

近年の船舶の技術動向と材料関連技術

小野修二 Syuuji Ono

三菱重工業(株)長崎研究所 主管

斉藤正洋 Masahiro Saitou

三菱重工業(株)長崎研究所 主務

Trends of Ship Building and Material Technology

1 はじめに

我が国は、1956年に建造量でイギリスを抜き世界一の造船国になって以来、造船技術で世界をリードしてきている。しかし、図1¹⁾に示すように近年、韓国などの発展途上国の追い上げにともない、我が国造船業もこれに勝ち抜くための技術革新に懸命な取組みを行っている。すなわち、付加価値の高い船舶の開発ニーズに即した特性を有する材料の開発とともに、高品質で経済的な船舶の建造技術の開発・実用化が最大の課題となっている。

船舶に関する近年の世界的な主な動きを我が国を中心として表1²⁾に時系列的に示す。この表から、近年の主な動きとして①海洋汚染の防止を狙いとしたタンカーの構造規制(二重船殻構造化)、②50ノットに達する高速旅客船や超高速貨物船の開発、③LNG船など高付加価値船の建造量の増加及び④造船国間のシェア争いの激化などを窺いしることができる。

ここでは、これら船舶に関する技術動向の概要とそれに直接関係する近年の材料関連の技術課題への取組み状況について述べる。

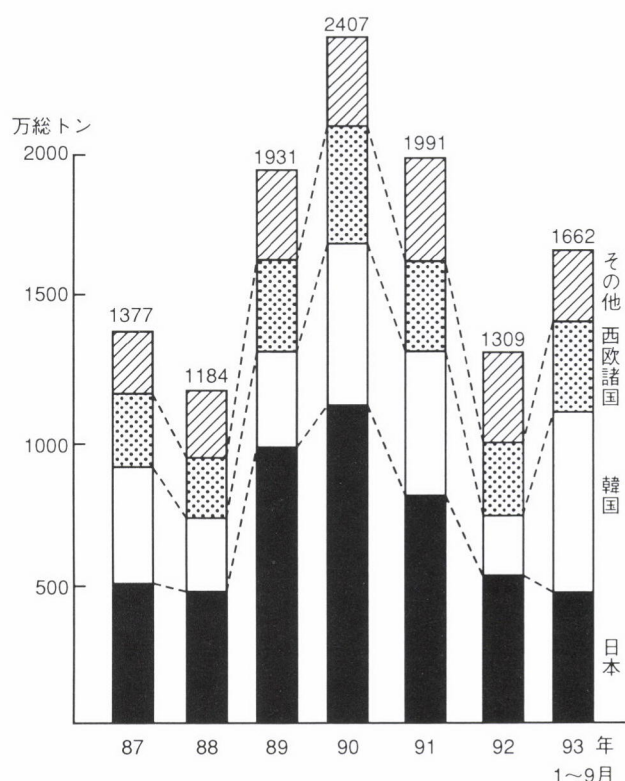


図1 世界の新造船受注量の推移

表1 船舶に関する近年の主要動向

'84	'86	'88	'90	'92	'94	'96
・ 第二世代VLCC		・ Exxon Valdez タンカー事故		・ IMO*1タンカー構造規制 ('94年新造分から)		
		・ 超高速貨物船 (TSL*2) 研究開発開始			・ TSL実海域性能試験	
				・ 高速旅客船建造量増加		
				・ SPB*3式LNG船建造		
・ 客船「ふじ丸」建造 (我が国大型客船建造再開)			・ 客船「クリスタルハーモニー」建造			
				・ 韓国船舶受注量世界一		

