

平成 29 年 12 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420455

研究課題名(和文) 多様な先験情報の逆解析統合フレームワークを適用した腐食モニタリング手法の開発

研究課題名(英文) Development of corrosion monitoring system using inverse analysis framework for integrating various type of a priori information

研究代表者

天谷 賢治 (Amaya, Kenji)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：70251642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では少ない数の電位計測から海中の構造物表面の腐食電流を数値逆解析によりモニタリングする手法を開発した。以下の4点の着眼点に基づいた新しい逆解析のフレームワークを提案した
1) 構造物の幾何的情報が欠如している場合には仮想境界条件を適用する 2) 経験や勘に基づくあいまいな情報をファジー数および隠れ変数で表現し定量的に扱う 3) 多様な先験情報を統一的に統合するためにベイズ推定を適用する 4) 対象構造物に電流を印加する能動的計測により情報を補う。開発した解析手法の有効性を検証するために数値シミュレーションおよび実験を実施した。

研究成果の概要(英文)：In this research, corrosion monitoring system which identifies corrosion currents on seawater structures from small number of potential measurements using numerical inverse analysis was developed. The new inverse analysis framework was proposed based on the following 4 approaches. 1) Virtual boundary condition is applied when the geometrical information of structures is unknown. 2) Useful ambiguous information based on experience and intuition are taken account with fuzzy reasoning. 3) Bayesian estimation is employed to integrating various type of a priori information. 4) In order to increase the measurement data, currents are impressed actively and potential change is measured. In order to demonstrate the effectiveness of the developed analysis method, numerical simulation and practical experiment has been performed.

研究分野：計算力学

キーワード：維持管理工学 逆問題 数値解析 腐食モニタリング

1. 研究開始当初の背景

[腐食モニタリングの必要性] 海に囲まれた国土をもつわが国では船舶、発電所、各種プラントなど多くの重要な産業構造物が臨海部に施設されている。また、高度成長期において急速な港湾整備の要請で鋼管杭や鋼矢板が港湾鋼構造物の建設に大量に使用されてきた。鋼材には錆びるという宿命的な欠点があり、特に海洋構造物における腐食の問題は深刻である。海洋環境に位置する鋼構造物を長期間健全な状態を維持していくには鋼材を腐食から守るための十分な防食対策と維持管理が必要となってくる。今後、日本の経済は前述した高度な経済成長を望むことは難しいので構造物が腐食により大きい被害が発生しても、容易に改造や改修等を実施できる状況下に置かれてはいない。我が国における腐食損失は年間3.9兆円にもものぼるといふ報告がある。平成25年3月に国土交通省は「社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置」を公表した。その中で「社会資本の維持管理の効率化を推進するため、IT等を活用した先端的インフラ維持管理システムの構築に向けた実証実験等を推進する」と謳っている。重要インフラの構造物全体の電位分布、電流密度分布を得ることは、構造物の維持管理上非常に重要な情報であるため、本研究手法の確立はきわめて重要である。また、本研究の目的は国交省が示すような社会要請に合致している。

[腐食モニタリングの問題点] 腐食モニタリングとは、現在そのとき(In-situ)の腐食速度を遠隔的に監視し、それに基づいて何らかの腐食対策を施すことである。構造物の腐食管理に対しては腐食モニタリングが、経済性、安全性の上で直接的なメリットがある。しかし、ナノテクなどに代表される技術分野に対して華やかさに欠け腐食モニタリング技術の日本での開発は低調であり、フィールドで適用可能な腐食モニタリング技術の多くは、国外に依存しているのが実情である。従来の研究により腐食の非破壊検出がある程度可能となっている。しかし、測定に多くの労力と時間と熟練を必要とすること、人が近づきにくい環境で測定する場合や構造物が複雑な場合には検出の精度が不十分であることなどの問題点が残されていた。さらに、腐食は電気化学・金属工学の分野で古くから多くの研究されてきているがコンピューターシミュレーション技術の適用は逆に遅れている。

