

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.45 NO.2 June 2006

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告(REPORT OF PARI)

第 45 卷 第 2 号 (Vol. 45, No. 2), 2006年 6月 (June 2006)

目 次 (CONTENTS)

1. NOWPHAS波浪観測データを同化させた波浪推算法の開発とその特性の検討
..... 橋本 典明・河合 弘泰・永井 紀彦 3
(Development of Adjoint WAM Model to NOWPHAS Wave Observation Data
..... Noriaki HASHIMOTO, Hiroyasu KAWAI, Toshihiko NAGAI)
2. 気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化
..... 菊池 喜昭・永留 健・水谷 崇亮 29
(Permeability and Absorption Property Change of Light Weight Soil with the Change of the Fraction of Air Foam
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Taka-aki MIZUTANI)
3. アーク形の矢板とトラスを有する新形式二重矢板護岸構造の水平抵抗性能の評価
..... 菊池 喜昭・北詰 昌樹・水谷 崇亮・恩田 邦彦・平嶋 裕・木下 雅敬・森 玄 51
(Lateral Resistance of Arc Shaped Double Sheet Wall with Truss Structure
Yoshiaki KIKUCHI, Masaki KITAZUME, Taka-aki MIZUTANI, Kunihiko ONDA, Yutaka HIRASHIMA, Masanori KINOSHITA, Gen Mori)
4. ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム
..... 菊池 喜昭・永留 健・御手洗 義夫 87
(Failure and Permeability Properties of Cement Treated Clay with Tire Chips under Shear Deformation
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Yoshio MITARAI)
5. 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性
..... 菊池 喜昭・中島 研司・木村 淳治・水谷 崇亮105
(Solidification of Granulated Blast Furnace Slag used for Port Construction
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kenji NAKASHIMA, Junji KIMURA, Taka-aki MIZUTANI)
6. 深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した新しい格子配置の提案
..... 高橋 英紀・山脇 秀仁・北詰 昌樹・石橋 伸司135
(Effects of Deep Mixing Method on Liquefaction Prevention and Proposal on New Arrangement of Grid-type Improvement
..... Hidenori TAKAHASHI, Shuuji YAMAWAKI, Masaki KITAZUME, Shinji ISHIBASHI)
7. 耐海水性ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性
..... 宮田 義一・若林 徹・濱田 秀則169
(Cathodic Protection Characteristics of Marine Steel Structure Sheathed with Seawater Resistant Stainless Steel
..... Yoshikazu MIYATA, Toru WAKABAYASHI, Hidenori HAMADA)

耐海水性ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の 電気防食特性

宮田 義一*・若林 徹**・濱田 秀則***

要 旨

海洋鋼構造物の腐食を防ぐために、干満部および飛沫部には被覆防食が施される。被覆材料に耐海水性ステンレス鋼を用いる手法が開発されている。ステンレス鋼と普通鋼が接触する箇所では異種金属接触腐食とよばれる現象が生じる。本研究の目的は、実海洋鋼構造物を対象として、鋼とステンレス鋼との異種金属接触部分の電気防食特性を調べ、本防食工法の効果を明らかにすることである。また流電陽極の消耗量の算出方法について検討した。

試験対象は、東京港の大井埠頭に建設された鋼管杭式構造物である。ステンレス鋼から約10m離れた位置、およびステンレス鋼の近傍に流電陽極が溶接されている。流電陽極から発生する電流および鋼の電位を測定した。陽極からの発生電流は、初期の50%にまで低減した。また鋼の電位は、防食電位よりも卑な値であった。これらの結果より、異種金属接触腐食が懸念される部位においても電気防食の効果があることが明らかになった。また測定の容易な陰極電位から陽極消耗量を算出できることを明らかにした。

キーワード：海洋環境，鋼構造物，金属被覆，耐海水性ステンレス鋼，電気防食，腐食，陽極消耗

* 地盤・構造部 材料研究室 研究官
** 前 地盤・構造部 材料研究室 研修生 (現 (株)ナカポーテック)
*** 地盤・構造部 材料研究室長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
TEL : 046-844-5061 Fax : 046-844-0255 e-mail : miyata-y@pari.go.jp

Cathodic Protection Characteristics of Marine Steel Structure Sheathed with Seawater Resistant Stainless Steel

Yoshikazu MIYATA*
Toru WAKABAYASHI**
Hidenori HAMADA***

Synopsis

Metal sheathing has been employed to prevent corrosion of steel structures in tidal and splash zones in marine environments. Seawater-resistant stainless steel has been used as sheathing material. However, dissimilar metal corrosion occurs where steel comes into contact with stainless steel. The main objective of this study was to investigate the cathodic protection characteristics at the area where dissimilar metal corrosion occurs. A method of estimating the consumption of a sacrificial anode is discussed.

A field experiment was conducted on a steel pipe pile structure at Ohi wharf in Tokyo port. One sacrificial anode is welded to the steel at about 10 m from the stainless steel sheathing, while another is in the neighborhood of the sheathing. Currents generated from the sacrificial anodes and the potentials of the steel were measured. These currents decreased to 50% of the initial values. The potentials of the steel were lower than the protective potential. These data indicate that sacrificial anode cathodic protection is effective against dissimilar corrosion of steel. The amount of consumption of the anode could be estimated from the potential of the steel, which can easily be measured.

Key Words: steel structure, metal sheathing, seawater resistant stainless steel, cathodic protection, corrosion, anode consumption

* Researcher, Materials Division, Geotechnical and Structural Department
** Former Trainee of Materials Division, Geotechnical and Structural Department (Nakabohtec Corrosion Protecting Co., Ltd.)
*** Director of Materials Division, Geotechnical and Structural Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-8445061 Fax : +81-46-8440255 e-mail : miyata-y@pari.go.jp

目 次

要 旨	169
1. 緒言	173
1.1 本防食工法が抱える電気防食上の課題	173
1.2 課題の対策	173
1.3 本防食試験の目的	173
2. 耐食性金属ライニング	173
2.1 耐海水性ステンレス鋼の化学成分	173
2.2 耐孔食性指数	173
2.3 耐海水性ステンレス鋼の適用範囲	174
2.4 耐海水性ステンレス鋼の実績	174
3. 現地防食試験	174
3.1 試験場所	175
3.2 海洋鋼構造物の概要	175
3.3 電気防食の設計	175
3.4 陽極発生電流および陰極電位の測定方法	177
3.5 水質調査方法	177
4. 陽極からの発生電流および陰極電位の理論	178
4.1 陽極からの発生電流	178
4.2 陰極電位	179
5. 結果および考察	180
5.1 水質分析の結果	180
5.2 設計時の防食電流密度の妥当性	181
5.3 陽極発生電流の経時変化	185
5.4 陽極の消耗状態	186
5.5 陰極電位の経時変化	186
5.6 防食状態	186
5.7 陰極電位の変動に関する理論的考察	187
5.8 陰極電位と陽極発生電流の関係	188
5.9 陰極電位による陽極消耗量の推定	188
5.10 長期間における陽極消耗量推定の際の注意点	190
6. 結論	190
謝辞	191
参考文献	191
付録	193
付録A 現場適用例	193
付録B 水質分析結果	195
付録C 水質汚濁	196

1. 緒言

海洋鋼構造物に対する防食手法には、電気防食工法と被覆防食工法がある。前者は海水中部および海底土中部に、後者は飛沫部、干満部および海上大気部に適用されるのが一般的である。電気防食は、電流を鋼構造物に供給し、鋼材の電位を防食電位よりも卑に保持する方法である。電流の供給源には、アルミニウム合金陽極と直流電源の2種類がある。前者は流電陽極方式、後者は外部電源方式とよばれている。前者の方が維持管理の面で優位なので現在多くの鋼構造物に適用されている。被覆防食は、鋼構造物に塗装やライニングを施して鋼材を腐食環境因子から遮断する方法である。複雑な形状にも比較的 low cost で適用できるという利点がある一方で、海水や紫外線によって被覆材料が経年劣化し、また摩擦、衝撃等による損傷を受けることもある。そのため定期的なメンテナンスに加え、被覆材料の寿命を越えた時点で大規模な補修が必要となる。この対策として、被覆材料に高耐食性金属を用いる手法が開発され、実構造物にも適用されてきた¹⁾。本研究では、高耐食性金属としてステンレス鋼を用いた、いわゆる耐海水性ステンレス鋼ライニング工法(以下ステンレス鋼ライニング)と電気防食工法が併用されている実海洋鋼構造物を試験対象とした。

1.1 本防食工法が抱える電気防食上の課題

一般にステンレス鋼は干潮面より1~2m下方まで被覆される。したがって海水中部においてステンレス鋼と普通鋼が接触する箇所が必ず生じる。このような接触箇所では、海水を介して普通鋼からステンレス鋼に腐食電流が流れるため、普通鋼側の腐食速度が、普通鋼単独の場合より増大することがある。この現象は異種金属接触腐食とよばれている。このような環境下で電気防食を併用する場合には、主に次の2点を考慮する必要がある。それは、1)干満部から海水中部の一部にかけて施されたステンレス鋼ライニング部分の防食電流密度をどの程度見積るかということ、2)海水中部のステンレス鋼側と普通鋼側の両者を防食状態にするための最適な陽極配置を決定すること、である。

1.2 課題の対策

近年の研究より、前節 1.1 で示した課題の対策について次のことが明らかになっている。

耐海水性ステンレス鋼部分の防食電流密度に関しては、海水中部では普通鋼と同じ防食電流密度が適用でき、干満部では海水中部における普通鋼の防食電流密度の半分

以下で良いことが確認されている²⁻⁴⁾。

また異種金属接触腐食が生じる環境下における陽極配置については、近接陽極法が有効であることが確認されている⁵⁾。この方法に従えば、ステンレス鋼と普通鋼が接する近傍の普通鋼側に陽極を設置することで、異種金属接触腐食の防止が可能になる。

1.3 本防食試験の目的

前節のように、本防食工法における電気防食上の技術的な課題については、基礎的な研究が進められてきた。しかしながら、実用規模の海洋鋼構造物を用いた試験については報告例が見あたらない。本研究の目的は、本防食工法が適用された実海洋鋼構造物を対象として、鋼材部ならびに鋼とステンレス鋼との異種金属接触部分の防食状態を調べ、本防食工法の効果を明らかにすることである。また得られた結果より、維持管理の面で重要な陽極消費量の推定方法についても議論する。

2. 耐食性金属ライニング

被覆材料に用いられる耐食性金属は、チタンやステンレス鋼等である。被覆方法には金属板ライニングと薄板クラッド鋼ライニングの2通りがある。本試験対象の実鋼構造物には耐海水性ステンレス鋼の金属板ライニングが適用されている。

2.1 耐海水性ステンレス鋼の化学成分

表-2.1 に代表的な汎用ステンレス鋼(SUS304, SUS316L)と本試験構造物の耐海水性ステンレス鋼の化学成分を示す。耐海水性ステンレス鋼は、ニッケル、クロム、モリブデンの成分が多い。また汎用ステンレス鋼には含まれていない銅と窒素が加えられている。こうすることで耐食性が飛躍的に向上する。

2.2 耐孔食性指標

ステンレス鋼の耐孔食性は、化学成分のクロム、モリブデンおよび窒素の量に基づき、(2.1)式から算出される耐孔食性指標(PRE: Pitting Resistance Equivalent)で評価できる⁶⁾。相互比較として、この指標が大きいほど耐孔食性の高い材料であると判断できる。

(2.1)式中に含まれる係数 α は、一般的に3または3.3である。また係数 β は試験環境などによって異なるが、10~30の値が用いられている。本稿では、過大評価を避けるために $\alpha=3$ 、 $\beta=10$ を用いて、表-2.1に示した代

表-2.1 汎用ステンレス鋼と耐海水性ステンレス鋼の化学成分

鋼種	化学成分 (mass%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Fe
SUS304 ⁷⁾ (下段代表値)	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00	18.00	---	---	---	残
	以下	以下	以下	以下	以下	~10.50	~20.00	---	---	---	残
SUS316L ⁷⁾ (下段代表値)	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	12.00	16.00	2.00	---	---	残
	以下	以下	以下	以下	以下	~15.00	~18.00	~3.00	---	---	残
耐海水性 ステンレス鋼 ⁸⁾ (下段代表値)	0.020	0.80	1.00	0.030	0.015	17.00	19.00	5.50	0.50	0.16	残
	以下	以下	以下	以下	以下	~19.50	~21.00	~6.50	~1.00	~0.24	残
	0.01	0.55	0.57	0.017	0.001	17.98	20.19	6.26	0.67	0.22	残

表値から、(2.1)式に従いPRE値を算出した。その結果を表-2.2に示す。

耐孔食性指数(PRE)

$$PRE = C_{Cr} + \alpha \cdot C_{Mo} + \beta \cdot C_N \quad (2.1)$$

ここで、

C_{Cr} : Crの化学成分 (mass%)

C_{Mo} : Moの化学成分 (mass%)

C_N : Nの化学成分 (mass%)

α : 係数 3 (一般には3または3.3)

β : 係数 10 (一般には10~30) である。

表-2.2から耐海水性ステンレス鋼は汎用ステンレス鋼より耐孔食性指数が大きく、耐孔食性に優れた材料であることがわかる。

2.3 耐海水性ステンレス鋼ライニングの適用範囲

海洋鋼構造物が置かれる海洋の腐食環境は、図-2.1に示すように鉛直方向に海上大気部、飛沫部、干満部、海中部および海底土中部に大別することができる。ステンレス鋼ライニングは腐食の激しい飛沫部を中心に、図-2.1に示した海上大気部、飛沫部、干満部および海中部の一部に適用される。

2.4 耐海水性ステンレス鋼ライニングの実績

表-2.3に、本試験施設と同様の耐海水性ステンレス鋼ライニングが適用された代表的な現場適用実績を示す。このライニング技術は平成9年の北海道絵巻漁港物揚場棧橋をはじめとし、平成14年までの6年間に、おもに棧橋や防波堤などの海洋鋼構造物に適用されている新しい技術である。なお表-2.3に示した施設のうち、数例の適用事例を付録Aとして巻末に示す。(図-A.1~図-A.4)

表-2.2 耐孔食性指数の比較

鋼種		PRE
汎用ステンレス鋼	SUS304	18
	SUS316L	24
耐海水性ステンレス鋼		41

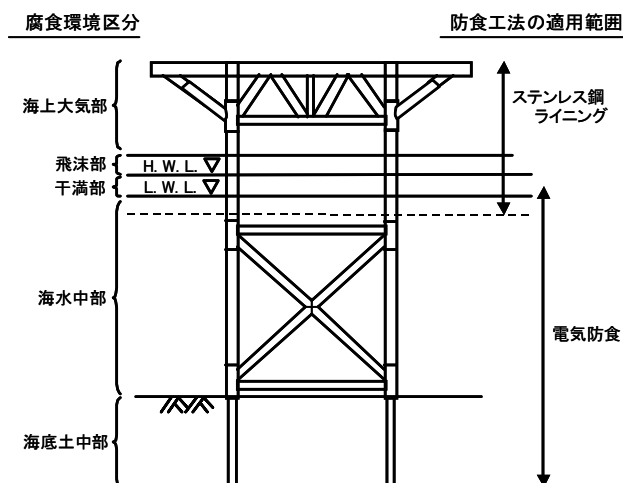


図-2.1 海洋鋼構造物の腐食環境区分と耐海水性ステンレス鋼ライニングの適用

3. 現地防食試験

本防食試験では、水深-3mと水深-12mに設置した陽極からの発生電流と防食対象物、すなわち鋼の電位(以下、陰極電位)のモニタリングを行った。また試験期間中における当該海域の水質調査を実施した。なお水深-3mはステンレス鋼ライニングと鋼管部との境界にあたり、異種金属接触腐食が最も懸念される水深である。一方水深-12mは海底面に近い水深であり、ステンレス鋼の影響が最も小さい水深である。

