

パイプ形状を有する非軸対称 3次元腐食問題の 効率的な境界要素解析法

An Efficient Boundary Element Method for Non-axisymmetric
Three-Dimensional Corrosion Problems

天谷賢治*・青木繁**・高沢宏彰***・浦郷正隆****・宮坂松甫†

Kenji AMAYA, Shigeru AOKI, Hiroaki TAKAZAWA,
Masataka URAGOU and Matsuho MIYASAKA

*工博 東京工業大学助教授 情報理工学研究科 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

**工博 東京工業大学教授 情報理工学研究科 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

***工修 東京工業大学大学院 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

****工博 東京工業大学助手 工学部 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

†工博 荏原総合研究所

An efficient numerical method is proposed for non-axisymmetric three-dimensional corrosion problems involving axisymmetric structures. The knowledge of physical quantities (potential and current density) on the surface of corroding materials is very important in corrosion monitoring and corrosion protection. Boundary element method is suitable for corrosion analysis, because it doesn't require discretization of internal elements. Although geometry of a structure is axisymmetric, enormous number of elements is necessary to discretize the real structure, since surface physical quantities of the axisymmetric structure are affected by other structures and electrodes. To reduce the boundary elements, our method is based on complex Fourier series expansion of boundary quantities in circumferential direction of axisymmetric structures. When axisymmetric structures depart from other structures and electrodes, this method has the advantage of decreasing the number of series, because surface physical quantities are more axisymmetric. In order to demonstrate the usefulness of the method, two example problems of buried pipelines in soil and a sea-water pump for cathodic protection system are presented.

Key Words : boundary element method, complex Fourier series, corrosion, axisymmetric structures, non-axisymmetric fields.

1. 緒言

構造物の腐食解析は、構造物表面の電流密度および電位を求めるポテンシャル問題に帰着される。そのため腐食解析には解析領域内部の要素分割を必要としない境界要素法^{1) 2) 3) 4)}が適している。

従来では、埋設パイプライン、海水ポンプ、プラント施設などのパイプ形状をもつ構造物を解析する場合、パイプ形状部における周方向の電位・電流密度分布は一定として離散化して解析を行ってきた。⁵⁾

近傍の構造物、電極の影響によりパイプ形状部における周方向の電位・電流密度分布を考慮する必要がある場合には、膨大な数の要素が必要であるため、効率的な解析手法の開発が望まれていた。

本研究ではこのような場合のパイプ形状部における周方向の電位・電流密度分布が急激な変化を含まないことに着目し、複素フーリエ展開を利用した効率的な腐食解析法を開発した。

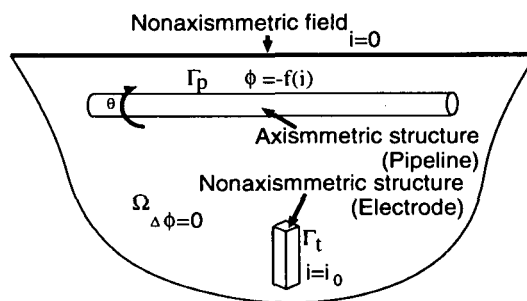


図-1 解析領域

2. 支配方程式と境界条件

土壌や海水などが占める領域をΩとし、領域Ω内の観測点 $\mathbf{x}$ における電流密度ベクトル $\mathbf{i}(\mathbf{x})[A/m^2]$ は、

$$\mathbf{i}(\mathbf{x}) = -\kappa \text{grad} \phi(\mathbf{x}) \quad (1)$$

と定義される。

ここで、 $\phi(\mathbf{x})[V]$ は電位、 $\kappa[\Omega^{-1}m^{-1}]$ は電気伝導度である。なお、電位の基準は腐食の対象となる構造物

