境界要素法防食解析システムの開発*

宮坂 松甫**, 高山 博和***, 天谷 賢治†, 青木 繁†

** 株式会社荏原総合研究所

*** 株式会社荏原製作所

† 東京工業大学情報理工学研究科

Development of BEM Analysis System for Corrosion Protection Design*

Matsuho Miyasaka**, Hirokazu Takayama***, Kenji Amaya†
and Shigeru Aoki†

** Ebara Research Co., Ltd.

*** Ebara Corporation

† Dep. of Mechanical and Environmental Informatics, Tokyo Institute of Technology

In order to make a practical application of boundary element method (BEM) to quantitative predictions of cathodic protection and macro-cell corrosion, a BEM analysis system based on the programs for 2D, 3D and axi-symmetric regions was developed. The system consists of a polarization curve database and programs to perform element discretization, input file set up, BE analysis and graphic display of input and output data. Even an engineer with no knowledge of corrosion will be able to easily operate this system and perform effective analyses for optional 3D regions. The usefulness of the system is demonstrated by an application example for the cathodic protection design of a seawater pump. In the system, the effect of flow-rate and time on the polarization curve can be taken into account for defining the boundary conditions.

Key words : boundary element method (BEM), 2D, 3D, axi-symmetry, potential, current density, cathodic protection, galvanic corrosion, polarization curve, seawater, pump

1. 緒 言

カソード防食における陽極の効果的配置, 防食範囲および犠牲陽極の寿命, 異種金属接触腐食および通気差腐食などのマクロセル腐食における腐食速度, などを正確に予測することは, 機器の保守にとって極めて重要である。これらの作業は従来経験則に頼らざるを得なかったが, 近年, 境界要素法^{1)~17)}, 有限要素法^{18)~21)}などを利用した数値解析を適用する試みが行われている。

著者らは, 腐食防食問題では材料表面における物理量(電位および電流密度)が重要であるので, 内部の要素分割を必要としない境界要素法による数値解析技術の開

発を進めてきた^{4)~12)}。これまでに, 2次元^{4), 5)}, 3次元^{6)~11)}および軸対称領域¹²⁾を扱う解析プログラムを実用化し, モデル^{4)~10), 12)}, 実機ポンプ¹¹⁾などを用いた実験および解析を通じて, 異種金属接触腐食^{4)~7), 10), 12)}, 通気差腐食(流速差腐食)⁸⁾およびカソード防食^{6), 9), 11)}の予測に有効であることを示した。

著者らは, 上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および解析結果の表示などを行うプログラムと, 分極曲線データベースとで構成された防食解析システムを開発し, 海水ポンプなど腐食性環境で使用される機器の防食設計および腐食診断に活用している。本稿では, 解析システムの構成と機能について述べ, 海水ポンプのカソード防食設計への適用事例を示す。

2. 境界要素解析の概要

マクロセル腐食およびカソード防食のいずれも, ア

* 腐食防食'96(東京, 1996年)で発表

** 〒251 藤沢市本藤沢 4-2-1 (2-1, Honfujisawa 4-chome, Fujisawa, 251 Japan)

*** 〒144 東京都大田区羽田旭町 11-1 (11-1, Haneda Asahi-cho, Ohta-ku, Tokyo, 144 Japan)

† 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1 (12-1, O-okayama 2-chome, Meguro-ku, Tokyo, 152 Japan)

ノードおよびカソードが電解質を介して構成する電池と考えることができる。電解質内の電位は式(1)のラプラス方程式に支配される。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

電解質が境界 Γ_1 , Γ_2 , Γ_a および Γ_c に囲まれているとする。ここで Γ_1 は電位 ϕ の値が ϕ_0 に指定された領域, Γ_2 は電流密度 q の値が q_0 に指定された領域, Γ_a および Γ_c はそれぞれアノードおよびカソードとの境界である。それぞれの境界における境界条件は式(2)~(5)で与えられる。

$$\Gamma_1 \text{ 上: } \phi = \phi_0 \quad (2)$$

$$\Gamma_2 \text{ 上: } q \{ \equiv \kappa \partial \phi / \partial n \} = q_0 \quad (3)$$

$$\Gamma_a \text{ 上: } \phi = -f_a(q) \quad (4)$$

$$\Gamma_c \text{ 上: } \phi = -f_c(q) \quad (5)$$

ここで, κ 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, $f_a(q)$ および $f_c(q)$ はアノードおよ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られる。式(1)を境界条件(2)~(5)のもとで解けば, 表面近傍の電位および電流密度を求めることができる。境界要素法による解法については別報^{9)~11)}で詳しく述べているのでここでは省略する。式(1)から, 最終的には非線形代数方程式が導かれるが, これを解く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。

