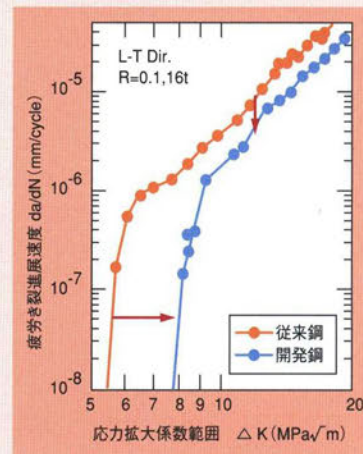
■フェライト・ベイナイト2相組織鋼の疲労特性

● α +ベイナイト複合組織での疲労き裂の屈曲と停留

適切に制御された α +ベイナイト複合組織は、相境界での疲労き裂の迂回、停留効果を有するとともに、繰返し歪みによりベイナイト組織が軟化することで、き裂進展駆動力抑制と延性破壊抵抗性維持をもたらすことが明らかとなっている。



●開発鋼と従来鋼の疲労き裂進展速度



(資料提供:住友金属工業(株))

の認識から取られた手法であった。

ところが2001年に、フェライト・ベイナイト2相組織鋼において、疲労き裂進展速度が抑制されるという、従来の認識を覆す知見が得られた。そして高い疲労特性を持つ鋼板の開発・実用化が、世界で初めて達成された。開発鋼の疲労き裂進展速度は、従来鋼の1/2以下であることが確認されており、構造物においても寿命延伸効果が確認されている。



VLCCに発生した疲労き裂

従来の認識を覆す疲労破壊への取り組み

船舶の安全性確保のためには、疲労強度向上も重要である。船体は陸上構造物とは異なり、遮るものがない海原での風と、それにより誘起される波浪の変動荷重を受ける。さらに海水という厳しい腐食環境に曝されるため、船体には高い疲労強度が求められる。

船体では、一般に溶接部から疲労き裂が発生する。従来、軟鋼の使用が一般的であった頃は、作用応力が低く疲労の問題は限定的であったが、近年高強度鋼の適用範囲が拡大するにつれ、疲労損傷が問題化するようになった。事実、1990年代初頭にはタンカーにおいて疲労損傷が多発した。これを教訓として、疲労き裂発生が危惧される部位の応力を低減するなどの構造設計の見直しが行われた。しかしこれは、鋼材による疲労特性の改善は望めないと

船体の長寿命化に寄与する耐食鋼

船体の安全性向上、長寿命化には、耐食性の向上も重要である。過度の船体腐食が原因で油流出事故を起こした老齢タンカーもあり、IMOでも腐食は重要な問題と認識されている。船体寿命は主に腐食と疲労の進行に左右されるため、材料の耐食性向上が強く求められている。

我が国では、1999～2001年度に船主、造船メーカー、鉄鋼メーカーの共同により、(社)日本造船研究協会第242研究部会(SR242)において、「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」が実施された。それまで、腐食に関する定量的な知見が不十分であったため、防食策の確立をめざして世界に先駆けて研究が始まった。この研究で得られた成果を生かして、優れたタンカー用耐食鋼が開発されている。

原油タンク内で生じる主な腐食は、上甲板裏側を中心とした腐食と底板の孔食がある。

高機能材の開発に不可欠なTMCP技術

現在、船舶用高機能材の開発に重要な役割を果たしているのがTMCP(Thermo Mechanical Control Process)技術だ。TMCP技術は、鋼板製造時における加熱、圧延、冷却の各工程の温度や圧下率を厳密に管理し、鋼材の材質性能を確保する技術である。特に制御冷却は、1980年代に日本で初めて厚板のオンラインによる加速冷却が実用化され、世界に広まった技術である。TMCPによって製造される厚板は微細な組織を有するため、強度、靱性に優れる。さらに同一強度の厚板を得るための炭素当量の低減が図れ、溶接時の予熱を省略したり、予熱温度を低減できる。また近年、造船所では生産性向上のため大入熱溶接を採用しているが、TMCP技術の適用により炭素、合金成分量を低減し、HAZ(溶接熱影響部)靱性の向上も可能となった。

