FRP 船のプロペラにおける防食電流分布*

——回転だ円体近似による解析——

瓜 生 浩 朗**

**防衛庁

Current Distribution for Cathodic Protection of Propeller of FRP Ship*
—Analysis by the Equivalent Ellipsoid—

Koro Uryu**

**The Defense Agency

The distribution of the protective current on the propeller of FRP ship was estimated by using the conformal mapping, with reference to the cathodic protection of the propeller by the zinc sacrificial anode. The resistance between the propeller and the zinc anode was calculated by transforming the propeller into an equivalent ellipsoid. The current distribution on the ellipsoid was drawn by the conformal mapping, and the arrangement of zinc anode for an uniform current distribution on the ellipsoid was discussed. As the result, it was found that an uniform current distribution would be obtained by providing three zinc anodes on hull bottom, redder and overhang.

1. 結 言

FRP 船のプロペラを亜鉛犠牲陽極によって効率よく防食するためには、プロペラに均一な防食電流が流れるよう犠牲陽極を配置し、しかも亜鉛陽極を均一に消耗させることが必要であるが、その理論的解析についてほとんど報告されていない。

そこで本研究では、FRP 船のプロペラ翼を等角写像により回転だ円体¹⁾に置換し、プロペラ表面の分極抵抗を無視して亜鉛陽極との間の海水抵抗を近似計算により算出し、さらに回転だ円体表面上の防食電流の分布を電界描写によって求め、この電流分布が均一になるような経済的かつ効率的な亜鉛陽極の配置と数量について考察した。

2. FRP 船における亜鉛陽極の設置可能な位置

FRP 船底の舵および張出軸受間に装備したプロペラを防食する亜鉛陽極の設置可能な場所としては、Fig. 1 に示すようにプロペラ翼上部の船底部、プロペラ翼の前進面に対面する舵の前部板厚面、および張出軸受の後部板厚面が適当である。

Fig. 1. Propulsion apparatus, and zinc anodes of the FRP ship.

3. プロペラ表面の電流分布、電流密度分布および陽極寸法

3.1 解析方法

FRP 船底に装備したプロペラ翼は複雑な形状をしていて、このままでは理論的に取り扱うのは難しいので、プロペラ翼を等角写像により回転だ円体に置き換えた。

さらに、FRP 船のプロペラ 3 翼を等角写像した 120° 間隔の 3 個の回転だ円体と亜鉛陽極との海水抵抗式は、1 個の等価回転だ円体の場合の式と同じ¹⁾であり、またこの回転だ円体の各回転角 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ における各海水抵抗値が変らない¹⁾ことから、FRP 船のプロペラ 3 翼の代りに、等価回転だ円体 1 個を対象とした。

無限大の面積の亜鉛陽極板と長軸および短軸回転だ円体との間の海水抵抗式を回転だ円体間のポテンシャル関

* FRP 船推進装置の防食に関する研究 (第 5 報)
Studies on Protection of Propulsion Apparatus
on FRP Ship (Part 5)

** 〒107 東京都港区赤坂 9-7-45 (9-7-45, Akasaka,
Minatoku, Tokyo 107, Japan)

数、電位、電荷および静電容量等から求め、さらに無限長の亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体との間の海水抵抗式を静電容量等から算出した。

これらの海水抵抗式の組合せにより、亜鉛陽極板および棒と回転だ円体との間の海水抵抗式を誘導した。

電界描画法により、亜鉛陽極板および棒と長軸および短軸回転だ円体との間の海水中に等電位線とこれに直交する電流線を描き、この電流線と回転だ円体表面との交点から回転だ円体表面の電流分布を得た。なお、左右対称の場合には何れか一方のみに電界描写を実施した。

電流線と回転だ円体表面との交点を通る分割線に囲まれた各表面積を積分によって求め、この面積でその面積素分に流れる電流を除して回転だ円体表面における局所電流密度を求めた。

この局所電流密度が回転だ円体の防食電流密度より大きくて防食状態を満足し、最小の面積でしかも消耗度が比較的均一であるような亜鉛陽極をうるため、数個の亜鉛陽極の組合せを考慮して適切な設置位置を解析した。

