

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1392 December 2021

海洋鋼構造物に適用された電気防食の維持管理に関する検討

山路 徹, 原 将之, 能登谷 健一, 山廻邊 伸充, 高橋 康弘, 小林 茂則,
渡部 昌治

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 電気防食に関する設計の概要	4
1.2 電気防食に関する点検診断の概要	5
1.3 本研究における検討課題及び実施内容	6
2. ジャケット式鋼構造物（羽田D滑走路等）における電気防食の点検診断および詳細調査結果 ...	8
2.1 はじめに	8
2.2 電気防食特性の把握のための連続モニタリング	9
2.3 電気防食に関する定期点検診断結果	14
2.4 維持管理の高度化を目的とした詳細調査結果	21
2.5 まとめ	26
3. 鋼管杭式栈橋における調査結果	28
3.1 はじめに	28
3.2 調査概要	28
3.3 調査結果	29
3.4 まとめ	31
4. 電気防食の点検診断に関する考察	32
4.1 一般定期点検診断	32
4.2 詳細定期点検診断	33
4.3 まとめ	35
5. おわりに	35
参考文献	36
付録	
付録A 測定電位に及ぼす鋼材表面と照合電極までの距離の影響に関する検討事例	
付録B 水中クランプメータの測定精度の検証例	
付録C 港湾鋼構造物における電気防食用流電陽極の脱落とその影響に関する検討事例	

Study of maintenance for cathodic protection applied to marine steel structures

Toru YAMAJI*, **Masayuki HARA****,
Ken-ichi NOTOYA***, **Nobumitsu YAMANOBE******,
Yasuhiro TAKAHASHI*****, **Shigenori KOBAYASHI*******, **Masaharu WATANABE*******

Synopsis

In the general periodic inspection diagnosis of cathodic protection applied to marine steel structures, we can get quantitative information as an index called "potential" instead of a qualitative index (deterioration degree a, b, c, d) as in the case of visual inspection. However, there are few cases where the inspection and diagnosis results are generally published. The same applies to the detailed inspection and diagnosis of cathodic protection (anode consumption, current from anode, etc.). If this information is made public and shared, it will be possible to carry out inspections and diagnoses related to cathodic protection more efficiently. Furthermore, it can be used as a reference material when developing new technologies related to inspection and diagnosis.

In addition, there is a theoretical correlation between the potential (E) and the current from anode (I). It has been pointed out that the amount of anode consumption (usually grasped by diver), that is, the remaining life of the anode can be estimated from the potential with a certain degree of accuracy. However, there are few cases where the estimation accuracy has been verified.

Based on the above, with the main purpose of contributing to the sophistication and labor saving of cathodic protection inspection and diagnosis, and publicizing and sharing the results of inspection and diagnosis, various inspection items related to cathodic protection have recently been regularly inspected. First, the diagnosis results were organized. Furthermore, the results of the additional surveys were summarized. The main findings obtained from this study are shown below.

- 1) The actual conditions of inspection and diagnosis results regarding cathodic protection in jacket-type structures and steel pipe pile-type piers are shown.
- 2) In the jacket-type structure (Haneda Airport D runway), about 1500 anode mounting conditions were confirmed after 5 and 10 years, respectively. There was no dropout of the anode. In addition, in the sheet pile type structure, the case where the anode dropout could be grasped by the potential measurement was shown.
- 3) Similar to the previous findings, most of the relationships between the potential and the current from anode in this case simultaneously satisfied the assumed values at the time of design. This result also suggests that it may be possible to judge that the anode life satisfies the design service life of the anode if the potential falls below a certain threshold value.

Key Words: Marine environment, steel structures, cathodic protection, periodical inspection

* Head, Materials Group, Structural Division
** Trainee, Materials Group, Structural Division
*** Former Tokyo Airport Construction Office
**** Tokyo Airport Construction Office
***** Yokohama Port and Airport Research Office
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5013 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yamaji-t@p.mpat.go.jp

海洋鋼構造物に適用された電気防食の維持管理に関する検討

山路 徹*・原 将之**・能登谷健一***・山廻邊伸充****・
高橋康弘*****・小林茂則*****・渡部昌治*****

要 旨

海洋・港湾施設への定期的な点検診断の実施は、維持管理制度の確立に伴い、広く普及してきている。海洋鋼構造物に適用された電気防食の一般定期点検診断においては、目視点検の場合の定性的な指標（劣化度 a, b, c, d）ではなく、「電位」という定量的な数値が得られる。ただし、点検診断結果が一般的に公表されている例はほとんどない。電気防食の詳細点検診断（陽極消耗量、陽極発生電流量、陽極の脱落の有無など）についても同様である。これらの情報が公表・共有されれば、電気防食に関する点検診断がより効率的に実施できるようになると考える。さらには、点検診断に関する新技術の開発の際の参考資料としても活用可能と考える。

また、上述の電位(E)と陽極発生電流(I)の間には理論的には相関関係がある。そして、ある程度の精度で、電位から陽極の消耗量（通常、潜水調査により把握）すなわち陽極の残存寿命が推定できる可能性が指摘されている。ただし、その推定精度を検証された事例は少ない。

以上を踏まえ、電気防食の点検診断の高度化・省力化に資すること、そして点検診断の結果を公表・共有することを主目的として、電気防食に関する各種の点検項目（電位、陽極発生電流量や陽極消耗量、陽極の取付状況確認等）に関して、最近実施された定期点検診断結果の整理、そして追加で実施した調査結果のとりまとめを行った。本検討より得られた主な知見を以下に示す。

- 1) ジャケット式構造物および鋼管杭式栈橋における、電気防食に関する点検診断結果の実態（経時変化、場所によるばらつき等）を示した。
- 2) ジャケット式構造物（羽田空港 D 滑走路）において、陽極取付状況の確認がなされているが、5年後および10年後の調査結果（それぞれ1500個程度）において、陽極が脱落していたものは皆無であった。また、矢板式構造物において、電位測定により陽極脱落を把握できた事例を示した。
- 3) 既往の知見と同様に、今回の事例における鋼材の電位と陽極発生電流（電流低減率）の関係は、設計時での想定値（電位：-935mV、電流低減率：0.5）を同時に満足しているものが大半であった。今回の結果においても、電位があるしきい値を下回れば陽極寿命が陽極の設計耐用年数を満足すると判断できる可能性が改めて示唆された。

キーワード：海洋鋼構造物，電気防食，電位，陽極発生電流，陽極消耗量

* 構造研究領域 材料研究グループ長
** 構造研究領域 材料研究グループ 依頼研修員
*** 国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所
**** 国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所
***** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5013 Fax：046-844-0255 e-mail: yamaji-t@p.mpat.go.jp

1. はじめに

日本国内の港湾施設において、鋼材が広く用いられている。鋼材は腐食するため、防食が必要不可欠である。過去には、防食対策が不十分だったことに起因し、事故につながった例も数例存在する。その結果として、現在では、海面より上（干満帯、飛沫帯、海上大気中）に対しては被覆防食、海中部に対しては電気防食が適用されるのが一般的である¹⁾²⁾。

この電気防食、特に流電陽極方式については、日本国内において広く普及しており、普及に伴い、防食効果の確実性が非常に高いことも広く認識されてきている。

電気防食の維持管理に関しても、基本的な概念は広く普及している²⁾³⁾⁴⁾。一方で、点検診断結果（実構造物での調査結果）が公表される例は少なく、結果として、点検診断時の評価や、点検頻度の決め方など、高度化の余地が残されている点も多い。

本章では、まず電気防食（流電陽極方式に限定）の設計および維持管理（主に点検診断）の概要を述べ、主に点検診断に関する課題を抽出し、本文で検討する目的および内容について整理を試みる。

1.1 電気防食に関する設計の概要

(1) 電気防食に関する設計の概要

「流電陽極（一般にアルミニウム（Al）合金）」は鋼材（Fe）より溶解しやすい（イオン化しやすい）。流電陽極（Al）が溶解した際、電子（e⁻）が鋼材（鉄）に供給され、鋼材の腐食（鉄のイオン化）が抑制（防食）される。陽極と鋼材の間で電子が移動する（電流が流れる）ということは、両者間に存在する電解質溶液（例えば海水）中において

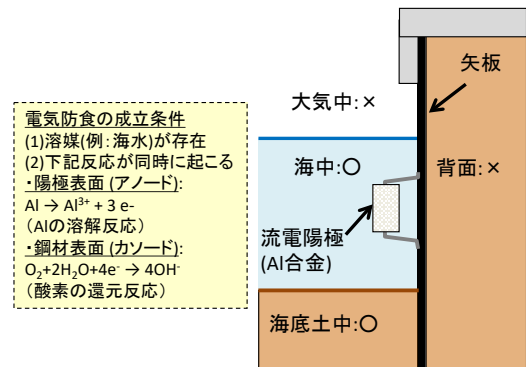


図-1.1 電気防食の適用範囲の一例

てイオンの移動が必須となるため、電気防食が機能する範囲は、図-1.1に示すように海中（干満帯の途中も含む）と海底土中部となる。

(2) 陽極消耗量の算定方法

ここで、流電陽極による防食を達成するためには、流電陽極は溶解し続ける（電流を流し続ける）必要がある。結果として、流電陽極は時間とともに消耗する。この消耗速度は「陽極発生電流（A）」と等価である。陽極発生電流の変化の一例を図-1.2に示す。若干の季節変動をしつつ、ある一定値に低減する。

この陽極が消耗する速度（設計上は防食電流密度（mA/m²）と陽極の設計供用年数を設定し、設計供用期間中の陽極の総消耗量を予測し、設計時に陽極の必要質量（=設計耐用期間）を設定している。陽極の寿命 $L_{e,c}$ は、電流値を時間積分し、下式により求められる。

$$L_{e,c} = \frac{Q \times W_0}{\int I dt} = \frac{Q \times W_0}{I_{ac} \times 24 \times 365} \quad (1)$$

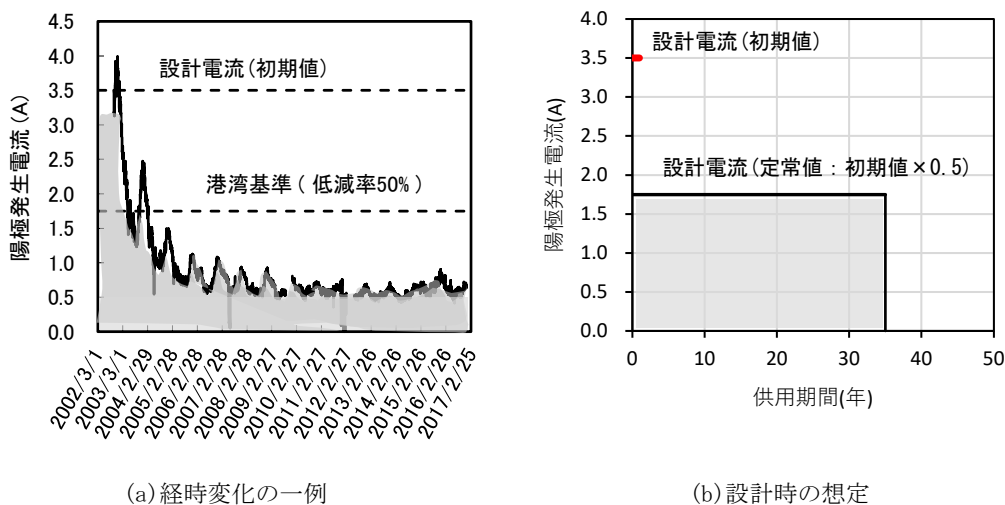


図-1.2 陽極発生電流の経時変化（イメージ）

ここで、 $L_{e,c}$ ：電流値から求めた陽極寿命(y)， Q ：流電陽極の発生電気量(2600A・h/kg)， W_0 ：流電陽極の初期質量， $I_{a,c}$ ：陽極発生電流 (A)，である。図-1.2の灰色着色部が時間積分値である。なお、設計時において、初期発生電流の1/2まで電流が低減し、この電流が設計供用期間にわたり流れ続けると仮定して、陽極の必要質量が計算されている¹⁾²⁾。この低下率は、電流低減率(=流れる電流/初期電流)と呼ばれ、陽極の設計耐用年数が15年以上の場合、0.5が用いられる。この電流低減率について、防食状態が良好な場合においては、0.5よりも低減すると考えられている^{例えは5)}。

(3)防食電流密度

電気防食の設計において、必要な防食電流密度(初期値)が対象環境ごとに設定される。一般の海域(清浄海域)では、海水中部で100 mA/m²、海底土中部では20 mA/m²とされる。汚染海域の場合は、海水抵抗が増加し、防食電流が流れにくくなる等の理由から、30~50%程度増加させる必要がある。なお、上記の値は初期の値であり、実際は時間とともに徐々に低下し、やがて定常状態に至る。

また、高波浪あるいは高潮流海域の場合、鋼材表面に供給される溶存酸素量が増加するなどの理由から、防食電流密度を高く設定する必要がある。

1.2 電気防食に関する点検診断の概要

港湾の施設の点検診断は、一般定期点検診断と、詳細定期点検診断に分かれる³⁾。電気防食に関して、この2つに分けて、概要を説明する。

(1) 一般定期点検診断(電位測定)

a)方法

照合電極(一般に海水塩化銀電極)を海中に投入し、深度方向の分布を測定するのが一般的である。測定を行う位置(測線)は、電位測定用端子の設置位置とその中間点で測定が行われている²⁾。測定状況のイメージ図を図-1.3に示す。

この照合電極と測定対象物(鋼構造物の表面)の距離が離れると、一般に計測される値は異なる。あるジャケット式栈橋(耐海水性ステンレス被覆が適用)において、電位の測定値に及ぼす距離の影響を調査している(付録A参照)。この結果において、1本の鋼管杭の8方向に対し、80cmあるいは200cm離れて計測した場合に、鋼材表面での測定値に対し、20mV程度貴な値(プラス側の値)が測定されている。また、上記とは別の同種の構造物(羽田空港D滑走路)において、鋼材表面から数m程度離れた船上から照合電極を投入して測定した場合に、やはりプラス側の値が測定されている⁶⁾。一方、一般の鋼構造物(栈

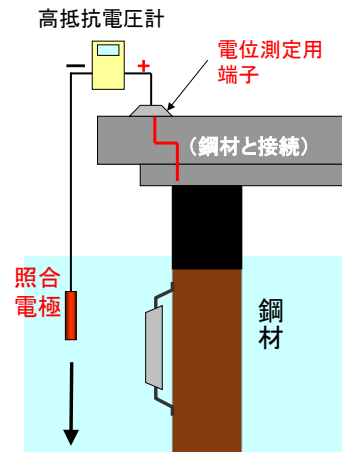


図-1.3 電位測定方法(イメージ図)

表-1.1 電気防食に関する劣化度判定基準

劣化度	判定基準
a	防食管理電位が維持されていない(部材の性能が著しく低下している状態)
b	-
c	-
d	防食管理電位が維持されている(変状が認められない状態)

橋、矢板式構造物等)の場合は、通常の間検診断結果については、公表された事例はほとんど存在しない(研究が主目的で調査が実施された例は除く)。

b)劣化度の判定

電位測定結果の劣化度の判定表を表-1.1に示す。一般点検診断の場合、通常はa, b, c, dの4段階で評価が行われる。一方、電気防食の場合は、防食されている・いないの2択でしか判定できないため、a, dの2段階の判定となっている。

(2) 詳細定期点検診断(陽極消耗量測定、取付状況確認)

一般に、陽極消耗量の調査が行われることが多い。この

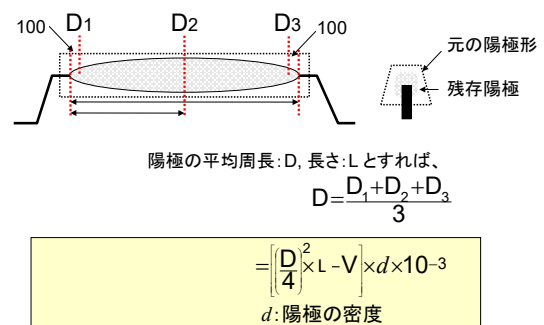


図-1.4 周長測定による陽極消耗量の測定方法

測定は、潜水土により陽極表面に付着している海生物等をケレン工具等にて除去し、図-1.4 に示す3箇所の陽極の周長を計測して陽極消耗量を算出するのが一般的である²⁾。陽極消耗量を測定すると、陽極の設置期間が分かれば陽極の消耗速度(=消耗量/経過年数)が評価でき、陽極がいつ完全消耗するのかを予測することができる。

また、陽極発生電流測定や陽極の取付状況の確認(脱落、ぶら下がり等の変状の確認)を行っている場合もある。陽極発生電流は、防食対象と陽極の心金間に電流測定装置(水中型シャント抵抗)を挿入し、測定することができる²⁾。これにより、陽極発生電流の連続的な測定も可能である(2.2 参照)。

なお、一般定期点検診断で測定される電位(E)と、陽極発生電流(I)の間には、オームの法則($E=RI$ 。R:抵抗)からも分かるように、理論的には相関関係がある。実構造物においては、諸要因が影響するため、精度的には高くはないにしても、電位からある程度の精度で、陽極の残存寿命が推定できる可能性がある。以下その概要を説明する。

電気防食の設計では、鋼材の防食電位と陽極の電位の差が250mV(アルミニウム合金製の場合)と設定されている²⁾。一方、陽極発生電流は、1.1で述べたように経験的に初期の値の1/2(電流低減率0.5)まで時間とともに低減するとしている。

図-1.5 は電位(鋼材表面での測定値)と電流低減率と電位の関係を示したものである。なお、図中の直線は、電位と電流の両者に線型的な関係があるとして、上述の考え方の下で2点を直線で結んだものである。

i)陽極の設計電位は-1060mV(vs.海水塩化銀電極)。鋼材の電位がこの電位となったとき、陽極との電位差がなくな

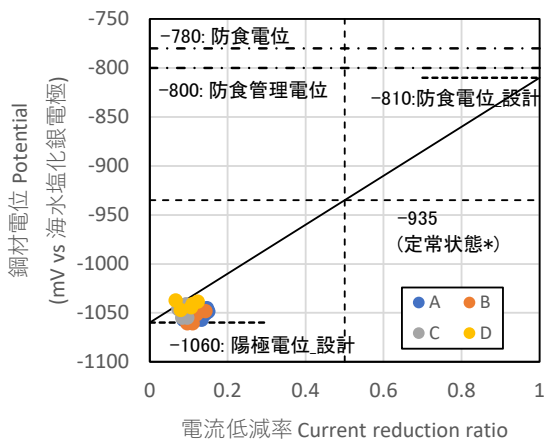


図-1.5 電流低減率と電位の関係 (図-3.7 と同じ)

るため、電流(=電流低減率)は0となる。

ii)設置直後の鋼材の電位は、-1060(陽極電位)から設計で想定している250mVを引いた-810mV(=1060-250)となる。この時、陽極の設置直後のため、電流低減率は1となる。ここで、時間が経過すると、鋼材表面にエレクトロコーティングが形成され、電位は卑化し、電流は低減する(低減率が減少する)。両者の値は、理論的には直線上の右上から左下に向かって変化する。電気防食の状態が定常状態となる際の電位(電流低減率0.5と想定)は、a)b)2点の間である-935mV(=(1060-810)/2)と計算される。

これらのことを踏まえ、文献7)では新たな電気防食の劣化度の判定基準値(-935mV)を提案している。これを踏まえると、設置後数年経過時の電位を測定することで、陽極の残存寿命が設計を満足しているか否かが簡単に判定できることとなる。

1.3 本研究での検討課題及び実施内容

上記に示した内容を踏まえ、点検診断の種類ごとに、本研究での検討課題の整理を試みる。

(1) 定期点検診断(電位)

a) 実構造物における実態の把握

実構造物における点検診断結果に関して、そもそも公表された例が少ない。点検診断の効率化に資することを目的として、まずは実態を把握し、傾向を改めて整理する。

特に羽田空港D滑走路においては、鋼構造物(ジャケット式構造物)が同じ海域内に多数存在しており、かつ、定期的に膨大な点検を実施しており、結果として膨大なデータが取得されている。これらのデータを整理し、傾向の把握を行った。また、定期点検とは別で、詳細定期点検診断に相当する各種調査を追加実施し、結果を整理した。

b) 電位測定に及ぼす測定方法の影響(照合電極と鋼材表面の距離の影響)

一般的な栈橋に対して電位測定を行う場合、照合電極を岸壁法線上から投入すると、照合電極と鋼材表面との距離が、最海側の杭においても、2~3m程度存在する。この距離の影響の把握を試みる。また、同一栈橋内に多数存在する鋼管杭表面で測定された電位のばらつきについても整理を試みた。

(2) 詳細点検診断

a) 陽極発生電流の測定

陽極消耗速度を評価するために行われる陽極消耗量の測定は、現状においては潜水作業が必須であり、かつ陽極に付着した生物などを除去する必要がある。一方、陽極消耗速度と等価である陽極発生電流量の測定に関して、従来は、電気抵抗を陽極と鋼材の間に介在させ、抵抗に流れ

