船舶および海洋構造物の防食*

森

稔**

Corrosion and Protection of Marine Structures

by

Minoru MORI

(Technical Research Laboratory, Kawasaki Heavy Industry Co., Ltd., Akashi)

最近の船舶の傾向として、タンカの大型化が一段落し、ケミカル・タンカ、プロダクト・キャリア、LPG船、LNG船などの特殊船の建造が増加しつつある。

一方海洋構造物としては、石油をはじめ各種の海洋資源開発を目的とした作業台、プラットフォーム、貯蔵タンク、パイプラインや、国土開発を目的とした海底トンネル、ケーソン、海上長大橋、港湾設備および発電プラントが建設され、海洋環境にさらされている。

これらの構造物の強度メンバーには、主として鉄鋼材料が使用されているが、腐食の問題は軽視することができない。一般に海洋構造物にかぎらず、さびに関する損失は非常に大きく、米国だけでも年間千万ドルは下らないといわれている。¹⁾これを腐食による年間損害補償費におきかえてみると更に大きな金額となり、米国では70～80億ドル、英国では6億ポンド、カナダでは1億ポンドになると報告されている。^{2,3)}船舶に関する損失例によると、年間鋼材損耗量は500～750 g/m²であり、これを5万トン級のばら積船にあてはめて計算すると、年間損耗量として約40 000 kg、金額に換算して約6万クロネの損失になる。

このような損失の背景には、海洋における腐食環境があり、大別すると大気、飛沫帯、潮干満帯、海中（浅海、深海）および海底土中に分けられる。これらの環境では、それぞれ腐食条件が異なるため、発生する腐食現象にもかなりのちがいが認められるが、一般には潮干満帯の腐食速度が大であるとされている。^{4,5)}したがって、このような海洋環境から構造物を保護するためには、多数の防食法の中から最も効果のある方法を見いだす努力が必要である。このために各種の研究、試行がなされているが、最近ではデジタル・データ・レコーダが利用されるにいたり、腐食の研究分野における測定と記録、データの統計解析のほかに図表まで行

われるようになった。⁶⁾しかし、一方では防食材料の選択あるいは施工に関して規制が設けられたため、従来の方法がそのままでは利用できない場合があり、その対策に苦心する時代となった。

本稿では、最近の文献の中から実績例に重点をおいて紹介し、各位の参考に供したい。

1 船舶の防食

1・1 船舶に用いる最近の塗料について

船舶に用いる塗料に対する船主の期待は、船体の防食と船速を低下させないための防汚であろう。船舶塗料の種類は非常に多いが、塗装仕様の決定は、価格、品質はもとより従来からの実績を参考にすることが多い。^{7,8)}造船所における塗装では、素地調整条件、塗装作業条件、塗装設備、塗装工程、作業者の技術、検査などが問題になるが、現在の技術を有効に利用すれば、船舶の防食の分野で、年間5 500ポンドが節約できるといわれている。¹⁰⁾

船舶の塗料および塗装費について Mock は、¹¹⁾25万トン級のスーパータンカの場合約500 000ドル（イニシャル・コスト）と述べている。一般に防食のためのコストは、イニシャル・コストだけで価値判断されがちであるが、実際にはメンテナンス・コストを含めたトータル・コストで判断しなければならない。とくに最近では、入渠間隔の延長が行われ、塗替周期の長いすぐれた防食塗装の要求が強く、また塗膜の長期品質保証ということから、塗料メーカーは塗料だけ売るのではなく、施工を含めて防食塗膜を売るという、いわゆる責任施工制度が広まりつつあり、品質保証と塗料による防食システムの収益性について注意がはられるようになってきた。

このような背景のもとに、最近の船舶用塗料は重防食、厚膜型化の検討が進んできた。その代表的なものを選び以下に紹介する。

(1) 塩化ゴム塗料¹²⁾

* 原稿受理 昭和51年4月22日

** 正会員 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町

塩化ゴム塗料は、さび止塗料（1号塗料）として、この10年間めざましく進歩した。この塗料の荷姿は1液型で、その塗膜は透水性が低く耐薬品性、耐候性にすぐれ、1回の塗装で3～6ミルの厚さとなる。本塗料は再塗装が容易で、しかも塗装時の温度の影響を受けにくく実用上の利点が多い。塗りかえ周期は、通常の塗料の1年にに対し約4年といわれている。とくに北欧での使用実績が多く、我が国の船舶の外板塗装の主流でもある。

(2) エポキシ塗料¹³⁾

エポキシ塗料は、塩化ゴム塗料とちがい、荷姿は2液型で主剤と硬化剤を混合して用いる塗料であり、塗膜の耐薬品性は非常にすぐれている。しかし、乾燥工程で1週間10℃以上保持することが必要であり、寒地では不利な点もある。塗膜の性能としては、耐純水性および耐候性に問題があり、また乾燥工程で溶剤蒸発により塗膜の厚さの目減りがある。しかし、無溶剤化すれば、先に述べた目減りの現象はなくなり、塗装環境の毒性、爆発性を改善しながら、厚膜化ができる。ただし、この場合主剤と硬化剤の反応速度が大となり、従来の塗装機では塗装しにくくなるので2成分をちがったノズルから同時に吹付けする方法などを採用すれば実用化が可能である。本塗料は船体外板のほかにタンク（ケミカルタンカ、プロダクトキャリア）への利用が増加するものと思われる。

(3) タール・エポキシ塗料¹⁴⁾

タール・エポキシ塗料は、先に述べたエポキシ塗料にタール成分（コールタール、ピッチ、膨潤炭など）を混合したもので、荷姿および塗膜になるまでの乾燥工程は、エポキシ塗料によくにている。しかし、タール成分を加えてあるため、通常の塗料に比較して1回塗装あたりの塗付量が大きく、厚膜型の塗料であることが特徴である。主として、タンカのカーゴオイルタンク、バラストタンクおよび外板など広い面積に使用されている。

(4) ビニル塗料¹⁵⁾

ビニル塗料は、塩化ゴム塗料と同様1液型で、同塗料より更に古くから用いられており、耐水性、耐候性にすぐれている。本塗料は、再塗装は容易であるが、1回塗装あたりの塗付量が少ないため塗装回数の多いことが欠点である。しかし、最近1回塗装あたり125ミクロンメートル厚さのものも開発されているので、塗装法を考案すれば実用化が可能となる。