3.2 回転だ円体の長軸方向に1枚の亜鉛陽極板を配置した場合

この場合の亜鉛陽極板および回転だ円体表面上の電流分布および面積素分などを Fig. 2 に示す。(S; 陽極, A; 回転だ円体)

3.2.1 回転だ円体表面上の電流分布

長軸回転だ円体と船底に装備した長軸と直交する亜鉛陽極板との間に電界描画法²⁾を適用して等電位線およびこれと直交する電流線分布を描いた。

(1) Fig. 2 の $S_{1,2}$ および $A_{1,2}$ は、亜鉛陽極面積および回転だ円体表面積が小さい状態を示す。

(2) Fig. 2 の $S_{1,7}$ および $A_{1,7}$ は、亜鉛陽極面積および回転だ円体表面積が中程度である状態を示す。

(3) Fig. 2 の $S_{1,12}$ および $A_{1,12}$ は、亜鉛陽極面積

Fig. 2. Current distribution between zinc anode and major axis ellipsoid.
a: Stream lines of current.
b: Equipotential lines.

および回転だ円体表面積が無限大に相当する状態を示す。

3.2.2 亜鉛陽極板と長軸回転だ円体との間の通過電流と海水抵抗

亜鉛陽極板と長軸回転だ円体との間の海水中における通過電流 I は、それぞれの電位を V, V_0 両者間の海水抵抗を R とすれば、次式であらわされる。

$$I = V - V_0 / R \quad (1)$$

この海水抵抗 R は、次式であらわされる¹⁾。

$$R = f \cdot \rho \cdot a(h-a) / 4\pi b^2 h \quad (2)$$

ここに

ρ : 海水の抵抗率

a : 長軸回転だ円体の長軸の 1/2

b : " 短軸の "

h : 2 個の長軸回転だ円体中心間の距離

f : k - f 特性線¹⁾から得た亜鉛陽極寸法に関する抵抗係数

(2) 式において、 a, b は回転だ円体が与えられると必然的に決まることから、海水抵抗 R は f と h の関数と考えられ、次のように変形される。

$$\begin{aligned} R &= f \cdot \rho \cdot a(h-a) / 4\pi b^2 h \\ &= f \cdot (\rho a / 4\pi b^2 - \rho a^2 / 4\pi b^2 h) \\ &= f \cdot (K_1 - K_2 / h) \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、(3) 式を次の 2 つの場合にわたる。

(1) $h = \text{const.}$ の場合、亜鉛陽極の面積を S とすれば、亜鉛陽極寸法 $\sqrt{S}$ と回転だ円体短軸 b との比 k に対応する f を k - f 特性線から求められることから、

$$f \propto 1 / \sqrt{S}$$

を得て、(3) 式は次式であらわされる。

$$R \propto 1 / \sqrt{S} \quad (4)$$

(4) 式から、亜鉛陽極寸法が大(小)になると海水抵抗は小(大)になり、(2) 式から通過する電流は大(小)となることがわかった。

(2) $f = \text{const.}$ の場合、(3) 式は次式であらわされる。

$$R \propto K_1 - K_2 / h \quad (5)$$

(5) 式から、回転だ円体と亜鉛陽極の距離 h が大(小)になると R は大(小)となり、(2) 式から通過する電流は小(大)となることがわかった。

3.2.3 電流密度分布と陽極寸法

長軸回転だ円体表面上における電流密度分布中の最大電流密度 $i_{1,2}$ および最小電流密度 $i_{11,12}$ を次式で求めた。

$$i_{1,2} = V - V_0 / n \cdot R \cdot A_{1,2} \quad (6)$$

$$i_{11,12} = V - V_0 / n \cdot R \cdot A_{11,12} \quad (7)$$

ここに

V, V_0 : 亜鉛陽極板および長軸回転だ円体の電位

R : " 間の海水抵抗

n : " 間の電流線数

Fig. 3. Current density distribution on the major axis ellipsoid.

