

海岸における鋼管構造物の防食について (第1報)

向江脇公雄*・沢村 稔**・谷 秀夫**・平山 英正**

1. 緒 言

海底管、棧橋の脚部、鋼管杭、養魚場の支柱、防波欄など、鋼管が海岸水域で使用されることが多くなったが、その理由は軽量・施工容易・強度などの利点が考えられる。また Cylindrical steel bearing pile は腐食にさらされる外表面が小さいから、海中パイロとして、理想的な形状であるといわれている。このように海中での腐食環境で、海底管または海岸構造物として、鋼管が使用されるにつれ、必然的にその防食法を確立することが、重要な課題となった。

海水は約3%の塩化ナトリウムを主成分とし、さらに種々の物質が溶解含有したもので、それ自体腐食性である上に、絶大なエネルギーを保有する潮流、波浪や海砂の影響を受け、海洋生物の付着など海岸構造物は常に物理的、化学的作用を受ける苛酷な環境にさらされているわけである。また構造物からみると、鋼管杭についても、部分によって受ける腐食の度合はことなり、海底地中の腐食部分、海底面の岩による破傷や、小石・砂によるエロージョン、単純な海水浸漬による腐食部分、潮流・波浪の外力をとめない、しかも干満による乾湿状態のくり返される上部腐食、さらに、常に潮風を受け大気にさらされている腐食部分にわけられ、複雑な腐食作用を受けることになる。このような腐食現象以外に、海洋生物の付着がある。付着による汚損は防食上重要な要因であり、ある種の防食被覆は短期間で無効となり、孔食の原因となる場合もある。このような外的条件は、海岸構造物の所在する地理的条件、すなわち熱帯・温帯・外洋・内海の差とか、潮流・干満の状況、海水の化学的性質や汚染度、海洋生物の繁殖状況、海底の地質などによって左右されるものであるが、一方防食上の立場からみると、多くの海岸構造物は半永久的施設であり、最初の防食被覆は海中で使用されない構造物と同様で、比較的簡単に加工されるが、使用途中で一度破損すると、後の補修や塗り直しは非常に困難である。すなわち、海岸における鋼管構造物は強い腐食環境と、防食補強のむずかしい二重の悪条件下にあるといえる。海中鋼管構造物が非常に腐食されやすい環境にあるため、腐食原因の解明¹⁾、耐海水性防食材料の開発や陰極防食法^{2)~4)}など、その対策について研究され、内外に数多くの報告がみられる。防食法としてはコンクリート・ライニングをふくむ無機

被覆や有機被覆が使用されているが、被覆のみで効果を期待できる材料は、現在のところ少ないようである。最近では陰極防食、あるいは陰極防食と防食被覆を併用することによって、腐食を防止する手段がとられ、その効果が顕著であることが認められている。

著者らは、鋼管の海水中の腐食、防食材料と陰極防食法について、一連の実験室、実地試験を実施中であるが、本文では一年間の海水による腐食状況の調査、および二、三の鋼管防食材料の検討を行なった結果について報告する。

2. 実験試料および方法

海岸構造物に使用される鋼管は、主として溶接鋼管であるので電気抵抗溶接管(電縫管)を用い、裸鋼管の海水試験には継目無鋼管を比較のために浸漬した。

(1) 裸鋼管の海水試験

鋼管の化学成分を表-1、鋼管の大きさ、溶接法、熱処理条件を表-2に示す。各種鋼管の母材部、溶接部か

表-1

品 種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
電 縫 鋼 管	0.06	0.01	0.34	0.009	0.023	0.16	—	—
"	0.03	0.01	0.29	0.020	0.018	0.08	—	—
"	0.03	0.01	0.30	0.029	0.027	0.09	—	—
"	0.06	0.01	0.38	0.034	0.016	0.10	—	—
継目無鋼管	0.12	0.25	0.45	0.035	0.030	0.15	—	—
ステンレス鋼	0.06	0.53	1.93	0.033	0.008	—	10.62	18.96

表-2

外径、肉厚	溶 接 法	熱 処 理 条 件
27.2×2.8mm	コア-コア溶接	造管のまま 680°C・30'AC 900°C・10'AC
60.5×3.8mm	リム-コア溶接	" " "
60.5×3.8mm	コア-コア溶接	" " "
89.1×4.2mm	コア-コア溶接	" " "