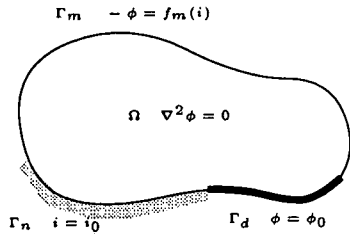


図-2 境界条件

にとる。領域Ω中でイオンの蓄積および損失が無視できるものとする、

$$\text{div} i = 0 \quad (2)$$

$$-\kappa \nabla^2 \phi = 0 \quad (3)$$

となる。式(3)が腐食場の支配方程式である。

次に、境界Γで与えられる境界条件について述べる。腐食境界要素解析では、次の様な三種の境界条件がある(図2)。

1. Dirichlet 型境界条件 (電位指定)

$$\phi = \hat{\phi} \quad \text{on } \Gamma_d \quad (4)$$

2. Neumann 型境界条件 (電流密度指定)

$$i = \hat{i} \quad \text{on } \Gamma_n \quad (5)$$

3. 分極特性にもとづく金属表面近傍のφとiの拘束条件

$$\phi = -f(i) \quad \text{on } \Gamma_m \quad (6)$$

上記の $\hat{\cdot}$ は既知量を表す。ここで、三番目の境界条件に挙げた分極特性について述べる。

土壌や溶液等の電解質中の金属に電流が出入りすることによって、溶解(アノード反応)または水素の生成反応など(カソード反応)が起こる。これにより、金属表面近傍のそれぞれのイオン濃度が変化し、それらの電気化学的平衡状態が乱れて、金属の電位も変化する。この現象を分極といい、金属の電位と電流密度の関係を示す曲線は分極曲線と呼ばれる。一般に、分極曲線は金属と周囲の環境に依存する関係で、実験によって測定されるものである。腐食の境界要素解析では、金属に対する金属表面近傍の土壌の電位φと金属表面に出入りする電流密度iの関係を表す関数fを分極曲線として用いる。

3. パイプ形状物体を有する解析場に対する境界積分方程式と境界条件

本問題に対する境界積分方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \kappa c \phi(y) = & \int_{\Gamma} \phi^*(x, y) i(x) d\Gamma(x) \\ & - \int_{\Gamma} i^*(x, y) \phi(x) d\Gamma(x) + \kappa \phi_{\infty} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 x, y はそれぞれ観測点とソース点であり、 ϕ_{∞} は無限遠の電位である。また、 ϕ^* は3次元問題の基本解であり、 $i^* = \kappa \frac{\partial \phi^*}{\partial n}$ である。

パイプ形状部では、電位・電流密度の周方向θに対して、複素フーリエ展開したものとして表す。

$$\phi(\theta, l) = \sum_{n=-N}^N \Phi_n(l) e^{jn\theta} \quad (8)$$

$$i(\theta, l) = \sum_{n=-N}^N I_n(l) e^{jn\theta} \quad (9)$$

ここで、lは軸方向の位置を表し、 $\Phi_n(l)$ 、 $I_n(l)$ はそれぞれn次の複素フーリエ係数である。

式(7)の境界積分方程式に式(8)、(9)を代入すると、ソース点がパイプ形状部にある場合は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \kappa c \sum_{m=-N}^N \Phi_m e^{jm\alpha} = & \int_{\Gamma_o} \phi^* i d\Gamma - \int_{\Gamma_o} i^* \phi d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_p} \phi^* \sum_{n=-N}^N I_n e^{jn\theta} d\Gamma - \int_{\Gamma_p} i^* \sum_{n=-N}^N \Phi_n e^{jn\theta} d\Gamma + \kappa \phi_{\infty} \end{aligned} \quad (10)$$

Γ_p はパイプ形状部の境界、 Γ_o はそれ以外の境界を表す。また、ソース点がパイプ形状部以外にある場合は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \kappa c \phi = & \int_{\Gamma_o} \phi^* i d\Gamma - \int_{\Gamma_o} i^* \phi d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_p} \phi^* \sum_{n=-N}^N I_n e^{jn\theta} d\Gamma - \int_{\Gamma_p} i^* \sum_{n=-N}^N \Phi_n e^{jn\theta} d\Gamma + \kappa \phi_{\infty} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、次式で表される変換

$$F_t[g(\alpha)] \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(\alpha) e^{-jt\alpha} d\alpha \quad (12)$$

を式(10)に施すと次式が得られる。

$$\begin{aligned} \kappa c \Phi_t = & \int_{\Gamma_o} \Phi_t^* i d\Gamma - \int_{\Gamma_o} I_t^* \phi d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_p} \Phi_t^* \sum_{n=-N}^N I_n e^{jn\theta} d\Gamma - \int_{\Gamma_p} I_t^* \sum_{n=-N}^N \Phi_n e^{jn\theta} d\Gamma \\ & + \begin{cases} \kappa \phi_{\infty} & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 Φ_t^* および I_t^* はそれぞれ $F_t[\phi^*]$ および $F_t[i^*]$ である。式(11)、(13)が本問題に対する境界積分方程式となる。

次に Φ_n 、 I_n に対応する境界条件について述べる。これらは、以下のように式(4)~(6)の境界条件を変換 $F_t[\cdot]$ をしたものを用いる。

1. Dirichlet 型境界条件 (電位指定)

$$\Phi_t = \begin{cases} \hat{\phi} & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad \text{on } \Gamma_d \quad (14)$$

2. Neumann 型境界条件 (電流密度指定)

$$I_t = \begin{cases} \hat{i} & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad \text{on } \Gamma_n \quad (15)$$

3. 分極特性に基づく金属表面近傍の ϕ と i の拘束条件分極曲線を次のように直線と仮定する。

$$f(i) = ai + b \quad (16)$$

$$\Phi_t = \begin{cases} -aI_t - b & t = 0 \\ -aI_t & t \neq 0 \end{cases} \quad \text{on } \Gamma_m \quad (17)$$

