潮間帯での電気防食鋼材面の付着生物の着生

桑 守彦*・山本郁雄*・千葉丈夫*

戸村寿一*・野村和徳**

(平成 3 年 11 月 12 日受理)

Attaching of Marine Organisms on Cathodically Protected Mild Steel Surface in Intertidal Zone

Morihiko KUWA, Ikuo YAMAMOTO, Takeo CHIBA, Jyuichi TOMURA

Corrosion Engineering Research Laboratory, Nakagawa Corrosion Protecting Co., Ltd. 417-16 Naka-arai, Ageo, Saitama 362

and

Kazunori NOMURA

Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Kohnan, Minato, Tokyo 108

(Received November 12, 1991)

Marine organisms attaching on test pieces of mild steel surface cathodically protected, the control steel plate, and FRP plate which were exposed in a intertidal zone of 0.00~+1.40 m in water level during the duration of 476 days were studied.

The amount of attaching organisms and the numbers of species were the most on the cathodically protected specimens, next being FRP and then the control steel plate. The results showed that organisms attached and multiplied even on the mild steel surface in the intertidal zone by providing cathodic protection. The action of covering protection on the mild steel surface by attaching of organisms would be maintained by applying a protective current. The highest effect of covering protection and most abundant of attaching organisms was observed in the water level of 0.00~+0.60 m.

電気防食した鋼材面では、海洋付着生物の着生が増大し、繁殖効果が助長され (MOSS, 1981; EASHWAR and LYER, 1987; 桑・野村, 1988), 付着生物量を電氣的にモニタリングできることも確認されている (桑ら, 1990)。また、電気防食されている金属面の電解被膜析出効果の魚礁技術 (熊田ら, 1986; 古賀, 1988; 熊田, 1990) やサンゴ移植法への応用技術 (大西・工藤, 1989) なども開発されつつある。これらの技術は、魚礁技術のみならず最近研究の進みつつある付着生物による海水浄化策 (大槻, 1982; 片倉ら, 1989, 1990) をはじめ、ウォーターフロント構想での海洋生態系の創生や復元技術 (堀江, 1988a, 1988b; 長尾, 1990), 例えば、鋼矢板で囲まれた埋立地周縁などの海洋環境保全策への応用も大いに期待

される。

一方、潮間帯の鋼材面に電気防食する場合には、防食電流は浸水時しか通電されないが、付着生物の着生による被覆作用と浸水時の電気防食による相乗防食効果と防食電流通電時の付着生物着生促進などが期待される。

そこで、潮間帯での鋼材面の電気防食効果と付着生物着生効果の関係を知るために、自然環境での鋼材面の電気防食とその対照、および海洋鋼構造物の代表的な被覆防食材料として使用されている FRP 板 (今喜多, 1978; 今喜多・梨子, 1979) の付着生物着生効果を比較した。

材 料 と 方 法

1. 実験内容

実験は Table 1 に示す内容で、沼津市西浦木負地先の海産養魚場内の実験栈橋で、1988 年 7 月 1 日から翌年の 10 月 19 日までの 476 日間に亘って行なった。

* 株式会社ナカボーテック技術開発研究所
(旧社名: 中川防蝕工業株式会社)