ら、長さ方向と円周方向に 30×50 mm、260×35 mm の大きさに切斷採取し、前者は表面状況と腐食減量、後者は機械的性質の変化を測定した。浸漬液は、実験室試験は3%塩化ナトリウム水溶液、実地試験は山口県光市で行なった。なお試験片は鋼管が垂直方向、水平方向になった場合に応じて、縦方向と横方向に浸漬した。

(2) 防食鋼管の海水試験

鋼管の防食に使用した防食材料と被覆法を表-3に示す。また、これらの防食材料が適正であるかどうかは、

* 正員 工博 八幡鋼管KK研究部

** 八幡鋼管KK研究部

表-3

種類	塗 装 順 序	被 覆 法
ブロンアスファルト	アスファルトプライマー+ブロンアスファルト	プライマー刷毛塗装 24時間後エナメルを 180°C に溶融し浸漬塗装
アスファルトエナメル	アスファルトプライマー+アスファルトエナメル	プライマー刷毛塗装 24時間後エナメルを 180°C に溶融し浸漬塗装
コールタールエナメル	コールタールプライマー+コールタールエナメル	プライマー刷毛塗装 24時間後エナメルを 200°C に溶融し浸漬塗装
コールタールエポキシ塗料	コールタールエポキシ塗料3回塗	24時間間隔で3回塗装
ポリエチレン (高密度)		鋼管を 280°C に加熱した流動浴に5秒浸漬

表-4

測定項目		種 類	ブ ロ ン アスファルト	アスファルト エ ナ メ ル	コ ー ル タ ー ル エ ナ メ ル	タ ー ル エ ポ キ シ 塗 料	ポ リ エ チ レ ン
軟 化 点 (環 球 法) °C			152		114	—	—
比 重					1.425		
針 入 度	25°C 100 g 5 sec		8		14.0	—	—
	45°C 50 g 5 sec		13		29.0	—	—
乾 燥 時 間 (25°C)			—	—	—	指触30分	—
			—	—	—	硬化2時間	—
高 温 試 験	70°C 24hr(mm)		0	0	1.0	0	0
低 温 試 験	-20°C 6hr(mm)		△	△	△	△	△
曲 げ 試 験	溶 融 直 後	亀裂発生距離 (mm)	0 △	24 △	0 △	0 △	24 △
		剝離面積 (cm ²)	0 △	1 △	0 △	0	10
	2 hr 加熱処理後	亀裂発生距離 (mm)	0 △	24 △	0 △	—	—
		剝離面積 (cm ²)	0 △	10 △	0 △	—	—
衝 撃 試 験	直 接 衝 撃 (cm ²)	0 △	5 △	0 △	0 △	0 △	
	間 接 衝 撃 (cm ²)	0 △	5 △	0 △	0 △	0 △	
皮 剝 ぎ 試 験	30, 40, 50, 60, 70°C		△	△	△	△	△
電 気 抵 抗 試 験	MΩ/dm ² (食塩水浸漬)		∞ △	∞ △	∞ △	∞ △	∞ △
吸 水 性 試 験	(水道水浸漬)		測定せず	測定せず	測定せず	測定せず	測定せず
縦 圧 試 験			△	△	△	△	△

注: △印は合格

埋設鋼管塗覆装規準⁹⁾によりたしかめた。表-4 にその結果を示す。

1年間の浸漬中における径時変化として行なった試験は、防食材料の物性として重要な因子となる吸水性と付着性である。海水中にある防食鋼管は常に海水にさらされ、潮流、波浪による物理的な作用を受けるので、その吸水量・付着力の変化は、材料の有効寿命を決定するものである。実験室試験で3%塩化ナトリウム水溶液に浸漬して、防食材料の吸水量と、付着力の変化を縦圧試験から求めた。実地試験は静岡県清水市で行ない、汚損生物による劣化状況と、付着力の変化として縦圧試験を

行なった。

吸水性・付着性の試験方法は、前記の埋設鋼管塗覆装規準と類似した方法で試料を作製し、浸漬して、吸水量と縦圧試験によるく離面積を測定した。つぎに各試験について具体的にのべる。

吸水性 50×50 mm の3枚の清浄な予熱したガラス板の片面に材料を 50×40×3 mm (ただし、コールタールエポキシ塗料は 0.3 mm) 厚に塗り、1週間室内放置後、3%塩化ナトリウム水溶液に浸漬して、2カ月ごとに取りだし、付着水分を軟かい清浄な布で拭きとり、デシケーター中で15~20分放置し、表面の付着水分を完