表-2.3 耐海水性ステンレス鋼ライニングの現場適用実績

施設名	場所	施設目的	設置時期
絵鞆漁港揚場棧橋	北海道室蘭市	棧橋	平成9年
南風泊漁港沖防波堤	長崎県高島町	杭式防波堤	平成10年、11年
大津島(馬島)漁港防波堤	山口県徳山市	杭式消波堤	平成11年、12年
境漁港棧橋	鳥取県境港市	物揚場棧橋	平成11年、14年
富津火力発電所 第2LNGバース	千葉県富津市	LNG受入バース	平成11年
佐賀関漁港防波堤	大分県佐賀関町	杭式消波堤	平成13年
大井埠頭新第5バース	東京都	コンテナ棧橋	平成14年
大阪港夢州トンネル立坑	大阪府大阪市	沈埋トンネル立坑	平成14年
北九州港二島埠頭	福岡県北九州市	棧橋	平成14年
北九州港川代埠頭	福岡県北九州市	棧橋	平成14年

3.1 試験場所

現地防食試験を行なった場所は、東京港の大井埠頭新第5バースである。図-3.1に試験場所の位置を示す。さらに、図-3.2に新第5バースの全体図を示す。この施設はジャケット式棧橋工法で建設された鋼管杭式構造物であり、図-3.2に示すように7組のジャケット(J1~J7)から構成されている。試験対象とした構造物は7組のジャケットのうちのJ1ジャケット部、No.3鋼管杭の近傍である。

3.2 海洋鋼構造物の概要

図-3.3に、試験対象としたJ1ジャケットの断面図を示す。この図に示すようにJ1ジャケットは全長約50m、全高約16mの鋼管杭式構造物である。このジャケットは、海底土中部に打設された約25.8m(水深-12.6m~水深-38.4m)の鋼管杭によって固定されている。さらに表-3.1に、J1ジャケットに施された防食仕様の概要を示す。全高16mのうち、水深-1.5mから水深+3.4mまでの範囲は、耐海水性ステンレス鋼のライニングが施されており、ライニングの厚みは0.4mmである。

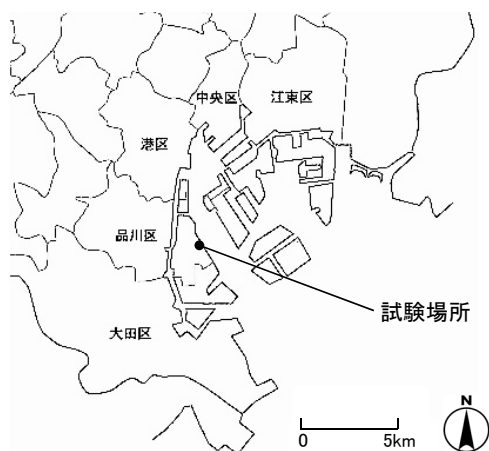


図-3.1 試験場所の位置図

3.3 電気防食の設計

a) 水質に基づく防食電流密度

H.W.L.(水深+2.1m)より下部ではアルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式による電気防食が適用されている。電気防食の設計上、東京湾は汚染海域となる⁹⁾。したがって設計上の防食電流密度は、海水中部で130mA/m²、海底土中部では30mA/m²とした¹⁰⁾。また干満帯部(H.W.L.~L.W.L.)においては、1.2で述べたように海水中部の半分に対応する65mA/m²で設計がなされている。

表-3.1に各部位における防食電流密度の値を整理した。なお、表-3.1および本稿における「水深」は荒川工事基準面(A.P.)を基準として表記している。

表-3.1 J1ジャケットの防食仕様

腐食環境区分	防食仕様	設計防食電流密度	
海上大気部	水深+3.4m	ステンレス鋼ライニング	
飛沫帯	+2.1m		
H.W.L.	0m		
干満帯	M.S.L.	ステンレス鋼ライニング+電気防食	干満帯全域: 65mA/m ²
L.W.L.	-1.5m	電気防食	L.W.L.~M.S.L.:130mA/m ²
海水中部	-12.6m	Al陽極 炭素鋼	海水中部:130mA/m ²
海底土中部	-38.4m	電気防食	海底土中部:30mA/m ²

※水深は荒川工事基準面(A.P.)基準で表記

b) 陽極配置

防食電流密度を前述のように設計した場合、本試験施設であるJ1ジャケットには、アルミニウム合金陽極(3.5A, 50年寿命)が約100本必要である。ステンレス鋼と普通鋼が接している付近に陽極を配置し、それ以外は陽極間の距離が均等になるように設置されている。

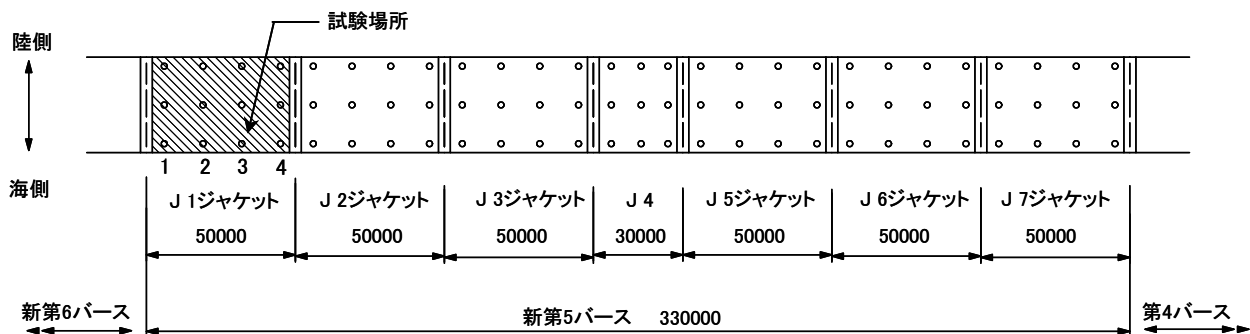


図-3.2 新第5バースの全体図

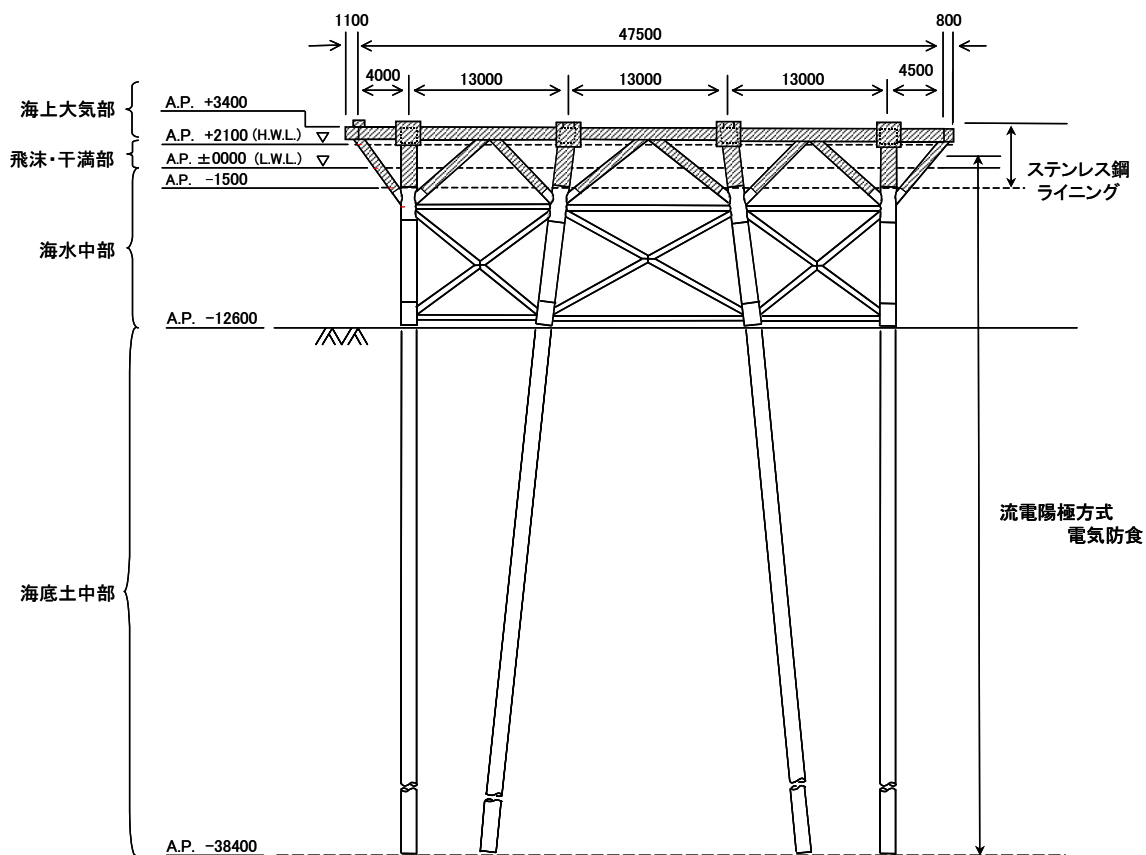


図-3.3 J1 ジャケットの断面図

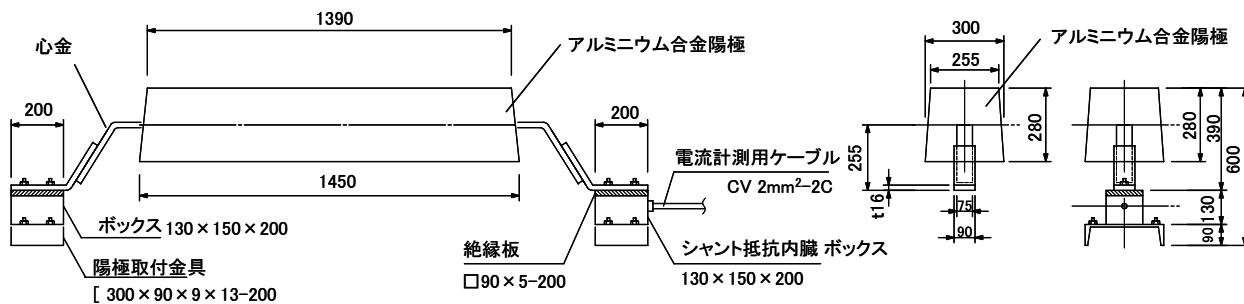


図-3.4 電流測定用陽極装置の概要

3.4 陽極発生電流および陰極電位の測定方法

J1 ジャケットを含む新第5バースは、表-3.1 に示した防食仕様で平成14年4月から運用されている。アルミニウム合金陽極（以下、陽極）からの発生電流を測定するために、同年10月に既設の陽極を一度引き上げ、新たに電流測定用陽極装置を設置した後、再び海水中の鋼管部に取付けた。またその際に、鋼管部の陰極電位が測定できるように、陽極装置の近傍に参照電極を設置した。

図-3.4 に、本防食試験で用いた電流測定用陽極装置の概要を示す。この図に示すように、陽極装置は平成14年4月から10月まで使用されていた同種・同形の陽極に、絶縁性を有するボックスを心金の両端2箇所に取付けたものである。ボックスの一方には、電流計測用のシャント抵抗 (0.01Ω , $1/4W$) が内蔵されており、このシャント抵抗を介して陽極とジャケットの鋼材部が電氣的に導通がとられている。あらかじめ陽極取付金具を鋼管杭に水中溶接し、これらの陽極取付金具に陽極装置両端部分をボルトおよびナットを用いて固定した。

図-3.5 に陽極発生電流および陰極電位測定回路の概要を示す。陽極発生電流は、ボックスに内蔵されたシャント抵抗の両端にかかる電位差を、高抵抗電位差計機能を有するポテンシャルロガー（日置電機製 PL-03、入力インピーダンス $2M\Omega$ ）を用いて自動測定し、得られた電位差をシャント抵抗値で除することで求めた。また陰極電位は、海水銀塩化銀参照電極（ナカボーテック製、WA-3型）を使用し、同種のポテンシャルロガーを用いて自動測定した。なお測定間隔は10分とし、陽極発生電流の測定と陰極電位の測定は同期させている。以下、海水銀塩化銀電極を $Ag/AgCl$ と略記する。

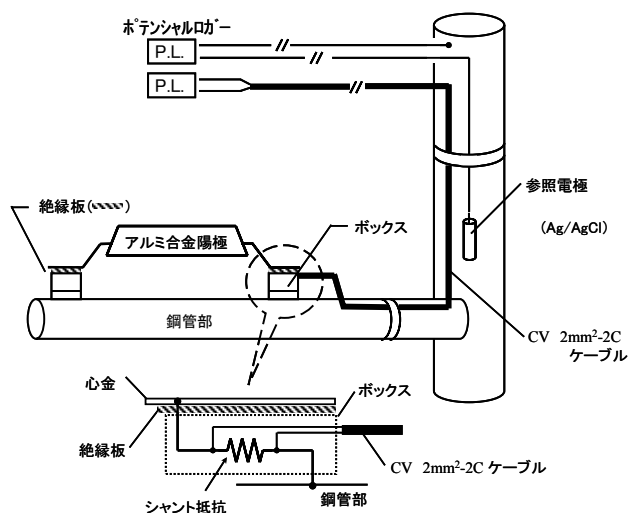


図-3.5 電流および電位測定回路の概要

図-3.6 に、電流測定用陽極装置、参照電極および測定ボックスの取付位置を示す。陽極装置と参照電極を1組とし、ステンレス鋼ライニングと鋼材部の境界部に近い水深-3m と、海底面に最も近い水深-12m の2箇所に取付けた。陽極装置および参照電極には各々1台のポテンシャルロガーが対応し、本試験では合計4台のポテンシャルロガーを使用した。これらのポテンシャルロガーを水密性の高い2重構造の測定ボックスに納め、H.W.L. より上部、水深+2.8m の位置に取り付けた。

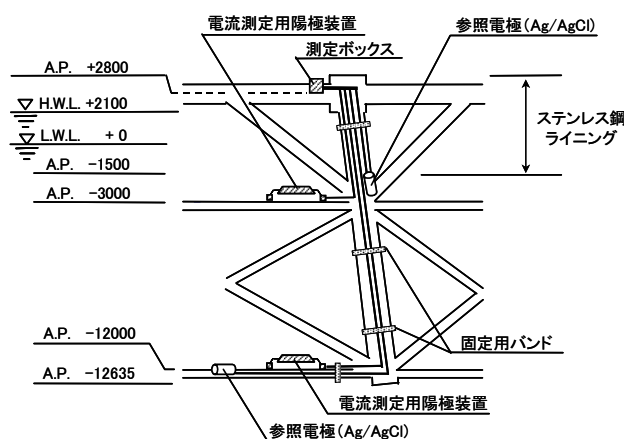


図-3.6 電流計測用陽極装置、参照電極
および測定ボックスの取付位置図
(J1 ジャケット No.3 鋼管杭)