** 東京水産大学

Table 1. Contents of experiment

1. Experimental duration and location
476 days, July 1, 1988~ Oct. 19, 1989, Nisura-kisho, Numazu, Sizuoka
2. Test piece
2-1 Steel plate: cold-finished mild steel plate, JIS G-3101, SS-400, size=2.3 ^l ×100 ^w ×220 ^t (mm)
2-2 FRP: fiber reinforced unsaturated polyester resin plate with blue color, size=1.0 ^l ×100 ^w ×220 ^t (mm)
3. Specifications of cathodic protection
3-1 Initial protective current density: $d=100$ mA/m ²
3-2 Kind of anode: aluminum alloy anode (ALAP S-19, Amount of output current; $Q=2600$ Ah/kg)
3-3 Anode size: $(a+b) \times c \times L = (40+60) \times 60 \times 1000$ (mm)
3-3 Anode weight and density: 7.56 kg (without steel core), 2.70 g/cm ³
3-4 Designated difference in potential between anode and cathode: $E=0.25$ V
3-5 Resistance formulae: Anode; $R_a(\Omega) = \rho(2.3 \log 4L/D - 1)/2\pi L$ Cathode; $R_c(\Omega) = 0.266\rho/\sqrt{S_c}$ Protective current adjustment; $R_r(\Omega) = E/dS_c - (R_a + R_c)$ Remarks; $\rho = 25 \Omega\text{-cm}$, $D(\text{cm}) = (a+b+2c)/\pi$ S_c = Effective surface area of cathode (440 cm ²)
4. Arranged water level of test piece in intertidal zone: 0.00, +0.15, +0.30, +0.45, +0.60, +0.80, +0.95, +1.10, +1.25 and +1.40 m

試験片は、電気防食とその対照片として酸化被膜を除去した軟鋼片、FRP 片としてはポリエステル樹脂製を用い、これらを電気防食区、対照区、FRP 区との 3 実験区とし、Fig. 1 に示すとおり、各実験区別に試験片を塩化ビニールパイプ製の枠にナイロンロープで垂直に固定した。

各試験片の潮間帯での配置は、最下段のものを沼津市内浦の潮位表基準面（気象庁，1989）を水位 0.00 m とし、それより上に向かって +0.15, +0.30, +0.45, +0.60, +0.80, +0.95, +1.10, +1.25 および +1.40 m の 10 水位に各試験片の中心が位置するように配置した。また、電気防食区の軟鋼試験片の配置は、Table 1 に併記した設計仕様で初期設計防食電流密度を日本港湾協会（1979）

Fig. 1. Arrangement of test piece in intertidal zone (mm). Cathodic protection: bonded to aluminum alloy anode and each water level pieces with resistance for current adjustment. Control of cathodic protection: bonded to all level pieces.

の電気防食設計基準の 100 mA/m² とし、浸水時に各試験片面に防食電流を均一通電するために試験片どうしは導通せず、各水深の試験片それぞれを防食電流調整抵抗器を介してアルミニウム合金陽極に導通した。これに対し対照区は、水深間の電位差腐食を観察するために、各水位の試験片すべてをビニール被覆電線で導通させた。また、これら軟鋼試験片の電線接続部分は、海水中に露出しないようにエポキシ樹脂で被覆した。

2. 付着生物の観察

試験片浸漬後、476 日目の実験終了時に付着生物量と生物の種類を調査した。付着生物量は試験片を実験桟橋から引上げ 30 分後に湿重量を秤量し、単位面積当たり (kg/m²) に換算した。また、付着生物は 5% ホルマリン溶液に固定してから同定した。

3. 電位、侵食度と防食率の測定

電位は、測定時に水没している電気防食区と対照区の試験片 (対 SCE) について測定した。また、軟鋼試験片の腐食度と侵食度ならびに防食率は次式 (中川, 1972) から求めた。測定前の試験片は、付着生物を除去して水洗し、耐酸インヒビター 0.5% 混入の 15% HCl 水溶液に 5 分間浸漬してから水洗して後、さらに、発錆防止のため 20% NaOH 水溶液に浸漬後アセトンによる脱水、乾燥の操作を経て秤量した。

$$\text{腐食度 (g/m}^2\text{/hr)} = WT/St \quad (1)$$

$$\text{侵食度 (mm/yr)} = WT \times 10^{-3}/dSt \quad (2)$$

$$\text{防食率 (\%)} = \{(C-P)/C\} \times 100 \quad (3)$$

ここで W : 重量減 (g), S : 試験片表面積 (m^2), t : 試験時間 (h), T : 腐食度を求めるとき 1 hr, 侵食度を求めるとき 24×365 hr, d : 試験片の比重 ($\text{Fe} = 7.86 \text{ g/cm}^3$), C : 対照片の腐食度, P : 防食片の腐食度である。

