

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 25

NO. 1

MAR. 1986

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告第25巻第1号

正 誤 表

ページ	欄	行	誤	正
16	左	10, 11	0なので,	等しいので, 両地点にはさまれた領域において堤体に直角方向の底質移動による土量変化は0である。したがって,
42	左	2	逆に $e_2 < \dot{0}$,	逆に $e_2 > \dot{0}$,

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第25巻 第1号 (Vol. 25, No. 1), 1986年3月 (Mar. 1986)

目 次 (CONTENTS)

1. 重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究
.....入江 功・栗山善昭・浅倉弘敏..... 3
(Study on Scour in Front of Breakwaters by Standing Waves and Protection
Methods.....Isao IRIE, Yoshiaki KURIYAMA and Hirotooshi ASAKURA)
2. 電気防食調査に基づく防食電流密度の検討横井聡之・阿部正美.....87
(Study on the Protective Current Density for Cathodic Protection based on the
Performance Surveys.....Toshiyuki YOKOI and Masami ABE)

2. 電気防食調査に基づく防食電流密度の検討

横井 聡之*・阿部正美**

要 旨

流電陽極方式の電気防食を適用している港湾鋼構造物に対して行った電気防食調査の結果から、防食電流密度の検討を行った。主要な結論は次のとおりである。

- (1) 防食電流密度（定常値）と水質との関係は、アンモニウムイオン濃度および塩素イオン濃度を指標に表すことができる。
- (2) 鋼材の干渉帯部分が被覆されていると防食電流密度が小さいことが確認された。
- (3) 陽極の寿命が設計値を満足するか否かは、防食電流密度の設計値、水質、鋼材の干渉帯部分の露出の有無から推定することができる。

* 構造部 材料施工研究室長

** 構造部 材料施工研究室

2. Study on the Protective Current Density for Cathodic Protection based on the Performance Surveys

Toshiyuki YOKOI*

Masami ABE**

Synopsis

In this paper the protective current densities for cathodic protection in marine environments were studied based on the performance surveys on steel structure, to which cathodic protection by galvanic anodes had been applied. The following results were obtained;

- (1) The values of protective current density could be characterized by density of ammonium ion and chloride ion in sea water which surround the structures.
- (2) It was proved that protective current density of a steel structure with concrete lining at tidal zone was markedly smaller than that without lining.
- (3) The real life of anode may be shorter than the design life when two items out of the following three do not satisfy certain levels;
 - 1 protective current density considered in design
 - 2 water quality
 - 3 state of steel members at tidal zone (bared or covered)

* Chief of Materials Laboratory, Structures Division

** Member of Materials Laboratory, Structures Division

目 次

要 旨	87
1. ま え が き	91
2. 電気防食調査の概要	91
3. 防食電流密度の定常値	91
4. 防食電流密度と水質の関係	96
5. 防食電流密度に及ぼす干満帯の影響	101
6. 電防初期の状況	102
7. 構造物の電位と防食電流密度の関係	104
8. 陽極の寿命に影響する要因	106
9. 設計法に関する検討	106
9.1 水質と防食電流密度	106
9.2 干満帯被覆の効果	109
9.3 電位および陽極寿命の管理	109
10. 結 論	109
11. あ と が き	110
参 考 文 献	110

1. ま え が き

港湾鋼構造物の海中部分の防食方法としては、電気防食と腐食しろを見込む方法が一般的に用いられてきた。腐食しろは腐食による鋼材肉厚の減少分を断面耐力から決まる肉厚に加えるもので、腐食速度が設計値以下であれば構造物の設計耐用期間中の維持管理が容易であり簡便な方法である。しかし鋼材の平均干潮面直下からL.W.L. 付近が著しく腐食するいわゆる集中腐食が発生することが多く、その場合の腐食速度は集中腐食の発生しない場合の数倍から極端な例では10倍にも達することがある。このような集中腐食に腐食しろにより対応することは、鋼材の肉厚が非常に厚くなり実際上困難である。したがって集中腐食が発生する危険性のある場合には、腐食しろでなく電気防食により対応しなければならない。電気防食はすでに相当長期間の実績があり、その効果は認められている。しかし電気防食が十分にその効果を発揮するためには適切な設計と管理が必要である。

電気防食の設計においては、防食電流密度の値を適切に設定することが重要である。防食電流密度は水質等の環境条件により相当変化することが知られているが、防食電流密度と環境条件の関係については十分には解明されていない。したがって設計において環境条件を考慮して適切な防食電流密度を設定しようとしても、それを可能とする技術が確立していない。現行の設計法においても、概略値を示しているのみであり改良の必要がある。

港湾鋼構造物が大量に建設されるようになってから20数年経過し腐食の問題が生じている。また流電陽極方式の電気防食が一般的に用いられるようになってから20年程度経過した。陽極の寿命は20年として設計されることが多いから、陽極の再取付が今後次々と行われることになる。

電気防食の実態を把握し必要に応じ設計法や管理方法の改良を検討するため、流電陽極方式の電気防食を施している構造物について電気防食調査を行ってきた。

本報告は電気防食調査(参考文献1)～(4))をもとに防食電流密度について検討したものである。

2. 電気防食調査の概要

調査構造物を表-1, その所在位置を図-1に示す。調査構造物は28施設であり、黒之瀬戸の構造物が橋脚であることを除くと、他はすべて係船岸である。係船岸の構造形式は鋼矢板、鋼管矢板、鋼管抗棧橋および鋼矢板セルである。小樽、衣浦、堺泉北の鋼矢板セル岸壁については、鋼矢板と鋼管杭について調査した。同じく境港の

調査構造物は土留矢板を有する横棧橋であるが、鋼矢板、鋼管杭の両方を調査した。また、名古屋(空見)、堺泉北(鋼矢板)、岡山および北九州(門司)の4施設は約5年の間隔をおいて前後2回調査している。表-1の電防経過年数は2回目の調査時点での経過年数であり、1回目はこれより5年短い。なお黒之瀬戸の橋脚は、防食電流密度に及ぼす流速の影響をみるために潮流の大きい場所の構造物として調査した。

陽極については、千葉および境(鋼矢板)は建設当初取り付けた陽極が消耗後、二度めの陽極を取り付けている。横浜(本牧)は後から設計変更して陽極を追加している。表-1の横浜(本牧)の欄の下段は追加した陽極に対するデータを示す。

調査の項目は以下のとおりである。

陽極調査

閉路電位測定

発生電流測定

重量測定

観察

構造物調査

電位測定

肉厚測定

観察

環境調査

水質試験

底質試験

調査方法と測定結果の詳細は参考文献1～(4)に述べてある。

調査の時期は10月後半から3月始めの冬季の間であり、一つの構造物の調査日数は2～3日間である。なお調査は多年度にわたっている。

3. 防食電流密度の定常値

防食電流密度は潮位変化、気象変化等に応じて変動するが、その変動の中心的な値は電気防食開始当初から時間経過とともにしだいに減少していきほぼ一定値に落ち着く。防食電流密度が減少するのは、通電によってカソードである鋼材面に石灰質皮膜が生成すること、陽極と鋼材との有効電位差が減少することなどによる。図-2は防食電流密度の変動の中心的な値を示したもので、同図に示すように、防食電流密度の電防開始当初の値は初期値、減少した後の一定値は定常値とよばれる。またここでは陽極の寿命期間中の平均を平均値とよび、電防開始から定常値になるまでの間を低減期間とよぶことにする。

表-1 調査構造物

No.	港名	構造形式	鋼材種類	水深(m)	H.W.L. (m)	陽極			建設後 経過年 数(年)	電防経過 年数(年)
						重量 (Net) (kg)	初期発 生電流 (A)	設計寿 命(年)		
1	小樽	セル式	鋼管杭 φ508mm	-10	+0.4	96.2	2.5	20	13	12.1
			鋼矢板 YSP-F			96.2	2.5	20		
2	苫小牧	矢板式	鋼矢板 Z-45	-9	+1.5	94.4	3.1	20	17	16.1
3	室蘭	矢板式	鋼矢板 YSPZ-45	-10	+1.5	200.5	3.5	30	7	7
4	塩釜(仙台)	矢板式	鋼管矢板 φ711mm	-12	+1.3	59.5	3.0	10	10	10
5	千葉	棧橋式	鋼管杭 φ711mm	-10	+2.0	59.4	3.0	10	14.8	12+2.8 ¹⁾
6	千葉(船橋)	矢板式	鋼管矢板 φ1066.5mm	-7.5	+2.1	59.5	3.0	10	7	6
7	東京	矢板式	鋼管矢板 φ1016mm	-4.5	+2.1	115.2	3.0	20	6	6
8	横浜(大黒)	棧橋式	鋼管杭 φ812.8mm	-4.5~-12	+2.0	41.0	1.9	10	9	9
9	横浜(本牧)	矢板式	鋼矢板 B-74	-12	+2.0	111.5	3.0	20	11.8	11.8
						60.0	2.5	12		
10	田子ノ浦	矢板式	鋼矢板 YSP-II	-4	+1.6	26.3	2.5	5	22	4.3
11	伏木富山(富山)	矢板式	鋼矢板 Z-38	-10	+0.7	63.8	2.2	20	13.9	13.9
12	伏木富山(伏木)	矢板式	鋼矢板 FSP-VIL	-10	+0.3	94.4	3.1	20	15.5	15.5
13	衣浦	セル式	鋼管杭 φ406.4mm	-10	+2.4	74.0	2.6	20	12.8	12.8
			鋼矢板 F			74.0	2.6	20		
14	名古屋(空見)	矢板式	鋼矢板 FSP-IVA	-5.5	+2.6	95.1	3.2	20	15.8	15.8
15	名古屋(金城)	矢板式	鋼管矢板 φ914mm	-10	+2.6	85.5	2.84	20	10	9
16	舞鶴	棧橋式	鋼管杭 φ711.2mm	-10	+0.3	115.2	3.0	20	11	11
17	堺泉北(堺)	セル式	鋼管杭 φ508mm	-10	+1.75	76.8	2.0	20	12.8	12.8
			鋼矢板 YSP-F			76.8	2.0	20		
18	尼崎西宮芦屋 (尼崎)	棧橋式	鋼管杭 φ1016mm	-10	+1.6	103.0	3.15	20	12.8	12.8
19	小松島	棧橋式	鋼管杭 φ812.8mm	-10	+1.8	111.5	3.0	20	13.4	12.8
20	岡山	矢板式	鋼矢板 FSP-III	-4	+1.85	103.3	3.5	20	13.8	13.8
21	境	棧橋式 (土留矢板)	鋼管杭 φ610mm	-9	+0.6	43.0	2.5	10	12.8	12.8
			鋼矢板 YSP-U15			60.9	3.0	10		
22	下関	棧橋式	鋼管杭 φ600mm	-10	+2.86	115.2	3.0	20	10.8	10.2
23	北九州(門司)	矢板式	鋼矢板 FSP-VL	-10	+4.0	109.0	2.8	25	15.8	15.8
24	北九州(洞海)	矢板式	鋼矢板 FSP-VIL	-10	+1.85	96.2	2.5	20	11	10.3
25	荻田	棧橋式	鋼管杭 φ700mm	-10	+4.2	98.7	2.8	20	14.4	13.2
26	佐伯	棧橋式	鋼管杭 φ700mm	-10	+1.7	96.2	2.5	20	8	7.5
27	黒之瀬戸	橋脚	橋脚外板	-4~-14.5		115.2	1.5	20	7	6.7
28	那覇	矢板式	組合せ矢板 VI-L	-11	+2.1	115.2	3.0	20	10.8	10

