

# 「腐食防食講座—海水ポンプの腐食と対策技術—」

## 第4報：腐食防食解析技術

宮坂松甫\*

### Lecture on Corrosion and Corrosion Protection of Seawater Pumps - Part 4: Numerical Corrosion Analysis -

by Matsuho MIYASAKA

The authors have developed a 2D, 3D and axisymmetric boundary-element-method (BEM) system. This system makes it possible to quantitatively estimate cathodic protection and macro-cell corrosion, such as galvanic corrosion and differential-aeration-cell-corrosion. Understanding the physical quantities (potential and current densities) on the surface of corroding materials is of primary importance in solving corrosion problems. The developed BEM system does not require internal elements discretization which constitutes difficulties when analyzing complicated 3D regions. Internal element discretization is used in conventional analysis techniques, e.g. finite-difference-method (FDM) and finite-element-method (FEM).

In this paper, some history on the development of corrosion analysis is introduced, followed by an outline on the BEM and BEM system. Also included are verification experiment results and examples of application for cathodic protection and galvanic corrosion, to demonstrate the analytical accuracy and effectiveness of the BEM system.

**Keywords:** Boundary element method (BEM), Corrosion analysis, Cathodic protection, Galvanic corrosion, Seawater, Pump, Potential, Current density, Polarization curve

### 1. はじめに

海水ポンプにおいては、複数の材料が同時に使われることが多いことに加え、流速分布も存在するため、高い電気伝導度をもつ海水を介して各部位間で電池を形成し、腐食の助長・抑制現象が生じる。したがって、海水ポンプを、異種金属接触腐食、流速差腐食、カソード防食などの電池系が複合された大きな電池と見なして腐食問題を考察しなければならない。このように、海水ポンプの腐食現象は、その支配因子が多岐にわたるため、実験や経験に頼るだけでは正確に予測を行うことが困難である。本報では、腐食防食の定量的予測のために筆者らが開発してきた、境界要素法を用いた数値解析技術について述べる。

### 2. 腐食防食における数値解析技術の重要性

腐食の予測は浸漬試験によって腐食減量を求める方法や電気化学的手法などによって行われているが、単一材料と単一環境を組み合わせた試験データからだけでは実際の機器の腐食を予想することが難しい。なぜならば、実際の機器では複数の材料が混用されたり、あるいは内部の環境の不均一（流速、温度、溶存物質の濃淡など）が生じることによってマクロセルが形成され、腐食の助長あるいは抑制が起こるからである。

海水のような高い電気伝導度をもつ溶液中では、異種材料を混用することによって生じる「異種金属接触腐食」、あるいは流速分布の不均一性に起因する「流速差腐食（流速差に起因する通気差腐食）」などのマクロセル腐食の被害を受けやすく、これらの腐食を事前に正確に予測し、対策を施すことが望まれている。

一方、異種金属接触腐食におけるカソード側の腐食抑制現象を積極的に利用した「カソード防食」は、効果的な防食法として広く採用されている。カソード防食設計には陽極の材料と設置位置、防食対象機器の形状、材料

\* 株荏原総合研究所  
工学博士、腐食防食専門士 [社腐食防食協会認定]

構成、溶液条件（電気伝導度、流速など）などに応じて、防食範囲、犠牲陽極の消耗速度などを予測することが要求されている。

マクロセル挙動の解明のために、多様な材料と環境の組合せを考慮して、古くから多くの実験的研究がなされてきた<sup>1~6)</sup>。しかし、マクロセルの挙動には、電解質の占める領域の3次元形状が大きく影響を及ぼすため、実際の機器及び構造物の腐食・防食状態を正確に予測するためには実験的手法だけでは限界がある。それは、複雑な構造物では、マクロセルにおける液間抵抗を正確に見積もることが困難だからである。かといって、防食対象機器の形状が変わるたびにその形状を想定した実験を行うことは実際上不可能である。より合理的に腐食防食問題を取り扱うためには、従来の定性的な議論や経験に加えて、定量的な解析が必要である。

### 3. これまでの解析的研究

ここで、異種金属接触腐食、カソード防食など、マクロセルに関する解析的研究を簡単に展望する。1950年代から、Wagner<sup>7)</sup>、Waber<sup>8)</sup>らが一連の研究を行った。彼らはこれら腐食防食問題の数学的モデル化を行い、分極特性が線形でしかも解析対象が平板や円筒などの比較的単純な系について、フーリエ級数などを用いて解析を行った。また、電場問題を解析する手法として等角写像法<sup>9)</sup>及び導電紙を用いた方法<sup>10)</sup>が古くから採用されている。これらの解析手法は比較的単純な問題にしか適用できないが、彼らの得た解析解は、種々の数値解析の、計算精度の検定のためにしばしば利用されている。

近年、電子計算機の発展に伴って、数値解析方法の研究が活発になってきている。正村ら<sup>11)</sup>は1976年に炭素鋼の通気差腐食の解析に差分法を適用し、解析結果が実際の腐食と良く一致することを示した。Doigら<sup>12)</sup>は1979年に塩酸中の亜鉛(Zn)-銅(Cu)対の異種金属接触腐食の解析に差分法を適用した。Doigらは分極特性を指数関数で表して解析を行っている。差分法は有限要素法や境界要素法に比べると複雑な形状を模擬し難いという欠点があるものの、プログラミングが比較的容易であるので、その後もカソード防食されたタンクや海洋構造物などの種々の問題へ適用されている<sup>13~15)</sup>。

Strommenは1979年に海中パイプラインのカソード防食の解析に<sup>16)</sup>、Forrestらは1981年に船舶プロペラのカソード防食の解析に<sup>17)</sup>有限要素法を適用した。その後、有岡らはすきま腐食の解析に<sup>18)</sup>、Kasperらは海洋構造物塗装欠陥部の異種金属接触腐食の解析に<sup>19)</sup>有限要素

法を適用し、その有効性を示した。有限要素法は複雑な形状を模擬しやすい上に、汎用のコードが入手しやすいので、腐食防食問題の解析に広く用いられてきた<sup>20~22)</sup>。

