導電紙による電気防食系の電位/電流分布の推定*

望 月 紀 保**, 白 水 司***, 平 塚 征 一****

**中川防蝕工業株式会社開発部

***中川防蝕工業株式会社技術研究所

****中川防蝕工業株式会社腐食検査室

Estimation of Potential/Current Distribution in a Cathodic Protection System by Electroconductive Paper Method*

Noriyasu Mochizuki**, Tsukasa Shirouzu*** and Seiichi Hiratsuka****

**Research and Development Department, Nakagawa Corrosion Protecting Co., Ltd.

***Technical Laboratory, Nakagawa Corrosion Protecting Co., Ltd.

****Corrosion Inspection Unit, Nakagawa Corrosion Protecting Co., Ltd.

Theoretical analyses of potential/current distribution in cathodic protection system with complex boundary conditions have rarely been discussed in detail because of the difficulty of mathematical treatment. By electroconductive paper method, despite the limited application to 2-dimensional, Laplace equation solution can be derived, since the boundary conditions can be represented graphically on electroconductive papers. By using this, potential/current distribution with complex boundary conditions can be estimated relatively easily. The application of the electroconductive paper method to the actual system have been demonstrated for the application of cathodic protection of steel piles in seawater and internal surface of stainless steel tank for hot water reservoir. A fairly good agreement was observed between the measured values and those obtained by electroconductive paper method which indicates the effectiveness of the electroconductive paper method for the estimation of potential/current distribution.

1. 緒 言

電気防食において電位/電流分布を正確に把握することは、有効な電気防食を行う上で重要なことである。

一般的には、防食対象物となるカソード表面の電位分布が一次分布になるような方法は、防食効果及び経済の見地からも行わないことが原則となっており、淡水や土中などの高抵抗率環境では、塗装等の被覆材と電気防食の併用が行われている。

これまで電気防食における電位/電流分布に関しては、Kasper¹⁾, Hoar²⁾, Nelson³⁾ など、種々の研究報告はあるが、いずれも単純な系における分布を問題にしているため、境界条件が複雑な実環境とは余り対応が得られないといわれている。

実際面においては、現場における仮通電試験によって電位分布の把握や電極配置が決められているが、仮通電試験の行いにくい土中や送水管内面の電位/電流分布については、それぞれ Pritula 式⁴⁾や Morgan 式⁵⁾によって推定されることもある。

導電紙⁶⁾による電位/電流分布の推定は、二次元ではあるものの、境界条件が複雑な系についても比較的容易にラプラス方程式の解が得られるため、電気防食設計上への適用は非常に有効であると考えられる。

* 1983 年 9 月第 10 回コロージョンセミナーで一部発表 (於 箱根・静雲荘)

** **** 〒101 東京都千代田区神田鍛冶町 2-2-2 (2-2-2 Kanda Kajicho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101 Japan)

*** 〒362 埼玉県上尾市中新井 417-16 (417-16 Nakaarai, Ageo, Saitama, 362 Japan)

本稿は、電気防食系における電位分布の推定を導電紙を用いて行ったところ、実測データと導電紙結果との間に比較的良好な対応が得られたので報告するものである。

2. 導電紙による測定

本実験で取り扱う電気防食系に対し、次のような仮定をおく。

- ① 環境は均質溶液である
- ② 電極の分極特性を、直線分極とする
- ③ 金属電極内部には、電位差はない

上述の条件設定によって、対象となる電気防食系を適当な断面で切断するなどの方法によって問題を二次元に置きかえることができるならば、導電紙を用いての電位/電流分布の解析が可能となる。

導電紙によって電位/電流分布を求めるには、境界条件が対象となる系と同一になるように導電紙上に設定すればよい。

電気防食系においては、多くの場合、カソードは二次電位/電流分布（以下、二次分布と呼ぶ）となる。

二次分布における境界条件の設定では、一次電位/電流分布（以下、一次分布と呼ぶ）に適用される、① 相似、② 対称、③ 互換、④ 切断、合成、の4則に加えて、電極表面上での境界条件が加わる。4則の詳細な説明は、文献^{6),7)}を参照されたい。