使用実績としては、米国では海軍に多く、日本では小型船舶によく用いられている。

(5) ポリウレタン塗料¹⁶⁾

ポリウレタン塗料は、エポキシ塗料と同様の荷姿で主剤と硬化剤を混合して用いるが、塗膜に光沢があり

色彩としてすぐれた外観が得られるという特徴がある。我が国では船舶に用いられた例は比較的少ないが、Kubitzはポリウレタン塗料の用途として、タンクにはトリレンジイソシアネート/トリメチロールプロパン配合品を、甲板には無溶剤品を、水中の使用にはター配合品の使用例をあげて説明している。

(6) 塗料の無溶剤化¹⁷⁾

無溶剤塗料は、1回あたりの塗付量を増して厚膜化ができるため、塗装回数を節減できるという利点のほかに、塗装中および乾燥工程中の溶剤蒸発をおさえることができるので、公害対策としても期待がもてる塗料である。しかし、高粘度であるため新規の塗装設備および高度の塗装技術が要求されることも事実である。塗料としてもレオロジー的な性質や被塗物への附着性などを改良すれば、船舶用塗料として今後広く使用されるものと期待される。

1・2 防汚塗料について

船底に海洋生物が付着し、船速を低下させるという事実は、紀元前400年頃から認識があり、その後いろいろな対策がとられてきたが、1625年銅化合物が防汚顔料として有効であることがわかって以来、現在まで利用され続けている。最近では、防汚のほかに船体の摩擦抵抗を減少させる塗料の研究が行われ、航行試験、いまだ試験、流出機構の解明が行われている。¹⁹⁾²⁰⁾

防汚剤の防汚効果を明らかにするには溶出機構の解明が必要で、亜酸化銅の溶出機構については、航走条件および静止（停泊）時などの銅イオンの溶出速度についての研究がある。²¹⁾²²⁾

しかし、近年防汚剤に各種の有機物が利用されはじめ、有機すず、有機鉛などが開発された。²³⁾ この場合の防汚効果の判定には、実験室で飼育したフジツボを使って効果の確認が行われ、生物学的なアプローチが導入された。²⁴⁾ この方法は、防汚剤単独の能力判定には有効であるから、塗料化された場合の塗膜の防汚効果判定への応用が期待される。また、船体の摩擦抵抗低下については、流体への有機重合体の添加が有効ともいわれ、酸化ポリエチレンの場合、添加濃度 7.5×10^{-4} %で抵抗の減少は45%に達するという報告がある。²⁰⁾

また、船舶の巨大化とドック不足に関連して、水中補修（ブラシ・ポート）も試みられている。この他に摩擦抵抗の減少方法として、フレーク・ガラス・ポリエステル²⁵⁾の利用の紹介もあり、30～35ミルの厚さで5年の寿命があり、ビニル系防汚塗料と組合せて使用すれば、入渠間隔は4年でよいといわれている。²⁶⁾

1・3 タンク用塗料

タンクの内側は、船体強度の補強のため縦、横の肋骨、隔壁などの骨組構造となっているため塗装面積は非常に大きく、通常外板の3倍程度といわれている。

今、7万 m^3 のタンクを例にとるとその塗装面積は約18万 m^2 あり塗装コストは710万クローネを必要とする。²⁷⁾バラストタンク用塗料としては各種のものがあるが、一般にはタールエポキシ塗料の使用実績が多く、我が国で最初にコロージョン・コントロールを適用した千じん丸(12万トン)にもこの塗料が適用されている。²⁸⁾タールエポキシ塗料に関する研究は多くあり、我が国でもワン・コート・システム・タールエポキシ塗料(乾燥膜厚として200ミクロンメートル以上、硬化乾燥時間24hr)が開発され、造船塗装工程の短縮に寄与している。²⁹⁾タールエポキシ塗料の特徴は、チクソトロピックな性質を活用して、ハイビルド化(厚膜化)が可能³⁰⁾なことで、その特徴をいかした製品は多い。

また、有機けい酸亜鉛塗料(比重3.3、乾燥膜厚にして75ミクロンメートル)は、1955年頃からタンカの荷油タンクに使用され始めた。この塗料の防食機能の特徴は、カソード防食作用といわれ、作業面では毒性、臭気がないことである。初期コストは高いが、ドック期間を長くとれるので、10年間で6.7万ドルの節約が可能といわれている。³¹⁾この塗料はばら積船にも利用されている。

この他に、特殊な例として、素地調整を必要としない浮遊塗装法(1000~1500ミクロンメートル³²⁾)、ケミカルタンクの被覆としてポリエチレンの被覆³³⁾、鉛石船を対象としたポリサルファイド塗料³⁴⁾の塗装などがある。

1・4 陰極防食法

1824年Davyによって陰極防食法が見いだされて以来、同法は船舶の防食のために約150年間利用され続けている。³⁵⁾³⁶⁾

現在は、犠牲陽極を用いる流電陽極法のほかに外部電源法も船舶に利用されている。

流電陽極法では、当初マグネシウム陽極がよく用いられたが、1950年代に亜鉛陽極にかわり、1960年代にはアルミニウム合金陽極³⁷⁾が加わった。船体外板の場合は、防食電流密度の均一分布を考慮した取付位置の検討と船体抵抗の増大にならないような形状の研究が行われ現在にいたっている。流電陽極法は外板の他にバラストタンクの防食にも多く利用され、現在は主としてアルミ合金陽極が用いられている。

流電陽極を船体外板に使用した場合の経済的な利点として、Taylorらは駆逐艦の場合入渠1回あたり1万~2万ドルのメンテナンス・コストが節約になると報告している。バラストタンクの場合は外板とちがい、温度、タンクの洗浄状態、はり込み海水の汚染度、空倉のインターバルなどが問題となる。³⁹⁾

外部電源方式の防食例としては、我が国では石狩丸が最初といわれているが、適用された電流密度は、100 mA/m^2 といわれている。⁴⁰⁾⁴¹⁾

陰極防食法は、上記のような外板およびタンクのほかに、銅合金の脱亜鉛防止、キャビテーション・エロージョンの減少、Cr-Ni鋼の孔食の防止、すきま腐食の防止および腐食疲労の防止などにも広く応用されている。³⁵⁾