表-5

種類	浸漬期間		1年	
	表面状況	6カ月	1年	年
ブロンアスファルト	全面付着	プライマーから全面はく離斑点状の腐食	全面付着	プライマーから全面はく離 全面腐食
アスファルトエナメル	全面付着	プライマーから90%はく離 全面腐食	全面付着	プライマーから全面はく離、わずかに乳食を認める
コールタールエナメル	全面付着	プライマーから50%はく離、はく離した面は全面腐食の他、極局部的に腐食の進行した所もある	全面付着	プライマーから全面はく離、全面腐食
コールタールエポキシ塗料	全面付着	生物付着部に石灰質が斑点状に残るが塗膜異状なし	全面付着	生物付着部に石灰質が斑点状に残るが、塗膜異状なし
ポリエチレン	全面付着	生物付着部に石灰質が斑点状に残るが塗膜異状なし	全面付着	生物付着部に石灰質が斑点状に残るが、塗膜異状なし
ブロンアスファルト+防汚塗料	付着なし	ブロンアスファルトはやや膨潤し、防汚塗膜に亀裂を生ず	一端部に付着、中央部にもフジツボが数個膜の内部に付着	一端部プライマーから10%程度はく離 腐食が著しい
アスファルトエナメル+防汚塗料	付着なし	異状なし	ほとんど全面付着	付着部はプライマーからはく離、腐食が進行している
コールタールエナメル+防汚塗料	付着なし	異状なし	ほとんど全面付着	防汚塗料90%はく離、コールタール50%はく離、コールタールはく離部腐食
コールタールエポキシ塗料+防汚塗料	付着なし	異状なし	ほとんど全面付着	ほとんど異状なし

全に乾燥させたのち、重量を測定し、吸水による重量増加より吸水量を算出した。

吸水量=吸水による重量増加/塗装表面積

付着性 付着力をしらべるため縦圧試験を行なった。

外径 48 mm, 厚さ 3.5 mm, 長さ 50 mm の鋼管の表面を清浄にしたのち、プライマーを使用して(コールタール・エポキシ塗料, ポリエチレンはプライマーなし)約 2 mm の厚さに上塗塗装し、一週間室内放置後、3%塩化ナトリウム液に浸漬して、1~2カ月ごとに取りだし、室温で長さ 40 mm になるまで縦方向に圧縮した。このとき生ずる塗装面のはく離、および付着力のなくなった部分をはく離した合計の面積を測定した。天然海水に浸漬した試料は、1年後取りだし、中心部 50 mm を切断し同様に試験した。

表面状況 縦圧試験に用いた鋼管と同じ外径、厚さで長さ 200 mm のものに、同じように塗装し、管端をシールして、天然海水に浸漬した。

3. 実験結果および考察

1年間天然海水、ならびに3%塩化ナトリウム水溶液に単純浸漬した結果と考察を、裸鋼管と防食鋼管にわけて述べる。

(1) 裸鋼管の海水試験

1年間浸漬後の、各試験項目の結果の大略を、つぎに示す。

3% 塩化ナトリウム水溶液の場合

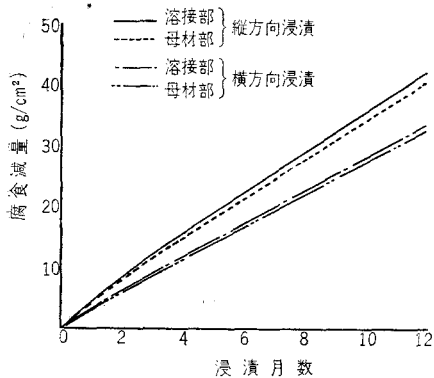
表面状況 全面腐食
 腐食減量 30~50 mg/cm²
 侵食度 0.04~0.06 mm
 機械的性質 変化なし

天然海水の場合

表面状況 全面に生物付着し、剝離した表面は斑点状の腐食
 腐食減量 160~220 mg/cm²
 侵食度 0.20~0.28 mm
 機械的性質 降伏点、抗張力、伸び、ともに顕著な変化なし

表-1 に示した、鋼管の大きさ、溶接法、熱処理条件では有意差なく、試験片の位置は、溶接部の方が母材部にくらべ、約2%腐食度が大きかった。試験片のおき方では、縦方向と横方向を比較すると、前者が0.04~0.05 mm/年であるが、後者は0.05~0.06 mm/年であり、縦方向においたものが腐食量が大きい。これは縦方向においたものは、腐食生成物が鋼表面に付着しがたいためと思われる。継目無鋼管は、電縫管母材部と等しい腐食状況をしめした。ただ3%塩化ナトリウム水溶液と天然海水を比較すると、腐食度は、天然海水の方がはるかに大きく、4~5倍である。これは、ステンレス鋼でも同じで、実験室試験ではほとんど腐食されないが、天然海水では、0.08 mm/年で、天然海水の腐食が大きいことがわかる。3%塩化ナトリウム水溶液に浸漬した、腐食減量の一例を、図-1 に示す。腐食度の変化