3.5 水質調査方法

試験期間中の水質状態を確認する目的で、平成15年7月14日から平成17年2月23日までの試験期間中に計8回の水質調査を実施した。投げ込み式の採水器を用いて、水深0~-12mの範囲において3m間隔の5水深から海水を採取した。測定項目は水温、pH、電気抵抗率 (ρ)、溶存酸素濃度 (DO)、アンモニウムイオン (NH_4^+) 濃度、塩化物イオン (Cl^-) 濃度、硫酸イオン (SO_4^{2-}) 濃度、化学的酸素要求量 (COD)、全カルシウム (T-Ca) 濃度、全マグネシウム (T-Mg) 濃度および懸濁物質 (SS) の11つである。

測定方法は JIS K0102-1998¹¹⁾ に準拠している。なお COD の測定ではアルカリ性過マンガン酸カリウムによる分析方法 (COD_{OH}) を採用した。その理由は、海水のように塩化物イオンを多量に含んでいる場合は、酸性で過マンガン酸カリウムを加えると塩化物イオンが酸化されて塩素になるため、正しく測定できないからである¹²⁾。また、アンモニウムイオン濃度については、水質判定上 $0.1mg/dm^3$ とした低濃度の分析値を必要としたため、インドフェノール青吸光度法を用いた。

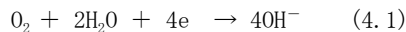
4. 陽極からの発生電流および陰極電位の理論

本章では、陽極からの発生電流と防食対象金属(陰極)の電位に関する理論式を導く。

4.1 陽極からの発生電流

陽極から発生した電流は、海水中を流れて陰極に流入する。したがって両者は等しい。以下では陰極に流入する電流を理論的に導く。

陰極表面上では、(4.1)式のような溶存酸素の還元反応が生じている。



この反応は次の3つの過程から成る。それは、1)海水中の溶存酸素が陰極表面まで移動する過程、2)陰極表面に到達した酸素が水と電子と反応する過程、3)生成した水酸化物イオンが陰極表面から海水中へ移動する過程、である。海水中的の電気防食系の場合、1)の溶存酸素の移動速度が2)の反応速度や3)の移動速度よりも十分に遅い。したがって(4.1)式の反応の律速過程は、1)の酸素の移動過程であり、この過程の速度で陰極に流入する電流が決まる。

電気防食の開始直後は、陰極表面に炭酸カルシウム(CaCO₃)と水酸化マグネシウム(Mg(OH)₂)から成る石灰質皮膜(エレクトロコーティング)が形成されていない。溶存酸素の移動がNernstの拡散層モデル¹³⁾に従うとすれば、図-4.1のように溶存酸素は海水中の拡散層を通り陰極表面に到達する。この場合、酸素の移動速度 r は(4.2)式で表わされる。

$$r = \frac{D_d \cdot (C_b - C_s)}{\delta_d} \quad (4.2)$$

ここで、

D_d : 拡散層内の溶存酸素の拡散係数 (cm²/s)

δ_d : 拡散層の厚さ (cm)

C_b : 海水中的の溶存酸素濃度 (mol/cm³)

C_s : 陰極表面の溶存酸素濃度 (mol/cm³) である。

1)の過程が律速なので、 C_s はゼロとみなすことができ、また(4.1)式のように1molの酸素に4molの電子が関与するので、流入する電流密度 $i_{L,1}$ は(4.3)式となる。

$$i_{L,1} = \frac{4 \cdot F \cdot D_d \cdot C_b}{\delta_d} \quad (4.3)$$

ここで F はファラデー定数(96500 C/mol)である。この

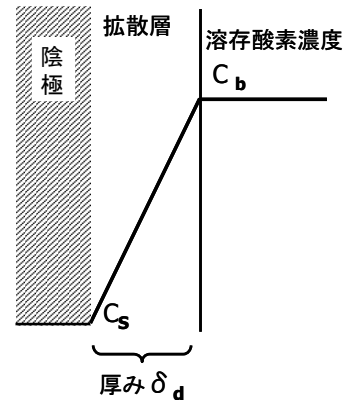


図-4.1 石灰質皮膜層が形成される前の陰極表面の様子

$i_{L,1}$ が電気防食開始時の流入電流密度である。

長時間の通電により陰極の表面には石灰質皮膜が形成される。次にこの時の流入電流を求める。石灰質皮膜層内においてもNernstの拡散層モデルを適用できるとすれば、陰極表面は図-4.2のように表わされる。この場合、石灰質皮膜内の酸素の移動速度 r_e と拡散層内の移動速度 r_d はそれぞれ(4.4)式、(4.5)式となる。

$$r_e = \frac{D_e \cdot (C_e - C_s)}{\delta_e} = \frac{D_e \cdot C_e}{\delta_e} \quad (4.4)$$

$$r_d = \frac{D_d \cdot (C_b - C_e)}{\delta_d} \quad (4.5)$$

ここで、

D_e : 石灰質皮膜層内の溶存酸素の拡散係数 (cm²/s)

δ_e : 石灰質皮膜層の厚さ (cm)

C_e : 石灰質皮膜層表面の溶存酸素濃度 (mol/cm³)

である。なお前述のように、 C_s はゼロとみなした。

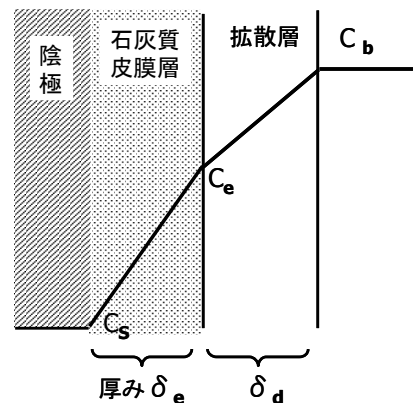


図-4.2 石灰質皮膜層が形成された後の陰極表面の様子

r_e と r_d は等しいので、(4.4)式と(4.5)式から C_e は(4.6)式で表わされる。

$$C_e = \frac{D_d \cdot \delta_e}{D_e \cdot \delta_d + D_d \cdot \delta_e} \cdot C_b \quad (4.6)$$

したがって、(4.4)式、(4.6)式および1molの酸素に4molの電子が関与することより、石灰質皮膜が形成された場合の流入電流密度 $i_{L,2}$ は(4.7)式となる。

$$i_{L,2} = \frac{4 \cdot F \cdot D_d \cdot C_b}{D_e \cdot \delta_e + \delta_d} \quad (4.7)$$

以上の(4.3)式、(4.7)式が、陽極からの発生電流密度に等しい。

4.2 陰極電位

陽極から発生した電流は、海水中を流れ陰極に流入する。この様子を模式的に表わしたのが図-4.3である。実際には、陽極は陰極に溶接されているが、電流経路をわかりやすく表現するためにこのように表わした。

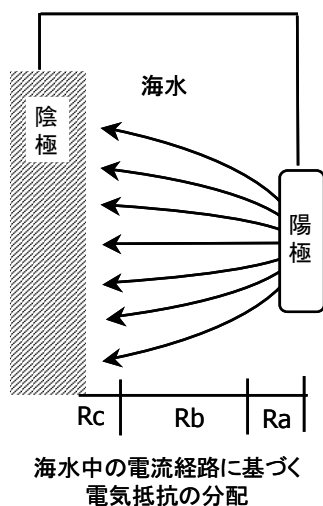


図-4.3 陽極から陰極に流れる電流の様子

陰極電位 E_c と陽極電位 E_a の間の電位差および海水中を流れる電流 I にはオームの法則が成り立ち、これらの関係は(4.8)式で表わされる¹⁴⁾。

$$E_c - E_a = I \cdot (R_a + R_b + R_c) \quad (4.8)$$

ここで、

- R_a : 陽極近傍の電流経路内の電気抵抗(Ω)
- R_b : 陽極と陰極から離れた電流経路内の電気抵抗(Ω)
- R_c : 陰極近傍の電流経路内の電気抵抗(Ω) である。

防食対象物が鋼構造物のみの場合、陽極に対して陰極が十分大きい。したがって陽極と陰極から離れた電流経路内の断面積、陰極近傍の電流経路内の断面積は十分に大きい。このためこれらの電流経路内の抵抗、すなわち R_b や R_c は R_a に比べて無視できるほど小さい。この場合、(4.8)式は(4.9)式に書き換えられる。

$$\begin{aligned} E_c &= I \cdot R_a \left(1 + \frac{R_b}{R_a} + \frac{R_c}{R_a} \right) + E_a \\ &= I \cdot R_a + E_a \end{aligned} \quad (4.9)$$

ここで R_a は陽極近傍の電流経路内の海水の電気抵抗であるが、一般的には陽極の接水抵抗とよばれている。接水抵抗は、陽極の形状を反映した物理量(L, r)と環境(海水)の電気抵抗率 ρ から(4.10)式で算出できる¹⁵⁾。なおこの式は $L/r \geq 4$ の場合の棒状陽極に適用できる。

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ 2.3 \log_{10} \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right\} \quad (4.10)$$

ここで、

- ρ : 環境の電気抵抗率 ($\Omega \text{ cm}$)
- L : 陽極の長さ (cm)
- r : 陽極の等価半径 (cm) [$r = C/2\pi$]
- C : 陽極の断面有効周辺長 (cm) である。

(4.10)式を(4.9)式に代入することで、陰極電位 E_c は(4.11)式で表わされる。

$$E_c = I \cdot \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ 2.3 \log_{10} \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right\} + E_a \quad (4.11)$$

5. 結果および考察

本試験海域の水質を調査し、設計時の防食電流密度の妥当性を議論する。

5.1 水質分析の結果

図-5.1～図-5.11に、試験期間中における当該海域の水質分析結果を経時変化として示す。なお、詳細な数値データに関しては、付録Bとして巻末に示す。また参考として、水質汚濁についても調査したので、付録Cに示す。

(1) 水温

図-5.1に水温の経時変化を示す。この図から、当該海域の水温は10.6～25.0℃の範囲にあり、毎年2月頃の冬季に水温は低く、8月頃の夏季に水温は高い。また、調査時期ごとの水温を比較すると、水深が深くなるほど水温は低くなる傾向にある。海面(0m)に対する水深-12mでの水温の差は夏季(平成16年8月30日)で-2.7℃であるのに対して、冬季(平成16年2月24日)では-1.4℃であった。

(2) pH

図-5.2にpHの経時変化を示す。また表-5.1に各水深におけるpHの最大値、最小値、平均値および標準偏差(σ)を示す。これらの図表から、水深-3mにおけるpHは他の水深と比較すると標準偏差が大きいため、この水深でのpHの変動は激しいことが分かる。しかしながらpHの平均値は、いずれの水深でも8付近で安定している。

表-5.1 各水深におけるpHの結果

水深(m)	pH				データ数 n
	最大値	最小値	平均値	σ	
0	8.06	7.66	7.89	0.15	5
-3	8.17	7.40	7.90	0.27	8
-6	8.19	7.95	8.05	0.09	5
-9	8.22	7.97	8.09	0.09	5
-12	8.22	7.75	7.98	0.14	8

(3) 電気抵抗率

図-5.3に電気抵抗率の経時変化を示す。この図から、当該海域の電気抵抗率は、21.4～30.9 Ω cmの範囲にあり、同一水深で比較すると、夏季に電気抵抗率は低下する傾向にある。また調査時期ごとで比較すると、水深が深くなるほど電気抵抗率は低くなる傾向にある。海面(0m)に対する水深-12mの電気抵抗率の差は、夏季に大きく、逆に冬季では小さい。例えば平成16年8月30日(夏季)における電気抵抗率の差は-5.6 Ω cmであるのに対して、平成16年2月24日(冬季)では-1.4 Ω cmであった。

(4) 溶存酸素濃度

図-5.4に溶存酸素濃度(DO)の経時変化を示す。この図から、当該海域の溶存酸素濃度は、1.2～8.9 mg/dm³の範囲にあり、8月頃の夏季に溶存酸素濃度は低下し、2月頃の冬季においては逆に増加する傾向にある。また、調査時期ごとで比較すると、2月頃の冬季においては水深による差異はほとんど認められないが、夏季においては水深が深くなるほど溶存酸素濃度は低下する傾向を示した。一例として、平成16年8月30日(夏季)の調査では、水深0mの溶存酸素濃度は3.4 mg/dm³であるのに対し、水深-12mでは1.2 mg/dm³であり、その差は2.2 mg/dm³であった。

(5) 塩化物イオン濃度

図-5.5に塩化物イオン濃度(Cl⁻)の経時変化を示す。また、表-5.2に各水深における塩化物イオン濃度の最大値、最小値、平均値および標準偏差(σ)を示す。これらの図表から、当該海域の塩化物イオン濃度は水深が深くなるほど、濃度が高くなることが分かる。また、標準偏差も小さくなることから、水深が深いところでは海面付近に比べ、塩化物イオン濃度が高い状態で安定しており、その変動も小さい。

一般海水に含まれる塩化物イオン濃度は約18,980ppmであるといわれている¹⁶⁾。このときの海水の密度は1.025 g/cm³であるので、この値は約19,400 mg/dm³に相当する。この値を基準にして考えると、最も濃度が高い水深-12mであっても調査期間中においてはこの基準値を上回ることはほとんどなかった。つまり、当該海域の塩化物イオン濃度は、一般海水と比較して低いことが分かった。

表-5.2 各水深における塩化物イオン濃度の結果

水深(m)	塩化物イオン濃度(mg/dm ³)				データ数 n
	最大値	最小値	平均値	σ	
0	17200	13800	15420	1251	5
-3	17300	14000	15600	1313	8
-6	18400	16700	17580	542	5
-9	18500	17300	17980	500	5
-12	19600	17800	18350	602	8

(6) アンモニウムイオン濃度

図-5.6にアンモニウムイオン(NH₄⁺)濃度の経時変化を示す。平成15年においてはアンモニウムイオン濃度が9 mg/dm³以上と高い状態であったが、平成16年に入ると若干の例外はあるものの0.1 mg/dm³以下の低い状態で推移している。また、同一水深で比較した場合には、水深が深くなるほど、アンモニウムイオン濃度は低くなる傾向にある。

(7) 総カルシウム濃度

図-5.7 に総カルシウム(T-Ca)濃度の経時変化を示す。この図から、当該海域の総カルシウム濃度は 268～400 mg/dm³ の範囲にあり、年間の濃度変動は小さく安定していることが分かる。また、水深が深くなるほど総カルシウム濃度は高くなる傾向を示した。

さらに、この特徴を明確にするために、表-5.3 に各水深における総カルシウム濃度の平均値、標準偏差および平均値に対する標準偏差の割合を示す。この表から総カルシウム濃度の平均値は、水深が深くなるほど高くなっており、図-5.8 から得られた傾向と一致している。濃度変動に関しては、平均値に対する標準偏差の割合が最大でも 11%と低く、全般的に濃度変動は小さいことが分かる。また、この割合は海面部の水深 0m で最も大きく、水深が深くなるほど小さくなることから、水深-12m では年間の総カルシウム濃度はより安定していることが推測される。

(8) 総マグネシウム濃度

図-5.8 に総マグネシウム(T-Mg)濃度の経時変化を示す。この図から、当該海域の総マグネシウム濃度は 852～1250 mg/dm³ の範囲にあり、総カルシウム濃度と同様に、年間の濃度変動は小さく安定している。また、水深方向への濃度変化に関しても、水深が深くなるほど総マグネシウム濃度は高くなる傾向を示した。

