

海洋構造物の耐久性向上技術に関する 共同研究報告書

(海中部における電気防食技術に
関する研究 第3分科会電防部会)

— 暴露期間10年後の研究成果 —

平成7年12月

建設省土木研究所材料施工部化学研究室
財団法人 土木研究センター

Copyright ©1995 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所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。

海洋構造物の耐久性向上技術に関する 共同研究報告書

(海中部における電気防食設計技術に
関する研究 第3分科会電防部会)

—暴露期間10年経過後までの研究結果—

Cooperative Research Report on Cathodic Protection in Submerged Zone

建設省土木研究所

材料施工部	新材料開発研究官	片 脇	清
〃	化学研究室 室 長	坂 本	浩 行
〃	〃 研究員	佐々木	厳

財団法人 土木研究センター

顧 問	田 中	柳之助
調査試験部長	森	芳 徳
専門調査役	戸 村	壽 一
〃	清 水	一 夫
〃	田 邊	弘 往

社団法人 鋼材倶楽部

海 野 武 人

要 旨

海洋に設置される土木鋼構造物を対象とする電気防食の設計は、標準的な環境条件での比較的単純な構造物については、ほぼ確立しているが、複雑な構造を有する構造物や潮流海域に設置される構造物に適用する場合等については、必ずしも明確でなく、海洋構造物による海洋空間の有効利用を図るには、構造物の大型化、構造の複雑化、長寿命化等に適した確実に経済的な電気防食設計技術の確立が不可欠と考えられる。

このため、駿河湾の大井川町沖合に設置した海洋技術総合研究施設の本体および各種試験体ならびに大鳴門橋の作業架台に設置した試験体を用いて長期試験を行い、波浪、潮流漂砂等の海象条件の変化および形状の複雑な構造条件に適応する電気防食法および電気防食と塗装の併用法に関して適正な防食電流密度と管理電位などの新しい知見を得た。

また、これらの成果をもとに「海域における土木鋼構造物の電気防食指針(案)・同解説」を作成した。

キーワード：海洋構造物、鋼構造物、防食技術、電気防食、複合電気防食法、防食電位、防食電流密度、電位分布、アルミニウム合金陽極、亜鉛基準電極

まえがき

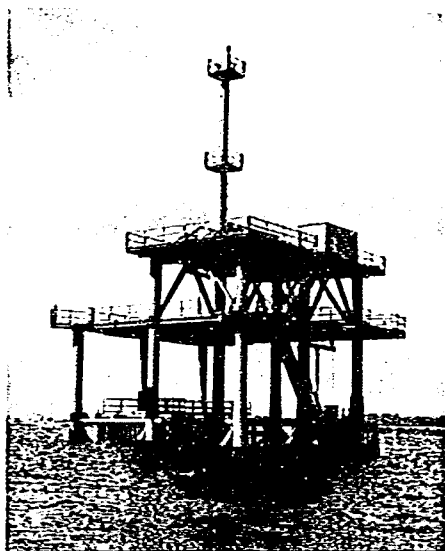
海洋鋼構造物は、供用期間が長く苛酷な腐食環境下にあり、何らかの腐食対策を必要とする。わが国における土木構造物の海中部に対する電気防食技術は、沿岸構造物とくに港湾構造物を中心に発展してきた。しかし、今後構造物がさらに大型化、複雑化するにしたがい、大型の海洋鋼構造物の大部分が海中部であることから、海中部にして防食効果が確実で経済性の優れた電気防食設計技術の確立が望まれている。

科学技術庁所管の科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋空間の有効利用に関する研究」の建設省土木研究所担当の実施課題の中の分担課題として「海中部の電気防食設計技術に関する研究」を昭和59年（1984）から5ヵ年計画で開始した。

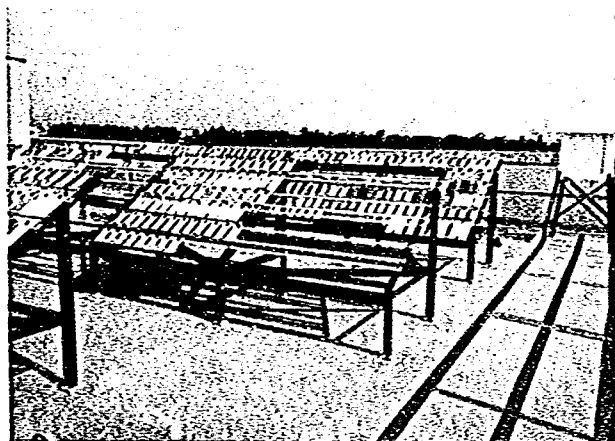
建設省土木研究所は「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」の課題を設定し、5ヵ年計画終了後も引続き建設省土木研究所、（社）鋼材倶楽部、（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会、（財）土木研究センターとの共同研究として、継続して試験研究を実施しているものである。

この研究は、建設省土木研究所が駿河湾内に設置した「海洋技術総合研究施設」を使用して、沖合大規模開発に必要な基盤技術の研究を行うと共に本四架橋の大鳴門橋海上足場を利用して、潮流海域に関する試験研究を行い、海象条件の変化や形状の複雑な構造条件に適応する電気防食条件を明確にすることを目指している。

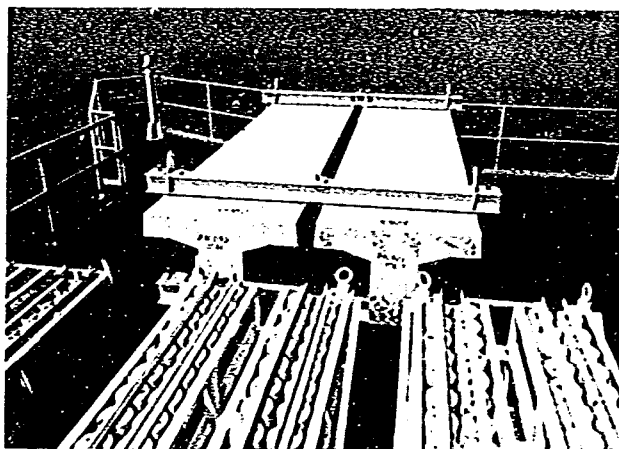
本研究報告書は、暴露試験開始10年経過後の成果をまとめたものである。



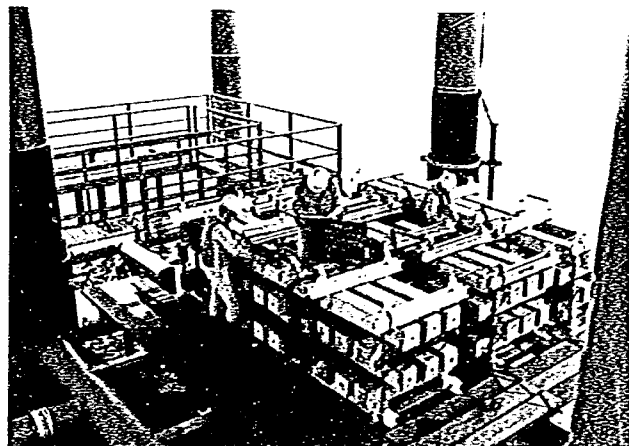
海洋技術総合研究施設の全景



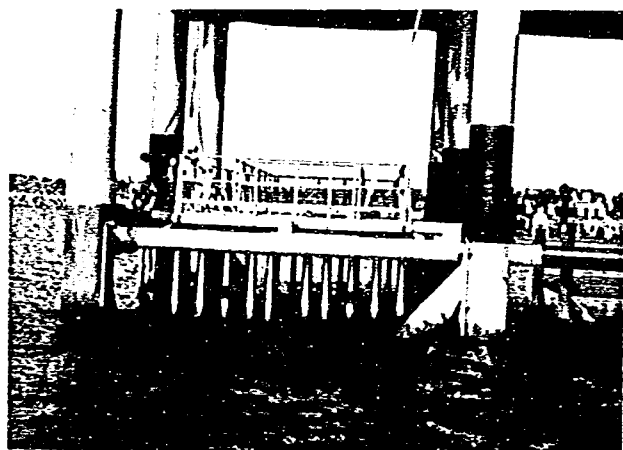
第一デッキ（長期防錆型塗装）



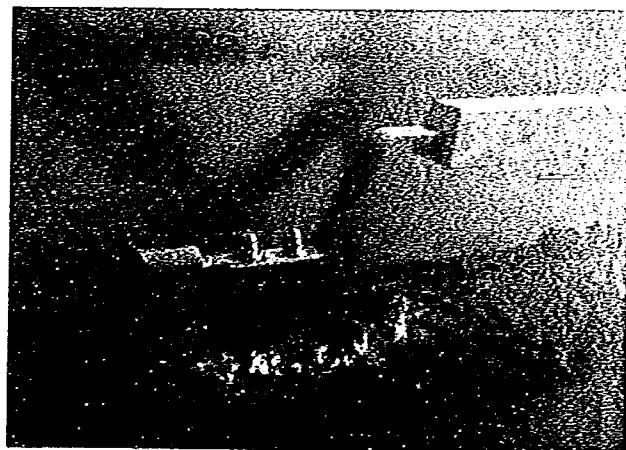
第二デッキ（コンクリート中鋼材の防食）



第三デッキ（塗覆装、コンクリート中鋼材の防食）



飛沫・干満部（塗覆装、高耐蝕性金属被覆）



海中部（アルミニウム合金陽極）

目 次

I. 海中部における電気防食設計技術に関する研究

1. 研究目的	1
1. 1 目的	1
1. 2 本研究開始までの電気防食に関する研究の経緯	1
1. 2. 1 電気防食技術の現状	1
1. 2. 2 電気防食に関するこれまでの研究	4
1. 3 官民共同研究開始の経緯と進め方	7
1. 3. 1 共同研究開始の経緯	7
1. 3. 2 共同研究の進め方	8
1. 4 研究経過	11

II. 駿河湾「海洋技術総合研究施設」における試験

1. 研究計画	14
1. 1 研究施設	14
1. 1. 1 海洋技術総合研究施設の場所	14
1. 1. 2 海洋技術総合研究施設の概要	14
1. 1. 3 海洋技術総合研究施設設置までの経緯	14
1. 2 研究計画	19
1. 2. 1 研究課題	19
1. 2. 2 試験対象	20
1. 3 研究項目	22
2. 試験方法	24
2. 1 環境調査	24
2. 2 小型試験片を用いた試験	24
2. 2. 1 小型試験片	24
2. 2. 2 裸鋼の陰分極および防食電流密度	26
2. 2. 3 電気防食と塗装の併用における最適塗装系の選定	27
2. 2. 4 電気防食と塗装の併用における塗膜損傷率と陰極電流密度	31
2. 3 大型供試体を用いた試験	32
2. 3. 1 大型供試体	33

2. 3. 2	大型供試体の電位分布	33
2. 4	施設本体を用いた試験	35
2. 4. 1	施設本体	35
2. 4. 2	アルミニウム合金陽極の発生電流および消耗量	36
2. 4. 3	施設本体の陰極電位分布	41
2. 4. 4	亜鉛基準電極の電位の安定性	41
3.	試験結果	43
3. 1	環境調査	43
3. 2	陰分極試験	44
3. 3	防食電流密度	44
3. 4	アルミニウム合金陽極性能	46
3. 4. 1	アルミニウム合金陽極発生電流	46
3. 4. 2	アルミニウム合金陽極の消耗量	47
3. 5	陰極電位分布試験	50
3. 5. 1	大型供試体の電位分布	50
3. 5. 2	施設本体の電位分布	51
3. 6	亜鉛基準電極電位の安定性	64
3. 7	電気防食と塗装の併用における最適塗装系の選定	66
3. 7. 1	塗装系と陰極電流密度	66
3. 7. 2	外観観察	66
3. 8	電気防食と塗装の併用における塗膜損傷率と陰極電流密度	69
3. 8. 1	塗膜損傷率と陰極電流密度	69
3. 8. 2	外観観察	69
3. 8. 3	塗膜抵抗	72
4.	10年間の研究成果の総括	73
4. 1	裸鋼に対する防食電流密度	73
4. 2	陰極電位分布	73
4. 3	アルミニウム合金陽極の特性	74
4. 4	亜鉛基準電極の信頼性	75
4. 5	塗装併用における最適塗装系	75
4. 6	塗膜損傷に対する陰極電流密度	75

III. 潮流海域における電気防食試験

1. 試験項目	78
2. 試験場所	78
3. 供試体および設置位置	80
3. 1 供試体	80
3. 1. 1 応力の影響を受ける供試体	80
3. 1. 2 応力の影響を受けない供試体	80
3. 2 供試体設置位置	82
4. 試験条件	83
4. 1 応力付加	83
4. 2 塗装条件	84
4. 3 電気防食	85
5. 試験結果	87
5. 1 裸鋼の定電位防食試験	87
5. 1. 1 設定電位 -800 mV	87
5. 1. 2 設定電位 -900 mV	87
5. 2 塗装鋼の定電位防食試験	87
5. 2. 1 塗膜損傷率: 0	88
5. 2. 2 塗膜損傷率: 2. 2 %	88
5. 2. 3 塗膜損傷率: 6. 5 %	88
5. 2. 4 塗膜損傷率: 13 %	88
5. 3 応力条件下における裸鋼の定電位防食試験	89
6. 総括	90
6. 1 裸鋼材の定電位防食試験	90
6. 2 塗装鋼材の定電位防食試験	90
6. 3 応力条件下における裸鋼材の定電位防食試験	90

IV. 電気防食設計指針（案）・同解説の改訂

1. 電気防食法の概要	91
1. 1 電気防食の基本的条件	91
1. 2 環境条件と防食電流密度	93
2. 電気防食設計に関する現行基準	93
3. これまでの電気防食設計指針（案）	96
4. 電気防食指針（案）・同解説の改訂の要点	96
4. 1 電気防食の設計	96

4. 1. 1	設計手順	96
4. 1. 2	事前調査	96
4. 1. 3	防食面積	96
4. 1. 4	防食電位および防食電流密度	97
4. 1. 5	流電陽極	98
4. 1. 6	設計計算	98
4. 1. 7	塗装系	98
4. 2	電気防食の施工	99
4. 3	点検および維持管理	99
4. 4	補修	100
5.	新指針（案）の構成（目次）	101
おわりに		102

I. 海中部における電気防食設計技術に関する研究

1. 研究目的

1. 1 目的

海洋鋼構造物に対する電気防食の設計基準は、標準的な条件についてはすでに明確になっており実用化されているが、複雑な環境条件や形状を対象とする場合については必ずしも明確になっていない。近年、構造物が大型化し、その果す役割から一層の長期耐用を要求されるにともない、より詳細な電気防食の設計基準が必要となっている。

このような背景から、電気防食法の正確かつ効率的な適用を図る目的で、現状の課題を明らかにすべくフィジビリティ・スタディが行われた。その結果、防食設計、施工技術、維持管理に関して実状に合った明確な基準を確立する必要があることが明らかとなった。すなわち、設計上の問題点としては、波浪、潮流、漂砂などの海象条件の変化およびこれにともなう応力条件に対する防食電流密度の決定、また、複雑な形状に対する塗装併用も含めた電位分布の向上等の課題があり、施工上の問題点としては流電陽極の取付法の簡易化、維持管理上の問題点としては長期安定性のある基準電極の選定、補修技術の向上等の多くの課題が指摘された。

本研究は、これらの課題のうち主として防食設計技術に関する試験を推進し、一層明確な基準の確立を目指すことを目的とするものである。

1. 2 本研究開始までの電気防食に関する研究の経緯

1. 2. 1 電気防食技術の現状

(1) 電気防食技術の発展経緯

電気防食は原理的に確立された方法で、歴史的にも古く1824年に英国のDavy卿が船舶の防食に亜鉛陽極を用いたのが最初であると言われている。その後も試験・研究は続けられたが、適用技術が未熟なことや腐食に対する認識の不足から実用的な防食法として活用されることは少なかった。

1930年代に入り、米国でパイプラインの進展に伴い、本法の防食効果が優れていることから見直され実用化されるに至った。

わが国においては、第二次世界大戦後研究が盛んになり、昭和20年代後半には電気防食専門会社が設立され、諸施設への実用化が始まった。

海洋関係への利用は昭和20年代後半から尼崎港や横浜港などの港湾施設の電気防食に始まり、当初は外部電源方式または亜鉛陽極による流電陽極方式であったが、昭和40年代から保守管理および経済性の点で優れたアルミニウム合金陽極による流電陽極方式が主流となった。以下各方式の発展経緯について述べる。

1) 外部電源方式

わが国において電気防食を行なった当初は、流電陽極材としては、亜鉛陽極またはマグネシウム合金陽

極しなく、大型の構造物に対しての流電陽極方式の適用は経済性の点で問題があり、大型の構造物のほとんどは外部電源方式が採用された。

外部電源方式の電源装置としては、当初セレン整流器が主に使用されたが、その後耐久性の優れているシリコン整流器に変わった。電極材としては、当初は磁性酸化鉄電極や黒鉛電極などが使用されたが、耐久性の点から現在では鉛銀合金電極が主に使用されている。

外部電源方式は、電気設備の定期的な点検・保守が必要であるとともに補修の時に専門技術者が必要なことなどから海洋鋼構造物の防食には難点が多く、経済的に優れたアルミニウム合金陽極の開発に伴い、特殊な場合を除き、海洋鋼構造物への適用は少なくなった。

しかし、外部電源方式は、防食電流を自由に調整できる点で優れており、環境変化の著しい河口付近や移動式作業船などには、自動制御式外部電源装置が現在でも使用されている。また、鉄筋コンクリート構造物の電気防食には電気抵抗率の高いコンクリート中の鉄筋に対しても十分な印加電圧の得られる外部電源方式の適用が考えられる。

2) 流電陽極方式

①アルミニウム合金陽極

アルミニウムは単位質量当たりの発生電気量は大きい、不動態化し易く、陽極材としての研究・開発が遅れていたが、昭和30年代に入り Al-Zn-Hg または Al-Zn-In を主体にした高性能の陽極材が開発され、昭和30年代後半から海洋鋼構造物に長寿命のアルミニウム合金陽極が使用され始め、現在では、海洋鋼構造物のほとんどがアルミニウム合金陽極による防食になった。

その後研究が進み Al-Zn-Hg または Al-Zn-In に Sn, Mg, Ca, Si, Ga, Bi, Ti などを少量添加した、更に高性能の陽極が多数開発され、現在では、2600A・hr/kg 以上の発生電気量をもつ陽極が市販されている。このうちHg系のアルミニウム合金陽極は発生電気量が2800A・hr/kg 以上と大きい、海洋汚染の危険性から現在先進国ではほとんど使用されなくなっている。

海洋鋼構造物が大型化するにしたがい使用する陽極も大型化され、陽極1個の発生電流 5A 以上で数百 kg 以上の陽極も出現している。この重量の大型化に伴い、芯金も当初は丸鋼などが主であったが形鋼や鋼管など強度を有するものに変化してきている。

アルミニウム合金陽極の取付は、昭和30年代は丸鋼などで吊り下げる方式が主であったが、海域は波浪や潮流があり破損し易いため、昭和40年頃から溶接方式に変わってきた。沿岸構造物は、水深が比較的浅いことや既設の構造物も多いことから陽極の芯金を直接水中溶接で被防食体に取り付する方法が一般的になった。海洋に建設される石油掘削用の作業台などは、水深が深いことや工場で構造物を作ることなどから、陽極の芯金を陸上溶接で取付の例が多い。陽極取付の代表的例を図-1・1 に示す。

②亜鉛陽極

亜鉛陽極による電気防食は、歴史的に最も古い。第二次世界大戦後、不純物としての鉄分が陽極性能を悪化させること、およびこれに少量のAlの含有が安定した高性能を維持することなどが判明し、現在では、亜鉛に少量のAlを添加した陽極が内外に登場し、米国では MIL規格になっている。

亜鉛陽極は、海水中での陽極性能が安定していることから昭和40年頃までは多く使用されていたが、

その後アルミニウム合金陽極が開発され、亜鉛陽極は、比重が大きいことや電気量当たりの価格がアルミニウム合金陽極に比べ高価であることなどから、海洋鋼構造物への適用はほとんどなくなった。しかし、電気抵抗率の低い土壤中の陽極性能に優れた点があり、海洋鋼構造物としては、海底パイプラインなどに主に使用されている。また、近年は海洋環境のコンクリート構造物の鉄筋に対する電気防食に適用され始めている。

③マグネシウム合金陽極

マグネシウム合金陽極は、約40年前に米国の Dow Chemical 社によって陽極効率の優れた Mg-Al-Zn 合金 (AZ63 合金) が開発され、その後 Mg-Mn 合金 (Galvomag) が開発された。わが国においても 1959 年から軽金属協会が中心となり研究が進められ、純マグネシウムと2種類の合金が JIS 規格になった。

しかし、マグネシウム合金陽極は、自己腐食が大きく、効率が50%程度と低いので高価になるため、海洋鋼構造物には殆ど使用されない。一方、非常に卑な電位を有しているため、その有効電位差が大きいことから土壤中や淡水中など電気抵抗率の高い環境で多く使用されている。

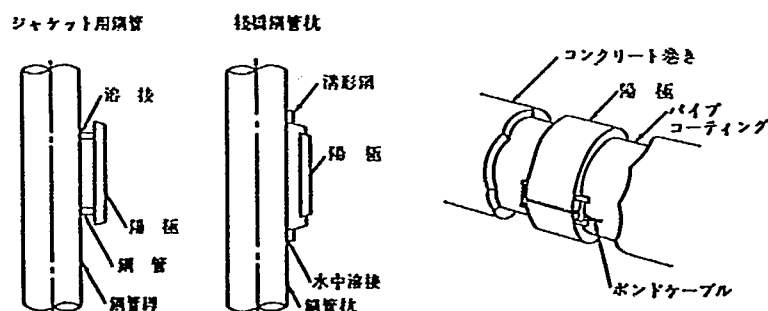


図-1・1 陽極取付例

(2) 適用範囲

電気防食は、原理的には電解質水溶液中にある鋼材に非常に有効な防食効果をもたらすが、大気中では効果がない。したがって、海洋鋼構造物の電気防食の適用範囲は海中部や土壤中などにかぎられる。さらに、最近ではコンクリート構造物も若干の電解質を含んでいるため、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の電気防食について研究・開発が進んでいる。

1) 海洋鋼構造物

海水は、腐食が激しいため海洋鋼構造物への適用は非常に古くから行われ、また、電気抵抗率が低いので、効果も非常に良く実績も多い。実績として主なものは、護岸、棧橋、シーバースなどの鋼矢板や鋼管杭、石油掘削用プラットフォームなどの海上作業台、海底配管、沈埋トンネル、人工島、長大橋、浮標、閘門、海中貯油施設、海中展望塔などがあり広く利用されている。

電気防食の方式は、ほとんどがアルミニウム合金陽極による流電陽極方式である。

2) 鉄筋コンクリート構造物

鉄筋コンクリート構造物は、古くは半永久的な構造物と言われていたが、塩害を受けるような環境や海砂を使用した鉄筋コンクリート構造物の鉄筋が腐食する被害が多くなってきている。この対策の一つ

として、電気防食が注目されている。米国ではすでに実用段階に入っている。わが国では、現在研究・開発が行われている段階で今後実構造物への適用が考えられる。

3) 塗覆装との併用

一般に海洋鋼構造物では、裸鋼材に電気防食を適用した方が経済的に優れており、また、十分な防食効果が得られる場合が多い。しかし、構造が複雑で隅部まで十分に防食電流が流入しない場合、流速が速く大きな防食電流を必要とする場合、干満部など海水浸漬時間に変化する場合、河口付近で河川水の流入があり環境が季節的に大きく変化する場合などは、防食効果や経済性の点で塗覆装と電気防食を併用した方が良い場合がある。この場合の塗覆装としては、耐水性や耐薬品性の優れた塗装やライニングが用いられる。実績として多いものには、移動式作業船外板、構造物の干満部、海底配管、浮標、閘門などがある。

1. 2. 2 電気防食に関するこれまでの研究

わが国の海洋鋼構造物の電気防食に対する調査研究は、昭和40年以前は主として民間の研究機関で行われていたが、昭和40年代後半からは、公共機関でも多くの調査研究が開始された。主な研究機関である建設省土木研究所および運輸省港湾技術研究所の公表されている調査研究の概要を以下に示す。

(1) 建設省土木研究所

1) 川崎沖における現地試験

実海域の試験として、昭和49年から東京湾の川崎沖において、約3年間鋼管杭に対する電気防食試験を行っている。

その結果は、図-1・2に示すように無防食杭は、海洋における腐食の標準パターンとほぼ同様な結果が得られている。電気防食を行った杭の海中部は、平均腐食が無防食杭の腐食の1/10以下になるとともに局部的な腐食は、全く認められず、実海域での電気防食の効果が認められている。

2) 筑波における実験室試験

実海域では、海洋環境により電気防食に必要な防食電流密度が変化するため、昭和54年からは、建設省土木研究所および(財)土木研究センターの共同研究として、水温、流速、塩分濃度、汚染などの因子を実験室で変化させ、各因子と防食電流密度の関係を求める実験を行った。また、塗装と電気防食併用による防食(複合防食)を行う場合の最適塗

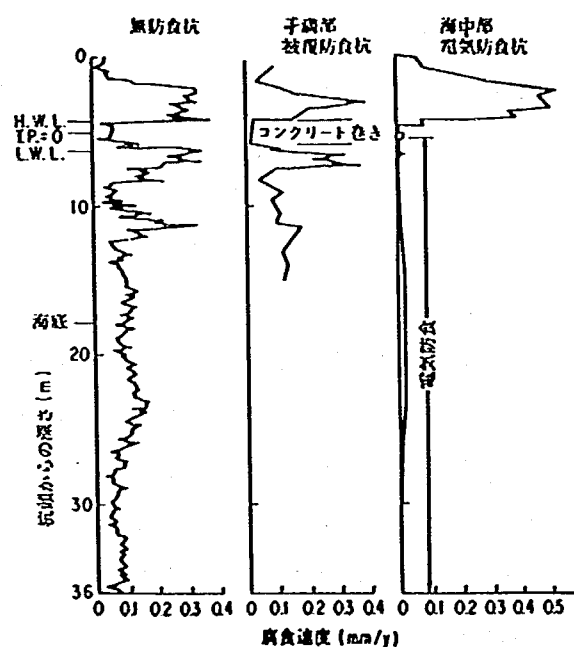


図-1・2 腐食速度の測定結果

装系の選定試験および防食電流密度を求める試験を実験室で行っている。

3) 電気防食設計指針（案）の作成

昭和56年には、「電気防食の設計法に関する研究」の一環として、それまでの実験室および実海域における各種試験結果を盛込むとともに、内外の研究機関における研究結果を調査してまとめている（表-1・1のNo.2）。

さらに、昭和58年に標準海域（低温環境、希釈環境を含む）、高潮流海域、汚染海域における海洋鋼構造物に対する「電気防食設計指針（案）」を作成している（表-1・1のNo.4）。こうして電気防食の設計技術に関する研究は実際の海域における確性試験の必要性が課題として残され、その後、昭和59年に開始された本研究の駿河湾および大鳴門橋における長期現地試験の実施に至っている。

これらの成果は、その都度建設省土木研究所の「土木研究所資料」として、まとめられており、表-1・1には土木研究所資料の一覧を示す。また、これらの成果の学協会等への発表一覧を表-1・2に示す。

表-1・1 電気防食関連の土木研究所資料

No.	発行年月	資料No.	題 名
1	昭和53年3月	1,245	東京湾における鋼管杭の腐食防食試験
2	昭和56年3月	1,689	電気防食の設計法に関する研究 海域鋼構造物への電気防食の適用の現状と課題
3	昭和57年3月	1,783	電気防食の設計法に関する研究
4	昭和58年11月	1,986	電気防食設計指針（案）・同解説
5	昭和59年3月	2,121	電気防食の設計法に関する研究 最終報告書
6	昭和59年3月	—	海洋技術総合研究施設に関する報告書
7	昭和61年3月*	科学技術庁宛 て報告書	海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究報告書（その1） （海中部の電気防食技術に関する研究）
8	平成 3年3月*	共同研究報告 書 No. 58号	海域における土木鋼構造物の電気防食に関する共同研究報告書 —海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説

*No.7 およびNo.8 は本研究開始後の初期にまとめられたものである。

表-1・2 土木研究所における研究の対外発表

発表年	発表機関	発表者	題 目
昭和54年	土木学会誌 Vol. 64, No. 12	蒔田、森	海域における土木鋼構造物の腐食と防食
昭和57年	第2回防錆防食 技術発表大会	蒔田	海域における土木鋼構造物の腐食と防錆防食
同上	腐食防食協会 春季学術大会	片脇、森 蒔田、田中	電気防食の設計法に関する研究-1 研究の概要
同上	同上	白水、石川 片脇	電気防食の設計法に関する研究-2 海水中における鋼材の電気防食特性
同上	同上	辻、森	電気防食の設計法に関する研究-3 電気防食併用塗装系の検討
昭和60年	OCEAN SPACE Utilization '85	T. Tsuji	Studies on the Paint System Applied to the Marine Steel Structure Simultaneously with Cathodic Protection
同上	同上	J. Tomura K. Shimizu	Study on Cathodic Protection in Various Seawater Environments
同上	同上	K. Katawaki H. Tamano	New Design Code for Cathodic Protection System of Maritime Steel Structures
昭和60年	腐食防食'85	片脇、田中 戸村、辻、清水	海洋構造物の電気防食の設計法に関する研究
昭和61年	第33回腐食防 食討論会	片脇、田中 戸村、清水、辻	海洋構造物の電気防食の設計法に関する研究
昭和62年	第7回防錆防食 技術発表大会	片脇	海洋暴露研究施設を用いた海洋構造物の防食 技術に関する研究

(2) 運輸省港湾技術研究所

港湾施設に使用する鋼矢板や鋼管杭に対しては、アルミニウム合金陽極を用いた流電陽極法による電気防食が多く行われている。

運輸省港湾技術研究所では、全国港湾施設の中から代表例を選定し電気防食の実態を調査している。この結果、電気防食が集中腐食（局部腐食）の防止に有効であることや港湾における防食電流密度の定常値は 30～70mA/m²程度であることなどの結果を得ている。

以上のような調査研究があるが、そのほとんどが沿岸付近に建設される構造物に対する適用ならびに調査研究であった。

1. 3 官民共同研究開始の経緯と進め方

1. 3. 1 共同研究開始の経緯

(1) 科学技術庁の研究計画

科学技術庁では、昭和57年から科学技術振興調整費によって「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」を5ヵ年計画でスタートさせたが、これに含まれる研究項目は、次のとおりである。

- ① 海洋構造物の設計・施工等に必要な自然環境を把握する技術の開発
- ② 大型の浮遊式海洋構造物の建設技術の開発
- ③ 厳しい波浪から海洋構造物を守る波浪制御技術の開発
- ④ 防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発
- ⑤ 大波浪海域における海洋構造物の実海域実施研究

(2) 建設省土木研究所の研究計画

上記のうち、建設省土木研究所が担当することになった研究計画は、④の「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」研究である。

この研究を実施するにあたって、民間の技術力の参加を得て、官民による共同研究として、これを進めることになった。そしてこの研究の曝露試験は、駿河湾静岡県側大井川沖の「海洋技術総合研究施設」を利用して実施することになった。

共同研究の実施機関は、次の通りである。

(官側) 建設省土木研究所

(民側) 社団法人鋼材倶楽部

社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

財団法人土木研究センター

ただこの研究は、「耐久性向上」をめざしており、耐久性に関する試験は、これまでの内外の例をみても比較的長期の実験となっているので、実海域での数年間の短期的な曝露試験では、本来的な目的が達成されないことが明らかであるので科学技術庁が設定した5ヵ年の期間(昭和57年～61年)が終了した後、すなわち昭和62年以降も曝露試験を継続することとしてスタートした。

共同研究は、当面20年間を目途としているが、社会情勢の変化、試験内容の進化等が予想されるので、差当り昭和58年度(1983)から平成5年度(1993)までの10年間の研究計画を策定している。

(3) 共同研究の目的

海洋技術総合研究施設を用いて、海洋構造物を対象とする高度な防食技術の開発およびそれらの長期耐久性評価を行うことを目的としている。

(4) 共同研究の名称と分担

共同研究の名称は「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」

また、共同研究の研究項目別の分担等を表-1・3に示す。

表－１・３ 共同研究課題と分担

研究項目	研 究 細 目	研究分担
1 飛沫部及び干満部における鋼構造物の防食技術に関する研究	1)防食被覆材料の適用試験（本体） 2)防食被覆材料の耐久性試験（防食供試体）	A B B
2 飛沫部におけるコンクリート構造物の防食技術に関する研究	1)コンクリート中の鋼材の防食技術の開発 2)耐海水コンクリート部材の設計技術の開発	A C
3 海中部における電気防食設計技術に関する研究	1)構造物形状に応じた電気防食設計法の開発試験 2)塗装併用電気防食設計技術の開発試験	A D
4 海上大気部の長期防錆型塗装技術に関する研究	1)長期防錆型塗装系の適用試験 2)長期防錆型塗装系の耐久性試験	A D
5 研究成果のまとめ		A B C D

注) A：土木研究所、 B：鋼材倶楽部、 C：プレストレスト・コンクリート建設業協会
D：土木研究センター

1. 3. 2 共同研究の進め方

(1) 共同研究の運営体制

海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究協定を建設省土木研究所と民間3団体とで、毎年締結する。

共同研究を円滑かつ効果的に運営していくため、次の組織を設けて業務を推進する。

① 防錆防食技術開発委員会（開発委員会）

- ・ 研究計画の審議
- ・ 研究成果報告の審議

② 共同研究連絡調整会議（連絡調整会議）

- ・ 研究運営の連絡調整

③ 共同研究分科会（第一、第二、第三の3分科会とする。）

（各分科会内で、さらに組織を分けることがある）

- ・ 研究計画の原案作成
- ・ 研究の実施

- ・研究報告書の原案作成

④ 共同研究事務局

- ・土木研究センター内に設置
- ・委員会、連絡調整会議の開催
- ・委員会資料等の作成
- ・共同研究報告書の取り纏め作成

(2) 分科会の構成

① 第一分科会：土木研究所、鋼材倶楽部で構成される。

第一分科会にワーキンググループを編制し、1WGは耐食性金属材料部門、2WGは高分子系塗覆装防食材料部門としている。

② 第二分科会：土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会で構成される。

③ 第三分科会：土木研究所、土木研究センターで構成し、電気防食部門と塗料部門に分ける。

(3) 防錆防食技術開発委員会（平成6年度）

委員長	浅間 達雄	財団法人土木研究センター参与
副委員長	蒔田 實	財団法人土木研究センター参与
委員	岡崎 治義	建設省土木研究所材料施工部長
々	片脇 清	建設省土木研究所新材料開発研究官
々	坂本 浩行	建設省土木研究所化学研究室長
々	久我 昂	社団法人鋼材倶楽部土木専門委員会委員長
々	清水 健次	社団法人鋼材倶楽部市場開発部長
々	津野 和男	社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会 耐久性技術委員会委員長
々	武藤 徳一	社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会 専務理事
々	田中柳之助	財団法人土木研究センター顧問
々	小林 豊治	財団法人土木研究センター技術委員
々	佐藤 靖	財団法人土木研究センター技術委員
々	森 芳徳	財団法人土木研究センター常任参与調査試験部長

(4) 共同研究連絡調整会議（平成6年度）

久我 昂	社団法人鋼材倶楽部（新日本製鐵（株）建材技術開発部担当部長）
伊藤 陽一	々（新日本製鐵（株）鉄鋼研究所表面処理研究部主任研究員）
清水 義明	々（NKK総合材料研究所京浜材料研究センター主幹）
栗栖 孝雄	々（川崎製鐵（株）エンジニアリング事業部鋼構造研究所主査）
塩谷 千歳	々（住友金属工業（株）建設技術部東京土木建材技術室参事）

中家 俊和	々	(関西ペイント(株)技術開発本部第四部係長)
田邊 弘往	々	(大日本塗料(株)技術本部基礎研究部副参事研究員)
海野 武人	々	((株)ナカボーテック技術開発研究所研究管理部)
三浦 正美	々	市場開発部土木開発部長
太田 稔	社団法人プラスチック・コンクリート建設業協会	((株)ピー・エス 第一営業部長)
武藤 徳一	々	専務理事
町田 武	々	((株)ピー・エス メンテナンス室長)
田中柳之助	財団法人土木研究センター	顧問
森 芳徳	々	常任参与調査試験部長
戸村 壽一	々	((株)ナカボーテック取締役業務本部長)
福島 稔	々	(日本ペイント(株)品質保証部長)
坂本 浩行	建設省土木研究所材料施工部	化学研究室長

(5) 共同研究第3分科会(電気防食部会)の構成員(昭和58年~平成6年)

(順不同、敬称略、これまでの研究関係者を含む)

