



連携記事

海洋構造物の信頼性を守る鉄ー2

海洋環境における防食

Corrosion Prevention Technology for Marine Environment

JFE スチール (株) スチール研究所
主任研究員

村瀬正次

Masatsugu Murase

新日本製鐵 (株) 君津技術研究部
主任研究員

吉崎信樹

Nobuki Yoshizaki

住友金属工業 (株)
総合技術研究所 主任研究員

上村隆之

Takayuki Kamimura

1 はじめに

日本は海洋に囲まれた国であり、海との関わりも深い。そのため日本では早くから海洋を利用することで発展してきた。例えば日本には、約1000の港湾が整備されており、約3000の漁港を有していることに加えて、海岸線の長い国土ゆえその護岸総延長も数千キロに及んでいる。これらの諸施設は、おおまかにコンクリート構造物あるいは鋼構造物によって整備されている。日本では、諸外国に比較して、これら諸インフラに対する鋼構造物の割合は大きく、特にけい船護岸の半数は鋼構造物¹⁾である。このような背景には、第二次世界大戦後の急速な経済復興に伴い、これら社会インフラ整備のニーズが急速に高まり、当時生産を増やしていた鉄鋼が均一で質の良い鉄鋼材料を安価で供給できたことや、コンクリート構造物に比較して短期間で施工できること、日本近海の海洋に軟弱地盤が多いことなどが、鋼構造物の採用に有利に働いた。またこれらの諸ニーズに答えるための鉄鋼各社の努力があったことは言うまでもない。更に、国土の狭い日本では海洋に諸施設を作ることが多く、特に関西空港などの海上空港、東京湾横断道路に代表される海上橋、海洋での資源採取に利用されるリグやプラットフォームなど様々な海洋鋼構造物が建造されている。

防食技術はこれらの背景とともに、1960年代より着実に発展して現在に至っている。1960年代～70年代にかけては電気防食法やタールエポキシ樹脂塗料などによる塗装による防食が開発され導入されたが、腐食代(腐食する量をあらかじめ見込み、部材の板厚などを厚くしておく方法)による設計が主流を占めていた。耐海水鋼が技術導入され使用されたのもこの年代である。耐海水鋼は当時盛んに使用されたが、干満部直下の集中腐食の防止が困難であることや、予想したほどの効果が得られなかったことから今日では殆ど海洋鋼構造

物に採用されていない。また港湾鋼構造物では、1999年より腐食代による防食設計は除外²⁾されている。1980年代では、ペトロラタム被覆工法やセメントモルタル被覆工法、ポリエチレンやポリウレタンのライニング工法、塗装では、水中硬化形エポキシ樹脂塗料や重防食塗装系が開発され、今の防食法の原型ができ上がった。インフラに使用されることが多いこれら防食法の効果を実海洋環境で実証するべく、1980年代に官・民による共同研究が多くスタートした。例えば、(独法)土木研究所(当時:建設省 土木研究所)が中心となり、駿河湾沖の海洋総合研究施設での「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」や、(独法)港湾空港技術研究所(当時:運輸省 港湾技術研究所)が中心となり茨城県波崎観測棧橋での「鋼管杭の防食法に関する研究」がいずれも1980年代半ばに始まり、現在でも暴露試験が継続^{3,4)}されている。当初から暴露試験に供している防食法については、これらの実海域での実証は20年を超えている。1990年代以降では、建設設備の大型化や長寿命化が求められるようになり、より耐久性を有すると考えられる耐食性金属被覆による防食が実用化された。例えば東京湾横断道路に採用されたチタンクラッド被覆による防食や、羽田空港再拡張工事に採用された、耐海水性ステンレス鋼被覆がその代表である。これらは従来の有機層による防食よりは物理的損傷に強く、防食層自身が海洋環境で比較的安定であることから、今後LCC (Life Cycle Cost) による施設設計思想の本分野への普及によりその採用は今後も増加することが考えられる。このように、様々な防食法が開発されその検証が行われてきたが、今後はより高耐久でかつ安価なものが求められるとともに、長期間の供用を想定した、保守・点検のやりやすさ、補修の容易性などの観点からも優れた防食法が開発されていくものと考えられる。