特徴を明確にするために、表-5.4 に各水深における総マグネシウム濃度の平均値、標準偏差および平均値に対する標準偏差の割合を示す。この表から総マグネシウム濃度の平均値は、水深が深くなるほど高くなっており、図-5.8 から得られた傾向と一致している。濃度変動に関しても、平均値に対する標準偏差の割合は最大でも 12%と低く、全般的に濃度変動は小さいことが分かる。また、この割合は海面部の水深 0m で最も大きく、水深が深くなるほど小さくなることから、総カルシウム濃度と同様に、水深-12m では総マグネシウム濃度はより安定していることが推測される。

(9) 硫酸イオン濃度

図-5.9 に硫酸イオン濃度の経時変化を示す。また表-5.5 に水深-3m と-12m における硫酸イオン濃度の平均値、標準偏差および平均値に対する標準偏差の割合を示す。これらの図表から、当該海域の硫酸イオン濃度は 1790～2670 mg/dm³ の範囲にあり、年間の濃度変動は非常に小さく安定していることが分かる。総カルシウム濃度および総マグネシウム濃度と同様に、水深が深い方が硫酸イオン濃度は高くなる傾向にある。

(10) 化学的酸素要求量

図-5.10 に化学的酸素要求量(COD)の経時変化を示す。この図から、当該海域の COD はほぼ検出限界近くで推移しており、海水中に含まれる有機物は少ない傾向にある。

(11) 懸濁物質

図-5.11 に懸濁物質(SS)の経時変化を示す。この図から、当該海域の SS は平成 16 年 8 月 30 日に特異的に高い値が観測されたものの、全般的には 10 mg/dm³ 以下の低い値で推移している。

表-5.3 各水深における総カルシウム濃度の平均値、標準偏差および平均値に対する標準偏差の割合

水深 (m)	総カルシウム濃度 (mg/dm ³)		割合 (%) ($\sigma/av.$) * 100
	平均値, av.	標準偏差, σ	
0	307	35	11
-3	330	30	9
-6	349	18	5
-9	365	14	4
-12	373	19	5

表-5.4 各水深における総マグネシウム濃度の平均値、標準偏差および平均値に対する標準偏差の割合

水深 (m)	総マグネシウム濃度 (mg/dm ³)		割合 (%) ($\sigma/av.$) * 100
	平均値, av.	標準偏差, σ	
0	976	113	12
-3	1040	97	9
-6	1132	94	8
-9	1169	70	6
-12	1188	56	5

表-5.5 各水深における硫酸イオン濃度の平均値、標準偏差および平均値に対する標準偏差の割合

水深 (m)	硫酸イオン濃度 (mg/dm ³)		割合 (%) ($\sigma/av.$) * 100
	平均値, av.	標準偏差, σ	
-3	3845	219	6
-12	2886	81	3

5.2 設計時の防食電流密度の妥当性

本試験海域が清浄海域であるかまたは汚染海域であるかを検討する。判定方法は阿部によって提案されている¹⁷⁾。この方法では、水質分析項目中の溶存酸素濃度(DO)、アンモニウムイオン(NH₄⁺)濃度および塩化物イオン(Cl⁻)濃度を用いて判定する。判定基準値を表-5.6 に示す。この表に示した項目で、3項目のうち2項目が汚染の基準に該当すれば、当該海域は汚染海域と判定される。本稿では基準値を mg/dm³ 単位に変換し、表-5.6 に併記した。なお本試験海域の海水の密度を 1.025 g/cm³ として換算した。

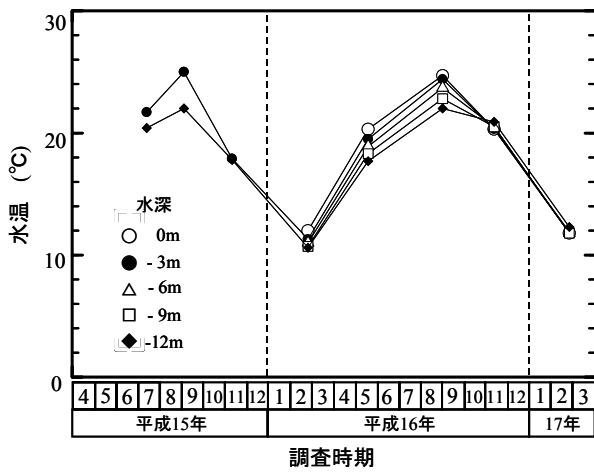


図-5.1 水温の経時変化

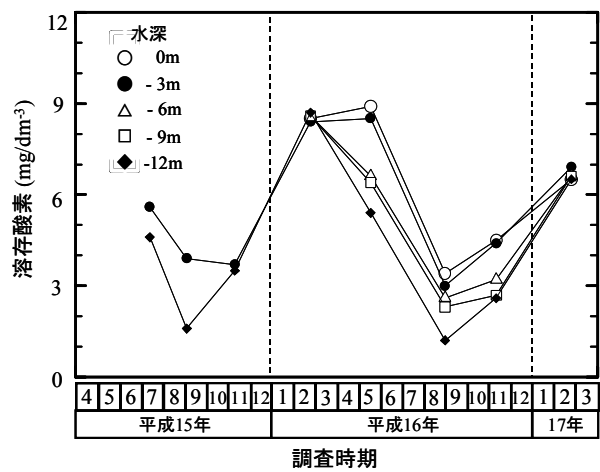


図-5.4 溶存酸素濃度(DO)の経時変化

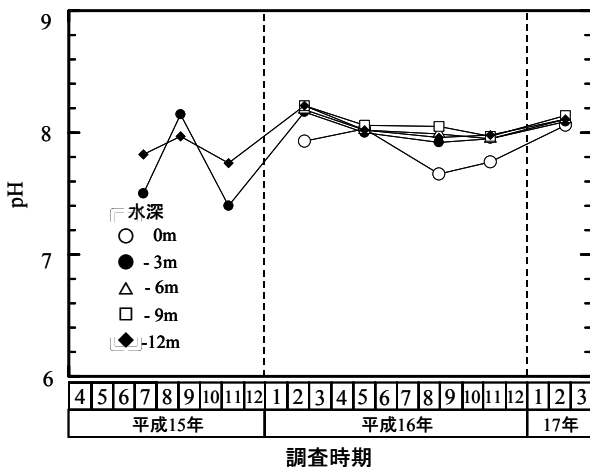


図-5.2 pHの経時変化

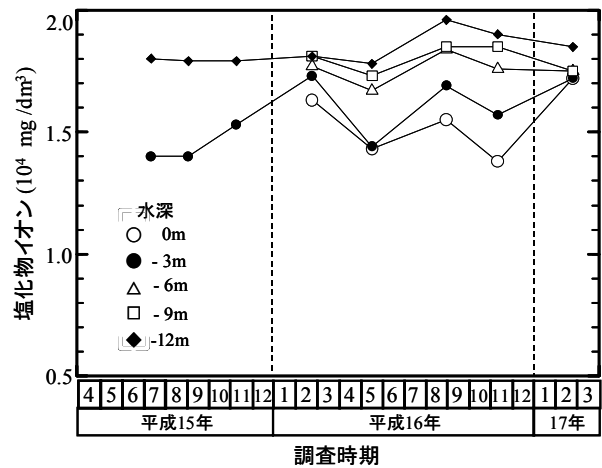


図-5.5 塩化物イオン(Cl⁻)濃度の経時変化

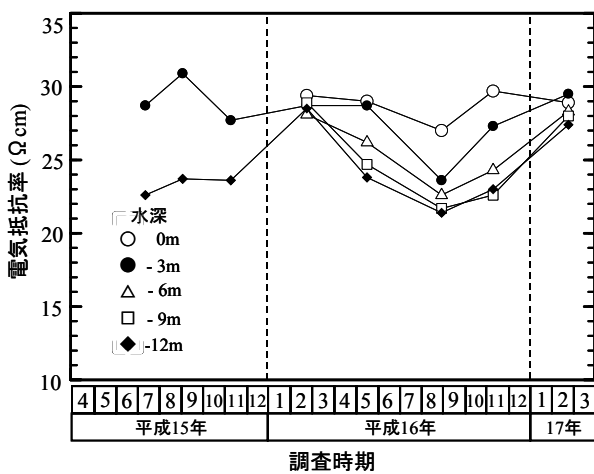


図-5.3 電気抵抗率の経時変化

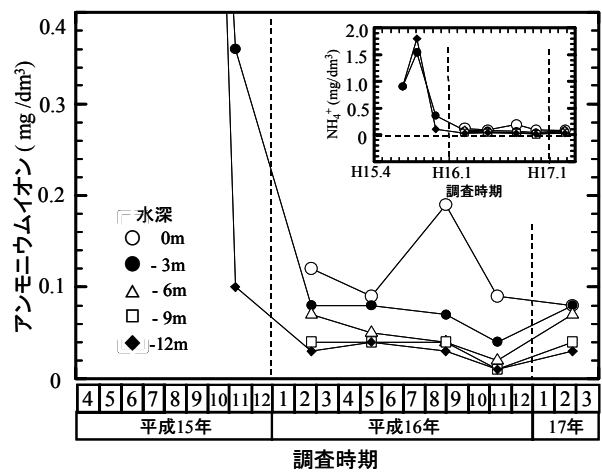


図-5.6 アンモニウムイオン(NH₄⁺)濃度の経時変化

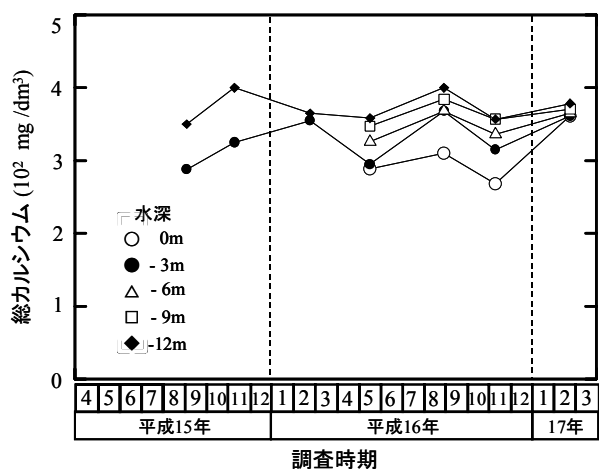


図-5.7 総カルシウム(T-Ca)濃度の経時変化

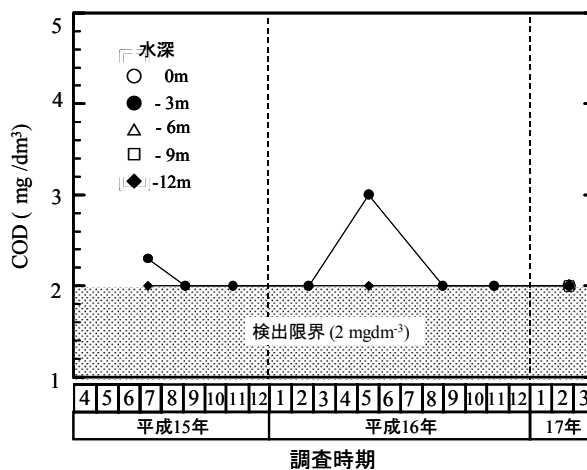


図-5.10 化学的酸素要求量(COD)の経時変化

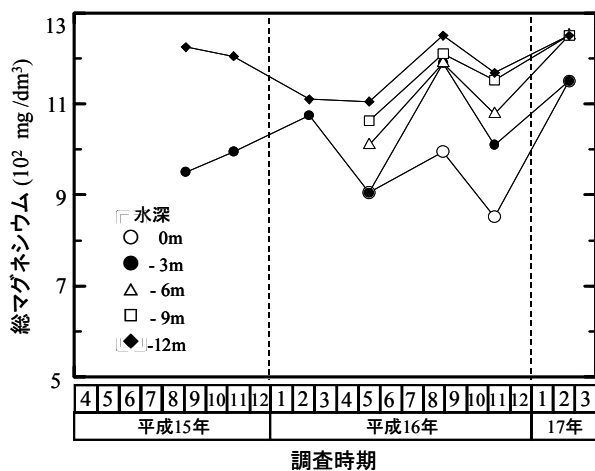


図-5.8 総マグネシウム濃度(T-Mg)の経時変化

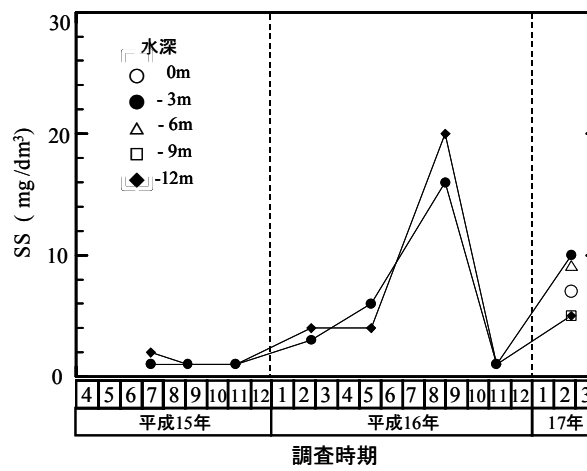


図-5.11 懸濁物質(SS)の経時変化

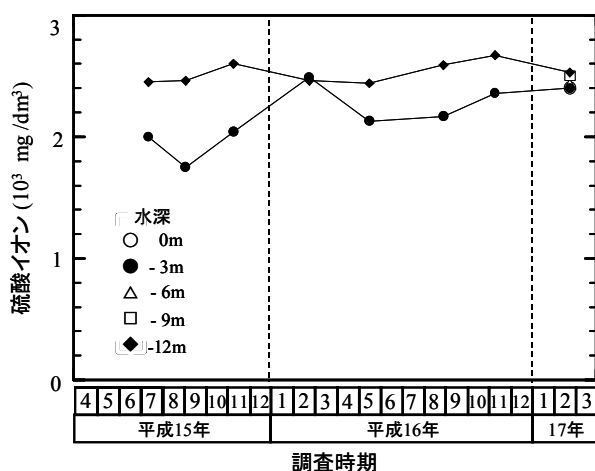


図-5.9 硫酸イオン(SO₄²⁻)濃度の経時変化

表-5.7 に、試験海域の判定結果を示す。-9m 以下の水深において、冬季(平成 16 年 11 月～平成 17 年 2 月)に清浄海域と判定される場合もあるが、それ以外は汚染海域と判定される。したがって本試験海域は、全般的に汚染海域であると判断される。

前述のように J1 ジャケットを含む本施設の設計防食電流密度は、汚染海域の基準が採用されている。今回得られた水質判定結果から設計防食電流密度の選択は設計上、妥当であると判断できる。

表-5.6 判定基準値

項目	基準値		阿部らの基準値		換算値	
	基準値	判定	阿部らの基準値	判定	換算値	判定
DO	6 ppmより高い 6 ppm以下	○(清浄) ×(汚染)	6 mg/dm ³ より高い 6 mg/dm ³ 以下	○(清浄) ×(汚染)	6 mg/dm ³ より高い 6 mg/dm ³ 以下	○(清浄) ×(汚染)
NH ₄ ⁺	0.1ppm未満 0.1ppm以上	○(清浄) ×(汚染)	0.1mg/dm ³ 未満 0.1mg/dm ³ 以上	○(清浄) ×(汚染)	0.1mg/dm ³ 未満 0.1mg/dm ³ 以上	○(清浄) ×(汚染)
Cl ⁻	17,800ppmより高い 17,800ppm以下	○(清浄) ×(汚染)	18,200mg/dm ³ より高い 18,200mg/dm ³ 以下	○(清浄) ×(汚染)	18,200mg/dm ³ より高い 18,200mg/dm ³ 以下	○(清浄) ×(汚染)