1) 当初陽極取付期間+再取付陽極経過期間

調査構造物の電防経過期間は最小のものは約4年であるが、大半は10年以上である。防食電流の低減期間は条件により異なり一定でないが、3~4年未満が多いといわれるので、調査時点の防食電流密度は定常値になっているとみて以下の検討を進める。

防食電流密度の求め方には二通りの方法がある。一つは陽極の発生電流の測定値を電流密度すなわち防食対象の単位面積当たりの防食電流に換算する方法である。他

は、まず陽極の重量測定から消耗量を求め、これと陽極の発生電気量の理論値(陽極が単位重量消耗することにより発生する電気量)とから、陽極が調査時点までに発生した総電気量を求める。この総電気量と陽極の消耗が行われた期間(防食期間)より平均の発生電流を求め、これを防食電流密度に換算する方法である。前者の方法は、調査時点の値を測定しているので定常値が得られるはずである。しかし防食電流密度が定常値になっている

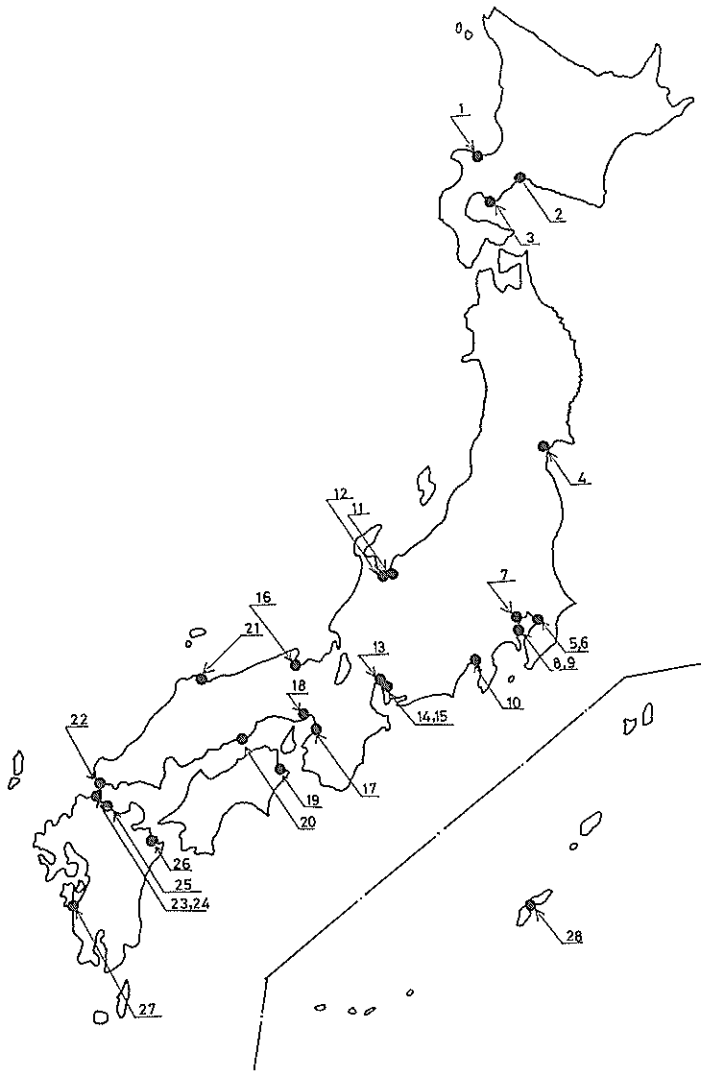


図-1 調査構造物の位置図

といっても、防食電流は海象、気象、水質などによって若干変動することがあるので常に一定であるとは限らない。したがって陽極の発生電流の測定値がたまたま現在の変動の中心的な値とは少し異なっているかもしれない。このため発生電流から求めた防食電流密度は図-2の定常値と少し異なっている可能性がある。他方、後者の陽極の消耗量から求める方法は、1回の調査から防食電流密度を求めようとする、電防当初からの消耗量から求めざるを得ず、電防初期の防食電流密度が大きいときの影響が入るため算出された値は定常値よりは若干大き

めになるという問題がある。ただし、低減期間以後の防食電流密度が定常値に達した時期以後に二度測定を行い、両測定の間での消耗量を求めて、これを防食電流密度に換算すれば、電防初期の影響を含まない防食電流密度が求まる。このようにして求めた防食電流密度は海象、気象、水質等の影響による防食電流密度の変動を平均したものとなっているので、図-2に示した定常値を求めるのに理想的な方法といえる。なお、厳密には二回の測定からはそれがいずれも低減期間後のものであることが確認できない。したがって最も理想的には三回以上測

表-2 防食電流密度

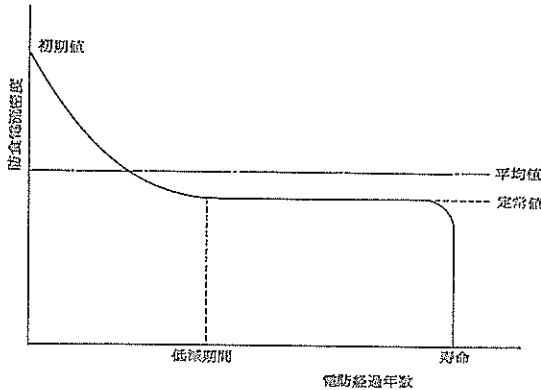


図-2 防食電流密度の経時変化

定することであるが、費用、労力、施設の供用に対する影響などからその実施は容易ではない。この点については低減期間についての既往の知見を参考にして調査時点を設定することで解決できると考える。

なお、防食電流密度を求める際の防食面積の算出においては、海中部の面積は平均水面より海底面までとした。また海底土中については、通常海底土中の防食電流密度を海中部の20%として設計することから、海底土中の面積に0.2を乗じて海中部に換算して海中部の面積に加えた。すなわち海中部と海底土中の防食電流の比は1:0.2になるとして海中部の防食電流密度を求めた。また、防食電流はすべての陽極について測定していないので、測定値を平均し、すべての陽極がこの平均値(図-2の平均値とは意味が異なる)の電流を発生しているとして防食電流密度を求めた。

一部の調査(9例)においては、満潮時および干潮時に発生電流を測定した。このうち2例においては満潮時の測定値が干潮時より約30%大きかったが、他はほとんど変化がなかった。この2例はいずれも潮位差が大きく、かつ鋼材の露出部の上端(被覆部の下端)が高いもので、このため満潮時の電流が大きくなったものと考えられる。満潮および干潮時に測定した事例ではそれらの平均値を用いた。またその他の事例はほとんどが平均水位に近い潮位時に測定しているから、電流測定値は潮位の変動に対してはほぼ平均的な値を示していると考えられる。

この二方法で求めた防食電流密度の値を表-2の(1)および(2)欄に示す。また図-3に発生電流の測定値から求めた防食電流密度の分布を、図-4に陽極の重量測定すなわち電防開始当初からの陽極の消耗量から求めた防食電流密度の分布を示す。図-3と図-4を比較すると全体的には陽

港名	(1) 電流測定より算出	(2) 重量測定より算出	(3) 5年間消費量より算出	(4) 平均値
小樽杭	36	46		40
矢板	36	48		42
苫小牧	25	32		29
室蘭	33	42		34
塩釜(仙台)	15	21		16
千葉	52	48		49
千葉(船橋)	65	53		57
東京	28	72		36
横浜(大黒)	30	56		49
(本牧)	53			
田子ノ浦	50	65		56
伏木富山(富山)	23	31		27
(伏木)	27	42		38
衣浦杭	44	42		42
矢板	28	52		42
名古屋(空見) ¹⁾	45/48	49/43	32	47/44
(金城)	39	49		43
舞鶴	32	60		44
堺泉北杭	33	62		49
矢板 ¹⁾	72/36	76/63	44	74/51
尼崎西宮(尼崎)	40	70		64
芦屋	32	34		32
小松島	32	34		32
岡山 ¹⁾	25/27	43/40	33	32/35
境杭	12	29		23
矢板	43	44		43
下関	34	57		43
北九州(門司) ¹⁾	25/34	62/52	33	45/47
(洞海)	26	47		37
苅田	16	41		25
佐伯	29	28		29
黒之瀬戸	30	31		30
那覇	14	39		19

1) 第1回調査/第2回調査

極の重量測定から求めたほうが約10mA/m²大きい。約5年間隔で前後2回調査した4構造物については、約5年間の消費量に対応する防食電流密度を求め表-2の(3)欄に示した。この値は定常値であるといえる。また、千葉および境(矢板)の陽極は二度めのものであるから、これらの消費量は防食電流密度が定常値である期間のものであり、(2)欄の値は定常値とみてよい。図-5に各構造物について表-2の(2)欄と(1)欄および(3)欄と(1)欄(第2回)の値の関係を示す。図において白丸は、陽極の重量測定から求めた値が定常値であるといえる上記の6例を