以上、我が国での海洋の利用とその防食の歴史を極簡単に紹介したが、現在の主要な防食法はその歴史の中で鍛えら

れた技術である。これら防食は、海洋における鋼構造物の安全を担っているが、殆ど人目につかない縁の下の力持ちである。以下、代表的な防食法を紹介するが、海に行かれた際には思い出していただければ幸いである。

2 海洋環境における腐食

海洋環境における鉛直方向における典型的な腐食プロファイルの模式図を図1に示す。腐食区分としては、部位別に(1)海上大気部、(2)飛沫部(帯)、(3)干満部(帯)、(4)海中部、(5)海土中部の5つに区分される。海上大気部は、海からの飛来塩分の影響を受け陸上大気部よりも腐食速度は大きく、0.01～0.1mm/y程度である。飛沫部は海水のスプラッシュを直接受け、乾湿繰り返しを受ける場合もあり、酸素の供給も多いので最も腐食が激しい領域で平均腐食速度は0.3～0.5mm/yである。干満部は、海水の干満に合わせ乾湿が繰り返されるが、後述する干満部直下の海中部とのマクロセル形成により腐食が抑制される傾向にある。海中部は、溶存酸素、流速などの影響を受けるが平均腐食速度は0.1～0.2mm/y程度である。海土中部は、陸上の土中部に比べてその腐食速度は大きい傾向にあり0.02mm/y程度である。図2には、駿河湾沖の海洋総合研究施設で20年にわたり経時的に採取された各部位の腐食速度の経年変化^{3,5)}を示す。経年的に腐食減量が減じているのは、鋼上の腐食生成物の影響を受けるためである。海洋環境の腐食で留意する点のひとつに、干満部直下の集中腐食が挙げられる。干満部は、海面直上で濡れている部分の水膜が薄くなると酸素の供給が海中部に比較して大きくなり、干満帯と直下の海中部で酸素濃淡電池を形成し、これにより干満部直下の海中部が激しく腐食する。その腐食速度は、0.3mm/y以上になる場合があり激しい腐食となる。最近では、干満部だけではなく海中部とのマクロセルの関与⁶⁾も

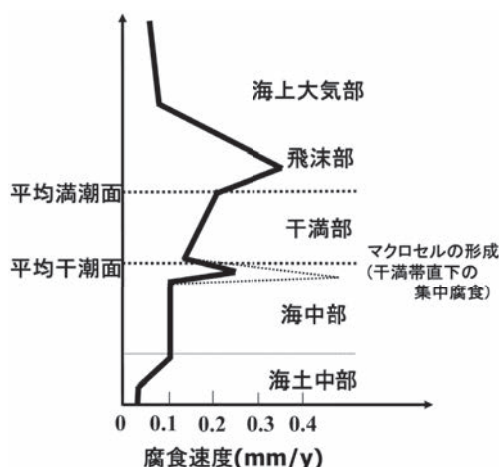


図1 海洋環境における鉛直方向の腐食傾向

報告されている。対処法としては電気防食法や被覆防食法がある。もう一つは、海中部の海底面近傍で、激しい流速による漂砂があると、鋼材表面に形成された腐食生成物層が漂砂で削られ腐食速度が大きくなる場合がある。中性近傍の水中での腐食は、酸素拡散が支配するが、形成される腐食生成物は酸素拡散障壁として働いている。これを失うことで、酸素の供給量（もちろん流速も高いので、それも加わり）が増加し、腐食速度が増加する。腐食速度が、海中部の2倍以上になる例⁷⁾もある。対処法としては電気防食法が有効⁷⁾である。更に海洋環境では、激しい波浪や漂流物による衝突による物理的損傷に対しても注意することが必要である。特に有機系の防食被覆の場合には、流木などの衝突によっても傷を生じやすい。塗装による防食も1960年代のタールエポキシ樹脂塗料の膜厚0.6～1mm程度から、最近の超厚膜形エポキシ樹脂ライニングやポリエチレン、ポリウレタンライニングのような2mm以上の厚膜の防食層に変遷してきている。特に金属被覆は有機系に比較して10倍以上の耐衝撃性を有しており、この点でも優れている。表1には、これら海洋で使用される被覆防食法について代表的なものを示す。

