電気防食した鋼材面の水深別付着生物の着生について^{*1}

桑 守彦, 山本郁雄, 戸村寿一, 野村和徳

(1989 年 5 月 1 日受付)

Attaching of Marine Organisms on Cathodically Protected Mild Steel Surface in Differences Water Depth

Morihiro Kuwa,^{*2} Ikuo Yamamoto,^{*2} Jyuichi Tomura,^{*2}
and Kazunori Nomura^{*3}

The amount of marine organisms attached to mild steel plate cathodically protected by aluminum alloy anode, its control steel plate, and FRP (fiber reinforced plastic) plate which were immersed in 1-25 m water depth, the largest attaching was found on cathodic protection plate, with the next largest being slightly less on FRP plate and the least on the control plate. On each of the three plates mentioned above, the largest amount of attaching was found at the 3-7 m depth and below the 10 m depth it increased.

With the cathodic protection rate, there were no noticeable changes in varied water depths. However, the corrosion rate was lower at depth of 3-7 m with a higher occurrence of attaching organisms, while the corrosion rate was higher at depth of 25 m. Also on the cathodic protection plate the potentials varied toward less noble, and the protective current density became lower as the amount of marine organisms increased. Simultaneously, less noble potentials and lower current densities were observed. At 1-7 m depth, where more organisms were attached than in 10-25 m depth, less noble potentials in low current densities were observed.

電気防食されている鋼材面には、海洋付着生物が着生し繁殖し易く、^{1,2)} その着生量は、防食電流密度の違いによって左右されることも証明されている。³⁾ このことから、電気防食技術は、金属の腐食を防止するのみならず、その付着生物着生や繁殖効果は、鋼製魚礁などの水産増養殖施設への適用や、金属構造物で囲まれている埋立地や人工島などの沿岸域における海洋環境保全策への適用も期待される。

一方、鋼材面においても、水深別に付着生物の種類や量の異なることが確認されているが、^{4,5)} 鋼材面の付着生物量調査の一手法として、これまで、付着生物の着生した試験片に一時的に直流電流を通電して、その時の試験片の電位、すなわち分極値を測定し、その経時変化が観察されている。⁶⁾ また、付着生物量と電位の関係については、微小藻類の着生量の違いによって分極電位が変化すること、⁷⁾ 金網生簀においては、付着生物量の違いによって金網電位が変化すること、⁸⁾ あるいは、付着生物量の有無や付着量によって鋼材面の電気抵抗の変化すること⁹⁾ などが確認されている。

そこで本報では、鋼材面の付着生物量観察のモニタリング法の開発を主目的とし、電気防食した鋼材面について、水深別の付着生物量と防食電流通電量の関係を調査した。併せて、電気防食とともに、海洋鋼構造物の干満帯や飛沫帯の防食に広く適用されている代表的な被覆防食材料^{10,11)}である FRP 板の付着生物着生効果を知るために、それら試験片による水深別付着生物量の着生について調査し、電気防食試験片と比較した。

材料および方法

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試験筏で、1989 年 7 月から 124 日間に亘って行ったが、Fig. 1 に示すとおり、酸化被膜を除去した板状の軟鋼試験片を、 $\phi 5$ mm のナイロンロープで連結し、さらに、 1.25 mm^2 のビニール被覆電線で導通して、水面下 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 および 25 m の 8 水深に試験筏より垂下し、アルミニウム合金陽極を用い、港湾鋼構造物の電気防食設計基準¹²⁾である初期設計防食電流密度 100 mA/m^2 で電気防食した。ま

^{*1} 本研究の要は平成元年度日本水産学会春季大会（東京）で発表した。

^{*2} 中川防蝕工業株式会社技術開発研究所 (Corrosion Engineering Research Laboratory, Nakagawa Corrosion Protecting Co., Ltd., Nakaarai, Ageo, Saitama 362, Japan).

