

## 港湾施設に適用した電気防食システムの維持管理に関する研究

小林, 浩之

<https://doi.org/10.15017/1441181>

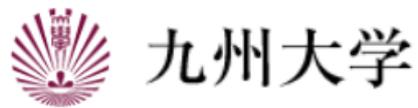
---

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済



# 港湾施設に適用した電気防食システムの 維持管理に関する研究

2013年8月



九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

小林浩之

# 港湾施設に適用した電気防食システムの維持管理に関する研究

## 目 次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 研究の背景と目的 .....	1
1.2 論文の構成 .....	4
1.3 参考文献 .....	6
<b>第2章 既往の研究</b> .....	7
2.1 序 .....	7
2.2 港湾鋼構造物の腐食と電気防食メカニズム .....	7
2.2.1 金属の腐食現象 .....	7
2.2.2 港湾鋼構造物の腐食 .....	10
2.2.3 港湾鋼構造物における電気防食メカニズム .....	11
2.3 港湾鋼構造物の電気防食特性 .....	17
2.4 流電陽極法の維持管理方法 .....	19
2.5 流電陽極法の更新設計 .....	23
2.6 港湾コンクリート構造物の塩害劣化と電気防食メカニズム .....	25
2.6.1 港湾コンクリート構造物の劣化 .....	25
2.6.2 塩化物イオンによるコンクリート中鉄筋の腐食反応 .....	27
2.6.3 コンクリート構造物における電気防食基準 .....	29
2.7 電気防食適用によるコンクリート中鉄筋の腐食反応 .....	32
2.8 港湾コンクリート構造物における電気防食基準 .....	36
2.9 第2章のまとめ .....	38
2.10 参考文献 .....	38
<b>第3章 港湾鋼構造物に適用した電気防食システムの維持管理</b> .....	41
3.1 序 .....	41
3.2 流電陽極法を適用した港湾鋼構造物の維持管理 .....	42
3.2.1 はじめに .....	42
3.2.2 試験方法 .....	42
(1) 大井埠頭新5バースにおける電気防食試験の詳細 .....	42
(2) アルミプローブを用いたアノード電流の推定手法 .....	46
3.2.3 試験結果および考察 .....	50
(1) 大井埠頭新5バースの電気防食特性 .....	50

1) アノード電流の経時変化 .....	50
2) カソード電位の経時変化 .....	53
3) 潮位とカソード電位, アノード電流の関係 .....	53
4) アノード電流とカソード電位の関係 .....	57
(2) カソード電位と $E_c - I_a$ 線による陽極消耗量の推定 .....	64
(3) 陽極消耗量推定方法の提案 .....	68
1) アルミプローブを用いたアノード電流の推定手法の検討試験 .....	69
2) カソード電位計測による陽極消耗量の推定手法の提案 .....	73
3.2.4 まとめ .....	77
3.2.5 参考文献 .....	78
3.3 流電陽極法を適用した港湾鋼構造物の更新設計 .....	79
3.3.1 はじめに .....	79
3.3.2 現状の陽極更新設計 .....	79
3.3.3 提案する更新設計法の考え方 .....	81
3.3.4 試験方法 .....	84
(1) 実験室試験 .....	84
(2) 実構造物による新設計法の検証試験 .....	91
3.3.5 試験結果および考察 .....	88
(1) 実験室試験 .....	88
(2) 実構造物による新設計法の検証試験 .....	91
3.3.6 まとめ .....	92
3.3.7 参考文献 .....	93
3.4 第3章のまとめ .....	94
<b>第4章 港湾コンクリート構造物に適用した電気防食システムの維持管理 .....</b>	<b>95</b>
4.1 序 .....	95
4.2 鉄筋表面の環境改善効果を考慮したコンクリート中鉄筋の電気防食設計 .....	96
4.2.1 はじめに .....	96
4.2.2 新設計法の考え方 .....	96
4.2.3 解析および試験方法 .....	97
(1) 解析方法 .....	97
1) $Cl^-$ 濃度の経時変化 .....	97
2) pH 経時変化 .....	98
(2) $r_{crit}$ 値の評価試験 .....	99
(3) 新設計法の検証試験 .....	101

4.2.4	試験結果および考察	103
(1)	カソード電流によるコンクリート中の Cl <sup>-</sup> 濃度経時変化	103
(2)	カソード電流によるコンクリート中の pH 経時変化	106
(3)	$r_{crit}$ 値の検討結果	108
(4)	鉄筋表面の環境改善を考慮した新設計法の検討	110
(5)	新設計法の検証試験	112
4.2.5	まとめ	115
4.2.6	参考文献	116
4.3	湿潤環境下における電気防食基準	117
4.3.1	はじめに	117
4.3.2	試験方法	118
(1)	アルカリ環境下における鋼材の $E_R$	118
(2)	コンクリート試験体の詳細	119
(3)	電気防食試験	121
4.3.3	試験結果および考察	124
(1)	アルカリ環境下における鋼材の $E_R$	124
(2)	飛沫・湿潤環境下におけるコンクリート中鉄筋の電気防食特性	126
1)	飛沫環境下の電気防食特性	126
①	維持電流密度の経時変化	126
②	通電オフ 24 時間後のカソード復極量の経時変化	128
③	通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位の経時変化	130
④	カソード復極量と腐食速度の関係	131
2)	湿潤環境下の電気防食特性	132
①	維持電流密度の経時変化	132
②	通電オフ 24 時間後のカソード復極量の経時変化	133
③	通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位の経時変化	135
④	カソード復極量と腐食速度の関係	136
3)	環境に適した電気防食評価基準の使い分け	137
4.3.4	まとめ	139
4.3.5	参考文献	140
4.4	第 4 章のまとめ	142
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>143</b>

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

資源が乏しく対外依存度の高い日本にとって、輸出入物資の99.7%を扱う港湾は、国際貿易の玄関として、国民生活や経済活動を支えるために必要不可欠な社会資本である<sup>1)</sup>。港湾は、岸壁、防波堤、航路、臨港道路といった多様な施設が一体的に機能しており、こうした施設は1970年代をピークに整備され、現在までに30年余りが経過している。図-1.1に示すように港湾の基幹的役割を果たす岸壁では、建設後50年以上経過する施設の割合が2006年には5%となっているが、20年後には42%に急増するなど急速に老朽化が進み、物流ネットワークを支える港湾機能の低下とそれに対応するための改良・更新コストの増大が懸念される。

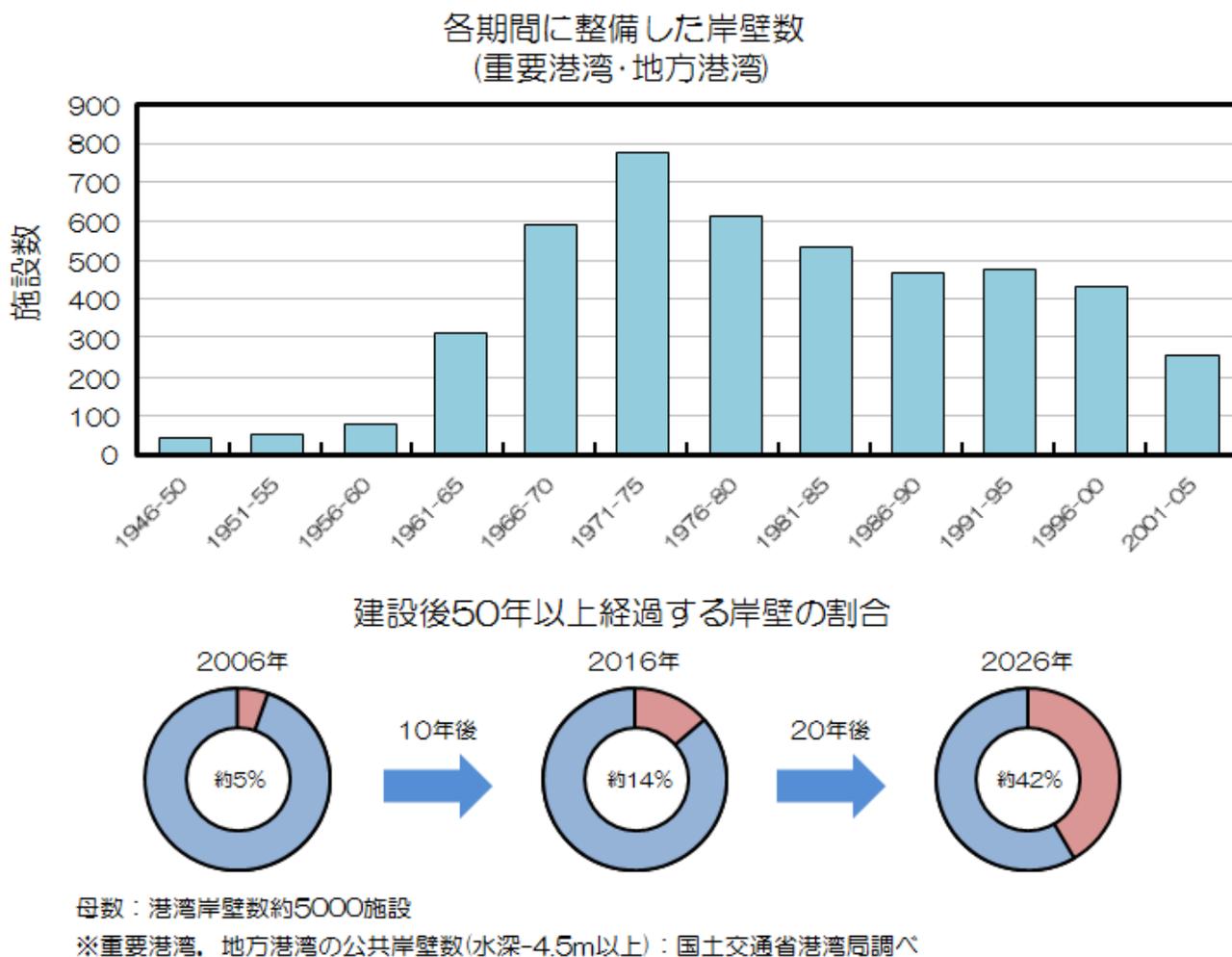


図-1.1 岸壁の整備時期と老朽化の進展<sup>2)</sup>

港湾施設は海洋に面するため、鋼製部材や鉄筋コンクリート部材は腐食に対して極めて厳しい環境下に置かれている。特に岸壁においては、エプロンの変形、ひび割れ、崩落や鋼管杭の破断等が生じた事例が数多く報告されている（写真-1.1）。この原因の多くは、飛沫・干満帯や海中部の鋼材腐食、内部鉄筋の腐食を起因とするコンクリート劣化による強度低下、破損であり、構造物の劣化・損傷による港湾施設の機能低下が顕在化してきている。



(a) 港湾鋼構造物

(平均干潮面直下で生じる集中腐食・腐食孔が鋼管杭の内面まで達しており、座屈する危険性が高い。)



(b) 港湾コンクリート構造物

(栈橋内面の床版部のかぶりコンクリートが剥落している。塩分浸透による内部鉄筋の腐食が原因。)

#### 写真-1.1 港湾施設の腐食劣化事例

このような港湾施設の腐食劣化に対し、電気防食（カソード防食）は極めて有効な防食方法である。日本国内の港湾施設に対し、初めて電気防食が適用されたのは、1953年の尼崎港防潮堤の水門扉である。当時は外部電源方式と流電陽極方式（マグネシウム合金陽極）との併用であったが、アルミニウム合金陽極の開発を機に流電陽極方式が急速に普及していった。1976年には運輸省（現国土交通省）において、新設の港湾鋼構造物に対する電気防食の適用が設計基準に明記され、現在では鋼矢板や鋼管杭などの海中部における防食法の主流となっている<sup>3)</sup>。また、塩害が社会問題となった1980年代半ばには、港湾コンクリート構造物に対しても電気防食が適用されるようになった<sup>4)</sup>。電気防食は、コンクリート構造物の塩害対策に最も有効な手法として米国だけでなく日本国内でも認知されており、適

用実績も1994年には56,000m<sup>2</sup>であったのが<sup>5)</sup>，2008年には約3倍の178,000m<sup>2</sup>まで広がっている<sup>6)</sup>。

厳しい財政状況の中，限られた予算で成長力の強化と安全・安心で質の高い国民生活の構築を実現していくためには，今までに蓄積された膨大な港湾ストックを徹底的に活用していくことが重要であり，今後の港湾施設の老朽化の進展，維持・修繕・更新費の増大に備え，ライフサイクルコストの低減や更新需要の平準化を図るとともに，港湾施設の安全性の確保のため，構造物の劣化・損傷による性能の低下を事前に防止し，戦略的に維持管理を行うことが求められている。

このような背景から，港湾施設の計画的かつ適切な維持管理を推進するため，平成19年に「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」が改正され，これまでの設計手法が仕様規定型から性能規定型に移行されることになった。この改正により，要求性能を満足すれば多様な設計法や工法を適用することが可能となったが，一方で，要求性能を照査する際にそれぞれの性能に対し適切に評価することが必要となった。

港湾鋼構造物における電気防食では，防食対象物の電位によって防食効果の判定が行われている。電位は防食状態を的確に示しており，また測定も容易にできるため，非常に優れた点検指標である。一方で，電気防食システムの寿命推定をする際には，海中に設置してある犠牲陽極の消耗量を調査する必要があるが，その調査費用は非常に高く，調査回数に限られている。更新コストの平準化を図るためには，集中する更新時期を分散する必要がある。そのためには電気防食システムの寿命を定期的に把握し，計画的に更新を行う必要がある。そのためには，低コストで簡易な寿命予測手法の確立と更新設計手法の整備が不可欠である。

港湾コンクリート構造物においては，様々な環境に電気防食が適用されているが，近年，湿潤環境下である干満帯において，従来の電位シフト基準によって防食判定ができないケースが報告されるようになってきた<sup>7)-8)</sup>。一方，大気環境下においては，電気防食の副次的効果により，従来よりも少ない防食電流で防食効果が得られることを示す報告も出ている<sup>9)-11)</sup>。現行の防食基準は，コンクリート構造物への電気防食の適用実績が少なかった頃に採用されており，設計手法も含めて見直す時期に来ていると考えられる。

以上の状況に鑑み本研究では，港湾施設に対する電気防食法の維持管理上の問題点を，材料上の観点から鋼構造物とコンクリート構造物に分けて抽出し，性能判定基準や設計手法について検討を行ったものである。

## 1.2 論文の構成

港湾施設に設置されている電気防食システムを長期にわたり経済的、効率的かつ適正に維持管理して行くために、海洋環境下における電気防食システムの諸特性を把握し、鋼構造物の維持管理手法とコンクリート構造物の電気防食効果の判定手法について検討することが本論文の目的である。この目的を達成すべく、以下の検討を行った。本論文の構成を図-1.2に示す。

第1章の【序論】では、日本国内の港湾施設の劣化状況と維持管理の必要性について述べ、本研究の背景および目的を示した。

第2章の【既往の研究】では、はじめに海水環境下における鉄の腐食メカニズムとコンクリート構造物の塩害劣化メカニズムを示し、電気防食法の理論について説明を行った。さらに、港湾鋼構造物における流電陽極方式電気防食の維持管理手法、港湾コンクリート構造物における電気防食効果の判定手法について既往の研究と問題点を示し、本研究の目的を明確にした。以上のことから、本論文では港湾施設を鋼構造物とコンクリート構造物に区分けし、各々に対して電気防食における維持管理上の課題について明らかにした。

第3章では、港湾鋼構造物における流電陽極方式電気防食の維持管理手法について検討した。はじめに電気防食システムの耐用年数を決定している犠牲陽極の寿命の評価方法について、実構造物データをもとに検討し、これまでの質量測定法に代わる新たな推定手法の提案を行った。続いて、犠牲陽極の更新設計手法について検討し、新しい設計手法の提案を行うとともに、実構造物試験において検証試験を実施した。

第4章では、港湾コンクリート構造物における電気防食効果の判定手法について検討した。コンクリート中鉄筋の腐食が進行している施設において電気防食を適用した際、通電初期において電気防食基準（100mVシフト基準）を満足しないことがあるが、そのまま通電を継続すると、経時的に防食基準を満足するケースが報告されている。この現象について、メカニズムを考察するとともに、経時的な鉄筋表面の環境変化を数値シミュレーションによって解析し、新たな設計手法を提案した。また、高湿潤環境下においても、通電初期に100mVシフト基準を満足しないことがある。この現象を明らかにするために、飛沫・干満帯を模擬した環境下で電気防食試験を行い、電気防食基準の検討を行った。

第5章【結論】では，第3章から第4章までに得られた結論を取りまとめた。

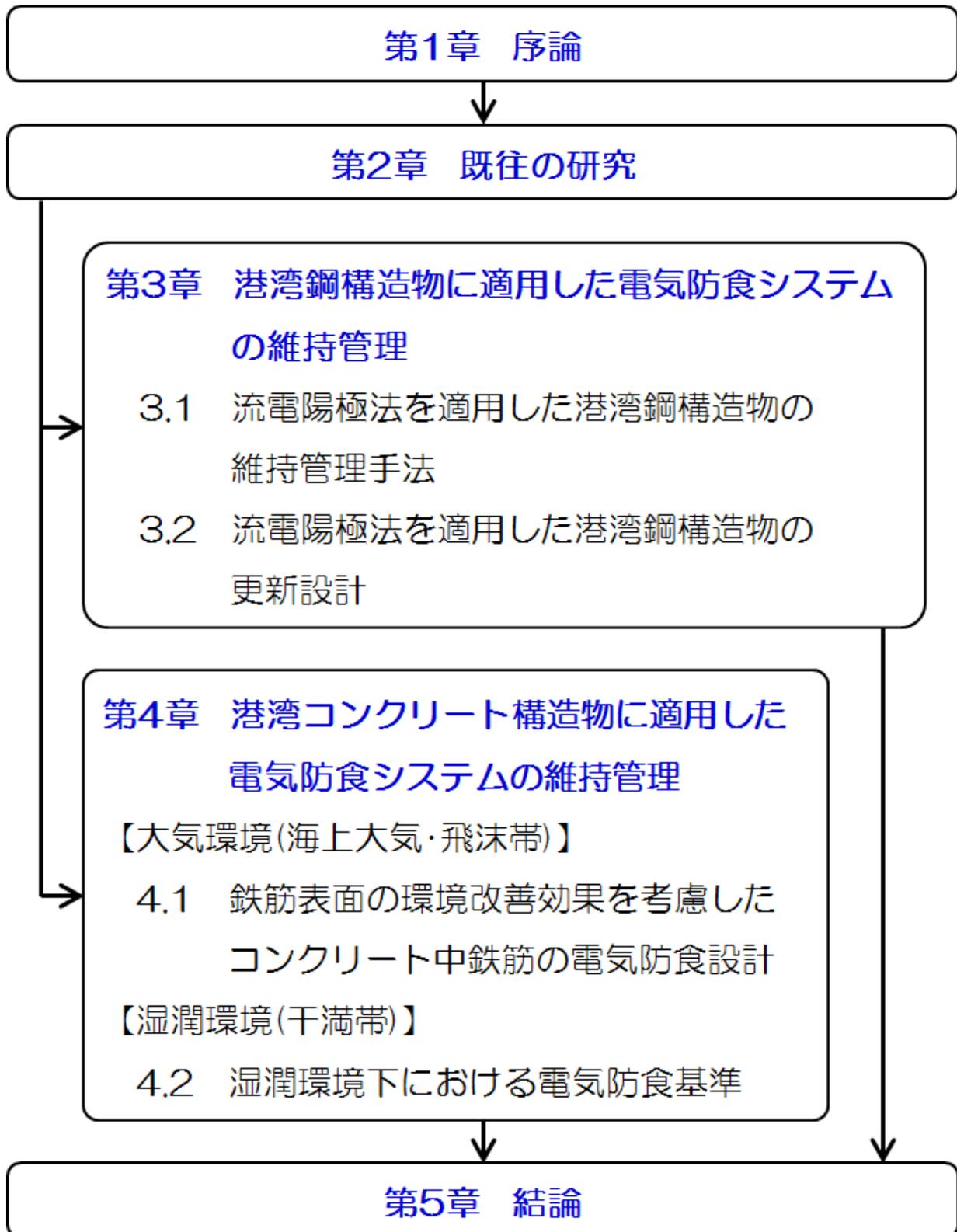


図-1.2 論文の構成

### 1.3 参考文献

- 1) 富田幸晴：港湾施設の戦略的維持管理について，建設マネジメント技術，No.3，2009
- 2) 国土交通省港湾局：港湾のストックマネジメント，マリンボイス 21，Vol.276，2010
- 3) 柏木達夫：電気防食の歴史変遷について，防錆管理，Vol.54，No.1，2010
- 4) (社)土木学会，コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会），p1.（2009）
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，p249，1994
- 6) 電気化学的防食工法研究会：総会資料，2008
- 7) 田代賢吉，細田喜子，山本 悟，石井浩司，関 博：湿潤環境を考慮したコンクリート部材の電気防食基準に関する研究，材料と環境2009講演集，D-207，2009
- 8) 篠田吉央，望月紀保，高久豊広，小林浩之：湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，p1157～1162，2011
- 9) 高久豊広，元売正美，菅野幹男：ソーラーパネルと導電性モルタルを用いた栈橋上部工への電気防食適用事例，材料と環境2008講演集，C-114，2008
- 10) 高久豊広，望月紀保，仲谷伸人：電気防食されたコンクリート中鉄筋の自然電位貴化現象に関する検討，材料と環境2009講演集，D-206，2009
- 11) 田中一弘，岩崎 隆：道路橋に適用したアルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の施工事例について，材料と環境2011講演集，C-112，2011
- 12) 日本エルガード協会編，「コンクリート構造物の電気防食 Q&A」，山海堂，p25（2004）

## 第2章 既往の研究

### 2.1 序

港湾施設は海に面しており、非常に厳しい腐食環境に曝されている。構造部材には主に鉄が使用されていることから、鉄の腐食による耐久性の低下を最小限に防ぐことが維持管理では必須である。しかしながら、潮汐や構造の影響により、各部位における腐食の度合いは大きく異なる。港湾施設に対して適切な防食対策を施すためには、鉄の腐食現象と暴露環境による影響を理解することが重要である。そこで第2章では、鉄を例として金属の腐食現象を電気化学的観点から整理した。また、防食対策の基本的な考え方について整理するとともに、本研究のメインとなる電気防食のメカニズムと電気防食方式についてまとめを行った。さらに、電気防食の維持管理手法について、港湾施設を鋼構造物とコンクリート構造物に区分し、それぞれに対して現状の問題点と既往の研究について整理した。

### 2.2 港湾鋼構造物の腐食と電気防食メカニズム

#### 2.2.1 金属の腐食現象

金属の多くは、自然界では酸化物や硫化物の形で存在しており、これらの鉱石から様々な製錬過程を経て得られるものである。鉄の場合、地殻中では鉄鉱石（酸化鉄）として存在しており、コークスを還元剤として溶鉱炉、転炉などを用いて製造される。金属の製造過程は、化学的にみると、鉱石中の酸素と金属を分離する還元反応であり、反応を進行させるためには莫大なエネルギーを必要とする。製造する際に使用したエネルギーの一部は、金属自体の中に蓄えられるため、金属はエネルギーの高い状態にある。しかしながら、自然界の変化は、エネルギーの高い状態から低い状態へと移って行く。例えば、構造物などに使用されている鋼材は、その内蔵するエネルギーを放出しつつさび（酸化鉄）へと変化する傾向を持つ。これが金属の腐食である。図-2.1は、鉄鉱石、鉄、さびのエネルギー関係を模式的に示している。金属が腐食するという事は、金属が酸素と結合（酸化）して、もとの状態（鉱石）へと戻ることである。

腐食は、金属が環境の作用によって化学的に侵食される現象である。腐食が起きるためには、溶液の水が存在するか、あるいは高温であることが少なくとも必要である。高温環境では、環境物質と直接化学反応して腐食が進行するのに対し、常温環境では水が存在する場合に電気化学反応によって腐食が進行する<sup>2)</sup>。前者を『乾食』、後者を『湿食』と言い、港湾鋼構造物で生じる腐食は、『湿食』に分類される。

金属の腐食が電池作用によって生じることを提唱したのは、イタリアの生理学者 Galvani (1790年) である。Galvani は、異種金属を接触させることによってその事実を見出した。

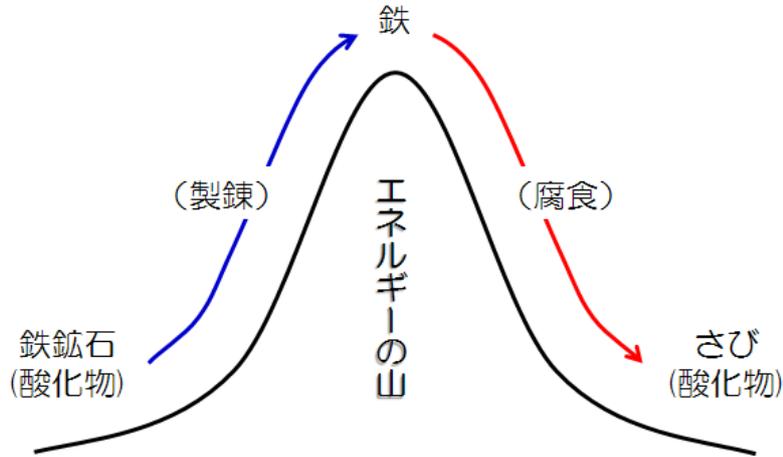


図-2.1 鉄鉱石，鉄，さびのエネルギー関係<sup>1)</sup>

そして、単一金属上にアノードとカソードが生起し、その電池作用によって腐食が進行すること（混成電位説）を Wagner と Traud (1938年) が証明した。

ここでは、中性環境で生じている鉄の腐食を例として、腐食のメカニズムを記述する。鉄の表面で生じている電気化学反応の模式図を図-2.2 に示す。

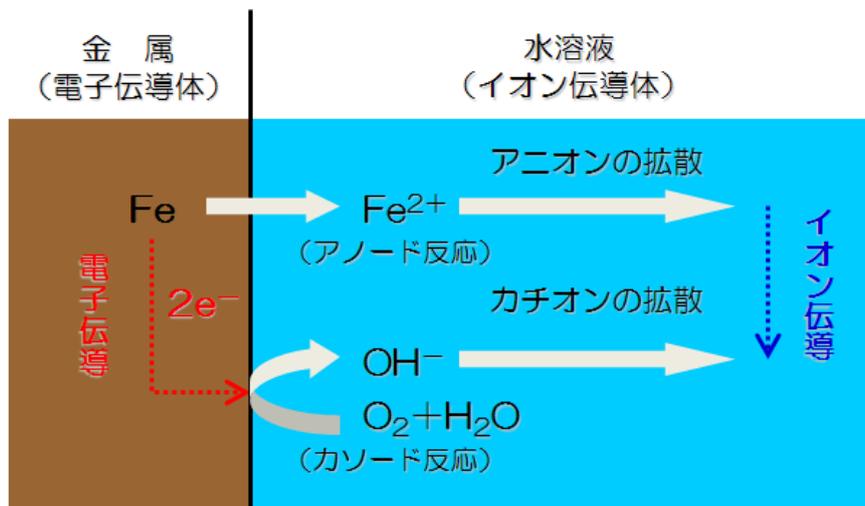
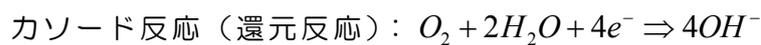
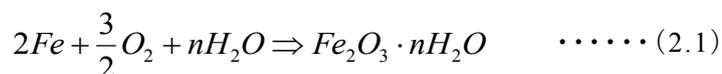


図-2.2 鉄の表面で生じている電気化学反応の模式図

水に浸漬された鉄の表面では、無数の電池（腐食電池または局部電池）が形成され、アノードとカソードが生じている。腐食反応の始まりは、鉄原子が結晶格子を離れ、水中に鉄イオン（ $\text{Fe}^{2+}$ ）として移行する過程であり、鉄 1 原子当たり 2 個の電子を金属に遊離する。これをアノード反応（酸化反応）と呼ぶ。しかしながら、この反応は単独では起こらず、電気的中性条件により対の反応が必要である。すなわち、水中の溶存酸素は鉄表面上で電子を受け取り、自身は還元されて水酸化物イオン（ $\text{OH}^-$ ）を生成する。これをカソード反応（還元反応）と呼ぶ。アノードとカソードが、時間の経過とともに位置を交換していく場合には均一腐食となり、固定される場合には孔食などの局部腐食となる<sup>3)</sup>。

鉄が水中で腐食する過程の総反応式は (2.1) 式で表される。



アノード反応とカソード反応が、同一金属上で対になって進行していることを裏付ける実験例を以下に示す<sup>4)</sup>。

3%食塩水を含有する寒天ゲル中に折り曲げた 1 本の釘を浸漬する。食塩水中にフェノールフタレインとフェリシアン化カリウムを添加しておくこと、図-2.3 のように青色部分と赤色部分が出現する。青色部分は  $\text{Fe}^{2+}$  の存在、赤色部分はアルカリ性であることを証明するものであるが、これは、腐食反応が電気化学反応で進行していることを示している。

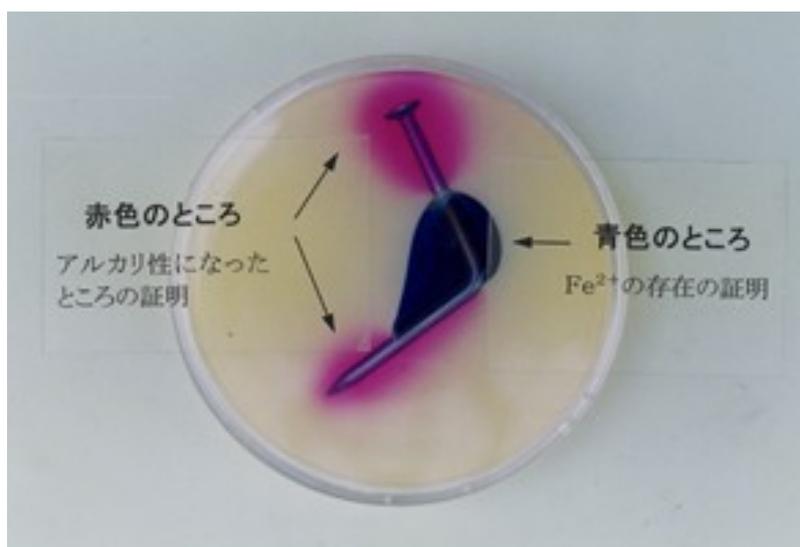


図-2.3 アノードとカソードの存在

## 2.2.2 港湾鋼構造物の腐食

けい船岸には、コンクリートおよび炭素鋼が用いられている<sup>5)</sup>。我が国の港湾施設は高度経済成長期に建設されたものも多いが、短期間で港湾整備を行うために施工工期の短い鋼構造物が多用されている。

港湾鋼構造物の腐食環境は、図-2.4 に示すように、海上大気中、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部の環境に分類され、環境によって腐食の程度が異なる。最も腐食速度が大きいのは飛沫帯であり、0.3mm/yにも達する<sup>6)</sup>。飛沫帯は海水の飛沫を絶えず受けることから、鋼材表面には常に薄い水膜が存在し、酸素の供給量が非常に多い。また、平均干潮面直下では、海洋鋼構造物に特有の腐食が生じる。これは集中腐食と呼ばれ、環境差によるマクロセル腐食である<sup>7)-9)</sup>。平均水面から平均干満帯がカソードとして働き、平均水面直下がアノードとなって激しい腐食を生じる。

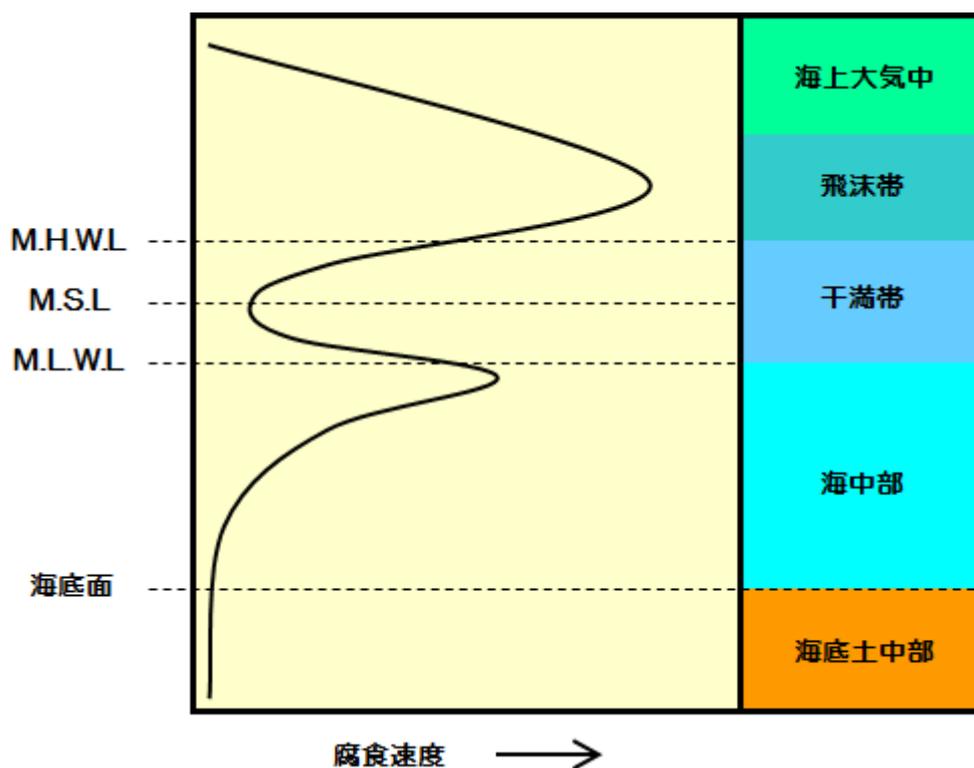


図-2.4 海洋鋼構造物の腐食傾向<sup>6)</sup>

松岡らは、この集中腐食のメカニズムを実験によって検討し、以下のように説明している<sup>10)</sup>。干潮時および満潮時の鋼管杭表面で生じているマクロセル電流の様子を図-2.5に示す。満潮時には、空気に触れた干満帯が貴な電位を示すようになり、干満部をカソード、

L.W.L 直下部を含む海中部をアノードとしたマクロセル電流が流れる。一方、干潮時には、L.W.L 直下部が卑な電位を持ち続け、より深い海中部をカソード、L.W.L 直下部をアノードとしたマクロセル電流が流れる。よって、いずれの状態も L.W.L 直下はアノードとなるため、干満帯と海中部の両方の影響を受けて腐食が極大値を示す。L.W.L 直下がアノードとなり続ける原因は、さび層のイオン透過抵抗が関係しているものと思われる。L.W.L 直下部は、満潮時に干満部とのマクロセル形成によってアノード分極するが、干潮時になってもさび層によって溶液側へのイオンの拡散が抑制されるために復極が鈍くなり、自然電位に戻るのに時間を要することが原因とされている。

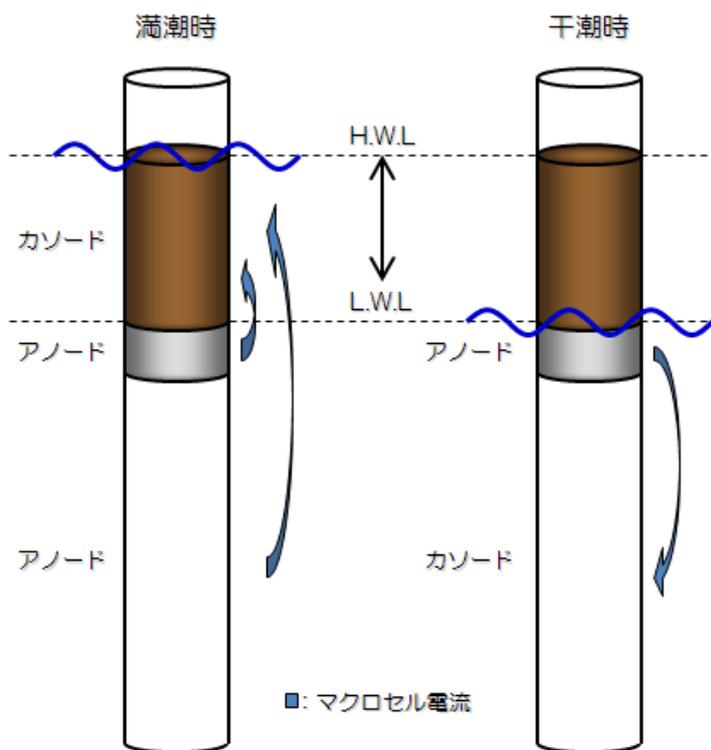


図-2.5 海洋に浸漬された鋼管のマクロセル電流の変化の模式図

### 2.2.3 港湾鋼構造物における電気防食メカニズム

金属の腐食現象は酸化反応であり、かつ電気化学反応であるから、電極電位をコントロールすることによって腐食反応速度を制御することができる。電気防食は、こうした考え方に基づいて行なわれる防食方法であり、腐食環境下に陽極（アノード）を置き、防食対象物との間で直流の通電を行なうことによって、電極電位をコントロールしようというものである。

図-2.6 は鉄の電位-pH 図であり，腐食の起り得ない領域（不感態領域），腐食の進行する領域（腐食域），および保護皮膜に覆われて腐食の進行しない領域（不動態域）を表している．この図から腐食域 A に存在する鉄を防食する方法として，図に示すような 3 通りの方法があるが，電極電位をコントロールして防食する方法（電気防食法）としては，1 または 2 が該当する．

すなわち 1 は，電極電位を低電位方向に変化させ，材料を不活性域に置くことを目的としたもの，2 は電極電位を高電位方向に変化させ，材料を不動態化させることを目的としたものである．前者をカソード防食法，後者をアノード防食法というが，アノード防食の場合，適用が特定の環境条件に限られるばかりでなく，腐食を促進してしまうという危険性も含んでいるため実用例が少なく，通常，電気防食といった場合はカソード防食法を指す．カソード防食法は，比較的簡単な設備で広い領域を効果的に防食できるため，港湾構造物，各種パイプライン，熱交換器，船舶，基礎杭などの大型構造物を中心に広く使用されている．

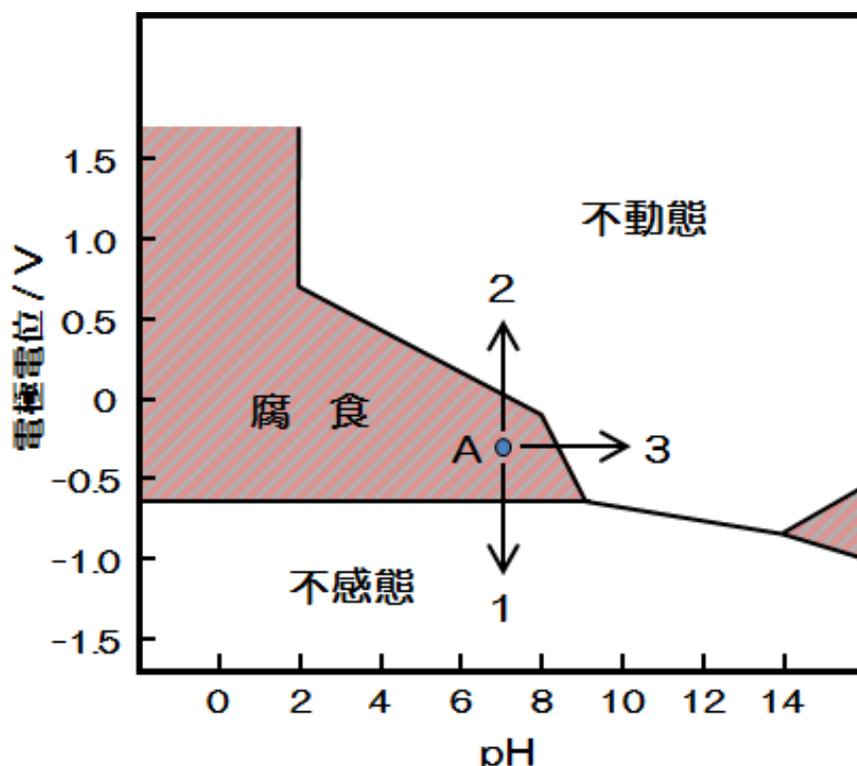


図-2.6 鉄の電位-pH 図<sup>11)</sup>

一方，速度論的には電位/電流密度曲線（分極曲線）を用いて電気防食メカニズムを説明

することができる。ここで、図-2.7 の模式図を用いて分極曲線の説明をする。図中の  $A_{in}$  と  $C_{in}$  は中性環境下における炭素鋼の内部アノード分極曲線、内部カソード分極曲線（破線）であり、 $A_{out}$  と  $C_{out}$  は外部アノード分極曲線、外部カソード分極曲線（実線）である。内部分極曲線とは、各々の平衡電位から示された電位/電流密度曲線であるのに対し、外部分極曲線は、腐食電位（自然電位）から計測された電位/電流密度曲線である。外部分極曲線に示される電流 ( $i_{out}$ ) は、カソード電流を正にとると、内部分極曲線に示されるカソード電流 ( $i_{in,c}$ ) とアノード電流 ( $i_{in,a}$ ) の差 ( $i_{in,c} - i_{in,a}$ ) として、電流計で計測することができる。通常、我々が計測する分極曲線はこの外部分極曲線である。

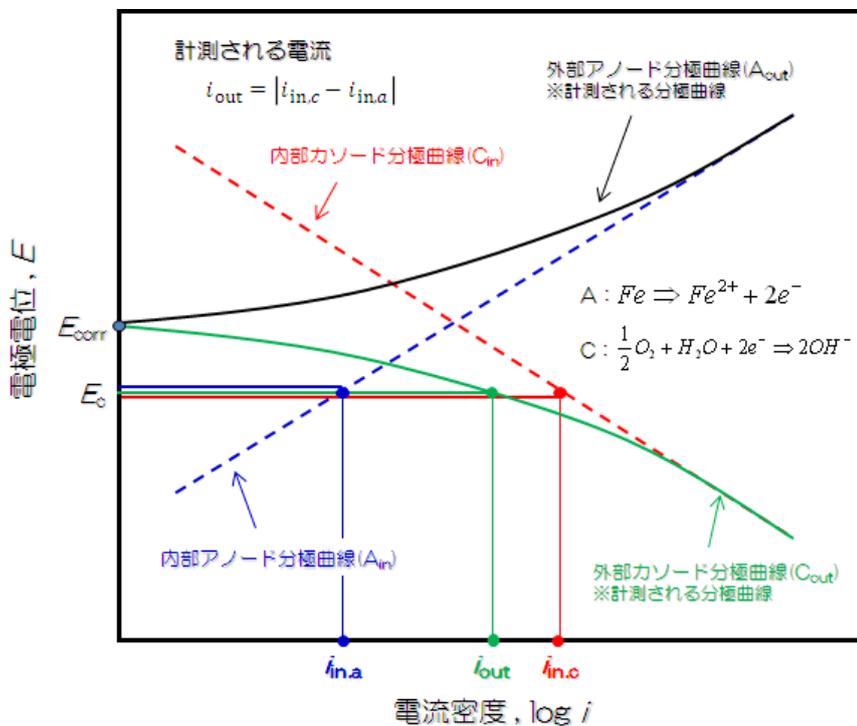


図-2.7 電位/電流密度曲線（分極曲線）の模式図

図-2.8 は、溶存酸素の拡散で腐食が律速される系での炭素鋼の内部（破線で示す）および外部（実線で示す）のアノード分極曲線およびカソード分極曲線の模式図である。外部カソード分極曲線(c2)からも分かるように、電極電位を低電位方向に移動させるためには、目的とする対象物に電流を流入させればよい。例えば、 $i_{p1}$  の電流密度でカソード電流を通電したとすると、電極電位は  $E_{p1}$  になり、その時の腐食速度は  $i_{corr}$  から  $i_{corr1}$  に低減する。さらに、電流密度を増加し  $i_p$  にまですると電極電位は  $E_p$  となり、腐食速度はゼロとなる。 $E_p$  以下の電極電位では、金属の腐食は完全に停止し、 $E_p$  はその上限の電極電位ということ

になる。カソード防食法の原理上は、 $E_p$ を防食電位、 $E_p$ を維持するのに必要な電流密度  $i_p$ を防食電流密度という。従って、与えられた環境下における防食対象物のアノードおよびカソードの分極特性が把握できるならば、電気防食条件（防食電位、防食電流密度）を推定することは可能となる。

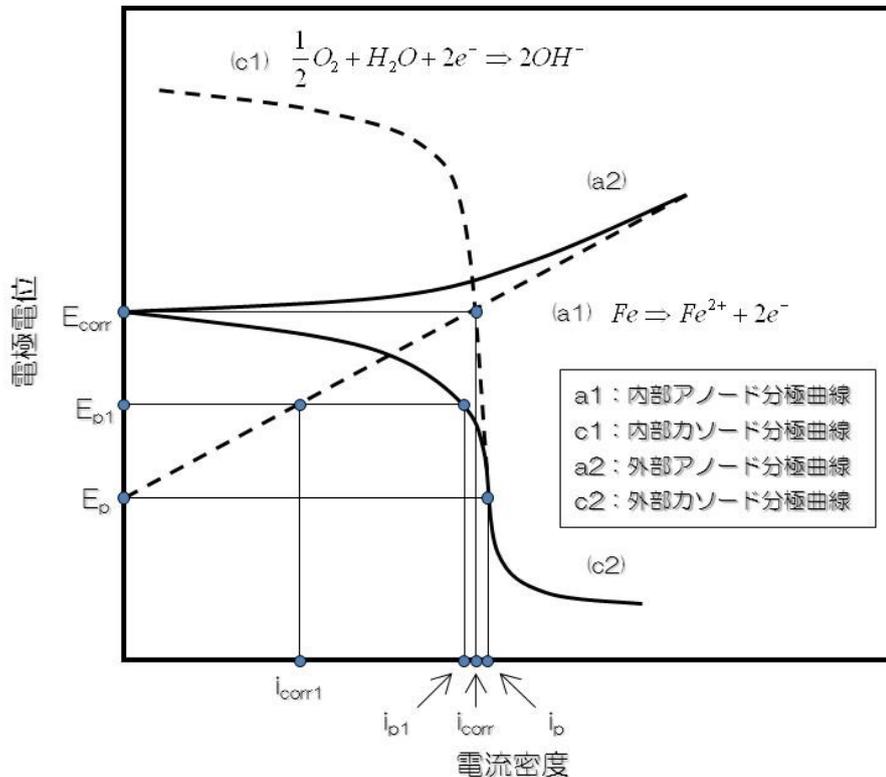
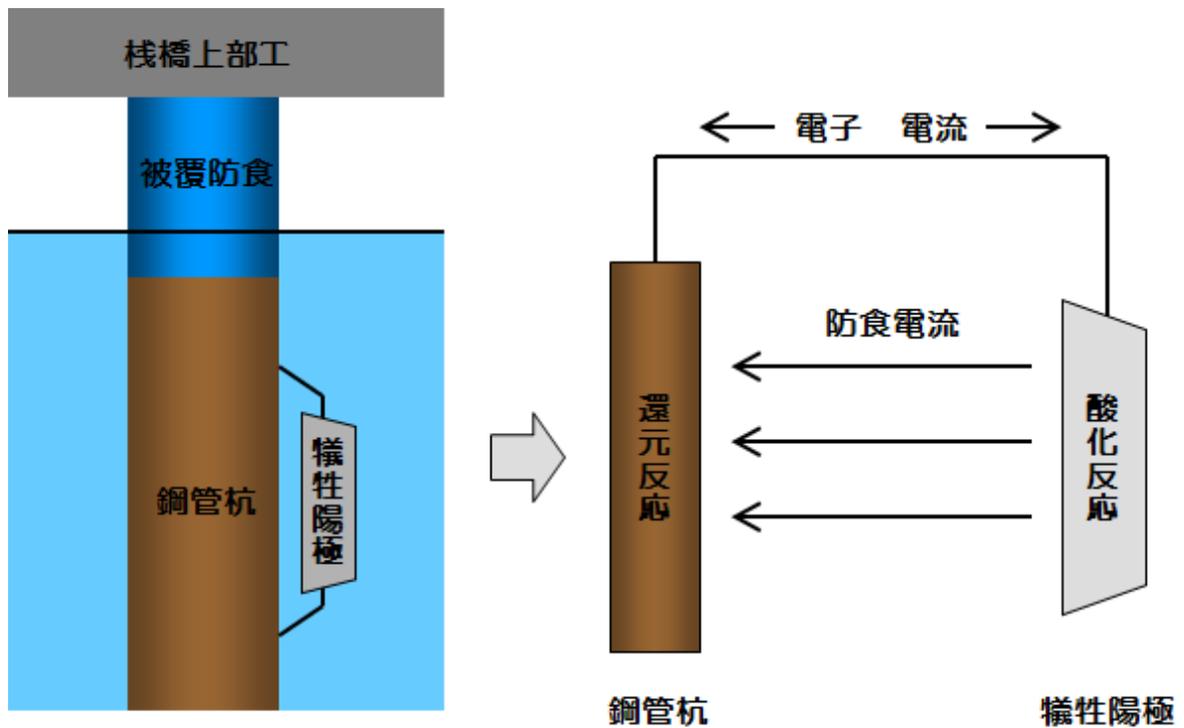


図-2.8 カソード防食法の原理図<sup>12)</sup>

### 【電気防食方式】

電気防食方式には外部電源方式と流電陽極方式があるが、本項では港湾鋼構造物の海中部および海底土中部に適用される流電陽極方式について述べる。

腐食環境下で、電極電位が低い金属と高い金属を電氣的に短絡させると、電池の原理により、溶液側を電位の低い金属から高い金属に向かって直流電流が流れるため、電位の高い金属は低い金属によって電気防食作用を受ける。このようにガルバニックカップル（異種金属の接触）を利用して電気防食する方法を流電陽極方式（図-2.9）といい、電位が低い金属のことを犠牲陽極と呼ぶ。この語源は、陽極自身が溶解（アノード反応）することによって金属を防食することに由来する。



(a) 栈橋鋼管杭への適用例

(b) 概念図

図-2.9 流電陽極方式の適用例と概念図<sup>13)</sup>

犠牲陽極に求められる要件は下記の通りである。

- ① 使用期間を通じて、低電位を維持して被防食体に対し有効な電位差を保つこと。
- ② 発生電気量が大きいこと。
- ③ 溶解が均一で表面に固着性被覆を生じないこと。
- ④ 適度な強度を有すること。
- ⑤ 環境を汚染しないこと。
- ⑥ 経済性を備えること。

犠牲陽極としては、アルミニウム合金陽極、亜鉛合金陽極、マグネシウム合金陽極があり、適用する環境によって使い分けがされている。港湾鋼構造物ではアルミニウム合金陽極が使用される。犠牲陽極の電気化学的特性を表-2.1に示す。

表-2.1 犠牲陽極の電気化学的特性<sup>14)</sup>

	アルミニウム系	亜鉛系	マグネシウム系
閉路電位 (V vs. Ag/AgCl [SW])	-1.06	-1.00	-1.45
有効電位差 (V)	0.25	0.20	0.65
有効電気量 (A·h/kg)	2700~2900	820	2210
適用環境	海水中 海底土中	海水中	土壌中 淡水中

流電陽極方式による電気防食系では、以下の関係式が成立する。

$$\phi_a^M - \phi_c^M = (\phi_a^M - \phi_a^S) + (\phi_a^S - \phi_c^S) + (\phi_c^S - \phi_c^M) \dots\dots (2.2)$$

ここで、 $\phi_a^M$  : 犠牲陽極の内部電位       $\phi_c^M$  : 被防食体の金属内部電位  
 $\phi_a^S$  : 犠牲陽極近傍の溶液内部電位       $\phi_c^S$  : 被防食体近傍の溶液内部電位

同一照合電極で電極電位を測定しているものとし、アノード電位を  $E_a$ 、カソード電位を  $E_c$ 、通電電流を  $I$ 、極間抵抗を  $R_s$  をすると、

$$\begin{aligned} \phi_a^M - \phi_a^S &= E_a \\ \phi_c^M - \phi_c^S &= E_c \\ \phi_a^S - \phi_c^S &= IR_s \end{aligned}$$

とおくことができ、(2.2) 式は次式のように整理できる。

$$E_c - E_a = IR_s \dots\dots (2.3)$$

さらに、アノード分極特性、カソード分極特性に直線分極を適用すると、

$$\begin{aligned} (E_c^* - h_c \cdot \frac{I}{S_c}) - (E_a^* + h_a \cdot \frac{I}{S_a}) &= IR_s \\ I &= \frac{E_c^* - E_a^*}{\frac{h_a}{S_a} + R_s + \frac{h_c}{S_c}} \dots\dots (2.4) \end{aligned}$$

ただし、 $E_a^*$  : アノード自然電位       $E_c^*$  : カソード自然電位  
 $h_a$  : アノード分極抵抗       $h_c$  : カソード分極抵抗  
 $S_a$  : アノード表面積       $S_c$  : カソード表面積

電気防食する上での最適条件とは、少ない電圧で大きな電流を得ることができ、か

つ陰極の防食電流が小さいことである。こうした条件を満足させるために必要な条件を図-2.10より考察すると、

- ①犠牲陽極のアノード分極抵抗を小さくする。
- ②被防食体のカソード分極抵抗を大きくする。
- ③環境の抵抗が小さいこと。

が必要であることがわかる。従って、実際の電気防食においては、上記条件を満たすために種々の工夫がなされている。

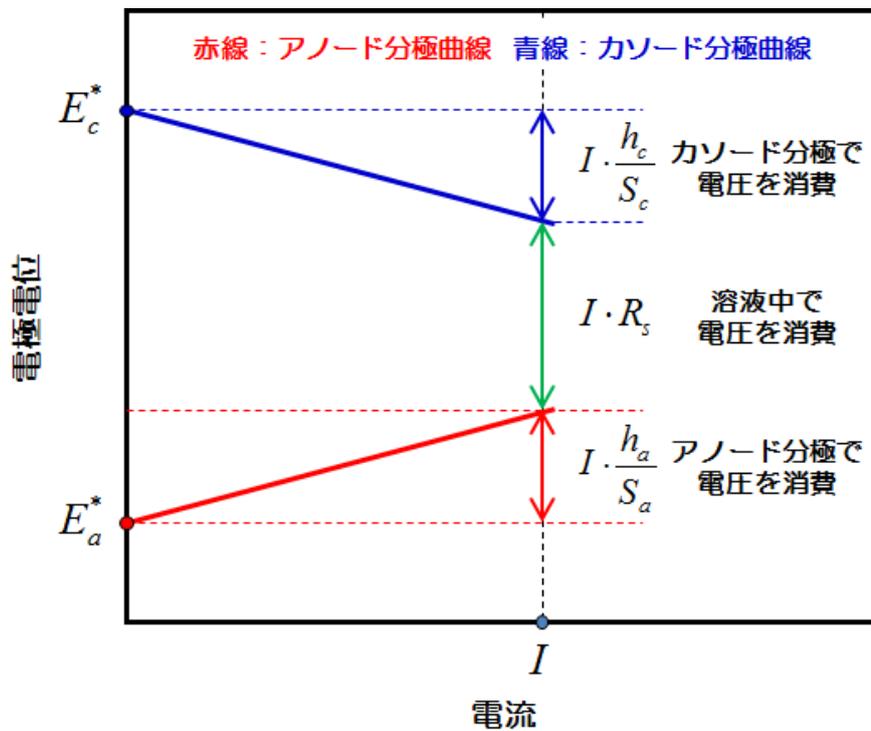


図-2.10 流電陽極方式における分極曲線模式図<sup>15)</sup>

### 2.3 港湾鋼構造物の電気防食設計

港湾構造物の電気防食設計の概要について述べる。なお、電気防食設計の詳細については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>16)</sup>（以後、港湾基準と記す）に詳しく記述されている。

流電陽極方式による電気防食系においては、(2.5)式が成立する。

$$I_a = \frac{E_c - E_a}{R_{sa}} \dots\dots (2.5)$$

$I_a$  : 陽極発生電流     $E_a$  : アノード電位     $E_c$  : カソード電位     $R_{sa}$  : 陽極1本当たりの接水抵抗

港湾基準では、 $E_c - E_a$  を有効電位差  $\Delta E$  で表しており、0.25V が用いられている。さらに回路抵抗  $R_s$  は、アノード接水抵抗  $R_{sa}$ 、環境抵抗  $R_s'$ 、カソード接水抵抗  $R_{sc}$  の和で表されるが、海水環境中の電気防食設計では、 $R_s \doteq R_{sa}$  ( $R_{sa} \gg R_s', R_{sc}$ ) とみなしている。なお、アノード接水抵抗とは、陽極形状と環境抵抗率によって定まる値である。アノード電位  $E_a$  はアルミニウム合金陽極の場合、 $-1050\text{mV vs. Ag/AgCl[SW]}$  を用いる。

施設を防食するのに必要な電流（所要防食電流  $I$ ）は、(2.6) 式によって求めることができる。

$$I = i_p \times S_c \quad \dots\dots(2.6)$$

$I$  : 所要防食電流       $i_p$  : 設計防食電流密度       $S_c$  : 防食対象面積

よって、施設を防食するのに必要な陽極本数  $N$  は (2.7) 式によって求めることができ、電流分布を考慮しながら均等に配置される。

$$N = \frac{I}{I_a} \quad \dots\dots(2.7)$$

近年、電気防食特性を評価する手法として、 $E_c - i_c$  プロットが用いられている<sup>17)-18)</sup>。この手法は、カソード電位／カソード電流密度平面上にデータをプロットし、その形状を基に犠牲陽極のアノード特性および被防食体のカソード特性を評価するものである。この考え方は、W.Wang ら<sup>19)</sup> によって初めて導入された。すなわち、(2.5) 式の陽極発生電流を陽極 1 本が担う防食対象面積  $S_c'$  で除すと、設計防食電流密度  $i_c$  が得られる ((2.8) 式)。

$$i_c = \frac{I_a}{S_c'} = \frac{E_c - E_a}{R_{sa}} \cdot \frac{1}{S_c'} \quad \dots\dots(2.8)$$

さらに、(2.8) 式は (2.9) 式のように書き換えることができる。

$$E_c = i_c \cdot S_c' \cdot R_{sa} + E_a \quad \dots\dots(2.9)$$

(2.9) 式は、傾き  $S_c' \cdot R_{sa}$ 、切片  $E_a$  の一次直線であり、 $E_c - i_c$  平面上に示すと、図-2.11 となる。