今では、干満部直下の集中腐食も考慮にいれ、港湾鋼構造物では、図3に示す鉛直方向の防食の組み合わせを基本⁸⁾としている。塗装・被覆の部分は、塗装、ライニング、金属被覆などの防食が該当する。これらは、環境に応じて別種を組み合わせても良く、例えば腐食の激しい飛沫・干満部は金属被

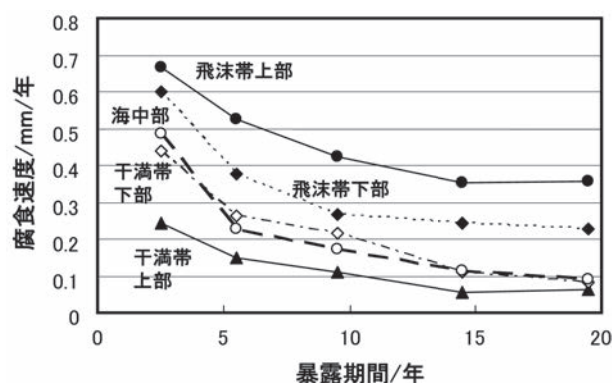


図2 炭素鋼の腐食速度の経年変化³⁾

表1 海洋で使用する代表的な防食法

防食法	被覆材料	被覆厚さ (μm)	防食性能 [※] (防食寿命)	施工性	イニシャル コスト [※]
塗装	厚膜型無機ジンク+エポキシ系	75+480	△	工場	◎
	有機ジンク+ガラスフレー入り塗料	20+800	△	工場	◎
有機ライニング (1000 μm 以上)	ポリエチレン(重防食)	2000～	○	工場	◎
	ポリウレタン(重防食)	2000～	○	工場	◎
	超厚膜形エポキシ樹脂被覆	2000～	○	工場	○
	水中硬化形エポキシ樹脂	5000～	△	現地	○
金属被覆	チタンクラー	2.0mm	◎	工場	△
	耐海水性ステンレス鋼	0.4mm～	◎	工場	△

※)防食性能、イニシャルコスト:◎:優、○:良、△:可

覆で施工し、海上大気部は塗装でも良い。防食被覆を海中部に適用し、電気防食と併用した図3の中央の例は、電気防食（海洋鋼構造物では流電陽極法が一般的に使用される）の電極損耗量を押さえるとともに、防食被覆層に欠陥を生じた場合でも防食が可能になるという利点がある。以下、3章では代表的な防食方法について述べる。

3 海洋で使用される主な防食方法

3.1 有機被覆鋼材および塗装

海洋では、飛沫、干満、海中では各々の環境が異なるため、腐食だけでなく、有機被覆に要求される特性も異なってくる。海洋鋼構造物の腐食や塗装防食鋼材の劣化を実海洋として駿河湾沖の海洋技術総合研究施設を利用して、20年間の長期に渡って調査³⁾が行われている。その中で、一般塗装の例として、無機ジンクリッチ ($75\mu\text{m}$) およびタールエポキシ ($600\mu\text{m}$) を塗装したL形鋼材での劣化挙動から、海洋構造物で必要となる特性を見てみる。まず、図4に塗膜のさび面積率の変化³⁾を示すが、さび面積比は干満部>海中部>飛沫部の順となる。これは、図1に示すように鋼材の腐食速度が飛沫部>干満部>海中部の順とは異なり、干満部>海中部>飛沫部の順に被覆の劣化が生じやすい。その理由は、L鋼の山

谷では山部の損傷が大きいことから、漂流物等による物理的な損傷が起点となった可能性が考えられた。このように海洋では塗膜強度が低い一般塗装では、干満部を中心に損傷が増加するため、耐衝撃性を有する厚膜被覆が必要となる。従って、 $1000\mu\text{m}$ 以上の膜厚みを有する有機ライニングによる防食が主流になってきつつある。また、塗膜厚みについては飛沫部、干満部では20年間で $200\sim 230\mu\text{m}$ 減少しており、紫外線の影響が考えられる。以上の結果から推察される一般塗装の劣化機構を図5に示す。