その後、機械工学、土木工学、電気工学などの分野で発展の著しい境界要素法が、異種金属接触腐食、カソード防食などの腐食防食問題にも適用されるようになった<sup>23~46)</sup>。差分法や有限要素法では解析領域全体を要素分割しなければならぬのに対して、境界要素法は領域の表面の要素分割だけしか必要としないので、腐食防食問題のような物体表面上の物理量を解析する問題については入力の手間や計算時間の点で有利である。また、無限場の取り扱いが容易であることも境界要素法の特長である。

したがって、物体表面の電位及び電流密度が重要な、また海水や土壌のように無限場を取り扱わなければならないことの多い腐食防食問題の解析には境界要素法が最もふさわしい方法であろう。著者らは東京工業大学と共同研究を実施し、早くから腐食防食の予測に境界要素法の適用を行い、解析技術の開発を行ってきた<sup>25~40)</sup>。

## 4. 境界要素解析技術の開発

### 4-1 異種金属接触腐食及びカソード防食の予測の考え方と問題点

第3報4章で、異種金属接触腐食及びカソード防食の機構を説明したが、ここでは、具体的事例を挙げて腐食防食の予測の考え方と問題点を説明する。

まず、図1(a)のような矩形容器(0.1 m × 0.1 m × 0.2 m)の両端面に、鋳鉄(FC200)及びステンレス鋼(SUS316)が対向して置かれ、互いに導通されているモデルについて考える。容器内部は、電気伝導度: 0.0357 S/mの食塩水で満たされているとする。図1(b)に同一の溶液環境(25℃, 流速0 m/s)で測定した両材料の分極曲線を示す。横軸は金属面(0.01 m<sup>2</sup>)あたりの総電流で示している。

電極間の溶液抵抗は以下のように計算される。

$$R_s = L / \kappa A \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $R_s$ : 溶液抵抗(Ω),  $\kappa$ : 溶液の電気伝導度(S/m),  $L$ : 長さ(m),  $A$ : 面積(m<sup>2</sup>)である。したがって、 $R_s = 0.2 / (0.0357 \times 0.1 \times 0.1) = 560 \Omega$ となる。この値を用いて計算すると、両極間に流れる電流量と両極間の電位差は、それぞれ、およそ $5.27 \times 10^{-4}$  A及び0.295 Vでバランスし( $0.295 \text{ V} = 5.27 \times 10^{-4} \text{ A} \times 560 \Omega$ )、FC200及びSUS316表面における電位(V vs.SCE)はそれぞれ約-0.670及び-0.375となる。この電流は、第3報図5で

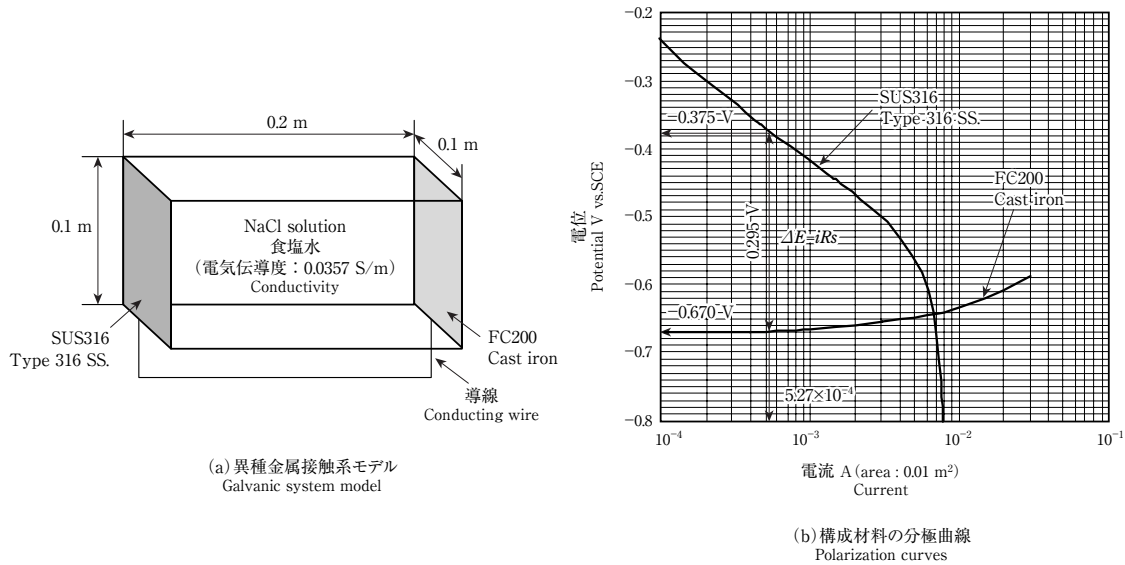


図1 異種金属接触系における電位・電流の予測方法  
 Fig. 1 Prediction of potential and current in a simple galvanic system

示した  $I_G$  に相当し、FC200に異種金属接触腐食による腐食助長をもたらし、逆にSUS316の腐食を抑制する。電流量  $5.27 \times 10^{-4} \text{ A}$  (電流密度:  $5.27 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ ) からFC200の腐食速度助長分を、単純にFeの溶解に置き換えて計算すると  $0.06 \text{ mm/y}$  になる。FC200の総腐食速度は、この値に自己腐食分(第3報図6で示した  $I_S$  に相当)を加えたものになる。

このような単純な1次元場においては、異種金属間の溶液抵抗を簡単に計算することができるため、両金属の分極曲線を用いて、容易に数値的に異種金属接触腐食及びカソード防食の予測を行うことができる。ところが実

際の系では1次元的な単純な形状はほとんどなく、マクロセルの挙動は複雑で予測し難いものになる。

例えば、図2<sup>25)</sup>のような簡単そうに見える2次元場でさえも、電位分布は大変複雑になるため、その予測には数値解析技術の助けが必要になる。図2は、境界要素解析技術の検証のために実施した2次元異種金属接触腐食実験の結果を示している。100 mmの高さまで溶液(0.0165% NaCl水溶液, 12°C)を満たした幅390 mm奥行60 mmの透明アクリル樹脂製容器の底部に、鋳鉄(FC200)及びステンレス鋼(SUS304)を左右対称に配置している。FC200及びSUS304は幅10 mmの細片に分けられ、幅10 mmの絶縁体によって分離されているが、互いに導線によって電氣的に導通されている。電位は、溶液を注入して24 h後に測定した値である。