図-1



は、時間に対し、ほぼ直線的であった。

普通、海水に浸漬した鋼の侵食度は、0.25～0.196mm/年で、平均 0.11 mm/年といわれており⁶⁾、また、C.P. Larrabee⁷⁾は、実際の鋼杭について行ない、海水中の腐食率は 0.05 mm/年と報告している。これらと比較した場合、本文の結果はやや大きい値となっている。もちろん腐食試験水域の差、試験体の大きさ、試験期間などに左右されるので、実際問題としてはこれらの数値は腐食の目安となるにすぎないと思う。

鋼管の腐食度は、実験室試験で行なった3%塩化ナトリウム水溶液の場合は、天然海水にくらべ、1/4～1/5であることは前述したが、これは単純浸漬の比較値を示すだけである。天然海水に浸漬した腐食を、実験室的にもとめるならば、浸漬液(人工海水)の酸素や他のガスの溶存量、温度、流速、補給率などを考慮して、試験すべきであろう^{8),9)}。

(2) 防食鋼管の海水試験

吸水性: 3%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬した、吸水量の変化を、図-2に示す。試験結果から、ブロンアスファルト、アスファルトエナメル、コールタールエポキシ塗料は、水道水中とほぼ同じ経過を示すが^{10)~11)}コールタール・エナメルの場合、逆に重量減少しているのが注目される。浸漬液は海水に近い状態にするため、pHを8±0.2に調節したが、天然海水でも同じ可

図-2

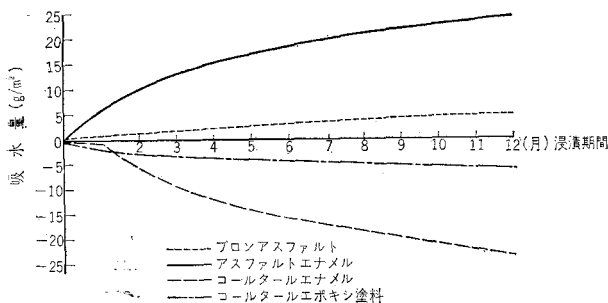
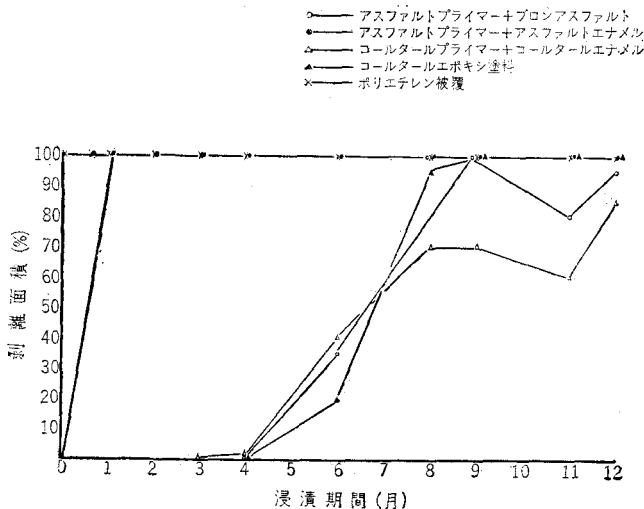


図-3



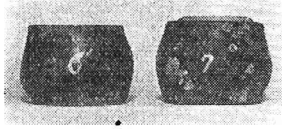
溶性の経過を示すとは、断定されない。しかし、少なくとも水道水中の吸水量よりも、この試験結果に近似した値になるであろうと推定される。重量変化の少ないのは、コールタールエポキシ塗料・ブロンアスファルトであった。

