

# さび

152



日本防蝕工業株式会社

# さ び 第 152 号

## 目 次

ご挨拶 .....	1
日本防蝕工業株式会社 代表取締役社長	岩崎 順三
近接犠牲陽極の逆解析推定精度の検証 .....	2
日本防蝕工業株式会社 技術研究所	斎藤 達哉
〃	田代 賢吉
東京工業大学工学院システム制御系	天谷 賢治
亜鉛めっき鋼管柱の地際部における腐食挙動と電気防食の防食効果 .....	7
日本防蝕工業株式会社 技術研究所	阿部 健
技術開発部	後藤 大
北海道支店	岡林 弘明
エンジニアリング部	山本 悟
北海道電力株式会社 総合研究所 環境技術グループ	橋田 修吉
〃	辻野 二郎

# ご挨拶



日本防蝕工業株式会社

代表取締役社長 岩崎 順三

皆様方におかれましては、健やかに新年をお迎えになられたこととお慶び申し上げます。

ご承知の通り、平成最後の年となった昨年は全国各地で大規模な災害が発生しました。この日本という国が災害大国であることと、防災の重要性を改めて思い知らされました。この機会をお借りしまして、被災された皆様には謹んでお見舞いを申し上げますと共に、被災地の一日も早い復興を祈念いたします。

さて、当社は電気防食を生業に、社会と生活の安全に貢献することを経営理念とし、ただ一途に業務に取り組んでまいりました。そして、災害が発生した場合には、その影響を最小限に抑えるために、社会基盤の腐食による劣化および強度低下等を防ぐことが当社に課せられた使命であると考えております。これを果たすために、当社は日々の営業活動と長年にわたり培ってまいりました技術力を以てお客様にご満足いただける最適な防食施工を実現します。営業と技術、この2つの歯車を最大限に機能させ、社会基盤の維持管理の一翼を担えるよう、社員一同、一丸となって努めてまいり所存でございます。

また、当社の技術開発の成果を発表させていただく技術情報誌『さび』をご愛読いただきまして、誠に有難うございます。この度、第152号を発刊することができましたのも、ひとえに皆様方のお力添えのおかげと感謝申し上げます。

本年もより一層のご愛顧を賜りますようお願い申し上げます。

今回お届けする技術報告は「近接犠牲陽極の逆解析推定精度の検証」と「亜鉛めっき鋼管柱の地際部における腐食挙動と電気防食の防食効果」の2件でございます。

## ・近接犠牲陽極の逆解析推定精度の検証

当社は東京工業大学 天谷教授にご協力いただき、海洋鋼構造物を適切に維持管理する手法として、構造物近傍の電位情報から、数値解析を用いて犠牲陽極の発生電流を推定する逆解析手法を開発・提案してまいりました。この度は犠牲陽極の取り付け位置や形状が曖昧な場合でも、犠牲陽極ごとの発生電流、取り付け位置および形状を推定することのできる手法を開発しましたのでご紹介いたします。本手法が維持管理の時代を担うオンリー・ワンの技術になることを確信しております。

## ・亜鉛めっき鋼管柱の地際部における腐食挙動と電気防食の防食効果

亜鉛めっき鋼管柱は、電力供給および通信等の架空設備支持物として用いられ、土壤中に埋設される場合は塗装が施されます。しかし、地際部は腐食する場合があります。電気防食を適用した際も防食電流が流れにくいことが懸念されました。この度は地際部に対しても防食電流を供給可能な Mg 陽極の設置方法を考案し、模擬試験設備で検証しましたのでご紹介いたします。

# 近接犠牲陽極の逆解析推定精度の検証

日本防蝕工業株式会社 技術研究所 斎藤達哉  
日本防蝕工業株式会社 技術研究所 田代賢吉  
東京工業大学工学院システム制御系 天谷賢治

## 1. 緒言

重要な社会インフラ設備である海洋鋼構造物を適切に維持管理していく上では、その防食状態を経済的かつ効率的に推定する手法の確立が重要な課題である。これまでに我々の研究グループは、数値解析を援用した犠牲陽極の発生電流を推定する逆解析手法を開発し、提案してきた<sup>1)3)</sup>。逆解析とは、海洋鋼構造物近傍の電位情報より、犠牲陽極の未知の発生電流を推定する手法である。既報では、犠牲陽極を含む海洋鋼構造物全体の形状情報を数値解析メッシュで詳細に再現していた。しかし、実現場において以下のような問題が発生した場合に、適切な数値解析メッシュが構築できず、犠牲陽極の評価が困難であった。

- ・ 注目すべき海洋鋼構造物の図面がない場合
- ・ 犠牲陽極が図面と異なる位置に取り付けられている場合
- ・ 経年的な消耗による形状変化で、犠牲陽極の形状が不明な場合

上記課題に対応するため、我々の研究グループは「群点湧き出しモデル」を開発し、検討を重ねてきた<sup>4)5)</sup>。群点湧き出しモデルとは、犠牲陽極が取り付けられている可能性がある領域に、電流湧き出し点を設置してモデル化する手法である(以下では、電流湧き出し点を設置した領域を群点領域と呼称する)。しかし平岡らが提案した手法は、一箇所の群点領域内の推定された電流値の総和を1つの犠牲陽極の発生電流として評価していた。そのため、一箇所の群点領域内に複数の犠牲陽極が存在する条件では、犠牲陽極毎の評価が行えなかった。

そこで本問題を解決するため、群点湧き出しモデルとクラスタリングを組み合わせた新たなアプローチの検討を行った<sup>6)</sup>。クラスタリングとは、データの集合を部分集合毎に分類する手法であり、いわゆる教師なし学習手法である。すなわち、群点湧き出しモデルを作成し、逆解析により各湧き出し点の電流値を推定し、クラスタリングにより推定した電流値を犠牲陽極毎に分類する、というものである。本アプローチにより、上記問題が発生した場合でも、犠牲陽極毎の発生電流、取り付け位置および形状を評価することが期待できる。本稿では、本アプローチの有効性を検証するために行った数値実験について報告する<sup>7)</sup>。なお、数値計算には有限要素法を用いた。