陰極防食法は、塗膜と併用することが多いが、この場合、過防食になると塗膜の破壊(アルカリによる損傷)が起るので、⁴²⁾両者の適合性について注意する必要がある、ビニル塗膜およびタールエポキシ塗膜が適当であるといわれている。⁴³⁾

1・5 その他の話題

塗膜の品質は、塗装作業条件とくに素地調整グレードの程度と密接な関係がある。⁴⁴⁾船舶の建造とくに超大型船の場合、塗装のための専門工場をもつようになり、⁴⁵⁾⁴⁶⁾素地調整、空調、除じんなどの装置を備え、最適条件で塗装作業を行って塗膜の品質向上に努めている。

塗装機については、現在ひろく利用されているエアレス・スプレー装置のほかに、高粘度塗料のための塗装機(加熱ヒータ付圧送スプレー)の開発⁴⁷⁾、ガラス繊維入りポリエステル樹脂のスプレー技術の開発⁴⁸⁾があげられる。

ライニングの適用例としては、鋼管内面に対するエポキシ樹脂、塩化ビニル樹脂およびポリエチレン樹脂の利用があり、⁴⁹⁾加工法としては高周波を利用した管の曲げ加工と樹脂ライニング⁵⁰⁾があげられる。

素地調整法としては、通常バラスト処理(サンド、グリット、ショットなど)、パワーツール処理(ディस्कサンダー、パワーブラシなど)がよく利用されるが、修繕船へのインヒビタの利用例として、高圧放水(ウェットブラスト)による船体表面清浄の場合に、処理後の発せい防止のために水にポリリン酸、亜硝酸ソーダを添加することが行われている。⁵¹⁾

特殊な例としては、カナダの修繕船で塗装下地として船体に亜鉛のフレイムスプレーを利用したという報告もある。⁵²⁾

水中作業については、ドライドックを使用しないで船体の水線下を検査する技術に関する報告⁵³⁾があり、水中カメラを利用した水中作業法などは船体の水中保守を検討する場合の参考となる。

2 橋梁の防食

最近の橋梁は、海洋環境に架設されることが多くなり、海洋構造物の中の一つの大きな分野となっている。したがって、最近の橋梁が架設される場所や位置の環境条件と鋼材の腐食に関する研究や調査の報文が幾つかあり、また防食についても塗料および施工(塗装機、足場、機械化など)に関する報告書や、本四連絡橋関係の試験調査報告がある。⁵⁴⁾⁵⁵⁾⁵⁶⁾⁵⁷⁾⁵⁸⁾⁵⁹⁾

これらの報告によれば、塗装下地としてジンクリッ

チペイントまたは金属亜鉛被覆の施工を推奨しているが、一方このような塗装下地に対しては現地中で、上塗りを施工する場合には、塗料の種類によっては付着性が充分でないという報告⁶⁰⁾もあり、実橋の塗装仕様の選定と施工管理については充分検討する必要がある。

2・1 さび止塗料

橋梁のさび止塗料としては、酸化鉄さび止塗料、鉛丹さび止塗料、クロム酸系統のさび止塗料が用いられてきた。クロム酸亜鉛顔料の防せい作用は、従来はクロム酸イオンによる金属表面の不働態化作用といわれていたが、Meyerはクロム酸亜鉛錯体アニオンによる防せい作用を主張している。また鉛系のさび止塗料で、金属鉛の使用を検討した例⁶²⁾もあり、この場合金属鉛が表面で空気や水と接触して酸化し、内部にこれらの腐食因子が到達するのを妨害して防食作用を行うといわれている。

最近では、従来のさび止塗料と少しちがったジंकダストペイント（鉛-けい酸亜鉛系 プライマ など）や、MIO（マイカシアス・アイアンオキシド⁶⁴⁾）の利用が行われるようになった。

2・2 さび面塗料

従来のさび止塗料は、塗装前に金属表面のさびや汚れを充分に除去した上で塗装することがたてまえであった。しかし、近年さびの上へ直接塗装できる塗料の開発が進行中であり、検討も行われている。この塗料の特徴は、金属上に存在するさびと反応または浸透⁶⁵⁾して被膜を形成し、さびの進行をとめる安定化層を形成することで、浸透剤としてはタンニン酸⁶⁶⁾などがあり鉄との錯体を形成するといわれている。現在開発されたものとしては、フェライト系顔料のさび変性能を利用した塗料⁶⁷⁾や、合成樹脂のビヒクルに浸透性をもたせ活性顔料を配合したさび面塗料⁶⁸⁾があげられる。これらの塗料には、塗膜損傷部のさびをおさえ、塗膜下へさび⁶⁹⁾が浸入するのを防止する効果や、施工面では湿潤面へ

の塗装効果⁶⁸⁾についての報告がある。

2・3 橋梁塗装仕様例

(1) 外国での例⁷⁰⁾

外国での著名橋梁の塗装仕様例を表Ⅰに示す。英国では、亜鉛溶射施工面の上へ MIO 塗料を塗装する仕様が⁷⁰⁾多く、米国では無機質ジंकリッチプライマの下塗りの上へ塩化ビニルまたはエポキシ樹脂塗料を塗装する仕様が⁷⁰⁾多い。いずれの場合も、イニシャル・コストは高価であってもメンテナンス・コストの低廉な塗装仕様が適用されている。

(2) 国内での例

我が国の橋梁の塗装仕様は、従来は油性鉛丹さび止塗料の下塗りにフタル酸樹脂系の上塗り塗装仕様が多かった。しかし、最近の鋼製長大橋では、次第に欧米の影響を受けてメンテナンスのかからない塗装仕様へと移行している。

耐候性鋼材を使用した例⁷¹⁾としては、四日市高架橋、神戸大橋⁷⁰⁾などがある。前者の例では石油コンビナートにおける亜硫酸ガス対策として、上塗りに塩化ゴム塗料が適用されている。後者の例では通行する自動車の排気ガスと海塩粒子対策としてフェノール系 MIO 塗料の中塗り、塩化ゴム塗料の上塗り塗装が適用されている。

最近完工した関門橋（全長1068m、中央径間716m、けた高さ61m、使用鋼材重量28000トン）では、補剛けた全面に塗装下地として亜鉛メタリコンが施工され、中塗りはフェノール系 MIO 塗料、上塗りは塩化ゴム塗料⁷²⁾⁷³⁾である。海洋環境に長期間耐えることを目標に、このような塗装仕様⁷²⁾⁷³⁾が選ばれている。