表-5.7 水質判定結果

水深 0m

測定項目	H15. 7.14 am10:00 (雨)		H15. 9. 4 am10:30 (曇)		H15.11.10 am10:00 (雨)		H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)		H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)		H16. 8.30 am 9:36 (曇の雨)		H16.11.10 am 9:40 (晴)		H17. 2.23 am 9:22 (晴)	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
DO (mg/dm ³)							8.5	○	8.9	○	3.4	×	4.5	×	6.5	○
NH ₄ ⁺ (mg/dm ³)							1.2	×	0.9	×	1.9	×	0.9	×	0.8	×
Cl ⁻ (mg/dm ³)							16,300	×	14,300	×	15,500	×	13,800	×	17,200	×
総合判定							汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域	

水深 -3m

測定項目	H15. 7.14 am10:00 (雨)		H15. 9. 4 am10:30 (曇)		H15.11.10 am10:00 (雨)		H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)		H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)		H16. 8.30 am 9:36 (曇の雨)		H16.11.10 am 9:40 (晴)		H17. 2.23 am 9:22 (晴)	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
DO (mg/dm ³)	5.6	×	3.9	×	3.7	×	8.4	○	8.5	○	3.0	×	4.4	×	6.9	○
NH ₄ ⁺ (mg/dm ³)	9.0	×	15.4	×	3.6	×	0.8	×	0.8	×	0.7	×	0.4	×	0.8	×
Cl ⁻ (mg/dm ³)	14,000	×	14,000	×	15,300	×	17,300	×	14,400	×	16,900	×	15,700	×	17,200	×
総合判定	汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域	

水深 -6m

測定項目	H15. 7.14 am10:00 (雨)		H15. 9. 4 am10:30 (曇)		H15.11.10 am10:00 (雨)		H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)		H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)		H16. 8.30 am 9:36 (曇の雨)		H16.11.10 am 9:40 (晴)		H17. 2.23 am 9:22 (晴)	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
DO (mg/dm ³)							8.6	○	6.6	○	2.6	×	3.2	×	6.6	○
NH ₄ ⁺ (mg/dm ³)							0.7	×	0.5	×	0.4	×	0.2	×	0.7	×
Cl ⁻ (mg/dm ³)							17,700	×	16,700	×	18,400	○	17,600	×	17,500	×
総合判定							汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域	

水深 -9m

測定項目	H15. 7.14 am10:00 (雨)		H15. 9. 4 am10:30 (曇)		H15.11.10 am10:00 (雨)		H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)		H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)		H16. 8.30 am 9:36 (曇の雨)		H16.11.10 am 9:40 (晴)		H17. 2.23 am 9:22 (晴)	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
DO (mg/dm ³)							8.6	○	6.4	○	2.3	×	2.7	×	6.6	○
NH ₄ ⁺ (mg/dm ³)							0.4	×	0.4	×	0.4	×	<0.1	○	0.4	×
Cl ⁻ (mg/dm ³)							18,100	×	17,300	×	18,500	○	18,500	○	17,500	×
総合判定							汚染海域		汚染海域		汚染海域		清浄海域		汚染海域	

水深 -12m

測定項目	H15. 7.14 am10:00 (雨)		H15. 9. 4 am10:30 (曇)		H15.11.10 am10:00 (雨)		H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)		H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)		H16. 8.30 am 9:36 (曇の雨)		H16.11.10 am 9:40 (晴)		H17. 2.23 am 9:22 (晴)	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
DO (mg/dm ³)	4.6	×	1.6	×	3.5	×	8.7	○	5.4	×	1.2	×	2.6	×	6.5	○
NH ₄ ⁺ (mg/dm ³)	9.0	×	18.0	×	<1	×	0.3	×	0.4	×	0.3	×	<0.1	○	0.3	×
Cl ⁻ (mg/dm ³)	18,000	×	17,900	×	17,900	×	18,100	×	17,800	×	19,600	○	19,000	○	18,500	○
総合判定	汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		汚染海域		清浄海域		清浄海域	

判定基準：DO ≤ 6 (mg/dm³)、NH₄⁺ ≥ 0.1(mg/dm³)、Cl⁻ ≤ 18,245 (mg/dm³)。このうち、2項目以上に該当したら、汚染海域と判定した。

表中では、測定項目ごとに「汚染」と判定された項目は「×」と表記し、「清浄」と判定された項目は「○」と表記した。

5.3 陽極発生電流の経時変化

図-5.12 に、各水深に設置したアルミニウム合金陽極からの発生電流の経時変化を示す。図-5.12 から、水深-3m と水深-12m に設置した陽極からの発生電流およびその変化の傾向はほぼ一致していることがわかる。

陽極発生電流の推移は、試験開始から平成14年12月中旬にかけて増加し、その後翌年の9月下旬にかけて減少を示した。平成14年12月中旬のピーク時に水深-3m で約4.4A、水深-12m では約4.2A に達した。平成15年9月下旬以降、同年12月下旬までは再び増加に転じた。このような推移が毎年周期的に繰返されている。

陽極発生電流の変化は次のように整理できる。

- 1) 試験開始当初、約3.5Aであった電流は、約2年後には1.2±0.4 A の範囲に収束する程度まで低減する。
- 2) 毎年冬場(12月～1月頃)に電流が増加する。
- 3) 冬場における電流の増加量は、時間の経過に伴い小さくなる。

以上の1)から3)の傾向は、4.1 で述べた発生電流の理論式で説明できる。

はじめに1)の傾向について議論する。試験開始当初は石灰質皮膜は形成されておらず電流 $I_{L,1}$ は(4.3)式に防食面積 A を乗じた(5.1)式で表わされる。時間の経過に伴い石灰質皮膜が形成された後の電流 $I_{L,2}$ は、(4.7)式より

(5.2)式となる。

$$I_{L,1} = \frac{4 \cdot F \cdot A \cdot D_d \cdot C_b}{\delta_d} \quad (5.1)$$

$$I_{L,2} = \frac{4 \cdot F \cdot A \cdot D_d \cdot C_b}{\frac{D_d}{D_e} \cdot \delta_e + \delta_d} \quad (5.2)$$

ここで、電流 $I_{L,1}$ と $I_{L,2}$ の大小関係を考えると、次式により D_d 、 D_e 、 δ_d および δ_e は全て正の値なので、 $I_{L,1} > I_{L,2}$ の関係が成立する。

$$I_{L,1} - I_{L,2} = \frac{4 \cdot F \cdot A \cdot D_d^2 \cdot C_b \cdot \delta_e}{\delta_d (D_d \cdot \delta_e + D_e \cdot \delta_d)} > 0$$

$$\therefore I_{L,1} > I_{L,2} \quad (\because D_d, D_e, \delta_d, \delta_e > 0) \quad (5.3)$$

つまり時間の経過に伴い石灰質皮膜が形成されるにしたがい、発生電流は低減する。

次に2)の冬場における電流の増加傾向について述べる。(5.1)式、(5.2)式より、電流の増加に関与する因子は、水温の変化を考慮して、 D_d 、 D_e 、および C_b と考えられる。一般に酸素の拡散係数(D_d 、 D_e)の温度依存性は小さい¹⁸⁾。一方、図-5.4に示したように溶存酸素(C_b)は冬場に高くなる。冬場における電流の増加は、溶存酸素

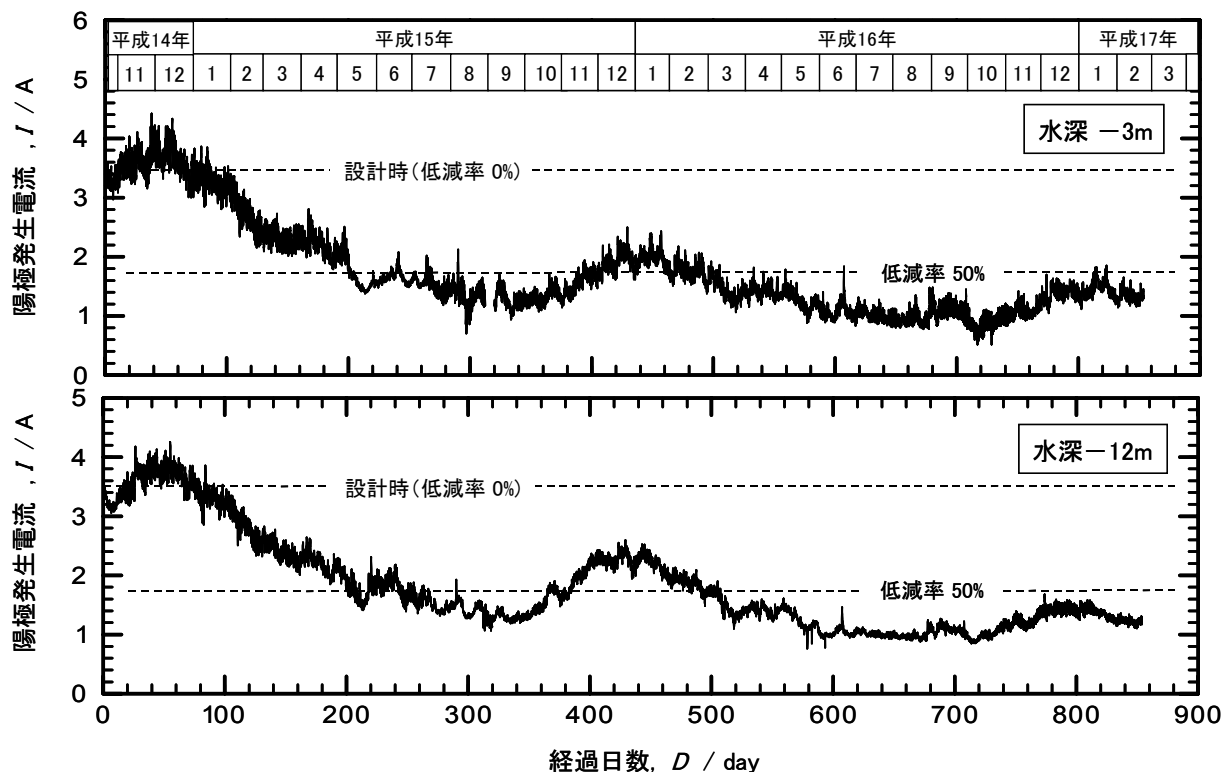


図-5.12 各水深における陽極発生電流の経時変化

濃度の上昇によるものと説明できる。

最後に 3) の傾向について述べる。(5.2)式より、時間の経過を考慮した場合、電流の増加に寄与する因子は、 D_e 、 δ_e 、 C_b である。なお前述のように D_d の温度依存性は小さいので一定とみなせ、また δ_d は海水の流動条件に依存するが、流速等を測定していないのでここでは一定と仮定した。したがって(5.2)式は(5.4)式で表わされる。

$$I_{L,2} = \frac{a \cdot C_b}{b + \frac{\delta_e}{D_e}} \quad (5.4)$$

ここで $a=4 \cdot F \cdot A$ (定数)、 $b = \delta_d / D_d$ (定数とみなす)である。冬場に C_b が増加することは既に述べた。以下では D_e と δ_e について議論する。

陰極への電流の流入に伴い、陰極表面には海水中のカルシウムイオンやマグネシウムイオンが移動してくる。石灰質皮膜はこれらのイオンから生成した炭酸カルシウムおよび水酸化マグネシウムで構成されている。したがって電流量が多くなれば、すなわち電気防食をしている期間が長くなるほど、石灰質皮膜は、より厚く、より緻密になる傾向がある。したがって(5.4)式の石灰質皮膜の厚さ δ_e は増加し、石灰質皮膜層内における酸素の拡散係数 D_e は低下する。これより(5.4)式の右辺の分母は、時間の経過とともに増加するので、溶存酸素濃度 C_b が毎年同じように上昇したとしても電流の増加量は年々に低下する傾向にある。

以上のように図-5.12に示した発生電流の変化は、(5.1)式、(5.2)式および(5.4)式の理論式を用いて、説明することができる。

5.4 陽極の消耗状態

試験対象とした J1 ジャケットに取り付けられているアルミニウム合金陽極は、発生電流 3.5A、耐用年数 50年の規格のものである。図-5.12のように試験開始から平成 15 年 1 月中旬までの約 85 日間は、いずれの水深においても規格以上の電流が陽極から発生している。これは、試験開始初期に設計寿命を上回る過剰な陽極消耗が起きていることを意味している。

一般に、陽極の耐用年数として 10 年を超える場合では防食設計上、防食期間における陽極発生電流の低減率を通常 50%と見込んでいる。この低減率とは、初期における設計上の陽極発生電流に対する防食期間を通じた陽極発生電流の平均値との比率のことである。つまり、本施設においては設計上の陽極発生電流は 3.5A であるので、陽極発生電流の平均値として約 1.8A の水準が低減率

50%に相当する。

図-5.12 の経時変化から各水深ともに陽極発生電流は年々低下し、約 1.2±0.4A に収束する傾向にあるため、陽極発生電流の平均値としては今後 1.8A の水準を十分下回ることが予想される。つまり、各水深に設置した陽極は、設計寿命を十分満たすものと考えられる。

5.5 陰極電位の経時変化

図-5.13 に各水深における陰極電位の経時変化を示す。各水深における陰極電位の経時変化についての概観は以下の通りである。

(1) 水深-3m における陰極電位

陰極電位は、電気防食下にあるにも係わらず試験開始から貴化し続け、平成 14 年 12 月中旬頃に最も貴化し、その時点では約 -692mV vs.Ag/AgCl であった。その後、平成 14 年 12 月中旬から翌年の 9 月下旬にかけて陰極電位は卑化し続け、約 -940mV vs. Ag/AgCl に達した。9 月下旬以降は一転し、同年 12 月下旬まで貴化した。このような陰極電位の変化が毎年周期的に繰り返された。長期的には年々低下し、約 -920±40 mV vs.Ag/AgCl の電位幅に収束する傾向にある。

(2) 水深-12m における陰極電位

陰極電位の経時変化は、前述した水深-3m の場合と酷似している。相違点は、試験期間中における水深-12m の陰極電位が、水深-3m の場合と比較して全体的に卑なことである。水深-3m の陰極電位に対して、試験開始時では約 100mV、平成 14 年 12 月中旬におけるピーク時では約 120mV 程度卑な値であった。平成 15 年 9 月から 10 月にかけて、各水深の陰極電位はほぼ一致するものの、その後は水深-12m における陰極電位の方が水深-3m の陰極電位よりも約 40mV 卑側の電位差を保ちながら推移した。また長期的には、水深-3m の場合と同様に陰極電位は低下し、約 -970±30 mV vs.Ag/AgCl の電位幅に収束する傾向にある。水深-3m と水深-12m の電位の差異については 5.7 で議論する。