^{*3} 東京水産大学 (Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

Table 1. Contents of experiment

Duration: 124 days, Aug. 6, 1988~Dec. 8, 1988
Location: Nishiura-kisho, Numazu, Shizuoka
Test piece:
Steel plate; cold-finished mild steel plate, JIS G-3101, SS-41, size=2.3t×100w×220L (mm)
2. FRP; fiber reinforced unsaturated polyester resin plate with blue color, size=2.0t×100w×220L (mm)
Specification of cathodic protection:
Protective current density; 100 mA/m ²
Anode; aluminum alloy anode (ALAP, S-19)
Designated difference in potential between anode and cathode; 0.25 V
Resistance formula of cathode:
$R(\Omega)=0.266\rho/\sqrt{S}$
(S: exposed surface area of cathode (cm ²), $\rho=25\Omega\cdot\text{cm}$)
Suspended water depth of test piece under from water level: 1, 3, 5, 7, 10, 15 and 25 m

$$\text{侵食度 (mm/yr)} = \Delta W \times 8.76 \times 10^4 / (t \times S \times d) \quad (1)$$

$$\text{防食率 (\%)} = [(C - P) / C] \times 100 \quad (2)$$

ここに、 ΔW : 試験片の重量減 (g), t : 試験時間 (h), S : 試験片の表面積 (cm²), d : 試験片の密度, ここでは, $\text{Fe}=7.86 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, P : 防食片の侵食度 (mm/yr), C : 対照片の侵食度 (mm/yr)

結果および考察

付着生物量と種類 電気防食片とその対照片および FRP 片の浸漬 124 日後の水深別付着生物量を Fig. 2 に示す。付着生物量は、各水深とも電気防食片が最も多く、FRP 片はそれよりもやや少なく、対照片が最も少なかった。また、Fig. 3 に示す各試験片の 3 m 層の浸漬 47 日後の付着状態にもみられるとおり、FRP 片の総付着生物量は対照片よりも少なかった。FRP の種類はポリエステルやエポキシ系など多種多様であるが、¹⁶⁾ 本実験に供した FRP は、不飽和ポリエステル樹脂¹⁶⁾である。その浸漬 47 日後迄、当 FRP 片は付着生物の着生を抑制していたが、その後、その効果の消滅した。このことは、当 FRP の樹脂にはワックス類が含有しているので、¹⁶⁾ FRP 板表面でのその撥水性により、付着生物の着生抑制作用がある程度発揮されていたと考えられる。また、FRP 面の付着生物量に関し、同傾向の観察例が報告されている。¹⁷⁾

水深別付着生物量では、その付着例として、各試験片の 124 日後の 3 m 層と 15 m 層の付着状態を Fig. 4 に示したが、各試験片とも、Fig. 2 に示したとおり、3~7 m 層が最も多く、それより深では少なく、25 m 層が最も

Fig. 2. Wet weight of attaching organisms from 1 to 25 m depth for 124 days exposed.

Fig. 3. Attaching condition of marine organisms in 3 m depth for 47 days exposed (left: cathodic protection, center: control of cathodic protection, right: FRP).

少なかった。

また、Fig. 5 には電気防食片の防食率ならびにその対照片の侵食度を示したが、各水深の防食率は、97~99%ではほとんど差はなく、付着生物の種類や量の多少にかかわらず、電気防食効果は発揮されている。しかし、侵食度は、1 m 層で 0.04 mm/yr で最も小さいが水深方向に増加し、20 m 層で最大値約 0.14 mm/yr、25 m 層でも 10 mm/yr 以上を示し、付着生物量の多い浅所ほど侵食度は小さく、少ない深所ほど大きい傾向が観察された。さらに、前回の実験³⁾ 同様、対照片は全水深とも赤錆が発生し、腐食生成物とともに付着生物は剥離し易く、また、生物無着生の赤錆面もみられ、とくに 10 m 以深で

Fig. 4. Attaching condition of marine organisms in 3 and 15 m depth 124 days exposed (top: 3 m depth, bottom: 15 m depth, P=cathodic protection, C=control of cathodic protection, F=FRP, scale: 1 div.=10 mm).