2・4 その他の話題

(1) ケーブルの防食

吊橋の場合、主塔間に張られたケーブルからトラスを吊下げているので、ケーブルは橋の生命であると考えてよい。このケーブルのワイヤに建設中ではあるが

表Ⅰ 著名外国橋梁の塗装実施例

橋 梁 名	施工場所	塗 装 系	塗替周期	架設環境	備 考
フォース道路橋	英 国	Zn 溶射-W/P-Z C. さび止め-MIO 塗料×2回	6年後良好	海上	日本で組立後現地架設
セバーン橋	英 国	同 上	4年後良好	海上	
オークランドハーバー橋	ニュージーランド	同 上	2年後良好	海上	
ラウシュウッド橋	英 国	Z. R. P. ×2回-Z. C. さび止め-MIO 塗料×2回	10年後良好	海上	
グインヒール橋	英 国	Zn 溶射-W/P-Z C. さび止め-MIO 塗料×2回	10年後良好	海上	新設時は油性系 現地プラスト後エアレ ス塗装 同 上
ゴールデンゲート橋	米 国	無機質 Z. R. P.-W/P-厚膜型V×2回	塗 替 中	海浜	
サンマテオヘイワード橋	米 国	無機質 Z. R. P.-W/P-V さび止め-厚膜型V×2回	塗 替 中	海浜	
ニューポート橋	米 国	無機質 Z. R. P.-E さび止め-厚膜型E×2回	塗 替 中	海浜	
ジョージワシントン橋	米 国	油性さび止め×2回-A R. 中塗-A R 上塗	4年-5年	海浜	

〔注〕 W/P: Wash Primer Z R P.: Zinc Rich Primer V: Vinyl Chloride Resin Z.C.: Zinc Chromate
MIO: Micaceous Iron Oxide A R. Alkyd Resin R.L.: Red Lead

切れが発見されたという報告があり⁷⁴⁾、その原因として線引き加工中にできたワイヤの表面傷をあげている。この場合は、ワイヤの防食として亜鉛めっきで処理したわけであるが、めっき中に表面傷から水素が浸透し、水素ぜい性が起ったと報告をしている。

ケーブルは、通常炭素鋼、低合金鋼⁷⁵⁾、ステンレス鋼などが用いられ、一般には防食被覆が施されるが、US スチールの16年間のテスト結果から炭素鋼、低合金鋼には亜鉛、アルミニウム合金の被覆が有効であると⁷⁶⁾いわれている。

ケーブルに対する防食処理としては、亜鉛めっきが⁷⁷⁾⁷⁸⁾多く用いられていることも事実で、我が国の最近の例⁷⁹⁾として関門橋のケーブルにも採用されている。

この他、塗膜による防食も行われているが、き裂が入り易いので、水分の浸透によって腐食が起るおそれがあるため、米国からプラスチック・ラッピングの導入が行われている。また、ケーブルの周囲をマイラ層やガラス繊維で被覆し、アクリル系の樹脂でかためるという方法もある⁸⁰⁾⁸¹⁾。

(2) 亜鉛被覆による防食

橋梁本体を亜鉛被覆によって防食施工したという報告⁸²⁾⁸³⁾もかなりあり、英国では1930年代から溶融亜鉛めっきの施工が行われている。この方法は、架設時の損傷に耐えるということでヨーロッパでは実例が多い。亜鉛溶射の例としては、フランスの Porte de la Chapelle の鋼製陸橋（曲率1000m、長さ484m、幅35m）に120ミクロンメートルの厚さで⁸⁴⁾施工され、スコットランドのフォースブリッジ（欧州で最大の吊橋1800m）の懸垂橋鋼材にも同様な方法によって防食被覆が施工されている⁸⁵⁾⁸⁶⁾。これらは、いずれもメンテナンスフリーを目的としている。

(3) 高力ボルト接合部

高力ボルト接合部の表面⁸⁷⁾は腐食し易いので、亜鉛めっきによって防食した例があるが、接合部であるため摩擦係数値については検討する必要がある。接合部の滑り防止法としては、表面を強く研磨してアセチレン炎を3m/minの速度で照射し、ブラシで清掃した後高力ボルトをしめつける⁸⁸⁾⁸⁹⁾。

(4) その他

外国における耐候性鋼の利用例としては、ノース・カロライナの道路橋⁹⁰⁾があり、また橋の再塗装のための表面清掃を対象としたプラスト作業車⁹¹⁾（5万2千ドル、デトロイト）の開発があり、機動力を発揮しているといわれる⁹²⁾。

3 海洋構造物の防食

海洋構造物としては、海底油田掘さく装置、海上採油装置、工事用プラットフォーム、港湾設備、ドック、橋ぐい、水中トンネル、発電プラントなど多数のもの

があげられる。

防食法としては、塗料、塗装のほかには陰極防食、金属溶射、溶融亜鉛めっきなどがあげられる。したがって、船舶や橋梁の防食と基本的には差はないが、それなりの特徴は有している。

3・1 塗料による防食

海洋構造物を保護するために用いられる材料については報文が幾つかあり^{92)~95)}、整理して代表的なものをあげると、合成樹脂としてはエポキシ、タールエポキシ、ふっ素化エポキシ、ポリウレタン、ふっ素化ポリウレタン、ポリエチレン、シリコン、ブチルゴムおよび各種のエマルジョン、顔料としては酸化鉄、MIO、亜鉛、ジンクロメート、鉛、亜酸化銅および有機チタンが利用されている。これらの利用形態としては、塗料、含浸剤、混和剤、パテなどがあげられるが、一般には塗料として用いられる場合が多い。

最近の傾向としては、さび止効果を期待してジンクリッチペイント（けい酸亜鉛系）の利用が増加していること、重防食とメンテナンスフリーのため厚膜塗装（120~160ミクロンメートル）が増加していること、深海においては特別な問題があるのではないかという疑問と検査技術の検討⁹⁶⁾（塗装回数の規定、作業の監視）などがあげられる。また、陰極防食法と併用する場合の塗装仕様の選定についても検討の余地がある。

海洋構造物では、一般に飛沫帯の腐食がはげしいといわれているが、橋脚の例ではネオプレンの被覆が行われ、この場合は被塗物との付着性をよくするために素地調整の仕上げる程度が重要である。飛沫帯の防食については他に幾つかの報告があるが、モネルメタル、オーステナイト鋼、銅ニッケル合金などとゴムの被覆の組合せの例や、耐候性鋼の利用（強度上必要な厚みにさび代を加えて設計する）、コンクリート巻、タールエポキシ塗料の塗装などが紹介されている⁹⁷⁾¹⁰⁰⁾。