設計防食電流密度,  $i_p$  : 100mA/m<sup>2</sup>の場合

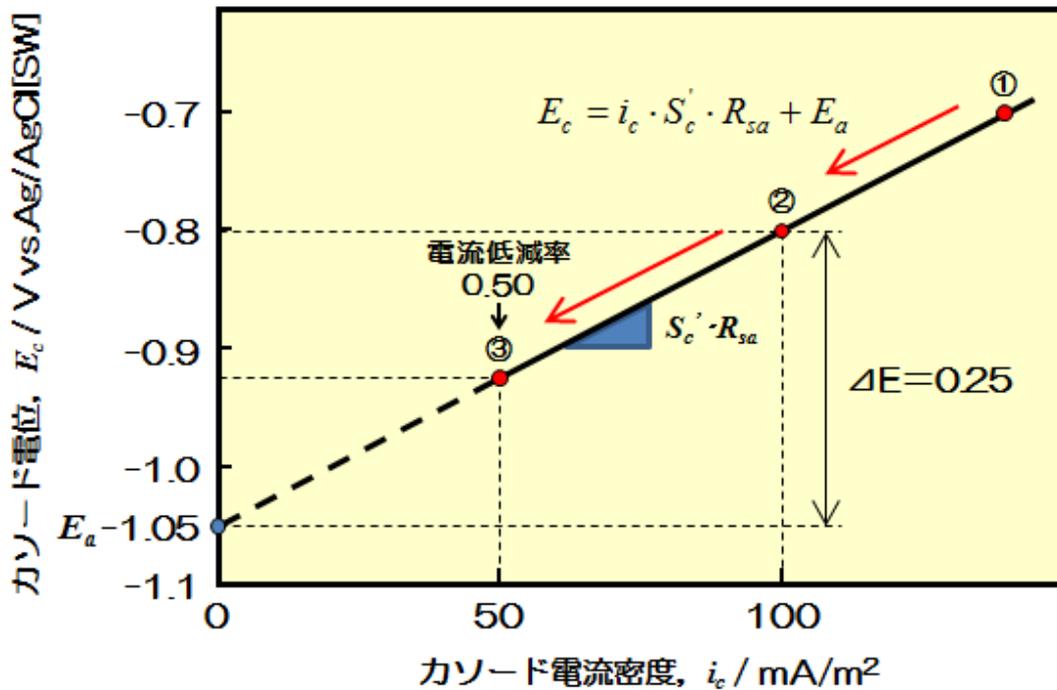


図-2.11  $E_c-i_c$  プロットの模式図

-800mV vs.Ag/AgCl[SW]に対するカソード電流密度が設計防食電流密度（図-2.11 では100mA/m<sup>2</sup>）となる。流電陽極方式の場合、犠牲陽極設置直後のプロットは高電流密度域（①）にあるが、時間の経過とともにカソード電流密度は低減するため、プロットは低電流密度域（①⇒②⇒③）に向かって変化する。この原因は、エレクトロコーティングの析出によるカソード分極抵抗の増大であり、(2.4)式によって確認することができる。

本手法は、海水環境下の電気防食特性の評価に用いられてきたが、最近では淡水環境下やコンクリート環境下においても用いられている。

## 2.4 流電陽極法の維持管理方法

高度経済成長期の建設ラッシュにより、電気防食の適用実績も右肩上がりに増加していった。その時代に建設された港湾施設の電気防食システムの更新時期が5～10年後に集中してやってくる。しかしながら、長引く経済不況で国家財政が苦しい現状では、更新時期を迎えた全ての施設に対して電気防食システムの更新を行うのは困難な状況である。限られた予算の中で効率よくシステムを更新していくためには、施設の状態を的確に把握し、重要度の高い施設から計画的に更新を進めていく必要がある。それを実現するためには、

定期的な点検と調査が不可欠である。

かつての港湾施設の電気防食には外部電源法が適用されていたが、アルミニウム系の犠牲陽極が開発されてからはメンテナンスをほとんど必要としないという理由から、流電陽極法が急速に普及していった。しかしながら、近年電気防食システムが設計寿命に近づいた際に行われる詳細調査において、犠牲陽極が予定よりも消耗していなかったり、反対に予定よりも早期に犠牲陽極が消耗し、防食システムが機能していなかったケースが報告されるようになってきた。前者の場合、システム寿命が設計寿命を上回っているので防食上問題とならないが、後者の場合には、腐食劣化が進行している状態であるため、早急な防食対策が必要である。

現在の電気防食の設計技術では、寿命設計に高い精度は期待できない。その理由は以下に示す通りである。

- ①港湾施設における流電陽極法の歴史は短く、実構造物のデータが十分ではない。
- ②陽極発生電流は、施設の状況（海底面の変動）や水質（河川の流入、生活排水による汚染）に大きく左右される。
- ③陽極発生電流の低減（電流低減率）を推定する技術が確立されていない。

あらかじめ現地の環境調査を行い、環境データを設計に反映することは可能であるが、数十年先までの施設の状況や電流低減を推定するのは困難である。また、港湾基準では、耐用年数に応じて表-2.2 に示す電流低減率を規定しているが、あくまで経験に基づくものであり、誤差も大きい。よって、施設を健全な状態で長期間維持していくためには、定期的に点検を行って電気防食システムの寿命を把握し、計画的に更新していく必要がある。電気防食の効果は電位測定によって確認することができ、岸壁から照合電極を海中に落とし込むことによって港湾施設の概ねの電位測定が可能である。一方、電気防食システムの残存寿命は、犠牲陽極の消耗量（以下、陽極消耗量と記す）から推定される。陽極消耗量

表-2.2 電流低減率<sup>20)</sup>

耐用年数	電流低減率
5年	0.60
10年	0.55
15年以上	0.50

を確認する方法としては、①周長測定と②質量測定がある。しかしながら、水中に設置された犠牲陽極の消耗量を調査するためには潜水作業が必要であり、非常に高額な調査となる。非常に限られた予算の中で効率良く維持管理をしていくためには、点検コストを出来るだけ低く抑える必要があり、低コストで陽極寿命が推定できる点検手法の早期開発が望まれる。

以下、流電陽極方式電気防食システムの維持管理に関する既往の研究事例を示す。

### 【W.wang らの研究】<sup>21)</sup>

W.wang, W.H.Hartt らは、(2.9) 式を用いた電気防食特性の評価手法（スロープパラメータ法）を提案し、実験室試験および実構造物試験によって、その有用性を示した。いずれの試験においても、カソード電位／カソード電流密度平面上にプロットしたデータは、理論直線上を変化することを実証した。また、図-2.12 に示すように、実測した電気量と、実測した被防食体の電位をもとに理論式から推定した電気量は、非常に良い一致を示した。これは、施設の電位測定によって電気防食システムの残存寿命が推定できることを示唆するものである。

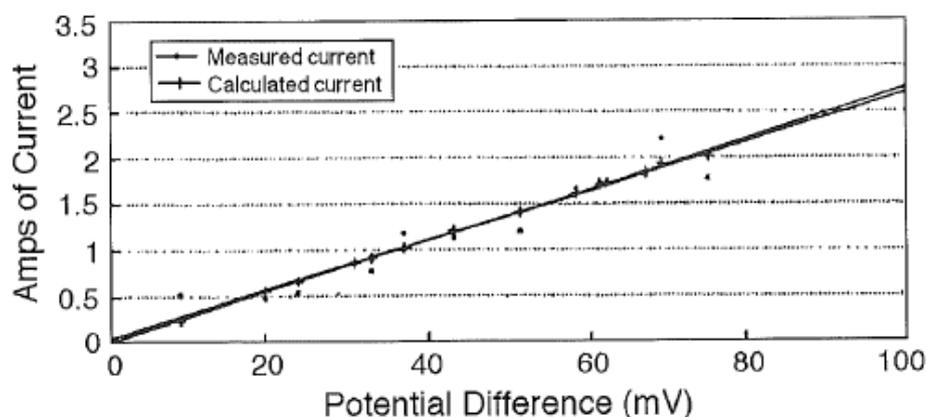


図-2.12 実測した電気量と理論式より推定した電気量

### 【若林らの研究】<sup>22)</sup>

若林らは、被防食体の電位から犠牲陽極の発生電流（以下、陽極発生電流と記す）を推定する W.Wang らの手法を導入し、実構造物試験データを用いて陽極消耗量の推定を試みた。試験は栈橋鋼管杭で行われ、シャント抵抗内蔵のアルミニウム合金陽極（以下、アルミ陽極と記す）を設置し、陽極発生電流と被防食体の電位（以下、カソード電位と記す）を連続的に計測した。陽極消耗量の推定方法は以下の通りである。

実海水環境下における流電陽極方式の電気防食系では、(2.10)式が成立する。

$$E_c - E_a = I \cdot R$$

$$E_c = I \cdot R + E_a \quad \dots (2.10)$$

$E_c$ : カソード電位  $E_a$ : アノード電位  $R$ : 極間抵抗  $I$ : 陽極発生電流

陽極発生電流とカソード電位（陰極電位）との間には直線関係が成立し、 $E_c$ - $I$ プロットはこの直線上を変動することになる。電気防食系の設計条件（ $E_a$ ,  $R$ ）が決まれば理論式（推定直線）が求まるので、カソード電位を測定することにより陽極発生電流を算出することができる。この陽極発生電流を時間積分して積算電気量を求め、有効電気量（アルミ陽極は  $2600A \cdot h/kg$ ）で除することで陽極消耗量の推定が可能となる。

図-2.13より、試験期間を通して、カソード電位と陽極発生電流の関係は、一定の直線上に沿って変化することはなく、推定直線からもズレが生じていた。実際の陽極発生電流から求めた陽極消耗量と推定直線から推定した陽極消耗量には、約1割の誤差が生じた。この原因として、極間抵抗（ここではアノード接水抵抗）の変化が考えられる。

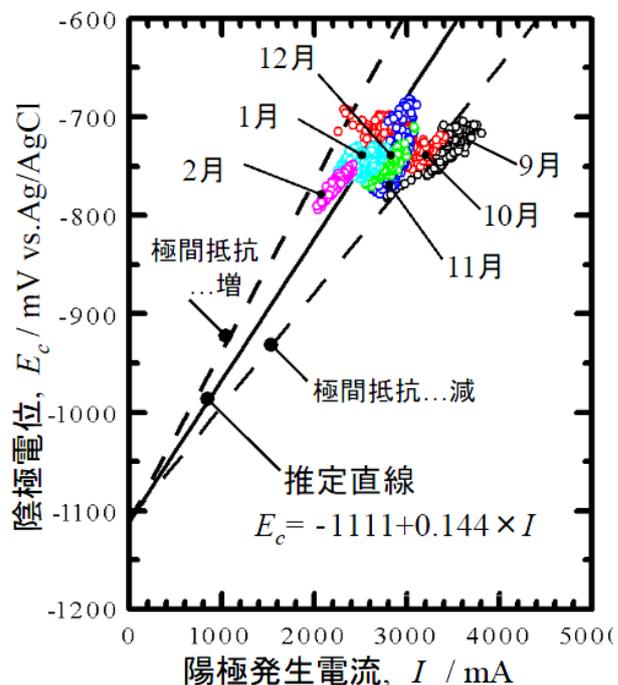


図-2.13  $E_c$ - $I$ プロット

【審良らの研究】<sup>23)-24)</sup>

審良らは、W.Wangらが提案しているスロープパラメータ法を用い、実構造物試験データを用いて電気防食特性の評価を行った。

実構造物試験は、東京湾内にあるジャケット式栈橋で行われた。防食仕様は、海中部がアルミ陽極による電気防食、飛沫・干満部（L.W.L-1.5mよりも上の部分）は、耐海水性ステンレス鋼被覆である。計測用のアルミ陽極を水深-3mと水深-12mの位置に設置して、陽極発生電流とカソード電位を連続モニタリングしており、約7年の試験データである。

ジャケット式栈橋で実施した電気防食試験の  $E_c$ - $I_a$ プロットを図-2.14に示す。試験デー

タと理論直線を比較すると、水深-12.0mの場合、通電初期の段階では、試験データの方が卑な値を示し、時間の経過と共に貴側に推移していることがわかる。また、耐海水性ステンレス鋼被覆近傍の水深-1.5mの場合は、通電初期から貴な値を示していることがわかる。耐海水性ステンレス鋼近傍の場合には、ステンレス鋼に集中的に電流が流れる。したがって、ステンレス鋼近傍ではカソードの面積が見かけ上小さくなるため、カソード近傍の電流経路内の電気抵抗  $R_c$  が無視できなくなるためである。また、いずれの水深の場合も時間の経過と共に、理論値よりも貴側に移動している傾向が認められる。この原因として、アルミ陽極の消耗に伴うアノード接水抵抗の増加、またはエレクトロコーティングの生成に伴うカソード近傍の抵抗値の増加が考えられる。

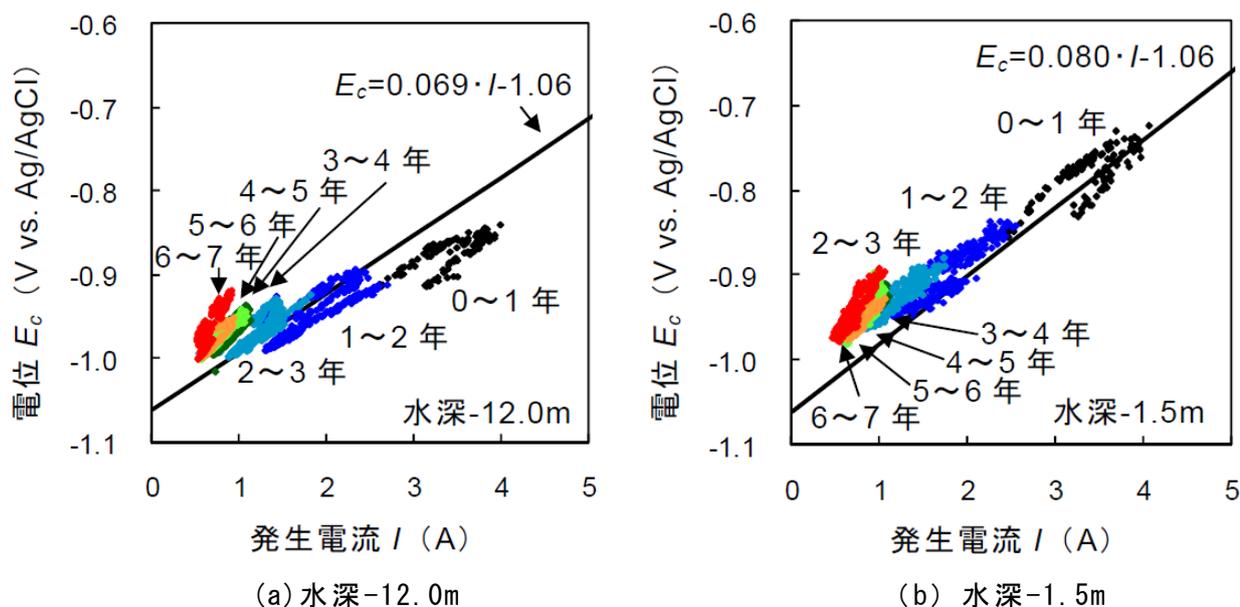


図-2.14 ジャケット式栈橋で約7年間実施した電気防食試験の  $E_c-I_a$  プロット

## 2.5 流電陽極法の更新設計

流電陽極法による電気防食においては、カソード電位が防食管理電位  $-800\text{mV vs. Ag/AgCl[SW]}$  よりも貴化した場合に寿命と判定され、電気防食システムの更新となる。一般的な電気防食システムの更新の流れについて説明する。はじめに、電気防食システムの設計寿命が近づくと、現地の詳細調査が実施される。この現地調査では、カソード電位測定と陽極消耗量調査（周長測定あるいは質量測定）が行われ、消耗量から求められたアルミ陽極の平均発生電流に基づいて更新時期が決定される。近年は水質が浄化された影響

により、設計寿命よりもシステム寿命の方が長くなる傾向（余剰設計）にある。ここで問題となるのが更新設計である。

新規設計に関しては、港湾基準や『港湾鋼構造物・防食補修マニュアル』に設計値や設計手順などが記載されているが、更新設計に関しては基準やマニュアル類が存在しない。よって、新規設計と同様の手法で更新設計も行われているのが現状である。しかしながら、システム寿命が設計寿命を上回った施設において新規設計を適用した場合、同様の電流低減率（表-2.2）が採用されるため、2回目の更新時もシステム寿命が設計寿命を上回るのは明白である。システム寿命があたかも延びているようにも思えるが、これは明らかな過剰設計であり、更新コストを増大させている。設計寿命に見合った質量のアルミ陽極を設置することが、更新コストの適正化に繋がると考えられる。そのためには更新時期の電気防食システムの状態を把握し、その時の電気防食特性を更新設計に反映させることが必要となる。日本国内においては流電陽極法の更新設計に関する研究報告は極めて少ない。海外においては米国の W.H.Hartt らの研究報告のみである。以下にその概要を示す。

#### 【W.H.Hartt らの研究報告】<sup>25)-26)</sup>

W.H.Hartt らは、自らが提案するスローブパラメータ法を用いて、更新設計について検討している。自然短絡試験より得られた  $E_c-i_c$  プロット（図-2.15）を解析し、電気防食特性は、①陽極発生電流は低減したままで構造物は低電位を維持した状態（分極状態）、②陽極発生電流は増加傾向にあり、カソード電位も上昇傾向を示している状態（部分的復極状態）、③アルミ陽極は完全に消耗し、自然電位を示している状態（完全復極状態）の順に変化することを示した。また、これらの状態の時の定常電流密度  $i_{ss}$  を求め、更に部分的小および完全復極状態から再び完全防食状態（再分極状態）にした時の定常電流密度  $i_{ss}$  を求め、これらから更新後の設計防食電流密度  $i_0$  を決定する式（(2.11) ～ (2.12) 式）を導き出した。更新時の電気防食特性を考慮した式ではあるが、 $k\sigma$  については現場試験による確認が必要である。

$$i_{ss}(\text{repol}) = 1.47 \times i_{ss}(\text{depol}) + 3.53 + k\sigma \quad \dots\dots (2.11)$$

$$i_0(\text{repol}) = 23.1 \times i_{ss}(\text{repol}) + 32.47 + k\sigma \quad \dots\dots (2.12)$$

$i_{ss}(\text{repol})$  : 再分極状態の時の定常電流値、 $i_{ss}(\text{depol})$  : 部分的復極状態の時の定常電流値、 $i_0(\text{repol})$  : 再分極状態の時の設計防食電流密度、 $k$  : 定数、 $\sigma$  : 標準偏差

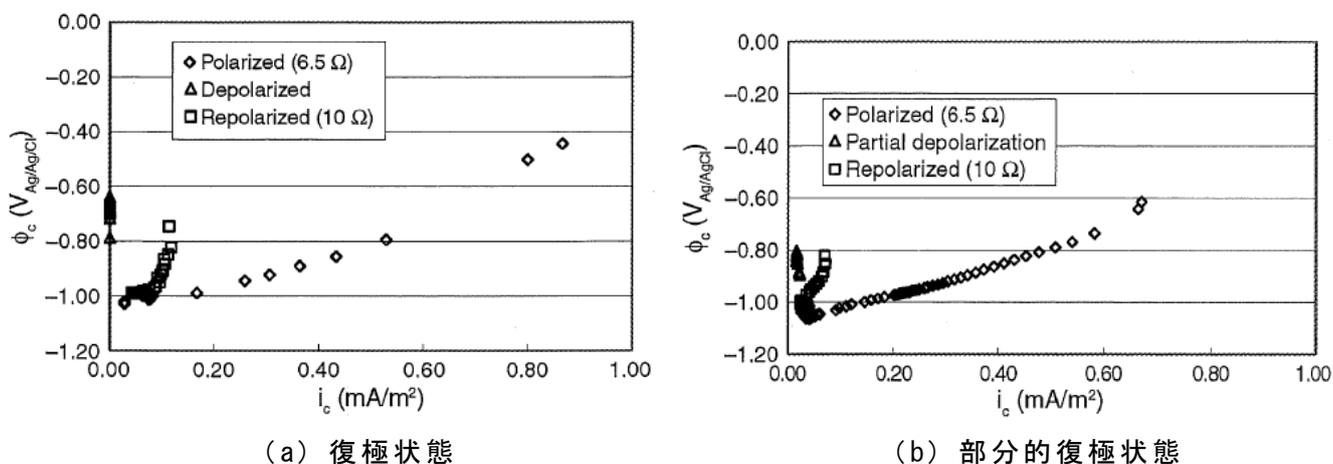


図-2.15 分極状態，復極状態，部分的復極状態を模擬した  $E_c-i_c$  プロット

## 2.6 港湾コンクリート構造物の塩害劣化と電気防食メカニズム

### 2.6.1 港湾コンクリート構造物の劣化

コンクリートとは「無機質または有機質の糊である結合材によって、骨材を結合成型する混合物ならびにその硬化体をいう」とされているが、現在では特にセメントペースト(糊)によって砂・砂利(骨材)を結合したもの(セメントコンクリート)の意味で使用されることが多い<sup>27)</sup>。セメントコンクリート(以下コンクリートと記す)は、体積比率から見ると図-2.16に示すように連行空気泡、セメント、細骨材および粗骨材が主な構成となっている。これらの中で、連行空気泡は原料の混合時に混入する気泡であり、作業性や耐凍害抵抗の向上を目的として意図的に形成される。また、粗骨材を用いないものをセメントモルタル(以下モルタルと記す)と呼んでいる。

コンクリートはマクロにはセメントペーストの硬化体と砂利や砂などの骨材とから成り、さらにセメントペースト硬化体はセメントの水和反応より生成するカルシウムシリケート水和物などのゲルや結晶、未水和のセメント粒子、およびこれらの周囲に形成される空隙などから構成されている。このようなセメントペースト硬化体の微細構造がコンクリートの力学的特性に大きな影響を及ぼすとされている<sup>28)</sup>。

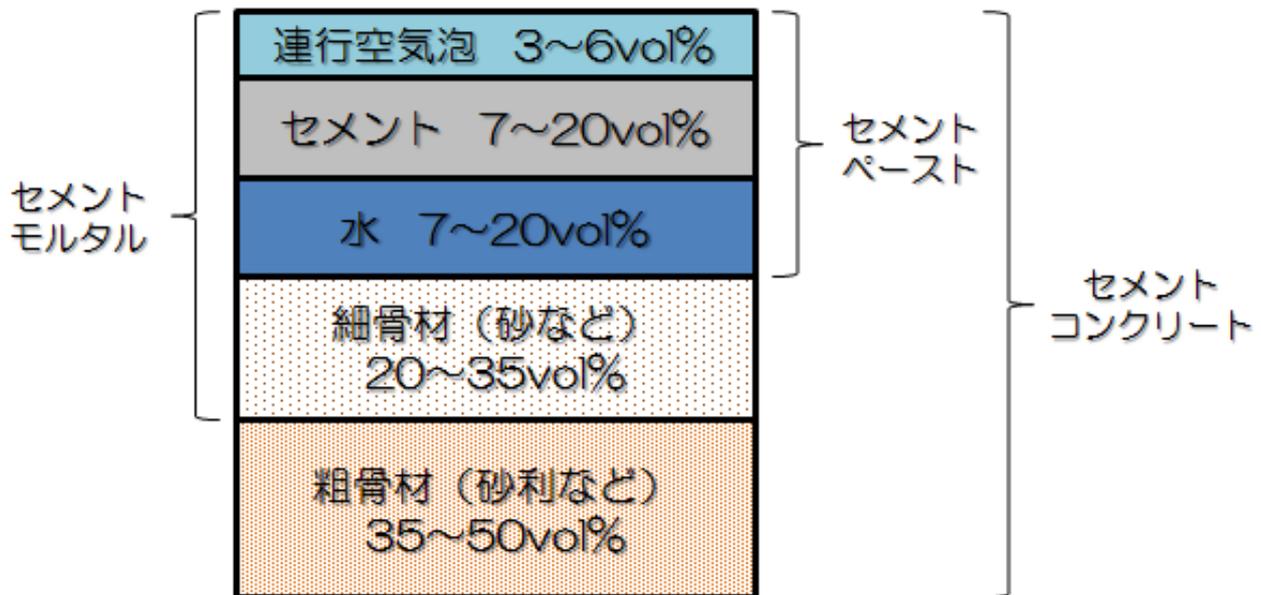
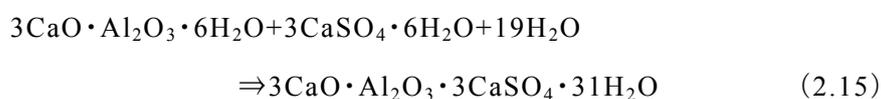
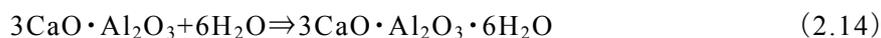
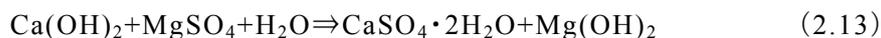


図-2.16 体積比率から見た一般的なコンクリートの構成<sup>29)</sup>

港湾構造物は、海水の作用を強く受けるため、さびの発生や硫酸塩生成による体積膨張がコンクリートのひび割れの主要因であると考えられている。

海洋環境における鉄筋コンクリートの劣化の機構については、従来はコンクリート中への硫酸塩の侵入に端を発する反応式(2.13)～(2.15)によるエトリングイト( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$ )の生成時の体積膨張によると考えられていた<sup>30)</sup>。



しかし、近年では、塩化物イオンによる鉄の不動態皮膜の破壊とその後のさび発生による体積膨張によってひび割れが発生し、ついに崩壊に至ることが解明されている。このような塩化物イオンによる鉄筋腐食に基づく考え方によると、従来よりも短い期間で部材崩壊にまで至り、施工後数年で構造物劣化が発生することも多い。鉄筋の発生時の体積膨張は2.5倍程度になる<sup>31)</sup>ことが知られているので、鋼材が深さ0.1mm程度腐食してもその錆

生成量でひび割れが発生すると報告されている<sup>32)</sup>。

以上のように、現状では、コンクリートそのものの劣化というよりはむしろコンクリート中の鋼材腐食による破壊（ひび割れ）が重要であり、鉄筋の耐食性向上あるいは鉄筋に適切な防食法を施すことにより、コンクリート構造物の長寿命化を図ることが可能である。

### 2.6.2 塩化物イオンによるコンクリート中鉄筋の腐食反応

コンクリートは連続した毛細血管空隙を有する多孔材料と見ることができ、数 nm から数  $\mu\text{m}$  の大きさの空隙内は pH が 12~13 のアルカリ性の水酸化カルシウム溶液（セメントの水和により生成）で満たされている。このようなアルカリ環境下における鉄筋の熱力学的性質を知るために、Fe の電位-pH 図（Pourbaix diagram）を図-2.17 に示す。

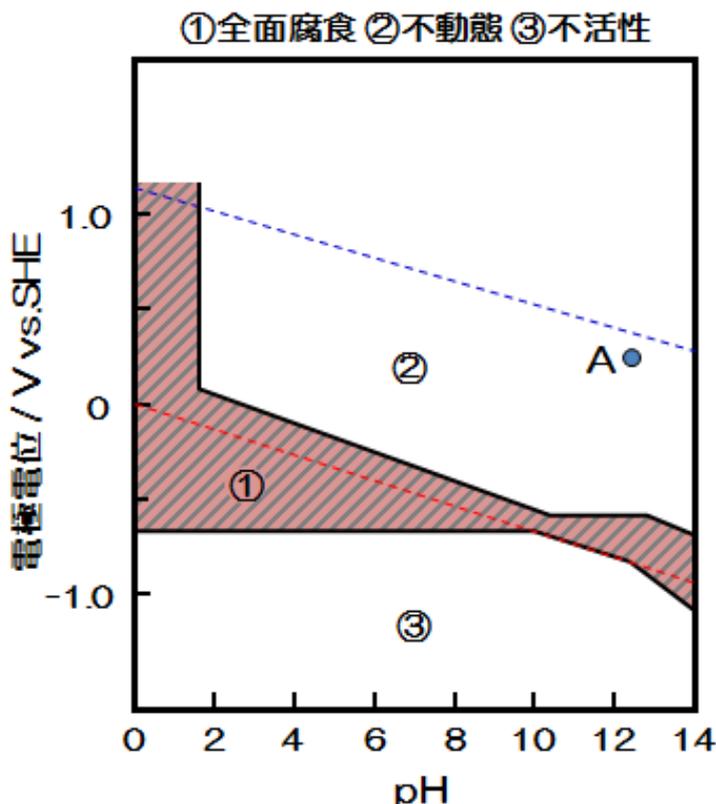


図-2.17 Fe の電位-pH 図（Pourbaix diagram）<sup>33)</sup>

図中の A 点はコンクリート中の鉄筋の状態を示している。pH が 12~13 における鉄筋は、その表面に 20~60 Å 程度の薄い酸化被膜 $[\gamma\text{-Fe}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$ を形成し、不動態化しているため、腐食作用から保護されている。しかしながら、コンクリート中への塩化物イオンの侵入は、

鉄筋表面の不動態皮膜を破壊し、鉄筋を活性化させる。活性態にある鉄筋の表面では、鉄筋がイオン化するアノード反応（酸化反応）と酸素が還元するカソード反応（還元反応）が式（2.16）、式（2.17）のように生じ、図-2.18 に示すような腐食電池を形成する。

このアノードおよびカソード反応は、同時並行的に起こり、図-2.18 に示すような化学反応が生じ、水酸化第二鉄  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$  となる。さらに、この水酸化第二鉄は、水を失って水和酸化物  $[\text{FeOOH}]$ （赤さび）となり、また、一部は酸化不十分のまま  $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ （黒さび）となって、鉄筋表面にさび層を形成する。このさび層は、多孔質で腐食を抑制する効果が小さく、腐食は絶えず進行する。また、鉄筋に生じたさびは、体積変化が大きく、元の鉄の約 2.5 倍の体積となるため、この膨張圧によってコンクリートにひび割れや剥離が生じ、さらに腐食を進行させることとなる。

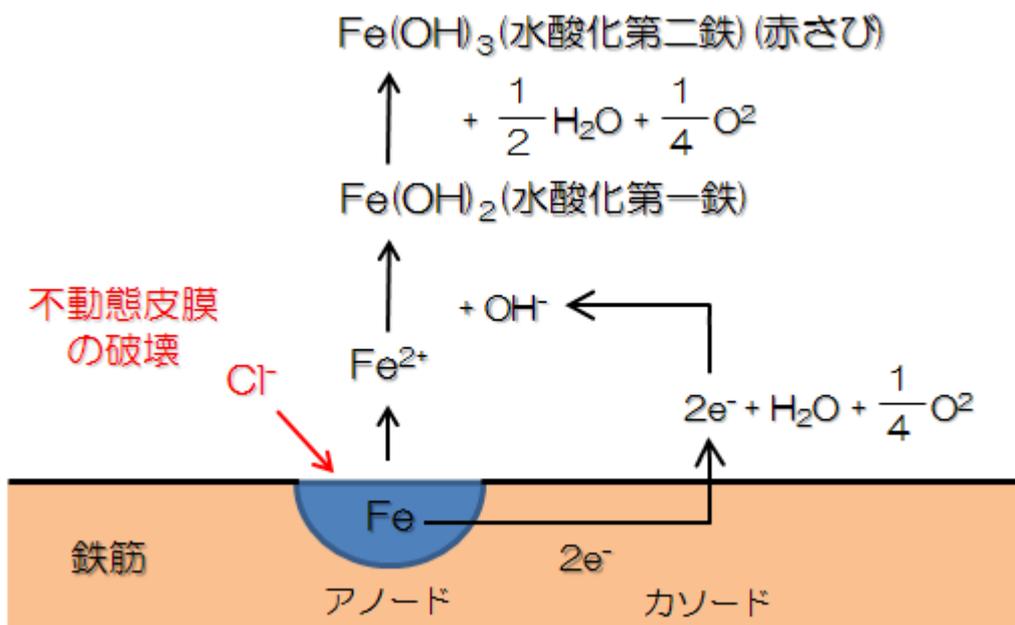
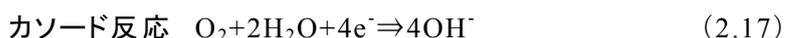
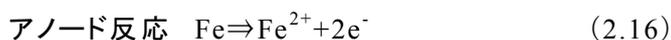


図-2.18 鉄筋の腐食反応メカニズム<sup>34)</sup>

このように、塩化物イオン自体は腐食反応自体に直接関与することはないが、不動態皮膜を簡単に破壊し活性化させることや、不動態域を小さくすること、並びにコンクリートの電気抵抗を低下させ、腐食反応を促進するなど、その存在が腐食に与える影響は非常に大きいと言われている。

### 2.6.3 コンクリート構造物における電気防食メカニズム

塩化物イオンに起因するコンクリート中の鉄筋の腐食反応は、上述したように、塩化物イオンによる鉄筋表面の不働態皮膜の破壊から始まる腐食電池形成によって生じる。この場合、図-2.18 に示した鉄筋がイオン化するアノード反応とアノード部で発生した電子を水と酸素により消費するカソード反応が同時並行的に反応することにより、腐食が進行する。従来の防食方法は、塩化物イオンやカソード反応に必要な酸素や水の供給を遮断することで間接的に防食を達成しようとするものである。これら従来の防食方法に対して、電気防食法は、図-2.18 に示した腐食反応自身を直接制御できる。この電気防食法の考え方を電気化学的平衡論から説明すると以下となる。0.01M (335ppm) の塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) 含む溶液中における鉄の電位-pH 図を図-2.19 に示す。この図における B 点は、コンクリート中の pH (約 12.5) にほぼ等しい環境での溶液中における鉄の電位であり、C 点はコンクリートが中性化した環境での鉄の電位である。

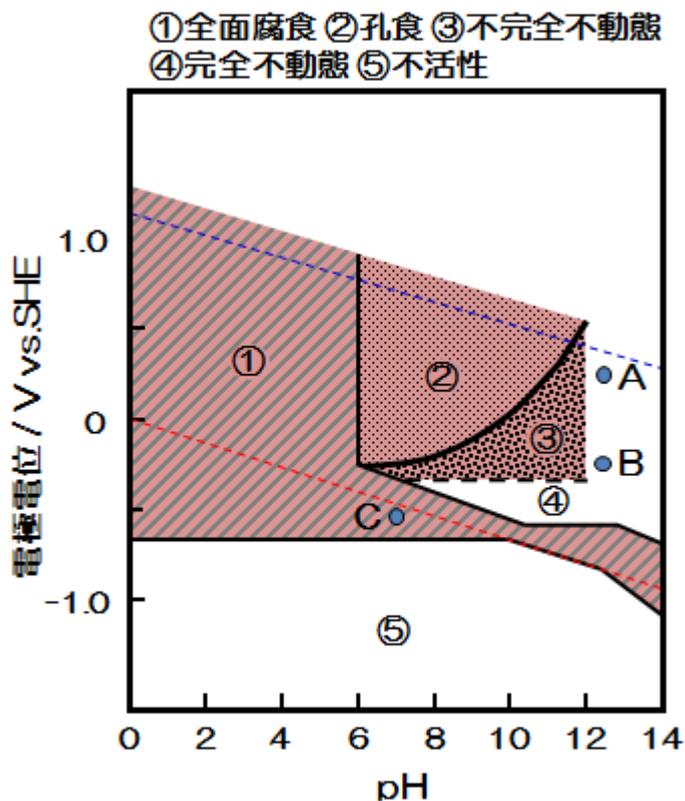


図-2.19 Cl<sup>-</sup>存在下における Fe の電位-pH 図<sup>35)</sup>

また、A 点は Cl<sup>-</sup>を含まない溶液中での鉄の電位である。図-2.17 の塩分を含まない溶液中では完全に不動態となる領域でも、図-2.19 の Cl<sup>-</sup>を含む溶液中では、鉄が腐食する領域となることがわかる。図-2.19 では、①～③の領域がそれに相当し、完全に不動態となる領域は④と非常に狭く、この完全に不動態となる領域は、Cl<sup>-</sup>の増加によりさらに小さくなる。すなわち、コンクリート中の Cl<sup>-</sup>が臨界値以下であれば、コンクリート中の鉄筋電位(B 点)は図-2.19 の不動態域にあるが Cl<sup>-</sup>が臨界値以上存在すると、孔食域が右下方向に広がり B 点においても鉄は腐食状態となる。この腐食を防止するためには、環境をさらにアルカリ側へ変化させるか、鉄筋の電位を卑な方向へ変化させて④の不動態領域あるいは⑤の不活性領域に維持する方法となる。通常は後者の方法がとられるが、このように電位を強制的に腐食の起こらない状態に移動させる方法が電気防食法である。

船体や栈橋鋼管杭のような海中の鋼材や土中のパイプラインなどの防食では、この電気防食の考え方をもとに、⑤の不活性領域となる領域まで電位を卑化させることにより防食を達成している。しかし、コンクリート中の鋼材に対する電気防食の考え方は、これら海中や土中の考え方とは若干異なり、コンクリート中の鋼材表面に形成された腐食電池を消滅させれば、大きな腐食は起こらないという考え方を基本としている。この考え方の違いは、防食電流を供給する電解質媒体となるコンクリートが同様な媒体である海水あるいは土壌とその性質に相違があることに起因したものである。すなわち、海水あるいは土壌は比較的均一で電気抵抗も小さいのに対し、コンクリートの場合、マクロ的にコンクリートの品質が不均質であるためコンクリート中の鋼材を均一な電位にすることが不可能であり、また高抵抗なコンクリート中での鋼材の通電時の真の電位をモニタリングすることは難しいことが主な理由である。

図-2.20 にコンクリート中の鋼材の腐食反応と電気防食を施した場合の腐食反応を比較して示す。コンクリート中の鋼材で生じる腐食反応は、鋼材がイオン化するアノード部とそれによる電子を消費するカソード部が腐食電池を形成している。従って、電気防食では外部に取り付けた陽極(アノード)から強制的にコンクリート中の鋼材に電流を流し、鋼材全体を陰極としてカソード化することにより、鋼材の腐食電池を消滅させるのが効果的となる。

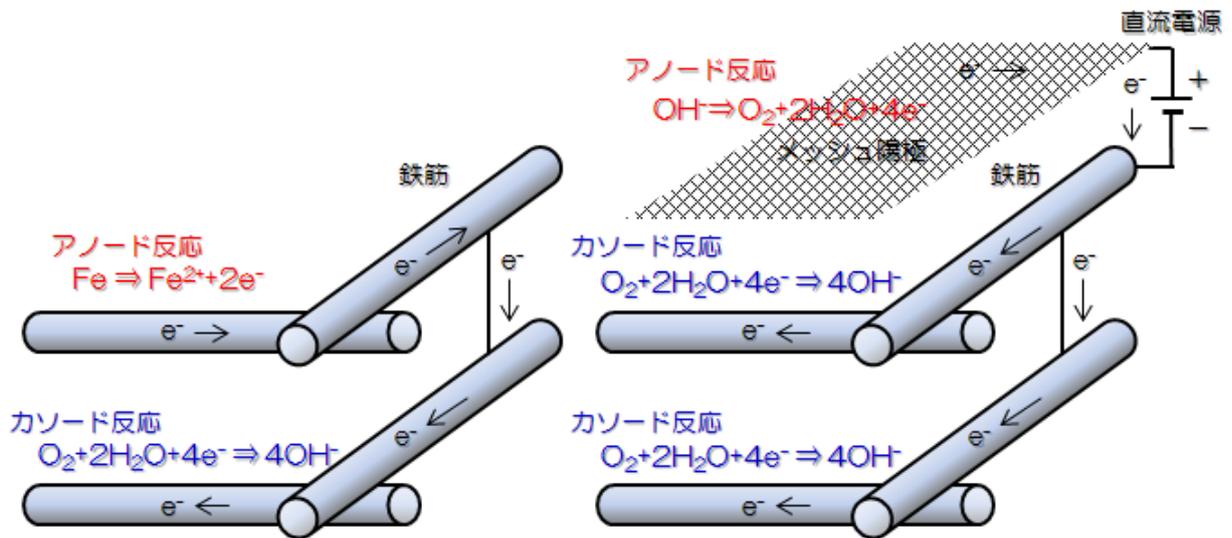


図-2.20 腐食反応と防食反応の模式図 <sup>36)</sup>

図-2.21 は、この電気防食による腐食電流の消滅の様子をより模式的に示したものである。電気防食を施す前のコンクリート中の鋼材は、コンクリートの不均一性に起因した塩化物イオン濃度の濃淡を生じ、塩化物イオン濃度の高い箇所は鋼材の電位が卑となり、その他の部位は相対的に電位は貴となるため、鋼材表面で電位差が生じる。その結果、電位が卑となる部分がアノード部、相対的に貴となる部分をカソード部とし、両者の電位差を起電力として腐食電池が形成される。この電池に電気防食による防食電流が流入した場合、まず、この電流は電位の貴なカソード部により多く流れ込み、カソード部の電位を卑方向へ変化させる。さらに電流密度を増加させるとカソード部の電位 ( $E_c$ ) とアノード部の電位 ( $E_a$ ) がほとんど等しくなり電位差もなくなるため、腐食電池が消滅し、鉄筋の腐食反応が停止する。

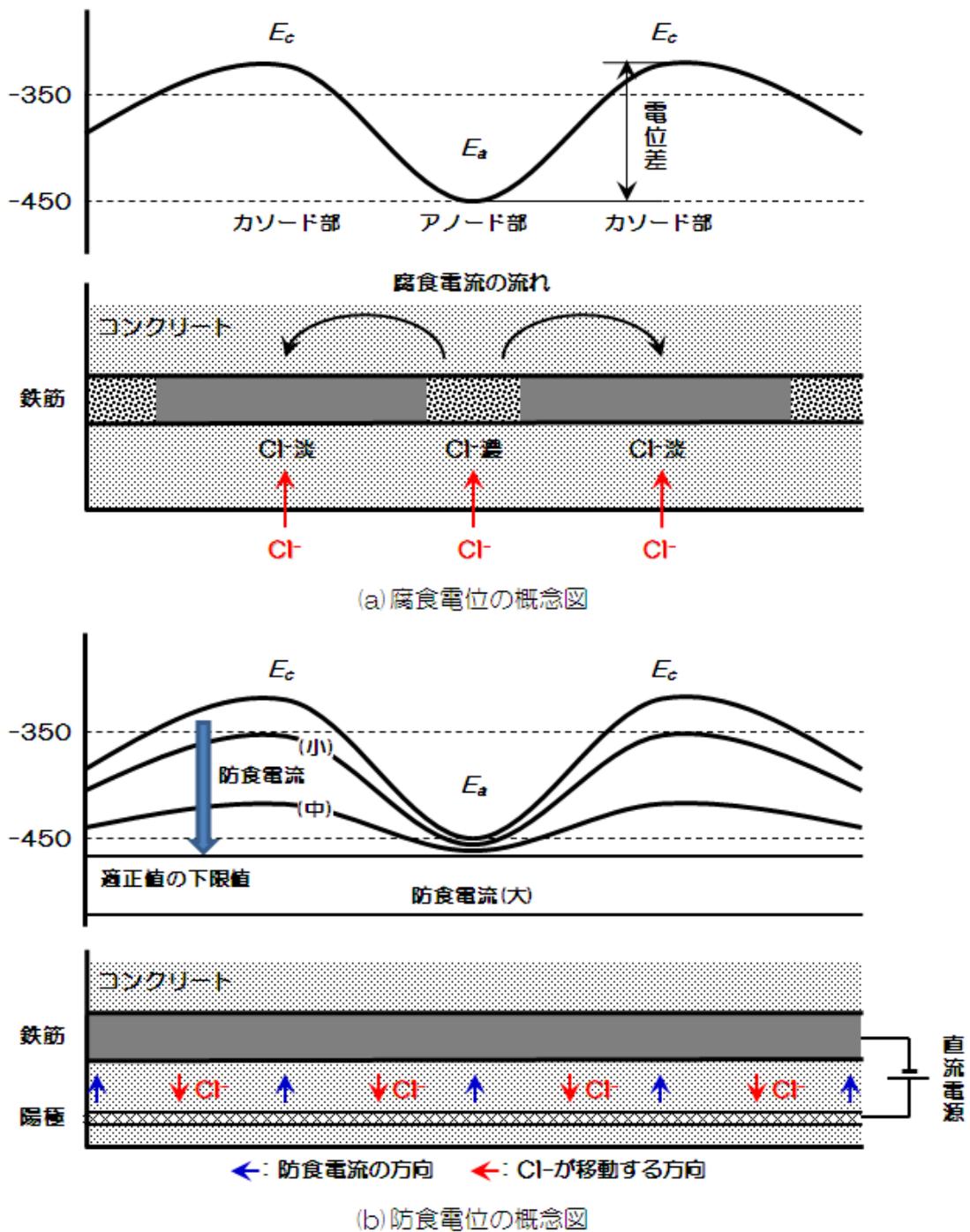


図-2.21 腐食電位と防食電位の概念図<sup>37)</sup>

## 2.7 適用環境や経時的に変化するコンクリート構造物の電気防食特性

コンクリート構造物の塩害問題がクローズアップされて以降、コンクリート橋梁への電気防食法の適用実績が著しく増加し、今では塩害対策工法として必要不可欠な技術となった。そして近年は、道路橋だけでなく、港湾施設（岸壁、栈橋）へも電気防食が適用され

るようになった。しかしながら、様々な環境に適用されるようになった一方で、環境によって異なる電気防食特性を示すことが報告されるようになってきた。これまでの電気防食に関する研究は、工法や電気防食基準による防食効果の確認が主であり、電気化学反応が生じている鉄筋表面の環境変化に着目した防食メカニズムの検討はほとんど行われていなかった。このような問題に対し、電気化学的観点より解析を試みようとする動きが出ている。

【川俣らの研究】<sup>38)</sup>

川俣らは、海洋環境を模擬した試験水槽においてコンクリート試験体による電気防食試験を行い、環境によって電気化学特性が異なることを確認した。すなわち、海水に接する試験体の電位は、干満の影響を受けることを示した。

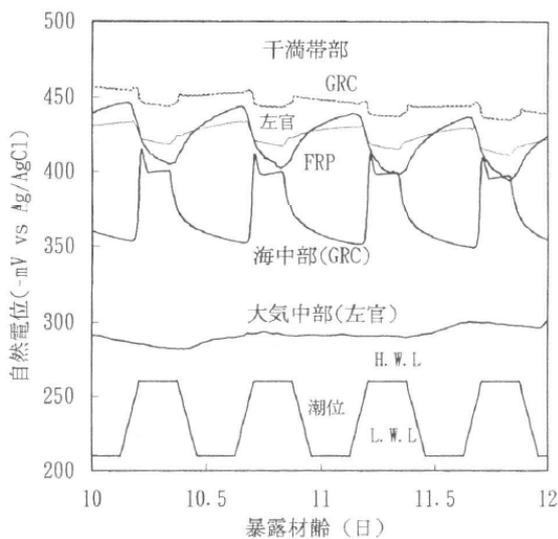


図-2.22 自然電位の経時変化

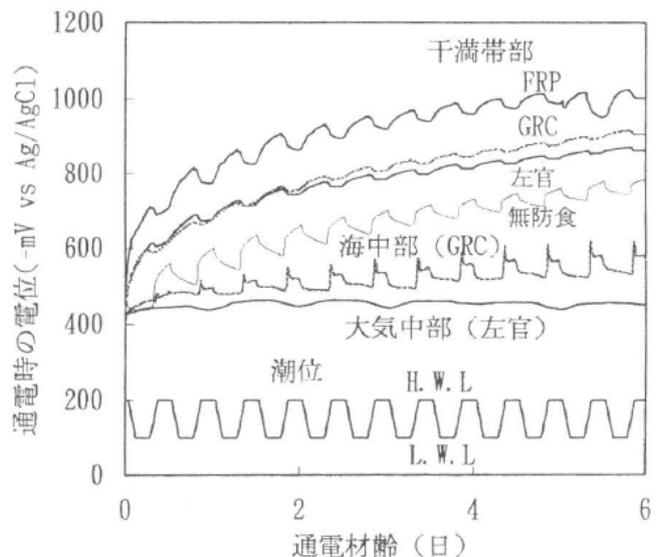


図-2.23 定電流通電時の電位変化

図-2.22 より、自然電位は設置したレベルによって異なり、干満帯部、海中部、大気中部の順に卑な電位を示した。また、干満帯部をアノード、海中部をカソードとしてマクロセルを形成していることも示した。

図-2.23 より、干満帯部の供試体に供給した防食電流の一部が、満潮時に海中部の供試体に流入している可能性を示した。干満帯部の供試体の電位は経時的に卑化する傾向を示した。これは、干満の繰り返しによってコンクリートの含水率が高くなり、酸素拡散性が低下したためと想定している。

【布田らの研究】<sup>39)</sup>

布田らは、種々の電気防食工法を適用したコンクリート鉄道橋に対して、鉄筋電位と回路電流の連続モニタリングを行った。電気防食方式によって鉄筋の電位特性は異なり、Znシート方式（流電陽極方式）では、鉄筋の自然電位（ $E_{off}$ ）が経時的に貴化するのに対し、Ti溶射方式（外部電源方式）では、経時的に卑化することを報告している（図-2.24）。その理由として、前者の場合は鉄筋表面のpH上昇、後者の場合は脱気効果を挙げている。

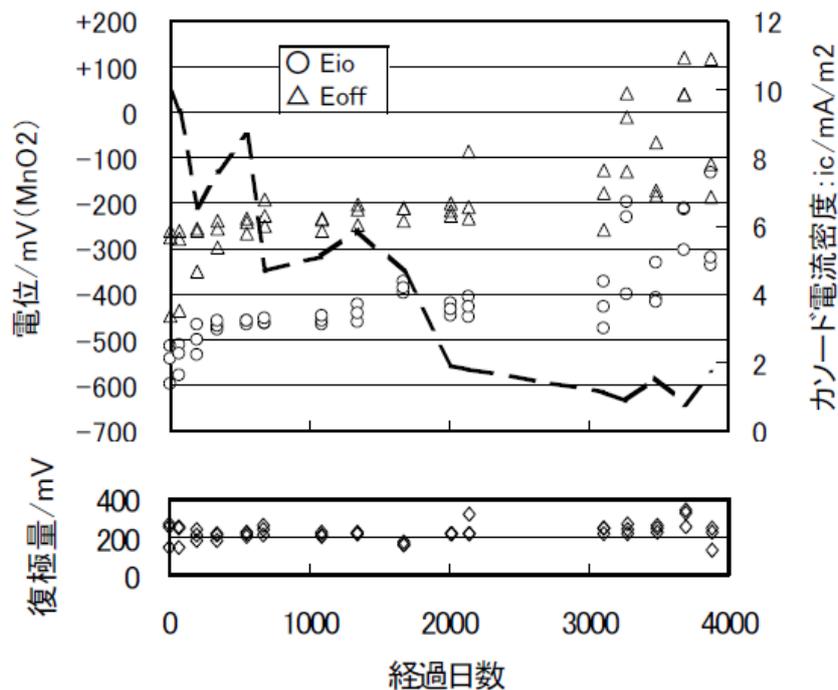


図-2.24 インスタントオフ電位 ( $E_{i0}$ )、オフ電位 ( $E_{off}$ ) とカソード復極量の経時変化 (Znシート方式)

【田中らの研究】<sup>40)</sup>

田中らは、電気防食法（流電陽極方式）を適用したコンクリート道路橋に対して、鉄筋の電位と回路電流の連続モニタリングを行った。カソード電位とカソード電流密度の関係（ $E_c-i_c$ プロット）より、通電初期はカソード分極抵抗（溶存酸素の還元反応）の影響を受けるが、時間の経過とともにアノード分極抵抗（不動態化）あるいは極間抵抗の影響が支配的になり、低電流-貴電位側に変化することを報告している（図-2.25）。

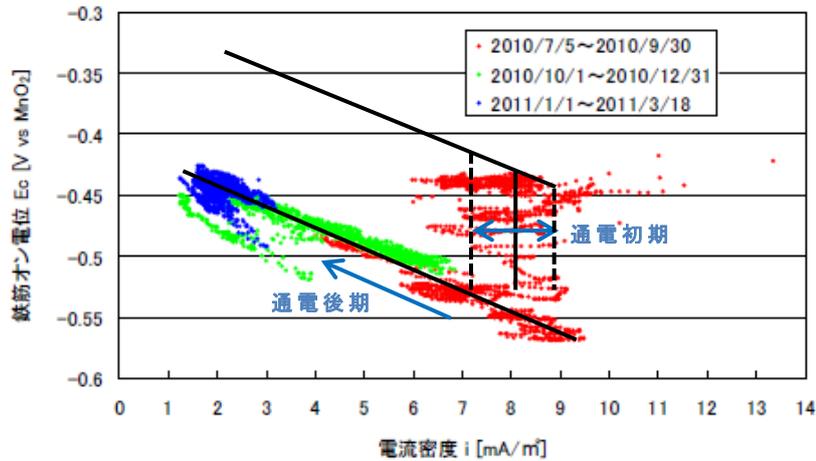


図-2.25 経時変化データの  $E_c-i_c$  プロット

【高久ら，大谷らの研究】<sup>41) -42)</sup>

高久らや大谷らは，電気防食適用下の鉄筋の自然電位貴化現象を実験室試験によって実証した．高久らは，塩化物イオン濃度 2000ppm の中性水溶液中に鉄試片を浸漬し，水酸化カルシウムを飽和量添加し pH を上昇させた時の分極曲線を測定したところ，活性溶解挙動（分極曲線の傾きが緩やか）を示していたアノード分極曲線（◆）に明確な不動態領域（分極曲線の傾きが大きい）が認められ，自然電位が貴化する傾向が認められた（図-2.26）．大谷らは，コンクリート試験体による電気防食試験を行い，経時的な自然電位の貴化とアノード分極曲線の増大を確認した（図-2.27）．これらの結果は，鉄筋近傍の pH の上昇によるアノード分極抵抗の増大と自然電位の貴化現象を結びつけるものである．

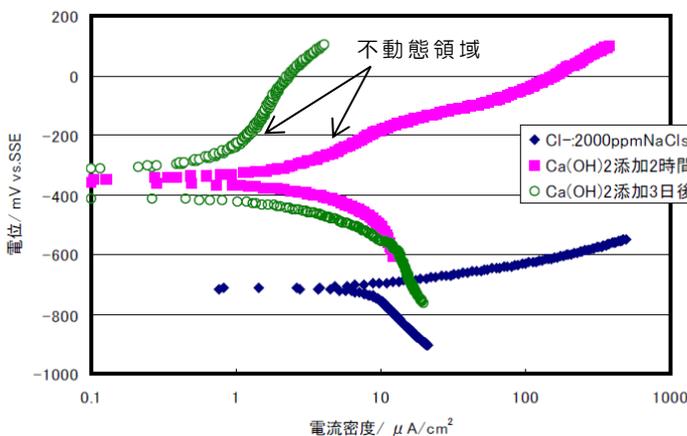


図-2.26 pH 上昇時の分極曲線変化

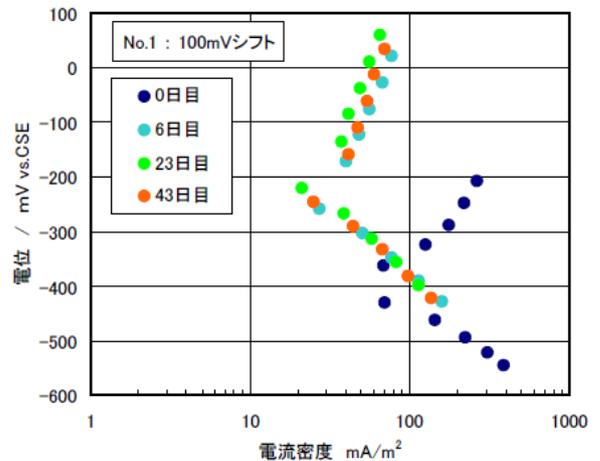


図-2.27 電気防食下の分極曲線変化

## 2.8 コンクリート構造物における電気防食基準

現在のコンクリート構造物における電気防食基準は、電位シフト基準<sup>43)</sup>が主流となっている。コンクリート構造物では、海水環境や土壌環境で用いられている防食電位（ $-780\text{mV vs. Ag/AgCl[SW]}$ ）のような特定な値による判定ではなく、自然電位からの電位変化量を判定指標としている。これは、照合電極の液絡部分の液間電位差や照合電極－鉄筋間の電圧降下の影響により、鉄筋の電位が精度よく計測できないためである。一方、電位変化量は、アルカリ環境下で安定している照合電極であれば利用することが可能であり、一義的に防食基準が設定できること、少ない電流で必要な防食効果を達成できるという利点のあることが採用された理由である。電位変化量は  $100\text{mV}$  以上が採用されており、世界で最初にコンクリート構造物に電気防食を適用したアメリカの基準<sup>44)</sup>に基づくものである。なお、電位変化量（カソード復極量）とは図-2.28 に示すように、通電時の電圧降下分を除去したカソード電位（インスタントオフ電位）と通電オフ 24 時間後のカソード電位（オフ電位）との差である。

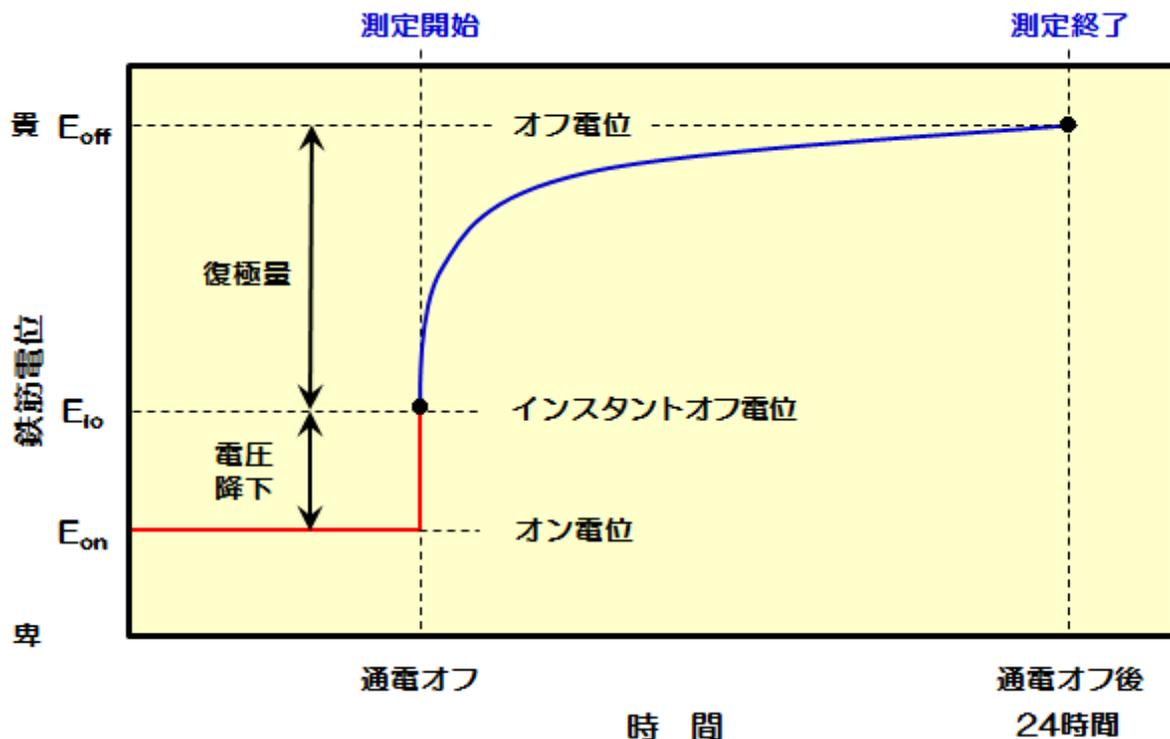


図-2.28 電位変化量の測定方法（復極量測定）

雨宮ら<sup>45)</sup>は、電位変化量  $100\text{mV}$  以上の妥当性を電気化学的に考察した。コンクリート模擬水溶液中の塩化物イオン濃度と pH を変化させて、炭素鋼のアノード分極曲線を測定

した結果、いずれの条件下においてもアノード反応のターフェル勾配は 100mV/decade 以下であった。また、塩分を含むコンクリート模擬水溶液中で腐食している炭素鋼を 100mV 陰分極で 180 時間通電したところ、防食率は 90% 以上を示した。これらの結果は、100mV 陰分極することにより、腐食速度を 1/10 以下に低減できることを示唆するものである。

また、土木学会では、腐食が厳しい環境では  $-850\text{mV vs.CSE}$  以下とすることを提唱しており、アメリカの基準やヨーロッパの基準<sup>46)</sup>でも電位シフト基準とともに併記している。これは、海水中や土壌中の電気防食に適用されている基準（防食電位）と同様である。

近年、電気防食を適用した港湾コンクリート構造物の海中部や干満部において、電位シフト基準を満足しないケースが報告されるようになった<sup>47)-48)</sup>。海中部や干満部は海水に浸漬している時間が長い。電気防食により生じるカソード反応によって鉄筋表面の溶存酸素は消費されるが、大気部に比べて含水率が高いために溶存酸素の供給が遅くなり、脱気に近い状態となる。よって、通電をオフにしても溶存酸素が供給されないために電位は復極せず、24 時間を経過しても 100mV が得られない。鉄筋近傍の溶存酸素は少ないため、鉄筋の腐食速度は非常に小さいと考えられるが、防食判定では 100mV 未達のため不良と判定される。田代ら<sup>49)</sup>は、湿潤環境下において、通電オフ 24 時間後のカソード復極量が 100mV 以上を満足しない場合、防食基準に  $-850\text{mV vs.CSE}$  を適用することを提案している。