5.6 防食状態

水深-3m では、図-5.13 から平成 14 年 11 月の中旬から翌年の 2 月上旬までの期間、陰極電位が海洋鋼構造物の防食電位¹⁰⁾ (-780mV vs.Ag/AgCl) より貴となった。すなわち、この期間中では十分な防食状態にない。しかし、経時変化の概観から陰極電位は約 -920±40 mV vs.Ag/AgCl の電位幅に収束する傾向にあるので、初期には不十分な防食状態の期間があっても、長期的には実用

上十分な防食状態が得られるものと考えられる。

一方、水深-12m では、図-5.13 から電位変化はあるものの試験期間を通して、陰極電位は防食電位より卑な電位を維持した。また、陰極電位は約-970±30 mV vs.Ag/AgCl の電位幅に収束する傾向にあるので、今後も電気防食の効果により良好な防食状態が維持されるものと考えられる。

5.7 陰極電位の変動に関する理論的考察

はじめにステンレス鋼の影響の小さい水深-12m 地点の陰極電位について述べる。前述のように陰極電位は(4.11)式で表わされる。この式より陰極電位の変動に関して議論する。

陽極は徐々に消耗するので陽極の長さ L 、陽極の等価半径 r は次第に減少するが、約2年半の本試験期間中の変化は小さいと考えられる。また海水の電気抵抗率 ρ の変動も小さい。したがってこれらの値はほぼ定数として扱える。また陽極の電位 E_a も定数として扱えるので、陰極電位 E_c は発生電流と線形関係にあり、発生電流の変化に連動する。冬場に電位が貴化する現象および時間の経過に伴い電位が卑に移行する現象は、陽極発生電流の変化に伴って生じるものと説明できる。

次にステンレス鋼の影響を最も受ける水深-3m 地点の陰極電位について述べる。5.5 で述べたように水深-3m 地点の陰極電位は、水深-12m 地点のそれと比べて貴な値を示した。この理由について考察する。

防食対象物が鋼構造物のみの場合、前述のように陰極

電位と発生電流の関係は(4.9)式で表わされる。この式は陽極近傍における電流経路内の海水の電気抵抗 R_a が、陰極近傍における電流経路内の海水の電気抵抗 R_c よりも十分大きいという仮定に基づいている。4.2 で述べたように防食対象物が鋼材のみの場合は、陽極面積に対して陰極面積が十分に大きいので、この仮定が成り立つ。水深-3m 地点は被覆材として使用しているステンレス鋼に最も近い位置であり、鋼材のみではなくステンレス鋼も防食対象物に含まれる。この場合陽極からの発生電流は、鋼材ではなくステンレス側に集中的に流れることが確認されている¹⁹⁾。したがって鋼材のみを防食対象とした場合に比べて陰極部分の面積が小さくなるので、(4.9)式を導く際の仮定が成り立たなくなる。ステンレス鋼の近傍では R_c を無視できず、陰極電位と発生電流の関係は(5.5)式になると考えられる。

$$E_c = I \cdot (R_a + R_c) + E_a \quad (5.5)$$

したがって(5.5)式から明らかなように、水深-3m 地点の陰極電位は、水深-12m 地点のそれと比べて $I \cdot R_c$ の分だけ貴な値を示す。

なお水深-12m の場合と同様に、陰極電位 E_c は発生電流の変化に連動するので、冬場の電位の貴化および時間の経過に伴う電位の卑化は、陽極発生電流の変化が主原因と考えられる。

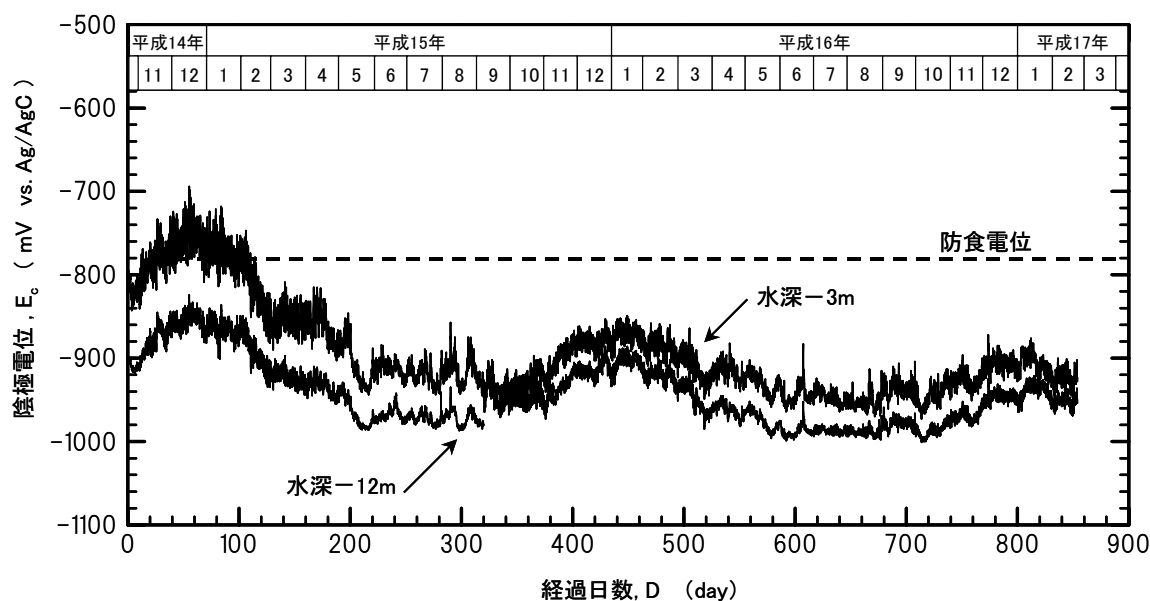


図-5.13 各水深における陰極電位の経時変化

5.8 陰極電位と陽極発生電流の関係

前述のように、陰極電位と陽極発生電流の関係は、水深-12m では(4.9)式、水深-3m では(5.5)式で表わされる。(5.5)式中の R_c については 5.9 で述べるが、一般には容易に求められないので、ここでは R_c を無視して議論を進める。(4.9)式および(5.5)式中の R_a は(4.10)式から求められ、本試験で用いた陽極の場合、 $L=142\text{cm}$ 、 $r=17.8\text{cm}$ である。また 5.1 で述べたように、それぞれの水深で海水の電気抵抗率を定期的に測定しており、その平均値は水深-3m で $28.1\Omega\text{cm}$ 、水深-12m で $24.3\Omega\text{cm}$ であった。また本試験で用いた陽極の電位 E_a は $-1060\text{mV vs. Ag/AgCl}$ である。これらの値を用いて、本試験条件における陰極電位 E_c と陽極発生電流 I の関係を求めると、(5.6)式および(5.7)式となる。

$$\text{水深-3m} \\ E_c = 77.7 \times I - 1060 \quad (5.6)$$

$$\text{水深-12m} \\ E_c = 66.9 \times I - 1060 \quad (5.7)$$

なお、

E_c : 陰極電位 (mV vs. Ag/AgCl)

I : 陽極発生電流 (A) である。

水深-12m における実測した陰極電位と発生電流の関係を図-5.14 に、水深-3m については図-5.15 に示した。水深-12m の場合、試験開始当初の数ヶ月間では、同じ陰極電位の時の陰極電位は実測値の方が理論値よりも $10\sim 20\text{mV}$ 卑な値を示したが、それ以降、両者はほぼ一致している。長期的な視点に立てば、ステンレス鋼の影響を受けない水深-12m の地点では、陰極電位と発生電流は理論に基づく関係式通りに変動すると言える。

ステンレス鋼の影響を最も受ける水深-3m 地点では、実測値が理論に基づく関係式上にある期間もあるが、全体的な傾向として、陰極電位の実測値は理論値よりも貴な値を示す。この原因は、(5.5)式中の R_c を無視したことにある。ステンレス鋼の影響を受ける水深では、(4.9)式が成り立たない。

5.9 陰極電位による陽極消耗量の推定

5.1~5.5 で述べたように、本試験構造物は十分な防食状態にあり、陽極寿命も想定通りである。流電陽極が機能している限り、この防食状態は維持されると考えられる。しかし何らかの要因によって防食電流が増加するようなことがあると、当然ながら流電陽極の消耗速度が速

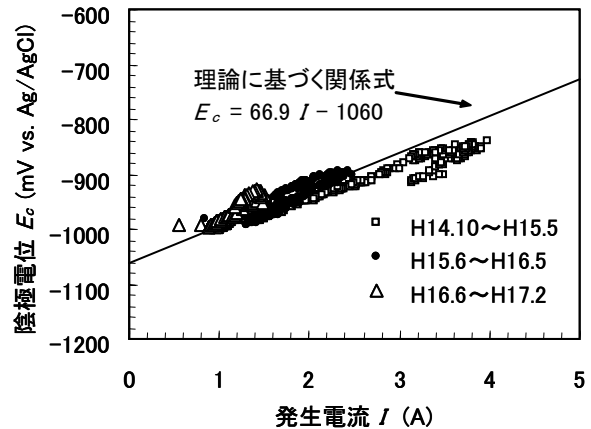


図-5.14 水深-12m における陰極電位と陽極発生電流の関係

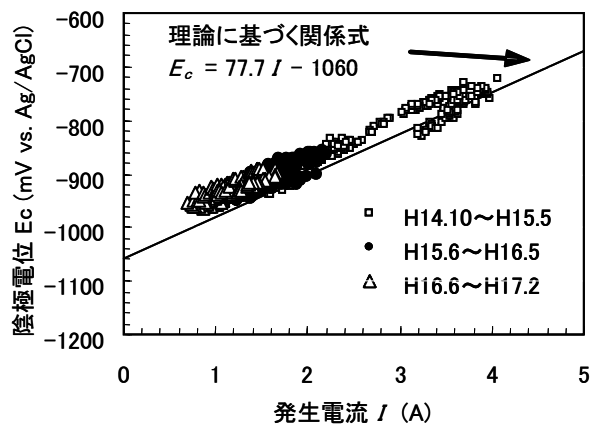


図-5.15 水深-3m における陰極電位と陽極発生電流の関係

まり、想定している寿命以前に消失してしまうことも考えられる。したがって構造物を維持管理する上では、陽極の消耗量を把握し、適切な陽極交換時期を定める必要がある。

本試験では、陽極からの発生電流を測定する装置を付けているので、陽極の消耗量を推測することができるが、通常はこのような装置は設置されていない。比較的容易に測定できるのは陰極電位であり、これによって陽極の消耗量をどの程度正確に推測できるか検討する。

(1) 陰極電位による推定方法

繰り返す述べるように水深-12m における陰極電位 E_c と陽極発生電流 I の関係は(5.6)式で表わされる。この理論に基づく関係式を用いれば、陰極電位から発生電流を求めることができる。発生電流を時間で積分すれば測定期間中の総電気量を求められる。本試験の陽極は 1kg 当

たり $9.36 \times 10^6 \text{C}$ の電気を発生するので、総電流量から陽極の消耗量を算出できる。

陰極電位は 10 分間隔で測定しているため、1 日の測定値は 144 個である。本研究ではこれらの平均値をその測定日における陰極電位 $E_{c,i}$ とする。試験開始から t 日後までの陽極消耗量 ΔW_e は (5.8) 式より求められる。

$$\Delta W_e = \sum_{i=1}^t \frac{\left(\frac{E_{c,i} + 1060}{Z} \right) \times \Delta T}{Q} \quad (5.8)$$

ここで、

- ΔW_e : 推定陽極消耗量 (kg)
- $E_{c,i}$: 平均陰極電位 (mV vs. Ag/AgCl)
- Q : 陽極の有効発生電流量 ($9.36 \times 10^6 \text{ C/kg}$)
- ΔT : 積算間隔 1 日 (= $60 \times 60 \times 24 = 86400 \text{ s}$)
- Z : 電流経路内の電気抵抗値 (m Ω) である。

ΔW_e は陰極電位の実測値と理論に基づく関係式を用いて推定した陽極消耗量であり、推定陽極消耗量とよぶ。また、(5.8) 式の Z は、水深 -12m の場合では 66.9m Ω となる。

本試験では陽極発生電流を実測しているため、この実測値からも陽極消耗量を算出できる。これが真の陽極消耗量に相当する。これを実測に基づく陽極消耗量 ΔW_r とよぶ。各測定日において 10 分間隔で測定した値を平均し、これをその測定日の陽極発生電流 I_i とすれば、試験開始から t 日後までの実測に基づく陽極消耗量 ΔW_r は、(5.9) 式より算出できる。

$$\Delta W_r = \sum_{i=1}^t \frac{I_i \times \Delta T}{Q} \quad (5.9)$$

ここで、

- ΔW_r : 実測に基づく陽極消耗量 (kg)
- I_i : 平均陽極発生電流 (A)
- Q : 陽極の有効発生電流量 ($9.36 \times 10^6 \text{ C/kg}$)
- ΔT : 積算間隔 1 日 (= $60 \times 60 \times 24 = 86400 \text{ s}$) である。

図-5.16 に水深 -12m における ΔW_r と ΔW_e の関係を示す。なお図中のプロットは、試験開始(平成 14 年 10 月)から平成 15 年 5 月まで、平成 16 年 5 月まで、平成 17 年 2 月までの期間における値に対応している。また図中の点線線上では、実測に基づく陽極消耗量 ΔW_r と推定陽極消耗量 ΔW_e が一致する。

水深 -12m 地点に設置した陽極の場合、両者がほとんど一致していることがわかる。これは図-5.14 に示したように陰極電位と発生電流の推移が理論式に従うためである。つまり、ステンレス鋼の影響を受けない地点では、陽極の消耗量を陰極電位から推定できると考えられる。

次にステンレス鋼の影響を受ける水深 -3m の結果について述べる。5.8 で述べたように R_c の寄与を無視した (5.6) 式では、陰極電位と発生電流の関係を正確に表わすことはできないが、試行として同式を用いて陽極消耗量を推定する。(5.8) 式中の Z は、水深 -3m の場合では 77.7m Ω である。水深 -12m の場合と同様の方法で求めた ΔW_r と ΔW_e を図-5.17 に示す。試験期間が短い場合、両者はほとんど一致しているように見えるが、試験期間が長くなるにつれて両者の差が徐々に積算されるので、全期間(平成 14 年 10 月～平成 17 年 2 月)では、 ΔW_e は ΔW_r より約 1.2 倍大きい値になる。これは実際よりも