* 1 : International Maritime Organization

* 2 : Techno Super Liner

* 3 : Self Supporting Prismatic tank-type B

表2 近年の船舶の主要技術動向と材料への要求特性

技 術 動 向	材料への要求特性
①構造軽量化（高速化） ・高張力鋼の活用（1千トン以上の船舶） ・アルミニウム合金の使用（1千トン未満高速船）	①強度特性（高弾力性率を含む）、低温靱性、耐食性 加工性（溶接性、ハニカム構造化）
②安全性・環境保全（海難事故・海洋汚染絶滅） ・二重船殻構造化 ・高疲労強度材 ・船体防汚システム	②強度特性（腐食疲労強度） 耐食性（耐海水、耐原油、耐石炭） 防汚性
③高付加価値船の建造量増大 ・LNG船の増大 ・コンテナ船の増大	③低温靱性、大入熱溶接性
④建造の合理化 ・建造作業の省力化・自動化 ・溶接工程の削減	④低溶接歪み性

2

船舶の技術動向と 材料関連技術課題

2.1 船舶の技術動向

表2に近年の船舶の主要技術動向と船舶用材料への要求特性³⁾を示す。船舶の基本的使命は、出来るだけ多量の荷物あるいは人（輸送量）を、少ない燃料消費で、高速（運航速度）で運ぶことである。

しかし、近年、これらの使命を達成するための船の基本性能に加えて、特に船舶の座礁などによる環境破壊の防止のために、船舶運航時の安全性の確保及び安全で経済的な操船技術の確立などが強く求められている。

一方、我が国では世界との造船競争に打ち勝つために、高効率化、省人化や自動化を狙いとした合理的工作法としてロボットの利用などを含む経済的施工技術の開発に全力を挙げている。

これらの近年の技術動向の概要について、表2に基づいて以下に簡単に述べる。

(1) 構造軽量化（高速化）

タンカーなど鋼製の船舶重量に占める鋼材の量は、80～90%と極めて大きく、鋼材重量は上記した船舶の基本性能、すなわち輸送量、燃料消費量及び運航速度を支配する大きい要因である。したがって、これらの基本性能、特に運航速度を支配する船舶重量の軽減に寄与する鋼材の高強度化により、構成部材の肉厚の低減を図ることが80年代始めからの大きな課題であった。

この課題に対処する材料として開発され、実用されているのが、TMCP鋼（Thermo Mechanical Control Process Steel、熱加工制御鋼）⁴⁾を主体とした高張力鋼である。但し、近年の船舶の安全性・信頼性確保の強い要請から高張力鋼の使用について慎重な船主も出ており、TMCP鋼に関する詳細とともに最近の高張力鋼に対する考え方についても後述する。

なお、中・小型船の高速化に関しては、近年の旅行ブームとともに各種の高速船型の旅客船が開発され、速力40～50ノット（100km/h）にも達する高速旅客船が実現している⁵⁾。一方、高速貨物船に関しては、速力50ノット、貨物積載量1000トンを目指した超高速貨物船TSL（Techno Super Liner）が官民共同で1989年から開発され、現在ほぼ技術的に見通しを得ている⁶⁾。このTSLは、現在1998年からの実船運航を目指して経済性、運航ルート等の調査が進められている。この超高速貨物船の船体材料としては、前述の高速旅客船とともに当然ながら鋼より軽量化が図れるアルミニウム合金が使用される状況にある。

なお、船舶への軽量材料の適用状況を図2⁶⁾に示す。1万トン以上の船舶には高張力鋼が、1千トン未満の場合にはアルミニウム合金ないしFRPが使用されている。ここで、1万トン未満の船舶で高張力鋼が使用されないのは、現状腐食代確保の観点より最小の船体肉厚が規定され、高張力鋼の特徴が十分活かされないからである。一方、プロペラ材料に関しても、従来はニッケルアルミニウム青銅に代わる高強度18%Crステンレス系のプロペラ材料が開発され、大型タンカー用プロペラとしての使用実績もかなり出ている⁷⁾⁸⁾。これは、プロペラ材を高強度化することによりプロペラ肉厚及び展開面積の低減が可能となり、プロペラの推進効率の向上による船舶運航費の低減を目指したもので、これまでの実船適用でこれが実証されている。