る電流を測定していた。これに代わる方法として、「水中クランプメータ（付録B参照）」を用い、ジャケット式構造物、栈橋式構造物において測定を試みた。なお、「水中クランプメータ」について、現状において潜水作業は必要であるが、陽極消耗量調査とは異なり、付着生物の除去は不要であり、比較的簡便に測定可能である。

b) 電位による陽極の残存寿命の推測

1.2で述べたように、流電陽極が設計通り消耗しているか（設計時に想定していた耐用年数を満足しているか）を、電位の測定値から推定できる可能性がある。

この検証のためのデータを蓄積することを目的として、ジャケット式構造物および栈橋式構造物において、電位と陽極発生電流量（あるいは陽極消耗量）の調査を実施した。

2. ジャケット式構造物（東京国際空港D滑走路等）における点検診断および詳細調査結果

2.1. はじめに

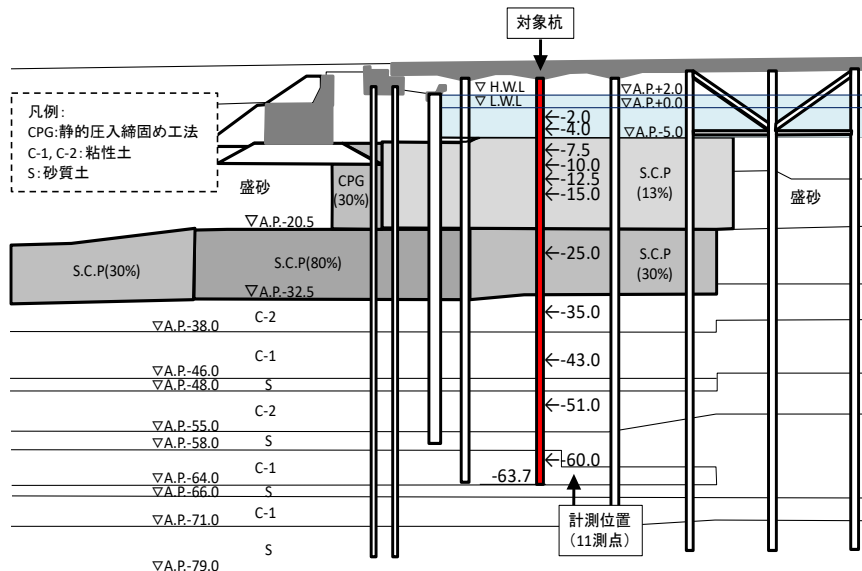
東京国際空港D滑走路ジャケット部には約2万個の電気防食用流電陽極（設計耐用年数35年）が設置されている。この維持管理のため、電位計測が2年に1回（1レグ/1ジャケット、12年で1サイクル）実施されている。電位計測は、ポート上からの計測であること、ジャケットの数が多ことから、簡易な測定とはいえ、かなりの負担（手間、コスト）が生じている状況である。

また、陽極の寿命予測に必要な「陽極消耗量」の測定は、潜水士が必要な作業となる。ここで、「電位」と「陽極発生電流（時間積分すると陽極消耗量が算出可能）」の間に

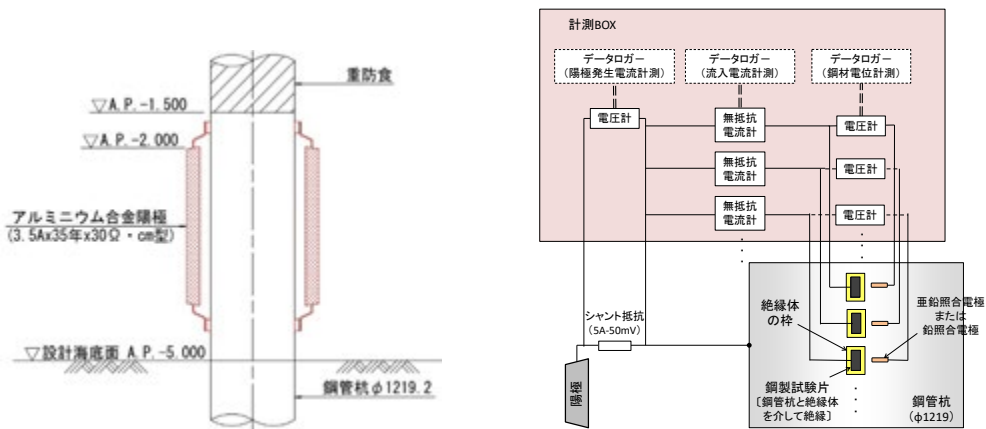
は、一般に線形の相関関係があるとされる。ただし、その関係は環境、構造形式等によって変化する（ばらつく）。この両者の相関関係が把握できれば、「電位」から「陽極発生電流」を、さらには「陽極消耗量」をある程度の精度での推定が可能になる。

本章では、電気防食が適用された鋼構造物の維持管理（特に点検診断手法）の高度化（簡素化）の検討を主目的として、ジャケット部および連絡誘導路部における電気防食の実態の把握・整理（下記(1)(2)(3)）を行う。

- (1) 電気防食特性の把握のための連続モニタリング
- (2) 定期点検により得られた結果の整理
- (3) 電気防食の維持管理の高度化（簡素化）を目的とした詳細調査



(調査対象位置)



(陽極設置状況)

(計測回路)

図-2.1 連絡誘導路部モニタリング箇所および測定方法概要

2.2. 電気防食特性の把握のための連続モニタリング

2.2.1. 概要

ここでは以下の2事例について説明する。なお、電流を連続的に測定することで、精度よく、消耗量の予測が可能である（1.参照）。

- 1) 連絡誘導路部の単杭（A および G 杭）での電位、電流モニタリング（そもそもの目的は海底土中部の電気防食特性の検討のため⁸⁾）
- 2) 栈橋部のジャケット式構造物（L1 および A14）における電位、電流モニタリング

2.2.2. 連絡誘導路単杭での電位、電流モニタリング

(1) 概要

海底土中部の電気防食を検討するという目的で、図-2.1 に示す連絡誘導路の単杭部（計2本。被覆防食は重防食被覆）において、建設時から連続モニタリングが実施されている（測定は港湾空港技術研究所および電気防食工業会が実施）⁸⁾。この際、流電陽極の陽極発生電流、陽極周辺に設置した鋼材試験片の電位の連続モニタリングも行っていた。ここでは、このモニタリング結果に着目して考察を行う。

(2) 調査結果

1) 電位および陽極発生電流の経時変化

図-2.2 に陽極発生電流の経時変化を示す。時間とともに電流が低減し、定常値に収束していることが分かる。なお、設計時に想定されている定常値は初期値の50%（1.75A）であるが、経過30日でその値を下回り、300日後には17%程度まで低下していた。これは、定常時において電気防食の状態が非常に良好であることを示す。

図-2.3 に鋼管杭表面に設置された鋼材試験片（深度-2m）の電位の時間変化を示す。防食管理電位（-0.8V）を大きく下回っており、電気防食の状態が非常に良好であることが分かる。

なお、これらの図から分かるように電気防食特性には若干の季節変動がある。2.2.3でも述べるが、一般に、水温が低い時には溶存酸素が増えるため、陽極発生電流は増加する。

2) 陽極の消耗量および寿命予測

図-2.4 に陽極消耗率の時間変化を示す。なお、図-2.3の陽極発生電流の調査結果に対し、1.に示した式(1)を基にして計算したものである。図中の点線は、これまでの実測値を直線近似し、将来予測したものである。今回対象の陽極の設計耐用年数は35年であるが、計算上では109年で完全消耗と計算された。

2.2.3. ジャケット部での電位、電流モニタリング

(1) 概要

羽田D滑走路のL1 および A14 ジャケットでは、設置された陽極（初期電流量 $I_0=3.5\text{A}$ ）に防食電流測定装置（シヤント抵抗）を取付け、陽極から発生する電流および鋼材の電位の経時変化をモニタリングしていた（羽田再拡張D滑走路維持管理JVが実施）⁷⁾。この際、電気防食の効果に及ぼすステンレス鋼被覆の影響を確認するため、防食電流測定装置および照合電極（海水塩化銀電極）は、上部

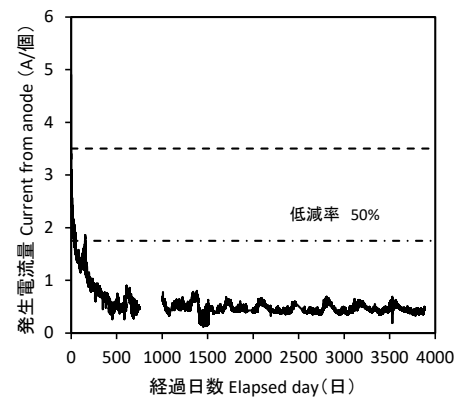


図-2.2 陽極発生電流の時間変化（G杭）

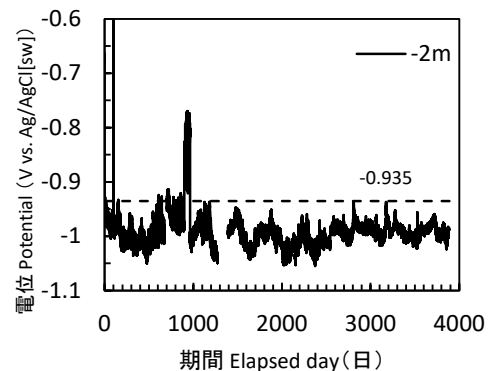


図-2.3 電位（鋼材試験片（-2m）の時間変化（G杭）

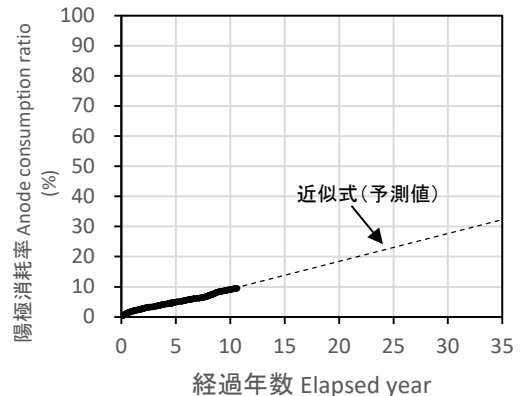
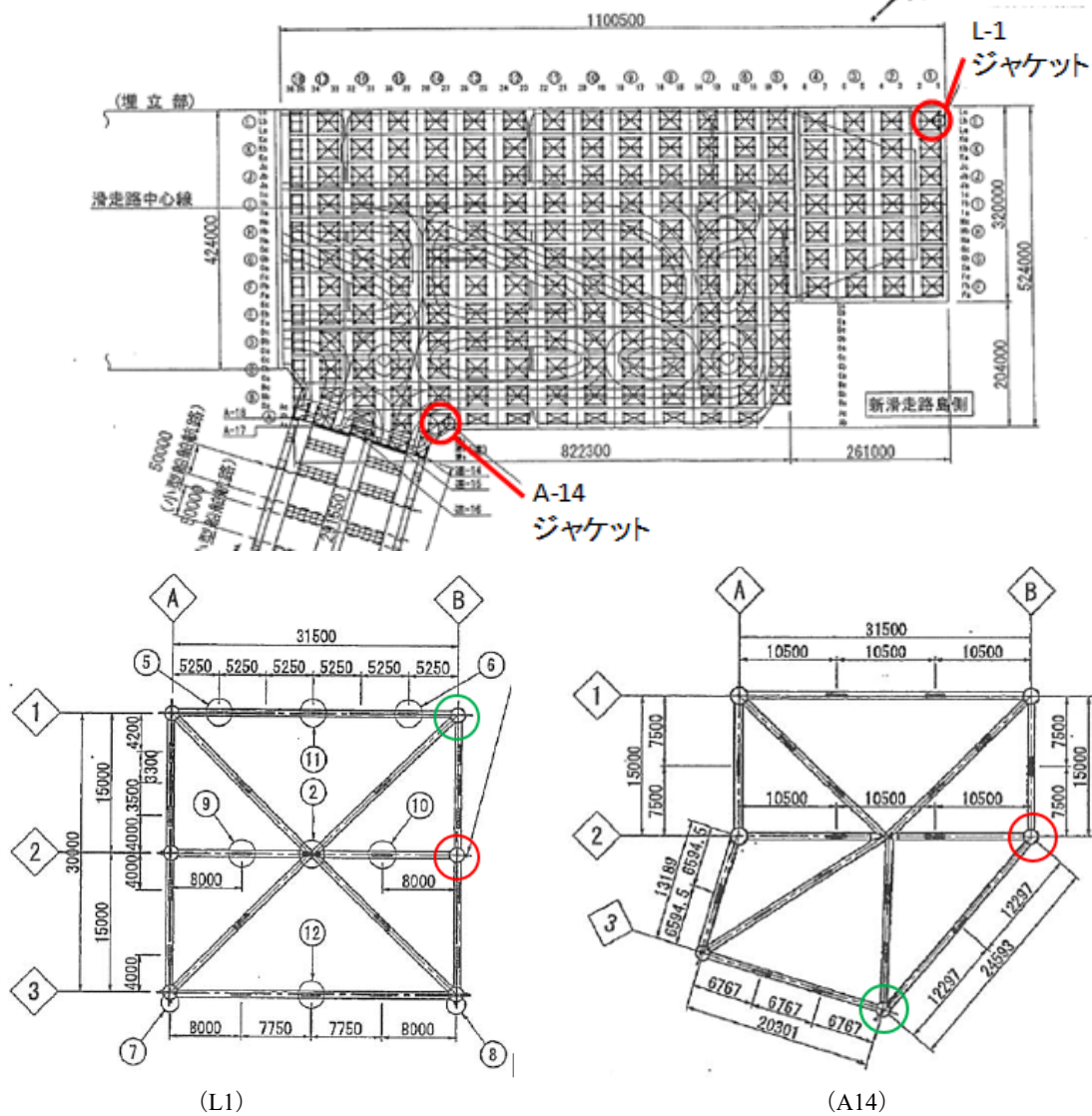


図-2.4 陽極消耗率の時間変化（G杭）



○● : 2010年測定箇所 (赤○ : 竣工後から連続モニタリング実施)

図-2.5 モニタリングを実施したジャケット位置図

(水面近く)と下部(海底面近く)の2か所に設置されている。測定開始日は、L1ジャケットは2009/4/30、A14ジャケットは2008/3/17である。調査位置図を図-2.5に示す。なお、2010年10月の台風時に断線したため、そこでモニタリングは終了している。

このモニタリング終了後、電気防食の状態が定常状態に至ったと考えられる2015年度(約5年経過)及び2020年度(約10年経過。2.4参照)の2時期において、電位および電流の測定も行った。なお、電流の測定は、「水中クランプメータ(付録B参照)」を用いて実施した。

(2) 調査結果

1) 電位および陽極発生電流の経時変化

a) 連続モニタリング

A14ジャケットにおける鋼材の電位および陽極発生電流の経時変化を図-2.6に、L1ジャケットにおける鋼材の電位および陽極発生電流の経時変化を図-2.7に示す。なお、A14については、季節変動の影響を確認するため、2009/3~2010/3の1年間の変化を拡大して示した。

陽極発生電流は、L-1ジャケットにおいて、初期に設計値(初期電流量 $I_0=3.5A$)を上回る値を示している。また、A-14に比べて大きな電流が流れている。これは、L-1ジャケット部においては、河川水の流入の影響や、波浪の影響を受け、鋼材を防食状態にするためにより多くの電流を

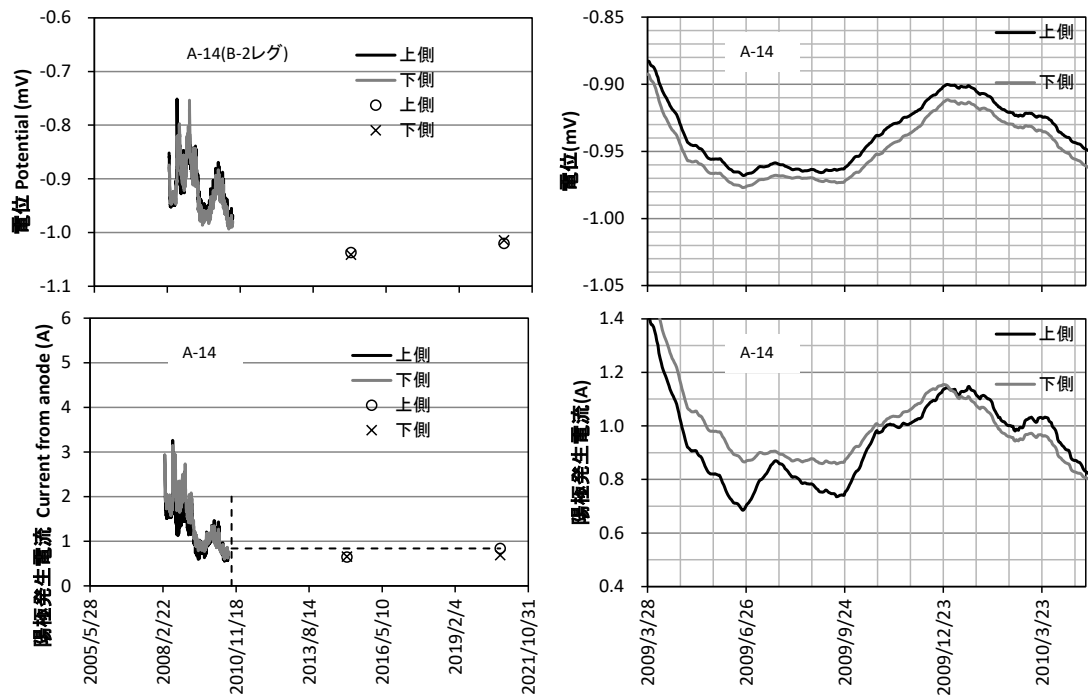


図-2.6 電位および陽極発生電流の経時変化 (A-14)
 (左：全体，右：2009/3～2010/3 の1年間の変化)

必要としたものと考えられる。しかし、電流値は時間とともに徐々に低下し、1年程度経過した段階では、L-1 および A-14 のいずれも設計値の 1/2 (50%) 以下の 1.0A 以下まで低減している。この電流量の低下は、鋼材表面にエレクトロコーティング (石灰質皮膜) が形成されたためである。

鋼材の電位は、初期の、特に冬季において、防食管理基準である $-800\text{mV vs. Ag/AgCl[sw]}$ (以下省略) を満足しておらず、鋼材が十分な防食状態でないことが分かる。しかし、時間とともに電位は低下し、2年目以降は $-900\sim-1000\text{mV}$ の間を推移している。

また、鋼材の電位は季節変動しており、冬季に貴側 (プラス側) に、夏期に卑側 (マイナス側) に推移していることがわかる。A-14 の 2010 年の 1 月の平均電位と 7 月の平均電位を比較すると、約 80mV 程度の差が生じている。電位が季節変動する理由としては、低温時に海水中の溶存酸素が増加し、カソード反応 (酸素の還元反応) が増加するためと考えられている⁹⁾。

b) 定常状態における電流の測定

図-2.6 および図-2.7 中の 2015.1 および 2020.10 の計測値は「水中クランプメータ」による測定値である。各 2 点のみではあるが、電流及び電位いずれも設計で想定される値より小さい値で落ち着いていた。

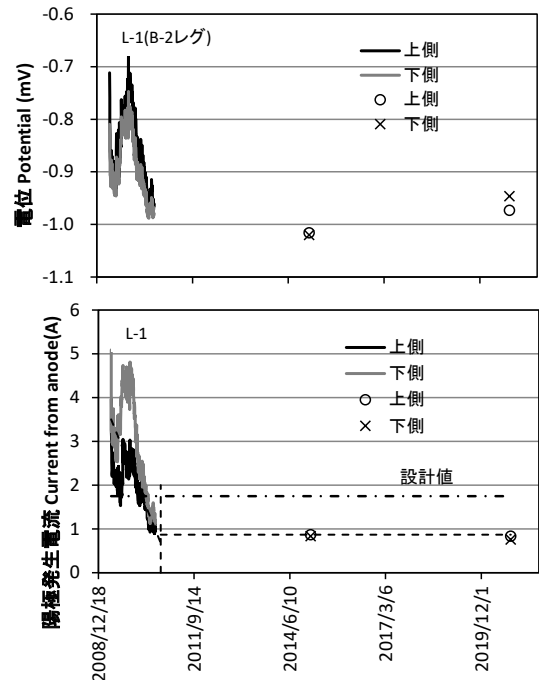


図-2.7 電位および陽極発生電流の経時変化 (L-1)