上記の劣化に対し、長期耐久性を有する被覆として、耐候性、高い耐衝撃性等を兼ね備えた防食方法として、鉄鋼メーカーからはポリエチレンあるいはウレタンを 2mm 以上厚膜被覆した重防食被覆製品が製造されている（図6）。その主な対応品種は、鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板である（図7）。また、鋼

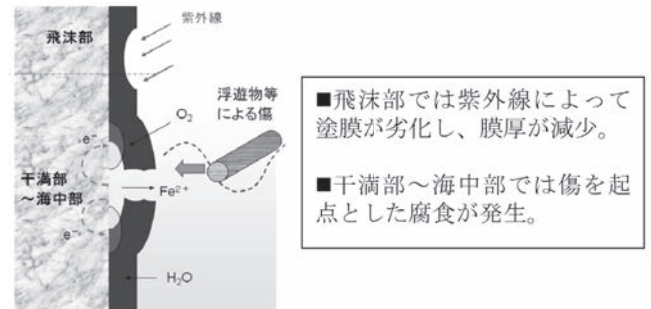


図5 一般塗装防食鋼材の劣化機構

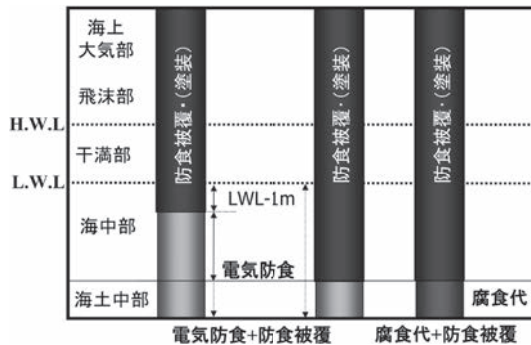


図3 港湾構造物に適用される被覆防食範囲

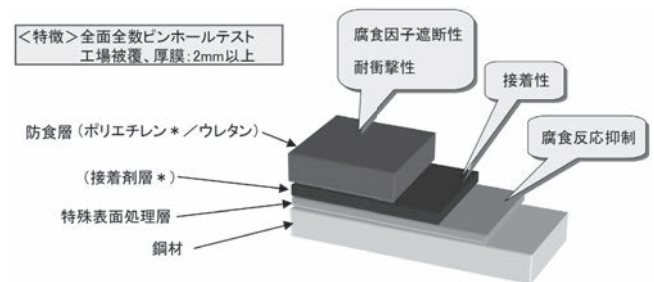


図6 有機被覆重防食鋼材の被覆層構成例

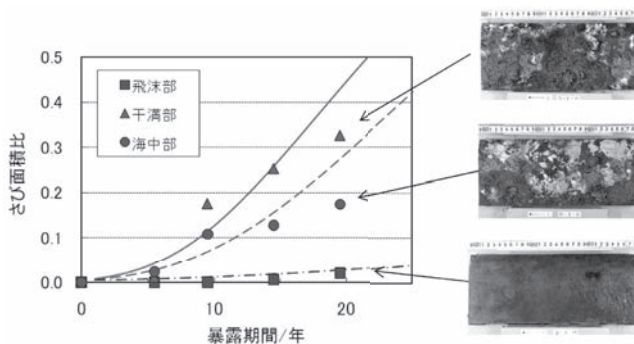


図4 塗膜のさび面積率（山側平均値）の経年変化³⁾
（タールエポキシ樹脂塗料： $600\mu\text{m}$ ）

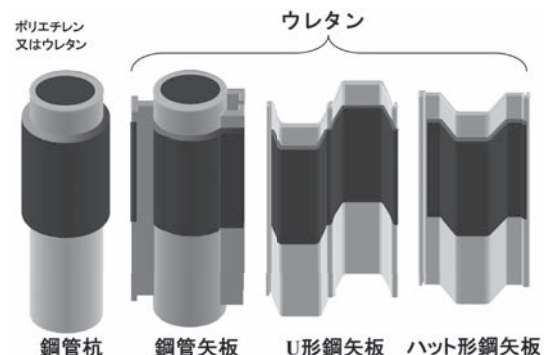


図7 有機重防食被覆が行われる鋼材

矢板は従来、U形のみに対応であったが、現在は研究開発により広幅のハット形鋼矢板にも対応が行われ、促進試験で耐久性が確認されている⁹⁾。

有機被覆を行う場合、鋼材の表面状態が重要となるが、重防食被覆の場合には工場で製造した鋼材をそのまま使用するため、積層錆びや塩分等の付着問題が少ない。有機被覆を行う方法としては、事前にプラスト処理にて表面錆びを除去するとともに表面に粗度を付与する。その後、特殊表面処理(プライマー塗装等)を行い、接着層とポリエチレン防食層を溶融押し出し被覆、あるいはウレタン防食層を塗装被覆する。ポリエチレンは押出被覆のため、鋼管杭のみで、残りは形状への追従性の良い塗装被覆が可能なウレタンが被覆⁹⁾として用いられる。

