

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560477

研究課題名（和文） 羽田D滑走路防食管理のための数値解析援用防食モニタリング技術の開発

研究課題名（英文） Development of corrosion monitoring techniques using numerical inverse analysis for Haneda Runway D corrosion protection management

研究代表者

天谷 賢治（AMAYA KENJI）

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：70251642

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では上記の要請に答え問題点を克服するために羽田 D 滑走路に代表される巨大海洋構造物の数値解析援用防食モニタリング技術を開発した。観測方程式は、海洋構造物の形状を考慮した有限要素法計算により構成される。本推定問題は悪条件であるため、ベイズ推定のアプローチを導入する。本手法の有効性を示すために、実構造物において検証実験を実施した。この手法は、簡易な測定により、海洋鋼構造物の防食状態を推定することが可能となる。

## 研究成果の概要（英文）：

A new method for estimating the current of sacrificial anodes and the surface potential of the structure from the potential measurement was developed. The observation equation is formed by finite element method considering the geometry of the sea structure. Since this estimation problem is ill conditioned, the Bayesian Estimation approach is employed to overcome the problem. In order to demonstrate the effectiveness and efficiency of the present method, the verification experiment was performed at the real steel structures. This method enables us to estimate the corrosion protection state of the marine steel.

## 交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 1,900,000 | 570,000   | 2,470,000 |
| 2011年度 | 600,000   | 180,000   | 780,000   |
| 2012年度 | 900,000   | 270,000   | 1,170,000 |
| 年度     |           |           | 0         |
| 年度     |           |           | 0         |
| 総計     | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理工学 腐食数値解析 モニタリング 逆問題

## 1. 研究開始当初の背景

海洋鋼構造物の一種であるジャケット式  
 栈橋では、骨組みとなる鋼材に対して2種類  
 の防食が行われている。空気と海水両方に触

れる飛沫帯および干満帯には耐海水性ステン  
 レス鋼ライニングが施されており、また、  
 海中の鋼材に対しては流電陽極方式による  
 電気防食が行われている<sup>1)</sup>。犠牲陽極はその

性質上時間とともに消耗し、発生する電流量は減少する。そのため、発生電流量の測定による犠牲陽極の寿命評価が必要となる。現在の検査方法として、構造物近傍の電位測定による防食状態の簡易検査と、ダイバーによる犠牲陽極の詳細検査が行われている<sup>2)</sup>。しかし、判定結果の信頼性や定量性、さらに大型鋼構造物においては、時間や労力のコストが問題となる。

そこで我々のグループは、新たな海洋鋼構造物の電気防食モニタリング法として、構造物近傍の電位から、数値解析を用いて犠牲陽極の電流量を推定する逆解析手法を提案している<sup>3)</sup>。

## 2. 研究の目的

本研究では、逆解析を実環境に適用できる解析モデルの構築や、海洋環境と測定に起因する解析パラメータの不確定性を考慮した逆問題の設定、ベイズ推定による逆問題の適切化、そして実際のジャケット構造物への手法の適用を行い、既存の点検手法に替わる、新たな数値的電気防食モニタリング法を開発することを目的とする。

この報告書では紙面に限りがあるので、実際のジャケット式栈橋構造を持つ港湾施設であり、Fig.1に示される大井埠頭ジャケットにおける、手法の有効性の検証実験について報告する。

## 3. 研究の方法

### (1)犠牲陽極発生電流量同定手法

解析モデルの構築

ジャケットのモデルをFig.2に示す。解析領域として、構造物周辺の海水および海底土で満たされた領域  $\Omega$  を考える。領域の境界は、犠牲陽極表面のアノードとなる境界  $\Gamma_a$ 、骨組の鋼材で、カソードとなる境界  $\Gamma_{c1}$ 、 $\Gamma_{c2}$ （それぞれ海中、土中の鋼材を表す）、海面付近の耐海水性ステンレス鋼でカソードとなる境界  $\Gamma_{c3}$ 、海水を仮想的に分割した海中領域の鉛直面境界（以下、海中壁と呼ぶ） $\Gamma_{sea}$ 、海中領域の上部の境界  $\Gamma_{air}$ 、そして海底土を仮想的に分割した土中領域の境界  $\Gamma_{soil}$  で囲まれる。