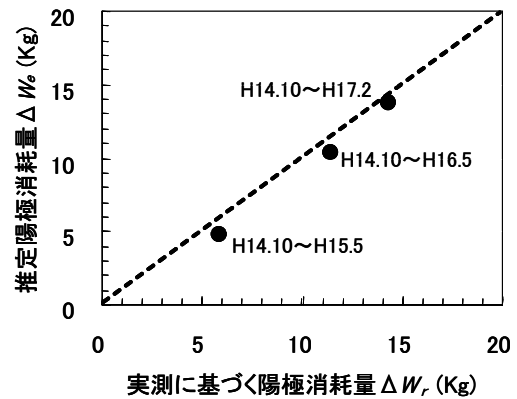


図-5.16 水深 -12m における陽極消耗量の推定

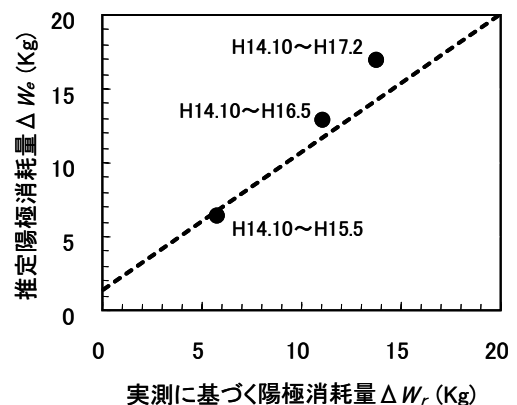


図-5.17 水深 -3m における陽極消耗量の推定値

20%程度過大に消耗量を算出してしまふことを意味する。この原因は陰極近傍における電流経路内の海水の電気抵抗 R_c を無視したことにある。

最後に水深-3m 地点における R_c について議論する。一般に海水中の電流経路を求めることは難しいので、 R_c を容易に求めることはできない。しかし本研究では陰極電位と陽極からの発生電流の両者を測定しているので、(5.5)式から R_c を算出することができる。前述のように E_a は -1060mV vs.Ag/AgCl, R_a は 77.7mΩ なので、 R_c は(5.10)式で表わされる。

$$R_c = \frac{E_c + 1160}{I} - 77.7 \quad (5.10)$$

(5.10)式から求めた R_c を図-5.18 に示す。 R_c が負値になることは原理的にあり得ないが、計算上はそのような場合があった。概ね 10~50 mΩ の範囲で変動するが、陰極電位や電流に見られたような季節的な変動は認められなかった。 R_c はステンレス鋼近傍の電流経路内の海水抵抗なので、その値はステンレス鋼が没水している面積に依存する。すなわち R_c は潮位によって変動すると考えられるが、両者の関係については今後の研究課題としたい。

試験期間内の R_c の平均値は、21.8 mΩ である。陽極と陰極間の全海水抵抗、すなわち ($R_a + R_c$) の約 20% を占める。このようにステンレス鋼の近傍に設置した陽極の場合は R_c を無視することはできず、 R_c を考慮しないで陰極電位から陽極消耗量を推定すると過大に見積もることになる。

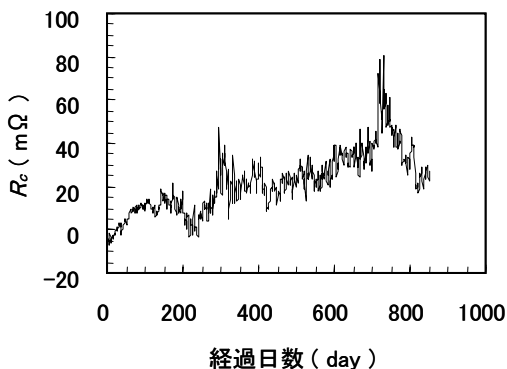


図-5.18 水深-3m における R_c の変化

5.10 長期間における陽極消耗量推定の際の注意点

最後に、長期的な視点に立ち、より正確に陽極消耗量をモニタリングする方法について述べる。要点は、実際の陰極電位と陽極発生電流の関係が、理論に基づく関係式と一致するかである。再度整理すると、両者の関係は(5.11)式で表わされる。

$$E_c = \left[\frac{\rho}{2\pi L} \left\{ 2.3 \log_{10} \left(\frac{4L}{r} \right) - I \right\} + R_c \right] \cdot I + E_a \quad (5.11)$$

なおステンレス鋼から離れた位置に設置した陽極の場合は、 R_c を無視できる。一方、ステンレス鋼の近傍に設置した陽極の場合は R_c を無視できない。 R_c の求め方については今後の課題としたい。(5.11)式中にはいくつかの変数が含まれており、これらをいかに正確に定めるかが要点である。以下、陽極の長さ L 、陽極の等価半径 r 、海水の電気抵抗率 ρ について述べる。

本試験期間は短かいので陽極の消耗量は少ない。したがって陽極の形状変化はほとんど生じず、 L および r を定数として扱った。長期的には陽極の消耗に伴い、 L および r は減少するので、これらを考慮する必要がある。また電気抵抗率 ρ については、試験期間中の変化がそれほど大きくなかったため、その平均値を用いたが、長期間では大きく変動することも考えられる。 ρ を可能な限り高頻度で測定し、その時点の値を用いるようにすれば、より正確な値になる。

以上のように、長期的な視点に立った場合、陽極の長さ L 、陽極の等価半径 r 、海水の電気抵抗率 ρ の変化を考慮することにより、陰極電位と陽極発生電流の関係式をより精度高く求めることができると考えられる。こうすることで、比較的測定の容易な陰極電位から、陽極の消耗量を推定できるであろう。

6. 結論

耐海水性ステンレス鋼ライニングと電気防食を併用した防食工法に注目し、この防食工法が適用されている実海洋鋼構造物に対して現地防食試験を試みた。試験対象とした水深は、異種金属接触腐食が懸念されるステンレス鋼ライニングと鋼管の境界部にあたる-3m および、異種金属接触腐食の影響が小さい-12m である。今回の試験結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 各水深における陽極発生電流値はほぼ一致しており、試験開始当初、約 3.5A であった電流は、約 2 年後には 1.2 ± 0.4 A の範囲に低減した。この要因として、経過に伴う鋼材表面上への石灰質皮膜(エレクトロコーティング)の形成が考えられる。
- (2) 毎年冬場(12月~1月頃)に電流が増加し、その増加量は経時的に小さくなる。この増加要因は、冬場における当該海域の溶存酸素濃度の上昇である。また、この増加量が経時的に小さくなる要因としては、前述した

ように石灰質皮膜(エレクトロコーティング)の形成が考えられる。

- (3) 陽極の消耗状態に関しては、各水深ともに約 1.2 ± 0.4A に収束する傾向にあった。今回使用した陽極に関する低減率 50%の水準は 1.8A であり、陽極発生電流の平均値はこれを十分下回ることが予想され、設計寿命を十分満たすものと考えられる。
- (4) 陰極電位の測定により、水深-3m における鋼材部では、初期に不十分な防食状態の期間が確認された。しかし、経時変化の概観から陰極電位は約 -920 ± 40 mV vs.Ag/AgCl の電位幅に収束する傾向にあるので、長期的には実用上十分な防食状態が得られるものと考えられる。一方、水深-12m における鋼材部では、試験期間を通して、陰極電位は防食電位より卑な電位を維持した。また陰極電位は約 -970 ± 30 mV vs.Ag/AgCl の電位幅に収束する傾向にあるので、今後も電気防食の効果により良好な防食状態が維持されるものと考えられる。
- (5) 流電陽極方式の電気防食系では、陰極電位と陽極発生電流の間には(5.11)式が成立する。この関係を利用することで、ステンレス鋼の影響が少ない水深では、陰極電位の測定から陽極消耗量を推定できることが明らかになった。なおこの場合、(5.11)式中の R_c はゼロとみなせる。
- (6) 長期モニタリングの観点から、より正確に陽極消耗量を算出するためには、(5.11)式中の L , r , ρ および R_c 値を正確に求めなければならない。 L , r 値に関しては陽極消耗に応じた陽極形状の変化を理論式に反映させれば良い。また ρ に関しては測定頻度を多くする必要があり、ステンレス鋼の影響を受ける水深での R_c の変動やその求め方については、今後の検討課題としたい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、関東地方整備局港湾空港部の皆様方には多大なるご協力を頂いた。また東京港埠頭公社の皆様方、ワンハイラインズの皆様方のご協力の下で、現地防食試験を実施することができた。ここに深く感謝の意を表します。

また試験開始当初のデータ収集および解析を遂行した元材料研究室の平崎敏史氏、現地試験に関して多くの助言をいただいた防食補修工法研究会の皆様方に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤弘隆, 河合康博, 岩見博志, 石田雅己, 金井久, 盛高裕生: 傾斜板式防波堤に適用した耐海水性ステンレス鋼ライニングの耐久性について, 海洋開発論文集, Vol.16, 2000年6月, pp.405-410.
- 2) 佐々木信博・佐藤弘隆・石田雅己・濱田秀則・阿部正美: ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性(その1), 第21回防錆防食技術発表大会講演予稿集, No.104, 2001年7月, pp.23-26.
- 3) 佐々木信博・佐藤弘隆・石田雅己・濱田秀則・阿部正美: ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性(その2), 第22回防錆防食技術発表大会講演予稿集, No.101, 2002年7月, pp.13-16.
- 4) 佐々木信博・佐藤弘隆・石田雅己・阿部正美: ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性, 防錆管理, Vol.46(No.3), 2002年3月, pp.86-91.
- 5) E.Schaschl and G.A.Marsh: Placement of Electrode and Impressed Current Anode Effect on Cathodic Protection of Steel in a Long Cell, *Materials Performance*, NACE, pp.9-11, (1974).
- 6) 腐食防食協会編: 腐食・防食ハンドブック, 丸善, 2000年2月, pp.179-185.
- 7) 財団法人日本規格協会: 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 JIS G4305-1999, 財団法人日本規格協会, 1999年4月.
- 8) 新日本製鐵株式会社: 耐海水性ステンレス鋼 YUS270, 新日本製鐵株式会社, Cat.No.SS107, 1990年5月.
- 9) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版), 財団法人沿岸開発技術研究センター, 1997年4月, p.58
- 10) 同上, p.54.
- 11) 財団法人日本規格協会: 工業排水試験方法 JIS K0102-1998, 財団法人日本規格協会, 1998年4月.
- 12) 三宅泰雄, 北野 康: 新水質化学分析法, 地人書館, 1991年10月, p.105.
- 13) A. J. Bard and L. R. Faulkner, "Electrochemical Method", John Wiley & Sons, pp.32-34, (1980).
- 14) W.Wang and W.H.Hartt: A Novel Approach to Polarization Data Analysis and Its Implications Regarding Cathodic Protection System Design and Performance, *Corrosion/94*, NACE, paper No.496, (1994).
- 15) 海洋ダム・堰施設技術基準委員会編: ダム・堰施設技術基準(案), 社団法人ダム・堰施設技術協会, 1999年3月, pp.764-765.

- 16) 気象庁：海洋観測指針 第 8 章 海水の化学分析，日本気象協会，1990 年 4 月，pp.145-157.
- 17) 阿部正美：海洋鋼構造物の腐食と防食対策，日本防錆技術協会，2002 年，p.32.
- 18) 腐食防食協会編：金属の腐食・防食 Q&A 電気化学入門編，丸善，2002 年 12 月，p.62.
- 19) 望月紀保：電気防食における電位/電流分布，第 10 回コロージョン・セミナー予稿集，腐食防食協会，1983 年 9 月，pp.5-17.
- 20) 生活環境の保全に関する環境基準 (昭和 49 年 環境庁告示第 63 号，平成 11 年環境庁告示第 14 号・一部改正).