上記の $\wedge$ は既知量を表す。

また、本問題の電荷保存則は次のように表される。

$$\int_{\Gamma} id\Gamma = 0 \quad (18)$$

$$\int_{\Gamma_o} id\Gamma + \int_{\Gamma_p} \sum_{n=-N}^N I_n e^{jn\theta} d\Gamma = 0 \quad (19)$$

$$\int_{\Gamma_o} id\Gamma + \int \sum_{n=-N}^N \int I_n e^{jn\theta} r d\theta ds = 0 \quad (20)$$

$$\int_{\Gamma_o} id\Gamma + 2\pi \int_{s_p} r I_0 ds = 0 \quad (21)$$

ここで s_p はパイプ形状軸方向の境界を表す。

本解析は、式(11)、(13)、(21)が基礎式となる。

4. 境界積分方程式の離散化

本節では、本解析の積分方程式の離散化手法を述べる。内部要素における近似として、パイプ形状部の境界 Γ_p では要素内で Φ_n 、 I_n ($-N \leq n \leq N$)は一定の値を表す要素を n_p 個用いて (N は要素ごとで違う、軸方向の ϕ 、 i の値は一定)、パイプ形状部以外の境界 Γ_o では要素内で ϕ 、 i は一定の値を表す一定要素を n_o 個用いて、式(11)、(13)、(21)を離散化すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \kappa c^i \phi^i &= \sum_{j=1}^{n_o} i^j \int_{\Gamma_o^j} \phi^* d\Gamma - \sum_{j=1}^{n_p} \phi^j \int_{\Gamma_o^j} i^* d\Gamma \\ &+ \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{n=-N_k}^{N_k} I_n^k \int_{\Gamma_p^k} \phi^* e^{jn\theta} d\Gamma \\ &- \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{n=-N_k}^{N_k} \Phi_n^k \int_{\Gamma_p^k} i^* e^{jn\theta} d\Gamma + \kappa \phi_{\infty} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \kappa c^i \Phi_t^i &= \sum_{j=1}^{n_o} i^j \int_{\Gamma_o^j} \Phi_t^* d\Gamma - \sum_{j=1}^{n_p} \phi^j \int_{\Gamma_o^j} I_t^* d\Gamma \\ &+ \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{n=-N_k}^{N_k} I_n^k \int_{\Gamma_p^k} \Phi_t^* e^{jn\theta} d\Gamma \\ &- \sum_{k=1}^{n_p} \sum_{n=-N_k}^{N_k} \Phi_n^k \int_{\Gamma_p^k} I_t^* e^{jn\theta} d\Gamma \\ &+ \begin{cases} \kappa \phi_{\infty} & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (23) \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^{n_o} i_j \int_{\Gamma_o^j} d\Gamma + 2\pi \sum_{k=1}^{n_p} I_0^k \int_{s_p^k} r ds$$

$$= \sum_{j=1}^{n_o} i_j S_j + \sum_{k=1}^{n_p} I_0^k S_k = 0 \quad (24)$$

これらより、次の連立方程式が得られる。

$$[H] \begin{Bmatrix} \Phi_n \\ \phi \\ \phi_{\infty} \end{Bmatrix} = [G] \begin{Bmatrix} I_n \\ i \\ i_{\infty} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

この方程式に式(14)～(17)の境界条件を代入し、解を求める。

5. 本解析手法の検証と具体例

本手法の有効性を確かめるために、カソード防食法として知られている外部電源方式と犠牲陽極方式の2種類の解析例を示す。まず、外部電源方式を用いる例としては、土壌に埋設されているパイプラインの腐食について、本解析法と従来の境界要素解析法の比較を行う。次に、犠牲陽極方式の例としては、海水ポンプの腐食の解析を行い、本解析法の有効的な活用法について述べるとともに、犠牲陽極の最適化を行う。

5.1 外部電源法を用いた埋設パイプラインの腐食解析

外部電源法は図3に示すように溶液(土壌、海水などの電解質)中に設置した電極に電源装置から電流を供給し、電極から構造物に防食電流を流入させて防食を防止する方法である。この方法は大電流を流すことが可能であるので、大規模な埋設管の防食に適している。

(1) 同種のパイプラインが2本埋設されている場合

本研究の有効性を確かめるために、図4のように2本のパイプラインと電極が埋まっている場合の腐食問題において、パイプラインの周方向にフーリエ展開した本手法と通常の境界要素法を比較した。パイプライン1は長さ200m、半径0.5m、深さ3.0mである。パイプライン2は長さ200m、半径0.5m、深さ5.0mである。電極は深さ40～70m、大きさ0.5×0.5×30mである。

土壌の電気伝導度 κ は $0.02[\Omega^{-1}m^{-1}]$ 、パイプラインの分極曲線はパイプライン1、パイプライン2ともに $f(i) = 0.275 \times 10^{-2}i - 0.590 [V]$ を用いた。また、それぞれのパイプラインの両端では絶縁条件 $i = 0.0[A/m^2]$ を仮定した。電極からは電流密度 $i = 0.015[A/m^2]$ の電流を流した。地表での絶縁条件 $i = 0.0[A/m^2]$ は鏡像法を用いて考慮した。