#### 4-2 数値モデル化(支配方程式と境界条件)

前節で述べたように、異種金属接触腐食及びカソード防食のいずれの系も、アノード及びカソードが電解質を介して構成する電池系と考えることができる。電解質内の電位  $\phi$  は式(2)のラプラス方程式に支配される。

$$\nabla^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (2)$$

電解質が境界  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_a$ , 及び  $\Gamma_c$  に囲まれているとする(図3)。ここで  $\Gamma_1$  は電位  $\phi$  の値が  $\phi_0$  に指定された境界(電位一定の境界),  $\Gamma_2$  は電流密度  $i$  の値が  $i_0$  に指定された境界(電流密度一定の境界),  $\Gamma_a$  及び  $\Gamma_c$  はそれぞれアノード及びカソードの表面である。各境界における境界条件は次式で与えられる。

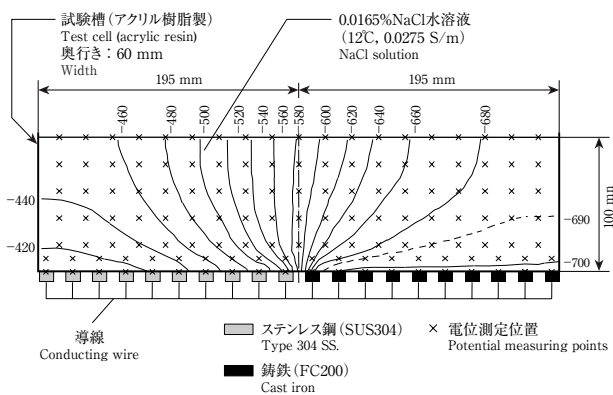


図2 2次元異種金属接触系における溶液内電位分布<sup>25)</sup>  
 (等電位線図: 単位は mV vs.SCE)

Fig. 2 Potential distribution in the electrolyte of a 2D galvanic system (equipotential diagram)

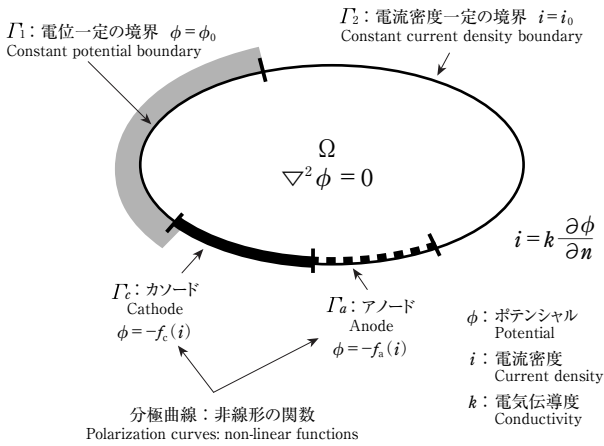


図3 境界要素解析のための基礎方程式と境界条件

Fig. 3 Basic equation and boundary conditions for boundary element analysis

$$\Gamma_1 \text{上: } \phi = \phi_0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\Gamma_2 \text{上: } i \equiv \kappa \partial \phi / \partial n = i_0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\Gamma_a \text{上: } \phi = -f_a(i) \dots\dots\dots (5)$$

$$\Gamma_c \text{上: } \phi = -f_c(i) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\kappa$ は電解質の電気伝導度、 $\partial/\partial n$ は外向き法線方向の微分であり、 $f_a(i)$ 及び $f_c(i)$ はアノード及びカソードの分極特性を表す非線形の関数で、実験によって求めた分極曲線を近似して与えられる。ここで、解析で扱う電位 $\phi$ と我々が実際に測定する電極電位 $E$ は、 $\phi = -E$ の関係がある。式(2)を境界条件式(3)～(6)のもとで解けば、表面近傍の電位及び電流密度分布を求めることができる。

前記の説明では、簡単のために金属は2種類としているが、3種類以上でも同様に取り扱うことができる。式(2)のラプラス方程式は、定常熱伝導の問題や、非圧縮性流体の渦無し流れの問題などでなじみの深い偏微分方程式であるが、アノード及びカソード上の境界条件(分極曲線)が非線形であることが腐食防食問題の特徴となっている。

### 4-3 境界要素法による解法

境界要素法の通常定式化に従い、式(7)の境界積分方程式が導かれる。

$$c\kappa\phi = \int_{\Gamma} \phi^* i d\Gamma - \int_{\Gamma} \phi i^* d\Gamma \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\phi^*$ は3次元ラプラス方程式の基本解であり、 $i^* = \kappa \partial \phi^* / \partial n$ である。 $\Gamma$ は電解質を囲む境界(=  $\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_a + \Gamma_c$ )を示す。また、 $c$ は滑らかな境界では $c = 1/2$ 、角度 $\omega$ の角点では $c = \omega/2\pi$ である。

この境界積分方程式を数値的に解くためには離散化を行う必要があり、境界を多くの要素に分割し、 $\phi$ と $i$ をそれぞれの節点における離散的な値と内挿関数により近似すると次の連立代数方程式が導かれる。

$$[A] \begin{Bmatrix} x_1 \\ i_0 \\ x_a \\ x_c \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} \phi_0 \\ x_2 \\ -f_a(x_a) \\ -f_c(x_c) \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

ここで $x_1, x_a, x_c$ はそれぞれ境界 $\Gamma_1, \Gamma_a, \Gamma_c$ における未知の電流密度ベクトル、 $x_2$ は境界 $\Gamma_2$ における未知の電位ベクトルを示し、 $f_a(x_a), f_c(x_c)$ はそれぞれアノード、カソードの分極特性を表す非線形の関数であり、未知の電流密度に対応した電位ベクトルを表す。全境界上( $\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_a + \Gamma_c$ )の要素数を $n$ とすれば方程式の未知数の数は $n$ となるとともに、方程式の数も $n$ となる。また、 $[A]$ 及び $[B]$ は境界 $\Gamma$ の幾何学的形状によって決まるマトリックスである。この式は非線形であるため、これを解くためには繰り返し計算を必要とする。著者らはニュートン・ラフソン法を採用している。