電気防食調査に基づく防食電流密度の検討

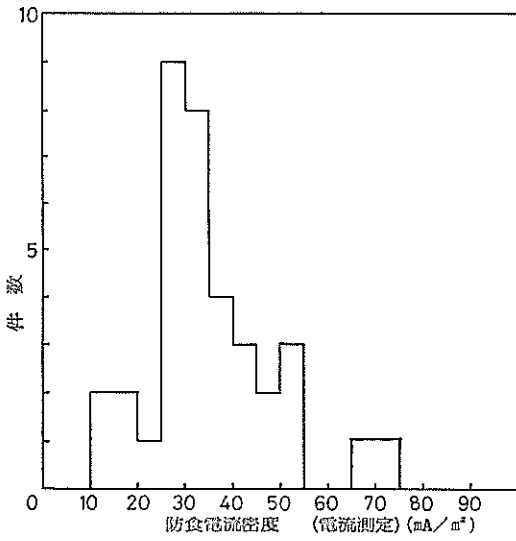


図-3 防食電流密度（電流測定）の分布

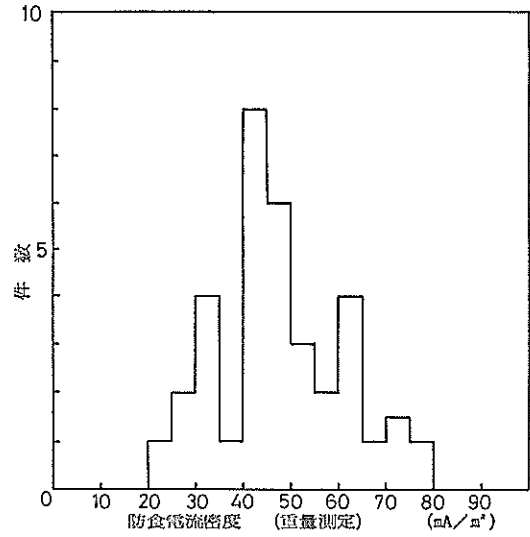


図-4 防食電流密度（重量測定）の分布

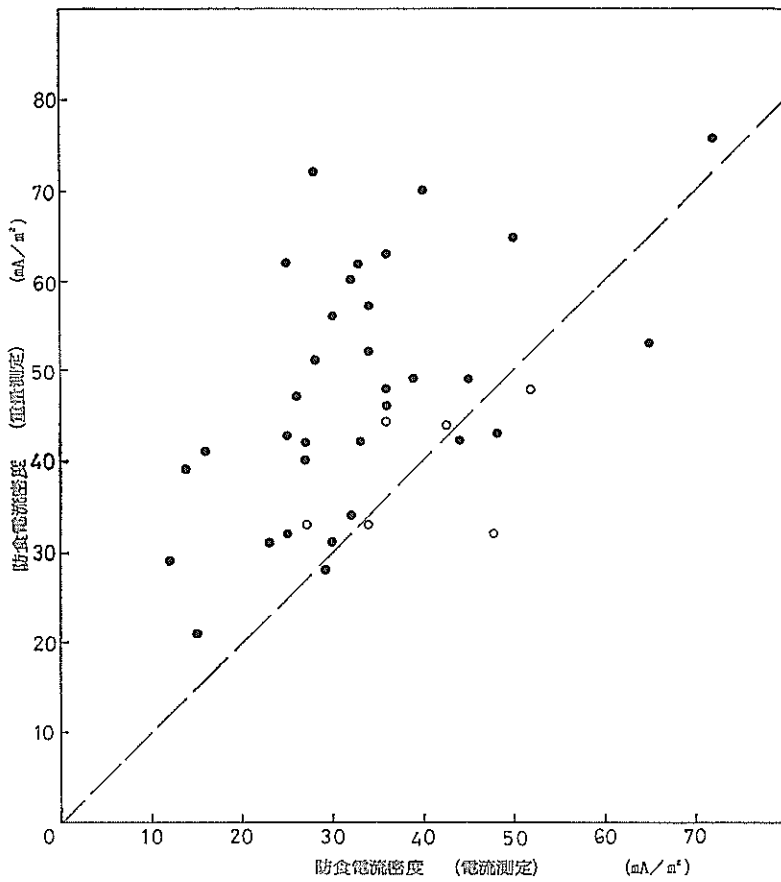


図-5 防食電流密度の算定法による比較

示す。6例中1は例やずれているが、他の5例は電流測定から求めた値と重量測定から求めた値がほぼ等しい。なお例外の1例は電流測定から求めた値が重量測定より求めた値よりも大きく、また2回目の調査では陽極の電位および構造物の電位が1回目の調査よりかなり貴になっており、2回目の調査時点で何か好ましくない状況が生じていることも考えられる事例である。ともかくこの事例については何か特別の事情があるとみなせば、他の5例から電流測定による防食電流密度は防食電流密度の定常値を示すものと判断される。また、重量測定による防食電流密度は既に説明した理由により防食電流密度の定常値よりも大きな値を示すことが図-5より明らかである。

以上のことから、低減期間以後に二度以上の調査を行って陽極の消耗量を求め、それから防食電流密度の定常値を求めるのが理想的であるが、それができない場合には低減期間以後の調査による発生電流の測定値から求めた防食電流密度を定常値として用いるのがよいと考えられる。ただし今回の調査結果の中には発生電流の測定値から求めた値が定常値から少し異なっているかもしれないものがある。すなわち電流測定による防食電流密度が 20 mA/m^2 以下と小さい値であって、陽極の重量測定から求めた値と比べて 20 mA/m^2 以上も小さく、たまたま電流量が小さいときに測定した可能性があるものが2例ある。また電流測定による値が最も大きい2例 (72 mA/m^2 および 65 mA/m^2) は、電防経過期間が比較的短い (6~8年)、水質が悪い、発生電流の測定値から求めた防食電流密度のほうが陽極の重量測定から求めた値よりも大きいかほぼ等しいという共通点がある。そしてそのうちの1例は前後2回調査を行っており1回目の調査がこれに該当しているが、2回目の調査では水質がよくなっていることもあるが発生電流はほぼ半減している。また2回の調査の間の約5年間の陽極の消耗から求めた防食電流密度もかなり小さくなっている。これらのことよりこの2例の値は、防食電流がまだ安定していない状態での防食電流密度である可能性がある。もしそうならば定常値はこれより若干小さい値になる。しかしこれらはいずれも可能性もあるという以上のことはいえないので、このことに留意はするが、以下の検討では上記の事例も含めて発生電流の測定値から求めた防食電流密度を定常値とする。

電気防食の設計においては、陽極の寿命の算定に寿命期間中の防食電流密度の平均値 (図-2参照) を用いる。陽極の残存重量および発生電流の測定値から陽極の推定寿命を求め、この推定寿命期間中の防食電流密度の平均

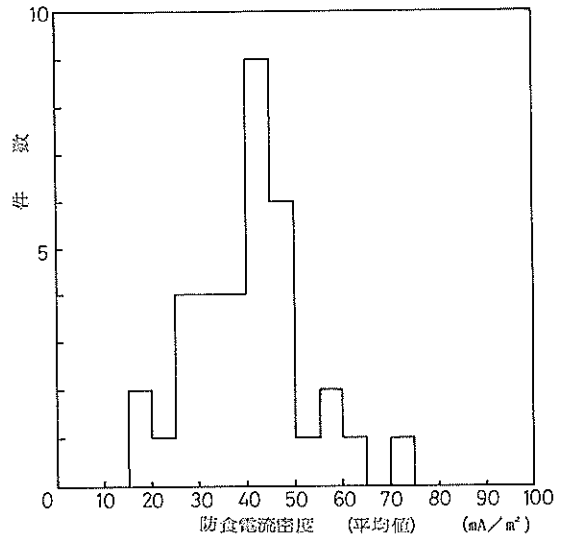


図-6 防食電流密度 (平均値) の分布

値を求めると表-2の(4)欄および図-6のようになる。推定寿命 (後出の表-5参照) は20年前後より長いものが多い。そして防食電流密度の平均値は $25 \sim 50 \text{ mA/m}^2$ が多く、なかでも $40 \sim 45 \text{ mA/m}^2$ が多い。陽極寿命期間中の防食電流密度の平均値は定常値よりも平均的には 10 mA/m^2 程度大きい。

電気防食の設計においては、防食電流密度の値を事例ごとに変えずにほぼ同じ値を用いることが多いが、実際の防食電流密度は図-4~図-6にみられるようにかなりの幅がある。

4. 防食電流密度と水質の関係

前述のように防食電流密度の値はかなりの幅に分布している。このように事例により差が生じる最大の原因は水質であると考えられる。水質以外の環境条件については調査構造物は一例を除いて係船岸であるから流速や波浪の影響にはあまり差がないとみてよいであろう。また潮位による差も前述のようにあまりないと考えられる。

防食電流密度は汚染海域では清浄海域の20~50%増の防食電流密度が必要とされている⁵⁾⁶⁾。しかし汚染海域の定義については、海水および海底土が著しく汚染されている海域で、内湾でへどろの堆積している海域など⁶⁾としているものもあるが、明確なものはない。

実際の電気防食の設計においては、通常は防食電流密度の初期値を海水中で 100 mA/m^2 としており、水質が悪く過去の経緯などからみて 100 mA/m^2 では十分に電防効果を発揮しないおそれがある場合には 100 mA/m^2

より大きい値を用いることがある。調査事例の中でも100 mA/m²より大きい値で設計しているものが二三ある。

水質が汚染している場合は防食電流密度を大きくとる必要があるといっても、何をもって水質が汚染しているかを示さない限り、その場所での実績を参考にできるような場合を除いて実際の設計に適用することは困難である。防食電流密度が水質の何かの指標と対応づけられることが必要である。

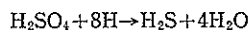
電氣防食調査の結果から防食電流密度の関係を検討する。ただし、水質は同一場所でも常に一定とは限らないし、水質試験の各指標が防食電流密度に及ぼす影響についての機構が十分わかっていないから、防食電流密度と水質の関係を細かく求めることは困難であろう。現段階では工学的に意味がある範囲で両者の関係が求まればよいと考える。設計法としては通常の水質の場合と、水質の影響のため防食電流密度を通常より大きくとる必要がある場合に分類して防食電流密度の値を定めるのが実際的と思われる。これは上記の清浄海域と汚染海域に対応するような分類であるが、大きな防食電流密度を必要とするような水質が汚染した水質だけであるかどうかはわからないから、ここでは汚染とはいわずに、防食電流密度が大きい水質ということにする。以下においては通常の水質と防食電流密度が大きい水質に分けられるように、また水質の指標はできるだけ簡単になるように調査結果を整理する。

電氣防食調査において実施した水質試験の項目は、水温、pH、酸化還元電位、比抵抗、塩素イオン、溶存酸素、COD、アンモニウムイオン、硫黄イオン、懸濁物質および硫酸塩還元菌である。ただし硫酸塩還元菌は一部の調査でのみ行った。調査結果をみると防食電流密度が大きいものには水質試験の何かの項目の値が清浄な海域における値よりも劣っているものが多かった。なお、清浄な海域における水質については次のような値⁷⁾が目安になる。pH=7.5~8.5、溶存酸素=6~10 ppm、アンモニウムイオンは極微量、イオウイオンはなし、塩素イオン=18,000~22,000 ppm。調査で実施した水質試験項目と防食電流密度の相関性を調べたところ、それら試験項目のなかで防食電流密度との対応が比較的好かったのが、塩素イオン、アンモニウムイオン、溶存酸素であった。すなわち塩素イオン濃度は小さいほど、アンモニウムイオン濃度は大きいほど、溶存酸素濃度は小さいほど防食電流密度が大きい傾向があった。

(1) 防食電流密度と溶存酸素の関係

溶存酸素濃度と防食電流密度の関係については次のよ

うにいわれている。鋼の腐食の機構からいえば溶存酸素の増大は腐食反応を促進させ、したがって防食電流密度は大きくなり、逆に溶存酸素が減少すると防食電流密度は小さくなるはずである。しかし実際の汚染海水においては、溶存酸素の欠乏にともなって嫌気性硫酸塩還元菌の繁殖が活発になり腐食が進行する。硫酸塩還元菌による腐食の機構は硫酸塩還元菌が次の反応を促進させ、こ



のときに生じるエネルギーを生育のエネルギーとしているため、腐食反応により生じる水素を消費して鉄表面を復極させることと、上記の反応により生じる硫化水素が腐食を促進させる。汚染海域(Cl⁻=8,000~14,000 ppm, DO=0~1 ppm, S²⁻=海水中2 ppm, へどろ中80 ppm)において防食電流密度が300 mA/m²程度であった報告もある⁸⁾。

電氣防食調査における水質試験では、溶存酸素の平均値は3~11 ppmに分布した。ここに平均値とは、海水の表層、中層、下層の満潮時および干潮時の6個の試験値の平均である。平均値が6 ppm未満のものが4例あり、いずれも防食電流密度(定常値)が大きかった(45~72 mA/m²)。しかし6 ppm以上ではばらつきが大きく50 mA/m²をこえるものもあり、溶存酸素と防食電流密度の間に明確な傾向はみられなかった。通常の海水の溶存酸素の濃度は5~6 ppm以上といわれるから、6 ppm未満は通常よりは溶存酸素が不足しているといえる。そこで溶存酸素の平均値が6 ppm未満の4例について硫酸塩還元菌の活動の有無を調べる。表-3に4例の硫酸塩還元菌に関係する試験項目の値を示す。水質の硫酸塩還元菌の試験は一部の調査(10例)でしか行っていないが、試験した事例の中では表-3のBが最大であった。通常の海水では0~10 MPN/ml (MPN: Most Probable Number)で10³MPN/mlはかなり汚染度が高い。硫黄イオンは硫酸塩還元菌の代謝生成物として生じる場合が多いとされている。硫黄イオンについては表-3のDが全調査事例中の最大で、D以外はごく微量かまたは検出されなかった。酸化還元電位と嫌気性腐食の程度については表-4のような関係がある⁹⁾。酸化還元電位は全調査事例中Aが最も低く、表-4にてらしてやや嫌気性腐食の傾向があるが、A以外は平均値で340 mV以上であった。底質の硫酸塩還元菌については10⁶MPN/ml台が最大で3例あった。それらが表-3のA, B, Cであり、いずれも防食電流密度が大きい。10⁶MPN/ml以下では防食電流密度との間にはっきりした傾向はみられなかった。底質の硫化物については硫酸塩還元菌が10²~