これらの重防食では2mm以上の厚膜被覆を管理された状態で実施することから、現地塗装では得られない高い品質安定性を確保しているとともに、ポリエチレン、ウレタンは耐衝撃性、耐久性に優れており、一般塗装に比較して傷がつきにくい特性を有する。また耐候性について、サンシャインウエザオメーターでのポリエチレン被覆についての長期試験結果^{10,11)}を図8、9に示す。いずれも、カーボンブラックを添加

することで、樹脂を劣化させる紫外線が殆ど吸収され、本来発生する物性変化が防止される。このため、紫外線劣化が問題となる飛沫帯についても問題なく使用することができる。また、前述の一般塗装と同じく、駿河湾沖の海洋技術総合研究施設でも重防食被覆の18年間の暴露が実施されている¹²⁾。暴露後の外観は海中～飛沫部まで傷などなく良好で、波浪の激しい環境でも長期に渡って良好な耐衝撃性を示した。また、防食の健全性の指標として飛沫部の交流インピーダンス変化¹²⁾を図10に示す。殆ど変化は見られず、長期間の海洋暴露後でも初期の交流抵抗値を維持し、高い防食性を維持していると考えられる。このように、一般塗装に比較して、鉄鋼メーカーで製造されるポリエチレンまたはウレタンを使用した重防食被覆鋼材は、高い品質安定性と耐久性が得られる優れた製品である。図11には、ポリエチレン被覆鋼管杭の港湾における実際の施工例を示す。

3.2 金属被覆鋼材

上述の従来の有機層による防食よりも、高耐食性金属材料を用いた被覆は物理的損傷に強く、また腐食反応に関与する水、酸素を完全に遮蔽することができるため、施設の期待寿命

