種々の汚染海水域における沿岸鉄鋼構造物の 防食電流密度について

三浦周敏*, 石川光男*, 阿久津光男*

*日本防食工業株式会社

Cathodic Protective Current Densities of Coastal Steel Structures in Several Polluted Sea Water Zones

Chikatoshi Miura,* Mitsuo Ishikawa* and Mitsuo Akutsu*

*The Nippon Corrosion Engineering Co., Ltd.

Mean protective current densities of cathodically protected steel structures including wharfs and piers have been measured at seventeen harbors in industrial districts in Japan. Dissolved oxygen, and sulfide- and hydrogen-ion concentrations were chosen as variables representing sea water pollution. A definition of "pollution index" was given as a sum of these concentrations each multiplied by a constant. Corrosion rates and mean protective current densities have been evaluated from the pollution indices in the following four zones of aquatic pollution: 1) Repurified zone. 2) Zone of mild pollution 3) Zone of pollution 4) Zone of foul pollution. a) Repurified zone and zone of mild pollution are so-called clean zones. In these zones, corrosion rates and mean protective current densities are less than 0.1 mm/yr and 50~55 mA/m², respectively. b) In zone of pollution, corrosion rates and mean protective current densities are 0.1~0.2 mm/yr and 75~85 mA/m², respectively. c) In zone of foul pollution, dissolved oxygen is low throughout a year, and hydrogen sulfide is detected even at sea surface in summer. Therefore, corrosion rates and mean protective current densities are higher in summer than that in winter, and their values are several times as large as those in clean sea water.

1. 緒 言

ここ数年来、一部の港湾においては海水の汚染により流電陽極方式の電気防食を行っている鋼矢板あるいは鋼管の電位がしばしば貴化することが認められている。本報告は昭和40年以後の電気防食を行っている岸壁および棧橋について電位と防食電流を測定し、ついで海水を汚染指標によって4種の汚染段階に分類し、これを用いて各地の海水の汚染段階と防食電流との相関性を検討したものである。

2. 実 験

各地の被防食体からそれぞれ4~5個のあらかじめ秤量したアルミニウム陽極を取り外し、陽極表面上の付着物を水洗しながら除去し、乾燥後秤量してそれらの重量減を求めた後、それらの値から施工後の消費電気を算出し、これと対象防食面積とから各防食体における平均

防食電流密度を算出した。また1本の陽極から流出する電流値は陽極と棧橋鉄鋼物の間に0.01Ωの抵抗を挿入し、抵抗間の電圧を測定し、電流値に換算し求めた。

3. 結 果

3.1 各地の港湾施設における平均防食電流密度

全国各地において昭和40年以後に電気防食を施工した岸壁および棧橋の平均防食電流密度を一括してTable 1に示した。姉ヶ崎(千葉県, No. 1)および苦小牧港(No. 2, 3および4)では平均防食電流密度は40 mA/m²以下であり、苦小牧の海面状況は年3, 4回の観察では年間を通じ着色がみられず清浄であり、姉ヶ崎では年に1回ほど薄く褐色がかっているときがあった。坂出(No. 5, 8および10)では平均防食電流密度が46~59 mA/m²の値を示し、同じ地域内でもかなりの差異がみられた。四日市(No. 11および15), 神戸(No. 12および14), 尼ヶ崎(No. 13), 千葉市(No. 16)の棧橋での海面状況は夏期には褐色から黒みを帯びており、いわゆる“赤潮”の発生が認められることがあり、また冬期は一般に黒み

* 干144 東京都大田区南蒲田1丁目1番25号蒲田常盤ビル(1-1-25 Minami Kamata, Ohta-ku, 144, Tokyo)

がっている。このような地域での平均防食電流密度は $50 \sim 80 \text{ mA/m}^2$ の値を示している。横浜 A 社棧橋 (No. 17) においては、海水は年間を通じて黒く、夏期には硫化水素臭を漂わせる状態であり、一見して汚染されているとわかる海域である。このような地区では平均防食電流密度は 130 mA/m^2 以上であった。以上のように海

Table 1. Mean protective current densities in various warfs and piers.