領域内の電位を  $\phi$ 、電気伝導度を  $\kappa$  とし、各境界上の電位を  $\phi_a$ 、 $\phi_{c1}$  のように、 $\phi$  の下付き文字で表す。また境界における法線方向の電流密度を  $i$  とし、 $i$  も同様に  $i_a$  のように表す。領域においてイオンの損失や増加が生じないとし、海中と土中の電気伝導度が不均一であることを考慮すると、領域内の電位  $\phi$  は支配方程式として式(1)を満足する。なお本稿では解析上、電位  $\phi$  は金属に対する海水の電位を考えているため、通常電気化学で用いる、

溶液に対する金属の電位の符号を逆転させている。

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

ここで境界条件をそれぞれ次式で与える。

$$\begin{aligned} i_a &\equiv \kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} = i(I_{anode}) && (\text{on } \Gamma_a \text{ (Sacrificial Anode)}) \\ \phi_{c1} &= -Ri_{c1} + \phi_{offset} && (\text{on } \Gamma_{c1} \text{ (Steel Leg in the Sea)}) \\ i_{c2} &= i(I_{steel-soil}) && (\text{on } \Gamma_{c2} \text{ (Steel Leg in the Soil)}) \\ i_{c3} &= i(I_{stainless}) && (\text{on } \Gamma_{c3} \text{ (Stainless Lining)}) \\ i_{sea} &= i(I_{sea}) && (\text{on } \Gamma_{sea} \text{ (Sea Wall)}) \\ i_{air} &= 0 && (\text{on } \Gamma_{air} \text{ (Sea Surface)}) \\ i_{soil} &= 0 && (\text{on } \Gamma_{soil} \text{ (Soil Wall)}) \end{aligned}$$

まず、 $\Gamma_a$ 、 $\Gamma_{c2}$ 、 $\Gamma_{c3}$ 、 $\Gamma_{sea}$  にはそれぞれの電流量  $I_{anode}$ 、 $I_{steel-soil}$ 、 $I_{stainless}$ 、 $I_{sea}$  により決まる電流密度を与える。

$\partial/\partial n$  は外向き法線方向微分を表す。ここで  $\Gamma_{c2}$  のみに、土中レグ表面の電流密度  $i_{steel-soil}$  は地下深くなるにつれて低減するという、代表的な分布形状を与え、残り3種の境界では電流密度は一律とした。次に  $\Gamma_{c1}$  では、金属境界条件として、鋼材の分極曲線を線形近似したものを用いる。本研究における検査対象では、測定される電位の最大値と最小値の差が最大 100[mV] 程度であるので、その範囲内では分極曲線を線形とみなす。 $R$  は分極曲線の傾きである。 $\phi_{offset}$  は線形近似の際の定数項である。 $R$  の事前分布は、鋼材試験片を用いた実験により得た分極曲線を、測定データの電位域で線形近似して取得した。また、 $\phi_{offset}$  は領域内の電位のオフセット値を表しており、各境界からの電流量と同じ未知パラメータとして扱う。なお、 $\Gamma_{air}$ 、 $\Gamma_{soil}$  は絶縁境界として扱う。すなわち、領域外への電流の流入は海中壁  $\Gamma_{sea}$  のみから起こると仮定する。

未知パラメータ  $I_{anode}$ 、 $I_{steel-soil}$ 、 $I_{stainless}$ 、 $I_{sea}$ 、 $R$ 、 $\phi_{offset}$  に仮の値を与え、式(2)のもと、式(1)を数値解析で解くことにより、領域内における電位や、各境界からの電流量を計算する。