$A_{1,2}$: 亜鉛陽極板に最も近い長軸回転だ円体表面の最小表面積

$A_{11,12}$: 亜鉛陽極板に最も遠い長軸回転だ円体表面の最大表面積

この $i_{1,2}$ および $i_{11,12}$ をもとにして描いた回転だ円体表面上の電流密度分布は、Fig. 3 に示すとおりである。

(1) Fig. 2 において亜鉛陽極板の小面積 $S_{1,2}$ および回転だ円体表面上の $A_{1,2}$ の場合、 $S_{1,2}$ から放射した電流は $A_{1,2}$ に流れてこの $A_{1,2}$ 部分を防食する。しかし、この $A_{1,2}$ 以外の回転だ円体表面には電流が流れず防食されない。したがって、亜鉛陽極面積を大きくする必要がある。

(2) 亜鉛陽極板の大面积 $S_{1,12}$ および回転だ円体表面上の全表面積 $A_{1,12}$ の場合、 $S_{1,12}$ から放射した電流は $A_{1,12}$ に流れてこの $A_{1,12}$ を全般的に防食する。しかし、亜鉛陽極板にもっとも近い $A_{1,2}$ は最小表面積であるため、この部分の電流密度は過大となり過防食となる恐れがある。そこで、この電流密度を減少するために回転だ円体と亜鉛陽極の距離 h を大にすれば、最大表面積 $A_{11,12}$ 部分の電流密度が減少してこの部分の表面は防食されない。したがって、大きい面積の亜鉛陽極板のみでは回転だ円体を十分に防食することができない。

(3) 亜鉛陽極板の中面積 $S_{1,7}$ および回転だ円体の表面積 $A_{1,7}$ の場合、 $S_{1,7}$ から放射した電流は $A_{1,7}$ に流れて $A_{1,2}$ 部分を過防食することなくこの $A_{1,7}$ 部分をほぼ一様に防食するが、 $A_{7,12}$ はほとんど防食されない。したがって、別の亜鉛陽極板によって回転だ円体表面積の $A_{7,12}$ を防食する必要がある。

3.3 回転だ円体の短軸方向に 1 本の亜鉛陽極棒を配置した場合

3.3.1 回転だ円体表面上の電流分布

有限長の亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体との間の海水中に、電界描写により描いた電流線および等電位線の分布は、第 1 近似としては無限亜鉛陽極棒とこれの右側に存

Fig. 4. Current distribution between zinc anode and minor axis ellipsoid.

a: Stream lines of current.
b: Equipotential lines.

在する短軸回転だ円体との間の電流線および等電位線の分布と、無限亜鉛陽極棒とこれの左側に存在する有限長の亜鉛陽極棒との間の電流線および等電位線の分布とを合成したものと考え、この電流線と等電位線とでつくる網目群の状態を亜鉛陽極棒の長短により次の三つに分類して Fig. 4 に示す。

(1) Fig. 4 の亜鉛陽極棒長 $L_{1,2}$ および回転だ円体表面積 $A_{1,2}'$ は、それぞれ、小さい状態を示す。

(2) Fig. 4 の亜鉛陽極棒長 $L_{1,12}$ および回転だ円体表面積 $A_{1,12}'$ は、それぞれ大きい状態を示す。

(3) Fig. 4 の亜鉛陽極棒長 $L_{1,7}$ および回転だ円体表面積 $A_{1,7}'$ は、それぞれ中程度の状態を示す。

3.3.2 亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体との間の通過電流と海水抵抗

亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体との間の海水中における通過電流 I は、それぞれの電流を V, V_0 、両者間の海水抵抗を R'' とすれば、(1) 式であらわされる。($R \rightarrow R''$)

次に、この海水抵抗 R'' は亜鉛陽極棒と無限平板陽極との間の海水抵抗と、この無限平板陽極と短軸回転だ円体との間の海水抵抗とに分けてそれぞれ計算し、これらの和として次のように算出した。

a. 無限平板陽極と短軸回転だ円体間の海水抵抗式

Fig. 5 に示すように、相等しい 2 個の短軸回転だ円体間の導体が共軸的に相対して、これに $+V_0$ 及び $-V_0$ の電位を与えたときの周囲の電位⁹⁾を求め、静電容量⁹⁾を計算してこれから海水抵抗式を算出した。