NO	LOCATION 場 所	M.C.D. mA/m^2	LAPSE 経過年月	INSTALLATION 施工日
1	ANEGASAKI PIER 姉ヶ崎 F 社棧橋	33.4	2Y 2M	'69. JUL.
2	TOMAKOMAI HARBOUR 苫小牧湾岸壁	35.9	5・6	'67. NOV.
3	"	38.8	5・6	'67. NOV.
4	"	40.4	2・7	'70. OCT.
5	SAKAIDE WHARF 坂出 M 社岸壁	46.4	4・6	'69. JUL.
6	FUKUYAMA WHARF 福山 N 社岸壁	49.3	3・10	'68. DEC.
7	KINUURA WHARF 衣浦岸壁	52.0	3・5	'70. MAR.
8	SAKAIDE PIER(A) 坂出 A 社棧橋	56.6	2・1	'72. JAN.
9	OSAKA HARBOUR 大阪港ドルフィン	58.4	2・7	'72. JAN.
10	SAKAIDE WHARF 坂出 M 社岸壁	58.7	4・8	'71. MAY.
11	YOKKAICHI PIER(A) 四日市 D 社棧橋	60.8	5・6	'66. APL.
12	KOBE PIER(A) 神戸 M 社棧橋	66.8	6・3	'65. MAR.
13	AMAGASAKI PIER 尼ヶ崎 M 社棧橋	69.5	4・8	'65. NOV.
14	KOBE PIER(B) 神戸 N 社棧橋	70.0	6・3	'65. MAR.
15	YOKKAICHI PIER(B) 四日市 D 社棧橋	72.9	5・6	'66. APL.
16	CHIBA PIER 千葉市 A 社棧橋	78.9	2・6	'69. APL.
17	YOKOHAMA PIER 横浜市 A 社棧橋	133.3	1・7	'72. JAN.

Fig. 1. Change in potential of pier in Manazuru Harbor.

水の汚染によって平均防食電流密度の増大があることがわかる。

3.2 真鶴 (神奈川) の棧橋の電位変化

神奈川県真鶴 D 社棧橋は昭和 48 年アルミニウム流電陽極で防食したもので、同棧橋の電位を 5m 間隔、水深 1m ピッチで測定した値の平均値を Fig. 1 に示した。施工当初は -950 mV (海水塩化銀電極基準) であったが、6 ヶ月経過以降は -1000 mV となり安定した値を示している。同地区は海水の着色もみられず青青としており、一見して清浄な海水域と判断されるところである。

3.3 四日市棧橋の電位電流変化

昭和 46 年よりアルミニウム流電陽極で防食した四日市 D 社棧橋について昭和 49 年 4 月から月 1 回電位測定した結果を Fig. 2 の実線で示した。(測定法は前記 3.2 と同じである。) 同棧橋の電位は夏期に卑になり、冬期に貴化した。さらに昭和 50 年 3 月より流電陽極 1 本に流れる電流を測定したところ、Fig. 2 の破線で示すように電位が貴になると電流が増大していることがわかった。夏期には海水は赤色～褐色を呈していることがしばしば観察され、また海底土を採取し北川式検知管で分析した結果海底土中に硫化物イオンが数 ppm 検出された。

4. 考 察

4.1 汚染因子と汚染段階

昭和 49 年一都三県公害防止協議会水質共同報告書では、海水の汚染段階を栄養の多寡により 4 つに分類している¹⁾。それぞれの段階における特徴は Table 2 に示す通りである。同 Table 中から腐食に関与する事項として溶存酸素と硫化水素濃度ならびに付着生物量に着目してみると、食栄養域では年間を通じ、溶存酸素は $80 \sim 100 \%$ であり、硫化水素は認められない。又 bio-film (酸素拡散の障害となる生物の膜) となる生物も少数多種である。生物のサイクルは年 1 回であるので bio-film の状

Fig. 2. Change in potential and protective current of pier in Yokkaichi Harbor

態は1年以上経過してある一定の値を示すものと考えられ、ただし経年変化は当然あるものと考えられる。富栄養域においては溶存酸素は冬期に100% 夏期に30~80% となるが、年間を通じ硫化水素の存在は認められず、生物も少数多種~多数多種になる。過栄養域では溶存酸素は冬期に80~100% となり、夏期には表層で100~200% (光合成によるプランクトンの異常増殖)、底層で

Table 2. Classification of Characteristics of pollution degrees (in summer).

