電気防食鋼材面の付着生物の経時変化

桑 守彦*・山本郁雄*・戸村寿一*・野村和徳**

(平成 10 年 6 月 11 日受理)

Successive Change in the Marine Attaching Organisms on Cathodically Protected Mild Steel Surface

Morihiko KUWA, Ikuo YAMAMOTO, Jyuichi TOMURA

*Corrosion Engineering Research Laboratory, Nakabohtec Corrosion Protecting Co., Ltd.
417-16 Nakaarai, Ageo, Saitama 362-0052*

and

Kazunori NOMURA

Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Kohnan, Minato, Tokyo 108-0075

(Received Jun 11, 1998)

The successive process of the marine attaching organisms on the test plates of cathodically protected mild steel using aluminum alloy anode method, of the control mild steel and FRP plate were observed at 3 meters depth for 650 days at Nishiura-kishoh, Suruga Bay, Sizuoka, Japan. In both the amount and kind of attaching organisms, the cathodically protected mild steel surface changed the most, next FRP little less, and the control of cathodic protection steel the least. Besides in particular, it was confirmed that cathodically protected mild steel surface could be kept to attach the dominance species of attaching organisms onto the surface with corrosion protection.

電気防食されている鋼材面は付着生物が着生し易く、生物種も多彩で (EASHWAR *et al.*, 1990; 桑ら, 1990), 付着生物量は防食電流密度の違いによって変化する (桑・野村, 1988)。また潮間帯では電気防食された鋼材面は、付着生物の被覆による相乗防食作用も確認されている (桑ら, 1992)。本研究では、電気防食された海洋鋼構造物表面におけるこれら付着生物着生効果を海洋環境保全策に応用する上で、長期間電気防食した鋼材面の付着生物の種類と着生量の経時変化を調査し、併せて FRP 面と比較した。

材料と方法

実験は駿河湾沼津市西浦木負地先の海産養魚場の試験筏において、夏季の 1988 年 8 月 6 日から春季の 1990 年 5 月 18 日までの 650 日間に亘って行った。試験片に關

し、電気防食した電防片とその対照の不通電片として、形状 (厚み×幅×長さ)= $2.3 \times 100 \times 220$ (mm) で表面積のみがき軟鋼片 (SS-400, JIS G-3101) を用いた。また FRP 片は、形状 $3.0 \times 100 \times 220$ (mm) の青色の不飽和ポリエステル樹脂製を使用した。

電防片の防食電流密度は、港湾鋼構造物の電気防食設計基準 (日本港湾協会, 1979) の初期防食電流密度の 100 mA/m^2 に設定し、アルミニウム合金陽極 (ALAP, 2600 Ah/kg) に電流調整用の抵抗器を介して電防片に導通させた。また電防片と不通電片には電位計測用のビニール被覆電線を結線し、電位 (対 SCE) を測定して腐食防食状態を確認した。

電防片、不通電片および FRP 片は、試験筏から各々 33 枚水面下 3 m 層に 5 mm^2 のビニロンロープで吊り下げ、試験終了までの 650 日間、それぞれ 3 枚を 11 回に亘って約 1 ヶ月から 3 ヶ月の間隔で回収し、これら試験片への付着生物量と生物種の経時変化を観察した。試験片回収時には、試験片に付着した生物を除去しながら生物の

* 株式会社ナカボーテック技術開発研究所

** 東京水産大学

Key words: 電気防食, 鋼材面, FRP, 付着生物

種類を同定した。さらに、回収 30 分後の付着生物の湿重量を秤量し、電防片、不通電片および FRP 片それぞれ 3 枚の平均値を単位面積あたりの付着湿重量 (kg/m^2) に換算した。

結 果

電防片と不通電片の腐食防食状態に関し、電防片は実験終了迄の 650 日間、鉄の防食電位 (中川, 1972) の -770 mV (SCE) より卑電位を維持し防食されたことが、また不通電片は防食電位より貴電位を示したことから、実験期間中腐食が進行したことが確認できた。

電防片、不通電片および FRP 片に対する付着生物湿重量の経時変化を実験場所の表層水温とともに Fig. 1 に示す。また主な付着生物の種類を Table 1 に、ならびに各試験片それぞれ 3 枚のうちの代表的な付着生物の着生状態として、浸漬 235 日後および実験終了時の 650 日後の状態を Fig. 2 に示す。