### (2)逆問題の設定

測定点における、誤差を含んだ測定値を  $\phi'$  とする。 $\phi'$  は  $m$  個の測定値  $\phi'_1$ 、 $\phi'_2$ 、 $\dots$ 、 $\phi'_m$  からなる列ベクトルである。また、同定値である、 $n$  種類の境界からの電流量およびオフセット電位からなる列ベクトルを  $\mathbf{X}$  とする。今回は犠牲陽極、土中レグ、ステンレス鋼、海中壁の4種類を考え、 $n=4$  とする。ここで  $\phi'$  を、電位の真の値  $\phi$ 、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  $\phi'$  と同定値  $\mathbf{X}$  の間には、式(3)で表される観測方程式が成立する。

$$\phi' = A_{(R)}\mathbf{X} + \epsilon \quad (3)$$

$A_{(R)}$  は  $R$  に依存する  $m$  行  $(n+1)$  列の観測行列である。有限要素法計算を行い、 $A_{(R)}$  の各成分を求めることにより、観測方程式を構築する。

### (3) ベイズ推定による未知数の同定

電位の測定誤差や各境界の電流値、オフセット電位の事前情報を事前分布として正規分布で表現する。 $\mathbf{R}$  に仮定値を与え、推定尤度分布の平均値  $\hat{\mathbf{X}}_{(R)}$  および分散  $P_{(R)}$  を、式(4)(5)に従い計算する。そして、 $\mathbf{R}$  の事前分布  $p(R)$  を用いて式(6)を計算することで、測定値  $\phi'$  を得たときの同定値  $\mathbf{X}$  の尤度分布  $L(\mathbf{X}|\phi')$  を得る。(7)は未知パラメータの事前情報  $\mathbf{X}_0$  および電位の測定誤差  $\epsilon$  の事前分布を表す。括弧内はそれぞれ平均値、分散行列である。 $T$  は転置を表す。

$$\hat{\mathbf{X}}_{(R)} = \hat{\mathbf{X}}_0 + P_{(R)}A_{(R)}^T W^{-1} \{ \phi' - (A_{(R)}\hat{\mathbf{X}}_0 + \bar{w}) \}$$

$$P_{(R)} = A_{(R)}^T W^{-1} A_{(R)} + P_0^{-1}$$

$$L(\mathbf{X}|\phi') = \int N(\hat{\mathbf{X}}_{(R)}, P_{(R)}) p(R) dR$$

$$\mathbf{X}_0 = N(\hat{\mathbf{X}}_0, P_0) \quad \epsilon = N(\bar{w}, W)$$

## 4 研究成果

### (1) 港湾施設における検証実験

#### ① 解析対象施設の概要

検証実験を行った大井埠頭ジャケットは、大型コンテナ船が接岸する港の外縁部分であり、一部の犠牲陽極に電流計測装置が取り付けられている。ジャケット近傍の電位を測定し、逆解析で同定した電流量と電流計の値を比較することで手法の検証を行う。ジャケットは2002年に運用が開始され、現在は犠牲陽極からの電流量も安定している。

#### ② 数値計算および電位測定

数値計算に用いる有限要素法モデルを Fig.3 に示す。解析領域としては、電位測定点を中心に周囲のレグが6本、犠牲陽極が59

個含まれる領域のモデルを作成した。

犠牲陽極は Fig.4 のように、水深ごとに3つのグループに区切り、個々の犠牲陽極の電流量は同一グループ内では同じであると仮定して、グループごとの電流量を同定する。また海中壁は4方向それぞれを未知数とした。未知パラメータは、犠牲陽極3グループ、ステンレス鋼、土中レグ、海中壁4方向の電流量と、全体のオフセット電位である。

電位測定では、海側のレグ近傍の水深方向の電位分布を Fig.6 のように測定した。計3箇所と同様の測定を行い、さらにステンレス鋼直近の電位も1点測定した。海中の電気伝導度は  $3.56[\text{S/m}]$  で、ほぼ一定であった。

### (2) 同定結果

未知パラメータの事前情報と同定結果を Table.1 に、電位分布の同定結果を Fig.7 に示す。

事前情報としては、 $R$  の事前分布は、 $1000[\text{mV}]$  に保持したみがき鋼板の分極曲線 (Fig.5) を継続的に測定し、 $-910 \sim -940[\text{mV}]$  の範囲で線形近似して取得した。その他のパラメータは防食設計時の値を用いた。また、測定誤差として最大  $50[\text{cm}]$  の電極の位置ずれを考慮し、平均値  $0[\text{V}]$ 、標準偏差  $3.0[\text{mV}]$  の事前分布を与えた。