(2) 安全性・環境保全

船舶の安全運航の確保ならびに海洋環境保全の観点から材料と構造の両面から技術開発が進められている。すなわち、原油環境中での疲労現象の解明⁹⁾¹⁰⁾並びに同雰囲気下高い腐食疲労強度を示す鋼材の開発¹¹⁾が進められている。また、船舶が座礁した際の原油流出による海洋汚染の防止を狙いとして1992年にIMO（International Maritime Organization、国際海事機関）でタンカーの二重船殻構造化が義務づけられた。

船体構造材料			部 材		総トン数				
			100	1000	10000	100000	200000		
高張力鋼	TMCP鋼 降伏応力 320, 360, 400 N/mm ²	甲 板							
		縦 骨							
		船 底							
		側外板							
		隔 壁							
アルミニウム合金	5000系	船体, 上部構造							
	6000系 サンドイッチ	上部構造							
FRP	板 GFRP ACM*	船体, 上部構造							
	サンドイッチ								

* : Advanced Composite Material

* : Advanced Composite Material

図2 軽量材料の適用状況

なお、前者の高腐食疲労強度材についての概要は、後述する。一方、海洋環境の汚染防止の点から、概要は後述するが、無公害な船体防汚システムの開発¹²⁾¹³⁾も進められている。

(3) LNG船など高付加価値船の建造量増大

世界的な経済活動の拡大に伴ってLNG（液化天然ガス）船およびコンテナ船など高付加価値船の建造が著しく増加している。前者は地球環境の保全の観点から石油に比べてクリーンなエネルギー資源としての天然ガス需要の増加によるもので、液化して輸送するLNG船建造の増加である。一方、後者は世界貿易の拡大に伴う荷動きの増大を示すものである。

これらの動向に伴う材料への要求は、低温での高い靱性と大入熱での優れた溶接性を有することである¹⁴⁾。

なお、我が国が今後とも世界の造船業をリードしていくためには、LNG船やコンテナ船或いは旅客船などの高性能化や高付加価値化などの技術革新を進め、国際競争力のある製品の開発・製造に力を入れることが特に重要である。

(4) 建造の合理化

図3¹⁵⁾は、我が国造船所での溶接作業の従業員一人当たりの生産性と機械化率の推移を示す。近年での機械化率は、70%を越えるまでになっている。しかし、今後とも溶接作業を含む建造作業の合理化は、我が国が世界で造船国として生き残っていくうえで今後とも永続的に取組まねばならない重要課題^{16)~20)}である。

具体的には、生産性向上及び品質確保の点から革新的な技術開発が強力に進められている。すなわち、溶接作業の省力化或いは自動化を狙いとして、材料面では低溶接歪み材の開発、溶接面からは簡易自動溶接機及び各種溶接ロボットの採用、適用拡大に関する開発・実用化である。これら材料技術に直接関連する溶接技術に関する現況の概要に

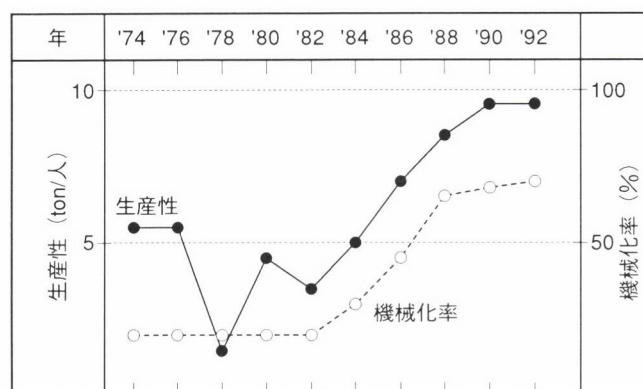


図3 造船での溶接作業の生産性及び機械化率の推移

ついても後述する。

2.2 材料関連課題への取組み

前述した船舶の技術動向に対応する材料関連課題への主な取組み概要と現況について整理する。

2.2.1 船体用材料及び防食技術関連

(1) 高張力鋼

高張力鋼の中心であるTMCP鋼（熱加工制御鋼）は、製鋼・圧延技術と設備の進歩と相まって、コンピュータによる制御技術の導入により圧延時の温度を正確に制御することが可能となり開発されたもので、従来の制御圧延法に比較して優れた熱加工制御法（TMCP）で製造される鋼である。なお、TMCPは日本独自のプロセス名で、これが定着したのは1983年頃である。