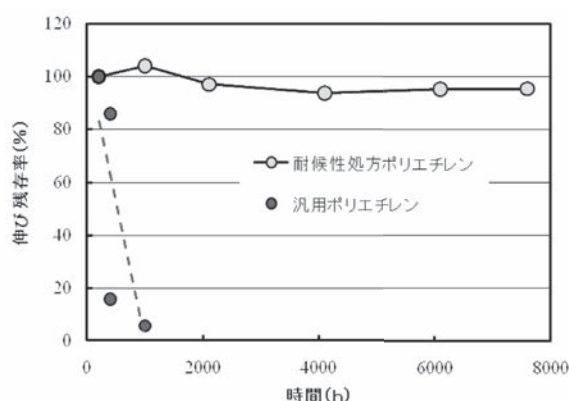


図8 サンシャインウエザオメーターによるポリエチレン層の耐候性試験結果¹⁰⁾

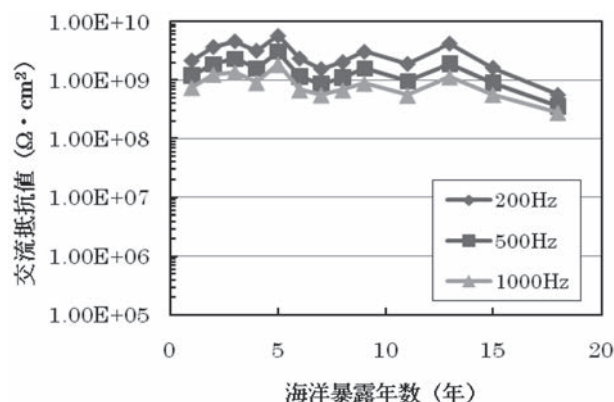


図10 ポリウレタン被覆鋼材の交流抵抗値の暴露時経年変化¹²⁾

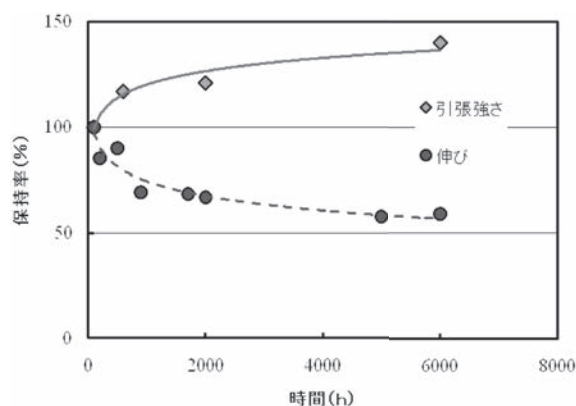


図9 サンシャインウエザオメーターによるポリエチレン層の機械的特性の経時変化¹¹⁾ (初期値を100%として相対値で示す)



図11 ポリエチレン被覆鋼管杭の施工例

内でのメンテナンスのミニマム化、および維持管理に要する
トータルコスト低減が期待される。一方、金属被覆の場合は、
被覆自体の腐食が寿命を決めるため、長期にわたる海洋暴露
試験が実施された。ここでは汎用ステンレス鋼を比較材とし
て、Cr、Moをはじめとする耐食性を向上させる元素を増量あ
るいは追加添加した高耐食性ステンレス鋼（オーステナイト
系、フェライト系、二相系）^{3,13)}ならびにチタンの耐食性³⁾に関
して、飛沫部、干満部、海中部にわたる腐食環境において検討
した約20年の長期暴露試験の結果について紹介する。

暴露試験は、3.1節と同様「海洋技術総合研究施設」にお
いて行った¹⁴⁾。代表的な試験材の金属被覆の化学成分を表2
に示す。試験材の形状はいずれも管状で、普通鋼を素管とし
てステンレス鋼板防食材を被覆したもの、もしくは防食材金
属をそのまま素管としたものである。試験材の一部には、予
め人工的にすき間を付与して、いわゆるすき間腐食発生の有
無とその程度を調査した。すき間付与の位置は、飛沫部では
平均満潮位（H.W.L）直上、干満部ではその中央部、海中部で
は平均干潮位（L.W.L）直下の合計3ヶ所とし、すき間付与の方
法としては、粘着材付きポリエチレン収縮チューブを加熱収
縮させた。また、電気防食試験として、汎用ステンレス鋼であ
るSUS304ならびにSUS316L鋼を用いて－500mV（vs. SCE）
および－770mV（vs. SCE）の電位に設定した。これらを所定
の期間暴露後、外観観察、すき間付与部観察、ディプスゲージ
を用いた孔食深さ測定等を詳細に実施した。

304鋼および316L鋼の汎用ステンレス鋼は2年間の暴露試
験でも1mmを越える局部腐食が干満部・海中部に多数発生
することが確認された。外観を図12に示す。人工すき間以外
の部位においても大型海生生物（フジツボ、イガイなど）が付
着し、その下ですき間腐食が認められた。なお304鋼には飛
沫部において軽微な孔食が認められた。局部腐食深さの深い
方から5個選び、その平均値を局部腐食深さとして時間変化
をプロット¹⁵⁾して図13に示す。SUS316L鋼ではほぼ1/2乗

に比例して局部深さが深くなることがわかった。

ステンレス鋼の耐食性向上元素であるCr、Mo等の添加量
が高くなるほど耐海水性が改善される傾向が認められた。10
年および20年暴露材の結果についてCr+3Mo+10N量¹⁶⁾
で整理した結果を図14に示す。Cr+3Mo+10N量が38
（mass%）以上となれば、鋼種によらず海水環境下での最大腐
食深さが著しく低下し、局部腐食（孔食・すき間腐食）が生じ
ないことがわかった。