次に同定結果について説明する。電流計が設置されている犠牲陽極は、Fig.6 の丸印のついているもので、電流量が No.1 が約  $0.9[\text{A}]$ 、No.2 が約  $0.7[\text{A}]$  であり、ともに  $\pm 0.02[\text{A}]$  の範囲内で推移していた。グループ1, 3 の同定結果と比較すると、それぞれ平均値からの標準偏差 ( $1\sigma$ ) 内に収まっており、また電位分布についても、同定値が測定値を良く再現することができた。

### まとめ

海洋鋼構造物の防食状態を、構造物近傍の電位測定から、ベイズ推定を用いた逆解析により推定する方法を開発した。本稿では港湾施設で行われた検証実験により、犠牲陽極発生電流量を、同定値の標準偏差 ( $1\sigma$ ) 内に正解値が収まる精度で同定できることを示した。



Fig.1 Ohi Jacket Photo<sup>1)</sup>

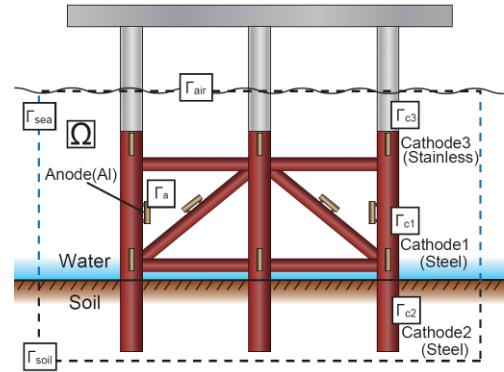


Fig.2 Model of Jacket Structure

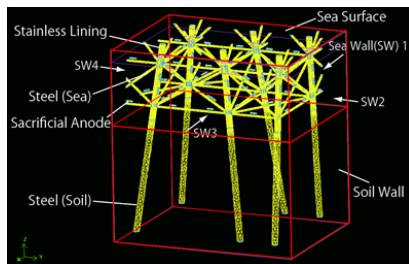


Fig.3 Ohi Jacket FEM Model

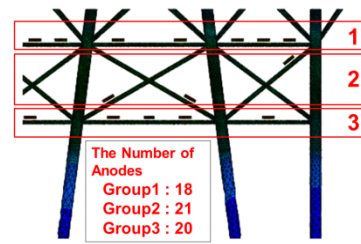


Fig.4 Group Division of Anodes

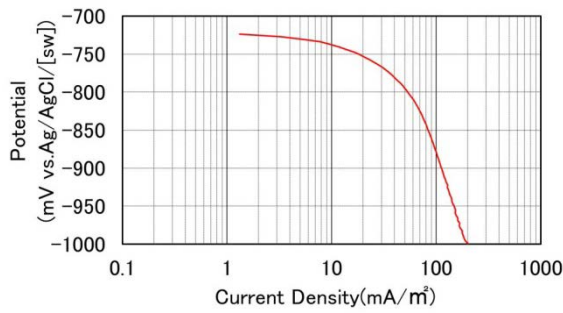


Fig.5 Polarization Curve (steel)