国内外で用いられている電気防食基準をまとめると表-2.3 の通りである。

表-2.3 コンクリート構造物に対する国内外の電気防食基準<sup>50)-56)</sup>

基準規定機関	名称	内容
NACE, ISO, JCI	100mV シフト基準	・通電オフ 24 時間後の復極量が 100mV 以上
JCI	100mV 分極基準	・通電初期に適用 ・自然電位からの分極量が 100mV 以上
NACE, ISO, JCI	$-850\text{mV vs.CSE}$ 以下	・湿潤環境 ・100mV シフト基準が適用できないとき
NACE, ISO	$-780\text{mV vs.CSE}$ 以下	・湿潤環境 ・100mV シフト基準が適用できないとき

## 2.9 第2章のまとめ

鉄の腐食現象と電気防食メカニズムについて整理を行った。また、電気防食の維持管理手法については、港湾鋼構造物と港湾コンクリート構造物に対して課題を抽出し、各々における問題点を明確にすることができた。

## 2.10 参考文献

- 1) 松島巖, 錆と防食の話(第2版), 日刊工業新聞社, p12, (1998)
- 2) 藤井哲雄, 基礎からわかる金属腐食, 日刊工業新聞社, p4, (2011)
- 3) 藤井哲雄, 目で見てわかる金属の防食対策, 日刊工業新聞社, p15, (2009)
- 4) (株)ナカボーテック, 平成13年度新入社員研修テキスト, p.p.8-9, (2010)
- 5) 鋼管杭の防食法に関するグループ, 海洋鋼構造物の防食技術, 技法堂出版, p.10, (2010)
- 6) (財)沿岸技術研究センター, 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版), p.123, (2009)
- 7) H.A.Humble, *Corrosion*, Vol.5, 292, (1949)
- 8) C.P.Larrabee, *Corrosion*, Vol.14, 501, (1958)
- 9) J.C.Hudson and J.F.Stanners, *JISI*, Vol.180, 271, (1955)
- 10) 松岡和巳, 山本正弘, 五戸清美, 材料と環境, Vol.56, No.3, 99, (2007)
- 11) 藤井哲雄, 目で見てわかる金属材料の腐食対策, 日刊工業新聞社, p28, (2009)
- 12) (社)鋼材倶楽部, 海洋鋼構造物の防食 Q&A, 技報堂出版, p141, (2001)
- 13) 中川雅央, 電気防食法の実際, 地人書館, p30, (1967)
- 14) 海野武人, アルミシリーズIV-電気防食用アルミニウム合金陽極-, 防錆管理, Vol.39, No.8, pp.1-9, (1995)
- 15) 例えば, ユーリック.レヴィ, 岡本剛, 腐食反応とその抑制, 産業図書, p51, (1968)
- 16) 国土交通省港湾局監修, 港湾の施設の技術上の基準・同解説平成19年版上巻, (社)日本港湾協会, p242, (2009)
- 17) 望月紀保, 池谷充, 海水中における流電陽極方の設計について, 第55回材料と環境討論会講演集, (2008)
- 18) 望月紀保, 山田真澄, 平崎敏史, 濱田秀則, 海水環境における流電陽極法の設計と陽極寿命について, 材料と環境2003講演集, (2003)
- 19) W.wang and W.H.Harrt, *Corrosion'94*, NACE, paperNo.496, (1994)

- 20) (財)沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版), p.p.81-91, (2009)
- 21) W.wang, W.H.Harrt and S.Chen, *Corrosion*, Vol.52, Vol.6, 419, (1996)
- 22) 若林徹, 望月紀保, 宮田義一, 瀨田秀則, 海水中におけるアルミニウム合金陽極の消耗量モニタリング技術に関する研究, 第52回材料と環境討論会, D-302, (2005)
- 23) 審良善和, 山路徹, 岩波光保, 野口孝俊, 耐海水性ステンレス鋼被覆を施した海洋構造物の電気防食特性, 第22回防錆防食技術発表大会講演集, (2009)
- 24) 宮田義一, 若林徹, 瀨田秀則, 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, 港湾空港技術研究所報告書, Vol.45, No.2, (2006)
- 25) W.H.Hartt and S.Chen, *Corrosion*, Vol.55, No.6, 596, (1999)
- 26) E.Lemieux and W.H.Hartt, *Corrosion*, Vol.62, No.7, 584, (2006)
- 27) (社)日本コンクリート工学協会編, コンクリート便覧, 技法堂出版, p.1, (1976)
- 28) (社)腐食防食協会編, 腐食防食便覧, 日本工業新聞社, p.p.286-290, (1986)
- 29) 阪下真司, コンクリート中の線材及び棒鋼の電気化学的手法による腐食特性評価と防食技術に関する研究, 東北大学博士学位論文, p.2, (2002)
- 30) 小林一輔, 土木施工, Vol.25, No.9, 20, (1984)
- 31) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭二, コンクリート構造物の耐久性シリーズ 3 鉄筋腐食の診断, 森北出版, p.1, (1993)
- 32) (社)鋼材倶楽部 防錆特別委員会, 社会資本の腐食診断と補修技術, 防食技術講習会 III, p.22, (1987)
- 33) M.Pourbaix, *Corrosion Science*, Vol.14, 25, (1974)
- 34) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電氣的防食法研究委員会報告書, (1994)
- 35) 小林豊治, コンクリート中鋼材の腐食・防食の基礎, 海洋コンクリート構造物の防食指針(案), 日本コンクリート工学協会, p.p.39-46, (1983)
- 36) 川俣孝治, 電気防食によるコンクリート構造物の塩害補修に関する研究, 鹿児島大学博士学位論文, p.16, (1999)
- 37) 青山敏幸, 電気防食の適用に伴う陽極材の品質変化および PC 部材の構造性能の評価に関する研究, 早稲田大学博士学位論文, p.8, (2010)

- 38) 川俣孝治, 福手勤, 阿部正美, 峰松敏和, コンクリート構造物干満帯部への電気防食法の適用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, p.p.832-836, (1996)
- 39) 布田仁美, 松田芳範, 篠田吉央, コンクリート鉄道橋における電気防食効果の経時変化について, 材料と環境 2009 講演集, D-205, (2009)
- 40) 田中一弘, 岩崎隆: 道路橋に適用したアルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の施工事例について, 土木学会年次論文集, V-234, (2011)
- 41) 高久豊広, 望月紀保, 仲谷伸人, 電気防食されたコンクリート中鉄筋の自然電位貴化現象に関する検討, 第 56 回材料と環境討論会講演集, D-206, (2009)
- 42) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保, 鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, p.p.1030-1035, (2012)
- 43) 土木学会, 電気化学的防食工法設計施工指針(案), p67, (2001)
- 44) National Associations of Corrosion Engineers, NACE Standard PP0290-90,
- 45) 雨宮佑太, 福手勤, 望月紀保, コンクリート中鉄筋の電気防食効果評価基準に対する考察, 材料と環境 2008 講演集, C-111, (2008)
- 46) 川俣孝治, 福手勤, 阿部正美, 峰松敏和, コンクリート構造物干満部への電気防食法の適用に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.1, p.p.831-836, (1996)
- 47) 木村哲士, 中野松二, 山路徹, 審良善和, 濱田秀則, 高橋良輔, RC 栈橋干満帯部の電気防食における復極挙動に関する検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, p.p.1019-1020, (2007)
- 48) British Standard Institution : British Standard BS87361, (1991)
- 49) 田代賢吉, 細田喜子, 山本悟, 石井浩司, 関博, 湿潤環境を考慮したコンクリート部材の電気防食基準に関する研究, 材料と環境 2009 講演集, D207, (2009)

## 第3章 港湾鋼構造物に適用した電気防食システムの維持管理

### 3.1 序

流電陽極方式の電気防食が港湾施設に適用されるようになってから 40 年が経過しようとしている。港湾施設においては外部電源方式が適用されていたが、アルミニウム合金陽極（以下、アルミ陽極）が開発されてからは、急速に流電陽極方式が普及していった。その理由は、外部電源方式で行われている電流調整等の機器メンテナンスが不要であり、維持管理コストが安価なこと、アルミ陽極の質量を調整することでシステム寿命を自由に設計できることである。バブル経済の崩壊後は、施設の長寿命化が望まれるようになり、50 年寿命のアルミ陽極まで製造されるようになった。

その一方で、近年、設計耐用年数を迎えた施設の詳細点検において、アルミ陽極の寿命が設計耐用年数を大きく上回るケースが報告されるようになった。これは、設計値よりも実際の電流低減率が小さくなったことが原因として挙げられる。設計の観点から考えれば過剰設計と考えられ、電気防食コストの増大につながる。現在のアルミ陽極の更新設計は、新設の設計がそのまま適用されるために、更新後も過剰設計となることが予想される。限られた予算で効率よく陽極更新を行うためには、現状のシステム状態を考慮し、適正な更新設計を行うことが必要である。

また、電気防食システムの状態を確認する方法についても問題を抱えている。システム寿命を把握するためにはアルミ陽極の消耗量を調査する必要があるが、多大なコストがかかるために頻繁に実施することができない。今後、陽極更新を迎える施設が集中することが予想されるため、計画的に陽極更新を行なわなければならない。そのためには、定期的にアルミ陽極の消耗量を把握し、陽極更新の時期を決定する手法の開発が必要である。

以上のことから、第3章では電気防食が適用された港湾鋼構造物の維持管理手法について検討した。具体的には、以下の通りである。

#### ①流電陽極方式電気防食を適用した港湾鋼構造物の維持管理手法

アルミ陽極の消耗量推定手法と発生電流測定手法に関する検討

#### ②流電陽極方式電気防食を適用した港湾鋼構造物の更新設計

施設の電気化学特性を考慮した更新設計手法に関する検討

## 3.2 流電陽極方式電気防食を適用した港湾鋼構造物の維持管理手法

### 3.2.1 はじめに

道路，空港，港湾などの社会資本は，戦後の日本経済を支え，また，国民の生活を支えている．現存の社会資本は，1960～1970年代の高度経済成長期に建設されたものも多く，それから40年以上が経過しようとしている．そのような状況の中で，現在，高度経済成長期に建設された港湾施設の老朽化が顕在化してきており，今後，維持・改良・更新費の増大が見込まれている．このため，港湾施設の整備に当たっては，重点的，効果的かつ効率的に実施するとともに，維持・更新費用の最小化を図りつつ，長期にわたって有効に活用していくことが必要不可欠である．

港湾鋼構造物の海中部の防食法として一般的となったアルミニウム合金陽極（以下，アルミ陽極と記す）による流電陽極方式電気防食（以下，電気防食と記す）についても，効率的な維持管理とシステムの更新が求められている．電気防食システムを計画的に更新していくためには，海中部に設置されたアルミ陽極の消耗状態を把握する必要がある．消耗状態を把握するためには，アルミ陽極の質量を知る必要があるが，その手段として，従来より周長測定や質量測定が行われてきた．しかしながら，いずれの方法も潜水作業が必要であり，特に質量測定においては，溶断，貝落とし，秤量，溶接など複数の工程があり，多大な点検コストがかかる．点検コストを削減するためには，潜水作業を必要としない陽極消耗量の計測方法の開発が望まれる．

以上のことから，本研究では点検コストの削減を実現する方法として，被防食体の電位計測による陽極消耗量の推定手法の開発を試みた．

### 3.2.2 試験方法

#### (1) 大井埠頭新5バースにおける電気防食試験の詳細

実際の港湾鋼構造物で実施した試験データをもとに，陽極消耗量の推定に関する検討を行った．今回利用したのは，東京港の大井埠頭新5バース（J1 ジャケット No.3 杭）で実施している電気防食試験のデータである．

防食設計仕様を図-3.2.1 に示す．本施設はジャケット式栈橋構造（写真-3.2.1）であり，防食工として飛沫・干満部には汎用ステンレス鋼に比べて耐食性の高い耐海水性ステンレス鋼（PRE=41）による被覆防食，海中部にはアルミ陽極による電気防食が施されている．耐海水性ステンレス鋼の化学成分を表-3.2.1，アルミ陽極の仕様を表-3.2.2 に示す．設計防

食電流密度に関しては，当該海域が汚染海域（表-3.2.3）<sup>1)-2)</sup>であることを考慮し，海中部は  $130\text{mA}/\text{m}^2$ ，海底土中部は  $30\text{mA}/\text{m}^2$  で設計されている．なお，耐海水性ステンレス鋼被覆へも防食電流が流入するため，無効電流として M.S.L.～L.W.L.間を防食対象面積に加えて設計されている．

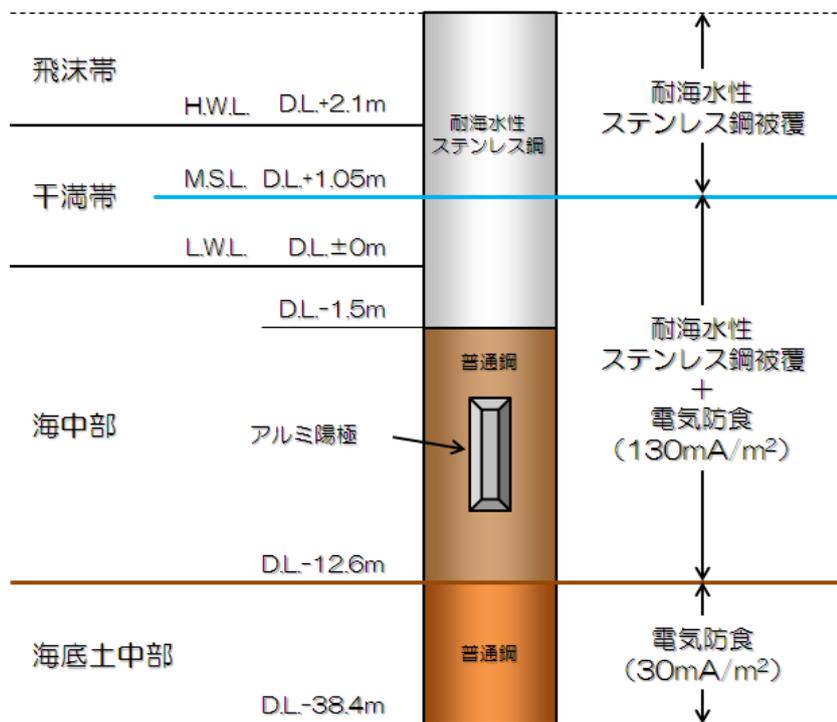


図-3.2.1 J1 ジャケットの防食設計仕様



写真-3.2.1 大井埠頭ジャケット式栈橋の外観（下部工）

表-3.2.1 耐海水性ステンレス鋼の化学成分 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Fe
許容	0.020	0.80	1.00	0.030	0.015	17.00	16.00	5.50	0.50	0.16	残
範囲	以下	以下	以下	以下	以下	~15.00	~21.00	~6.50	~1.00	~0.24	
代表値	0.01	0.55	0.57	0.017	0.001	17.98	20.19	6.26	0.67	0.22	残

表-3.2.2 アルミ陽極の仕様

定格電流	3.5A
耐用年数	50年
型式	H-356A142
形状	(255+300)×280×1420mm
正味質量	295.6kg
製品質量	312.0kg
表面積	17412.5cm <sup>2</sup>

表-3.2.3 大井埠頭の水質汚染判定<sup>1)-2)</sup>

水質項目	測定値	しきい値	判定	
Cl <sup>-</sup> 濃度(mg/dm <sup>3</sup> )	16849	<17800ppm	○	汚染海域
DO(mg/dm <sup>3</sup> )	5.4	<6.0	○	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 濃度(mg/dm <sup>3</sup> )	0.5	>0.1	○	

※1 港空研調べ

※2 水質項目のうち、2項目がしきい値を満足した場合に「汚染海域」と判定される。

電気防食試験装置の概要を図-3.2.2に示す。構造物の防食状態（被防食体の電位）を確認するため、-1.5mと-12mの2箇所の位置に照合電極（海水塩化銀電極）を設置した。特に耐海水性ステンレス鋼被覆の近傍に位置する-1.5mは、普通鋼より貴電位である耐海水

性ステンレス鋼被覆の電気防食に及ぼす影響を詳細に捉えることがねらいである。また、アルミ陽極から発生する電流（以後、アノード電流）は、図-3.2.3 に示す電流計測装置を用い、電圧降下法によって計測した。本装置は芯金と一体構造を成しており、ボックス内部にはシャント抵抗（50mV-5A）を内蔵している。通常はデータロガーにてシャント抵抗の端子電圧を計測し、この端子電圧をシャント抵抗値（10mΩ）で除することによって電流値に換算した。

被防食体の電位（以後、カソード電位）とアノード電流の連続計測にはデータロガー（HIOKI 製、PL-03）を用い、10分インターバルで記録した。本ジャケットは2002年3月に設置されたが、電気防食モニタリングを開始したのは設置から約半年後の2002年10月である。現時点で約10年が経過しており、この間に動作不良のため照合電極を2回（2007年9月、2012年6月）交換している。また、2012年2月からは、アルミ陽極近傍に照合電極を設置し、アルミ陽極の電位（以後、アノード電位）の連続モニタリングを開始した。

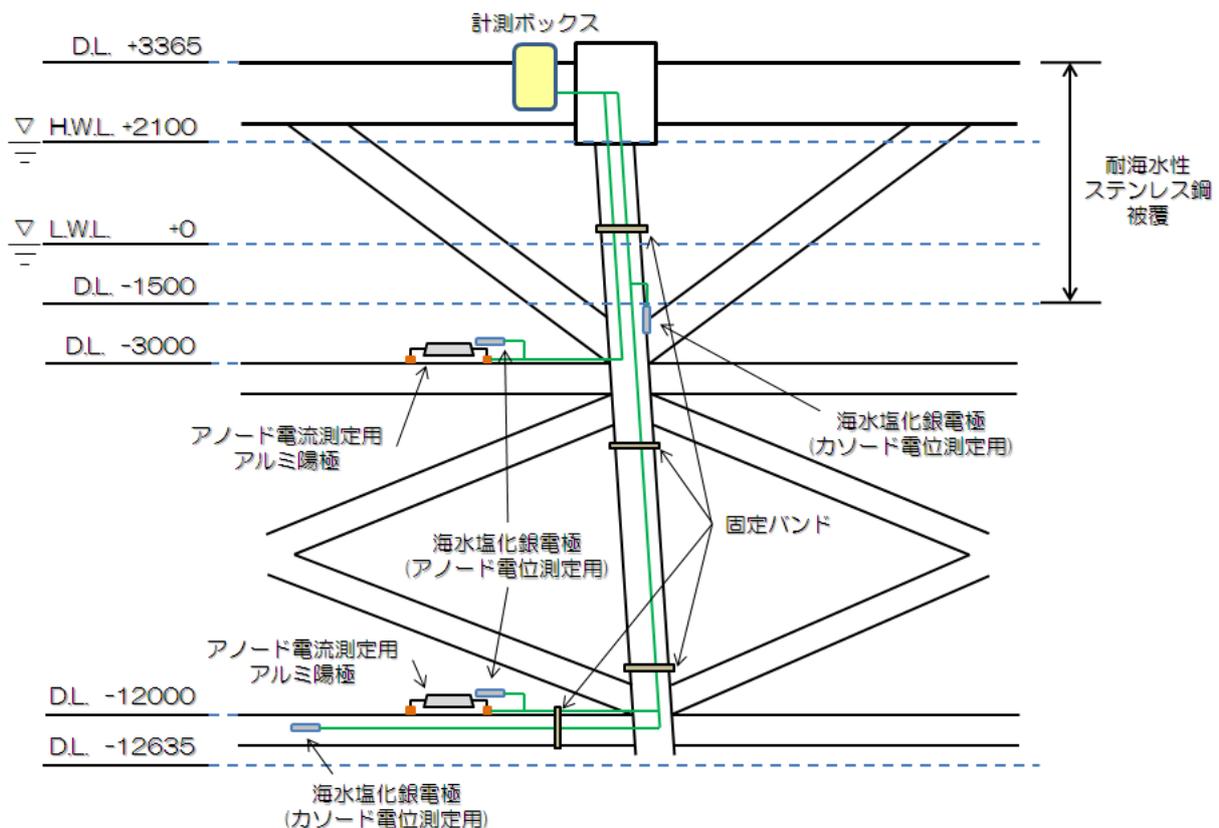


図-3.2.2 大井埠頭新5バースの電気防食試験装置の概要

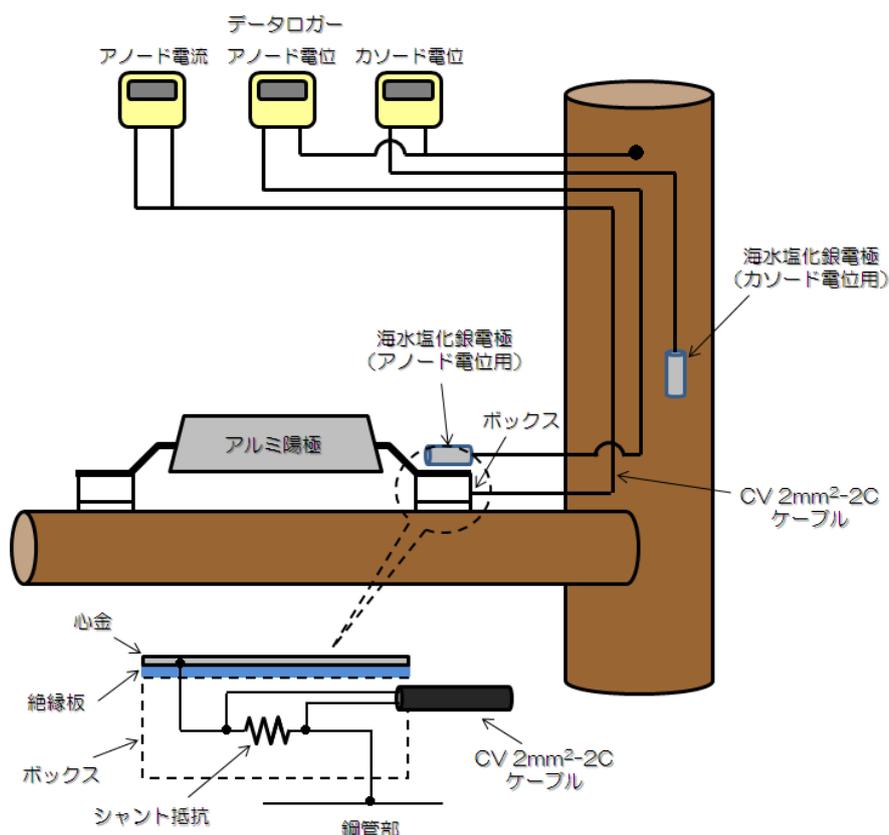


図-3.2.3 電位・電流計測装置の詳細

## (2) アルミプローブを用いたアノード電流の推定方法

実構造物に設置されているアルミ陽極の発生電流（アノード電流）を測定するため、アルミプローブを用いた測定方法（以下、アルミプローブ法）を考案し、実構造物において適用した。アルミプローブ法は点検コストを低く抑えるため、現地で簡便に計測できることを目的として考案されたものである。

装置はアルミプローブ、ゼロ抵抗電流計（東方技研製，7635），データロガー（HIOKI製，データミニ LR5042）から構成される。アルミプローブは、現地で設置されているアルミ陽極と同組成の電気防食用アルミニウム合金（(株)ナカボーテック社製 ALAP-K, 表-3.1.4 参照）であり，金型鋳造で  $\phi 20 \times 150\text{mm}$  に成形した後，リード線を取り付け，供試面を除く部分をシリコンシーラントおよびテフロンテープで被覆した（図-3.2.4）。アルミプローブの供試面積は，電気防食系に及ぼす影響を抑制するためにできるだけ小さいことが望ましく，また，アルミプローブのアノード分極による影響を極力抑えるために  $60\text{cm}^2$ （定格出力時で  $0.2\text{mA}/\text{cm}^2$ ）とした。

表-3.2.4 アルミプローブの化学成分 (mass%)

Zn	Mg	Si	In	Al
3.2	1.5	0.2	0.02	残

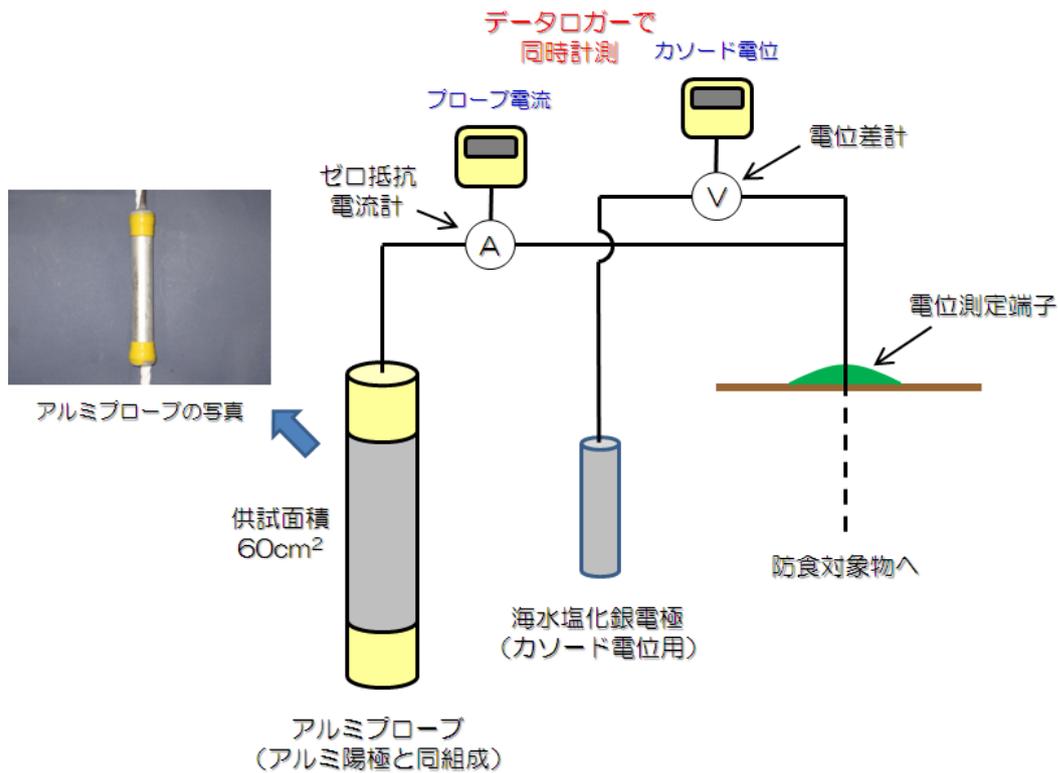


図-3.2.4 アルミプローブ法の装置図

プローブ電流の測定方法は図-3.2.5 に示すとおりである。ロープを取り付けたアルミプローブを海中部のアルミ陽極付近まで吊り降ろし、アルミプローブからのリード線をゼロ抵抗電流計のマイナス入力端子、鋼管杭（電位測定用端子）からのリード線をプラス入力端子に接続して電流計測を行った。なお、ゼロ抵抗電流計の出力端子にデータロガーを接続し、10s インターバルで電流値を記録した。

本計測値から、アノード電流を推定するためには、計測した電流値に換算係数（実構造物試験で得られたアノード電流/プローブ電流比）を乗じて得られる値を推定アノード電流とした。詳細は 3.2.3(3)に示す。

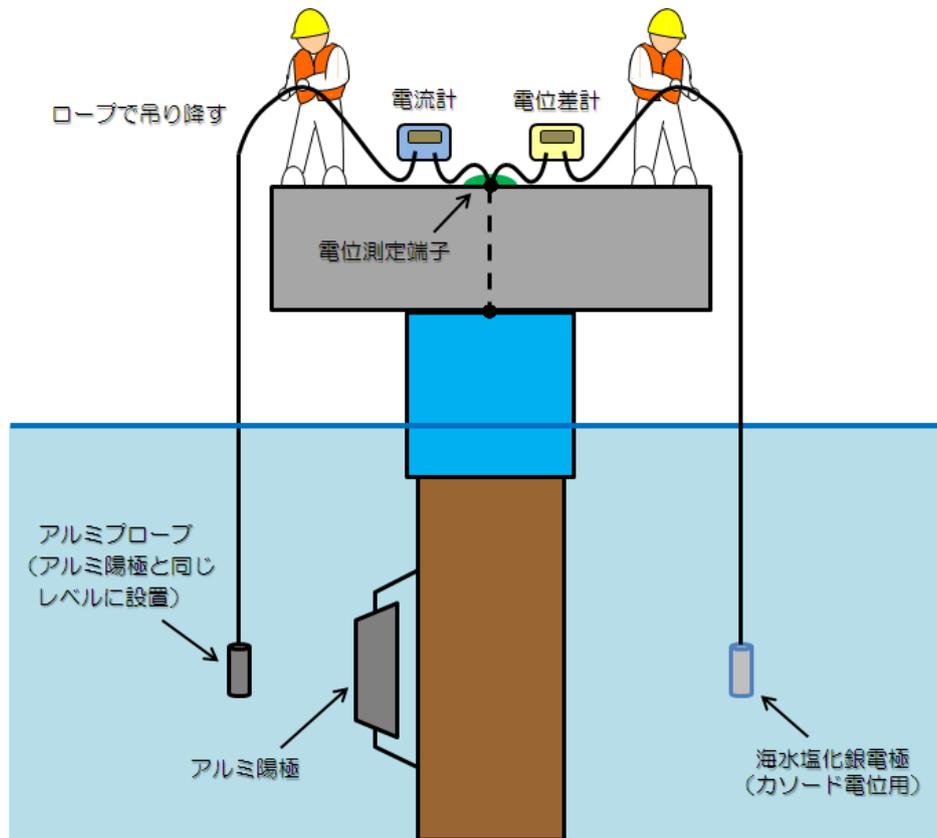


図-3.2.5 プローブ電流の測定方法

アルミプローブ法の確認試験は、大井埠頭新5バース，東京国際空港D滑走路連絡誘導路（羽田空港），南本牧埠頭MC-3ブロックで実施した。

南本牧埠頭MC-3ブロックで実施している電気防食試験の概要を図-3.2.6に示す。MC-3ブロックはセル式岸壁（築造中）であり，飛沫・干満部（L.W.L.-1.0m以上）はコンクリート被覆工，海中部は電気防食工となっている。なお，電気防食工には，アルミ陽極による流電陽極方式が採用されている。2011年10月頃にアルミ陽極が設置されたが，セル式岸壁の電気防食特性を確認するためにアノード電流計測用のアルミ陽極（2箇所），アノード電位計測用の照合電極（2箇所），カソード電位計測用の照合電極（2箇所）も同時に設置し，データロガーを用いて連続モニタリングを実施している。なお，プローブ電流の計測状況を写真-3.2.2に示す。

羽田空港で実施している電気防食試験の概要については，図-3.2.6に示す。

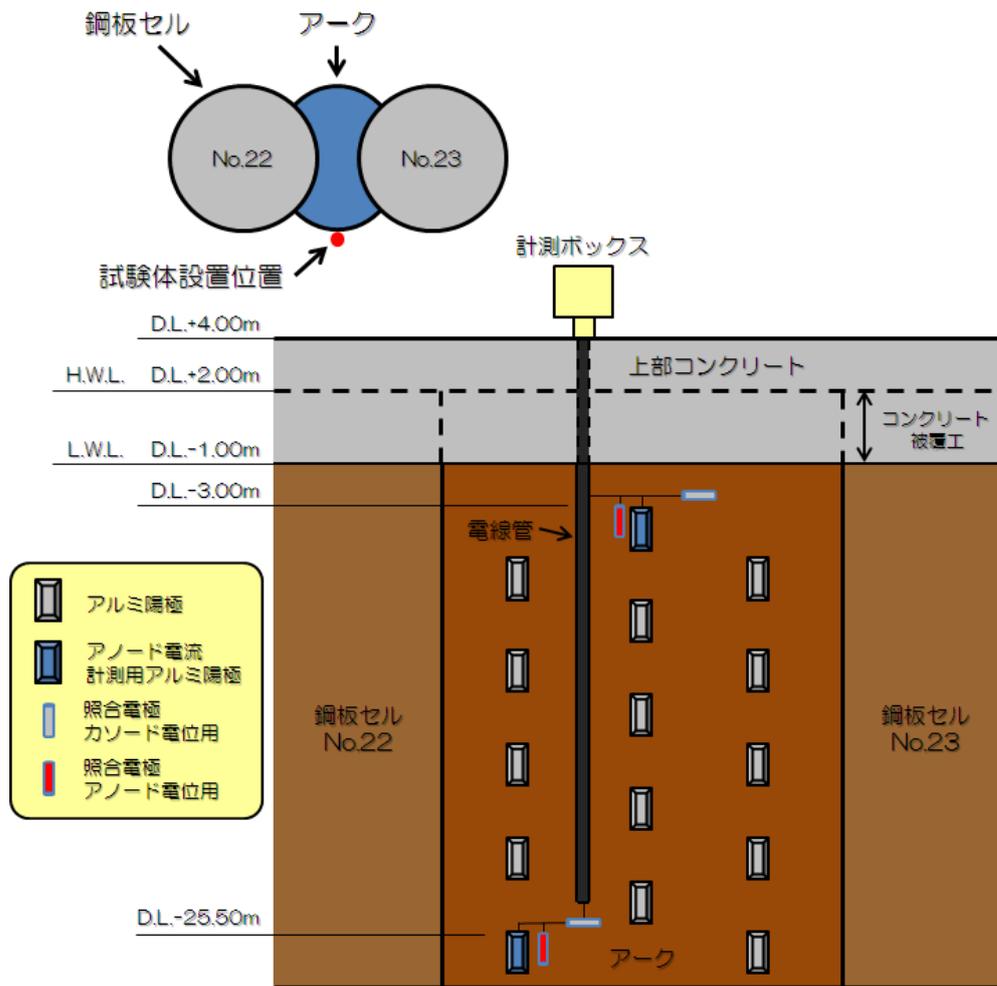


図-3.2.6 南本牧埠頭 MC-3 で実施している電気防食試験の概要図



写真-3.2.2 プローブ電流の計測状況

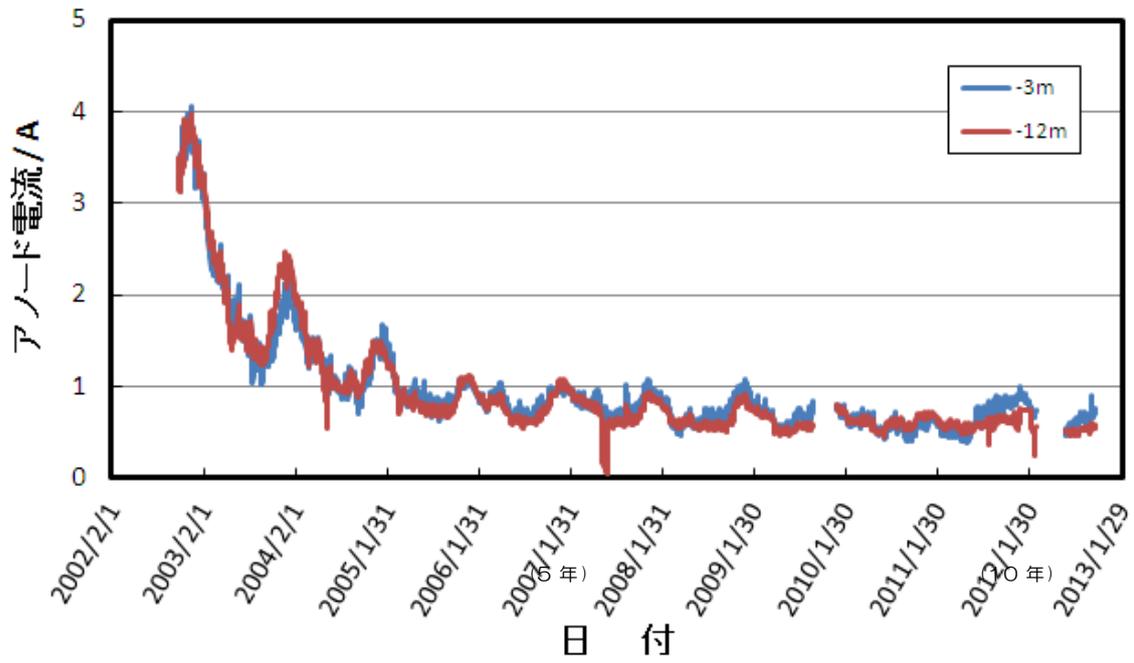
### 3.2.3 試験結果および考察

#### (1) 大井埠頭新5バースの電気防食特性

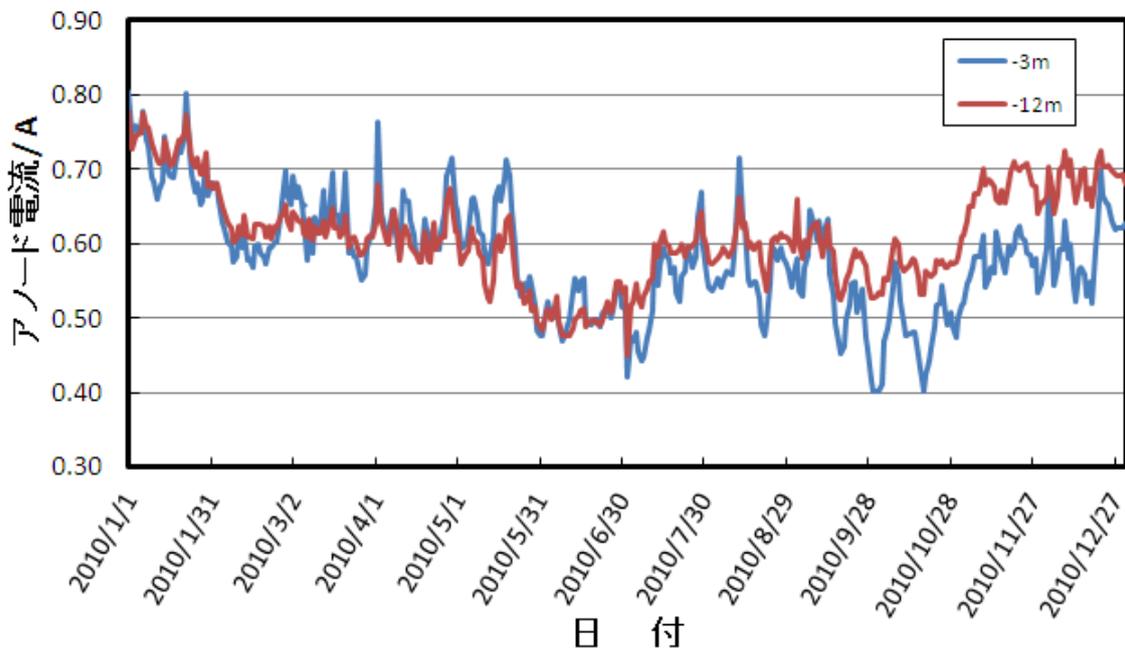
##### 1) アノード電流の経時変化

アノード電流の経時変化を図-3.2.7(a)に示す。アノード電流は、いずれの深度においても設置初期に最大で約4.0Aまで上昇した後、増加・減少を繰り返しながら減少するのが確認できる。これは流電陽極法の初期に見られる特有の現象である。表-3.2.2より、アルミ陽極の定格電流（設計上、カソード電位が-810mVの時にアルミ陽極から発生する電流）は3.5Aであることから、この値よりも大きい電流が流れていた時期は、防食電位を満足していなかったことを意味しており、設計防食電流密度の不足とアノード分極特性の低下（アノード分極抵抗の増大）が原因として挙げられる。さらに、アノード電流は、1年を単位として周期変動しているのが確認できる。2010年のアノード電流の経時変化を例として図-3.2.7(b)に示す。これは海水中の溶存酸素濃度の季節変動に対応していると考えられる。アノード電流は春から夏にかけて低下し、その後、秋から冬にかけて増加する傾向が読み取れる。同施設における既往の研究<sup>3)</sup>より、海水中の溶存酸素濃度は春から夏の時期に少なく、秋から冬の時期に多いことが明らかにされている。この原因を分極曲線で説明する。分極曲線の模式図を図-3.1.8に示す。鋼材表面で生じているカソード反応は、溶存酸素の還元反応が主であることから、溶存酸素濃度の低い春から夏の時期は、カソード反応が抑制されて（①線）アノード電流が低下し（ $I_{a1}$ ）、一方で、溶存酸素濃度の高い秋から冬の時期は、カソード反応が促進されて（②線）アノード電流が増加した（ $I_{a2}$ ）と考えられる。

電流低減率の経時変化を図-3.2.9に示す。電流低減率は、いずれの深度においても供用初期において著しく低下したが、4年目以降は緩やかな低下に転じた。電流低減率の設計値：0.50（1.75A）に到達するまでに要した期間は、いずれの深度も約13ヶ月である。6年目以降は0.20以下で推移し、11年目となる2013年1月には約0.15～0.18まで低下した。深度別では、-3mの方が全体的に高い値となる傾向を示したが、これは耐海水性ステンレス鋼被覆の影響で-12mよりもアノード電流が大きいためである。電流低減率が低い値であるほど優れた防食状態といえるが、0.50を下回るとアルミ陽極の寿命は設計寿命よりも長くなるので、過剰設計と考えることもできる。



(a) 全データ



(b) 2010年のデータ

図-3.2.7 アノード電流の経時変化

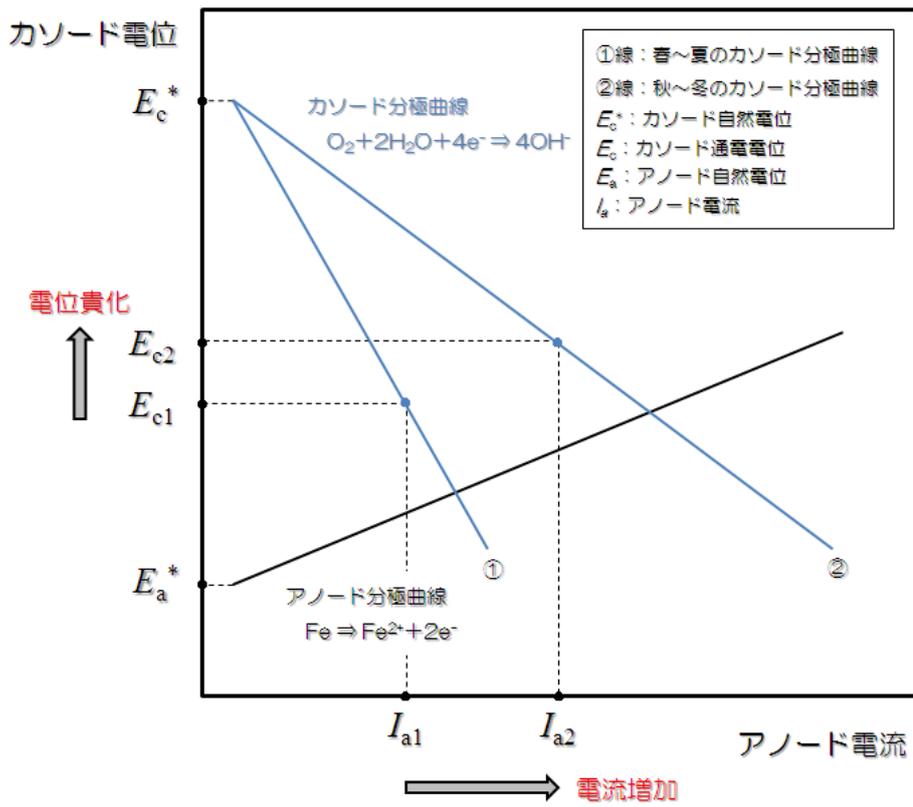


図-3.2.8 カソード分極曲線の季節変化

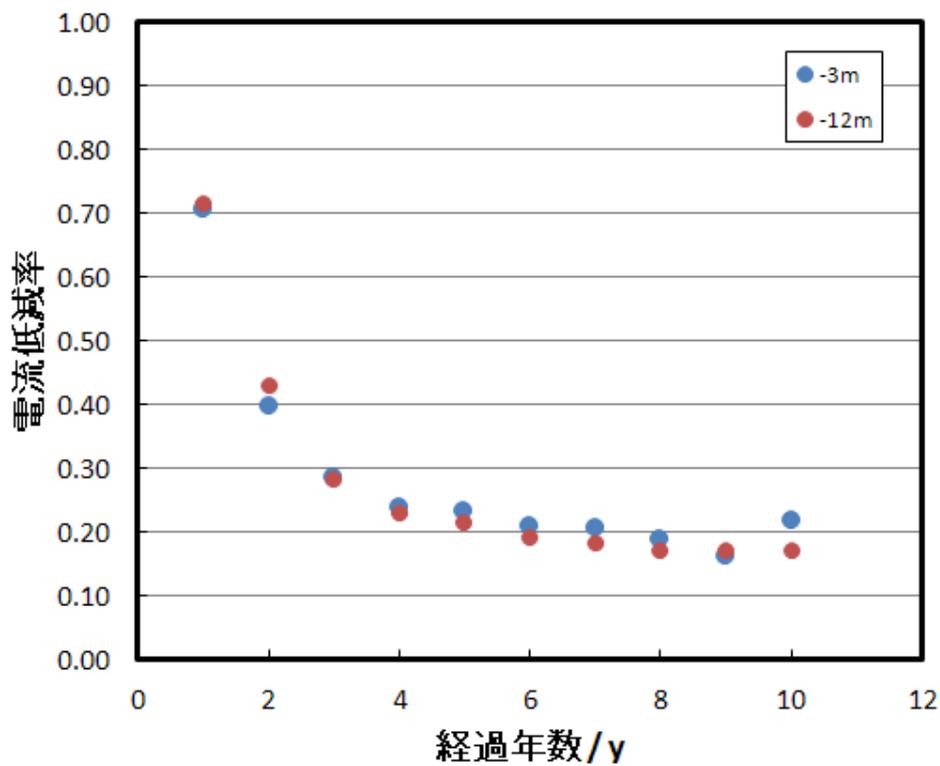


図-3.2.9 電流低減率の経時変化

## 2) カソード電位の経時変化

カソード電位の経時変化を図-3.2.10(a)に示す。-12mのカソード電位は、計測開始時より防食電位である-800mVよりも卑な電位を維持していた。一方、-1.5mは、計測開始時は-720~-750mVで推移し、しばらく-800mVを上回る時期が確認されたが、13ヶ月経過以降は-800mV以下を維持するようになり、いずれの深度も防食電位を満足した。

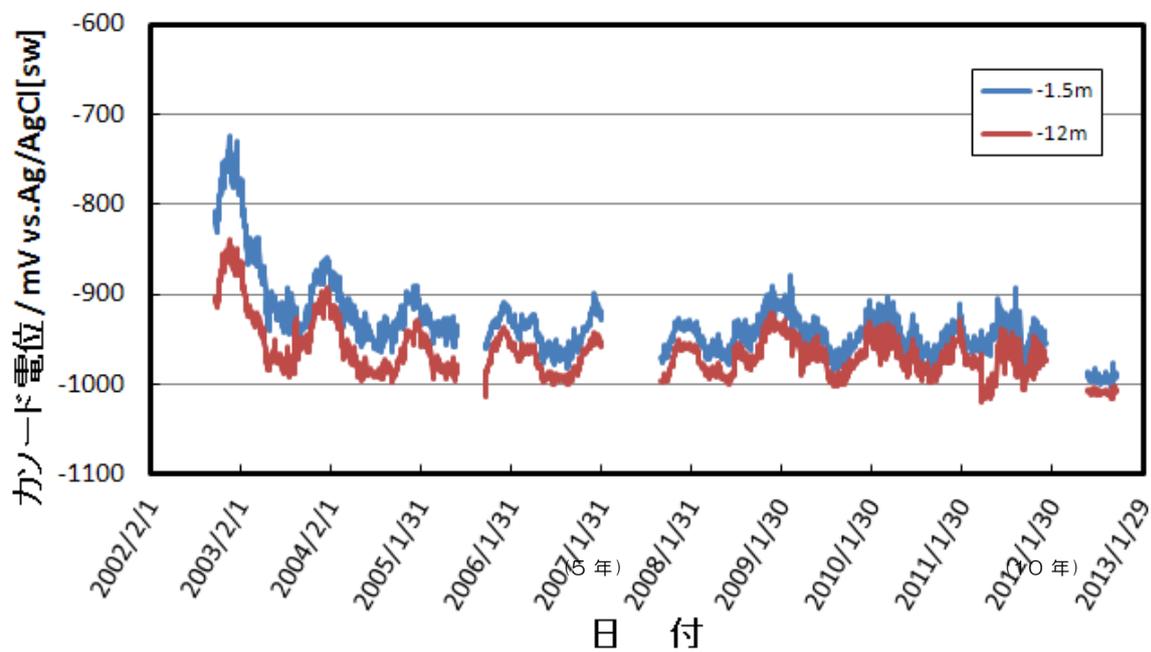
カソード電位は1年を単位に周期変動しているのが確認できる。2010年のデータを例として図-3.2.10(b)に示す。この原因は、先に述べたアノード電流の時と同様である。カソード電位は、春～夏にかけて卑側に変化し、その後、秋から冬にかけて貴側に変化しているのが図から読み取れる。図-3.2.8を用いて考察すると、海水中の溶存酸素濃度は春～夏の時期に少なく秋～冬の時期に多いことから、溶存酸素濃度の低い春から夏の時期はカソード反応(①線)が抑制されるためにカソード電位が卑化し( $E_{c1}$ )、溶存酸素濃度の高い秋から冬の時期はカソード反応(②線)が促進されるためにカソード電位が貴化した( $E_{c1}$ )と考えられる。

## 3) 潮位とカソード電位およびアノード電流の関係

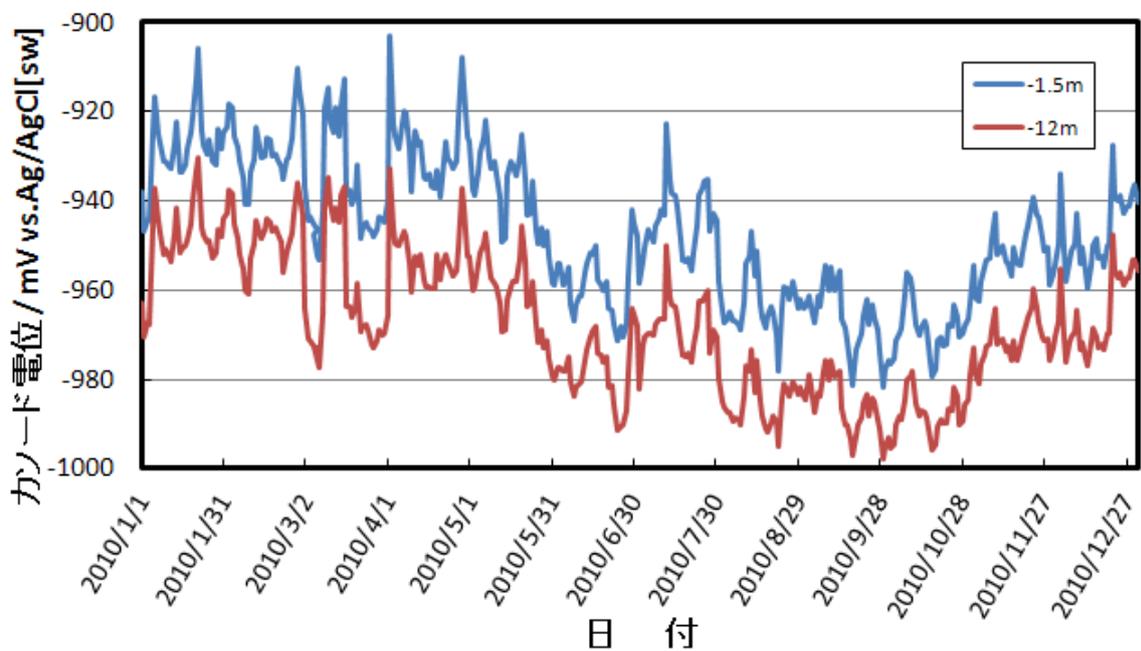
図-3.2.10(a)のカソード電位に加えて潮位変動をプロットしたものを図-3.2.11に示す。なお、潮位との相関を確認するため、2012年9月1日～14日の短期間のデータを抜粋してプロットした。図より分かるとおり、カソード電位は潮位の変動と同期しており、満潮とともに貴側へ変化し、干潮とともに卑側に変化する傾向が認められた。また、相関係数は、-1.5mで $r=0.76$ 、-12mで $r=0.75$ であり、潮位とカソード電位の間には相関があることが明らかである。

図-3.2.7(a)にアノード電流を加えて潮位変動をプロットしたものを図-3.2.12(a)に示す。なお、潮位との相関を確認するため、2012年9月1日～14日の短期間のデータを抜粋してプロットしたものを図-3.2.12(b)に示す。アノード電流は潮位変動と連動しており、満潮とともに増加し、干潮とともに低下する傾向が認められた。この傾向は-3mにおいて顕著であった。また、相関係数は、-3mで $r=0.72$ 、-12mで $r=0.69$ であり、潮位とアノード電流の間には相関があることが明らかである。

カソード電位とアノード電流の潮位変動による変化は、防食対象面積の変化が原因と考えられる。この原因を図-3.2.13を用いて考察する。満潮に向かって防食対象面積は増加するため鋼材への酸素供給量が多くなり、それに伴ってカソード反応が増加する(①線⇒②)



(a) 全データ



(b) 2010年のデータ

図-3.2.10 カソード電位の経時変化

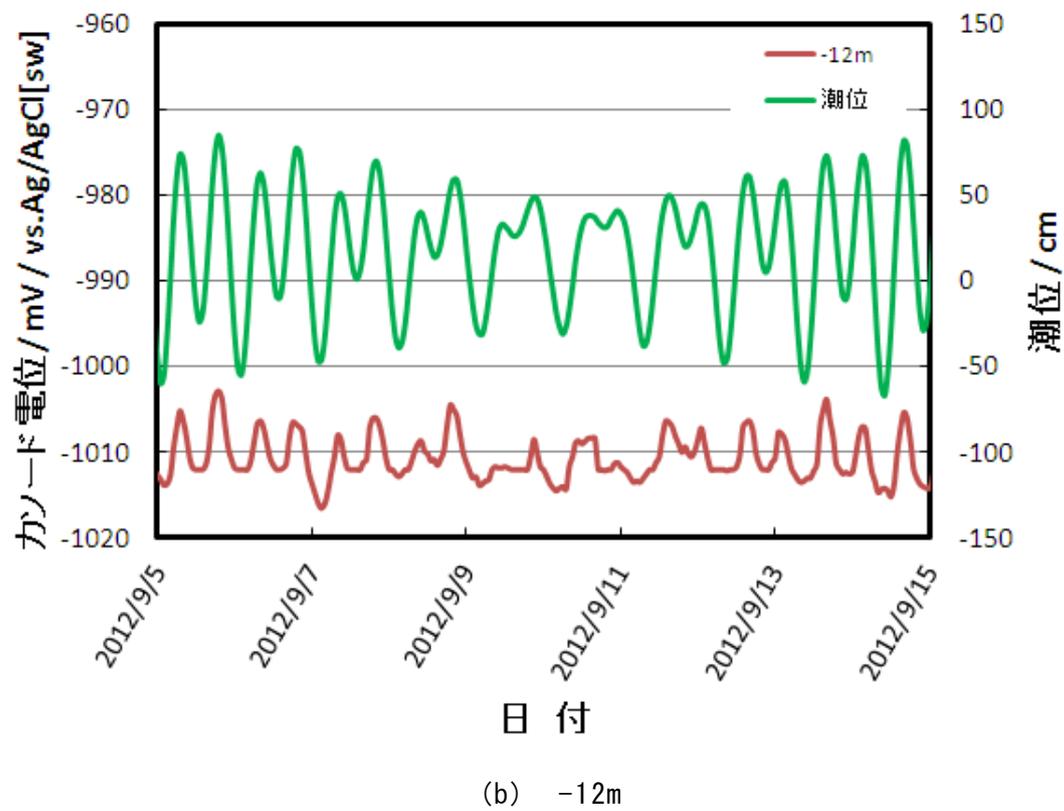
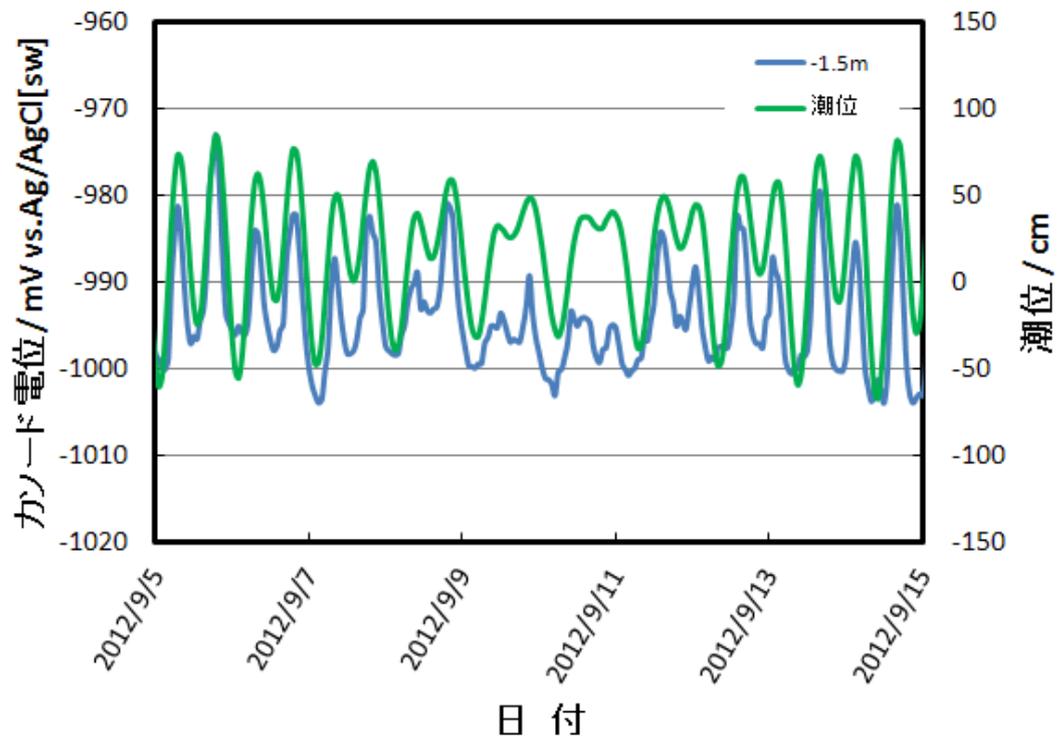
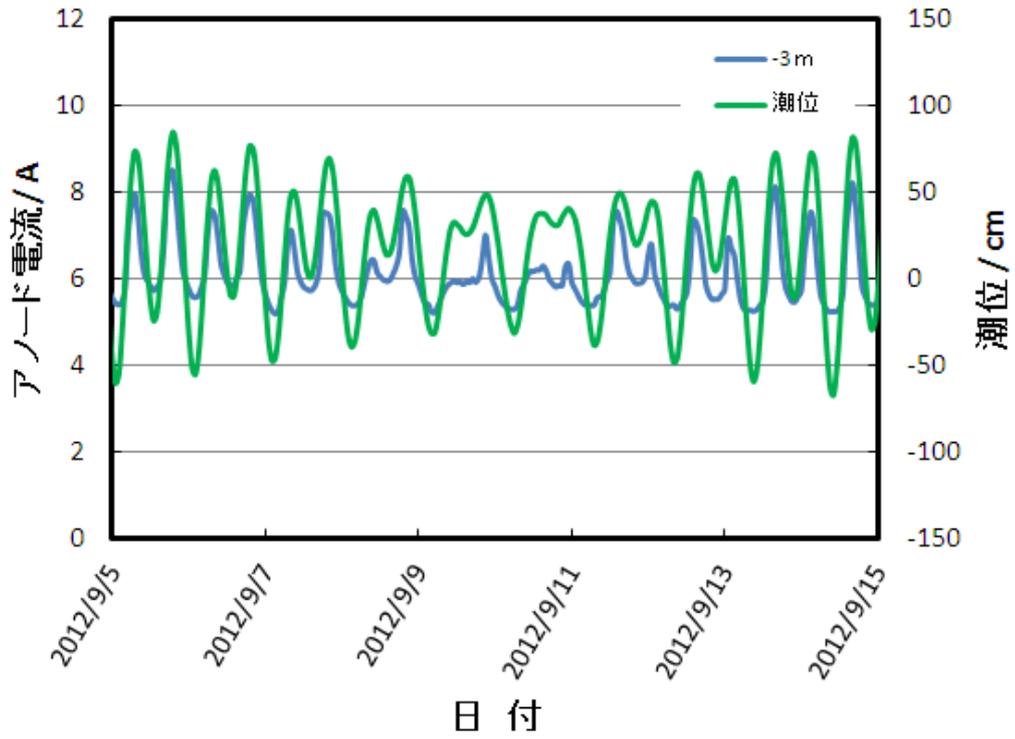
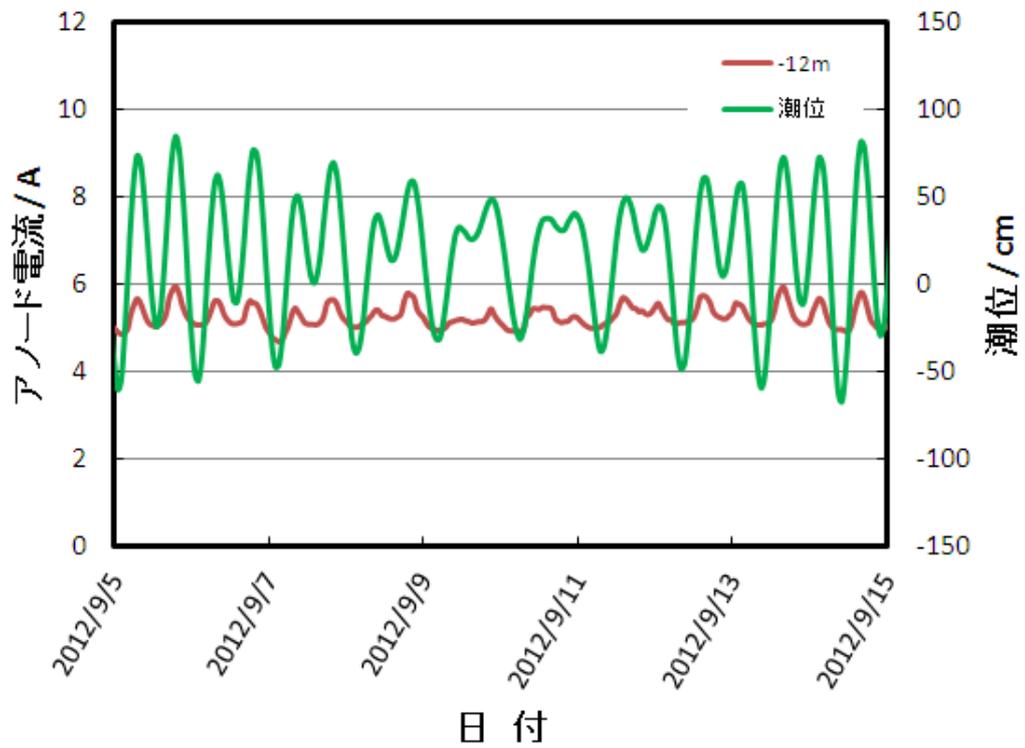