(a) ポテンシャル関数

短軸回転だ円面座標によるラプラスの方程式は

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} [(\lambda^2 + 1) \frac{\partial V}{\partial \lambda}] + \frac{\partial}{\partial \mu} [(1 - \mu^2) \frac{\partial V}{\partial \mu}] + \lambda^2 + \mu^2 (\lambda^2 + 1)(1 - \mu^2) \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (8)$$

で、変数分離を行ない、電位は Z 軸のまわりに対称的 (ϕ に無関係) であることを考慮すると、解は一般に次式で表わされる。

Fig. 5. Same ellipsoids on the prolate spheroidal coordinate.

$$V(\lambda, \mu) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot Q_n(i\lambda) \cdot P_n(\mu) \quad (9)$$

(b) 電位の計算

Fig. 5 における任意の点の電位は、導体 A による電位 V_A と導体 B による電位 V_B との和であり、 $V_B = -V_A$ から V_A, V_B を次のように仮定する。

$$V_A(\lambda, \mu, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot Q_n(i\lambda) \cdot P_n(\mu), \quad \lambda_0 \leq \lambda \quad (10)$$

$$V_A(\lambda_i, \mu_i, \varphi_i) = - \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot Q_n(i\lambda_i) \cdot P_n(\mu_i), \quad \lambda_0 \leq \lambda \quad (11)$$

係数 A_n を決定するには、上式の右辺を点 P の座標 (λ, μ, φ) であらわす必要があり、このため Datta 変換公式

$$Q_n(i\lambda_i) \cdot P_n(\mu_i) = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \cdot W_{ln}(t) \cdot P_l(i\lambda) \cdot P_l(\mu) \quad (12)$$

を上式に代入して、

$$V_A = - \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \cdot W_{ln}(t) \cdot P_l(i\lambda) \cdot P_l(\mu) \quad (13)$$

を得、さらに n を k , l を n と置き換えて、

$$V_A = - \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \cdot W_{nk}(t) \cdot P_n(i\lambda) \cdot P_n(\mu) \quad (14)$$

を得る。ただし、変換関数 $W_{nl}(t)$ は、 n と l に関して対称であり、 $k_1 = k_2$ ($\rho = 1$) の場合をとり、 $l \rightarrow k$ として

$$W_{nk}(t) = 2^n n! / (2n+1)! \cdot 2^k k! / (2k+1)! \cdot 1/t^{n+k+1} \\ \cdot [(n+k)! + (n+k+2)! / t^2 \cdot (1/2(2n+3) + 1/2(2l+3) + \dots)] \quad (15)$$

である。

電位 V は、次の境界条件

$$\left. \begin{aligned} V_A &= V_0, & \lambda &= \lambda_0 \\ V_B &= -V_0, & \lambda' &= \lambda_0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

の一方を満足すればよい。

$$V_0 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot Q_n(i\lambda_0) \cdot P_n(\mu) \\ - \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \cdot W_{nk}(t) \cdot P_n(i\lambda_0) \cdot P_n(\mu) \quad (17)$$

この式がすべての μ で成り立つためには、 $n=0$ において

$$P_0(\mu) = 1, \quad P_0(i\lambda_0) = 1 \quad (18)$$

であることが必要であって、これから

$$\left. \begin{aligned} A_0 \cdot Q_0(i\lambda_0) - \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot W_{0k}(t) &= V_0 \\ A_n \cdot Q_n(i\lambda_0) - \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot (2n+1) \cdot W_{nk}(t) \\ &\times P_n(i\lambda_0) = 0, \quad (n=1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

さらに、この (19) 式の近似式として次式を得た。

$$A_0 \cdot Q_0(i\lambda_0) - A_0 \cdot W_{00}(t) = V_0 \quad (20)$$

(20) 式の A_0 を求めるため、まず

$$\left. \begin{aligned} z^2/b^2 + x^2/a^2 &= 1 \\ z^2/c^2\lambda_0^2 + x^2/c^2(\lambda_0^2 + 1) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