結果と考察

1. 付着生物量、種類と着生状態

電気防食区、対照区と FRP 区の各水位での付着生物量を Fig. 2 に示す。付着生物量は、+0.80 m 以浅では、電気防食区がやや多く、また、各実験区とも深部に向かって微増がみられるものの、各試験区間の差は少ない。しかし +0.80 m 以深では、電気防食区は +0.30 m まで急増し、それ以後は減少している。対照区と FRP 区では +0.30 m まで増加し、+0.15 m で減少し、0.00 m で増加している。また、0.80 m 以深の付着生物量においては、電気防食区が最も多く、FRP 区、対照区の順に減少し、0.00 m 以深での実験結果 (桑ら, 1990) とほぼ同じ傾向が観察された。

生物種類については、各試験片の水位別の主な着生種と個体数の多少にもとづく着生状況を Table 2 に示した。各実験区とも優占群はフジツボ類で、付着生物量の大半を占めたのは、フジツボ類、マガキとムラサキガイの 3 種類であった。また、各試験片の代表的な着生状態を Fig. 3 に示した。各実験区の着生傾向として、+0.60 m 以浅ではフジツボ類が大半を占め、+0.60 m 以深では、最初に着生したフジツボ類の殻上に、それを覆うようにマガキが着生し、マガキの殻面にフジツボ類とムラサキガイが着生した 3 層からなり、他海域での潮間帯の観察結果に見られる付着生物の層状分布 (古瀬・風呂田, 1985) が観察された。

各付着生物の着生状態は、各実験区でのフジツボ類の大半はタテジマフジツボで、アカフジツボとオオアカフ

Fig. 2. Wet weight of attaching organisms of cathodic protection, control of cathodic protection and FRP in intertidal zone. ●—●: cathodic protection, ○—○: control, □—□: FRP.

ジツボは、+0.95 m 以深ではタテジマフジツボ着生面に散見される程度で、+1.10 m 以浅ではアカフジツボの着生はみられなかった。

フジツボ類の着生量は、FRP 区で最も多く、対照区が最も少なく、電気防食区ではそのほぼ中間であったが、電気防食区では +0.60 ~ +0.80 m に多く、FRP 区では +0.45 m 以深に集中していた。さらに、マガキ殻上に着生したフジツボ類は、翌年に着生したものとみなされ、小坂・石橋 (1980) の調査結果同様、前年に着生したいわゆる前年群とその翌年に着生したいわゆる翌年群の間には個体の大きさに差異がみられた。また、前年群の表面には、翌年群との共存は殆ど観察されなかったが、前年群は、対照区では殆ど死滅し殻だけ残存し、殻は赤錆に着色されていた。電気防食区と FRP 区では、マガキ着生面下の前年群の生存数は多かったが、マガキ着生のなかった水位では、浅所に向う程死滅数が多く、とくに電気防食区の +1.10 m 以浅では、対照区同様大半が死滅していた。

これら試験片の違いでフジツボ類の着生量や生存数が異なった理由として、試験片浸漬直後に対照区では腐食が進行し、電気防食区では、浅所での浸水機会が少なく、

Table 2. Attaching condition*¹ of the principal organisms in intertidal zone of 0.00~+1.40 m in water level after 476 days exposed.