蒔田 實	建設省土木研究所地質化学部長	
	(現)ニチレキ(株)	
森 芳徳	建設省土木研究所地質化学部化学研究室長	
	(現)財団法人土木研究センター	
片脇 清	建設省土木研究所地質化学部化学研究室長	
	(現)土木研究所新材料開発研究官	
坂本 浩行	建設省土木研究所地質化学部化学研究室長	
田中柳之助	財団法人土木研究センター	
新居 昇	々	
佐々木勝夫	々	
(主査)戸村 壽一	々	(株式会社ナカボーテック)
海野 武人	々	(々)
飯島 勇	々	(々)
井川 一弘	々	(々)
清村 秀樹	々	(々)
遠山 正博	々	(々)
剣持 清	々	(々)
清水 一夫	々	(日本防蝕工業株式会社)
永田 利明	々	(々)
金子 聖治	々	(々)

山本 悟	々	(々)
佐藤 俊二	々	(々)
田村 祐一	々	(々)
石川 光男	々	(々)
篠原 稔雄	々	(大日本塗料株式会社)
田邊 弘往	々	(々)
多記 徹	々	(々)
松野 英則	々	(々)
辻 敏幹	々	(々)
大川 敏夫	々	(々)

1. 4 研究経過

研究試験は実海域において実施することとし、試験場所は日本の沿岸を代表する標準的な海域としてまず駿河湾に建設された「海洋技術総合研究施設」を選定した。試験対象としては、施設本体のほかに実構造物に近い鋼製大型供試体を作製することとし、また、詳細にかつ多数のデータを取得するためには小型試験片を多数準備した。

試験は科学技術庁の研究5ヵ年計画に基づき、当初の2年間は研究施設の設計・製作および試験場所への移動・据付け等が行われ、その後3年間にわたって曝露試験を実施した。この5ヵ年計画の試験は昭和61年をもって終了したが、前に述べたような研究の重要性からその後は建設省土木研究所が継続した。

また、潮流海域の試験としてこの駿河湾とは別に淡路島と鳴門市大毛島の間の鳴門海峡にかかる大鳴門橋の作業足場を選定した。ここでは潮流による応力付加条件下の電気防食条件を求めることとした。これらの試験はいずれもこれまでに実施した実験室試験の結果を実海域において検証するもので、より実用的な電気防食条件を得ることを目的としている。表一1・4には研究活動の経緯を示した。

表－１・４ 研究活動の経緯

年度	経緯	活 動 内 容
昭和５６		科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋等の有効利用に関する研究」のフィジビリティスタディ
昭和５７		1)建設省土木研究所の課題「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」が決定 2)上記課題に基づき小課題４件を決定並びに３分科会を設置 3)電気防食に関する課題として「海中部における電気防食設計技術に関する研究」が決定 4)研究計画策定
昭和５８		1)研究施設および供試体の製作 2)旧電気防食設計指針（案）発行
昭和５９	０	1)研究施設設置（３月） 2)試験開始（８月） 施設本体用陽極３個設置による電位分布試験、大型供試体による試験、小型試験片による裸鋼材の電流密度試験および塗装併用時の試験、陽極発生電流試験、亜鉛基準電極の電位安定性試験等を開始 3)本海域の環境調査開始、（以降毎年１回測定）
昭和６０	１	1)施設本体用陽極４個追加計７個で電位分布試験、陽極発生電流試験 2)大型供試体による試験、小型試験片による試験、亜鉛基準電極の試験継続 3)腐食防食'85に成果発表（詳細内容は付録参照）
昭和６１	２	1)施設本体用陽極１１個追加計１８個（計画数量）取付け終了。電位分布試験、陽極発生電流試験継続 2)大型供試体による試験終了 3)亜鉛基準電極の試験継続 4)小型試験片による試験中、裸鋼材片および塗装試験片の一部回収 5)潮流海域（鳴門）における裸鋼材の防食電流密度試験、塗装鋼材の防食電流密度試験、応力条件下の裸鋼材の防食電流密度試験、開始、終了 6)科学技術庁宛て報告書提出 7)第３３回腐食防食討論会に成果発表（詳細は付録参照）

年度	回数	活 動 内 容
昭和62	3	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続 2)亜鉛基準電極試験継続
昭和63	4	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続 2)亜鉛基準電極試験終了、引き上げ 3)小型試験片による試験の塗装併用試験片を施設本体に接続 4)「電気防食指針(案)」改訂作業に着手、原案完成
平成元年	5	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続 2)「電気防食指針(案)」改訂原案の手直し
平成2年	6	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続 2)5年間の試験結果「海中部における電気防食技術の開発」のまとめ 3)「電気防食指針(案)」改訂原案の手直し
平成3年	7	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続 2)「海域における土木鋼構造物の電気防食指針(案)・同解説」完成
平成4年	8	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続
平成5年	9	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続。 2)「駿河湾大井川沖曝露試験10年のあゆみ」のまとめ
平成6年	10	1)施設本体の電位分布試験、陽極発生電流試験継続 2)アルミニウム合金陽極4個消耗量測定 3)塗装併用試験片の一部を回収し、外観劣化状況および塗膜イオン透過率を測定 4)「10年間の研究成果」のまとめ

Ⅱ. 駿河湾「海洋技術総合研究施設」における試験

1. 研究計画

1. 1 研究施設

1. 1. 1 海洋技術総合研究施設の場所

研究の推進にあたり、わが国の外洋性沿岸海域を代表する標準的な一般海域の適地として、駿河湾内の静岡県志太郡大井川町高新田地先（沖合）の東経 $138^{\circ}18'55''$ 、北緯 $34^{\circ}47'17''$ の地点を選定した。図-1・1に研究施設の位置を示す。昭和59年10月刊行の大井川町史（上）によれば、この付近は気象的には気温が、年平均 16.2°C 、月平均では最高が8月の 26.2°C 、最低は1月の 5.9°C で、夏は東北地方以北を除く我国全体の平均気温に近く、冬は駿河湾に面し、沿岸近くは黒潮が流れるので一般に暖かい。しかし、位置的に風の影響は大きく、夏は台風の接近及び襲来があり、冬は西または北西風が強い。雨は我国の多雨地帯の一つで年間 $2,000\text{mm}$ を越え、7～9月に多い。海水は極めて清浄で標準的といえる。

1. 1. 2 海洋技術総合研究施設の概要

電気防食設計技術に関する試験対象は図-1・2に示す鋼管ジャケット構造の海洋曝露試験施設とこの枠内に取り付けられた鋼管組み立て籠型の大型試験体である。この施設の設置地点は海岸線より沖合約 250m 、水深約 8m で汀線付近の勾配は $1/10$ とやや大きい、水深 5m より沖では $1/80$ と海底勾配は小さい。付近には静穏時でも常時ゆるやかなうねりが寄せ、風速が増すと施設の第3デッキにも飛沫がかかる。水中部の電気防食対象部は通常の港湾内より波浪の影響が大きい。海底は砂質層であるが季節によって若干の移動があり、波浪の大きいときは海底漂砂の影響が試験体にも及ぶものと推定される。

なお、この施設は昭和58年度末に完成した。

表-1・1には試験施設本体の規模と諸元を示す。施設は3層のデッキからなり、電気防食の対象となるのは、海水中部および海土中部である。

本施設は、昭和57年度、建設省土木研究所から製作発注され、昭和58年度に完成した。その後、本施設は建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所に所管替えとなって、維持管理は同工事事務所がおこなっている。

1. 1. 3 海洋技術総合研究施設設置までの経緯

(1) 海洋技術総合研究施設計画の経緯

科学技術庁が関係各省参加のもとに、昭和56年度から開始した「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一環として、建設省土木研究所化学研究室が、分担担当することになった研究課題「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術」の研究を開始するため、海洋曝露試験施設の設置を検討し、その適地の選考が開始された。

また、建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所では、駿河海岸や富士海岸で海岸浸食や高波による災害防止のための海岸保全事業を実施しており、とくに駿河海岸では海岸浸食が激しいため、浸食の機構と防止工法等のための調査が必要であるとの判断で、そのための観測施設を必要としていた。

したがって、曝露試験用の施設としてのみならず総合的に海域の自然条件を調査し、沿岸の防災にも役立つ施設となる海洋技術総合研究施設として、計画された。

(2) 研究項目

第1に、海上の風、波浪、潮流、水質、地質などの自然条件を明らかにするための観測とその実態把握がある。

第2に、海岸の防災に関する項目がある。これは海岸への土砂供給の現象、海浜変形等への対策用として、漂砂現象の解明等海岸浸食防止対策工法の開発のための研究である。

第3に、構造物の安定性や使用材料の耐久性に関する項目がある。これは、海洋空間や資源利用のため海洋構造物が建設されるが、安定性に関しては強大な波力に抵抗できる構造形式や疲労が問題であり、耐久性に関しては鋼やコンクリート構造物の腐食が問題とされ、これらの技術開発のための研究が必要である。

計画時に検討された主要な研究項目は、次のとおりである。

- 1) 海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究
- 2) 自然環境条件の調査
- 3) 海岸浸食対策に関する調査研究
- 4) 海洋構造物の安定性に関する調査研究

(3) 海洋技術総合研究施設の建設地点

上述の研究を推進するための適地の選定にあたり、大井川町、大井川漁業組合等の理解と協力を得て、駿河海岸の静岡県志太郡大井川町高新田地崎（沖合）を設置地点と決定した。

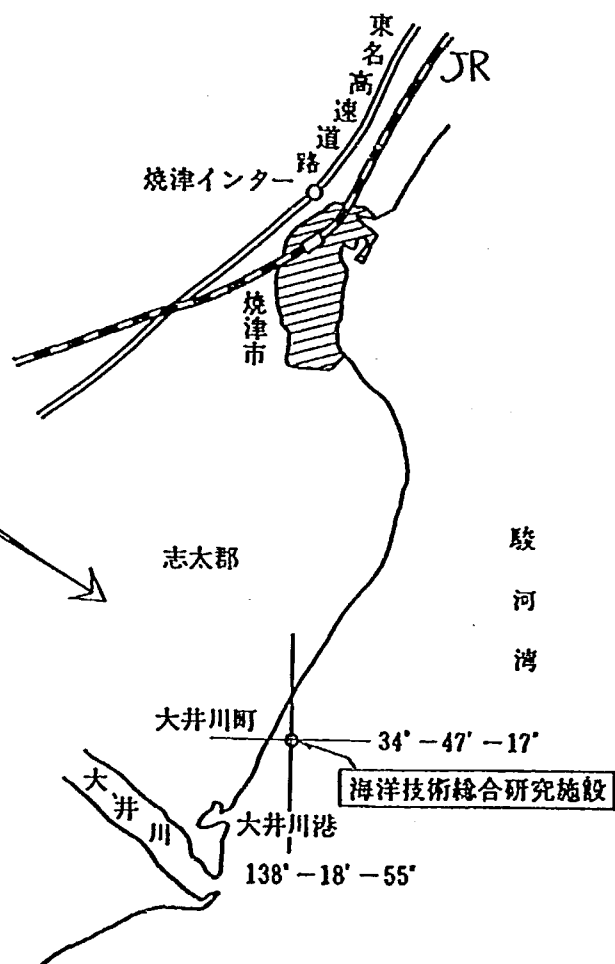
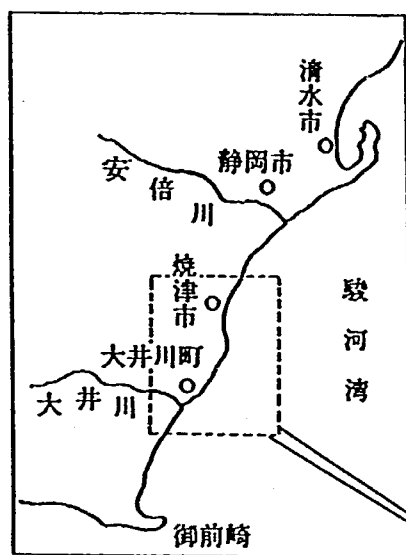
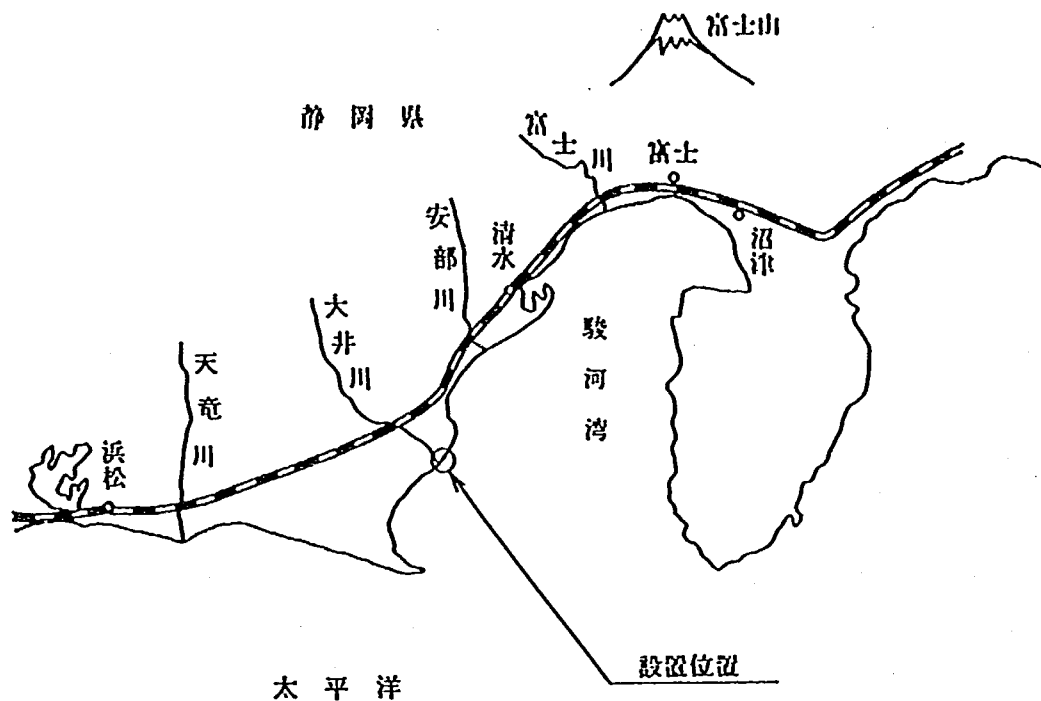


図-1・1 海洋総合研究施設位置図

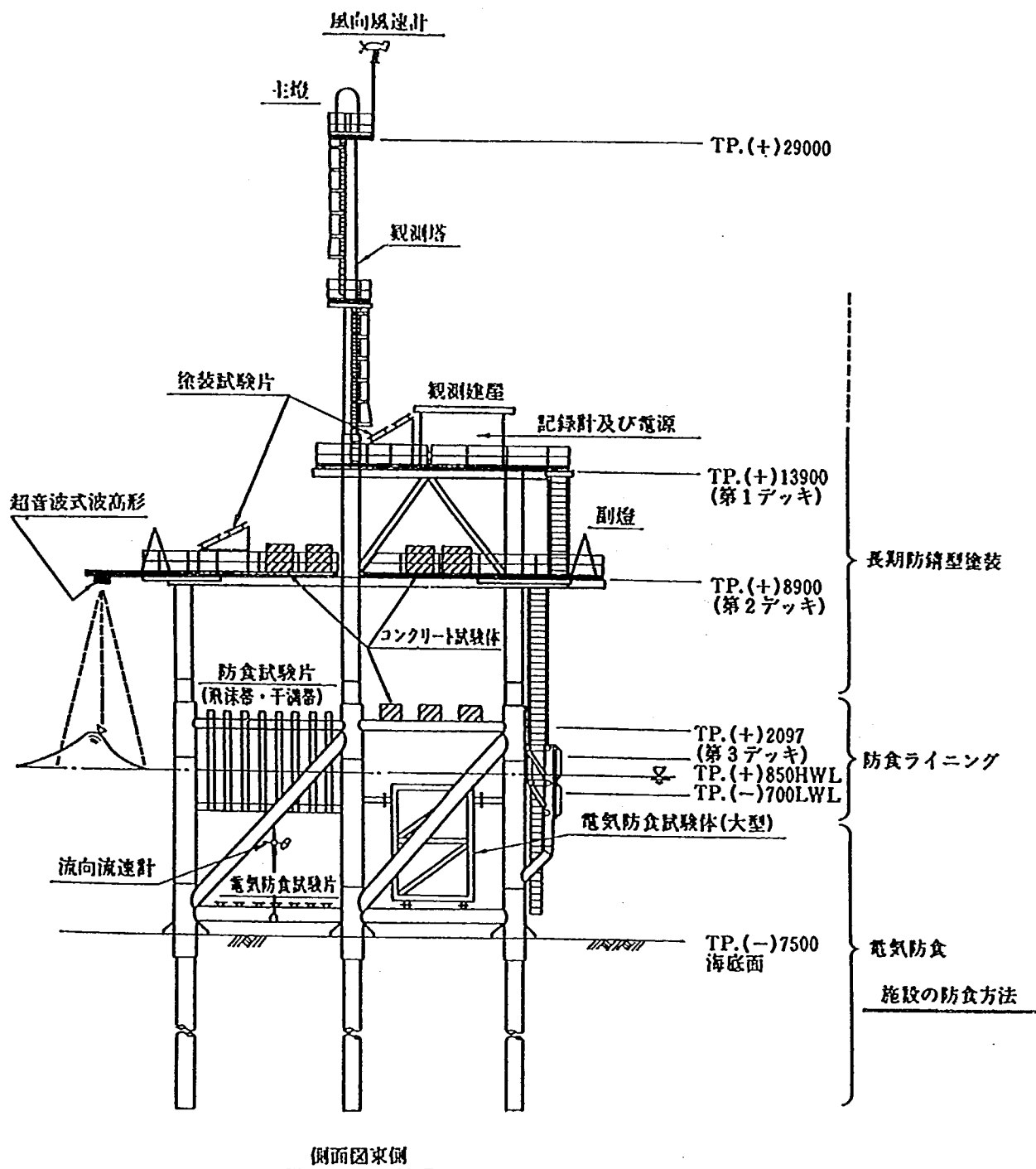


図-1・2 海洋技術総合研究施設 (海洋暴露試験設備)

表-1・1 海洋技術総合研究施設諸元

項 目	諸 元
第1 デッキ	高さ T. P. +13.9m、面積 189 m ² (10.5m×18.0m)
第2 デッキ	高さ T. P. + 8.9m、面積 256 m ² (15.0m×15.0m+4.0m×7.5m)
第3 デッキ	高さ T. P. + 2.0m、面積 56.25 m ² (7.5m×7.5m)
海底面標高	深さ T. P. -7.50m
気象観測用張出し	第2 デッキに3ヵ所
荷揚用張出し	第2 デッキに1ヵ所
観測タワー	第1 デッキ上面から、高さ 13.1m
観測建屋	第1 デッキ上、10.7 m ² (4.5m×2.38m)
設計条件	鋼管杭基礎 (9本) を有するジャケット構造 HWL : T.P.+0.85m、MSL : T.P.+0.15m、LWL : T.P.-0.7m 海底面土質 : 砂質土 潮流 : 0.5 m/sec、設計波高 : H _{max} = 7.7 m 床荷重 : 第1デッキ : 400 kg/m ² 、第2デッキ : 356 kg/m ² 、第3デッキ : 356 kg/m ²
本体防錆防食法	海上大気部 : 長期防錆塗装、飛沫干満部 : 重防食塗装、海中部 : アルミニウム合金 陽極使用電気防食法 (一部重防食塗装と併用) (これらの防錆防食法は、試験の一部とする。)
施工条件	製作工場 (北九州) より海上運搬→ジャケット据付け→鋼管杭打設・固定→デッキ (上部構造物) 搭載・固定→各種装備→完成

1. 2 研究計画

1. 2. 1 研究課題

海洋鋼構造物に対する電気防食の設計基準は、標準的な条件についてはすでに明確になっており実用化されているが、複雑な環境条件や形状を対象とする場合については必ずしも明確になっていない。近年、構造物が大型化し、その果す役割から一層の長期耐用を要求されるにともない、より詳細な電気防食の設計基準が必要となっている。

このような背景から、電気防食法の正確かつ効率的な適用を図る目的で、現状の課題を明らかにすべくフィジビリティ・スタディが行われた。その結果、防食設計、施工技術、維持管理に関して実状に合った明確な基準を確立する必要があることが明らかとなった。すなわち、設計上の問題点としては、波浪、潮流、漂砂などの海象条件の変化およびこれにともなう応力条件に対する防食電流密度の決定、また、複雑な形状に対する塗装併用も含めた電位分布の向上等の課題があり、施工上の問題点としては流電陽極の取付法の簡易化、維持管理上の問題点としては長期安定性のある基準電極の選定、補修技術の向上等の多くの課題が指摘された。

本研究は、これらの課題のうち主として防食設計技術に関する試験を推進し、一層明確な基準の確立を目指すことを目的とするものである。

研究は、当初、昭和56年度に科学技術庁の科学技術振興調整費によって「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」として設定され、同年度にフィジビリティ・スタディが行われ、その結果にもとづいて昭和57年度からの5ヵ年計画が策定された。研究内容としては上記の大課題のもとに各省庁が担当する中課題が5件設定され、そのうち建設省土木研究所が直接担当する課題は「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」と決まり、さらに具体的な小課題として海上大気部から海中部に至る各環境の防食技術に関する研究4件が決定した。これらの研究は、分科会を設けて推進することになったが、そのうち「海中部における電気防食設計技術に関する研究」は第3分科会が担当した。

第3分科会の研究テーマを表-1・2に示す。

表-1・2 電気防食に関する研究課題（第3分科会）

課 題	海中部における電気防食設計技術に関する研究
研究テーマ	1. 構造形状に応じた電気防食設計法の開発実験 2. 塗装併用電気防食設計技術の開発実験 3. 潮流環境に応じた電気防食設計法の開発実験

なお、これらの研究は、科学技術振興調整費により建設省土木研究所が設置・管理する「海洋技術総合研究施設」を利用して実施することとなった。

また、数年間の短期曝露試験では、本来の研究目的が達成できないため、科学技術庁が設定した5ヵ年計画（昭和57～61年度）を終了した後も研究を継続することになった。

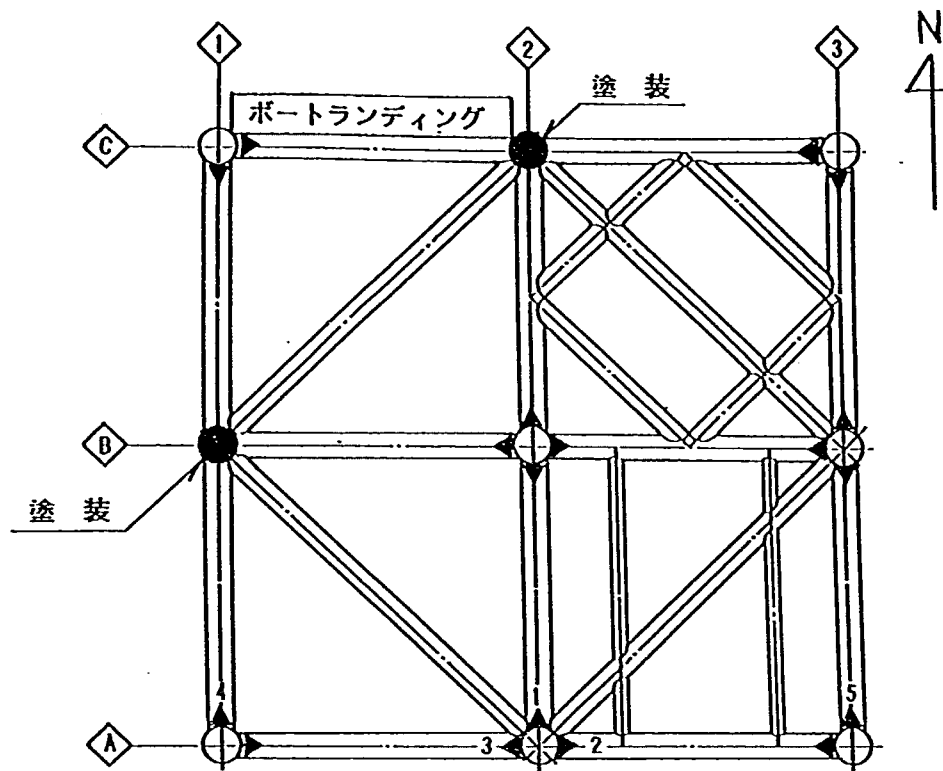
1. 2. 2 試験対象

電気防食試験の試験対象は、前節で述べたように、鋼管ジャケット構造の海洋技術総合試験施設の没水部と、この施設の海中部に取付けられた鋼管組立て籠型の大型供試体である。この他に、板状の裸鋼および塗装鋼の小型試験片を水中部に設置して詳細調査対象とした。

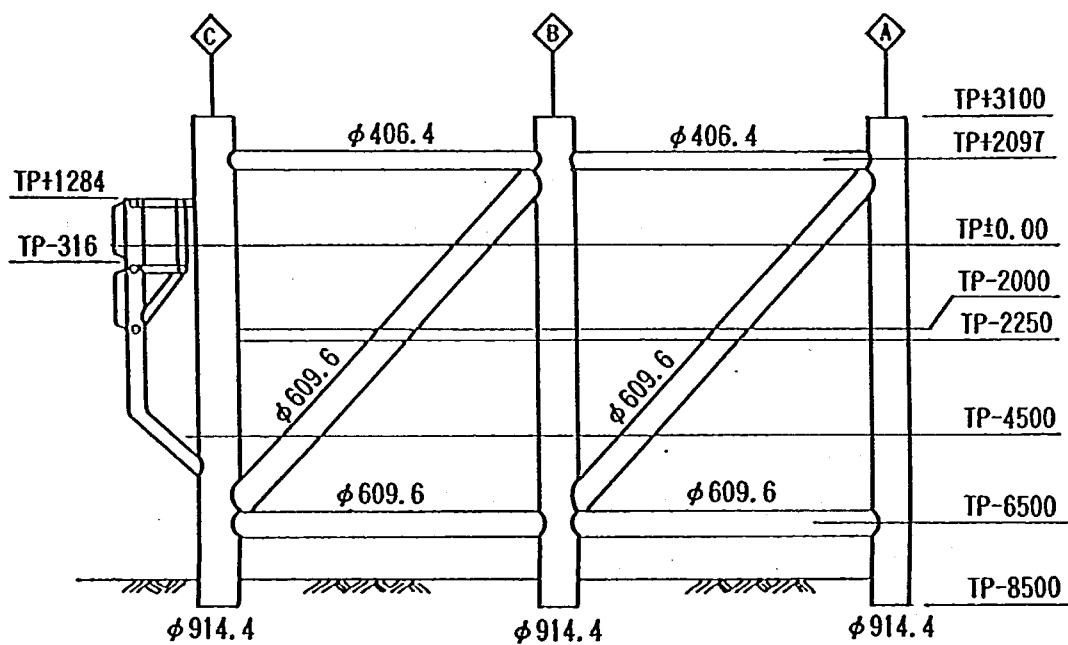
図-1・3には施設本体の平面図と海中部側面図を示す。施設本体の海中部構造は直径914.4mmの直立杭9本、直径609.6mmの水平材及び同径の斜材で構成され、平面的には15×15mの大きさである。この他に、後述する各種試験のために供試体、あるいは架台が取り付けられており、それらの一部も接続（溶接）の関係で小面積ながら電気防食試験対象面積に含まれている。また、干満帯及び一部（No.1B及び2C）の直立杭の全面には塗装あるいは被覆が施工（他分科会の試験）されていてこの面積は電気防食の対象から裸材部の面積としては除外されるが、塗装と電気防食併用の対象となる。この施設本体に通電した場合、電気防食の対象範囲と考えられるのはT.P. +0.15mから海底土中までで、昭和59年試験開始当初の合計面積は表-1・3に示すとおりである。

図-1・4には大型供試体とその設置位置、および試験片の設置架台を示す。大型供試体は上述の施設本体の杭2B-2C-3C-3Bによって囲まれる位置に絶縁して設置されている。大きさは縦3750×横3750×高さ7300mmで裸鋼管250A（STPG 38 Sch 40）によって構成されている。側面の4面には各2本ずつの斜材も配置されている。この大型供試体を海水中に全没した場合の防食対象面積は68.2m²である。設置レベルはT. P. -1901~-6096mmにあり、干満帯から海中部に位置している。

また、塗装試験片の設置架台は図-1・4に示すように施設本体の杭2A-2B-3B-3Aで囲まれる位置の-6.04mにあり、試験片はこの架台に供試面を上にして平面状に固定されている。



平面図



側面図

図-1・3 標準海域(駿河湾)における試験施設本体

表-1・3 施設本体の当初の電気防食対象面積（昭和59年）

区	防 食 対 象	色	防食面積
1 B	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μ m) + タールウレタン樹脂塗料 (150 μ m $\times$ 2)	黒	33.1 m^2
2 C	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μ m) + ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 (500 μ m $\times$ 2)	グレー	35.0 m^2
T. P. -1.75m以上の塗装面積			171.6 m^2
裸 鋼 材	海 水 中		484.5 m^2
	海 土 中		74.6 m^2
合 計			798.8 m^2

注) (1)膜厚実測値

杭 1 B : 367 μ m

杭 2 C : 1638 μ m

(2)裸鋼材の範囲は T. P. +0.15m (MSL) 以下とした。

1. 3 研究項目

電気防食設計技術において最も重要なことは、環境に対応し構造物の規模や形状に適合した防食電流密度を決定することであるが、それは構造物全域に良好な防食電位分布を得るためである。駿河湾の試験施設ではこれらの設計データを得るために次のような試験項目を定めた。

(1) 小型試験片を用いた試験

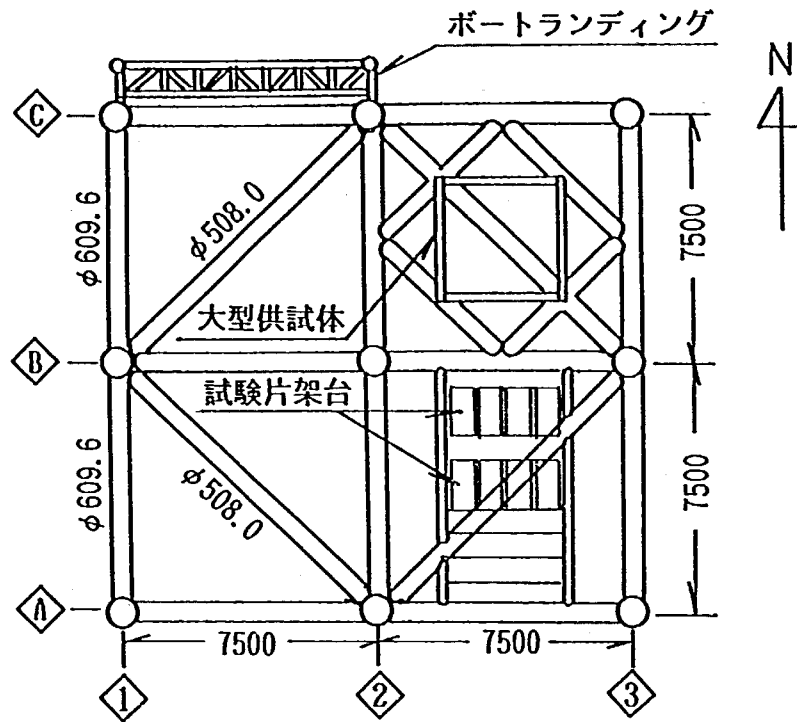
- 陰分極試験
- 各種電流密度と陰分極電位の関係
- 電気防食との併用における最適塗装系の選定
- 塗膜損傷率に対する防食電流密度

(2) 大型供試体を用いた試験

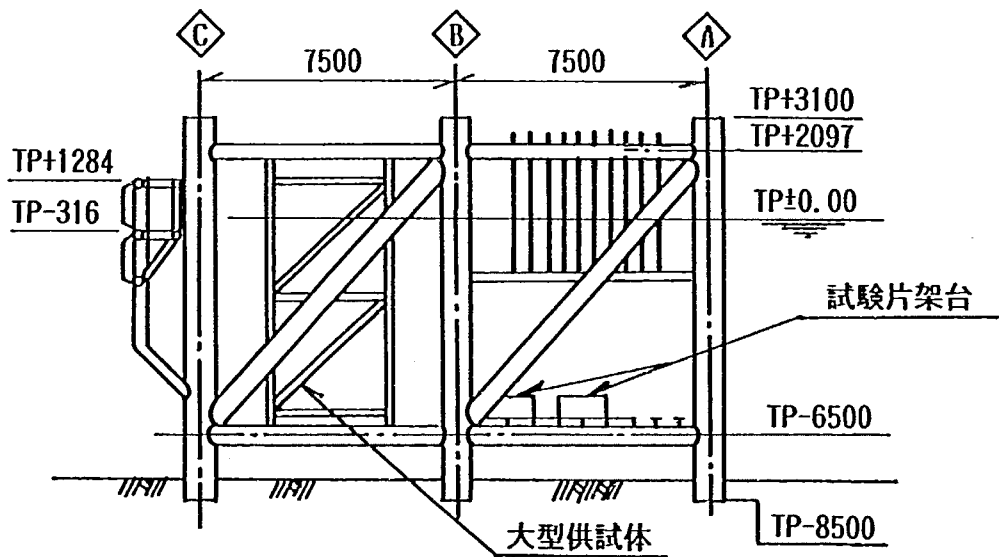
- 複雑構造物における陰極電位分布

(3) 施設本体を利用した試験

- アルミニウム合金陽極の発生電流および消耗量
- 施設本体の陰極電位分布
- 亜鉛基準電極の電位安定性



平面図 (TP-6.696)



側面図

図-1・4 大型供試体と試験片架台の位置 (駿河湾)

2. 試験方法

2.1 環境調査

駿河湾の試験場はわが国沿岸海域の代表性を有する一般海域として選定されたのでとくに著しく異質なことではないものと考えられる。ここでは、構造材の腐食および防食に影響を与える条件として海象変化を記録した。定期的に計測したものは主として海水の水質で、測定項目は水温、pH、抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)、溶存酸素、塩化物イオン濃度、硫酸イオン濃度で、いずれも鋼材の腐食性や分極特性にかかわる因子である。一部の項目については海水を採取して実験室に持ち帰って分析に供した。

なお、測定、採水は表水および底水を対象とした。

2.2 小型試験片を用いた試験

2.2.1 小型試験片

試験片は SS400 で寸法は $200 \times 300 \times 3.2 \text{mm}$ とし、表面はサンドブラスト仕上で鋼製枠に取付け、水深 -6.04m に設置した。図-2・1 には小型試験片を示す。図-2・2 には裸試験片の取付容量と枠内の配置を示す。また、図-2・3 には取付枠の暴露位置を示す。