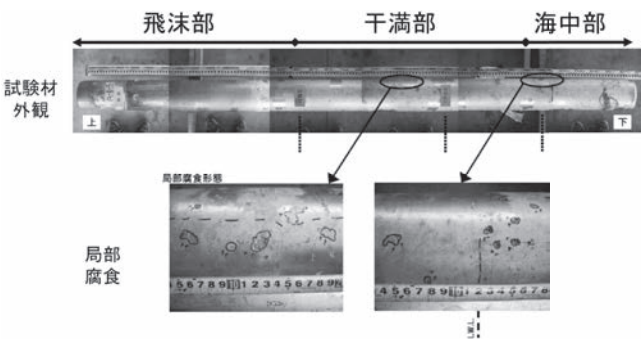


図12 汎用ステンレス鋼（SUS316L）の暴露試験結果例（20年）³⁾

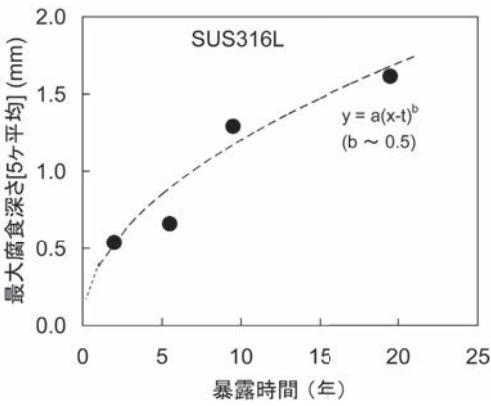


図13 SUS316L鋼の局部腐食深さの経時変化^{3,13)}

表2 主なステンレス鋼、チタン試験材の化学成分^{3,13)}

	被覆材料	化学成分 (mass%)									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	その他
ステンレス鋼板溶接	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	0.014	0.69	1.17	0.030	0.001	17.05	12.42	2.09		
ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.	0.04	0.70	1.17	0.033	0.003	21.41	25.97	4.70		Ti:0.41
ステンレス鋼板溶接	25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	0.012	0.47	0.64	0.012	0.009	24.37	49.08	5.74	0.99	Ti:1.25
ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	0.0031	0.09	0.09	0.004	0.002	25.50	0.26	3.97	0.01	Al:0.13, Nb:0.15, N:0.0057
ステンレス鋼板溶接	30Cr-2Mo	0.003	0.13	0.11	0.018	0.004	29.58	0.14	2.15		
素管(二相ステンレス)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	0.019	0.35	0.87	0.030	0.003	24.90	7.15	3.20	0.5	N: 0.139
素管(二相ステンレス)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.	0.012	0.49	1.04	0.015	0.001	25.00	7.09	3.04		N: 0.11
素管(二相ステンレス)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	0.017	0.43	1.83	0.023	0.001	21.24	5.39	2.86	0.04	
素管(二相ステンレス)	25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N	0.012	0.43	0.54	0.018	0.0004	25.30	6.75	3.28	0.05	N: 0.275
チタンクラッド	純チタン	0.12O-0.04Fe-0.01N-0.0004H-残部 Ti									
チタンクラッド	チタン合金	Ti-6Al-4V, Ti-3Al-2.5Sn, Ti-0.5Pd									

チタンに関しても、生物付着下や人工すきま部にも腐食の発生が認められず、一般部にも腐食が認められず、海洋環境での高い耐食性が確認された。なおチタンの場合にはカソード防食を用いる場合、チタンが水素吸収しない電位で電気防食することが必要となる。

ステンレス鋼ならびにTiの海洋における20年の暴露結果をまとめて表3に示す。海洋鋼構造物の防食技術として高耐食性ステンレス鋼およびチタンによる被覆は長期の耐久性に優れることが確認され、既に実用化され、その効果を発揮している。