2. 研究の目的

本研究では少ない数の電位計測から海中の構造物表面の腐食電流を数値逆解析によりモニタリングする手法を開発する。問題の悪条件性の克服には手元にある多様な先験情報をいかに適切化に有効に統合して活用するかが鍵となる。本研究では以下の4点の着眼点に基づいた新しい逆解析のフレームワークを提案する。1) 構造物の幾何的情報が欠如している場合には仮想境界条件を適用する。2) 経験や勘に基づくあいまいな情報をファジー数および隠れ変数で表現し定量的に扱う。3) 多様な先験情報を統一的に統合するためにベイズ推定を適用する。4) 対象構造物に電流を印加する能動的計測により情報を補う。さらに、数値シミュレーション及び実験による検証を実施し開発した手法の有効性を確かめる。

3. 研究の方法

本研究では少ない数の電位計測から海中の構造物表面の腐食電流を数値逆解析によりモニタリングする手法を開発する。前章で示した目的を達成するための研究を以下の手順・方法により進めた。

ステップ1 仮想境界条件、隠れ変数、ベイズ推定、を組み込んだ静電場逆解析プログラムを開発する。・複数の海洋構造物どうしの相互干渉による腐食の進行速度を定量的に推定する解析システムを開発する。解析目的は、注目する構造物の電流密度分布を推定することである。電流密度を推定するために、解析領域を海水領域とし電場解析をする。解析領域の電位分布がラプラス方程式を満たすと仮定する。通常境界要素法の定式化を用い、支配方程式、境界条件より連立方程式を得る。得られた方程式は未知数の数が方程式の数を上回るため単独では解くことができない。そのため、領域内部の数箇所での電位の測定値から得られる式を用い、逆問題を設定する。・不確実な形状情報を仮想境界で取り扱う本研究では、構造物の形状情報が不完全であるという問題点を解決するために、仮想境界を設定し解析をする手法を提案する。正確な形状の情報が得られない構造物について仮想境界で囲む。次に、仮想境界上の境界条件は不完全規定境界として、解析を進める。ここで、正確な電流密度を求めたい構造物においては、形状情報が得られているとする。

ステップ2

あいまいな先験情報をファジー数で取り扱

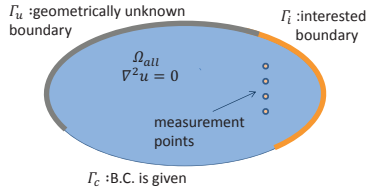


Fig. 1: Inverse problem setting with geometrically unknown structure

う手法をシステムに取り込む。さらに実際の海洋構造物を対象とした実証実験のために必要な電位測定システムを開発する。

・あいまいな先験情報をファジー数で取り扱う解析に用いる電気伝導度や境界条件などの情報には、正確な情報が得られる場合、不正確な情報が得られる場合、全く情報が得られない場合など様々なレベルがある。正確な情報が得られる場合は確定値として表現でき、解析に利用できるが、あいまいな情報は従来の方法ではそのまま扱うことができない。本研究ではファジー集合を用いることで、多様な情報を有する腐食問題を統一的に表現する。

4. 研究成果

(1) 幾何情報不完備問題に対する仮想境界条件の適用手法

少ない数の電位計測から海中の構造物表面の腐食電流を数値解析を援用してモニタリングする手法を実際の現場に適用する場合、注目する構造物の周囲に幾何的情報および境界条件が曖昧な構造物が存在し、適切な数値解析モデルを構築することができない問題が存在していた。

本研究では、解析領域近傍に幾何的情報や境界条件が曖昧な構造物(不明構造物)が存在する場合に仮想境界を適用する手法を提案する。すなわち、数値モデルを構築する際に注目する構造物と不明構造物を隔てる仮想境界を設置する。逆問題の悪条件性を緩和するための仮想境界の設置位置および電位計測位置の決定法についても考察する。

a) 腐食モニタリング逆問題 本逆問題の数値モデルについて説明する。Fig.2に示すように、電位がラプラス方程式で満たされる領域 Ω を考える。領域内にいくつかの電位測定点が存在する。電位および電流密度が未知でありこれらを同定したい興味のある境界 Γ_i 、興味のない不明境界 Γ_u および境界条件が既知の境界 Γ_c に囲まれている。