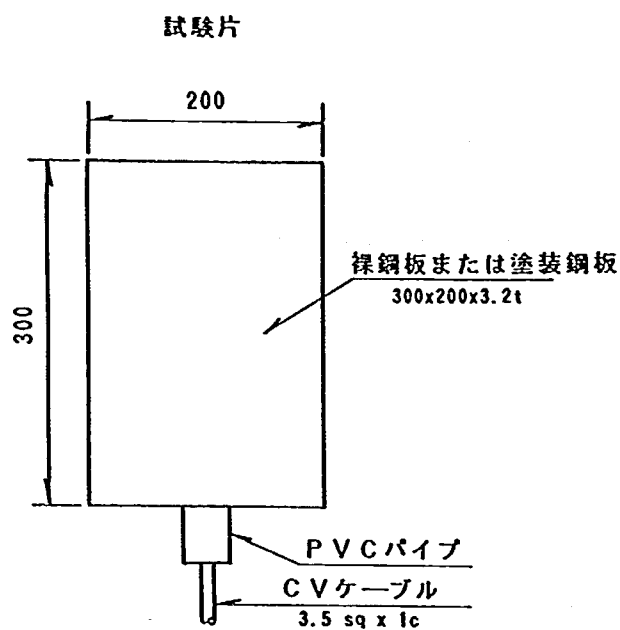


図-2・1 小型試験片

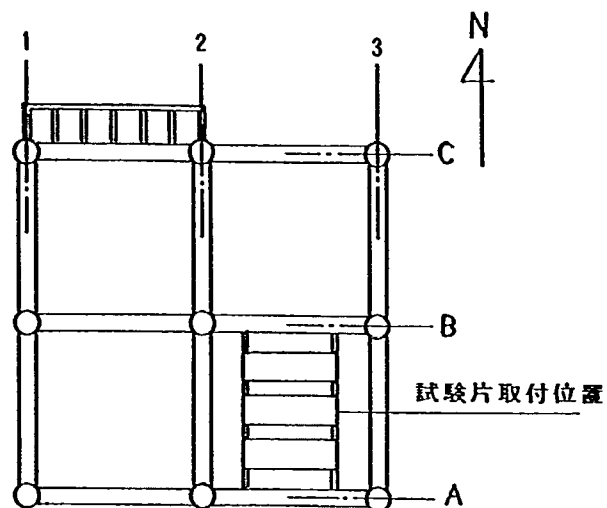


図-2・3 試験片取付枠暴露位置

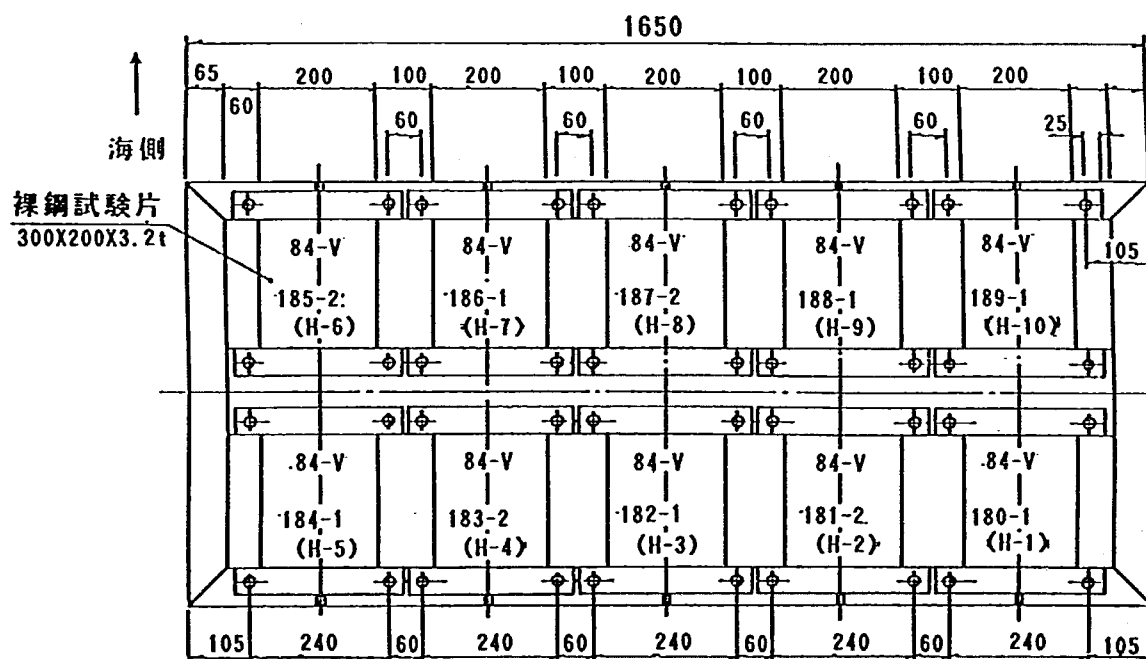
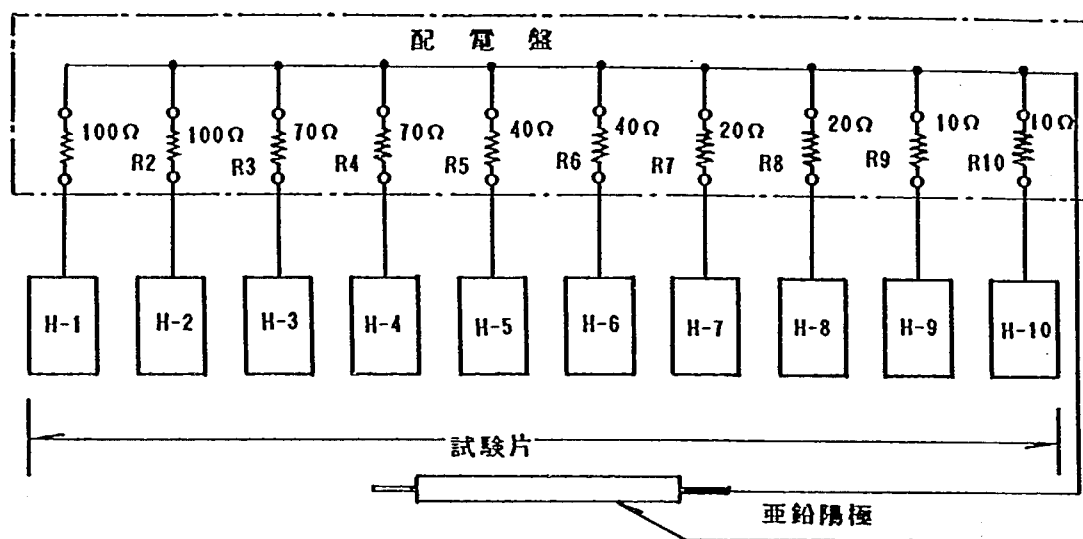


図-2・2 裸鋼試験片の配置と取付要領

2. 2. 2 裸鋼の陰分極および防食電流密度

海水中における裸鋼材に対する防食電流密度を求めるために、小型試験片を用いてまず陰分極曲線を求め、次に数種類の電流密度を設定して電流密度と陰極電位の関係を経時的に測定した。方法としては図一 2・4 に示すように絶縁して別に取付けた亜鉛合金陽極との間に抵抗を挿入して結線し、電流密度を当初の計画として 25, 50, 70, 120, 200, 300mA/m² の 6 種類に設定した。実際の計測は抵抗による電圧降下より電流を求め、電位実測値と組み合わせて陰分極曲線とする。



図一 2・4 電気防食回路結線要領

2. 2. 3 電気防食と塗装の併用における最適塗装系の選定

これよりさきに別途実験室において実施された試験結果から、実際の海域においても電気防食との併用に適性があるものと判断される6種類の塗装系を選定し、実海域で検証試験を行うこととした。試験内容および試験条件は次のとおりである。

(1) 塗装系

防食下地としては、厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント（以下有機ジンクと略す）、厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下無機ジンクと略す）、また、防食塗料はタールエポキシ樹脂塗料（以下タールエポキシと略す）、ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料（GFPと略す）をとりあげ、これらを組合わせた塗装系を表-2・1に示す。

表-2・1 試験因子と水準の組合せ（塗装系）

防食塗料	防食下地	膜 厚 (μm)		
		200	400	600
タールエポキシ	有機ジンク	○		
	無機ジンク	○		
	な し		○	
GFP	有機ジンク			○
	無機ジンク			○
	な し			○

注) タールエポキシは JIS K 5664 1種を用いた。

(2) 試験片

SS400鋼を用い図-2・5に示す寸法、形状とし、サンドブラスト処理した後、これに塗装したものを試験片とした。

試験片は両面とも目標膜厚になるようにエアースプレー塗装を行った。また、試験片の四辺のエッジ部は、その下塗り塗料および上塗り塗料が硬化乾燥したのちに、同一上塗り塗料を用いて十分に厚く増し塗りした。乾燥期間が30日経過した後、図-2・5に示したようにリード線の結線部を絶縁被覆した。試験片の切傷は塗装面が硬化乾燥した後、図-2・5に示したように試験片表面の中央部分に素地に達する長さ20cmのスクラッチを1本入れた。

試験対象面は図-2・5に示すように片面 200×230mmの表裏2面で合計920cm²である。試験片数は塗装系6種、繰返し3枚で合計18枚とした。

また、これらの試験片は図-2・6に示した取付枠A、B (T.P.-6.04m) に取付け配置した。

電気防食は棒状の亜鉛陽極 (75×75×500mm) を用いる流電陽極法とした。亜鉛陽極は取付枠上部に枠とは絶縁して取付けた。

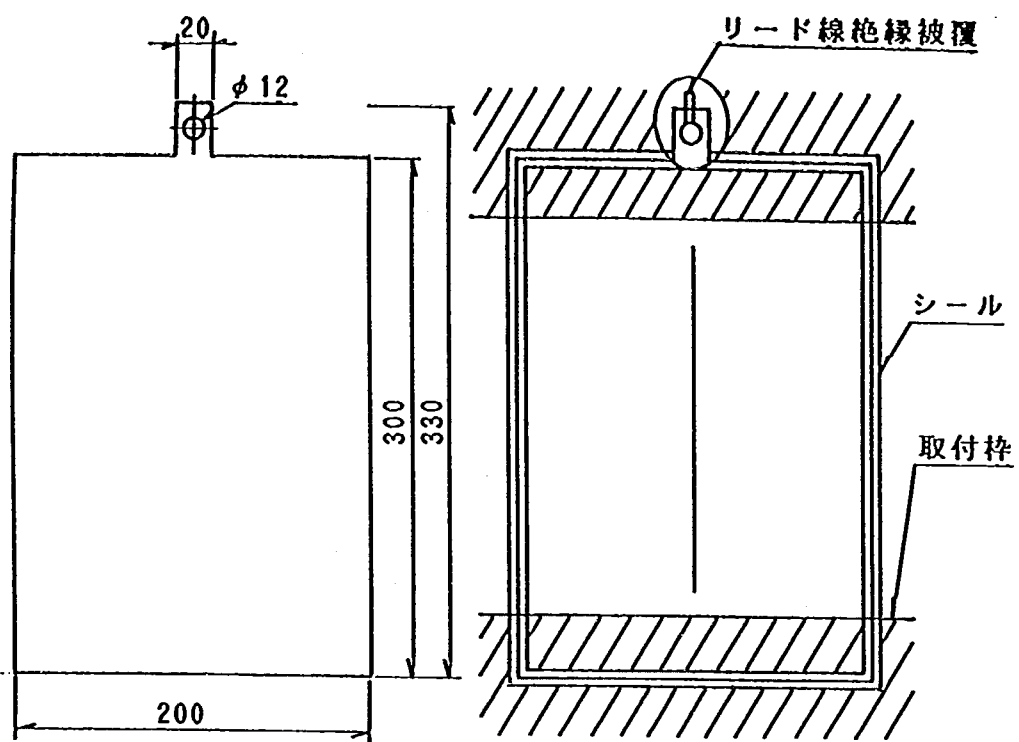


図-2・5 最適塗装系試験用試験片

(3) 測定項目

最適塗装系の選定試験における測定項目は次のとおりである。

- a) 外観観察
- b) 電位測定
- c) 電流測定

2年経過後と10年経過後に調査を実施する試験片の塗装系と評価項目の内容は、次の表-2・2および表-2・3のとおりである。

表-2・2 回収試験片の塗装系

塗 装 系		膜 厚 (μm)					
防 食 塗 料	防 食 下 地	200		400		600	
		2年	10年	2年	10年	2年	10年
タールエポキシ	有機ジンク	○	—	—	—	—	—
	無機ジンク	○	○	—	—	—	—
	な し	—	—	○	○	—	—
GFP	有機ジンク	—	—	—	—	○	○
	無機ジンク	—	—	—	—	○	—
	な し	—	—	—	—	○	○

表-2・3 評価項目

項 目	2年	10年
外観観察、生物付着時 生物除去時	○ ○	○ ○
電位測定	○	—
電流測定	○	—
塗膜抵抗測定	—	○

2. 2. 4 電気防食と塗装の併用における塗膜損傷率と陰極電流密度

塗装鋼材に電気防食を行った場合、塗膜に欠陥があれば経年的に剥離面積が増大すると予想される。この剥離を想定して、当初より塗り残し部を設け塗膜損傷率と陰極電流密度の経時変化を測定した。

(1) 塗装系

防食下地は、なし、有機ジンク、無機ジンクの3種類、塗料種はタールエポキシ樹脂塗料で乾燥膜厚200 μ mの1種類、塗膜損傷率は、スクラッチ、2.2, 6.5, 13%の4種類とした。これらの組合せを表2・4に示した。

表2・4 試験片の塗装条件

塗料種	防食下地	膜厚 (μ m)	塗り残し幅 (mm)	損傷率 (%)	数量 (枚)
タールエポキシ樹脂塗料	なし	200	0	スクラッチ	4
			10	2.2	4
			30	6.5	4
			60	13.0	4
	有機ジンク	200	0	スクラッチ	4
			10	2.2	4
			30	6.5	4
			60	13.0	4
	無機ジンク	200	0	スクラッチ	4
			10	2.2	4
			30	6.5	4
			60	13.0	4
注) タールエポキシは JIS K 5661 1種を用いた。				合 計	48

(2) 試験片

図2・5の左図と同一の寸法、形状のサンドブラスト処理したSS400鋼を用い、それに塗装したものを試験片とした。試験片は両面とも目標膜厚になるようにエアースプレー塗装を行った。

また、試験片の四辺のエッジ部は下塗り塗料および上塗り塗料の塗装面が硬化乾燥した後、同一上塗り塗料を用いて十分に厚く増し塗りした。

乾燥期間30日を経過した後、図2・5の右図に示したようにリード線の結線部を絶縁被覆した。試験片の切傷は塗装面が乾燥した後、図2・5の右図に示したように試験片表面の中央部分に素地に達する長さ20cmのスクラッチを1本入れた。

また、塗膜損傷は防食下地の有無の両条件とも上塗りのタールエポキシ塗膜に付与した。防食下地がある場合はジンクリッチの十分乾燥下面を、また、防食下地がない場合は鋼素地面を、それぞれ所定の面積にマスキングし、次いでタールエポキシを塗装し、十分乾燥しない内にマスキングを除去し作製した。

塗膜損傷率は図-2・7に示したようにマスキング長さを20cmに固定し、幅を各々1, 3, 6cmとすることにより変化させた。

試験片数は、防食下地3種、塗膜損傷率4水準、繰返し4枚で合計48枚とした。これらの試験片は図-2・6に示した取付枠C～Gに取付け、T.P.-6.04mに配置した。

電気防食は亜鉛合金陽極(75×75×500mm)を用いる流電陽極法とした。

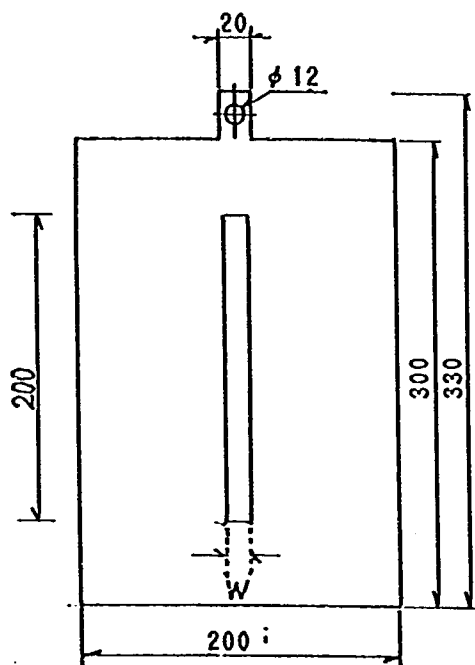


図-2・7 塗膜損傷付与試験片

(3) 測定項目

- a) 外観観察
- b) 電位測定
- c) 電流測定

2.3 大型供試体を用いた試験

海洋構造物の電気防食設計において最も重要と考えられる適性な陽極配置を求めるため、大型供試体にアルミニウム合金陽極を取付けその電位分布を調べた。

2. 3. 1 大型供試体

図-2・8には大型供試体の暴露位置を示し、図-2・9には大型供試体の見取図を示した。前述したように供試体の海水中における裸鋼材の面積は68.2㎡で、供試体には1個の発生電流2 A型(90×90×1,000mm)のアルミニウム合金陽極が6個、それぞれ絶縁した状態で取付けられており、その電氣的な接続は上部第2デッキに設けた配電盤で任意の操作が可能である。また、供試体には亜鉛基準電極が12個配置しており、電位分布の状態を調べることができる。

2. 3. 2 大型供試体の電位分布

試験は初めT.P. -2.50mのNo.1アルミニウム合金陽極1個を用いて電位分布を測定した。1年経過後からはT.P. -2.45mのNo.4およびT.P. -6.096mのNo.6の2個のアルミニウム合金陽極に切換えて引続き電位分布を測定した。その後1年経過したところで再び1個に切換えた。電位測定はモニタリング用に取付けられている亜鉛基準電極(φ15×75mm)を用い、これを飽和カロメル基準電極でチェックし、表示は飽和カロメル基準(SCE)とした。亜鉛基準電極の配置を図-2・9に示す。

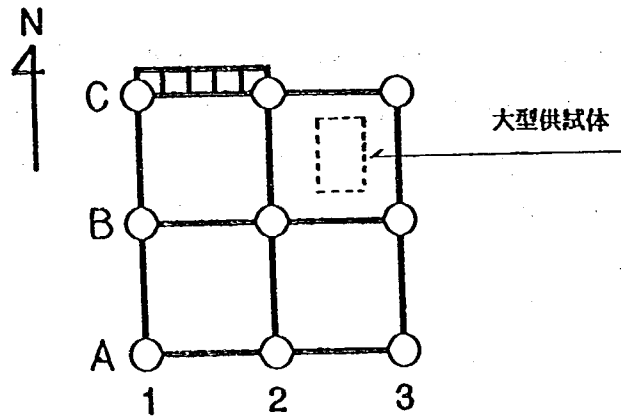


図-2・8 大型供試体の暴露位置

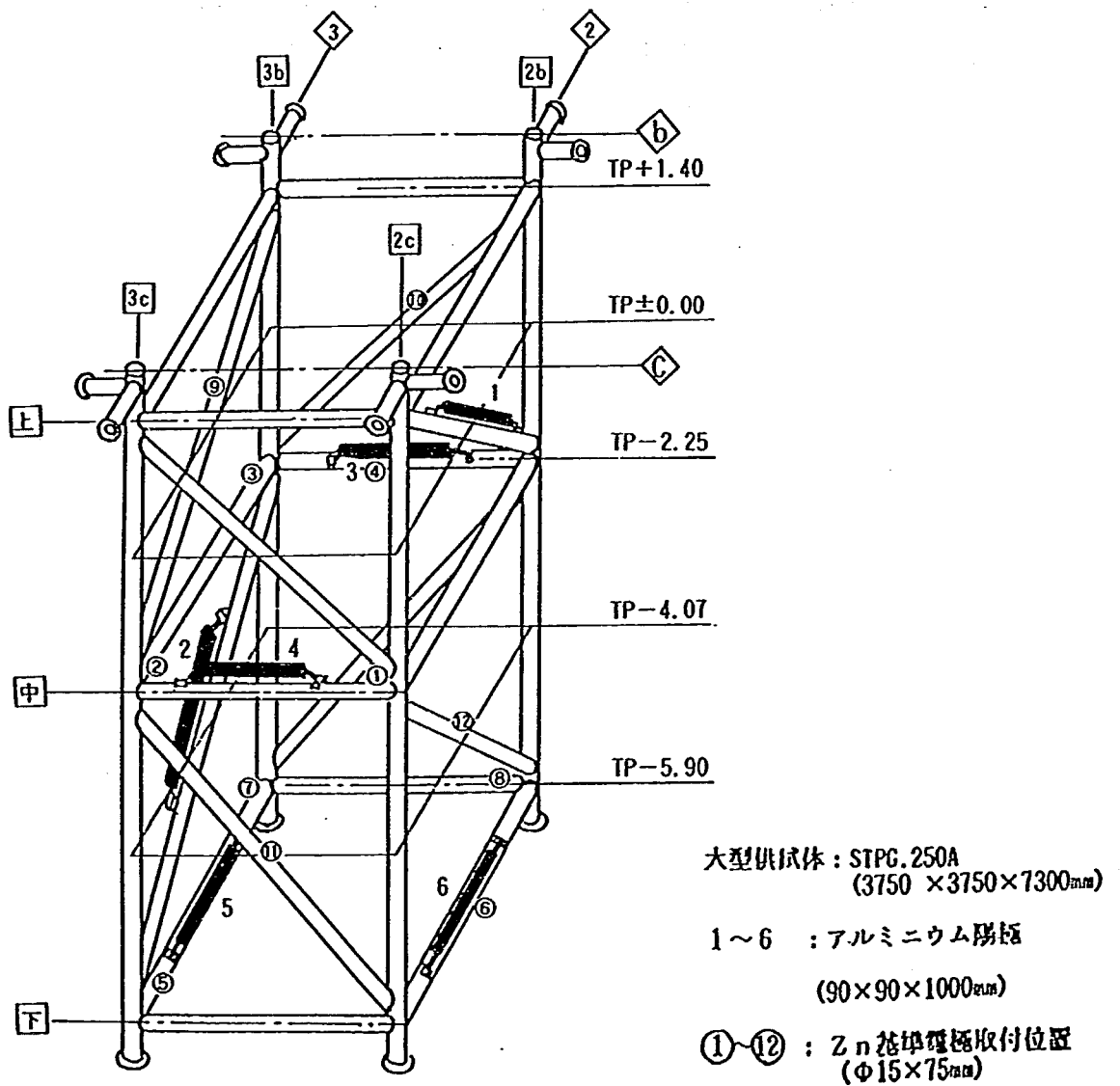


図-2・9 電気防食試験用大型供試体見取図

2. 4 施設本体を利用した試験

構造部材を組み込んだ大型の海洋曝露試験施設本体を対象に、自然環境の腐食条件に対応する電気防食の状況を経年的に調査することとした。対象構造物にアルミニウム陽極を取付け、防食電流到達（有効）距離を求めるために各部の電位分布を測定し、陽極の発生電流値を経時測定した。また、同時に実海域において壊れにくく、扱いやすい固体型の亜鉛基準電極の電位安定性を長期間追跡測定した。

2. 4. 1 試験施設本体

試験施設本体は前章に試験対象として規模と諸元を述べが、海中部構造は直径 914.4mm の直立杭 9 本、直径 609.6mm の水平材および同径の斜材で構成され、平面的には 15m×15m の大きさである。これらの鋼管部材は直立杭 2 本およびその他にも一部塗装があるが、電気防食の対象面積としてはそれらも含め、海中部および海土中部で当初は合計 798.8m² であった。その後、他の分科会や研究課題のための鋼材設置が加わって 10 年目の現在は 953.6m² である。その間の経緯を表 2・5 に示した。

表 2・5 施設本体の電気防食対象面積の変化

	杭	防 食 対 象		色	防食面積		
当 初 計 画	1 B	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75μ m) + タールウレタン樹脂塗料 (150μ m× 2)			黒	33.1㎡	798.8㎡
	2 C	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75μ m) + ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 (500μ m× 2)			グレー	35.0㎡	
	他杭	T. P. -1.75m以上の塗装面積				171.6㎡	
	裸杭	裸 鋼 材	海 水 中		484.5㎡		
			海 土 中		74.6㎡		
追 加	昭和59年	試 験 架 台 等 の 鋼 材				60.4㎡	154.8㎡
	昭和63年					33.6㎡	
	平成5年					33.6㎡	
	平成5年	他の分科会の試験材				27.2㎡	
合 計					953.6㎡		

注) (1) 当初計画では裸部は T. P. +0.15m (MSL) 以下とした。

(2) 昭和59年試験開始後、各種の目的による追加試験のため、裸部材、簡易塗装部材およびステンレス鋼管試験材などがこの施設本体に直接取り付けられ、電気防食対象となっており、その増加面積

は他の試験材の架台等の鋼材として昭和59年度に60.4㎡、平成2年度に67.2㎡（昭和63年度および平成元年度取付分）となり、さらに他分科会の試験材（ステンレス鋼）として平成元年に27.2㎡があり、全対象面積としては953.6㎡となっている。なお、平成2年度に増加した面積は、いずれも鋼材にタールエポキシの簡易塗装で浸漬後1年および2年経過しており十分発錆した状態のものが施設本体に接続された。

2. 4. 2 アルミニウム合金陽極の発生電流および消耗量

施設本体には図－2・10に示すようにアルミニウム合金陽極が取り付けられた。アルミニウム合金陽極は図－2・11に示す棒状の発生電流3 A型（135 × 135 × 1650mm）正味重量約80 kg、設計寿命15年のもので、本体と絶縁され、その間に水中型発生電流測定用シャント抵抗（10mΩ）を介して接続した。アルミニウム合金陽極の取付け個数は表－2・6に示すように計画的に徐々に増加させた。

すなわち当初の1年間は杭2 Aに3個（No. 1～3）の陽極を取付け、主として陽極からの距離と陰分極の関係を調査した。1年後、杭1 Aに陽極2個（No. 4、No. 6）および杭3 Aに陽極2個（No. 5、No. 7）の合計4個を取付け、当初からの陽極と合せて7個の陽極の状態で行続き陽極からの距離と陰分極状況を調査し、さらに杭2 Aについて水深方向の電位分布、杭No. 2の列における杭2 A、2 B、2 Cの電位分布の比較、塗装杭1 Bおよび2 Cについて塗装との併用効果などを調査した。その後は、陽極7個で1年経過後、塗装杭を除く他の裸杭に図－2・10に示すように合計11個の陽極の追加取付けを行って、全陽極数を18個とし、大型の構造物に対する電位分布状況を長期計測することとした。この18個の陽極の取付けは上記の各種調査とは別に海洋総合研究施設の海水中の防食対策をも兼ねるもので、その防食設計の内容は次の（注）に示す。

表－2・6 アルミニウム合金陽極取付経過

取付け日	取付個数	陽極 No.	取 付 位 置（杭 No.）	合計個数
59.8. 5	3	1, 2, 3	2 A	3
60.7. 30	2	4, 5	1 A, 3 A	5
60.7. 31	2	6, 7	1 A, 3 A	7
61.7. 30	11	8～18	2 B（4個）、3 B（4個） 1 C（2個）、3 C（2個）	18

（注）

〔海洋技術総合研究施設の海中部に対する電気防食〕

施設本体の電気防食試験は、昭和58年に建設省土木研究所から発行された「電気防食設計指針（案）・同解説」に基づいてアルミニウム合金陽極の使用数量を決定した。以下に計算根拠を示す。

1. 防食面積

海水中（裸部）	484.5 m ²
海水中（塗装部）	239.7 m ²
海土中	74.6 m ²

2. 防食電流密度

海水中（裸部）	100mA/m ²
海水中（塗装部）	100mA/m ² ×0.1（剥離率）
海土中	20mA/m ²

3. 防食電流

海水中（裸部）	$484.5 \text{ m}^2 \times 0.1 \text{ A/m}^2$	$= 48.45 \text{ A}$
海水中（塗装部）	$239.7 \text{ m}^2 \times 0.1 \text{ A/m}^2 \times 0.1$	$= 2.40 \text{ A}$
海土中	$74.6 \text{ m}^2 \times 0.02 \text{ A/m}^2$	$= 1.49 \text{ A}$

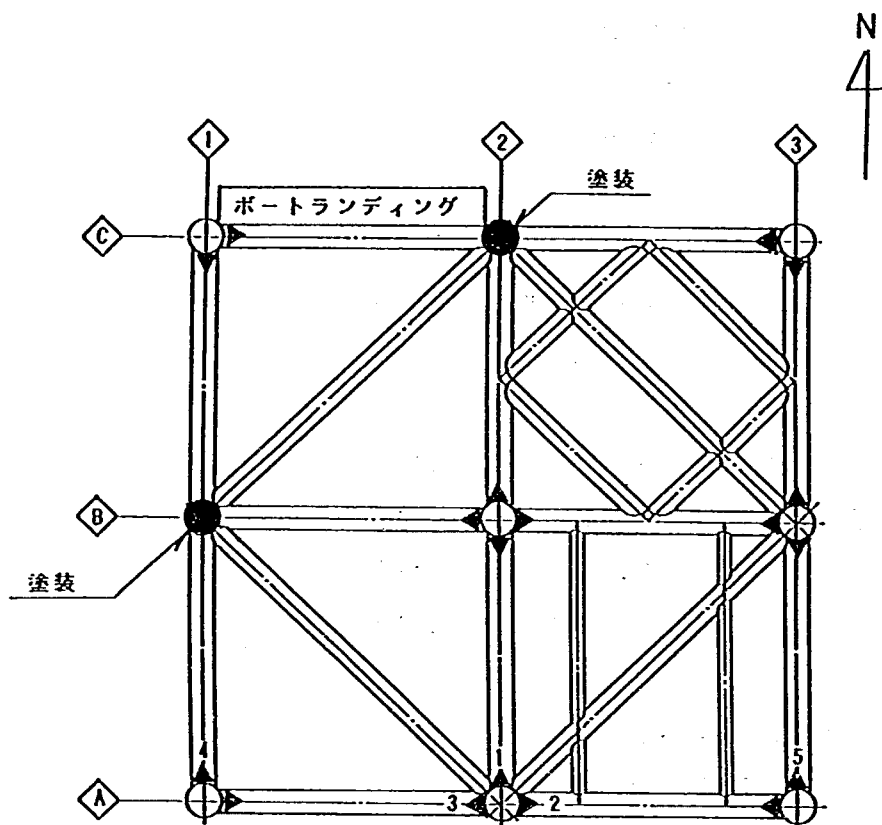
計 52.34 A

4. 使用陽極

材質	: アルミニウム合金
形状	: 135×135×1650mm
初期発生電流:	3.0 A/個
正味重量	: 80 Kg/個
設計耐用年数:	15年

5. 陽極数量

$$52.34 \text{ A} \div 3.0 \text{ A/個} = 17.45 \text{ 個} \rightarrow 18 \text{ 個}$$



●杭1 Bと2 Cは全面塗装

▲アルミニウム合金陽極位置

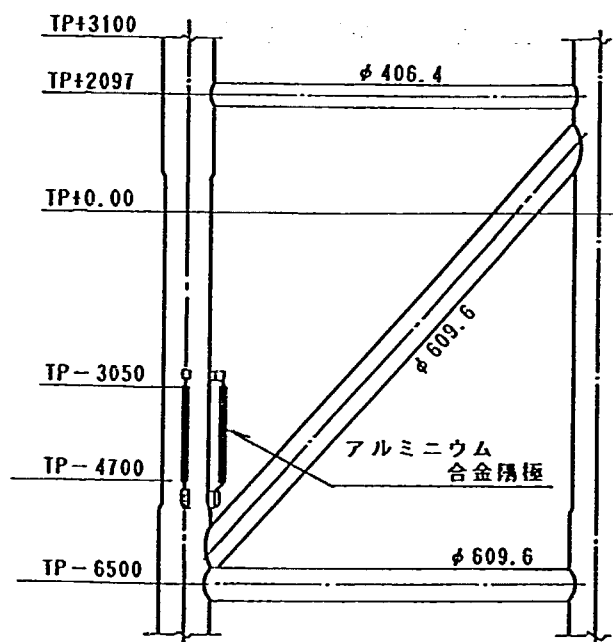


図-2・10 施設本体におけるアルミニウム合金陽極

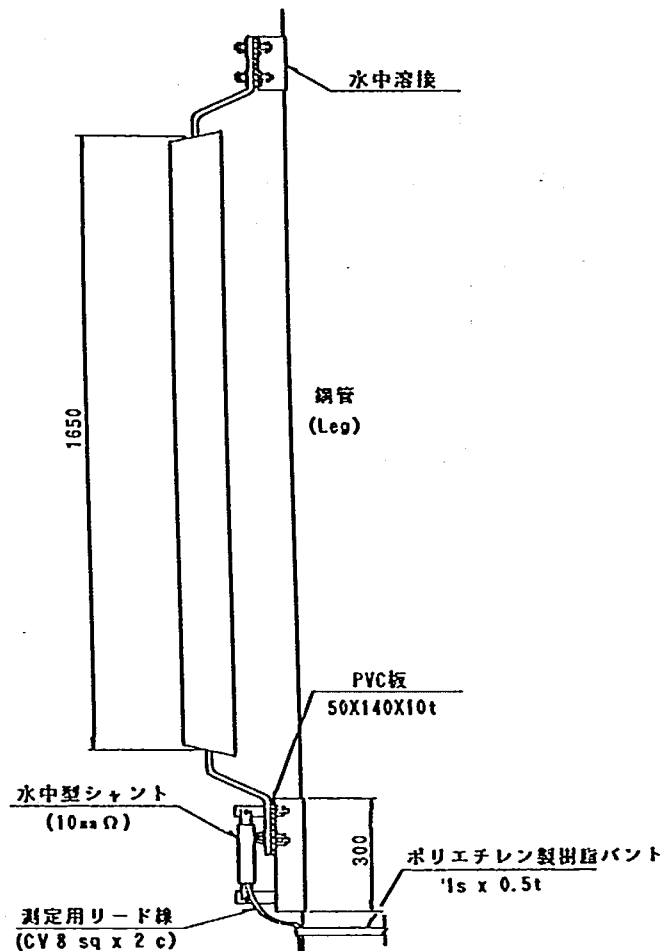


図-2・11 発生電流測定用アルミニウム合金陽極取付け図

(1) アルミニウム合金陽極の発生電流測定

アルミニウム合金陽極の発生電流は、前に述べたように水中に設けた発生電流測定用シャント抵抗 ($10\text{ m}\Omega$) の電圧降下実測値から算出した。測定はアルミニウム合金陽極の取付けに対応して当初は3個、1年経過後から2個追加、その後の1年経過以降は特定の陽極についてのみ長期間継続することとした。

(2) アルミニウム合金陽極の消耗量の測定

陽極の消耗量調査の目的は、経過年数間の防食電流密度の推定や陽極の耐用寿命を予測するためである。

陽極の消耗量調査法には2通りの方法がある。陽極を取外さないで求める方法としては、陽極の形状・寸法を潜水土によって計測し、陽極の残存体積から消耗量を算出する方法と、取付けられている陽極を水中切断等によって取外し、陸上に引上げて秤量する方法がある。

1) 陽極の形状・寸法測定による調査

陽極の表面に付着している海生物や腐食生成物を水中で十分に除去する。陽極形状・寸法の測定は図-2・12に示す部位の寸法を測定する。測定には幅がせまく、収縮しない巻尺を使用する。

L : 残存陽極の長さ (cm)

l : 残存陽極の周長 (cm)

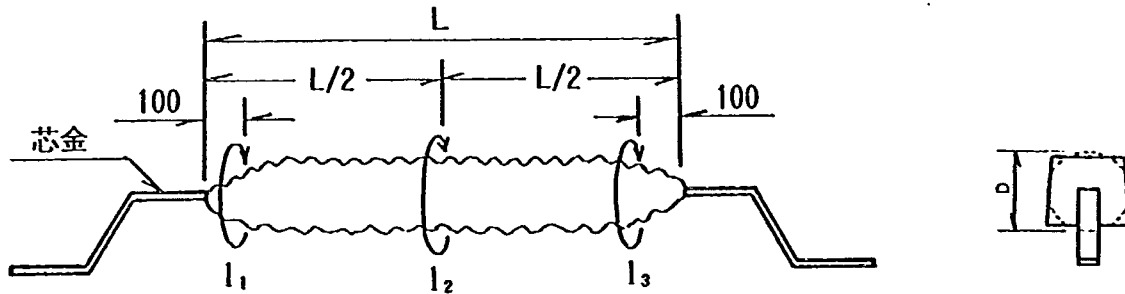


図-2・12 陽極寸法測定要領図

陽極の消耗量の計算は次式によって求める。

$$C = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3}$$

C : 残存陽極の平均周長 (cm)

$$D = \frac{C}{\pi}$$

D : 等価直径 (cm)

注) 陽極表面は消耗に伴う凸凹があるので実測寸法を補正した寸法で計算する必要がある。

$$V_2 = \left(\frac{D}{2} \right)^2 \times \pi \times L$$

V₁ : 陽極の初期体積 (cm³)

V₂ : 残存陽極の体積 (cm³)

$$W_2 = (V_1 - V_2) \times d \times 10^{-3}$$

W₁ : 陽極の初期正味重量 (kg)

W₂ : 消耗した陽極重量 (kg)

$$W = \frac{W_2}{y}$$

W : 陽極の年間平均消耗量 (kg/y)

$$Y = \frac{W_1 - W_2}{W}$$

d : 陽極の比重

Y : 残存寿命 (y)

y : 経過年数 (y)

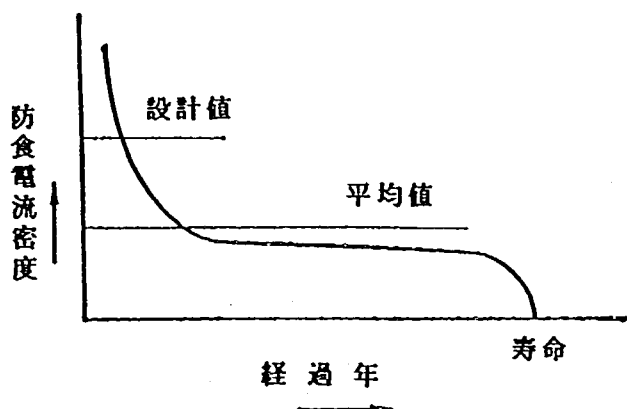
2) 陽極の重量測定による調査

陸上に引上げた陽極を秤量し、芯金の重量を差引けば陽極の残存重量を求められる。芯金の重量は実測することができないので芯金の体積を求め、芯金の重量を計算する。

消耗量や残存寿命の計算は上記1)項に準じる。

3) 定常電流密度

防食電流密度は図-2・13に示すように通常は時間の経過とともに被防食体表面の陰分極の進行に伴って減少し、ある期間経過後は、ほぼ一定の値に落ち着くのが一般的である。



この状態での電流密度を定常電流密度という。定常電流密度はアルミニウム合金陽極の消耗量をもとに次式の計算によって求められる。

図-2・13 防食電流密度の経時変化モデル

$$\text{定常電流密度 (A/m}^2\text{)} = \frac{\text{消耗した陽極の平均重量 (kg/t)} \times \text{陽極取付個数 (t)} \times 2600 \text{ A} \cdot \text{h/kg}}{\text{経過年数 (y)} \times 8760 \text{ h/y} \times \text{有効面積 (m}^2\text{)}}$$