表-3 水質, 底質試験結果

調査事例	水 質				底 質	
	溶 存 酸 素 (ppm)	硫酸塩還元菌 (MPN/ml)	硫黄イオン (ppm)	酸化還元電位 (mV)	硫酸塩還元菌 (MPN/ml)	硫 化 物 (ppm)
A	3.0~3.8 (3.3)	0	0	+178~+384 (+271)	1.4×10^6	4,200
B	2.5~5.3 (4.2)	1未満~ 1.1×10^3	0	+350~+372 (+360)	1.1×10^6	2,000
C	4.8~6.8 (5.6)	0	0	+323~+405 (+366)	1.1×10^6	1,500
D	0.8~5.7 (3.1)	—	0.1未満~1.2	+464~+550 (+499)	1.4×10^3	970

() 内は平均値

表-4 酸化還元電位と嫌気性腐食の程度⁹⁾

酸化還元電位 (mV)	嫌気性腐食の程度
<100	激 烈
100~200	中 程
200~400	軽 微
>400	無 腐 食

10⁴MPN/mlでも硫化物が4,000~5,000ppmのものもあり両者の相関は試験値からはよくわからなかった。以上のように、硫酸塩還元菌の影響はある程度はうかがえるが、表-3の4例に共通して硫酸塩還元菌の活動を示す試験項目がないことから確かなことは言えない。硫酸塩還元菌は25~35℃を最適温度とすることに対して、調査時点が10月後半から3月始めの冬季であったため水温が10℃前後のものが多かったことも影響していると思われる。

溶存酸素濃度が6ppm未満では防食電流密度が大きかったことは一つの目安となる。しかし6ppm以上でも防食電流密度が大きい事例があるので、溶存酸素のみで防食電流密度と水質との関係は表せない。

(2) 防食電流密度と塩素イオンおよびアンモニウムイオンの関係

塩素イオンは通常の海水では19,000ppm程度であるが、河川水や排水などの流入があると減少する。海水の塩分濃度と腐食との関係は、一般には電気伝導度と溶存酸素量で説明されている。すなわち塩分濃度が増すと電気伝導度も増すが、図-7¹⁰⁾に示すように溶存酸素量は塩分濃度が高い領域では減少するため、腐食速度はNaClが1%前後で最大となる。したがって海水が河川水によ

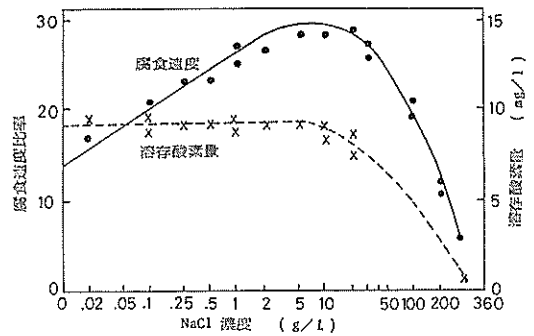


図-7 鋼の腐食と塩分濃度の関係¹⁰⁾

り若干希釈されると腐食速度は増大する。図-7では腐食速度の変化はあまりないが、図-8¹¹⁾のような調査結果もある。

アンモニウムイオンはチッ素を含む有機化合物が腐敗して生じる。復水器管に腐食が生じている発電所の冷却水のアンモニウムイオン濃度が高い事例が報告されている¹²⁾¹³⁾。

以上のように塩素イオンは減少すると、またアンモニウムイオンは増加すると腐食は進行する傾向がある。防食電流密度については、調査結果は塩素イオン濃度が低いと、またアンモニウムイオン濃度が高いと防食電流密度が大きい傾向を示した。特にアンモニウムイオンが防食電流密度との対応がよかった。しかし例外もあるのでアンモニウムイオンのみで水質を表すのは適当でない。このため二項目以上を組み合わせて水質を表す係数をつくることを考える。溶存酸素は前述のように6ppm以上では傾向がはっきりしないので、アンモニウムイオン

電気防食調査に基づく防食電流密度の検討

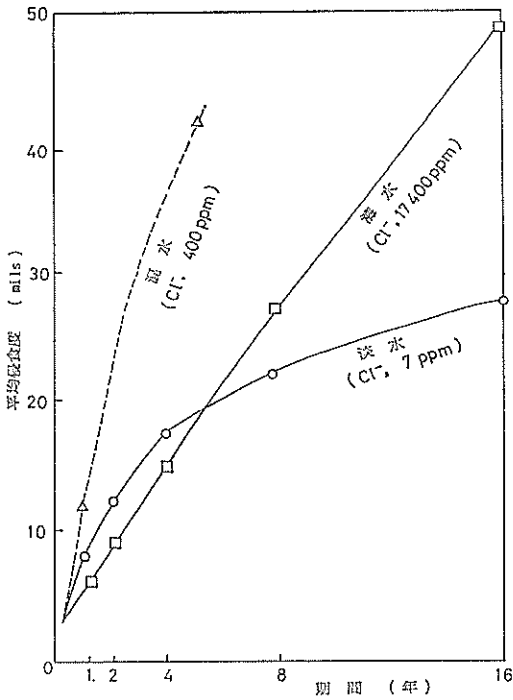


図-8 種々の塩分濃度における鋼の腐食¹¹⁾

と塩素イオンを用いる。

アンモニウムイオン濃度 (ppm 表示) に塩素イオン濃度 (%表示) の逆数を加えた値 $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-}$ に対して防食電流密度 (定常値) を示すと 図-9 のようになり、水質

と防食電流密度との関係をかなりよく表すことができる。ここにアンモニウムイオン濃度および塩素イオン濃度の値は、満潮時および干潮時における海水の表層、中層、下層の値を平均したものである。

図-9にみられるように $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-}$ が 0.8 未満では防食電流密度 (定常値) は 40 mA/m² 未満であり、0.8 以上では 40 mA/m² をこえるものがある。なお $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-}$ が 0.8 以上では防食電流密度のばらつきが大きい

が、これについては後で検討する。

図-9において防食電流密度の大きさにより二つの領域に分けるならば、 $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-} = 0.8$ がその境界になっている。

ところで水質を $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-}$ で表すと、塩素イオンについては小さくなるほど、たとえば $\frac{1}{Cl^-}$ が 0.8 以上 (Cl^- は 1.25% 以下) ならば、アンモニウムイオンの有無にかかわらず $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-}$ は 0.8 以上となり水質が悪く防食電流密度が大きいことになる。さらに $Cl^- = 0$ では $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-}$ は無限大となる。したがって $NH_4^+ + \frac{1}{Cl^-}$ が適用できる塩素イオン濃度の範囲を検討する必要がある。

防食電流密度を 40 mA/m² 以上と未満に分けて NH_4^+ および Cl^- に対して示すと 図-10 のようになる。防食電流密度の 40 mA/m² 以上が多いのは、 $Cl^- = 17,000 \sim 18,000$ ppm で NH_4^+ が 0.3 ppm 以上、および $Cl^- = 14,000 \sim 17,000$ ppm で NH_4^+ が 0.1~0.3 ppm の範囲である。図において $Cl^- = 14,000 \sim 16,500$ ppm で NH_4^+ が 0.3 ppm 以上の領域には点がない。この領域の水質

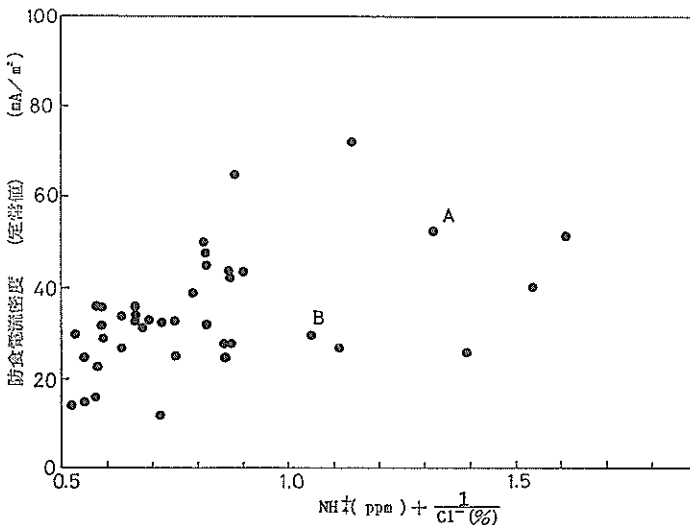


図-9 防食電流密度 (定常値) と水質の関係

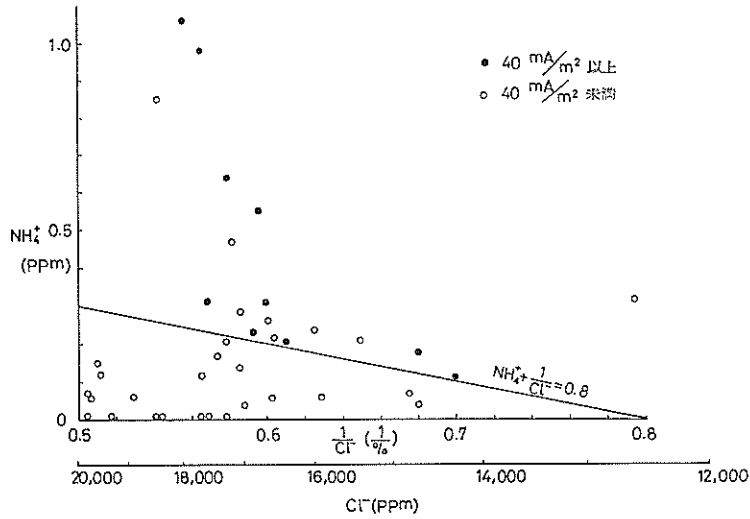


図-10 防食電流密度（定常値）と NH_4^+ 、 Cl^- との関係

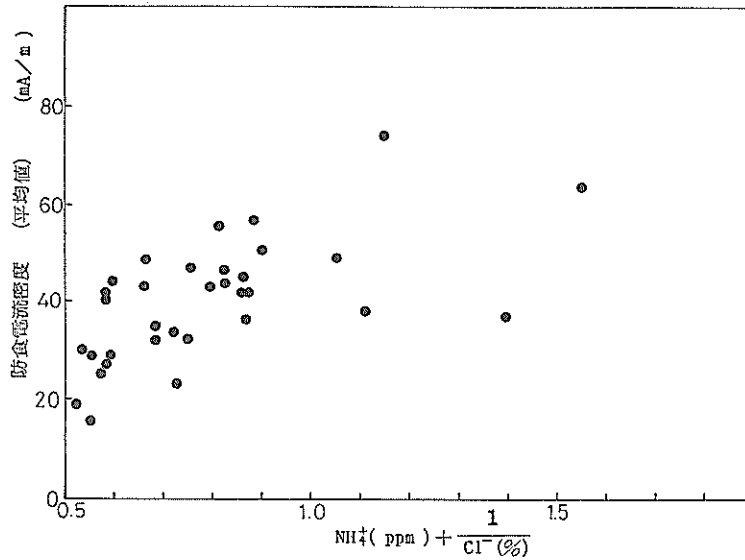


図-11 防食電流密度（平均値）と水質の関係

である場合は少ないのかもしれない。 Cl^- が 14,000 ppm 以下は 1 点しかなく、防食電流密度は 40 mA/m^2 未満である。これより $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が適用できる塩素イオン濃度の範囲は 14,000 ppm 以上とみてよいと考えられる。