Species	Test piece* ²	Water level (m)									
		0.00	0.15	0.30	0.45	0.60	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40
<i>Haliclona permollis</i> ムラサキカイメン	P	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr			
	C	rr	rr	rr	rr	rr					
	F	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr		
<i>Hydroides</i> spp. カンザシゴカイ類	P	rr	rr	rr	rr		rr				
	C			rr	rr	rr	rr	rr			
	F	rr				rr	rr	rr			
<i>Mytilus gallo-provincialis</i> ムラサキイガイ	P	+	+	+	+	rr	rr	rr	rr	rr	rr
	C	+	rr	rr	rr	rr	r	+	rr	rr	rr
	F	c	c	c	c	c	+	+	+	rr	rr
<i>Crassostrea gigas</i> マガキ	P	cc	cc	cc	c	+	r	r			
	C	c	+	r	rr	rr	rr	rr			
	F	r	r	r	rr	rr	rr				
<i>Megabalanus rosa</i> アカフジツボ	P	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr			
	C	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr			
	F	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr			
<i>M. volcano</i> オオアカフジツボ	P	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr
	C	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr
	F	rr	rr	rr	rr	rr	rr	rr			
<i>Balanus amphitrite</i> タテジマフジツボ	P	rr	rr	r	+	cc	cc	+	r	r	r
	C	rr	rr	r	r	r	rr	rr	r	r	r
	F	cc	cc	cc	cc	c	c	c	+	+	+
<i>Botryllus</i> spp. イタボヤ類	P				rr	rr					
	C					rr	rr	rr			
	F						rr				
<i>Styela plicata</i> シロボヤ	P				rr						
	C							rr			
	F	rr	rr								
<i>Styela clava</i> エボヤ	P										
	C										
	F								rr		

*¹ cc: most numerous attaching, c: numerous attaching, +: medium between c and r, r: slightly attaching, rr: most slightly attaching

*² P: cathodic protection, C: control of cathodic protection, F: FRP

防食電流の通電がないので対照区に準じた腐食の進行したことが影響していると思われる。また、FRP区では腐食の影響はないが、潮間帯より下層の水面下での実験結果(桑ら, 1990)と同様に、浸漬後1か月間位はその表面の撥水性により生物の着生が抑制されるため、その抑制期間経過後にフジツボ類が急激に着生したと思われる。

マガキは、各実験区とも+1.10 m以浅での着生はみられなかったが、着生量は、電気防食区が最も多く、次

いでFRP区、対照区の順であった。水深別では、+0.30 m以深の電気防食区の付着生物量が大半を占め、FRP区では0.00 mでやや多く、その他の水深では、対照区と殆ど同じであった。また、全実験区で、前年着生した大型個体の殻上に翌年着生した小型個体がみられた。

ムラサキイガイは、全実験区とも各水深にみられ、すべてフジツボ類やマガキの殻上に着生していたが、着生量は、FRP区が最も多く、次いで、電気防食区、対照区の順であった。

Fig. 3. Typical attaching condition of marine organisms to mild steel plate of cathodic protection (P), its control steel plate (C), and FRP plate (F), in intertidal zone after 476 days exposed. Figures shows the water level in meter and scale unit are 10 mm per division.

カンザシゴカイは、各実験区とも、フジツボ類の殻上に僅かに着生していた。シロボヤ、エボヤ、イタボヤとムラサキカイメンは、それぞれマガキやフジツボ類の殻上に広く着生し、それらの各実験区別着生量の差異は殆どみられなかった。

一方、476 日の実験期間の全実験区で、フサコケムシ、ヒメフサコケムシ、シロボヤ、イソギンチャク類、ヒドロ虫類、アオサ類などの着脱も随時観察された。これらは、各優占種群の殻上に主に着生し、それぞれ 0.00 m に近い程着生量は多かったが、それらの試験片間の実験区別の着生量の差異は殆ど認められなかった。

3. 腐食・防食効果と付着生物着生量との関係

電気防食区と対照区での水位別の侵食度と電気防食区の防食率の変化を Fig. 4 に示す。電気防食区の侵食度は、+1.40~+0.95 m までは、対照区に比べやや少なく、同時に対照区と平行して深さ方向に、付着生物量の増加と反対に減少している。また、+0.95 m 以深においても、水深方向に對し付着生物量の増加にほぼ平行しながら徐々に減少し +0.60 m 以深では殆ど腐食は見られなかった。また、+0.60 m 以深での電気防食率は 90% 以上を示し防食状態は良好で、それら水位の生物除去後

Fig. 4. Corrosion rate of cathodic protection and control with cathodic protection rate in intertidal zone. ●—●: cathodic protection, ○—○: control, □—□: protection rate.