### 4-4 解析プログラムの開発と検証

著者らは、1980年代初期から腐食・防食の境界要素解析技術の開発に取り組み<sup>25~38)</sup>、これまでに2次元<sup>25)</sup>、3次元<sup>26~29)</sup>及び軸対称<sup>30)</sup>の、それぞれ閉領域及び開領域を扱う解析プログラムを開発し、モデル<sup>25~28,30)</sup>、実機ポンプ<sup>29)</sup>などを用いた解析及び検証実験を通じて、異種金属接触腐食<sup>25~27,30)</sup>、通気差腐食(流速差腐食)<sup>28)</sup>及びカソード防食<sup>27,29)</sup>の予測に有効であることを示した。また、複数の異なった領域を連結して解析する手法も開発し<sup>27,32)</sup>、ポンプの解析に適用した<sup>32)</sup>。

解析の際、実測した分極曲線は近似式(通常、非線形の分極曲線を複数の近似式で表現する)に置き換える必要があるが、分極曲線の近似方法の違いによる計算の収束性及び精度の差異についても検討した<sup>30)</sup>。電流密度の対数と電位の関係を直線で扱う方法(対数近似法)と電流密度と電位の関係を直線で扱う方法(直線近似法)とを比較し、複雑な分極曲線を扱う場合、直線近似法は対数近似法よりも計算の収束性が良好であること、及び解析精度は両者に差異がないことを確認した。

ここで、2次元モデル及び実機ポンプを用いて解析精度の検証を行った事例を紹介する。2次元場については、図2のモデルを対象に解析を行った。図4に示すように境界を68個の要素に分割し、要素内では、電位 $\phi$ 及び電流密度 $i$ を一定と仮定して2次元解析を行った。20個に分かれたFC200及びSUS304試片に対してはそれぞれ

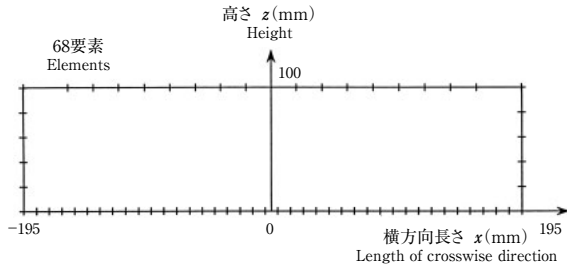


図4 2次元異種金属接触系解析のための境界要素分割図  
Fig. 4 Boundary element discretization for the analysis of the 2D galvanic system

一個の境界要素を割り当てた。溶液上面、容器側面及び底面の金属以外の部分は絶縁であるので、 $i_0 = 0$ とした。FC200及びSUS304表面における境界条件としては、同一溶液条件で測定した、それぞれの材料の分極曲線を近似したものを用いた。電気伝導度 $\kappa$ は、実験で用いた溶液の電気伝導度 $2.75 \times 10^{-2}$  S/mの値を採用した。境界における電位及び電流密度分布の計算のほか、溶液内の電位分布を求めるための内点計算も行った。図5<sup>25)</sup>で、電位分布の解析結果を実験結果と比較する。FC200-SUS304の境界から離れている側においては、それぞれの金属の自然電位に比較的近い値を示しているが、境界に近づくにつれて互いの値が近づいてきている。電位の変化が最も大きいのは、FC200-SUS304の境界近くである。解析結果はこれらの特徴を良く予測しており、実験

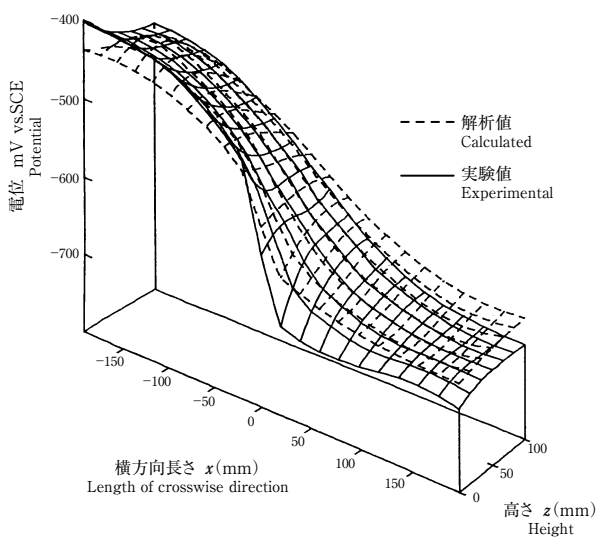


図5 2次元異種金属接触系電位分布の解析値と実験値の比較<sup>25)</sup>  
Fig. 5 Comparison between calculated and experimental potential distribution in the electrolyte of the 2D galvanic system



09-60 01/223

写真1 検証実験用実機ポンプ<sup>29)</sup>

Photo 1 Actual pump used to measure the potential distribution inside the pump and the current densities on the Zn anodes

結果と良い一致を示している。ここでは結果を割愛するが、電流密度分布も良い一致が見られている<sup>25)</sup>。

次に、3次元境界要素解析の精度と有効性を検証するために行った実験と解析について紹介する。写真1<sup>29)</sup>は解析精度の検証実験のために使用した、口径200 mm、長さ6.5 mの鋳鉄 (FC200) 製立軸ポンプである (ただし、回転系部品は316系ステンレス鋼製)。ポンプ運転中は、通常、回転系部品と固定系部品は絶縁されることが多いが、本実験ではこの条件を確実なものとするため、特に絶縁措置を施した。図6<sup>29)</sup>のように、Zn犠牲陽極

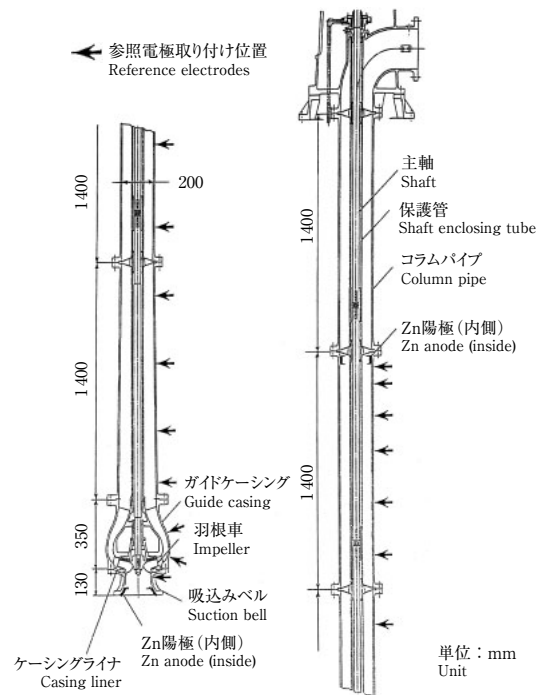


図6 検証実験用ポンプ断面と参照電極及びZn陽極取り付け位置<sup>29)</sup>  
Fig. 6 Cross section of the tested pump and location of reference electrodes and Zn anodes