また、河川水等が流入する場合は、汚染物質を含むことが多いが、それらを含まない清水が流入する場合、すなわち河川水等の流入により汚染され、同時に塩素イオン濃度も希釈されるのではなく、単に塩素イオン濃度の

みが希釈される場合にも図-9が適用できるかの問題がある。これに対しては、調査結果には明らかにこれに該当するような例はないが、図-7においては NaCl が 1% 程度以上、すなわち塩素イオン濃度が 6,000 ppm 程度以上の範囲では塩素イオン濃度が小さいほど腐食速度が大きくなっていることから、清水が流入する場合も防食電流密度は大きくなる傾向があり図-9は適用できるとみてよいと思われる。ただし、この調査結果からは塩素イオン濃度の適用の範囲は 14,000 ppm 以上であるから、こ

の適用範囲内では塩素イオン濃度の値のみで $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上とならない。すなわち塩素イオン濃度のみで $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上となる場合は対象外である。

なお、清浄な海域においては塩素イオン濃度は 18,000 ppm 以上、アンモニウムイオンはごく微量といわれるから、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ は 0.8 より小さくなる。

次に防食電流密度の平均値についても $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ との関係調べた。前後 2 回調査した構造物については 2 回の水質試験結果の平均を用いた。その結果を図-11 に示す。防食電流密度の平均値は電防開始当初からの水質の影響を受けているから、その間に水質が変化している可能性があるので一時点の試験値とは合わなくてもおかしくないが、結果は図-9 と同様の傾向を示した。図-9 において防食電流密度 (定常値) が 40 mA/m² 以上の有無の境界となった $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-} = 0.8$ についてみると、図-11 では 0.8 未満では防食電流密度 (平均値) は 50 mA/m² 未満で、0.8 をこえると 50 mA/m² 以上のものがある。

5. 防食電流密度に及ぼす干満帯の影響

電気防食においては干満帯部分の鋼材に流入する防食電流密度は、海中部に流入するそれよりも大きいといわれている。これは海中部では OH⁻ の生成反応であるのに対して、干満帯では干潮時に大気中で酸化したさび層の還元反応であることに起因すると考えられている。

電気防食の水槽実験においても、干満帯の防食電流密度は海中部よりかなり大きくなっている¹⁴⁾¹⁵⁾。

電気防食の設計においては、防食電流密度は干満帯と海中部を区分せず同一の数値を使っているが、陽極の配置の際にこのことを考慮して海中部の上部を密に配置している。

図-9 において A と B は同一港内の比較的近くに存在する構造物である。この二構造物について、海中部の防食電流密度を B で得られた 30 mA/m² として、A の干満帯の防食電流密度を推定すると 250~350 mA/m² 程度となる。水槽実験¹⁵⁾でもこの程度の海中部と干満部の防食電流の比が得られている。ただし実験では潮位差が一定であり、海中部と干満帯の鋼材面積がほぼ同じという相違点がある。さらに電防経過期間は約 1 年で 1 ケースのみである。また A と B とは近くにあるといっても水質は全く同じではない。したがってこれのみから断定はできないが、少なくとも二つの構造物 A、B の防食電流密度の相違には干満帯の部分が防食対象となっているか否かが最も影響していると考えられる。

そこで干満帯の防食電流密度に及ぼす影響をみるため、図-9 について鋼材の露出部の上端の高さを、+0.5 m および +1.0 m を境に三段階に分けてみた。その結果は図-12 のようになり、鋼材の露出部の上端高が +0.5 m 以下では防食電流密度は小さくなっており、特に $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上であって防食電流密度が小さいものはほとんどすべて鋼材露出上端高が +0.5 m 以下となっ

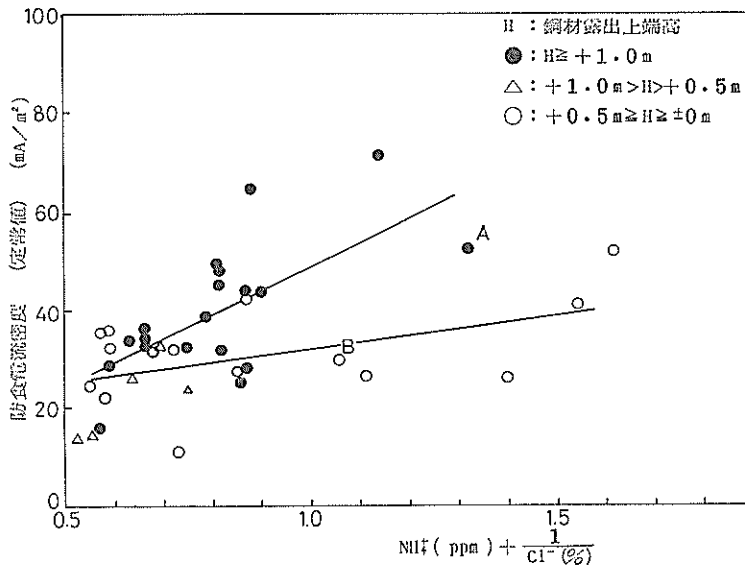


図-12 防食電流密度 (定常値), 水質, 鋼材露出上端高の関係

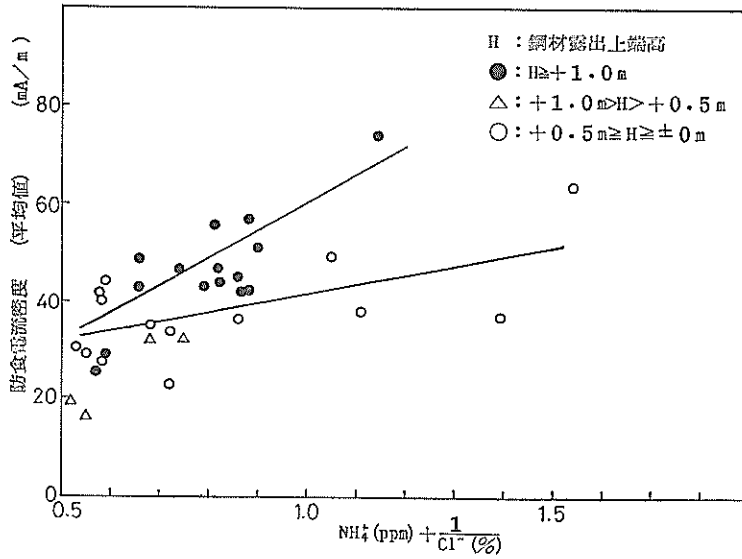


図-13 防食電流密度 (平均値), 水質, 鋼材露出上端高の関係

ている。図-12における鋼材露出上端高+1 m以上および+0.5 m～±0 mのそれぞれの各点に対して最小自乗法により直線を表すと図示のようになり、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が大きいほど干満帯被覆の影響が著しい。

図-11の防食電流密度の平均値についても同様に鋼材露出部の上端高で区分すると図-13のようになる。図中の直線は図-12と同じく鋼材露出上端高+1 m以上と+0.5 m～±0 mのそれぞれの各点を最小自乗法により表したものである。

干満帯と海中中部で防食電流密度が異なるならば、それらを分離して知ることができればのぞましい。しかし調査結果からそれを求めることはできなかった。たとえば干満帯の鋼材が同じ程度露出している場合は、構造物の水深により防食電流密度の値がかわってくるはずである。しかし調査構造物は水深が浅いものは少ないこともあるが、それらの防食電流密度が大きい傾向はなかった。また先に述べた図-9のAの干満帯の防食電流密度の試算にしても、海中中部の値の設定や干満帯の範囲の定め方によって結果は変わってくる。たとえば干満帯をL.W.L.以上とするか平均干潮面以上とするかによって、あるいはAの水質がBよりは悪いとみて海中中部の防食電流密度の値を30 mA/m²より大きくとると試算結果は異なってくる。また直接比較できる事例が他にない。このようにこの調査結果から干満帯の防食電流密度を抽出することは難しい。

6. 電防初期の状況

防食電流密度は電気防食開始当初の値から時間経過とともにしだいに減少して定常値に落ち着く。防食電流密度が減少するのは、通電によってカソードである鋼材面に石灰質皮膜が生成すること、陽極と鋼材との有効電位差が減少することなどによる。防食電流密度が定常値に低減するまでの期間は、石灰質皮膜の生成や、構造物や陽極の電位差が種々の条件の影響をうけることなどにより一定ではない。数か月から数年の範囲におよぶが、一般には環境が良好なほど、また初期の通電量を大きくするほど低減期間は短いといわれている。

電気防食調査においては電気防食開始初期についての調査は行っていないので、実際の防食電流密度の初期値および低減期間は不明である。そこで陽極の消耗量および発生電流の測定値から防食電流密度が定常値になるまでの間の状況を推定してみる。電防開始から調査時点までの陽極の消耗量に相当する電気量から防食電流密度の定常値分に相当する電気量を減じた値、すなわち図-14の斜線部分の面積を求めた。この値を便宜的に低減電気量とよぶことにする。低減電気量が大きいほど初期の防食電流密度が大きい、低減期間が長いことになる。

低減電気量を前述の水質を表す係数 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ に対して表すと図-15のようになる。低減電気量は電気防食開始当初から調査時点までの水質の影響をうけるので、一時点のみの水質を用いるのは問題があるが、他にデー

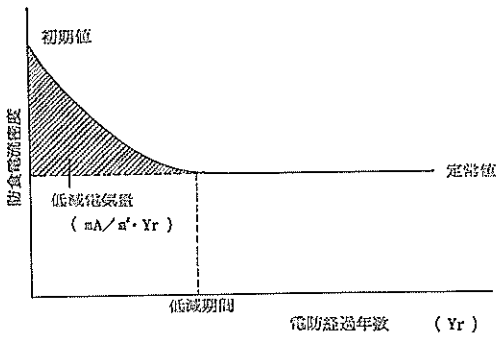


図-14 低減電気量

タがないのでこれによった。ただし2回調査を行ったものについては2回めの調査結果から求めた低減電気量に対して、水質の試験値は2回の平均を用いた。なお発生電流の測定値から求めた防食電流密度が陽極の消耗量より求めたものよりも大きく、低減電気量がマイナスと算出されるものは0とした。2回めの陽極を取り付けたケースについては、防食電流密度の変化はないとして除外した。また3.で述べたような防食電流密度(定常値)の真の値ではないかもしれない可能性のあるものや、隣接の陽極が消耗してしまっているなど周辺の問題があると考えられるもの数点を除外した。図-15より低減電気量は $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が大きいほど大きくなる傾向はよみとれる。 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が0.8付近までは低減電気量は

直線的に増加し、その後はほぼ一定になっている。ここでも $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ の0.8が境になっている。