の試験片にはフジツボ類が固着し、その着生面下にも発錆はみられなかった。このことは、潮間帯でも浸水時には防食電流が通電されるが、水位が高くなるほど浸水時間が短く通電量が減少して防食効果も減少する(内堀, 1965) ことによると思われる。

海洋鋼構造物で、カキやフジツボ類などの石灰質を分泌する生物着生面下やその周縁では、局部腐食が発生し (REDFIELD and HUTCHINS, 1952; GRIFFIN *et al*, 1989), 一方、フジツボ類や管棲多毛類などの着生面下の鉄面の腐食抑制作用も報告されている (SOUTHWELL *et al*, 1979; FORTEATH *et al*, 1984; RUIMU *et al*, 1984, 1987), +0.60 m 以深でのフジツボ類着生量の多かった電気防食区は、その被覆防食との相乗効果を発揮していたことがうかがえる。また、Fig. 5 の電位変化に見られるように、電気防食区の浸水面は常に防食電位より卑電位を維持し、防食効果を発揮していたことを示している。

一方、対照区の侵食度は、+1.40~+0.95 m では付着生物量の増加による減少がみられるが、それ以深では生物着生量は少なく、侵食度にもバラツキがみられた。す

Fig. 5. Potential changes of cathodic protection and control. P: protective potential, ●—●: cathodic protection, ○—○: control, □---□: water level where the potential was measured.

なわち、その値は $+0.60$ m にかけて増加し、 $+0.60$ m では Fig. 3 の試験区の腐食状況に示すように最大値を示し、それ以深で再び減少し $+0.45$ m 以深では殆ど同じ値を示している。

対照区の付着生物の被覆による防食効果は、フジツボ類の着生面下に僅かにみられたが、その効果は電気防食区に比べて劣り、付着面周縁での腐食は激しく、鍍層に埋没して死滅しているフジツボ類が全水位の試験片で観察され、また、付着生物は腐食生成物とともに容易に剝離できた。このことは、生物付着面と無付着面間の電位差と Fig. 5 の電位変化に示されるとおり、防食電流の通電が無いので、浸水時でも電位が腐食電位に維持されていたためと思われる。

以上の観察結果から、潮間帯でも電気防食した鋼材面は、その対照鋼材面や FRP 面に比べ海洋付着生物の着生や繁殖が促されること、潮間帯での付着生物の着生による鋼材面の被覆防食作用は、防食電流の通電によって維持され、その効果の発揮される潮間帯の水位は、付着生物量の多い $0.00 \sim +0.60$ m で、それ以浅では、付着生物量と浸水時間の減少によって徐々に防食効果が減少することが認められた。

謝 辞

本研究を行なうにあたって、実験場所を提供され御協力された沼津市西浦木負の金指正典氏に深謝申し上げるとともに、本研究の機会を与えられた株式会社ナカボーテック常務取締役 善一 章博士に記して感謝の意を表します。