を2箇所、また、ポンプ内各部に電位測定用参照電極（銀-塩化銀電極）を取り付け、東京湾に面した岸壁で実海水を汲み上げ、480 h連続実験を行った。なお、Zn陽極は、ポンプ本体とは直接接触させず、両者から取り出した導線を測定室内に設置した無抵抗電流計を介して互いに導通させ、Zn陽極表面に流れる電流を測定した。運転中、潮位の変化によって流量が変わるのを防ぐため、ポンプ吐出し部に定流量弁を取り付け、流量を2.5 m<sup>3</sup>/min一定とした。したがって、コラムパイプ内の平均流速は1.5 m/sとなる。実験条件は、(1) 流路面だけを無塗装として外面をタールエポキシ塗装した場合（夏季実験：平均海水温度25℃）、(2) ケーシングライナだけを除き内外面ともタールエポキシ塗装を施した場合（冬季実験：平均海水温度11℃）の2種類とした。

一方、実験室では、ポンプ材料（FC200）及びZn陽極の分極特性を調べた。ポンプ内では流速分布があるため、流速0から15 m/sの範囲で分極曲線の流速依存性を調べた。FC200の分極曲線の流速依存性は、第2報図3に示したようである。また、海水中では、カソード反応によってCaCO<sub>3</sub>、Mg(OH)<sub>2</sub>などのスケールが析出してカソード電流が経時的に減少するため、その挙動を調べるため定電位分極測定を行った。図7<sup>29)</sup>に、FC200の定電位カソード分極における電流密度の経時変化を示す。

これら分極特性を反映させた近似分極曲線を境界条件として用い、ポンプ内の3次元閉領域解析を行った結果を実験結果と比較した。図8<sup>29)</sup>に、ガイドケーシング及びその近傍（無塗装、海水温度25℃）の電位分布を示す。解析結果と実験結果は良く一致している。図9<sup>29)</sup>は

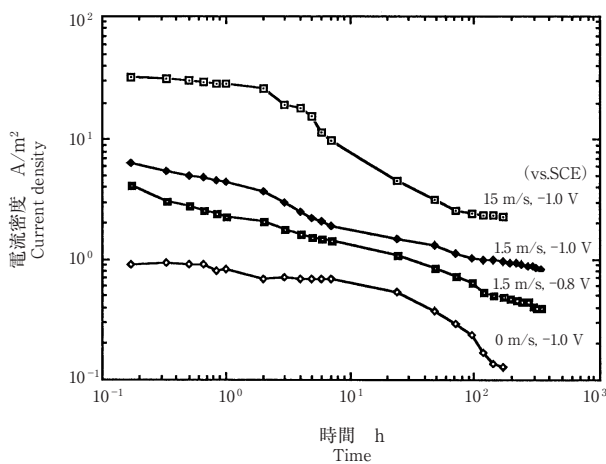


図7 FC200の定電位分極における電流密度経時変化、海水：25℃<sup>29)</sup>  
**Fig. 7** Change in current density of cast iron under potentiostatic polarization measurement in seawater at 25℃

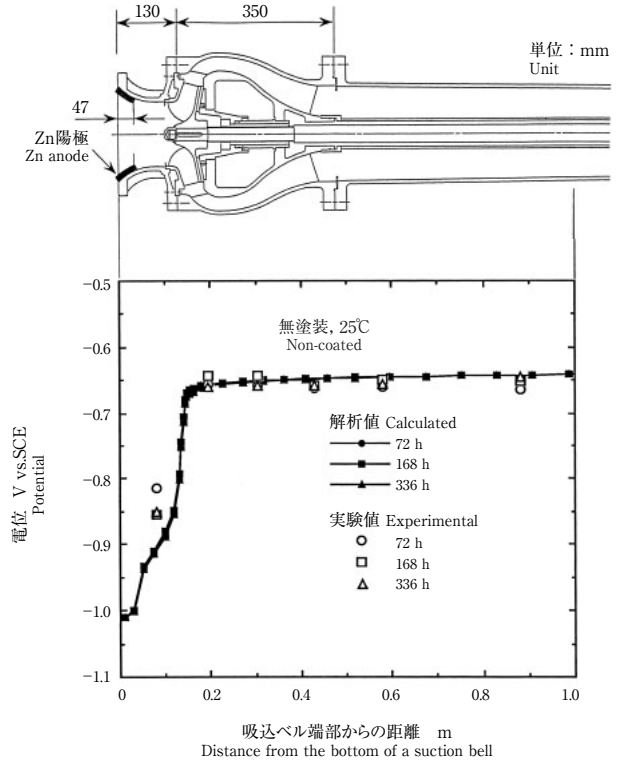


図8 ガイドケーシング及び近傍内面電位分布の解析結果と実験結果の比較<sup>29)</sup>  
**Fig. 8** Comparison between calculated and experimental potential distribution inside a guide casing and its vicinity

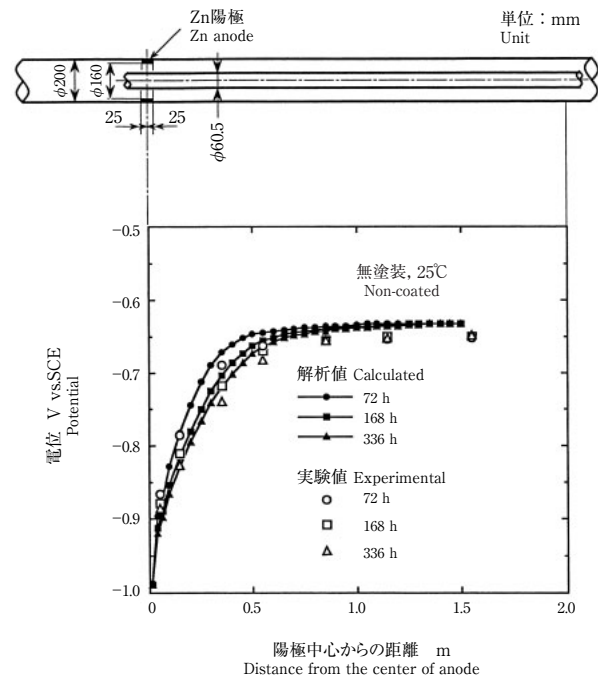


図9 コラムパイプ内面電位分布の解析値と実験値の比較<sup>29)</sup>  
**Fig. 9** Comparison between calculated and experimental potential distribution inside a column pipe