図-3.2.11 潮位とカソード電位の経時変化



(a) -3m



(b) -12m

図-3.2.12 潮位とアノード電流の関係

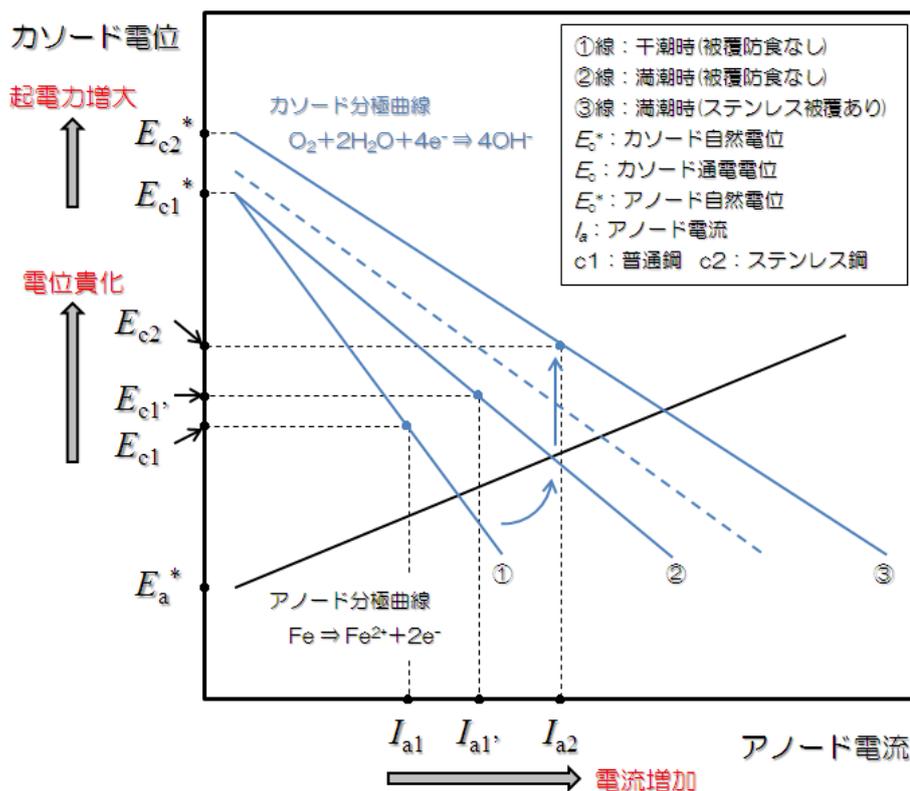


図-3.2.13 潮位変動によるカソード分極曲線の変化

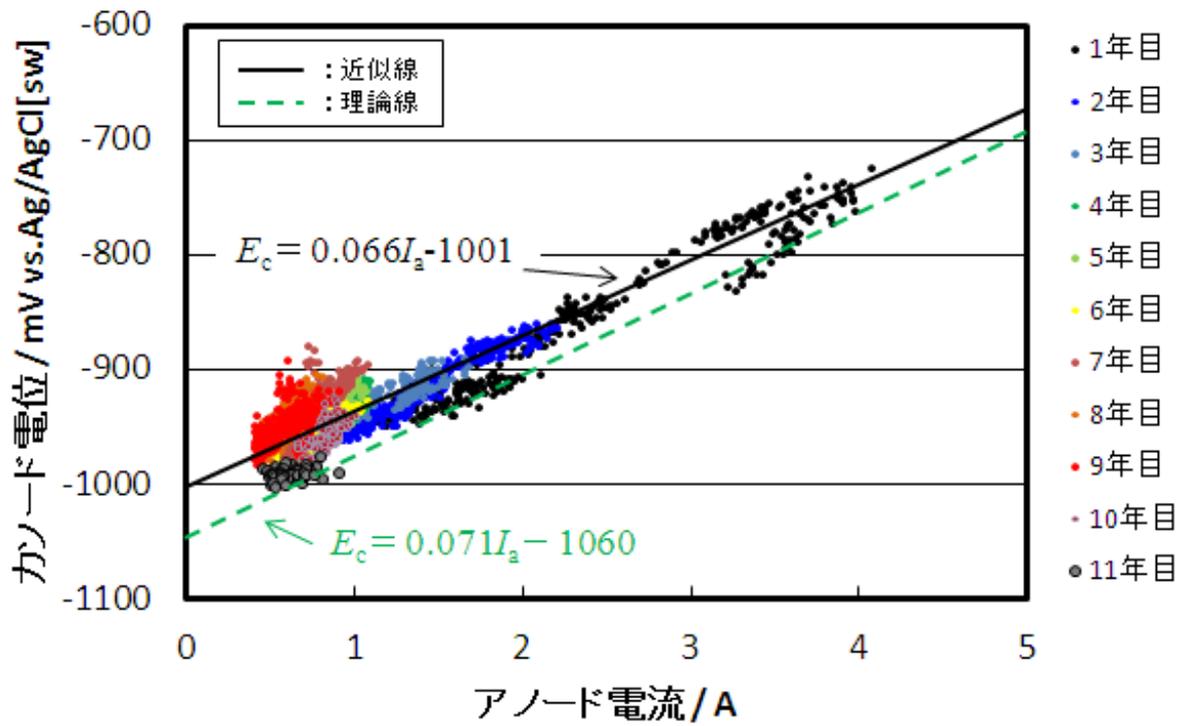
線) 結果, アノード電流は増加し ( $I_{a1} \Rightarrow I_{a1}'$ ) カソード電位は貴化する ( $E_{c1} \Rightarrow E_{c1}'$ ). また, 干満部には耐海水性ステンレス鋼被覆が施されており, 耐海水性ステンレス鋼被覆の自然電位は海中部の普通鋼よりも貴電位であることから, アルミ陽極との電位差 (起電力) が増加する (③線,  $I_{a1}' \Rightarrow I_{a2}$ ,  $E_{c1}' \Rightarrow E_{c2}$ ) ため, この現象はさらに助長される. -1.5mの方が-12mよりも貴電位を示すのは, -1.5mの方が干満部に近いためと考えられる.

#### 4) カソード電位とアノード電流の関係

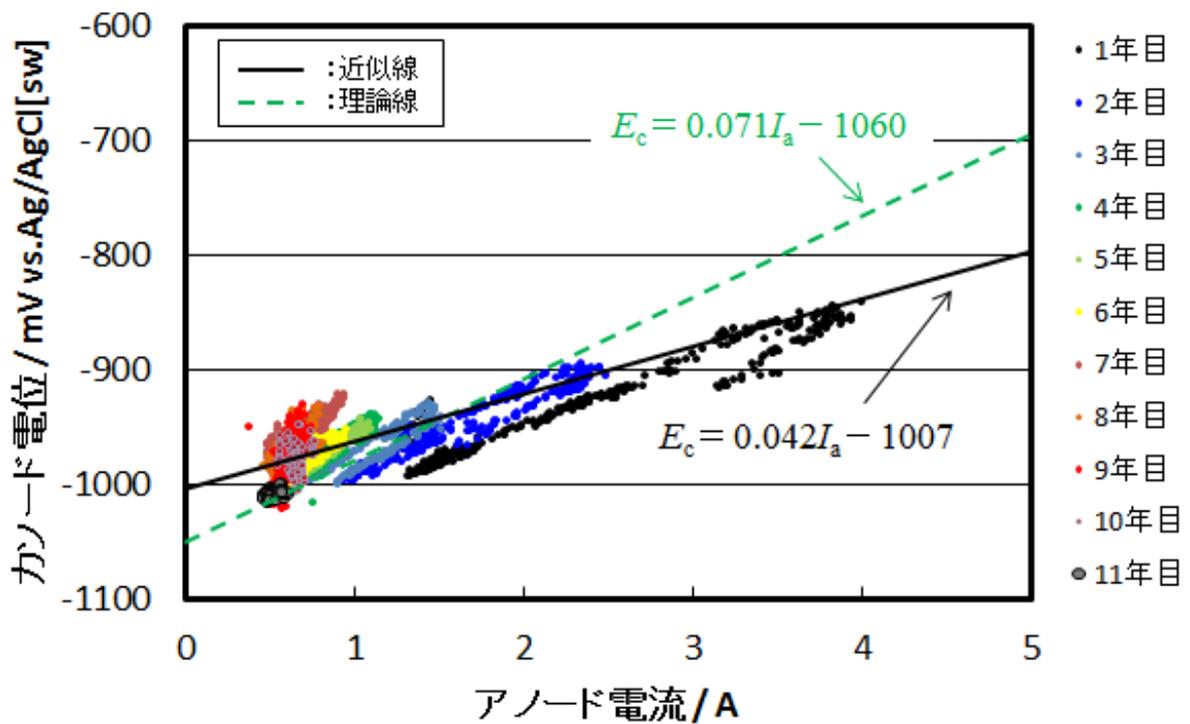
カソード電位とアノード電流の関係 ( $E_c$ - $I_a$ プロット) を図-3.2.14に示す.

$E_c$ - $I_a$ プロットは, 時間の経過とともに低電流-卑電位側に変化する挙動を示した. カソード電位とアノード電流の間には概ね直線関係が認められ, 海水中における一般的な電気防食特性<sup>4)-6)</sup>を示していた. 経時的な  $E_c$ - $I_a$ プロットの変化は, 以下の理由によって説明される.

電気防食によって生じるカソード反応によって鋼材表面の pH が上昇し, エレクトロコーティング (外層:  $\text{CaCO}_3$  (アラゴナイト), 内層:  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )<sup>7)-9)</sup>が形成される. これが



(a) -3m



(b) -12m

図-3.2.14 カソード電位とアノード電流の関係

時間の経過とともに緻密化し、溶存酸素の鋼材表面への拡散の障壁となってカソード分極抵抗を増加させることが原因と考える。

また、海水環境下における電気防食系では(3.2.1)式が成立する。この式をもとにカソード分極抵抗 ( $h_c$ ) のみを変化させた時の  $E_c$ - $I$  プロットのシミュレーションを行った。シミュレーションに用いた値は以下に示すとおりである。図-3.2.15 に示す結果から、カソード分極抵抗の増大とともに  $E_c$ - $I$  プロットは低電流-卑電位側に変化するのが確認できる。これはカソード分極抵抗の増加により、起電力 ( $E_c-E_a$ ) が減少するためである。

$$I = \frac{E_c - E_a}{R_s} = \frac{E_c^* - E_a}{\frac{h_c}{S_c} + R_s} \quad (3.2.1)$$

$I$ : 回路電流(A)  $E_c^*$ : カソード自然電位(=-650mV)

$E_a$ : アノード電位(=-1060mV)  $h_c$ : カソード分極抵抗( $k\Omega \cdot cm^2$ )

$S_c$ : カソード面積(=80000 $cm^2$ )  $R_s$ : 極間抵抗(=0.071 $\Omega$ )

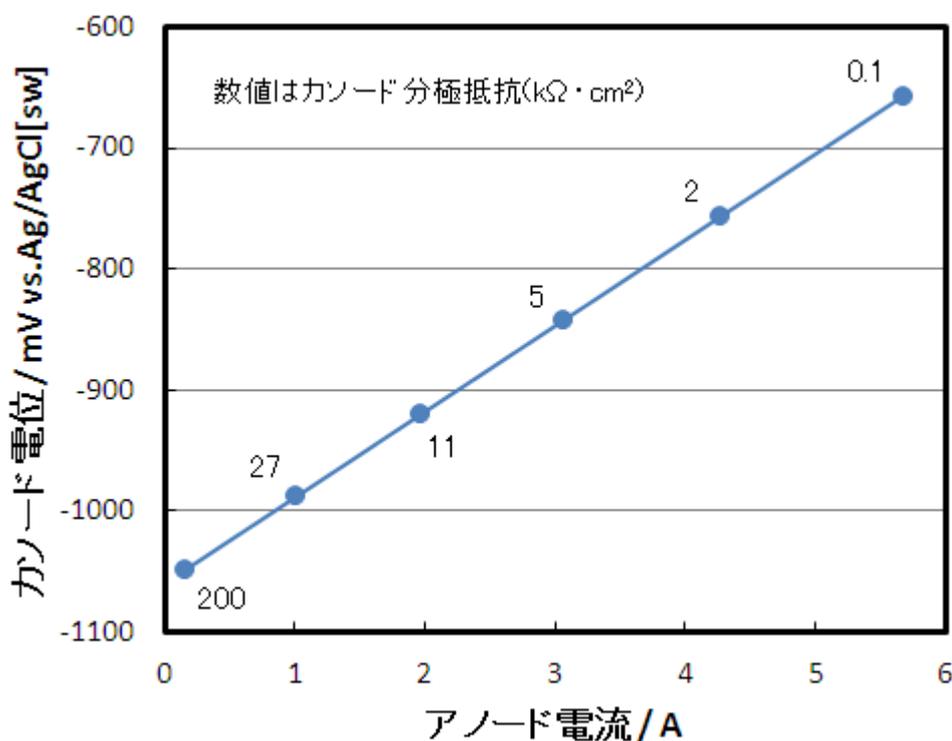


図-3.2.15 カソード分極抵抗を変化させた時の  $E_c$ - $I$  プロットの変化

設計データから求められる理論  $E_c-I_a$  線（理論線）と、 $E_c-I_a$  プロットを最小二乗近似することによって得られた近似線を図-3.2.13 中に示す。なお、理論線の導出は以下の通りである。

$$E_c = R_s \times I_a + E_a = \frac{\Delta E}{I_0} \times I_a + E_a$$

$$E_c = 0.071 \cdot I_a - 1060 \quad (3.2.2)$$

$E_c$  : カソード電位(mV)    $R_s$  : 極間抵抗( $\Omega$ )    $\Delta E$  : 有効電位差(=250V)  
 $I_0$  : 定格電流(=3.5A)    $I_a$  : アノード電流(A)    $E_a$  : アノード電位(=-1060mV)

いずれの深度においても、 $E_c-I_a$  線は理論線と近似線が一致せず、-3m では近似線は理論線よりも低電流－低電位側に位置し、-12m では傾きが小さくなり、陽極電位（y 切片）が貴化する傾向を示した。また、-3m では防食管理電位（-800mV）時におけるアノード電流が設計値（3.5A）よりも小さく、-12m では大きくなっていた。図-3.2.16 に示すように、-3m では設計よりも防食対象面積が広がっていること（電気防食影響範囲が設計よりも広い）、-12m では電流分布の不均一により海底土中部へ流れる予定の防食電流が海中部に流れ込んでいることが原因と考える。

$E_c-I_a$  プロットは、時間の経過とともに近似線からずれ始め、アノード電流の変化に対するカソード電位の変化の割合も、時間の経過（アノード電流の低下）とともに増加する傾向を示した。この原因として、アルミ陽極の経時的なアノード特性の変化が考えられる。

アルミ陽極の電位経時変化を図-3.2.17 に示す。アノード電位は、カソード電位よりも変動は小さいものの、周期性をもって変動している。-3m のアノード電位は平均値：-998mV、標準偏差（ $2\sigma$ ）： $\pm 12$ mV、-12m のアノード電位は平均値：-1005mV、標準偏差（ $2\sigma$ ）： $\pm 12$ mV であり、いずれの深度においても設計値の-1060mV よりも平均値比較で約 50mV 貴な値を示していた。周期的なアノード電位の変動は潮位変動と同期しており、図-3.2.18 に示すように潮位が高くなると貴電位、低くなると卑電位を示す。これは防食対象面積が潮位によって変化することが原因と考えられる。潮位が高い場合、防食対象面積の増加（カソード反応の増加（復極））により発生電流も増加するためアノード電位は貴化し、一方、潮位が低い場合には、防食対象面積の減少（カソード反応の低下）により発生電流も低下

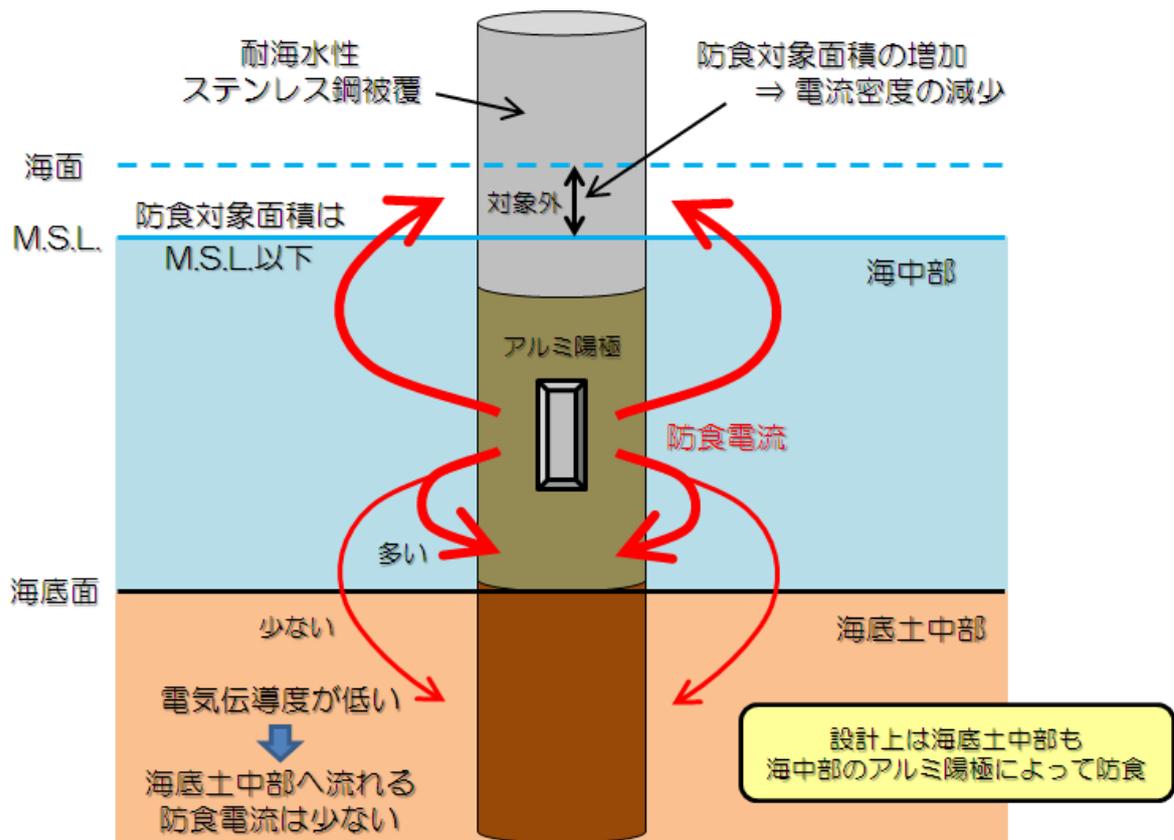


図-3.2.16 現場の設計防食電流密度が設計値と異なる原因（模式図）

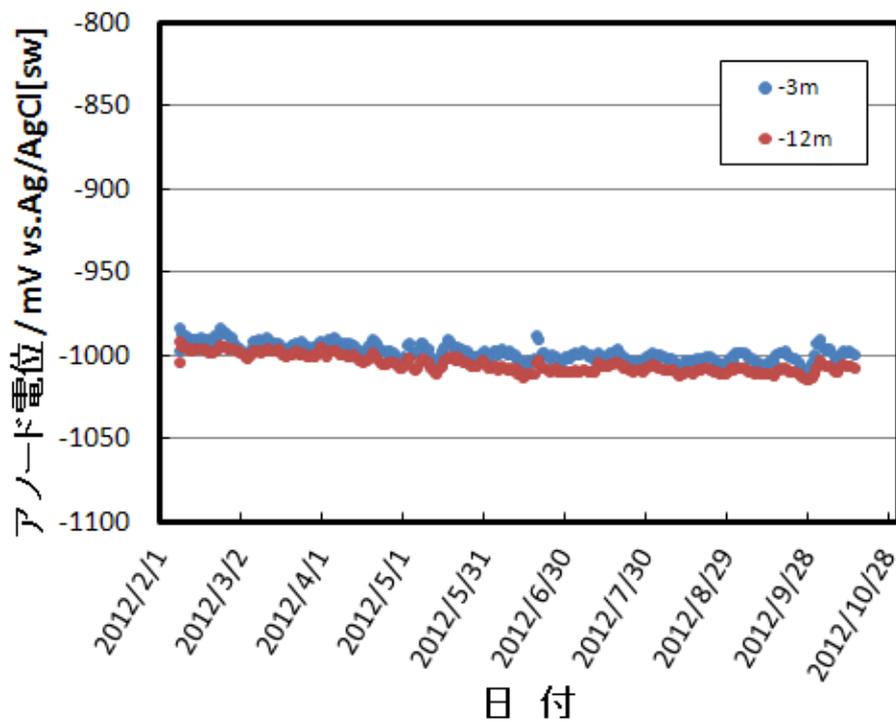


図-3.2.17 アルミ陽極の電位経時変化

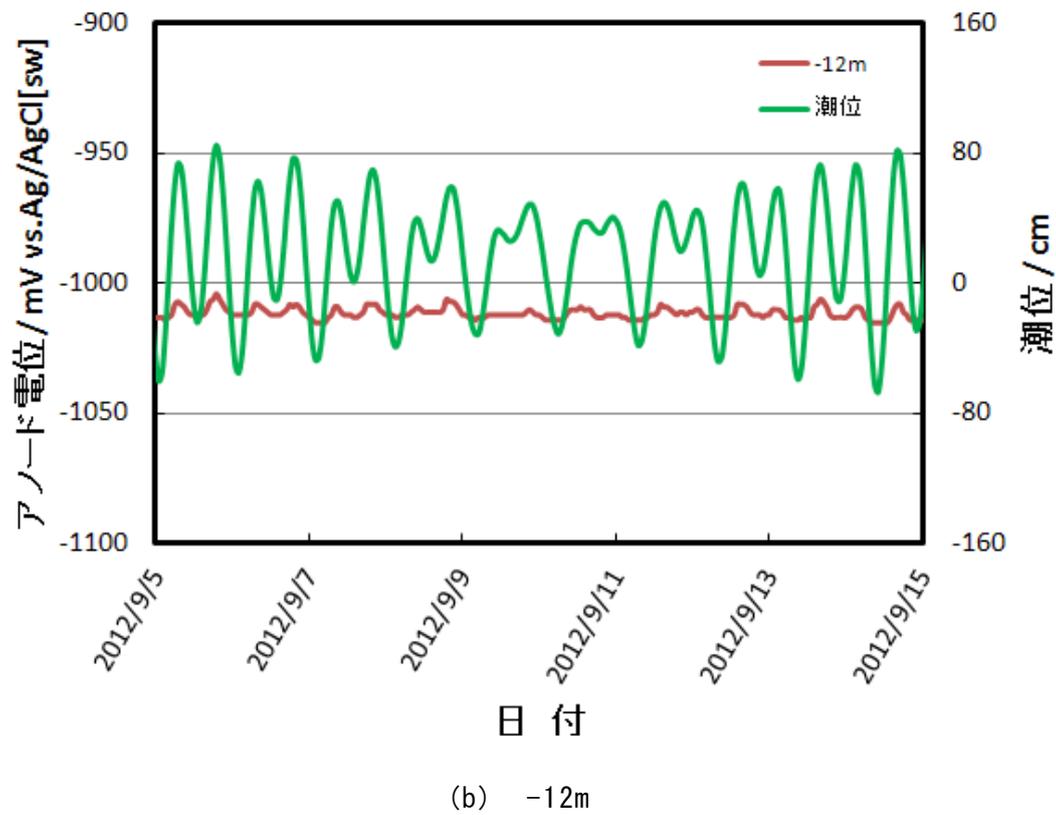
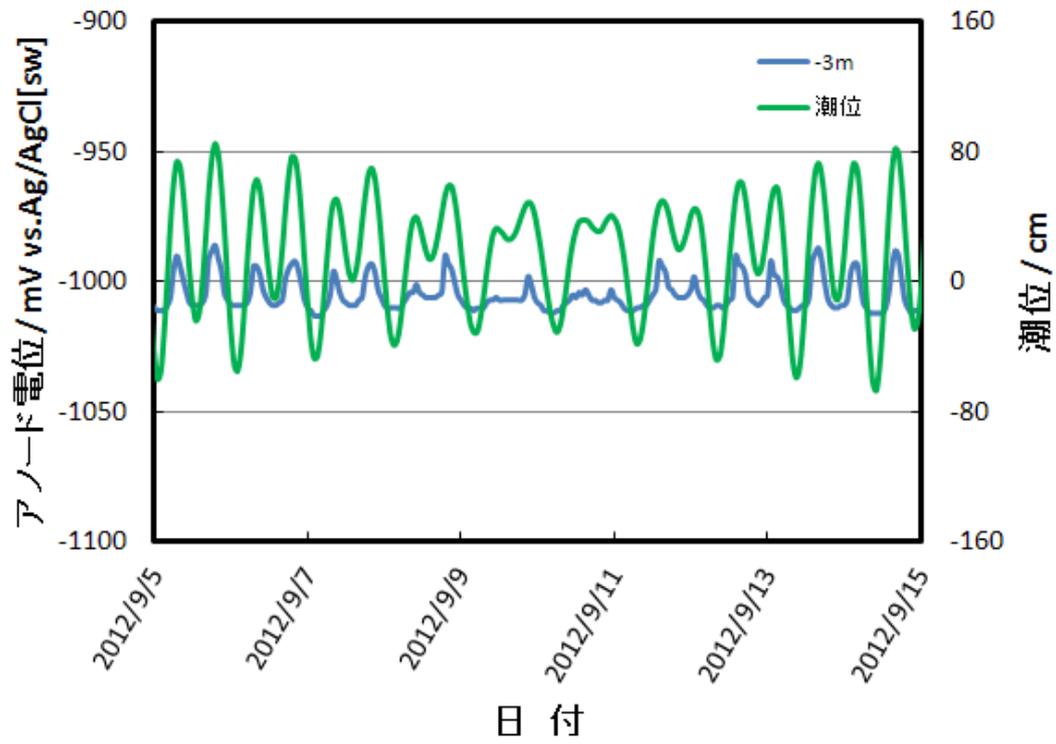


図-3.2.18 潮位とアノード電位の関係

するためアノード電位は卑化する。特に本施設では、飛沫・干満部に自然電位が普通鋼よりも貴な耐海水性ステンレス鋼被覆を施しているため、起電力の影響を受けてその傾向はより顕著となる。

アルミ陽極のアノード分極曲線を図-3.2.19 に示す。図中のプロットは現地計測データ、青色の実線は現地計測データから推定されるアノード分極曲線、赤色の実線は現地海水中に浸漬して測定したアルミテストピースのアノード分極曲線（アルミ陽極の初期の状態を想定）である。浸漬直後のアルミテストピースの自然電位は約-1070mVを示しており、アノード分極曲線は低分極領域が広く、 $1.0\text{mA}/\text{cm}^2$ においても30mV程度の分極である。一方、現地計測データは、浸漬直後に比べて低電流－貴電位側に変化していた。 $0.1\text{mA}/\text{cm}^2$ 時の電位が浸漬直後は約-1065mVであるのに対し、現地計測データは約-990mVを示し、70mV程度貴化していた。現地計測データから推定されるアノード分極曲線より、自然電位は約-1010mVと読み取ることができ、分極特性のみならず自然電位そのものも経時的に変化しているのがわかる。アノード分極特性が経時的に変化する原因は、アルミ陽極の溶解生成物（ $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ ）や海洋生物（フジツボ、イガイなど）が表面に付着し、アルミ陽極

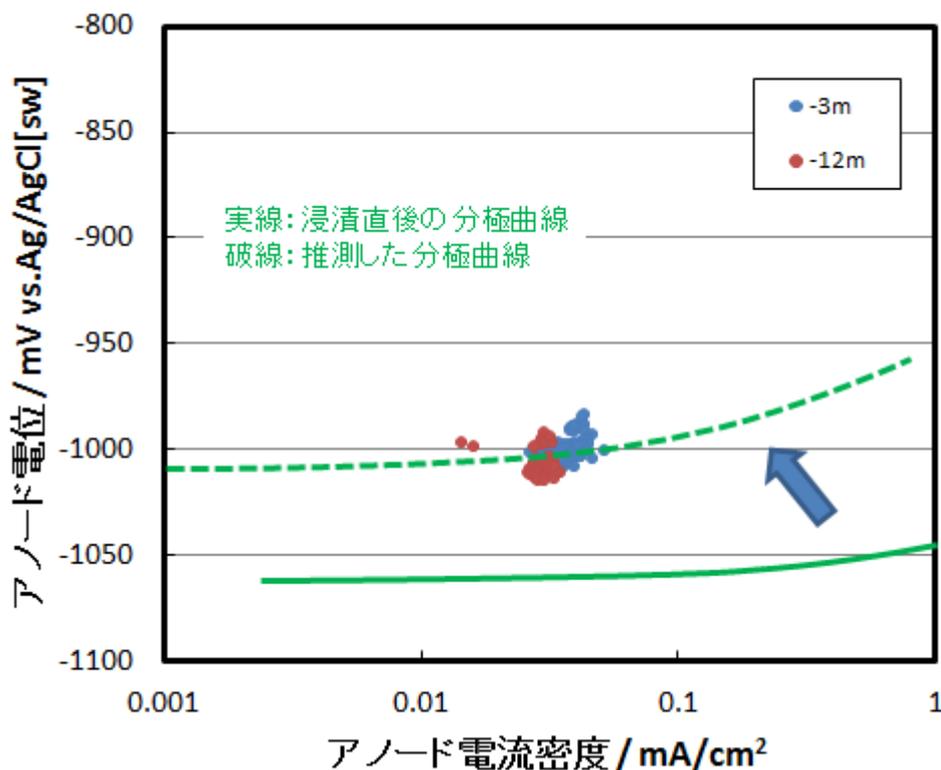


図-3.2.19 アルミ陽極のアノード分極曲線

の溶解反応を抑制するためと考えられ<sup>10)-12)</sup>、アノード分極曲線は図-3.2.19 に示すように低電流-貴電位側に変化すると推測される。また、現地計測データから推定される自然電位が、図-3.2.14 の  $E_c-I_a$  プロットより得られた近似線の切片の値と同等であったことから、この近似線を実施設の  $E_c-I_a$  線とみなすことができる。

以上のことから、低電流領域におけるカソード電位変動の増大は、アルミ陽極の経時的なアノード分極特性の変化と自然電位の貴化が原因として挙げられるが、本試験環境下におけるアルミ陽極の電流密度は非常に小さく、比較的low分極の領域に位置することから、自然電位の貴化の影響が強いと考えられる。

## (2) カソード電位と $E_c-I_a$ 線による陽極消耗量の推定

カソード電位と  $E_c-I_a$  線によるアルミ陽極の消耗量(以下、陽極消耗量)の推定を試みた。推定の手順は以下の通りである。

- ①設計条件より、理論線 ((3.2.3)式) を求める。
- ②(3.2.3)式より、平均カソード電位 (10 分間隔で測定した値の 1 日平均) に対するアノード電流を算出する。

$$E_{c,i} = 0.072 \cdot I_a - 1.06 \quad (3.2.3)$$

$E_{c,i}$ : カソード電位(実験値)(V)  $I_a$ : アノード電流(A)  $R_s$ : 極間抵抗(=0.071Ω)

- ③(3.2.4)式より、試験期間 ( $i=1 \sim t$  日間) における陽極消耗量を推定する。

$$\Delta W_e = \sum_{i=1}^t \frac{\left( \frac{E_{c,i=1} + 1.06}{R_s} \right) \times \Delta T}{Q} \quad (3.2.4)$$

$\Delta W_e$ : 推定した陽極消耗量(kg)  $E_{c,i}$ : 平均カソード電位(V)  $R_s$ : 極間抵抗(Ω)

$\Delta T$ : 積算間隔 1 日(24h)  $Q$ : アルミ陽極の発生電気量(2600A·h/kg)

また、本試験では、実際に設置されているアルミ陽極のアノード電流を計測しているため、平均アノード電流（10分間隔で測定した値の1日平均）を用いて(3.2.5)式より、陽極消耗量を算出することができる。

$$\Delta W_r = \sum_{i=1}^t \frac{I_i \times \Delta T}{Q} \quad (3.2.5)$$

$\Delta W_r$  : 実測電流から求めた陽極消耗量(kg)  $I_i$  : アノード電流(A)

$\Delta T$  : 積算間隔 1日(24h)  $Q$  : アルミ陽極の発生電気量(2600A・h/kg)

理論線から推定した陽極消耗量と実測電流から求めた陽極消耗量との関係を図-3.2.20に示す。実測電流から求めた陽極消耗量は、-3.0mに設置されたアルミ陽極の方が-12mよりも若干ではあるが大きかった。これは、-3.0mの平均アノード電流の方が大きいため

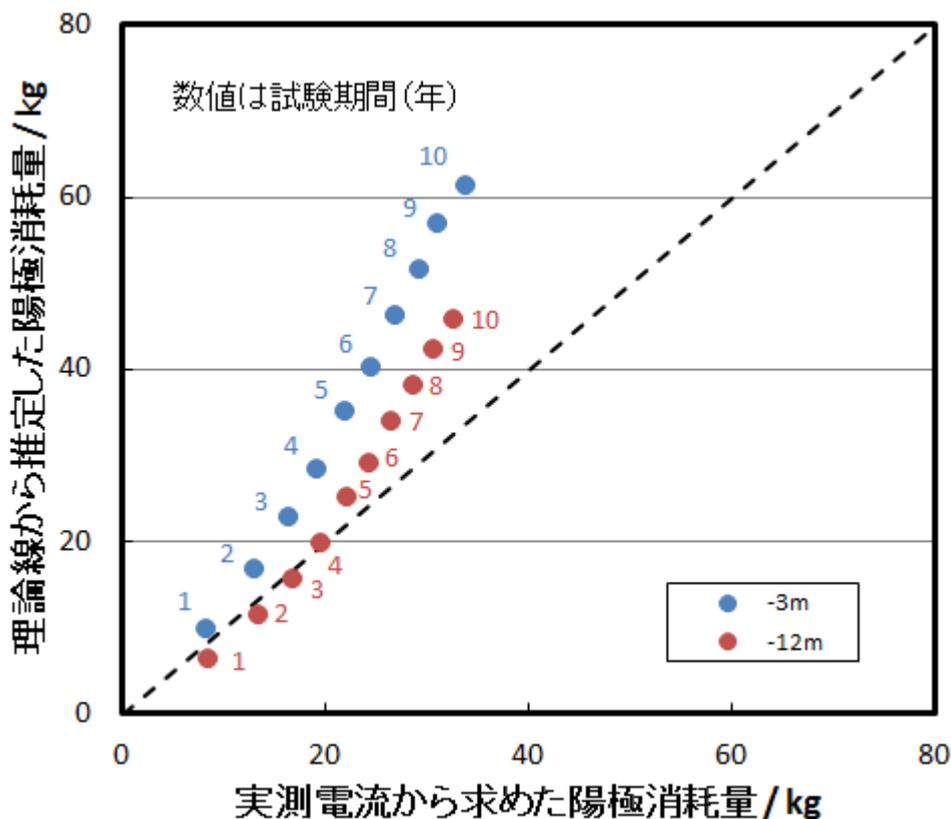


図-3.2.20 理論線から推定した陽極消耗量と実測電流から求めた陽極消耗量の関係

ある。理論線より推定した陽極消耗量は、いずれの深度においても実測電流から求めた陽極消耗量から大きくずれていた。このずれは-3mの方が大きく、いずれの深度においても経過日数の増加とともに大きくなる傾向を示した。

理論線より推定した陽極消耗量の推定誤差を図-3.2.21に示す。なお、推定誤差は(3.2.6)式より求めた。

$$\text{推定誤差(\%)} = \frac{\text{推定した陽極消耗量(kg)} - \text{実測電流から求めた陽極消耗量(kg)}}{\text{実測電流から求めた陽極消耗量(kg)}} \times 100 \quad (3.2.6)$$

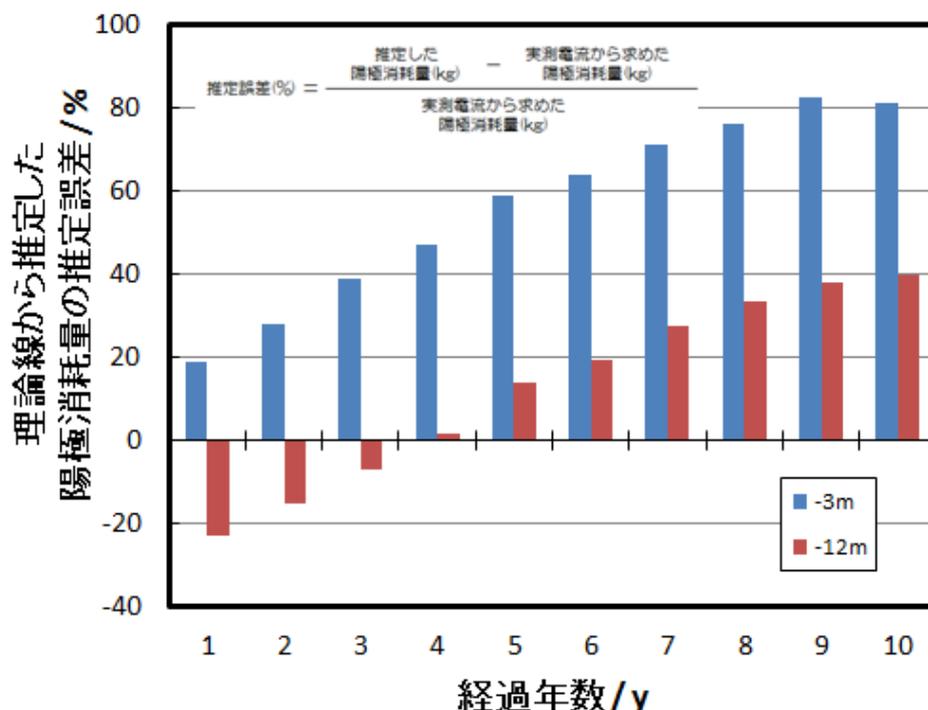


図-3.2.21 理論線から推定した陽極消耗量の推定誤差

-3.0m は 1 年目の推定誤差が 20%で最も小さく、それ以降は時間の経過とともに推定誤差も大きくなる傾向を示し、10 年目で約 80%に達した。-12m は、1~3 年目までは実測電流から求めた陽極消耗量より小さく見積もられた。3 年目と 4 年目は±10%以内の推定誤差であったが、時間の経過とともに大きくなる傾向を示し、10 年目で約 40%に達した。理論線からの陽極消耗量の推定は誤差が大きく、このままでは実用化は困難である。そこで、

$E_c-I_a$  プロットを最小二乗近似して得られた近似線（実施設の  $E_c-I_a$  線）を用いて陽極消耗量の推定を試みた。実施設の  $E_c-I_a$  線から推定した陽極消耗量と実測電流から求めた陽極消耗量の関係を図-3.2.22 に示す。

いずれの位置のアルミ陽極においても、実施設の  $E_c-I_a$  線から推定した陽極消耗量は、計測期間を通して実測電流から求めた陽極消耗量に近い値を示した。また、図-3.2.23 に示すように、実施設の  $E_c-I_a$  線から推定した陽極消耗量の推定誤差は、経過年数 5~6 年までは実測電流から求めた陽極消耗量よりも少なく見積もられるが、それ以降は多く見積もられる傾向を示した。供用初期はいずれのアルミ陽極も -20% 程度の推定誤差を示したが、5~6 年経過以降は 10% 以内で推移した。±10% 程度の推定誤差であれば、陽極消耗量の推定手法として実用可能なレベルと考える。

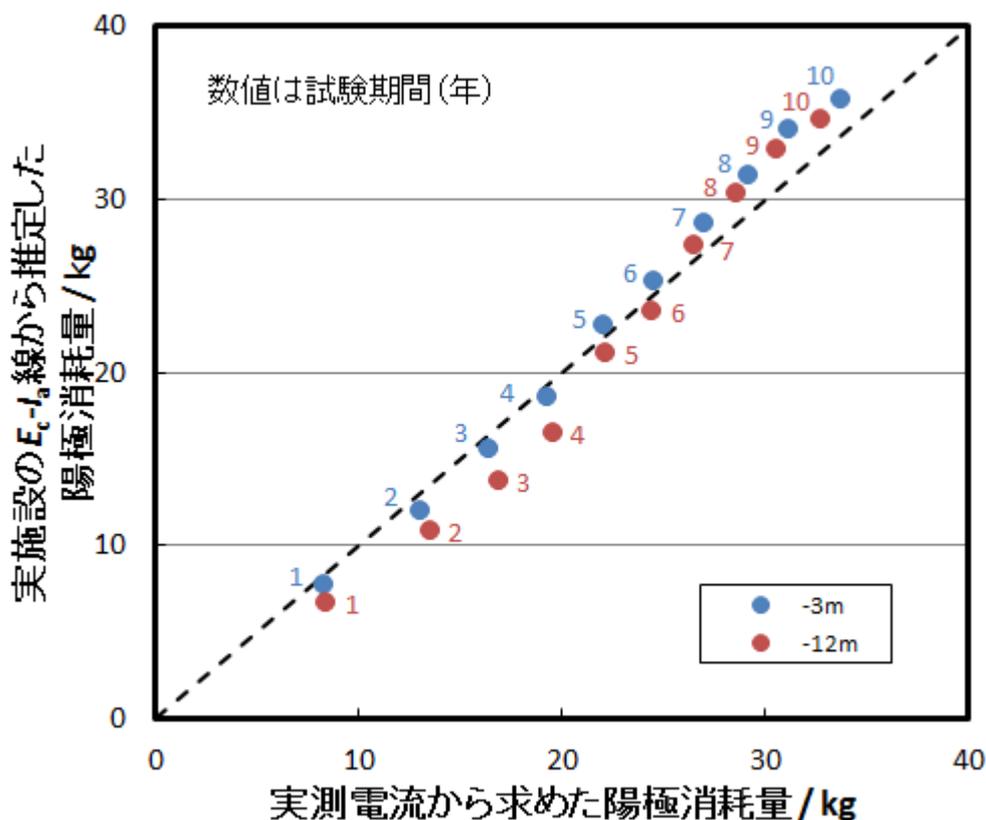


図-3.2.22 実施設の  $E_c-I_a$  線から推定した陽極消耗量と実測電流から求めた陽極消耗量の関係

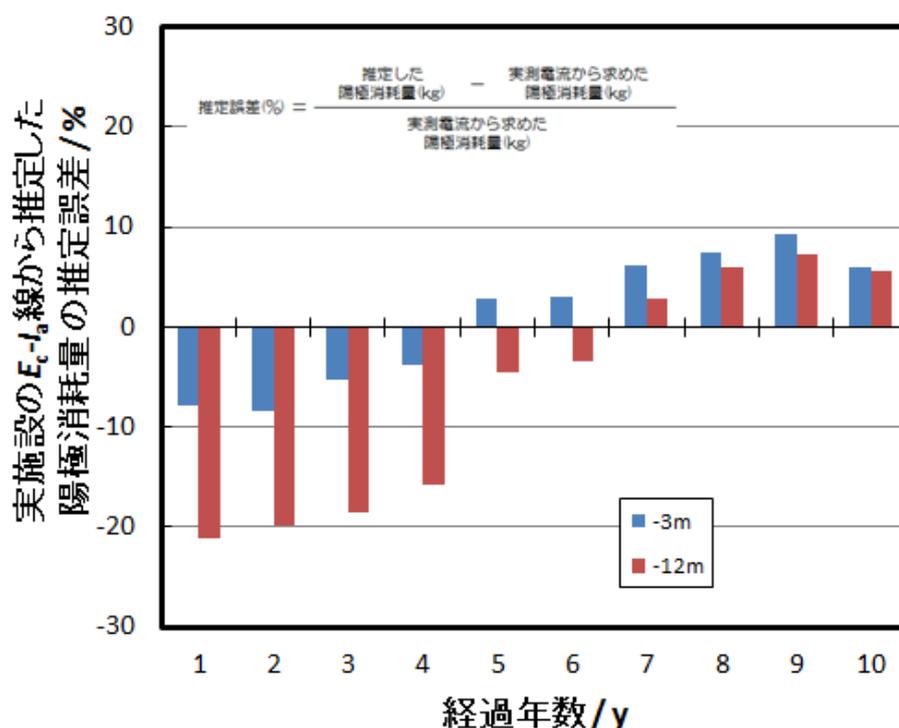


図-3.2.23 実施設の  $E_c-I_a$  線から推定した陽極消耗量の推定誤差

本研究により、実構造物においては、現場を反映した実施設の  $E_c-I_a$  線と理論線とは一致せず、また、深度によっても異なることが判明した。その原因として、海底土中部の電流分布の不均一、潮位変動による電気防食影響範囲の変化、アノード分極特性の経時的な変化が挙げられる。陽極消耗量を精度よく推定するためには、実施設の  $E_c-I_a$  線を求める方が望ましい。

### (3) 陽極消耗量推定手法の提案

これまでの試験結果より、実施設の  $E_c-I_a$  線を用いることで、供用開始から5年以降の陽極消耗量が10%程度の誤差で推定できることが分かった。しかしながら、実構造物において、 $E_c-I_a$  線を求めるのは極めて困難である。その理由は、海中部に設置されたアルミ陽極の発生電流を直接計測できないためである。

そこで、間接的な計測でアノード電流を推定する方法を検討し、アルミプローブを用いた推定手法の提案を試みた。本検討では、はじめに実構造物によるアルミプローブ法の検討結果について説明し、カソード電位計測による陽極消耗量の推定手法についての提案を行う。

### 1) アルミプローブを用いたアノード電流の推定手法の検討結果

大井埠頭，南本牧埠頭，羽田空港で計測したプローブ電流とアノード電流の経時変化をそれぞれ図-3.2.24，図-3.2.25，図-3.2.26に示す．いずれの試験場所においても，プローブ電流は増加する傾向を示したが，時間の経過とともに増加の傾向は緩やかとなり，定常状態を示すようになった．これは，短絡と同時にアルミプローブのアノード分極が進行したが，時間の経過とともに安定状態に達したためと考えられる．一方，アノード電流は測定中において比較的安定した値を示していた．大小関係は，羽田空港<大井埠頭<南本牧埠頭の順となり，プローブ電流も同様の順序であった．

ここで，アノード/プローブ電流比の経時変化を図-3.2.27に示す．アノード/プローブ電流比は，いずれの試験場所においても時間の経過とともに減少する傾向を示し，約80分以降から電流比の変化が少なくなり，一定の値を示すようになった．安定後の電流比の平均値は図-3.2.28に示すように，大井埠頭：14.1，南本牧埠頭：24.8，羽田空港：26.5であり，南本牧埠頭と羽田空港に関しては非常に近い値であった．大井埠頭の電流比が小さい値を示した要因として，カソード接水抵抗の影響が考えられる．大井埠頭の干満部は耐海水性ステンレス鋼被覆が施されているが，この部分も実際にはカソードとなっているため，

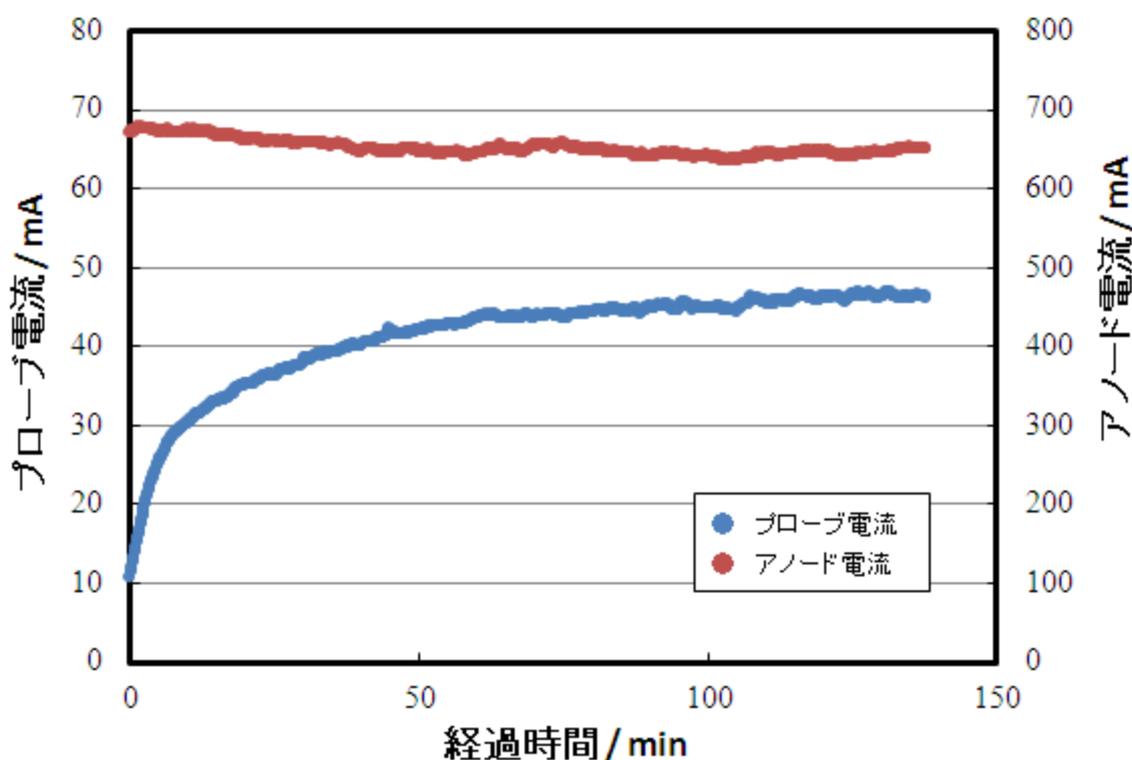


図-3.2.24 プローブ電流とアノード電流の経時変化（大井埠頭）

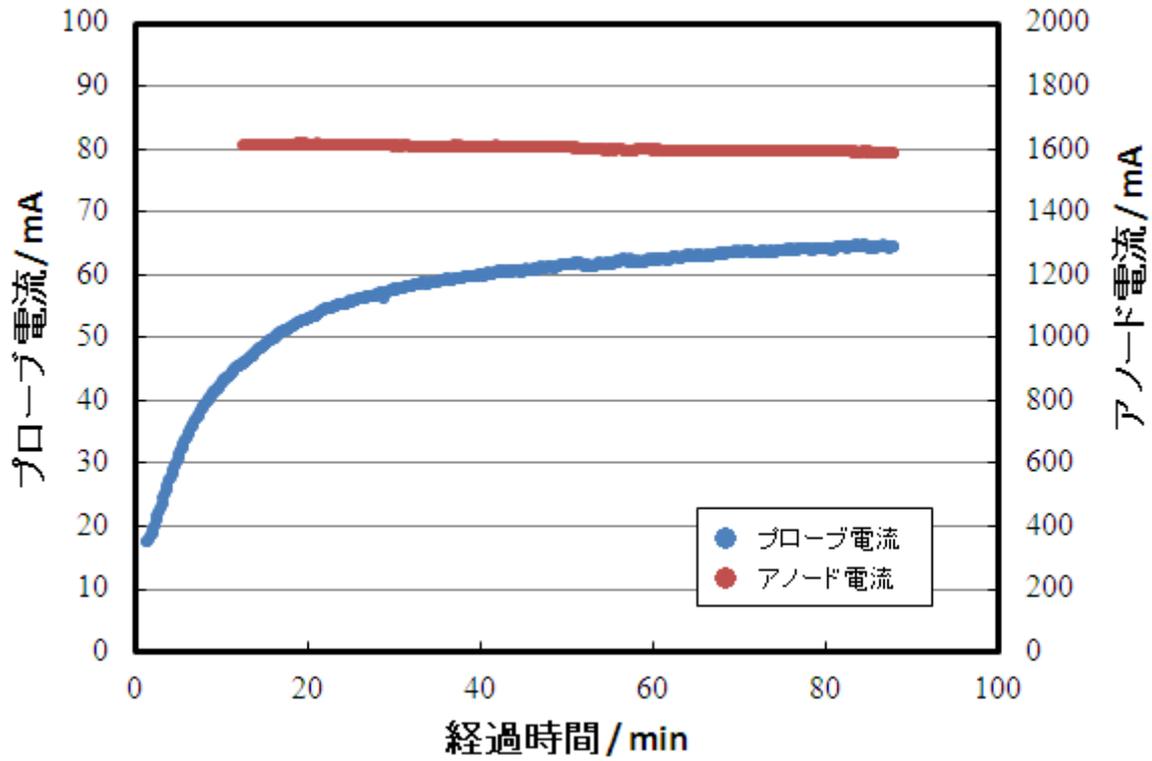


図-3.2.25 プローブ電流とアノード電流の経時変化（南本牧埠頭）

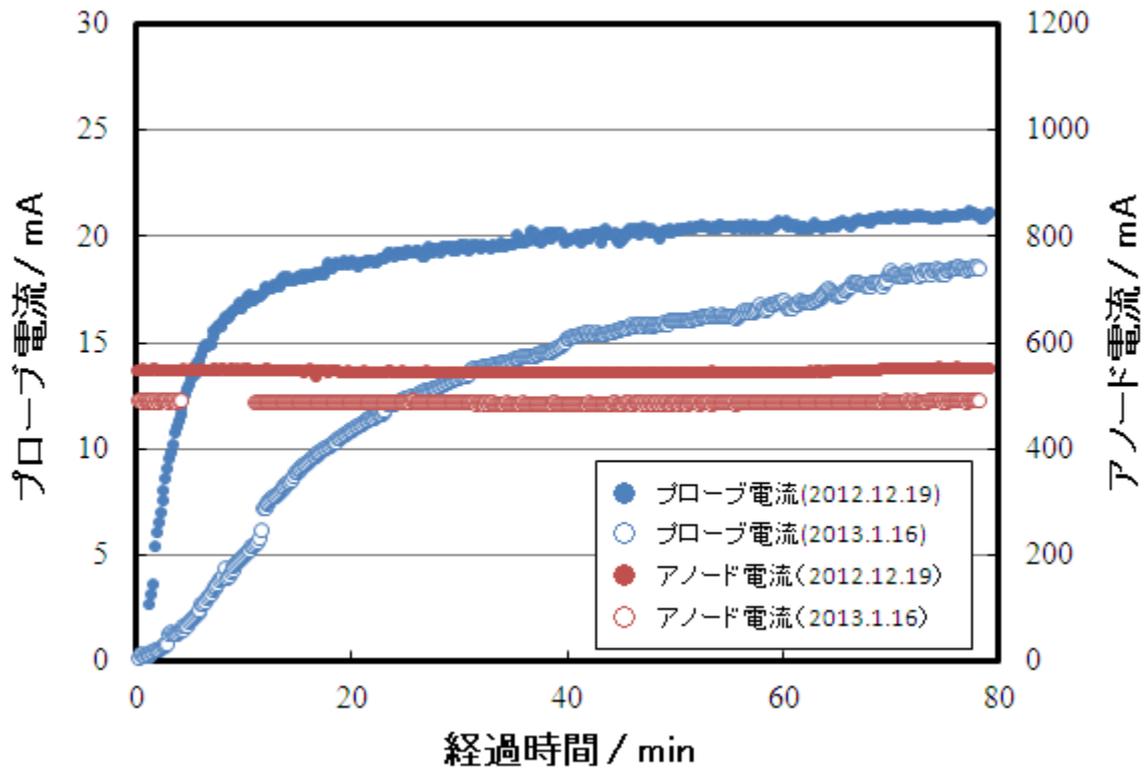


図-3.2.26 プローブ電流とアノード電流の経時変化（羽田空港）

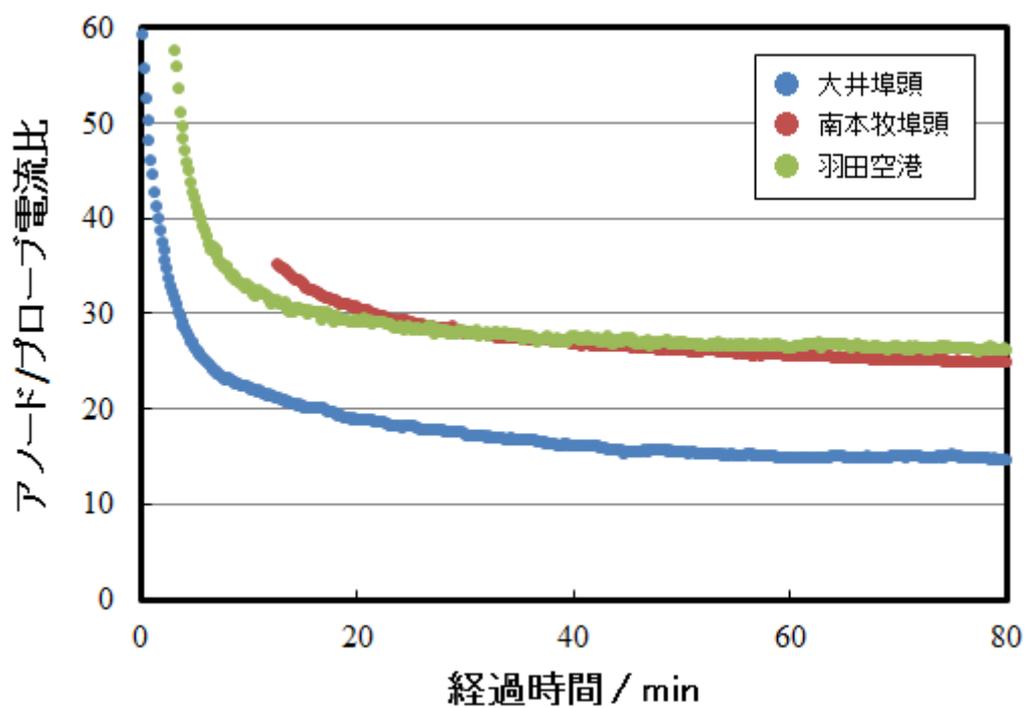


図-3.2.27 アノード/プローブ電流比の経時変化

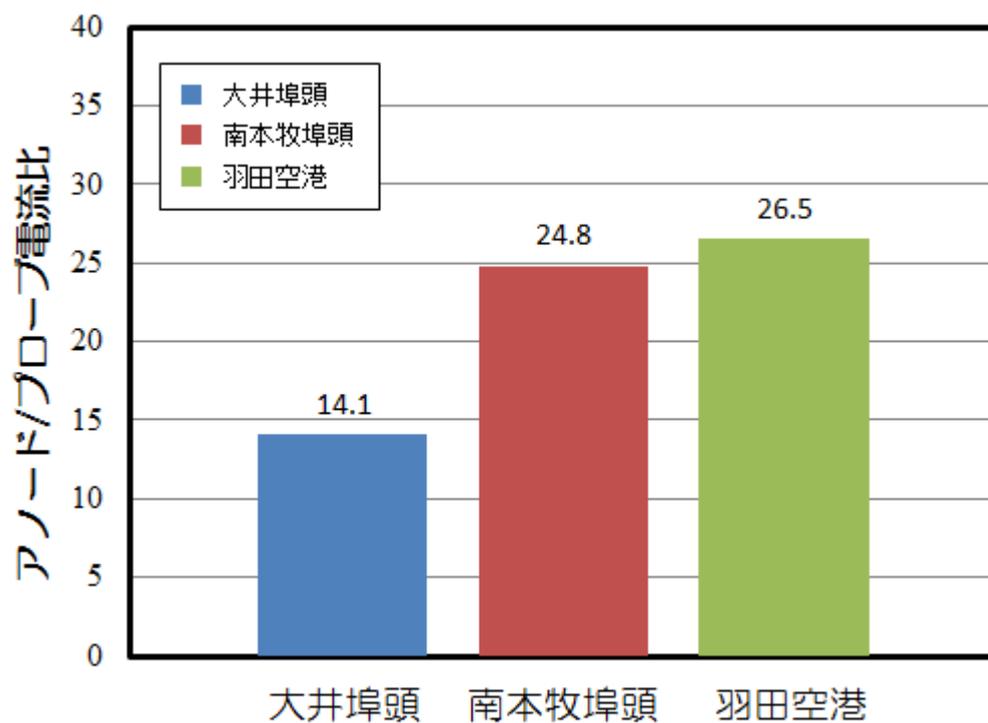


図-3.2.28 アノード/プローブ電流比の平均値

南本牧埠頭や羽田空港に比べてアルミプローブが担うカソード面積が広がる。よって、カソード接地抵抗が小さくなるためプローブ電流は増加し、電流比を減少させたものと推察される。