(注) 有効面積とは防食対象面積を海水中の面積に換算したものである。

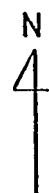
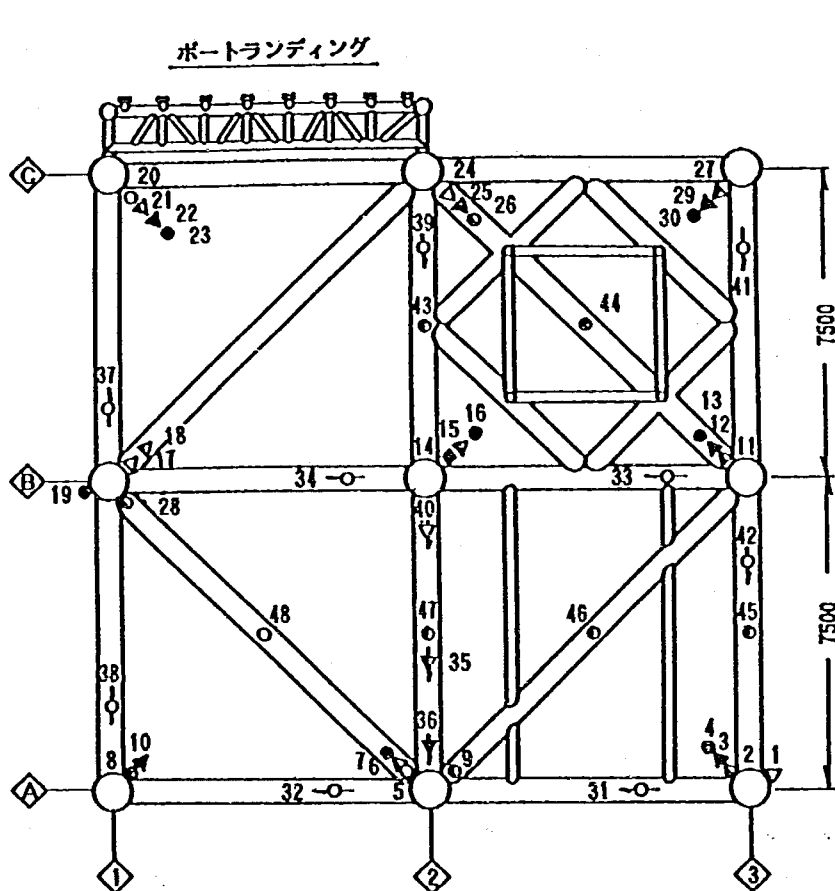
2. 4. 3 施設本体の陰極電位分布

施設本体の電位分布は前に述べた表-2・6のアルミニウム合金陽極の取付個数に応じて測定を実施した。電位分布としては距離の異なる位置の分布、直立杭の水深方向分布、塗装の有無による分布の差異、長期間にわたる電位変化など種々の目的を設けた。測定は飽和カロメル基準電極によった。

2. 4. 4 亜鉛基準電極の電位の安定性

電気防食法を適用した海洋構造物の防食効果を確認するためのモニタリングとして、被防食体に亜鉛基準電極を直接取付ける方法が、近年多く採用されている。すなわち、亜鉛基準電極は個体電極として加工が容易なうえに堅牢で、海水中においては比較的電位の安定性がよく長期実用に耐えるので、苛酷な環境などで交換できない場合に重用されている。しかし、これまで実海域における実証報告が少ないのでこれを確認することとした。

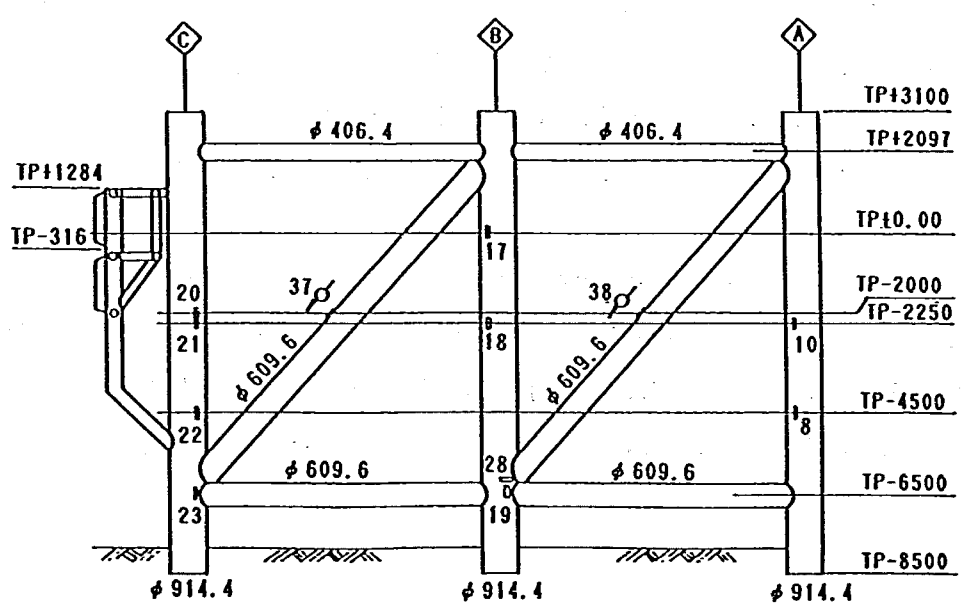
本試験は、モニタリング用亜鉛基準電極の信頼性を調査する方法として施設本体に取付けた48個の亜鉛基準電極の電位を飽和カロメル電極を用いて測定した。供試した亜鉛基準電極は直径15mm、長さ75mmの円柱状で、取付け位置を図-2・14に示した。取付け水深は7レベルに配置されている。信頼性は亜鉛基準電極の自然電位を経年的に測定することにより、その変化量を調べることで安定性を判断することとした。



亜鉛基準電極取付内訳

記号	取付水深	数量(個)	
		ジャケット	バルブ
△	0.00m	3	1
■	1.50m	1	—
○	2.00m	2	9
△	2.25m	9	1
▲	4.50m	5	1
①	6.20m	—	9
●	6.50m	7	—
合計		27	21

平面図



断面図

図-2・14 亜鉛基準電極取付配置図

3. 試験結果

3. 1 環境調査

表-3・1 に試験施設付近の海水の水質分析結果を示す。試験開始以来ほぼ安定した標準的な清浄海水に近い値を示している。

表-3・1 試験施設付近の海水の水質

年 度	採 水	水 温 (℃, 現地)	p H	抵抗率 (Ω cm)	溶存酸素 (ppm)	塩素イオン (ppm)	硫酸イオン (ppm)
59年度	表 水	13.8	8.0	21.4	8.8	19,300	2,720
S60.2.27	底 水	12.8	8.0	21.4	8.9	18,900	2,740
60年度	表 水	14.9	7.9	22.2	7.2	19,300	2,920
S60.11.21	底 水	13.2	8.1	22.1	6.8	19,300	2,930
61年度	表 水	26.2	8.2	23.8	6.8	17,600	2,420
S61.7.23	底 水	25.2	8.2	23.1	7.0	18,300	2,570
62年度	表 水	17.0	8.1	18.9	6.8	19,200	2,630
S62.12.15	底 水	17.5	8.1	19.0	7.5	17,000	2,560
63年度	表 水	24.3	8.0	21.3	7.3	19,500	2,520
S63.8.6	底 水	24.0	8.1	20.8	7.7	20,100	2,640
元年度	表 水	19.2	8.1	22.0	7.9	18,500	2,800
H1.10.25	底 水	19.3	7.8	22.1	8.0	18,600	2,800
2年度	表 水	22.2	8.2	23.6	7.1	18,000	2,530
H2.10.18	底 水	23.2	8.2	22.9	7.8	18,700	2,590
3年度	表 水	18.1	8.1	23.0	7.4	18,700	2,360
H3.11.17	底 水	17.5	8.2	22.0	7.8	18,600	2,380
4年度	表 水	26.4	8.1	24.0	8.7	17,000	2,350
H4.7.28	底 水	25.2	8.1	23.0	7.3	18,600	2,450
5年度	表 水	21.4	8.2	24.0	6.8	18,850	2,625
H5.10.22	底 水	21.2	8.2	24.2	6.9	18,950	2,920
6年度	表 水	24.4	8.2	20.5	6.7	19,150	2,550
H6.8.3	底 水	24.2	8.2	20.5	6.3	19,400	2,570
標準清浄海水の例		—	8.2	20~25	7~8	18,900	2,600

3. 2 陰分極試験

図-3・1は小型試験片を用いて求めた裸鋼（サンドブラスト処理）の陰分極曲線である。試験片と亜鉛陽極との間に抵抗をはさんで計画陰極電流密度を25～300mA/dの間の数種類として通電し、2時間後、1年後、1.5年後に電流密度と電位を測定して陰分極曲線を作成した。

初期に防食電位(-770mV, SCE)に達する電流密度は、100mA/dよりやや大きい程度であった。この値は実験室試験(80mA/d)に比べ若干大きい値である。これは、実海域では常に波浪や潮流の影響を受け、分極がしにくいことが挙げられる。1年後経過までは防食電位に達していない電流密度ではさらに貴方向に変化し、防食電位に達している電流密度では卑方向に変化するが、防食電流密度はほぼ同様な値で推移する。1年経過後から全体に分極が進み1.5年経過後の防食電流密度は約50mA/dになった。

この図から、初期に比較的大きな電流密度で通電して、できるだけ速やかに防食電位に到達すればその後は時間の経過とともに防食電流密度が次第に低減することを示唆している。

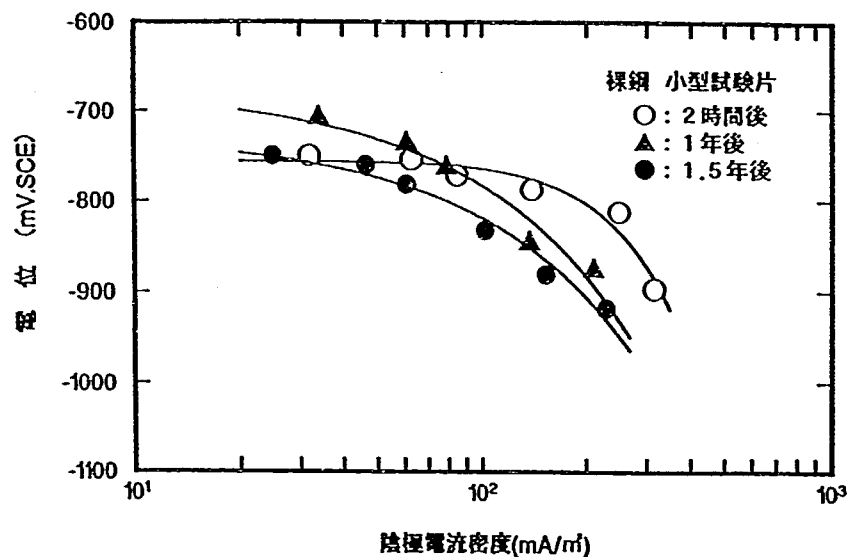


図-3・1 陰分極の経時変化（駿河湾）

3. 3 防食電流密度

図-3・2には一般の外洋性海域における試験として、駿河湾で実施された裸鋼材試験片に対する防食電流密度の経時変化を示す。試験はあらかじめ計画した電流密度で通電したが、図は実際に測定されたデータから -770mV(SCE)を維持する電流密度の経時変化として表わしたものである。

所要防食電流は通常初期に大きく、次第に低減する傾向があるが、ここでも同様の傾向を示した。また、測定ごとの電流密度の変動も初期に大きく、これも次第に小さくなる傾向を示した。図から明らかなように当初の設計防食電流密度としては通常の内湾環境に適用される100mA/dでは不足と考えられ、より大きい電流密度で、まお数ヵ月を要するものと推定される。このような陰分極の状況や前記した電流密度の変動は、この沿岸外洋性海域の試験施設附近では常に波浪があり、また、そのために海水中に浮遊細砂があつて鋼面が陰分極しにくいことが原因となっている。すなわち、122日、206日および565日経過後の測定値で、復極に基づく電流値の大きな増加が認められたのは、いずれも冬季で著しく波浪の大きい条件に対応したものと考えられる。このような鋼板表面の復極に対応する防食電流の変化は、初期の200日経過ごろまでは不安定

で変動が大きい、1年経過以後は安定して影響は小さくなっている。

以上のような状況から、外洋性海域において、波浪や漂砂を原因とする復極に対応して裸鋼材が初期から防食電位を維持するための防食電流密度は、設計値として $120 \sim 150 \text{ mA/m}^2$ 程度が必要と考えられる。防食電流密度の低減については約1年経過で当初のほぼ $1/2$ に低下した。

図-3・3には防食電流密度試験における防食効果を示す。試験片の重量減から平均侵食度を求め、防食片と非防食片の重量減とを比較して防食率を求めた。防食率は最大の電流密度のとき95.4%、最小電流密度で30.9% となり防食電流密度に依存する傾向を示した。

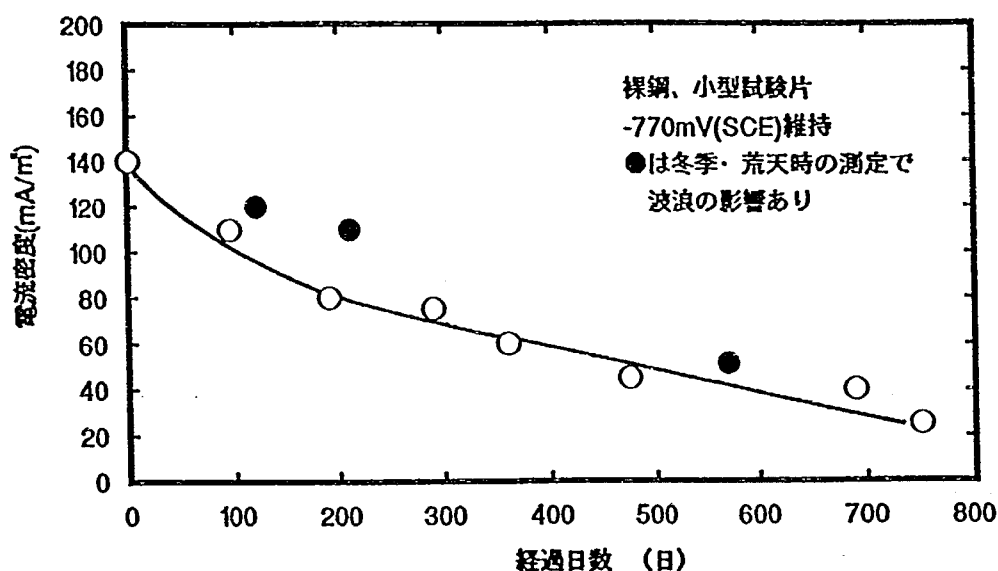


図-3・2 防食電流密度の経時変化 (駿河湾)

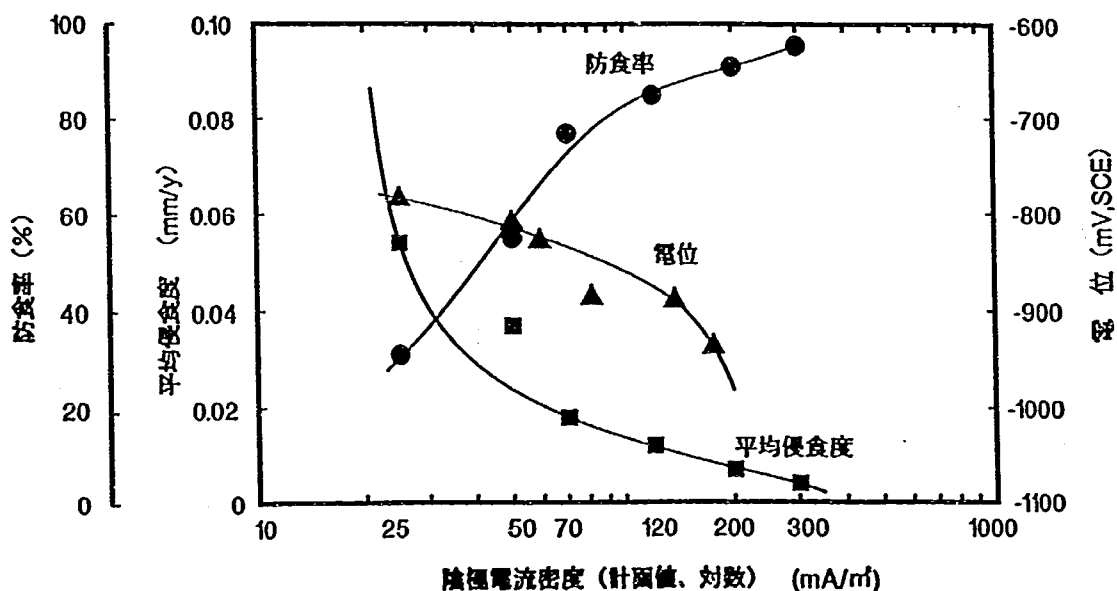


図-3・3 防食電流密度試験結果 (774日間、小型試験片、駿河湾、)

3. 4 アルミニウム合金陽極性能

アルミニウム合金陽極は試験施設本体に当初の3本から次第に増加して取付けられたが、これは施設本体の電気防食試験に用いられたもので、同時に陽極からの発生電流と消耗量を調査した。

3. 4. 1 アルミニウム合金陽極発生電流

図-3・4に当初2年間のアルミニウム合金陽極の発生電流を示す。いずれの陽極も当初は計画値よりかなり大きい発生電流を示すが、これは施設本体の防食対象面積に対してまだ陽極数が不足の段階であり、両者の電位差の関係からアルミニウム合金陽極に過大な電流流出が強いられているものと考えられる。したがって、施設本体の分極増加にともなって次第に低減し、1年経過頃には計画値より小さくなりさらに低減を続ける傾向を示していた。

アルミニウム合金陽極の計画的な取付け経過はすでに表-2・6に示したが、図-3・5には試験開始1年経過後に追加して取付けた杭1Aのアルミニウム合金陽極 No. 4の発生電流のその後の経時変化を示した。当初5A以上を示した発生電流値は、杭の陰分極の進行に対応して次第に減少し、約3年8カ月後には0.75Aを示し、順調に低減した。しかし、4年1カ月後の調査では若干増加が認められた。この理由は、この間に他の試験が追加され、それらの部材が施設本体に取付けられて対象面積が増加していることに起因するものと思われる。増加面積は裸部材、簡易塗装部材、ステンレス鋼管試験材などの合計で約155m²となり、とくに裸鋼材として数年間暴露されたものを一部に含むなど陰分極に大きい電流を必要としたためと推定される。なお、4年5ヶ月後の冬季荒天時の測定では波浪が大きく施設本体の電位が復極し、発生電流が増大したものと考えられる。

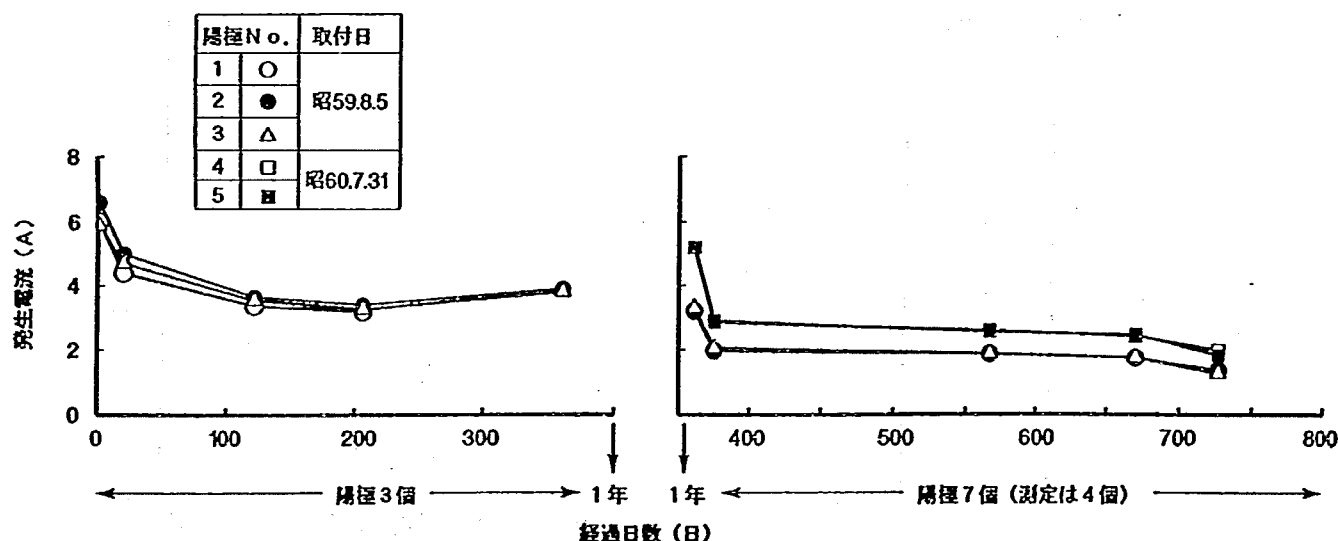


図-3・4 アルミニウム合金陽極発生電流の経時変化 (駿河湾)

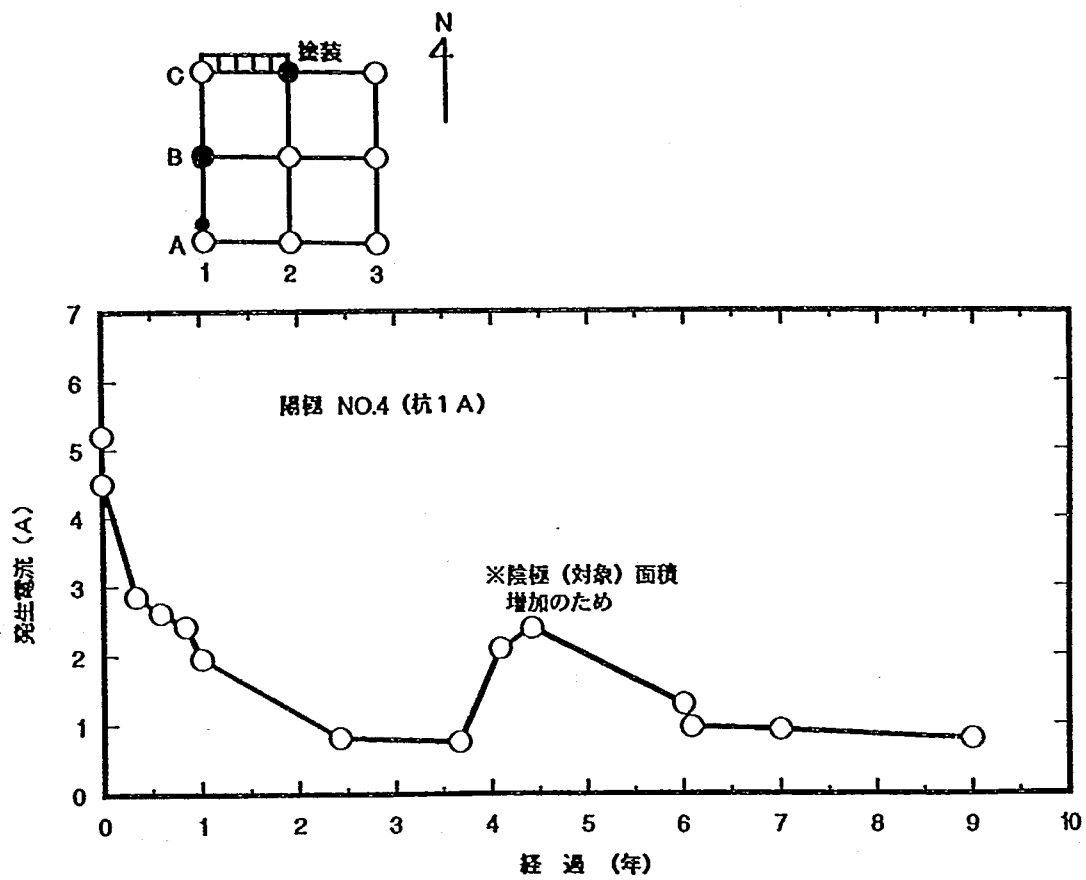


図-3・5 アルミニウム合金陽極発生電流経時変化 (駿河湾)

3. 4. 2 アルミニウム合金陽極の消耗量

施設本体に取付けたアルミニウム合金陽極の主な仕様を以下に示す。

形状寸法	: 135×135×1650mm
正味重量	: 80kg±2%
電気量	: 22.6 A・y
初期発生電流	: 3.0A/個
設計耐用年数	: 約15年

アルミニウム合金陽極を取付けてから約10年が経過したので消耗量の調査を行った。調査方法は水中に残存する陽極の形状・寸法を潜水士によって測定した。その測定結果を表-3・2に示す。

(1) 残存陽極の寸法測定

表-3・2 陽極の形状寸法測定結果

陽 極 No.		No. 1	No. 3	No. 4	No. 6
陽極取付年月日		1985.8.5	1985.8.5	1986.7.30	1986.7.31
測 定 年 月 日		1994.8.2	1994.8.2	1994.8.2	1994.8.2
経 過 年 数		約10年	約10年	約9年	約9年
陽極の 周 長 (cm)	l ₁	34	30	36	34
	l ₂	37	33	40	38
	l ₃	36	32	37	37
	C (平均)	35.7	31.7	37.7	36.3
陽極長さ (cm)		160	155	162	159

残存している陽極の表面形状は一般的に不均一であり、陽極の等価直径および有効長は実測値を補正した寸法で、前述の所定の算式に基づいて消耗量の計算を行った。

(2) 陽極消耗量の算出

残存陽極の寸法から所定の算式によって陽極消耗量を求めた。その結果を表-3・3に示す。

陽極消耗量は約40～50kgであり、陽極の消耗率は当初の重量に対して9年経過後の陽極で50～55%、10年経過後の陽極で56～68%を示している。年間の平均消耗量は約4.5～5.4kg/yである。

表-3・3に見られる各陽極の消耗量のバラツキは陽極の設置位置についてみると、No. 3およびNo. 6陽極は施設の南側に面しており、このため特に波浪の影響を受け易く、また荒天時には強い波浪によって陽極に付着している海生物が脱落し、陽極表面の活性面は大きくなり発生電流は増加する。

また一方、当初の1年間は電位分布試験の関係で陽極の取付数が3本（総取付数の1/6）であったため陽極の発生電流は大きく、時間の経過に伴う電流の低減も小さい。前述の如くNo. 3陽極は波浪の影響もあり消耗量が多くなったものと考えられる。

2年目以降もNo. 3およびNo. 6陽極は波浪の影響を受けるがNo. 1およびNo. 4陽極は南側からみれば杭の陰に位置している関係で消耗量は少なくなっていると思われる。また、No. 4陽極に近いNo. 1B杭は塗装が施されているため防食に必要な電流が小さいことから消耗量が少なくなったものと推測される。

表-3.3 陽極消耗量調査結果

陽 極 No.	No. 1	No. 3	No. 4	No. 6
陽極の初期体積 (cm ³)	30,071.25	30,071.25	30,071.25	30,071.25
陽極の残存体積 (cm ³)	13,337.8	9,945.9	15,225.2	13,743.5
陽極の消耗量 (kg)	45.18	54.3	40.08	44.08
陽極の消耗率 (%)	56	68	50	55
陽極の年間平均消耗量 (kg/y)	4.52	5.43	4.45	4.90
	4.975		4.675	
陽極の残存重量 (kg)	34.82	25.66	39.92	35.92
陽極の残存寿命 (y)	7.7	4.7	9.0	7.3
陰極の定常電流密度 I_m (A/m ²)	4,975kg/ヶ×3ヶ×10年=149.25kg 4,675kg/ヶ×4ヶ×9年=168.3kg 4,675kg/ヶ×11ヶ×8年=411.4kg 計728.95kg $I_m = \frac{728.95\text{kg} \times 2600\text{A} \cdot \text{h/kg}}{10\text{y} \times 8760\text{h/y} \times 666.2\text{m}^2} \approx 0.0325\text{A/m}^2$ $\therefore 32.5\text{mA/m}^2$			
注) 有効面積: 666.2m ²				

(3) 陽極の寿命計算

既存の陽極の残存寿命の算出は残存重量をそれまでの年間平均消耗量で除して求める方法と、残存重量から算出された残存電気量をそれまでの平均発生電流で除して、なお安全率を見込む方法とがある。

表-3.3の陽極の残存寿命は前者の方法で陽極の年間平均消耗量より単純計算によって求めたものである。しかし、陽極の寿命計算は電気防食指針(案)に記載されている陽極の平均発生電流から算出する後者の方法(指針P39)が実情に即した方法といえる。今回の調査した陽極の発生電流の経時変化は図-3.5に示されている通り、初期5.2Aから徐々に低減し10年後には0.8Aとなっているが、この図から10年間の平均発生電流を求めると約1.2Aとなる。

また、10年間に消耗した全陽極の推定重量から求めると表-3.3に示した通り728.95kg(陽極の18ヶの合計消耗量)であり、下記の計算式から陽極1ヶ当りの平均発生電流は約1.2Aとなる。

$$\text{平均発生電流} = \frac{728.95\text{kg} \times 0.2968\text{A} \cdot \text{y/kg}}{10\text{y} \div 18\text{ヶ}} \approx 1.2\text{A/ヶ}$$

ここでアルミニウム合金陽極の発生電気量を $2600\text{A} \cdot \text{h/kg} = 0.2968\text{A} \cdot \text{y/kg}$ と仮定した。すなわち、推定消耗量から求めた陽極1ヶ当りの平均発生電流は、上述の図-3.5の実測発生電流測定値から求めた平均

発生電流の値とほぼ一致している。

この平均発生電流値より指針の解8式（P 2 7）を用いて、各々の陽極の残存寿命を求めた結果を表-3・4 に示す。

表-3・4 陽 極 の 寿 命

陽極No.	残 存 重 量	残存電氣量	残 存 寿 命	総 寿 命
No. 1	34.82kg	9.84A・y	8.2年	18.2年
No. 3	25.66kg	7.25A・y	6.0年	16.0年
No. 4	39.92kg	11.28A・y	9.4年	19.4年
No. 6	35.92kg	10.15A・y	8.5年	18.5年

陽極の推定総寿命は16.0～19.4年であり、設計耐用寿命より約1～5年程度延びるものと思われる。試験場所の環境は外洋性であり、常に波浪や漂砂等の影響を受ける過酷な環境下でも設計耐用寿命が満たされていることは、電気防食設計が適切であったといえる。また、定常電流密度が設計上の電流密度より小さい値となっていることは、防食対象が塗装杭を含んでいるので、その併用効果によるものと推測される。

3. 5 陰極電位分布

3. 5. 1 大型供試体の電位分布

表-3・5 にはアルミニウム合金陽極の発生電流と大型供試体の陰極電位分布状況を示す。

大型供試体に対してアルミニウム合金陽極1個（No. 1）を短絡して通電を開始した当初は、アルミニウム合金陽極の発生電流が約2 A程度で、これは陰極面積68.2m²に対して約30mA/m² となり防食電流密度としては不足で、約7カ月後もほとんど陰分極を生じていなかった。なお、この No. 1 アルミニウム合金陽極は取付け位置が干満帯にあり、防食陽極として時間的に充分有効に作動しなかったのが原因である。

約1年経過後、アルミニウム合金陽極 No. 4 および No. 6 の2個を用いて通電したところ、1日後の発生電流が 5.69A (83.4mA/m²)となり、陰分極が進み、その後の 114日目以降の測定ではすべて-800mVより卑な防食電位に達していた。1年経過後は供試体の全域にわたって電位分布の平均化も進み、-870～920mV を示した。

位置的にみると、No. 6 陽極に近い位置にある No. ⑥亜鉛基準電極による測定値が最も卑で、114日経過後以後は-900mVより卑な値で安定し、1年後は-924mVを示した。そのほか No. ⑧、No. ⑪、No. ⑫、陽極 No. 4 に近い No. ①、No. ②の位置などが比較的卑な値を示した。陽極2個の当初は陽極近傍と遠隔部とでは 137mVの電位差が認められたが、1年後には約55mVになり、その差は次第に減少した。

アルミニウム合金陽極の発生電流は、大型供試体の陰分極の増加とともに次第に低減して、約300 日経過後には2本の合計で約3 Aを示し、防食電流密度としては約45mA/m²に低減した。

図-3・6には電流密度と電位の経時変化を示した。施設本体の電位は時間の経過とともに卑に変化し、かつ最貴値と最卑値の差が減少して電位の均一分布がすすんでいることが明らかである。

以上の表-3・5および図-3・6から推定すると、 80mA/m^2 以上の電流密度が印加されれば、構造物の位置で若干異なるものの3カ月程度で防食電位に達するものと考えられ、その後は電位分布の均一化とともに全体的に陰分極が進み、1年後には電流密度は $1/2$ 程度に低減する。

3. 5. 2 施設本体の電位分布

施設本体の陰分極を調べるために、施設全域にわたり48箇所の測定点で電位の経時変化を測定した。当初、杭2 Aに3個の陽極を取り付け、1年後に杭1 A及び3 Aに各2個を追加した経過とともに、陰分極の傾向は、当初は杭2 Aを中心に進行し、1年後、陽極が7個に増加された後はA列の分極が、次いで徐々にB列の分極が進んだ。陽極に遠いC列は最も陰分極が遅れたが、1年後にはその一部が防食電位に達した。水深別に見ると、陽極取り付けレベルの水深-4 m付近の分極が最も大きい傾向が認められた。

(1) 施設本体の電位分布の経時変化

施設本体の防食用のアルミニウム合金陽極は前章の表-2・6に示したように段階的に取り付け数を増加したが、これに対応した初期の電位分布の経時変化を表-3・6に示す。陽極3個の場合では、1日後に防食電位まで陰分極したのは陽極に最も近い1箇所のみで、208日経過後で3箇所である。この場合はまだ防食電流の不足が明らかである。1年後に陽極4個を増設すると、その当日から陰分極が進み、1日後では施設本体全域において数+ mV も卑方向に変化し、48箇所中の15箇所で防食電位に達している。113日後では過半数が防食電位より卑な値に到達し、その他の箇所もほぼ防食電位に近い値を示した。1年後の測定では全域が防食状態であることを確認した。ここで当初の防食計画どおりさらに11個の陽極を増設して施設の海水中部全域を安全かつ十分な防食状態まで陰分極させた。表におけるその2日後(昭61.8.2)の測定値はほぼ-900 mV より卑な値を示している。

(2) アルミニウム陽極からの距離と電位分布

図-3・7には杭2 Aからの距離と電位分布の関係を示す。当初は杭2 Aにアルミニウム合金陽極3個を取り付けてあり、図には208日後の電位分布を示した。防食電位に達したのは約2 mまでで、それより遠い部分では約3.5 mまで分極効果が認められたが、さらに遠隔位置では腐食生成物の付着により若干貴方向へ変化していた。1年後杭1 Aおよび3 Aに各2個ずつ陽極を増加(合計7個)したので、以降は杭2 A~2 Cの列における距離と電位分布の関係を示した。1日後では約3 mまで防食電位に達し、全長にわたって分極は認められた。さらに113日後には約6 mまで、約1年後には一部で約10 m付近まで防食電位に達した。

(3) 水深方向の電位分布

図-3・8には杭2 Aにおける陰分極状況を示した。当初の陽極3個では7カ月後も陽極レベル近傍の

みが防食電位に達する程度であったが、7個に増加してさらに10カ月後の測定では水深全長にわたって十分防食電位に達し、とくに陽極取り付けレベル付近の分極は顕著であった。

表-3・5 大型供試体における電位分布状況 (単位: -mV)

基準電極 取付位置	測 定		測定年月（経過日数）									
	基準電極 位置No.	取付深度 T. P. (m)	59. 8 鉄軌	59. 8 (3hr)	59. 12 (120)	60. 2 (206)	60. 7 直後	60. 8 (1)	60. 11 (114)	61. 2 (206)	61. 6 (309)	61. 7 (365)
φ2c→φ3c	1	-2. 12	693	698	654	681	691	738	843	835	859	884
φ3c→φ3b	2	-2. 12	693	696	654	683	685	730	832	833	860	888
φ3c→φ3b	3	-2. 12	693	696	654	682	676	720	827	827	855	872
φ3b→φ2b	4	-2. 12	693	698	653	682	681	727	832	833	860	883
Γ3C→Γ3B	5	-5. 77	692	694	654	681	676	718	823	823	849	870
Γ2b→Γ2C	6	-5. 77	692	696	654	682	788	848	918	910	902	925
Γ3C→Γ3B	7	-5. 77	692	695	654	682	670	711	819	818	851	877
Γ2b→Γ3B	8	-5. 77	692	695	653	681	680	726	830	828	861	890
Γ3B→φ3C	9	±0. 00	694	697	654	681	677	718	833	833	860	875
Γ2B→φ3C	1 0	±0. 00	692	698	654	683	680	719	833	829	862	878
φ3C→Γ2C	1 1	-4. 07	693	696	654	682	687	733	833	834	861	888
φ2C→Γ2B	1 2	-4. 07	692	697	653	683	692	736	839	838	863	894
陽極発生電流（A）		陽極 No.1orNo.4	2. 15	2. 09	-	2. 70	3. 12	1. 84	1. 55	1. 64	1. 66	
		陽極 No.6	-	-	-	2. 80	2. 57	1. 74	1. 44	1. 43	1. 38	
		合計電流	2. 15	2. 09	-	5. 50	5. 69	3. 58	2. 99	3. 07	3. 04	
陰極電流密度（mA／m ² ）			31. 5	16. 0	-	80. 6	83. 4	52. 5	43. 8	45. 0	44. 6	
陽極取付個数			1 個(No. 1)				2 個(No. 4, 6)					