不明境界の困難を実際的に取り扱うためにFig.2のように仮想境界 Γ_v を導入し、不明境界を含まない領域 Ω を設定する。 Ω は電位および電

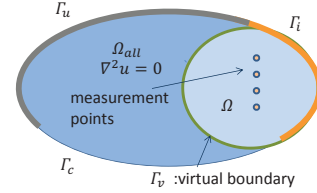


Fig. 2: Inverse problem setting with virtual boundary

流密度の双方が未知である境界 Γ_i 、 Γ_u および境界 Γ_c で囲まれている。 Γ_i 、 Γ_c および Γ_v の電位をそれぞれ x_i 、 x_c および x_v とし、未知量ベクトル x を次式のように定義する。

$$x \equiv (x_i^T, x_c^T, x_v^T)^T \quad x_i = [P]x \quad (1)$$

ここで、行列 $[P]$ は x から x_i を抽出する射影行列である。領域 Ω の電位はラプラス方程式を満たすので、 x を仮定すれば Ω 内に設置された測定点における電位の値 y を得ることができる。未知量ベクトル x と観測量ベクトル y の関係を表す観測方程式は次式となる。

$$y = [A]x + \varepsilon \quad (2)$$

ここで、行列 $[A]$ はFEMやBEMなどを用いて x に対する y の応答を数値解析することにより得ることができる。また、 ε はモデルや計測の誤差を表す誤差ベクトルであり、次式のような確率密度をもつ確率変数とする。

$$p(\varepsilon) \sim N(\mu, [\Sigma]) \quad (3)$$

b) 仮想境界および測定点の設定について 本逆問題において、精度のよい同定を行うために以下の2つの疑問が生ずる。1)仮想境界をどのように設定するのが望ましいか。2)測定点をどこに設置するのが望ましいか。以下ではこれらの疑問を数値的に検討する。

事前分布 $p_{ap}(x)$ の共分散行列が $[\Sigma_{ap}]$ であるとき、測定 \bar{y} を得た場合の興味のある未知量ベクトル x_i の尤度は次式となる。

$$L(x_i|\bar{y}) = \int p(\bar{y} - [A]x)p_{ap}(x)dx_u \sim N(\hat{x}, Q_i) \quad (4)$$

ただし、

$$\hat{x} = ([A]^T[\Sigma]^{-1}[A] + [\Sigma_{ap}]^{-1})^{-1}[A]^T\bar{y} \quad (5)$$

$$[Q_i] = [P]([A]^T[\Sigma]^{-1}[A] + [\Sigma_{ap}]^{-1})^{-1}[P]^T \quad (6)$$

x_i の共分散行列 $[Q_i]$ のノルムが小さいほど同定精度が高いことを意味する。

Fig.3に示すような内径1,外径Rの円環を考える内周側を興味のある境界 Γ_i ,外周側を仮想境界 Γ_v とする. Γ_i および Γ_v 上の電位分布をそれぞれ32項のフーリエ級数で展開し,その係数を x_i, x_v とする. 測定点を半径 $\rho=1.1$ の位置に $n_i=32$ 点,半径 ρ_v の位置に n_v 点だけ配置する. $R=5,10$ としたときに n_v および ρ_v をさまざまに変化させて $[Q_i]$ のノルムを計算し,望ましい測定点に関する知見を得る.

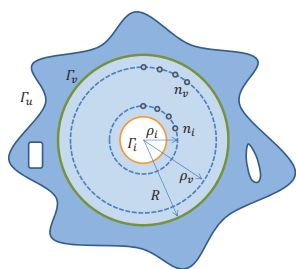


Fig. 3: Example analysis model:

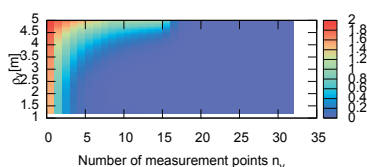


Fig. 4: norm of $[Q_i]$ for different measurement points and location ($R=5$)

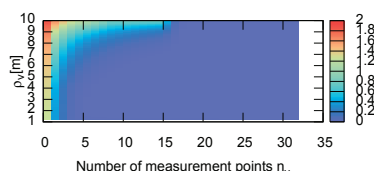


Fig. 5: norm of $[Q_i]$ for different measurement points and location ($R=10$)

計算結果をFig.4からFig.5に示す. これらから1) n_v を大きくする場合, 2) ρ_v を小さくする場合, 3)仮想境界の半径 R を大きくする場合の3つの場合に同定精度を向上できることがわかる.