TMCP鋼の製法をJIS規格²¹⁾より引用して図4に示す。TMCP鋼の特徴は、制御圧延と制御冷却（加速冷却）との最適化による材質制御とともに、Nbなどの微量合金元素と低い炭素当量（Ceq.）で構成される成分との適切な組合せ

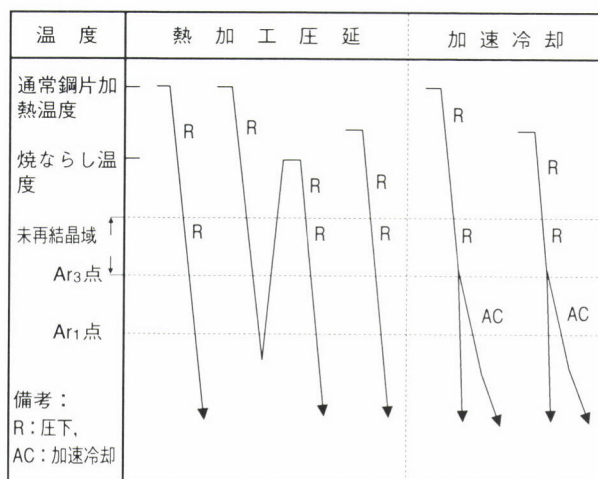


図4 熱加工制御鋼（TMCP鋼）の製法

により、優れた強度と低温靱性並びに溶接性が確保できることである。なお、これらの制御条件並びに成分と鋼材の特性との関係については、栗原³⁾がまとめているのでここでは省略する。

TMCP鋼は、1987年には表3及び表4に示すように船体用高張力鋼材としてNK（日本海事協会）で規則化され、船体の軽量化に大きく貢献してきた。

図5⁴⁾は、高張力鋼の使用状況の経緯を示したもので、1980年には70％程度に達していた。しかし、近年、特にタ

ンカーの二重船殻構造化が義務づけられてから建造される船舶いわゆる第三世代VLCCへの高張力鋼の使用量は、以前に比較して大幅に減少する方向にある。これは、広範囲に高張力鋼が使用された1985年頃から建造されたいわゆる第二世代VLCCで積荷の原油による腐食疲労とみられる損傷がみられたこと及び二重船殻タンカーにおいては、構造の安全性・信頼性が最も重視されるからである²²⁾。

なお、造船用鋼材の開発としては、TMCP鋼の他に形状面から造船施工の省力化に貢献する厚板も開発されている。その例として圧延方向または直角方向に板厚が異なる「差厚鋼板²³⁾」や工場出荷のままの端面でのI開先突合わせ溶

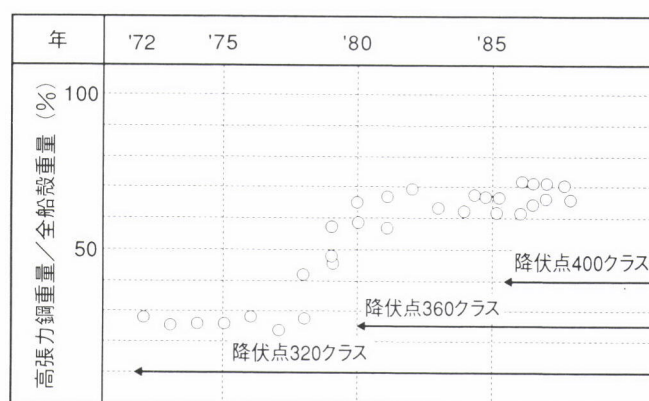


図5 高張力鋼使用量の推移

表3 NK規則での船体用高張力鋼材のTMCP熱処理（NK規則，1995）

グレード	脱酸形式	厚さ, t (mm)	熱処理
KA32 KA36	細粒キルド (Nb処理無し)	12.5 < t ≤ 50	TMCP
		20 < t ≤ 35	
		35 < t ≤ 50	
KD32 KD36	細粒キルド (Nb処理無し)	12.5 < t ≤ 50	
		20 < t ≤ 25	
		25 < t ≤ 50	
KE32, KE36	細粒キルド	t ≤ 50	
KA40	細粒キルド	12.5 < t ≤ 50	
KD40, KE40	細粒キルド	t ≤ 50	