二次分布に4則が適用できる理由は、解析上は二次分布を問題にしている場合でも、導電紙上での電位/電流分布はあくまで一次分布であるためである。

一方、電極表面上での境界条件については、電気防食系に対して次式が成立する。

$$\phi_a^s - \phi_c^s = V_{ex} - E_a^0 + E_c^0 - h_a i_a - h_c i_c \quad (1)$$

ここで ϕ^s : 溶液電位 V_{ex} : 極間電圧

E^0 : 自然電位 h : 分極抵抗

i : 電流密度

下付添字は、 a : アノード、 c : カソードを表す。

実環境における電極に対して完全な直線分極の適用が不可能な場合、電位/電流分布の解析上は、実際の対象系において問題とされる電位あるいは電流密度領域が(1)式を満足するような直線近似を行う必要がある。この時 E^0 は、直線分極適用上での自然電位となる。

分極パラメータ L (h/ρ , ρ : 溶液抵抗率) を用いて

$$\phi_a^s = V_{ex} - E_a^0 + E_c^0 - i_a \rho L_a \quad (2)$$

$$\phi_c^s = i_c \rho L_c \quad (3)$$

とおくと、(2), (3) 式を満足する境界条件を導電紙上に設定すればよいことになる。

一例を挙げる。

Fig. 1(a) に示す二次元の電気防食モデルがある。系

Fig. 1 2-dimensional representation of a cathodic protection system.

(a) 2-dimensional cathodic protection model

(b) Representation of model (a) on an electroconductive paper

の対称性から対称則および切断・合成則を適用し、かつ(2), (3) 式に示す境界条件を満たすためには、Fig. 1(b)のように導電紙上に表せばよい。

ここで、実環境における ρ , L , i に対して、導電紙上におけるそれらの値を上付添字*をつけてそれぞれ ρ^* , i^* , L^* として示した。

導電紙上に表した電極表面の境界条件の意味は、電流の流れを電極面に対して垂直方向に規制した微小幅のスリットを設けることによって $i\rho L$ を表し、内部に電位差のない金属電極を導電ペイントを塗って表示したところにある。

更に、両電極間に $V_{ex} - E_a^0 + E_c^0$ の電圧を印加することによって(2), (3) 式は完全に満足され、スリット両端間の電位差を測定することによって電極各部の電位/電流分布は求めることができる。しかしながら $V_{ex} - E_a^0 + E_c^0$ が非常に高電圧の場合には、一般に測定上便利な電圧 V_{ex}^* を印加した時の電位差を測定し、 $(V_{ex} - E_a^0 + E_c^0)/V_{ex}^*$ の比に応じた補正を行うという方法をとる。

本実験では、得られたデータに対してカソード各位置の電位/電流密度は、次式から求めた。

$$E_{cj} = E_c^0 - \Delta E_{cj} \cdot (V_{ex} - E_a^0 + E_c^0)/V_{ex}^* \quad (4)$$

$$i_{cj} = \Delta E_{cj} \cdot (V_{ex} - E_a^0 + E_c^0)/\rho/L_c/V_{ex}^* \quad (5)$$

ここで

E_{cj} : j 番目のスリットに対応する実環境での電位

i_{cj} : j 番目のスリットに対応する実環境での電流密度

ΔE_{cj} : j 番目のスリット両端の電位差

V_{ex}^* : 導電紙上での印加電圧

更に、電気防食系においてはアノード形状がカソード形状に比べて非常に小さいため、アノードの形状そのものが導電紙上に表現しにくいこと以外に、アノードの分極パラメータ L_a までも無視されがちになりやすい。

Fig. 6 Effect of anode interval (l in Fig. 2) on the potential distribution of steel sheet piles determined by electroconductive paper method.

Cathodic protection model is given in Fig. 2.

Fig. 7 Potential distribution measured on steel sheet piles in natural seawater environment.

おける電位分布カーブを描くと Fig. 6 のようになる。

Fig. 6 の結果は、防食電位の上限を -0.8 V (SCE) とすると、40 cm 鋼矢板の場合、陽極間隔は、3.2 m ピッチで取り付けの必要があることを示している。これは、現在、電気防食施工で行われている取り付け間隔⁹⁾と非常によく一致するもので、導電紙による推定に大きな誤差はなかったものと考えることができる。

実環境における電位分布との対応例を次に示す。

対象は、電気防食施工後 10 年経過した岸壁の鋼矢板で、形状及び陽極の取り付け間隔は Fig. 7 に示す通りである。電位測定は、ダイバーによって、陽極間を水平方向に 25 cm ピッチで行われた。結果を Fig. 8 に $\bullet$ で示す。

Fig. 8 Comparison of results of field measurement (FM) and those by electroconductive paper method (EC). Cathodic protection system is given in Fig. 7.