を解いて、

$$\lambda_0 = b/\sqrt{a^2 - b^2} \quad (22)$$

h を 2 つの短軸回転円体中心間の距離として

$$t = i \cdot h' / \sqrt{a^2 - b^2} \quad (23)$$

を得て、これから

$$Q_0(i\lambda_0) \doteq 1/i\lambda_0 = \sqrt{a^2 - b^2}/ib \quad (24)$$

$$W_{00}(t) \doteq 1/t = \sqrt{a^2 - b^2}/ih' \quad (25)$$

を算出し、これらを (15) 式に代入して次式を得た。

$$\therefore A_0 = V_0 / (\sqrt{a^2 - b^2}/ib - \sqrt{a^2 - b^2}/ih') \quad (26)$$

(c) 電荷および静電容量の計算

電荷および静電容量の計算に必要な準備を行う。(17) 式 ($\lambda = \lambda_0$ として) を λ について微分し、次式を得る。

$$\frac{\partial V}{\partial \lambda} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot P_n(\mu) \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda} Q_n(i\lambda) \\ - \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \cdot W_{nk}(t) \cdot P_n(\mu) \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda} P_n(i\lambda) \quad (27)$$

ここに、

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} Q(i\lambda) = 2^n (n!)^2 / (2n+1)! [- (n+1) \cdot i / (i\lambda)^{n+2} \\ - (n+1)(n+2)(n+4) / 2(2n+3) \cdot i / (i\lambda)^{n+4} - \dots] \quad (28)$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} P_n(i\lambda) = (2n)! / 2^n (n!)^2 [in(i\lambda)^{n-1} \\ - in(n-1)(n-2) / 2(2n-1) \cdot (i\lambda)^{n-3} + \dots] \quad (29)$$

である。

以上から、回転円体の表面上の電荷 Q は、つぎのように求められる。

$$Q = \oint D \lambda \cdot ds, \quad \text{ここに、} ds = 2\pi c^2 \sqrt{(\lambda^2 + 1)(\lambda^2 + \mu^2)} d\mu \\ = \oint -\epsilon/c \sqrt{\lambda^2 + 1/\lambda^2 + \mu^2} \cdot \partial V / \partial \lambda \cdot ds \quad (30) \\ = -2\pi \epsilon c (\lambda^2 + 1) \left[\sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda} Q_n(i\lambda) \right]_{-1}^{+1} P_n(\mu) d\mu \\ - \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \cdot W_{nk}(t) \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda} P_n(i\lambda) \\ \times \int_{-1}^{+1} P_n(\mu) d\mu \quad (31)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} n \neq 0 \text{ では, } \int_{-1}^{+1} P_n(\mu) d\mu &= 0 \\ n = 0 \text{ では, } \int_{-1}^{+1} P_n(\mu) d\mu &= 2 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

であるから, $n=0$ では, (31) 式は次式となる。

$$Q = -2\pi\epsilon c(\lambda_0^2 + 1) \left[A_0 \cdot \partial/\partial\lambda_0 Q_0(\lambda_0) - \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot W_{0k}(t) \cdot \partial/\partial\lambda_0 P_0(\lambda_0) \right] \times 2 \quad (33)$$

ここで, (24) 式から A_0 , (22) 式から

$$\partial/\partial\lambda_0 Q_0(i\lambda_0) = +i(a^2 - b^2)/b^2,$$

(16) 式から

$$\partial/\partial\lambda_0 P_0(i\lambda_0) \doteq 0, \quad c = \sqrt{a^2 - b^2}, \quad \lambda_0^2 + 1 = a^2/a^2 - b^2$$