両手法とも軸方向とパイプライン両端における半径方向を合わせて25分割した。従来の境界要素法では図5、図6のように周方向に18分割し、パイプラインでの自由度は合計900である。また、本手法では、図7、図8のように要素分割をし、電位・電流密度の周方向分布の複素フーリエ級数は $n = -2 \sim 2$ を用いたので、

パイプラインでの自由度は合計 250 である。なお、両手法ともに図 9 のように電極は三角形要素を用いて要素分割をした。

図 10 にパイプライン 1 の $x = 100[m]$ における電流密度分布を示す。また、図 11 にパイプライン 2 の $y = 0[m]$ における電流密度分布を示す。本手法と従来法の結果は良く一致しており、本研究の有効性が確かめられた。

図 12, 図 13 に従来法で得た電流密度分布を式 (12) で表す複素フーリエ変換 $F_i[\cdot]$ によって変換した結果をしめす。 $|n| = 2$ までに級数は十分に収束していることがわかる。実際の腐食解析では、部材の周方向の物理量はこの例と同様に数項の級数で表せる場合がほとんどであるので、本手法による効率性の効果は格段に向上する。

(2) 異種のパイプラインが 2 本埋設されている場合

異なった 2 種類の金属が電氣的に導通した状態で溶液(土壌、海水などの電解質)中に置かれると、片方の金属の腐食が、単独で置かれた場合に比べて著しく助長されることがある。これは、異種金属接触腐食(ガルバニック腐食)と呼ばれる現象である。海水用機器、海洋構造物、化学プラント、地中埋設物などにおいては、これにより甚大な被害を被ることが多い。

前節では同種のパイプラインの腐食解析をしたため、このような現象が起きにくいと考えられる。そのため、本節では異種のパイプラインが埋設されている場合の腐食解析をした。分極曲線以外のパイプラインの配置、電気伝導度、電極からの電流密度、要素分割は前節と同じものを用いるとする。分極曲線はパイプライン 1 では $f_1(i) = 0.275 \times 10^{-2}i - 0.590 [V]$ 、パイプライン 2 では $f_2(i) = 0.275 \times 10^{-2}i - 0.500 [V]$ を用いた。本節においても通常の境界要素法との比較をした。

図 14 にパイプライン 1 の $x = 100[m]$ における電流密度分布を示す。また、図 15 にパイプライン 2 の $y = 0[m]$ における電流密度分布を示す。これらを見るとパイプライン 1 からパイプライン 2 に電気が流れているのがわかる。すなわち、パイプライン 1 は防食されておらず、腐食しているのである。特にパイプライン 1 ではパイプライン 2 に一番近い $\theta_1 = -90^\circ$ で電流が多く出ていて、逆にパイプライン 2 ではパイプライン 1 に一番近い $\theta_2 = 90^\circ$ で電流が多く入っているのがわかる。このような場合の腐食解析においても本手法と従来法の結果は良く一致していることがわかる。

6. 犠牲陽極法を用いた海水ポンプの解析と犠牲陽極の位置の最適化

犠牲陽極方式は図 16 のような構造物(例えば Fe)に対して卑な自然電位をもつ金属(Zn, Mg, Al など)を短絡させることで前節で示したような異種金属電池作用

により防食電流を発生させる方法のことである。このとき卑な自然電位をもつ金属は電流の流出によって消耗し、埋設構造物の腐食に対して犠牲になることから犠牲陽極と呼ばれる。

海水は、火力・原子力発電、製鉄、化学プラントなどの冷却水、海水淡水化および製塩プラントの原料、冷却水などに幅広く利用されており、海水ポンプはこれらプラントの重要な構成要素となっている。海水は、塩化物を中心とする無機塩類を多量に含んでいる、電気伝導度が高い、などの理由から腐食性が高く、これを扱うポンプの防食対策は重要な課題である。海水は電気伝導度が高いため、腐食の被害を受けやすい一方、カソード防食を適用しやすいので、海水ポンプの防食に多用されている。

図 16 のような犠牲陽極方式のカソード防食を施した海水ポンプの解析を行う。海水ポンプは海水面から深さ 6.5 m まであり、部材は FC-200 である。犠牲陽極は深さ 3.2 ~ 4.5 m、大きさ $0.1 \times 0.1 \times 1.3m$ で対称に 4 本付けられており、部材は Zn である。また、分極曲線は本研究では直線近似でしか解くことができないので、図 17 のように実際に分極曲線を直線近似したものを用いた。すなわち、分極曲線は FC-200 を用いている海水ポンプでは $f_1(i) = 5.0i - 0.5 [V]$ 、Zn を用いている犠牲陽極では $f_2(i) = 0.05i - 1.1 [V]$ とした。ポンプ下面では、絶縁条件 $i = 0.0 [A/m^2]$ を仮定した。