## 2. 逆解析手法

### 2.1 群点湧き出しモデルの概要

Fig. 1 に群点湧き出しモデルの概念図を示す。群点湧き出しモデルは、数値モデルを構築する際に、犠牲陽極からの電流流出を多数の電流湧き出し点で表現し、これらを犠牲陽極が取り付けられている可能性がある領域に設置することで作成する。群点湧き出しモデルを用いることで、湧き出し点の電流値は、犠牲陽極近傍では自ずと大きな値となり、逆に犠牲陽極から離れると0mAに近い小さな値となる。以上のようなことから、位置不明問題下においても、犠

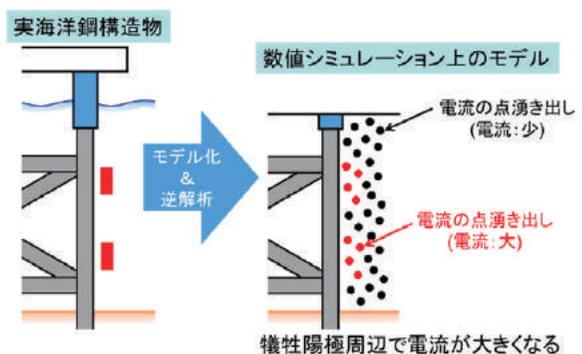


Fig. 1 群点湧き出しモデルの概念図

性陽極の取り付け位置、形状および発生電流の評価が可能となる。なお、本稿では作成した有限要素モデルの節点を電流湧き出し点とした。

## 2.2 海水中電位の順解析

解析領域として、海洋鋼構造物周囲の海水で満たされた領域を考える。領域の境界は、鋼材でカソードとなる境界 $\Gamma_c$ 、電流湧き出し点でアノードとなる $\Gamma_a$ および海水を仮想的に分割した境界 $\Gamma_n$ で囲まれる。領域内の電位を $\phi$ 、電気伝導度を $\kappa$ 、境界における法線方向の電流密度を $i$ とする。領域内においてイオンの増減や損失が生じないと仮定すると、電位 $\phi$ は支配方程式として式(1)を満たす。

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \phi) = 0 \quad \text{式(1)}$$

ここで境界条件は、それぞれ式(2)~(4)で与えられる。 $\Gamma_c$ では式(2)の通り、金属境界条件として鋼材の分極曲線を区間線形近似したものをを用いた。 $R$ は鋼材の分極抵抗、 $\phi_0$ は自然電位である。 $\Gamma_a$ では式(3)の通り、定電流指定の境界条件を、そして $\Gamma_n$ は絶縁境界条件を与えた。ただし、 $I$ は電流値である。

$$\phi = R \cdot i + \phi_0 \quad (\Gamma_c) \quad \text{式(2)}$$

$$I = I_{anode} \quad (\Gamma_a) \quad \text{式(3)}$$

$$i = 0 \quad (\Gamma_n) \quad \text{式(4)}$$

## 2.3 観測方程式の構築

本節では、測定値と推定値の関係を表す観測方程式について述べる。測定値は、海中の電位情報であり、本稿では鉛直な測定線上の電位差分とする。なお電位差分は相対位置を固定した数点における電位を差分することで得る<sup>8)</sup>。測定線上の $m$ 箇所の測定点における測定値からなる列ベクトルを $\Delta\phi'$ とする。また推定値である、 $n$ 点の湧き出し点からの電流値からなる列ベクトルを $x$ とする。ここで $\Delta\phi'$ を、電位差分の真の値 $\Delta\phi$ 、測定誤差やモデル誤差などの誤差をまとめた $\varepsilon$ の2つに分離する。領域内における電位は、式(1)を満足するため、測定値 $\Delta\phi'$ と推定値 $x$ の間には、式(5)で表される観測方程式が成立する。ただし、 $A$ は観測行列である。有限要素法により順解析を行い、観測行列の各成分を求めることにより、観測方程式を構築する。

$$\Delta\phi' = A \cdot x + \varepsilon \quad \text{式(5)}$$

## 2.4 最大事後確率推定法による逆解析

各湧き出し点の電流値を推定する逆解析手法として、最大事後確率推定法(以下ではMAP法と呼称する)を用いた。MAP法は、推定値の事前分布(推定値の確からしさを表す確率密度関数)と測定値が与えられたときに、事後分布(測定値が与えられたときの推定値の確率密度関数)を最大にするパラメータを最適解とする手法である。MAP法には測定値および事前情報の確からしさを与え、それらは正規分布で表現する。推定値 $x$ の平均値 $x_1$ および分散 $P_1$ を式(6)および式(7)に従い計算する。ただし、 $N(x_0, P_0)$ は推定値の事前分布、 $N(w, W_0)$ は測定誤差の事前分布を表す。なお、括弧内の各成分はそれぞれ正規分布の平均値および分散を意味する。また、 $^T$ は行列の転置を表す。

$$x_1 = x_0 + P_1 \cdot A^T \cdot W^{-1} (\Delta\phi' - A(x_0 + w)) \quad \text{式(6)}$$

$$P_1 = A^T W_0^{-1} A + P_0^{-1} \quad \text{式(7)}$$

## 2.5 k-means 法によるクラスタリング

式(6)より得られた各湧き出し点の推定値 $x$ の平均値 $x_1$ を、複数の犠牲陽極毎の発生電流として評価するために、 $k$ -means法によるクラスタリングを実施した。 $k$ -means法とは、中心点と部分集合(以下ではクラスタと呼称する)内のデータ間の距離の二乗の総和が最小となるように $k$ 個のクラスタに分離する手法であり、式(8)で表される評価関数 $J$ を最小化するアルゴリズムである。ただし、 $K$ はクラスタ数、 $N$ はデータ数であり、 $c_k$ はクラスタの中心点を意味している。また $o_n$ は湧き出し点の推

定電流値および位置座標を含んだ情報である。

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (o_n - c_k)^2 \quad \text{式(8)}$$