表4 NK規則での船体用高張力鋼材の機械的性質（NK規則，1995）

グレード	引張試験			衝撃試験		
	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	試験温度 (°C)	最小平均吸収エネルギー値 (J)	
					L方向	T方向
KA32 KD32 KE32	≥ 315	440 ～ 590	≥ 22	0 -20 -40	31	22
KA36 KD36 KE36	≥ 355	490 ～ 620	≥ 21	0 -20 -40	34	24
KA40 KD40 KE40	≥ 390	530 ～ 650	≥ 20	0 -20 -40	39	26

接が可能な「びたり銅板²⁴⁾」などがある。

(2) タンカー原油雰囲気中での船体銅板の腐食疲労強度

図6は、CT試験片で行ったサワー原油 (H_2S 400ppm) の高濃度硫化水素原油) 中及び大気中でのKA36 (TMCP) 銅母材の疲労亀裂伝ば速度 (da/dN) を示したものである。これによると応力拡大係数範囲 ΔK が約 $16 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 以上の領域ではサワー原油中の疲労亀裂伝ば速度は大気中に比較して加速されている。特に ΔK が大きくなるほど加速の度合いは著しくなり、 ΔK が $30 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 程度では約7倍に達している。なお、サワー原油中における疲労亀裂伝ば速度の加速現象は母材のみならず、溶接継手の溶接金属及び熱影響部でも同様な現象が見出されている²⁵⁾。

図7⁹⁾にサワー原油及び大気中でのKA36 (TMCP) 銅の丸棒試験片のS-N曲線を示す。疲労寿命に及ぼすサワー原油の影響は、高い応力域ほど顕著で、応力が低下するほど小さくなることから明らかである。

これらの原油による腐食損傷と見られる現象が、1985年頃から建造された第二世代VLCCに観察されたことから、前述のとおり近年の第三世代VLCCでは従来の高張力銅の使用に船主は慎重になっている²²⁾。しかし、原油中で高い疲労強度を示す造船用銅板の改良・開発は、船舶の一層の安