図 18 に海水ポンプ(88 要素)と犠牲陽極(288 要素)の要素分割を示す。図 18 の右図は左図の A 点(ポンプの中心にある)から見た犠牲陽極の要素分割である。このように犠牲陽極は 4 本が対称的に備え付けられている。複素フーリエ級数の近似を $n = -10 \sim 10$ までとした。これらより、総自由度が 2137 となる。

図 19 に電位分布を示す。海水ポンプ上の電位・電流密度は犠牲陽極に近いところでは非軸対称の分布を示すが、遠いところではほぼ周方向には一定すなわち軸対称の分布を示していることがわかる。そのため、海水ポンプの周方向の電位・電流密度分布は犠牲陽極に近いところでは数項の級数で近似し、遠いところでは軸対称の近似すなわち定数項($n = 0$)で近似するようにその部位に応じた近似があると考えられる。

これを考えるために、電位の n 次のフーリエ級数 $|\Phi_n| (n \neq 0)$ の n と深さに対する分布を図 20 に深さに対する分布を図 21 に示す。これらより、 n 次のフーリエ級数 $|\Phi_n| (n \neq 0)$ の分布は、犠牲陽極から離れるに連れてほぼ 0 になっていることがわかる。また、図 21 より、犠牲陽極からの距離により近似の次数を決定することにする。図中の $L (= 1.3[m])$ は犠牲陽極の長さを表しており、 $|\Phi_8|$ 、 $|\Phi_{-8}|$ は犠牲陽極の端から $L/4$ 離れたところではほぼ 0 になっているので、この領域 Γ_8 では $n = -8, 8$ の近似をする。また、 $|\Phi_4|$ 、 $|\Phi_{-4}|$ は領域 Γ_8 の端から $L/4$ 離れた所でほぼ 0 になっている

ので、この領域 Γ_4 では $n = -4, 4$ の近似をする。それ以外では係数を持たないので Γ_0 とし、 $n = 0$ 次近似とする。この近似とした時、総自由度は1104減り、1033となる。このように近似した時の電位 ϕ_{84} と上記で計算した($n=-10\sim 10$)電位分布 ϕ との比較を図22に示す。 $n = 0$ で近似をしたあたりで誤差が出ているが解析の精度には問題ない程度であるのでフーリエ級数の次数の深さ方向の分布は妥当であると考えられる。

また、図20、図21より $|\Phi_n|$ は $n = -8, -4, 4, 8$ しか係数を持たないことがわかる。これは犠牲陽極の配置の対称性からでてくるものと考えられる。犠牲陽極は対称的に4本配置されているので周方向の電位分布は、4の倍数の周期を持ち、

$$\begin{aligned}\phi(\theta) &= \sum_{n=-N}^N \Phi_n e^{jn\theta} \\ &= \sum_{m=-M}^M \Phi_m e^{j4m\theta}\end{aligned}\quad (26)$$

となる。これより、構造物が対称性を持つ場合、上記のように対称性を考慮した形で電位分布を近似することにより、0を持つ余分な係数を求める必要がなくなる。これを前述の解析例に適用すると、総自由度は542減り、491となる。

ここで、このように自由度を減らしたものを用いて、犠牲陽極の最適な位置を求める。犠牲陽極は構造物との位置関係から、その防食の効果は変わってくる。特に海水は電気伝導度が高いので、犠牲陽極から近い場所では完全に防食されているが、犠牲陽極から遠い場所では防食が不完全であるという場合がある。そこで、最適化の目的として、“構造物の全体に防食が行なわれる”とし、これは電位 ϕ の最小値を最大にする問題と考えられる。すなわち、設計変数として、犠牲陽極の上面の深さ d_t を取り、目的関数 $F(d_t)$ を

$$F(d_t) = \min \phi \quad (27)$$

として、これを最大化する。

図23に $\min \phi$ の d_t に対する分布を示す。最適な d_t は-3.4mとなった。この最適な位置における深さ方向の電位分布と前述までに用いていた設計条件($d_t = -3.2$)における電位分布図24を示す。最適な位置における電位分布は構造物の全ての領域で1.0[V]以上となっており、構造物の全体に防食が行われていることがわかる。また、前述までの設計条件が良い設計であった事もわかる。