3. 防食解析システムの構成と解析手順

本境界要素解析技術は, (1) 解析領域の幾何学的形状, (2) 材料の分極曲線, (3) 溶液の電気伝導度, を条件として, 解析領域境界の電位および電流密度分布を計算するもので, 例えば, カソード防食に対しては防食範囲および犠牲陽極の寿命を, マクロセル腐食問題に対しては腐食速度の分布などを予測することが可能である。

Fig. 1 に防食解析システムの概要を示す。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。それぞれの構成部分の機能について, 解析の流れに従って述べる。

3.1 要素分割

解析に必要な上記の3条件の内, 解析領域の幾何学的形状は, 機器と溶液との境界面を要素に分割することによって定義する。例えば, ガイドケーシング, 羽根車などのポンプ部品は3次元形状・寸法がデータベース化さ

Fig. 1 Sequence of BEM analysis system.

れているので, これを3次元CADソフト:「CATIA」(Dassault Systemsの商標)を用いて読み取り, 要素分割を行う。要素分割されたデータは, 座標で定義された節点, および節点番号で定義された要素として示し, 所定の書式に従って配列し入力ファイルの一部を構成する。この段階で, それぞれの要素を材料および流速が同一のグループに分け, グループごとに名称を与えておく(多くの場合は部品ごとに名称が与えられる)。これは後の段階で各グループごとに分極曲線を与えるためである。

3.2 入力ファイル作成

ここでは, (1) 各要素に対して境界条件として分極曲線を与える, (2) 溶液の電気伝導度を与える, ことによって入力ファイルを完成させる。これらの作業はコンピュータの端末を用い対話形式で行われる。

まず, Fig. 2 に示す操作画面上で, 溶液の電気伝導度を入力する。溶液が通常の海水であれば, 電気伝導度は温度の関数で表されるので, 温度を入力するだけで電気伝導度が設定される。また, 塩化物イオン濃度と温度を入力することによって電気伝導度を設定することもできる。むろん, 電気伝導度がわかっているならば, その値を直接入力することができる。

図中の「Time」は, 「何時間後の分極曲線を適用するか」である。これは, 分極曲線の時間依存性を考慮し

て、より正確な分極特性を解析に適用するために必要な数値である。海水中においては、カソード部の電流密度は時間と共に徐々に減少する。これはカソード反応 ($1/2 \cdot O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$) によって pH が上昇し、 $CaCO_3$ および $Mg(OH)_2$ などのスケールが析出して材料表面への溶存酸素の拡散を抑えるためである^{22)~24)}。この現象を反映させるため、定電位カソード分極測定 (測定時間: 336 h) 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、指定した時間に対応する分極曲線を解析に用いている。

次に、2次元 (2D)/3次元 (3D)/軸対称解析 (AX) のいずれか、閉領域解析 (Closed: 溶液が境界によっ

て囲まれている場合) か開領域解析 (Open: 船舶のように境界が無限に広がる溶液にかこまれている場合。この場合、式(3)の I_2 の一部が無限遠となりそこでは $q_0=0$ となる) か、を指定する。

最後は各要素に対する分極曲線の指定である。3.1項で作成した未完成の入力ファイル (要素定義のみ) を呼び出し、部品構成を表示する。各部品に対し材料名および流速を入力すると (操作画面: Fig. 3), 分極曲線データベースが加工されて、(指定された材料×流速) に応じた数の分極曲線がファイル上に作成される。非線形分極曲線は、(電位, 電流密度) で示される座標の羅列で作成され、それら座標を結んだ折れ線として扱われる。

3.3 境界要素解析

3.2項で完成された入力ファイルは、ソルバー (境界要素法プログラム) で解析にかけられる。解析プログラムは、2次元、3次元および軸対称用のそれぞれについて、閉領域および開領域用があり、合計6種類である。解析結果は、要素ごとに電位、電流密度および面積が表示された出力ファイルとして得られる。