を (33) 式に代入して, 次式を得た。

$$Q = 4\pi\epsilon \cdot a^2 h' / (h' - b) \cdot b \cdot V_0 \quad (34)$$

以上から 2 個の短軸回転だ円体間の静電容量 C は

$$C = Q/2V_0 = 2\pi\epsilon \cdot a^2 h' / b(h' - b) \quad (35)$$

で, 無限平板陽極と 1 個の短軸回転だ円体間の静電容量 C_0 は次式であらわされる。

$$C_0 = 2C = 4\pi\epsilon \cdot a^2 h' / b(h' - b) \quad (36)$$

(d) 無限平板陽極と短軸回転だ円体間の海水抵抗式
前項で求めた静電容量 C_0 とその間の海水抵抗 R' との関係は, 次式であらわされる。

$$R' = \epsilon\rho/C_0$$

ここに,

ϵ : 誘電率

ρ : 海水抵抗率

以上から無限平板陽極と短軸回転だ円体間の海水抵抗 R' は, 次式で求められた。

$$R' = \rho b(h' - b) / 4\pi h' a^2 \quad (\Omega) \quad (37)$$

ここに,

a : 短軸回転だ円体の長軸の 1/2 (cm)

b : " 短軸の " (")

h' : 2 個の短軸回転だ円体中心間の距離 (")

b. 無限平板陽極と無限長亜鉛陽極棒間の海水抵抗式
 $h'/2$ の間隔で半径 d , 無限長の亜鉛陽極棒を無限平板陽極に平行して設置している場合の両者間の静電容量を求め, ついで海水抵抗式を算出した。

Fig. 6 に示す亜鉛陽極棒 P と間隔 h'' にある映像 P' との間の単位長当りの静電容量 $C_0^{(4)}$ は

$$C_0' = \pi\epsilon_0 / \log(h'' - d/d) \doteq \pi\epsilon_0 / \log(h''/d) \quad (38)$$

であり, 亜鉛陽極棒 P と無限平板陽極との間の単位長当りの静電容量 C' は

$$C' = 2C_0' = 2\pi\epsilon_0 / \log(h''/d)$$

である。

以上から, 亜鉛陽極棒と無限平板陽極との間の海水抵抗 r'' は, 次式で得られた。

Fig. 6. Infinite cylindrical zinc anode and image.

Fig. 7. Relation ϕ_1 and length of zinc anode major axis ellipsoid.

$$r'' = \epsilon_0\rho/C' = \rho/2\pi \cdot \log(h''/d) \quad (39)$$

C. 亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体との間の海水抵抗式

(a) 無限長亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体間の海水抵抗式

無限長亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体との間の海水抵抗式 R_0'' は, (37) 式と (39) 式の和として求められた。

$$R_0'' = R' + r'' = \rho b(h' - b) / 4\pi h' a^2 + \rho/2\pi \log(h''/d) \quad (40)$$

(b) 有限長亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体間の海水抵抗式

亜鉛陽極棒が無限長から有限長になった場合の有限長時と無限長時の海水抵抗との比 ϕ_1 は, 無限長時と有限長時の電流線数との比であらわされ, Fig. 7 に示すとおりである。したがって, 有限長亜鉛陽極棒と短軸回転だ円体間の海水抵抗を次式で得た。

$$R'' = \phi_1 \{ \rho b(h' - b) / 4\pi h' a^2 + \rho/2\pi \log(h''/d) \} \quad (41)$$

3.3.3 電流密度分布と陽極寸法

短軸回転だ円体表面における電流密度分布中の最大電流密度 $i_{1,2}'$ および最小電流密度 $i_{11,12}'$ を次式で求めた。

$$i'_{1,2} = V - V_0/n'R''A'_{1,2} \quad (42)$$

$$i'_{11,12} = V - V_0/n'R''A'_{11,12} \quad (43)$$

ここに,

Fig. 8. Current density distribution on the minor axis ellipsoid.