文 献

- EASHWER M. and S. V. K. LYER (1987). Marine fouling and its relation to corrosion and cathodic protection. Proceedings of pacific corrosion '87 in Melbourne. Volume II, session 21, Mohan Primlani for Oxford & IBH Publishing Co, Ltd., New Delhi, 1-5.
- FORTEATH G. N. R., G. B. P. PICKEN and R. RALPH (1984). Corrosion and marine growth on offshore structures. Ellis Horwood Ltd., Chichester, 17-22.
- 古瀬浩史・風呂田利夫 (1985). 東京湾奥部における潮間帯付着動物の分布生態. 付着生物研究, 2(1), 9-14.
- GRIFFIN R. B., L. R. CORWELL, W. SEITZ and E. ESTES (1989). Localized corrosion under biofouling. *Materials Performance*, 28(3), 71-74.
- 堀江 毅 (1988a). 東京湾の沿岸開発と海域環境, 水際線の形状と湾内水質について. '88 日本沿岸会議研究討論会講演概要集, No. 1, 3-4.
- 堀江 毅 (1988b). ウォーターフロント開発での土木技術. 土木学会誌, 73, 47-49.
- 今喜多美方 (1978). 既設海洋鋼構造物スブラッシュゾーンの被覆防食工法. 中川防蝕技報, 14, 24-34.
- 今喜多美方・梨子国男 (1979). 海洋鋼構造物飛沫帯・干満帯の被覆防食. 防錆管理, 23(9), 12-18.
- 片倉徳夫・金子文夫・福永純治. (1989). 付着生物による海水浄化に関する研究. 大成建設技術研究所報, (22), 21-26.
- 片倉徳夫・福永純治・和田直巳・金子文夫 (1990). 生物付着多孔質担体を用いた海水浄化に関する研究. 大成建設技術研究所報, (23), 15-20.
- 気象庁 (1987). 昭和 63 年度潮位表. 気象庁, 東京.
- 古賀哲郎 (1988). 電着技術 (コーラルプロセス) の紹介. 配管技術, (392), 151-157.
- 小坂昌也・石橋 公 (1980). 清水港岸壁上でのタテジマフジツボの成熟, 成長, 死亡の付着層間の比較. 付着生物研究, 2(1), 9-14.
- 熊田 誠・藤岡 稔・宮崎芳明・佐々木晴敏 (1986). コーラルプロセスによる藻場の造成. 水産土木, 22(2) 19-23.
- 熊田 誠. (1990). 海中鉱物の電解被覆. 電気化学, 58, 410-415.
- 桑 守彦・野村和徳 (1988). 鋼材面の防食電流密度

- と付着生物着生との関係, 日本水産学会誌, **54**(3), 359-364.
- 桑 守彦・山本郁雄・戸村寿一・野村和徳 (1990). 電気防食した鋼材面の水深別付着生物の着生について, 日本水産学会誌, **56**(3), 417-423.
- Moss B. L. (1981). Marine algae fouling offshore structures in the north sea. Proceedings of society for underwater technology conference. Session I & II, Society for Underwater Technology. London, 1-5.
- 中川雅央 (1972). 電気防食法の実際, 地人書館, 東京, 92-96.
- 長尾義三 (1990). ミチゲーションとは環境創造の工学へ, 海建, (35), 10-12.
- 日本港湾協会 (1988). 港湾の施設の技術上の基準・同解説. 第3編, 材料, 日本港湾協会, 東京, 9-12.
- 大西 毅・工藤君明 (1989). 電着によるサンゴ移植技術の調査研究, 海洋科学技術センター試験研究報告, (21), 99-108.
- 大槻 忠 (1982). 生物体を用いた水・底質の浄化(リビングフィルター), 港湾技術要報, **21**, 21-26.
- REDFIELD A. C. and L. W. HUTCHINS (1952). Marine Fouling and Its Prevention, (ed. Wood Hole Oceanographic Institution), United States Naval Institute, Anapolis, 3-20.
- Ruimu L., L. DEKAI, H. XUEBAO, and Z. JIANCHENG (1984). The effects of macro-fouling organisms on steel corrosion and its electrochemical behavior. Marine Biology, Proceedings of 6th international congress on marine corrosion and fouling, International Technical University of Athens, Athens, 443-451.
- RUIMU L., L. DEKAI, H. XUEBAO and Z. JIANCHENG (1987). The effects of different marine fouling organisms on corrosion of steels and the steady-state corrosion rate of steels. Proceedings of 4th Asian-Pacific corrosion control conference in Tokyo, Chiyoda Printing Co., Ltd., Tokyo, 539-547.
- SOUTHWELL C. R., J. D. BULTMAN, and C. W. HUMMER, Jr. (1979). Seawater corrosion handbook, (ed. M. SCHUMACHER) Noys Data Co., Park Ridge, New Jersey, 374-387.
- 内堀利也 (1965). 潮の干満帯での鋼材に対する電気防食効果, 防食技術, **14**, 261-265.