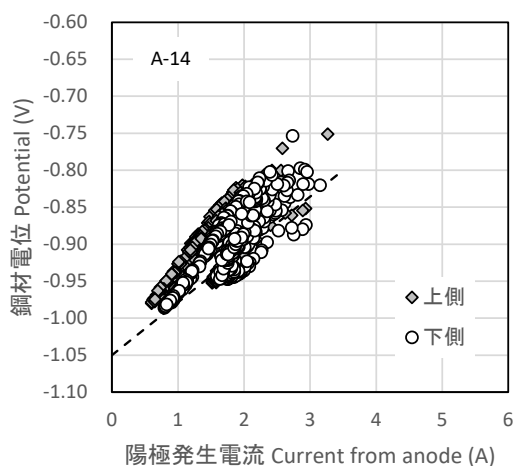


図-2.8 陽極発生電流と鋼材電位の関係 (A-14)

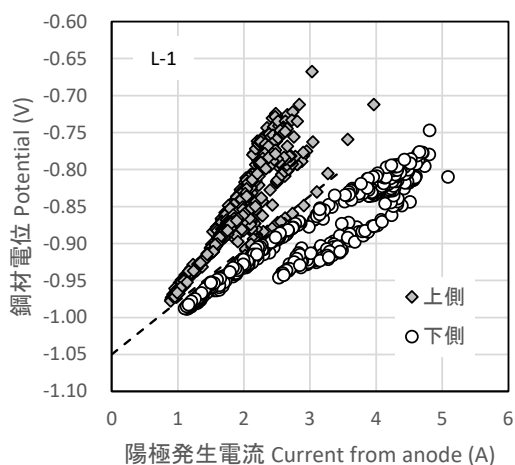


図-2.9 陽極発生電流と鋼材電位の関係 (L-1)

2) 陽極発生電流と電位の関係

図-2.8 および図-2.9 に陽極発生電流と電位の関係を示す。両者の間には、理論的に一次式の関係が成り立つ。ばらつきはあるものの、切片を有する一次式の相関関係がみられる。このことは、電位の値が防食管理電位 (-800mV) よりマイナス側であるほど、陽極発生電流の値が小さく、陽極の消耗速度は遅いことを意味する。逆に言うと、定常時において、電位の値が防食管理電位に近いと電流の値は大きく、陽極の消耗速度が速くなっていることを意味する。維持管理時においては、この点に留意する必要がある。

図-2.10 に 2015.1 の計測時における電流低減率 (= 測定時の陽極発生電流/初期の陽極発生電流) と電位の関係を示す。概ね理論線付近の値を示した。電位の値を指標と

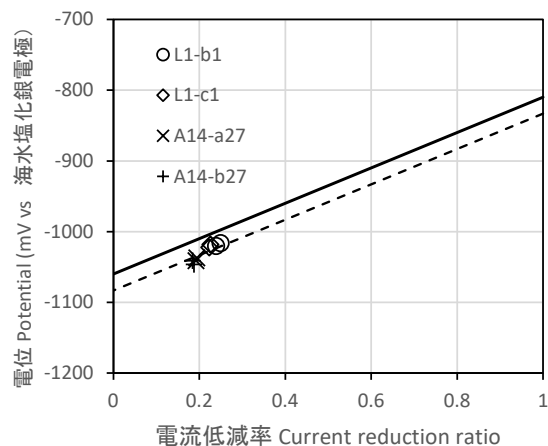


図-2.10 陽極発生電流と鋼材電位の関係
(2015.1 測定時)

して陽極の残存寿命が設計耐用年数を満足するか否かを判定できる可能性⁵⁾⁷⁾が、今回の測定結果からも示唆された。

3) 陽極の消耗量および寿命予測

対象の陽極に対して、2020 年度時点における陽極消耗量の測定 (2.4 参照) および寿命予測を行った。対象は、L1 ジャケットと A14 ジャケットに取付けた各 2 個の陽極とした。現状の消耗量の予測結果を表-2.1、寿命を予測した結果を表-2.2 に示す。

なお、図-2.6 および図-2.7 において、連続モニタリング終了時までには測定値の時間積分値、連続モニタリング終了時以降は 2015.1 と 2020.10 の計測値の大きい方の値で収束したと仮定し、電流の積分値、そして陽極寿命 $L_{e,c}$ を算出した。

陽極消耗量の測定値 (2020.10 時点) については、周長測定から求めた実測値の方が、計測値から求めた予測値を若干上回っているが、概ね同様な値を示した (なお、測定対象の陽極は同一のものではない。)

推定寿命については、いずれの部材においても設計陽極寿命 35 年以上の推定結果となった。なお、連続モニタリング終了時以降も、電流は季節変動していると考えられる。なお、前述のように、一般に低温時 (冬) に大きな電流が流れる傾向がある。電流の季節変動を考慮し、電流値を +0.4 (東京港・大井埠頭ジャケット式栈橋での電流測定値の最大値と最小値の差⁵⁾) した場合の予測値、2020 年度測定値の最大値 (1.7A) を基にした予測値も表中に示した。後者の値の場合でも 35 年 (設計値) 以上と推測された。

上記の結果より、対象箇所の陽極の寿命は設計値を満

表-2.1 L-1 およびA-14における現状の陽極消耗量の予測結果と実測値

		A14			L1		
		上側	下側	実測値 (下側)	上側	下側	実測値 (上側)
計測値	定常値(A)	0.84	0.69		0.87	0.84	
	W(kg)	38.2	34.4	42.2	37.8	40.7	40.3
計測値 +0.4(A)	定常値(A)	1.24	1.09		1.27	1.24	
	W(kg)	51.8	48.0		51.3	54.2	

表-2.2 L-1 およびA-14における陽極の寿命推定結果

		A14		L1	
		上側	下側	上側	下側
計測値	定常値(A)	0.84	0.69	0.87	0.84
	T(年)	72.5	87.8	69.3	72.3
計測値 +0.4(A)	定常値(A)	1.24	1.09	1.27	1.24
	T(年)	49.9	56.4	47.9	49.3
今回 最大値	定常値(A)	1.7	1.7	1.7	1.7
	T(年)	37.0	36.8	36.1	35.4

足する可能性が高いと考えられる。

2.2.4. まとめ（連続モニタリング）

1) 連絡誘導路部（単杭・重防食被覆）

電流値は時間とともに低下し、設置後 1 年経過時において、設計での想定値を大幅に下回る約 1A 以下（低減率：30%以下）まで低減した。

2) A14 および L1 ジャケット（ステンレス被覆）

電流値は時間とともに低下し、設置後 1 年経過時において約 1A 以下（低減率：30%以下）まで低減した。また、2015 年度及び 2020 年度において、水中クランプメータによって推定した実際のアルミ陽極の発生電流は、0.6～0.9 A 程度以下（低減率：25%以下）まで低減していた。

以上の陽極寿命の予測結果より、設計陽極寿命 35 年よりも陽極寿命が伸びる可能性が高いと推測された。

また、電位の値は、維持管理電位（-800mV）を相当下回っていた。電位の値を指標として陽極の残存寿命が設計耐用年数を満足するか否かを判定できる可能性⁵⁾⁷⁾が、今回の測定結果からも示唆された。

2.3. 羽田D滑走路の維持管理時における定期点検診断結果

2.3.1. 調査概要

羽田D滑走路ジャケット部(図-2.11参照)には約2万個の電気防食用流電陽極(設計耐用年数35年)が設置されている。この維持管理のため、電位計測が2年に1回(1レグ/1ジャケット, 12年で1サイクル)実施されている。電位計測は、ポート上からの計測であること、ジャケットの数が多いため、簡易な測定とはいえ、かなりの負担(手間、コスト)が生じている状況である。

本調査では、海洋鋼構造物の電気防食における維持管理の省力化の検討を主目的として、羽田D滑走路ジャケット部および誘導路部における定期点検結果(電位測定

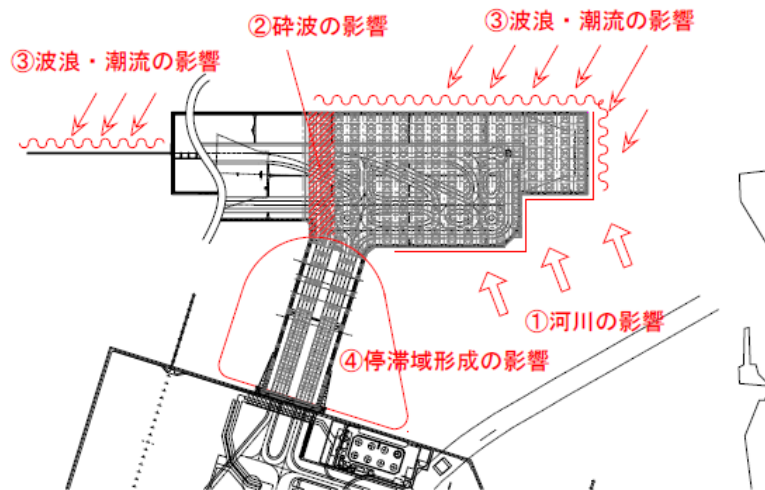
等)の整理および追加調査を行う。

2.3.2 現状の点検診断計画

D滑走路で実施している点検診断計画の概要を、一般定期点検診断と詳細定期点検診断に分け、以下に示す。なお、図-2.11に示すように、対象環境の違いにより、I~IVの4工区に分けられている。

(1) 一般定期点検診断(電位測定)

- ・方法:海上(ポート)から照合電極を投げ込んで測定。導通はステンレス被覆の上に磁石式の端子を設置することで確保。
- ・数量:1レグ/1ジャケット。水深2m間隔を基本。



	I 工区										II 工区										
	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1			
L	L18	L17	L16	L15	L14	L13	L12	L11	L10	L9	L8	L7	L6	L5	L4	L3	L2	L1	L		
K	K18	K17	K16	K15	K14	K13	K12	K11	K10	K9	K8	K7	K6	K5	K4	K3	K2	K1	K		
J	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2	J1	J		
I	I18	I17	I16	I15	I14	I13	I12	I11	I10	I9	I8	I7	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I		
H	H18	H17	H16	H15	H14	H13	H12	H11	H10	H9	H8	H7	H6	H5	H4	H3	H2	H1	H		
G	G18	G17	G16	G15	G14	G13	G12	G11	G10	G9	G8	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1	G		
F	F18	F17	F16	F15	F14	F13	F12	F11	F10	F9	F8	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1	F		
E	E18	E17	E16	E15	E14	E13	E12	E11	E10	E9	E8	E7	E6	E5	E	IV 工区					
D	D18	D17	D16	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D						
C	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C						
B	B18	B17	B16	B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B						
A	A18	A17	A16	A15	A14	A13	A12	A11	A10	A9	A8	A7	A6	A							
連			R16	R15	R14																
	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1			

(↓連絡誘導路)

図-2.11 D滑走路部のジャケットの配置図および名称

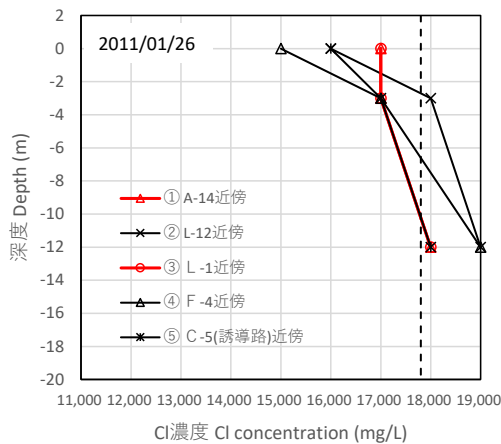


図-2.12 Cl 濃度の深度分布 (2011.1)

・頻度：2年に1回（1ジャケットで、12年で6本のレグを1周することとなる（図-4.1参照））

(2) 詳細定期点検診断

1) 陽極脱落の確認

- ・方法：目視（潜水士）で全数確認
- ・数量：全ジャケット（198基：棧橋部）の10%（20基/1回を基本）
- ・頻度：5年に1回（10回（50年）で1周）

2) 陽極消耗量

- ・方法：（潜水士による）陽極の周長測定。
- ・数量：環境区分毎に抜き取り。2基×10個=20個×5区分=計100個
- ・頻度：20年目、31年目（設計耐用年数（35年）で更新予定）

2.3.3. 定期点検診断結果

(1) 概要

羽田D滑走路の維持管理時において、定期的に鋼材の電位が測定されている。この測定結果を整理し、実際の構造物における電気防食の状態についての評価を試みる。また、5年毎に陽極取付状況の確認が行われている。その結果を基に、陽極脱落の可能性についても考察する。

(2) 水質測定

定期点検時に実施された、塩化物イオン(Cl)濃度の深度分布を図-2.12に示す。なお、海水を採取してから行った。いずれも表層付近で低濃度になっている。これは河川の混入の影響によるものと考えられる。

(3) 電位測定

1) 測定概要

D滑走路部のジャケットの配置図および名称を図-2.11に示す。計測対象のレグは1レグ/1ジャケットであり、2年ごとに異なるレグについて計測を行い、12年で1ジャケット全レグの計測が終了する計画である。

維持管理JVによる電位の計測時期は、初期値(H22.8頃)、H23.1頃、H24.11頃、H26.9頃、H28、H30、R2の計7回である。ただし、H24.11の際においては異常値が計測された。原因は明確でないが、過去の記録によると、「照合電極のケーブル内に水が浸透していた可能性が考えられる」とある。よって、H24年度のデータについては検討の対象外とした。

計測は、小型船舶で杭にロープを取り船舶を固定させた状態で行われた。この状態で、測定用端子を磁石を用いて鋼管杭表面（気中部）に取付け、照合電極（海水塩化銀電極）を海水中に投げ込み、鋼管杭の表面付近に下ろし、所定の深度にて計測された。この際、照合電極と鋼材表面の距離は20～50cm程度であった。

計測深度は、初期値（H22.8）においては1m間隔、H23.1以降においては、維持管理計画の見直しにより、間隔を2m程度に広げられている。

2) 電位測定結果（R2年度まで）

定期点検時に測定された電位の深度分布とその経時変化を図-2.13に示す。なお、代表として、最も多摩川側（第1列）、最も埋立側（第18列）、両者の中間（第6、10列）の4列を抽出し、さらに最も沖側（K,L行）、最も陸側（A,B行）、両者の中間（F,G行）の3行のデータを抽出した。

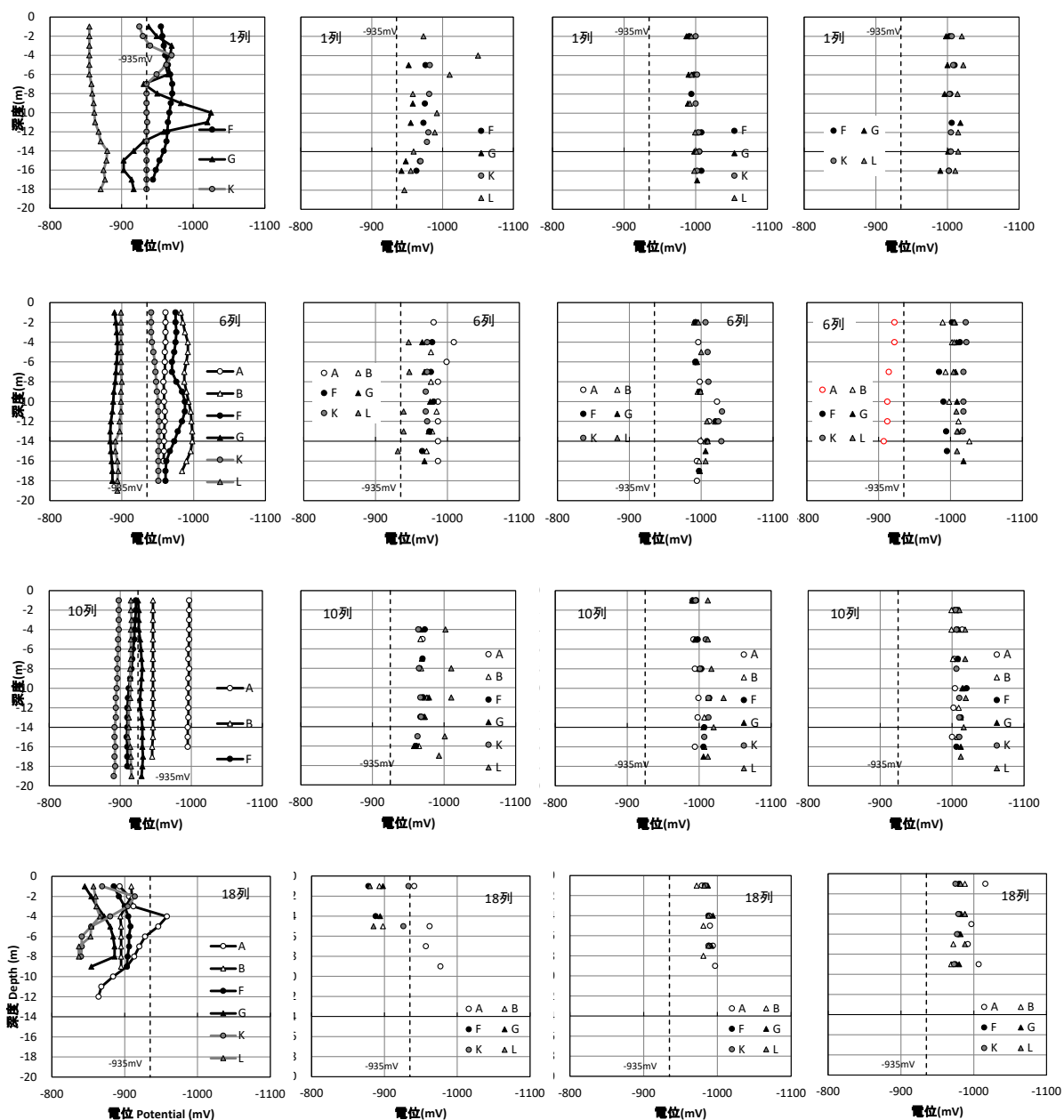
ほぼ全てのデータが、初期値(H22.8)と比べ、マイナス側に大きく変化している。これは、時間が経過することで、鋼材表面におけるエレクトロコーティングの生成が進行したためである。

なお、R2年度のA-6（図-2.11参照）の計測値（図-2.13中の赤丸○：6列-A）のみ、-935mV（設計寿命を満足しているかを判断する指標として提案されている値⁷⁾、1章参照）を上回っている。維持管理電位(-800mV)は満足しているため、現時点では全く問題ないが、この値が真値であったとしたら、陽極の消耗速度が設計値よりも若干早い可能性がある。

図-2.14～図-2.16は、各ジャケットの電位の平均値を求め、各行（A～R行）毎、各列（1～18列）毎、各エリア（I～IV区）毎に整理したものである。場所によって電位の値に差が表れている。以下主な傾向を示す。

i) 各行の比較

- ・初期値(H22.8)においては最沖側のL行で値が最もプラ



(初期値：H22.8)

(H23.1)

(H26.9)

(R2.9)

図-2.13 電位の深度分布とその経時変化（定期点検時に測定）

ス側となっていた。河川水の流入、波浪等の影響が表れていたと考えられる。

・H23.1 時点の計測値においては、A 行を除いて、初期値よりもマイナス側の値を示した。なお、初期値において最もプラス側の値を示していた L 行の値も他と同様の値を示した。時間が経過することで、鋼材表面におけるエレクトロコーティングの生成が進行し、良好な防食状態に達したと考えられる。