(4) 杭No. 2列の電位分布

図-3・9には陽極7個の場合の杭No. 2列(2A, 2B, 2C)における陰分極状態を示す。分極は1日後に比べて1年後では著しく進んでいるが、1日後、1年後とも7個の陽極に近い位置にある杭2Aの分極が杭2B、2Cに比較して著しく大きかった。

(5) 塗装杭における電位分布

図-3・10には陽極7個の場合における塗装された杭1Bおよび2Cの陰分極状態を示す。この場合

もそれぞれの杭で1年後の分極が著しく進んだが、杭A列あるいは杭2Aから等距離の位置にある杭1Bと3Bの比較では塗装（厚膜型無機ジンクリッチ+タールウレタン樹脂塗装 367 μ m）された杭1Bの方が分極が大きく卑な電位を示した。また、表-1・2に示すように杭2Cは塗装（厚膜型無機ジンクリッチ+ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料1638 μ m）されているが、陽極から遠いので分極効果は小さかった。

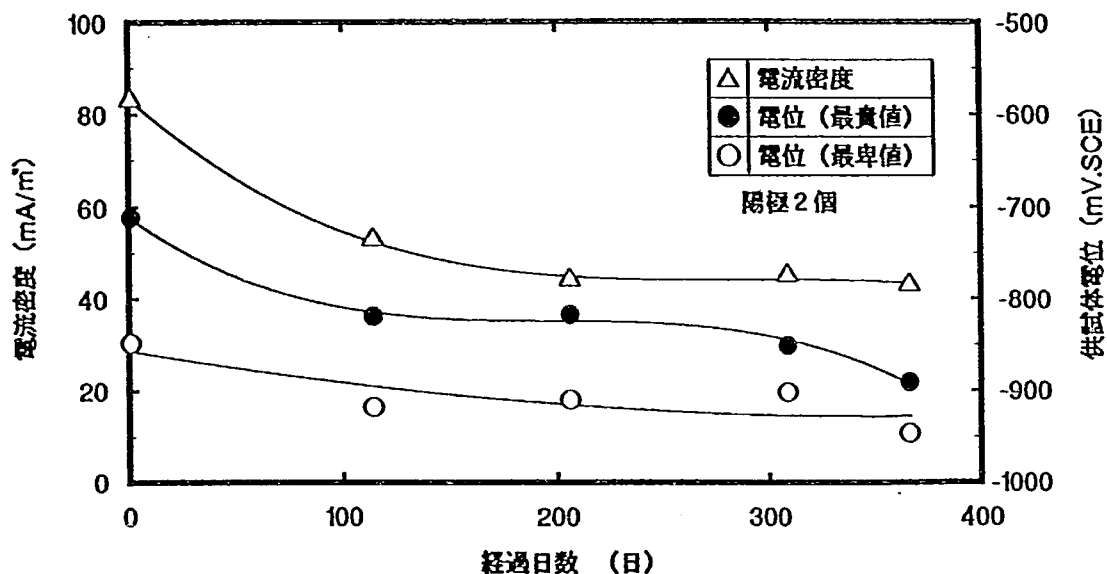


図-3・6 電流密度と電位の変化（大型供試体、駿河湾）

(6) 長期間における電位の経時変化

表-3・7～3・14には陽極18個を取付けた後の施設本体全域の電位分布を示した。測定値はすべて防食電位（-770mV, SCE）より卑な値を示し、施設本体は全域にわたって良好な防食状態であることが明らかである。施設各部の電位差も小さく、ほぼ均一に近い状態といえる。表の値を詳しくみると、いずれの杭もアルミニウム合金陽極の取り付け部付近である水深-3～5mの陰分極が最も大きい。また、塗装杭の杭1Bおよび2Cは全長がほぼ15mV以内の均一な電位分布を示し、塗装との併用は電位分布の均一化に有効なことが明らかであった。なお、表-3・10の値が前回に比較して若干貴な電位を示しているが、この理由もまた前に述べたように対象面積の増加に起因しているものと推定される。追加された部材の中には数年間裸材として暴露され、著しく発錆しているものがあり、陰分極にはかなり大きい電流密度と時間を必要とすることが考えられる。

図3-11には陽極を全数18個取付けた後のすべての杭の電位分布経時変化を示す。全体の傾向として1.5年後の電位に比較して4.5年後は陽極付近を除いて数10mV貴な値を示しているが、これは前に述べたように防食対象面積が増加したうえに測定が冬季の荒天時であったことが原因で、海象（波浪）の変化が復極要因になることを示している。その後は十分な陰分極を示している。水深-4～-5m付近で卑な値を示しているのは陽極に近いためである。これに対して杭1Bおよび杭2Cが水深方向でほぼ均一な電位分布

を示しているのは、この両杭に塗装が施工されていて陽極がないことと、塗膜が電位分布の均一化に寄与しているためと考えられる。

図-3・12には杭2Aの電位経時変化を示す。アルミニウム陽極が3個および7個までは陽極付近を除いて防食電位に達していないが、施設本体防食に必要なかつ十分な全18個を設置した後は防食電位に達し、その後も長期にわたり十分な防食電位を安定して維持している。

表-3・6 海洋施設本体の電位分布

杭No.	測 定 点			測定年月 (経過日数)								
	基準電極 位置 No.	取付深度 T. P. (m)	塗装有無 有 : ○	59. 8	59. 8 (1)	60. 2 (208)	60. 7 (360)	60. 7 (361)	60. 8 (362)	60. 11 (474)	61. 7 (726)	61. 8 (728)
1 A	8	-2. 25		687	714	697	694	920	824	837	847	939
	1 0	-4. 50		690	712	674	698	787	823	947	894	995
2 A	5	-2. 00		690	789	778	759	809	843	852	859	943
	6	-2. 25		690	718	803	779	841	860	854	864	963
	7	-6. 50		690	720	755	733	741	785	832	890	920
	9	-6. 20		687	719	765	710	739	806	825	874	915
3 A	1	±0. 00	○	688	715	695	688	756	788	816	835	930
	2	-2. 25		689	709	688	685	772	806	823	843	933
	3	-4. 50		689	705	687	685	884	943	920	918	961
	4	-6. 50		689	700	681	681	757	805	827	861	931
1 B	1 7	±0. 00	○	689	704	684	685	709	742	785	804	915
	1 8	-2. 25	○	690	703	-	685	710	741	785	804	913
	1 9	-6. 50	○	690	701	678	683	698	730	784	798	906
	2 8	-6. 20	○	686	697	677	684	700	737	795	798	906
2 B	1 4	-1. 50	○	683	704	677	680	693	819	770	784	941
	1 5	-2. 25		690	721	675	678	689	713	765	782	949
	1 6	-6. 50		690	695	668	674	681	706	747	759	898
3 B	1 1	-2. 25		688	719	-	677	690	711	765	788	944
	1 2	-4. 50		690	694	673	671	680	704	758	782	972
	1 3	-6. 50		689	709	667	667	672	693	750	778	916
1 C	2 0	-2. 00		690	698	-	675	686	713	764	780	932
	2 1	-2. 25		689	700	-	675	686	713	765	778	936
	2 2	-4. 50		689	723	672	674	683	710	756	772	1022
	2 3	-6. 50		689	693	672	673	679	710	753	772	903
2 C	2 4	±0. 00	○	-	-	672	677	692	713	762	777	914
	2 5	-2. 25	○	691	699	673	677	692	713	761	775	915
	2 6	-6. 20	○	691	697	673	677	688	708	751	770	892
3 C	2 7	-2. 25		-	-	673	677	687	703	755	771	938
	2 9	-4. 50		691	693	673	676	684	705	754	770	1024
	3 0	-6. 50		691	694	673	673	679	698	748	770	914
アルミニウム合金陽極取付け状況				3 個 No. 1 ~3			2 個 No. 4, 5	2 個 No. 6, 7			11個 No. 8 ~18	

杭No.	測 定 点			測定年月 (経過日数)								
	基準電極 位置 No.	取付深度 T. P. (m)	塗装有無 有:○	59. 8	59. 8 (1)	60. 2 (208)	60. 7 (360)	60. 7 (361)	60. 8 (362)	60. 11 (474)	61. 7 (726)	61. 8 (728)
3A→2A	3 1	-2. 20		691	724	723	698	759	798	829	841	930
2A→1A	3 2	-2. 00		688	724	710	704	765	804	833	847	931
3B→2B	3 3	-2. 00		689	699	674	677	688	711	763	778	925
2B→1B	3 4	-2. 00		688	703	683	683	703	734	781	794	925
1B→1C	3 7	-2. 00		689	700	672	678	694	722	771	784	920
1A→1B	3 8	-2. 00		689	708	672	686	731	763	806	818	917
2C→2B	3 9	-2. 00		690	700	673	673	685	709	757	777	924
3C→3B	4 1	-2. 00		691	697	-	675	685	704	763	774	929
3B→3A	4 2	-2. 00		691	705	674	681	726	758	815	810	906
2B→2A	4 0	±0. 00	○	686	720	683	694	728	756	789	806	936
	3 5	-2. 25		688	740	727	710	750	783	816	824	933
	3 6	-4. 50		689	849	845	805	840	886	884	879	930
2B→2C	4 3	-6. 20		687	690	674	670	683	707	755	773	903
2C→3B	4 4	-6. 20		689	693	673	677	759	711	759	771	900
3A→2B	4 5	-6. 20		691	701	683	677	712	739	794	879	910
2A→3B	4 6	-6. 20		690	699	673	665	676	703	764	783	859
2A→2B	4 7	-6. 20		689	712	674	687	704	734	783	828	924
2A→1B	4 8	-6. 20		690	722	673	693	721	757	799	819	913
アルミニウム合金陽極取付け状況				3 個 No. 1 ~3			2 個 No. 4, 5	2 個 No. 6, 7			11個 No. 8 ~18	

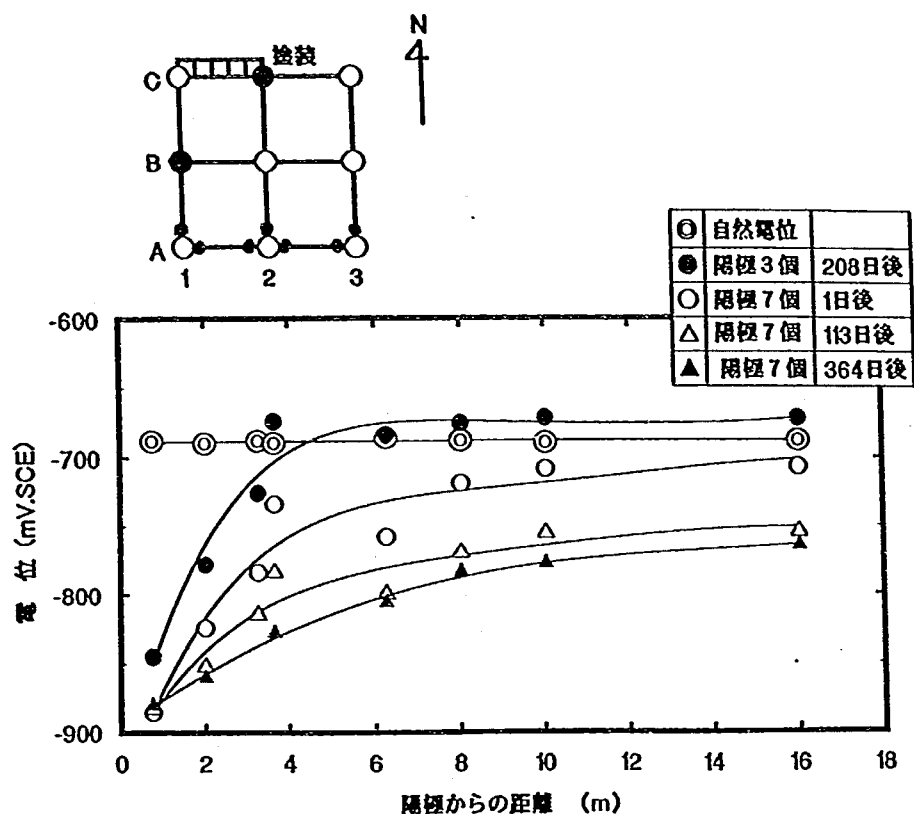


図-3・7 施設本体の電位分布（駿河湾）

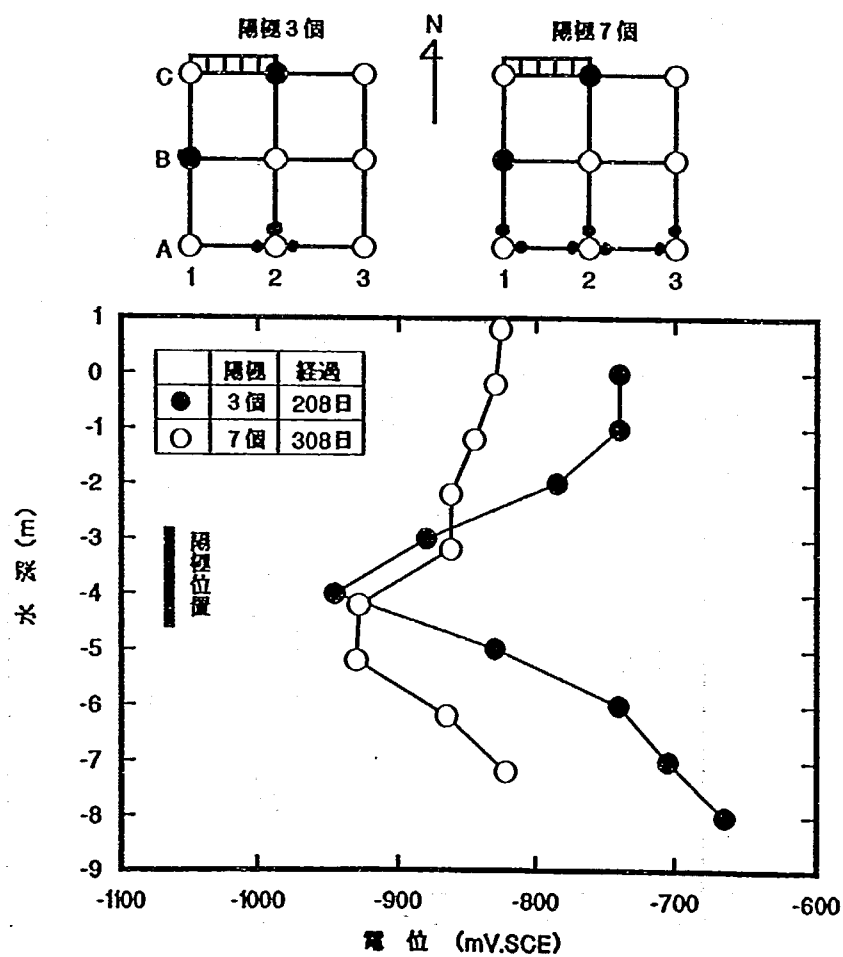


図-3・8 杭2 Aにおける水深方向電位経時変化

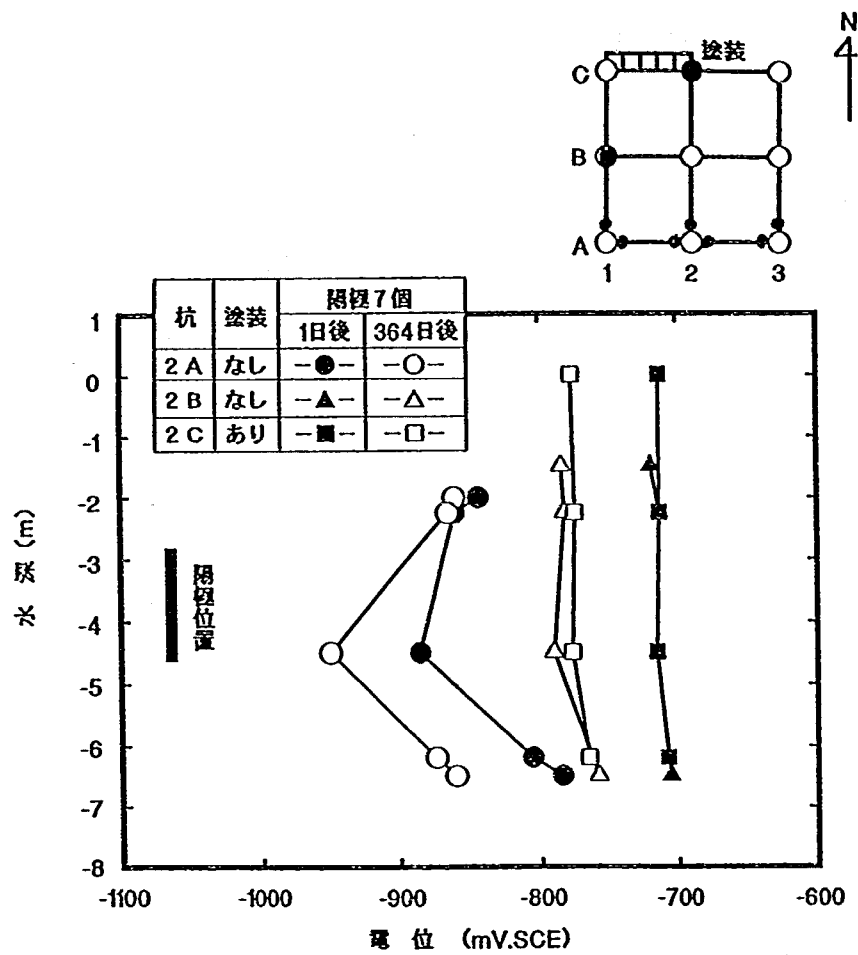


図-3・9 杭2列における陰分極状況

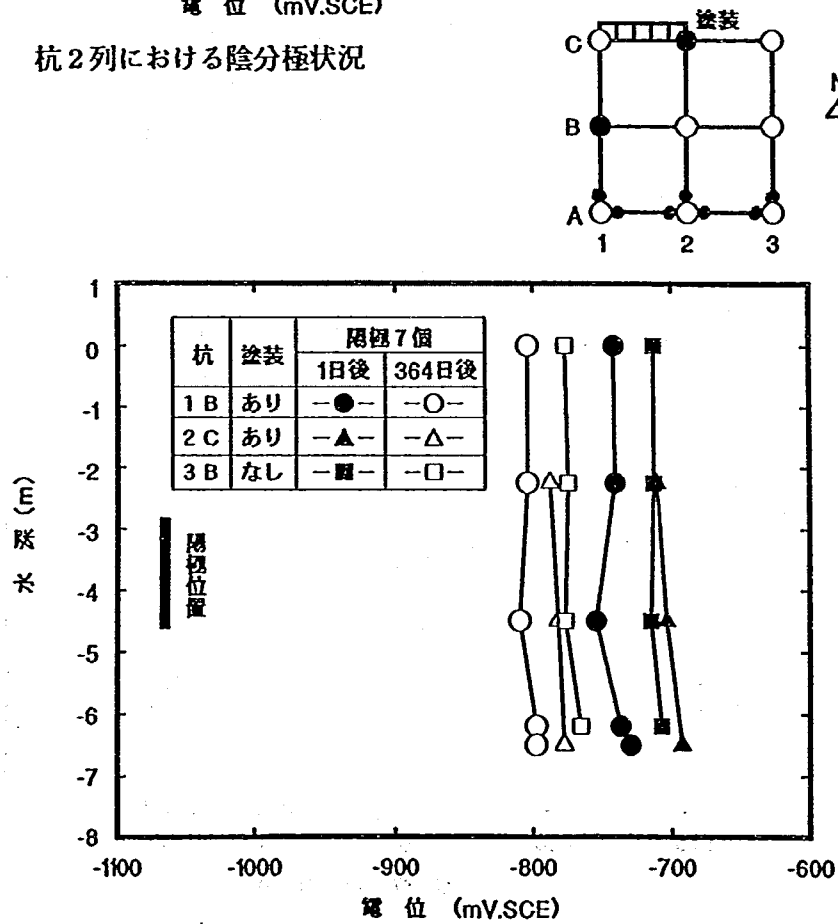


図-3・10 塗装された杭の分極状況

表-3・7 施設本体各部の電位分布(1年5ヵ月後)測定: S62.12.17 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	
±0	974	975	974	971	970	979	974	
-1	974	975	974	970	980	980	974	
-2	976	976	977	971	986	984	976	
-3	979	979	979	971	998	1000	980	
-4	981	982	980	968	1010	1015	980	
-5	983	973	968	967	1006	1000	976	
-6	977	967	964	964	977	973	970	
-7	971	961	963	962	968	969	967	
-8	-	959	-	-	-	-	965	
海底	-	-	-	-	-	-	-	

表-3・8 施設本体各部の電位分布(2年8ヵ月後)測定: H1.3.8 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	2 C
±0	974	969	975	967	972	973	973	966
-1	975	970	976	967	972	974	975	966
-2	976	972	977	967	980	979	979	965
-3	979	980	981	967	1009	993	994	964
-4	987	989	988	966	1015	999	1005	962
-5	987	978	990	964	992	985	998	960
-6	981	967	981	964	962	969	971	956
-7	975	959	970	963	950	959	964	955
-8	969	957	966	962	-	957	961	953
海底	-	-	966	-	-	955	-	954

表-3・9 施設本体各部の電位分布(3年1ヵ月後)測定：H1.8.24 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	2 C
±0	948	967	964	958	952	963	960	945
-1	948	967	964	958	956	966	963	942
-2	950	968	966	958	970	972	969	944
-3	953	970	970	958	999	993	984	947
-4	976	971	983	957	1030	1019	995	946
-5	995	968	1010	955	996	994	986	945
-6	961	963	986	955	958	968	965	944
-7	945	956	974	955	945	960	960	944
-8	941	952	—	950	942	955	950	944
海底	—	953	—	947	—	—	—	—

表-3・10 施設本体各部の電位分布(4年6ヵ月後)測定：H3.1.25 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	2 C	3 C
±0	905	913	914	900	912	914	907	894	901
-1	905	913	915	900	918	916	909	894	903
-2	906	914	919	900	918	925	916	893	908
-3	909	916	927	898	950	955	942	897	930
-4	920	920	970	896	1020	1010	950	890	956
-5	918	912	983	894	1010	940	932	887	958
-6	901	903	930	892	925	912	906	884	910
-7	889	896	905	888	890	900	895	884	891
-8	886	889	910	888	881	895	891	884	891
-9	—	—	989	—	—	—	—	883	—
海底	877	885	894	885	881	890	889	882	891

表-3・11 施設本体各部の電位分布(5年1ヵ月後)測定: H3.8.2 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	2 C	3 C
±0	955	954	953	972	958	957	954	946	—
-1	955	955	953	973	960	960	954	947	—
-2	953	960	955	972	967	966	957	946	—
-3	951	962	959	972	978	973	966	945	—
-4	951	964	975	972	983	1003	974	944	—
-5	950	967	967	972	974	976	972	942	—
-6	949	951	965	971	954	957	950	940	—
-7	948	946	950	970	943	948	944	939	—
-8	947	945	946	969	940	944	943	938	—
-9	—	—	945	—	940	944	943	938	—
海底	946	944	944	968	940	943	943	938	—

表-3・12 施設本体各部の電位分布(6年1ヵ月後)測定: H4.7.31 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	2 C	3 C
±0	952	965	960	953	966	963	960	950	—
-1	952	965	958	952	970	961	960	950	—
-2	958	966	955	953	990	974	962	949	—
-3	968	972	950	952	1005	999	995	947	—
-4	975	977	955	956	1025	1013	994	951	—
-5	970	971	961	955	1017	998	978	950	—
-6	961	965	966	956	988	970	967	944	—
-7	955	956	955	953	970	958	961	941	—
-8	948	950	955	951	966	952	961	946	—
-9	—	950	—	—	—	—	958	—	—
海底	950	950	955	951	965	951	958	945	—

表-3・13 施設本体各部の電位分布(7年5ヵ月後)測定: H5.11.19 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	2 C	3 C
± 0	9 2 8	9 3 6	9 3 1	9 3 3	9 4 2	9 3 7	9 4 0	9 1 8	9 2 1
- 1	9 2 8	9 3 8	9 3 0	9 3 3	9 4 3	9 4 1	9 4 2	9 1 6	9 3 5
- 2	9 2 7	9 4 2	9 3 0	9 3 2	9 5 5	9 4 9	9 4 9	9 1 4	9 4 1
- 3	9 2 6	9 5 1	9 2 8	9 3 2	9 8 7	9 6 3	9 7 6	9 1 4	9 5 8
- 4	9 2 4	9 6 2	9 2 6	9 3 0	1 0 2 4	9 9 0	9 9 9	9 1 2	9 9 3
- 5	9 2 3	9 2 9	9 2 3	9 2 8	9 7 2	9 5 9	9 7 1	9 1 1	9 6 6
- 6	9 2 7	9 2 7	9 2 1	9 2 6	9 4 5	9 4 2	9 6 2	9 0 8	9 3 8
- 7	9 2 9	9 2 7	9 1 8	9 2 2	9 2 8	9 2 4	9 3 8	9 0 8	9 2 5
- 8	9 2 9	9 1 7	9 1 6	9 2 0	9 2 2	9 2 1	9 2 6	9 0 4	9 2 1
- 9	9 2 9	-	-	-	9 1 7	9 2 1	9 2 4	9 0 2	-
海底	-	-	-	-	-	-	-	9 0 2	-

表-3・14 施設本体各部の電位分布(8年1ヵ月後)測定: H6.8.2 (-mV, SCE)

水深(m)	1 A	2 A	3 A	1 B	2 B	3 B	1 C	2 C	3 C
± 0	9 4 2	9 4 7	9 4 5	9 4 5	9 5 5	9 5 3	9 5 3	9 4 4	9 5 1
- 1	9 4 2	9 4 8	9 4 4	9 4 4	9 5 7	9 5 5	9 5 3	9 4 4	9 5 2
- 2	9 4 1	9 4 7	9 4 3	9 4 4	9 6 8	9 6 2	9 6 0	9 4 4	9 5 6
- 3	9 4 0	9 4 9	9 4 2	9 4 3	9 8 3	9 7 9	9 6 9	9 4 4	9 6 7
- 4	9 3 9	9 4 7	9 4 0	9 4 2	1 0 0 2	9 9 2	9 9 8	9 4 3	9 9 8
- 5	9 3 7	9 4 3	9 3 7	9 4 0	9 8 7	9 8 6	9 8 3	9 4 2	9 7 2
- 6	9 3 6	9 3 8	9 3 4	9 3 9	9 5 8	9 5 5	9 4 9	9 4 1	9 5 1
- 7	9 3 5	9 3 4	9 3 1	9 3 8	9 4 2	9 4 2	9 4 3	9 4 0	9 4 1
- 8	9 3 5	9 3 1	9 2 7	9 3 7	9 3 6	9 3 8	9 4 0	9 3 6	9 4 0
- 9	9 3 6	-	-	9 3 5	9 3 3	-	-	9 3 6	9 3 9
海底	-	-	-	-	-	-	-	-	-

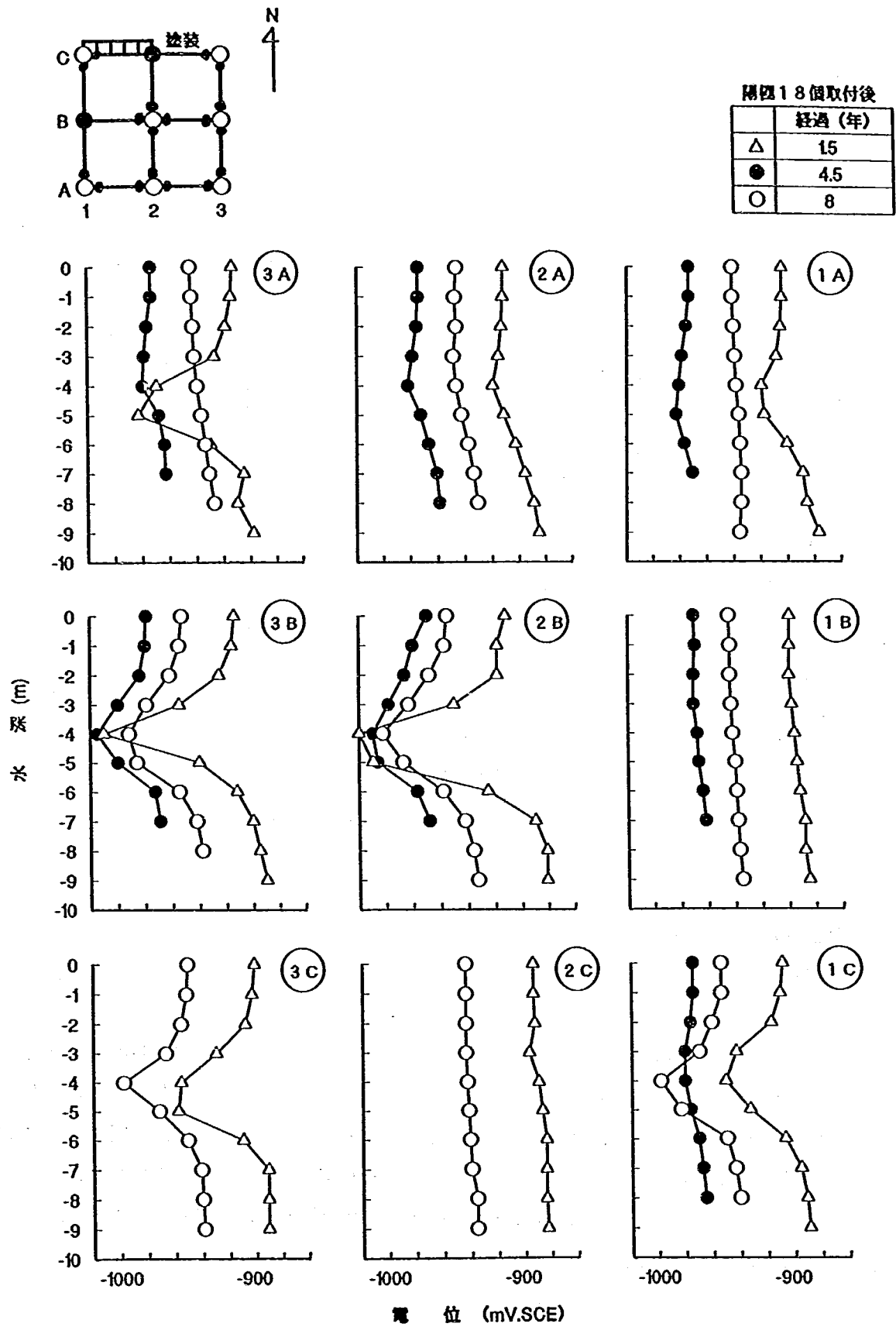


図-3・11 施設本体の各抗の電位経時変化

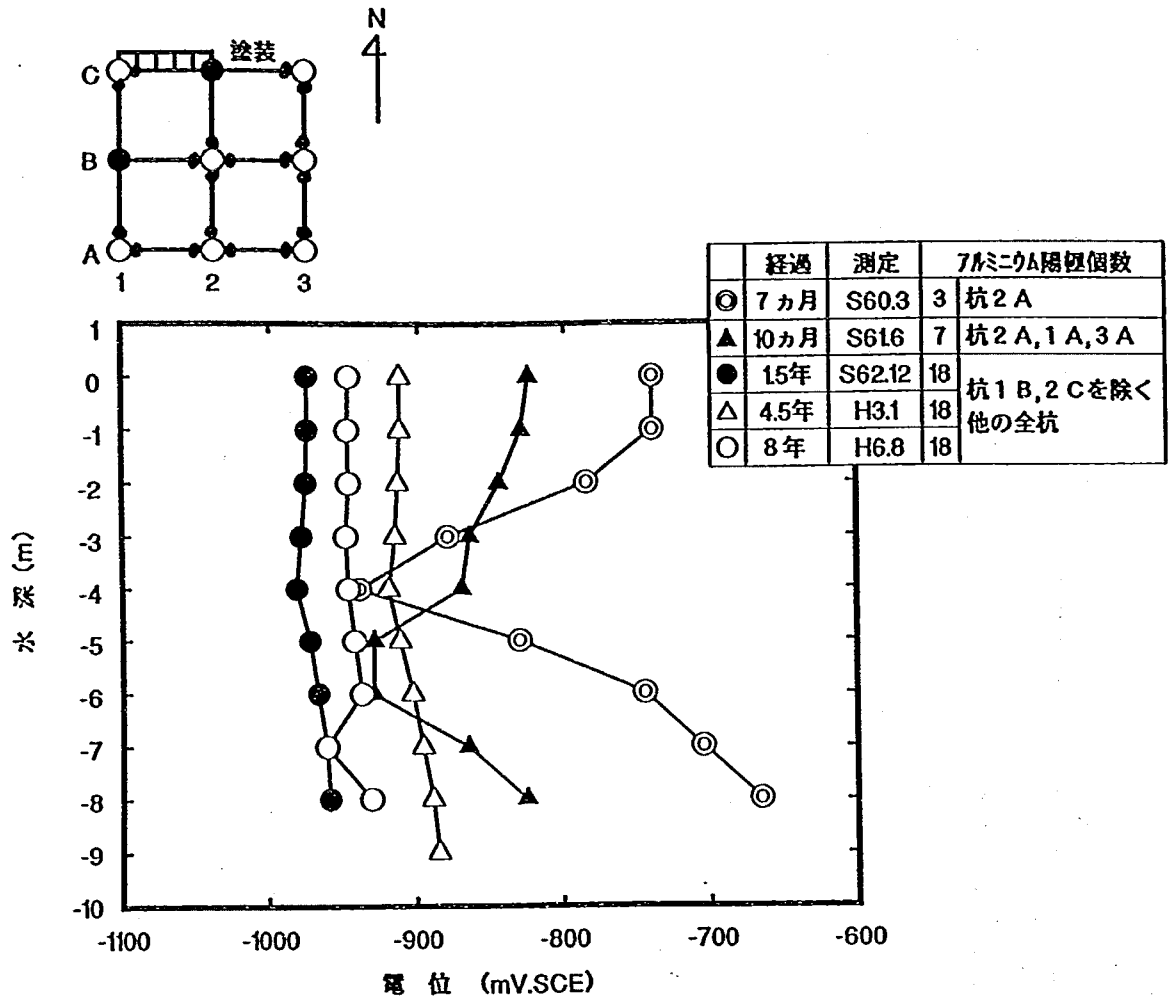


図-3・12 杭2 Aの電位経時変化

3. 6 亜鉛基準電極電位の安定性

施設本体に取付けてある48個の亜鉛基準電極の電位変化を測定した。亜鉛基準電極の位置は前出の図-2・14に示した。測定は飽和カロメル基準電極をダイバーによって至近距離に近づけて行った。取付け直後と約1年後の値を図-3・13に示した。取付け直後に $-1030 \sim -1040 \text{ mV}$ を示したものが、1年後には -1050 前後とやや卑方向へ変わり、若干のバラツキを示している。図-3・14には長期継続している各水深合計16個の2年4ヵ月間の変化を示した。約300日経過後には $-1050 \sim -1060 \text{ mV}$ でほぼ安定し、取付け部位、水深に関係なく大体 20 mV 位の範囲におさまっている。図-3・15にはさらに長期継続した2個の4年11ヵ月間の経時変化を示した。亜鉛基準電極の電位は -1050 mV 程度の値で安定しており、実際の海洋構造物において十分使用できるものと考えられる。

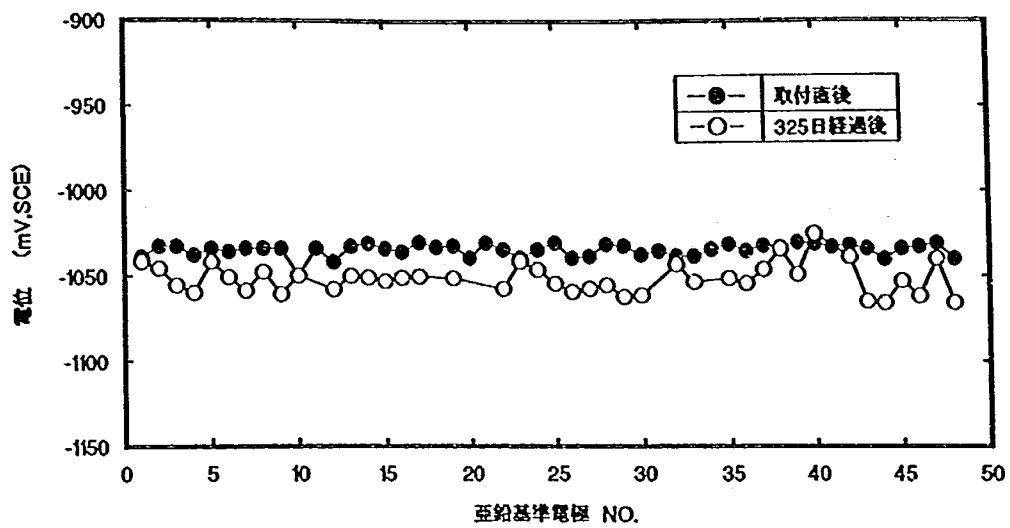


図-3・13 施設本体における亜鉛基準電極の電位経時変化(1)(駿河湾)