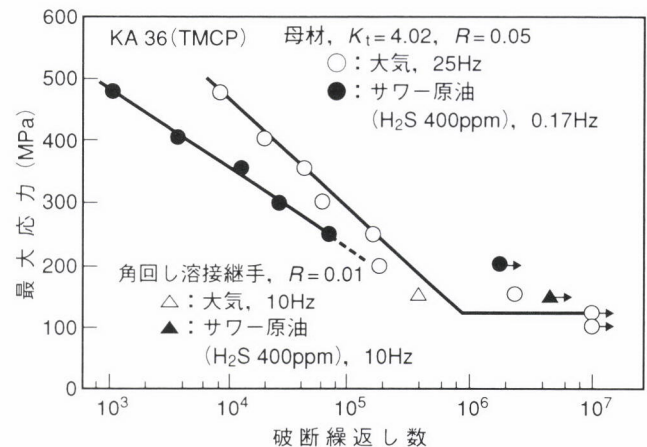


図7 サワー原油及び大気中におけるKA36 (TMCP) 銅丸棒試験片の疲労寿命試験結果

全性確保並びに船体構造の軽量化推進のために今後とも重要な課題である。

このような課題の解決の可能性を見出すために行われている検討の現状について、以下に概要を述べる。

前述した硫化水素を含む原油中での現象は、銅の腐食に伴って生成された水素が銅に侵入して亀裂先端の塑性域に拡散集積して水素脆化が生じるためと考察されている¹⁰⁾。一方、水素脆化はマイクロ組織の影響を強く受けることがよく知られており、腐食環境中での疲労亀裂の進展に対する銅のマイクロ組織の影響を把握する観点から、材料改善の可能性についての検討が一部進められている¹¹⁾。これによるとベイナイト組織を有する銅の陰極水素チャージ下の疲労亀裂伝ば速度は、フェライト-パーライトバンド状組織、フェライト-ベイナイト組織などに比べて遅く、亀裂破面は延性的であるとの知見を得ている¹¹⁾。今後は、実船でのサワー原油環境条件を水素濃度を含めて明確にして、これら環境中で優れた特性を示す造船用銅が開発されることを期待したい。

(3) 船体の防食

船舶の外板没水部に海洋生物が付着すると船の速度の低下や燃料消費量の増大を招くことから、一般に防汚塗料が使用されている。しかし、1975年に入って開発され、その優秀な防汚性能のために現在使用されているトリブチルすず (TBT) 化合物共重合体を利用した防汚塗料は、それに含まれるTBT化合物が1990年に第2種特定化学物質に指定されたことから、使用が困難な状況になりつつある。そこで、この対策として海水の電気分解を利用した導電塗膜による新しい船舶の防汚システムの開発が進められている¹²⁾¹³⁾。