7. 結言

近傍の構造物、電極の影響によりパイプ形状部における周方向の電位・電流密度分布を考慮する必要がある。

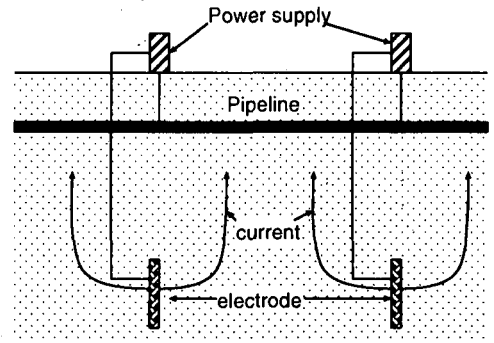


図-3 カソード防食システムの概念図

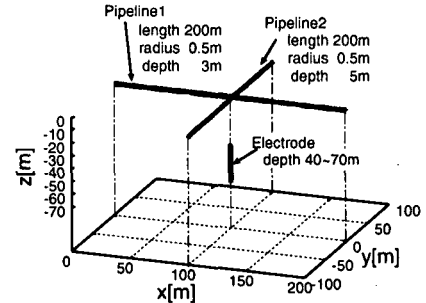


図-4 解析モデルの幾何的条件

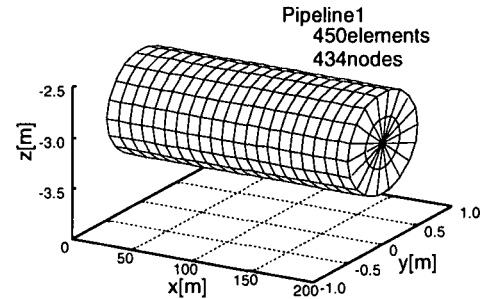


図-5 パイプライン1のメッシュ(三角形・四角形要素)

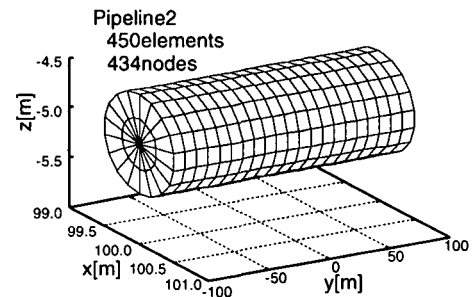


図-6 パイプライン2のメッシュ(三角形・四角形要素)

るポテンシャル問題に対して、従来の境界要素法を用いると膨大な数の要素を必要とした。本手法ではパイプ形状部における周方向の電位・電流密度分布が急激な変化を含まないことに着目し、それらを周方向に低次の複素フーリエ級数に展開することで要素数を減らし、

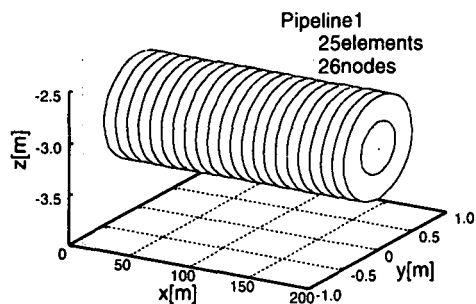


図-7 パイプライン 1 のメッシュ(フーリエ要素)

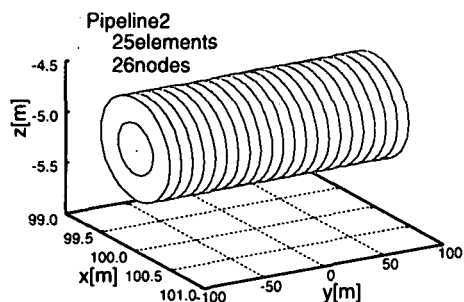


図-8 パイプライン 2 のメッシュ(フーリエ要素)

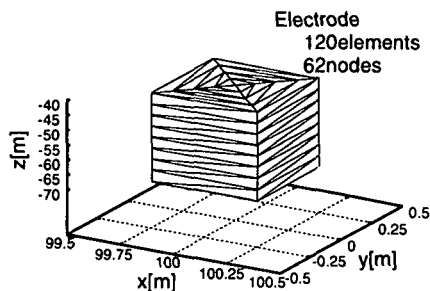


図-9 電極のメッシュ

効率的な腐食解析法を開発した。

実際の腐食場における具体例として、外部電源方式のカソード防食をするパイプライン、犠牲陽極方式のカソード防食をする海水ポンプおよび犠牲陽極の位置の最適化を示し、本研究の有効性を示した。

参考文献

- 1) 田中 正隆, 松本敏郎, 中村正行, “境界要素法”, 培風館 (1994).
- 2) 境界要素研究会, “境界要素法の応用”, コロナ社 (1987).
- 3) 登坂 宣好, 中山 司, “境界要素法の基礎”, 日科技連出版社 (1987).
- 4) 松本敏郎, 田中正隆, 石井昇: 機論 (A)58-[555]175-180(1992)
- 5) 青木繁, 高橋徹, 浦郷正隆, 天谷賢治, 西川明伸材料 46,[2],170-175 (1997)
- 6) 天谷賢治, 歌川和宏, 青木繁, 宮坂松甫: 機論 A,64-[623]1761-1766 (1998-7)

(1999 年 4 月 23 日 受付)