### 3. 矢板式岸壁を模擬した数値実験

#### 3.1 概要

本章では、本アプローチの有効性を数値実験により検証を行った。すなわち、有限要素法により模擬測定データを生成し、MAP法により各湧き出し点の電流値を推定する。そして、推定電流値をクラスタリングにより犠牲陽極毎に分類し、陽極発生電流が精度良く評価できているか検証した。解析対象は、Fig.2に示すような犠牲陽極が2個取り付けられている矢板式岸壁である。さらに、この2個の犠牲陽極間の距離  $R$  を種々変化させることで、近接犠牲陽極の逆解析推定精度の検証を行った。なお以下では、 $x$  軸方向は構造物長手方向、 $y$  軸方向は沖合い方向および  $z$  軸方向は水深方向を意味する。

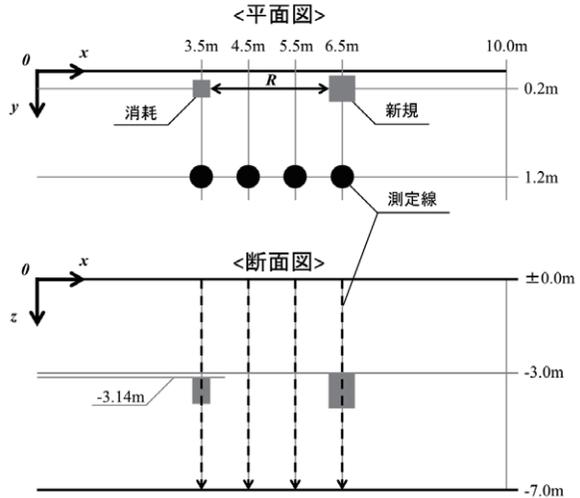


Fig. 2 数値実験モデルの概略図

#### 3.2 模擬測定データの生成

Fig.2に示すような、 $10.0^W \times 5.0^D \times 7.0^H$ mの直方体を解析領域とし、 $10.0^W \times 5.0^H$ mの一面を式(2)の通り金属境界条件を与え鋼材とし、他面を式(4)の通り絶縁境界とした。犠牲陽極は、残存量の多い犠牲陽極( $0.2^W \times 0.2^D \times 0.8^H$ m、以下では新規と呼称する)と消耗が進んだ犠牲陽極( $0.07^W \times 0.07^D \times 0.53^H$ m、以下では消耗と呼称する)の2種類を用意し、犠牲陽極中心から鋼材表面までの距離が0.2mとなるように配置した。犠牲陽極の取り付け位置は、新規： $x = 6.5\text{m}$ 、 $z = -3.0\text{m}$ 、消耗： $x = 3.5 \sim 6.0\text{m}$ ( $R = 3.0 \sim 0.5\text{m}$ )、 $z = -3.14\text{m}$ とした。また犠牲陽極には式(3)の通り、 $I_{\text{新規}} = 2.0\text{A}$ 、 $I_{\text{消耗}} = 0.5\text{A}$ の定電流条件を与え、これらの値を陽極発生電流の正解値とした。また、解析領域内の電気伝導度は $5.0\text{S/m}$ とした。この条件を基に、有限要素法により解析領域内の電位分布を順解析した。鋼材表面から1.2m離れた $x = 3.5, 4.5, 5.5, 6.5\text{m}$ の4箇所に鉛直な測定線を設定する。そして、測定線上を海面から海底に向けて2mm間隔で電位差分を取得した。ただし、電位差分はFig.3に示す相対位置を固定した4つの電極において、1つの電極を基準電極とした際の、他の3つの電極との電位差 $+\Delta\phi_x, -\Delta\phi_x, \Delta\phi_z$ である。これらに平均0mV、標準偏差0.2mVのガウス分布に従うノイズを与え、模擬測定データ $+\Delta\phi'_x, -\Delta\phi'_x, \Delta\phi'_z$ とした。

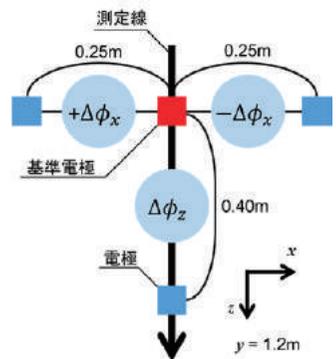


Fig. 3 測定点の関係

#### 3.3 観測方程式の構築

作成した群点湧き出しモデルの概略図をFig.4に示す。群点領域は鋼材表面から0.2m離れた $xz$ 平面上の $5.0^W \times 3.0^H$ mの領域とし、群点領域中心の $x, z$ 座標と鋼材中心 $x, z$ 座標が一致するように設

置した。群点領域内には電流湧き出し点を規則的に 3081 点設置した。今回設置した群点領域は、 $x$  軸方向において犠牲陽極中心の平面と同一である。

以下に観測行列の構築手順について述べる。3081 点ある電流湧き出し点のうち 1 点、例えば  $s = 1$  の湧き出し点のみが単位電流を持つ場合を順解析し、測定線上の電位差分を取得し、観測行列  $A$  の  $s$  列目に並べる。すべての湧き出し点に対して同様の操作を行うことで、観測行列  $A$  を構築する。なお、測定線の位置座標、測定間隔および電位差分の取得方法は前節と同様である。

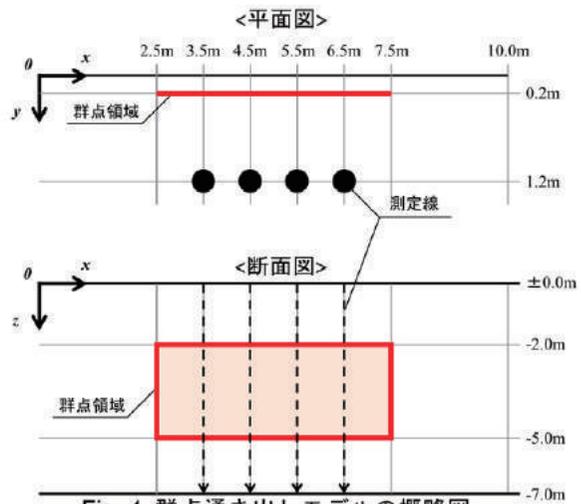


Fig. 4 群点湧き出しモデルの概略図

#### 4. 結果と考察

##### 4.1 犠牲陽極間の距離 $R = 3.0\text{m}$ の結果

以下に本アプローチを適用した結果の一例として、 $R = 3.0\text{m}$  としたときの推定電流値の  $xz$  平面上の 2 次元分布を Fig. 5(a) に示す。Fig. 5(a) は、各湧き出し点の推定電流値の大きさをカラーバーに従って表している。ただし、図中の黒色の矩形は、予め与えた犠牲陽極の取り付け位置と形状を示している。これより、矩形周囲の湧き出し点の電流値が大きくなっており、矩形から離れるに従って電流値は小さくなり、最終的には  $0\text{mA}$  に近い値となっている様子が認められる。このことから、新規・消耗ともに取り付け位置を精度良くかつおおよその形状も推定できているといえる。