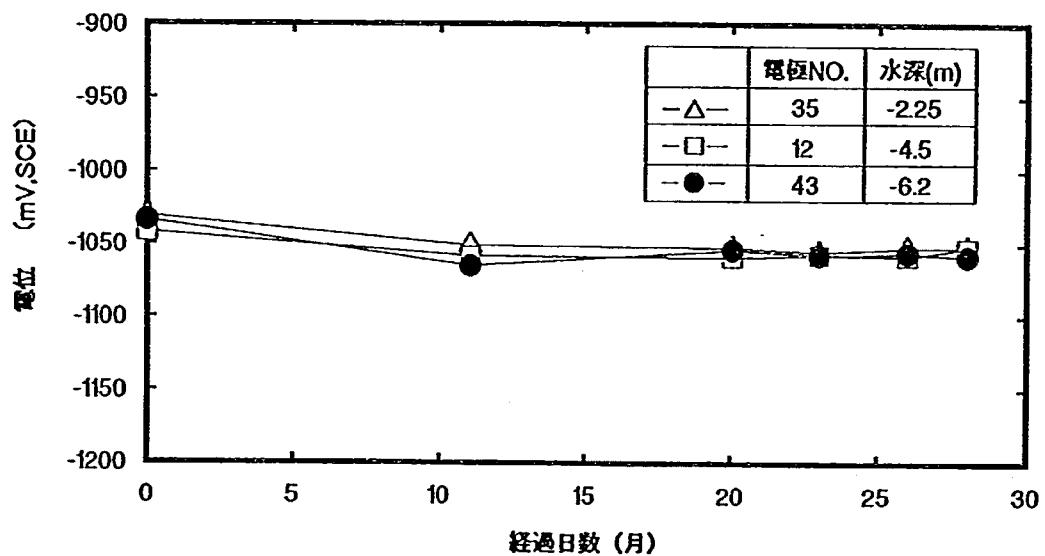


図-3・14 施設本体における亜鉛基準電極の電位経時変化(2)(2年4ヵ月、駿河湾)

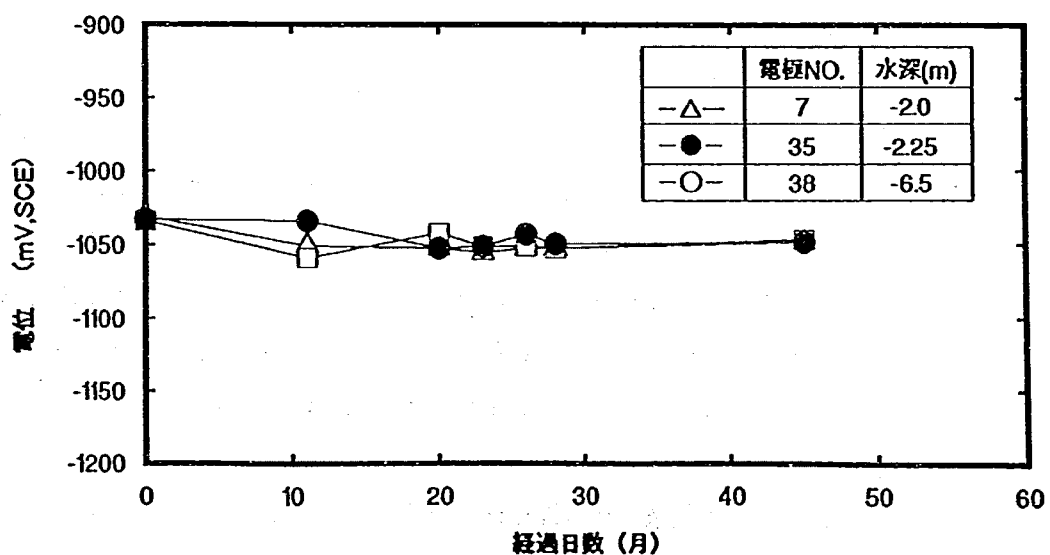


図-3・15 施設本体における亜鉛基準電極の電位経時変化(3)(4年11ヵ月、駿河湾)

3. 7 電気防食と塗装の併用における最適塗装系の選定

3. 7. 1 塗装系と陰極電流密度

図-3・16にはスクラッチを有する各塗装片における陰極電流密度を防食下地の比較で示す。電位は当初の2年間は亜鉛陽極による電気防食で $-1030 \sim -1080 \text{ mV(SCE)}$ の範囲にあった。その後の8年間は試験施設本体と接続されて防食されたので、 $-920 \sim -980 \text{ mV}$ の範囲にあった。

各塗装系とも通電直後には、スクラッチ部に電流が流入するため、電流密度がやや大きい、その後2年経過時までは、電流密度が 1.5 mA/m^2 以下でとくに塗装系による差は僅かであった。

しかし、防食下地のない系は若干電流密度が大きい傾向がみられた。

また、タールエポキシよりGFPの方が若干電流密度が大きいのは、スクラッチ部の鋼材露出面積に関係しているものと思われる。

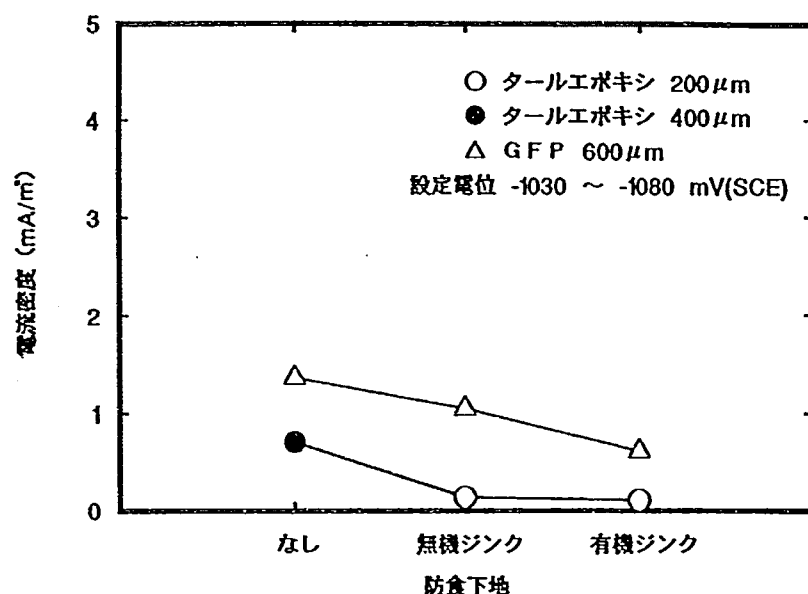


図-3・16 防食下地と電流密度

また、防食下地の無機ジंकと有機ジंकによる差は明瞭でなかった。

3. 7. 2 外観観察

浸漬開始2年経過後の外観を図-3・17、10年経過後の外観を図-3・18に示す。全試料とも貝や藻類が全面に1~2cmの厚みで付着しているため、これを除去し、水洗後ウェスで水分を拭き取って調べた。図-3・19には付着生物除去後の状況を示す。

表-3・15に2年経過後および10年経過後の回収試験片の塗装系と塗膜外観の概要を示す。スクラッチ部のさびについてはタールエポキシ、GFPのいずれの場合も防食下地の影響が明確でなかった。また、スクラッチに沿うふくれについては、上塗りがタールエポキシの場合、2年経過後、10年経過後とも認められたものがあつたが、GFPについては、いずれの経過年数の場合もふくれは認められなかった。一般部については、タールエポキシ上塗りの場合、その膜厚が $200 \mu\text{m}$ であつたため、ジंकリッチペイントの下地があつても10年後の一部にふくれが認められる場合があつた。GFPでは一般部に塗膜の異常は認められず、良好な状態であつた。なお、10年後の引上げ試験片の種類は現地の施設本体の制約により限定された。

以上の結果から、電気防食併用の塗装系の防食性は外部からの衝撃等により、著しい塗膜の欠損がなければ10年経過しても良好であることが認められた。

表-3・15 塗装系と塗膜外観（電気防食併用）

上塗り	防食下地	な し		有機ゾウリハイト		無機ゾウリハイト	
	浸漬期間	2年	10年	2年	10年	2年	10年
タールエポキシ 樹脂塗料	スラッシュ部	異常なし	ふくれ小数	ふくれ小数	—	異常なし	ふくれ小数
	一般部	— (a) —	— (a') —	— (b) —	—	— (c) —	— (c') —
GFP	スラッシュ部	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	—
	一般部	— (d) —	— (d') —	— (e) —	— (e') —	— (f) —	—

注) () 内の記号は図-3・19の写真の記号

試験片の膜厚は表-2・2参照

有機ジンク

+

タールエポキシ(200 μ m)

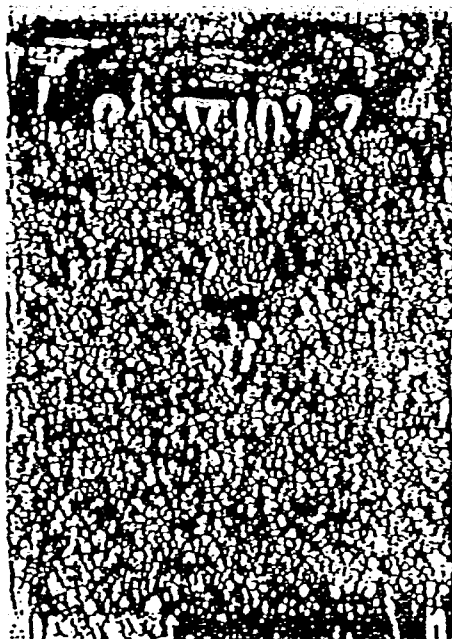


図-3・17 生物付着状況（2年経過後）

無機ジンク

+

タールエポキシ(200 μ m)

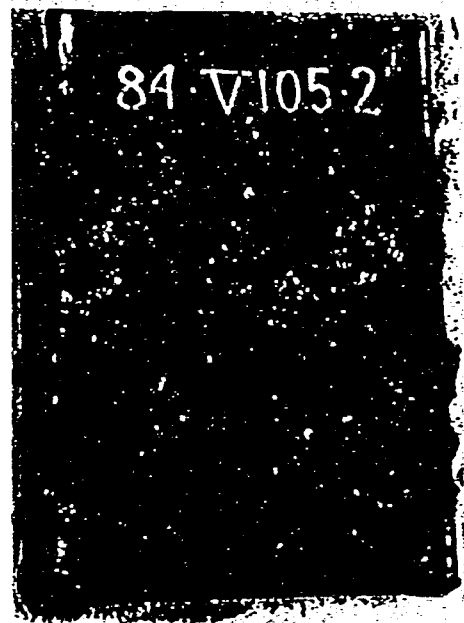
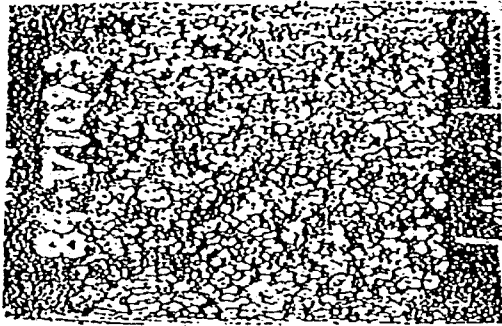
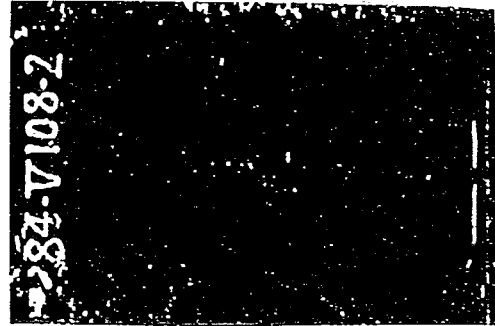


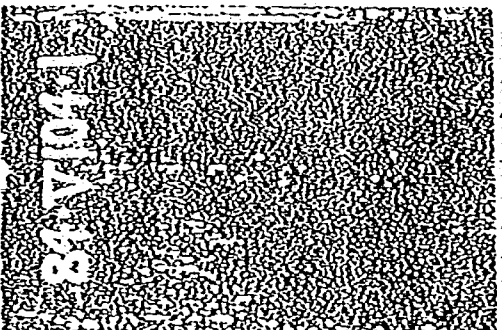
図-3・18 生物付着状況（10年経過後）



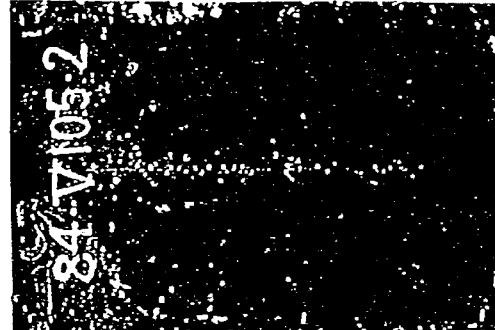
(a)下地なし - タ-ルイキ(400 μ m)



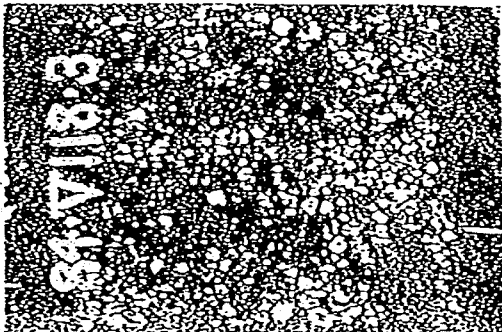
(a')下地なし - タ-ルイキ(400 μ m)



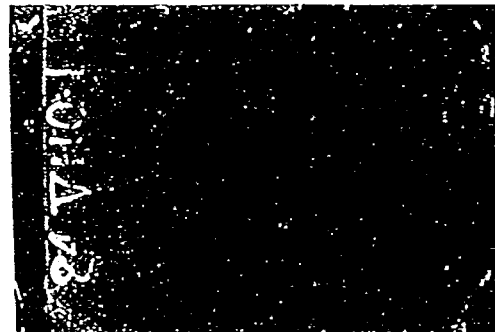
(c)無機ジंक - タ-ルイキ(200 μ m)



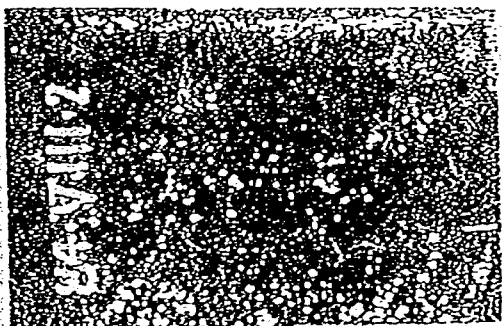
(c')無機ジंक - タ-ルイキ(200 μ m)



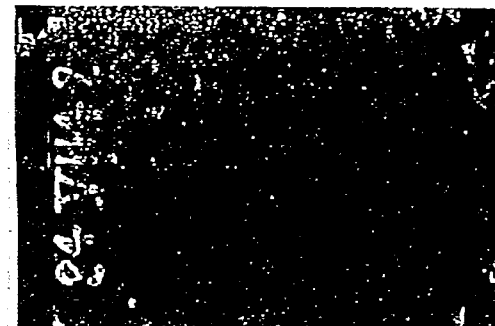
(d)無機ジंक - GFP(600 μ m)



(d')下地なし - GFP(600 μ m)



(e)下地なし - GFP(600 μ m)



(e')有機ジंक - GFP(600 μ m)

2年海中浸漬

10年海中浸漬

図-3・19 生物付着状況(10年経過後、電気防食併用)

3. 8 電気防食と塗装の併用における塗膜損傷率と陰極電流密度

3. 8. 1 塗膜損傷率と陰極電流密度

各種塗装系の120日および725日後の塗膜損傷率と電流密度の関係を図-3・20に示す。

試験期間中、各試験片の電位は-1010~-1070mV(SCE)の範囲にあった。一般に防食下地のある系は、ない系に比べて電流密度が小さく、防食下地の効果が認められるが、無機ジンクリッチペイントと有機ジンクリッチペイントの差は明確でなかった。また、スクラッチ部を除けば防食下地の有無にかかわらず120日後より725日後の方が電流密度が大きい傾向がある。120日後においては、塗膜損傷率と電流密度の間に相関が認められ、725日でも、とくに防食下地のある系で、塗り残し面積2.2%の試験片を除けば相関が認められた。

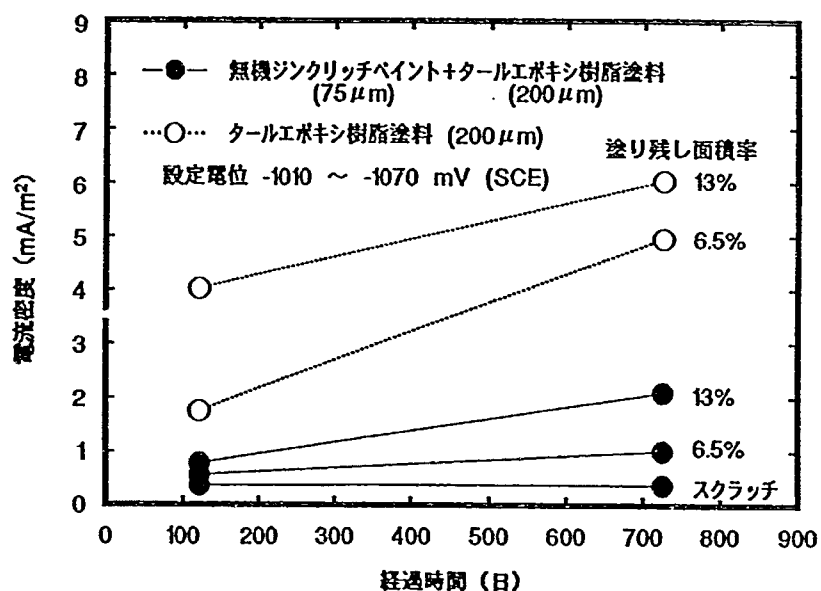


図-3・20 塗り残し面積率と電流密度

3. 8. 2 外観観察

防食下地/塗膜損傷率と塗膜外観を表-3・16、表-3・17および図-3・21に示す。表-3・16の2年経過後の場合、防食下地なしの系はいずれの損傷部にもふくれが認められ、また、一般部にもかなりのふくれが認められたのに対し、防食下地ありの系では、ふくれの発生は損傷部周辺のみで一般部は異常なく、防食下地の効果が明らかである。しかし、防食下地の種類による差は明瞭でない。

10年経過後の場合、試験片は無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料の塗装系で、スクラッチのみと6.5%損傷の場合に限られたが、一般部ではいずれも異常なく、損傷部に少数のふくれが認められた。

表-3・16 防食下地/塗膜損傷率と塗膜外観(電気防食併用)

2年後

防食下地	損傷率	(スクラッチのみ)	2.2%	6.5%	13%
なし	損傷部	ふくれ 多数	ふくれ 少数	ふくれ 少数	ふくれ 多数
	一般部	ふくれ 少数	ふくれ 少数	異常なし	ふくれ 少数
有機ゾウ	損傷部	ふくれ 少数	ふくれ 多数	異常なし	異常なし
	一般部	異常なし	異常なし	(g)	(h)
無機ゾウ	損傷部	ふくれ 少数	ふくれ 多数	ふくれ 少数	ふくれ 少数
	一般部	(i)	(j)	(k)	(l)
	一般部	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

注) () 内の記号は図-3・21の写真の記号

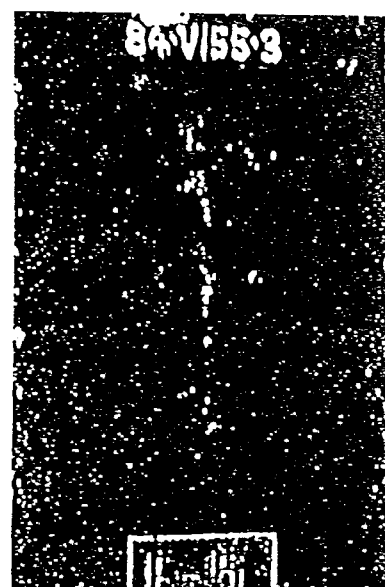
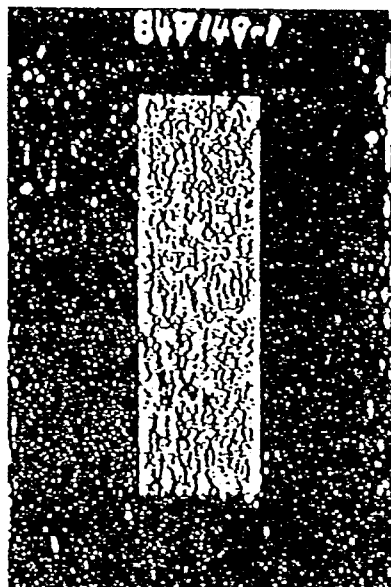
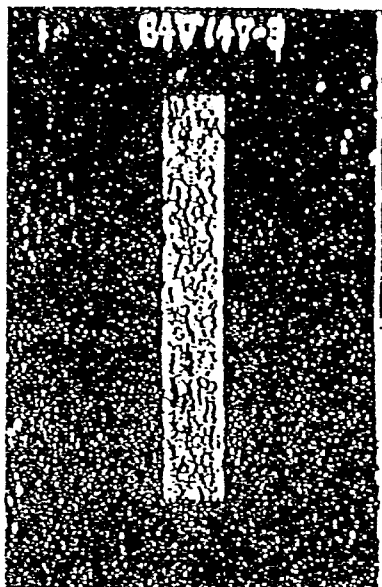
試験片の膜厚は表-2・2参照

表-3・17 防食下地/塗膜損傷率と塗膜外観(電気防食併用)

防食下地	損傷率	(スクラッチのみ)		6.5%	
	経過年数	2年	10年	2年	10年
無機ゾウ	損傷部	ふくれ 少数	ふくれ 少数	ふくれ 少数	ふくれ 少数
	一般部	(i)	(n)	(k)	(n)
	一般部	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

注) () 内の記号は図-3・21の写真の記号

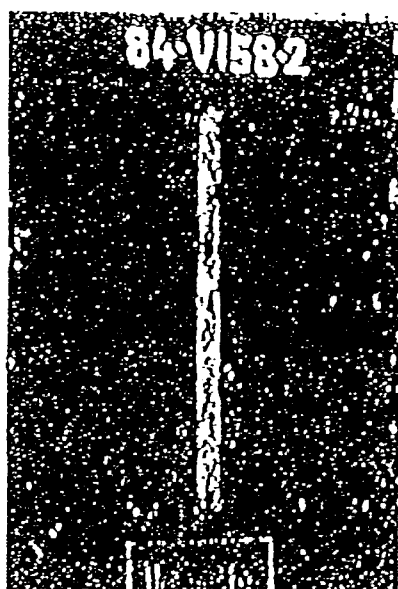
試験片の膜厚は表-2・2参照



(g)有機ジソク+タールIホ°キシ(200 μ m)
6.5%(30W)

(h)有機ジソク+タールIホ°キシ(200 μ m)
13%(60W)

(i)無機ジソク+タールIホ°キシ(200 μ m)
スクラッチ

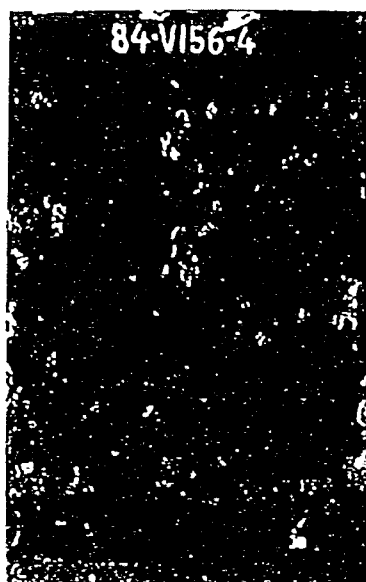


(j)無機ジソク+タールIホ°キシ(200 μ m)
2.2%(10W)

(k)無機ジソク+タールIホ°キシ(200 μ m)
6.5%(30W)

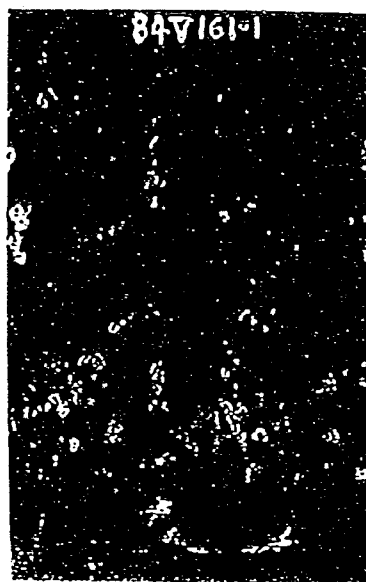
(l)無機ジソク+タールIホ°キシ(200 μ m)
13%(60W)

図-3・21 (1) 付着生物除去後の試験片の状態 (2年後)



(m) 有機ゾンク + ターナルキ(200 μ m)

スクラッチ



(n) 有機ゾンク + ターナルキ(200 μ m)

6.5%(30W)

図-3・21(2) 附着生物除去後の試験片の状態

3. 8. 3 塗膜抵抗

10年経過後の各種塗装系の試験片の一般部を対象に測定した塗膜インピーダンスを図-3・22に示す。

いずれの場合も10年経過後の試験片で $10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上の高い抵抗を示し、健全であることが認められた。塗膜抵抗値は塗膜厚の大きい程大きく膜厚依存の傾向を示した。しかし、防食下地の有無および防食下地の種類による影響は明確でなかった。

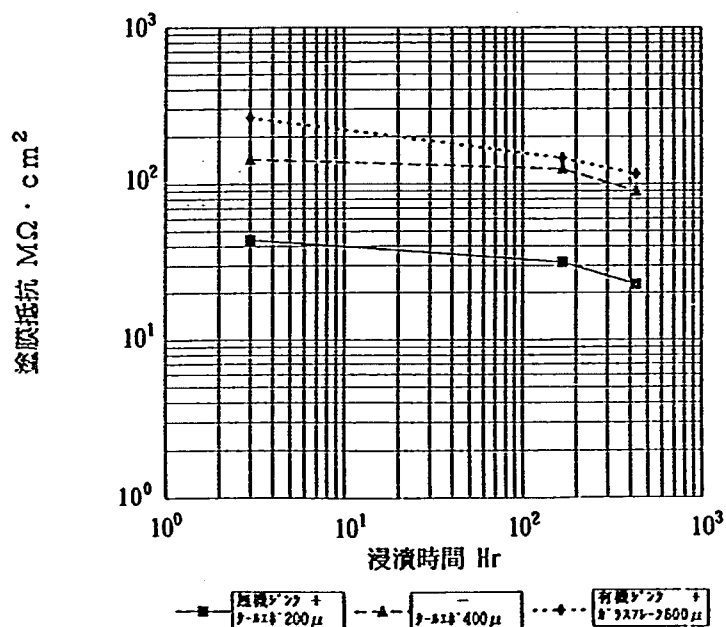


図-3・22 塗膜抵抗の経時変化(10年後回収片)

4. 10年間の研究成果の総括

海洋構造物は一般に過酷な腐食環境において長期耐用が要求されている。しかも構造物は近年ますます大型化し、多種類の用途に応じて形状が複雑化している。これらの構造物の腐食対策として海水中の鋼材に対する電位防食の適用は必要不可欠であるが、電気防食設計技術は海域の波浪、潮流、干満、水温などの海象条件や、構造物の形状、規模などに適応できるものでなければならない。一方、電気防食は塗装と併用することによって電位分布の改善や経済的な優位性が期待できると言われている。駿河湾では鋼管杭を用いた形状の複雑な構造物を対象に海象条件の変化に対応する電気防食設計技術を求めて各種の試験を実施した。

この駿河湾における研究は、一般海域を代表する試験環境として選定した静岡県大井川の河口沖合において実施され10年を経過した。内容としては、小型板状試験片、鋼管を組み合わせた大型供試体、海洋試験施設本体などの裸鋼および塗装鋼を対象に防食電流密度および陰極電位分布を詳細に求めた。また、アルミニウム合金陽極の挙動および亜鉛基準電極の信頼性についても同時に調査した。その結果、この駿河湾の実海域における各種電気防食試験は数多くの成果を得た。それらはすでに完了していた実験室試験を実地に立証することになり、従来の電気防食指針を多面的に充実し、その改訂に寄与することができるものと考えられる。

4. 1 裸鋼に対する防食電流密度

裸鋼に対しては初期に防食電位 (-770mV, SCE) に達する電流密度は 100mA/m^2 よりやや大きい値で、 100mA/m^2 の電流では防食電位に達するまでに数カ月を要した。このように初期に電流密度が小さい場合は、時間の経過とともに電位が貴方向に移行し、この時期は腐食が進行しているものと考えられる。一方、初期に防食電位に達する電流密度で通電すれば、その後はさらに卑方向への分極がすすみ、しかも電流は低減する。今回は1年経過頃からは陰分極が十分にすすみ、1.5年後には電流密度は約 50mA/m^2 に低減した。

なお、初期に電流低減が小さいのは、この試験場が内湾に比較して常時波浪があり、陰分極がすすみにくいことに起因しているものと考えられる。図-4・1には大型供試体における電流密度と電位の経時変化を示す。

以上のような電流密度に依存する陰分極の状況は防食効果すなわち防食率に反映し、環境条件に見合った電流密度の適用が重要であることが確認された。裸鋼に対する電気防食試験の結果をまとめると、比較的静穏な内湾では現行の防食指針の防食電流密度で十分防食が達成されるが、一般に海象条件の厳しい外洋性海域においては、波浪や漂砂を原因とする復極性に対応して、初期から防食電位を維持するために初期に大きい電流密度を印加することが効果的で、防食電流密度は設計値として $120\sim 150\text{mA/m}^2$ 程度が必要と考えられる。しかし、その効果として1年経過以降は当初の約 $1/2$ 程度に低下する。

4. 2 陰極電位分布

電気防食の設計では防食電流密度の選定が重要であるが、その目的とするところは対象が防食電位以下に維持されることと、防食対象施設が全域にわたりできるだけ均等な電位分布を得ることである。外洋性一般海域の代表である駿河湾の海洋試験施設本体は裸鋼管と塗装鋼管とから成り、複雑な構成形態の構造物とい

える。試験は裸の鋼管杭と補強鋼管材の各部位における電位の経時変化について調査を行った。電気防食は現行指針に基づくアルミニウム合金陽極による流電陽極方式によった。

(1) 裸鋼における陰極電位分布

海洋試験施設本体における電位測定は、平面的には15m×15m、深さの方向には約8mにわたる立体的水域に対してアルミニウム合金陽極を段階的に増設してその都度実施し、アルミニウム合金陽極からの距離と電位と経時時間との関係を求めた。

当初、1本の杭に3個のアルミニウム合金陽極を取り付けた場合は、防食電位に達したのは約2mまでであったが、1年後、2本の杭に2個ずつ計4個増加して合計7個とすると、全長にわたって陰分極が認められ、1日後には約3mまで、約4ヵ月後には約6mまで、さらに1年後には10m近くまで防食電位に達した。

図-4・2には海洋試験施設本体における電位分布の状況を示す。このほか、水深方向では陽極を取付けた水深付近の陰分極が大きいこと、塗装杭は全長にわたって電位分布が均一なことなどが判明した。その後は試験施設全域の防食に必要な合計18個の陽極の配置で、施設全体としては全域が-900mV以下の良好な防食状態を維持している。これは現行の電気防食指針の設計法に基づいて算出された陽極所要数で、海象条件の変化や防食対象面積の若干の変化にも対応しており、現行指針の信頼性が実海域において十分立証されたものと考えられる。

(2) 塗装鋼における陰極電位分布

この海洋試験施設は直立鋼管杭9本で支える構造となっており、この鋼管杭の水中部分が電気防食の対象であるが、そのうち2本には塗装が施されている。電位分布測定の結果では、塗装鋼管杭の水深方向の全長にわたって電位分布の均一化が確認された。また、陽極から等距離にある場合は、塗装鋼の方が裸鋼より陰分極が大きく、卑な電位を示した。これは塗装と電気防食の併用が、海洋鋼構造物の電位分布改善に極めて有効なことと、防食電流節減に有利であることを明らかに示しているものといえる。

4. 3 アルミニウム合金陽極の特性

海洋試験施設本体に対する電気防食では、1個あたり初期発生電流3.0A、設計耐用寿命15年のアルミニウム合金陽極が段階的に取り付け個数を増加する方法で適用された。アルミニウム合金陽極の特性調査としては陽極発生電流値の経時的測定および10年後の陽極消耗量の推定と残余寿命の算出を行った。

(1) アルミニウム合金陽極の発生電流量

適正な防食設計数量より少ない陽極個数で開始した当初は陽極1個の負担が過重で、著しく大きい発生電流が計測されたが、徐々に陽極を増加するにともない発生電流は妥当な値に近づき、陰極側の分極が進むとともにさらに低減し、外洋性の流動条件でも1年後に計画値の2/3、1.5年後に1/2、2年後には1/3程度を示した。図-4・3にはアルミニウム陽極の発生電流経時変化を示す。一般に陽極からの発生電流は陰極の分極状況の影響を受けるので、初期にはやや変動が大きいのが次第に安定する。

(2) アルミニウム合金陽極の消耗量

海洋試験施設本体の電気防食に適用したアルミニウム合金陽極の消耗量を現行指針の測定方法により求めた。すなわち水中において潜水士により所定の部分の残存寸法を計測した。所定の算式に基づいて得られた消耗量は10年経過で56～68%であった。また、前項の平均発生電流値から残存寿命を算出すると6～9年となった。陽極の設置位置で異なるが設計耐用より1～5年の延長が推定され、気象、海象の変動の大きい外洋性環境ではあったが十分に安全な防食設計であることが立証された。

4. 4 亜鉛基準電極の信頼性

電気防食を適用した海洋鋼構造物ではその防食効果を確認するためのモニタリング用として亜鉛基準電極を直接取付ける方法が採用されている。水深を変えた3箇所の亜鉛基準電極の自然電位の経時変化を5年間追跡した結果、安定性と再現性の良好なことが確認できた。外洋性の一般海域において実用条件に十分適用できる信頼性があるといえる。

4. 5 塗装併用における最適塗装系

電気防食と塗装の併用において、供試した塗装系は防食下地として有機および無機ジンククリッチペイントの有無、防食塗料としてタールエポキシ樹脂およびガラスフレーク入りポリエステル樹脂のいずれかで、膜厚を数種類変え、予めスクラッチを付与した。これに当初2年間は亜鉛合金陽極による電気防食（ $-1030 \sim -1080 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ ）を、その後は試験施設本体との接続による電気防食（ $-920 \sim -980 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ ）を併用した。試験片に流入した防食電流密度は当初の2年間では $1.5 \text{ mA}/\text{m}^2$ 以下でガラスフレーク入りポリエステル樹脂の方が大きく、また、両塗装系とも防食下地のない場合が多かった。外観的にはタールエポキシ樹脂の場合のみ防食下地の有無に関わらずスクラッチに沿って若干のふくれが認められた。

また、10年経過後に回収された試験片の健全部のインピーダンス測定では $10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上の良好な値が確認された。

以上のように、10年後でも外部からの衝撃などによる著しい塗膜損傷がなければ、これらの現行指針推奨塗装系は電気防食との併用に十分適性のあることが立証された。

4. 6 塗膜損傷に対する陰極電流密度

電気防食と塗装の併用において、供試した塗装系は前項と同じ防食下地の有無、防食塗料はタールエポキシ樹脂（ $200 \mu\text{m}$ ）で、塗膜損傷としては、予めスクラッチおよび塗り残し面積率で2.2、6.5、13%を付与した。これに前項と同じ電気防食を併用した。試験片に流入した陰極電流密度は、当初の4ヵ月後では塗膜損傷率との間に相関性が認められ、損傷率が大きいほど電流密度が大きかったが、2年経過後では生物付着等の影響で相関性が失われた。図-4・4には塗り残し面積率と電流密度の関係を示す。防食下地は陰極電流密度の増大の抑制と損傷部周辺のふくれ発生の抑制に有効であった。しかし、無機系と有機系の差は明確でなかった。

以上の結果から長期間にわたり塗装と電気防食を併用する場合は、塗膜の劣化や予期せぬ浮遊物との衝突によって生じる塗膜の損傷等を予め考慮し、安全のために損傷率に応じた防食電流密度を選定すべきことが明らかとなった。