CHARACTERISTICS 特 長	ZONE OF FOUL POLLUTION 腐水域	ZONE OF POLLUTION 過 栄 養 域		ZONE OF MILD POLLUTION 富 栄 養 域	REPURIFIED ZONE 貧 栄 養 域
		BLOW SEVERAL m 数m以深	ABOVE SEVERAL m 数m以浅		
TRANSPARENCY (m) TONE	< 3 BLACK	< 3 YELLOW, YELLOWISH GREEN, BROWN		3~10 TEMPORARY LOCALLY COLOURED	< 10 NO COLOURED
COD (O ₂ ppm)	> 10	3~10		1~3	< 1
BOD (O ₂ ppm)	> 10	3~10		1~3	< 1
INORG N COMP. (mgN/l)	> 100	10~100		2~10	2<1
DISSOLVED OXYGENE (DO) %	LOW OR NO OXYGEN IN ALL PARTS (0~30%)	SUPER SATD. AT SURFACE LOW OR NO OXYGEN AT BOTTOM (0~30%)	SUPER SATD. AT SURFACE 100~200%	SATD. AT SURFACE AND MIDDLE PART; UNSATD. AT BOTTOM (30~80%)	SATD. IN ALL PARTS (80~100%)
HYDROGEN SULFIDE	DETECTED REACHING NEAR SURFACE	DETECTED AT BOTTOM	NOT DETECTED	NOT DETECTED	NOT DETECTED

CONTINUED

PHYTOPLANKTON MAX. LAYER	—	FORMS IN 3m OR 0.5 LOW OXYGEN PART	FORMS IN SEVERAL METERS-10 SEVERAL METERS	FORMS IN SEVERAL METERS
BOTTOM SULFIDE (mg/l) COD (mg/l)	> 1.0	0.3 ~ 3.0 > 30	0.03~0.3 5 ~ 30	< 0.03 < 5
ZOOPLANKTON CRUSTACEA	—	A FEW, A FEW KIND, OCCASIONALLY MANY	MANY, MANY KIND	A FEW, A FEW KIND
BENTHOS POLYCHAETA CRUSTACEA	A FEW A FEW KIND	A FEW A FEW KIND MANY KIND	MANY	A FEW
EXAMPLE	ESTUARY INFLOW ZONE OF SEWAGE	INNER BAY NARROW MOUTH OF BAY	COAST INNER BAY BELOW 30 m	COAST OFF-SHORE BEYOND 30 m

Fig. 3. Relations between dissolved oxygen content and pollution degree.

は0~30% (プランクトンが死滅し分解のために酸素が消費される。) となるとともに硫化水素の存在が認められ、また生物も少数少種 (ただし表層では多数多種) となる。腐水域になると年間を通じ溶存酸素は0~30% であり、夏期には硫化水素が表層近くまで認められ、生物は少数少種となる。夏期における栄養段階と酸素飽和度の関係は Fig. 3 に示す通りである。

そこでいま海水の汚染因子として溶存酸素、硫化物イオンと pH の三因子を選びだし、Table 3 に示すように各因子について、汚染に寄与する程度に従って点数基準と点数を定め、これら3つの汚染点数の代数和を汚染指標とした。さらに Table 4 に示すように汚染指標の大小によって海水を4種の汚染段階に分類した。

4.2 腐食速度と汚染段階

重野ら²⁾ および島田ら³⁾ が各海域で行った鉄鋼の腐食試験データと水質調査結果に対して、該試験海域の汚染段階を上述の方法で算出し、鋼の腐食速度と汚染段階との関係を求めた結果を一括してそれぞれ Table 5 および Table 6 に示した。(なお、同表の腐食速度は海水浸漬部にある試験片の平均値である。)