次に、防食電流密度の初期値は測定されていないので設計値を実際の初期値と仮定し、さらに時間とともに直線的に減少して定常値にいたるとして、定常値になるまでの低減期間を求めると、0年から10年の間に分布した。ここで求めた低減期間は仮定にもとづく計算値であって、たとえば防食電流密度の初期値が設計値の2倍であれば低減期間は1/2になるように実際の低減期間はわからない。しかし事例によりかなりの差があることは確かである。

防食電流密度の初期値を大きくすると石灰質皮膜の形成が促進され、低減期間が短くなり、防食電流密度の定常値も小さくなることが期待できるといわれている。初期値を約300 mA/m² とすることにより、1か月で構造物の電位が-1000 mV(人工海水塩化銀電極基準)になり、従来の設計法と比べて陽極重量を40%減ずることができたという報告もある¹⁰⁾。

図-15のAは防食電流密度の初期値を200 mA/m² として設計されているが、低減電気量はかなり小さくなっている。なおこの事例の水質は表層での試験値が著しく悪く、表層の水質を重視すれば図に示されるよりもっと汚染している。低減電気量が小さいことは初期値の大きいことのみによるのではないにしても、その効果も否定できない。調査事例には初期値の設計値が100 mA/m² より大きいものがほとんどないので、この調査から何と

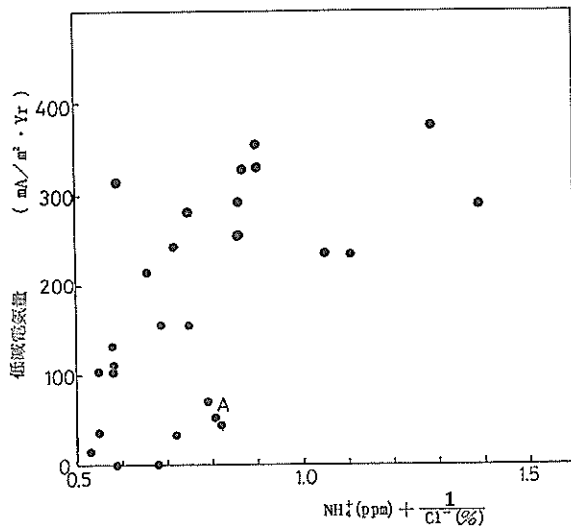


図-15 低減電気量と水質の関係

もいえないが今後の課題である。

7. 構造物の電位と防食電流密度の関係

鋼構造物に電気防食を適用する場合、構造物の電位は腐食が抑制される防食電位より卑に保たなければならない。この防食電位は経験的に -780 mV (人工海水塩化銀電極基準) とされている。調査結果では構造物の電位は図-16 に示すようにほとんどが $-840\sim-1040\text{ mV}$ の範囲にあり、 -900 mV 前後が多い。二三の例外を除いて防食電位よりかなり卑である。

電気防食を行うと鋼材面には時間の経過とともに石灰質皮膜が形成される。この皮膜は良好であれば防食電流密度の分布をよくし、所要防食電流を低減させる。皮膜の主成分は CaCO_3 と $\text{Mg}(\text{OH})_2$ であり、皮膜の組成、性能は鋼材の接する環境、鋼材の表面状態、電流密度、電位、流速などによって異なる。電位が $-900\sim-1050\text{ mV}$ 付近において最も良好な石灰質皮膜が形成されるといわれている¹⁷⁾。

したがって構造物の電位の実態が防食電位よりかなり卑であることについては、防食電流密度との関係も検討して評価する必要がある。

構造物の電位と防食電流密度(定常値)との関係を示すと図-17のようになる。ここに電位は図-16の鉛直方向の平均値を用いた。かなりのばらつきがあるが、全体的にみると電位が卑になるほど防食電流密度は小さくなる。なお、図において -800 mV 付近に数点あるがこれらは河川水が流入していたため電位が十分下らなかったと考えられるもの、調査個所の周辺に脱落した陽極のあるもの、二回めの調査で一回めの調査より電位がかなり貴になったもので、いずれも周辺の条件に何らかの問題があると思われるものである。

電位と低減電流量との関係を図-18に示す。 -800 mV 付近の点を除くと、かなりのばらつきはあるが、電位が卑なほど低減電流量が小さい傾向がある。しかし電位と水質の間には明確な関係は見出せなかった。 -950 mV より卑な構造物は一例を除いて鋼材露出部の上端が $+1\text{ m}$ 未満であった。

流電陽極方式では構造物の電位を任意に調節することは困難であるが、防食電位よりかなり卑な $-900\sim-1000\text{ mV}$ 程度であっても、過剰な防食をしているというよりむしろ好ましい状態にあるといつてよいと思われる。塗装と電気防食を併用する場合、 -1100 mV 程度になると

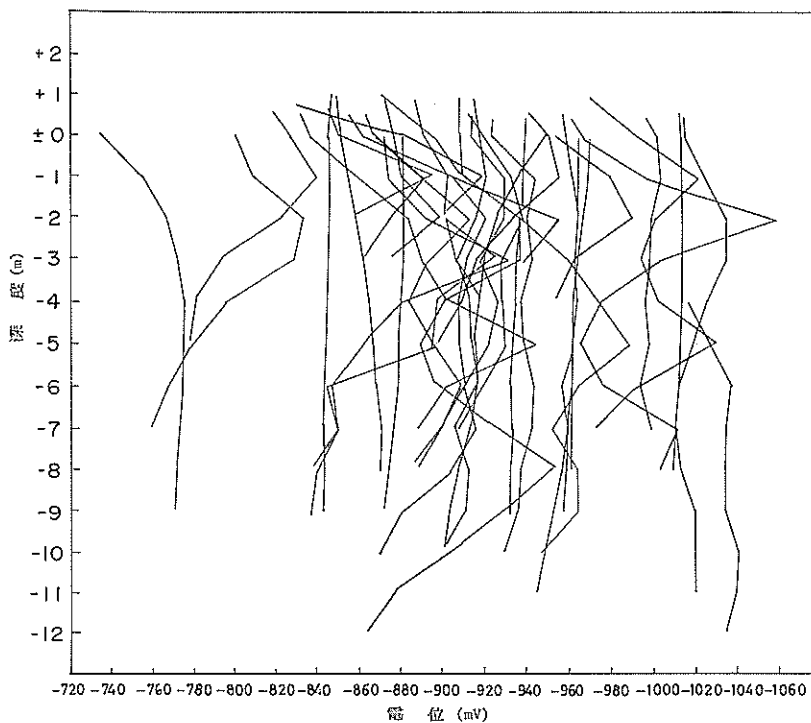


図-16 構造物の電位(海水塩化銀電極基準)

電気防食調査に基づく防食電流密度の検討

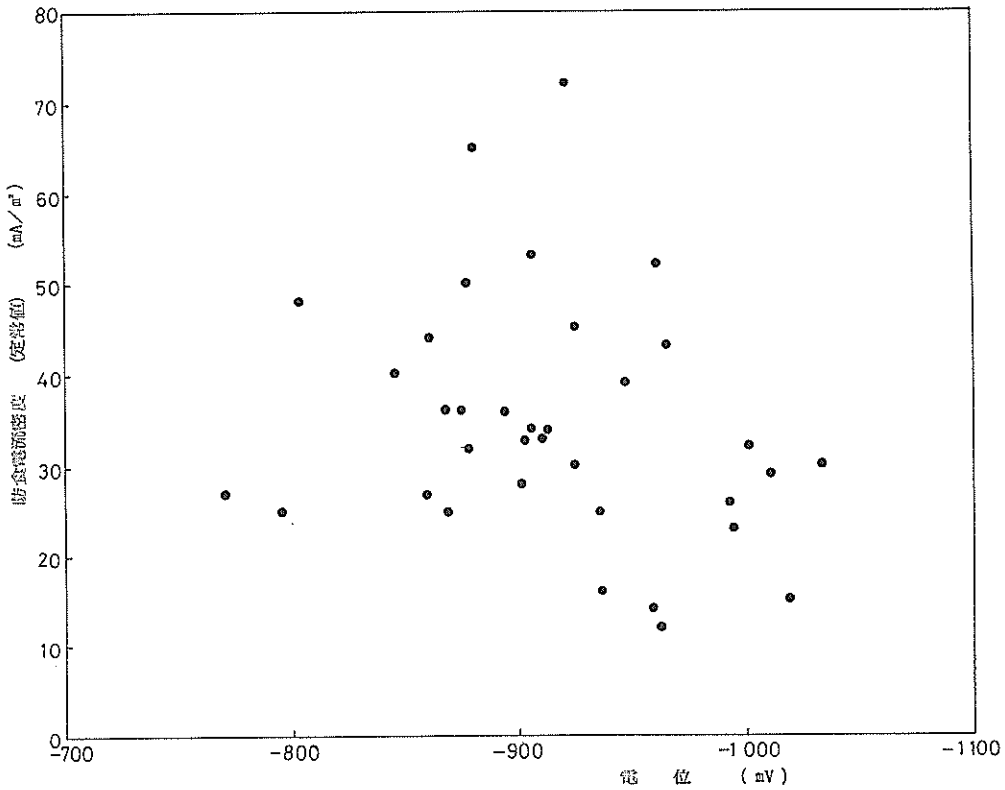


図-17 電位と防食電流密度（定常値）の関係

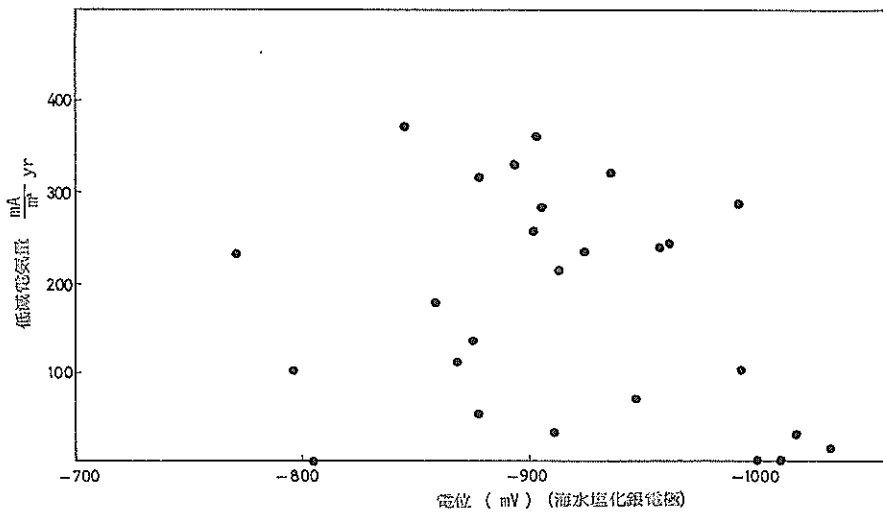


図-18 電位と低減電気量の関係

水素ガスの発生による塗膜の劣化の問題が生じるといわれるが、調査結果では-1100 mV までになっている例はない。アルミニウム合金陽極による流電陽極法の場合、陽極自体の電位が-1000~-1100 mV 程度であるから^{11~14)}、構造物の電位がそれまで下がることはまずないと思われる。