付着生物量は 650 日後まで、電防片および FRP 片への付着生物量は不通電片よりも常に多かった。また電防片と FRP 片には、生物量の差のある時期もあったが、両者は実験終了時にはほとんど同じであった。

浸漬時の 1988 年 8 月初旬から同年 12 月初旬の 124 日間は、各試験片の生物量は僅差であった。また 124 日目までの生物種は、各試験片とも大部分カサネカンザシゴカイ *Hydroides elegans* であった。

しかし 124 日目頃 (1988 年 12 月初旬) より、電防片と FRP 片では、カサネカンザシゴカイの上に主としてシロボヤ *Styela plicata* が付着した。しかし不通電片では、シロボヤは少なく、またカサネカンザシゴカイが赤錆とともに基盤から脱落する傾向にあった。

193 日後 (1989 年 2 月中旬) には、各試験片の生物量の差は拡大し、電防片と FRP 片に対し不通電片は最も少なく、生物種は、電防片と FRP 片はほとんど同じで、不通電片ではやや少なかった。

235 日目 (1989 年 3 月下旬) になると、電防片と FRP 片の生物量はほとんど同じであったが、生物種は電防片は最も勝り 13 種、FRP 片では 6 種で、電防片にはカイメン類やコケムシ類、ホヤ類などがカサネカンザシゴカイの上に付着した。また FRP 片の主なる付着種はシロボヤであった。対照片では 124 日目以降、生物種は少なく、47 日目に着生が確認されたフジツボ類は、赤錆に埋もれ死滅しているのもみられ、カサネカンザシゴカイを

Fig. 1. Change in the wet weight of attaching organisms.

(●—●: Cathodic protection, ○---○: Control of cathodic protection, □---□: FRP, △—△: Water temperature).

Table 1. Attaching process of the principle organisms observed during from Sep. 23, 1988 to May 18, 1990.

Sampling date	9/22/'88	11/2/'88	12/8/'88	2/15/'89	3/29/'89	5/24/'89	8/11/'89	10/19/'89	1/12/'90	2/23/'90	3/18/'90
Exposed days	47	88	124	193	235	291	370	439	524	566	650
Test plate*1	P C F	P C F	P C F	P C F	P C F	P C F	P C F	P C F	P C F	P C F	P C F
Algae 藻類	Frequency*2										
アオサ種類	rr				rr rr	rr	rr rr		rr rr	rr C	rr
ウシケノリ類					rr rr						
クロイソカイメン				rr		+					
ダイダイイソカイメン					C						
ゼラカイメン		rr		rr rr	C						
ムラサキカイメン			rr rr	rr rr	C	+	rr	rr	rr	rr	C
その他の尋常海綿類			rr rr	rr rr	rr	C	+	rr	rr	rr	rr
キセルガヤ		rr		rr			rr				
その他のイソギンチャク類	rr	rr		rr	rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr
フサコケムシ	rr r		rr rr	rr rr		rr rr rr					rr rr
ヒメフサコケムシ			rr rr		rr rr rr	rr rr rr	rr				
チゴケムシ	rr		rr rr	rr		C rr rr					rr
カサネカンザシゴカイ	CC C	+	CC CC	+	C	+	rr	rr rr rr	rr rr	rr rr	rr
ムラサキイガイ						+	rr rr C	+	CC CC C CC CC C	+	C
マガキ										rr	rr
フジツボ類	rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr	rr rr rr
シロボヤ		rr rr	C CC	+	C CC	+	rr rr		rr rr rr	rr rr	rr rr
エボヤ				rr		rr rr rr rr	rr rr rr rr				
ベニボヤ			rr		rr rr	rr rr rr rr	rr rr rr rr				
クロボヤ				rr rr		rr rr rr rr	rr rr rr rr				
イタボヤ			rr								
シロウスボヤ	rr			rr		rr	+	rr			rr rr

*1. P=Cathodic protection, C=Control of cathodic protection, F=FRP. *2. Frequency; CC: very common, C: common, +: present, r: rare, rr: very rare.