・H26.9 以降においては、各行とも -1000mV 程度の値を示した。非常に良好な防食状態に達している。なお、R、A 行（河口側）の値が他の値と若干傾向が異なる傾向にある。

ii)各列の比較

・初期値 (H22.8) においては、明確な場所の違いは見られなかった。

・H23.1 時点の計測値においては、16～17 列の値を除い

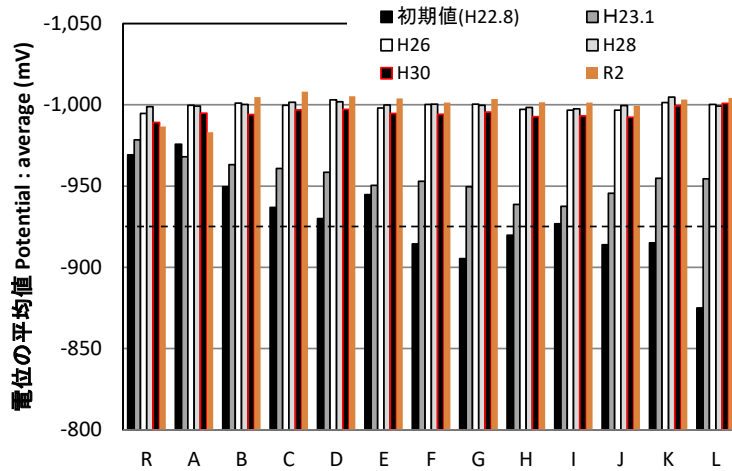


図-2.14 各行 (A～R 行) における電位の平均値

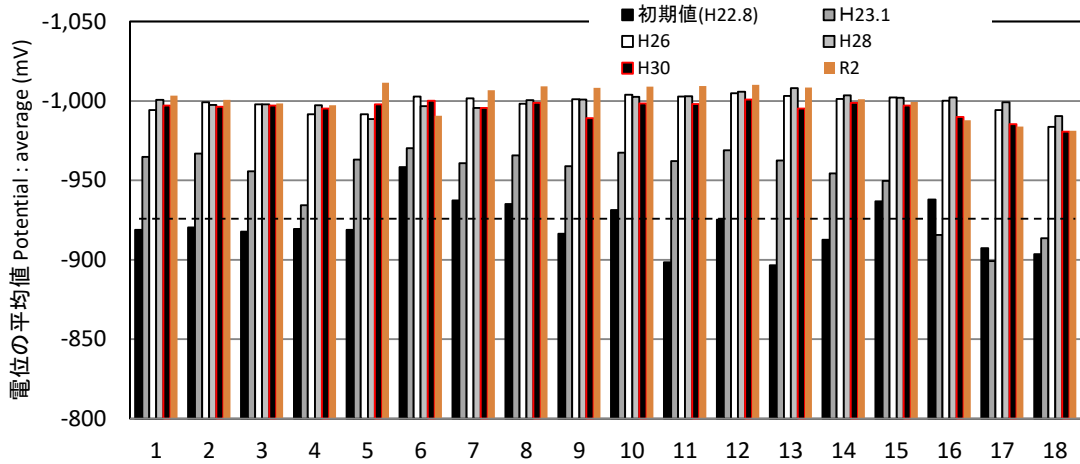


図-2.15 各列 (1～18 列) における電位の平均値

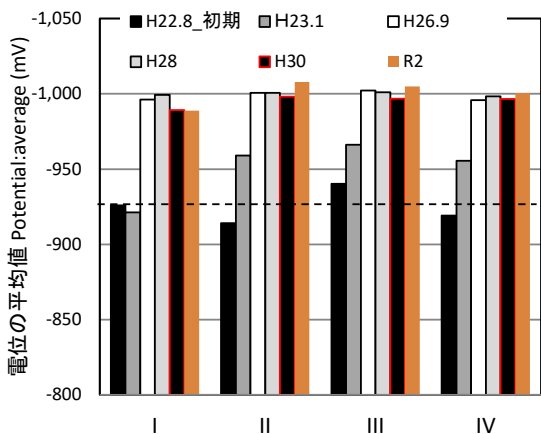


図-2.16 各工区 (I-IV 工区) における電位の平均値

て初期値よりもマイナス側の値を示した。また、1～15 列の値は-935mV を下回り、非常に良好な電気防食状態を示した。なお、16～18 列の値は-935mV を上回る値を示した。

環境が異なることや、ジャケットの構造形式の違い、構造形式の違いによる電気防食設計の違い等が考えられる。

- ・ H26.9 以降においては、各列とも-1000mV 程度の値を示した。非常に良好な防食状態に達している。なお、16～18 列および 6 列の値が他の値と若干傾向が異なる傾向にある(6 列は A-6 (前述) の測定値の影響を受けていると推測)。

iii)工区ごとの比較

- ・ 初期値 (H22.8) において、III 区の値のみが-935mV を下回る、非常に良好な電気防食状態を示した。

- ・ H23.1 時点の計測値においては、I 区 (埋立側) の値のみが初期値とあまり変化がなく、-900mV 程度の値を示した。その他の工区の値は-935mV を下回り、非常に良好な電気防食状態を示した。工区ごとの違いの理由としては、各列の比較と同様に、環境が異なることや、ジャケットの構造形式の違い、さらに構造形式の違いによる電気防食設計の違い等が考えられる。

・H26.9以降においては、各工区とも-1000mV程度の値を示した、非常に良好な防食状態にある。

iv)電位の経時変化

電位の平均値の経時変化を図-2.17に示す。定常値に至っていることが分かる。

また、全データの平均値 μ と標準偏差 σ を正規分布の式に代入して計算した、電位のばらつきの経時変化を図-2.18に示す。ばらつきが小さくなりつつ、電位が卑な方向にシフトしていたことが分かる。

温度が低い冬季の場合、常時よりもプラス側に、温度が高い夏季においては、値がマイナス側に移行することがある(図-2.6参照)。それを差し引いても、H26.9に測定された値からは、鋼材の状態は非常に良好な電気防食状態であると考えられる。よって、設計値よりも陽極消耗速度は相当遅いと考えられる。

電位の測定値を基に考察すると、各工区の陽極の寿命

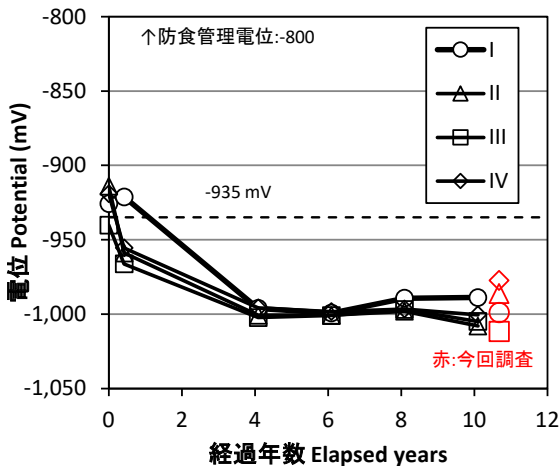


図-2.17 電位の平均値の経時変化 (工区毎)
※2.4の調査結果も追記

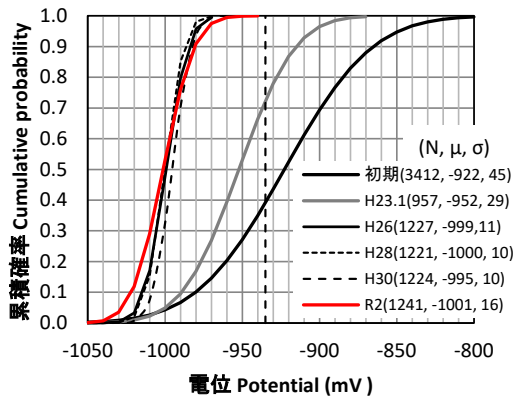


図-2.18 全電位のばらつき*の経時変化

*平均値 μ と標準偏差 σ を正規分布の式に代入して計算

は設計値(35年)より相当上回るものと推測される。なお、2020年度に陽極消耗量を測定しており、その結果については2.4で説明する。

(4)陽極取付状況の確認(栈橋部を中心に)

1)概要

維持管理計画において、5年に1回、全ジャケットの10%(20基を基本)について、陽極の全数確認を行うことになっている。「維持管理計画書 点検診断計画の概要」を以下および表-2.3に示す。

＜維持管理計画書 点検診断計画 抜粋＞
 ・陽極取付状況の確認方法(陽極の脱落有無点検)
 ジャケットに取付けた全ての電気防食用陽極について、潜水士により脱落、取付け不良の有無を確認する。(図-2.19参照)
 ジャケット総数198基に対して5年毎に10%を対象に点検を実施する。

2)点検結果

栈橋部については、H26年度、R元年度に20基ずつ調査が実施されている。実施した箇所および数量を図-2.20に、実施状況の一例を図-2.21に示す。この調査の結果、「陽極の脱落は確認されなかった」と報告されている。脱落の原因の特定や将来の予測は困難であるが、実態

表-2.3 維持管理計画 点検診断計画 下部構造

(2)下部構造(水中部レグ、ブレース)栈橋部・連絡誘導路部

点検対象部位		点検項目		頻度	密度	点検方法
下部構造 水中部	下部ジャケット構造部材	鋼構造の損傷	部材の変形、損傷の有無	1回/5年	10% 栈橋部20基 連絡部2基 場周2基	目視(水中)
		耐食ライニングの損傷	破損、取付け不良の有無			部材の変形、損傷点検と同時に実施
	電気防食	電気防食用陽極の損耗	脱落、取付け不良の有無	部材の変形、損傷点検と同時に実施	目視(水中)	

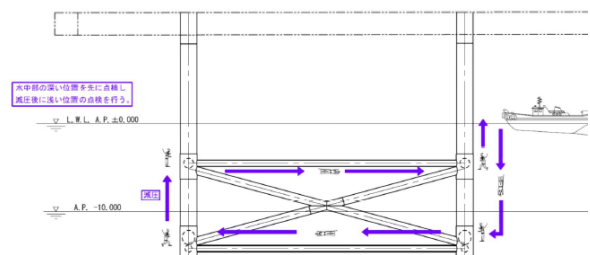


図-2.19 陽極取付状況の確認方法

L-18	L-17	L-16	L-15	L-14	L-13	L-12	L-11	L-10	L-9	L-8	L-7	L-6	L-5	L-4	L-3	L-2	L-1
42	81	81	81	81	81	81	81	80	80	80	79	79	81	81	79	79	79
K-18	K-17	K-16	K-15	K-14	K-13	K-12	K-11	K-10	K-9	K-8	K-7	K-6	K-5	K-4	K-3	K-2	K-1
41	81	81	81	81	81	81	80	79	79	79	79	79	81	81	79	79	79
J-18	J-17	J-16	J-15	J-14	J-13	J-12	J-11	J-10	J-9	J-8	J-7	J-6	J-5	J-4	J-3	J-2	J-1
46	87	85	85	85	85	85	84	84	84	83	83	83	84	81	79	79	79
I-18	I-17	I-16	I-15	I-14	I-13	I-12	I-11	I-10	I-9	I-8	I-7	I-6	I-5	I-4	I-3	I-2	I-1
50	89	88	88	88	88	88	88	87	87	87	87	86	86	81	78	78	78
H-18	H-17	H-16	H-15	H-14	H-13	H-12	H-11	H-10	H-9	H-8	H-7	H-6	H-5	H-4	H-3	H-2	H-1
50	89	88	88	88	88	88	86	86	87	86	86	86	85	80	78	78	78
G-18	G-17	G-16	G-15	G-14	G-13	G-12	G-11	G-10	G-9	G-8	G-7	G-6	G-5	G-4	G-3	G-2	G-1
50	88	88	87	88	87	88	87	85	82	86	86	86	84	80	78	78	78
F-18	F-17	F-16	F-15	F-14	F-13	F-12	F-11	F-10	F-9	F-8	F-7	F-6	F-5	F-4	F-3	F-2	F-1
50	88	87	87	87	81	85	87	86	86	86	86	86	84	80	78	78	78
E-18	E-17	E-16	E-15	E-14	E-13	E-12	E-11	E-10	E-9	E-8	E-7	E-6	E-5				
50	87	86	87	87	86	86	86	86	86	86	85	85	82				
D-18	D-17	D-16	D-15	D-14	D-13	D-12	D-11	D-10	D-9	D-8	D-7	D-6	D-5				
50	86	86	86	86	86	86	86	86	86	85	85	85	81				
C-18	C-17	C-16	C-15	C-14	C-13	C-12	C-11	C-10	C-9	C-8	C-7	C-6	C-5				
45	85	85	85	86	83	83	84	85	85	85	85	85	81				
B-18	B-17	B-16	B-15	B-14	B-13	B-12	B-11	B-10	B-9	B-8	B-7	B-6	B-5				
26	72	84	85	85	85	86	86	85	85	85	84	84	79				
A-18	A-17	A-16	A-15	A-14	A-13	A-12	A-11	A-10	A-9	A-8	A-7	A-6					
37	84	54	83	79	50	51	51	50	50	50	50	50					
	R-16	R-15	R-14														
	89	58	53														

H26
R1

図-2.20 陽極取付状況調査の実施箇所および調査対象の陽極数量（栈橋部）

（H26年度（5年経過）：1,562個，R1年度（10年経過）：1,504個）



図-2.21 H26 調査結果一例

をベースに評価すると、10年間で脱落したものが約1500個中0個ということ、10年間で脱落する確率は1/1500以下（0.066%以下）であったと言い換えることができる。

ここで、陽極が脱落する確率が時間の経過に関わらず変化しない（一定）と仮定すると、以下のように計算される（実際は、時間とともに溶接部が経年劣化し、脱落する確率は増大すると考えられる）。

- ・ 供用期間20年： $1/1500 \times 2 = 1/750$ 以下（0.13%以下）
- ・ 供用期間100年： $1/1500 \times 10 = 1/150$ 以下（0.66%以下）

標準的なジャケット1基においては、90個程度の陽極が設置されている。上記の脱落確率をこれに乘じると、供用期間100年において、1ジャケット内で陽極が脱落する個数は、 $90 \text{ 個} \times 0.66/100 = 0.60 \text{ 個}$ となり、計算上は、1ジャケット90個において、100年で脱落するのは1個未満となる。ここで、付録C 2.3の既往の調査事例（数値解析の事例）において、1ジャケット内において、陽極が2個脱落しても防食機能は直ちには著しく低下しないという解析結果もある。

羽田ジャケット栈橋において、陽極は陸上での溶接（≡工場溶接）であり、溶接の信頼性は、水中溶接の場合と比べて高い。また、陽極の設置位置は、最浅で水深-2.0mであり、漂流物が衝突する可能性は極めて低いと考えられる。ジャケット式栈橋部の海中に衝突する可能性がある漂流物があるとしたら、それはかなり大型のサイズのものであり（例えばコンテナ）、これらが衝突した場合については、その実態は確実に把握できると考えられる。この衝突が判明した際に、陽極の確認を行うことで、脱落の判定が可能となる。

上述のように、陽極が脱落する確率について、正確に求めることは難しいが、今回の調査結果や上記を踏まえる

と、かなり低いということは明らかである。また、電気防食の維持管理（点検手法や頻度の設定等）は、陽極の脱落の可能性を踏まえつつ、検討することでより合理化が図られる可能性もある。

3) 陽極取付確認に関する将来の点検方法

各分野で検討がなされている水中ロボット類の活用は、点検作業（潜水作業）の省力化に大いに貢献できる可能性がある。

2.3.3 まとめ

定期点検診断の結果を以下にまとめる。

(1)水質

河川水の混入を受け、表層付近のCl濃度は若干低下している。一方、海底付近になると、通常の海水濃度と同様であった。

(2)電位

時間の経過とともに、全体的にマイナス側に移行し、かつばらつきも少なくなっていた。これは、時間が経過することで、鋼材表面におけるエレクトロコーティングの生成が進行したためと考えられる。

なお、現状で平均値が-1000mV程度であり、最小値も-950mVを下回っている。電気防食の状態は非常に良好であり、設計寿命を満足する可能性が高いと推測された。

(3)陽極取付状況の確認

潜水士による目視確認により、多数の陽極における陽極の現況（脱落の有無）に関する情報が得られた。5年経過時で1562個、10年経過時で1504個（5年経過時と異なる場所）を調べているが、それぞれ全く脱落が確認されなかった。たとえば確率的に表すと、陽極が脱落する確率は、それぞれ5年間で $1/1562(=0.00064)$ 以下、10年間で $1/1504(=0.00066)$ 以下と表される。同一施設の別のジャケット式構造物においても、脱落の可能性は非常に低いと予想される。

なお、今回のジャケット式栈橋の場合、船を係留することではなく、陽極に船が衝突する可能性は非常に低い。木材などの漂流物についても、水面付近を漂うため、水深-2m付近に設置されている陽極に作用する可能性は非常に低い。よって、衝突に起因して陽極が脱落する可能性は非常に低い。今回の調査結果は、このことを裏付けるものである。

2.4. 維持管理の高度化を目的とした詳細調査結果

2.4.1 概要

陽極の寿命予測に必要な「陽極消耗量」の測定は、潜水士が必要な作業となる。ここで、「電位」と「陽極発生電流（時間積分すると陽極消耗量が算出可能）」の間には、一般に線形の相関関係があるとされる。ただし、その関係は環境、構造形式等によって変化する（ばらつく）。この両者の相関関係が把握できれば、「電位」から「陽極発生電流」を、さらには「陽極消耗量」をある程度の精度での推定が可能になる。

ここでは、電気防食が適用された鋼構造物の維持管理（特に点検診断手法）の高度化（簡素化）の検討を主目的として、ジャケット部および連絡誘導路部における各種の電気防食特性の把握を行う。

2.4.2 調査内容

(1) 調査箇所

調査箇所を図-2.22 に示す。調査対象のジャケット部（連絡誘導路部含む）は、環境区分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳから均等に選出した。また、ジャケット1基につき杭（レグ）を2本選定し、各2深度の陽極（計4個）を選定した。なお、連絡誘導路部の直杭（AおよびG杭の2本）は、2.2で説明した連続モニタリングの実施箇所である。

(2) 調査項目

a) 水質測定

投げ込み式の測定器を用い、塩化物イオン濃度と電気抵抗率（ Ωcm ）の深度分布を測定したが、精度の良い値

が得られなかった。そこで、過去の文献6)の結果を引用して掲載した。

b) 鋼管杭の電位分布

水面から照合電極を下ろし、鋼管杭の電位を深度方向に1m間隔で海底付近まで測定する。

- ・ジャケット部：10箇所×2本（鋼管杭）＝20箇所
- ・直杭部（連絡誘導路部）：2箇所×1本（鋼管杭）＝2箇所

c) 陽極の電位

潜水士により照合電極を陽極に当てて測定する。なお、e)陽極消耗量測定後（付着物を除去後）にも測定を行う。

- ・ジャケット部：10箇所×2本（鋼管杭）×2深度＝40箇所
- ・直杭部（連絡誘導路部）：2箇所×1本（鋼管杭）×2深度＝4箇所

d) 陽極発生電流

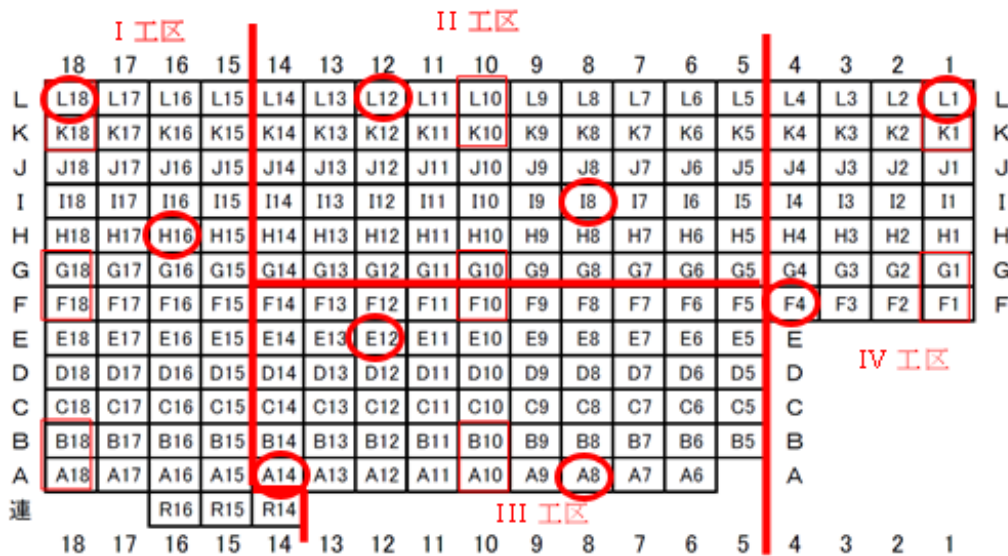
陽極発生電流を潜水士により水中クリップオン電流計を用いて測定する。

- ・ジャケット部：10箇所×2本（鋼管杭）×2深度＝40箇所
- ・直杭部（連絡誘導路部）：2箇所×1本（鋼管杭）×2深度＝4箇所

e) 陽極消耗量測定

陽極の電位を測定した1深度の陽極を設定し、付着生物などを除去後、全長および周長（3断面）を測定し、陽極消耗量を算定する。

- ・ジャケット部：10箇所×1本（鋼管杭）×1深度＝10箇所
- ・直杭部（連絡誘導路部）：2箇所×1本（鋼管杭）×1深度＝2箇所



(↓連絡誘導路)：C-6, 単杭部

図-2.22 D滑走路部のジャケットの配置図および名称

2.4.3 調査結果

(1) 水質

2010 年度に 2 か所で実施した、Cl 濃度および抵抗率の深度分布を図-2.23 に示す⁶⁾。先の図-2.12 と同様、表層付近で Cl 濃度が低下している。なお、Cl 濃度が最も低下している箇所でも、抵抗率はいずれも 30 Ω cm (清浄海域の場合²⁾) を下回っている。なお、汚染海域の場合の電気防食設計時には 35 Ω cm が用いられている²⁾。