つづいて、Fig. 5(a) に対して  $k$ -means 法によるクラスタリングを適用した結果を Fig. 5(b) に示す。湧き出し点は青色のクラスタと赤色のクラスタに分かれており、各々新規および消耗に対応する湧き出し点の集合である。ここで、各クラスタに含まれる湧き出し点の推定電流値の総和を各犠牲陽極の発生電流として評価する。その結果、新規： $2.28\text{A}$  (正解値： $2.0\text{A}$ )、消耗： $0.57\text{A}$  (正解値： $0.5\text{A}$ ) であり、いずれも正解値との誤差は  $10\%$  であった。これは、群点領域を鋼材近傍に設置したことが影響していると考えられる。すなわち、本来の犠牲陽極よりも測定線から離れた位置に群点領域が存在するため、測定線上の電場(電位差分)と同様の電場を形成するために、本来よりも大きめの電流値が推定されたと考えられる。

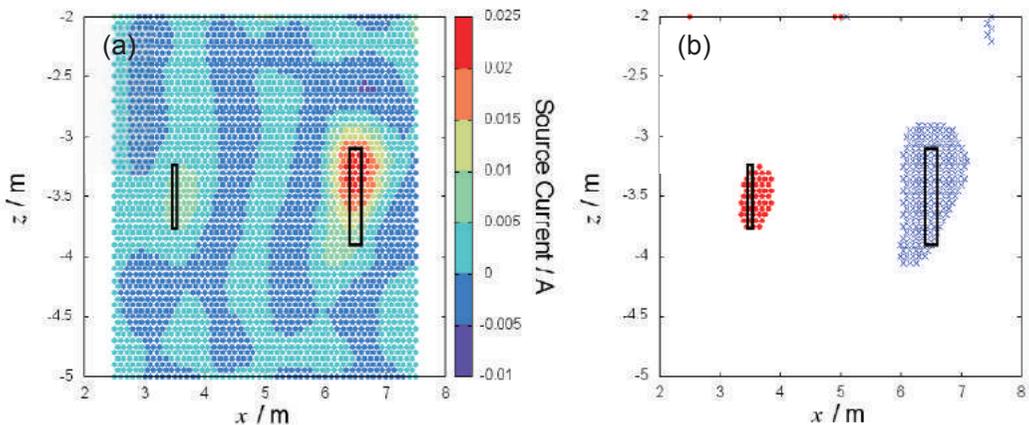


Fig. 5  $R = 3.0\text{m}$  の推定結果 (a)推定値の  $xz$  平面上の 2 次元分布 (b) $k$ -means 法を適用した結果

以上の結果から、陽極発生電流の推定値に 10%の誤差があるものの、位置不明問題下でも電位情報のみから犠牲陽極毎の取り付け位置および発生電流とおおよその形状の推定が可能であり、本アプローチはエンジニアリング上有意義であるといえる。

#### 4.2 近接犠牲陽極の発生電流推定精度の評価

Fig. 6 にすべての陽極間距離  $R$  に対して本アプローチを適用した結果を示す。Fig. 6 の横軸は陽極間距離  $R$ 、縦軸は推定電流値を示している。なお、図中の破線は下から消耗の正解値、新規の正解値および両者を合計した正解値である。これより、いずれの推定結果も正解値に対して約 10%の誤差があった。これは前述した要因によるものと考えられる。また、 $R = 0.5\text{m}$  の条件では新規と消耗の 2 つのクラスターへの適切な分類ができなかったため、図中に犠牲陽極毎のプロットがない。しかし、合計の電流値を見ると 2.79A(正解値: 2.5A)であり、他の条件と同程度の精度で求められていた。このことから、 $R = 0.5\text{m}$  のように陽極間距離が短いと、2 つのクラスターへの分類は困難であったが、1 個の犠牲陽極としての評価を行うことは問題ないといえる。

以上の結果から、本数値実験では  $R > 0.5\text{m}$  の条件のときに本アプローチを適用することで、犠牲陽極毎の取り付け位置、形状および発生電流を適切に評価できることが確認できた。

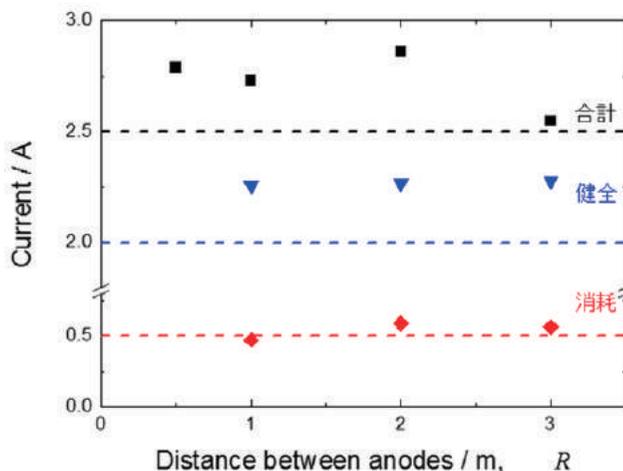


Fig. 6 各条件に本アプローチを適用した結果

#### 5. まとめ

群点湧き出しモデルとクラスタリングを組み合わせた新たなアプローチを検討し、その有効性を数値実験により評価した。以下に結果をまとめる。

- 1) 群点湧き出しモデルを用いて逆解析を行った結果、犠牲陽極近傍では大きな電流値が推定され、それ以外では小さな電流値が推定された。このことから、取り付け位置および発生電流を精度良くかつおおよその形状を推定できたと判断した。
- 2) クラスタリングによる犠牲陽極毎の発生電流の評価を行った結果、いずれも推定値との誤差は 10%であった。ただし、 $R = 0.5\text{m}$  の条件では適切なクラスターへの分類ができなかった。
- 3) 推定値の誤差の要因は、群点領域を鋼材近傍に設置したためだと考察した。
- 4) 位置不明問題が発生した場合でも、電位情報のみから犠牲陽極の取り付け位置、形状および発生電流を推定することができ、本アプローチはエンジニアリング上有意義である。