付着性: 縦圧試験の結果を 図-3, 写真-1 に示す。縦圧試験は、実際の鋼管構造物は海中で静止状態にあるわけであるから、試験方法として、やや苛酷な条件であると思うが、付着力や経時変化を推定する一手段と考えられる。図-3に示すように、3%塩化ナトリウム水溶液の場合、防食材料のすべてが、6カ月以後でいちじるしい劣化を生じている。浸漬期間は37年5月18日～38年5月18日であるが、8～9カ月目に相当する冬期(1～2月)には、はく離面積が大きくなり、その後再び、減少している。このことから、瀝青質塗料は水温低下による脆化を生ずることが考えられる¹²⁾。また重要なことは、タールエポキシ塗料の場合、天然海水に浸漬したものは、はく離していないことである。写真-1に示すように、海中生物が付着しても、塗膜中へ貫入しえないものは、かえって海水から保護し、海水の温度変化の影響が少なく、防食上有効であることが推定される。以上の結果から、3%塩化ナトリウム水溶液では、コールタール・エナメルが、調査した材料中最もよかったが、天然海水の場合は汚損生物の影響が大きく、コールタールエポキシ塗料の方が、よい成績を示した。

表面状況: 表-5にまとめて示すが、防汚塗料を塗装したものも、比較のために試験した。防汚塗装を施さないものはすべて、全面にフジツボ・カキ・セルプラ・ホヤなどが、浸漬6カ月以内で付着している。これは繁殖しやすい水域と、浸漬時期が7月で、これら生物の繁殖時期と合致したためと思う。

写真-1 天然海水1年浸漬

- 6': コールタールエポキシ塗料+防汚塗料
7: コールタールエポキシ塗料



3% 塩化ナトリウム水溶液年浸漬

- 4, 5: コールタールエナメル (5は特殊プライマー使用)
6: コールタールエポキシ塗料
7: ポリエチレン

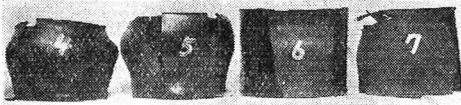
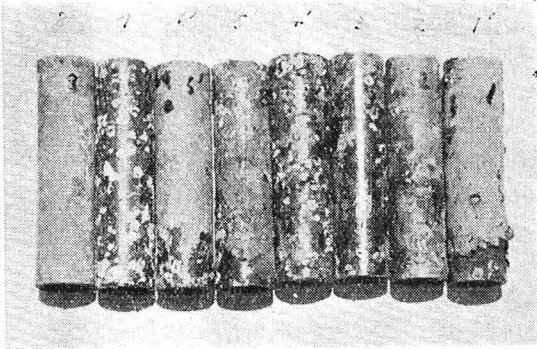


写真-2

- 1': ブロンアスファルト+防汚塗料
2: アスファルトエナメル
3: アスファルトエナメル
(ただし特殊プライマー使用)
4': コールタールエナメル+防汚塗料
5: コールタールエナメル
6': コールタールエポキシ塗料+防汚塗料
7: ポリエチレン
8: 防汚塗料



しかし、コールタールエポキシ塗料とポリエチレンを被覆したものは、膜中に付着生物が浸入することができず、生物除去後は、石灰質のものが白い斑点状にのこっただけで、変化はなかった。一部を写真-2に示す。防汚塗料を使用したものでは、コールタールエポキシ塗料の場合、1年浸漬で有効であったが、アスファルトコールタールの場合、相互の付着力不良か、瀝青質のやわらかい膜によるものか、劣化が認められ、かなり、生物が付着した。

以上、天然海水、3% 塩化ナトリウム水溶液に浸漬して、防食材料の付着性、吸水性、表面状況を試験したが、天然海水では、汚損生物の付着がいちじるしく、この影響が大きくて実験室における試験と、関連性はえられなかった。たとえばコールタールエナメルは縦圧試験で、最もよい成績を示したが、天然海水に浸漬したも

のは、生物が塗膜中に侵入して破壊し、鋼面は全面腐食していた。これに反しコールタールエポキシ塗料は、縦圧試験で、浸漬8カ月以後は、100%はく離したが、天然海水に浸漬したものは、1年後汚損生物の害はなく、縦圧試験で悪化は認められない。このように、まったく逆の結果を生じたわけで、海洋生物の付着しやすい水域では、特に防食材料にたいし、生物が大きな役割をなすことがわかる。