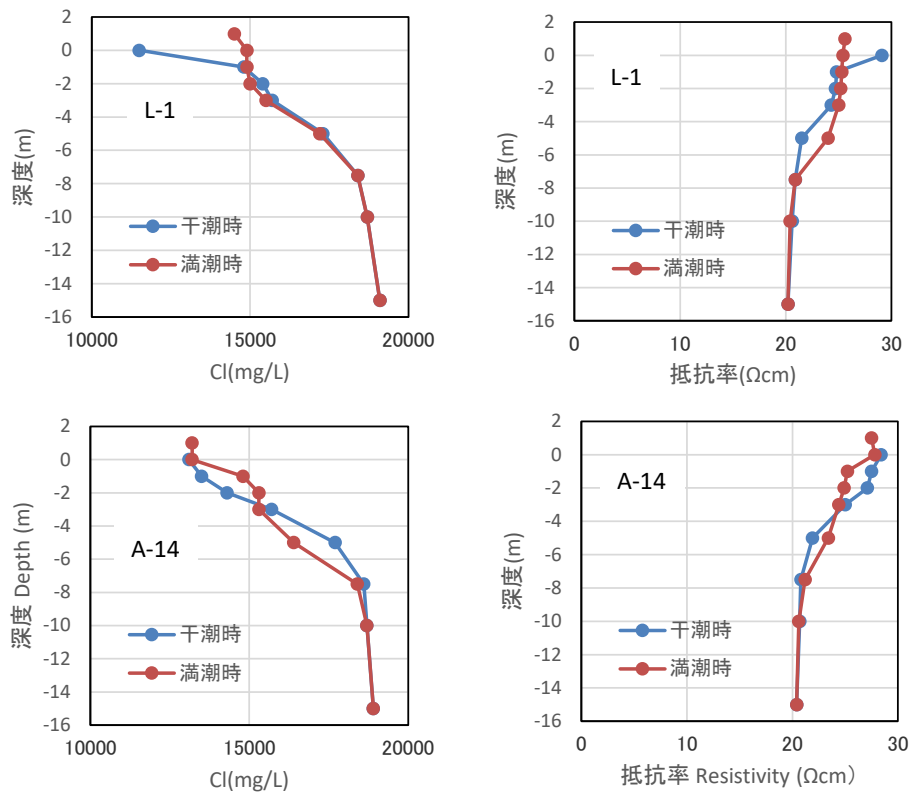


図-2.23 Cl 濃度，抵抗率の深度分布

(2) 電位

電位の深度分布を図-2.24 に示す。防食管理電位（-800mV）はすべて満足している。L-1の海面付近（4点）を除き、-935mV（1章参照）も満足している。

また、2.3の定期点検時に測定された電位の平均値の経時変化を示した図-2.17（前掲）の中に、図-2.24の各平均値の調査結果（各工区別）を追記した。全体として、2.3

の定期点検時の結果と比べて大きな違いは見られなかった。なお、IV工区（河口側）において、他工区に比べて若干プラス側の値を示した。河口付近では、河川水の流入を受けやすく、また、測定日付近は雨天が続いていたため、特に表層部においてC1が低濃度となり、電位がプラス側の値を示した可能性がある。

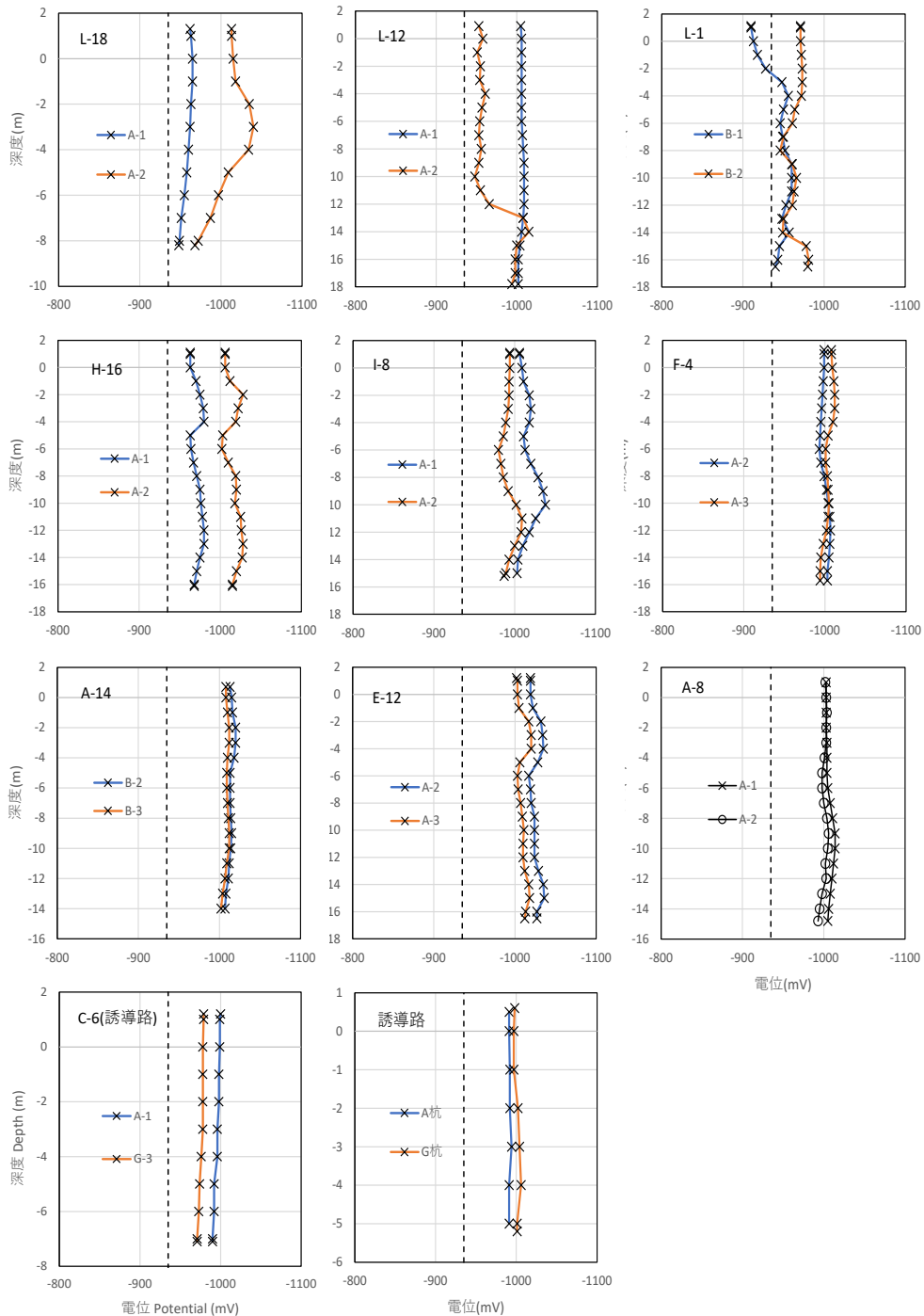
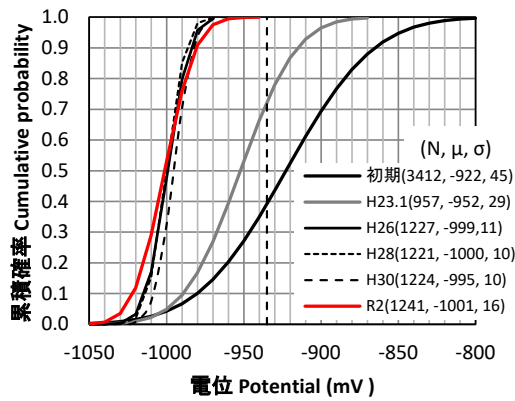
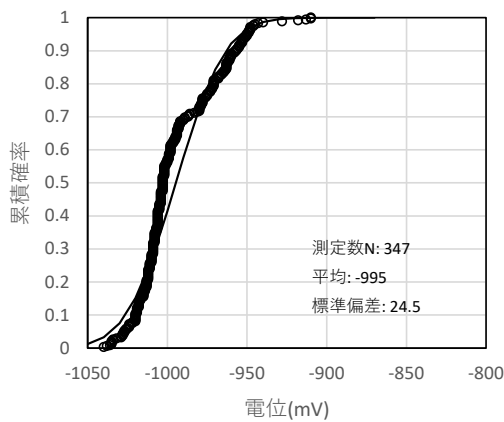


図-2.24 電位の深度分布（追加調査時）



(定期点検時) : 図-2.18 の再掲



(2020 年度調査結果)

図-2.25 電位のばらつき

図-2.25 に、電位のばらつきを、全データの累積確率分布として示した。図中の曲線は、全データの平均値 μ と標準偏差 σ を正規分布の式に代入して計算して求めたものである。なお、定期点検時の結果 (図-2.18) も再掲した。

2020 年度の調査結果は、定期点検診断時の結果と概ね同様な傾向を示した。ただし、直近の R2 年度の定期点検時の結果と比較して、 -950mV 付近のデータが若干増加している。理由の 1 つとしては、今回の測定日周辺において雨天が続いていたことが考えられる。

(3) 陽極発生電流

図-2.26 に陽極発生電流の測定値を示す。ばらつきは多いが、全て設計での想定値 (1.75 (A) : 電流低減率 0.5 に相当) を満足している。

図-2.27 は電流低減率 (=測定値/設計値 3.5A) と電位の関係を示したものである。直線は設計時に想定されている値 (1 章参照) である。直線から若干外れたものも多いが、大半 (=39/40 例=97.5%) の電位は -935mV を下回っていた。さらには、これらのケース (39/40 例) は、すべて電流低減率 0.5 を満足していた。以上より、電位の値を指標として陽極の残存寿命が設計耐用年数を満足するか否かを判定できる可能性⁵⁾⁷⁾が、今回の結果からも改めて示唆された。

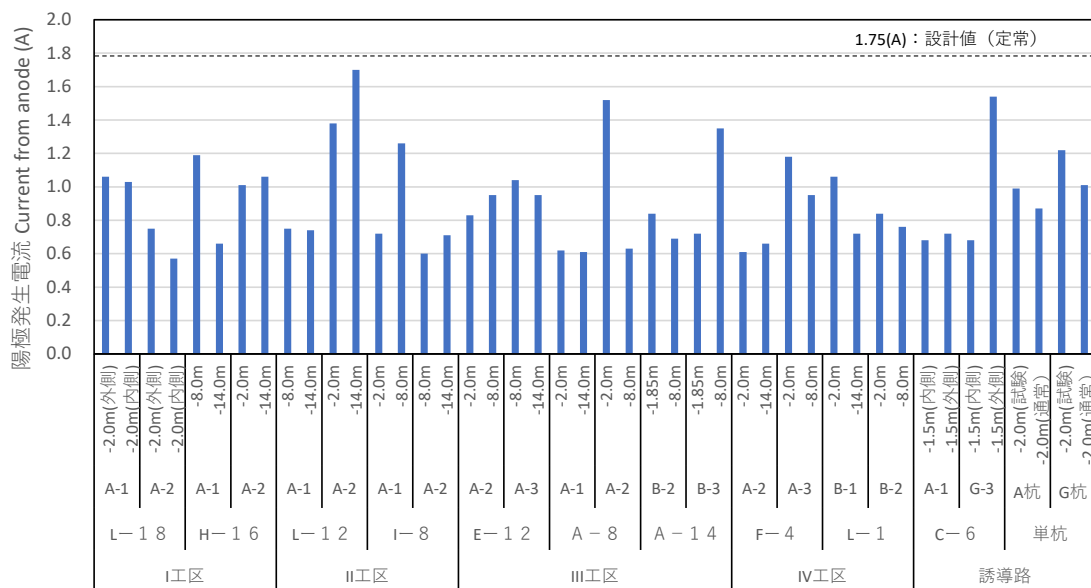


図-2.26 陽極発生電流の測定値

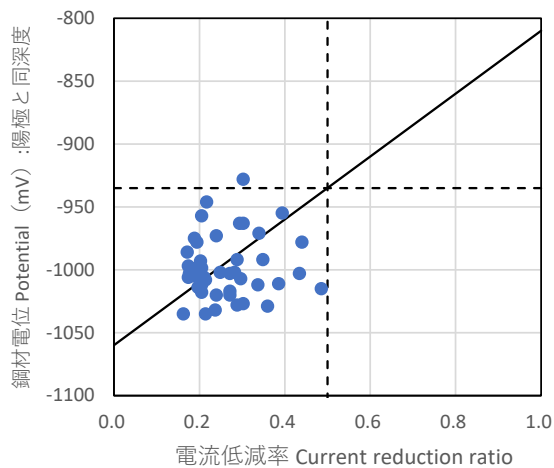


図-2.27 電流低減率と電位の関係

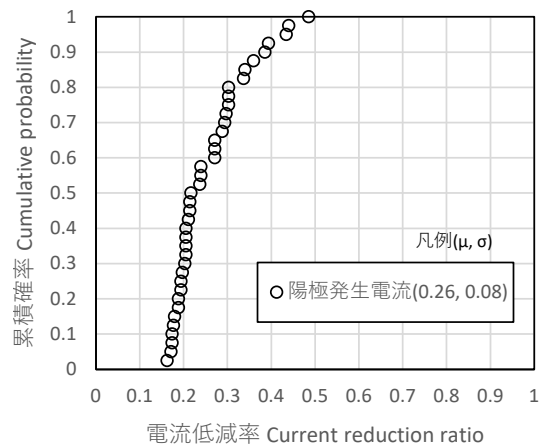
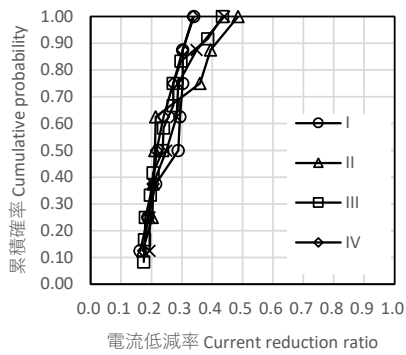
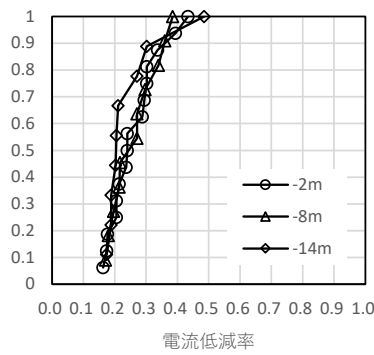


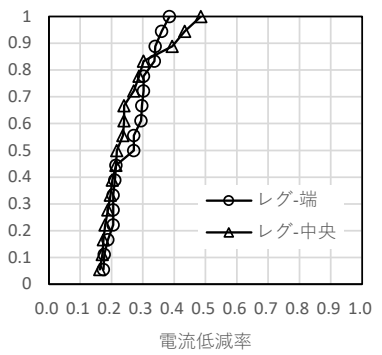
図-2.28 電流低減率の累積確率



i)工区別



ii)水深別



iii)レグの位置別

図-2.29 電流低減率の累積確率（工区別，水深別，レグの位置別）

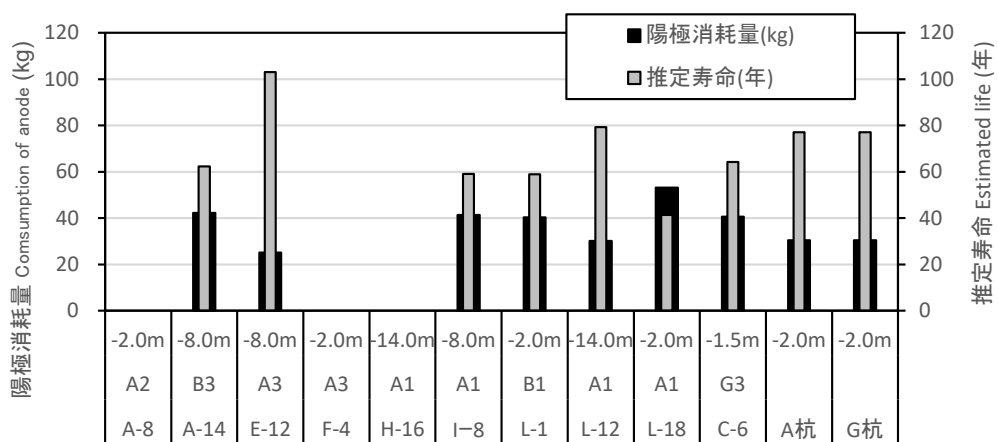


図-2.30 陽極消耗量および推定寿命

図-2.28 は電流低減率を累積確率として示したものである。100%が0.5以下であり、95%が0.4以下、80%が0.3以下の値であった。また、図-2.29は、この累積確率分布

を、工区別、水深別、レグの位置別にまとめたものである。ばらつきに及ぼす場所や水深、設置位置による影響は、顕著では無いようである。

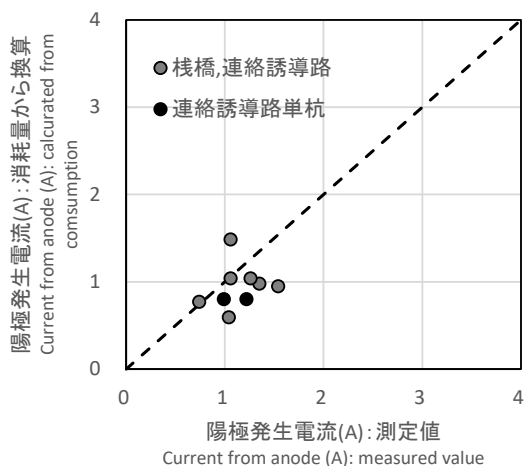


図-2.31 陽極発生電流との比較

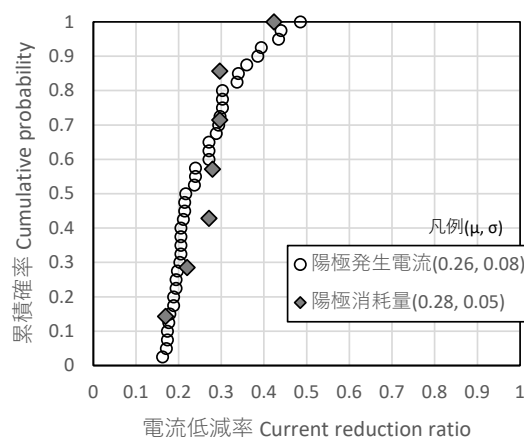


図-2.32 累積確率分布（ジャケット式のみ）

(4) 陽極消耗量

図-2.30 に陽極消耗量の測定値を示す。なお、この結果から陽極の消耗速度(=消耗量/ジャケット設置期間)を算出し、推定寿命(初期からの年数)を求めた結果も示した。推定寿命は41~100年程度(平均67年)となった。

陽極発生電流に換算した値と陽極発生電流の実測値を比較したものを図-2.31に、陽極消耗量から求めた電流低減率と、陽極発生電流の実測値から求めた電流低減率の累積確率分布を図-2.32に示す。図-2.31より、陽極消耗量から求めた電流低減率と、陽極発生電流の実測値から求めた電流低減率の累積確率分布の傾向は概ね同様であった。

2.4.4. まとめ

2020年度に実施した詳細調査の結果を以下にまとめる。

- ・各ジャケットにおける電位測定結果より、非常に良好な電気防食状態で安定しており、場所によるばらつきも少ないことが確認された。
- ・陽極発生電流量(水中クランプメータで測定)および陽極消耗量調査により、設計寿命を満足する可能性が高いことが確認された。水中クランプメータについては、潜水士による作業時(陽極の脱落状況の確認時など)に併用すると効率的と考えられる。
- ・電位の値を指標として陽極の残存寿命が設計耐用年数を満足するか否かを判定できる可能性⁵⁾⁷⁾が、今回の測定結果からも示唆された。

2.5 まとめ

(1) 連続モニタリング

1) 連絡誘導路部(単杭・重防食被覆)

電流値は時間とともに低下し、1年経過時において、設計での想定値を大幅に下回る約1A以下(低減率:30%以下)まで低減した。

2) A14およびL1ジャケット(ステンレス被覆)

電流値は時間とともに低下し、1年経過時において約1A以下(低減率:30%以下)まで低減した。また、2015年度及び2020年度において、水中クランプメータによって推定した実際のアルミ陽極の発生電流は、0.6~0.9A程度以下(低減率:25%以下)まで低減していた。

以上の陽極寿命の予測結果より、設計陽極寿命35年よりも陽極寿命が伸びる可能性が高いと推測された。

(2) 定期点検診断

1) 水質

河川水の混入を受け、表層付近のCl濃度は若干低下している。一方、海底付近になると、通常の海水濃度と同様であった。

2) 電位

時間の経過とともに、全体的にマイナス側に移行し、かつばらつきも少なくなっていた。これは、時間が経過することで、鋼材表面におけるエレクトロコーティングの生成が進行したためと考えられる。

なお、現状で平均値が-1000mV程度であり、最小値も-950mVを下回っている。電気防食の状態は非常に良好であり、設計寿命を満足する可能性が高いと推測された。

3)陽極取付状況の確認

潜水士により、陽極取付状況の確認が行われ、多数の陽極における陽極脱落の有無に関する情報が得られた。5年経過時で1562個、10年経過時で1504個（5年経過時と異なる場所）を調べているが、それぞれ全く脱落が確認されなかった。たとえば確率的に表すと、陽極が脱落する確率は、それぞれ5年間で $1/1562(=0.00064)$ 以下、10年間で $1/1504(=0.00066)$ 以下と表された。同一施設の別のジャケット式構造物においても、脱落の可能性は非常に低いと予想される。

なお、今回のジャケット式栈橋の場合、船を係留することではなく、陽極に船が衝突する可能性は非常に低い。木材などの漂流物についても、水面付近を漂うため、水深-2m付近に設置されている陽極に作用する可能性は非常に低い。よって、衝突に起因して陽極が脱落する可能性は非常に低い。今回の調査結果は、このことを裏付けるものである。