##### <参考文献>

- 1) 米谷, 他, *材料と環境*, **62**, p326-333(2013).
- 2) 斎藤, 他, *防錆管理*, **62**, p237-244(2018).
- 3) 斎藤, 他, *第 64 回材料と環境討論会 講演予稿集*, p389-392(2017).
- 4) 平岡, 他, *第 64 回材料と環境討論会 講演予稿集*, p393-396(2017).
- 5) 斎藤, 他, *材料と環境 2018 講演予稿集*, p215-218(2018).
- 6) 特願 2018-192925
- 7) 斎藤, 他, *第 65 回材料と環境討論会 講演予稿集*, p299-302(2018).
- 8) 特願 2017-111035

# 亜鉛めっき鋼管柱の地際部における腐食挙動と電気防食の防食効果

阿部 健<sup>\*1</sup>, 橋田 修吉<sup>\*2</sup>, 辻野 二郎<sup>\*2</sup>, 後藤 大<sup>\*1</sup>, 岡林 弘明<sup>\*1</sup>, 山本 悟<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 日本防蝕工業株式会社, <sup>\*2</sup> 北海道電力株式会社

## 1. 目的

近年、業界を問わず産業設備の保全コストの低減が求められており、設備材料の中でも亜鉛めっき鋼管柱は、その低コスト性と優れた耐食性により、建築物用鋼管杭の他、電力供給、通信および照明用等、種々の目的および用途に応じて利用されている。架空設備支持物に用いる場合は、コンクリートの打設が困難な箇所では土壤へ直接埋設される。その際、地上部および土壤埋設部の境界である地際部には塗装が施されているが、紫外線等により、劣化が発生する場合がある。塗装の劣化が発生すると、地際は土壤中の電解質および乾湿繰り返し等により、亜鉛めっきが消失し、母材の鋼材が腐食する<sup>1)</sup>。また、マグネシウム合金(以下、Mg と呼ぶ)等を用いた犠牲陽極法による電気防食は土壤埋設部には有効であるが、地際は乾燥しやすいことから、防食電流が供給されにくく、防食効果が十分に得られない場合がある。

そこで本報では、地際部でも防食電流が供給される Mg 陽極の設置方法を検討し、模擬試験設備により防食効果を検証したので報告する。具体的には、Mg 陽極を接続した鋼管柱近傍に短冊状の SS400 製鋼片を複数並べることで構成された試験片を設置し、地際の腐食電流および防食電流の記録、および試験片表面状態の調査を実施した。

## 2. 試験方法

### 2.1 鋼管柱および試験片の概要

亜鉛めっき鋼管柱(以下、鋼管柱と呼ぶ)および試験片の埋設状況を図 1、試験片の形状を図 2 および試験条件を表 1 に示す。既設の鋼管柱に対して、Mg 陽極 2 本を深さ 300mm で向かい合うように埋設し、地際の電気防食を行った。この 43 日後、試験片 3 式を鋼管柱の地際部に固定し、埋設した。試験片は、PVC 製型枠内にリード線をはんだ付けした H10×W30×t2mm の SS400 製鋼片(以下、鋼片と呼ぶ)を等間隔に 15 枚並べて固定し、鋼片間の隙間にはエポキシ樹脂材を充填することで作製した。また、PVC 製型枠の両端には、試験片を固定するための番線用孔を設けた。この試験片の内 2 式は、それぞれ Mg 陽極に対向および直交する方向に設置し、鋼管柱および Mg 陽極と電氣的に導通させ、防食電流を供給した。

また、電氣的に独立した防食電流を供給しない試験片も 1 式、設置した。鋼片間は固定抵抗 10Ω を挿入して接続し、固定抵抗に発生する電圧をデータロガーで自動計測し、鋼片から流出入する電流値を

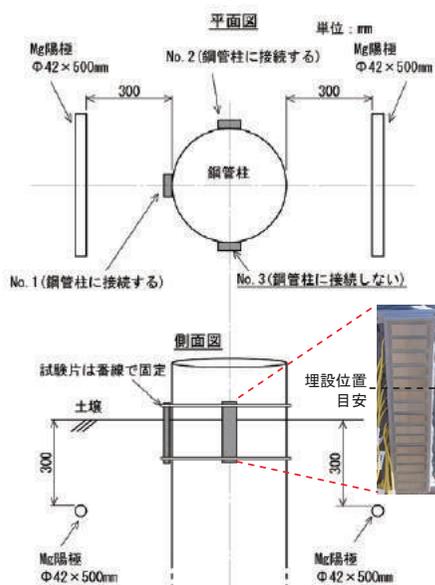


図 1 鋼管柱および試験片埋設状況

算出した。本試験は、北海道石狩管内で、2015年10月から2017年5月まで589日間実施した。また、試験期間中の気温は-21.7から31.9℃であった。

表1 試験条件

試験片番号	設置方向	電気防食
No.1	陽極と対向	あり
No.2	陽極と直交	〃
No.3	〃	なし

## 2.2 測定項目

鋼管柱の埋設後、定期的にMg陽極発生電流、鋼片間で発生する電流(以下、鋼片間電流と呼ぶ)および鋼管柱地際部の電位を測定した。鋼管柱地際部の電位は、地表面において試験片近傍に飽和硫酸銅照合電極(以下、CSEと呼ぶ)を設置することで測定した。