は、深さが増すにつれ、その面積の拡がりは大きかった。腐食鉄面の付着生物量の少ないことは、Effird¹⁸⁾ や Ravindran and Piliani¹⁹⁾ の耐食性金属との比較実験によっても観察されているが、当実験での水深別の侵食度の違いは、深所ほど、付着生物量が少なく、それによる試験片の露出面積、すなわち、腐食面積が多く、それに加え、腐食鉄面の付着生物着生抑制効果が発揮されていたことがうかがえる。

つぎに、付着生物の種類においては、各試験片とも、7 m 以浅と 10 m 以深で、それぞれ付着量や付着種にはほぼ同じ傾向がみられたが、その主なる付着種別付着量の観察結果を Table 2 に示した。種類の最も多いのは電気

防食片、少ないのは対照片で、FRP 片は電気防食片とほぼ同じであった。優占種は、浸漬 47 日後において、各試験片とも水深 10 m まで *Hydroides* spp. であったが、124 日後においては、対照片と FRP 片の 20~25 m 層を除き全て *Styela plicata* で、それぞれ、それらの付着面にその他の付着生物も着生していた。また、*Balanus* spp. は FRP 片で最も多く各水深にみられたが、対照片は極めて少なかった。さらに、FRP 片の付着種類が電気防食片や対照片とやや異なったのは、浸漬直後の FRP 片の特性に基づく選択的着生抑制作用によると思われる。しかし FRP 片は、浸漬期間が長くなれば、付着生物量や種類は電気防食片に近づく傾向もみられた。

Table 2. Attaching condition of main organisms in 1-25 m water depth for 124 days after exposed

Attaching organisms	Attaching condition in water depth*1														
	Cathodic protection					Control of C/P					FRP				
	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 m
<i>Haliclona permollis</i>	D	B	E	E	—	—	E	E	E	—	—	D	D	E	—
<i>Haliplanella luciae</i>	E	E	E	—	—	—	—	—	—	—	—	E	E	E	—
<i>Mytilus edulis</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	E	D	E	—
<i>Hydroides</i> spp.	C	A	B	B	E	E	E	A	A	A	C	E	B	C	C
<i>Balanus</i> spp.*2	E	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	C	C	C
<i>Bugla neritina</i>	C	C	C	D	E	C	D	E	—	—	—	E	C	B	E
<i>Watersipora subovoidea</i>	E	D	D	D	E	E	E	E	—	—	—	D	D	D	—
<i>Botryllus schlosseri</i>	—	—	—	—	E	E	D	E	—	—	—	—	—	—	—
<i>Styela plicata</i>	A	A	A	B	E	E	D	E	—	—	—	C	A	A	A
<i>Herdmania incornuta</i>	E	E	E	E	D	D	E	—	—	—	—	E	E	E	E

*1 A: Most numerous attaching, B: Numerous attaching, C: Medium attaching, D: Slightly attaching, E: Most slightly attaching, —: No attaching.

*2 *Megabalanus rosa* and *B. amphitrite*.

Fig. 5. Cathodic protection rate and corrosion rate from 1 to 25 m depth.

一方、電気防食されている金属面には、 CaCO_3 や Mg(OH)_2 などの電解被膜が析出し、その組成は付着生物の着生にも影響し、²⁰⁾ また、その析出量は防食電流密度によって変化する。²¹⁻²³⁾ このことから、電気防食片における付着種の特異性が期待されたが、当実験の防食電流密度 100 mA/m^2 では、そのような現象はみられなかった。

電位と防食電流密度の変化と付着生物の関係 電気防食片の水深別電位および防食電流密度の経時変化を Figs. 6, 7 に示す。

電位変化 (Fig. 6) において、浸漬直後は、各水深とも鉄の防食電位よりも貴電位を示し、水深別の差異もほとんどみられなかったが、付着生物量の増加に伴い、各水深とも経時的に卑電位の方向に分極している。しかし、浸漬直後を除き各測定時期とも、付着生物量の多い浅所に対し少ない深所は貴電位を示している。

防食電流密度の変化 (Fig. 7) をみると、電位変化に対応するかのように、浸漬直後は、各水深とも設計防食電流密度よりも 50 mA/m^2 高い値が測定されたが、付着生物量の増加に伴い経時的に減少し、また、その各測定時期の減少値は、付着生物量の多い浅所ほど大きく、少ない深所ほど小さかった。このことは、各測定時期とも、付着生物量の多い浅所ほど、試験片の露出面積が減少し、そこに防食電流が集中して、その面の陰分極を促進するためと思われる。

一方、電気防食片においても、水深別における付着種

Fig. 6. Change in the potential of cathodic protection piece (figures in DWG: exposed days).

Fig. 7. Change in the protective current density of cathodic protection piece (figures in DWG: exposed days).