アノード/プローブ電流比は、本試験で用いたアルミプローブの特性値と考えられ、この比を換算定数とすれば、同形状・同面積のアルミプローブの電流を計測することにより、アノード電流を推定することが可能となる。また、飛沫・干満部に耐食性金属被覆が施され、海中部の上層と下層で  $E_c-I_a$  線が異なる場合でも、上層と下層に設置されているアルミ陽極の近傍でプローブ電流を計測することにより、それぞれの位置でのアノード電流を推定することが可能になるものと考えられる。

しかしながら、以下の点については今後も検討が必要である。

#### ①流速の大きい環境

写真-3.2.2 に示す波崎海洋研究施設のような高流速環境下では、アルミプローブ表面への溶存酸素の供給速度だけでなく、漂砂の影響によってアルミプローブ表面の状態が変化し、それに伴ってアノード電位も変化することが予想される。アノード電位が変化しない流速の適用限界を検討する必要がある。



写真-3.2.2 高流速環境下の波崎海洋研究施設

## ②塩化物イオン濃度が海水濃度より低下する環境

アルミプローブのアノード電位には，塩化物イオン濃度依存性があるため，塩化物イオン濃度の減少とともにアノード電位は貴化する傾向がある．よって，河口付近で本手法適用する場合には，水質の確認が必要となる．

## ③飛沫・干満部の被覆防食の影響

金属被覆やモルタル・コンクリート被覆においては，潮位によりカソード面積が経時的に変化するため，改めて確認する必要がある．

## ④プローブ電流が定常状態になるまでの時間

本試験は限られた時間での検討であったため，プローブ電流を長時間計測することができなかった．1日程度の連続モニタリングを行い，長時間の電流特性を確認することが望ましい．

## 2) カソード電位計測による陽極寿命の推定手法の提案

プローブ電流の計測とカソード電位計測を組合せたアルミ陽極の寿命推定手法を提案する．アノード電流の推定手法の概念図を図-3.2.29に示す．本手法は，点検時に実施される施設の電位測定で得られたデータと現場の実施設の  $E_c-I_a$  線を用いてアノード電流を推定し，陽極寿命を求めるものである．なお，本手法は，アノード電流の低減が大きい期間は推定誤差が大きくなるため，安定状態となる5～6年以降において適用するものである．アルミ陽極の寿命推定フローは図-3.2.30に示す．はじめに実施施設の  $E_c-I_a$  線を求めるために，実構造物においてカソード電位とプローブ電流の同時計測を行う．なお，飛沫・干満部に金属被覆が施工されている場合，潮位変動によってカソード電位が大きく変動するため，潮位変動の少ない小潮の日に計測するのが良いといえる．小潮の日に計測したカソード電位計測例を図-3.2.31に示す．表-3.2.5に年平均と小潮の日の平均値を示す．6月のカソード電位の平均値が年平均値に最も近いため，6月の小潮の日の計測が最適と考えられる．初期のカソード電位とプローブ電流の計測は，アルミプローブ短絡後80分以降のデータを数点記録し，平均化したものを初期値として採用する．プローブ電流の初期値を(3.2.7)式に代入してアノード電流を算出する．ここで，切片となるアノード電位： $E_a$ は，本来であれば設計値の-1060mVであるが，実環境では経時的にアノード分極特性が変化しているため，実施施設のアノード電位計測（図-3.2.17）によって得られた-1010mV（平均値）を使用する．

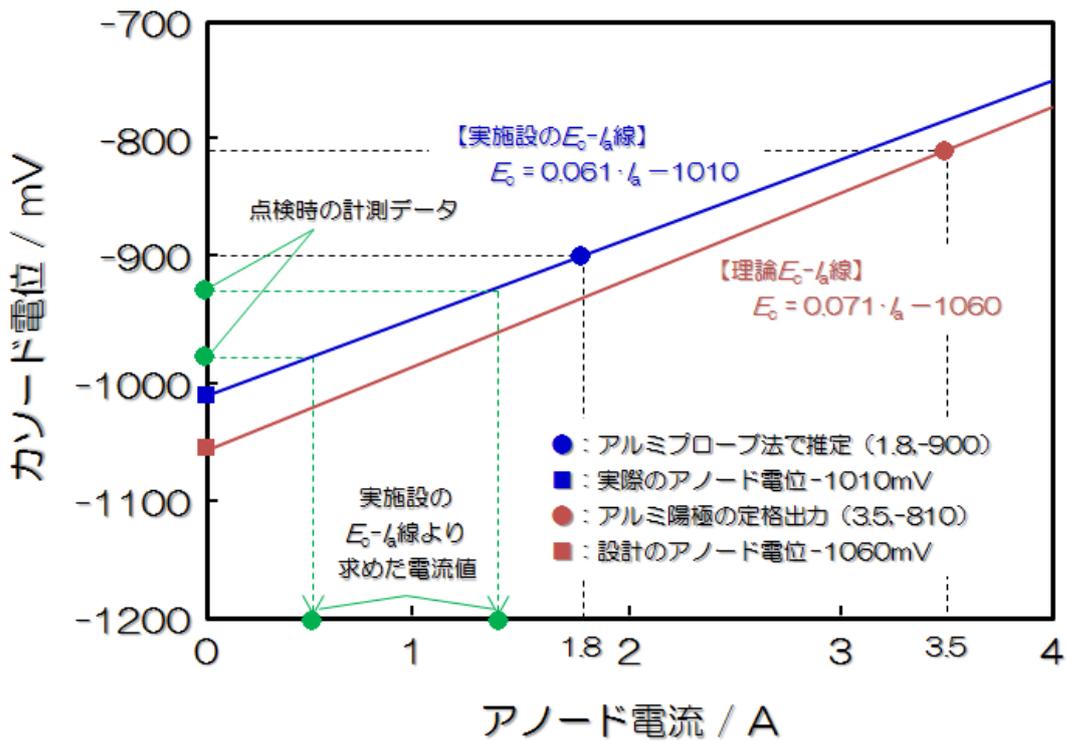


図-3.2.29 プローブ電流計測とカソード電位計測を組合せたアノード電流の推定手法の概念図

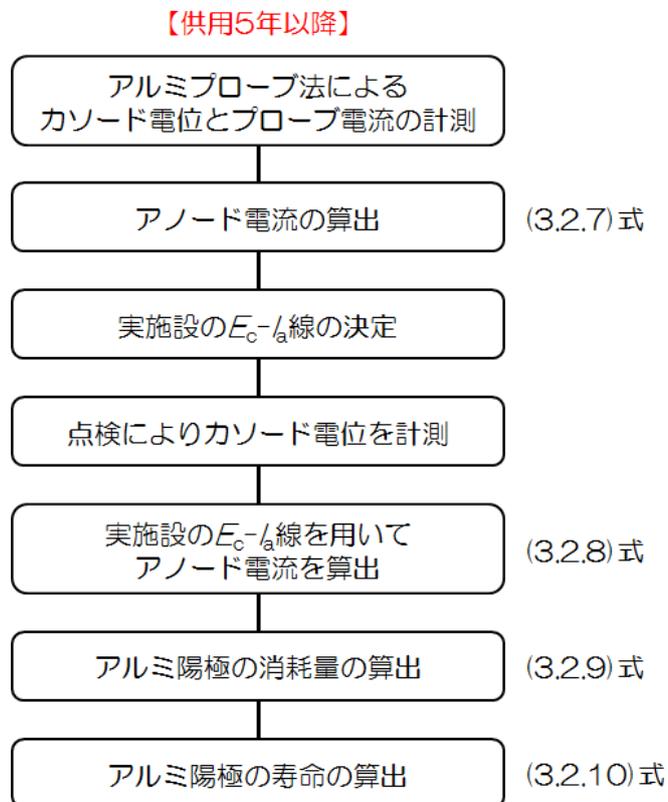


図-3.2.30 カソード電位計測によるアルミ陽極の寿命推定のフロー

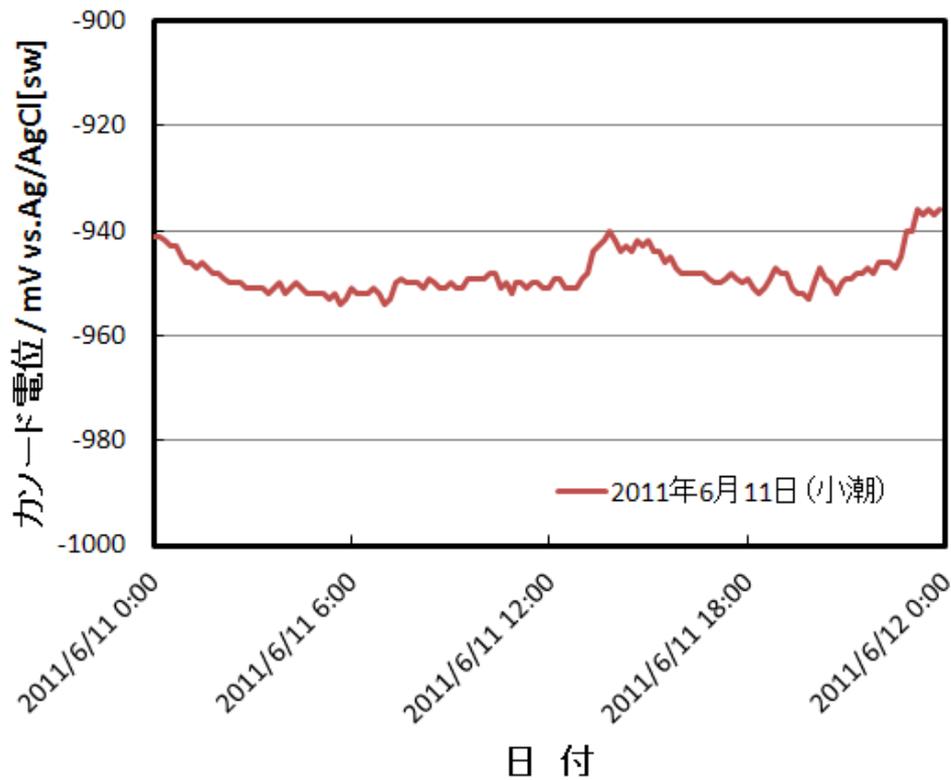


図-3.1.31 小潮の日のカソード電位経時変化 (2011年6月11日)

表-3.2.5 2011年におけるカソード電位の年平均と小潮の日の平均

	3月	6月	9月	12月
小潮の日の平均 (mV)	-967	-948	-971	-961
年平均 (mV)	-948			

$$I_{a,e} = K \cdot I_{a,p} \quad (3.2.7)$$

$I_{a,e}$  : プローブ電流から推定したアノード電流 (A)

$I_{a,p}$  : プローブ電流 (A)  $K$  : 換算係数 (表-3.1.6 参照)

表-3.2.6 プローブ電流からアノード電流への換算係数

金属被覆	金属被覆以外の被覆
14.1	24.8~26.5

算出したアノード電流とカソード電位の初期値を(3.2.8)式に代入することにより極間抵抗： $R_s$ が求まるため、実施設の $E_c-I_a$ 線を描くことができる。

$$E_c = R_s \cdot I_{a,e^*} - 1.01 \quad (3.2.8)$$

$E_c$ ：カソード電位(計測値)(V)  $R_s$ ：極間抵抗( $\Omega$ )

$I_{a,e^*}$ ：カソード電位から推定したアノード電流(A)

以上より、実施設の $E_c-I_a$ 線を推定することができたため、以後は定期点検で実施されるカソード電位の計測データをもとに、(3.2.9)式より陽極消耗量を算出する。

$$W_e = \frac{I_{a,e^*} \times T}{Q} \quad (3.2.9)$$

$W_e$ ：陽極消耗量(kg)  $T$ ：供用期間(h)  $Q$ ：アルミ陽極の発生電気量(2600A・h/kg)

電気防食システムの更新計画で必要となるアルミ陽極の残存寿命は、(3.2.10)式より求めることができる。なお、寿命計算に用いる平均アノード電流には、カソード電位より推定したアノード電流を用い、この電流が耐用年数まで流れ続けるものと仮定してアルミ陽極の寿命を算出する。

$$L_e = \frac{Q \times (W_0 - W_e)}{I_{a,e^*} \cdot 24 \cdot 365} \quad (3.2.10)$$

$L_e$ ：アルミ陽極の寿命(y)  $W_0$ ：アルミ陽極の初期質量(kg)

本手法によるアルミ陽極の寿命推定では、10%前後の推定誤差があることに注意し、アルミ陽極の残存寿命が耐用年数の10~20%になった時点で、実際のアルミ陽極の消耗量調査(質量測定あるいは周長測定)を行い、最終的な更新時期を決定すればよいと考える。カソード電位の計測は、照合電極と電位差計があれば、比較的容易に計測することができ

る。本手法によれば、定期的にかソード電位計測を実施することにより、電気防食システムの効率的な維持管理を行うことができる。

#### 3.2.4 まとめ

実構造物の電気防食試験によって得られたデータを用い、電気防食システムの維持管理手法について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 10年経過した大井埠頭新5バース下部工の電気防食試験において、カソード電位-アノード電流プロット ( $E_c-I_a$ プロット) は直線状に分布しており、時間の経過とともに卑電位-低電流側に変化する傾向を示した。これは、カソード側にエレクトロコーティングが生成し、カソード分極抵抗が経時的に増大したためと考えられる。電流低減率は設計値の0.50に対し、実構造物では0.15まで減少しており、アルミ陽極の寿命は設計寿命を大幅に上回ることを確認した。
- 2)  $E_c-I_a$ プロットは、卑電位-低電流側になるに従い理論  $E_c-I_a$ 線 (理論線) からずれる傾向が見られた。この原因は、アノード電位の経時的な変化と考えられる。現地計測において、アノード電位は-980~-1020mV (平均値: -1005mV) の間で変動しており、設計値の-1060mVに対し50mV以上も貴な電位を示していた。
- 3) 理論線を用いたアルミ陽極の消耗量推定では、計測したアノード電流より求めた消耗量と大きな差が生じた。一方、 $E_c-I_a$ プロットを最小二乗近似して得られた近似線より求めたアルミ陽極の消耗量は、供用初期において計測した値と差が生じていたが、供用5年以降から推定誤差が10%以下となった。近似線の切片は、現地計測したアノード電位の平均値とほぼ一致しており、実施設の  $E_c-I_a$ 線と見なすことができる。この実施設の  $E_c-I_a$ 線を用いることにより、カソード電位計測によるアルミ陽極の消耗量推定が10%程度の誤差で可能となり、電気防食システムの効率的な維持管理手法としての可能性を確認することができた。
- 4) 実施設の  $E_c-I_a$ 線を求めるための手段として、アルミプローブ法を考案した。本手法はアルミプローブを電流計を介して構造物と短絡し、計測される短絡電流に換算係数を乗じてアノード電流を推定する方法である。実構造物のデータが少ないため、今後も様々な施設でデータ収集を行い、換算係数の信頼性を向上させることが今後の課題である。

- 5) 潮位により電気防食特性が変動する施設（飛沫・干満部に金属被覆が適用された施設）においてアノード電位やプローブ電流を計測する場合，一日を通して潮位変動の少ない小潮の日に計測するのが適切であることが分かった．
- 6) カソード電位の計測は，照合電極と電位差計があれば，比較的容易に計測することができるため，本手法を用いれば，定期的に電位計測を実施することにより，電気防食システムの効率的な維持管理が可能になると考えられる．

### 3.2.5 参考文献

- 1) 阿部正美，海洋鋼構造物の腐食と防食対策，(社)日本防錆技術協会，p.32 (2002)
- 2) 宮田義一，若林徹，濱田秀則，耐海水性ステンレス鋼被覆を施した海洋鋼構造物の電気防食特性，港湾空港技術研究所報告書，第45巻，第2号，p.p.180-184 (2006)
- 3) 審良善和，山路徹，岩波光保，野口孝俊，耐海水性ステンレス鋼被覆を施した海洋鋼構造物の電気防食特性，第29回防錆防食技術発表大会講演集，p.p.25-28 (2009)
- 4) W.Wang and W.H.Hartt, *CORROSION/94*, no.496 (1994)
- 5) 阿部正美，豊島幹人，砂本健志，清水泉一郎，中田毅，小林浩之，望月紀保，海水中における流電陽極法の設計に関する考察，第47回材料と環境討論会講演予稿集，p.p.437-440 (2000)
- 6) 小林浩之，審良善和，濱田秀則，望月紀保，志茂香，流電陽極方式電気防食を適用した港湾鋼構造物の更新設計に関する研究，材料と環境2011講演予稿集，p.p.51-54 (2011)
- 7) R.A.Humble, Cathodic Protection of Steel in Sea Water with Magnesium Anodes, *Corrosion*, Vol.4, p.p.358-370 (1948)
- 8) 濱田秀則，兼坂薫，鈴木靖庸，宮田義一，鋼材における電着および電気防食併用工法の防食性能に関する実験的検討，港湾空港技術研究所資料，No.1113，p.6 (2005)
- 9) 北川尚男，轟原誠，宗宮賢治，若菜弘之，玉田明宏，電気防食により生成するエレクトロコーティングの解析，材料と環境2007，D-302 (2007)
- 10) 善一章，横井聡之，港湾構造物の電気防食調査（その1），港湾技研資料，No.475 (1984)
- 11) 横井聡之，阿部正美，港湾構造物の電気防食調査（その2），港湾技研資料，No.502 (1984)
- 12) 横井聡之，阿部正美，港湾構造物の電気防食調査（その3），港湾技研資料，No.532 (1985)

### 3.3 流電陽極法を適用した港湾鋼構造物の更新設計

#### 3.3.1 はじめに

港湾鋼構造物の海中部の腐食に対し、電気防食は極めて有効な防食法である。今日では一般的となったアルミニウム合金陽極（以下、アルミ陽極）による流電陽極方式が港湾鋼構造物に適用されたのは1960年代であり、その後、高度経済成長期の港湾施設の新設や大型化により急速に普及していった。

流電陽極方式では、防食対象施設の電位が防食管理電位（ $-800\text{mV vs. Ag/AgCl[sw]}$ ）より貴化した時にシステムの寿命と判定され、新たにアルミ陽極を設置することでシステムが更新される。陽極更新時の電気防食設計は、新規施設と同様に取り扱われ、設計方法や手順などが『港湾鋼構造物防食・補修マニュアル<sup>1)</sup>』などに記載されている。しかしながら、近年、設計上の陽極更新時期を迎えた施設の防食電流が、設計値を大きく下回る（システム寿命が設計を上回る）ケースが確認されるようになってきており、更新設計を見直す必要性が生じている。これまで、流電陽極方式の更新設計について検討した報告は国内外で数件<sup>2)-4)</sup>あるが、具体的な設計方法までは示されていない。今後、港湾施設をより効率的かつ経済的に維持管理して行くためにも、流電陽極方式の更新設計について改めて詳細に検討しておく必要がある。

本研究では、陽極更新時の設計条件を供用時の電気防食特性から決定する手法を提案し、実験室および実構造物による電気防食試験を通して検証を行った。

#### 3.3.2 現状の陽極更新設計

流電陽極方式では、施工直後は設計防食電流密度に相当する防食電流がアルミ陽極から発生するが、経時的に防食対象物表面に電気分解による析出物（エレクトロコーティング）が析出することにより防食電流は次第に低減し、数年後には定常状態となる。アルミ陽極の質量は、平均発生電流をもとに設計される。流電陽極方式におけるアルミ陽極の設計寿命は、アルミ陽極の質量と形状を調整することで決まる。その質量を決定する際に重要となるパラメータが、(3.3.1)式で表される電流低減率（ $r$ ）である。

$$r = \frac{I_{\text{ave}}}{I_{\text{design}}} \quad (3.3.1)$$

$r$ ：電流低減率， $I_{\text{ave}}$ ：平均発生電流， $I_{\text{design}}$ ：設計発生電流

現行の設計では、電流低減率は設計耐用年数によって決められており、その値は 0.50（設計耐用年数 15 年以上）～0.55（設計耐用年数 5 年）である。しかしながら、近年は実構造物のアルミ陽極の消耗量調査や防食電流の連続モニタリング試験などにより、電流低減率が 0.20～0.30 であることが報告されている<sup>5)-8)</sup>。図-3.3.1 に電流低減率と耐用年数の関係を示す<sup>9)</sup>。例えば、更新時期を迎えた施設（電流低減率：0.30）に対して耐用年数 30 年の更新設計を行う場合、現行の設計では電流低減率として 0.50 が適用される。この場合、アルミ陽極の質量に余裕をもって設置することになるため、結果的には耐用年数 50 年を有することになる。設計の精度という観点から考えれば、これは過剰設計とも言える。正確に寿命を見積もった更新設計を行うためには、対象施設のアルミ陽極の消耗量調査を行い、アルミ陽極の平均発生電流を把握しておくことが望ましい。

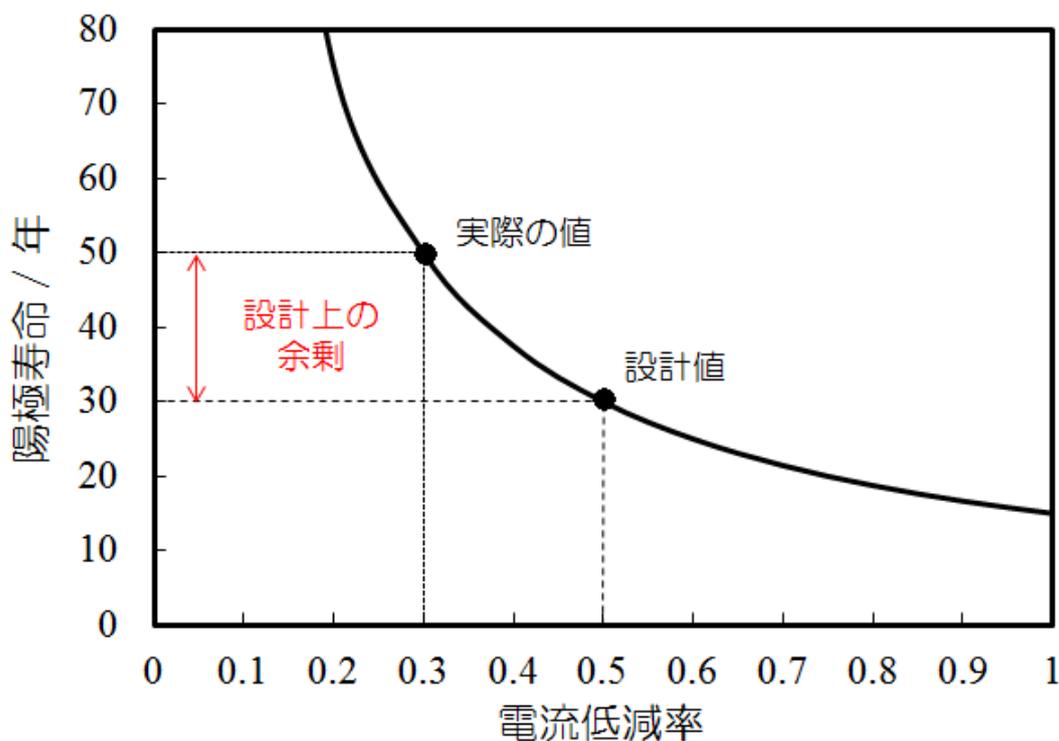


図-3.3.1 電流低減率と陽極寿命の関係

### 3.3.3 提案する更新設計法の考え方

本文で提案する更新設計法（新設計法）の概念図を図-3.3.2 に示す。なお、電流低減率は 0.50 とし、本文および図中に出てくる電位は、海水銀/塩化銀電極基準（Ag/AgCl[sw]）で示している。流電陽極方式を適用した海水中の鋼材に対する電気防食では、(3.2.2)式が成立する。陽極のアノード分極が小さいことから、一つの設計条件が決まると  $E_a$ ,  $S_c$ ,  $R_{sa}$  はほぼ一定とみなすことができ、適用されている電気防食特性をカソード電流密度とカソード電位から構成される平面上において 1 本の直線（(3.3.3)式）で示すことができる（1つの設計条件に対して 1 本の直線式が対応する）<sup>10)</sup>。

$$E_c - E_a = I \cdot R_{sa} \quad (3.3.2)$$

$$E_c = i_c \cdot R_{sa} + E_a \quad i_c = \frac{I}{S_c} \quad (3.3.3)$$

$E_c$  : カソード電位,  $E_a$  : アノード電位,  $I$  : 発生電流,

$R_{sa}$  : アノード接水抵抗,  $i_c$  : カソード電流密度,  $S_c$  : カソード表面積

カソード電位とカソード電流密度は、 $E_c$ - $i_c$ プロット上を時間の経過とともに卑電位、低電流密度方向（左下方向）に移動する。更新前の電気防食の直線が図-3.3.2 の b 線として得られるが、カソード電位が -800mV（アノード電位との電位差 250mV）の時の電流密度（ $i_{cb}$ ）が設計防食電流密度であり、 $i_{cb}$  の 1/2（電流低減率）に相当する電流密度が平均電流密度  $i_{c1}$ （定常カソード電流密度）として設計されている。したがって、平均電流密度に対応するカソード電位  $E_{c1}$  は設計上は -925mV となり、この電位より貴電位であれば流れているカソード電流密度は設計上の平均カソード電流密度（ $i_{c1}$ ）より大きく、卑電位であれば小さいことになる。本文では  $E_{c1}$ （-925mV）に相当する電位を維持管理電位と称する。陽極更新時に設計防食電流密度が低減するのは、カソード電位が -925mV より卑となっている場合であり、以下のような設計法が考えられる。

電気防食においてカソード電位が -925mV（図-3.3.2 の◇）より卑電位である場合、その時の  $i_{c2}$  でカソード電位が -925mV となるようにアルミ陽極を設計することとし、点（0, アノード電位）と点（ $i_{c2}$ , -925）を結んだ直線式（a 線）で示される新たな  $E_c$ - $i_c$ プロットを更新後の電気防食特性とするものである。この直線の -800mV に対応するカソード電流密

度 ( $i_{ca}$ ) が更新後の設計防食電流密度となり，更新時のカソード電流密度 ( $i_{c2}$ ) を 2 倍した値となる。

なお，カソード電位が  $-925\text{mV}$  よりも貴電位である場合には現行の設計法を適用することになり，電流低減率とアノード形状の見直しを行う必要がある。また，耐用年数に達する前にアルミ陽極の寿命を迎えるため，定期点検によって防食状態と陽極寿命を把握し，更新計画を立てる必要がある。

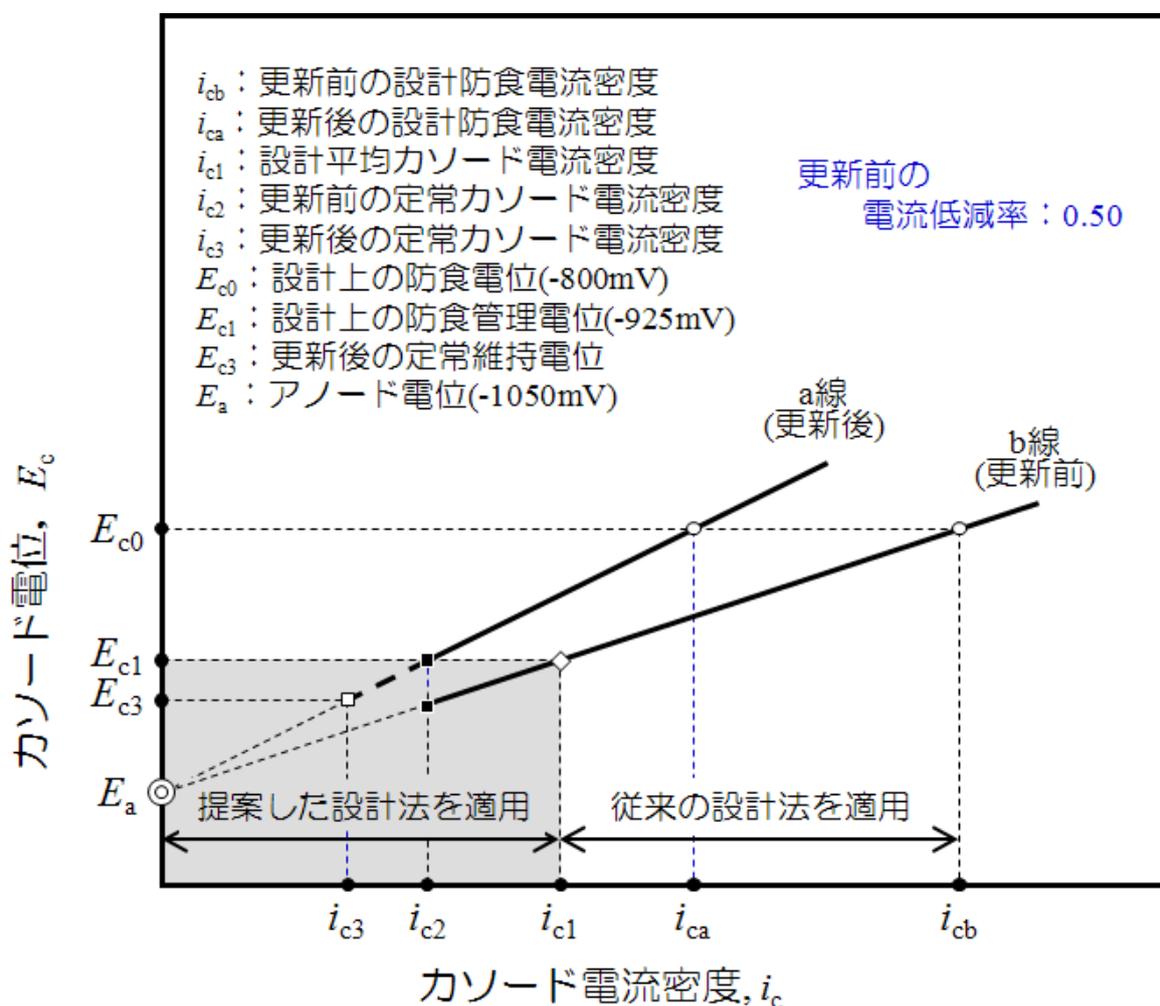


図-3.3.2 新しい更新設計法の概念図

アルミ陽極の更新の流れは図-3.3.3 に示す通りである。はじめに対象施設の詳細調査（施設のカソード電位の計測とアルミ陽極の消耗量調査）<sup>11)</sup> によって電気防食システムの状態確認を行い，施設のカソード電位とアルミ陽極の残寿命を考慮して陽極更新の実施が判断

される。ここで、アルミ陽極を更新することになった場合、現行の設計法と新設計法のどちらを適用するかの判定が行われ、詳細調査時に測定した施設のカソード電位 ( $E_c$ ) が設計上の維持管理電位 (-925mV) よりも貴電位を示す時には現行の設計法、卑電位を示す時には新設計法が適用される。いずれの設計方法においても、アルミ陽極の消耗量調査より平均発生電流密度を求め、現行の設計法においてはこの電流密度をもとに電流低減率を決定しなければならない。また、現行の設計方法を適用する際、施設の陽極寿命が設計寿命を下回っていた場合には、設計防食電流密度の見直しも必要となる。

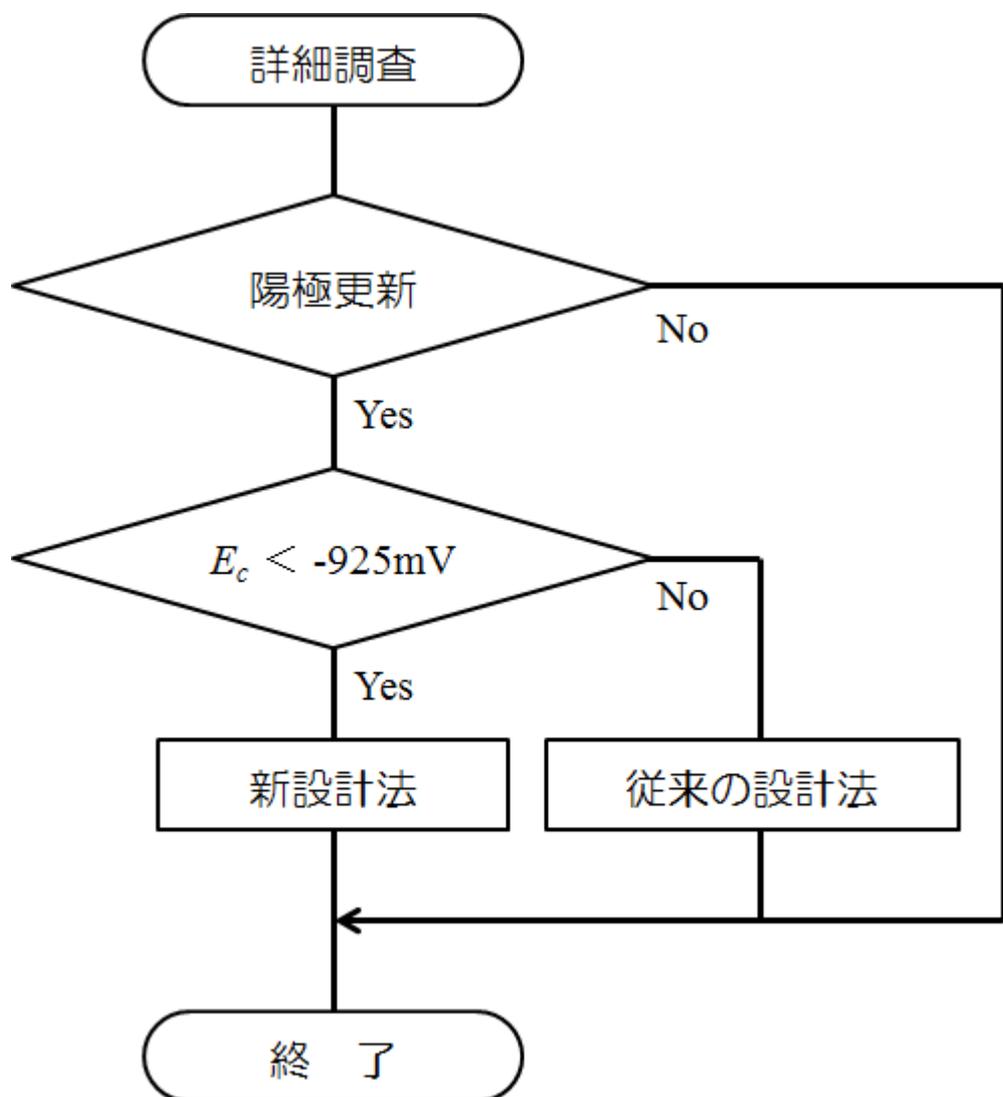


図-3.3.3 陽極更新設計のフローチャート

### 3.3.4 試験方法

新設計法の妥当性を検証するために，実験室および実構造物において試験を実施した．

#### (1) 実験室試験

自然短絡試験法と呼ばれる試験を実施した．自然短絡試験に用いる装置は，アノード（電気防食用アルミニウム合金陽極），カソード（SS400），抵抗器（可変抵抗），照合電極（Ag/AgCl[sw]）から構成される．概要を図-3.3.4 に示す．

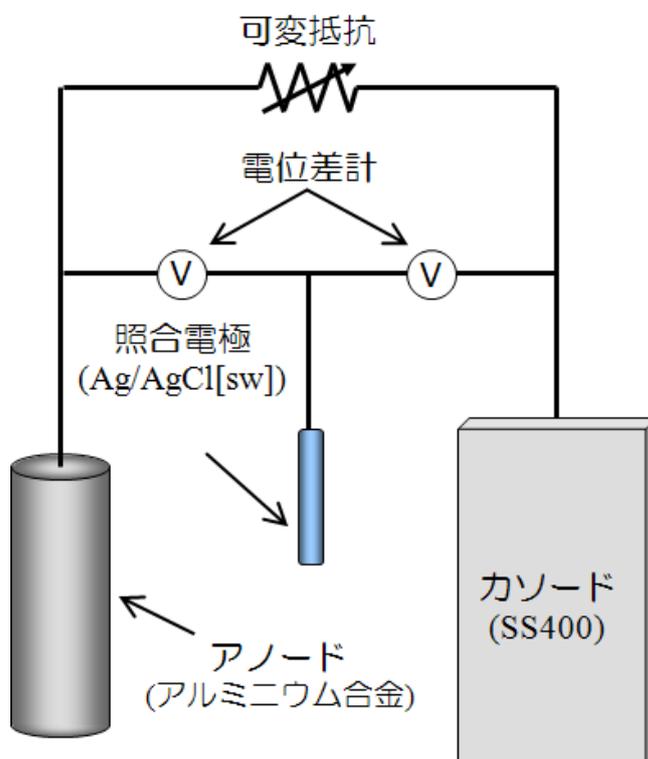


図-3.3.4 自然短絡試験装置の図

アノードの表面積は  $20\text{cm}^2$  ( $\phi 20\text{mm}\times 50\text{mm}$ ) であり，カソードの表面積は  $200\text{cm}^2$  ( $75\text{mm}\times 150\text{mm}\times 1\text{mm}$ ) である．抵抗器を介してアノードとカソードを短絡し，通水試験装置内に設置した．通電中はアノード電位，カソード電位および抵抗器の端子電圧を5分インターバルで測定し，データロガーで記録した．なお，回路電流は，抵抗器の端子電圧を抵抗値で除することによって算出した．

抵抗器は，回路電流を所定の設計防食電流密度に調整するために用いた<sup>12)</sup>．現行の設計法に準拠すれば，カソード電位が  $-800\text{mV}$  の時に設計電流密度に相当する電流が流れるよ

うに回路抵抗を調整する必要がある。本試験では、アノード電位が-1100mV と低電位であったため、発生電流算出のための有効電位差（-800mV とアノード電位の差）を 300mV とした。設計防食電流密度を  $100\sim 300\text{mA}/\text{m}^2$  とした場合通電電流は 2~6mA となり、回路抵抗として  $50\sim 150\Omega$  を設定する必要がある。アノード-カソード間の抵抗は  $1\Omega$  前後なので外部抵抗を挿入して調整する必要がある、その値は有効電位差を通電電流（設計防食電流密度×カソード面積）で除した値を用いた。

通水試験装置の概要を図-3.3.5 に示す。通水試験装置は、幅×長さ×高さが  $200\times 1000\times 500\text{mm}$  の塩化ビニル製水槽を 2 個直列に接続したものである。水槽内に図-3.3.4 に示した試験体を設置し、神奈川県久里浜湾の自然海水を  $1.5\text{L}/\text{min}$ （一過式）で供給した。

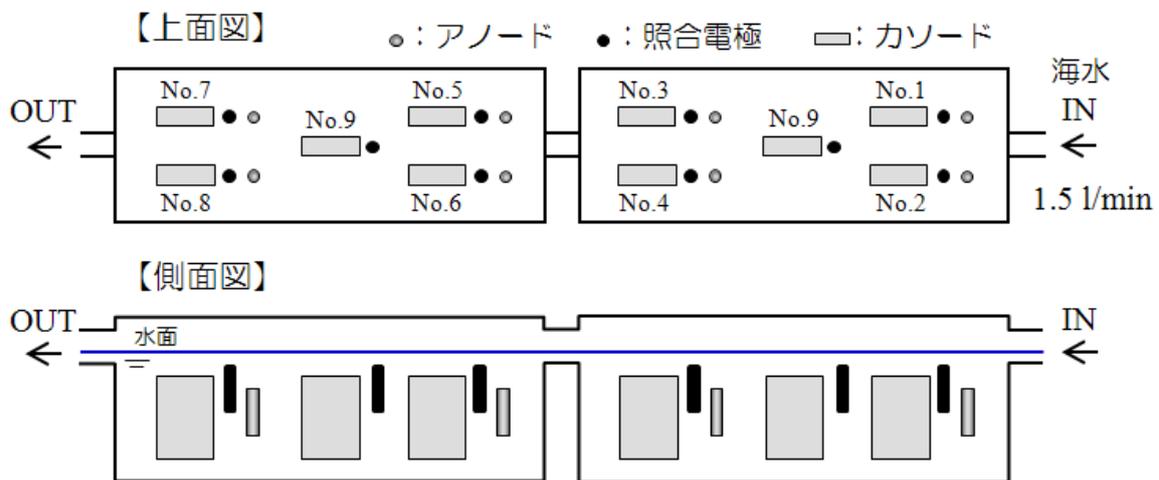


図-3.3.5 通水試験装置の図

自然短絡試験条件を表-3.3.1 に示す。アノードとカソードを表-3.3.1 の更新前に該当する設計防食電流密度で短絡し、カソード電流密度がほぼ定常化した状態を更新時期とみなし、抵抗器を調整して更新後の設計防食電流密度に変更した。

表-3.3.1 自然短絡試験条件

No.	設計防食電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	
	更新前	更新後
No.1	120	90
No.2	120	60
No.3	120	30
No.4	180	90
No.5	180	60
No.6	180	30
No.7	240	60
No.8	240	30
No.9	自然浸漬	

**(2) 実構造物による新設計法の検証試験**

東京国際空港 D 滑走路連絡誘導路下部鋼管杭(φ1219mm, 根入れ長さ 58.7m)において, 海中部のみに着目し更新設計法の検証試験を実施した. 試験対象杭は, 周辺の鋼材および陽極からの電氣的影響を受けないように絶縁処理が施されている.

鋼管杭の防食仕様と試験装置を図-3.3.6 に示す. 鋼管杭のコンクリート上部工下端から L.W.L.-1.5m の範囲(飛沫帯~干満帯)には重防食塗装, それ以下の範囲(海中部, 海底土中部)には流電陽極方式(アルミ陽極)による電気防食が施されている. なお, 周辺の鋼材およびアルミ陽極の影響を受けないよう, 試験対象杭のみに絶縁処理を施し, 周辺環境から電氣的に遮断した. 設計防食電流密度は, D.L.+2.0m~-2.0m は汚染海域の 130mA/m<sup>2</sup>, D.L.-2.0~-5.0m は清浄海域の 100mA/m<sup>2</sup>, D.L.-5.0m~-63.7m は海底土中部の 20mA/m<sup>2</sup> が適用されている. 本試験は, 鋼管杭に取り付けられている試験体を用いて実施した. 試験体は図-3.2.7 に示す形状のもので, 鋼管杭に溶接して取り付けられているが, 鋼材試験片(供試材)は鋼管杭とは電氣的に絶縁されている. 鋼材試験片からのリード線を陸上の計測ボ

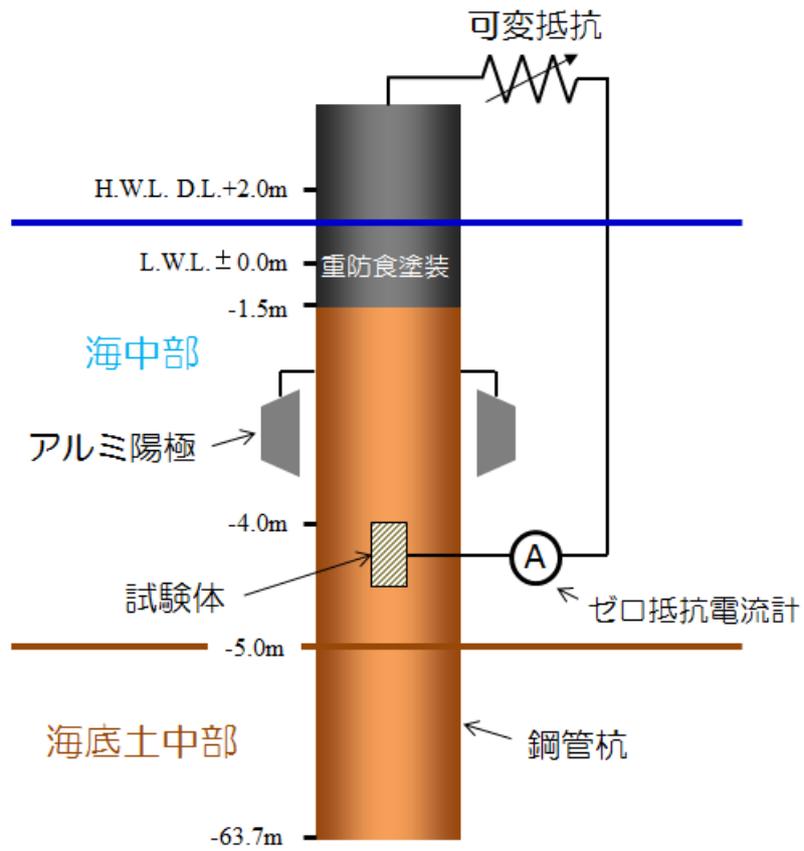


図-3.3.6 検証試験の試験装置図

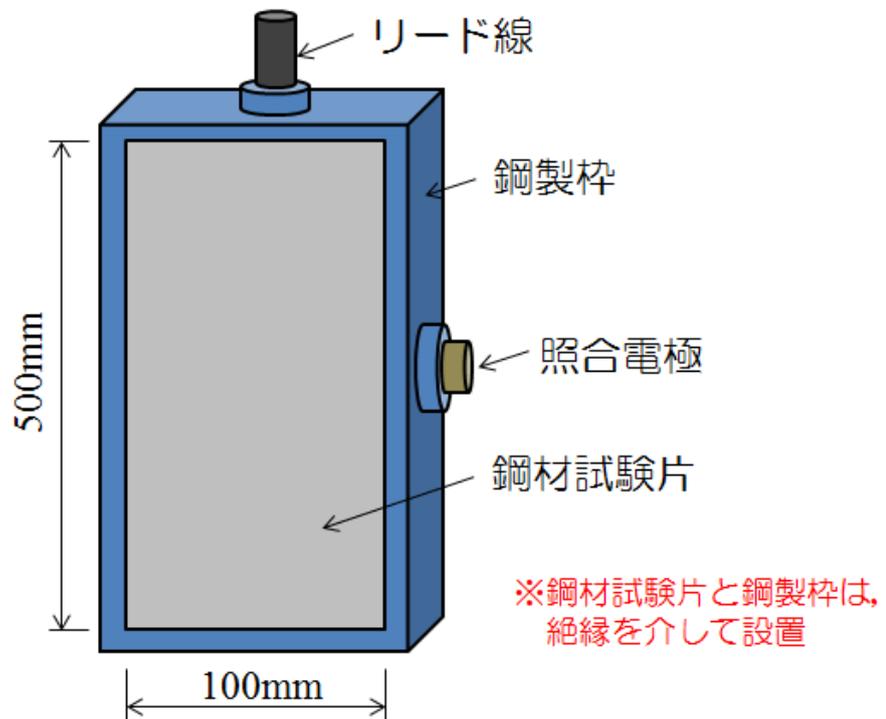


図-3.3.7 検証試験に用いた試験体の詳細図

ックスまで立ち上げ、鋼材試験片と鋼管杭とは抵抗器（可変抵抗）を介して短絡し、鋼材試験片に流入する防食電流を調整した。検証試験の手順は以下の通りである。

はじめに現時点までに得られているデータをもとに  $E_c-i_c$  プロット図を作成し、前述した更新設計の考え方をを用いて設計防食電流密度を決定した。次に、予備試験として抵抗器を回路内に挿入し、数種類の電流値を設定して通電を行い、得られた  $E_c-i_c$  プロットから設計防食電流密度を評価した。評価値が更新設計電流密度と異なる場合は、抵抗器を調整し、所定の設計電流密度での通電条件を確定した。

### 3.3.5 試験結果および考察

#### (1) 実験室試験

自然短絡試験から得られたカソード電位とカソード電流密度の関係（ $E_c-i_c$  プロット）を図-3.3.8～図-3.3.10に示す。塗り潰し記号で示す各種防食条件における更新前の挙動は、(0, -1100) と（設計防食電流密度, -800）の2点を通る直線（理論線）上に分布していることから、各試験装置は設計通りの電気防食系を模擬していることが確認できた。いずれの試料も、試験開始とともにカソード電位は急速に分極が進行し、短時間で防食電位（-780mV）に到達した。その後も非常に速い速度で分極が進行し、全てが設計上の維持管理電位とされる -925mV より卑な電位で定常化した。以上のことから、本試験では全ての条件において更新時に設計防食電流密度が低減可能である前提条件を満たしていた。

種々の設計防食電流密度に変更した後の  $E_c-i_c$  プロットを同図中にそれぞれ白塗り記号で示した。また、新設計法に基づいて決定される直線（電気防食条件）を破線で示した。図から分かるとおり、設計防食電流密度の変更によってカソード電位は一時的に貴電位側に变化したが、その後は新たな設計条件として定義される直線上を経時的に卑電位側に移行した。更新前の設計防食電流密度が  $180\text{mA/m}^2$  および  $240\text{mA/m}^2$  の条件では、更新後も全ての条件下で -925mV より卑な電位まで変化し、新設計法よりさらに低い設計防食電流密度でも良好な防食状態が得られることが分かった。一方、更新前の設計防食電流密度  $120\text{mA/m}^2$  の条件で防食した場合は、更新後の設計防食電流密度が  $90\text{mA/m}^2$ （電流低減率：0.75）の場合のみ -925mV より卑化した。設計防食電流密度を新設計法よりさらに低下させた条件での防食では、カソード電位を -925mV 以下に維持することはできなかった。陽極更新時に低減可能な最小設計防食電流密度は、防食対象物に対する通電履歴（更新前の設計防食電流密度）に依存する傾向が認められたが、全ての条件に対して更新後もカソー

ド電位が-925mV 以下を維持したのは、先に提案した新設計法を満たす条件（破線より小さい傾きの設計条件）のみであったことから、陽極更新時の設計法としては、本文で提案する設計手法は安全側を与える妥当なものであると考えられる。

更新後の定常カソード電流密度（直線の左下端の値）が更新前の値よりさらに低減した値を示す場合、析出していたエレクトロコーティングがより緻密なコーティングに成長したことが考えられ、電気防食設計上、今後考慮すべき課題である。

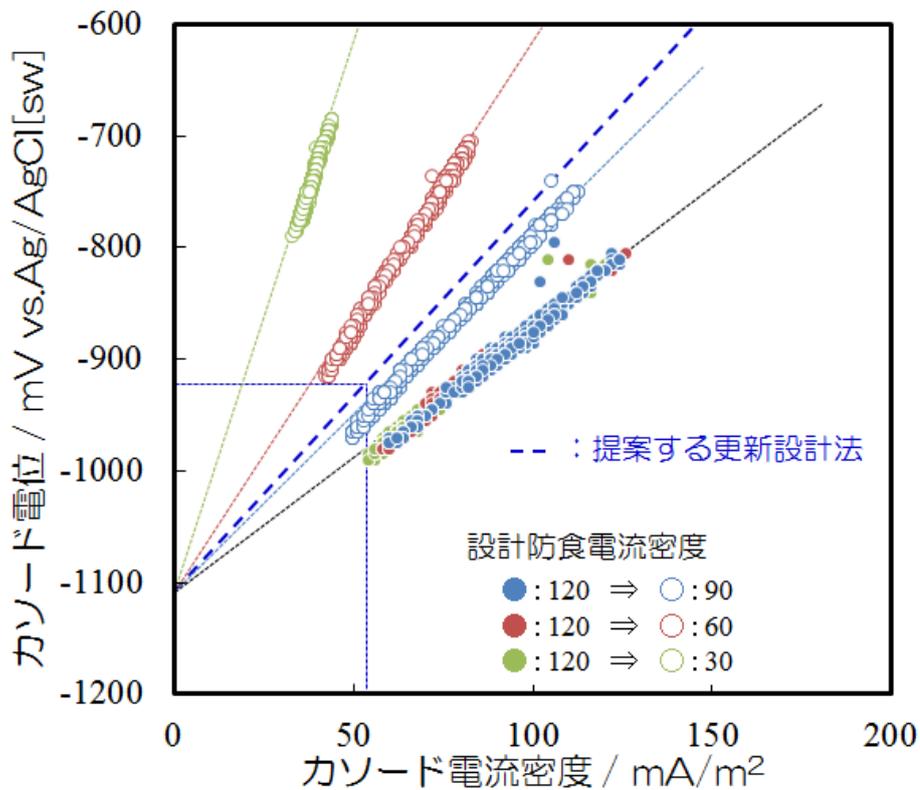


図-3.3.8 設計防食電流密度  $120\text{mA/m}^2$  で通電した時の  $E_c-i_c$  プロット

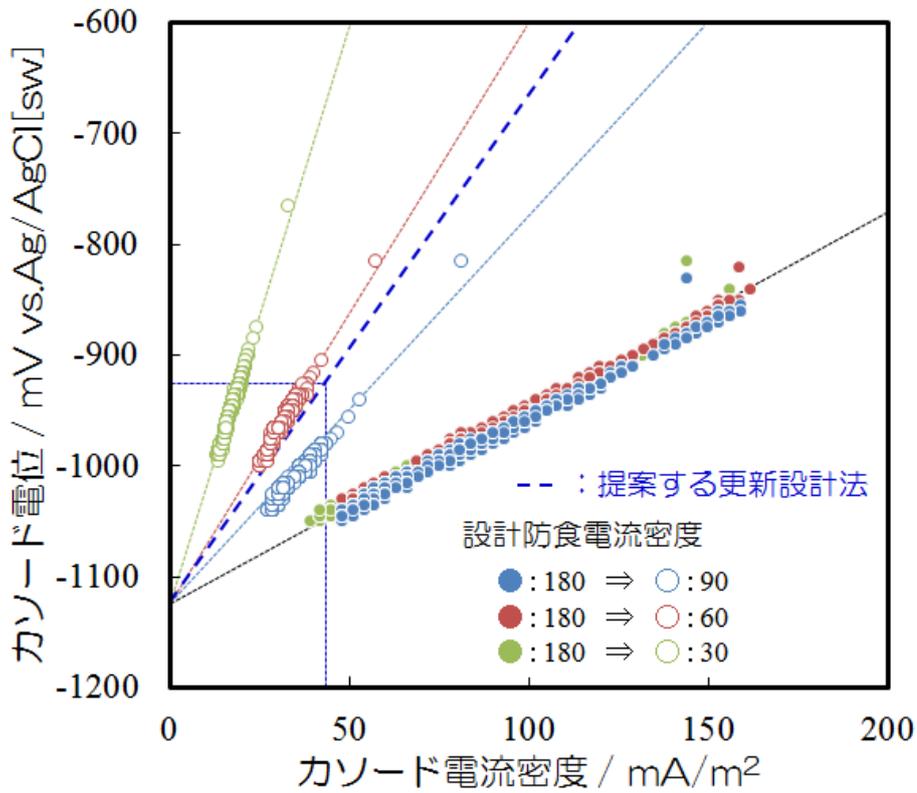


図-3.3.9 設計防食電流密度 180mA/m<sup>2</sup> で通電した時の  $E_c-i_c$  プロット

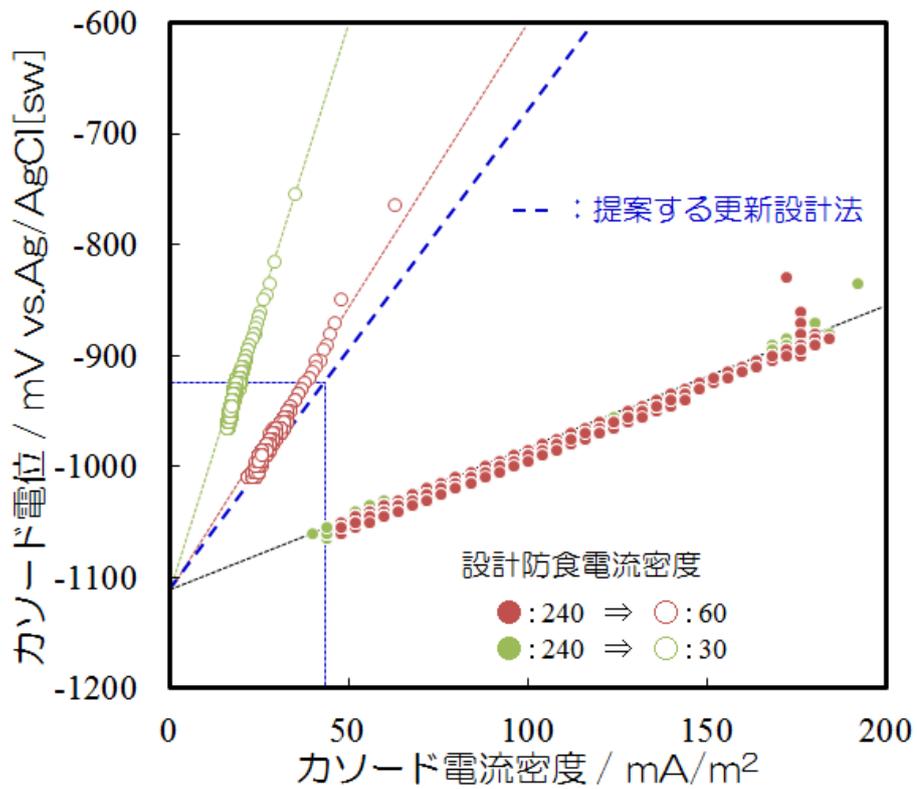


図-3.3.10 設計防食電流密度 240mA/m<sup>2</sup> で通電した時の  $E_c-i_c$  プロット

## (2) 実構造物による新設計法の検証試験

東京国際空港 D 滑走路連絡誘導路の下部工（鋼管杭）で実施した検証試験におけるカソード電流密度とカソード電位の関係を図-3.3.11 に示す。

実構造物に設置した試験体の  $E_c-i_c$  プロットは、若干の幅はあるものの直線的に変化しているのが確認された。直線近似より、アノード電位は約  $-1030\text{mV}$ 、設計防食電流密度は約  $540\text{mA/m}^2$  と推測された。設計時の設計防食電流密度は  $130\text{mA/m}^2$  であることから、約 4.2 倍も大きい値である。