Fig. 2. Typical attaching condition of marine organisms on test plate.

1. Upper: 235 days after exposed, 2. Bottom: 650 days after exposed.

P=Cathodically protected mild steel plate, C=The control steel plate, F=FRP made of unsaturated polyester resin with blue collar.

Plate size: Mild steel=1.6'×100"×220' (mm), SS-400, JIS G-3101

FRP=3.0'×100"×220' (mm).

はじめ、その上に着生したシロボヤなども赤錆とともに剥離脱落しつつあった (Fig. 2—上段)。

370日目 (1989年8月中旬)には、各試験片とも、これまで着生していたカサネカンザシゴカイやカイメン類などが剥離し、235日目 (1989年3月下旬)に着生が確認されたムラサキガイ *Mytilus galloprovincialis* のその後の成長がみられ、生物量において、電防片とFRP片は約 90 kg/m²、不通電片は 55 kg/m² で、実験期間中それぞれ最大値を示した。このときの各試験片の生物種は電

防片が最も多く、FRP片と不通電片はその半数であったが、電防片はシロボヤが、またFRP片はムラサキガイが多く、不通電片では、ムラサキガイが互いに付着し合って赤錆面を覆っていた。

439日目 (1989年10月中旬)は、各試験片の生物量は著しく減少し、とくに不通電片は極端に減少した。このとき、電防片とFRP片のムラサキガイはさらに成長していたが、ホヤ類は剥離していた。不通電片では、赤錆とともに大半の生物種は剥離し、僅かに着生していた

ムラサキイガイの成長が観察された。実験終了時の650日後(1990年3月中旬)の生物量は電防片とFRP片はほとんど同じであったが、不通電片はこれらよりも約40 kg/m² 少なかった。電防片はそれまで着生していたムラサキイガイの大半が剥離し、新たに着生したマガキ *Crasostrea gigas* 上にカイメン類やホヤ類などが着生し、生物の種類数も多彩で、同一種の偏在はなかった。しかしFRP片では、生物種数は電防片とほとんど同じであったが、生物量の大半を占めたのはムラサキイガイであった。不通電片では、439日目(1989年10月中旬)以降、赤錆面にムラサキイガイが残存していたが、赤錆面の広がりが大きく、新たな付着生物種はほとんどみられなかった(Fig. 2-下段)。

考 察

付着生物量の経時変化において、実験開始から124日後までは、各試験片の生物量の大きな違いはなかった。これは、とくに浸漬当初の不通電片では赤錆発生量が少なく、付着生物が着生し易い基盤面が維持されていたためと思われる。また、フジツボ類が鉄面に付着して、その付着面下が防食されている観察結果が報告されているが(MARUTHAMUTHU *et al.*, 1993)、本実験の不通電片では、実験終了までフジツボ類の着生量は少なく、このような固着動物の被覆による防食現象はみられなかった。一方、不通電片は電防片やFRP片に比べ生物量は極端に少なかったが、鋼材面の腐食進行中の付着生物の付着抑制は、自然腐食で生成された赤錆面(臼井ら, 1998)や電解法で生成した赤錆面(斉藤ら, 1996)などで確認され、また、腐食生成物によるフジツボ類の剥離や成長阻止も報告されている(SASIKUMAR *et al.*, 1991)が、不通電片すなわち無防食の鋼材面の付着生物量が少ない原因は、腐食生成物の赤錆とともに付着生物が剥離する現象に加え、赤錆面は軟弱なので、泥や粘土面に付着生物がほとんど着生しないように、生物の着生盤にならないものと思われる。

対して、電防片およびFRP片の付着生物量は多く、生物種も多彩であった。しかし、電防片はFRP片に比べ生物量の少ない時期もあったが、生物種においては、全実験期間を通じ相対的に電防片はFRP片に対し多かった。またFRP片では、ムラサキイガイの偏在がみられたのに対し、電防片では各生物種の均等な着生傾向がみられた。