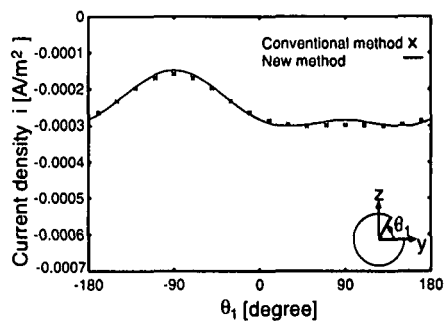


図-10 パイプライン 1 電流密度分布 ($x=100\text{m}$) 従来法と本手法の比較

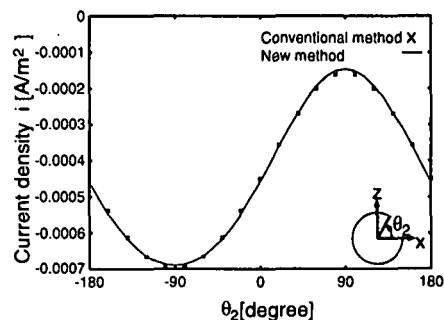


図-11 パイプライン 2 電流密度分布 ($y=0\text{m}$) 従来法と本手法の比較

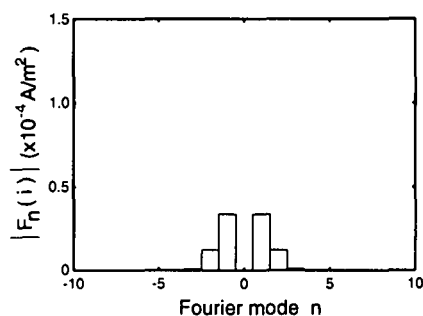


図-12 パイプライン 1 における電流密度分布のフーリエ係数 ($x=100\text{m}$)

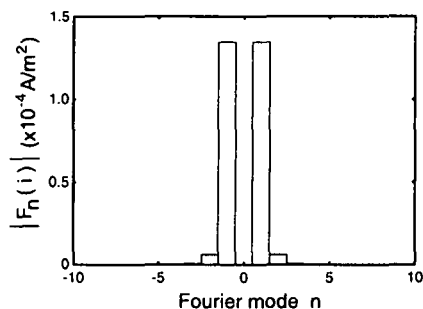


図-13 パイプライン 2 における電流密度分布のフーリエ係数 ($y=0\text{m}$)

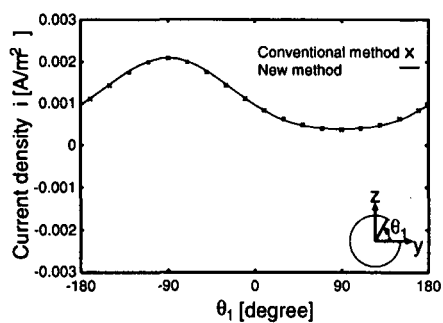


図-14 パイプライン 1 の電流密度分布 ($x=100\text{m}$)

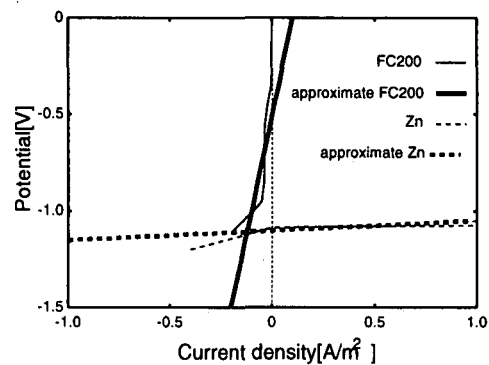


図-17 分極曲線

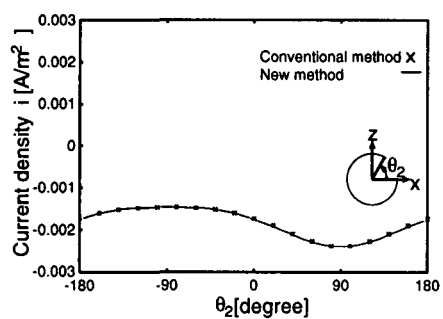


図-15 パイプライン 2 の電流密度分布 ($y=0\text{m}$)