試験終了後、試験片を掘り上げて走査型電子顕微鏡SEM-EDXを用いて鋼片表面の付着物を分析した。また、鋼片の腐食減量から腐食速度を算出した。腐食減量は、試験開始前の質量 $W_1(g)$ と除錆処理後の質量 $W_2(g)$ の差から求めた。除錆処理方法は、JIS Z 2371 塩水噴霧試験方法の化学的腐食生成物除去方法に準じたもので、塩酸-ヘキサメチレンテトラミン溶液で酸洗した。また、酸洗による質量減は供試しない鋼片を3枚用意し、同様の処理を行い、その平均の減量を $W_a(g)$ とし、補正腐食減量 $W_r(g)$ を式(1)に従って計算した。また、補正腐食減量 $W_r(g)$ 、鋼片の表面積 $A(mm^2)$ 、鉄の密度 $\rho(g/cm^3)$ および試験期間 $t(y)$ を用いて腐食速度 $P(mm/y)$ を式(2)に従って計算した。

$$W_r = W_1 - W_2 - W_a \quad (1)$$

$$P = W_r / \{ (\rho / 1000) \cdot A \cdot t \} \quad (2)$$

## 3. 試験結果と考察

### 3.1 Mg陽極発生電流の経時変化

Mg陽極発生電流の経時変化を図3に示す。Mg陽極発生電流は初期に最大 $25.3mA/m^2$ が認められたが、2016年2月に $16.1mA/m^2$ で約2/3となった。これは測定時期が冬季であり、測定日の気温が平均-4.3℃と非常に低く、電極反応速度の低下および土壌抵抗率の増加によるものと考えられる。その後、2016年8月には20.0mAまで増加する傾向であり、気温の上昇と共に土壌抵抗率が低下したためと考えられる。また、2015年8月とその1年後である2016年8月のMg陽極発生電流を比較すると、25.3から $20.0mA/m^2$ に低下したことが認められた。これは、後述のように、電気防食により鋼管柱表面に電着物が析出したことで防食に必要な電流が少なくなったためと考えられる。

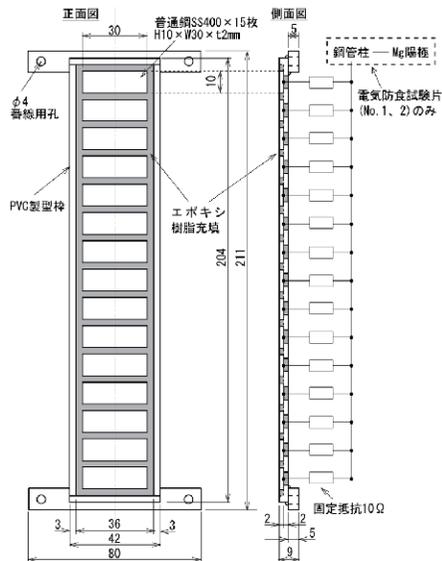


図2 試験片形状

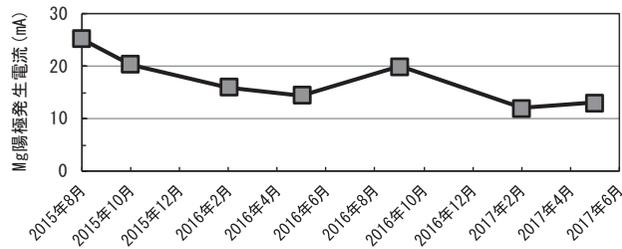


図3 Mg陽極発生電流の経時変化

### 3.2 鋼管柱地際部の電位の経時変化

試験片近傍に照合電極を設置して計測した鋼管柱電位の経時変化を図4に示す。試験片 No.1 近傍より No.2 近傍の鋼管柱電位は貴な傾向であった。これは、Mg 陽極と距離が近い No.1 近傍に比べ、直交方向の No.2 近傍は Mg 陽極との距離が遠く、防食電流が供給されにくかったためと考えられる。しかし、試験開始時から鋼管柱電位は防食電位より卑な値を示しており、腐食性が高い地際部においても Mg 陽極に対する位置関係によらず防食状態であったことが認められた。

2016年5月以降は、鋼管柱電位は次第に卑化する傾向があった。これは、前述のように鋼管柱表面に電着物が析出したことで陰分極しやすくなったためと考えられる。

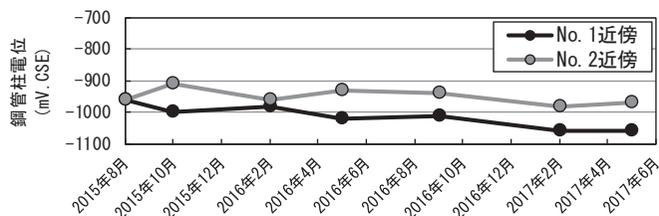


図4 試験片近傍の鋼管柱電位の経時変化

### 3.3 防食および鋼片間電流密度の経時変化

試験片の各鋼片に流れる電流密度の経時変化を図5および図6に示す。このとき、プラス側は土壌中から鋼片に流入する電流で防食傾向、マイナス側は流出する電流で腐食傾向を示す。

土壌中の鋼片に流れる電流密度は試験片 No.1 では流入のみで、No.3 では流入および流出が認められた。このことから、No.3 では鋼片間でマクロセル腐食が発生したが、No.1 では防食電流が供給されることで、腐食が抑制されたと考えられる。

試験開始時の2015年10月には、No.1 および No.3 の防食電流密度ならびに鋼片間電流密度は高かったが、時間の経過と共に減少する傾向であった。これは、No.1 では鋼片表面に電着物が固着したことで防食に必要な電流が減少し、No.3 では各鋼片表面が土壌中において電気化学的に安定となり、鋼片間の電位差が小さくなったためと考えられる。また、No.1 では冬季には防食電流がほとんど流れなかった。これは、温度の低下および試験片周辺土壌の凍結により、土壌抵抗率が上昇したためと考えられ、No.3 でも電流の流出がほとんどなかったことから、冬季は防食電流が流れにくい、腐食速