Table 5 の試験結果についてみると、

a) 東京浜離宮は腐水域であり、腐食は硫化水素により夏期に大きく冬期に小さくなり、また貝類および藻類の鉄鋼表面への付着はみられず、典型的な腐水域とみなされる。年間の腐食速度は 0.21 mm/yr と大きい。

Table 3. Pollution factors and pollution values

FACTOR 因 子	BASIS OF CHARACTERISTIC VALUE 点 数 基 準	CHARACTERISTIC VALUE 点 数
DISSOLVED OXYGEN	PER $\pm 10\%$ FROM SATURATION	2
SULFIDE ION	PER 0.1 ppm	5
pH	PER 0.1 UNDER 8.0	1.5

Table 4. Pollution indices and pollution degrees. Pollution index = Sum of three kinds of pollution value.

POLLUTION INDEX 汚 染 指 標	POLLUTION DEGREE 汚 染 段 階
0~5	REPURIFIED ZONE 貧 栄 養 域
5~15	ZONE OF MILD POLLUTION 富 栄 養 域
15~30	ZONE OF POLLUTION 過 栄 養 域
OVER 30	ZONE OF FOUL POLLUTION 腐 水 域

Table 5. Relation between corrosion rate of steel and pollution degree [I].

LOCATION 場 所	TOKYO HAMARIKYU 東京浜離宮	OSAKA AMAGASAKI 大阪尼ヶ崎	NAGOYA K* COMPANY 名古屋K社	IBARAGI KASHIMA 茨城鹿島
POLLUTION INDEX 汚染指標	151.6	21.3	21.5	0.0
POLLUTION DEGREE 汚染段階	ZONE OF FOUL 腐水域	ZONE OF POLLUTION 過栄養域	ZONE OF POLLUTION 過栄養域	REPURIFIED ZONE 貧栄養域
SEASON	SUM - WIN - MER TER	SUM - WIN - MER TER	SUM - WIN - MER TER	SUM - WIN - MER TER
CORR RATE IN SEASON $\frac{mm}{Yr}$	0.51 0.063	0.29 0.22	0.28 0.15	0.32 0.30
CORR RATE IN Yr $\frac{mm}{Yr}$	0.21	0.19	0.20	0.13

Table 6. Relation between corrosion rate of steel and pollution degree [II].

LOCATION 場 所	KANMON STRAIT 関門海峡	OKU DOKAI BAY 奥洞海湾
POLLUTION INDEX 汚染指標	4.4	46.5
POLLUTION DEGREE 汚染段階	REPURIFIED ZONE 貧栄養域	ZONE OF FOUL POLLUTION 腐水域
SEASON	SUMMER WINTER	SUMMER WINTER
CORR RATE IN SEASON $\frac{mm}{Yr}$	0.32 0.31	0.24 0.08
CORR RATE IN YEAR $\frac{mm}{Yr}$	0.28	0.19

b) 大阪尼ヶ崎および名古屋 K 社は過栄養域であり、年間の腐食速度もそれぞれ 0.19 および 0.20 mm/yr と大きく、期における腐食速度は夏期の方が大きい、ただしこの試験は 1~3 ヶ月の短期間であるので bio-film の効果が明確に表われなかったものと考えられる。

c) 茨城鹿島は貧栄養域に該当する清浄海水であり、年間の腐食速度は前二者の海域に比較し小さな値 (0.13 mm/yr) である。夏冬における腐食速度の差はなく、両期とも腐食速度は大きい、この期別の試験は 1~3 ヶ月と短期間であるため bio-film の効果が少なかったものと考えられる。年間の腐食速度が 0.13 mm/yr であり、夏冬両期の腐食速度が 0.3 mm/yr 近くの値であるので、1 年後の腐食速度は 0.13 mm/yr よりもかなり小さな値になっていることが推測される。

Table 6 の試験結果についてみると

a) 関門海峡は貧→富栄養域である。年間の腐食速度は 0.28 mm/yr と大きく、かつ夏期および冬期における値もそれぞれ 0.32 および 0.30 mm/yr と大きい、夏冬の差はない。貧→富栄養域においては腐食速度は小さいと考えられるが、とくにこの海域は海峡であるため、潮流が数 m/sec に達することがある。潮の干満によって潮の流れをひきおこし、さらに潮流は防食電流の変化を

Fig. 4. Effect of tide velocity on protective current density.