乾湿交番になる潮干満帯では、エポキシ塗料、ビニル塗料のような一般的な塗装のほか、ガラス繊維で補強したエポキシ・ポリアミド樹脂のパテ付けをしたという例もある¹⁰¹⁾。

無機質のジンクリッチペイントが海洋構造物に多く使われるようになったのは、例えばドックのデッキ上は作業時に鎮、砂、工具、海水および機械油などで損耗が起るので、通常の有機被覆では約18か月で破壊されるが、無機質のジンクリッチペイントの場合は3年以上の耐久性があることが認められたからである¹⁰²⁾。

塗装費については、米国の石油掘削企業の例では、0.0929m²あたりの平均塗装費は40~80セント、再塗装までの平均期間は3~10年、0.0929m²あたりの修理費は5~35セントといわれている。塗装による防食の経済性については、イニシャル・コストだけでなく¹⁰³⁾

メンテナンス・コストを含めたいわゆるトータル・コスト¹⁰⁴⁾で比較する必要がある。

3・2 陰極防食

海水中における鋼構造物の防食には、船舶の場合と同様に陰極防食法が有効であり、幾つかの文献がある^{105)~108)}が、最近^{109)~113)}は自動電位制御のできる外部電源法の話が多い。

陰極防食を設計する場合、海水の状況（流速、温度、汚染）、電気抵抗値（海水、土中）、陽極材料の選定、構造物の形状と取付位置、迷走電流の影響などが重要な問題である^{109)~113)}。たとえば、温度の影響についてはメキシコ湾のプラットフォームのために設計した仕様が北海で有効とは限らないし、水深によっても流電陽極法（浅海では有利）にするか外部電源法にするかが変わってくるので、環境条件に適した設計が必要である¹¹⁴⁾。

陰極防食の効果については、我が国の場合港湾における鋼材の腐食速度は0.03~0.3 mm/year（平均0.13 mm/year）といわれているが、陰極防食法を採用すれば防食効果として80~100%が期待できる¹¹⁵⁾。その他の効果としては、繰返し荷重のかかった海水中での疲労に対する効果¹¹⁶⁾、海水中における銅合金の脱合金の予防効果¹¹⁷⁾¹¹⁸⁾、304および316ステンレス鋼の海水中でのすきま腐食の防止効果^{119)~122)}、海洋生物の付着に起因した通気差電池腐食による高級ステンレス鋼の孔食防止効果¹²³⁾などがあげられる。

陰極防食法の問題点としては、140 kg/mm²以上の強さの高張力鋼の場合、陰極電流の供給によって鋼中に水素が吸収されぜい化を起すといわれており¹²⁴⁾、このような場合の陰極防食の採用は好ましくない。また、塗装による防食を併用する場合、塗膜にとって過防食の状態になると劣化が起る。例えば陰極防食電位が-1.10~-1.50 V（銅-硫酸銅電池）の場合、ネオブレン、ビニル、コールタールエナメル、タールエポキシ、変性フェノール、アスファルト被覆などは劣化しないが、鉛丹及び塗料、アルミニウムペイントなどははげしく劣化する¹²⁵⁾。

3・3 溶射および塗装

海洋環境での防食法の一つとして溶射法の利用があげられる。この方法が採用されるのは、被防食面積が比較的小さくて、しかも耐食性のほかに耐摩耗性が要求されるような場合か、非常に長期の防食システムの素地としての場合である。

溶射方法としては、金属粉末の溶射¹²⁶⁾、金属線の放電爆発溶射（耐熱、耐摩耗性）¹²⁷⁾、爆発溶射（耐摩耗、耐食性）¹²⁸⁾、線爆溶射（パイプ内面など）¹²⁹⁾などの方法があげられる。海洋構造物へ適用される材料としては、亜鉛、アルミニウムなどが多いが、このほかに鉛、すずなどの溶射があり、このような処理によって得られる

被覆は一般に多孔質といわれているので、この性質を利用して油その他の潤滑剤を含浸させ、耐摩耗性をあげることに利用されている。

溶射の実例としては、ニューヨークで摩耗した引船の船尾軸を高クロムステンレス鋼でメタライジングし、そのあとを旋削研磨して仕上げるが行われ、この方法を採用することにより、従来の方法では4~5週間かかる修理期間を20時間で完了し、ドック費200ドル/dayの利益が得られたといわれている¹³¹⁾。同様な例として粉末溶射によるカムシャフトの補修があり、この方法では入熱を小さくおさえることができるため、シャフトにねじれが発生しないことのために、従来の方法に比較して能率は1.5倍に、コストは半分に低減したと報告している¹³²⁾。このほかに小面積の施工例として、レーシング・ヨットのキールに、76.2~152.4ミクロンメータ厚みの亜鉛溶射を行い、その上をポリエステルで仕上げれば、滑らかな表面が得られるとしている¹³³⁾。

長期の防食を考える場合は、塗装との組合せを利用することになるが、一般に亜鉛およびアルミニウムの溶射層は多孔質であるため、下塗りとしてのプライマ塗装が必要であり、その上へクロム酸亜鉛系の塗料を中塗りし、最終仕上げに合成樹脂系の塗料を用いるのがよいとされる¹³⁴⁾。亜鉛溶射被膜に適する塗装仕様としては、ポリビニルブチラル・ジンクロメート系のエッチングプライマの下塗り、ジンクロメート系中塗り塗料ときり油変性フェノール樹脂の上塗り例や、りん片状酸化鉄塗料やウレタン塗料、アルミ顔料入りビニル塗料などが適しているという報告もある¹³⁵⁾。いずれにしても、溶射被膜に塗装する場合には、下塗りおよび中塗りの塗装仕様がきめ手になる¹³⁶⁾。

金属以外の溶射材料としてプラスチックがあり、ビニル、ポリウレタン、エポキシなどの溶射被覆例もある¹³⁸⁾。

3・4 施工例について

(1) 石油および天然ガス掘削用プラットフォーム

北欧の北海開発計画に関連して、米国で製作した天然ガスの探査用海洋プラットフォームの例では、脚部の防食に塗装と流電陽極法を採用している。使用した塗料はタールエポキシ・コーティング、陽極にはアルミニウム合金を用い25年間耐久性をもたせるとい設計になっている¹³⁹⁾。