すなわち、付着生物の着生を促す基盤面に最初に形成される Bacterial film, Biofilm, Mmicrobial film あるいは

Primary film ともいう“生物被膜”にはバクテリアも付着する(WAHL, 1989; ZOBELL *et al.*, 1935)が、電気防食した鉄面は、腐食鉄面に比べ付着生物とともにバクテリア数が多いことが報告されている(EASHWAR and IYER, 1986)。また電気防食した金属面には、炭酸カルシウムなどの電解被膜が析出して防食効果を発揮し(福沢, 1983)、同時に付着生物の着生を促す生物被膜が形成される(DEXTER and LIN, 1991; LITTLE and WAGNER, 1993)。これらの研究報告から、電気防食した鋼材面は、不通電片やFRP片に比べ、浸漬直後から生物が着生し易い基盤条件を満たし、付着生物量や種類も多く、防食電流が通電しているかぎり、優占する生物種は交替しつつも付着生物群集が維持されるものと考えられる。

要 約

650日間電気防食した鋼材面、その対照鋼面およびFRP片の海洋付着生物の経時変化を観察した。付着生物量は電気防食面とFRP片はほとんど同じで、対照鋼片が最も少なかったが、電気防食面は単一種の偏在もなく生物種類は最も多く、電気防食は鋼材面の腐食を防止するのと同時に、防食面に優占する付着生物の着生を保持することが確認された。

謝 辞

本稿を終わるにあたり、実験場所を提供されご協力いただいた沼津市西浦木負の金正典氏に謹んで深謝申し上げます。またFig. 1の水温に関しては、静岡県栽培漁業センターの観測資料を挿入させていただきました。資料を提供された同センター所長大滝高明氏ならびに関係諸氏に深謝申し上げます。併せて、当研究の機会を与えられた株式会社ナカボーテック取締役技術開発研究所長中出和彦氏をはじめ同社諸兄に記して感謝の意を表します。

文 献

- DEXTER S. C. and S. H. LIN (1991). Effect of marine bacteria on calcareous deposition. *Mater. Perform.*, 30, 16-21.
- EASHWAR M., G. SUBRAMANLAN and P. CHANDRASEKARAN (1990). Marine fouling and corrosion studies in the coastal waters of Mandapam, India. *Bull. Electrochem.*, 6(8), 699-702.
- EASHWAR M. and S. V. IYER (1986). Microfouling on cathodic protected mild steel in sea water. *Bull. Electrochem.*, 2(4), 341-343.
- 福沢秀刀(1983). 電気防食におけるエレクトロコーティングの効果. 防錆管理, 27, 301-310.

- 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の関係. 日本水産学会誌, **54**, 359-368.
- 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**, 417-423.
- 桑 守彦・山本郁雄・千葉丈夫・戸村寿一・野村和徳 (1992). 潮間帯での電気防食鋼材面の付着生物の着生. 付着生物研究, **9**, 1-7.
- LITTLE B. J. and P. A. WAGNER (1993). Interrelationship between marine biofouling and cathodic protection. *Mater. Perform.*, **32**, 16-20.
- MARUTHAMUTHU S., M. ESHWAR, S. T. MANICKAM, S. AMBALNKTACHARI and K. BALAKRISHNAN (1993). Corrosion and biofouling in Tuticorn harbor. *Corr. Prev. & Cont.*, **40**, 6-10.
- 中川雅央 (1972). 電気防食法の実際. 地人書館, 東京, pp. 20-21.
- 日本港湾協会 (1979). 港湾の技術上の基準・同解説, 第3編, 材料. 日本港湾協会, 東京, 33 pp.
- 斉藤清美・桑 守彦・北村俊雄・安藤啓二 (1996). 鋼電極の溶解による海生生物の付着防止. 火力原子力発電, **47**, 814-822.
- SASIKUMAR N., K. V. K. NAIR and J. AZARIAH (1991). Some observations on barnacle growth and corrosion of materials in seawater. *Corr. Prev. & Cont.*, **38**, 145-150.
- 臼井英智・仲谷伸人・大庭忠彦・桑 守彦 (1998). 鋼材面の付着生物と腐食量の関係. *SEVILLE ORGANISMS*, **14**(2), 19-24.
- WAHL M. (1989). Marine epibiosis I. Fouling and antifouling, some basic aspect. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **58**, 175-189.
- ZOBEL C. E. and E. C. ALLEN (1935). The significance of marine bacteria in the fouling of submerged surfaces. *J. Bacteriol.*, **29**, 239-215.