本文で行なった防食材料は、海中鋼管構造物で使用されるすべてではなく、コンクリートをふくむ無機質被覆、金属被覆、常に新しい材料の台頭するプラスチック・塗料・テープなど、多種多様であるが、ここでは有機被覆の一部について行なった結果であり、この実験で最もよかったものが、ほかの防食材料より、すぐれている結論はでないわけである。1~2の参考資料についてみると、NACE レポート¹³⁾では、ビニル、ビニルマスチック、エポキシ系、マリンペイント、コールタール、コールタールエマルジョン、塩化ゴム、ネオプレン、亜鉛系無機質塗料、金属被覆、テープなどについて規定しており、また、実際のパイルについて防食材料の試験を行なっている、アメリカ海軍の報告¹⁴⁾によると、アルミニウムをふくむビニル、ビニルマスチック、ネオプレンサラン、クェノールマスチック、コールタール、アスファルト、亜鉛溶射の8種類を選定してテストし、30カ月の試験結果から、ビニルマスチック、サランを推薦している。劣化状況は、パイルを地中部、海中下半部、海中上半部、スブラッシュ部において観察し、海中下半部の海水+砂混相による摩耗作用が、最も苛酷であったと述べている。スブラッシュ部の防食では、鋼杭をモネルなどの耐食金属で包み、コールタールエポキシ塗料を塗装し、陰極防食を行なうU.S. Pat¹⁵⁾などがある。このように、防食材料の選定には、数多くの要因があり、また市販の耐海水防食材料も多く、どの防食材料、防食方法を採用するかということは、海岸構造物にとって、非常に大切なことである。著者らは現在、さらに広範囲の防食材料について、実験室試験および、鋼管パイルを用いた、実地試験を続行中で、これらの結果については、今後報告していく予定である。

4. 結 言

裸鋼管および、防食鋼管の海水試験を、3% 塩化ナトリウム水溶液と天然海水に浸漬し、1年後の鋼管の腐食度ならびに、防食材料の比較を行なった。

鋼管の腐食は、低炭素鋼の場合、3% 塩化ナトリウム水溶液では、0.04~0.06 mm/年、天然海水では0.20~0.28 mm/年であり、ステンレス鋼の場合、前者は、ほとんど腐食されなかったが、後者は0.08 mm/年であった。天然海水の方が、4~5倍の腐食率を示している。

防食鋼管は、2・3の防食材料について、吸水性、付着性、表面状況に重点をおいて検討した。吸水性では、コールタールエナメル（加熱型）は、水道水中の浸漬となり、3%塩化ナトリウム水溶液では、重量減少を示した。付着性では、実験室で縦圧試験を行なった所、コールタールエナメルが最もすぐれていたが、天然海水に浸漬した場合は、汚損生物の付着により、実験室の3%塩化ナトリウム水溶液に浸漬した場合の逆になり、コールタールエポキシ塗料が、よい結果であった。表面状況では、1年間の浸漬で、防汚塗料の効果が一部認められた。

参 考 文 献

- 1) Erben, A.R.: Cathodic polarization of steel in sea water, *Corrosion*, 17, 5, 1961.
- 2) Horton, C.H.: Steel pile marine corrosion and cathodic protection, *Proc. Am. Soc. Civil Engrs*, 87, WW3, 1961.
- 3) Mogan, H.E.: Cathodic protection for marine installation, *Dock & Harbour Authority*, 42, 494, 1961.
- 4) Peterson, M.H.: Principles and criteria for cathodic protect of steel in sea water corrosion, 15, 9, 1959.
- 5) 電食防止研究委員会：塗覆装小委員会 主査 重野 隼太：埋設鋼管塗覆装特集，配管と装置 1, 1, 1961.
- 6) 花田政明他：港湾施設の腐食とその対策，金属防蝕技術便覧。
- 7) Larrabee, C.P.: Steel has low corrosion rate during long sea water exposure, *Material Protection*, 1, 12, 1962.
- 8) LaQue, F.L.: Theoretical studies and laboratory techniques in sea water corrosion testing evaluation, *Corrosion*, 13, 5, 1957.
- 9) May, T.P., Alexander, A.L.: Spray testing with natural and synthetic sea water, Part. 1, *Proc. Am. Soc. Testing Mat.* 50, 1131, 1950.
- 10) Fair, W.F.: Properties, specifications, tests and recommendations for coal tar coatings, Part 1, *Corrosion*, 12, 11, 1956.
- 11) 平山照邦：コールタールエポキシ塗料，防錆管理，6, 3, 1962.
- 12) 青木敬雄・島田実：コールタールエナメルの吸水性もろさおよび付着性について，色材協会誌，33, 10 1960.
- 13) NACE Report: Suggested painting specification for marine environment, *Corrosion*, 13, 3, 1957.
- 14) U.S. Naval Civil Engineering Laboratory Report: Protective coatings for steel piling, Results of 30 month tests, 八幡鋼管研究部資料
- 15) Marsh, G.A. Schaschl. E: U.S. Pat. 3,047,478. 7, 31, 1962.