V, V_0 : 亜鉛陽極棒および短軸回転だ円体の電位

R'' : " 間の海水抵抗
=(41) 式

n' : " の電流線数

$A'_{1,2}$: 亜鉛陽極棒に最も近い回転だ円体表面の最小表面積

$A'_{11,12}$: 亜鉛陽極棒に最も遠い回転だ円体表面の最大表面積

この $i'_{1,2}$ および $i'_{11,12}$ をもとにして描いた回転だ円体表面上の電流密度分布は、Fig. 8 に示すとおりである。

(1) Fig. 4 において短い亜鉛陽極棒 $L_{1,2}$ および回転だ円体表面の小面積 $A'_{1,2}$ の場合、 $L_{1,2}$ から放射した電流は $A'_{1,2}$ に流れてこの $A'_{1,2}$ 部分を防食する。しかし、この $A'_{1,2}$ 以外の回転だ円体表面は、電流が流れず防食されない。したがって、亜鉛陽極棒の長さを大きくする必要がある。

(2) 長い亜鉛陽極棒 $L_{1,12}$ および回転だ円体の全表面積 $A'_{1,12}$ の場合、 $L_{1,12}$ から放射した電流は $A'_{1,12}$ に流れてこの $A'_{1,12}$ を全般的に防食する。しかし、亜鉛陽極棒にもっとも近い $A'_{1,2}$ は最小表面積であるため、この部分の電流密度は過大となり過防食となる恐れがある。したがって、長い亜鉛陽極棒のみでは回転だ円体を十分に防食することができない。

(3) 中程度の長さの亜鉛陽極棒 $L_{1,7}$ および回転だ円体の表面積 $A'_{1,7}$ の場合、 $L_{1,7}$ から放射した電流は $A'_{1,7}$ に流れて $A'_{1,2}$ 部分を過防食することなくこの $A'_{1,7}$ を防食するが、 $A'_{7,12}$ は防食されない。したがって、回転だ円体表面積の $A'_{7,12}$ を別の亜鉛陽極棒によって防食する必要がある。

3.4 長軸および短軸方向に各 1 個の亜鉛陽極棒および棒を配置した場合

長軸方向の 1 枚の亜鉛陽極棒と短軸方向の 1 本の亜鉛陽極棒を直交して組合せた場合の、回転だ円体表面の電流分布、電流密度分布および陽極寸法を次のように推算

Fig. 9. Current distribution between two zinc anodes and ellipsoid.

Fig. 10. Current density distribution on the ellipsoid.

した。

3.4.1 回転だ円体表面上の電流分布

Fig. 9 は長軸方向の亜鉛陽極棒の面積 $S_{1,12}$ から回転だ円体表面積 $A_{1,12}$ に流れる電流分布を実線で示し、短軸方向の亜鉛陽極棒の長さ $L_{1,9}$ から同じ回転だ円体の表面積 $A'_{1,9}$ に流れる電流分布を点線で示して、これらを重ね合せたものである。

3.4.2 電流密度分布と陽極寸法

Fig. 10 は亜鉛陽極棒の面積 $S_{1,12}$ からの電流による回転だ円体表面における電流密度分布を実線で示し、亜鉛陽極棒 $L_{1,9}$ からの電流による同じ回転だ円体表面における電流密度分布を点線で示して、これらを重ね合せたものである。さらに、回転だ円体表面の防食に必要な電流密度分布に関する陽極寸法を次のようにして得た。

回転だ円体表面における実線および点線で示した各電流密度分布線は、F、C 点で交叉し、FBC 部分では実線部が大きいのでこの部分には陽極棒 F'B'C' が対応し、

FDC 部分では点線部が大きいのでこの部分には陽極棒 $F'D'C''$ が対応する。ここで、BFDC 部分における各電流密度を合成した総合電流密度は、この回転だ円体の必要とする防食電流密度より大で、この BFDC 部分を防食するが、BC 部分における総合電流密度は防食電流密度より小であって、この BC 部分を防食できない。

もし、この BC 部分の総合電流密度を防食電流密度より大にして防食するとすれば、DF 部分の電流密度は過大となって過防食となる。

以上から、この場合は回転だ円体を十分に防食できない。

3.5 長軸方向の 1 枚および短軸方向の 2 個の亜鉛陽極板と棒を組合せて配置した場合

長軸方向に直交する 1 枚の亜鉛陽極板を回転だ円体上方に装備し、さらに短軸方向に直交する 2 本の亜鉛陽極棒を回転だ円体の左右に装備した場合の回転だ円体表面の電流分布、電流密度分布および陽極寸法を次のように推算した。