一方、導電紙による解析は、現場における陽極、鋼矢板の分極特性が把握できなかったため、電極表面における境界条件の設定では、陽極については先の検討と同様、 $E_a^0 = -1.05 \text{ V (SCE)}$, $h_a = 10 \Omega \text{ cm}^2$ ($L_a = 0.4 \text{ cm}$)、鋼矢板については $E_c^0 = -0.6 \text{ V (SCE)}$ とし、 h_c は、現場における取り付け陽極 1 個当りの発生電流が $0.3 \sim 0.5 \text{ A}$ の範囲で計測されたとの結果をもとに、陽極 1 個当りの発生電流が 0.4 A 程度に相当する h_c として $5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ($L_c = 2.0 \times 10^3 \text{ cm}$) を用いた。結果を Fig. 8 に $\circ$ で示す。ちなみに、このとき導電紙上から導き出される陽極 1 個当りの発生電流は 0.405 A である。

Fig. 8 の結果は、実測値と導電紙結果との間に比較的良好な対応が得られているとみることができ、導電紙による電位分布解析の有効性が示された。

3.2 ステンレス製温水タンク内面側壁の電位/電流分布

1.5 m ϕ の円筒状ステンレス (SUS 304) 製温水タンクがある。このタンク内面は、タンク側壁に沿って、垂直方向に等間隔に張った 6 本の 1.5 mm ϕ の Pt めっき Ti (Pt-Ti) 線をアノードとして、定電圧の電気防食を行っている。温水は、温度 60°C 、抵抗率 $2,000 \Omega \cdot \text{cm}$ の水道水で、電極配置はタンク水平方向断面で示すと Fig. 9 のようになっている。

本タンクにおける側壁の電位/電流分布の推定を導電紙を用いて行い、電位分布については、実測値との対応を調べた。

電極表面の境界条件として、アノード、カソードそれぞれ Fig. 10, Fig. 11 に示す直線分極を適用した。各パラメータを示すと Table 1 のようになる。

Fig. 9 Configuration of electrodes for the cathodic protection of a hot-water tank.
Number of line-anodes: 6
 $a : b = 2 : 1$

Fig. 10 Anodic polarization curve of Pt-Nb electrode in tap water.

Fig. 11 Cathodic polarization curve of stainless steel in tap water.

なお、Pt-Ti 電極の境界条件の設定に Pt-Nb 電極の分極曲線を用いたのは、本実験における直線分極の適用範囲では、Pt-Ti 電極と同様の分極挙動をとる¹⁰⁾と考えることができるためである。

導電紙上への表現は、系の対称性から全体の 1/12 を 1/5 縮尺で表示し、極間電圧として 1 V を印加した。

本実験の場合、アノードは 1/5 縮尺でも径が 0.3 mm, $L_a = 0.095$ mm と非常に小さく、導電紙上への正

Table 1 Parameters necessary for the estimation of potential/current distribution on the internal surface of a hot-water tank of stainless steel.

E^0 : Free corrosion potential

h : Polarization resistance

L : Polarization parameter

	E^0 (V, SCE)	h (Ωcm^2)	L (cm)
Anode	1.25	95	0.0475
Cathode	-0.3	1.2×10^4	6

Fig. 12 Representation on the electroconductive paper of the model shown in Fig. 9.

確な表示は不可能であるため、アノード形状の表示では Fig. 12 に示すように、導電紙上に表示可能な電極として 3 mmφ の電極を同心円として表示し、電位/電流分布の測定を行った。これは次のような考え方に基いている。

微小円電極においては、その周囲の等電位線は適当な大きさのところまでは円電極の中心を中心とした同心円状に描かれると考えることができる¹¹⁾。この場合、切断・合成則により等電位線を電極に置き換えたとすると、同心円である二つの半円電極間の抵抗 R_3 は次式より求めることができる。

$$R_3 = \rho^* / \pi \ln(r/r_0) \quad (8)$$

ここで r , r_0 , ($r > r_0$) は、同心円である二つの円電極の半径を示す。

(8) 式が成立すると考えられる範囲内では、電極を実際の形状より同心円状に大きく描くことによって測定を行っても、得られたデータに対して (8) 式を用いて元の形状の電極での値に補正することは可能であるという考えである。

Fig. 12 において、導電紙上の極間抵抗 R_2 及び抵抗率 ρ^* はそれぞれ、745 Ω , 437 Ω であった。

また、0.3 mmφ の電極形状の表示が可能であったとすれば、0.3 mmφ の半円から 3 mmφ の半円までの抵抗値は、この範囲内で等電位線が電極形状と同心円状に描かれるとの仮定のもとに (8) 式より $R_3 = 320 \Omega$ と求

Fig. 13 Results for the cathodic protection of a tank as shown in Fig. 9 by electroconductive paper method.