度も低下することが示唆された。なお、No.1 および No.2 はほぼ同様の傾向であり、Mg 陽極と直交する方向でも防食電流の流入が認められた。

2016年6月から8月に急激に電流密度が上昇する時期があった。これらは降雨量が多い時期であり、土壌抵抗率が低下していたと考えられる。また、全ての試験片の土壤中鋼片で、電流密度の急激な上昇が発生した時期には大気中 GL +10mm 位置の鋼片でも電流密度が上昇した。これは、雨水により、地表面に水膜が形成され、大気中の鋼片表面に達したために電流が流れたと考えられる。

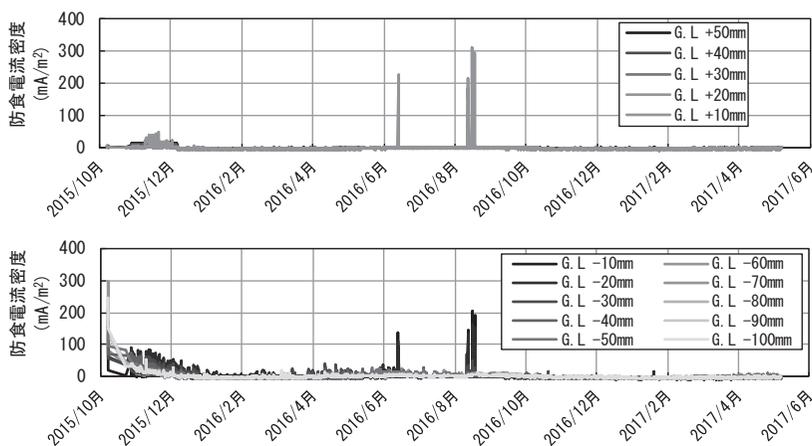


図5 試験片 No.1 の電流密度の経時変化(上:大気中、下:土壤中)

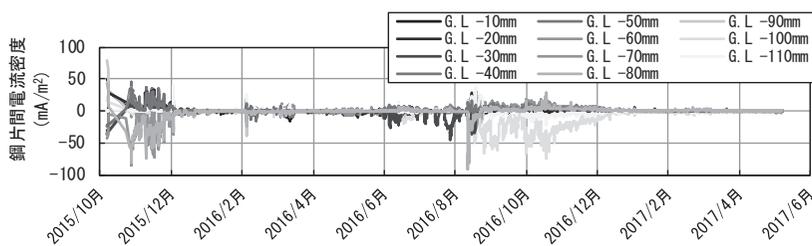


図6 試験片 No.3 の電流密度の経時変化(土壤中)

### 3.4 試験片の掘上調査結果

#### (1) 試験片の表面状態

試験片 No.1 および No.3 で試験終了時に GL -20mm 程度の位置にあった鋼片表面の付着物について SEM-EDX により元素分析した結果を表 2 に示す。電気防食を適用した No.1 は無防食の No.3 と比べると、Ca が多く検出された。

これは、3.1 項でも述べたように、電気防食によって鋼片表面に CaCO<sub>3</sub> 等の電着物が形成されたためと考えられる<sup>3)</sup>。また、No.3 では Fe が多く検出されたため、腐食が進行していたと言える。

表2 鋼片表面付着物の成分

成分	濃度(%)	
	No.1	No.3
C	20.9	13.5
O	45.1	38.2
Al	6.1	3.0
Si	14.6	7.1
Ca	7.3	0.82
Fe	3.6	34.9
その他	2.4	2.5

## (2) 試験片の腐食速度

各鋼片の腐食速度を図7に示す。無防食のNo.3では、試験終了時に土壤中に位置した鋼片の腐食速度は最大0.032mm/yであったことに対して、電気防食を適用した試験片では、No.1の試験終了時G.L直下で最大0.003mm/yであった。このことから、電気防食により腐食速度が無防食試験片の1/10程度に抑制されたため、土壤中の鋼材の地際部であってもMg陽極を地表面近くに設置し、電気防食を行うことで防食効果が得られることが分かった。

No.1からNo.3の試験開始時から大気中に位置した鋼片では最大0.011mm/y程度であり、土壤中に位置する電気防食を適用した鋼片より高い値を示した。大気中では防食電流は流れないが、健全な鋼管柱は亜鉛めっきにより防食されており、また、巡視等による状態監視も容易なため、土壤埋設部とは異なり、問題にはならないと思われる。

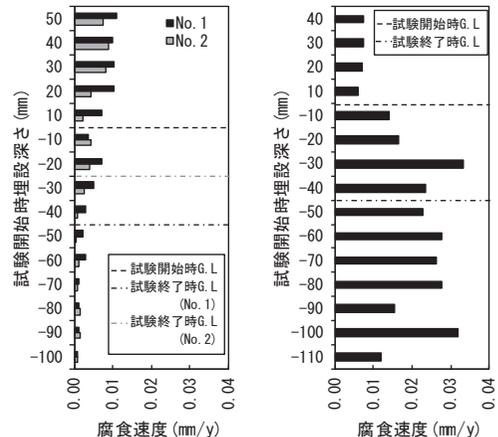


図7 腐食速度(左:No.1、2 右:No.3)

## 4. まとめ

地際部に設置した試験片に対し、Mg陽極を用いた電気防食を適用した結果、以下のように地際部に位置する土壤中鋼片でも腐食が抑制されることが明らかになった。

- 1) 電気防食を適用した鋼片では、地際部でも防食電流が流れ、表面には電着物が付着した。
- 2) 無防食の試験片は腐食したが、電気防食を適用すると腐食が抑制された。
- 3) 冬季は防食電流および腐食電流が共に低下した。

本工法は簡便に施工でき、塗装やモルタルのように気象条件が限定されず、養生期間も不要であり、施工性に優れた防食対策であるといえる。ただし、電極埋設深さが浅いことから、耕作地帯では農業機械等により電極が損傷するおそれがあるため、適用に際して、十分な事前調査が必要である。

## 参考文献

- 1) 栗栖孝雄：腐食センターニュース，腐食防食学会，No.066，pp.25-44(2013)。
- 2) 電気学会・電食防止研究委員会編：電食防止・電気防食ハンドブック，(株)オーム社，p.235(2011)。
- 3) 福沢秀刀：防食技術，腐食防食協会，Vol.36，No.10，pp.671-673(1987)。