3.5.1 回転だ円体表面上の電流分布

Fig. 11 は亜鉛陽極板の面積 $S_{1,12}$ から回転だ円体表面積 $A_{1,12}$ に流れる電流分布を実線で示し、左右の亜鉛陽極棒の長さ $L_{1,9}$ 、 $L'_{1,9}$ から同じ回転だ円体の表面積 $A_{1,9}$ 、 $A'_{1,9}$ に流れる電流分布を点線および一点鎖線で示して、これらを重ね合せたものである。

3.5.2 電流密度分布および陽極寸法

Fig. 12 は亜鉛陽極板 $S_{1,12}$ からの電流による回転だ円体表面における電流密度分布を実線で示し、亜鉛陽極棒 $L_{1,9}$ および $L'_{1,9}$ からの電流による同じ回転だ円体表面における電流密度分布を点線および一点鎖線で示して、これらを重ね合せたものである。これから、回転だ円体表面の防食に必要な電流密度分布に関係する陽極寸法を、次のように推算した。

回転だ円体表面における実線および点線ならびに一点

Fig. 11. Current distribution between three zinc anodes and ellipsoid.

Fig. 12. Current density distribution on the ellipsoid.

鎖線で示した各電流密度分布線は、F, B および C 点で交叉し、FB 部分では実線部が大きいのでこの部分には陽極棒 $F'B'$ が対応し、FDC 部分および BEC 部分では点線部および一点鎖線部が大きいのでこれらの部分には陽極棒 $F'D'C_1''$ と陽極棒 $B'E'C_2''$ がそれぞれ対応する。ここで、回転だ円体全表面における各電流密度を合成した総合電流密度は、これらの亜鉛板および棒の配置をてきとうに調整することにより、過防食部分を生ずることなく回転だ円体の必要とする防食電流密度より大とすることができて、この回転だ円体全表面を防食できる。

4. FRP 船に装備する亜鉛陽極の面積と配置について

以上の理論を FRP 船の実船に適用して、プロペラを防食する亜鉛陽極の面積および配置を推算した例を、次に示す。

Fig. 1 において、FRP 船のプロペラ翼の等価回転だ円体の長軸および短軸はそれぞれ 140 mm, 85 mm であって、これを防食する亜鉛陽極としては、船底に装備する亜鉛陽極が $30 \times 100 \times 200 \text{ mm} \times 2$ 枚、舵の前部板厚面および張出軸受の後部板厚面にそれぞれ装備する亜鉛陽極棒がそれぞれ $32 \times 32 \times 600 \text{ mm}$ となる。

5. 結 論

FRP 船のプロペラを、亜鉛陽極によって効率よく防食するために、電流線分布の解析をおこなった。

(1) プロペラ翼を等角写像して得た等価回転だ円体と長軸および短軸方向に装備した亜鉛陽極間の海水抵抗を理論計算し、これと両者間の電位から通過電流を算出した。

(2) これらの亜鉛陽極と回転だ円体との間の海水中

に電界描写法を適用して、回転円体表面上の電流分布および電流密度分布を求めたが、1方向の亜鉛陽極のみでは適切な防食効界がえられなかった。

(3) 長軸1方向の亜鉛陽極板を船底に、短軸1方向の亜鉛陽極棒を舵の前部板厚面に、他の短軸1方向の亜鉛陽極棒を張出軸受の後部板厚面に分割装備して、適切な防食効果がえられた。

(4) 以上から、プロペラの防食設計に対して知見が得られる。
(Received March 7, 1977)

文 献

- 1) 瓜生浩朗: 防食技術, **26**, 3 (1977).
- 2) 末武国弘: 信学誌, **35**, 574 (昭 27)
- 3) 清野 武: 電気磯気学 I, 132 オーム社 (1962).
- 4) 竹山説三: 電磁気学現象理論, 154, 丸善(昭25).