8. 陽極の寿命に影響する要因

電気防食調査においては、調査結果より陽極の寿命を推定している。推定の方法は発生電流の測定値を用いる方法と、陽極の消耗量から求めた平均発生電流を用いる方法の二つの方法によっている。既報^{11~14)}では前者を電流測定による方法、後者を重量測定による方法とよんでいる。電流測定による方法は次式による。

$$\text{推定残寿命 (yr)} = \frac{\text{陽極残存重量 (kg)} \times \text{陽極有効電気量 (A \cdot \text{yr} / \text{kg})}{\text{発生電流 (A)} \text{ (測定値)}} \quad \dots(1)$$

$$\text{ここに、陽極有効電気量} = \frac{1}{3.8} (\text{A} \cdot \text{yr} / \text{kg})$$

$$\text{推定総寿命 (yr)} = \text{調査時点までの電防経過期間} + \text{推定残寿命} \quad \dots(2)$$

重量測定による方法は

$$\text{平均発生電流 (A)} = \frac{\text{陽極消耗量 (kg)} \times \text{陽極有効電気量 (A \cdot \text{yr} / \text{kg})}{\text{調査時点までの電防経過期間 (yr)}} \quad \dots(3)$$

$$\text{推定残寿命 (yr)} = \frac{\text{陽極残存重量} \times \text{陽極有効電気量}}{\text{平均発生電流}} \quad \dots(4)$$

の2式と(2)式による。

(3)式による平均発生電流の値は発生電流の測定値よりも一般には大きいから推定寿命は重量測定による方法の方が短くなる。

推定値は表-5に示す。設計寿命と比較すると重量測定による方法では33例中14例が推定寿命が設計寿命より短く、電流測定による方法ではその14例のうち6例が設計寿命より短くなっている。すでに述べたように防食電流密度は水質と鋼材の干渉帯部分が露出しているか否かに影響されることから、推定寿命と防食電流密度の平均値の設計値、水質 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ 、鋼材露出上端高との関係を調べた。表-5において推定寿命の欄を太枠で囲んだものは設計寿命より短いもので、防食電流密度(平均値)の設計値の欄は 40 mA/m^2 以下のもの、水質は $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上のもの、鋼材露出上端高は $+1.0 \text{ m}$ より高いものを太枠で囲んだ。重量測定による方

法により求めた推定寿命が設計寿命より短い14例中11例が、防食電流密度(平均値)の設計値、水質、鋼材露出上端高の3項目のうち2項目以上が太枠で囲まれている。また電流測定による方法より求めた推定寿命が設計寿命より短い6例は全部が、3項目中2項目以上が太枠で囲まれている。なお重量測定による方法の例外の3例については電流測定による方法による推定寿命は設計寿命よりかなり長くなっている。逆に防食電流密度(定常値)の設計値、水質、鋼材露出上端高の3項目中2項目以上が太枠で囲まれているが推定寿命の欄が太枠で囲まれていないのが2例ある。そのうち1例は推定寿命はわずかに設計寿命を上回っているだけで、第一回目の調査においては設計寿命より短くなっている。またもう1例は防食電流密度(定常値)の設計値を 100 mA/m^2 と通常の場合の約2倍としているため、もし 50 mA/m^2 程度の設計値としていたら推定寿命は設計寿命より短くなったと考えられる。

以上のように防食電流密度(平均値)の設計値が 40 mA/m^2 以下、水質 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上および鋼材露出上端高が $+1 \text{ m}$ 以上の3項目中2項目が該当する場合は、陽極の寿命が設計寿命を満足しない可能性が高い。

9. 設計法に関する検討

まず現行の一般的な電気防食の設計法の要点は次のとおりである。

1) 電気防食の適用範囲は平均水面(M.S.L.)以下とする。

2) 海中部の防食電流密度の初期値は通常 100 mA/m^2 が用いられる。水質が汚染している場合は $20 \sim 50 \%$ 増とする。また陽極の寿命を求めるとき、あるいは耐用年数に対して陽極の必要重量を求めるときには、海中部の防食電流密度の陽極寿命期間中の平均値を、初期値 100 mA/m^2 に対して 50 mA/m^2 程度とすることが多い。

3) 電気防食の防食率は海水浸し(濃)率 100% で 91% 以上とする。

4) 構造物の電位は防食電位(人工海水塩化銀電極基準で、 -780 mV)より卑にする。

ここでは、おもに2)項の防食電流密度について検討する。1)、4)項についても防食電流密度と関係する部分は検討の対象とする。

9.1 水質と防食電流密度

水質と防食電流密度との関係について現行の設計法は、汚染海域では清浄海域の $20 \sim 50 \%$ 増の防食電流密

電気防食調査に基づく防食電流密度の検討

表-5 陽極の推定寿命

港名	鋼材種類	設計寿命 (年)	推定寿命(年)		防食電流密度 (平均値)の設計 値 (mA/m ²)	水質 ($\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$)	鋼材露出高 上端 (m)
			重量測定	電流測定			
小樽	杭	20	21.7	24.4	50	0.58	±0
	直線矢板	20	21.2	24.1	50	0.58	±0
苫小牧	矢板	20	24.3	26.6	40	0.55	±0
室蘭	矢板	30	36.2	45.3	50	0.72	+0.5
塩釜(仙台)	鋼管矢板	10	24.3	32.5	50	0.55	+0.6
千葉	杭	10	10.8	10.9	50	1.61	±0
千葉(船橋)	鋼管矢板	10	9.1	9.1	50	0.88	+1.0
東京	鋼管矢板	20	16.9	33.5	60	0.86	+0.5
横浜(大黒)	杭	10	10.7	12.2	50	1.05	±0
	(本牧) 矢板	20	13.9	17.4	※50→65	1.32	+1.4
		12	10.7	13.0	65		
田子ノ浦	矢板	5	8.3	9.6	100	0.81	+1.0
伏木富山(富山)	矢板	20	24.8	28.5	30	0.58	±0
	(伏木) 矢板	20	18.9	21.0	40	1.11	+0.3
衣浦	杭	20	17.5	17.6	40	0.87	+2.0
	直線矢板	20	17.5	21.9	40	0.87	+2.0
名古屋(空見)	矢板	20	(18.2) 20.8	(18.9) 20.5	45	(0.82) 0.82	+1.0
	(金城) 鋼管矢板	20	16.5	18.3	40	0.79	+1.5
舞鶴	杭	20	18.7	25.8	50	0.59	±0
堺泉北	杭	20	18.8	22.8	55	(1.14) 0.66	+1.0
	直線矢板	20	(14.6) 17.8	(15.0) 21.9	55	(1.14) 0.66	+1.0
尼崎西宮(尼崎)	杭	20	14.4	15.6	40	1.54	+0.5
小松島	杭	20	29.1	31.3	50	0.68	+0.5
岡山	矢板	20	(18.1) 20.0	(24.7) 23.0	40	(0.75) 0.63	+0.7
	境 杭	10	15.8	20.1	45	0.72	+0.3
	矢板(土留)	10	12.4	12.8	50	0.87	±0
下関	杭	20	18.9	24.7	50	0.66	+2.05
北九州(門司)	矢板	25	(16.0) 19.1	(21.9) 20.9	40	(0.86) 0.63	+1.7
	(洞海) 矢板	20	21.8	27.8	50	1.39	+0.5
苅田	杭	20	23.7	39.1	45	0.57	+3.2
佐伯	杭	20	40.1	38.1	55	0.59	+2.4
黒之瀬戸	鋼板(橋脚)	20	65.1	68.4	100	0.53	-4.0
那覇	矢板	20	26.9	55.0	50	0.52	+0.8

() : 前回調査時 横浜(本牧) : 途中で設計変更し, 下段の陽極追加。 ※当初設計→変更設計

度を必要としている。しかし汚染海域の定義は明確でない。

4. においては、水質による区分を通常の場合とそれより大きい防食電流密度の場合の二つに分類するように電気防食調査の結果を整理した。

前述のように、溶存酸素濃度が 6 ppm 未満では防食電流密度（定常値）が大きかった。またアンモニウムイオン濃度（ppm）と塩素イオン濃度（%）を用いた $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 未満では防食電流密度の定常値は 40 mA/m² 未満、陽極寿命期間中の平均値は 50 mA/m² 未満で、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 をこえると、定常値、平均値とも大きい値のものがあった。なお通常の清浄な海域では $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ は 0.8 より小さい。

一時点の水質の限られた試験項目の値と防食電流密度を関係づけることは問題もあるが、以上のことは電気防食の設計にあたって一応のめやすになると考えられる。なお $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が適用できる塩素イオン濃度の範囲は前述のとおり 14,000 ppm 以上である。

$\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 未満で防食電流密度の定常値が 40 mA/m² 未満、平均値が 50 mA/m² 未満であることは、現行の設計で最も一般的に用いられている定常値および平均値の設計値が 40~50 mA/m² であることと一致するから、現行の設計法とも整合する。

したがって $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ を指標に用いるなら、0.8 未満では防食電流密度の設計値としては、定常値は 40 mA/m²、平均値は 50 mA/m² とすればよい。なお、この調査では陽極の推定寿命はほとんどが約 20 年以上となったから、防食電流密度の平均値は、ここでは約 20 年以上の陽極寿命に対するものである。

電気防食の設計においては、陽極のタイプおよび個数を決定するには防食電流密度の初期値が関係し、陽極の寿命あるいは寿命が定められている場合の所要重量の算出には防食電流密度の平均値が関係する。現行の設計では、定常値と平均値の値を区別しないで用い、平均値のことを定常値といっていることもある。設計法によってはそれらの数値を区別しているものもある¹⁶⁾。最初に取り付ける陽極の設計では平均値が用いられるので、定常値を区別しておく必要はないが、最初の陽極が消耗後二度めの陽極を取り付ける際には、防食電流密度はすでに定常値になっているから、陽極の寿命の計算あるいは所要重量の計算には定常値を用いたほうが合理的である。

次に $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上の範囲については、図-9~図-13 にみられるように防食電流密度の値はかなりの幅の間に分布している。特に鋼材露出上端高によって異なっている。したがって近傍の既設構造物の実績を参考

にできる場合はそれによるのがよい。参考になるデータがない場合については次のようにすればよいと考える。干満帯が被覆されている場合は後で検討することにして、ここでは干満帯も含めた場合を扱う。なお、調査結果からは干満帯と海中部の防食電流密度を分離できなかったことは 5. で述べたとおりである。図-9 において防食電流密度（定常値）が 60 mA/m² 以上のものが 2 点あるが、それらは 3. で述べたように、定常値に達していない可能性がある点であり、図-11 の平均値の最大の点も、そのうちの一点である。また従来汚染海域での防食電流密度は清浄海域の 20~50% 増といわれていることも考慮すると、設計値としては、定常値は 50~60 mA/m²、平均値は 60~70 mA/m² が適当であると考えられる。

初期値については直接調査を行っていないので推論する。まず、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 未満では、上記の定常値および平均値の値と、一般にそれらの値は初期値の 40~50% 程度といわれていることから、現在用いられている 100 mA/m² は適当な値と考えられる。調査結果では初期値を 100 mA/m² として設計された構造物の電位は、一部の例外を除いて防食電位より十分卑であり、また陽極の寿命も、防食電流密度の平均値の設計値が 50 mA/m² であれば、設計寿命を満足していることから初期値の 100 mA/m² は妥当といえる。

次に、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上については、初期値は 100 mA/m² より大きくとる必要がある。調査事例では 100 mA/m² より大きいものが少ないので、調査結果からは直接はいえないが、従来いわれている清浄海域と汚染海域との比、初期値と定常値および平均値との比から考えると、初期値の設計値としては 130~150 mA/m² 程度が適当と思われる。