これは、海底土中部に防食電流を供給するためのアノードが海中部に設置されていることと実構造物から突出した試験片による評価を行っていることが原因と考えられる。海底土中部の電気抵抗率は、深度が深くなるにつれて高くなる傾向を示し<sup>13)</sup>、同施設における既往の研究では、 $20\text{mA/m}^2$ （設計値）以上の電流が確認されたのは海底面から 15m 程度までの範囲と報告されている<sup>14)</sup>。よって、海底土中部に流入する予定の防食電流の多くが海中部に流入していることが設計防食電流密度の増大につながったと考えられる。

試験片による防食電流の計測では、試験片を実構造物表面の一部と考え、試験片に流れる電流流線は供試面にすべて垂直になるように境界条件を整えなければならない。しかしながら、本試験片は実構造物から突出した位置にあるため試験片端部にも回りこみによる電流が加わり、設計電流密度の増加要因になっているものと考えられる。

更新前の定常カソード電流密度は約  $100\text{mA/m}^2$  であり、新設計法を適用した後の設計防食電流密度は、3.3.3 で述べた方法により  $200\text{mA/m}^2$  と求められた。固定抵抗の値を調整して実構造物に更新設計を適用したところ、実際の  $E_c-i_c$  プロットは若干の幅はあるものの直線的に変化しており、設計防食電流密度は約  $230\text{mA/m}^2$  と推定され、概ね更新設計の値と一致した。カソード電位は更新直後から防食電位を満足しており、短期間で  $-925\text{mV}$  以下まで分極した。また、更新後の定常カソード電流密度は、更新前の値の約 1/2 に相当する  $50\text{mA/m}^2$  であった。短期間の試験ではあるが、提案する新設計法の妥当性を示すデータとなっており、実用化への可能性が示された。

本設計手法を適用することにより設計値以上の電流低減が期待されるが、電流低減率の設定については今後の更なるデータの蓄積が必要である。

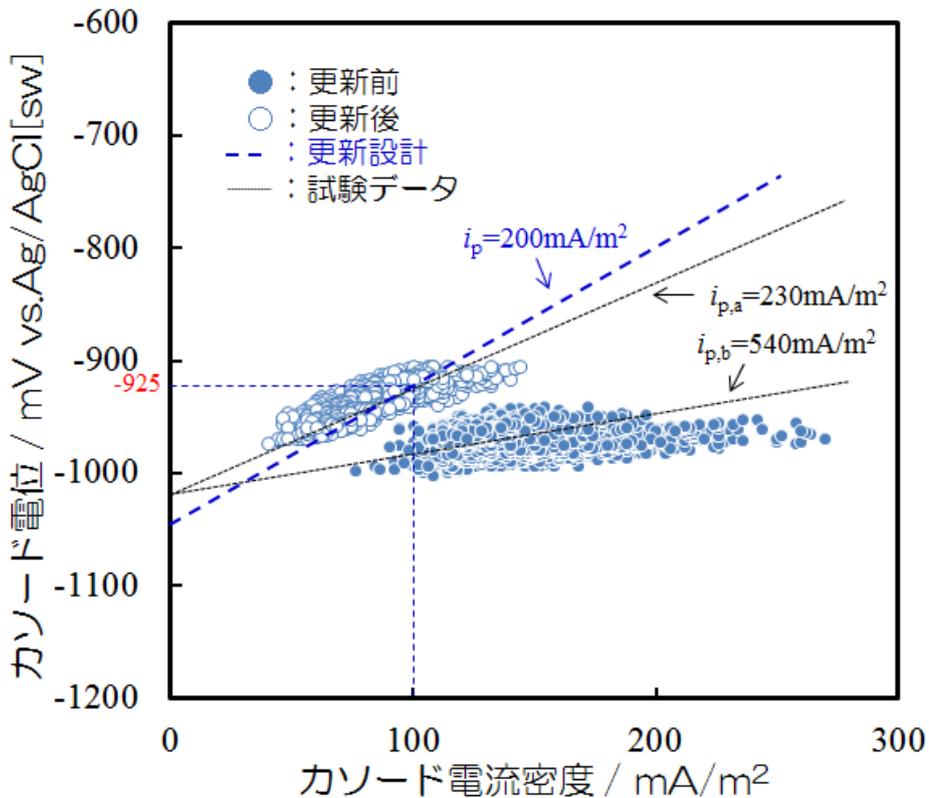


図-3.3.11 検証試験で得られた  $E_c-i_c$  プロット

### 3.3.6 まとめ

流電陽極方式による港湾鋼構造物の電気防食に対して陽極更新時の設計手法を提案し、検証試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 陽極更新時に設計防食電流密度の低減が期待できるのは、カソード電位が  $-925\text{mV vs. Ag/AgCl[sw]}$  より卑化している場合である。更新後においても  $-925\text{mV}$  以下に維持するために必要な最小設計防食電流密度は、防食対象物に対する通電履歴に依存することが分かった。通電履歴に関係なく更新後もカソード電位を設計上の維持管理電位 ( $-925\text{mV}$ ) 以下に維持するためには、更新前の定常カソード電流密度を 2 倍した値を設計防食電流密度にすればよい。
- 2) 東京国際空港 D 滑走路連絡誘導路の下部工（鋼管杭）に対して、提案する更新設計法の検証試験を実施した結果、更新設計適用後の  $E_c-i_c$  プロットは、設計した直線上を変化していたことから、本設計手法の妥当性が確認された。

### 3.3.7 参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター, 港湾の構造物の防食・補修マニュアル, p.90, (2009)
- 2) M.Abe, T.Fukute, S.Tamari and T.Tomura, Technical Note of The Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport. Jpn, p.1120, PHRI, (1996).
- 3) B.S.Wyatt, R.Brittain and G.R.Jones, *CORROSION/80*, no.148, (1980).
- 4) E.Lemieux and W.H.Hartt, *Corrosion*, 62, 584, (2006)
- 5) 審良善和, 山路徹, 岩波光保, 野口孝俊, 耐海水性ステンレス鋼被覆を施した海洋構造物の電気防食特性, 第 32 回防錆防食技術発表大会講演集, p.122, (社)日本防錆技術協会, (2005)
- 6) 審良善和, 山路徹, 岩波光保, 野口孝俊, 第 36 回防錆防食技術発表大会講演集, p.p.14-15, (社)日本防錆技術協会, (2008)
- 7) 審良善和, 山路徹, 岩波光保, 小林浩之, 港湾鋼構造物の電位計測による電気防食管理方法に関する一提案, 材料と環境 2012 講演予稿集, p.314, (社)腐食防食協会, (2012).
- 8) K.Mayumi and N.Takashiro, *J.Soc.Mater.Sci.JPN*, 53, 1198 (2004).
- 9) 望月紀保, 山田真澄, 平崎敏史, 濱田秀則, 海水環境における流電陽極法の設計と陽極寿命について, 材料と環境 2003 講演予稿集, p.346, (社)腐食防食協会, (2003).
- 10) W.Wang and W.H.Hartt, *CORROSION/94*, no.496 (1994).
- 11) (財)沿岸技術研究センター, 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, p.98, (2007).
- 12) 豊島幹人, 砂本健志, 清水泉一郎, 中田毅, 小林浩之, 望月紀保, 阿部正美, 海水中における流電陽極法の設計に関する考察, 第 47 回材料と環境討論会講演予稿集, p.437, (社)腐食防食協会, (2000)
- 13) 審良善和, 山路徹, 小林浩之, 渡部要一, 板倉新, 高橋小夜佳, 吉田倫夫, 前菌優一, 高柳紘貴, 海底土中部における防食電流密度と土質特性の関係, 第 59 回材料と環境討論会講演予稿集, p.2, (社)腐食防食協会, (2012)
- 14) 審良善和, 山路徹, 小林浩之, 根本正幸, 吉田倫夫, 前菌優一, 海底土中部鋼管杭への電気防食に関する実構造物調査, 第 57 回材料と環境討論会講演予稿集, p.395, (社)腐食防食協会, (2010)

### 3.4 第3章のまとめ

第3章では、港湾鋼構造物に適用した流電陽極方式電気防食システムの維持管理手法について検討した。今後集中すると予想される電気防食システムの更新を計画的に実施するために、アルミ陽極の寿命推定手法について検討し、以下の知見を得た。

- 1) 実施設の  $E_c$ - $I_a$  線とカソード電位計測を組み合わせたアノード電流の推定法を提案した。本方法により、アルミ陽極の寿命を±10%の誤差内で推定することが可能となり、効率的な維持管理手法としての可能性を確認した。
- 2) アルミプローブを用いたアルミ陽極のアノード電流推定法を考案した。実構造物に対して検証試験を実施し、その有用性を確認した。

また、余剰設計となっている現行の陽極更新設計について見直しを行い、陽極更新時の施設の防食状態を考慮した新しい更新設計法を提案した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 陽極更新前のアノード電流からカソード電流密度を評価し、その値の2倍を陽極更新後に用いる設計防食電流密度とする設計法を提案した。ただし、新設計法を適用するのは、カソード電位が防食管理電位  $-925\text{mV vs. Ag/AgCl[sw]}$  以下を維持している時であり、それ以外の時には現行の設計法を適用する。
- 2) 東京国際空港 D 滑走路連絡誘導路の下部工（鋼管杭）に対して、提案する更新設計法の検証試験を実施し、本設計手法の妥当性を確認した。

本手法を用いることにより、点検コストを低く抑えることができ、電気防食システムの効率的な維持管理が可能になると考えられる。

## 第4章 港湾コンクリート構造物に適用した電気防食システムの維持管理

### 4.1 序

耐久性は半永久的といわれたコンクリート構造物であるが、塩害劣化による耐久性の早期低下が頻発し、電気防食が適用されるようになったのは1980年代のことである。その頃はコンクリート道路橋への適用がほとんどであり、港湾施設に本格的に適用されるようになったのは1990年代中頃になってからである。港湾施設は道路橋に比べて極めて厳しい塩害環境であり、海上大気部、飛沫帯、干満帯、海中部によってその影響度が大きく異なる。栈橋内部は比較的密閉された空間であり、塩化物イオンのコンクリート中への浸透が多く、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの剥落が頻繁に起きている。通常、このような場合には、断面修復と電気防食を併用した防食対策が採用される。



写真-4.1.1 断面修復と電気防食を適用した例

しかしながら、近年、港湾施設において所定の防食電流を供給しても電気防食基準（100mVシフト基準）に到達しないケースが報告されるようになってきた。この原因を追究するために大気環境および湿潤環境での電気防食試験を実施し、コンクリート中鉄筋の電気防食特性を確認した。そして、コンクリート中鉄筋の電気防食メカニズムが暴露環境によってことなることを究明し、湿潤環境下における電気防食設計法の提案を行った。また、湿潤環境下でも低酸素濃度状態の場合の電気防食基準についても検討を行い、新たな電気防食基準値の提案を行った。さらに、Pt電極の水素特性に着目した水素電極法を考案し、速度論的な防食評価手法の可能性を見出した。

## 4.2 鉄筋表面の環境改善を考慮したコンクリート中鉄筋の電気防食設計

### 4.2.1 はじめに

半永久的な耐久性を有するといわれていた鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化が、我が国において大きな社会問題となったのは1970年代前半のことであり、既に30年が経過した。塩害とは、種々の要因でコンクリート中に混入した塩化物イオンによって構造物中の鉄筋が腐食し、その腐食生成物（錆）の影響によって鉄筋に体積変化が生じ、その体積膨張圧でコンクリートにひび割れ、剥落が起こり、部材耐力を低下させる現象である。その後、断面修復や表面塗装などの補修工法が施されるようになったが、いずれの工法も再劣化の問題を抱えており、複数回の補修が必要となる場合も多い<sup>1)-2)</sup>。一方、電気防食は、防食電流を供給し続ける限り再劣化は生じないため、今日では塩害劣化に非常に有効な防食対策と認識されるようになった。

現在、電気防食の適用に際しては、復極量を分極量と等価と考え、通電初期から100mV以上のカソード分極が生じるような通電が行なわれている<sup>3)</sup>。しかしながら、復極量と分極量は濃度分極の影響がない場合はほぼ等価と考えられるが、溶存酸素の濃度分極の影響が大きいコンクリート中鉄筋の場合、等価ではない。また、分極量を基準にした通電は、水分の少ないコンクリート構造物にとっては過剰な通電となることもある。電流供給用の難溶性アノード表面の水分が枯渇することによっても印加電圧は上昇し、通電不能となる危険性もある。安定したカソード通電を確保するためには、通電初期からの過剰通電を控え、小電流密度であっても一定期間経過後には防食基準を満足するような設計をすることが重要である。この考えを裏付けるものとして、通電初期は電気防食基準を満足しなくても、防食電流を供給し続けることによって鉄筋の自然電位が経時的に上昇し、電気防食基準を満足するようになることが実構造物で確認されている。この現象は、電気防食による鉄筋表面の副次的な環境改善効果をもたらした結果と考えられており<sup>4)-5)</sup>、この環境変化を定量的に評価できれば防食設計に取り入れることが可能となる。

本節では、電気防食による鉄筋表面の環境改善効果を取り入れた電気防食設計法(以下、新設計法と記す)を提案し、その妥当性を確認するための試験を実施したものである。

### 4.2.2 新設計法の考え方

本設計法の目的は、通電初期から現行の電気防食基準を満足させるような過度な通電を避け、鉄筋表面の環境改善により経時的に腐食速度を低下させることである。具体的には

電気防食の適用により，経時的に変化する鉄筋表面の塩化物イオン（Cl<sup>-</sup>）濃度と水酸化物イオン（OH<sup>-</sup>）濃度の変化を数値解析（差分法）によって評価し，Cl<sup>-</sup>濃度とOH<sup>-</sup>濃度比（[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]= $r_{ce}$ ）がしきい値（ $r_{crit}$ ）以下になるまでの期間（ $t_a$ ）を求めて，許容範囲内で初期の防食電流密度を決定する方法である．本設計法では， $t_a$ までの期間は復極量が電気防食基準に未達であっても良い（以下，未達許容可能期間と記す）こととし， $t_a$ 以降に対して現行の電気防食基準を適用することを考えている．これにより，経済的かつ安定した電気防食の適用が可能であると考えられる．

#### 4.2.3 解析および試験方法

##### (1) 解析方法

##### 1) Cl<sup>-</sup>濃度の経時変化

電気防食を適用しているコンクリート中のCl<sup>-</sup>濃度の一次元（ $x$ 軸方向）の濃度変化は，(4.2.1)式のように考えることができる<sup>6)</sup>．

$$\frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial t} = D_{Cl^-} \frac{\partial^2 C_{Cl^-}}{\partial x^2} + D_{Cl^-} \frac{zFE}{RT} \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial x} \quad (4.2.1)$$

$C_{Cl^-}$ ：Cl<sup>-</sup>濃度， $x$ ：コンクリート表面からの距離， $t$ ：時間， $z$ ：荷電数，

$D_{Cl^-}$ ：見かけのCl<sup>-</sup>拡散係数， $F$ ：ファラデー定数， $E$ ：環境電位勾配，

$R$ ：気体定数， $T$ ：絶対温度

電気防食適用前のコンクリート中のCl<sup>-</sup>濃度分布は，フィックの第2法則を $C_{Cl^-}(x, 0) = 0$ ， $C_{Cl^-}(0, t) = C_{Cl^-,0}$ （一定）の条件下で得られる(4.1.2)式によって求めることができる．本解析では，(4.2.2)式をもとに下記の解析条件を設定し，求められる分布を初期条件とした．

$$C_{Cl^-}(x_i, \Delta t) = C_{Cl^-,0} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{Cl^-} \cdot t}} \right) \quad (4.2.2)$$

【解析条件】

$$C_{Cl^-}(0,t)=10\text{kg/m}^3 \text{ (コンクリート表面濃度)}, C_{Cl^-}(\infty,t) = 0\text{kg/m}^3,$$

$$D_{Cl^-}=3.0\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}, t: 20 \text{ 年後}$$

(4.2.1)式を差分方程式((4.2.3)式)に変換し、下記の解析条件下で各位置における  $Cl^-$ 濃度の経時変化を求めた。

$$C_{Cl^-}(x_i,t+\Delta t) = D_{Cl^-} \cdot \Delta t \cdot \left\{ \frac{C_{Cl^-}(x_{i+1},t) - 2C_{Cl^-}(x_i,t) + C_{Cl^-}(x_{i-1},t)}{\Delta x^2} + \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{C_{Cl^-}(x_{i+1},t) - C_{Cl^-}(x_i,t)}{\Delta x} \right\} + C_{Cl^-}(x_i,t), \quad (4.2.3)$$

【解析条件】

$$\text{鉄筋位置} : x = 5\text{cm}, C_{Cl^-}(0, t)=10\text{kg/m}^3, C_{Cl^-}(\infty,t)=0\text{kg/m}^3, D_{Cl^-}=1.0\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s},$$

$$E=-30\text{mV/cm} (x \leq 5\text{cm}), E=0\text{mV/cm} (x > 5\text{cm}), T=298\text{K}$$

## 2) pH 経時変化

電気防食を適用することによるコンクリート内部の  $OH^-$ 濃度の時間変化は、一次元での物質移動を考慮し、(4.2.4)式および(4.2.5)式で与えることとする。

《鉄筋位置》

$$\frac{\partial C_{OH^-}}{\partial t} = D_{OH^-} \frac{\partial^2 C_{OH^-}}{\partial x^2} + D_{OH^-} \frac{zFE}{RT} \frac{\partial C_{OH^-}}{\partial x} + \frac{i}{zFd} \quad (4.2.4)$$

《鉄筋位置以外》

$$\frac{\partial C_{OH^-}}{\partial t} = D_{OH^-} \frac{\partial^2 C_{OH^-}}{\partial x^2} + D_{OH^-} \frac{zFE}{RT} \frac{\partial C_{OH^-}}{\partial x} \quad (4.2.5)$$

$C_{OH^-}$ : 濃度,  $x$ : コンクリート表面からの距離,  $D_{OH^-}$ : 見かけの  $OH^-$ 拡散係数,  
 $t$ : 時間,  $z$ : 荷電数,  $F$ : ファラデー定数,  $E$ : 環境電位勾配,  $R$ : 気体定数,  
 $T$ : 絶対温度,  $i$ : カソード電流密度,  $d$ : pH 定義層の厚み

【解析条件】

鉄筋位置：  $x = 5\text{cm}$ ,  $D_{\text{OH}^-} = 1.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ ,

$x = 5\text{cm}$  の時：  $C_{\text{OH}^-}(5,0) = 1.0 \times 10^{-7} \text{M}$ ,  $x \neq 5\text{cm}$  の時：  $C_{\text{OH}^-}(\infty, t) = 1.0 \times 10^{-2} \text{M}$ ,

$i = -10 \text{mA}/\text{m}^2$ ,  $d = 0.05 \text{cm}$ ,  $E = -30 \text{mV}/\text{cm}$  ( $x \leq 5\text{cm}$ ),  $E = 0 \text{mV}/\text{cm}$  ( $x > 5\text{cm}$ ),

$T = 298 \text{K}$

上記の解析条件は以下の点を考慮して決定した。腐食している鉄筋を想定して  $C_{\text{OH}^-}(x,0)$  は鉄筋表面を  $1.0 \times 10^{-7} \text{M}$  (pH7) とし、それ以外の部分を  $1.0 \times 10^{-2} \text{M}$  (pH12) とした。また、 $D_{\text{OH}^-}$  は  $\text{Cl}^-$  と  $\text{OH}^-$  との移動度<sup>7)</sup>の比を考慮し、 $D_{\text{Cl}^-}$  の3倍の値を用いた。(4.2.4)式, (4.2.5)式を下記((4.2.6)式, (4.2.7)式)の差分方程式に変換し、上記解析条件下で各位置における  $\text{OH}^-$  濃度を算出し、 $\text{pH} = 14 + \log C_{\text{OH}^-}$  の関係より  $\text{pH}$  に換算して経時変化を求めた。

《鉄筋位置》

$$C_{\text{OH}^-}(x_i, t + \Delta t) = \Delta t \cdot \left[ D_{\text{OH}^-} \cdot \left\{ \frac{C_{\text{OH}^-}(x_{i+1}, t) - 2C_{\text{OH}^-}(x_i, t) + C_{\text{OH}^-}(x_{i-1}, t)}{\Delta x^2} + \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{C_{\text{OH}^-}(x_{i+1}, t) - C_{\text{OH}^-}(x_i, t)}{\Delta x} \right\} + \frac{i}{zFd} \right] + C_{\text{OH}^-}(x_i, t) \quad (4.2.6)$$

《鉄筋位置以外》

$$C_{\text{OH}^-}(x_i, t + \Delta t) = D_{\text{OH}^-} \cdot \Delta t \cdot \left\{ \frac{C_{\text{OH}^-}(x_{i+1}, t) - 2C_{\text{OH}^-}(x_i, t) + C_{\text{OH}^-}(x_{i-1}, t)}{\Delta x^2} + \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{C_{\text{OH}^-}(x_{i+1}, t) - C_{\text{OH}^-}(x_i, t)}{\Delta x} \right\} + C_{\text{OH}^-}(x_i, t) \quad (4.2.7)$$

(2)  $r_{\text{crit}}$  値の評価試験

発錆させた試験片を数種類の異なる  $\text{Cl}^-$  濃度の試験溶液中に浸漬し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  および  $\text{NaOH}$  の添加によって  $\text{pH}$  を上昇させた時の腐食速度の変化を AC インピーダンスの周波数特性と、自然電位の経時変化により評価した。試験片の形状は図-4.2.1 に示すとおりであり、材質は SS400 (JIS G 3101) である。SS400 の化学成分を表-4.2.1 に示す。室温、大気開放下の海水を用いて 1~2 週間、任意のインターバルで乾湿を繰り返すことにより、試験片の供試面全体に錆を発生させた。試験溶液の  $\text{pH}$  上昇は、はじめに  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の添加によって

Ca(OH)<sub>2</sub> の飽和水溶液状態とし、それ以上の pH 上昇は NaOH の添加により調整した。

AC インピーダンスによる評価は、図-4.2.2 に示す等価回路によって行った。計測によって得られたデータをナイキスト図にプロットし、CPE (Constant phase element) を取り入れた等価回路によってカーブフィッティングを行い、腐食抵抗 ( $R_{corr}$ ) を推定した。測定装置は図-4.2.3 に示すように、ポテンショ/ガルバノスタット、周波数特性分析器 (FRA)、パーソナルコンピューターからなる計測系と、試験片 (試料極)、対極、照合電極 (sat.KCl Ag/AgCl 電極, SSE) からなる電解系によって構成されている。測定条件は、振幅: ±20mV, 測定周波数: 10mHz~10kHz である。

表-4.2.1  $r_{crit}$  値の評価試験に用いた試験片の化学成分 (mass%)

	C	Mn	P	S
SS400	—	—	< 0.050	< 0.050

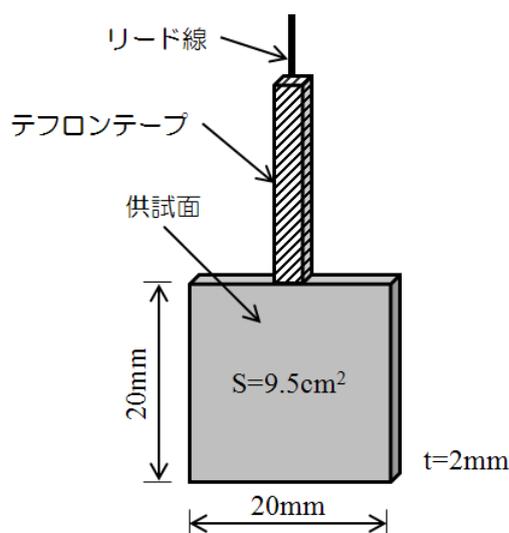


図-4.2.1  $r_{crit}$  値の評価試験に用いた試験片の形状

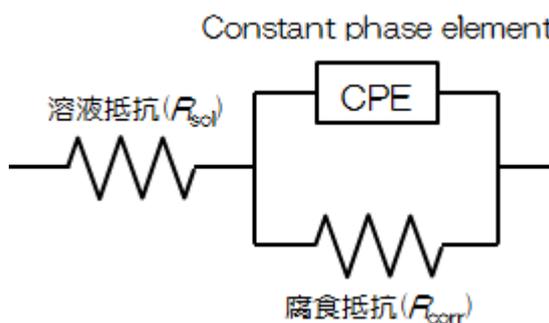


図-4.2.2 AC インピーダンス解析に用いた等価回路

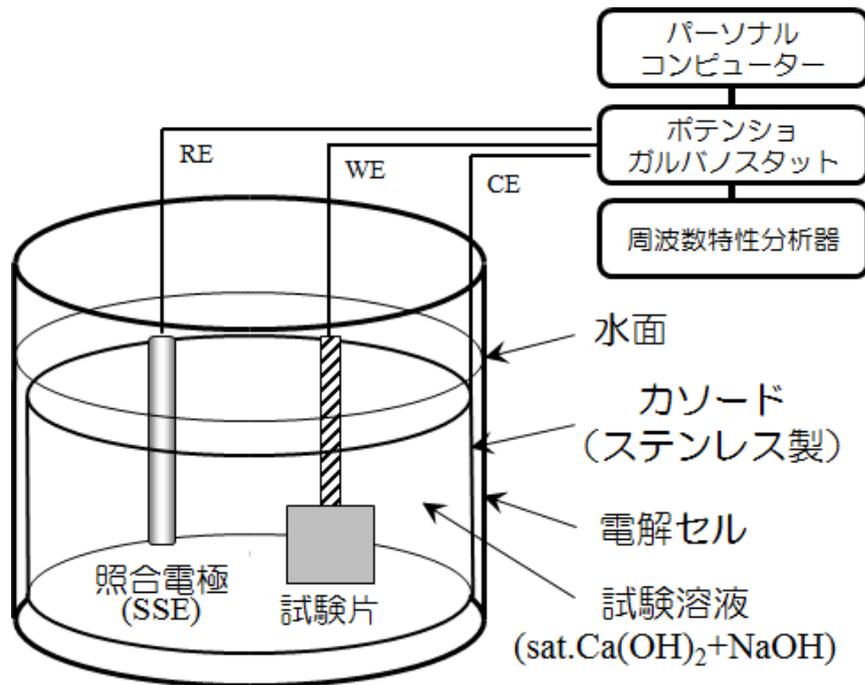


図-4.2.3 ACインピーダンス測定装置

### (3) 新設計法の検証試験

新設計法の妥当性を確認するため、コンクリート試験体による電気防食試験を実施した。コンクリートの配合を表-4.2.2 に示す。コンクリート試験体のセメントには普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には川砂、粗骨材には川砂利を用いた。水セメント比は 0.50、目標スランプは  $10 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、目標空気量は  $4 \pm 1\%$  とした。また、鉄筋の腐食を促進するため、 $10 \text{ kg/m}^3$  の NaCl を練り混ぜ水に添加した。コンクリート試験体の形状は図-4.2.4 に示すように幅×高さ×長さ =  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  であり、上面から 30mm の位置に  $\phi 13 \text{ mm}$  の鉄筋を設置し、上面を除く周囲 5 面をエポキシ樹脂で被覆した。コンクリート打設後、30 日間の湿潤養生を行い、(独) 港湾空港技術研究所の暴露試験場 (1 日につき 3 時間×2 回海水を噴霧) に 1 年間暴露した。暴露終了後、試験体の上面から 10mm の位置に通電するためのリボンメッシュ電極を設置し、試験体底面の樹脂を剥がした後、30mm の高さに水道水を張った試験水槽に試験体を設置した。

コンクリート試験体は 2 体作製し、ガルバノスタットを用いてそれぞれ  $10 \text{ mA/m}^2$  と  $30 \text{ mA/m}^2$  の定電流カソード通電を行った。通電前にはコンクリート抵抗と鉄筋の自然電位を測定し、通電中には復極量測定 (24h) を定期的に行なった。

表-4.2.2 コンクリートの配合

W/C	s/a	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )
0.50	0.45	166	324	805	1008

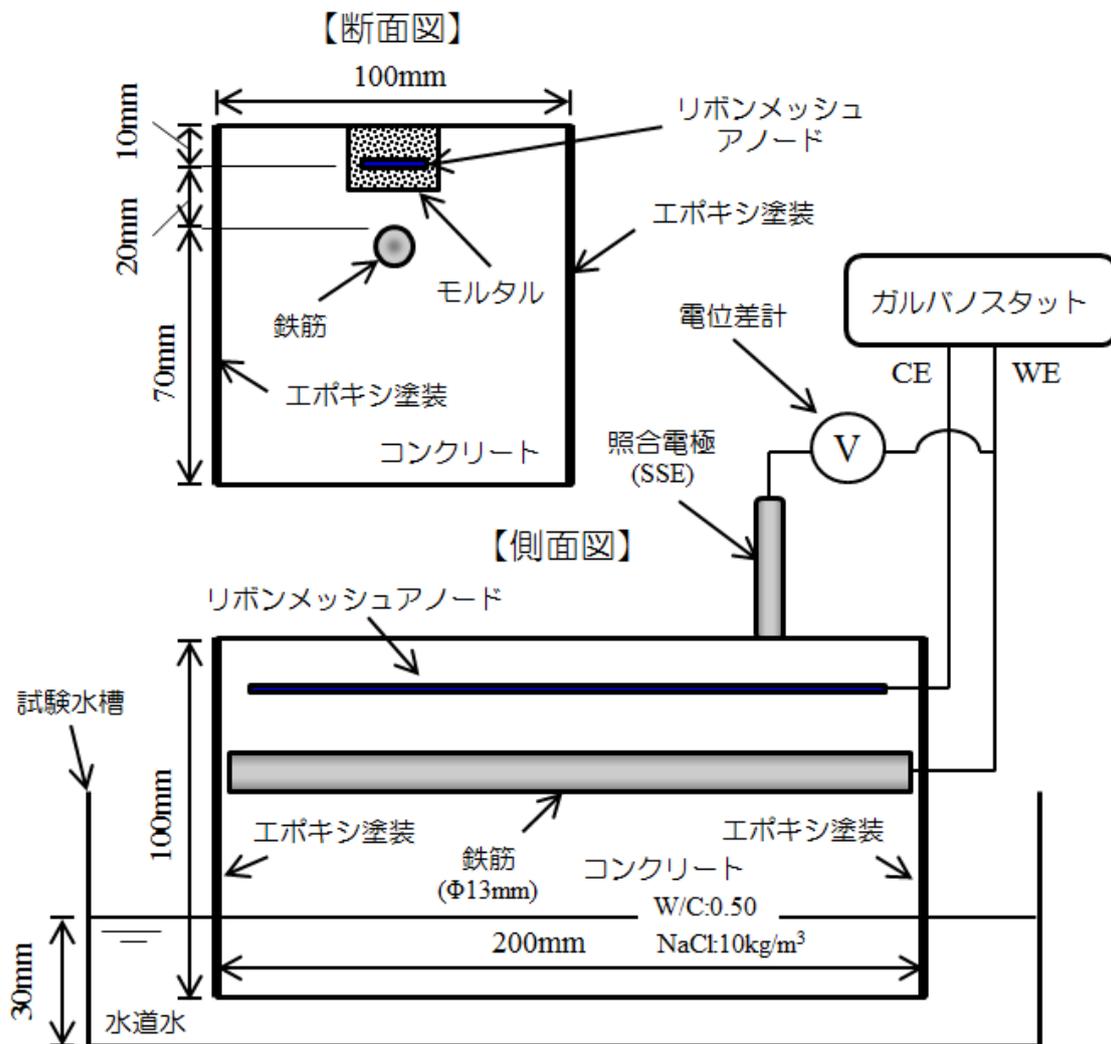


図-4.2.4 検証試験に用いたコンクリート試験体の形状

#### 4.2.4 試験結果および考察

##### (1) カソード電流によるコンクリート中の Cl<sup>-</sup>濃度経時変化

$\Delta x = 0.1\text{cm}$ ,  $\Delta t = 10^3$  年として, 4.2.3(1)に述べた手法で解析した結果を図-4.2.5 に示す. なお, 図中の ◆ は, 本条件下における定常 Cl<sup>-</sup>濃度分布である. 定常状態における Cl<sup>-</sup>濃度は, Nernst-Plank 式よりカソード電流密度  $i=0$  として導かれる(4.2.8)式によって求めることができる<sup>8)</sup>. 定常状態における 2 点間の Cl<sup>-</sup>濃度比は, 2 点間の環境電位勾配によって一意的に求められることを示している.

$$\Delta E = \frac{RT}{zF} \ln \left( \frac{C_{\text{Cl}^-,1}}{C_{\text{Cl}^-,2}} \right) \quad (4.2.8)$$

ここで,  $C_{\text{Cl}^-,1}$ ,  $C_{\text{Cl}^-,2}$  はそれぞれコンクリート中の任意の 2 点の Cl<sup>-</sup>濃度,  $\Delta E$  はその間に印加されている環境内の電位勾配を表している.  $C_{\text{Cl}^-,2}$  をコンクリート表面濃度 ( $10\text{kg/m}^3$  で一定) とし,  $\Delta E$  が距離に対してリニアに変化するとすれば, 任意の位置のコンクリート表面に対する電位勾配が得られるため, (4.2.8)式よりその位置の定常 Cl<sup>-</sup>濃度 ( $C_{\text{Cl}^-,1}$ ) を求めることができる.

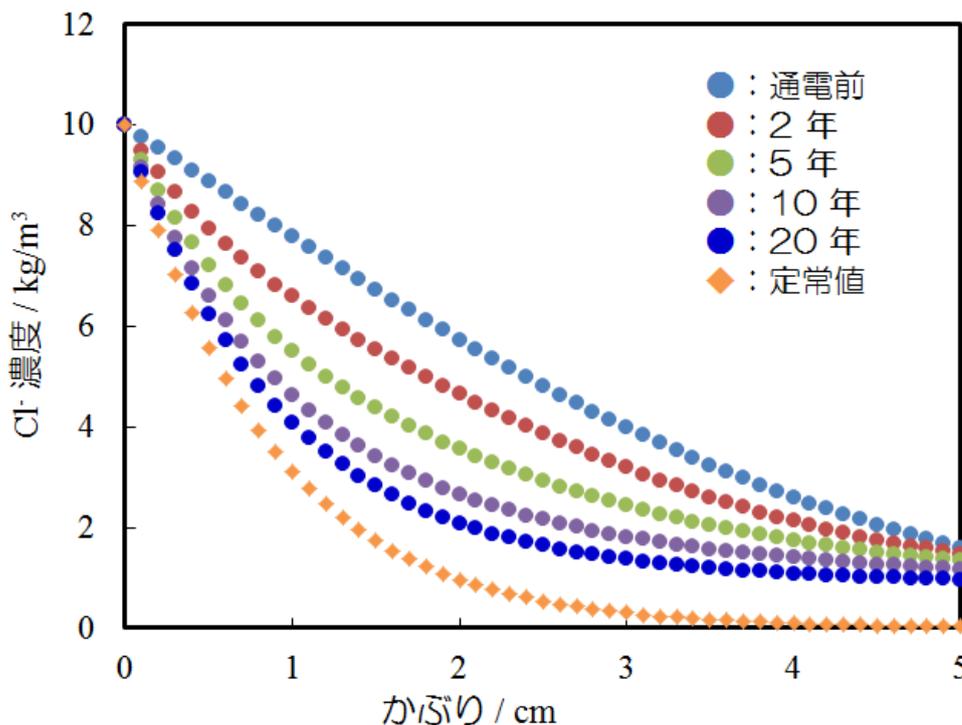
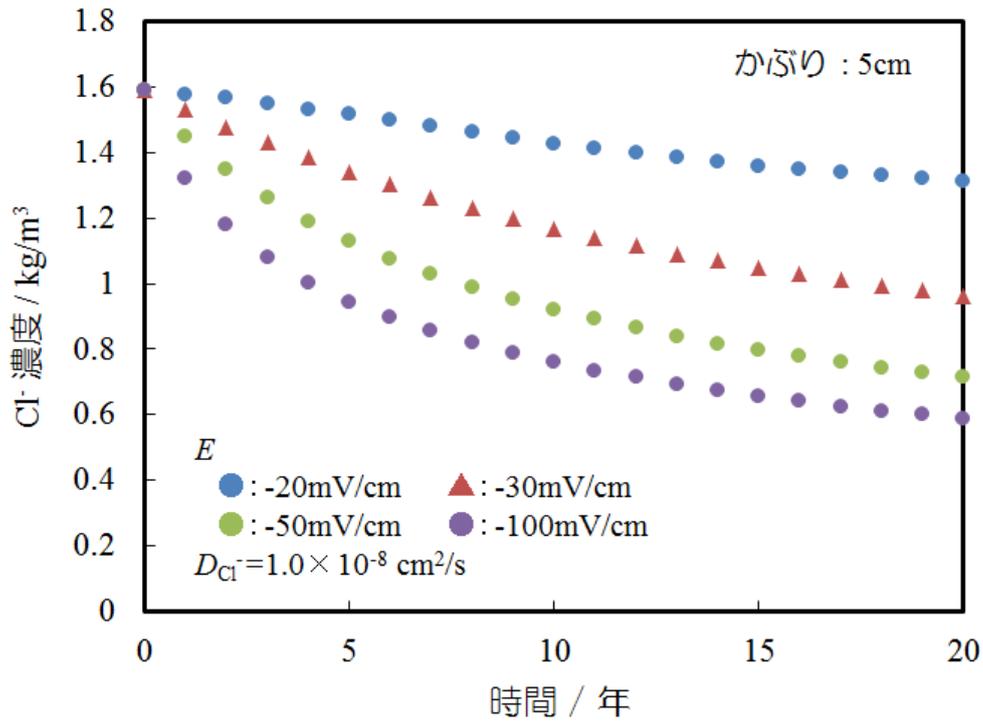
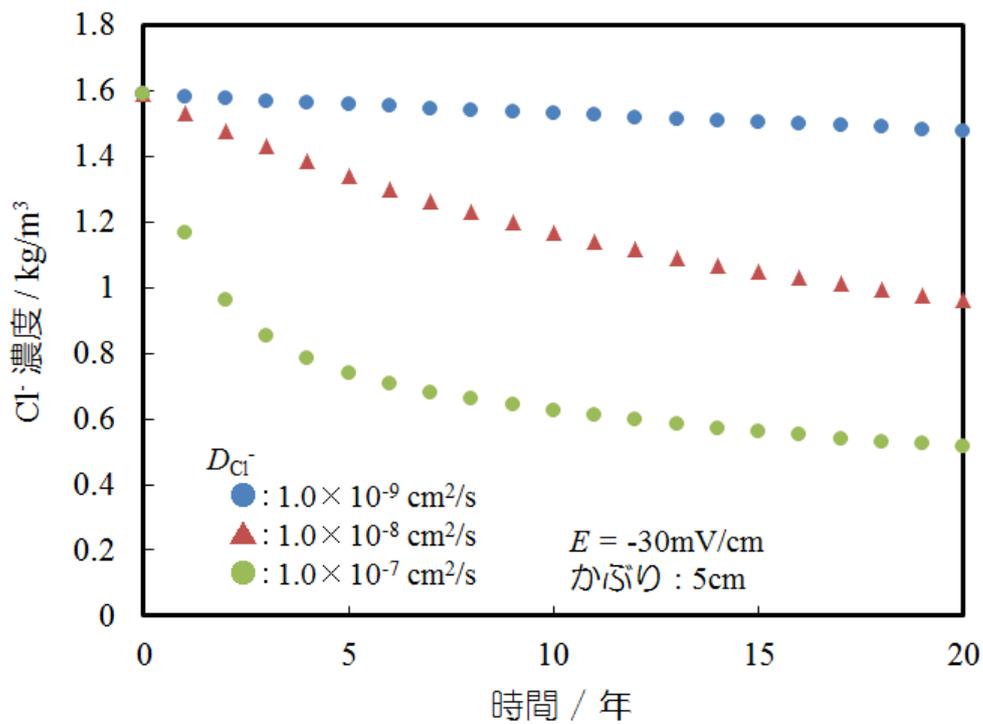


図-4.2.5 電気防食の適用に伴う Cl<sup>-</sup>濃度分布の経時変化



(a)  $E$  の影響



(b)  $D_{Cl^-}$  の影響

図-4.2.6 鉄筋表面における Cl<sup>-</sup>濃度の経時的低減に及ぼす各種パラメータの影響

電気防食の適用により，コンクリート内部の  $\text{Cl}^-$ 濃度は，時間の経過とともに低減するのが確認できる．特にかぶり厚さ 1~3cm の位置において，低減量が大きくなる．しかしながら， $\text{Cl}^-$ 濃度が定常濃度になるまでには相当の時間を要することが分かる．また， $\text{Cl}^-$ 濃度の低減に及ぼす各種パラメータの影響として，鉄筋位置（かぶり 5cm）における濃度変化に着目し， $D_{\text{Cl}^-}$ と  $\Delta E$  の影響を調べた．結果を図-4.2.6 に示す．

図中の ▲ は，図-4.2.5 のシミュレーションにおける  $\text{Cl}^-$ 濃度の経時変化であるが， $D_{\text{Cl}^-}$ ， $\Delta E$  ともに大きい値になるほど  $\text{Cl}^-$ 濃度の低減速度が速いことが分かる．このことから，既存の構造物に対する対応としてはとりわけ  $\Delta E$  の設定が重要であると考えられる．

## (2) カソード電流によるコンクリート中の pH 経時変化

$\Delta x=0.1\text{cm}$ ， $\Delta t=60\text{sec}$  として解析した  $\text{OH}^-$ 濃度分布の経時変化を pH に変換し，図-4.2.7 に示した．定常値としてプロットした値は，Glass らの論文に基づき(4.2.9)式<sup>9)</sup>より算出した値である．

$$C_{\text{OH}^-,0} = \frac{RT}{RT + zFi\rho\delta} \left( \frac{i\delta}{zFD_{\text{OH}^-}} + C_{\text{OH}^-,1} \right) \quad (4.2.9)$$

$C_{\text{OH}^-}$  :  $\text{OH}^-$ 濃度 ( $C_{\text{OH}^-,0}$ :カソード表面， $C_{\text{OH}^-,1}$ :コンクリート表面)， $i$ :カソード電流密度，  
 $\delta$ : かぶり厚さ， $\rho$ : コンクリート抵抗， $z$ : 荷電数， $D_{\text{OH}^-}$ :  $\text{OH}^-$ 拡散定数，  
 $F$ : ファラデー定数， $R$ : 気体定数， $T$ : 絶対温度

カソード電流の供給に伴う鉄筋表面(かぶり 5cm)の pH 変化は，定常値に達するまでの時間が先述した  $\text{Cl}^-$ 濃度の場合と比較するとその速度が非常に速い．本解析条件下では，30日程度で(4.2.9)式より得られる定常 pH (■) の近くまで上昇するという結果になった．

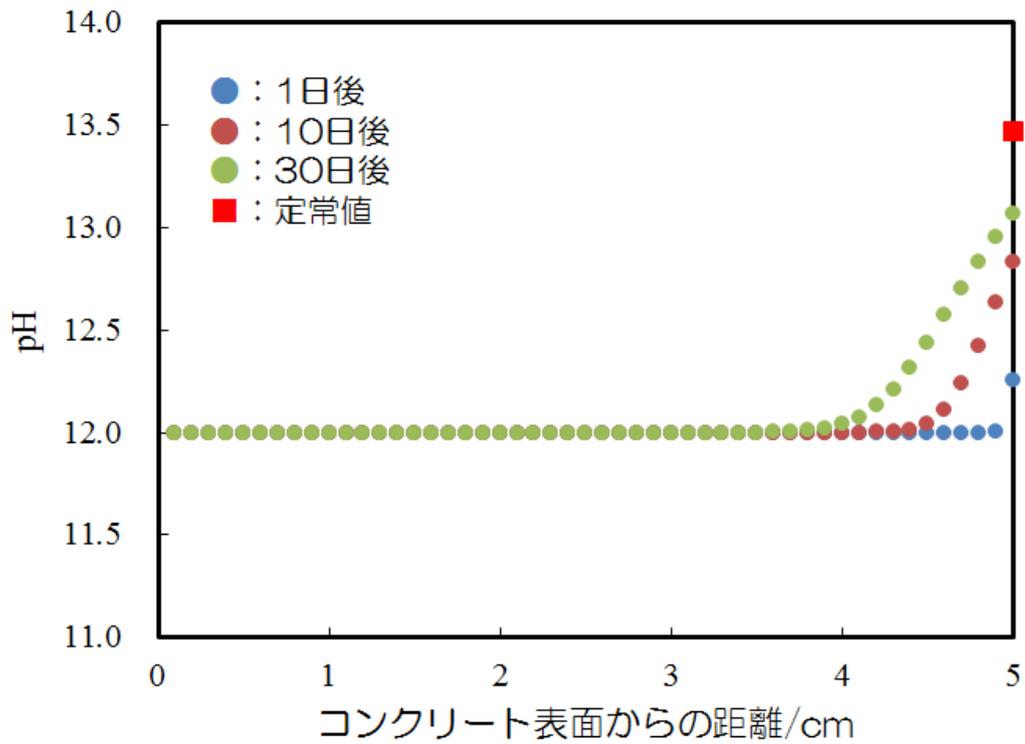
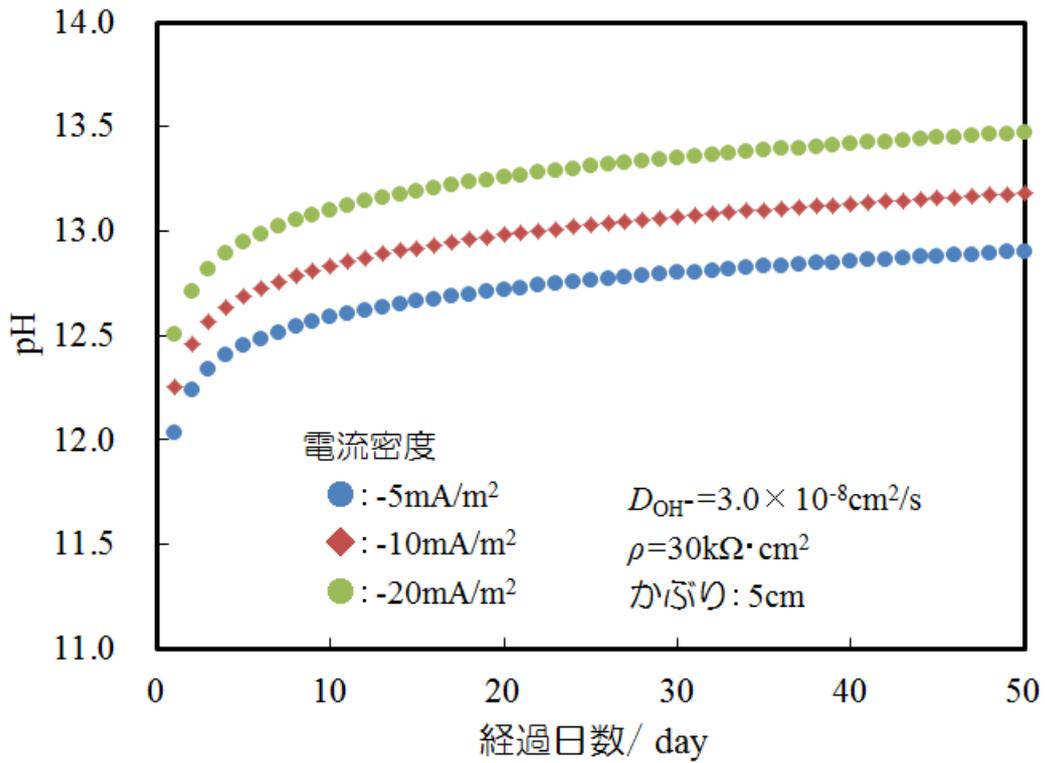
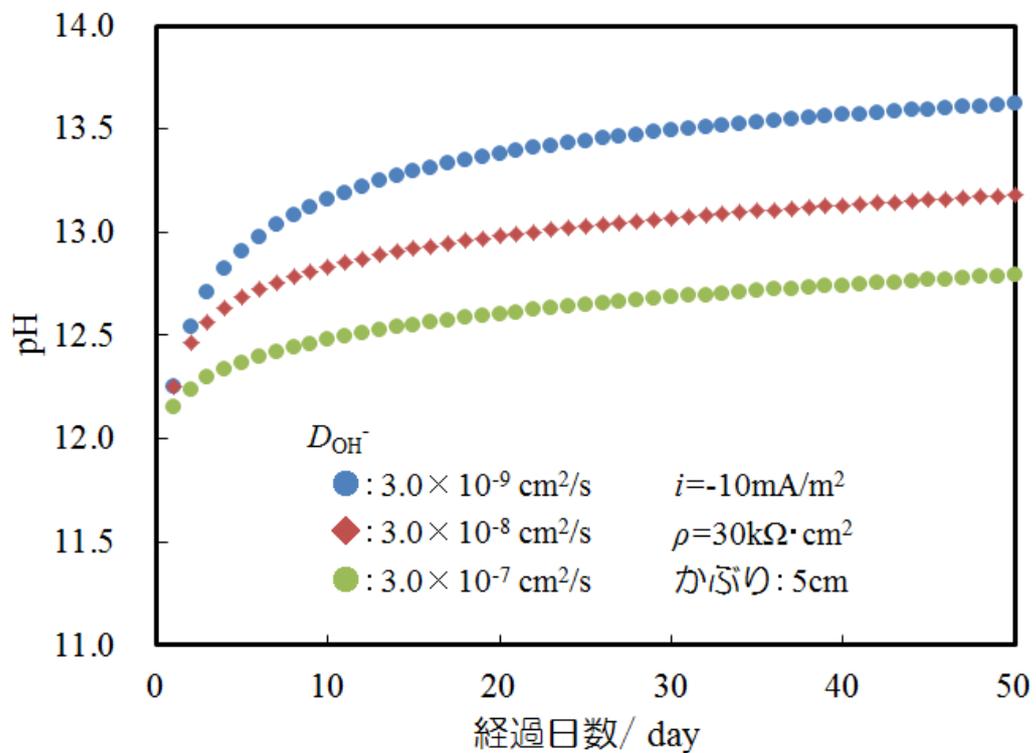


図-4.2.7 カソード防食適用に伴う pH 分布の経時変化

(4.2.9)式において  $E = i \cdot \rho$  とし、鉄筋位置（かぶり 5cm）での pH 経時変化に及ぼす  $i$  と  $D_{OH^-}$  の影響を評価した結果を図-4.2.8 に示す。◆は図-4.2.7 の数値解析における pH の経時変化である。解析結果より、 $D_{OH^-}$  が大きく、 $i$  が高い条件ほど pH の上昇が大きく、鉄筋表面の pH も高くなることが分かる。



(a)  $i$  の影響



(b)  $D_{\text{OH}^-}$  の影響

図-4.2.8 鉄筋表面の pH 経時変化に及ぼす各種パラメータの影響

### (3) $r_{crit}$ 値の検討結果

図-4.2.9 は、試験片のアルカリ環境下における自然電位の変化について検討した結果の一例である。自然電位は  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の添加により上昇し、約 20 時間経過後に定常化した。この電位の貴化は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の添加による pH の増加によって、試験片が腐食状態から不動態の状態に変化したことを示している。

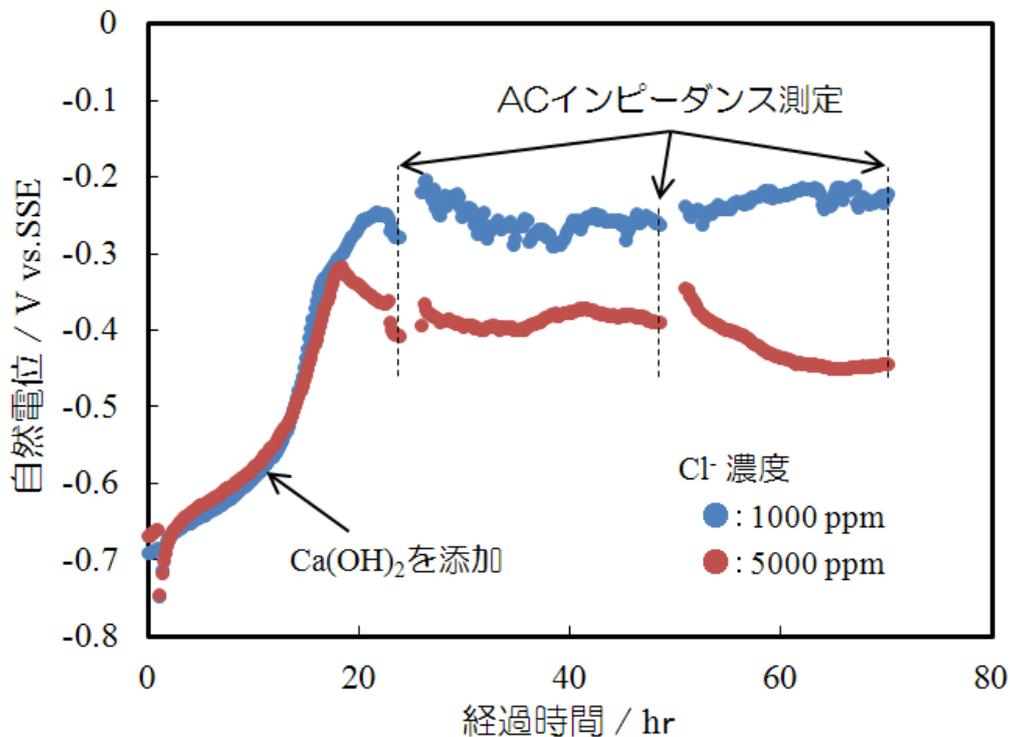


図-4.2.9  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  添加前後における試験片の自然電位経時変化

本試験では、自然電位が定常化した時点で AC インピーダンス測定により評価した腐食抵抗  $R_{corr}$  (CPE を取り入れたカーブフィッティングより評価) を当該 pH 環境の腐食速度に対応するパラメータと考え  $r_{ce}$  との対応を調べた。  $R_{corr}$  の評価結果の一例を図-4.2.10 に示す。いずれの塩化物イオン濃度においても、時間の経過とともに  $R_{corr}$  は増加する傾向を示した。これは腐食速度が減少したことを示しており、腐食状態から不動態の状態に変化したことを裏付けるものである。試験片に対する  $r_{ce}$  と  $R_{corr}$  の関係を図-4.2.11 に示す。データにばらつきが生じているが、  $r_{ce} < 2$  で  $R_{corr}$  は  $100\text{k}\Omega\text{cm}^2$  以上を示し、腐食した鋼材もアルカリ環境を維持することで、腐食速度を 1/10 以下 (防食率で 90% 以上) に低減することが可能であることを確認した。  $r_{crit}$  に関しては、既報文献<sup>10) -11)</sup> との対応も考慮し、本試験では  $r_{crit}=1$  と評価することにした。なお、データのばらつきについては、 $[\text{Cl}^-]$  が 1000

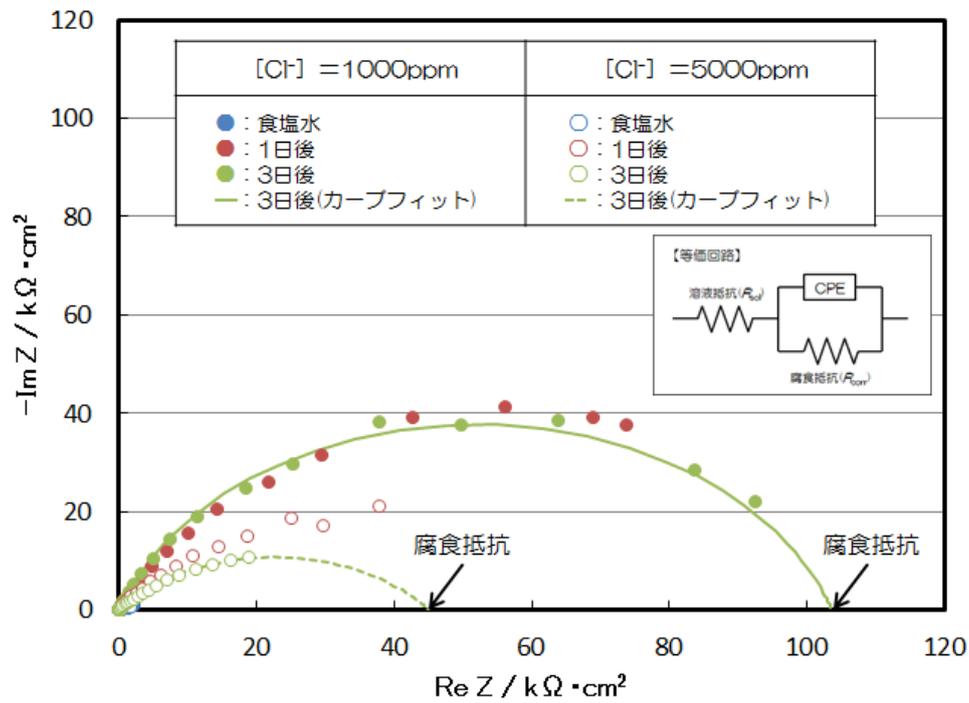


図-4.2.10  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  添加前後における試験片の AC インピーダンス特性経時変化