(3) 詳細調査

・各ジャケットにおける電位測定結果より、非常に良好な電気防食状態で安定しており、場所によるばらつきも少ないことが確認された。

・陽極発生電流量（水中クランプメータによる）および陽極消耗量調査により、設計寿命を満足する可能性が高いことが確認された。水中クランプメータについては、潜水士による作業時（陽極の脱落状況の確認時など）に併用すると効率的と考えられる。

・電位の値を指標として陽極の残存寿命が設計耐用年数を満足するか否かを判定できる可能性⁵⁾⁷⁾が、今回の測定結果からも示唆された。

電気防食の信頼性は非常に高く、電気防食の脱落する可能性がゼロであれば、陽極の設計耐用年数の間に電気防食の機能が損なわれる可能性はほぼ無いと考えられる。

ただし、非常に重要な施設である場合（例えば羽田空港D滑走路部）、供用期間中に何も点検しないということはありません。一般定期点検診断項目として、電位測定を定期的に行う方向性は継続し、その頻度や測定数量は今後の状況を踏まえその都度検討、といった方向性が良いと考える。なお、今回の一連の調査より、電位の測定結果を基に、陽極の寿命が設計寿命を満足するか否かを判定できる可能性が示されている。この手法の活用方法については今後の検討課題としたい。

また、今後の技術の発展により、各種の新技术（ROV、音響機器など）の活用が容易となった場合、測定方法や頻度を検討することが望ましいと考える。

3. 鋼管杭式棧橋における調査結果

3.1 はじめに

電気防食が適用された鋼管杭式棧橋の定期点検診断時において、岸壁法線上から照合電極を鉛直に投入し、最海側の鋼管杭の電位測定が行われる²⁾³⁾。鋼管杭は陸側にも数列存在しているが、その場合の電位測定結果の報告例は少ない。また、陽極寿命に関連する陽極発生電流は電位と相関があるとされるが検証例は少ない。

点検診断の効率化に寄与することを目的として、電気防食が適用された鋼管杭式棧橋において各種調査を行った。

3.2 調査概要

3.2.1 調査場所

対象構造物の断面図を図-3.1 に、平面図を図-3.2 に示す。本施設は 1989.4 に竣工された。当初から電気防食および被覆防食（モルタル被覆、FRP カバー有）が適用されている。電気防食については 20 年-3.0A の流電陽極に一度更新され、約 3.5 年が経過している。なお、防食設計の際には、対象海域を「汚染海域²⁾」とし、海中部の防食電流密度は 140mA/m² と設定されている。

3.2.2 調査項目

1) 水質測定

1 測線において、3 深度（水面付近、中層部、下層部）から試料（海水）を採取し、塩化物イオン濃度、溶存酸素、アンモニウムイオン濃度を測定した。

2) 電位測定

照合電極（海水塩化銀電極）を用いた電位測定を、5 測線、1 測線においては 6 箇所（岸壁法線、鋼管杭 4 本及び陸側法線の計 6 箇所）さらに 1 箇所においては深度方向に 1m 間隔で行った。岸壁法線と A の鋼材表面の距離は 1.5m、陸側法線（渡版（グレーチング））を開放した箇所と D の鋼材表面の距離は電位測定位置（海側）までは 2.5m、直近の鋼管杭表面（陸側）までの距離は 1.5m である。

表-3.1 水質測定結果

		DO (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	区分*
2020/11/25	±0.0m	8.3	12400	0.13	汚染
	-1.5m	7.3	17900	0.10	
	-3.5m	6.8	17600	0.09	
2021/2/5	±0.0m	9.1	15600	0.07	
	-1.5m	9.6	18100	0.04	
	-3.5m	9.8	18200	0.02	
判定基準		<6	<17800	>0.1	

太字：指標に該当、区分：3項目中、2項目以上該当で汚染海域と判定

3) 陽極発生電流測定

水中クランプメータ^{例5)}を用いた陽極発生電流測定を、陽極 35 個に対して行った。

4) 陽極消耗量調査

2)の測定を実施した陽極（計 35 個）の寸法（3 か所の周長）を測定し、陽極消耗量を算定した。

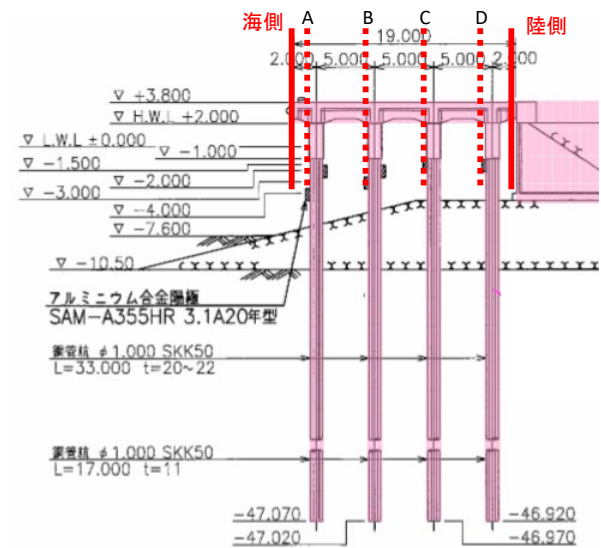


図-3.1 棧橋断面図および測定箇所

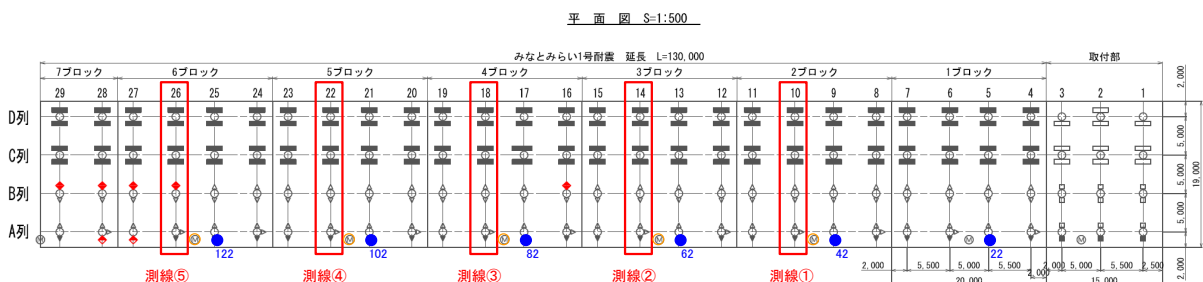


図-3.2 棧橋平面図および測定箇所

3.3 調査結果

3.3.1 水質

表-3.1 に水質調査結果を示す。上層部では塩化物イオン濃度が低い。当該岸壁は河口に位置しており、上層部では淡水の影響を受けている。11月と2月のうち、11月の±0.0m の場合のみ、汚染海域と判定された。

3.3.2 電位

(1) 測定結果

図-3.3 に電位の深度分布を、図-3.4 に各列ごとの累積確率分布を示す。全ての値が-1000 mV 以下の値を示して

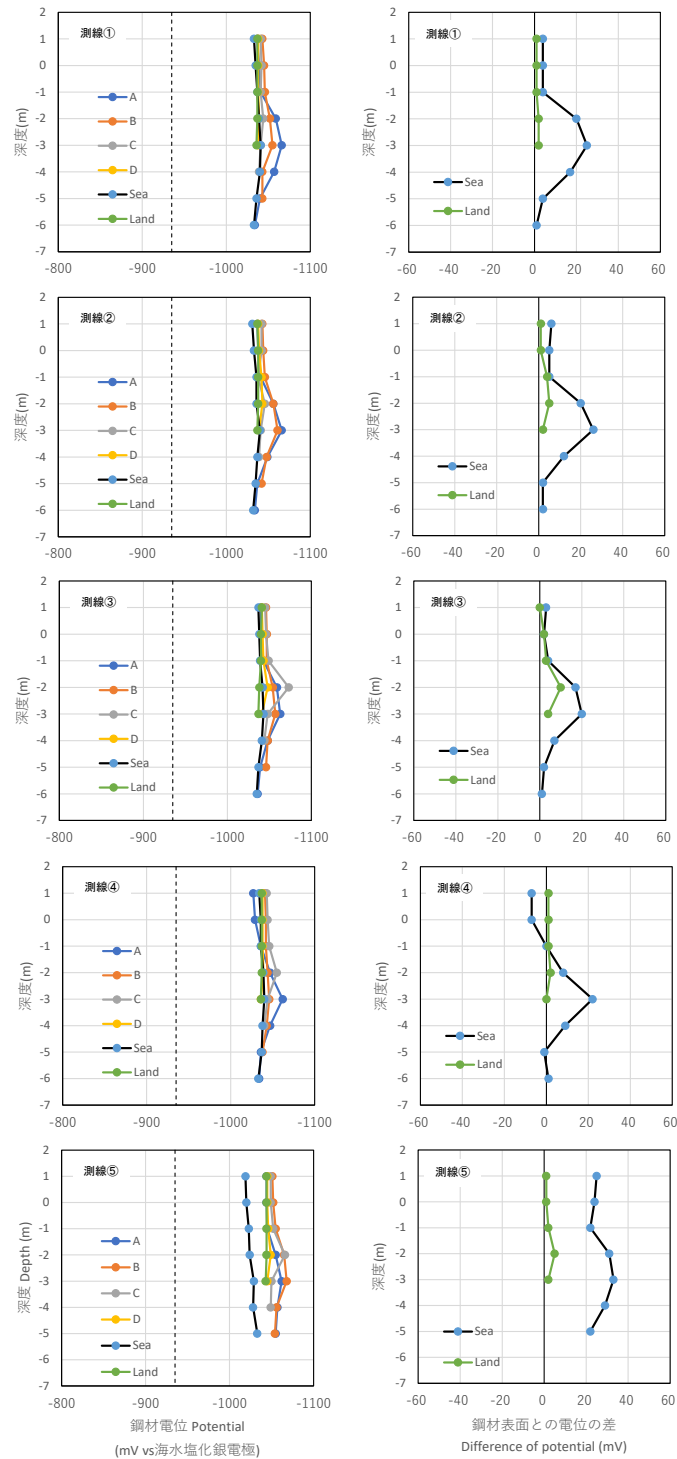


図-3.3 測線毎の電位および「鋼材表面の電位と離れた個所での測定値の差」の深度分布

おり、列ごとのばらつきも少なかった。電気防食の状態は非常に良いことが分かる。水面付近の値も非常に良好であり、河川水混入の影響は見られなかった。

(2)照合電極と鋼材の距離の影響

鋼材表面から離れた個所（海側の岸壁法線および背後）での測定値およびその差を図-3.3 に示している。この値は、鋼材表面の値よりも若干プラス側（貴側）に計測された。その差は非常に小さいが、陽極が近くにある場合、鋼材表面の測定値との差が若干大きい。図-3.5 はこの電位の差を累積確率分布として整理したものである。最大で30mV程度であり、全データの95%が30mV以内の差に収まっていた。

なお、付録 A にはジャケット式栈橋の場合の照合電極と鋼材の距離の影響についての結果が示されている。この結果において、本章の結果とは逆で、鋼材面から離れるとマイナス側（卑側）の値が計測される場合があった。なお、過去の羽田空港D滑走路（ジャケット式栈橋）の調査結果においても同様な傾向がみられた⁶⁾。これらの場合、仮に、鋼材から離れた個所で測定した電位が防食管理電位-800mV付近であった場合、鋼材表面では防食管理電位を満足しないこととなる。

照合電極と鋼材の距離の影響には、電場の影響、距離が離れることによるIR降下、複数の部材が存在する影響など、様々な影響が含まれている可能性がある。安全側の観点で考えると、岸壁法線上から測定した値は、鋼材表面の値より+30mV程度マイナス側の値を取る可能性があることを踏まえつつ、結果を判断するのが良いと考える。

3.3.3 陽極発生電流および陽極消耗量

図-3.6 に電流低減率の累積確率分布を示す。なお、「電流低減率」は電流の測定値を設計値(今回は3.0A)で除したものであり、電流の測定値が小さくなるほど値は小さくなる。今回の電流低減率は設計時の想定値(0.5)より非常に小さく、電流が著しく低減していることが分かる。この状態だと、陽極の消耗は非常に遅く、寿命は設計耐用年数を十分満足する可能性が高い。

陽極消耗量調査により得られた「陽極消耗速度(kg/年)」の単位を電流(A)に換算し、設計値3.0で除して求めた電流低減率を図-3.6中に示した。図中●(陽極発生電流から算定)よりも値がかなり小さい。経過年数が約3.5年と短く、寸法測定により陽極消耗量が正しく評価されていない可能性がある。

3.3.4 電流低減率と電位(鋼材表面での測定値)の関係

図-3.7 に電流低減率と電位(鋼材表面での測定値)の関係を示す。なお、図中の直線は、以下の仮定の下で2点を直線で結んだものである。i)陽極の設計電位は-1060mV。

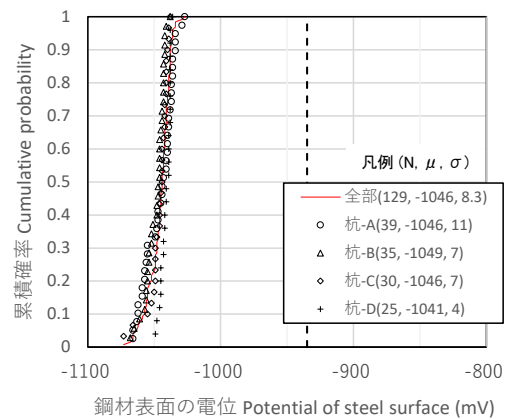


図-3.4 鋼材表面の電位の累積確率分布

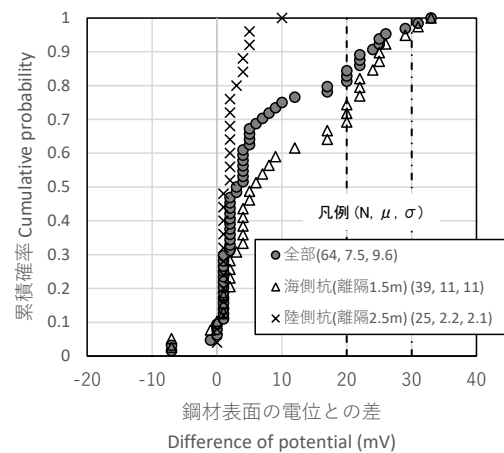


図-3.5 鋼材表面の電位との差の累積確率分布

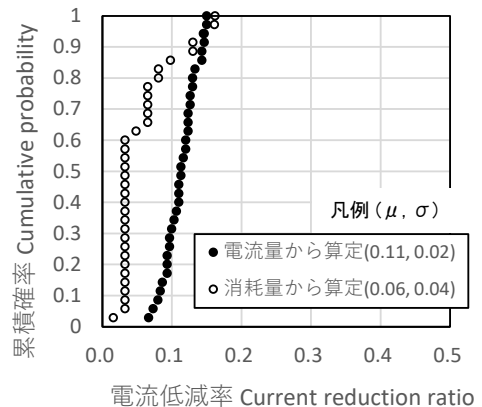


図-3.6 電流低減率の累積確率分布

鋼材の電位がこの電位となったとき、陽極との電位差がなくなるため、電流(=電流低減率)は0となる。

ii)陽極と鋼材の電位差は、設置直後において250mVが想定されている。設置直後の鋼材の電位は、-1060(陽極電位)から250を引いた-810mV(=1060-250)となる。この時、陽極の設置直後のため、電流低減率は1となる。

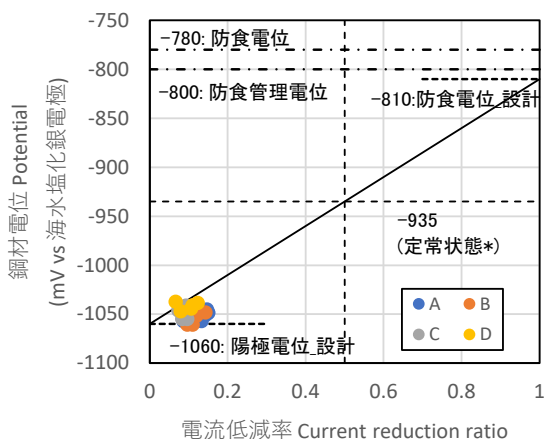


図-3.7 電流低減率と電位の関係

ここで、時間が経過すると、鋼材表面にエレクトロコーティングが形成され、電位は卑化し、電流は低減する（低減率が減少する）。両者の値は、理論的には直線上の右上から左下に向かって変化する。電気防食の状態が定常状態となる際の電位（電流低減率 0.5 と想定）は、i)と ii)の 2 点の間である-935mV(= $(-810-(-1060))/2$)と計算される。今回の測定値は-935 mV 値を大きく下回っており、この直線上の陽極電位付近のデータが大半であった。この結果からも、電気防食の状況は非常に良好であることが分かる。

また、文献 5)7)において、電位が-935mV(vs 海水塩化銀電極)を下回った場合、電流低減率が 0.5 を下回っている可能性が高いため、その結果として陽極が設計寿命を満足する可能性が高いことを提案している。今回の結果は、その提案を裏付ける結果となっていた。

表-3.2 は、今回（横浜港）の結果に、2 章および文献 5)の結果を加え、電流低減率と電位の関係をまとめたものである。今回の結果は、過去の結果や 2 章の結果と同様であった。また、これまで得られたデータのうち、電位が-

935mVかつ電流低減率が0.5を満足していたものは、90/91 例（99%）であった。

今後引き続きデータを蓄積させる予定である。

3.4 まとめ

点検診断の効率化に寄与することを目的として、電気防食が適用された鋼管杭式栈橋において各種調査を行った結果を以下にまとめる。

1)同一栈橋内の異なる鋼管杭で測定された電位のばらつきは非常に小さかった。また、測定値に及ぼす鋼材表面と電極との距離の影響は小さいことが確認された（今回は距離が 1.5m で、電位の差は最大で 30mV 程度）。以上より、従来実施されている、海側法線から電極を海中に投入する方法でも、電気防食の状況を十分評価できていることが改めて確認された。

2)鋼材の電位と陽極発生電流（電流低減率）の関係は、設計で想定されている直線関係と同様な値を示し、設計時での想定値（電位：-935mV、電流低減率：0.5）をいずれも下回っていた。また、これまで得られたデータのうち、電位が-935mV かつ電流低減率が 0.5 を満足していたものは、90/91 例（99%）であった。以上の結果より、ある電位を下回れば陽極寿命が設計寿命を満足すると判断できる可能性⁵⁾⁷⁾が改めて示唆された

表-3.2 電流低減率と電位の関係（まとめ）

被覆防食の種類		横浜港	羽田_2章		羽田_2015	鋼矢板	合計
		モルタル (FRPカバー)	耐海水性ステンレス	重防食	耐海水性ステンレス	無し	
N	個	35	40	4	8	4	91
E<-935 and 低減率<0.5	個	35	39	4	8	4	90
	確率	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	0.99
上記以外	個	0	1	0	0	0	1
	確率	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01

4. 電気防食工の点検診断に関する考察

定期点検診断の種類（一般および詳細）ごとに、本検討で得られた結果を整理しつつ、今後の方向性について考察する。

4.1 一般定期点検診断（電位測定）

(1) 測定値の実態および判定

今回の2か所の例（2章、3章）において、いずれも河川水の影響を受ける環境に位置しているが、電位の測定結果は非常に良好（-800mVを大いに下回る）であり、かつ値のばらつきは非常に少ない結果であった。被覆防食の下端深度の設定（2章：-1.5m（東京港）、3章：-1m（横浜港））を含め、適切な防食設計がなされていたこともあり、河川水の影響は特に現れていなかったと考えられる。

また、2章のジャケット式栈橋の場合においては、金属被覆（耐海水性ステンレス被覆）が電気防食に及ぼす影響（異種金属腐食の影響）が懸念されていたが、今回の条件においては、顕著な影響は生じていないことが改めて確認された。

(2) 測定方法

一般的に、照合電極を海上から投入し、海底面に向かって鉛直方向に下げつつ、電位の深度分布を測定する（1章参照）。

栈橋式構造物の場合、照合電極の投入位置と鋼材表面までの距離が2～3m程度離れる場合がある。この電極との対象鋼材面との距離の影響は、2章（ジャケット式構造物）、3章（鋼管杭式栈橋）の場合で若干異なった。すなわち、構造形式や陽極の取付場所の違いが影響している可能性が示された。ただし、鋼材表面での計測値とやや離れた個所での測定値の差（電位差）は今回の例においては30mV程度であった。結果の判定の際は、このことを念頭において判断すればよいと考える。

(3) 場所（測線）の設定

一般的な構造物（栈橋、矢板式構造物）において、電位測定用端子の設置位置とその中間点で測定が行われている²⁾。3章（鋼管杭式栈橋）の結果においては、電位のばらつきは、最海側の杭、陸側の杭いずれも非常に少ない結果を示した。今回は1例の結果しか示していないが、現状の方法で特に問題は生じていないことから、適切な防食設計がなされており、陽極脱落の可能性がほぼない状況においては、現状の測定方法で特に問題は無いと考えている。