ひきおこす。潮流速が 1 日の内最も大きい変化を示したときの鉄鋼の電位を -900 mV (飽和甘汞電極) に設定した場合の防食電流と潮流速の関係を求めた。その結果を Fig. 4 に示す⁴⁾。同図からわかるように防食電流に及ぼす潮流の影響は初期は大きい、時間の経過とともに小さくなる。関門海域における試験では潮流速の影響が顕著に表われたものと考えられる。

b) 奥洞海湾では年間を通じ溶存酸素は 0.1 ppm 以下であり、夏期に腐食が大きく、冬期に小さくなる典型的な腐水域である。

4.3 電気防食と汚染段階

真鶴 (神奈川県) は清浄海域と判別され、年間を通じ防食電流が安定しているので電位の変動も少ないものと考えられる。四日市 D 社栈橋の海水は過栄養域であるので夏期の溶存酸素は表層で大きく、中層および底層は低酸素となるので、全体の所要防食電流は冬期 (上層および底層共に溶存酸素は 80~100%) に比較し小さいために電位は卑になるものと考えられる。腐水域においては年間を通じ低酸素状態にあるので酸素還元に基づく防食電流は小さくなり、夏期に腐食速度が増大するのは硫化水素の発生に起因するものと考えられ、したがって防食電流が増大することが予測される。この海域には Table 1 中の No. 17 横浜 A 社栈橋が該当するようである。汚染状況は明確に区別できない場合もあり、かつ時間の経過とともに変化するものである。

5. ま と め

以上の結果をまとめると、次の通りである。

1) 全国各地のアルミニウム流電陽極で防食している 17 箇所の鉄鋼岸壁および栈橋について平均防食電流密度を求めた。

2) 一都三県公害防止協議会、水質共同報告書に基づいて、海水の汚染段階をその進行程度に従って次の 4 段階に分類した。

- a) 食栄養域 (Repurified zone)
- b) 富栄養域 (Zone of mild pollution)
- c) 過栄養域 (Zone of pollution)
- d) 腐水域 (Zone of foul pollution)

3) 鉄鋼の腐食に対する海水汚染の因子として溶存酸素、硫化物イオンおよび pH をとり、各測定濃度に重みをつけ、その代数和を汚染指標としさらにその数値から上記 4 つの汚染段階を評価した。

4) 汚染海水中における鉄鋼の腐食および電気防食の所要電流は溶存酸素と硫化水素の濃度に比例し、さらに鉄鋼表面に付着する海中生物（貝殻等、bio-film）の量およびその付着面積に反比例するものとして考察を行った。

5) 各汚染段階における鉄鋼の腐食現象は前記 2), 3) および 4) による考察で説明できるが、一部は前記仮定で説明できない場合があった。しかし前記仮定で説明できない場合のデータは 1 年以内の短期間のデータに基づくためと考えられた。恒久性沿岸鉄鋼構造物の腐食およ

び電気防食は長期に渡る現象が問題となるので短期間のデータで判断することは誤りを導く恐れがあり、少なくとも 1 年以上経過した試片および構造物についてその挙動を観察する必要がある。

6) 今回の測定結果から防食維持電流密度は食栄養域および富栄養域においては $50 \sim 55 \text{ mA/m}^2$ であり、過栄養域においては $75 \sim 85 \text{ mA/m}^2$ であり、腐水域においては前三者の防食維持電流密度より大きくなる場合がある。また潮流が大きい場合も多少の防食電流の増大がある。

文 献

- 1) 昭和 49 年, 「一都三県公害防止協議会, 水質共同調査報告書」
- 2) 重野, 海野, 「橋 梁」vol. 9, 16 (1973).
- 3) 島田, 三井田, 横大路, 「鉄と鋼」vol. 60, 1646 (1974).
- 4) 昭和 48 年 「本州四国連絡橋鋼材防食試験調査報告書」