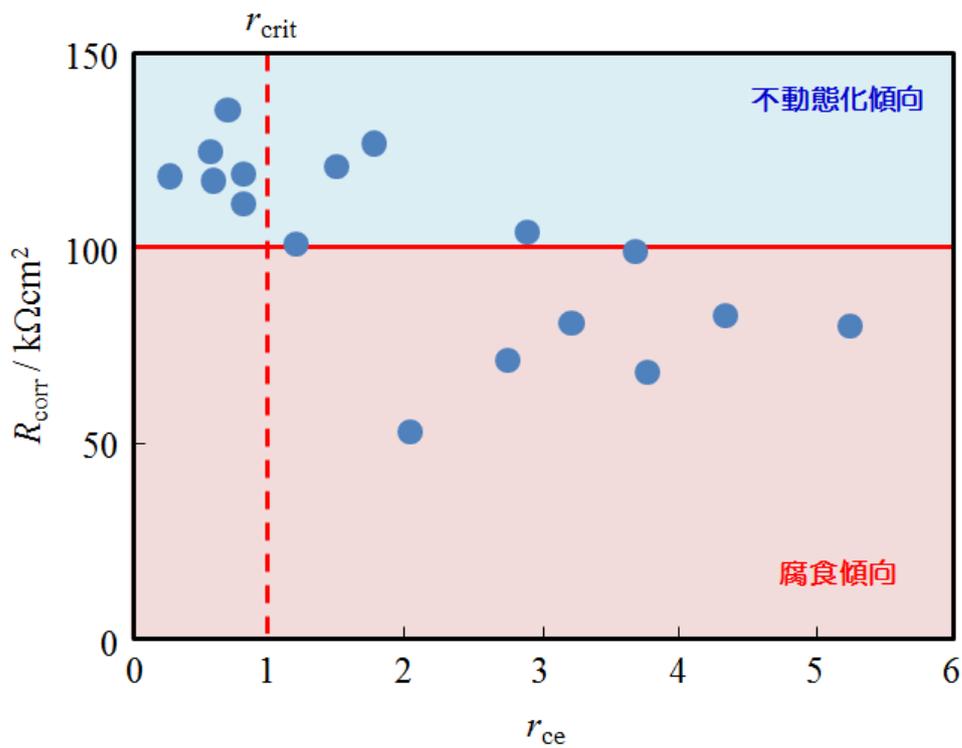


図-4.2.11 試験片に対する  $r_{ce}$  と  $R_{corr}$  の関係

～2000ppm の試料に対して顕著に認められた。これは、鍍試片作製時の鍍の生成状態が試料によって異なることが原因と推測されるが、1000ppm 以上は腐食傾向と捉えるのが安全側での評価と考える。

#### (4) 鉄筋表面の環境改善を考慮した設計法の検討

図-4.2.12 に本設計法のフローチャートを示す。本設計に必要なパラメータは、コンクリートかぶり、コンクリート抵抗率、コンクリート表面 Cl<sup>-</sup>濃度、構造物の経過年数、Cl<sup>-</sup>および OH<sup>-</sup> 拡散定数の 6 項目である。Cl<sup>-</sup>濃度と OH<sup>-</sup>濃度の初期条件は、Cl<sup>-</sup>濃度の場合、Fick の第 2 法則の解析解である(4.2.2)式より求めた。一方、OH<sup>-</sup>濃度は、鉄筋表面を  $1.0 \times 10^{-7}$  M とし、それ以外の部分を  $1.0 \times 10^{-2}$  M、とした。電気防食系は、2 枚の平板電極が対向するモデルとして扱い、鉄筋以深の電場については無視した。通電に伴う Cl<sup>-</sup>および OH<sup>-</sup>濃度分布の経時変化は、それぞれ(4.2.1)式、(4.2.4)式、(4.2.5)式の微分方程式を差分方程式に変換して求めた<sup>12)</sup>。

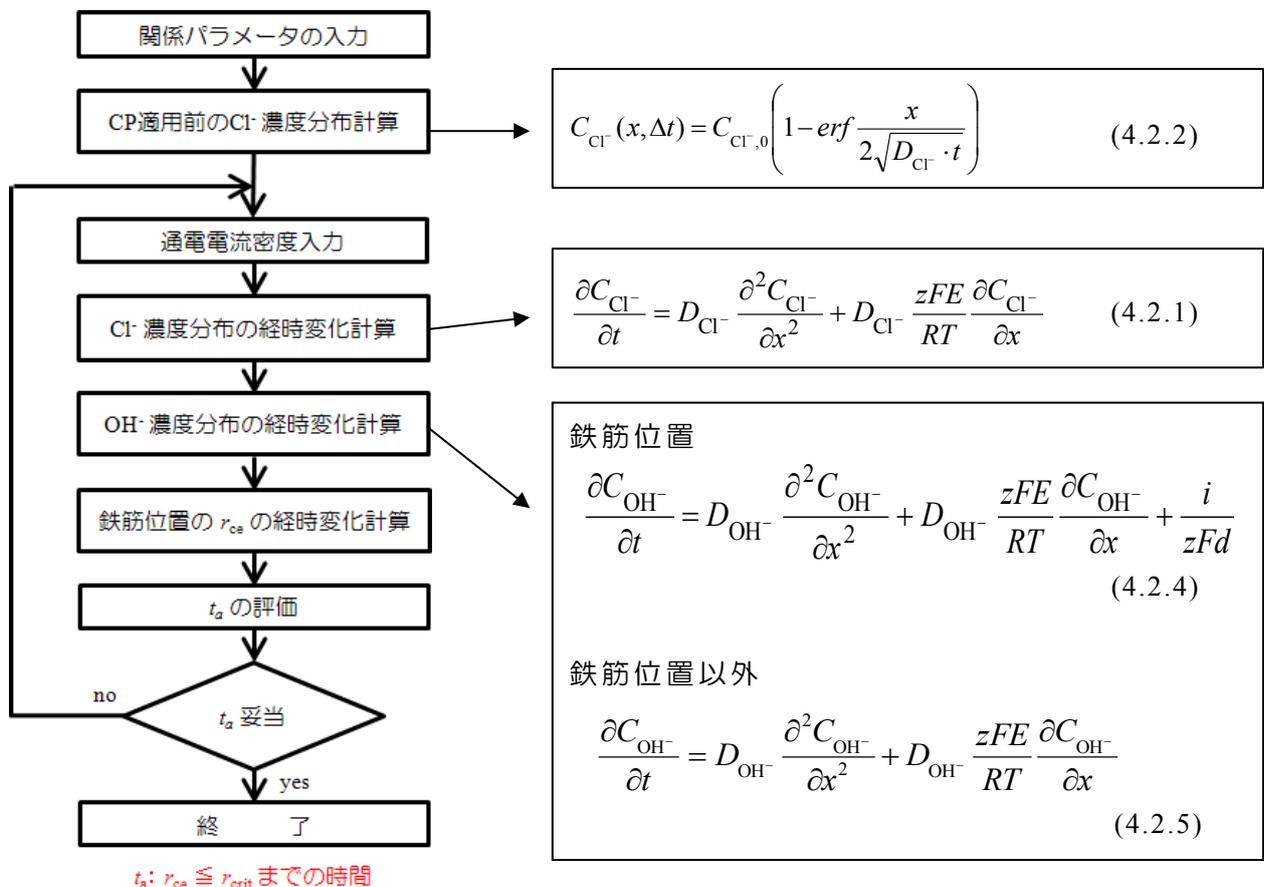


図-4.2.12 設計フローチャート

$r_{ce}$  の経時変化の算出は、(4.2.2)式、(4.2.6)式、(4.2.7)式より求められる各位置の  $Cl^-$  および  $OH^-$  濃度の経時変化より、鉄筋位置における各濃度をピックアップし、同時期における  $[Cl^-]/[OH^-]$  の計算を時系列で実施し  $r_{ce}$  の経時変化とした。その際、 $Cl^-$  濃度として通常用いられる  $kg/m^3$  単位はモル濃度への換算が必要であるが、本設計では、 $NaCl$  を添加した  $Ca(OH)_2$  飽和水溶液環境で孔食電位が出現する  $[Cl^-]=2000ppm$  をコンクリート中鉄筋の腐食発生限界濃度である  $1.2kg/m^3$  に相当するとした<sup>13)</sup>。 $r_{ce} \leq r_{crit}$  となる期間  $t_a$  を評価し、カソード防食基準の未達許容可能期間内であれば当該電流密度で通電することとし、見直しが必要であれば通電電流密度を再入力し  $t_a$  の再評価を試みるというフローである。

表-4.2.3 に示す条件下で実施した設計結果の一例を図-4.2.13 に示す。1年以内で鉄筋近傍の環境を  $r_{ce} \leq 1$  に改善するという条件であれば、 $2mA/m^2$  という非常に小さい電流密度で通電すればよいことになる。

表-4.2.3 解析条件

<p><b>【試験体条件】</b>            コンクリートかぶり: 5cm            初期 <math>Cl^-</math> 濃度: <math>10kg/m^3</math>  <math>D_{Cl^-} = 1.0 \times 10^{-8} cm^2/s</math></p>
<p><b>【電気防食条件】</b>  <math>i = -2, -5, -10 mA/m^2</math>  <math>\rho = 30000 \Omega \cdot cm</math>  <math>E = i\rho\delta</math>  <math>D_{OH^-} = 3.0 \times 10^{-8} cm^2/s</math>  <math>d = 0.05 cm</math>            初期 <math>OH^-</math> 濃度            ・鉄筋位置: <math>1.0 \times 10^{-7} M</math>            ・鉄筋位置以外: <math>1.0 \times 10^{-2} M</math>  <math>T = 298 K</math></p>

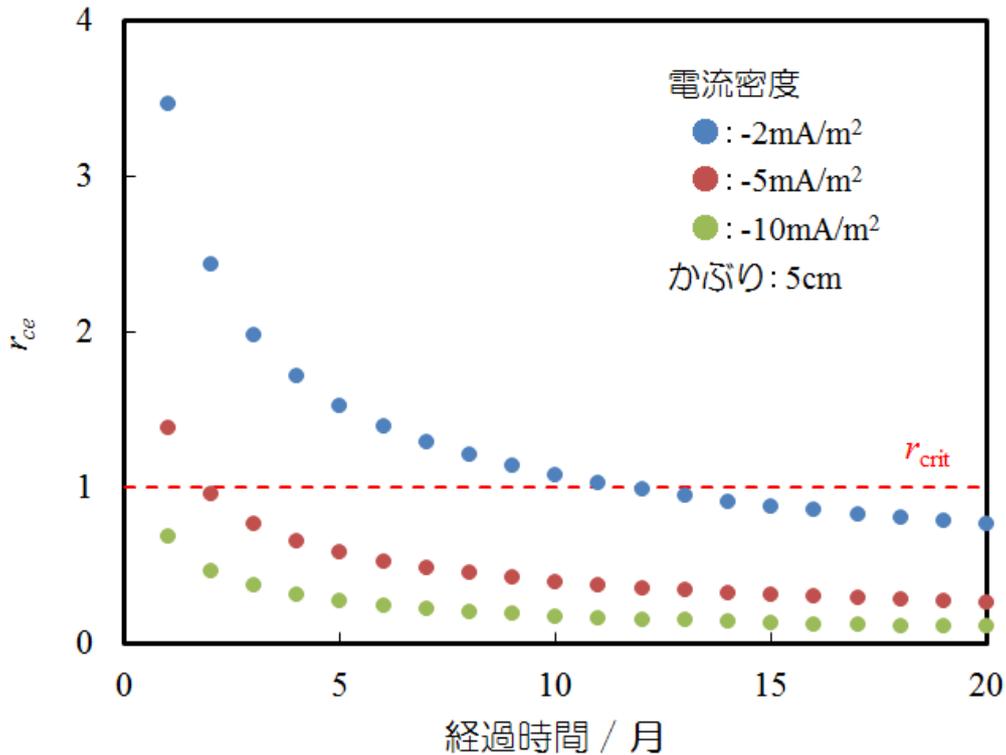


図-4.2.13 各種通電条件における  $r_{ce}$  の経時変化

コンクリート中において高電流密度での通電は困難であるが、物質の拡散速度が遅いので、小さい電流密度で生成した鉄筋表面の  $\text{OH}^-$  は蓄積しやすいという特性を持っている。本設計法に基づく小さい電流密度での通電は、鉄筋とコンクリート界面の付着に悪影響を及ぼすことなく鉄筋の腐食速度を低減し、鉄筋の不動態化後は断続通電での防食も可能と考えられることから、省エネルギー効果の高い防食法となる可能性がある。

#### (5) 新設計法の検証試験

電気防食適用下におけるコンクリート中鉄筋の復極量の経時変化を図-4.2.14 に示す。いずれの試験体も通電初期の復極量は、電気防食基準である  $100\text{mV}$  に到達しなかった。この原因は、通電前の鉄筋の自然電位が  $-500\text{mV vs.SSE}$  前後を示していたことから、鉄筋腐食が著しく進行し表面の  $\text{pH}$  も低下（中性化）していたことにより錆の還元により多くの防食電流が消費されたためと考えられる。しかしながら、時間の経過とともにいずれの試験体の復極量も増加していくのが確認された。復極量の増加速度は  $30\text{mA/m}^2$  で通電していた試験体のほうが速く、電気防食基準を約 16 日で満足した。一方、 $10\text{mA/m}^2$  で通電していた試験体は非常に緩やかに増加し、 $100\text{mV}$  に到達するまでに約 90 日を要した。

通電オフ 24 時間後のコンクリート中鉄筋の自然電位の経時変化を図-4.2.15 に示す。30mA/m<sup>2</sup>で通電した試験体は、時間の経過とともに電位が貴化する傾向が見られた。これは電気防食によって鉄筋近傍の pH が上昇し、鉄筋表面が再不働態化することによって生じた現象であり、電気防食による環境改善効果を裏付けるデータである。10mA/m<sup>2</sup>で通電した試験体は、通電初期は目立った電位の貴化は認められなかったが、50 日頃から電位の貴化が認められるようになった。また、復極量は自然電位の貴化とともに増加する傾向を示していることから、所定の復極量が得られない場合でも、経時的な自然電位の貴化が認められれば、いずれは電気防食基準を満足するものと考えられる。

表-4.2.4 の条件下で解析した電流密度と  $t_a(r_{cc}<1)$  に達するまでにかかった日数の関係を図-4.2.16 に示す。いずれの試験体においても、解析結果よりも実測値の  $t_a$  のほうがやや大きい傾向を示すものの、概ね整合しているといえる。今後は、試験体の数量を増やして検証試験を実施し、データのばらつき等の確認が必要である。

本設計手法は、鉄筋腐食が生じているコンクリート試験体に対して有用であると考えられる。実構造物に適用する場合には、電流分布の不均一などが問題となることが予想される。実用化のためには、更なるデータの蓄積が必要である。

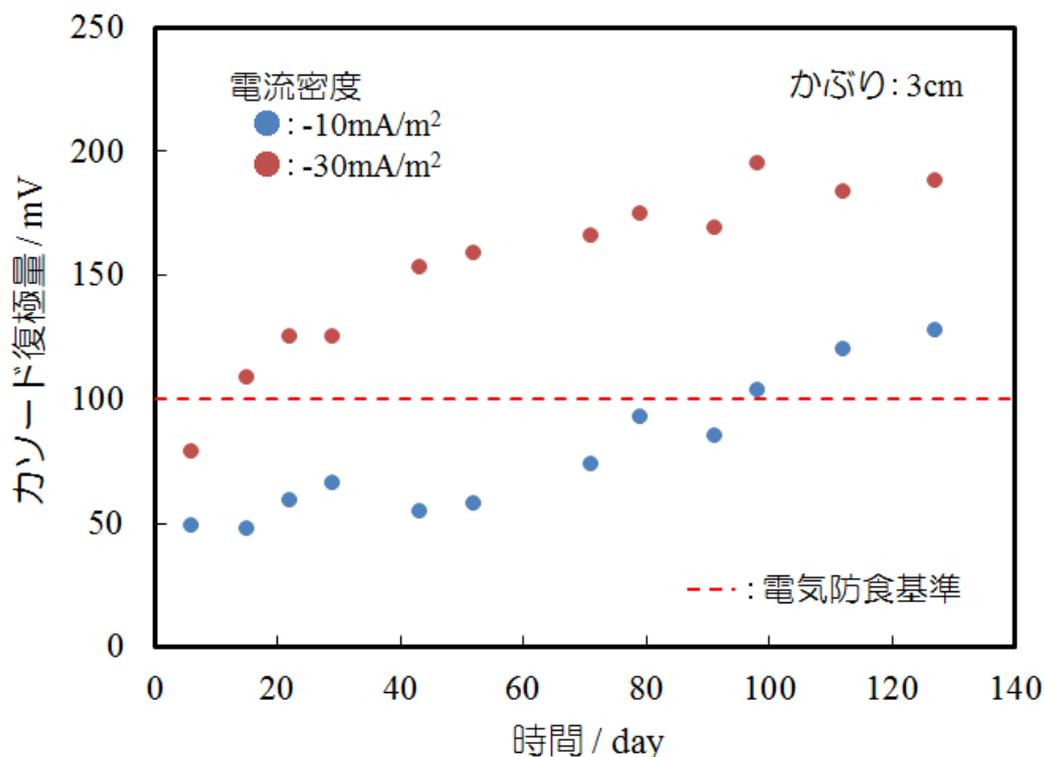


図-4.2.14 通電オフ 24 時間後のカソード復極量の経時変化 (検証試験)

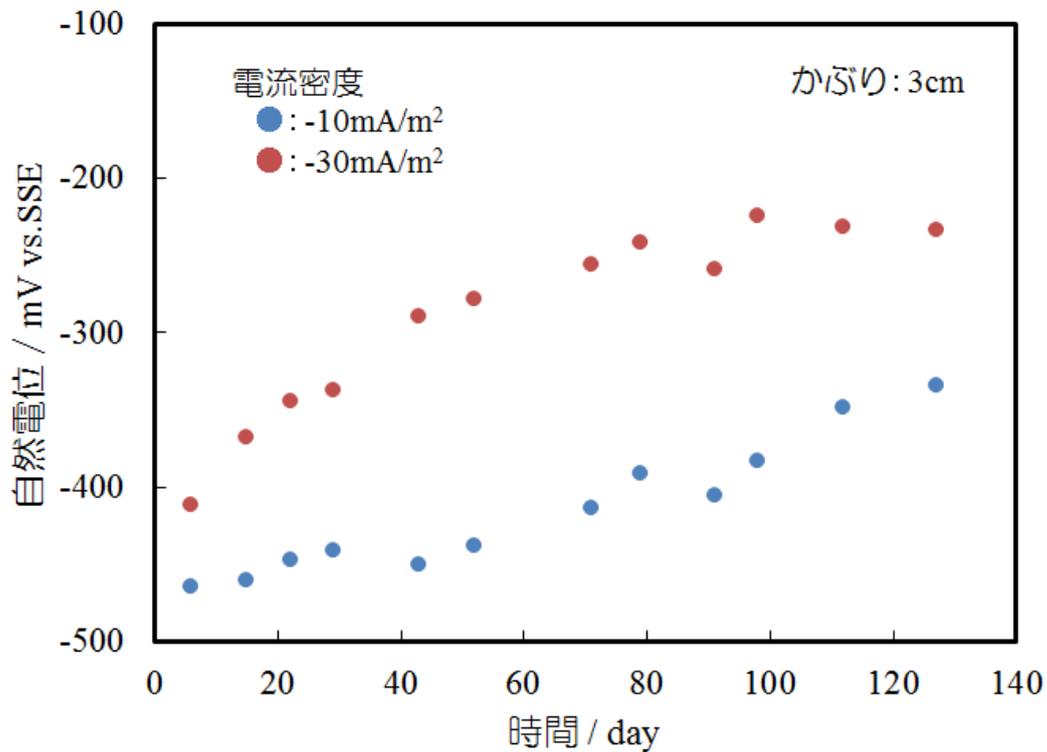


図-4.2.15 通電オフ 24 時間後の鉄筋自然電位の経時変化 (検証試験)

表-4.2.4 解析条件

<p>【試験体条件】</p> <p>コンクリートかぶり: 3cm  初期 Cl<sup>-</sup> 濃度: 10kg/m<sup>3</sup>  <math>D_{Cl^-} = 1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}</math></p>
<p>【電気防食条件】</p> <p><math>i = -10, -30 \text{mA}/\text{cm}^2</math>  <math>\rho = 18500 \Omega \cdot \text{cm}</math>  <math>E = i\rho\delta</math>  <math>D_{OH^-} = 3.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}</math>  <math>d = 0.05 \text{cm}</math>  初期 OH<sup>-</sup> 濃度  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 鉄筋位置: <math>1.0 \times 10^{-7} \text{M}</math></li> <li>• 鉄筋位置以外: <math>1.0 \times 10^{-2} \text{M}</math></li> </ul> <math>T = 298 \text{K}</math></p>

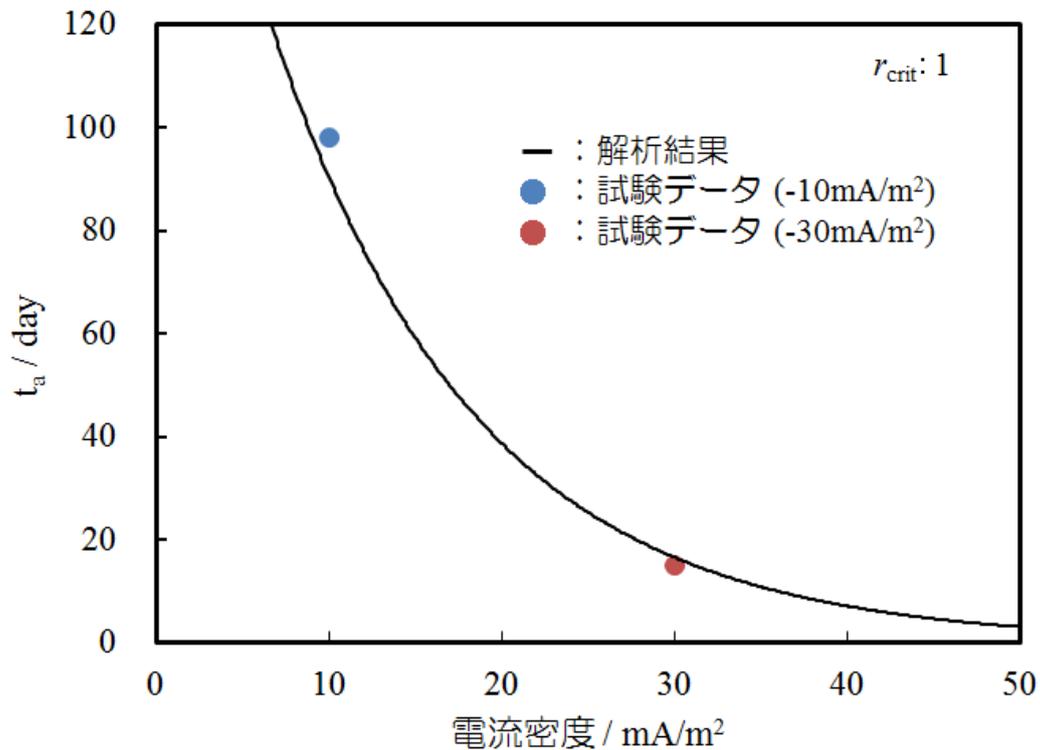


図-4.2.16 試験データと解析結果の比較

#### 4.2.5 まとめ

本試験によって得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリート中鉄筋に電気防食を適用した場合，鉄筋表面では経時的に塩化物イオン濃度の減少および pH の上昇が生じるが，とりわけ pH の上昇が顕著に現れることが分かった。
- 2) コンクリート中鉄筋に対する電気防食設計法として，鉄筋表面の Cl<sup>-</sup>と OH<sup>-</sup>の濃度比 ( $r_{ce}$ ) がしきい値 ( $r_{crit}$ ) 以下になるまでの期間 ( $t_a$ ) を評価して通電電流密度を決定する考え方は，新しい設計手法となる可能性を有する。
- 3) 鉄筋腐食が生じているコンクリート試験体を用い，考案した設計法の検証試験を実施した。解析により推定した  $t_a$  よりも実測値は若干大きい値を示したが，概ね整合しており，本設計法の妥当性を確認できた。
- 4) 本設計法は， $r_{crit}$  値の設定や実構造物に対しての検証試験などさらに検討すべき課題は多いが，コンクリートという特性を有効利用した省エネルギー効果の高い防食法となる可能性があることが明らかとなった。

#### 4.2.6 参考文献

- 1) 宇野祐一，魚本健人，元売正美，松田敏，各種要因が補修後の再劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，p.p.1559-1156，JCI，(2003)
- 2) David K Phillips, Proc. Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks, p.5, NACE (1985).
- 3) (社)土木学会，コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法設計施工指針(案)，p.p.67-68，(2001)
- 4) 布田仁美，松田芳範，篠田吉央，コンクリート鉄道橋における電気防食効果の経時変化について，第56回材料と環境討論会講演予稿集，p.111，(社)腐食防食協会，(2009)
- 5) 布田仁美，篠田吉央，松田芳範，栗林健一，小林真也，アルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の鉄道橋への適用試験，第57回材料と環境討論会講演予稿集，p.402，(社)腐食防食協会，(2010)
- 6) A.M.Hassanein, G.K.Glass and N.R.Buenfeld, *Corrosion*, 55, 9 (1999).
- 7) 大畑公嗣，杉山隆文，辻幸和，Supratic Gupta，コンクリート中の電気伝導現象における塩化物イオンの役割，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，p.p.511-516，JCI，(2001)
- 8) G.K.Glass, J.Z.Zhang and R.N.Buenfeld, *Corrosion*, 51,9 (1995).
- 9) G.K.Glass and J.R.Chadwick, *Corrosion Science*, 36, 12 (1994).
- 10) D.A.Hausmann, *Mater.Protection*, 6, 11 (1967).
- 11) Lianfang Li and A.Sagues, CORROSION/2000, No.801, NACE (2000).
- 12) 若林徹，小玉俊明，望月紀保，被覆欠陥を有する防食体の電位降下に関する伝送線モデルによる解析，材料と環境 2011 講演予稿集，p.102，(社)腐食防食協会，(2011)
- 13) 雨宮佑太，福手勤，望月紀保，コンクリート中鉄筋の電気防食効果評価基準に対する考察，材料と環境 2008 講演予稿集，p.111，(社)腐食防食協会，(2008)

### 4.3 湿潤環境下における電気防食基準

#### 4.3.1 はじめに

港湾施設は、我が国の経済活動を支える社会資本として重要な役割を担っているが、現存の港湾施設の中には高度経済成長期に築造されたものも多く、近年、これらの栈橋の上部工において塩害劣化が顕著となっている。塩害はコンクリート中の鉄筋が腐食することにより、かぶりコンクリートにひび割れが生じ、ひいては部材の耐力低下を引き起こす現象である。この塩害に対し、電気防食は優れた防食効果を発揮する。コンクリート構造物に対する電気防食は、日本国内では主に道路橋への適用が多く、港湾構造物に対して適用されることは少なかった。しかし、近年では民間の栈橋においても採用されるようになってきている。

コンクリート構造物の電気防食基準として、100mV シフト基準が採用されている<sup>1)-2)</sup>。この基準は、通電オフ後の定常化した鉄筋自然電位と通電オフ直後の鉄筋電位（インスタントオフ電位）との差（カソード復極量）を100mV以上としているものである。道路橋においては問題となることはないが、常時濡れた状態となる栈橋下部工の干満部や結露しやすい栈橋内部のような湿潤環境において、100mV シフト基準を満たすことが難しいケースが報告されるようになってきた<sup>3)</sup>。このような場合、絶対値管理基準が適用されるが、そ

表-4.3.1 国内外の主な電気防食判定基準

判定基準	内 容
100mV シフト	鉄筋のインスタントオフ電位と通電オフ24時間後の自然電位との差が100mV以上となるように通電を行う。
100mV 分極 <sup>4)</sup>	鉄筋のインスタントオフ電位が自然電位から100mV以上分極するように通電を行う。
-850mV vs. CSE 以下 <sup>5)</sup>	鉄筋のインスタントオフ電位が-850mV vs. CSE (-780mV vs. Ag/AgCl[sw])以下まで分極するように通電を行う

※インスタントオフ電位：鉄筋－照合電極間の IR 降下分を除いた電位

の値として-850mV vs.CSE が用いられている。しかしながら，この電位までカソード分極させるためには大きな防食電流が必要であり，アノードの早期耐久性低下やアノード周辺の水分枯渇による整流器の浴電圧上昇など悪影響もたらしることが多い。これまでに湿潤環境下における電気防食基準に関して研究した例は少なく，電気防食システムの耐久性の確保と防食効果を適正に判定するための研究が必要とされている。

本節では，コンクリート試験体を用いた電気防食試験によって湿潤環境下における電気防食特性を把握し，100mV シフト基準に替わる電気防食基準について検討を行ったものである。

#### 4.3.2 試験方法

##### (1) アルカリ環境下における鋼材の再不動態化電位 ( $E_R$ ) 測定

塩化物イオンを含むアルカリ環境下における鋼材の防食条件を検討するため，再不動態化電位 ( $E_R$ ) 測定を実施した。テストピースには SS400 (JIS G 3101) (供試面  $9.5\text{cm}^2$ ) を用いた。テストピース表面をエメリー紙 (#800) を用いて研磨し，アセトン脱脂をして  $E_R$  測定に供試した。 $E_R$  測定システムは図-4.3.1 に示すようにテストピース，対極，照合電極 (sat.KCl Ag/AgCl 電極，SSE)，電解セル，自動分極装置 (北斗電工製 HZ3000) によって構成され

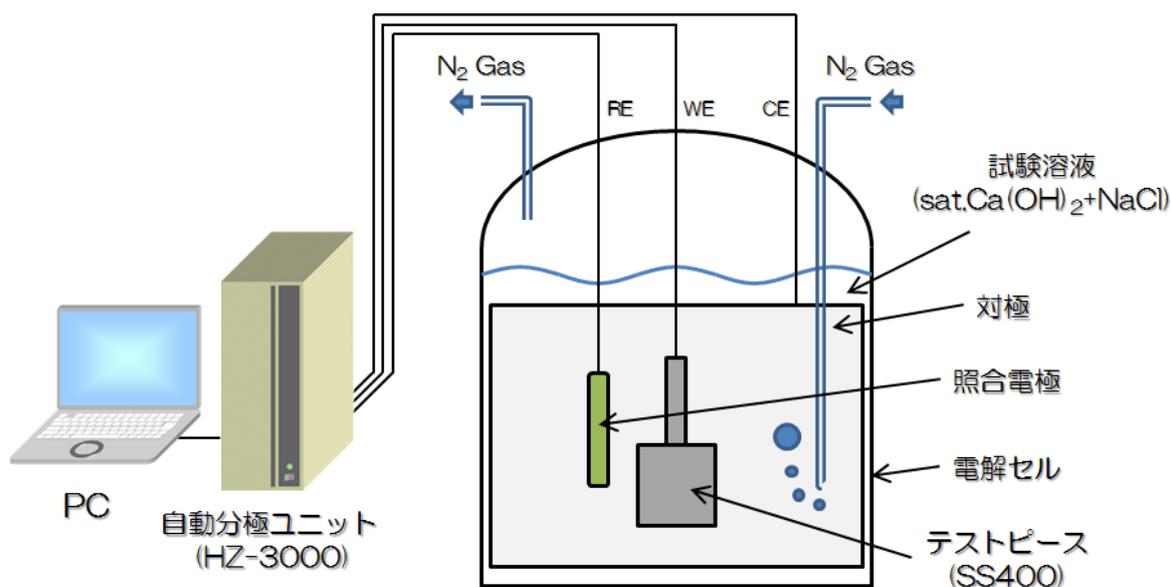


図-4.3.1  $E_R$  測定システムの詳細図

ている．試験溶液には  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の飽和水溶液を用い，塩化物イオン濃度 ( $[\text{Cl}^-]$ ) が 300, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 50000ppm となるよう NaCl を添加して調整した．

$E_R$  測定方法の模式図を図-4.3.2 に示す． $E_R$  測定は JIS G 0592 を参考にし，時間の短縮を図るために再不動態化過程における卑電位方向（カソード方向）への掃引方法を 10mV/min の動電位とした． $E_R$  の測定手順であるが，はじめに前処理をしたテストピースを試験溶液の入った電解セル中に設置し， $\text{N}_2$  ガスを用いて脱気処理を行った．続いて， $\text{N}_2$  ガスを通気したまま 30mV/min でテストピースの電位を貴電位方向（アノード方向）に掃引し，孔食発生後  $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$  で 2 時間保持することにより孔食を成長させた．その後 10mV/min でテストピースの電位をカソード方向に掃引し，電解電流がゼロ到達時の電位を  $E_R$  とした．

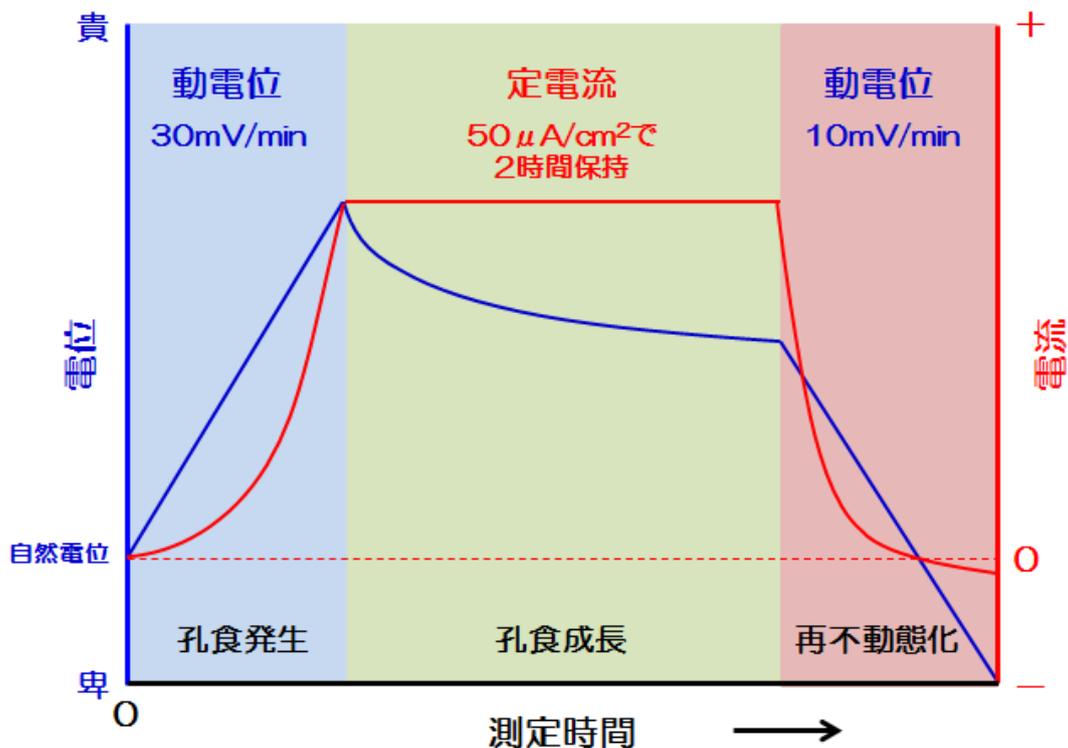


図-4.3.2  $E_R$  測定の模式図

## (2) コンクリート試験体の詳細

コンクリート試験体の配合を表-4.3.2 に示す．セメントには普通ポルトランドセメント，細骨材には川砂，粗骨材には川砂利を用い，これらを練り混ぜ水（水道水）で混合し，所定の型枠に流し込んだ．塩害環境を模擬するため，練り混ぜ水に  $5\text{kg}/\text{m}^3$  (as  $[\text{Cl}^-]$ ) の NaCl を添加した．また，混和剤として，AE 減水剤および AE 剤を用いた．水セメント比 (W/C)

は 0.55 とし，目標スランプは  $8\pm 1\text{cm}$ ，目標空気量は  $4\pm 1\%$  とした．打設後 1 日で脱型を行い，約 30 日間の湿潤養生を行った後，電気防食試験に供試した．

コンクリート試験体の形状を図-4.3.3 に示す．コンクリート試験体は  $200\times 100\times 100\text{ mm}$  の角柱状であり，かぶり 30mm の位置に鉄筋 ( $\phi 13\text{mm}$ ) を埋設したものをを用いた．また，定電位通電を行うためのアノード（リボンメッシュ電極）をかぶり 2cm の位置に，照合電極（SSE）を鉄筋の近傍に設置した．海水に接する面を上面（打設面）のみとし，周囲 5 面をエポキシ樹脂で被覆した．

コンクリート試験体は 12 体を同時に作製し，6 体（飛沫暴露試験体）を飛沫環境，6 体（湿潤暴露試験体）を湿潤環境に曝露した．

表-4.3.2 コンクリート試験体の配合

W/C	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
	W	C	S	G
0.55	166	302	826	1056

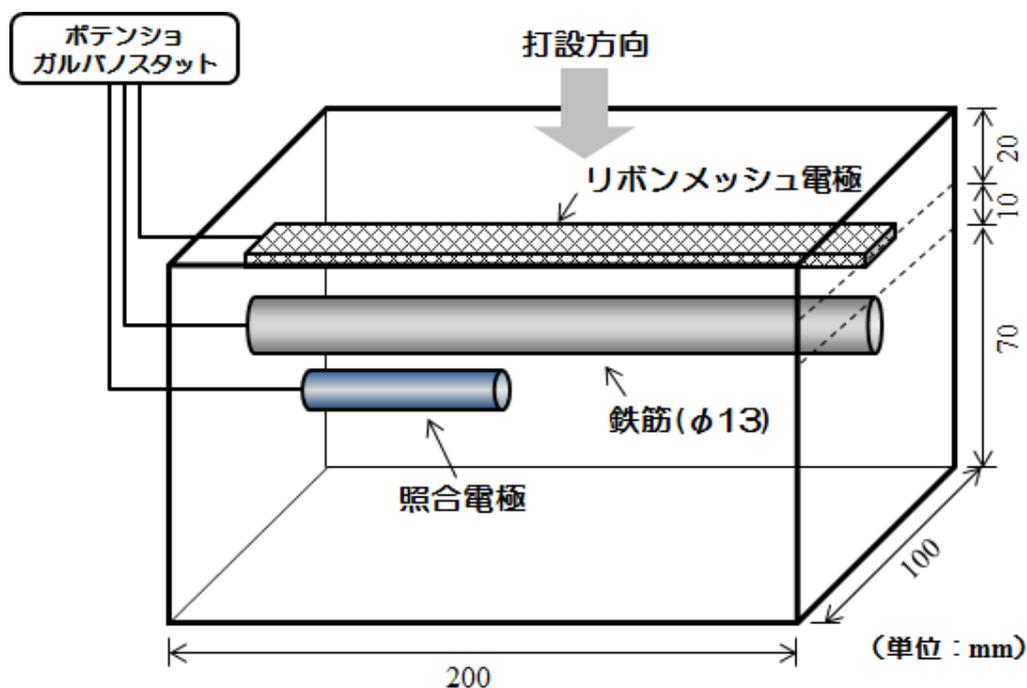


図-4.3.3 コンクリート試験体の詳細図

### (3) 電気防食試験

コンクリート試験体の電気防食特性を把握するため、定電位通電試験を実施した。電源にはポテンショ・ガルバナスタット（北斗電工製 HA-151）を用い、内部の照合電極によって所定の電位に制御した。また、鉄筋－照合電極間の IR 降下の補正は、インスタントオフ電位差計（ナカボーテック製）を用いて行い、定期的に計測してポテンショ・ガルバナスタットの制御電位を調整した。 $E_R$ 測定結果を考慮し、設定電位を表-4.3.3に示す-400, -500, -550, -600, -650, -725 mV vs.SSE の 6 条件とした。試験体の供試数は各条件 1 体ずつとした。

コンクリート試験体は、(独)港湾空港技術研究所内の海水噴霧場と屋外循環水槽に暴露した。海水噴霧場は飛沫帯を模擬しており、図-4.3.4に示すように海水噴霧⇒乾燥が 1 日に 2 回繰り返される環境である（写真-4.3.1）。一方の屋外循環水槽は、干満帯を模擬しており、図-4.3.4に示すように 1 日に 2 回干満（潮位差 1.5m）が繰り返される環境であり、干潮位+1.0m の位置に試験体を設置した。海水浸漬時間が約 5 時間と屋外乾燥時間が約 7 時間の繰り返し環境となる（写真-4.3.2）。いずれの施設も、海水には久里浜湾（神奈川県横須賀市）の海水を使用している。

表-4.3.3 試験条件

設定電位 (mV)	試験体数		試験体合計
	飛沫環境	湿潤環境	
-400mV	1 体	1 体	6 体 × 2 環境 = 12 体
-500 mV	1 体	1 体	
-550 mV	1 体	1 体	
-600 mV	1 体	1 体	
-650 mV	1 体	1 体	
-725 mV	1 体	1 体	

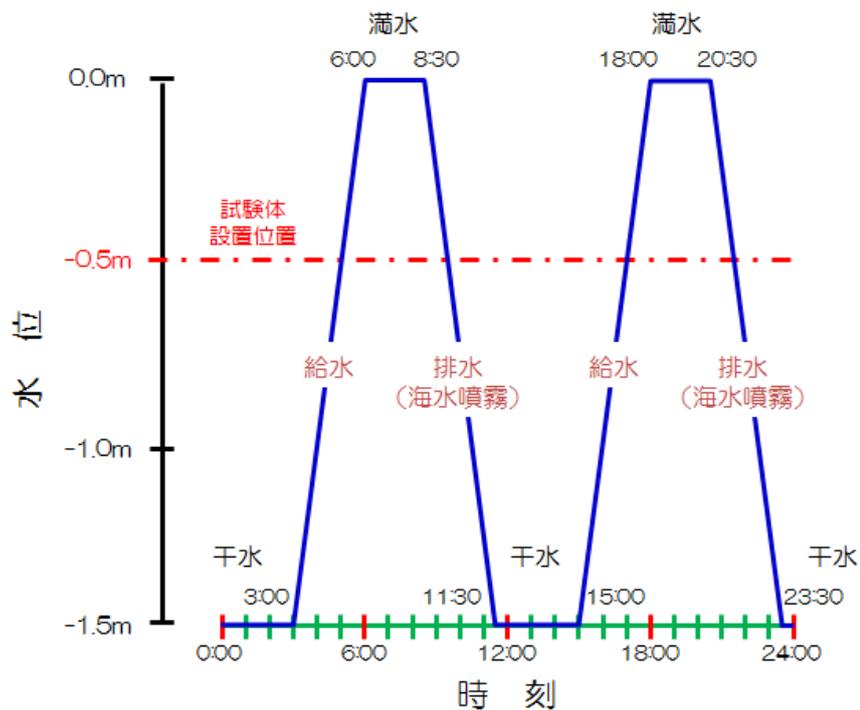


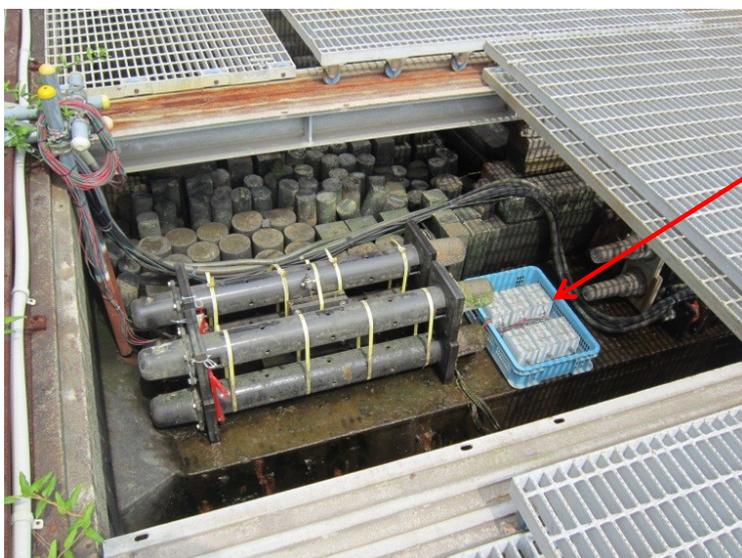
図-4.3.4 循環水槽の干満サイクルと海水噴霧場の噴霧サイクル

鉄筋を腐食状態とするため、電気防食適用前に  $92\mu\text{A}/\text{cm}^2$  で 9 日間のアノード電解通電を行った。電解条件は既往の研究を参考にした<sup>7)-8)</sup>。通電終了後、鉄筋の自然電位測定、AC インピーダンス測定 (3 電極法, 振幅 $\pm 20\text{mV}$ , 測定周波数:  $10\text{k}\sim 10\text{mHz}$ )、分極曲線測定を行い、1 日放置後に所定の電位で定電位通電を開始した。通電期間中は、データロガーを用いて維持電流 (定電位通電時に計測される電流) を 1 時間インターバルでモニタリングした。また、定期的に 24 時間のカソード復極量測定、AC インピーダンス測定 (振幅 $\pm 20\text{mV}$ ,  $10\text{m}\sim 1\text{kHz}$ )、分極曲線測定を実施した。

飛沫環境試験体  
(6体)



写真-4.3.1 (独)港湾空港技術研究所の海水噴霧場  
(赤い矢印の部分が試験体)



湿潤環境試験体  
(6体)

写真-4.3.2 (独)港湾空港技術研究所の屋外循環水槽  
(赤い矢印の部分が試験体)

### 4.3.3 試験結果および考察

#### (1) アルカリ環境下における鋼材の $E_R$

アルカリ環境下で測定した鋼材の  $E_R$  測定結果を図-4.3.5 に示す。

[Cl<sup>-</sup>]が 300ppm 未満の条件については、アノード方向掃引時、 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近の低電流密度領域において、鋼材表面の不動態化による電位の上昇が認められた。この領域において、プロットに大きなばらつきが生じているが、これは鋼材表面における不動態被膜の形成と破壊に起因するものと考えられる。さらに掃引を継続すると、600mV 付近より緩やかな電流の増加が確認された。これは、酸素の発生反応 ( $2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H} + 4\text{e}^-$ ) が生じたことによるものである。測定後の目視観察では、テストピース表面に腐食痕は見られなかった。

[Cl<sup>-</sup>]が 500ppm の条件については、活性溶解（電位の変化に対し、電流密度の変化の方が大きい状態）した後に、 $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近に不動態維持電流が確認された。測定した 2 つのテストピースのうちの一つは、700mV 付近で酸素発生反応に基づく変曲点が見られ、緩やかに電流が増加した。測定後の目視観察では、テストピース表面に腐食痕は見られなかった。しかしながら、もう一方のテストピースは、不動態維持電流を示した後、500mV 付近で変曲点が見られ、電流の増加が確認された。この変曲点は孔食電位であり、腐食の発生を現している。よって、その後の電流増加は、腐食の進行によるものである。測定後の目視観察では、テストピース表面に孔食の発生が確認された。[Cl<sup>-</sup>]が 500ppm の条件においては、同じ条件であっても、腐食するものと腐食しないものが生じた。結果がばらつくため安全サイドから評価し、本条件は腐食ありと判定した。

[Cl<sup>-</sup>]が 1000ppm 以上の条件については、いずれのテストピースにおいても孔食電位が現れており、その電位は [Cl<sup>-</sup>]の増加とともに低下する傾向を示した。測定後の目視観察では、すべてのテストピースにおいて、表面に孔食の発生が確認された。

[Cl<sup>-</sup>]と  $E_R$  の関係を図-4.3.6 に示す。アルカリ環境下で測定した鋼材の  $E_R$  は、試料間のばらつきがあり、その範囲は 120mV 程度であった。また、本試験では、[Cl<sup>-</sup>]が 300～50000ppm までの広範囲において測定しているが、明瞭な [Cl<sup>-</sup>]依存性は認められず、概ね -500～-650mV の範囲に位置している。よって、電気防食によりこの下限値よりも低電位に鋼材電位を維持した場合、将来的にかぶりコンクリートの [Cl<sup>-</sup>]が増加しても腐食を抑制できると考えられる。試験結果を安全側に評価し、-650mV を新しい防食基準値とした場合、ISO<sup>9)</sup> や ASTM<sup>10)</sup>における評価基準値 (-720mV, Ag/AgCl/0.5MKCl=55mV) に近い値となる。

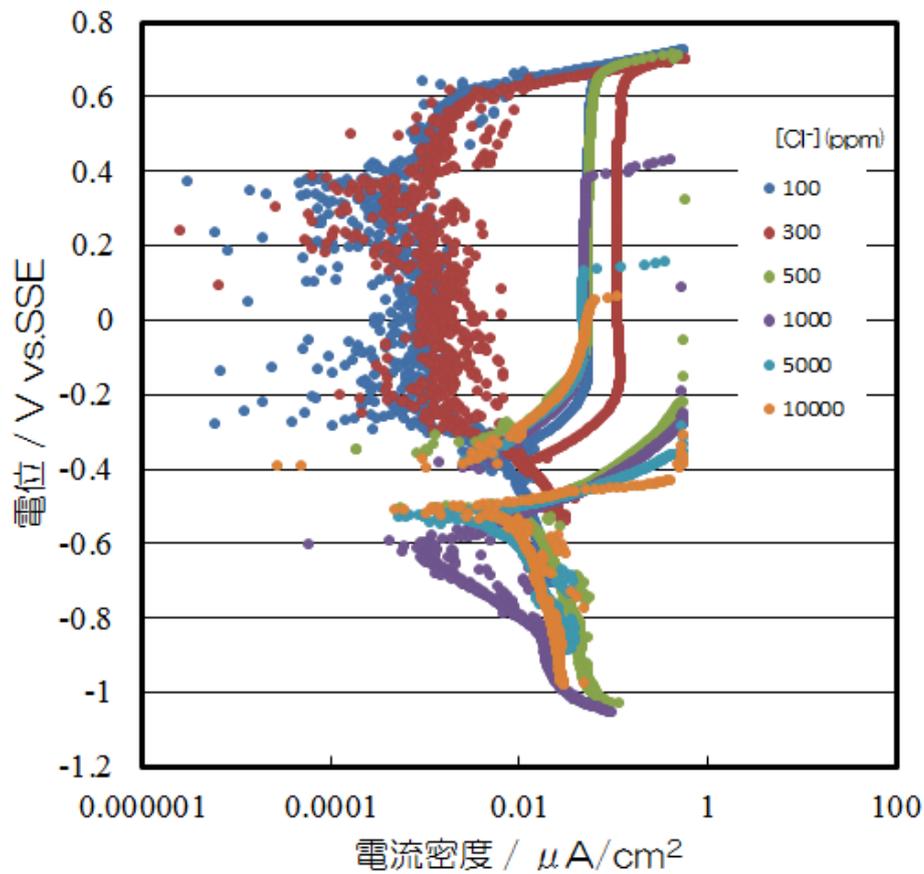


図-4.3.5  $E_R$  測定時の電位-電流曲線

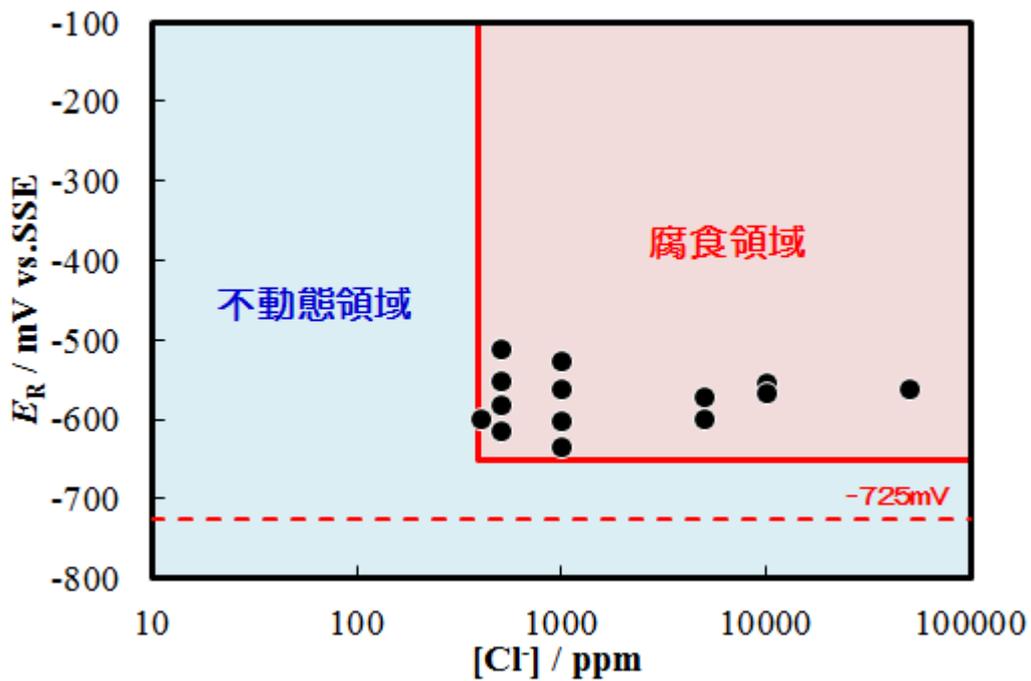


図-4.3.6  $[\text{Cl}^-]$  と  $E_R$  の関係

## (2) 飛沫・湿潤環境下におけるコンクリート中鉄筋の電気防食特性

### 1) 飛沫環境下の電気防食特性

#### ①維持電流密度の経時変化

鉄筋を各設定電位に保持したときの維持電流密度の経時変化を図-4.3.7 に示す。なお、アノード電流とカソード電流を区別するため、カソード電流をマイナスで表示した。

設定電位-400mV では、通电直後からアノード電流が確認された。通电初期は  $8\mu\text{A}/\text{cm}^2$  程度のアノード電流を示し、時間の経過とともにアノード電流は減少傾向を示すものの、カソード電流に転じることはなかった。平均値は  $3.18\mu\text{A}/\text{cm}^2$  であった。設定電位-500mV では、通电初期にアノード電流が確認されたが、30日経過した頃からカソード電流を示すようになり、若干の変動をしながらカソード電流は増加する傾向を示した。平均値は  $-2.33\mu\text{A}/\text{cm}^2$  であった。設定電位-550mV、-600mV、-650mV、-725mV では、通电直後からカソード電流が確認され、経時的に増加する傾向を示した。維持電流密度の平均値は、設定電位が低い条件であるほどマイナス側に大きな値を示す傾向にあり、設定電位-650mV と-725mV が他の条件に比べて大きい値を示した。設定電位-550mV で  $-8.54\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、-725mV で  $-9.06\mu\text{A}/\text{cm}^2$  であり、いずれの条件も一般的な防食電流密度 ( $2\sim 3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )<sup>11)</sup> に比べて 3~4 倍程度大きい値であった。

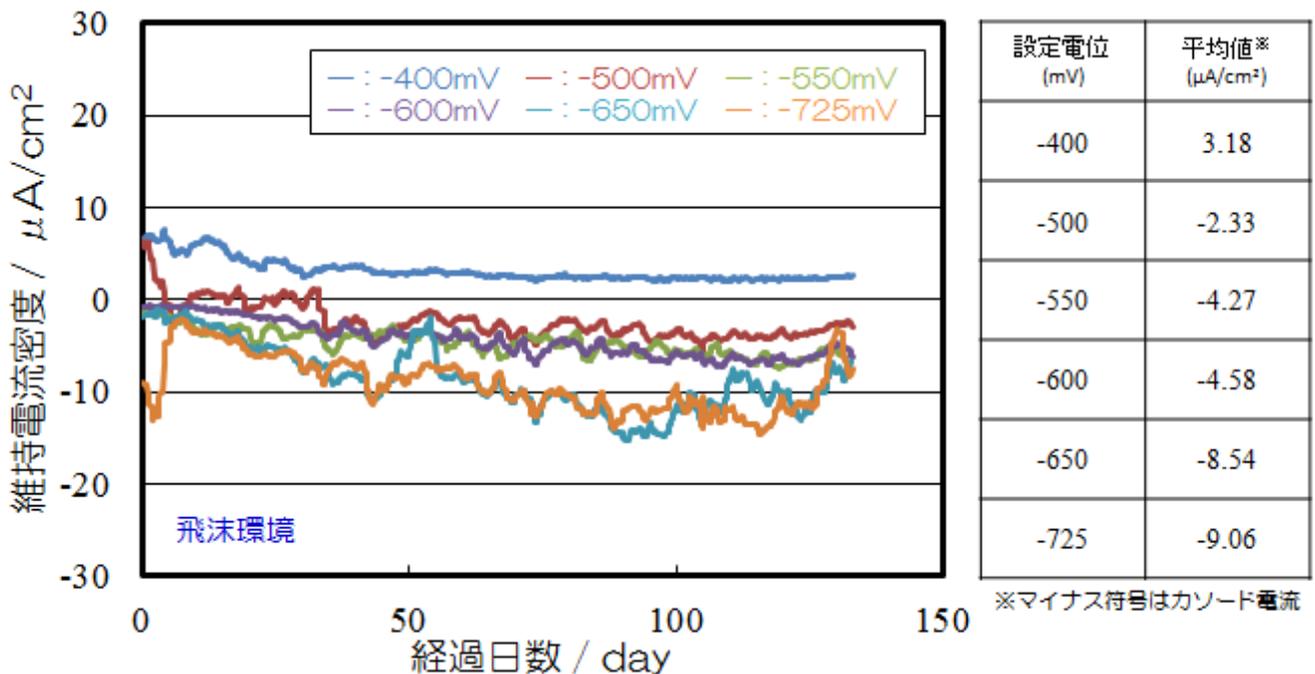


図-4.3.7 維持電流密度の経時変化(飛沫環境)

維持電流密度がカソード電流を示した条件については、いずれも経時的に維持電流密度が増加する傾向を示した。この変化は、気温や湿度の影響を受けていると推測される。ここで、月の平均気温と相対湿度の統計データを図-4.3.8<sup>12)</sup>に示す。図より、月の平均気温と相対湿度は、いずれも冬季が低く、夏季に高い値を示す傾向にあることがわかる。図-4.3.7のデータと見比べてみると、維持電流密度は、気温と相対湿度の上昇とともに増加する傾向が認められる。この原因として、カソード反応が気温の影響を受けること<sup>13)</sup>、コンクリート抵抗率が湿度の影響を受けること<sup>14)</sup>が考えられる。この現象を電位-電流ダイアグラムにおいて模式的に説明したのが図-4.3.9である。試験を開始した5月における鉄筋のアノード・カソード分極曲線をそれぞれ赤色と黒色で示す。極間抵抗（コンクリート抵抗）を考慮すると、この時に流れる電流は  $I_{a1}$  となる。この状態をもとに8月の場合を考えると、気温の上昇とともにカソード反応は促進されるため赤色のように変化する。また、湿度も上昇するため、コンクリート抵抗率は低下し、この時に流れる電流は  $I_{a2}$  となり、5月比べて増加することになる。維持電流密度は気象の変化による周期変動を繰り返しながら、年オーダーで長期的には減少していくものと考えられる。

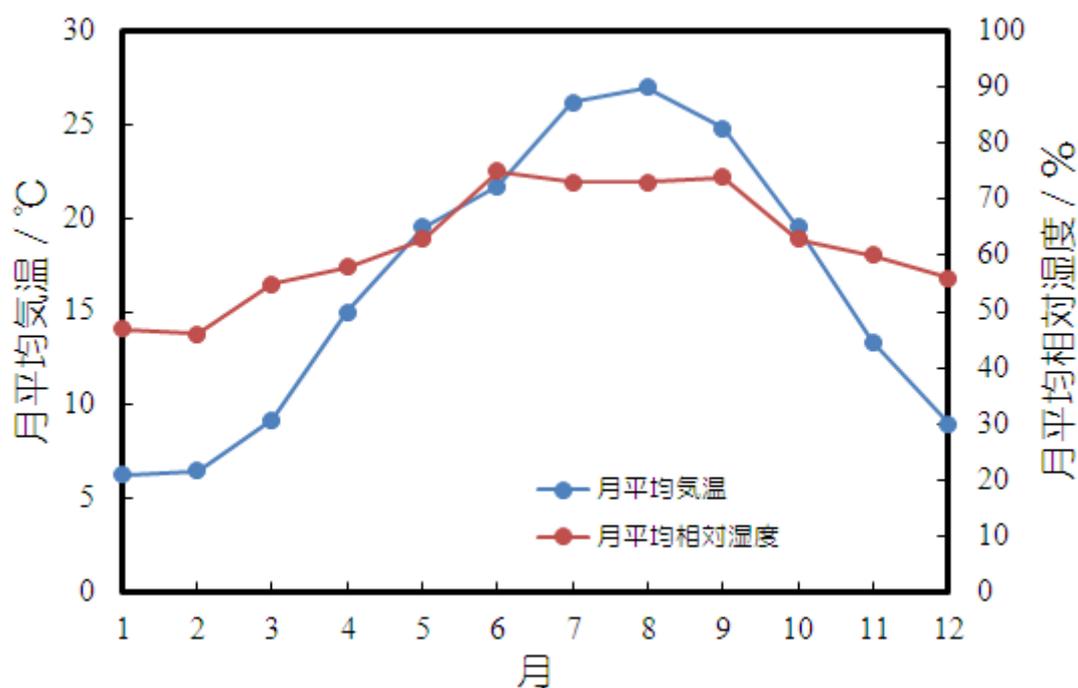


図-4.3.8 月平均気温と相対湿度の統計データ

設定電位-725mV においては、通電初期に非常に大きいカソード電流が確認されたが、これはアノード電解で鉄筋表面に生じた錆の還元反応（例えば(4.3.1)式）に多くの防食電流が消費されたためと考えられる<sup>15)-17)</sup>。