北米ルイジアナ沖合に建設された482の油井ジャケットと34のプラットフォームの例では、0.45 Hg, 0.045 Zn, 残りは99.9%の純Al合金の陽極を用いて陰極防食を行い、電流密度のコントロールは50~1500 A/0.0929 m²の範囲が可能になっている¹⁴⁰⁾。

我が国で建造された海底油田掘削装置オーシャンブロスベクタの例では、外板およびタンクの合計53000

m² に流電陽極方式を採用（陽極の総重量は 85 トン）し、タールエポキシ塗料およびフロートコートを用いている。

(2) 港湾施設およびタンク

九州大分海岸工業地帯に新しく鉄鉱石積卸海岸シーバースが建設された。ここでは25万トンの専用運搬船4隻が停泊できるような大規模な施設で、主バースは長さ620m、幅450m、平均水深30mである。ここには740本の鋼管ぐい（1～1.5 mφ）が用いられているが、水面下には3541個のアルミニウム合金陽極を使用し、12000アンペアの防護電流が与えられるようになっている¹⁴²⁾。

サンフランシスコとオークランド間の世界最長の水中輸送トンネルの例では、外部電源による陰極防食法を採用しているが、近くの他の構造物に電気的な影響を与えているおそれがあるので調査したところ、陽極の外側約150mでは電位差はゼロで影響がないとの結論を得ている¹⁴³⁾。

US スチール社は、埋設用鋼製貯蔵タンクの外面に石灰バックフィル防食法を開発した¹⁴⁴⁾。この方法は、従来の陰極防食法を改良したもので、タンクの周囲に石灰をおき、石灰中の重炭酸カルシウムが陰極反応で生ずる水酸イオンと反応し、タンク上に不溶性炭酸カルシウムを析出し、保護すべき鋼表面を減少するとともに、陰極防食に必要な電流密度も減少することができるというものである。

(3) パイプライン

水中パイプラインは、当初は浅海であったが最近では深海で長く大口径となり、布設工法についてもたると曲げ応力などむずかしい問題が多い¹⁴⁵⁾。したがって、腐食環境としてはあまりよくないため、通常は陰極防食や塗装が施工される¹⁴⁶⁾。

電気防食は、外部電源法、流電陽極法の両法が利用されているが、前者は保守が必要なため長いパイプラインには不向きである¹⁴⁷⁾。流電陽極法の場合、陽極材料には船舶の場合と同様最初マグネシウムが用いられたが、その後亜鉛またはアルミニウム合金にかわっている¹⁴⁸⁾。設計する場合には、埋設部あるいは海底での環境条件（流速、土壌の比抵抗）をよく確かめる必要がある。比抵抗が10～20 Ω cm で土の腐食性が強い場合は、パイプラインに熔融アスファルトコーティングが有効であるといわれている¹⁴⁹⁾。

北海におけるフィリップスグループの海底パイプラインの電気防食の例では、86.4 cm φの管の周囲に大きな腕環状の陽極（幅30.5 cm、厚さ6.4 cm、重量374 kg）を取付け、220マイルのラインに2930個取付けている¹⁵⁰⁾。

埋設パイプラインの陰極防食では、保守のため電位

のモニタリングをする必要があるが、省力化する方法としてライン上に無人測定装置を設置し、ヘリコプターで測定値を受信して記録するようなことも行われ、測定値はフルスケールの2%の正確さで受信が可能で、受信装置は2100～2500ポンド¹⁵¹⁾、測定装置は150～250ポンドであるといわれる。

(4) 鉄筋コンクリート

コンクリート中の鉄筋の腐食は、コンクリートのかぶり厚さと関係があるといわれているが、鉄筋の防食についても各種の試みがなされている。その中で鉄筋の被覆に関するものをあげると、金属被覆では亜鉛、ニッケル、カドミウム、銅、鉛、すずなどの被覆の比較試験では、カドミウムの被覆がよいとの結論がだされている¹⁵²⁾が、高価であるため亜鉛めっきやタール系塗料の塗装との組合せが実用的である¹⁵³⁾。

このほかに、有機質の被覆材料としてはエポキシ樹脂があり、有機質の被覆であっても鉄筋表面とコンクリートの付着性を妨害しないといわれている¹⁵⁴⁾。

コンクリート中の鉄筋の腐食と防食については、日本材料学会腐食防食部門委員会、PC構造研究委員会、コンクリート混和剤研究委員会が合同委員会を開催し（昭和51年1月）、討論されているのでその資料を参考にされたい¹⁵⁵⁾。

参 考 文 献

- 1) Hickether, C., Deut Farben-Z, **22**, 106 (1968).
- 2) Ship & Boat, **21**, 21 (1968).
- 3) ВАПАПАЕВ, Г. А., Пром Стронтел, **44**, 12 (1967).
- 4) Skipsteknikk, **6**, 62; 65 (1968).
- 5) Tuthill, A. H., and C. M. Schillmoller, 防食技術, **16**, 33 (1967).
- 6) Matthewman, W., and W. E. Heaton, Corrosion Sci., **8**, 453 (1968).
- 7) Roots, D. C., Metal Finishing J. (London), **19**, 200 (1973).
- 8) Crowley, J., Paint Varnish Prod., **61**, 35 (1971).
- 9) Skarrebo, K., Western Paint Rev., **55**, 14 (1969).
- 10) Shipping World Shipbuilder, **165**, 99 (1972).
- 11) Mock, J. A., Mater. Eng., **71**, 60 (1970).
- 12) Birkenhead, T. F., Shipbldg. Shipping Rec., **114**, 18 (1969).
- 13) Bryn, T., Skipsteknikk, **11**, 240 (1973).
- 14) 森 稔, 柳瀬元昭, 豊田 信, 関西造船協誌, **151**, 25 (1974).
- 15) Ginsberg, T., and J. J. Stevens, Paint Varnish Prod., **64**, 19 (1974).
- 16) Kubitz, W., Hansa, **108**, 256 (1971).
- 17) Cauwenberghe, C. Van, Peintures Pigments Vernis, **49**, 446 (1973).