初期値を上記の値よりも更に大きくとって、定常値になるまでの期間を低減することについては、場合によってはそのほうが経済的になることもあり得ると思われる。特に $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が大きい場合は図-14 のように低減電氣量が大きいから、その効果が大きいと思われる。今後検討に値する問題と考えられる。

以上においては $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ の 0.8 という値をもとに検討してきた。しかし $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ のみに注目すればよいということではなく、また水質の変動についても注意しなければならない。

この調査では溶存酸素濃度が 6 ppm 未満のものは、すべて $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上であったが、溶存酸素濃度が低い場合は、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 未満であっても注意しなければならない。溶存酸素については、環境基

準¹⁰⁾においては海域での類型Aが7.5 ppm以上、類型Bが5 ppm以上、類型Cが2 ppm以上とされているので、類型Cの海域では特に注意する必要がある。

また、調査結果では硫酸イオンはほとんど検出されず、pHや酸化還元電位などにも異常な値はなかったが、これらの項目において異常な値が得られたときは別途検討しなければならない。

ここでは、水質試験の値は満潮時および干潮時における海水中の表層、中層および下層での6個の試験値の平均値を用いた。ほとんどの場合、それら6個の値にはあまり差がなかったが、中には表層での値が著しく悪いものもあった。ここでの例では平均値を用いても $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が0.8より小さくならなかったが、このような場合はもし平均値が0.8より小さくなったとしても、0.8以上と同様に扱うのがよいと考える。

また海水は一般に冬季のほうが夏季より清浄である。電気防食調査は冬季に行っている。したがって夏季の水質で判断すると一般的には安全側である。しかし正確を期するには冬季または通年の水質をもとに判断するのがよい。

9.2 干満帯被覆の効果

5.で述べたように、干満帯が被覆されていると防食電流密度の低減に効果がある。電気防食の防食率も干満帯では若干低下するから、その点からも干満帯を被覆することは電気防食を効率的に適用する方法である。ただし干満帯でも現行の設計法どおり平均水位以下であれば若干効率はおちるものの電気防食が有効なのはもちろんである。

ところで干満帯の定義について、下限がどこであるか、たとえばL.W.L.であるか平均干満面であるかは明確には定められていない。本文においても、これまで干満帯の定義を明確にしていなかった。図-12および図-13においては鋼材露出部の上端高の区分を+0.5 mで行ったが、これは+0.5 m程度以下では差がなかったため+0.5 mとしたのである。これより電気防食の適用に関しては、少なくとも±0 mもしくはL.W.L.を干満帯の下の境界とする必要はないと考えられる。また腐食に関しては、従来から一般に平均干潮面を干満帯の境界とされていることも考慮すると、電気防食においては平均干潮面を干満帯と海中部の境界とするのが妥当と考えられる。

干満帯を被覆する場合、実際の設計においては電気防食開始までの建設中の腐食なども考慮して平均干潮面より若干深い位置まで被覆することが望ましい。

干満帯を被覆した場合、防食電流密度の値をどうとる

かが問題となる。図-12および図-13にみられるように、干満帯被覆の影響は $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が大きいほど著しい。 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が0.8で図中の二直線の差は約10 mA/m²である。これより $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が0.8未満では、設計値としては9.1で述べたとおり、初期値100 mA/m²、定常値40 mA/m²、平均値50 mA/m²とし、干満帯被覆の効果は余裕とみてもよいと考える。また $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が0.8以上の範囲では9.1で述べた値より10 mA/m²小さくともよいと思われる。この場合、平均値は50~60 mA/m²となるが、8.で述べたように平均値が50 mA/m²以上であるから干満帯が被覆されていれば陽極の寿命が設計寿命より短くなる可能性は小さい。

9.3 電位および陽極寿命の管理

電気防食の管理において、まず行わなければならないことは構造物の電位の測定であり、防食電位より卑であることを確認しなければならない。また電位の測定は定期的に行い、防食電位を満足していても、以前よりも著しく貴になっている場合は、環境の変化や、陽極の消耗、脱落などに注意する必要がある。防食電位は不足する場合はもちろん、このような場合にも原因の調査と、防食状態を回復するための措置を講ずる必要がある。

次に陽極の寿命の管理が重要である。陽極の寿命は設計どおりの結果になるとは限らない。消耗してしまったら新しい陽極を取り付けなければならない。実際の寿命が設計寿命より短い場合は設計が適当でなかったか、環境の変化があったことであり、新しく取り付ける陽極の設計において考慮しなければならない。

ここで行ったような電気防食調査を行うことは、のぞましいことではあるが、簡単には実施できない。潜水調査で陽極の消耗状態の観察、測定や、脱落の有無の確認は必要である。この際、8.で述べたように防食電流密度の平均値の設計値が40 mA/m²以下、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が0.8以上、鋼材露出上端高が+1 m以上の3項目のうち2項目以上が該当する場合には、陽極の寿命が設計寿命より短い可能性が高いことが参考になる。水質以外は既知であるから水質試験のみ行えばよい。ただし上記の3項目中2項目以上が該当しない場合は問題ないということではなく、2項目以上が該当する場合は注意する必要があるということである。

10. 結論

以上、電気防食調査の結果をもとに検討してきた事項をまとめると次のようになる。

(1) 電気防食調査において測定した陽極の発生電流より求めた防食電流密度は、防食電流密度が定常状態であ

るとみなせる期間の陽極の消耗量より換算した防食電流密度とほぼ等しかった。これより、この調査で得られた発生電流の測定値から求めた防食電流密度は、大体において防食電流密度の定常値になっているとみることができ。

(2) 陽極の発生電流の測定値から求めた防食電流密度を定常値とすると、定常値の範囲は約 15 mA/m² から約 70 mA/m² であった。ただし発生電流測定時の状況を考慮すると、実際の定常値の範囲はこれより若干狭い可能性はある。最も事例の多い防食電流密度の値は 30 mA/m² 程度であった。また陽極の推定寿命を求め、寿命期間中の防食電流密度の平均値を算出すると定常値より平均 10 mA/m² 程度大きかった。

(3) 水質と防食電流密度との関係については次のことがわかった。溶存酸素濃度が 6 ppm 未満では防食電流密度(定常値)が大きかった。ただし 6 ppm 以上でも大きい事例もあった。またアンモニウムイオン濃度(ppm表示)と塩素イオン濃度(‰表示)を用いた $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ の値が 0.8 未満では、防食電流密度(定常値)は 40 mA/m² 未満で、0.8 以上では 40 mA/m² 以上のものがある。なお通常の清浄な海水では $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ の値は 0.8 より小さい。また陽極の寿命期間中の防食電流密度の平均値の傾向も $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ で表すことができた。

(4) 防食電流密度の設計値としては、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 未満では初期値 100 mA/m²、定常値 40 mA/m²、陽極の寿命期間(約 20 年以上)中の平均値 50 mA/m² が妥当であると考えられる。 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上では、調査結果には幅があることから近傍の既設構造物の実績も考慮することががぞましい。調査結果からは初期値 130~150 mA/m²、定常値 50~60 mA/m²、平均値 60~70 mA/m²、が適当と考えられる。なお $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が適用できる塩素イオン濃度は 14,000 ppm 以上である。

また、水質の評価にあたっては、アンモニウムイオンおよび塩素イオン以外の項目の試験値や、水質の場所的および季節的変動に注意する必要がある。前述のように溶存酸素濃度が 6 ppm 未満では防食電流密度が大きかった。その他の項目についても通常の水質ではないと判断される値が得られた場合は別途検討しなければならない。また夏季の水質により判断する場合は一般には安全側であるが、冬季または通年の値より判断するほうが正確である。

(5) 鋼材の干満帯部分を被覆している場合は、露出している場合より防食電流密度が小さく、この傾向は $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が大きいほど著しかった。干満帯を被覆し

た場合の防食電流密度の設計値としては、 $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上では上記の値より 10 mA/m² 程度小さくしてもよいと思われる。

(6) 防食電流は電気防食開始当初から時間経過とともに減少して一定値に落ち着くが、それまでに要する電気量は $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が小さいほど小さい傾向がある。これより水質が清浄なほど防食電流密度の初期値が小さいか、定常値になるまでの期間が短いと推察される。

(7) 構造物の電位は、二三の例外を除いて -840 ~ -1040 mV (人工海水塩化銀電極基準)の範囲にあり、-900 mV 前後が多かった。電位が卑なほど防食電流密度の定常値が小さい傾向にあった。

(8) 陽極の寿命は、寿命期間中の防食電流密度の平均値の設計値が 40 mA/m² 以下、水質については $\text{NH}_4^+ + \frac{1}{\text{Cl}^-}$ が 0.8 以上、鋼材の露出部上端高が +1 m 以上の三項目のうち二項目以上が該当する場合、設計寿命より短い可能性が高い。

11. あとがき

電気防食調査の結果より、水質と防食電流密度との関係など電気防食の設計、管理に役立つ結論を得ることができた。

電気防食に関する今後の課題は、防食電流密度の初期値、波浪等の防食電流密度に及ぼす影響、防食率などである。

本報告においては、善一章博士の港湾技術研究所在職中の業績を利用させていただいた。記して謝意を表します。また電気防食調査に御協力いただいた関係機関の方々に厚く御礼申し上げます。(1985年11月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 善一章, 横井聡之, 阿部正美: 港湾構造物の電気防食調査(その1), 港湾技研資料, No. 475, 1984年
- 2) 横井聡之, 阿部正美: 港湾構造物の電気防食調査(その2), 港湾技研資料, No. 502, 1984年
- 3) 横井聡之, 阿部正美: 港湾構造物の電気防食調査(その3), 港湾技研資料, No. 532, 1985年
- 4) 善一章, 阿部正美: 港湾構造物の所要防食電流に関する調査, 港湾技研資料, No. 365, 1980年
- 5) 運輸省港湾局: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1979年
- 6) 建設省土木研究所, 土木研究センター: 電気防食設計指針(案)・同解説, 1983年
- 7) 大津武通: 汚染海水による腐食問題について, 第15回腐食防食討論会要旨集, 1968年
- 8) 戸村寿一: 海水汚染と金属の腐食, 表面処理ジャーナル, vol. 6, No. 11, 1973年

電気防食調査に基づく防食電流密度の検討

- 9) 電気学会：電食土壌ハンドブック，1966年
- 10) A. Hache : *Rev. de Metallurgie*, No. 1, 1956
(日本学術振興会：金属防蝕技術便覧，日刊工業新聞社，1972年)
- 11) C. R. Southwell, A. L. Alexander : *Corrosion of Metals in Tropical Waters-Structural Ferrous, Materials Protection*, vol. 9, No. 1, 1970
- 12) 大津武通，田中礼次，佐藤史郎：復水器管の汚染水腐食，防蝕技術，vol. 11, No. 6, 1962年
- 13) 山本昇三：汚染河海水による復水器管の腐食，防蝕技術，vol. 11, No. 6, 1962年
- 14) 善一章，阿部正美：集中腐食に対する電気防食の適用性，港湾技術的研究所報告，第22巻，第2号，1983年
- 15) 阿部正美，横井聡之：被覆工と電気防食の併用効果に関する実験，港湾技術資料，No. 537, 1985年
- 16) S. Evans : *Development and Testing of New Offshore Cathodic Protection Criteria*, OTC, 1984
- 17) 福沢秀刀：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，Vol. 27, No. 10, 1983年
- 18) D. N. V. : *Technical Note, Fixed Offshore Installations*, 1981
- 19) 生活環境の保全に関する環境基準（昭49，環境庁告示第63号）