Measured values in an actual system are indicated by open circles

(a) Potential distribution

(b) Current density distribution

Table 2 Estimated values of anode potential and current density on a Pt-Ti anode at given electrolysis voltage for electrode configuration of Fig. 9

Tank diameter: 1.5 m

Anode diameter: 1.5 mm

Resistibility of water: 2000 $\Omega \cdot \text{cm}$

V_{ex} (V)	E_a (V, SCE)	i_a (A/dm ²)
2	1.28	0.04
4	1.44	0.20
6	1.59	0.36

V_{ex} : Electrolysis voltage

E_a : Anode potential

i_a : Current density

まる。

一方、分極パラメータ L_a の取り扱いについては、(6), (7) 式より R_1 及び α (本系の場合、 $R=R_1+R_2+R_3$) を求めると、それぞれ 88 Ω , 0.076 となるため、本系では L_a の存在も考慮することにした。

Fig. 12 に示す測定によって得られたデータは、極間抵抗として R_2 のみを考慮した電位/電流分布を示す。求めるものは、 R_1 , R_2 , R_3 を考慮した電位/電流分布である。測定系において、 R_1 , R_2 , R_3 はシリーズに存在するため、極間抵抗として $(R_1+R_2+R_3)$ を考え、Fig. 12 の測定より得られたデータに対し、 $R_2/(R_1+R_2+R_3)$ の係数を乗ずることによって補正を行った。更に (4), (5) 式によって、実環境における電位/電流分布に換算した結果を Fig. 13 に示す。電位分布カーブ中に示す○印は、極間電圧 6 V で運転中の実機におけるタンク電位測定結果を示す。実機における電位測定では、電源の ON-OFF 瞬時における電位変化を IR ドロップとして

補正した。また、実測値との対応は確認することはできなかったが導電紙法より推定される Pt-Ti 電極の電位/電流密度を Table 2 に示した。電位分布に関して実測値と導電紙結果との間にはよい対応が示されたが、他の推定値においても実系において十分考えられる対応性のある値が得られた。導電紙法による電位/電流分布の推定は、本系においても十分可能であると考えることができる。

4. ま と め

電気防食系として、海洋における鋼矢板及びステンレス製温水タンク内面側壁を選び、導電紙による電位/電流分布の推定結果と実測値との対応を調べた。

導電紙結果と実測値との間にはよい対応が得られた。

電気防食系においては、カソードに対して分極現象も考慮した上でのラプラス方程式の解法が必要となる場合が多い。導電紙法はこの種の問題に対して比較的容易に解が得られるところに利点があるため、電気防食系における電位/電流分布の推定には非常に有効な手段であると考えることができる。

[謝 辞]

本研究の遂行にあたり種々の御指導、御批判をいただいた東京大学生産技術研究所 増田正孝氏、金属材料技術研究所 小玉俊明氏、藤井哲雄氏に感謝致します。

(Received April 26, 1984)

文 献

- 1) C. Kasper: *J. Elect. Chem. Soc.*, **77** (1940).
- 2) J. N. Ager, T. P. Hoar: *Discussion of the Faraday Soc.*, **1**, 162 (1974).
- 3) E. E. Nelson: *Corrosion*, **13**, 315t~320t (1957).
- 4) V. A. Pritula: "Cathodic Protection of Pipelines and Storage Tanks" Her Majesty's Stationery Office, London (1953).
- 5) J. H. Morgan: *Corrosion*, **15**: 417t (1959).
- 6) 高橋正雄, 増子 昇: 「工業電解の化学」, アグネ, (1979).
- 7) 増田正孝: 第 10 回コロージョン・セミナー資料, 腐食防食協会 (1983).
- 8) 望月紀保: 第 10 回コロージョン・セミナー資料, 腐食防食協会 (1983).
- 9) 運輸省港湾局監修: 「港湾の施設の技術上の基準, 同解説」, 日本港湾協会 (1979).
- 10) 望月紀保: 中川防蝕社内資料.
- 11) 小玉俊明, 藤井哲雄, 馬場晴雄: 防食技術, **33**, 343 (1984).