- 18) Dick, R.J., Paint Varnish Prod., **60**, 35 (1970).
- 19) Londen, A.M., J. Paint Technol., **42**, 511 (1970).
- 20) Barth, C.D., Seewirtschaft, **2**, 682 (1970).
- 21) 森 稔, 川崎技報, **35**, 49 (1969).
- 22) Court, F. H., and H. J. Vries, J. Oil Colour Chemists Assoc., **56**, 388 (1973).
- 23) Pischky, H., Schiff Hafen, **24**, 197 (1972).
- 24) Freiburger, A., and H. Horbund, Nav. Engrs. J., **81**, 105 (1969).
- 25) Jones, D. F., Conf. Papers Intern. Oceanol. Conf. 2nd Brighton Engl., 471 (nd).
- 26) Devoluy, R., Marine Eng. Log., **75**, 33 (1970).
- 27) Brun, J., Skipsteknikk, **10**, 32 (1972).
- 28) 加藤復雄, 大沢一夫, 船の科学, **24**, 67 (1971).
- 29) 船の科学, **23**, 123 (1970).
- 30) 高木 勇, 造船技術, **1**, 76 (1968).
- 31) Hartland, P., Skipsteknikk, **9**, 344 (1971).
- 32) Terveer, D.J., Skipsteknikk, **11**, 516 (1973).
- 33) Rogers, J., Trans. Inst. Marine Engrs., **83**, 139 (1971).
- 34) Paint Varnish Prod., **59**, 54 (1969).
- 35) McCoy, J.E., Trans. Inst. Marine Engrs., **82**, 210 (1970).
- 36) Mater. Protect Performance, **12**, 18 (1973).
- 37) Kurr, G.W., Proc. NACE Conf. 25th, 444 (1969).
- 38) Birnbaum, L. S., B. M. Taylor, and W. M. Strasburg, Jr., Nav. Engrs., **83**, 13 (1971).
- 39) 玉利昭一, 造船技術, **3**, 61 (1970).
- 40) 鎌原正夫, 船舶, **41**, 102 (1968).
- 41) 鎌原正夫, 船舶, **41**, 95 (1968).
- 42) Routley, A.F., Paint Technol., **31**, 28 (1967).
- 43) Brown, P., Metal Finishing, **66**, 66 (1968).
- 44) 豊田 信, 森 稔, 造船工業, **3**, 13 (1971).
- 45) 松永昭介, 造船技術, **2**, 44 (1969).
- 46) Marine Eng. Log., **75**, 57 (1970).
- 47) 落合正美, 塗装と塗料, **133**, 45 (1966).
- 48) Coudenrove-Kalergi, J., Plastverarbeiter, **20**, 407 (1969).
- 49) Klaas, H., Schiffbautechnik, **17**, 21 (1967).
- 50) 造船技術, **3**, 110 (1970).
- 51) Chromy, L., J. Kukla, and E. Smieszek, Plaste Kautschuk, **19**, 135 (1972).
- 52) Can Paint Finishing, **42**, 38 (1968).
- 53) Smith, A.L., Conf. 2nd Brighton Engl., 459 (nd).
- 54) Hutchins, J. S., and M. Mckenzie, PB Report 220313, 29 (1973).
- 55) 森本隆也, 金属材料, **10**, 61 (1970).
- 56) たとはは長大構造物塗装第一次報告, 防錆管理, **14**, 13 (1970).
- 57) たとはは, 長大構造物塗装第二次報告, 防錆管理, **15**, 11 (1971).
- 58) 森 芳徳, 土木技術資, **13**, 13 (1971).
- 59) 森 芳徳, 西島高秀, 土木技術資, **13**, 393 (1971).
- 60) 佐藤 靖, 吉田真一, 橋本達知, 大里敏夫, 今井文夫, 菅谷ひろし, 鉄道技研報, **771**, 1 (1971).
- 61) Meyer, G., Deut Farbenz, **20**, 526 (1966).
- 62) Newnham, H.A., Shipbuilding & Shipping Record, **109**, 301 (1967).
- 63) Am. Paint J., **156**, 565 (1969).
- 64) Surface Coatings, **4**, 108 (1968).
- 65) Cupr, V., and B. Cibulka, Deut Farben-Z, **21**, 494 (1969).
- 66) Langenhaeck, J.C., Peintures Pigments Vernis, **46**, 625 (1970).
- 67) 福井三郎, 山本正登, 松村雄介, 三菱重工技報, **9**, 257 (1972).
- 68) 石川信雄, 防錆管理, **17**, 11 (1973).
- 69) 浦部匡司, 防錆管理, **17**, 17 (1973).
- 70) 島田喜十郎, 森 稔, 村田安房, 浦部匡司, 橋梁と基礎, **5**, 38 (1971).
- 71) 浅間達雄, 山住幸光, 橋梁, **6**, 40 (1970).
- 72) 中山雅道, 橋本定明, 塗料の研究, **88**, 7 (1974).
- 73) 防錆管理, **15**, 21 (1971).
- 74) Nauman, F.K., and F. Spies, Prakt Metallog., **10**, 588 (1973).
- 75) Rademacher, C.H., Stahlbau, **42**, 161 (1973).
- 76) Swan, J.D., Preprints Ann. Offshore Technol. Conf. 2nd, 2, II. 223 (1970).
- 77) 東田信安, 内川千彦, 富士鉄技報, **18**, 15 (1970).
- 78) 根来広平, 石黒隆義, 富士鉄技報, **18**, 28 (1970).
- 79) 鉄鋼界, **21**, 63 (1971).
- 80) 尾家義弘, 山田光二, 武野 優, 富士鉄技報, **18**, 60 (1970).
- 81) Bolwell, A.J., Design News, **25**, 42 (1970).
- 82) Eijnsbergen, J. F. H., Europe Ind. Rev., **3**, 11, (1970).
- 83) Hall, J. R., Corrosion Prevent Control., **17**, 12 (1970).
- 84) Prat Soudage, **24**, 34 (1970).
- 85) Wuich, W., Metalloberflache, **23**, 244 (1969).
- 86) Tech. Betrieb, **23**, 267 (1971).
- 87) Birkemoe, P. C., and D. C. Herrschaft, Civil Eng., **40**, 42 (1970).
- 88) 鈴木久男, 土木技術, **22**, 34 (1967).
- 89) Jenrich, E., Bauplan-Bautech, **25**, 219 (1971).
- 90) Davidson, S.F., and J. L. Norris, Civil Eng., **38**, 33 (1968).
- 91) Roads Streets, **113**, 46 (1970).
- 92) Ellinger, M.L., Paint Mf, **43**, 7/8, 32 (1973).
- 93) Mayne, J.E.O., Brit. Corrosion J., **5**, 106 (1970).
- 94) Kunststoffe Bau, **28**, 41 (1972).
- 95) Hochweber, M., Deut Farben-Z, **24**, 182 (1970).
- 96) Gönnel, F., Haus Tech. Vortragsveroeffentl, **297**, 12 (1972).