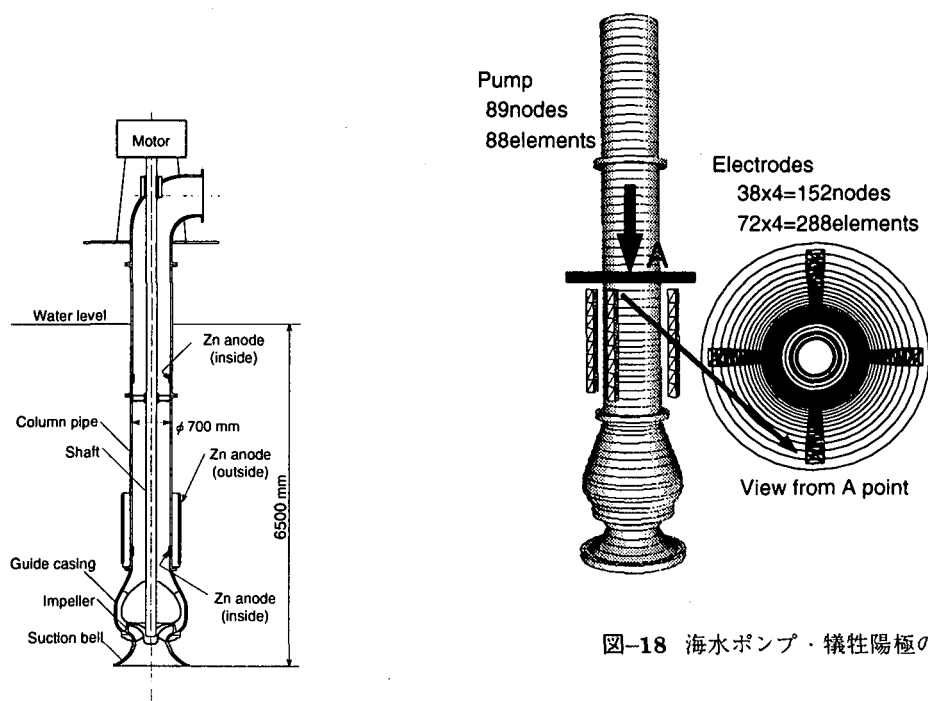


図-18 海水ポンプ・犠牲陽極のメッシュ

図-16 解析対象 (海水ポンプ)

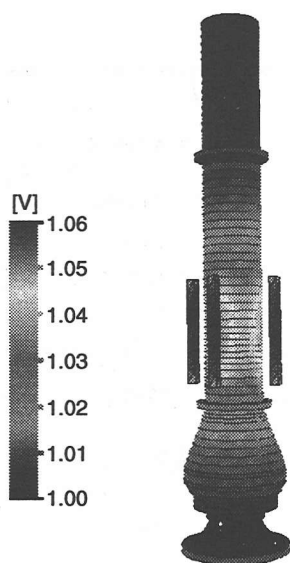


図-19 海水ポンプの電位分布

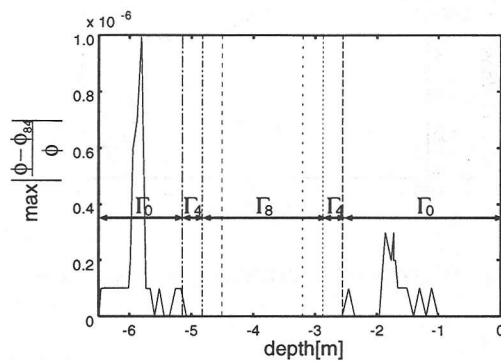


図-22 電位分布の誤差分布

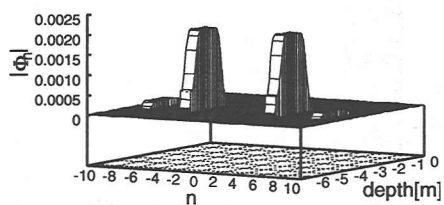


図-20 電位のフーリエ係数の分布 $|\Phi_n|$

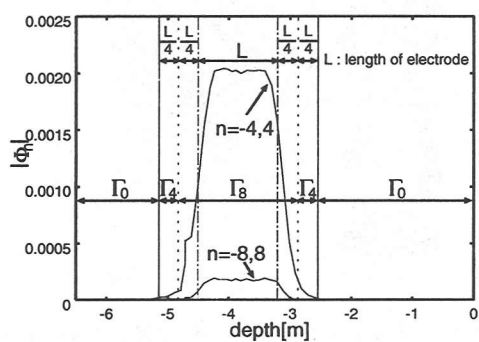


図-21 電位のフーリエ係数の深さ方向の分布 $|\Phi_n|$

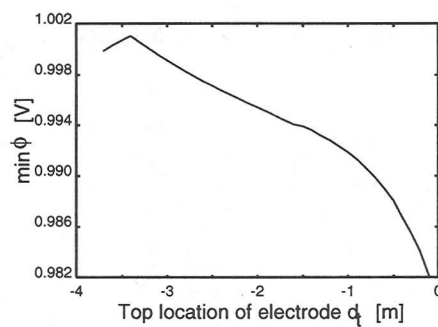


図-23 電極位置に対するポンプ表面の最小電位

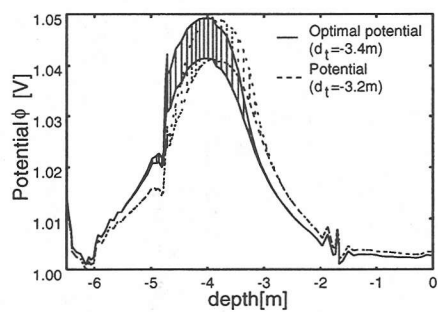


図-24 初期電位分布および最適電位分布