このことを考察するためにFig.6に $R=5$ とし, Γ_v 上に電位分布がデルタ関数となる境界条件を与えたときのリング領域内の電位分布を示す. デルタ関数はフーリエ級数の63次の項までの級数として計算した. この図からリング領域内の電位は中心に近づくほど滑らかになっていくのがわかる. これから Γ_v 上の周波数が高い成分は測定点が Γ_v から離れるにつれて減衰していることが予想できる.

これを確認するために, 中心からの位置に対するFig.6の電位分布の周方向スペクトル分布

をFig.7に示す. 高い周波数成分ほど測定点が Γ_v から離れるにつれて減衰していることがわかる. 以上から Γ_v を遠ざけた場合に, x_v において低次の周波数成分のみを考慮すれば x_i の同定には十分であることがわかる. この低次成分を精度よく同定するためには高次成分の少ない Γ_v を遠ざけた位置の計測情報を得ることが有利である.

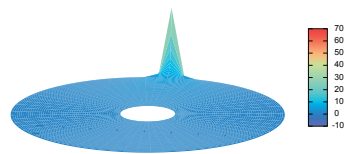


Fig. 6: Potential distribution when B.C. on Γ_v is given as δ function

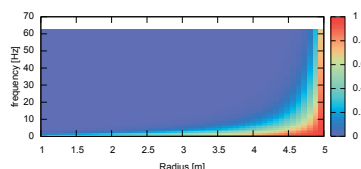


Fig. 7: Spacial spectrum of circumferential potential distribution for different radius

c) おわりに 本研究では, 海洋構造物の防食電流を同定する逆問題において, 解析領域近傍に幾何的情報や境界条件が曖昧な構造物(不明構造物)が存在する場合に仮想境界を適用する手法を提案した. 逆問題の悪条件性を緩和するための仮想境界の設置位置および電位計測位置の決定法について考察した. さらに, 本逆問題において未知境界を興味のある境界とそれ以外の境界の2つのタイプに分け, 興味のある境界値を精度よく同定するにはどうすべきかという新しい問題を提起した.

(2) ファジー推定およびベイズ理論を適用したフレームワーク

問題の悪条件性の克服には手元にある多様な先験情報をいかに適切化に有効に統合して活用するかが鍵となる. 本研究では経験や勘に基づくあいまいな情報をファジー推論を適用して定量的に扱うとともに, 多様な先験情報を統一的に統合するためにベイズ推定を適用する逆解析のフレームワークを提案する.

a) ファジィベイズ推定の枠組み 次式の観測方程式の下で観測値 y が与えられたとき未知量 x を推定する問題を考える.

$$y = Hx + \varepsilon \quad (7)$$

ここで ε は観測誤差およびモデル誤差を表す確率変数とする. なお, ε の確率密度関数 p_ε は与

えられるものとする。

また, x に関連する潜在変数 z が先験情報として得られるとする. その関連は次に示すような if-then型のファジールールで表現する

$$\begin{aligned} &\text{if } z_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } z_n \text{ is } A_{in} \\ &\text{then } x \text{ is } B_i, \quad (i = 1, l) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, l はルールの総数, $A_{ij}, B_i (i = 1, \dots, l) (j = 1, \dots, n)$ はファジィ集合, z_j は前件部変数, x は後件部変数である. また, A_{ij} に対するメンバシップ関数を $\mu_{A_{ij}}, B_i$ に対するメンバシップ関数を μ_{B_i} とする.

以下のようなステップからなる推定法を提案する. なおステップ1,2,3,5は推論法はMamdaniの推論法と呼ばれ, 本研究ではベイズ推定のフレームワークをステップ4に統合する.