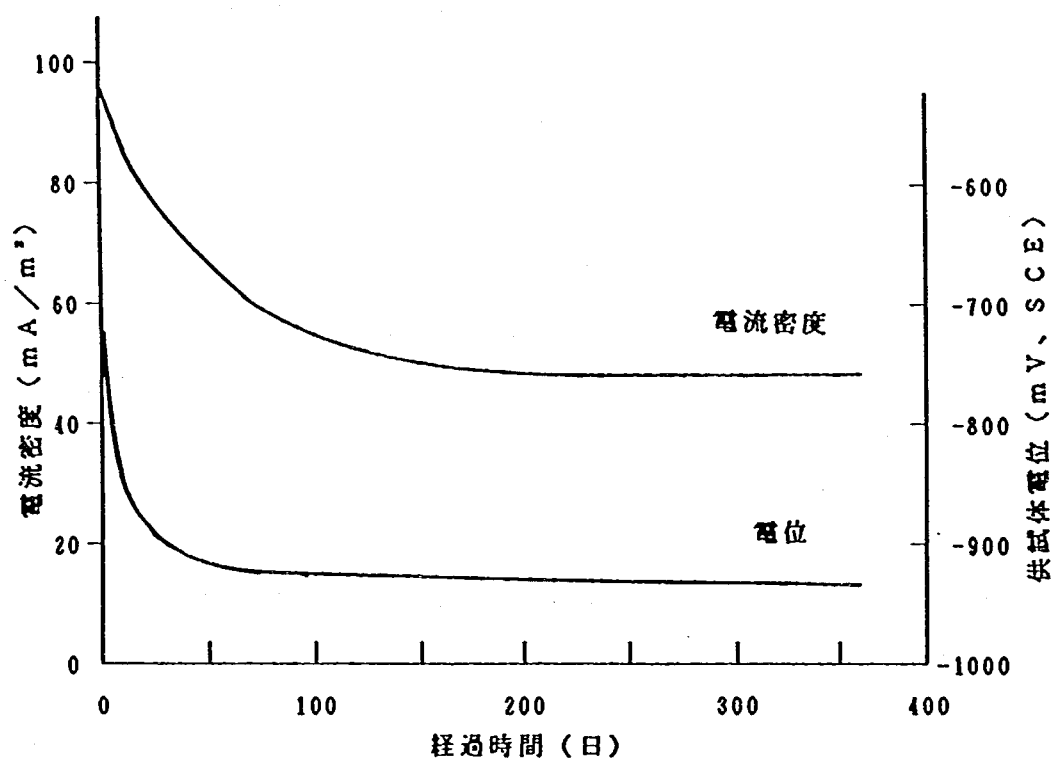


図-4・1 電流密度と電位の変化（駿河湾、大型供試体）

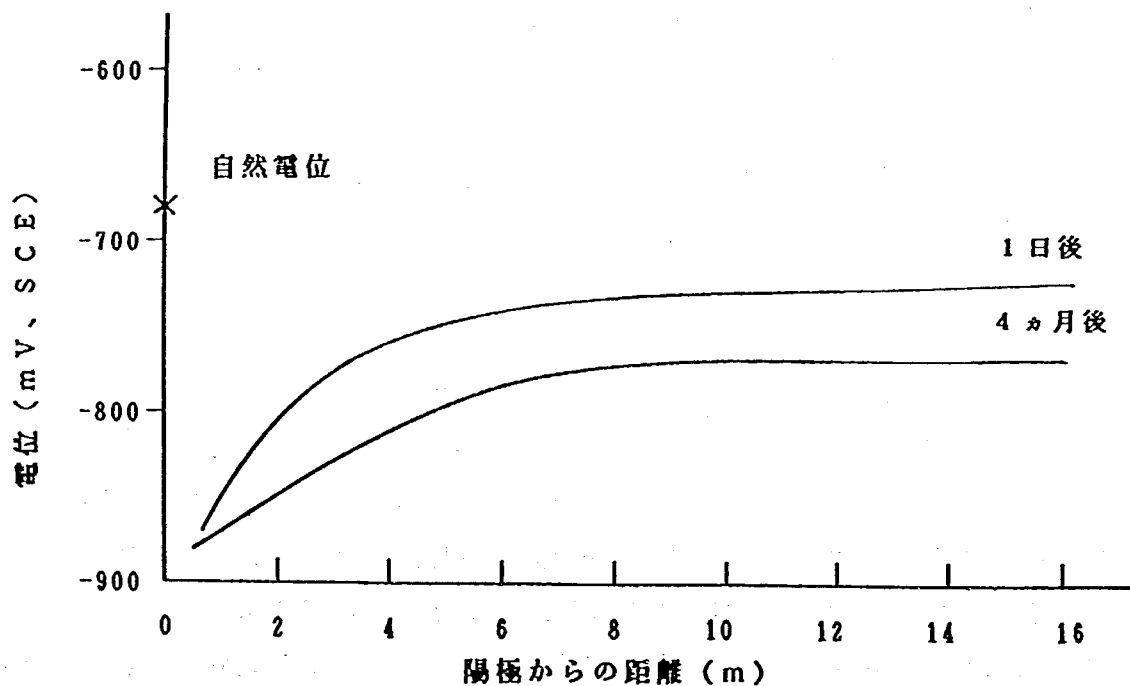


図-4・2 施設本体の電位分布（駿河湾）

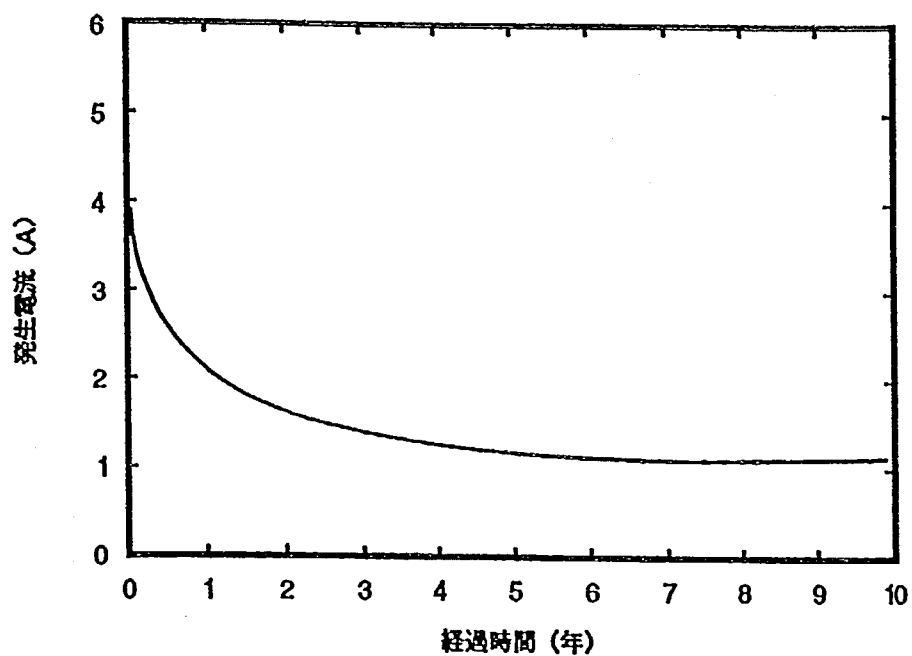


図-4・3 アルミニウム合金陽極発生電流経時変化

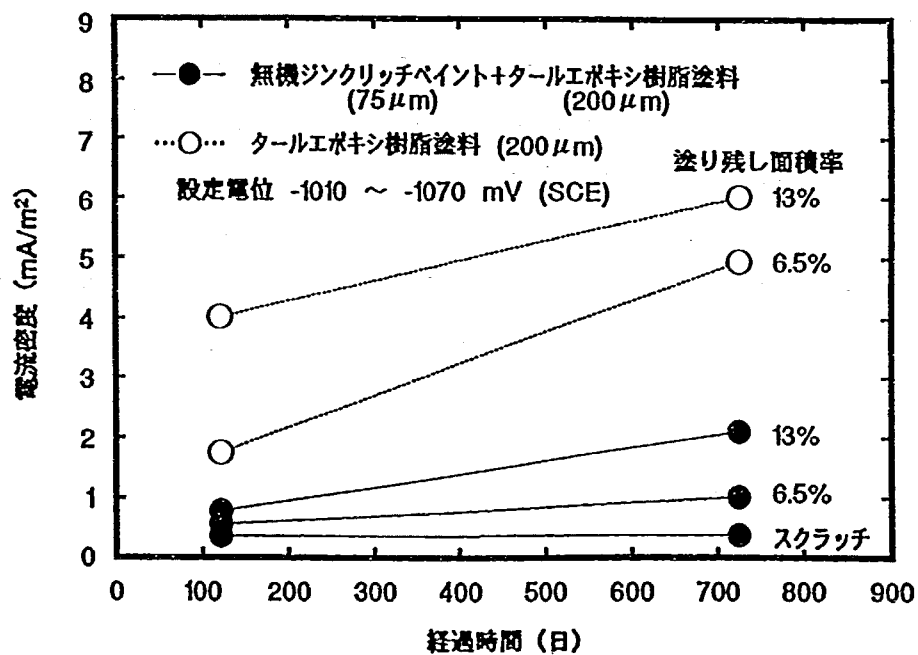


図-4・4 塗残り面積率と電流密度 (駿河湾)

Ⅲ．潮流海域における電気防食試験

流速環境下で使用する鋼材は、沿岸の静穏な海域における構造物に比較して流速や波浪によってより大きな歪みを生じるといわれている。このような条件では鋼材の腐食はより大きくなることが考えられる。また、これに対する電気防食では鋼材表面における復極性の増大や、さびの生成・剥離などから大きい防食電流密度を必要とすることが予想される。今回はこれらの検証を行うとともに電気防食条件を求めることを目的とした。

1. 試験項目

潮流海域で電気防食を行う場合、標準海域に比較して大きな電流密度を必要とすることは実験室試験で確認されている。しかし実海域では常時同じ流速があるわけではなく、流速は常に変化し、また潮止りもある。実海域での試験は数例あるがデータも少ないので、電気防食の設計上必要なデータを得るために、以下の試験を実施した。

- 1) 潮流環境における裸鋼材の定電位防食試験
- 2) 潮流環境における塗装鋼材の定電位防食試験
- 3) 潮流環境応力付加条件下における裸鋼材の定電位防食試験

2. 試験場所

潮流海域での試験は、本州四国連絡橋公団の御協力を得て、図-2・1に示す大鳴門橋の4P、海上作業足場を使用し、電気防食試験を実施した。

試験場所付近は、毎日2回の南流と2回の北流があり、潮流の強い所は大鳴門（孫崎～中瀬間）の下流といわれている。¹⁾しかし、試験を実施した場所は4P部の作業台で、ここでの潮流は最強時でも1.5m/sec程度で、多柱基礎の影響で常時乱流が発生している場所である。流速計による測定結果では試験開始直後の流速は最大0.8m/secで、最小は0.1m/secであった。ただし、試験場所の潮流は多柱基礎の影響で潮止りでも乱流が認められていた。また、試験完了時の流速も最大=0.9m/sec、最小=0.1m/secで開始時と殆ど変わらない値であった。海水の水質は、表-2・1に示す如く清浄で標準的といえる。¹⁾

¹⁾ 海上保安庁：潮汐表

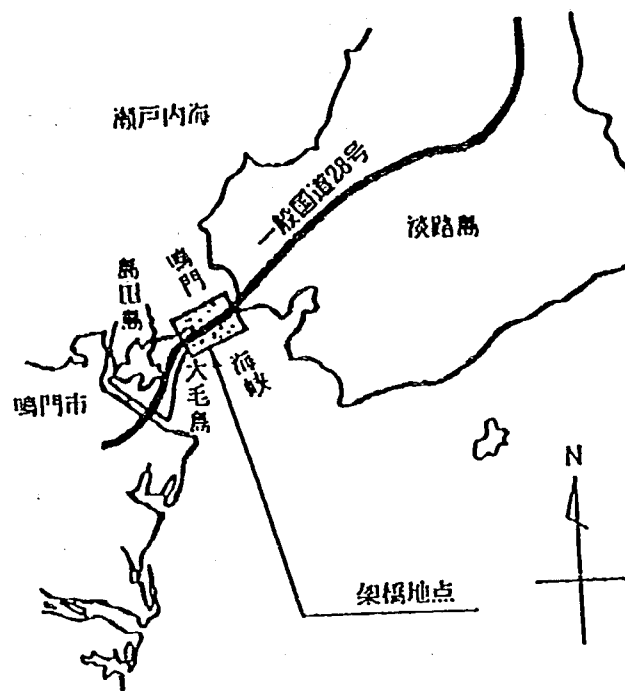


図-2・1 電気防食試験場所

表-2.1 大鳴門橋4Pの試験場所付近の水質調査結果

測定項目	測定値	備考	標準海水 (参考)
pH	8.0		8~8.2
海水の抵抗率 ($\Omega\text{-cm}$)	22.4	25℃換算値	20~25
溶存酸素 (PPm)	7.2		7~8
塩素イオン (PPm)	19,000		18,900
硫酸イオン (PPm)	3,110		2,600
酸化還元電位 (mV)	+408		
アンモニウムイオン (PPm)	0.09		
硝酸イオン (PPm)	0.40		
化学的酸素要求量 (PPm)	1.0		
硫酸塩還元菌菌体数 (MPN/m)	検出されず		検出されず

注) 採水条件: S. 61. 2. 11、-3.0mより採水
水質測定時の水温: 19℃

3. 供試体および設置位置

3. 1 供試体

供試体は、流速による応力の影響を受ける構造のものと応力を受けない構造のものを使用し、潮流環境中に浸漬した。応力の影響を受けない供試体は短いパイプ状のものとした。応力の影響を受ける供試体は、長いパイプ形状とし、パイプ下端側面の4方向にひれ状の鋼板を取付けた。また、強制的に応力を付加する供試体と比較する目的で同一寸法でひれ状の鋼板を取付けない供試体も準備し、それぞれの供試体には歪みゲージを取付け、発生応力の計測を行った。

3. 1. 1 応力の影響を受ける供試体

潮流環境中に設置し、流速によって発生する応力を受けやすい構造とする目的で長いパイプ形状とした。

供試体は配管用炭素鋼管〔JIS G-3452 (SGP)〕65A、外径 76.3mm、長さ2500mmで表面積は 0.6㎡である。この供試体は強制的に応力を付加するものと付加しない供試体の2種類とし、応力を強制的に付加する供試体には絶縁フランジの下端に4枚のひれ（鋼板：P-150×150）を取付けた。供試体は裸面とし電気防食を適用した。供試体および電気防食用陽極の取付要領を図-3・1に示す。

3. 1. 2 応力の影響を受けない供試体

潮流環境中に設置するが潮流による応力を人工的に付加しない供試体の形状・寸法を図-3・2に示す。

供試体は配管用炭素鋼管〔JIS G-3452 (SGP)〕80A、外径 89.1mm長さ400mmで表面積は 0.1㎡とした。

この供試体は裸鋼管の供試体と塗装を施したものの2種類とし、それぞれの供試体に電気防食を適用した。

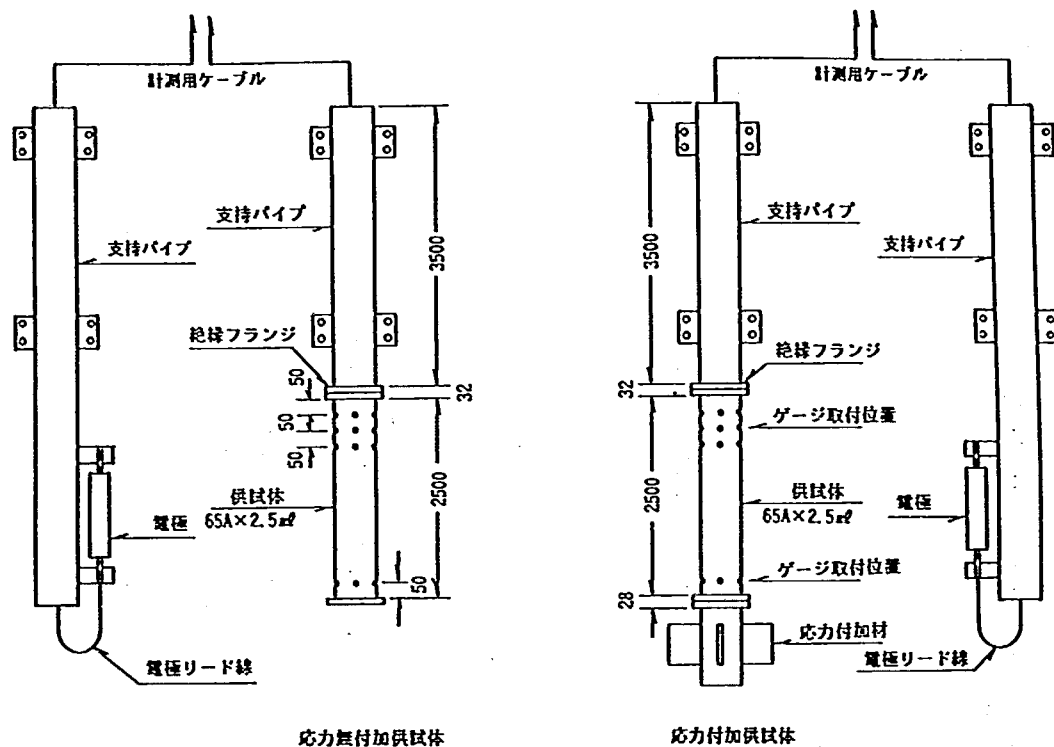


図-3・1 応力の影響を受ける供試体の概要

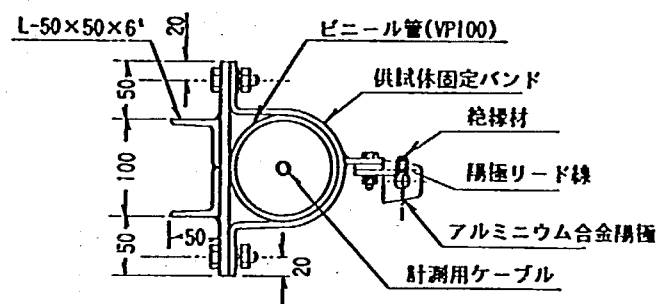
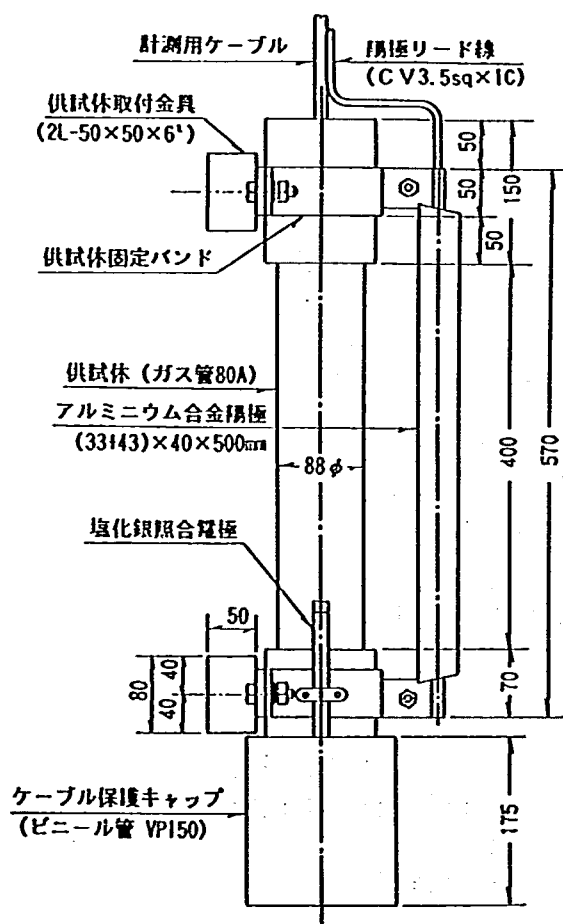
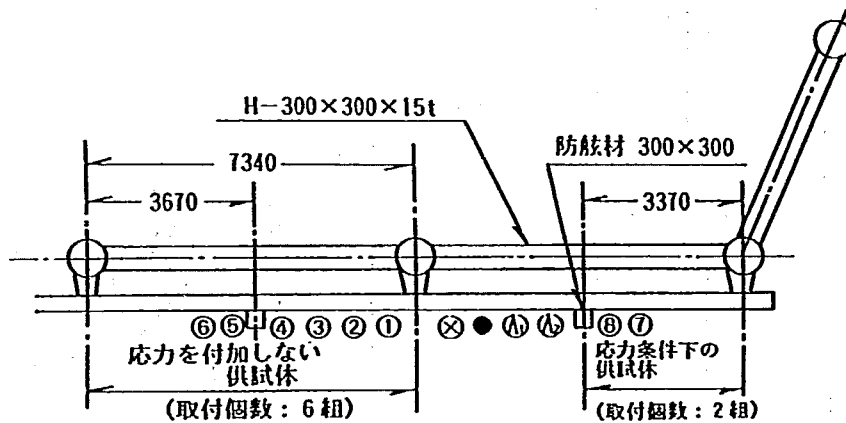
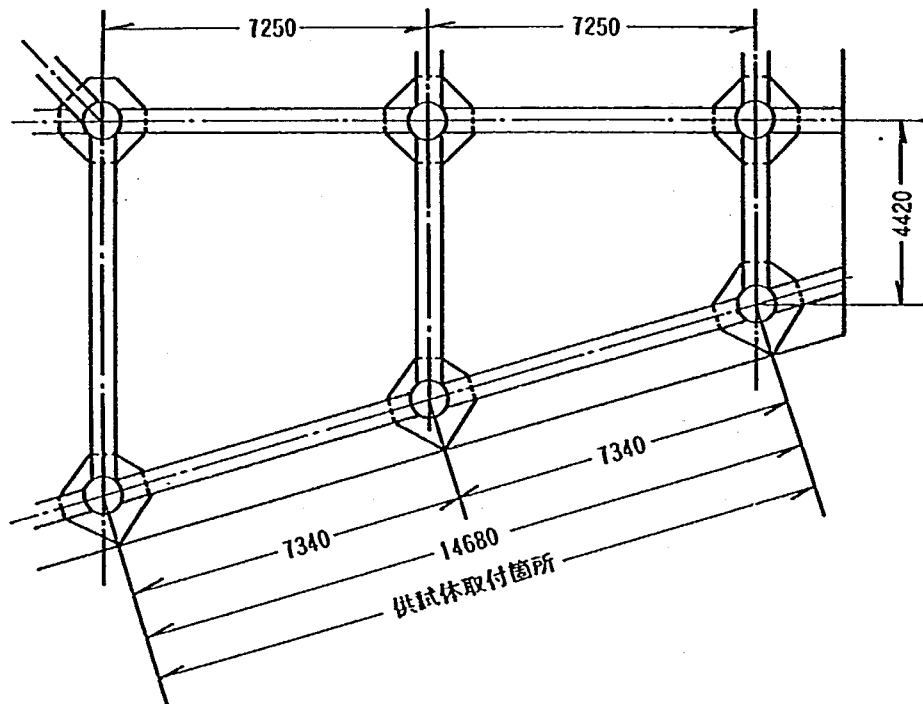


図-3・2 応力の影響を受けない供試体の概要

3. 2 供試体設置位置

供試体は大鳴門橋4P作業架台前面に設置した。その設置位置を図-3・3に示す。



- A₁ : 供試体No.7 用陽極
 A₂ : 供試体No.8 用陽極
 ● : 流速計
 ⊗ : 流向流速計

図-3・3 供試体設置位置

4. 試験条件

潮流環境における試験は、内湾の静穏な海域または比較的流動性の小さい条件に対して外洋の沿岸流あるいは沖合での潮流条件を模擬するものである。各供試体の試験条件を表-4・1に示す。

表-4・1 各供試体の試験条件

NO.	寸法 (mm)	溶接	応力付加	歪み	塗装系			電気防食 読値V(Ag/Ag)
					環境	塗装	劣化率(%)	
1	SGA 80A 外径 89.1 長さ 400	0.1			サト ブラスト	厚膜型ゾウリツチハント (75 μ m) + ターミナル保護塗料 (200 μ m)	0	-900
2							13	
3							6.5	
4							2.2	
5					裸			-900
6								-800
7	SGA 65A	0.6	付加	計測	歪みゲージ			-900
8	外径 76.3 長さ 2500							

4.1 応力付加

潮流環境中に設置される長尺パイプ形状の供試体は、そのままでも潮流による応力を受けるが、より大きい応力を強制的に受けるように鋼板をひれ状に取付けた供試体を用意し、これらの比較試験を行った。応力を強制的に受ける構造の供試体をここでは応力付加の供試体と呼ぶことにした。

応力付加の供試体は下端に4枚の鋼板を直交するように配置し取付けられているので、水流を妨げる方法で歪みが生じるよう配慮している。応力は歪みゲージによる測定とし、図-3・1に示す位置に歪みゲージを張り付けた。この供試体の内面は歪みゲージの絶縁を保つため密閉構造とした。

歪みゲージの取付数は上端部に3段(a, b, c)4方向の12点、下端部には1段(d)4方向の4点である。歪み測定は、試験開始時と終了時を主とし、数回行った。

歪み測定結果は 5~20Kg・m の曲げモーメントを示し、変動が大きく、流速との間に顕著な相関を見出せなかったが、これは不規則な乱流状態を推測させるものであった。至近距離にある多柱基礎の作業棧橋や岩礁、狭い海峡における潮位・潮流の変化などが影響しているものと考えられる。”

2) 応用計測工業(株) 大鳴門橋電気防食試験 高潮流下における波浪試験のうち
応力測定(1次・2次) 報告書 昭和61年7月

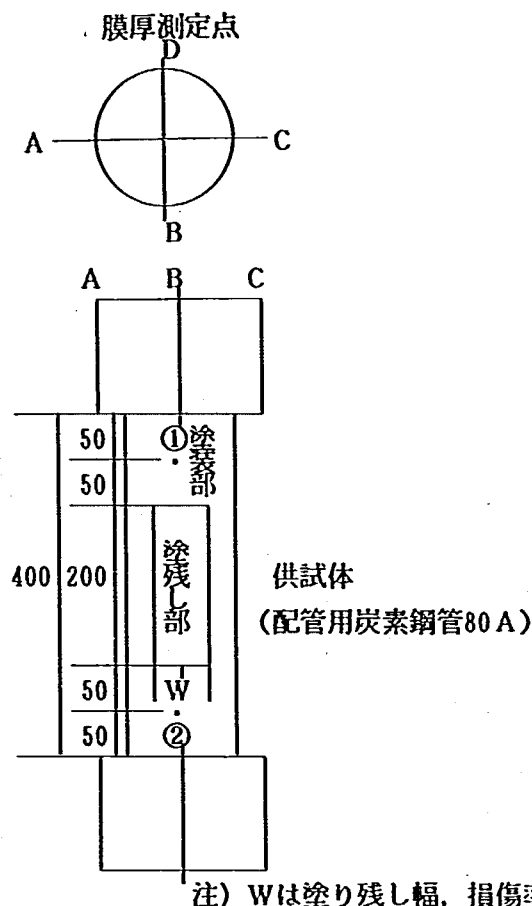
4. 2 塗装条件

塗装と電気防食を併用する場合、とくに塗膜に損傷が生じた場合を想定して塗膜の損傷率と防食電流密度の関係を求めるため定電位試験(設定電位: -900mV(Ag/AgCl))を行った。供試体の概要は表-4・1に示したが、表面をサンドブラスト処理した後、厚膜型無機ジンクリッチペイント(75 μ m)+タールエポキシ樹脂塗料JIS K 5664(200 μ m)をエアースプレーにて塗装した。

塗膜の損傷率は予め 0, 2.2, 6.5, 13.0%を想定した面積を塗り残した。図-4・1に塗膜の塗り残し要領を、表-4・2には試験開始前の塗膜厚さの測定値を示す。測定点はA, B, C, Dの4方向で①, ②の位置を平均した。

表-4・2 塗装鋼供試体の塗膜厚さ測定結果

供試体 No.	塗 装 系	塗 膜 損傷率(%)	各測定点での平均膜厚(μ m)				平均値 (μ m)
			A	B	C	D	
1	厚膜型ジンクリッチペイント(75 μ m) +タールエポキシ(200 μ m)	0	360	298	290	312	315
2	〃	13.0	310	248	258	250	267
3	〃	6.5	300	252	250	278	270
4	〃	2.2	294	270	276	278	280



注) Wは塗り残し幅, 損傷率2.2%で1.2cm,
6.5%で3.6cm, 13%で7.2cm

図-4・1 塗装鋼供試体の塗り残し要領

4. 3 電気防食

裸鋼および塗装鋼に対して潮流環境または同環境下でさらに応力を付加する条件下における電気防食試験は、いずれも外部電源方式の定電位法を適用した。

通常の土木鋼構造物に適用されている電気防食法は流電陽極方式であるが、本試験で外部電源法を採用した理由は標準的かつ実用的な防食電位に対する防食電流密度を比較的短期間で求めることを目的としたためである。

潮流環境で応力を付加しない条件下における定電位法における設定電位はすでに表-4・1に示したように、塗装鋼に対してはいずれも-900mV、裸鋼に対しては-800mV、-900mVとした。一方、潮流環境で応力を受ける条件下では-900mVの設定電位とした。通電は外部電源方式によったが通電用の電極にはアルミニウム合金陽極を用いた。各供試体に取り付けた陽極の取付状況を図-3.1および図-3.2に示した。応力の影響を受けない供試体では供試体の支持材に陽極と人工海水塩化銀電極を取付けたが、応力の影響を受ける長尺パイプ形状の供試体では陽極は別の支持パイプに取り付けて供試体の近傍に設置した。供試体と通電方法を図-4・2に示した。

照合電極は人工海水塩化銀電極を用いたが、試験結果は飽和甘汞電極基準で表示した。試験期間は昭和60年9月12日より153日間である。

年9月12日より 153日間である。

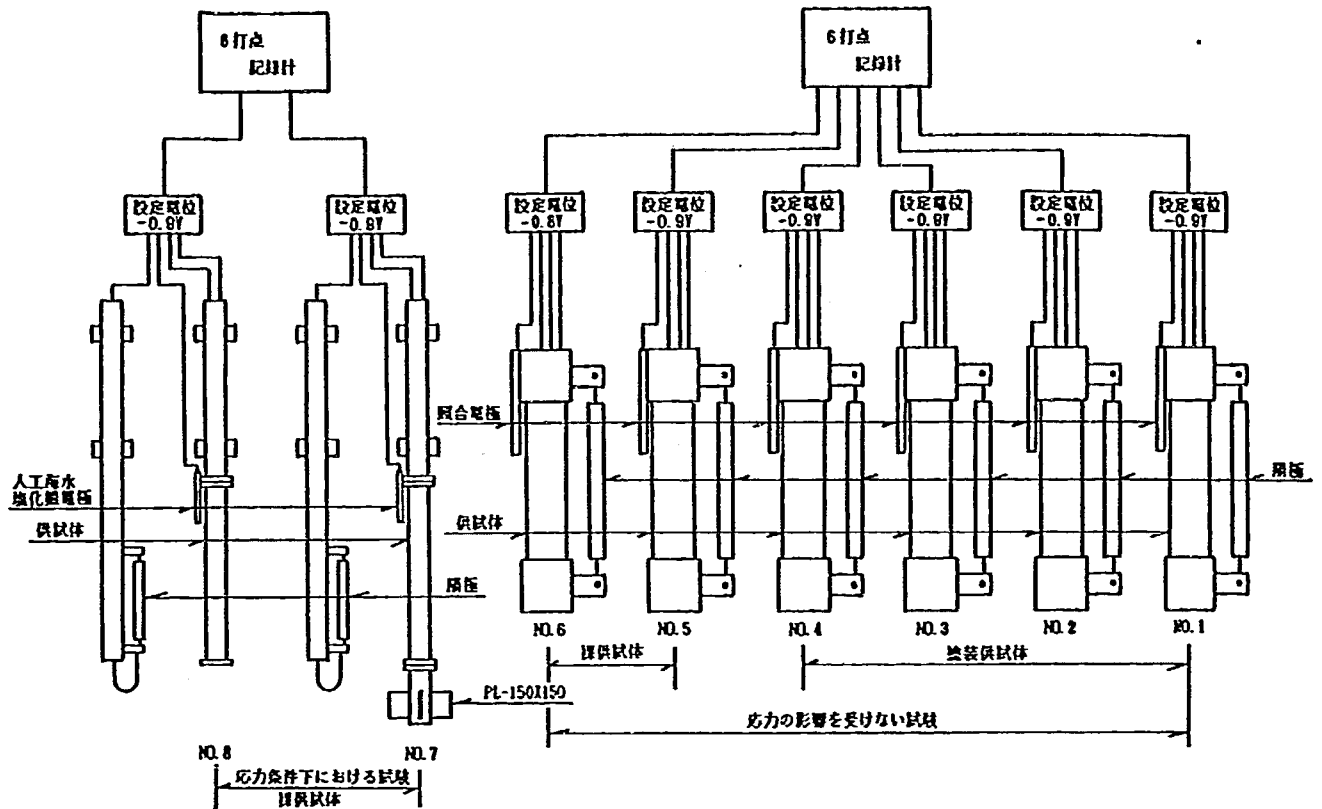


図-4・2 各供試体の通電方法

5. 試験結果

5. 1 裸鋼の定電位防食試験

潮流環境下で応力を人工的に付加しない供試体を用いた定電位防食試験は、供試体の電位を -800 および -900mV に設定し、153日間行った。その間の電流密度の変化を図-5・1に示す。

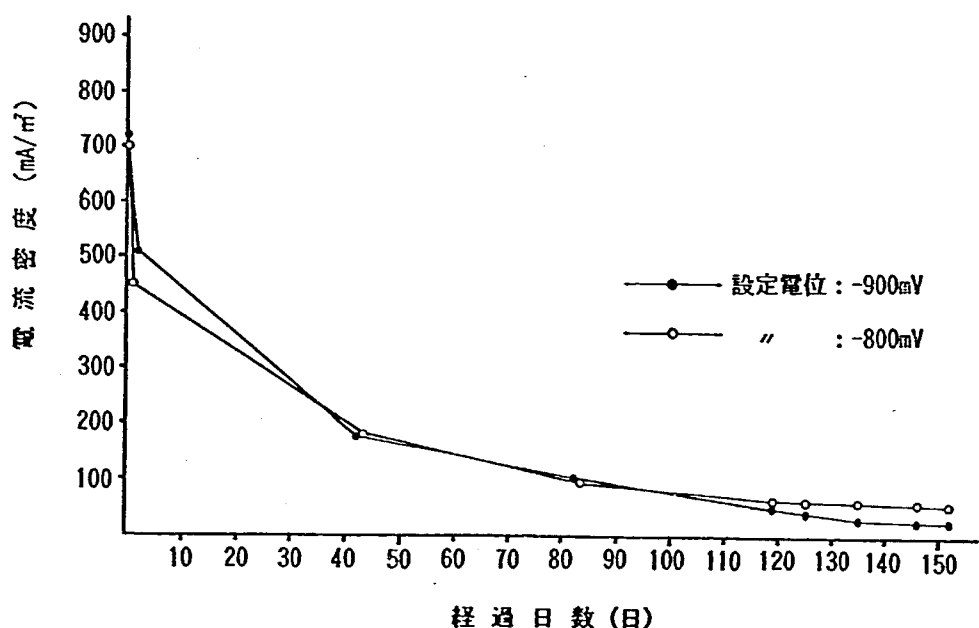


図-5・1 潮流海域における裸鋼材の電流密度 (鳴門)
(定電位試験)

5. 1. 1 設定電位 -800mV

供試体No. 6は試験開始時に 700mA/m^2 に相当する電流が流れ、電流値も潮流の変動に合わせ大幅に変動していた。電流は時間の経過とともに変動幅も小さくなり、また、通電電流値も徐々に低減し、153日経過後には 60mA/m^2 の電流密度となった。

5. 1. 2 設定電位 -900mV

供試体No. 5は試験開始時に 720mA/m^2 に相当する電流が流れ、1日経過後には、 510mA/m^2 の値となった。この値は平均値で、潮流の変化に比例して通電電流は、前項の試験より大きく変化していた。通電電流は前記同様、時間の経過とともに低減し、153日後には 25mA/m^2 の値となった。また、この時の電流の変動幅も試験開始時に比較して小さい値となっていた。電流の低減が最も大きかったのは設定電位が -900mV の場合で、これは設定電位を卑値にする程、通電初期には大きな電流が流れるため、比較的短い期間にエレクトロコーティングが鋼表面に生成されるためと思われる。