3.4 入出力データのグラフィック表示

グラフィック表示を行うプログラムは、入力ファイル作成を行うプログラムと同一の流れに組み込まれ、同じく対話形式で操作することができる。入力データとしては、要素分割のワイヤーフレーム図、材料別および分極特性別色分け図および解析に用いた分極曲線、出力データとしては、電位分布、電流密度分布のほか、完全防食領域 (防食電位より卑)/腐食抑制領域 (自然電位と防食電位の間)/腐食促進領域 (自然電位より貴) を区別する図、腐食速度 (陽極の消耗速度含む) 表示図を、それぞれカラー表示することができる。図の作成および表示にはカラーグラフィックソフト「HOOPS」(FAMOTIKの商標) を利用している。

3.5 分極曲線データベース

腐食・防食解析にとって分極曲線は極めて重要な境界条件である。分極曲線は材料と環境の組合せによって変

Fig. 2 Operation screen for defining analysis conditions.

Fig. 3 Operation screen for defining polarization curve to each element.

Fig. 4 Cross-section of virtual seawater pump as an analysis object.

わり、海水のような中性塩溶液では環境条件として流速が極めて重要な因子となる。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、オーステナイト鋳鉄、ステンレス鋼、銅合金など各種実用材料、およびAlおよびZn犠牲陽極のそれぞれに関し、流速0~15m/sの海水中で測定された動電位分極測定によるデータを基に整理したものである。測定し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ことができる。

本データベースには各種材料の防食電位データベースを付属しており、これを解析結果と比較することにより防食が達成されているかどうかを判断する。

4. 解析事例

4.1 解析対象

本解析システムを海水ポンプのカソード防食設計に適

Fig. 5 Boundary element discretization of inner surface of seawater pump for 3D closed region analysis.

用した事例を紹介する。解析対象としたのは、Fig. 4に示す口径700mmのSUS316製立軸海水ポンプ（無塗装）であり、Zn犠牲陽極によるカソード防食を行う場合の防食効果およ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箇所および吸い込みベル内面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。

4.2 ポンプ内面の3次元閉領域解析

まず、ポンプ内面に関して3次元閉領域解析を行った。Fig. 5に要素分割図を示す。解析領域の軸方向長さは6mである。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れは複雑な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れ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1つだけを取り出して要素分割を行った。羽根車に関しても同様の考えで行った。ガイドケーシングの上方および羽根車の下方は軸の周りの60°分だけを取り出して要素分割した。ポンプ内部は複雑な流速分布を持つているが、ここでは4つの流速域（1.3, 1.8, 3.7および6.7 m/s）に分割し、それぞれの流速に相当するSUS316およびZnの分極曲線を境界条件として各要素に与えた。つまり、本解析には、SUS316およびZnに対してそれぞれ4および2本、合計6本の分極曲線を同時に用いている（Fig. 6）。分極曲線はカソード電流が比較的安定する168h後の値を用いた。海水の電気伝導度は4.6 S/m（20°C）とした。

電位分布解析結果をFig. 7に示す。電位分布はグラフ表示も可能であり、Fig. 8は軸方向の分布を示している。ポンプ内全域が約-0.5 V vs. SCE 近くまで分極

Fig. 6 Polarization curves used for analysis.

Fig. 7 Potential distribution on inner surface of seawater pump obtained by 3D closed region analysis. (no indication on insulated elements).

されており, SUS 316 の $E_{R, CREV}$ (すきま再不導体化電位) が -0.32 V vs. SCE である²⁵⁾ことを考慮すれば, ポンプ全域が防食されていると判断される。Fig. 9 には電流密度分布を示す。電流密度解析結果から Zn 陽極の消耗速度を計算し表示することも可能である。

4.3 ポンプ外面の軸対称開領域解析

ポンプ外面の解析においては, 簡単のため, 角柱状の Zn 陽極と同一面積の陽極が円周状に取り付けられていると仮定した。こうすれば, ポンプ外面は軸対称モデルで扱うことができる。また, ポンプを囲む溶液は十分に広い領域を占めるため, 解析には軸対称開領域用プログラムを用いた。軸対称解析では, 3次元の領域を, $(r,$

Fig. 8 Potential distribution along z-direction on inner surface of seawater pump.

Fig. 9 Current density distribution on inner surface of seawater pump obtained by 3D closed region analysis.