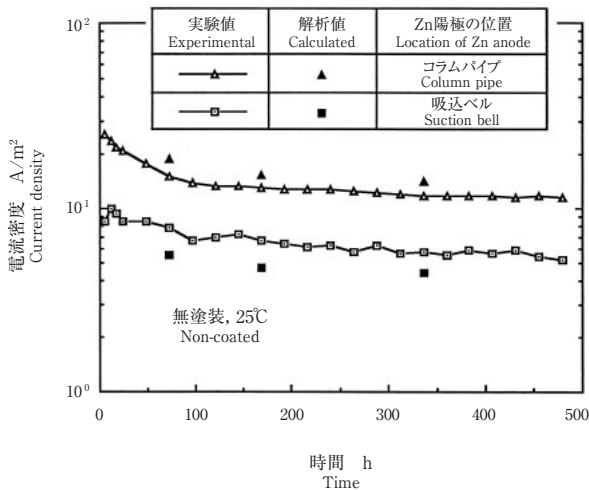


図10 Zn陽極表面の電流密度に関する解析結果と実験結果の比較<sup>29)</sup>  
 Fig. 10 Comparison between calculated and experimental current densities on the surface of Zn anodes

コラムパイプ内（無塗装，海水温度25℃）に関する結果である。時間の経過と共に防食範囲が広がる様子を解析結果は精度良く予測している。図10<sup>29)</sup>には、吸込ベル及びコラムパイプ内面に取り付けたZn陽極表面のアノード電流密度の解析結果と実験値の比較を示す。電流密度についても同様に精度の高い解析結果が得られている。

## 5. 境界要素解析システムの開発と適用

解析をより効率的に行うため、前記の解析プログラムを軸に、要素分割、入力ファイルの作成及び解析結果の表示を行うプログラムと、分極曲線データベースなどで構成された防食解析システムを開発した。以下にシステムの構成と解析事例を紹介する。

### 5-1 システムの構成

システムは、基本的には、①要素分割、②入力ファイル作成、③境界要素解析、④入出力データのグラフィック表示のそれぞれを行うプログラムと、⑤分極曲線データベースによって構成され、一連の解析作業を行う。要素分割は汎用のソフトを用いて自動で行うことができる。各要素への分極曲線の設定及び電気伝導度の指定によって入力ファイルが完成する。本システムに組み込まれた分極曲線データベースは、鋳鉄、ニレジスト鋳鉄、ステンレス鋼、銅合金など各種実用材料、Al及びZn犠牲陽極のそれぞれに関し、流速0～15 m/sの海水中で測定された動電位分極曲線を基に整理されたものである。測定された流速のデータを内挿することによって任意の流速のデータを作成する。海水中においては、カソー

下部の電流密度は時間と共に徐々に減少する。この現象を反映させるため、定電位カソード分極測定で求めた、カソード電流の時間依存性を示す実験式を基に指定する時間に対応する分極曲線が作成される。本システムでは、2次元、3次元及び軸対称のそれぞれについて、開領域及び閉領域の解析を行うことができる。

### 5-2 解析事例

本境界要素解析技術を海水ポンプのカソード防食設計に適用した事例を紹介する。解析対象としたのは、図11<sup>31)</sup>に示す口径700 mmのステンレス鋼（SUS316）製立軸海水ポンプ（無塗装）であり、Zn犠牲陽極によってカソード防食を行う場合の防食効果及び犠牲陽極寿命を予測した。Zn陽極は、ポンプ内部ではコラムパイプ内面の2箇所及び吸込ベル内面1箇所、合計3箇所に円周状に、また、ポンプ外面ではコラムパイプ外面に角柱状のものが4本等配に取り付けられている。

それぞれ、ポンプ内面を3次元閉領域、ポンプ外面を軸対称開領域としてモデル化し両領域を連結した解析を行った。ポンプ外面については、4本の各柱状Zn陽極を、同じ面積を持つリング状陽極として簡略化して扱った。写真2<sup>31)</sup>にポンプ内面の3次元境界要素分割図を示す。解析領域の軸方向長さは6 mとした。立軸ポンプでは羽根車とその後方のガイドケーシング内の流路はら旋

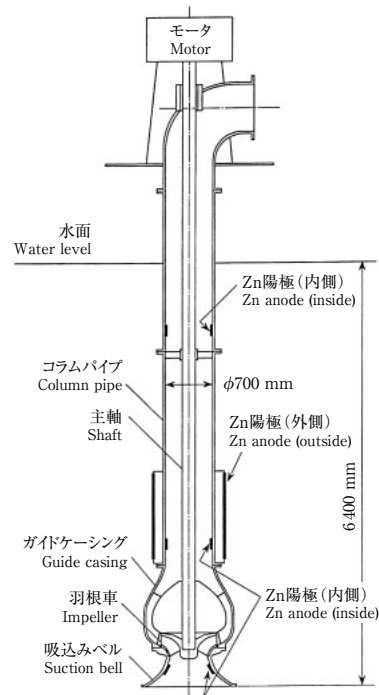
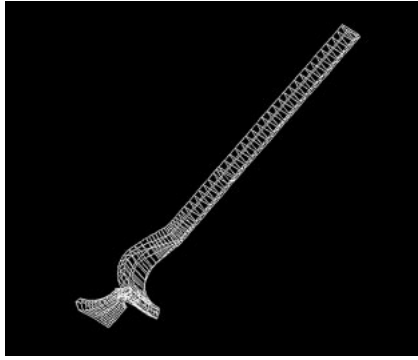