一方、2章（ジャケット式栈橋：羽田空港D滑走路）の場合、レグの間隔が10m以上離れていること、本数が膨大

であることなどの理由により、レグ1本を1施設とみなし、1ジャケット当たり6本のレグに対して2年ごとに測定を行い、12年で1周する方法を採用している。その概要を図-4.1に示す。この頻度については次で触れる。

(4) 頻度の設定

表-4.1に港湾の施設における定期点検診断の実施時期の考え方を示す。一般定期点検診断の頻度は、重要点検診断施設の場合に3年以下、通常点検診断施設の場合に5年以下とされている³⁾。なお、施設の管理者によってはさらに短い頻度を設定している場合もある。羽田空港D滑走路では、電位の測定頻度を2年としている。羽田空港D滑走路のように対象施設が大規模な場合、頻度の設定が、ライフサイクル全体で考えた際のコストに大きな影響を及ぼす。

電位測定に限った話ではないが、頻度の設定方法について、取得されたデータに基づいた手法等、合理的な方法の確立が望まれる。

表-4.1 港湾の施設における定期点検診断の実施時期の考え方

	通常点検診断施設	重点点検診断施設
一般定期点検診断	・5年以内ごとに少なくとも1回	・3年以内ごとに少なくとも1回
詳細定期点検診断	・供用期間中の適切な時期に少なくとも一回 ・供用期間延長時	・10～15年以内毎に少なくとも1回 ・主要な航路に面する特定技術基準対象施設等は、10年以内毎に少なくとも1回

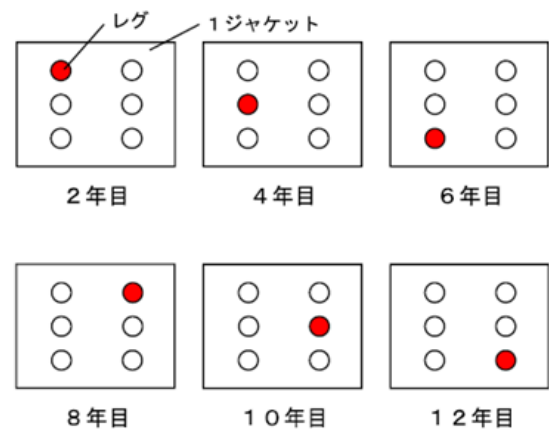


図-4.1 1ジャケットにおける電位の測定の順番（羽田空港D滑走路の場合）

4.2 詳細定期点検診断

4.2.1 陽極消耗量調査

通常、潜水士による寸法測定結果を基に、陽極の消耗量を推測する方法が実施されている。これは、陽極周囲の付着物を除去後に、周長を3か所測定し、残存する体積を推定し、陽極の消耗量を求めるものである(1章参照)。このため、陽極表面に凹凸が多いほど、推定精度は低くなる。測定の時期及び測定数量を設定する際は、上記のことを念頭において検討するのがよいと考える(過度に頻度や調査数量を増やさない、等)。

なお、陽極消耗量を直接測定するのではなく、陽極発生電流から推測する方法もある。これについては次で述べる。

4.2.2 陽極発生電流測定

陽極発生電流の測定方法は、鋼材と陽極の間に電気抵抗(シャント抵抗)を設置して測定を行う方法と、今回のように、水中で測定する方法の2つに大きく分かれる。以下それぞれに分けて考察する。また、電位から陽極発生電流を(大まかに)推測し、陽極寿命の消耗時期を推測する方法についても述べる。

- (1) 電気抵抗(シャント抵抗)を用いる方法
- (2) 水中クランプメータを用いる方法
- (3) 電位から推定する方法

(1) 電気抵抗(シャント抵抗)を用いる方法

鋼材と陽極の間に電気抵抗(シャント抵抗)を設置することで、電流が測定できる。さらにケーブルを陸上までに引き上げ、データロガーを用いることで連続測定が可能となる。その例は2章でも紹介した。この陽極発生電流量の時間積分が陽極消耗量となり、4.2.1の陽極消耗量調査を行わずに陽極消耗量の推測が可能となる。

ただし、電気抵抗が高耐久性を有していたとしても、そこに接続されるケーブルが破断する例が多くみられる。2章の例だけでなく、東京湾内で実施した連続モニタリングの場合においても、実施中にケーブルの断線が見られた¹⁰⁾。現状においてはこの点が大きな課題である。

(2) 水中クランプメータを用いる方法

今回の検討において、電流測定に関して、比較的簡便に測定可能な「水中クランプメータ」を多用した。なお、付録Bの検証例では、陽極に電気抵抗を設置した際の測定値と概ね近い値を示していた。

今回の一連の測定結果においては、一般の鋼管杭式栈橋の方は非常に安定していたが、2章のジャケット式の場合では、値がやや大きく、かつばらつきが比較的大きくな

る傾向が見られた。ここで、陽極消耗量においては時間的な蓄積が含まれているのに対し、陽極発生電流はある一時点の値(消耗速度)である。水中クランプメータを活用する際は、このばらつきの評価が課題である。

(3) 電位から推定する方法(電位と電流の相関)

電位と陽極発生電流(電流低減率)には、既往の知見⁵⁾同様、ある程度の相関がみられた。電流低減率の実測値が設計での想定値より小さい場合、陽極の耐用年数は設計耐用年数を満足する。すなわち、既往の知見同様⁵⁾⁶⁾、電位の値から、大まかにではあるが、陽極が設計の耐用年数を満足するか否かの予測程度は可能であることを意味する。今回の結果(表-3.2参照)においても、電位がある値以下の場合、設計で想定している電流値を下回っていたものが99%を占めた。上記の方法により、陽極消耗量測定の実施頻度や数量を省略できる可能性がある。例えば、陽極設計寿命を迎えた際に、その時点での陽極消耗量の調査結果に関係なく、自動的に陽極を更新するという方法も考えられる。

電位から陽極発生電流あるいは陽極消耗時期を(大まかに)推測する方法については、今後データを蓄積することで、より信頼性が増すと考える。例えば、陽極消耗量調査等の潜水調査を実施する際に電位や陽極発生電流を同時に測定、あるいは水中ドローンを活用して測定¹¹⁾することで、より効率的にデータの蓄積が可能となる。

4.2.3 陽極の取付状況の確認

陽極の取付状況の確認(脱落等の変状の確認)については、通常はほとんど行っていない。今回、2章(ジャケット式栈橋:羽田空港D滑走路)の点検診断においては、潜水士による目視確認により、多数の陽極における陽極脱落の有無に関する情報が得られた。5年経過時で1562個、10年経過時で1504個(5年経過時と異なる場所)を調べているが、それぞれ全く脱落が確認されなかった。たとえば確率的に表すと、陽極が脱落する確率は、それぞれ5年間で1/1562以下、10年間で1/1504以下と表される。同一施設の別のジャケット式構造物においても、脱落の可能性は非常に低いと予想される。なお、ジャケット式構造物の場合、一般に陽極は陸上で溶接される。溶接強度に関して、一般の場合よりも高かつ安定している可能性もある。

ここで、溶接の設計・施工が適切であることを前提として、陽極の脱落の可能性について改めて整理する。

鋼管杭式栈橋やジャケット式栈橋(羽田空港D滑走路も含む)の場合、岸壁法線から陽極位置までは数m離れているため、船の係留時に陽極に船が衝突する可能性は

非常に低い。木材などの漂流物についても、水面付近を漂うため、水深-2m 付近に設置されている陽極に作用する可能性は非常に低い（コンテナや船舶などの大型の漂流物が衝突する場合は除く）。なお、付録 C に示すように、比較的形式が似ているドルフィン式栈橋の場合でも、26 年の供用期間中に陽極（計 152 個）の脱落は確認されていなかった。

一方、矢板式構造物の場合、岸壁法線から陽極位置までの距離は比較的近いため、栈橋などと比べて脱落の可能性が高いと考えられる。以下、2 つの事例を紹介する。

・事例 1

付録 C において、原因は不明であるが、矢板式構造物に設置された陽極が 1 個脱落していた（設置されている陽極の全数は不明）。

・事例 2

図-4.2 に、矢板式構造物において、ある区間内で複数個の陽極脱落が生じた際の断面図を示す。この場合、陽極の更新時に、設計耐用年数が 50 年の大型のものを配置し

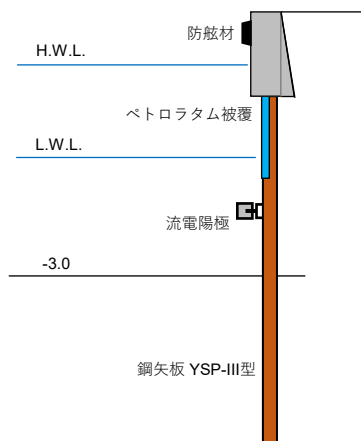


図-4.2 陽極脱落が生じた鋼矢板式係船岸

ているが、一方で、設置されていた防舷材のサイズが小さい状態であった。このような状態において、荷役作業時（主な荷役対象は砂利）に船が動揺する場合があったため、船側面の下側が陽極に衝突した際に落下したと推測されている。防舷材や陽極のサイズを把握し、さらには荷役状況を把握し、陽極に船が衝突する可能性を設計時あるいは維持管理時に把握しておく必要がある。

なお、上記の事例の場合の電位測定結果を図-4.3 に示しているが、陽極が複数個脱落（8 個が陽極脱落、2 個が片側の心金が切断）している区間の電位が大きく異なっていた。陽極が複数個同時に脱落していた場合、電位測定から脱落状況を把握できる可能性が高いと考えられる。ただし、測定時期によっては、防食管理電位をギリギリ満足している場合もあった（図中 12~13BL◇）。電位の測定結果の判断の際は、値が防食管理電位を満足していることだけでなく、同じ施設内の他の測定箇所の違いを確認する必要がある。また、本文中でも何度か述べているように、電気防食の状態が良好な場合（設計を十分満足している場合）、電位の測定値が防食管理電位を大幅に下回り、-935mV を下回っている可能性が高い。電位測定結果の判断の際に、この値を 1 つの目安とすることも考えられる。

以上のように、陽極脱落が生じるケースは、かなりの異常時（例：船やコンテナの衝突など）に限定されることが確認された。そのため、陽極が脱落するケースについては、利用条件などから推測できる可能性が高い。また、電位測定値によっても、脱落の有無を判断できる可能性がある。

なお、陽極取付状況の確認に関しては、現状では潜水士による方法が主であるが、将来的には、水中ドローン、あるいは音響機器等を活用して水中部の状況を可視化する

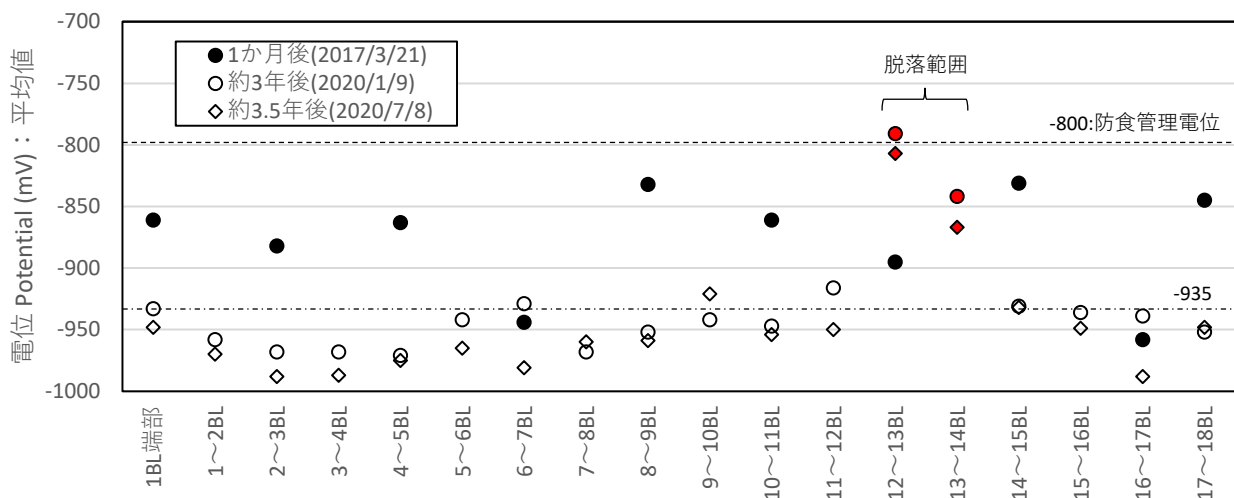


図-4.3 陽極脱落が生じた鋼矢板式係船岸の電位測定結果

手法^{例えば 12)}を活用する方向にシフトすることが想定される。また、陽極が脱落していなければ、電気防食の機能が損なわれる可能性はほぼ無いと考えられるため、将来的に、陽極の全数検査が容易に実施可能となれば、電気防食の効果に関する点検診断項目（電位、陽極消耗量など）を減らすことも可能であるとする。

4.3 まとめ

一般定期点検時に行っている「電位測定」は、定期的に行うのが望ましい。ただし、その頻度の設定方法については検討の余地が残されている。

詳細定期点検時に行っている「陽極消耗量調査」については、必ずしも行う必要はないと考える。設置されている陽極の仕様（特に設計耐用年数）を確実に把握できているかつ「電位」を定期的に確認しており、さらには同様な環境での陽極の消耗速度の実態を把握できていれば、「電位」の値から陽極の交換時期を判断する、といった方法も考えられる。例えば、陽極の設計耐用期間中は電位のみを定期的に計測し、設計耐用年数に到達したら、陽極消耗量を調査せずに、新たな陽極を追加設置（更新）するということも考えられる。

また、今後の技術開発で、陽極の取付状況の確認が、他の調査（例：音響機器等を活用した方法など）の際に得られる可能性もある（特に矢板式構造物の場合）。陽極の設置状況が簡易に把握できれば、その他の点検の数量や頻度を減らすことも可能と考える。

なお、陽極の取付状況の確認については、先の例で示したように、「電位」の値からある程度判断できる可能性がある。そのため、一般的な構造物の場合は、陽極取付状況の確認は行わず、文献2)にも記載されているように、「電位」に異常が見られた場合にのみ確認でよいと考える。

電気防食の維持管理においては、「電位」や「電流」といった定量的な数値として情報が得られるため、このデータを蓄積し、他の情報（波浪、水質など）と連携させることで、結果の評価や頻度の設定などを高度化しやすい可能性もある。この点については今後の課題としたい。

5. おわりに

本文では、電気防食工が適用された海洋鋼構造物における点検および調査結果を整理しつつ、維持管理（特に点検診断）の方向性について考察した。

電気防食については、国内における経験を多数重ねる中で、その信頼性は非常に高いことが分かってきている。一方で、実構造物における調査結果、特に点検診断に関する結果については、公表されているデータは非常に少ない。電気防食の場合、目視調査が行えない一方で、定量的な情報が得られるという特徴がある。すなわち、そのデータの活用が考えられる。また、これらを基に、より合理的な点検診断の実現される可能性もある。

今回については、2 施設で実施した調査結果（データ）の提示と、今後の方向性について考察するにとどまった。今後、データが蓄積・共有されることで、さらなる点検診断の高度化につながると考える。また、それらの検討は、海洋鋼構造物（洋上風力発電施設の支持構造物も含む）における電気防食の設計法の見直しにもつながる。以下、余談的な話となるが、主に電気防食の設計法に関する課題について、簡潔に述べる（本文の検討内容には関係するもののみ）。

(1) 海域の設定（汚染/清浄海域）

過去に比べて、港湾区域の水質が改善されている場合

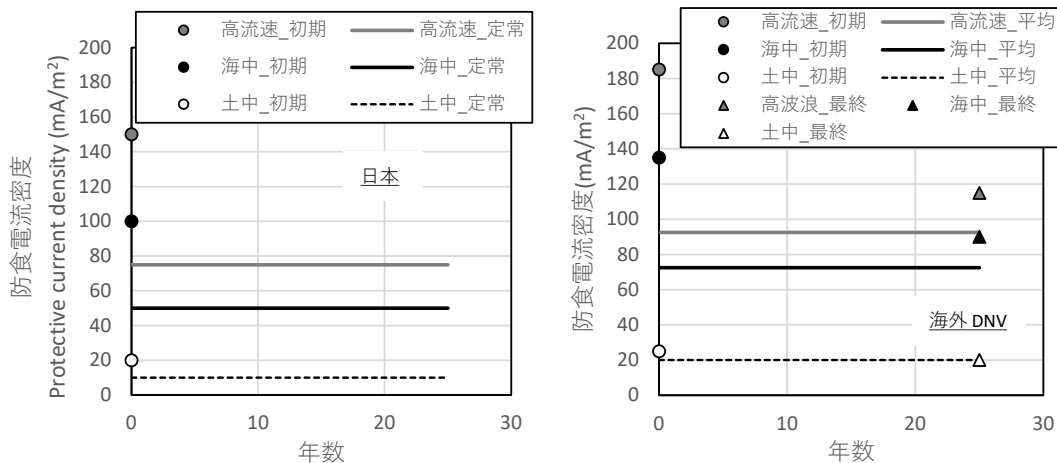


図-5.1 国内と海外の比較（防食電流密度）

もある。また、汚染の程度は、深度方向で異なる場合が多い。なお、羽田空港D滑走路の場合、海域の設定を表層付近と表層以外で変えている（表層：汚染海域、表層以外：清浄海域）。汚染海域の設定の方法について、検討の余地が残されている。

(2)防食電流密度および低減率の設定

防食電流密度の例を図-5.1に示す。なお、海外の例¹³⁾も併せて示した。

電流低減率は現状では設計値では0.5であるが、実際はそれを下回っている例が多く報告されている。また、電流の低減に対する考え方は海外とやや異なる。電流低減率の設定値を検証する際には、陽極発生電流の経時変化を長期間にわたり把握する必要がある。一方で計測例は少ない。検証に当たっては、多様な環境での長期計測が必要と考える。

(2021年11月5日受付)

謝辞

国土交通省関東地方整備局、羽田再拡張D滑走路維持管理JV、電気防食工業会の関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2019.
- 2) 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），2009.
- 3) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン，2014.7.
- 4) 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（改訂版），2019.
- 5) 山路徹，田土弘人，川瀬義行，小林厚史，吉田倫夫：海洋鋼構造物の集中腐食および電気防食に関する最近の知見，港湾空港技術研究所資料，No.1369，2020.3.
- 6) 審良善和，山路徹，小林浩之，板倉新，高橋小夜佳，鈴木大介：河口付近沿岸部に位置する耐海水性ステンレス鋼被覆を施したジャケット式栈橋の電位分布，材料と環境講演集2011講演集，pp.47-50，2011.5.
- 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講演集，pp.313-316（2012）
- 8) 宇津野伸二，山路徹，与那嶺一秀，審良善和，小林浩之，渡部要一，吉田倫夫，前薊優一，川瀬義行，松本茂：港湾鋼構造物の海底土中部の電気防食特性および土壌抵抗率を考慮した電気防食設計に関する検討，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），Vol.73，No.2，pp.220-238，2017.
- 9) 宮田義一，若林徹，濱田秀則：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，Vol.45，No.2，2006.6.
- 10) 田土弘人，山路徹，与那嶺一秀，若林徹，小林浩之，宇津野伸二，審良善和：耐海水性ステンレス鋼被覆を施した海洋鋼構造物の長期電気防食特性，防錆防食技術発表大会講演予稿集，Vol.36，pp.131-136，2016.
- 11) 野上 周嗣，加藤 絵万：水中ドローンを利用した港湾構造物の調査に関する検討，No.1380，2020.12.
- 12) 国土交通省港湾局：港湾の施設の新しい点検技術カタログ（案），2021.3.
- 13) DNVGL-RP-B401 Cathodic protection design，2017.