- 97) Dear, H., Metals Eng. Quart., **13**, 41 (1973).
- 98) Richardson, M. R., Preprints Ann. Offshore Technol. Conf. 2nd, 2, 497 (1970).
- 99) 長崎作治, 土木技術, **24**, 68 (1969).
- 100) Creamer, E. V., Preprints Ann. Offshore Technol. Conf. 2nd, 2, 485 (1970).
- 101) Can Paint Finishing, **47**, 22 (1973).
- 102) Brouillette, C. V., Mater. Protect, **9**, 19 (1970).
- 103) 金属材料, **10**, 82 (1970).
- 104) 森 稔, 金属材料, **10**, 27 (1970).
- 105) Lehmann, J. A., J. Metals, **22**, 56 (1970).
- 106) Ferry, C. R., Proc. NACE Conf. 24th, 119 (1968).
- 107) Byrne, P. B., Mater. Protect Performance, **10**, 21 (1971).
- 108) Röbbke, H., Seewirtschaft, **5**, 847 (1973).
- 109) Grandstaff, C. M., and H. L. Craig, Jr., Mater. Protect Performance, **10**, 29 (1971).
- 110) Morgan, J. H., Brit. Corrosion J., **5**, 237 (1970).
- 111) Metals Mater., **5**, 150 (1971).
- 112) 花田政男, 防食技術, **19**, 12 (1970).
- 113) Nekoxa, G., and C. S. Potosnak, Preprints Ann. Offshore Technol. Conf. 2nd, 2, 465 (1970).
- 114) Davis, J. G., G. L. Doremus, and F. W. Graham, J. Petrol. Technol., **24**, 323 (1972).
- 115) 筧 建彦, 大内一憲, 遊佐 功, 防食技術, **21**, 124 (1972).
- 116) Hudgins, C. M., Jr., B. M. Casada, R. L. Schroeder, and C. C. Patton, Preprints Ann. Offshore Technol. Conf. 2nd, 2, II-257 (1970).
- 117) Lennox, T. J., Jr., and M. H. Peterson, PB Report 195314, 30 (1971).
- 118) Lennox, T. J., and M. H. Peterson, Mater. Protect Performance, **10**, 31 (1971).
- 119) Peterson, M. H., T. J. Lennox, Jr., and R. E. Groover, Mater. Protect, **9**, 23 (1970).
- 120) Vreeland, D. C., and G. T. Bedford, Mater. Protect, **9**, 31 (1970).
- 121) Lennox, T. J., Jr., and M. H. Peterson, PB Report 204406, 24 (1971).
- 122) Peterson, M. H., T. J. Lennox, and R. E. Groover, Proc. NACE Conf. 25th, 314 (1969).
- 123) 藤井政夫, 佐伯庄吾, 熊田 誠, 日本金属学会誌, **34**, 534 (1970).
- 124) 小林豊治, 金属材料, **10**, 25 (1970).
- 125) Backstrom, T. E., and F. E. Causey, PB Report 184734, 23 (1969).
- 126) Wuich, W., Werkstaat Betrieb, **103**, 871 (1970).
- 127) 栖原寿郎, 福田重久, 鋳鍛造, **23**, 19 (1970).
- 128) 田中 清, 金属材料, **11**, 51 (1971).
- 129) 栖原寿郎, 福田重久, 金属, **40**, 50 (1970).
- 130) Reininger, H., Metall., **22**, 795 (1968).
- 131) Welding J., **46**, 519 (1967).
- 132) Welding J., **49**, 931 (1970).
- 133) Welding J., **49**, 657 (1970).
- 134) Gohl, K., Schweisstechnik, **19**, 86 (1969).
- 135) 橋本定明, 実務表面技術, 236, 459 (1973).
- 136) Radtka, S. F., Paint Varnish Prod., **63**, 29 (1973).
- 137) Claxton, A. E., and E. V. Carter, Brit. Corrosion J., **4**, 187 (1969).
- 138) Legrand, J., Corrosion Traitement Protect Finition, **18**, 301 (1970).
- 139) Europe Oil, **7**, 36 (1968).
- 140) Doremus, E. P., and R. B. Pass, Proc. NACE Conf. 25th, 455 (1969).
- 141) 黒瀬博志, 池田やす夫, 海洋開発, **3**, 59 (1970).
- 142) Nakagawa, M., Conf. Paper Intern. Oceanol. Conf. 2nd Brighton Engl., 167 (nd).
- 143) Bomar, H. E., and R. H. Marchand, Mater. Protect, **9**, 19 (1970).
- 144) Vrabie, J. B., Mater. Protect Performance, **12**, 44 (1973).
- 145) Small, S. W., Conf. Preprints Am. Soc. Civil Engrs., 1974, 22 (1973).
- 146) 早川武夫, 秋浜成友, 海洋開発, **3**, 64 (1970).
- 147) Mackay, W. B., and A. T. G. Edmonds, Corrosion Prevent Control, **20**, 6 (1973).
- 148) Anti-Corrosion Methods Mater., **14**, 15 (1967).
- 149) Liesche, H., Bauplan-Bautech, **26**, 32 (1972).
- 150) Davis, J. A., Petrol Petrochem. Intern., **13**, 70 (1973).
- 151) Process Eng., Sept., 115 (1973).
- 152) Duffaut, P., L. Duhoux, and B. Heuze, Ann. Inst. Tech. Batiment Trav. Publics, 305, 101 (1973).
- 153) Bird, C. E., and F. J. Strauss, Mater. Protect, **6**, 48 (1967).
- 154) Trivella, L., Verniciature Decorazioni, **1**, 25 (1972).
- 155) Rinaldi, G., Proc. Intern. Navigation Congr. 22nd, Paris Sect. 2, Subj. 5, 63 (1969).
- 156) 日本材料学会腐食防食部門委員会資料, 14, 74, Part 1 (1976).