図11 解析対象：ステンレス鋼（316系）製立軸海水ポンプ<sup>31)</sup>  
 Fig. 11 Analysis target: type 316 stainless steel vertical seawater pump



09-60 02/223

写真2 ポンプ内面の要素分割図<sup>31)</sup>

Photo 2 Boundary element discretization inside the pump

状の複雑な3次元形状をしているため、効率的な解析のため適切なモデル化を行った。すなわち、ガイドケーシング内の流路はガイドベーンによって6個に区切られ、それぞれの領域は互いに等価であるため、その内一つだけを取り出して要素分割を行った。

ポンプ内部は複雑な流速分布をもっているが、ポンプ内面を四つの流速域に分割し、それぞれの流速に相当するSUS316及びZnの分極曲線を境界条件として各要素に与えた(図12<sup>32)</sup>)。また、ポンプ外面は流速を0と仮定した。つまり、本解析にはSUS316及びZnに対してそれぞれ5及び2本、合計7本の分極曲線を同時に用いている。分極曲線はカソード電流が比較的安定する168 h後の値を用いた。海水の電気伝導度は4.6 S/m (20℃)

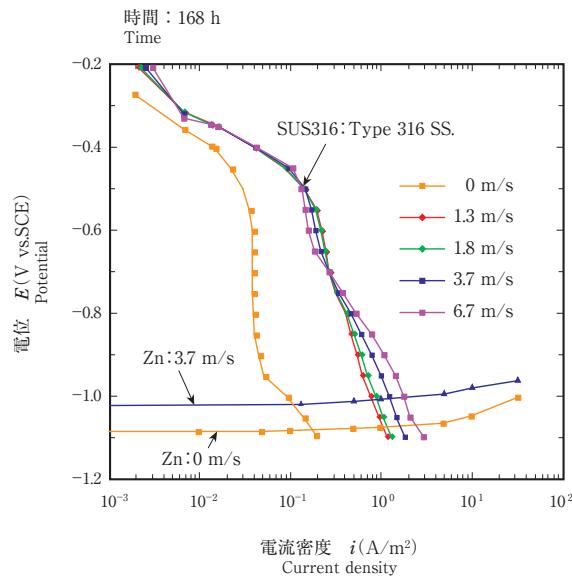


図12 解析に用いた分極曲線<sup>32)</sup>

Fig. 12 Polarization curves for boundary element analysis defined by the polarization curve database

とした。

ポンプ内外面の電位分布を図13<sup>32)</sup>に、またポンプ内面の電位分布を写真3<sup>31)</sup>に示す。ポンプ全域が-0.4 V vs.SCE以下にまで分極されており、SUS316のすきま再不動態

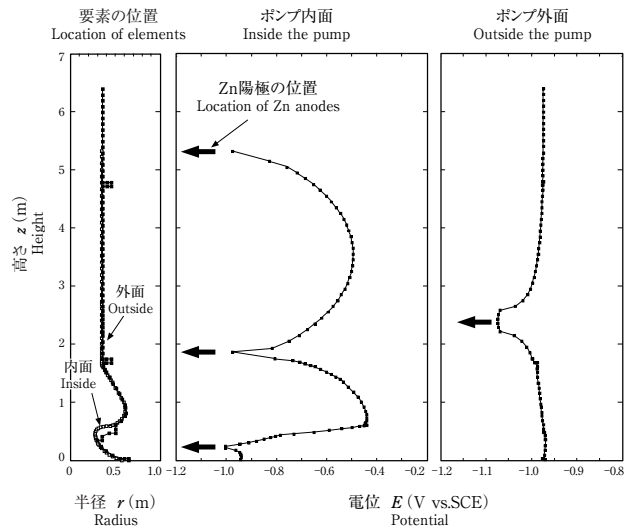


図13 ポンプ内外面電位分布解析結果<sup>32)</sup>

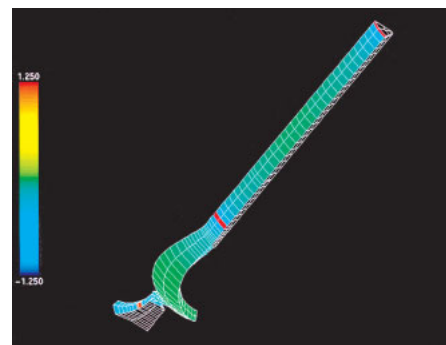
Fig. 13 Analyzed potential distribution inside and outside the pump



09-60 03/223

写真3 ポンプ内面電位分布解析結果<sup>31)</sup>

Photo 3 Analyzed potential distribution inside the pump



09-60 04/223

写真4 ポンプ内面電流密度分布解析結果<sup>31)</sup>

Photo 4 Analyzed current density distribution inside the pump



化電位  $E_{R, CREV}$  (第3報6章参照) が  $-0.32 \text{ V vs.SCE}$  である<sup>47)</sup> を考慮すれば、ポンプ全体が防食されていると判断される。一方、電流密度解析結果(写真4<sup>31)</sup>)からはZn陽極の消耗速度が計算される。

## 6. あとがき

腐食防食問題の予測のために開発した境界要素解析技術について述べた。定量的な腐食予測技術により、機器の設計・保守管理業務の合理化、信頼性向上、最適設計によるコストダウンなどを図ることができる。本技術は、現在、海水ポンプをはじめ腐食性環境で使用される機器のカソード防食及び異種金属接触腐食などのマクロセル腐食にかかわる防食設計及び診断に利用されている。

本稿ではカソード防食及び異種金属接触腐食の解析を中心に述べたが、本技術はめっき<sup>39, 40)</sup>、電解槽などの解析にも適用することができる。物体内部までの要素分割を必要としない境界要素解析技術は、今後、マクロセルを扱う問題の解析の主流になっていくと考える。

本稿では説明を割愛したが、腐食・防食及びめっきに関する最適化問題及び逆問題の解析<sup>40)</sup>、複雑形状の効率的解析<sup>33)</sup>など、本技術を発展させる努力を著者らは続けている。最近では、形状情報と物理量情報を分離して連立方程式における未知量の数を低減させる方法<sup>38)</sup>などを開発した。これらの手法を適用することにより、より大規模なモデルの解析が可能となり、ポンプ機場<sup>37)</sup>や大型ポンプのような複雑かつ大規模な構造物に対して腐食・防食問題の解析ができるようになった。