に極端な差異がみられなかったもので、Xuebao ら⁶⁾ が報告している生物の種類の違いによる電位変化は観察されなかった。また、本実験は 8 月初旬から 12 月初旬にかけての約 120 日間に亘って行ったが、付着生物の種類や量は季節の違いによって異なり、それに応じて電流密度や電位の変化も異なると考えられるが、付着生物量の違い

によって電位や防食電流密度が水深別に且つ経時的にはっきり変化することが確認され、防食電流測定法は、電気防食した鋼材面の付着生物量をモニタリングする一手法として利用し得ることが示唆された。また、本実験結果から、電気防食の対照片においては、一時的に通電する回路を形成して、そのときの分極電位とともに、その通電量を測定する手法も検討されよう。

謝 辞

本研究を行うにあたって、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中川防蝕工業株式会社常務取締役 一章博士をはじめ同社諸兄に記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) B. L. Moss: Proceedings of society for underwater technology conference, session I & II, Society for Underwater Technology, London, 1981, pp. 1-5.
- 2) M. Eashwar and S. V. K. Iyer: Proceedings of pacific corrosion '87 in Melbourne, volume II, session 21, Mohan Primlani for Oxford & IBH Publishing Co., Ltd., New Delhi, 1987, pp. 1-5.
- 3) 桑 守彦, 野村和徳: 日永誌, **54**, 359-364 (1988).
- 4) A. B. Wagh, S. S. Sawant, V. P. Venugopalan, T. V. Raveedran, and K. L. Bhat: *Corrosion Prevention and Control*, **35**, 134-137 (1988).
- 5) G. N. R. Forteach, G. B. Pickken, and R. Kalph: Corrosion and Marine Growth on Offshore Structures, Fills Horwood Limited, Chichester, 1984, pp. 10-12.
- 6) H. Xuebao, L. Ruimu, L. Dekai, and Z. Jiancheng: Proceedings of pacific corrosion '87 in Melbourne, volume II, session 22, Mohan Primlani for Oxford & IBH Publishing Co., Ltd., New Delhi, 1987, pp. 1-6.
- 7) L. A. Terry and R. G. Edyvean: *Botanica*

- Marina*, **24**, 177-183 (1981).
- 8) 桑 守彦: 日永誌, **50**, 1635-1640 (1984).
- 9) B. T. Patil, G. Ranganna, T. Ramchandran, A. B. Wagh, and M. R. Gajendragad: Proceedings of pacific corrosion '87 in Melbourne, volume II, session 22, Mohan Primlani for Oxford & IBH Publishing Co., Ltd, 1987, pp. 1-7.
- 10) 今喜多美方: 中川防蝕技報, **14**, 24-34, (1978).
- 11) 今喜多美方, 梨子国男: 防錆管理, **23** (9), 12-18, (1979).
- 12) 日本港湾協会: 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, 1979, pp. 9-12.
- 13) 鈴木紹夫: 防食技術便覧 (腐食防食協会編), 日刊工業新聞社, 東京, 1986, p. 778.
- 14) 中川雅夫: 電気防食法の実際, 地人書館, 東京, 1972, pp. 92-96.
- 15) 大石不二夫: プラスチックの耐久性, 工業調査会, 東京, 1975, pp. 16-17.
- 16) 滝山栄一郎: プラスチック材料講座 [10], ポリエステル樹脂, 日刊工業新聞社, 東京, 1960, pp. 1-382.
- 17) 伊藤信夫, 村井 徹, 梶原 武: 海洋科学技術センター研究報告, **8**, 113-123 (1982).
- 18) K. D. Efrid: *Materials Performance*, **15** (4), 16-25 (1976.)
- 19) K. Ravindran and A. G. C. Piliani: Marine Biology, Proceedings of 6th international congress on marine corrosion and fouling, International Technical University of Athens, Athens, 1984, pp. 370-383.
- 20) R. G. Edyvean: Marine Biology, Proceedings of 6th international congress on marine corrosion and fouling, International Technical University of Athens, Athens, 1984, pp. 469-483.
- 21) F. L. LaQue: *Corrosion*, **6**, 161-166 (1950).
- 22) H. J. Engell and P. Forchhammer: *Corrosion Science*, **5**, 479-488 (1965).
- 23) R. Korlipara, R. A. Zatorski, and H. Herman: *Marine Technology Society Journal*, **17** (4), 19-28 (1983).