4 おわりに

本稿では、海洋環境における腐食環境、有機系防食法、金属被覆系防食について、最新の知見を紹介した。これら防食法は、過去数十年の数多い実海域での評価から得られた知見を元に、改良・改善が加えられたものであり現在日本の海洋鋼構造物の防食として広く利用されている。これら防食法について、20年以上の長期にわたり観察と実証が続けられた例は世界的に見ても貴重な結果であり、海洋防食技術として諸外国に誇ることができる優れた技術である。今後ますます海洋・海底資源利用や太陽光発電・風力発電に伴う海洋利用などが活発になるものと考えられる。海洋環境は、鋼構造物に

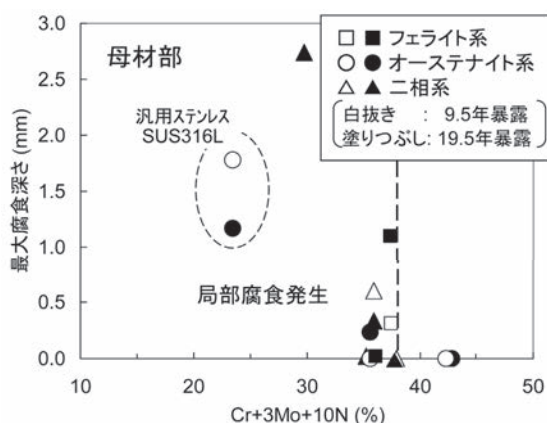


図14 各種ステンレス鋼の耐海水性に及ぼす合金成分の影響^{3,13)}

表3 ステンレス鋼、チタン暴露試験結果まとめ^{3,13)}

	ステンレス鋼	チタン
	SUS304 鋼、SUS316L 鋼 またはこれらと同等の耐食性を有するステンレス鋼	Ti (≥99.8 mass%) TP35C (現: TP340C)
飛沫部	局所腐食発生有り	腐食発生無し
干満部	電気防食の併用で局所腐食発生無し	
海中部	局所腐食発生無し	

としては厳しい腐食環境には変わらないので、これら防食技術や防食鋼材は、海洋開発の重要な技術であり今後も様々な防食法が提案されるものと考えられる。今後も本分野の技術開発、長期間の実証結果、などに注目していきたい。

参考文献

- 1) 鋼管杭の防食法に関する研究グループ：海洋鋼構造物の防食技術，技報堂出版，(2010)
- 2) 港湾の技術上の基準・同解説，(1999)
- 3) 海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書－海洋暴露20年の総括報告書－，(社)日本鉄鋼連盟，(独法) 土木研究所，(2006)
- 4) 鋼管杭の防食法に関する研究20年の長期暴露試験総括報告書，(独) 港湾空港技術研究所他，(2006)
- 5) 吉崎信樹，守屋進：土木学会論文集F，66 (2009) 2，222-229.
- 6) 松岡和巳，山本正弘，五戸清美：材料と環境，56 (2007)，99-105.
- 7) 阿部正美，福手勤，清水一夫，山本郁雄：第42回腐食防食討論会，C-203 (1995)
- 8) 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル 再々改訂版，(財) 沿岸開発技術研究センター編，(2009)
- 9) 審良善和，山路徹，小林浩之，原田典佳，吉崎信樹，村瀬正次，斎藤勲，上村隆之，北村卓也：第31回防錆防食技術発表大会講演予稿集，(2011)，209.
- 10) 田中満生，白石基雄：ポリエチレン被覆重防食鋼管杭，防錆管理，83-10，312.
- 11) 高松輝男，石田雅己，鈴木和幸，新藤芳雄，大槻富有彦，田中満生：製鉄研究，(1984) 316，85.
- 12) 海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究 新規暴露試験記録 (2008年度報告書)，日本鉄鋼連盟，(2009.3)
- 13) 守屋進，上村隆之，幸英昭：土木学会第62回年次学術講演会講演予稿集，(2007)，5-514.
- 14) 守屋進，大澤隆英，渡辺健児，中野正，永井昌憲，多記徹，金井浩一：重防食塗装系の駿河湾海上暴露20年の結果，土木学会論文集E，62 (2006) 4，790-797.
- 15) 守屋進，松岡和巳，松橋亮，華英昭，平井陽一，南孝男：第49回材料と環境討論会講演集，(2002)，127.
- 16) 腐食防食データハンドブック，腐食防食協会編，(1995)，542.

(2011年10月31日受付)