TMCP技術のなかでも特に活発に開発が進められてきたのが制御冷却である。例えば水冷時の伝熱現象には、気泡が発生して伝熱される核沸騰と、鋼材と冷却水の間に形成される蒸気膜で伝熱される膜沸騰があり、核沸騰の方が冷却能力が高い。そこで水量と水流の工夫により全面核沸騰状態での冷却を可能とした方式が開発されている。また、異なるノズルの組み合わせを変化させ

ることにより求める冷却速度での冷却を実現したもの、低流量でも均一冷却できるノズルを開発し、広範な冷却速度の選択を実現したもの等、改良が進められている。

現在、次々と誕生している船舶用高機能材の多くは、このTMCP技術を駆使して高い機能を獲得している。実用化から20年以上をかけて著しく高められたTMCP技術は、材料のさらなる機能向上に不可欠なものとなっている。



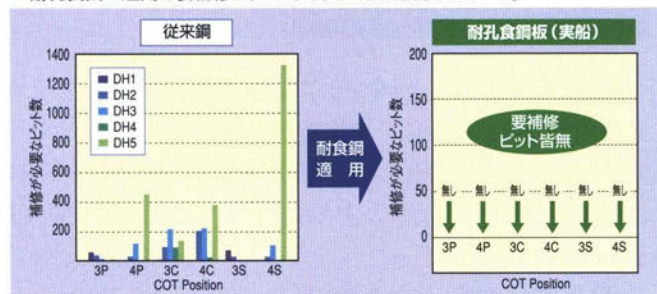
全面核沸騰状態での冷却を可能とした加速冷却設備。最近では高効率誘導加熱方式によるオンライン加熱設備を開発し、加速冷却設備に組み合わせることで、圧延ライン上での冷却と加熱を自由にかつ連続して行うことが可能となっている。

(写真提供:JFEスチール(株))

上甲板裏側の腐食は、燃焼排ガスと原油から揮発する H_2S の混合雰囲気下で、昼夜の温度変化による乾湿を繰り返す事に起因する事が明らかとなっている。腐食の進行が激しければ上甲板の交換の必要性も生じる。この対策として開発された上甲板用耐食鋼は、添加元素の最適化とTMCP技術を駆使することで、従来鋼と比較して腐食速度を1/3~1/5に抑制することが確認されている。これにより無塗装の状態でも25年の船舶寿命を通じて腐食

■耐孔食鋼の開発の例

耐孔食鋼の適用で要補修ビットがなくなることが確認されている。



(資料提供:新日本製鐵(株))

損耗を許容値以内に抑えられ、メンテナンス負荷の低減と安全性の向上が期待できる。

一方、タンク底板の孔食は、ダブルハル化が進むにつれ顕著となった問題である。これはシングルハルでは船体の骨材が突出しているが、ダブルハルでは二重船殻の内側に納められ、底板はフラットな構造となっていることに起因している。本来、タンク内は原油が固化した厚い油膜が防食の役割をしているが、洗浄のための油噴射により、遮るものがないダブルハルはタンク底板の油膜が薄くなり、孔食が発生しやすくなることがわかっている。底板の腐食は最大約4mm/年の速さで局部的に腐食が進行する。この対策として開発された耐孔食鋼板は、孔食の進行速度を1/5程度に低減させる事が可能で、塗装に頼らずに耐食性向上を図ることができる。

このほど、タンカー底板に試験採用された耐孔食鋼板が、2年後の定期点検において無塗装でも良好な耐食性を持つ事が確認された。IMOでは孔食に対しては塗装が唯一の有効手段と認識し、塗装の義務化を検討してきたが、耐食鋼の効果が確認されたことから、現在では、日本の新技術である耐食鋼も検討対象としている。

近年、韓国、中国の造船業が勢いを増すなか、コストだけに頼らない我が国の国際競争力確保が重要となっている。造船メーカーとともに日本が培ってきた船舶用鉄鋼材料の技術は、性能や品質、環境配慮など、新たな時代のニーズに応える力を備えている。活況に沸く今を好機に、日本の材料技術がさらなる応用の幅を広げることが期待される。

タンカーへの試験採用によって、耐孔食鋼板の良好な耐食性が確認されたことから、このほど、国内の大手船主は今後新造する大型タンカーに耐食鋼を採用することを決めた。

(写真提供:日本郵船(株))