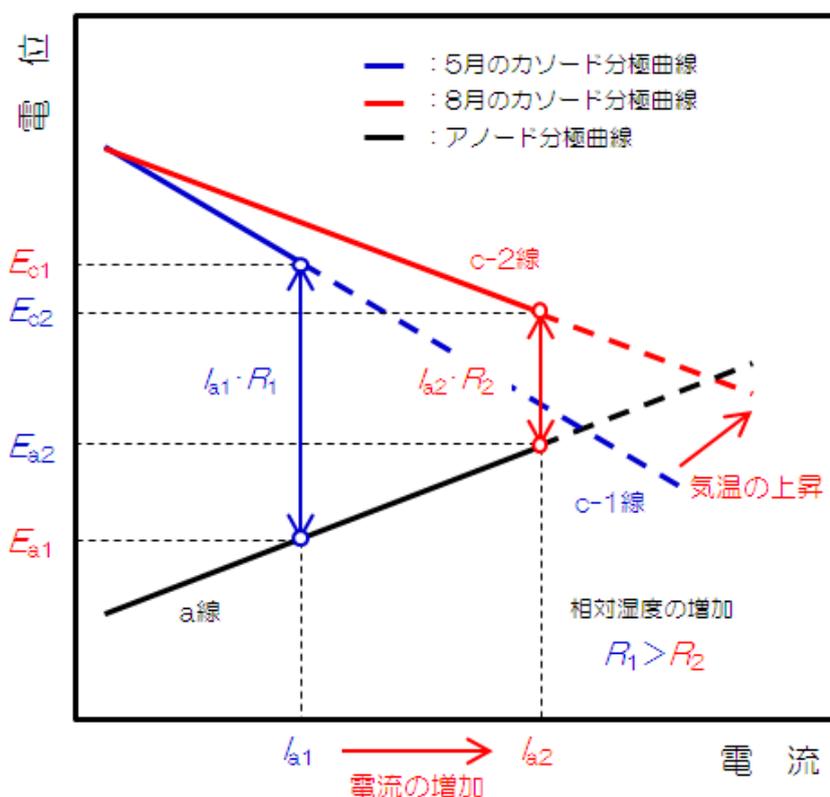
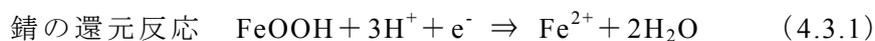


図-4.3.9 維持電流密度の変化を分極曲線により説明した模式図

## ②通電オフ24時間後のカソード復極量の経時変化

通電オフ24時間後のカソード復極量（通電オフ後の電位変化量）の経時変化を図-4.3.10に示す。設定電位-500mVでは、通電初期はアノード復極を生じていたが、30日を経過した頃からカソード復極をするようになった。カソード復極に転じた後のカソード復極量は20mV前後で推移し、通電終了時点で100mV基準値を上回ることはなかった。設定電位-550mVと-600mVでは、時間の経過とともにカソード復極量は増加する傾向を示したが、100mV基準値に到達するまでにはそれぞれ時間を要した。要した時間は設定電位-550mVで約140日、設定電位-600mVで約40日である。

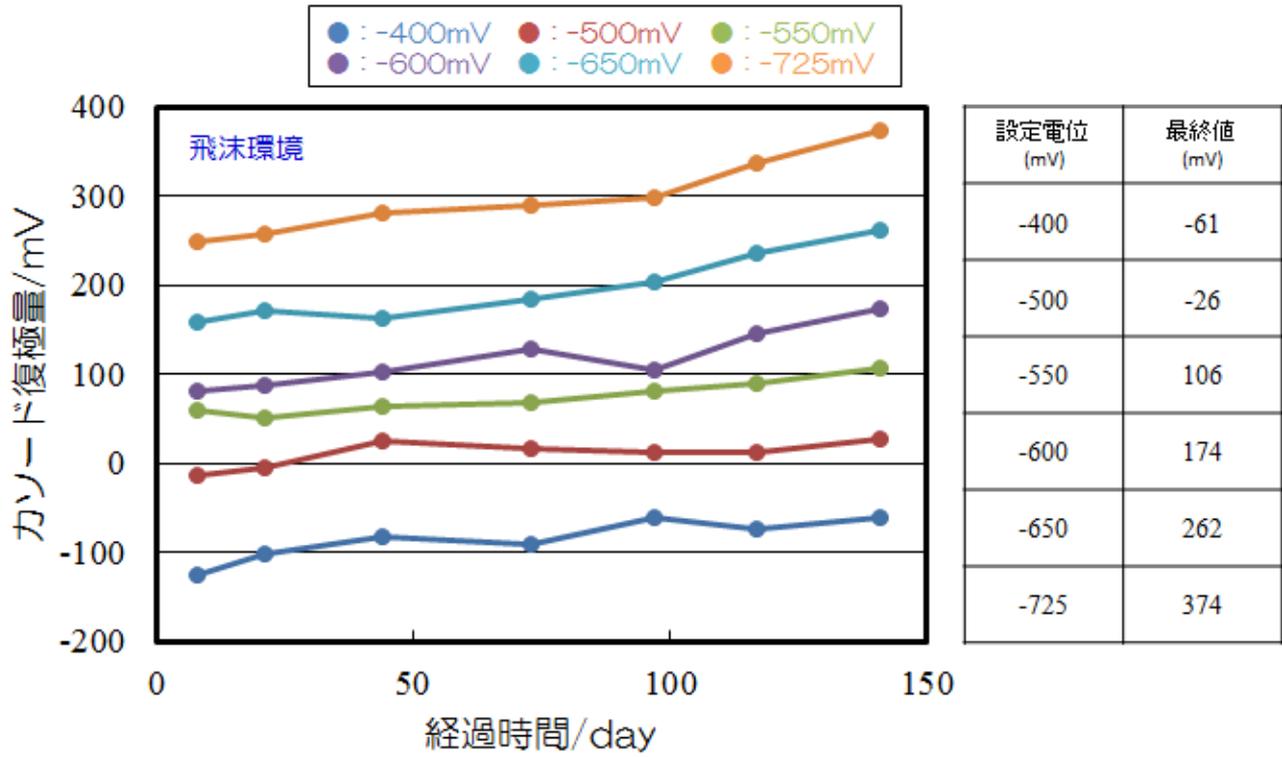


図-4.3.10 カソード復極量の経時変化（飛沫環境）

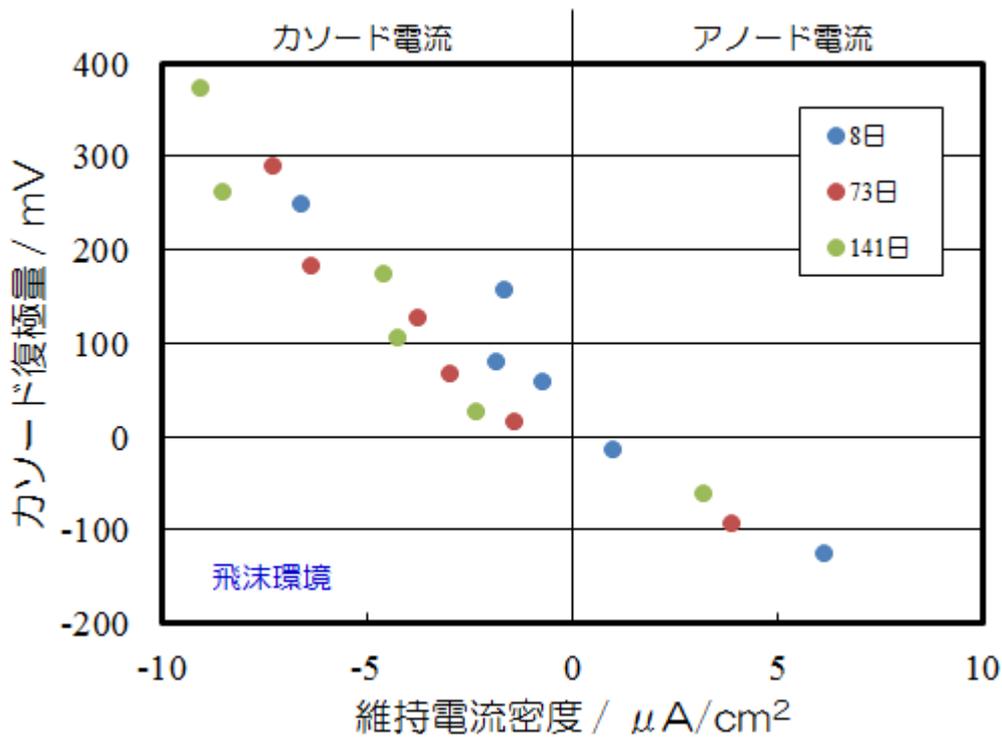


図-4.3.11 維持電流密度とカソード復極量の関係（飛沫環境）

設定電位 -650mV と -725mV は、通電初期から 100mV 以上のカソード復極量を示した。試験終了時のカソード復極量は、設定電位 -650mV で約 260mV、設定電位 -725mV で約 380mV であり、100mV シフト基準で判断すると、非常に高い防食状態にあるといえる。カソード復極量は、設定電位が低い条件ほど大きな値を示し、また、時間の経過とともに増加する傾向であった<sup>18)</sup>。

通電前の鉄筋の自然電位が -500mV 前後を示していたことから、本試験において 100mV 分極基準に相当する条件は設定電位 -600mV となる。しかしながら、本試験結果では、試験初期において 100mV 以上のカソード復極量が得られていない。100mV 分極基準は本来、分極量と復極量が等価であるという考え方に基づいているが、100mV 分極は必ずしも 100mV 復極とはならないので、本基準を適用する場合には、通電後の猶予時間（基準未達許容期間）を考慮するなどが必要である。

各設定電位における維持電流密度の平均値とカソード復極量の関係を図-4.3.11 に示す。維持電流密度とカソード復極量との間には負の直線関係 ( $r = -0.95$ ) があり、維持電流密度の低下とともにカソード復極量は低い値を示す傾向が認められる。100mV 以上のカソード復極量を得ようとする場合、最低でも  $-4 \sim -5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ( $40 \sim 50 \text{mA}/\text{m}^2$ ) 以上の防食電流密度が必要となることが示されている。一般的な防食電流密度 ( $20 \sim 30 \text{mA}/\text{cm}^2$ ) に比べると、錆層を有するコンクリート中の鉄筋を防食する場合、大きな電流が必要となる<sup>19)</sup>。

### ③通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位の経時変化

通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位の経時変化を図-4.3.12 に示す。通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位は、設定電位が高い条件ほど貴電位を示していた。また、自然電位は時間の経過とともに貴側に変化しており、既往の研究データ<sup>20)-22)</sup>と同様の傾向を示した。その変化は、設定電位が高い条件ほど顕著であり、設定電位 -650mV で約 100mV、設定電位 -725mV で約 120mV も通電前の自然電位に比べて貴電位を示した。この経時的な自然電位の貴化現象は、4.3.3 節 (1) で述べたように、鉄筋表面の pH 上昇によってもたらされた再不動態化によるものである。ASTM の自然電位判定<sup>23)</sup>では、いずれの条件も -230mV よりも卑であることから『90%以上の確率で腐食あり』と判定されるが、長期間通電することによって鉄筋の自然電位は経時的に貴化し、最終的には『90%以上の確率で腐食なし』の領域に到達するものと推定される<sup>24)</sup>。

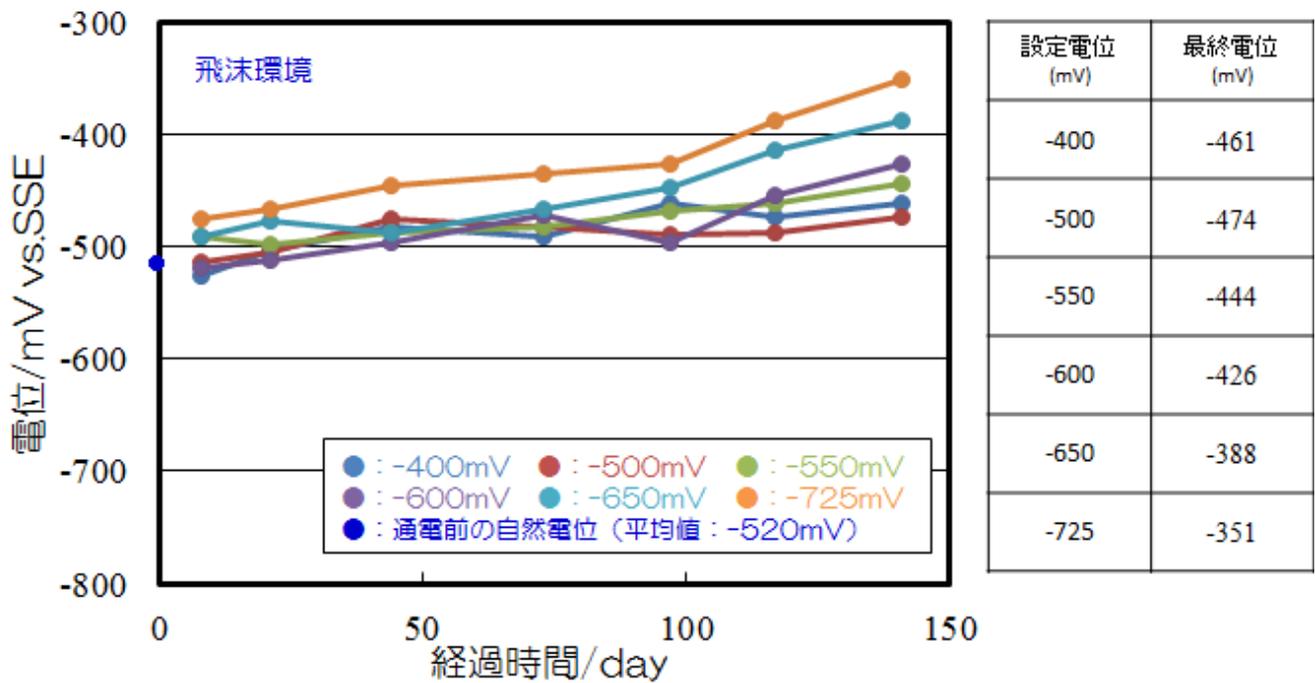


図-4.3.12 通電オフ 24 時間後の自然電位の経時変化（飛沫環境）

#### ④カソード復極量と腐食速度の関係

カソード復極量と腐食速度の関係を図-4.3.13 に示す。カソード復極量と腐食速度との間には負の直線関係が認められ、カソード復極量の増加とともに腐食速度は低下する傾向を示した。0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を腐食のしきい値<sup>25)</sup>とすると、腐食速度をこの値以下にするためには90～100mV以上のカソード復極量があればよいことになる。本試験結果は、これまで飛沫環境下で行ってきた100mVシフト基準による防食評価は妥当であることを示唆するものである。

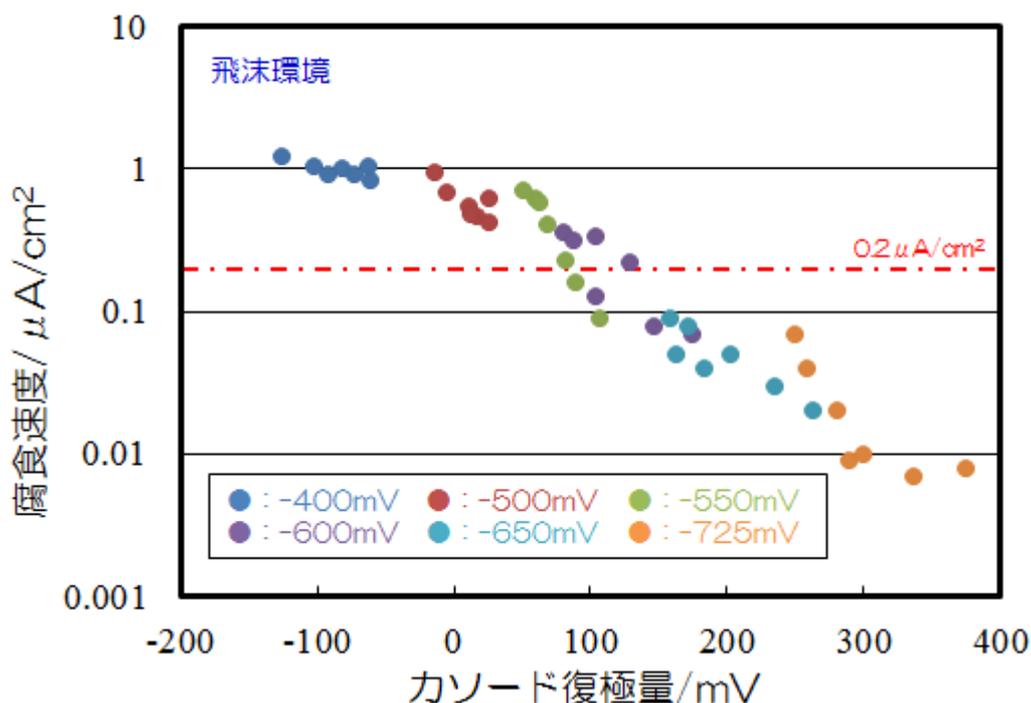


図-4.3.13 カソード復極量と腐食速度の関係（飛沫環境）

## 2) 湿潤環境下の電気防食特性

### ①維持電流密度の経時変化

維持電流密度の経時変化を図-4.3.14に示す。

設定電位-400mVは、通电直後からアノード電流が確認された。通电初期は $9\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度のアノード電流を示し、時間の経過とともにアノード電流は減少傾向を示すものの、カソード電流に転じることはなかった。平均値は $2.06\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。設定電位-500mVは、通电直後にアノード電流が確認されたが、経時的にアノード電流は減少し、20日経過頃からはカソード電流が確認されるようになった。カソード電流に転じた後の平均維持電流密度は $-1.40\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。設定電位-550mV、-600mV、-650mV、-725mVは、通电直後からカソード電流が確認され、経時的に増加する傾向を示した。平均維持電流密度は、設定電位が低い条件であるほど大きな値を示す傾向にあり、設定電位-725mVが他の条件に比べてとくに大きな値を示した。設定電位-550mVで $-2.49\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、-725mVで $-8.10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、設定電位-725mVにおいては一般的な防食電流密度（ $2\sim 3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ）に比べて3倍程度大きい値であった。

飛沫環境に比べると，維持電流密度の平均値は，各設定電位において-1～-2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度小さい傾向にある．これは，湿潤環境の方が溶存酸素の拡散速度が遅いためと考えられる．

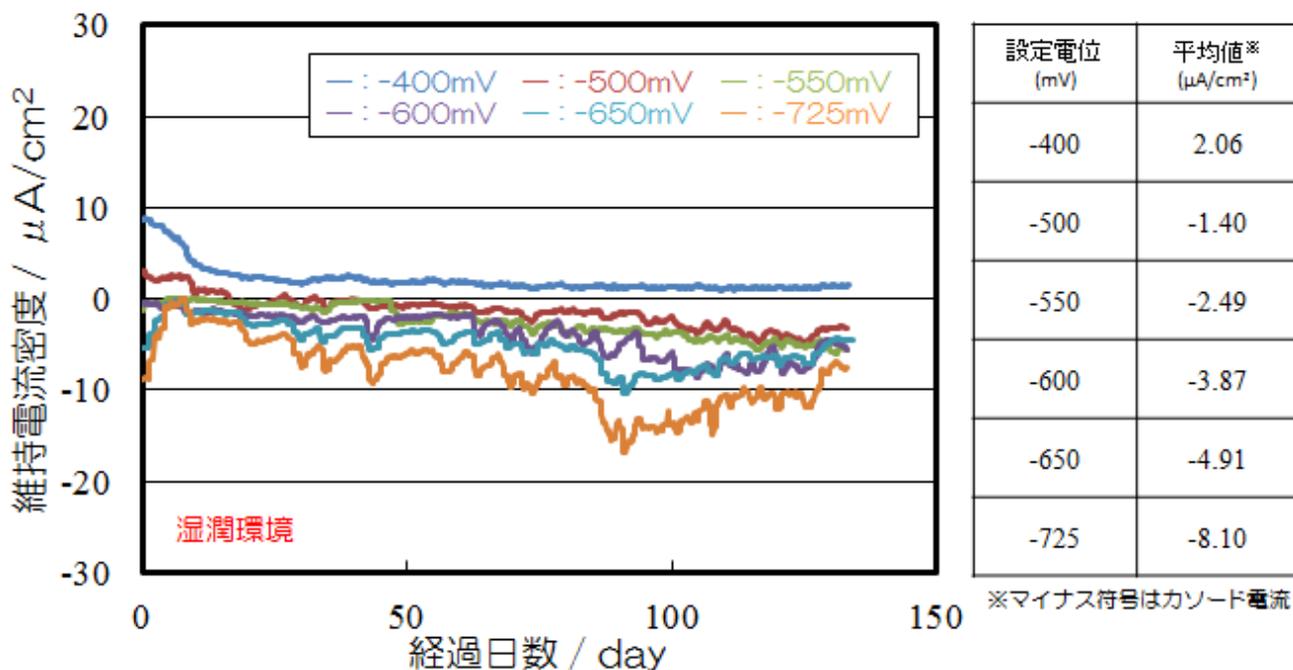


図-4.3.14 維持電流密度の経時変化（湿潤環境）

## ②通電オフ 24 時間後のカソード復極量の経時変化

通電オフ 24 時間後のカソード復極量の経時変化を図-4.3.15 に示す．

設定電位-400mV は，終始アノード復極を生じており，カソード復極に転じることはなかった．設定電位-500mV は，通電初期はアノード復極を生じていたが，20 日経過頃からカソード復極を生じるようになった．カソード復極量は経時的に増加する傾向を示したが，100mV 基準値には到達しなかった．設定電位-550mV は，通電開始からカソード復極量は増加する傾向を示したが，100mV 基準値に到達するまでに 100 日を要した．終始カソード復極量は増加を続け，試験終了時においては試験開始時に比べて約 100mV 増加していた．設定電位-600mV，-650mV，-725mV は，通電開始時より 100mV 基準値を満足していた．しかしながら，設定電位-600mV は経時的にカソード復極量は増加するものの，設定電位-650mV と-725mV は時間の経過とともに低下する傾向を示し，130 日経過時にはいずれも 100mV を下回っていた．

飛沫環境下では、いずれの設定電位においてもカソード復極量は経時的に増加する傾向を示していたため、 $-650\text{mV}$  よりも低い電位で保持したときのカソード復極量の経時的な低下は、湿潤環境特有の現象と考えられる。

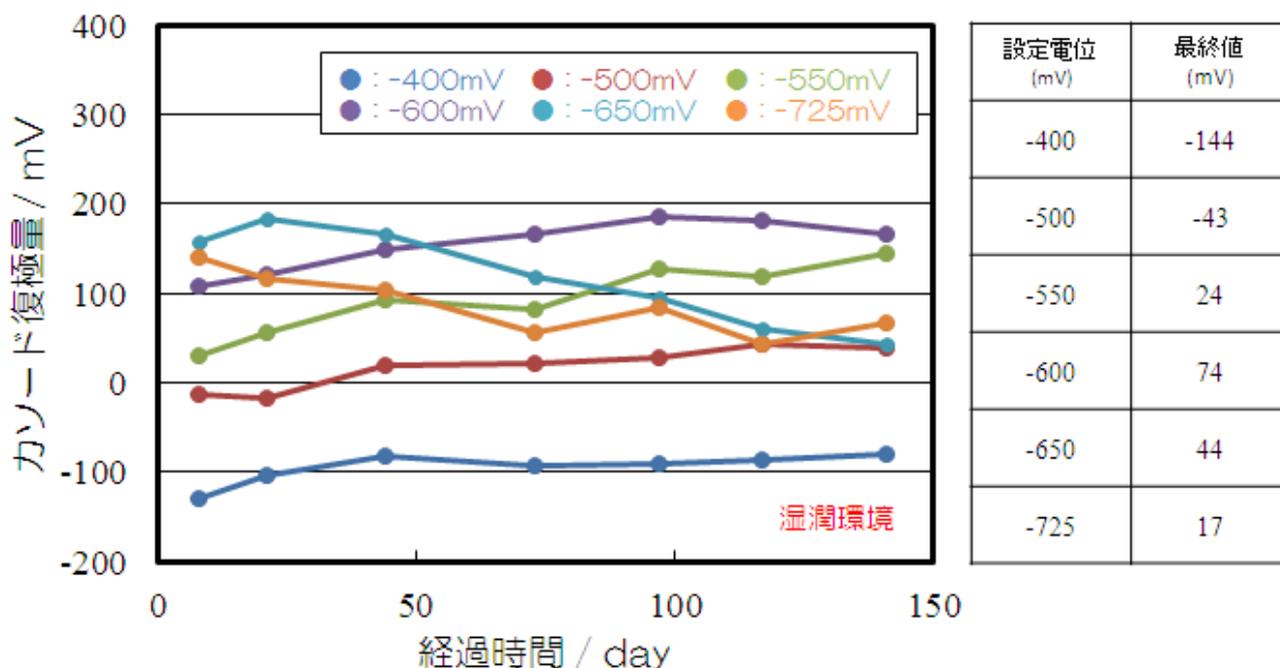


図-4.3.15 カソード復極量の経時変化（湿潤環境）

維持電流密度とカソード復極量の関係を図-4.3.16 に示す。

維持電流密度の減少とともに、カソード復極量は増加する傾向を示した。100mV 以上のカソード復極量を得るためには、 $3\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ( $30\text{mA}/\text{m}^2$ ) 以上の防食電流が必要となる。左下の2つのプロットは設定電位 $-650\text{mV}$ と $-725\text{mV}$ であり、カソード電流を増加しても所定のカソード復極量が得られていない。コンクリート構造物の電気防食において、近年、防食電流を増加してもカソード復極量が得られないのは、まさにこの状態である。安易に防食電流を増加すると、アノードの耐久性低下だけでなくアノード周囲の pH が低下し、埋戻しモルタルの劣化を促進することになる。

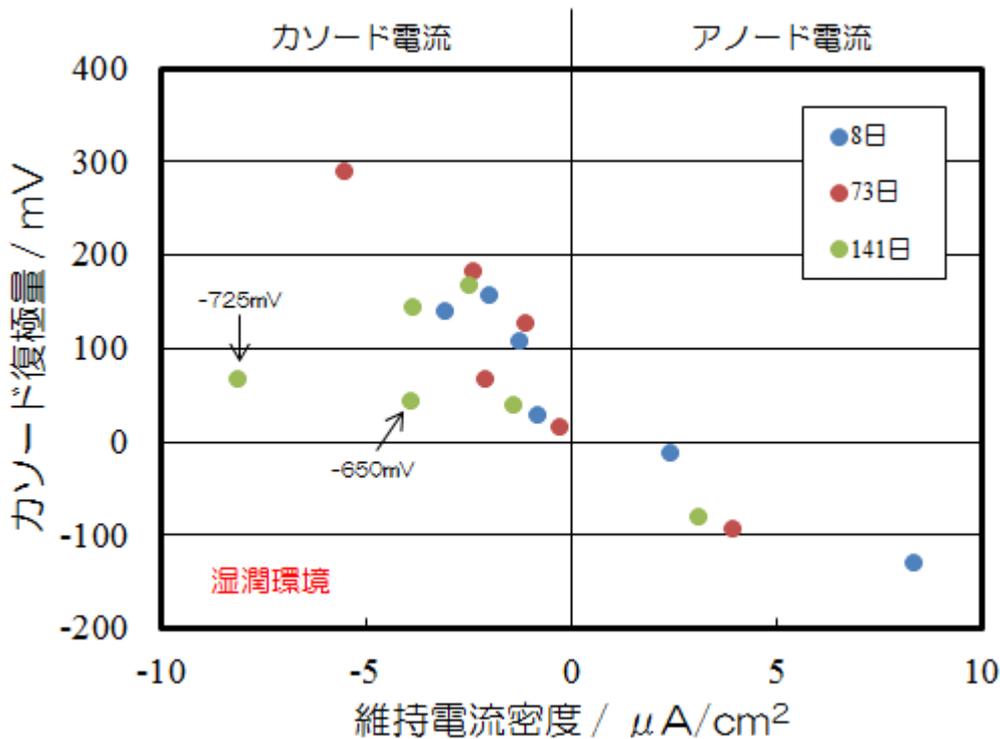


図-4.3.16 維持電流密度とカソード復極量（湿潤環境）

### ③通電オフ 24 時間後の鉄筋自然電位の経時変化

通電オフ 24 時間後の鉄筋自然電位の経時変化を図-4.3.17 に示す。

設定電位  $-500\text{mV}$ 、 $-550\text{mV}$ 、 $-600\text{mV}$  は、時間の経過とともに貴側に変化する傾向を示した。設定電位が低くなるに従って貴側に変化する量は大きくなり、設定電位  $-600\text{mV}$  で試験初期から約  $100\text{mV}$  貴化した。設定電位  $-650\text{mV}$  では、通電開始時は貴側に変化したが、20 日経過頃から卑側に変化する傾向を示した。また、設定電位  $-725\text{mV}$  では、時間の経過とともに卑側に変化する傾向を示しており、試験初期から最大で卑方向に約  $140\text{mV}$  変化した。設定電位  $-650\text{mV}$  と  $-725\text{mV}$  は、飛沫環境下とは明らかに異なる挙動を示し、通電オフ 24 時間後の自然電位はカソード復極量の変化と同期しているようである。

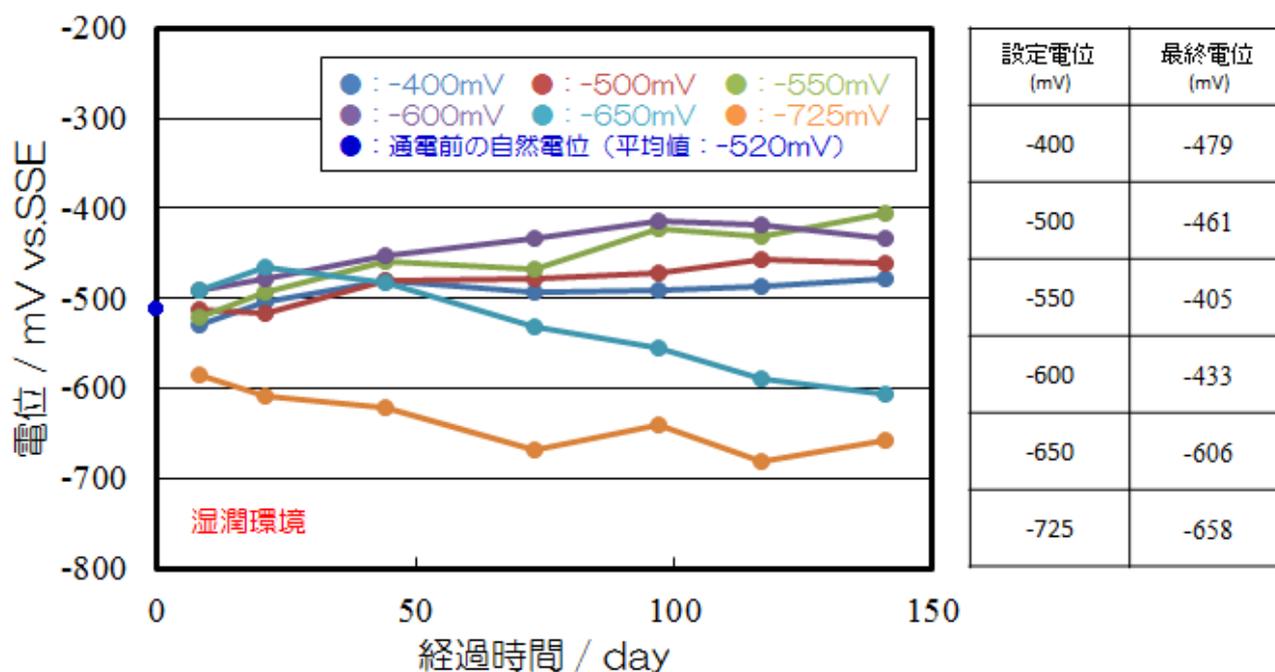


図-4.3.17 通電オフ 24 時間後の自然電位経時変化（湿潤環境）

これらの電気化学的特性に対し，以下のように考察した．電気防食の適用により，鉄筋表面の pH は上昇する．pH の上昇に対して，復極後の自然電位が貴化するのには，鉄筋の不動態化に起因し<sup>26)</sup>，卑化するのには電気防食により鉄筋表面の溶存酸素の消費速度が供給速度を上回る状態すなわち脱気状態に起因すると考えられる<sup>27)</sup>．従って，湿潤環境下における RC の電気防食においては，自然電位が貴化するような場合は溶存酸素による不動態化が可能であるため，従来の 100mV シフト基準で評価することが可能である．一方，溶存酸素の供給速度が遅く，鉄筋表面が脱気状態となるような場合は，鉄筋の不動態化による防食は困難であることから脱気状態の自然電位以下の電位に維持する必要がある．この値は，前述した  $E_R$  に相当し，本試験では -650mV に保持することが必要である．水素脆性の影響も考慮した場合，pH12 では，-650～-900mV で管理すればよいと推定される．

#### ④カソード復極量と腐食速度の関係

本試験の終了時における通電電位とカソード復極量および電気防食時の腐食速度との関係を図-4.3.18 に示す．なお，腐食速度は，通電終了時に測定したアノード分極曲線を，所定の電位まで外挿して評価したものである．

設定電位-400～-600mVの範囲においては、カソード復極量と腐食速度との間に負の直線関係が認められ、100mVシフト基準を満たした条件は、概ね腐食発生の目安となる $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と同程度以下の腐食速度を示した。一方、設定電位-650mV以下の条件では、カソード復極量に関係なく小さな腐食速度を示した。これにより、100mVシフト基準および-650mV以下という電位の絶対値基準のいずれも防食効果の評価基準として有効であることを確認することができた。

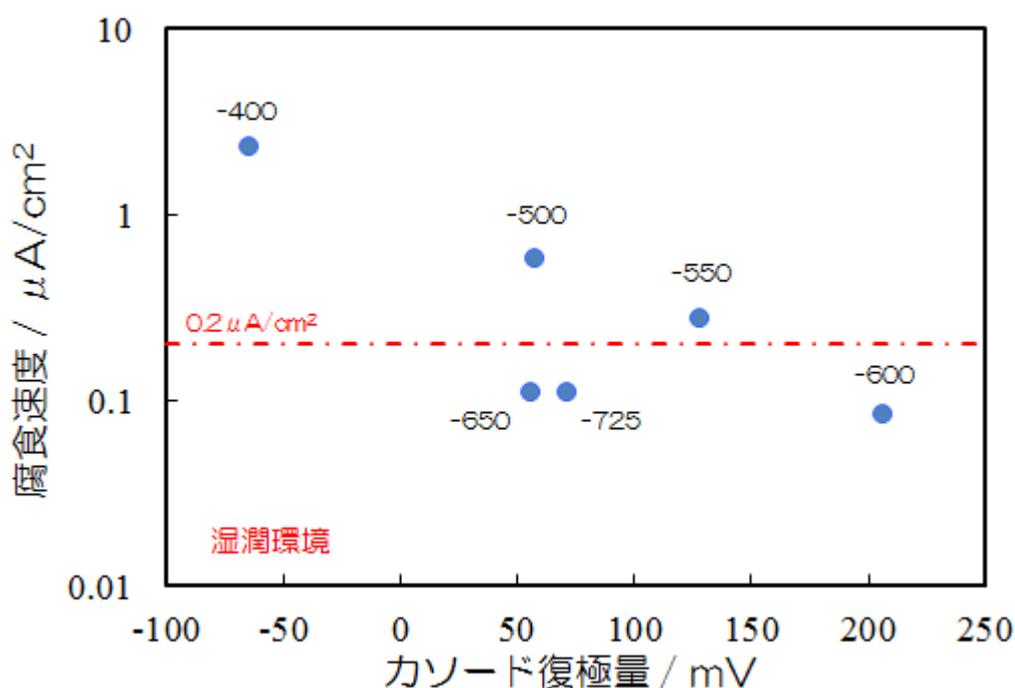


図-4.3.18 カソード復極量と腐食速度の関係（湿潤環境）

### 3) 環境に適した電気防食評価基準の使い分け

港湾構造物においては、陸上構造物に比べて環境の変化が複雑である。特に栈橋の場合、潮位変動と構造によるところが大きい。部位によって腐食形態や腐食速度が異なるのと同様に、電気防食特性も曝される環境によって異なる。

図-4.3.19に示すように、飛沫環境の場合、カソード電流の増加とともにカソード復極量も大きな値となるため、従来の100mVシフト基準の適用が可能であり、防食電流の調整によって管理が可能である。一方、湿潤環境の場合、防食電流の増加は必ずしもカソード復極量の増加にはならないため、100mVシフト基準は適用できない。このような場合には絶

対値管理が適しており，通電電位（インスタントオフ電位）を  $-650\text{mV}$  以下で管理すれば  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下の腐食速度に抑えることができる．飛沫環境と湿潤環境では，経時的な電気化学特性の変化が異なることから，通電オフ 24 時間後の電位変化に着目し，卑化傾向であれば絶対値管理基準を適用すればよいと考えられる．

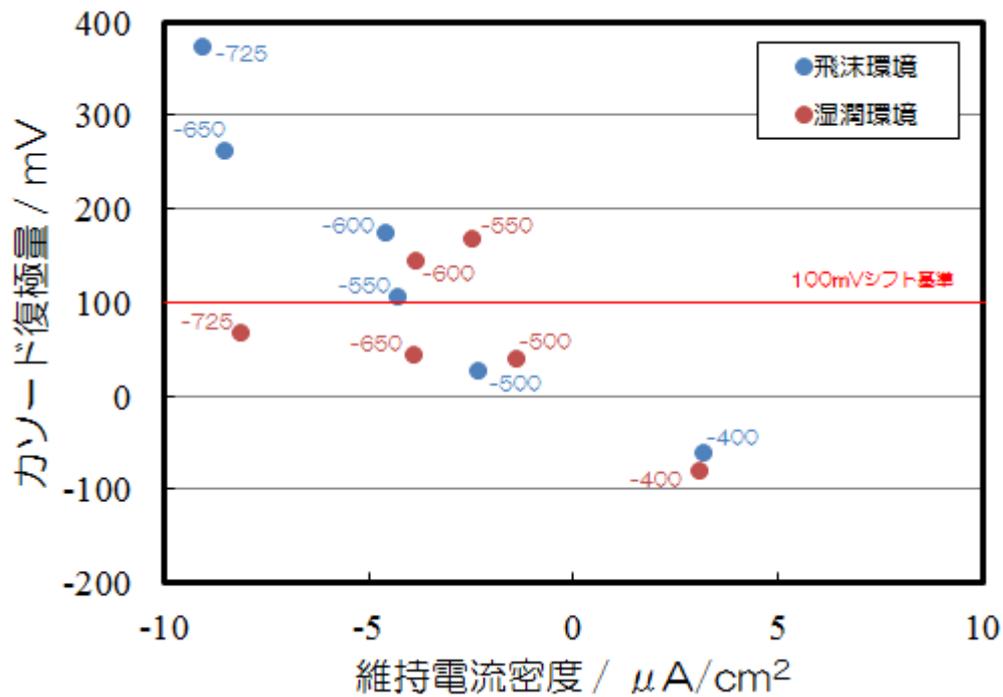


図-4.3.19 維持電流密度とカソード復極量の関係（飛沫・湿潤環境）

#### 4.3.4 まとめ

本試験によって得られた知見を以下に示す。

##### ● $E_R$ 測定に関して

- 1) アルカリ環境下における鋼材の  $E_R$  測定では、 $[Cl^-]=500\text{ppm}$  以上の条件においてアノード分極曲線上に孔食電位が確認された。孔食電位は $[Cl^-]$ の増加とともに卑化する傾向を示した。
- 2)  $100\sim 50000\text{ppm}$  の範囲で  $E_R$  測定を行った結果、同条件でもばらつきが大きく、 $E_R$  値に $[Cl^-]$ 依存性は認められなかった。試験結果を安全側に評価し、 $-650\text{mV}$  を新しい防食基準値とした場合、この値は ISO や ASTM における評価基準値 ( $-720\text{mV}$ ,  $\text{Ag}/\text{AgCl}/0.5\text{MKCl}=55\text{mV}$ ) とも対応していた。

##### ● 飛沫環境での試験に関して

- 1) 通電初期において、 $100\text{mV}$  シフト基準を満足したのは、設定電位 $-650\text{mV}$  と $-725\text{mV}$  であった。通電オフ 24 時間後のカソード復極量は、いずれの設定電位においても経時的に増加する傾向を示した。設定電位 $-550\text{mV}$  と $-600\text{mV}$  は時間を要したが、通電終了時にはいずれも  $100\text{mV}$  以上を示していた。 $100\text{mV}$  以上のカソード復極量を得るために必要な電流は  $3\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ( $30\text{mA}/\text{m}^2$ ) であり、一般的な防食電流密度と同等の値であった。
- 2) 通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位は、いずれの設定電位においても時間の経過とともに貴化する傾向を示した。これは、防食電流の供給によって鉄筋表面の pH が上昇し、その影響によって再不動態化したためと考えられる。
- 3) カソード復極量と腐食速度との間には負の直線関係が認められた。カソード復極量を  $100\text{mV}$  以上確保できれば、腐食速度は  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下に抑えることができ、 $100\text{mV}$  シフト基準の妥当性を確認することができた。

##### ● 湿潤環境での試験に関して

- 1) 通電初期において、 $100\text{mV}$  シフト基準を満足したのは、設定電位 $-600\text{mV}$ ,  $-650\text{mV}$ ,  $-725\text{mV}$  であった。設定電位 $-550\text{mV}$  においては、飛沫環境と同様にカソード復極量は増加する傾向を示し、100 日で  $100\text{mV}$  基準値に到達した。しかしながら、設定電位 $-650\text{mV}$  と $-725\text{mV}$  は経時的に減少する傾向を示し、通電終了時点でいずれも  $100\text{mV}$  基準値を大きく下回った。

2) 通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位は、設定電位  $-400\sim-600\text{mV}$  は時間の経過とともに貴化する傾向を示したが、設定電位  $-650\text{mV}$  と  $-725\text{mV}$  はそれとは逆に卑化する傾向を示した。これは湿潤環境特有の現象と考えられる。電位が卑化する原因は、カソード通電により鉄筋表面の溶存酸素の消費速度が供給速度を上回る状態すなわち脱気状態に起因すると考えられる

#### ● 環境に適した電気防食基準の使い分けについて

- 1) 湿潤環境下における RC 構造物の電気防食では、従来の  $100\text{mV}$  シフト基準で評価が可能な場合と不可能な場合がある。後者は、溶存酸素の供給速度が低下したことにより鉄筋表面が脱気状態になっている場合で、防食効果の判定として鉄筋電位（インスタントオフ電位）が  $-650\text{mV vs.SSE}$  以下という評価基準を適用することが考えられる。
- 2)  $100\text{mV}$  シフト基準が適用可能か否かの判断法としては、通電オフ 24 時間後の自然電位が経時的に貴化するか、あるいは卑化するかで判断することが可能である。

#### 4.3.5 参考文献

- 1) (社)土木学会, コンクリートライブラリー107 電気防食工法設計施工指針(案)(2002)
- 2) NACE Standard Practice, Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete Structures, NACE SP0290-2007 (2007)
- 3) 日本コンクリート工学協会編: コンクリート構造物の電気防食法研究委員会実験報告書 (1995)
- 4) Stratful.R.F, Criteria for the Cathodic Protection of bridge decks, Corrosion Reinforcement in Concrete Construction, NACE, p.p.287-331 (1983)
- 5) NACE Recommended Practice RP-01-69(84), Control of External Corrosion of Underground of Submerged Metallic Piping System (1984)
- 6) 日本工業規格, ステンレス鋼の腐食すきま再不動態化電位測定方法, JIS G 0592 (2002)
- 7) 関博, 伊藤昇, 鉄筋腐食による軸方向ひび割れの発生機構について, セメント技術年報, No.36, p.p.428-431 (1982)
- 8) 細田喜子, 石井浩司, 田代賢吉, 関博, 設置環境を考慮したコンクリート部材の電気防食基準に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, p.p.1155-1160, (2008)

- 9) ISO, Cathodic Protection of Steel in Concrete, ISO 12696 (2012)
- 10) Vrable.J.B, Cathodic Protection for Reinforcing Steel in Concrete, Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP-629, p.p.124-149 (1976)
- 11)日本コンクリート工学協会編, コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書 (1994)
- 12)気象庁, 日本の標準気象データ (2000)
- 13)佐藤唯, 鹿島篤志, 宮川浩, 久田真, 温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1 (2010)
- 14)山本佳城, 衣笠秀行, 古賀一八, 榊田佳寛, コンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2 (2001)
- 15)Pourbaix M, Theoretical and Experimental Considerations in Corrosion Testing, Corrosion Science, Vol.12, p.p.161-190 (1972)
- 16)西村俊哉, 田中賢逸, 清水義明, 乾湿繰り返し環境における炭素鋼のさび形成に与える NaCl の影響, 鉄と鋼, Vol.81, No.11, p.p.49-54 (1995)
- 17)三沢俊平, 鉄さびの生成機構, 防錆管理, p.p.408-416 (1994)
- 18)青山敏幸, 實盛明日香, 関博, 電気防食を適用した鋼材のカソード分極挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, p.p.1363-1368 (2009)
- 19)山本悟, 小林靖宏, 川岡岳晴, 田代賢吉: 電気防食新工法のコンクリート実構造物への適用, 材料, Vol.55, No.11, p.p.1016-1020 (2006)
- 20)堀越直樹, 小林俊秋, 中村雅之: 電気防食における鋼材の電位評価について, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1 (2010)
- 21)布田仁美, 松田芳範, 篠田吉央, コンクリート鉄道橋における電気防食効果の経時変化について, 第 56 回材料と環境討論会講演予稿集, p.p.411-414 (2009)
- 22)田中一弘, 岩崎隆, 道路橋に適用したアルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の施工事例について, 材料と環境 2011, p.p.161-164 (2011)
- 23) ASTM C 876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete (1999)
- 24)川俣孝治, 武若耕司, 守安陽一郎: コンクリート構造物における電気防食の電位シフト基準に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, p . p .865-870 (1997)
- 25) CEB-FIP, Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures , Bulletin d'

Information No.243, pp.52-59 (1997)

26) 小林浩之, 審良善和, 山路徹, 濱田秀則, 若林徹, 望月紀保: 第 58 回材料と環境討論会, pp.217-220 (2011)

27) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保: コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1030-1135 (2012)

#### 4.4 第 4 章のまとめ

第 4 章では, 港湾コンクリート構造物の湿潤環境下における電気防食設計と電気防食基準について検討した.

電気防食設計に関する研究では, 電気防食によって経時的に変化する鉄筋の防食効果を溶液実験と電気化学計測によって検討し, 鉄筋表面の再不動態化が寄与していることを確認した. そして, 鉄筋表面の  $\text{Cl}^-$  と  $\text{pH}$  の変化を数値解析を用いてシミュレーションし, 防食電流による経時的な鉄筋表面の環境改善効果を考慮した電気防食設計法を提案し, 実験室試験によってその妥当性を検証した.

電気防食基準に関する研究では, 湿潤環境下において電気防食試験を実施し, コンクリート中鉄筋の電気防食特性を確認し, 100mV シフト基準未達の原因を電気化学計測によって明らかにした. また, 再不動態化電位測定や電気防食試験より, 鉄筋の電位を -650mV 以下に分極させることを湿潤環境下における新しい電気防食基準とすることを提案した.

## 第5章 結 論

本論文は、電気防食が適用された港湾施設の維持管理を効率的かつ適正に行うことを目的とし、鋼構造物とコンクリート構造物に対して電気防食システムの運用上の課題を抽出し、実験室試験および実構造物試験を通して検討を行った。

港湾鋼構造物では、流電陽極法の維持管理手法について検討した。電気防食システムを適正に維持し、計画的に更新していくためには、定期的な点検によって施設の防食状態と電気防食システムの寿命を把握しておく必要があり、 $E_c-I_a$ プロットによるシステム状態の確認手法と陽極寿命の簡易推定手法を提案した。また、過剰設計となる可能性もある現状の更新設計法を見直し、修正設計法を提案した。

港湾コンクリート構造物では、電気防食の評価方法について検討した。道路橋に比べて港湾の栈橋施設は潮流の影響を受けるなど、環境も様々である。そこで、飛沫帯と干満帯における電気防食特性の確認と電気防食評価方法の検討を行い、鉄筋表面の環境改善効果を考慮した設計方法と、湿潤環境下における電気防食基準（ $-650\text{mV vs. Ag/AgCl}(\text{sat. KCl})$ ）を提案した。

以下に本研究で得られた結論を示す。

### 〈港湾鋼構造物の維持管理手法に関する検討〉

第3章では、電気防食が適用された港湾鋼構造物の維持管理手法について検討を行った。3.2 では、実構造物の電気防食試験によって得られたデータを用い、電気防食システムの維持管理手法について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 10年経過した大井埠頭新5バース下部工の電気防食試験において、カソード電位-アノード電流プロット（ $E_c-I_a$ プロット）は直線状に分布しており、時間の経過とともに卑電位-低電流側に変化する傾向を示した。これは、カソード側にエレクトロコーティングが生成し、カソード分極抵抗が経時的に増大したためと考えられる。電流低減率は設計値の0.50に対し、実構造物では0.15まで減少しており、アルミ陽極の寿命は設計寿命を大幅に上回ることを確認した。
- 2)  $E_c-I_a$ プロットは、卑電位-低電流側になるに従い理論  $E_c-I_a$ 線からずれる傾向が見られた。この原因は、アノード電位の経時的な変化と考えられる。現地計測において、アノード電位は $-980\sim-1020\text{mV}$ （平均値： $-1005\text{mV}$ ）の間で変動しており、設計値の

-1060mV に対し 40mV 以上も貴な電位を示していた。

- 3) 理論  $E_c-I_a$  線を用いたアルミ陽極の消耗量推定では、計測したアノード電流より求めた陽極消耗量と大きな差が生じた。一方、 $E_c-I_a$  プロットを最小二乗近似して得られた近似線より求めたアルミ陽極の消耗量は、供用初期において計測した値と差が生じていたが、供用 5 年以降から推定誤差が 10%以下となった。近似線の切片は、現地計測したアノード電位の平均値とほぼ一致しており、実施設の  $E_c-I_a$  線と見なすことができる。この実施設の  $E_c-I_a$  線を用いることにより、カソード電位計測によるアルミ陽極の消耗量推定が 10%程度の誤差で可能となり、電気防食システムの効率的な維持管理手法として期待される。
- 4) 実施設の  $E_c-I_a$  線を求めるための手段として、アルミプローブ法を提案する。本手法はアルミプローブを電流計を介して構造物と短絡し、計測される短絡電流に換算係数を乗じてアルミ陽極のアノード電流を推定する方法である。実構造物データが少ないため、今後も様々な施設でデータ収集を行い、換算係数の信頼性を向上させることが今後の課題である。
- 5) 潮位により電気防食特性が変動する施設（飛沫・干満部に金属被覆が適用された施設）においてアノード電位やプローブ電流を計測する場合、一日を通して潮位変動の少ない小潮の日に計測するのが適切である。
- 6) カソード電位の計測は、照合電極と電位差計があれば、港湾管理者でも容易に計測することができる。本手法を用いれば、定期的に電位計測を実施することにより、電気防食システムの効率的な維持管理が可能になると考えられる。

3.3 では、流電陽極方式による港湾鋼構造物の電気防食に対して陽極更新時の設計手法を提案し、検証試験を実施した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 陽極更新時に設計防食電流密度の低減が期待できるのは、カソード電位が -925mV vs.Ag/AgCl[sw]より卑化している場合である。更新後においても -925mV 以下に維持するために必要な最小設計防食電流密度は、防食対象物に対する通電履歴に依存することが分かった。通電履歴に関係なく更新後もカソード電位を設計上の維持管理電位 (-925mV) 以下に維持するためには、更新前の定常カソード電流密度を 2 倍した値を設計防食電流密度にすればよい。

- 2) 東京国際空港 D 滑走路連絡誘導路の下部工（鋼管杭）に対して，提案する更新設計法の検証試験を実施した結果，更新設計適用後の  $E_c-i_c$  プロットは，設計した直線上を変化していたことから，本設計手法の妥当性が確認された。

## 《港湾コンクリート構造物の維持管理手法に関する検討》

第4章では，電気防食が適用された港湾コンクリート構造物の維持管理手法について検討を行った。

4.2 では，電気防食によって生じる鉄筋表面の環境改善効果を考慮した設計方法について検討し，提案する設計手法の検証試験を実施した。得られた知見は以下の通りある。

- 1) コンクリート中鉄筋に電気防食を適用した場合，鉄筋表面では経時的に塩化物イオン濃度の減少および pH の上昇が生じるが，とりわけ pH の上昇が顕著に現れることが分かった。
- 2) コンクリート中鉄筋に対する電気防食設計法として，鉄筋表面の  $Cl^-$  と  $OH^-$  の濃度比 ( $r_{ce}$ ) がしきい値 ( $r_{crit}$ ) 以下になるまでの期間 ( $t_a$ ) を評価して通電電流密度を決定する新しい設計手法を提案した。
- 3) 鉄筋腐食が生じているコンクリート試験体を用い，考案した設計法の検証試験を実施した。数値シミュレーションで推定した  $t_a$  よりも実測値は若干大きい値を示したが，概ね整合しており，本設計法の妥当性を確認できた。

本設計法は， $r_{crit}$  値の設定や実構造物に対しての検証試験などさらに検討すべき課題は多いが，コンクリートという特性を有効利用した省エネルギー効果の高い防食法となる可能性がある。

4.3 では，湿潤環境下における 100mV シフト基準未達現象について，実験室試験および飛沫・干満帯を模擬した環境下で電気防食試験を行い，鉄筋の腐食特性と電気防食特性の把握と電気防食基準について検討した。得られた知見は以下の通りである。

### 【Er 測定】

- 1) アルカリ環境下における鋼材の再不動態化電位 ( $E_R$ ) 測定では， $[Cl^-]=500ppm$  以上の条件においてアノード分極線上に孔食電位が確認された。孔食電位は  $[Cl^-]$  の増加とともに卑化する傾向を示した。

- 2) 100～50000ppm の範囲で  $E_R$  測定を行った結果、同条件でもばらつきが大きく、 $E_R$  値に[Cl<sup>-</sup>]依存性は認められなかった。試験結果を安全側に評価し、-650mV を新しい防食基準値とした場合、この値は ISO や ASTM における評価基準値 (-720mV, Ag/AgCl/0.5MKCl=55mV) とも対応していた。

#### 【飛沫環境】

- 1) 通電初期において、100mV シフト基準を満足したのは、設定電位-650mV と-725mV であった。通電オフ 24 時間後のカソード復極量は、いずれの設定電位においても経時的に増加する傾向を示した。設定電位-550mV と-600mV は時間を要したが、通電終了時にはいずれも 100mV 以上を示していた。100mV 以上のカソード復極量を得るために必要な電流は  $3\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ( $30\text{mA}/\text{m}^2$ ) であり、一般的な防食電流密度と同等の値であった。
- 2) 通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位は、いずれの設定電位においても時間の経過とともに貴化する傾向を示した。これは、防食電流の供給によって鉄筋表面の pH が上昇し、その影響によって再不動態化したためと考えられる。
- 3) カソード復極量と腐食速度との間には負の直線関係が認められた。カソード復極量を 100mV 以上確保できれば、腐食速度は  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下に抑えることができ、100mV シフト基準の妥当性を確認することができた。

#### 【湿潤環境】

- 1) 通電初期において、100mV シフト基準を満足したのは、設定電位-600mV、-650mV、-725mV であった。設定電位-550mV においては、飛沫環境と同様にカソード復極量は増加する傾向を示し、100 日で 100mV 基準値に到達した。しかしながら、設定電位-650mV と-725mV は経時的に減少する傾向を示し、通電終了時点でいずれも 100mV 基準値を大きく下回った。
- 2) 通電オフ 24 時間後の鉄筋の自然電位は、設定電位-400～-600mV は時間の経過とともに貴化する傾向を示したが、設定電位-650mV と-725mV はそれとは逆に卑化する傾向を示した。湿潤環境特有の現象と考えられる。電位が卑化する原因は、カソード通電により鉄筋表面の溶存酸素の消費速度が供給速度を上回る状態すなわち脱気状態に起因すると考えられる

## 【環境に適した電気防食基準の使い分け】

- 1) 湿潤環境下における RC 構造物の電気防食では、従来の 100mV シフト基準で評価が可能な場合と不可能な場合がある。後者は、溶存酸素の供給速度が低下したことにより鉄筋表面が脱気状態になっている場合で、防食効果の判定には鉄筋電位（インスタントオフ電位）が -650mV vs.SSE 以下という評価基準を適用するとよい。
- 2) 100mV シフト基準が適用可能か否かの判断法としては、通電 off24 時間後の自然電位が経時的に貴化するか、卑化するかで判断することが考えられる。

第 5 章では、得られた結論について総括した。

最後に、電気防食システムの維持管理に関して残された課題について述べる。

港湾鋼構造物の維持管理に関しては、モニタリング技術の構築が重要である。電気防食では、特に被防食体の電位（カソード電位）のモニタリングが基本となるが、水質、流速、温度、供用時間、計測する時間などによってその値は大きく異なる。よって、被防食体の状態を正確に把握するためには連続的にモニタリングすることが重要であり、普及させるためには低コストで簡便なモニタリングシステムの開発が必要となる。連続モニタリングを行うことによって、常に変化する防食状態の特性を知ることができるばかりでなく、実施の  $E_c-I_a$  線の適正評価も可能となり、陽極寿命推定の更なる高精度化にも繋がると考えられる。モニタリング装置としては、電流計測用のシャント抵抗と照合電極を内蔵したアルミ陽極が考えられるが、実用化するためには計測用リード線の長期耐久性が課題である。アルミプローブ法もアルミ陽極の電流計測手法として今後必須な技術となるが、様々な施設と照合し、信頼性を上げていくことが必要である。また、干満・干満部の被覆防食材に電氣的絶縁性の高い材料が用いられている場合には問題とならないが、金属製被覆が適用されている場合には干満の影響を強く受けるため、今後も検討を続けていかなければならない。

港湾コンクリート構造物の維持管理に関しては、同一施設においても飛沫帯、干満帯、海中部、あるいは海中部に電気防食が適用されている場合など、部位によって環境条件が異なるため、どのように防食基準（100mV シフト基準、絶対値管理基準）を使い分けていくかが大きな課題である。今後は、実構造物を電気化学的手法によってモニタリングしてデータの蓄積と評価を行い、環境ごとの電気防食特性を明確にするとともに、既存のモニ

タリング技術（自然電位計測，分極抵抗計測，電気抵抗率計測など）の信頼性向上が不可欠と考えられる．特に鉄筋の腐食速度評価技術の向上が望まれる．また，電気防食システムに関しては，環境ごとに電気防食回路を分ける技術や，絶対値管理基準を目的とした定電位自動制御（インスタントオフ電位による制御）に対応した直流電源装置の開発が必要である．