### 臨海プラント海水ライン防汚装置

## 省エネ海水電解防汚装置：SP型

臨海プラント工場等の海水ライン防汚を目的とした海水電解装置は**大電流**で電解するため設備投資費用が**高く**電力消費量も**大きい**等の問題がありました。

日本防蝕工業㈱は、およそ半世紀に渡り海水電解方式の海洋生物付着防止装置を3,000基以上製造、販売してきた実績のもと、初期費用を抑え低ランニングコストを実現した**省エネ**海水電解防汚装置をご提供します。



SP06-KF 型 「塩素発生量：9.4kg/h」

#### 電解槽

SP06-KA (塩素発生量：1.57kg/h) × 6 槽

設置寸法：

120W × 90D × 1,900H (cm)

SP06KA 重量：

20kg/樹脂製槽、33kg/金属製槽

#### 電源装置

電力消費量：40kW

設置寸法：95W × 90D × 165H (cm)

重量：700kg

### 省エネ海水電解防汚装置：SP型の特徴(従来品との比較)

#### 初期設置費用

電源装置、電解槽の小型化により搬入、設置場所が従来に比べ大幅に改善されております。

また、電解電流がおよそ従来品の1/20になるため電力配線系統の設置費用も安価です。

#### ランニングコスト

##### 「陽極更新」

重機不要、電解槽 (SP06-KA) の重量が<sup>※</sup>20kg (樹脂製)、33kg (金属製) と軽量ですので、作業員1~2人、所要時間半日程度と経済性に優れています。

##### 「電力費用」

電源装置の変換効率が高く、従来品比較で電力費用の約**48%低減**を実現しています。

例：塩素発生量9.4kg/hの電力使用量は従来77kWでしたが、本装置は40kWで年間電力費用換算すると約**500万円**低減できます。(16円/kWh換算；当社比)

## 製品紹介

HACCP対応

# セサイルガード® Jr II 海水電解二次殺菌装置

セサイルガードは、水産加工場や魚市場で使用する海水を電気分解し、生成させた次亜塩素酸で海水を殺菌することによって水産物の衛生管理を向上させる装置です。従来の紫外線タイプの装置では、海水自体は殺菌されても当該作業場の床や使用する器具等の殺菌については十分でない場合があります。

この対応策として「海水電解装置 セサイルガード Jr II」が開発されました。海水電解の電解レベルを上げて処理した海水で床や器具等を洗浄することにより、効果的に殺菌できる装置です。

設置工事也不要とせず、当該作業場の端末海水蛇口にホースを接続するだけで使用が可能で、運転方法も家電製品の感覚で簡単にご使用いただけます。

## 衛生管理のグレードアップ

通常海水を電気分解して効果的な殺菌力を付与します。  
水産作業場の品質管理レベルが向上します。

## 床も使用器具も積極的に殺菌

作業場床面・魚箱の洗浄・殺菌。  
ベルトコンベアー・選別機の洗浄・殺菌。  
陳列台・陳列シートの洗浄・殺菌。

## 安価なコスト・簡易な運用

海水配管の蛇口に接続するだけで使用できます。  
設置工事が不要です。  
簡単に移動ができます。



## 全国を網羅するサービスネットワーク

---

- 北海道地区 ●北海道支店  
〒060-0807 札幌市北区北七条西 1-1-2 (SE 札幌ビル 6 階)  
Tel (011) 736-6591 FAX (011) 736-6593
- 東北地区 ●東北支店  
〒980-0804 仙台市青葉区大町 2-15-28 (藤崎大町ビルディング 1 階)  
Tel (022) 264-5511 FAX (022) 265-6506
- 関東甲信越地区 ◎本社  
〒144-8555 東京都大田区南蒲田一丁目 21 番 12 号 (昭和ビル)  
Tel (03) 3737-8400 FAX (03) 3737-8479
- 広域営業部 (本社内)  
Tel (03) 3737-8441 FAX (03) 3737-8459
- 東京支店 (本社内)  
Tel (03) 3737-8450 FAX (03) 3737-8458
- 千葉営業所  
〒260-0834 千葉市中央区今井 1-20-1 (Y's21 ビル 2 階)  
Tel (043) 263-2118 FAX (043) 263-2558
- 新潟営業所  
〒950-0086 新潟市中央区花園 2-1-16 (三和ビル 3 階)  
Tel (025) 244-0911 FAX (025) 247-6030
- 中部地区 ●名古屋支店  
〒464-0075 名古屋市千種区内山 1-10-10  
Tel (052) 735-3481 FAX (052) 735-3480
- 四日市営業所  
〒510-0093 四日市市本町 1-1 (服部ビル 3 階)  
Tel (059) 351-7163 FAX (059) 353-8599
- 関西地区 ●大阪支店  
〒530-6004 大阪市北区天満橋 1-8-30 (OAP タワー 4 階)  
Tel (06) 6356-9800 FAX (06) 6356-9820
- 神戸営業所  
〒651-0085 神戸市中央区八幡通 4-1-38 (東洋ビル 7 階)  
Tel (078) 242-2535 FAX (078) 242-5426
- 本四営業所  
〒700-0962 岡山市北区北長瀬表町 3-1-12 (北長瀬駅前 II ビル 1 階)  
Tel (086) 805-0287 FAX (086) 244-1077
- 中国地区 ●中国支店  
〒730-0051 広島市中区大手町 5-1-1 (大手町ファーストビル 3 階)  
Tel (082) 243-2720 FAX (082) 248-2364
- 徳山営業所  
〒745-0073 周南市代々木通り 1-30 (山陽ビル 4 階)  
Tel (0834) 31-3762 FAX (0834) 31-3791
- 九州地区 ●九州支店  
〒810-0013 福岡市中央区大宮 1-4-34 (五常物産ビル 2 階)  
Tel (092) 523-8001 FAX (092) 523-8002
- 沖縄営業所  
〒900-0006 那覇市おもろまち 4-10-18 (タカダ新都心マンション 2 階)  
Tel (098) 862-0226 FAX (098) 864-2383