Fig. 10 Potential distribution on outer surface of seawater pump obtained by axis-symmetric open region analysis (3D expression).

z) で指示される 2 次元の要素分割で表現でき、より簡便な解析を行うことができる。ポンプ外面は、流速がほとんど無いとして、分極曲線は SUS 316, Zn 共に流速ゼロのものを適用した。Fig. 10 に電位分布の解析結果を示す。要素分割は 2 次元で表現されるが、結果の表示は立体的な表現をするため、あえて 60° だけ回転させた 3 次元的な表現をしている。全体が -0.98 V vs. SCE まで分極されており、十分な防食がなされていることがわかる。

5. 結 論

著者らは、これまで、腐食・防食問題の診断・予測のために、境界要素法を用いた数値解析手法の開発に取り組み、2 次元、3 次元および軸対称領域のそれぞれについて、開領域および閉領域の解析を行うプログラムを完成させた。今回、これらのプログラムを軸に、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とによって構成された防食解析システムを開発した。本システムは、特に腐食の知識を持たない技術者でも容易に扱うことができ、任意の三次元形状に関し効率的な解析を行うことができる。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およ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に活用されている。

(Manuscript received December 27, 1996 ;
in final form February 24, 1997)

参 考 文 献

- 1) D. J. Danson & M. A. Warne : *Corrosion* '83, Paper No.211 (1983).
- 2) R. A. Adey, S. M. Niku, C. A. Brebbia & J. Finnegan : Appl. Boundary Element VII (Eds. C. A. Brebbia and G. Maier), 2, pp.14-21~14-43, Springer-Verlag (1985).
- 3) J. C. F. Telles, L. C. Wrobel, W. J. Mansur and J. P. S. Azevedo : Appl. Boundary Element VII (Eds. C. A. Brebbia and G. Maier), 1, pp.1-73~1-83, Springer-Verlag (1985).
- 4) S. Aoki, K. Kishimoto & M. Sakata : Appl. Boundary Element VII (Eds. C. A. Brebbia and G. Maier), 1, pp.1-63~1-71, Springer-Verlag (1985).
- 5) 青木 繁, 岸本喜久雄, 吉部耕史, 宮坂松甫 : 材料, 35, 394 (1986).
- 6) 青木 繁, 岸本喜久雄, 宮坂松甫 : 材料, 37, 418 (1988).
- 7) 宮坂松甫, 橋本和広, 岸本喜久雄, 青木 繁 : 材料, 38, 432 (1989).
- 8) 宮坂松甫, 岸本喜久雄, 青木 繁 : 材料と環境, 40, 401 (1991).
- 9) 天谷賢治, 青木 繁, 岸本喜久雄 : 日本機械学会論文集 A 編, 57, 538, 1431 (1991).
- 10) 青木 繁, 天谷賢治, 早瀬仁則, 植田昌克 : 材料, 43, 495, 1628 (1994).
- 11) 宮坂松甫, 石黒寿一, 岸本喜久雄, 青木 繁 : 材料と環境, 44, 226 (1995).
- 12) 宮坂松甫, 天谷賢治, 青木 繁 : 材料と環境, 44, 293 (1995).
- 13) B. W. Cherry, M. Foo & T. H. Siau : *Corrosion*, 42, 654 (1986).
- 14) N. G. Zamani, J. F. Porter & A. A. Mufti : *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 23, 1295 (1986).
- 15) N. G. Zamani : *Appl. Math. Computation*, 26, 119 (1988).
- 16) 岩田光正, 永井欣一 : 関西造船協会誌, [210] 97 (1988).
- 17) 広沢規行, 伊藤 叡 : 第 36 回腐食防食討論会講演集, p.97 (1989).
- 18) R. Strommen : *Trans. Int. Mar. Wng. C. Conf.*, 91, 74 (1979).
- 19) R. G. Kasper & M. G. April : *Corrosion*, 39, 181 (1983).
- 20) 稲垣修一, 菊名 登 : 第 37 回腐食防食討論会講演集, p.125 (1990).
- 21) 宇佐見 明, 水流 徹 : 腐食防食 '90 講演集, p.291 (1990).
- 22) P. O. Gartland, E. Bardal, R. E. Andersen and R. Johnsen : *Corrosion*, 40, 127 (1984).
- 23) J. R. Scully, H. P. Hack and D. G. Tipton : *Corrosion* '85, Paper No.214 (1985).
- 24) M. M. Kunjapur, W. H. Hartt and S. W. Smith : *Corrosion*, 43, 674 (1987).
- 25) 辻川茂男, 柏瀬正晴, 玉置克臣, 久松敬弘 : 防食技術, 30, 62 (1981).