付録 A 現場適用事例

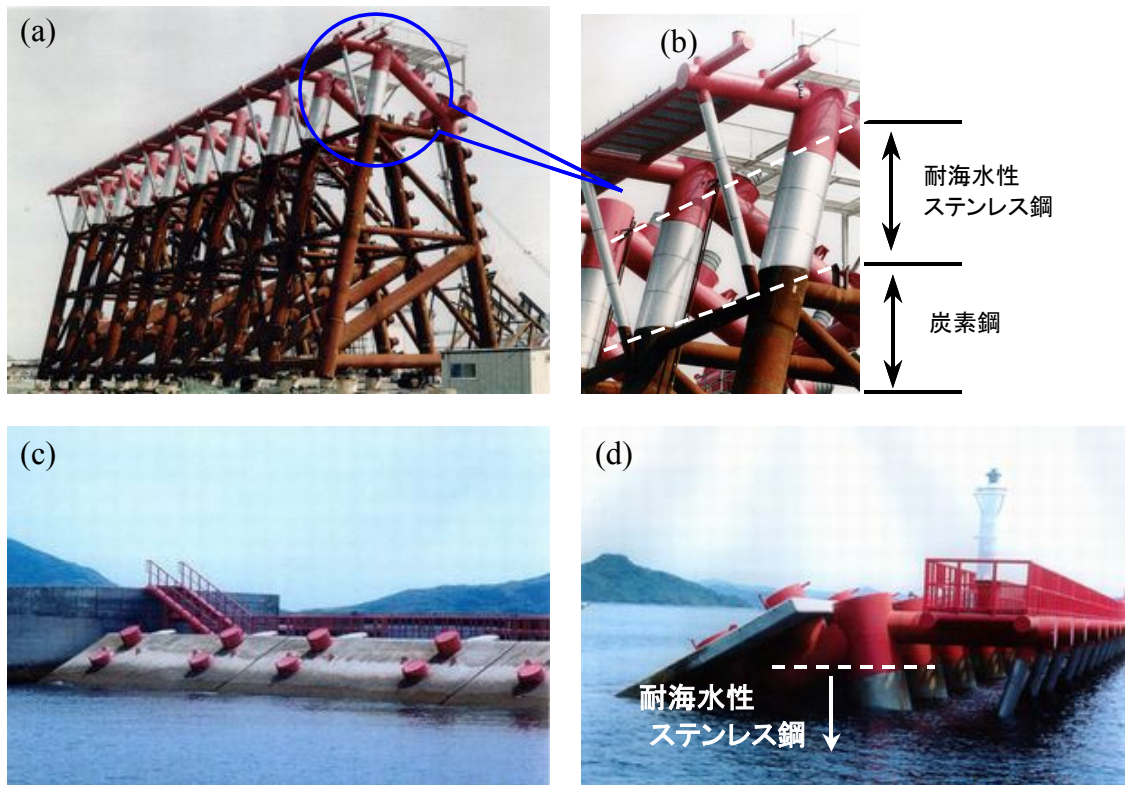


図-A.1 南風泊漁港沖防波堤（長崎県高島町）

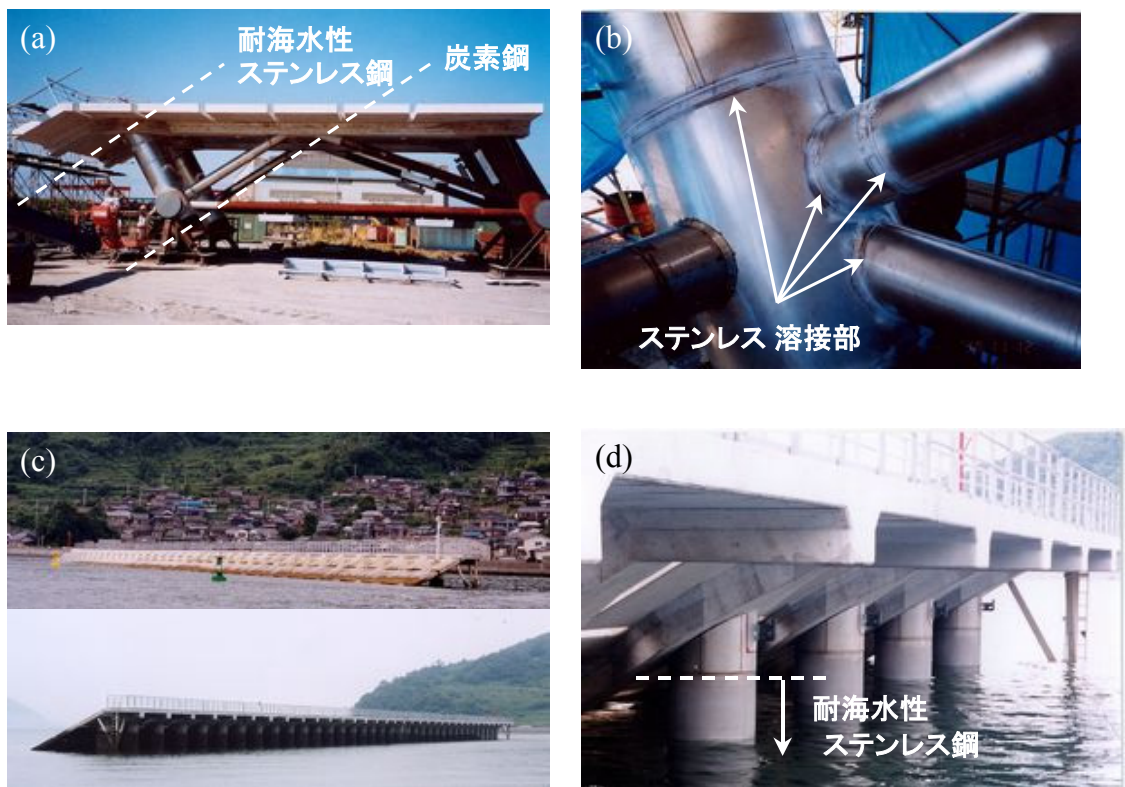


図-A.2 大津島漁港防波堤（山口県徳山市）

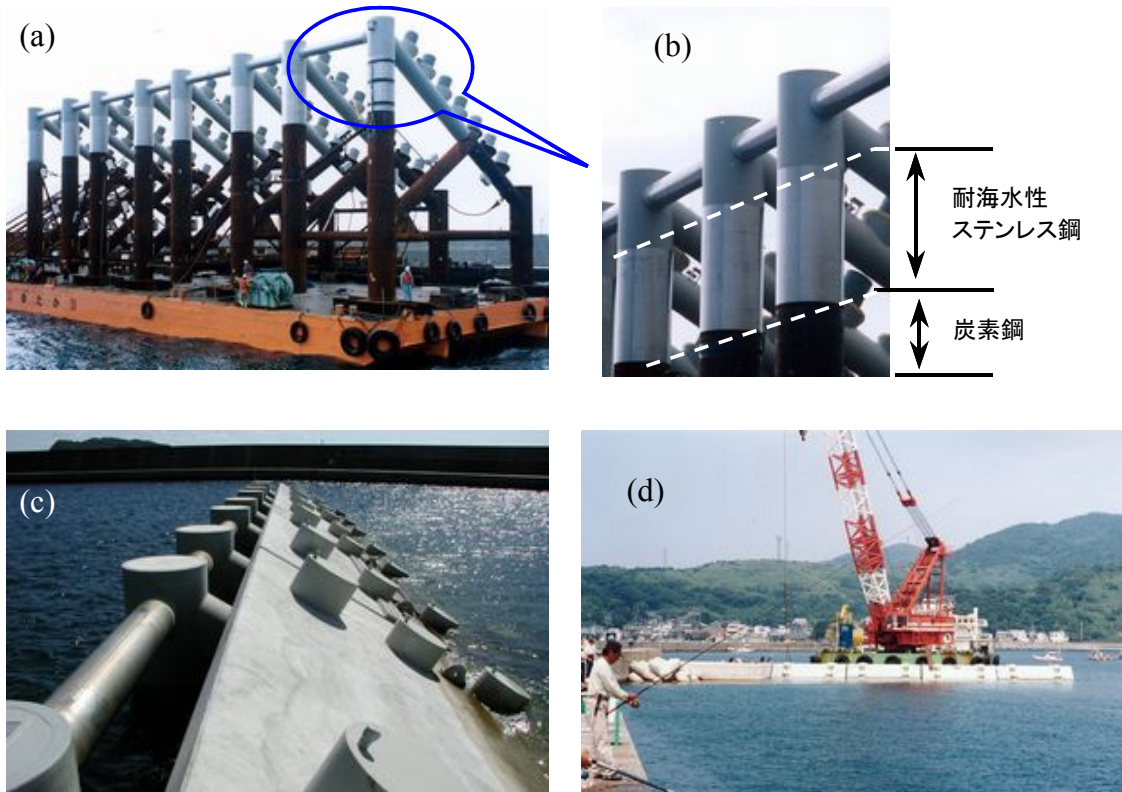


図-A.3 佐賀関漁港防波堤（大分県佐賀関町）

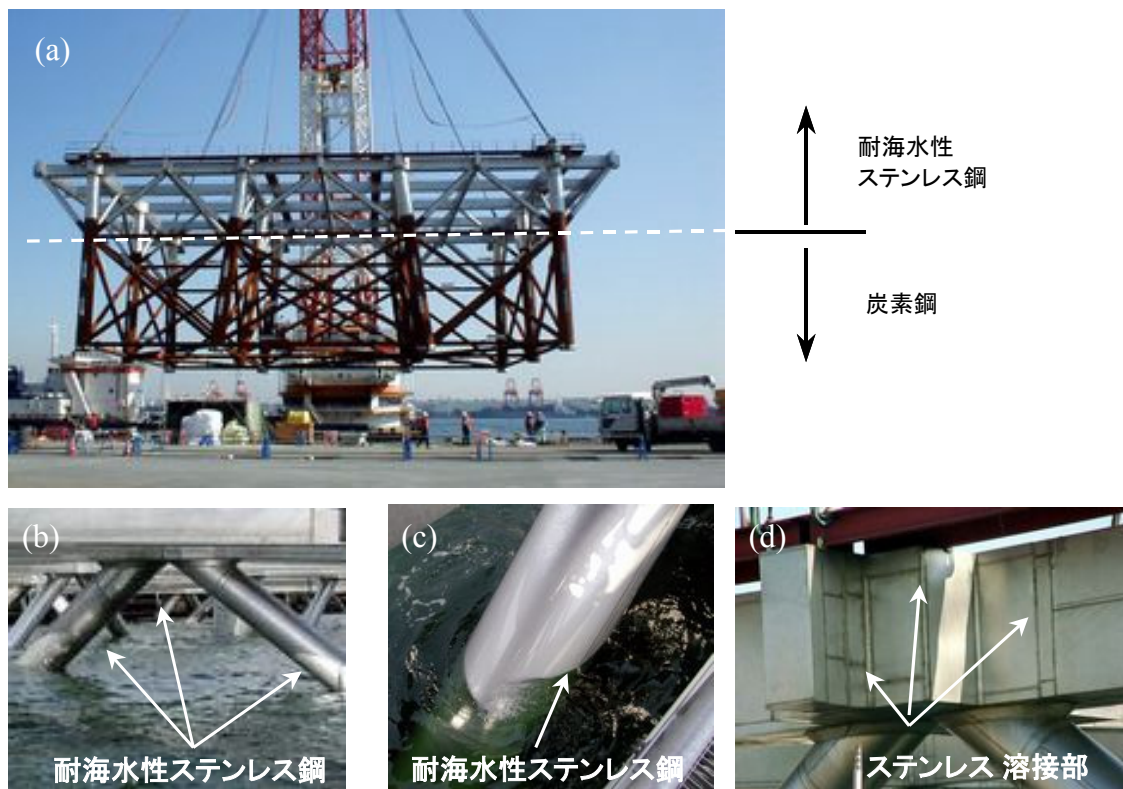


図-A.4 大井埠頭新第5バース（東京都 試験場所）

付録 B 水質分析結果

表-B.1 試験期間中における水質分析結果

測定項目	測定日時 (天気)	H15. 7.14 am 10:00 (雨)	H15. 9. 4 am 10:30 (曇)	H15.11.10 am 10:00 (雨)	H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)	H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)	H16. 8.30 am 9:36 (曇のち雨)	H16.11.10 am 9:40 (晴)	H17. 2.23 am 9:22 (晴)
	水深(m)								
水温 (°C)	0	----	----	----	12.0	20.3	24.7	20.3	11.8
	-3	21.0	25.0	17.9	11.3	19.5	24.4	20.3	11.9
	-6	----	----	----	11.0	18.9	23.7	20.5	11.8
	-9	----	----	----	10.7	18.3	22.8	20.5	11.8
	-12	20.4	22.0	17.8	10.6	17.7	22.0	20.9	12.3
pH	0	----	----	----	7.93	8.03	7.66	7.76	8.06
	-3	7.50	8.15	7.40	8.17	8.00	7.92	7.95	8.09
	-6	----	----	----	8.19	8.02	7.99	7.95	8.11
	-9	----	----	----	8.22	8.06	8.05	7.97	8.14
	-12	7.82	7.97	7.75	8.22	8.02	7.96	7.98	8.11
電気抵抗率 ρ (Ω cm)	0	----	----	----	29.4	29.0	27.0	29.7	28.9
	-3	28.7	30.9	27.7	28.7	28.7	23.6	27.3	29.5
	-6	----	----	----	28.0	26.2	22.6	24.3	28.3
	-9	----	----	----	28.9	24.7	21.7	22.6	28.0
	-12	22.6	23.7	23.6	28.5	23.8	21.4	23.0	27.4
DO (mg/dm ³)	0	----	----	----	8.5	8.9	3.4	4.5	6.5
	-3	5.6	3.9	3.7	8.4	8.5	3.0	4.4	6.9
	-6	----	----	----	8.6	6.6	2.6	3.2	6.6
	-9	----	----	----	8.6	6.4	2.3	2.7	6.6
	-12	4.6	1.6	3.5	8.7	5.4	1.2	2.6	6.5
NH ₄ ⁺ (mg/dm ³)	0	----	----	----	1.2	0.9	1.9	0.9	0.8
	-3	9.0	15.4	3.6	0.8	0.8	0.7	0.4	0.8
	-6	----	----	----	0.7	0.5	0.4	0.2	0.7
	-9	----	----	----	0.4	0.4	0.4	<0.1	0.4
	-12	9.0	18.0	<1	0.3	0.4	0.3	<0.1	0.3
Cl ⁻ (mg/dm ³)	0	----	----	----	16,300	14,300	15,500	13,800	17,200
	-3	14,000	14,000	15,300	17,300	14,400	16,900	15,700	17,200
	-6	----	----	----	17,700	16,700	18,400	17,600	17,500
	-9	----	----	----	18,100	17,300	18,500	18,500	17,500
	-12	18,000	17,900	17,900	18,100	17,800	19,600	19,000	18,500
COD (mg/dm ³)	0	----	----	----	----	----	----	----	<2
	-3	2.3	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
	-6	----	----	----	----	----	----	----	<2
	-9	----	----	----	----	----	----	----	<2
	-12	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
SS (mg/dm ³)	0	----	----	----	----	----	----	----	7
	-3	1	<1	1	3	6	16	<1	10
	-6	----	----	----	----	----	----	----	9
	-9	----	----	----	----	----	----	----	5
	-12	2	<1	4	4	4	20	<1	5
T-Ca (mg/dm ³)	0	----	----	----	----	289	310	268	361
	-3	----	288	325	355	295	368	315	361
	-6	----	----	----	----	326	368	336	365
	-9	----	----	----	----	347	384	357	370
	-12	----	350	400	365	358	400	357	378
T-Mg (mg/dm ³)	0	----	----	----	----	905	995	852	1,150
	-3	----	950	995	1,080	905	1,190	1,010	1,150
	-6	----	----	----	----	1,010	1,190	1,078	1,250
	-9	----	----	----	----	1,063	1,210	1,152	1,250
	-12	----	1,225	1,205	1,115	1,105	1,250	1,168	1,250
SO ₄ ²⁻ (mg/dm ³)	0	----	----	----	----	----	----	----	2,400
	-3	2,000	1,790	2,040	2,490	2,130	2,170	2,360	2,400
	-6	----	----	----	----	----	----	----	2,420
	-9	----	----	----	----	----	----	----	2,500
	-12	2,450	2,460	2,600	2,460	2,440	2,590	2,670	2,530
《参考値》									
陰極電位 (mV vs.Ag/AgCl)	-3	-910	-926	-910	-883	-932	-966	-923	-921
	-12	-965	-978	-938	-918	-978	-997	-969	-945
陽極発生電流 (A)	-3	1.552	1.110	1.342	1.838	1.147	0.805	1.107	1.452
	-12	1.678	1.338	1.684	1.886	1.209	0.905	1.231	1.304

付録 C 水質汚濁

参考として試験海域における水質汚濁についての調査を行なった。分析項目の pH, DO, COD および SS が該当項目である。水質汚濁の判定は環境基準²⁰⁾に基づいて行なった。表-C.1 に水質汚濁の判定結果を示す。この表より、試験期間中における当該海域は pH および COD の判定結果が良好であり、これらの項目に対して DO の判定結果は悪い。このため、総合判定ではほぼ DO の判定結果に応じた結果となった。一部例外はあるものの、当該海域は C 類以上の判定結果であるため、比較的澄んだ試験環境であったことが推察される。また季節変動については、8 月頃の夏季に汚濁は進行し、2 月頃の冬季に改善される傾向にある。

分析項目のうち SS は、海域の環境基準には含まれず、河川および湖沼の環境基準に含まれる項目である。図-5.11 から試験期間中の SS は平成 16 年 8 月 30 日に特異的に高い値、 20 mg/dm^3 が観測されたものの、一般的には 10 mg/dm^3 以下の低い値で推移している。水質汚濁の傾向として SS 値が大きくなることは、河川水や生活廃水の流入が影響しているものと考えられる。しかし、海域における明確な判定基準は現在のところ示されていないため、関連性については不明である。

表-C.1 水質汚濁の判定結果

測定項目	H15. 7.14 am10:00 (雨)		H15. 9. 4 am10:30 (曇)		H15.11.10 am10:00 (雨)		H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)		H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)		H16. 8.30 am 9:36 (曇の雨)		H16.11.10 am 9:40 (晴)		H17. 2.23 am 9:22 (晴)	
	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型
pH	7.50	B	8.15	A	7.40	C	8.17	A	8.00	A	7.92	A	7.95	A	8.09	A
DO (mg/dm^3)	5.6	B	3.9	C	3.7	C	8.4	A	8.5	A	3.0	C	4.4	C	6.9	B
COD (mg/dm^3)	2.3	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B
総合判定	B類		C類		C類		B類		B類		C類		C類		B類	

測定項目	H15. 7.14 am10:00 (雨)		H15. 9. 4 am10:30 (曇)		H15.11.10 am10:00 (雨)		H16. 2.24 pm 1:30 (曇のち晴)		H16. 5.18 am 9: 7 (雨のち曇)		H16. 8.30 am 9:36 (曇の雨)		H16.11.10 am 9:40 (晴)		H17. 2.23 am 9:22 (晴)	
	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型	測定日時 (天気)	類型
pH	7.82	C	7.97	A	7.75	C	8.22	A	8.02	A	7.96	A	7.98	A	8.11	A
DO (mg/dm^3)	4.6	C	1.6	C以下	3.5	C	8.7	A	5.4	B	1.2	C以下	2.6	C	6.5	B
COD (mg/dm^3)	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B	<2	B
総合判定	C類		C類以下		C類		B類		B類		C類以下		C類		B類	

類型 A類: 水産1級、2級、水浴、自然環境保全、工業用水および環境保全の利用目的に適応される。

B類: 水産2級、工業用水および環境保全の利用目的に適応される。

C類: 環境保全(日常生活において不快感を感じない程度)の利用目的に適応される。

港湾空港技術研究所報告 第45巻 第2号

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 ニッセイエブロ株式会社

Copyright© (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。