図8に導電塗膜を利用した防汚システムの基本原理を示す。船体外板の接水面を絶縁塗膜を介して被覆した導電性

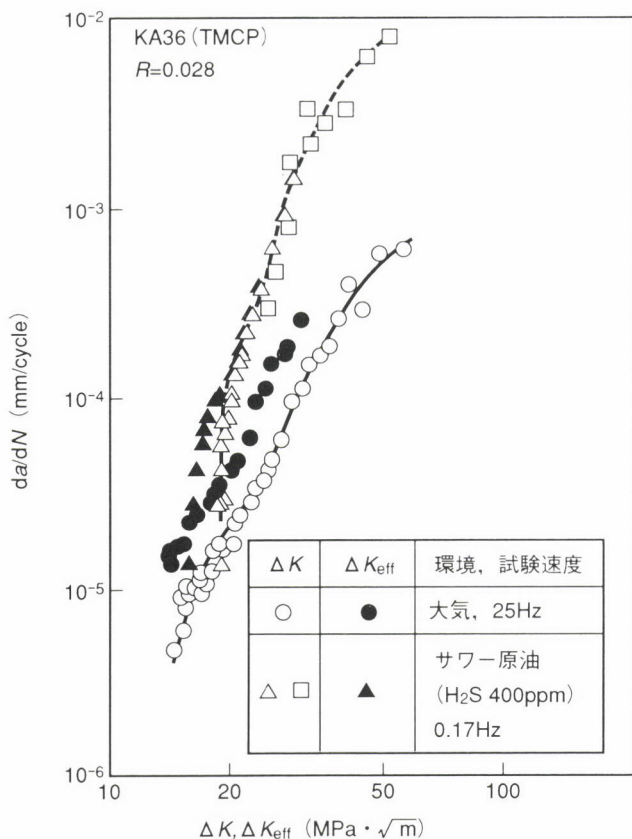


図6 サワー原油中及び大気中におけるKA36 (TMCP) 銅の疲労亀裂伝ば速度

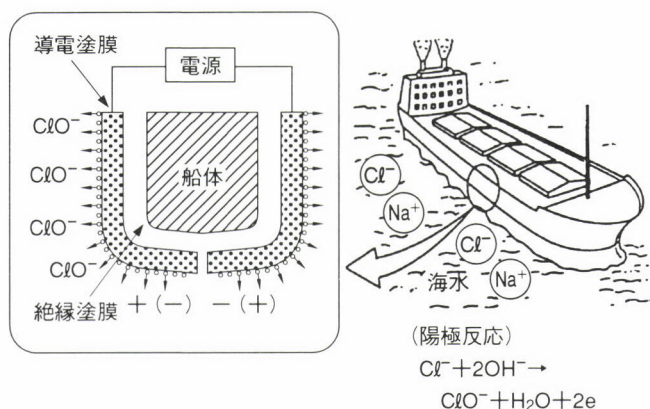


図8 導電塗膜を利用した防汚システムの基本原理図

のある塗膜を陽極として微小電流を流すと、電気分解反応により導電塗膜の極表面層が次亜塩素酸イオンで覆われ、微生物、藻、貝などの海洋生物の付着を防止できる。この技術の特徴は①塗膜中に有機すずや重金属などを含まないため、海洋を汚染しない。②海水中に溶出する成分がないため、長期間安定した防汚性能が維持できるとともに、塗膜表面は塗装直後の平滑な状態を維持でき、運航燃費の節減に寄与できる。③外部電源陰極防食機能を兼ね備えるため、塗膜が損傷し船体外板が露出してもその部分は電気防食され保護される。

本システムは、小型船で長期間の防汚耐久試験が進められており、近年高まりを見せている海洋環境保全の観点から早期に実用化されることが期待される。

2.2.2 溶接技術関連

図9¹⁵⁾は造船各工程における溶接作業での機械化及び自動化がどの段階に達しているかの最新の状況を、また、図中の矢印は将来の目標を示したものである。この図からも造船所での溶接作業の機械化及び自動化が高いレベルに達していることが分かる。しかし、今後とも我が国の造船業

溶接技術レベル	単板	トランス	スティ	板継：板継：	スロット	板継	ロンジ	板継	内構材
建造工程	小組立	平板大組立	曲り大組立	外業					
CAD/CAM化									
オフラインティン									
遠隔教示									
現物ならい									
機械溶接（多機溶接）	20極	12極	3極	×2			12極		
機械溶接									
簡易台車									
手溶接、半自動溶接									

図9 造船各工程毎の溶接作業の機械化及び自動化の状況

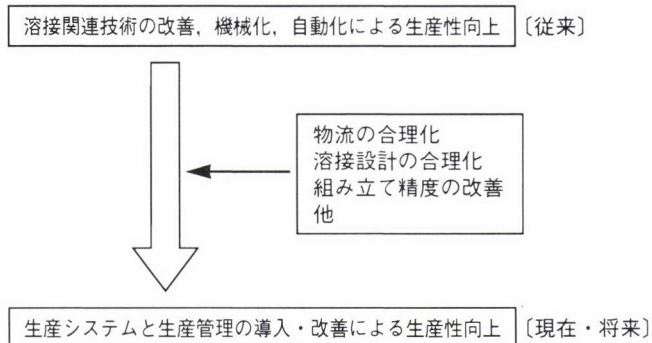


図10 造船における建造技術合理化の施策

が勝ち残っていくためには、溶接を含む建造技術の合理化を最重要課題として取り組む必要がある。但し、今後の建造技術の合理化の施策は、図10²⁶⁾に示すように単に溶接の自動化やロボット化のみならず、CIM(Computer Integrated Manufacturing)の構築による生産システムの合理化も含むものでなければならない。すなわち、溶接に関する固有技術の改善とともに生産システム及び生産管理の合理化など総合的な改革による生産性の向上を達成する必要がある。

2.3 材料関連技術の今後の課題

最後に、前述した材料関連技術課題への取り組み状況から残された主な課題を整理する。

(1) 材料及び防食技術関連

近年の海洋汚染の防止に対する世界的な強い要請から、より安全で信頼性の高い船が求められている。従って、TMCP鋼などの高張力鋼に関しては、第二世代のVLCCで見られた腐食疲労損傷に対して高い抵抗性を有するとともに腐食代が減少できる優れた耐食性を示す新規材料の開発が必要である。また、将来的には前述したような新規船体防汚システムを併用して腐食代の大幅低減による軽量化を目指すべきである。

(2) 溶接技術関連

溶接を含む建造技術の合理化においては、今後溶接の自動化、ロボット化とともに生産システムの全面的な見直しによる合理的生産システムの構築による全体の生産性向上が不可欠である。