5. 2 塗装鋼の定電位防食試験

健全な塗膜と塗膜の損傷を2.2, 6.5, 13%と想定した供試体を用いて -900mV 設定の所要電流密度を求め

た。その結果を図-5・2に示す。

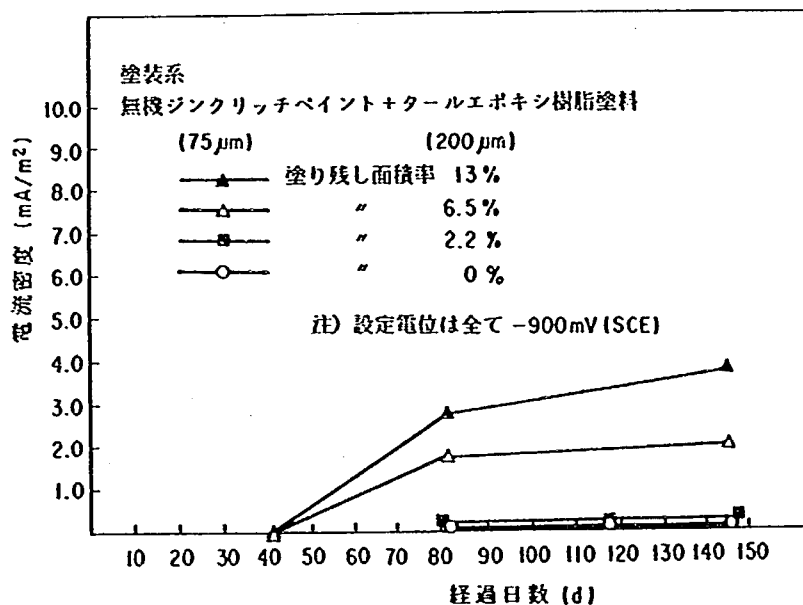


図-5・2 潮流環境における塗装鋼材の電流密度 (鳴門)
(定電位試験)

5. 2. 1 塗膜損傷率：0

No. 1 供試体は、健全な塗膜の供試体である。この供試体は試験開始後 146日経過後も防食電流を必要としなかった。従って、このようなことから塗膜が健全であったことが理解できる。

5. 2. 2 塗膜損傷率：2.2%

No. 4 供試体の塗膜の損傷率は 2.2%で、試験開始から約80日経過後まで電流は流れなかった。82日経過後に 0.1mA/m^2 の電流密度に相当する電流が流れ始め、試験完了時の 146日までこの電流密度で、設定電位の -900mV が維持された。

5. 2. 3 塗膜損傷率：6.5%

No. 3 供試体の塗膜損傷率は 6.5%で、試験開始時から40日経過後にまだ電流は流れなかったが、42日経過後に 0.08mA/m^2 の電流密度に相当する電流が流れ、以後徐々に増加し82日～119日までは 1.7mA/m^2 、試験完了時の146日では約 2mA/m^2 の電流密度で若干増加している。増加の原因は防食下地のジンクリッチペイントの溶出によるものと推測される。

5. 2. 4 塗膜損傷率：13%

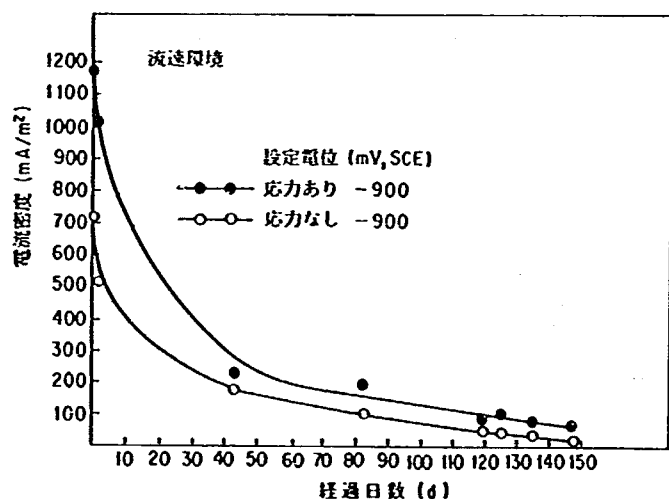
No. 2 供試体の塗膜の損傷率は13%で、前記の試験同様、試験開始時から約40日経過後まで電流は流れなかった。通電は、供試体の電位が -900mV に達した42日目から始まった。42日経過後に流れた電流から

電流密度を求めると $0.3\text{mA}/\text{m}^2$ であった。以後、通電電流は徐々に増加し、試験完了時の146日目では $3.7\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度となった。

以上ように塗膜の損傷率試験では、時間の経過とともに電流密度は増加する傾向を示す。これは通電初期は防食下地のジंकリッチペイントの影響で電流が抑制されているが、時間の経過とともに防食下地のジंकリッチペイントが溶出するためと思われる。また、塗膜の損傷面積が小さい程、所要電流密度が小さくて良いことが確認された。

5. 3 応力条件下における裸鋼の定電位防食試験

長いパイプ形状の供試体を潮流環境中に設置し、設定電位を -900mV として所要電流密度を求めた。応力の影響については強制的に付加したもの（No. 7 供試体）と長いパイプ形状の供試体をそのまま設置したものの（No. 8 供試体）とを比較した。



試験の結果は図-5・3に示す通り、外力による歪の影響を受けないNo. 8 供試体（応力無付加）は、試験開始時に $667\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度であったが、その後、分極が急速に進み42日後には $200\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度となった。

この電流密度は試験完了時の152日後には $71.2\text{mA}/\text{m}^2$ の値に低減した。

図-5・3 応力条件下の流速と電流密度の関係（鳴門）
（定電位試験）

一方、No. 7 供試体（応力付加）は試験開始時に $1,167\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度に相当する大きな電流が流れたが、42日後には $220.8\text{mA}/\text{m}^2$ と大幅に低減し、以後も徐々に電流は低減して試験完了時の152日後には $82.2\text{mA}/\text{m}^2$ に相当する電流値となった。

この結果、所要防食電流密度の定常値はやや小さい値を示しているが、この原因は本試験が定電位法によるので通電開始直後の電流が非常に大きいためである。

また、本試験では外力による歪の影響を受ける供試体（応力付加）と外力の影響を受けない供試体（応力無付加）との電流密度の比は、初期から終始1.8~1.1倍程度の値を示しており、応力発生に対応する所要防食電流密度が大きいことが明らかになった。

6 総括

潮流海域における電気防食条件の把握を目的として、試験は大鳴門橋4P橋脚下の作業台に各試験片を取付けて行った。この位置は毎日2回ずつの潮流（南流、北流）があり、1.5m/secと流速は大きくないが乱渦流は著しい。電気防食試験にはSGP、80A鋼管を用い、裸面（サンドブラスト処理）と無機ジンクリッチペイント（75 μ m）+タールエポキシ樹脂（200 μ m）の塗装面を供試した。塗膜条件は上塗りの塗残し率を0、2.2、6.5、13%の4種類とした。防食条件は定電位法で-800、-900mV（SCE）に設定した。また、別に潮流の影響を強く受けるように4枚の鋼板（150×150）を取付けたSGP65A鋼管試験片を用いて歪測定と同時に電流密度の経時的な変化を求めた。

試験項目としては、流速条件下での裸鋼材の所要電流密度を求める試験、塗膜損傷率の異なる塗装鋼材の所要電流密度を求める試験、裸鋼歪測定供試体による歪と所要電流密度の関係等で、得られた成果は次のとおりである。

6.1 裸鋼材の定電位防食試験

定電位試験において当初大きい電流密度でスタートし、電位が卑な場合程その後の電流低減効果が著しい。約4ヶ月でそれぞれ、ほぼ定常値になったが、例えば、-800mVのとき60mA/m²で、-900mVではその1/2以下であった。

6.2 塗装鋼材の定電位防食試験

-900mVを維持する試験では、塗膜が健全なら5ヶ月後も殆ど電流を必要としないが、上塗りに損傷のある場合は、例えば、損傷率2.2、6.5、13%と増大するに伴い0.1、1.7、3.7mA/m²とその面積率に応じて増加した。

6.3 応力条件下における裸鋼材の定電位防食試験

応力を付加する目的で鋼板を取付けている供試体は潮流により不規則ながら繰り返し応力を受ける時、大きい防食電流密度を必要とすることが判明した。その差は最大1.5m/secの流速条件下で歪を受けないものの当初は約1.8倍に、その後は電流密度は急速に低減するが、試験完了時の152日後では歪を受けない供試体と歪を受ける供試体との差は約1.1倍程度となっており、応力の発生に所要電流密度は対応しているといえる。

IV. 電気防食設計指針（案）・同解説の改訂

1. 電気防食法の概要

海水中における鋼材の腐食現象は、電気化学的反応に基づいている。腐食表面は局部的に電流が流出している腐食部と電流が流入している部分とから成る腐食電池を構成し、この電池作用が継続している。これを図-1・1で説明すると、表面において電位の低い陽極部（アノード部： E_a ）と電位の高い陰極部（カソード部： E_c ）とからなる腐食電池を構成しており、陽極部から電流が流出し、当該部分が腐食している。この腐食状態（通常、自然腐食状態に相当する： S ）における腐食電位を E_{corr} 、腐食電流密度を i_{corr} で示す。

電気防食法は、このような腐食している金属表面全体を陰極として、外部の陽極から電流を流入させ金属の腐食を防止する方法である。

外部から電流を流入させることにより、腐食状態（ S ）の自然電位（ E_{corr} ）は、次第に低下する。 M では、外部からの防食電流によって腐食電流が減少していることを示す。

このように、 S から T まで陰分極させると、電位が陽極部の電位（ E_a ）と等しくなり、電位差が消滅し、腐食電流密度 i_{corr} はゼロとなり腐食は停止する。

これが電気防食の原理で、この腐食停止時（ T ）の電位が防食電位で、 i_p が防食電流密度である。

海中部に電気防食を適用した場合、鋼材の電位を防食電位より卑（防食電位より低い電位）に維持すれば、原理的に腐食は生じない。

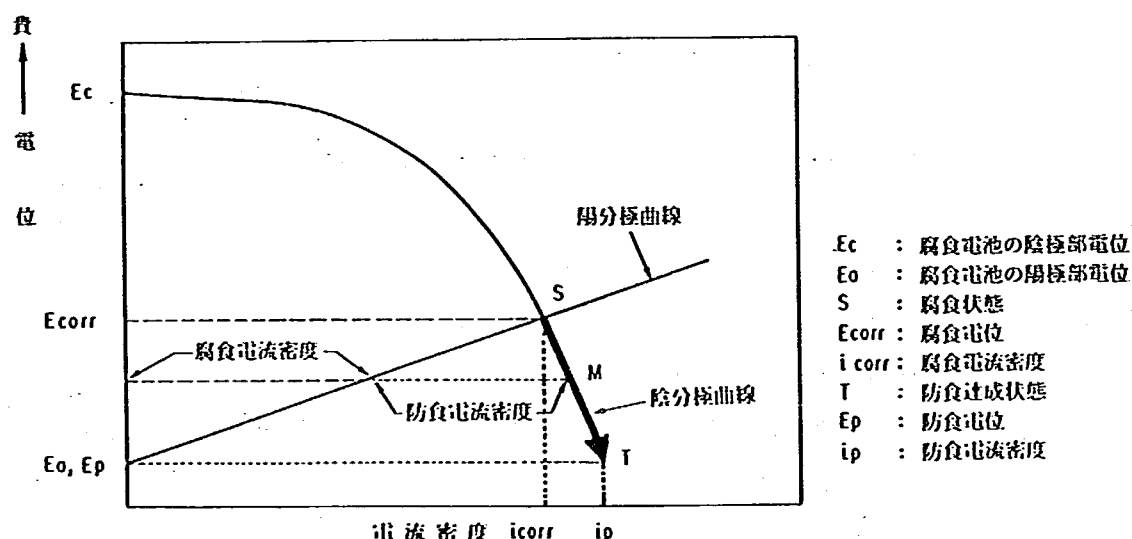


図-1・1 電気防食の原理を示す分極図

1. 1 電気防食の基本的条件

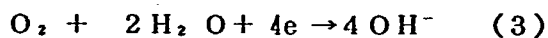
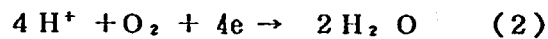
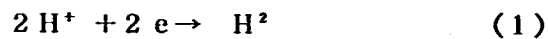
鋼材の腐食を抑制するためには上述のように鋼材の電位を防食電位以下に維持することが必要である。防食電位は金属材料の種類で異なり、また、環境条件で異なる場合もある。理論的には熱力学的に計算されるが、実際の条件は複雑で実験的確認を要する場合もあり、数多くの実測値が報告されている。一方、防食電

位を達成する防食電流密度は環境条件の影響が大きく、その変化に追従する必要がある。

防食電位については特殊な水質汚染の場合を除いて通常の海域では -770mV(SCE) といわれており、すでに多くの実績がある。海水中の鋼材を陰極として、この表面に電流を流入させると陰分極と呼ばれる電位低下を生じる。この場合、流入する電流を徐々に増加していくとある値から電位低下が急激に大きくなる。これは海水中に溶存する酸素の鋼表面への供給が限界に達することに対応する挙動で、この場合の電流密度を酸素の拡散限界電流密度と呼んでいる。こうして鋼材の電位が局部腐食電池の陽極部まで低下すれば腐食は停止する。この場合の電位を防食電位、電流密度を防食電流密度という。

防食電位は金属材料によって各々異なるが、鉄鋼の場合は前述したように特殊な水質汚染の場合を除き -770mV(SCE) である。一方、電流密度は環境条件によって異なることが明らかとなっている。

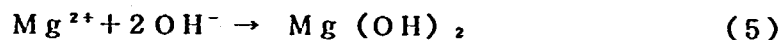
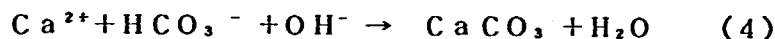
これを鋼表面の反応でみると、一般海域のような溶存酸素を含む中性条件下ではすでに述べたように陰分極は溶存酸素量とその拡散（陰極面への供給）に大きく支配される。すなわち陰極面における反応は、水中で解離している水素イオン (H^+) が放電反応によって水素ガスを発生する（式1）が、このとき酸素があれば水素イオンを酸化して水を生成する（式2）。陰極面ではこの他に水中の酸素が還元されて水酸イオンを生じ（式3）、PHを上昇させる。



この場合、陰極面において液中からの酸素の供給が追いつかなくなると、表面に薄い水素皮膜を生じて電位が低下する。したがって、液の流動、攪拌など溶存酸素の供給を助ける条件があると、電位の低下、すなわち陰分極を妨げたり、逆に貴方向に戻したりする結果となり、防食電位に到達するまでに大きな電流密度を必要とすることになる。この陰分極の妨害を復極作用といい、実際に波浪や潮流などは気泡を巻き込み、かつ運ぶことから酸素を絶えず補給することになり重要な復極要因となっている。

次に、防食電流密度に関して重要なことはその低減である。低減は通電方法によってその挙動がかなり異なるが、その他にも陰極電位、電解質の成分、陰極表面の状態の影響が大きい。

実際の海水中の長期にわたる電気防食において重要なことは、防食電流密度の低減と安定性である。防食電流が流入する陰極表面は前述の（3）式の還元反応によってアルカリ性となるのでPHが上昇する。この結果、海水中の溶解成分が次のように反応して陰極表面に生成し石灰質皮膜を形成する。これは電解被覆（エレクトロコーティング）といわれている。



電解被覆物の組成は、上記（4）、（5）を主とするものであるが、その比は陰極電流密度に左右され、電流が大きいほどMg/Caの比が大きい。また、密着性が良く、緻密で良質な皮膜の形成は陰極電位に依存しており $-1000 \sim -1050\text{mV(SCE)}$ 位が最適とされている。この電解被覆物の形成は防食に必要な電流密度を著しく低減させるとともに安定化にも有効で、さらに陰極表面における防食電流均一化にも効果的である。

また、良好な電解被覆は、例えば通電を中止しても長時間復極を抑制することが確認されている。なお、CaやMgの溶解量が小さい淡水中では海水中ほどの電解被覆は期待できない。長期間にわたる電気防食において、防食電流密度の低減は外部電源法ならば電力の節約に、流電陽極法ならば陽極寿命の延長につながる利点となる。

1・2 環境条件と防食電流密度

電気防食の実施に際しては、上述のように種々の環境条件において防食電位に到達し、さらにこれを維持する防食電流密度を把握することが防食設計上極めて重要である。

今回の駿河湾の実海域試験においては、冬季の季節風あるいは台風、低気圧接近等の海象変化が明らかに復極現象をもたらしている。海水の流動が避けられない外洋性実海域条件では、Ⅱの3.3の図-4・2に示したように、一般に陰分極が十分でない初期ほど大きな電位変動、電流変化が計測され、定常電流密度に到達する時間も長く、通常は大きな電流密度を必要とする。

第3分科会ではこの駿河湾海洋試験施設における現場試験に先立って、すでに実験室試験を実施して流速条件下の電気防食条件を明らかにしているが、本試験場とは別に潮流環境下においても電気防食試験を実施した。その概要は次のとおりである。

試験場所は本四連絡橋の大鳴門橋、鳴門市側第4橋脚海上作業仮設足場で、鋼管(89Φ×420 1mm)に羽根を取り付けて流速による応力(歪ゲージ装着)を付与し、裸および塗装(塗り残し%数種類)表面に対して定電位防食試験を実施した。

試験結果としては、応力付加材に対する防食電流は、当初は付加しないものに比較して1.5倍程度を要したが、Ⅲの4.3の図-5・3に示したように数ヶ月後には若干大きい程度に低減した。この低減は初期の陰分極が大きい程期待できることが明らかとなった。また、塗膜損傷率が大きくなる程、防食所要電流が増大することも判明した。

2. 電気防食設計に関する現行基準

わが国には、電気防食全体に対する基準はないが、外部電源方式の場合は、主として安全性の面から通産省「電気設備技術基準」に定められている。この他、マグネシウム合金陽極など一部の材料については、JIS規格に定められている。

その他の規格・基準類は、全て特定の構造物あるいは施設について電気防食を適用する場合の適用基準である。

海洋鋼構造物に対する適用基準には主に次のようなものがある。

建設省土木研究所：電気防食設計指針(案)・同解説

運輸省港湾局：港湾施設の技術上の基準

この他に、海洋鋼構造物以外の対象まで含めれば関連する材料、設計、施工、保守、試験法など腐食・防食に関して各協会等で定めた基準・規格は数多くある。現在海洋鋼構造物に対する基準として内外でひろく使用されている基準の主な内容を表-2・1に示す。

表-2・1 海洋鋼構造物に対する

	1				2			
名 称	海域における土木鋼構造物の電気防食 指針（案）・同解説（1991）				港湾施設の技術上の基準・同解説 （1989）			
制 定 機 関	建設省土木研究所				運輸省港湾局			
防食電位	一般海域		-770mV		飽和甘汞		-770mV	
	汚染海域		-900mV		人工海水塩化銀		-780mV	
	潮流海域		-770mV		飽和硫酸銅		-850mV	
	塗装併用		-770~-1050mV (Hg/Hg ₂ Cl ₂)					
	[管理電位]							
	一般海域		-800mVより卑					
	汚染海域		-900mV //					
	潮流海域		-800mV //					
	複合電気防食		-800~-1050mV (塗装併用)					
防食電流密度 (mA/m ²)			初 期	定 常	[通常の海域の初期値]			
	環 境		防食電流	防食電流				
	一 般 海 域	内湾性	海水中	100	裸	海水中	100	
			土 中	20		石積部	50	
		外洋性	海水中	100 F		海底土中	20	
			土 中	20 F		陸土中	10	
	特 殊 海 域	汚 染	海水中	100 K	塗 装	海	20+100 S	
			ヘドロ	150		水	10+100 S	
		土 中	20 K	10 K	コンクリート	中	100 S	
			1 m/S	160				80
		潮 流	2 m/S	230	115	S：損傷率＝想定被覆損傷面積／全被覆面積 1)河川水や諸排水の流入、硫化物濃度の高い所、流速の大きい所では上記値より一般に増大する。 2)定常値は初期値の40～50%		
			5 m/S	270	135			
		複合電気防食：上の値にPを乗じた値 F：海域の波浪、潮流の程度に応じて1.0～1.5までの範囲 K：汚染の程度に応じて1.2～1.5の範囲 P：塗膜劣化・損傷によって生じる鋼の露出率。塗装系によって0.1～0.25の範囲						

電気防食設計基準の公的規格

3				4		5		
Veritas Offshore Standards Cathodic Protection RP B401 1986				Code of Practice for land and marine applications Cathodic Protection BS 7361:Part 1:1991		Corrosion Control of Steel, Fixed Offshore Platforms Associated With Petroleum Production (1983) RP-0176-83		
D n V (ノルウェー)				B S (英)		N A C E (米)		
好気性環境 Ag/AgCl -0.8~1.05V				通気性環境 Cu/CuSO ₄ -0.85V Ag/AgCl (海水) -0.80V Ag/AgCl (飽和KCl) -0.75V Zn +0.25V		Ag/AgCl -0.8V以下 300mV以上分極させる Cu/CuSO ₄ -0.85V以下 Hg/Hg ₂ Cl ₂ -0.78V以下 Zn +0.25V以下		
嫌気性環境 Ag/AgCl -0.9~1.05V				不通気性環境 Cu/CuSO ₄ -0.95V Ag/AgCl (海水) -0.90V Ag/AgCl (飽和KCl) -0.85V Zn +0.15V				
海域	I i	I m	I f	海水中 (25Ω・cm)		海 域	抵 抗 率	電流密度
北海 (北部)	180	90	120	初期値 100		メキシコ湾	20	54~65
北海 (南部)	150	90	100	維持値 30~70		米国西海岸	24	76~106
ベルシャ湾	130	70	90	海土中		クック湾	50	380~430
インド	130	70	90	10~30		北 海	26~33	86~216
オーストラリア	130	70	90	塗装 (タールペースト 0.2mm)		ベルシャ湾	15	54~86
ブラジル	130	70	90	初期値 5		インドネシア	19	54~65
メキシコ湾	110	60	80			抵抗率の単位: Ω・cm		
西アフリカ	130	70	90					
インドネシア	110	60	80					
海底管	50	40	40					
海底土中	25	20	15					
I i: 初期値 I m: 平均値 I f: 最終値								

3. これまでの電気防食設計指針（案）

海域に建設される土木鋼構造物の腐食に対する有効な対策として、電気防食法はすでに周知である。建設省土木研究所および（財）土木研究センターは、この電気防食法の普及と標準化のために実験と考察、および知見と経験から昭和58年11月に「電気防食設計指針（案）・同解説」を定めた。これは共同研究として清浄海域、汚染海域、高潮流海域を想定し、裸鋼材および塗装鋼材に対する電気防食を実験室において実施した結果に基づいている。実験条件としては水温、ヘドロ、流速、海水希釈などの因子について防食電位と電流密度の関係を求め、塗装と電気防食との併用については、最適塗装系の選定および併用防食電流密度を求めた。指針は環境調査、防食電位、防食電流密度、陽極規格、併用塗装系などを明確にし、内容的には設計指針といえるものであった。

4. 電気防食指針（案）・同解説の改訂の要点

海域における土木鋼構造物に対する電気防食では、すでに述べたように環境条件に応じた適正な防食電流密度による防食電位の維持が重要であるが、長期間にわたって施設の防食や安全を確保するには当初の設計のみでなく、施工、管理、点検も同様に重要である。これまでの指針が「電気防食設計指針（案）・同解説」として実験室試験の結果をふまえたものであるのはすでに述べたが、今回の改訂には、その後実施された駿河湾、鳴門海峡等の現場試験の成果を反映させ、内容的には設計方針に設計要領を加え、とくに防食状態の維持に管理電位を設け、施工、点検、維持管理を含む総合的な構成とし、名称も「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」と改めた。これについては、本研究成果のうちでは、とくに設計指針に関する結果を反映させて改訂が行われ、第1編5頁に述べたように建設省土木研究所および（財）土木研究センターの共同研究報告書第58号として平成3年3月にまとめられている。

今回の改訂の要点は次のとおりである。

4. 1 電気防食の設計

4. 1. 1 設計手順

電気防食の設計手順をよりくわしく定めた。電気防食の種類と選定では、土木鋼構造物に適用する方式として、アルミニウム合金陽極を用いる流電陽極方式を原則とすることを明確にした。また、塗装と電気防食を併用する場合を複合電気防食方式と呼ぶのは従来どおりである。

4. 1. 2 事前調査

事前調査については必要があれば、環境調査、通電試験を行うこととし、環境条件ごとに従来よりくわしく防食電流密度を定めた。

4. 1. 3 防食面積

防食面積は各環境別に算出するが、代表的な構造として多柱式構造、矢板構造、鋼殻構造について電気

4. 1. 4 防食電位および防食電流密度

表-4・1に防食電位を示す。表の値は電気防食単独ではこれまでの指針と同じである。塗装を併用する複合電気防食では、その後得られた実験結果および諸外国の事例などを配慮して、防食電位の下限界値を塗膜にとってより安全な-1050mV (SCE)とし、従来より50mV貴に改訂している。表-4・2には防食電流密度を示す。防食電流密度は基本的に従来指針と変わりなく、初期値および定常値の考え方も従来と同様である。しかしながら、改訂された指針では環境をよりくわしく区分した。例えば、海域区分としては従来は清浄、汚染、高潮流の3区分としたが、今回はまず一般と特殊に2大別し、さらにその中を細分した。一般海域は内湾性、外洋性に分け、外洋性環境では波浪や潮流を原因とする鋼表面の復極に対して、その程度に応じて50%までの割増し係数を選択できるようにした。汚染や潮流の条件については特殊海域として分類し、汚染海域ではその程度に応じて20~50%の割増し係数を選択できるようにし、流速の大きい潮流条件では流速5m/sまでを3段階に区分した。また、塗装を併用する複合電気防食では塗膜の劣化・損傷による鋼の露出面積率に応じ10~25%の割増係数を選択できるようにした。

表-4・1 防食電位

単位：mV (SCE)

環境	電気防食の種類	電気防食法	複合電気防食法 (塗装併用)
一般海域		-770	-770 ただし下限を -1050
汚染海域		-900	
潮流海域		-770	

表-4・2 防食電流密度

単位：mA/㎡

環境			電気防食		複合電気防食
			初期 防食電流密度	定常 防食電流密度	防食電流密度
一般海域	内湾性	海水中	100	50	左の値にPを乗じた値
		土中	20	10	
	外洋性	海水中	100 × F	50 × F	
		土中	20 × F	10 × F	
特殊海域	汚染	海水中	100 × K	50 × K	
		ヘドロ	150	100	
		土中	20 × K	10 × K	
	潮流	1m/s	160	80	
		2m/s	230	115	
		5m/s	270	135	

備考 F は、海域の波浪、潮流の程度に応じて1.0~1.5までの範囲とする。

K は、汚染の程度に応じて1.2~1.5までの範囲とする。

P は、塗膜の劣化・損傷等によって生じる鋼の露出率で、塗装系により0.1~0.25までの範囲とする。

防食所要電流は各環境部位ごとの防食電流の総和で得られるが、とくに複合電気防食方式において塗装以外の対象と併用される場合の注意が記されている。例えば、コンクリート中の鉄筋が対象として組み合わされるときは防食電流の一部流入を見込むこと、FRPなど絶縁性の高い型枠材がるときは対象から除外すること、金属系被覆があるときはその境界部のガルバニック腐食防止に配慮すること、有機系被覆と組み合わせられ被覆に損傷があるときは、その程度に応じる配慮をすること、そのほか、迷走電流が確認されればその対策をとること、などである。

4. 1. 5 流電陽極

流電陽極材料としては発生電流量が 2600Ah/kg以上の性能を有するアルミニウム合金陽極を用いることとし、標準的な設計に適用する場合の6種類の陽極について、形状、寸法、重量、性能等を陽極規格（付録1）として定めている。表-4・3に陽極規格を示す。これらの陽極は防食設計の便宜上、一般海域用で耐用年数15年および30年の3種類ずつを規格したもので、陽極の種類を限定するものではなく、特殊な海域や条件にはそれに応じた設計が必要であるとした。

表-4・3 陽極規格

アルミニウム合金陽極の種類

形 式	15-I型	15-II型	15-III型	30-I型	30-II型	30-III型
設計耐用年数 (y)	15	15	15	30	30	30
形 状 寸 法 (mm)	(100+120)× 130×1500	(100+120)× 130×1800	(100+120)× 130×2230	(180+200)× 190×1150	(180+200)× 190×1400	(180+200)× 190×1830
初期発生電流 (A) ($\rho=30\Omega\cdot\text{cm}$ の場合)	2.0	2.5	3.0	2.0	2.5	3.0
正 味 重 量 (kg)	56.5	67.9	84.2	110.7	134.9	176.0
発生電流量 (A・y)	15.9	19.1	23.8	31.2	38.1	49.7

4. 1. 6 設計計算

設計計算における諸式は従来指針と変わらない。棒状陽極の接地（水）抵抗式は次の D w e i g h t 式を採用しており、N A C E および D n v と同じである。

$$R = \rho / 2 \pi L (2.3 \log 4 L / r - 1)$$

R : 接地抵抗 (Ω) ρ : 抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

L : 陽極の長さ (cm) r = 陽極の半径 (cm)

4. 1. 7 塗装系

複合電気防食方式に用いる塗装系は表-4・4に示す3種類でこれも従来指針と変わらない。塗料の品質表-4・4規格は付録2としてまとめられているが、それらはいずれも現在市販されているもので、今後、より耐久性の優れた塗料が開発されれば、長期併用時の耐久性を確認して使用することはさしつかえ

ないとした。

表-4・4 電気防食と併用する塗装系

工程	塗装系		I	II	III
	下 地 処 理		除錆度 Sd2 以上または Sh2 以上、表面粗さ 35~70 μm RZ		
仕 様	第1層	塗料の種類 乾燥膜厚	無機ジソクリッチペイント 75 μm 平均		エポキシ樹脂 ジソクリッチペイント 75 μm
	第2層	塗料の種類 乾燥膜厚	ミストコート (タールエポキシ樹脂塗料)	ミストコート (厚膜型エポキシ樹脂塗料)	専用プライマー
	第3層	塗料の種類 乾燥膜厚	タールエポキシ樹脂塗料 150 μm	厚膜型エポキシ樹脂塗料 150 μm	ガラスフレーク入り ポリエステル樹脂塗料 500 μm
	第4層	塗料の種類 乾燥膜厚	タールエポキシ樹脂塗料 150 μm	厚膜型エポキシ樹脂塗料 150 μm	ガラスフレーク入り ポリエステル樹脂塗料 500 μm
	合 計 膜 厚		375 μm	375 μm	1,075 μm

注) 1): 除錆度の表示は、日本造船研究会編「塗装前鋼材表面処理基準」による。

2): 表面粗さの表示は、「JIS B 0601 表面粗さ」の10点平均あらさ表示法による。

3): ミストコートは、合計膜厚に算入しない。塗装時気温が10℃以下の場合、タールエポキシ樹脂塗料、厚膜型エポキシ樹脂塗料のいずれも低温型を用いる。

4): 専用プライマーは、エポキシ樹脂ジソクリッチペイントとガラスフレーク入り塗料との密着付着性を向上させるために使用する。

4. 2 電気防食の施工

施工の章は今回新しく設けられたもので、内容的には施工手順に従って必要かつ注意すべきことが盛り込まれている。施工に際しては施工計画を必要とし、陽極の選定では、(社)腐食防食協会が定めた流電陽極試験法によって発生電気量 2600Ah/kg以上、陽極電位 -1050mV (SCE) 以下のアルミニウム合金陽極であることを確認することとしている。現場作業では各工種に応じた有資格者が必要で、工事着工前には所定の屈出を行うとともに、施工方法については安全で適切な方法を選定する必要がある。とくに陽極の取付けに際しては溶接を原則とし、それらの手順を明示している。施工行程はすべて施工計画に基づいて管理し、関連法規の遵守、機器管理、安全確保等については十分に配慮しなければならないとしている。

4. 3 点検および維持管理

電気防食の点検および維持管理も今回の指針で新しく設けられたものである。定期点検は年1回を原則とすると定めたが、異常がなければこの間隔は延長できる。異常が認められたとき、または陽極が計画耐用年数に達したときは詳細点検を行なうこととしている。定期点検は今回新しく定めた防食管理電位を満足しているかどうかの確認で、測定箇所は、一般には海水中の表層、中層、低層の深度レベルで各1点と20~30mごとの水平方向で1点とを望ましいとしている。表-4・5には電気防食管理電位を示す。表-4・1の防食電位より若干卑な、すなわち安全側の電位を定め

表-4・5 管理電位

単位: mV (SCE)		
環境	電気防食の種類	電気防食法 複合電気防食法 (塗装併用)
一般海域		-800より卑
汚染海域		-900より卑
潮流海域		-800より卑

ている。詳細点検は、主として管理電位に達しない場合に、その原因を明らかにし対策を立てるために行うものである。その内容は、詳細な電位測定、陽極の発生電流測定、簡略な陽極消耗量の測定、試験片による防食効果の確認、被防食体の肉厚測定などである。これらの点検を十分に行うにはあらかじめモニタリング装置を取り付けておくことが望ましいとしている。

4. 4 補修

詳細点検の結果、必要であれば適切な補修を行なう。

5. 新指針（案）の構成（目次）

昭和58年11月に定められた従来の指針は本研究の成果を反映して、総合的な電気防食指針として改訂され、建設省土木研究所および（財）土木研究センターの共同研究報告書第58号として平成3年3月にまとめられた。次に新指針（案）の構成を目次で示す。

海域における土木鋼構造物の電気防食に関する共同研究報告書

— 海域における土木鋼構造物の電気防食（案）・同解説 —

目 次

まえがき	4. 施 工
1. 総則	4.1 施工計画
1.1 適用範囲	4.2 陽極性能の確認
1.2 用 語	4.3 現場作業者
1.3 構造物に関する事前調査	4.4 作業準備
	4.5 施工方法の選定
2. 電気防食	4.6 施工方法
2.1 電気防食による防食効果	4.7 施工管理
2.2 防食電位	
2.3 電気防食法の種類と選定	5. 点検および維持管理
	5.1 点検一般
3. 設 計	5.2 定期点検
3.1 設計一般	5.3 詳細点検
3.2 調 査	5.4 補 修
3.3 防食電流密度	
3.4 設計要領	参考文献
3.4.1 防食面積	
3.4.2 所要防食電流	付録1 陽極規格
3.5 流電陽極方式	付録2 塗料規格
3.5.1 陽極の性能	
3.5.2 陽極の形状および寸法	
3.5.3 陽極個数の算出	
3.6 複合電気防食方式	
3.6.1 複合電気防食方式用塗装系	

おわりに

国土の開発や社会資本の整備の進展により、数多くの土木鋼構造物が建設されつつあり、特に、海洋空間の有効利用の促進により、腐食性の激しい海域に建設される事例が増加している。

今後、海域への建設が予想される土木鋼構造物は、建設地点の大水深化や幅広い海底地質条件への対応の必要性から、その構造は大型化、複雑化するとともに、設置環境も波浪や潮流が激しい等、より腐食性の厳しい環境を含む広範な環境条件への対応が求められるようになると考えられる。

本研究は、今後益々増加するであろう貴重な社会資産である土木鋼構造物を腐食から守り、機能の恒久化を図りつつ、次世代に引き継いで行くためには、防食技術の高度化、複合化が不可欠であるという観点から、昭和58年度以降10年にわたって実施しているもので、現在までに、①構造形状に応じた電気防食設計、②塗装併用電気防食設計、③潮流環境における電気防食設計等に関しては、基本的な試験をほぼ終了し、補助試験を一部残すのみとなっている。

今までに得られた成果は、平成3年度に、「電気防食設計指針（案）・同解説」（建設省土木研究所、昭和58年度版）の改訂版として作成された「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」に反映されており、これらの成果の活用により、海域に建設される土木鋼構造物の海中部に適用する「電気防食法」および「塗装と併用する電気防食法」の信頼性が益々高まることを期待したい。

本研究における一連の暴露試験調査は、駿河湾海洋技術総合研究施設（マリンステーションするが）において実施しているものである。末筆ながら同施設の管理者である中部地方建設局静岡河川工事事務所に対し深甚なる謝意を表する次第である。

海洋構造物の耐久性向上技術に
関する共同研究報告書
(第3分科会電防部会)

ISSN 0386-5878

共同研究報告書第144号

平成7年12月(1995)

建設省土木研究所
財団法人土木研究センター

要 旨

海洋に設置される土木鋼構造物を対象とする電気防食の設計は、標準的な環境条件での比較的単純な構造物については、ほぼ確立しているが、複雑な構造を有する構造物や潮流海域に設置される構造物に適用する場合等については、必ずしも明確でなく、海洋構造物による海洋空間の有効利用を図るには、構造物の大型化、構造の複雑化、長寿命化等に適した確実で経済的な電気防食設計技術の確立が不可欠と考えられる。

このため、駿河湾の大井川町沖合に設置した海洋技術総合研究施設の本体および各種試験体ならびに大鳴門橋の作業架台に設置した試験体を用いて長期試験を行い、波浪、潮流漂砂等の海象条件の変化および形状の複雑な構造条件に適応する電気防食法および電気防食と塗装の併用法に関して適正な防食電流密度と管理電位などの新しい知見を得た。

また、これらの成果をもとに「海域における土木鋼構造物の電気防食指針(案)・同解説」を作成した。

キーワード: 海洋構造物, 鋼構造物, 防食技術, 電気防食, 複合電気防食法, 防食電位, 防食電流密度, 電位分布, アルミニウム合金陽極, 亜鉛基準電極

郵便はがき

五十円切手
をはって下
さい。

305-□□

建設省土木研究所
材料施工部化学研究室
行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 002

No. 002

配布先氏名

配布先住所

○

共同研究報告書第 144 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印