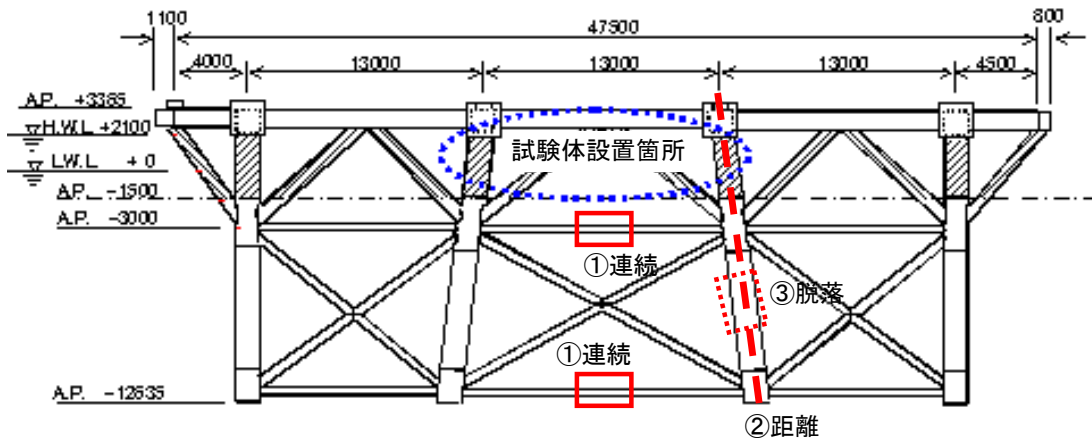
付録 A 測定電位に及ぼす鋼材表面と参照電極までの距離の影響に関する検討事例

値よりもマイナス側（卑側）の値を示している。

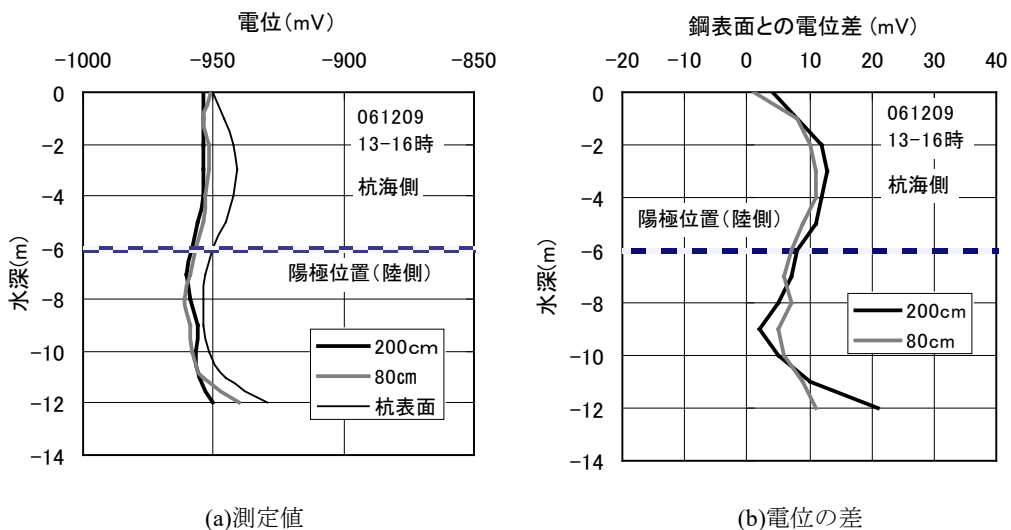
付図-A.1 に示すジャケット式構造物（耐海水性ステンレス被覆が適用）において、測定電位に及ぼす鋼材表面と参照電極までの距離の影響を検討するため、2006年12月に下記の調査を行った。

付図-A.1 中の②の場所で、水深0、-1、-2、-3、-4、-5、-6、-7、-8、-9、-10、-11、-12mの計13深度において、杭の円周面で8箇所ずつに対して、a)鋼材表面、b)鋼材から80cm離れた場合、c)鋼材から200cm離れた場合、の3点電位測定を行った。（13深度×8箇所×3点＝計312点）

付図-A.2 に測定結果を示す。（a）は電位の測定値、（b）は鋼表面との差を示している。最大で20mV程度、鋼表面の



付図-A.1 調査箇所概略（※海側から見た図）



付図-A.2 測定電位に及ぼす鋼材表面と参照電極までの距離の影響

付録B 水中クランプメータの測定精度の検証例

1. 調査概要

この手法により陽極発生電流量の値が推定できれば、陽極の消耗量が推定可能となる。そこで、羽田空港 D 滑走路ジャケット式棧橋部へ適用された流電陽極方式の電気防食に対し、鋼材の電位の値から陽極発生電流量を推測方法に関する調査・検討を行った。

調査は、羽田空港 D 滑走路部の L-1 および A-14 ジャケットで行った。計測方法を以下に記す。

(1) 水中クランプメータによる陽極発生電流の計測

実機アルミ陽極の発生電流を把握することを目的に、水中にて計測可能なクランプメータを用いて電流計測を行った。水中クランプメータは、クランプ状のセンサーと計測器本体から構成される(付図-B.1 参照)。計測要領は付図-B.1 に示すように、実機アルミ陽極と鋼材(レグ)とを接続する心金にセンサー部を挟み込み、心金に流れる電流を計測した。陽極 1 本当たりにパイプ状の心金が 2 本あるため、各心金にて 2 回ずつ計測し、それぞれの平均値の和を陽極発生電流とした。なお、水中クランプメータによる計測は、小型アルミ陽極の電流計測と同時に実施した。

水中クランプメータの測定精度に関しては、陽極発生電流を自動計測している羽田空港 D 滑走路連絡誘導路において、誤差 5%程度であることを確認している。

(2) 鋼材電位および陽極電位の計測

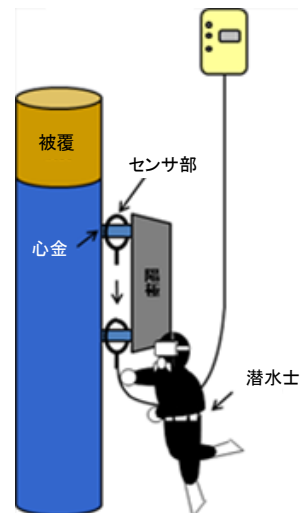
電位計測装置は海水塩化銀電極 (SSE[sw])、デジタルマルチメータ、マグネット式排流端子から構成される。海水塩化銀電極を測定対象に近づけ、デジタルマルチメータに表示される値を読み取った。なお排流端子は、鋼材と短絡していると考えられるステンレス被覆部に設置した。測定位置は 1 本の陽極に対し、陽極上端部付近の鋼材、陽極(上面中央部)、陽極下端部付近の鋼材の 3 ヲ所とした。

2. 調査結果

(1) 水中クランプメータの性能確認

羽田空港 D 滑走路連絡誘導路部の A 杭と G 杭には、電流計測用の陽極が設置されている。よって、水中クランプメータの性能を確認するために、この陽極を利用して電流計測値の精度確認を実施した。電流計測結果を付表-B.1 に示す。なお、A 杭の計測用アルミ陽極電流値は、ロガーの設定ミスにより、データが得られなかった。

G 杭で計測した水中クランプメータの電流値は、計測用アルミ陽極の電流値と同程度の値を示し、そのずれは計



付図-B.1 水中で使用可能なクランプメータの一例
および測定状況イメージ

測用アルミ陽極に対して約 5.4%であった。水中クランプメータにおいても比較的高い精度で実機アルミ陽極の電流計測が可能であることが確認された。

(2) 水中クランプメータによる陽極発生電流の計測

L-1, A-14 ジャケットの陽極電流計測結果を付表-B.2 に示す。水中クランプメータで計測した実機アルミ陽極の発生電流は、L-1 ジャケットで 780~870mA、A-14 ジャケットで、645~678mA であり、A-14 ジャケットのほうが電流低減が進行していた。アルミ陽極の定格電流は 3.5A であることから、今回計測した全ての陽極において低減率は設計値の 0.50 を下回っており、陽極寿命は設計年数(35年)を上回ると推定される。

(3) 鋼材電位および陽極電位の計測

L-1 および A-14 ジャケットの電位計測結果を付表-B.3 に示す。鋼材の電位は全ての測定位置で防食電位:-780mV vs.SSE[sw]以下を示しており、良好な防食状態を維持していた。また、比較的 A-14 ジャケットの方がカソード分極が進んでおり、河口付近にある L-1 ジャケットよりも高い防食効果を示した。陽極電位は-1066~-1082mV

vs.SSE[sw]を示しており、比較的低分極の状態を維持していた。

付表-B.1 連絡誘導路部の電流計測結果 (単位: mA)

計測項目		連絡誘導路	
		A杭	G杭
水中クリップ オン電流計	心金上 ^{※1}	305/287	283/291
	心金下 ^{※1}	254/240	274/271
	平均値の和 ^{※2}	543	560
計測用アルミ陽極電流値 ^{※3}		—	531

※1 左側が1回目, 右側が2回目計測値

※2 心金上平均値と心金下平均値の和

※3 測定時刻 2015年1月13日15:00

付表-B.2 ジャケットの電流計測結果 (単位: mA)

	L-1ジャケット				A-14ジャケット			
	b1レグ		c1レグ		a27レグ		b27レグ	
	上段陽極	中段陽極	上段陽極	中段陽極	上段陽極	下段陽極	上段陽極	下段陽極
心金上 ^{※1}	513/492	572/574	387/401	481/469	429/404	384/402	378/413	378/396
心金下 ^{※1}	356/382	282/241	394/397	306/304	249/273	272/285	253/246	264/275
平均値の 和 ^{※2}	872	835	790	780	678	672	645	657

※1 左側が1回目, 右側が2回目計測値 ※2 心金上平均値と心金下平均値の和

付表-B.3 電位計測結果 (単位: mV vs. SSE[sw])

計測位置	L-1ジャケット				A-14ジャケット			
	b1レグ		c1レグ		a27レグ		b27レグ	
	上段陽極	中段陽極	上段陽極	中段陽極	上段陽極	下段陽極	上段陽極	下段陽極
鋼材_上側	-1012	-1018	-1018	-1017	-1035	-1039	-1037	-1043
鋼材_下側	-1020	-1022	-1018	-1026	-1039	-1043	-1045	-1049
鋼材_平均値	-1016	-1020	-1018	-1022	-1037	-1041	-1041	-1046
陽極	-1071	-1073	-1067	-1065	-1072	-1068	-1066	-1082

灰色: 連続モニタリング箇所

付録C 港湾鋼構造物における電気防食用流電陽極の脱落およびその影響に関する検討事例

1. はじめに

国内の港湾鋼構造物には流電陽極方式の電気防食が一般に適用されている¹⁾。この流電陽極（以下、陽極）は防食設計が適切であれば、何らかの想定外の外力が作用することにより陽極が脱落しない限り、陽極の耐用年数を確実に満足すると考えられている。この陽極の脱落に関して、その実態について調査を報告した例はほぼ皆無である。この実態が明確になれば、維持管理における最適な点検頻度の考察につながると考える（例えば、脱落の可能性が非常に低い場合、点検の頻度を緩める等）。

そこで本検討では以下について、既往の知見を基に整理を行った。

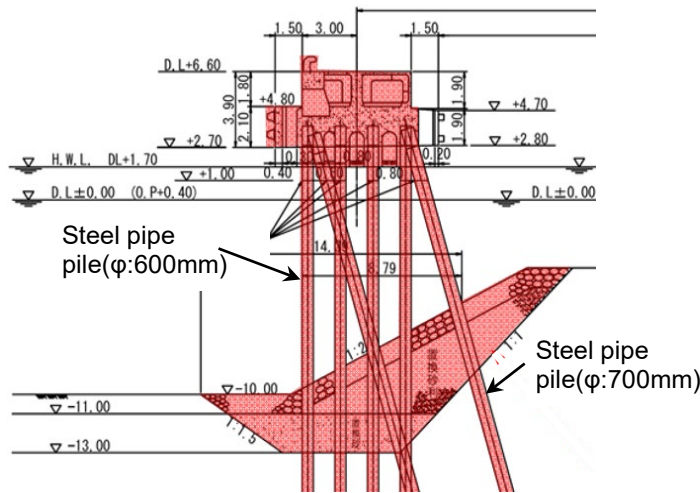
- 1) 陽極脱落の実態
- 2) 陽極が1個脱落した際の防食効果の変化
- 3) 数値解析による陽極脱落の影響の評価

2. 調査結果

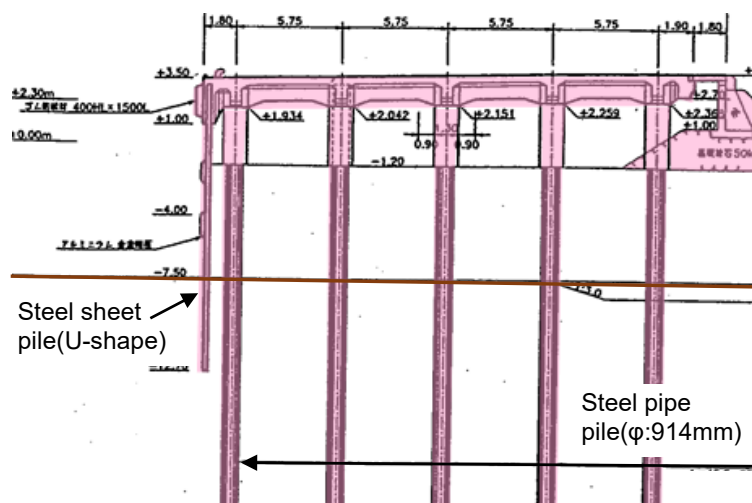
2.1 陽極脱落の実態

A 港（内湾に位置）のドルフィン式栈橋の断面図を付図-C.1に示す。陽極設置26年後において、全152個中脱落したものは0個であった。26年間で陽極が脱落する確率は、 $1/152=0.66\%$ 以下と計算される。

B 港（外洋近隣に位置）の鋼矢板式構造物（栈橋の前面に矢板が設置）の断面図を付図-C.2に示す。陽極の全数は不明であるが、設置後17年後において1個のみ脱落が確認されていた（脱落した陽極の設置位置は不明）。本施設は外洋近隣に位置しており、さらに鋼矢板式であるた



付図-C.1 A 港：ドルフィン式栈橋

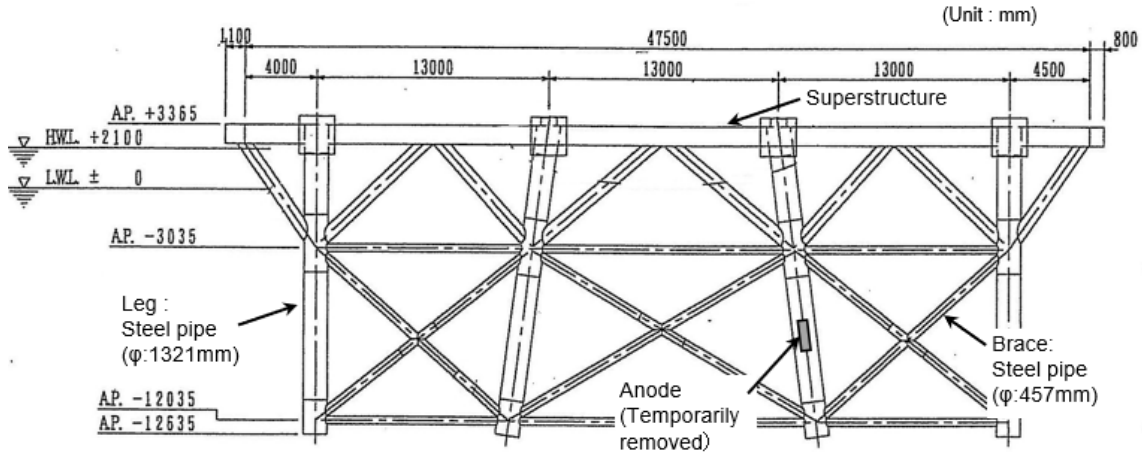


付図-C.2 B 港：鋼矢板式構造物（栈橋の前面に矢板が設置）

付表-C.1 鋼管杭式栈橋（波崎）における陽極の脱落状況

Pile No.	5	6	12	13	14	15	17	18	19	20	21	22	23	25	26	28	29	30					
Elapsed year	10	10	12	13	13	12	13	12	12	12	12	8	8	8	5	10	12	8	5	12	12	5	
Design life(year)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5	10	10	5	5	10	10	5	
Fall of anode	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No

*Listed only when Elapsed year ≥ Design life



付図-C.3 C港：ジャケット式栈橋（海側から見た図）

め、A港（栈橋）の場合よりも漂流物の衝突の頻度や速度は高かった可能性が考えられる。ここで、漂流物は基本的に水面付近を存在するため、脱落した陽極位置は、水面近傍の陽極に限定されると考えている。

高波浪海域に位置する波崎観測栈橋²⁾において、表-1に示すように、水中溶接方式の陽極の場合、過去の履歴が明確な陽極のうち脱落したものは0個であった。なお、陽極に作用する波力とは異なるが、陽極が設置されている鋼管杭（No.15）の水中部に作用する波力を、式(1)³⁾を基に、想定作用面積あたりの抗力として算出すると10,000 N/m²程度と計算された。

$$F = 1/2 \cdot C_D \cdot \rho_0 \cdot A \cdot U^2 \quad (1)$$

ここで、F：うねり波による抗力、A：流れ方向の投影面積、C_D：抗力係数（円柱：0.7）、ρ₀：単位体積質量（海水：105 N/m³）、U：波速（m/s）、である。

2.2 陽極が1個脱落した際の防食効果の変化

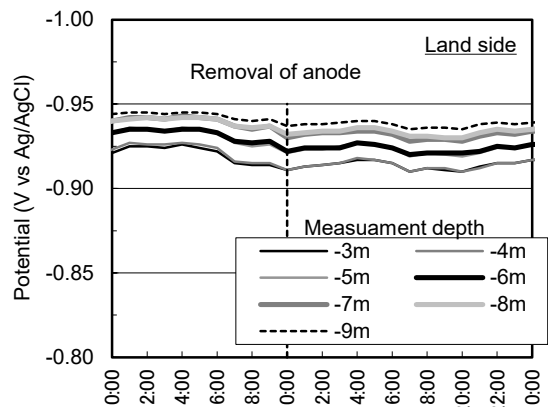
(1) C港：ジャケット式栈橋

付図-C.3にC港（内湾に位置）のジャケット式栈橋の断面図を示す。図中の1個の陽極（設置位置：-6m）を陽極消耗量調査のために一時的に外した際に、陽極周辺（海側、陸側の-3、-4、-5、-6、-7、-8、-9 mの7深度）の電位変化を連続的に計測した。その結果を付図-C.4に示す。陽極を撤去しても、値の急激な変化は見られなかった。この結果は、陽極が1個程度脱落しても、電気防食の効果が急激

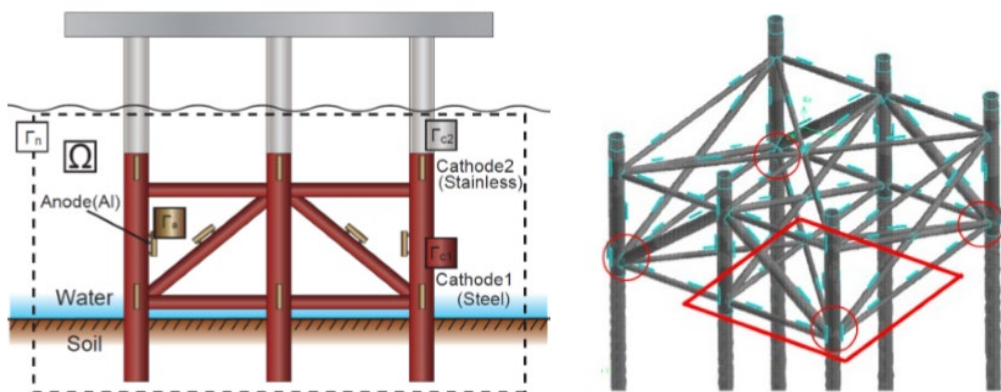
に低下することは無いということを示している。

(2) B港：矢板式構造物

前述のように、陽極の脱落が1個確認されたが、定期点検診断時に測定された電位は防食管理電位（-800 mV vs 海水塩化銀電極）を満足していたとの記録がある。この結果は、C港の結果同様、陽極が1個程度脱落しても、電気防食の効果が著しく低下することは無いということを示している。また、電位測定では、陽極1個程度の脱落の判定は困難であることを示唆している可能性もある。



付図-C.4 陽極を一時的に外した際の電位変化



付図-C.5 数値解析モデル (ジャケット式構造物)⁴⁾

2.3 数値解析による陽極脱落の影響の評価の例⁴⁾

文献 4)では、ジャケット式構造物を対象とし、陽極が脱落した際の防食効果への影響を数値解析に基づき検討を行っている。解析モデルを付図-C.5 に示す。この解析の場合、1 ジャケット中に設置された陽極 90 個のうち 3 個が脱落すると、防食状態を満足しない場合 (鋼材の電位が防食電位を下回る場合) がある結果となった。なお、脱落した個数が 2 個まででは鋼材の電位が防食電位を下回ることはいないという結果であった。上記の結果も、2.2 の結果同様、陽極が多数設置されている構造物においては、陽極 1 個程度が脱落しても防食効果が急激に損なわれる可能性は低いことを示唆している。

pp.11-15, 2013.

3. まとめ

国内の港湾・海洋鋼構造物において、電気防食用流電陽極の脱落およびその影響について、既往の知見を基に整理を行った結果、陽極が全く脱落していない事例は複数確認された。また、陽極が多数設置されている構造物においては、1 個程度陽極が脱落しても防食効果が急激に損なわれる可能性は低いことが改めて確認された。

参考文献

- 1) (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), 2009.
- 2) 山路徹ほか, 長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の耐久性評価に関する研究 (30 年経過時の報告), 港湾空港技術研究所資料, No.1324, 2016.6.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上), pp.455-460, 2018.
- 4) 米谷直樹, 天谷賢治, 審良善和, 田代賢吉, 飯田知宏：有限要素法を用いた海洋構造物における犠牲陽極消耗に対する防食限界の推定材料と環境, Vol.62,

港湾空港技術研究所資料 No.1392

2021. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

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

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