3 あとがき

1956年以来船舶の建造量で世界をリードしてきた我が国も、近年韓国などとの競争で厳しい状況に直面しており、これに勝ち抜くために技術革新に懸命な取り組みを行っている。そこで、本報告では近年特に1985年以降の造船業界の技術動向とともにそれに直接関係する材料関連の技術課題

への取組み状況について、その概要を取りまとめた。

我が国が現状の厳しい状況に打ち勝つとともに、21世紀に向けて一段と発展するためには、

- ①現状、海洋環境保全の面から船舶の安全性確保が最も重要な課題であり、材料面での革新は極めて難しい状況にあるが、今後とも耐食性の優れた高張力鋼など高性能な材料の開発に継続的に取組む必要である。
- ②一方、建造技術に関しては、製造コストの削減が当面の最重要課題であり、溶接作業の自動化やロボット化などの省力・省人化技術の追求を継続的に進める。
また、CIMの構築などによる生産システムの見直し・合理化により生産性の向上を図る。
- ③なお、我が国のように賃金の高い国では、LNG船やコンテナ船など国際的に高い競争力を有する高付加価値船の高性能化、差別化を更に進め、これら高付加価値船の製造に特に力を入れる必要がある。

文 献

- 1) 貝原正一郎：溶接学会誌，63（1994），p.388
- 2) ㈱鋼材倶楽部：鉄鋼主要分野における製品開発経緯と今後の展望（昭和63年7月）を参考
- 3) 栗原正好：鉄と鋼，81（1995），p.467
- 4) 北田博重：日本造船学会誌，No.726（1989），p.797
- 5) 木原和之：ふえらむ，1（1996），p.179
- 6) 富田康光，松岡一祥：日本造船学会誌，No.788（1995），p.92
- 7) 武藤数彦，松尾信太郎：鋳物協会，1990年度豊田賞受賞記念講演概要
- 8) 小野修二，齊藤正洋：鉄と鋼，81（1995），p.N250
- 9) 江原隆一郎，山田義和，矢島 浩，伏見 彬，渡部栄一：三菱重工技報，31（1994），p.198
- 10) 江原隆一郎：まてりあ，33（1994），p.1497
- 11) 櫛田隆弘，菅田 登，幸 英昭，大西一志，木村博則，矢島 浩，渡辺栄一，江原隆一郎：日本造船学会論文集，No.174（1993），p.563
- 12) 西 昭雄，宇佐美正博，植田健二，友重清美：三菱重工技報，28（1991），p.258
- 13) 宇佐美正博，友重清美：日本造船学会誌，No.795（1995），p.692
- 14) 中野善文，天野虔一，三宮好央，小林英司，小川隆生，矢島 浩：川崎製鉄技報，18（1986），p.301
- 15) Y. Takeda, T. Kawano, H. Takeda and H. Iwabuchi：Proceedings of International Conference held in Beijing, China, 5-6 September 1994 under the auspices of the International Institute of Welding, p.67（International Academic Publishers）
- 16) 齊藤忠雄：日本造船学会誌，No.788（1995），p.85
- 17) 百合岡信孝：日本造船学会誌，No.773（1993），p.80
- 18) 百合岡信孝：溶接学会誌，65（1996），p.67
- 19) 岩淵 寛：溶接学会誌，65（1996），p.435
- 20) 奥本泰久：日本造船学会誌，No.802（1996），p.263
- 21) JIS G0201-1995，p.15
- 22) 渡部栄一：溶接学会誌，63（1994），p.599
- 23) 武田秀雄：船舶建造における生産技術の高度化への取り組みと今後の課題，日本学術会議，平成4年度シンポジウム，（1993）
- 24) 百合岡信孝：産業界が要望する簡易溶接，高能率溶接および複合材料溶接の開発の現状，日本学術会議，平成4年度シンポジウム，（1993）
- 25) 中野義文，松本重人，杉江英司，矢島 浩，江原隆一郎：日本造船学会論文集，No.174（1993），p.571
- 26) 松井繁朋：溶接学会誌，65（1996），p.43

（1996年11月28日受付）