## 参考文献

- 1) O. Bauer, O. Vogal: Mit. Matt. Prof. Amt., 36, 114 (1918).
- 2) U. R. Evans: J. Soc. Chem. Ind., 47, 73T (1928).
- 3) F. L. LaQue: Proc. ASTM, 51, 495 (1951).
- 4) U. R. Evans: Ind. Eng. Chem., 17, 363 (1925).
- 5) W. Lynes: J. Electrochem. Soc., 103, 467 (1956).
- 6) U. R. Evans: J. Inst. Metals., 30, 239 (1923).
- 7) 例えば, C. Wagner: J. Electrochem. Soc., 98, 116 (1951).
- 8) 例えば, J. T. Waber: J. Electrochem. Soc., 101, 1 (1954).
- 9) 例えば, 小玉俊明, 藤井哲男, 馬場晴雄: 防食技術, 33, 343 (1984).
- 10) 例えば, 増田正孝, 増子昇: 実務表面技術, 29, 513 (1982).
- 11) 正村克身, 松島巖: 第23回腐食防食討論会予稿集, p.47 (1976).
- 12) P. Doig and P. E. J. Flewitt: J. Electrochem. Soc., 126, 2057 (1979).
- 13) R. Strommen and A. Rodland: Corrosion/80, Paper No.241 (1980).
- 14) R. S. Munn: Corrosion/84, Paper No.49 (1984).
- 15) M. A. Warne: Corrosion/85, Paper No.313 (1985).
- 16) R. Strommen: Trans. Int. Mar. Eng. C. Conf., 91, 74 (1979).
- 17) A. W. Forrest and R. Bicchichi: Corrosion, 37, 349 (1981).
- 18) 有岡孝司, 宝来学, 野口繁, 福本昇: 第48回腐食防食シンポジウム資料, p.34 (1983).

- 19) R. G. Kasper and M.G. April: Corrosion, 39, 181 (1983).
- 20) 稲垣修一, 和田素直, 出口邦雄, 中久保宰: 腐食防食'88, p.46 (1988).
- 21) 広沢規行, 松岡和巳, 岩尾直樹: 第35回腐食防食討論会講演集, p.167 (1988).
- 22) 宇佐美明, 水流徹: 腐食防食'90, p.291 (1990).
- 23) D. J. Danson and M. A. Warne: Corrosion/83, Paper No.211 (1983).
- 24) R. A. Adey, S. M. Niku, C. A. Brebbia and J. Finnegan: Appl. Boundary Element VIII(Eds. C. A. Brebbia and G. Maier), 2, pp.14-21 ~ 14-43, Springer-Verlag (1985).
- 25) 青木繁, 岸本喜久雄, 吉部耕史, 宮坂松甫: 材料と環境, 35, 394 (1986).
- 26) 青木繁, 岸本喜久雄, 宮坂松甫: 材料と環境, 37, 418 (1988).
- 27) 宮坂松甫, 橋本和宏, 岸本喜久雄, 青木繁: 材料と環境, 38, 432 (1989).
- 28) 宮坂松甫, 岸本喜久雄, 青木繁: 材料と環境, 40, 401 (1991).
- 29) 宮坂松甫, 石黒寿一, 岸本喜久雄, 青木繁: 材料と環境, 44, 226 (1995).
- 30) 宮坂松甫, 天谷賢治, 青木繁: 材料と環境, 44, 293 (1995).
- 31) 宮坂松甫, 高山博和, 天谷賢治, 青木繁: 材料と環境, 46, 378 (1997).
- 32) M. Miyasaka, H. Takayama, K. Amaya and S. Aoki: Corrosion/98, Paper No.689 (1998).
- 33) 天谷賢治, 歌川和宏, 青木繁, 宮坂松甫: 機械学会講演論文集, 67-7, 123 (1997).
- 34) 宮坂松甫, 高山博和, 天谷賢治, 青木繁: 材料と環境, 47, 156 (1998).
- 35) 青木繁, 天谷賢治, 宮坂松甫: 「境界要素法による腐食防食問題の解析」, 裳華房 (1998).
- 36) 青木繁, 天谷賢治, 高沢宏彰, 宮坂松甫: 表面技術, 51, 4, pp.425-430 (2000).
- 37) K. Hayabusa, M. Miyasaka and K. Amaya: Corrosion/2004, Paper No.04065 (2004).
- 38) 早房敬祐, 天谷賢治: 日本機械学会第18回計算力学講演会講演論文集, pp.543-544 (2005).
- 39) 早房敬祐, 竹村隆, 天谷賢治: 日本機械学会M&M材料力学カンファレンス講演論文集, pp.409-410 (2006).
- 40) 早房敬祐, 天谷賢治: 日本機械学会2007年度年次大会講演論文集, Vol.6, pp.139-140 (2007).
- 41) B. W. Cherry, M. Foo and T. H. Siau: Corrosion, 42, 654 (1986).
- 42) N. G. Zamani, J. F. Porter and A. A. Mufti: Int. J. Numer. Methods Eng., 23, 1295 (1986).
- 43) R. Strommen, W. Keim, J. Finnegan and P. Mehdizadeh: Corrosion/86, Paper No.45 (1986).
- 44) N. G. Zamani: Appl. Math. Computation, 26, 119 (1988).
- 45) 岩田光正, 永井欣一: 関西造船協会誌, [210] 97 (1988).
- 46) 広沢規行, 伊藤毅: 第36回腐食防食討論会講演集, p.97 (1989).
- 47) 辻川茂男, 柏瀬正晴, 玉置克臣, 久松敬弘: 防食技術, 30, 62 (1981).

### 「腐食防食講座－海水ポンプの腐食と対策技術－」

第1報：腐食の基礎と海水腐食の特徴  
(08年7月発行済み, 第220号)

第2報：海水腐食に及ぼす流れの影響  
(08年10月発行済み, 第221号)

第3報：異種金属接触腐食とカソード防食  
(09年1月発行済み, 第222号)

第4報：防食解析技術 (本号)

第5報：ステンレス鋼及びニレジスト鋳鉄の腐食と対策技術  
(09年7月発行予定)