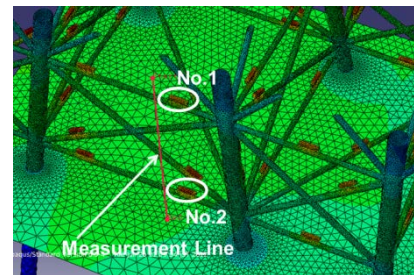


Fig.6 Measurement Line

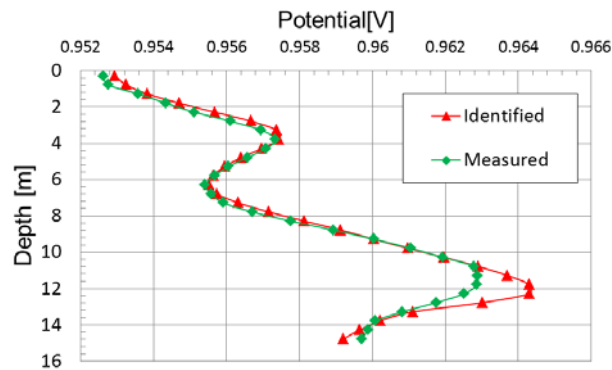


Fig.7 Identified and Measured Potential Distribution

Table.1 Result of Inverse Analysis of the Ohi Jacket Experiment

| Place                                 | A Priori Information     |                        | Identified Result           |                           |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                                       | Average                  | Standard Deviation     | Average                     | Standard Deviation        |
| Steel-Sea Surface Electric Resistance | 2.0[Ωm <sup>2</sup> ]    | 0.5[Ωm <sup>2</sup> ]  | —                           | —                         |
| Anode Group 1                         | 1.5[A/anode]             | 1.0[A/anode]           | 0.835[A/anode]              | 0.104[A/anode]            |
| Anode Group 2                         | 1.5[A/anode]             | 1.0[A/anode]           | 1.070[A/anode]              | 0.122[A/anode]            |
| Anode Group 3                         | 1.5[A/anode]             | 1.0[A/anode]           | 0.785[A/anode]              | 0.181[A/anode]            |
| Stainless Lining                      | -130[mA/m <sup>2</sup> ] | 50[mA/m <sup>2</sup> ] | -41.667[mA/m <sup>2</sup> ] | 6.329[mA/m <sup>2</sup> ] |
| Steel-Soil                            | -10[mA/m <sup>2</sup> ]  | 50[mA/m <sup>2</sup> ] | -0.523[mA/m <sup>2</sup> ]  | 5.804[mA/m <sup>2</sup> ] |
| Sea wall 1                            | 0[A]                     | 5.0[A]                 | 0.537[A]                    | 3.118[A]                  |
| Sea wall 2                            | 0[A]                     | 5.0[A]                 | -0.079[A]                   | 2.881[A]                  |
| Sea wall 3                            | 0[A]                     | 5.0[A]                 | -1.413[A]                   | 1.459[A]                  |
| Sea wall 4                            | 0[A]                     | 5.0[A]                 | 1.131[A]                    | 2.349[A]                  |
| Offset Potential                      | 1.0[V]                   | 1.0[V]                 | 0.879[V]                    | 0.010[V]                  |

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① ベイズ法を用いた海洋構造物の犠牲陽極発生電流量同定法の開発  
材料と環境 62-8 2013 査読有
- ② 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 62-1 2013 11-15 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① 米谷直樹, 天谷賢治. データ同化を用いた電気防食予測システムの開発, 第62回理論応用力学講演会, 東京 2013年3月8日.
- ② 米谷直樹, 天谷賢治, 審良善和, 田代賢吉, 飯田知宏, 山路徹. ベイズ推定を用いた海洋鋼構造物の電気防食モニタリング法の開発, 第59回材料と環境討論会, 第59回材料と環境討論会, 旭川, 2012年9月20日
- ③ 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 春季大会, 東京, 2012年4月26日
- ④ 米谷直樹, 天谷賢治. 逆解析を用いたバラストタンクの塗装モニタリング法, 第24回計算力学講演会, 岡山, 2011年10月8日

- ⑤ 米谷直樹, 天谷賢治, 大西有希, 中山淳. 数値逆解析を用いたバラストタンクの塗装状態のモニタリング精度向上, 第23回計算力学講演会, 岡山, 2010年9月24日

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

天谷 賢治 (AMAYA KENJI)  
東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授  
研究者番号：70251642

#### (2) 研究分担者

なし

#### (3) 連携研究者

審良 善和  
独立行政法人港湾空港技術研究所  
構造研究領域 研究官

田代 賢吉  
日本防蝕工業株式会社  
技術研究所 研究員

飯田 知宏  
日本防蝕工業株式会社  
技術研究所 研究員