1. ルール i の前件部の適合度 $\alpha_{A_i}(z)$ を次式で求める.

$$\alpha_{A_i}(z) \triangleq \bigwedge_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(z_j) \quad (9)$$

2. ルール i に対する推論結果を次式で求める.

$$\beta_{B_i, A_i}(x|z) \triangleq \alpha_{A_i}(z) \wedge \mu_{B_i}(x) \quad (10)$$

3. すべてのファジールールに対する統合された先験情報の推論結果を次式で求める.

$$\gamma_{AB}(x|z) \triangleq \bigvee_{i=1}^l \beta_{B_i, A_i}(x|z) \quad (11)$$

4. ファジィ集合で表現された先験情報 $\gamma_{AB}(z, x)$ を事前情報としてベイズ推定を適用する.

$$p(x|\bar{y}, z) \propto L(x|\bar{y}) \wedge \gamma_{AB}(x|z) \quad (12)$$

ここで, $L(x|\bar{y})$ は観測値が得られたときの x の尤度であり次式で記述される.

$$L(x|\bar{y}) = p_\varepsilon(\bar{y} - Hx) \quad (13)$$

5. 推論結果を重心法で非ファジィ化する. 実際の解析においてはモンテカルロフィルターや粒子フィルターで適用されているようなサンプリング手法で計算を実施する.

$$\rho_{AB}(x|\bar{y}, z) \triangleq \frac{\int x \gamma_{AB}(z, x) L(x|\bar{y}) dx}{\int \gamma_{AB}(z, x) L(x|\bar{y}) dx} \quad (14)$$

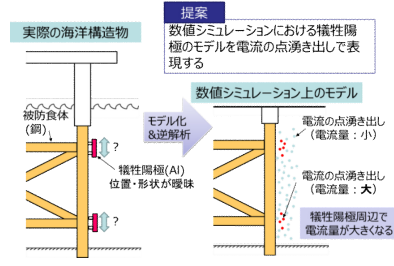


Fig. 8: 幾何情報不明の犠牲陽極の湧き出し点群によるモデル化

b) 腐食電流同定問題への適用 前節で説明したファジィベイズ推定の枠組みを腐食電流同定問題に適用する. 海洋構造物において構造物近傍の電位計測データ y から構造物表面の腐食電流を同定する問題を考える. 構造物表面の腐食電流の分布を離散化し, これを未知ベクトル x とする. y と x の代数関係である観測方程式(1)は海水や土壌などの媒体中の電位分布をラプラス方程式で記述し, 有限要素解析などを用いて得ることができる.

(3) 犠牲陽極位置不明問題

少ない点数での電位計測から海中の構造物表面の防食電流を同定する本研究の方法は, 海洋構造物全体の形状情報を数値解析メッシュで再現し順解析によって観測方程式を構築する. しかし実際に適用する場合に, 犠牲陽極の位置・形状が事前情報と異なるため適切な数値解析メッシュを構築することができない問題がある. ここでは, 犠牲陽極の位置及び形状情報が曖昧な場合に点群湧き出しモデルを適用する手法を提案する. すなわち, 数値モデルを構築する際に犠牲陽極からの電流の流出を犠牲陽極が設置されている可能性がある領域に電流の点湧き出しを散布してモデル化する. このアプローチにより犠牲陽極の位置・形状が曖昧であっても複数の散布点湧き出しが構造物周辺の防食電場を表現することが期待できる.

Fig.8に提案手法の概念図を示す. 位置および形状が曖昧な犠牲陽極の防食電流量を同定したい. そこで数理モデルにおいて犠牲陽極からの電流流出を, 電流の点湧き出しを犠牲陽極が設置されている可能性がある領域に広くカバーするように散布してモデル化する. つぎに逆解析によって各点の湧き出し電流量を同定する. 犠牲陽極の近傍にある点湧き出しのみが電流値を持つことが期待できる.

a) 双子数値実験の概要 本節では, 提案した逆解析の有効性を双子数値実験により検証する. すなわち, 模擬測定データを数値計算で生成し, 模擬測定データから本手法により

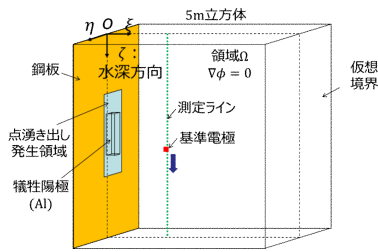


Fig. 9: 計測モデルの概略図

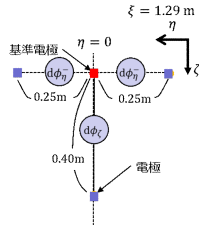


Fig. 10: 電位差計測の測定点

犠牲陽極の電流量が精度良く同定できるか検証する．解析対象はFig.9に示すような矢板式岸壁に設置された犠牲陽極を想定する．

b) 模擬測定データの生成 Fig.??の様に一辺5mの立方体内を領域 Ω とし，1面が鋼板材料であり，他面は仮想境界とする．犠牲陽極の寸法は ξ, η 方向0.19m， ζ 方向1.043mであり，取り付け位置は鋼板の中心かつ鋼板との表面間距離が0.1mとなる．鋼板領域の境界条件は $R=1[\Omega m^2], v_0=0.73[V]$ とする．仮想境界の境界条件は絶縁となる．犠牲陽極境界の境界条件は定電位1.05[V]とした．領域内の電気伝導度は5.0S/mとした．境界要素法を用いて領域 Ω の電位分布を順解析する．電位勾配はFig.10のような位置関係にある電極間の電位差とする．赤く示すのが電位基準となる基準電極であり，図の緑線のように $\xi=1.29, \eta=0[m]$ となる鉛直な測定ラインを移動させながら，海上から海底までを10cm間隔で電位勾配を取得する．数値計算した電位勾配に測定誤差を加えて並べた列ベクトルを観測値 (du) とする．測定誤差は平均0mV，標準偏差0.1mVのガウス性ノイズとした．

c) 観測行列の構築 本手法で提案する点湧き出しは，鋼板から0.195m離れた η と平面上にランダムに152点配置した．この平面は ξ 方向には犠牲陽極の中心である． η 方向の長さは1.19m， ζ 方向の長さは2.043mであり，犠牲陽極表面から0.50mずつ広がっている．各点湧き出しに単位湧き出しを与え，複数回の順計算により測定電位勾配の応答を求め観測方程式を作成する．

d) 結果 異なる100個の測定誤差を乱数で生成し，これらに対し防食電流の推定をMAP法に

より行うノイズリアライゼーションを実施した．その推定結果を表1に示す．推定値の平均と正解値を比べると，誤差+3.8

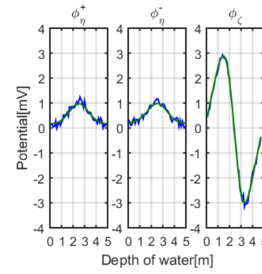


Fig. 11: 電位差分布の推定結果

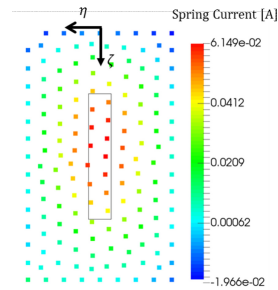


Fig. 12: 電流湧き出しの推定結果

犠牲陽極の位置及び形状情報が曖昧な場合に点湧き出しモデルを適用する手法を開発した．矢板式岸壁を模した数値実験において詳細な犠牲陽極の位置が不明な場合でも犠牲陽極の防食電流量を3.8%の精度で推定できることを示した．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

1.平岡泰明, 天谷賢治, 大西有希. 腐食モニタリングにおける曖昧な先験情報を活用した逆解析手法. 日本機械学会, 第27回計算力学講演会, 2014年11月23日, 盛岡

2.天谷賢治. 多様な先験情報の統合フレームワークを適用した逆解析腐食モニタリング手法. 材料と環境2017, 2017年05月24日東京

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

〔その他〕ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者天谷賢治 (AMAYA Kenji) 東京工業大学・工学院・教授 研究者番号: 70251642