Some Investigations on the Cathodic Protection of Marine Propeller and it's Shafting

Junichi Sakuma

Prevention of (erosion) corrosion on the propeller and it's shafting was examined with a stern model and discussed the results.

In the case of running ship, protecting current to propeller (white arrow in Fig. 1) is used to be checked, and stray current (black arrow) arises in stern tube at the same time.

To prevent these troubles, several methods were ascertained. The results were as follows:

1) It is favorable for both propeller and it's shafting to make sure the connection between the intermediate shaft and bearing by the ring and brush.

2) Painting on the inner side of stern tube (especially copper alloy parts in it) would decrease the stray current mentioned above.

3) Zinc anodes attached on the boss of propeller are effective, but the effect are insufficient to the vicinity of blade tip. However, this foible is diminished by the coating on the inner half of propeller.

4) In case that cathodic protection by external anode would be used for the ship, it is favorable to connect this anode to the shafting directly, and not to the ship's hull.

1. 緒 言

船用推進軸系の腐食に関しては最近かなりの報告があり¹⁻³⁾、その防食電流回路についてはすでに常識化した感がある。一般に推進軸系を主体とした上記電流回路は、簡単な直流回路にすぎないのであるが、その間に海水または油膜を介して接触するために必ずしも簡単な理論通りにはならぬ点も存在する。

本調査ではその回路に関連した船尾模型によって実船では計測しえない電流、特に船尾管内における漏洩電流を計測し、主としてこれについて各種の防食方法の確認試験を行なったものである。

2. 船尾模型による実験

2.1 実験法と腐食電流

実船における船尾付近の構造は図1の通りであるが、これについて、船体垂鉛系と推進軸系の電流を考えると、図中の矢印のようになり、回路について簡単化すれば図2のようになっている³⁾。しかし実船においてはこれらの回路は各部で既成の接続が行なわれて（たとえば推進器と推進軸間）いるためにそれらの間を通る電流値を確認することが困難である。そこで、図3に示すような船尾の模型を作り、船体、垂鉛、推進器、推進器軸、船尾管内部品（ランタンリング）等は別個に電気的に離れた状態に組立を行なった。

図1 推進軸々系の電流回路

図2 船体、推進軸系間の電流回路略図

実船においてはランタンリングのほかリグナムバイタ止金、グラウンド抑えなどがあるが、本模型では簡単に

* 石川島播磨重工業（株）（兵庫県相生市 5292）

① 亜鉛用端子 ② 船体用端子 ③ 船尾管内ブッシュ用端子 ④ 推進器用端子 ⑤ 推進器軸用端子 ⑥ 水槽(木製) ⑦ 船体(軟鋼板) ⑧ 推進器(黄銅) ⑨ 保護亜鉛 ⑩ 推進器軸間絶縁(アクリライト) ⑪ 推進器軸(黄銅) ⑫ リグナムバイト軸受 ⑬ 船尾管 ⑭ 船尾管内ブッシュ(ランタンリング相当)(黄銅) ⑮ 同上ブッシュ用絶縁(アクリライト) ⑯ 水密パッキング ⑰ スリッピング絶縁(アクリライト) ⑱ 推進器用スリッピング ⑲ 推進器軸用スリッピング ⑳ 絶縁(ベークライト) ㉑ 駆動用プーリー

図3 推進軸系の防食実験用模型装置

するためグランド抑えは絶縁物を使用し、銅合金部はランタンリングのみとしてある。これらの部品は外部で接続して各部の電流は回路中に低抵抗を挿入することによって、計測できるようにした。

さて図3の装置において、 R (船内軸受面における船体と軸系間抵抗に相当) を変化させた場合の推進器電位 E_p 、船体電位 E_H および、推進器軸表面から流出する電流 I_T の変化は、図4のようになる。すなわち、 R が増すにしたがって、推進器の電位と船体の電位はそれぞれ固有の電位に近づく。それと同時にその間の電位差 $E_p - E_T$ はそのまま電圧となって船尾管内にかかり、電流 I_T が大きくなることが確認できる。この電流値と R の関係については次式のように考える³⁾。

図4 船体軸系間の抵抗(R)と船尾管内漏洩電流の関係およびランタンリング内面塗装による効果

$$I_T = E_0 / [(r_1 + K/A_p) + (r_2 + 2K/A_T)]$$

$$+ (r_2 + 2K/A_T)(r_1 + K/A_p)/R] \dots\dots\dots (1)$$

I_T : 推進器軸面より流出する電流

E_0 : 電流の流れていない状態における亜鉛—推進器間電圧

r_1, r_2 : 亜鉛—推進器間、推進器軸—ランタンリング間の海水抵抗

K : 係数, $K = -E/i$, i は流入する電流密度, E は過電圧

A_p, A_T : 推進器, 推進器軸の面積, ただし A_T は図3におけるランタンリングの内面積 A_S の向い合った部分の面積。すなわち, $A_T = A_S$ とする。

図5 防食亜鉛の陽分極特性

(1) 式を図示すれば図4の点線のようにになる。上の式では、亜鉛電位を $-1,000$ mV で一定と考えたが、これは最近の陽極亜鉛の性質が、図5のように浸漬後の時間が長い場合も分極が少なく、 $-950 \sim -1,000$ mV 付近からは特に良好な性質を示すと思われたので簡単にするためこのようにした。亜鉛の面積が特に小さい場合にはこの誤差が大きくなることは当然と考える。図中には R の低い場合に I_T が負になることすなわち軸に電流が流入する現象が示されている。これは本試験装置においては、軸全面に出入する電流を計測したために、 R が減少すると、亜鉛から推進器軸端の海中に露出した部に流入する電流が計測値に入るためと考える。したがって実船においてもこの電流(露出部に対する防食電流)はあるわけであるが、軸受の奥までは到達し難いことについては後述する。

航行中にこの R に相当する抵抗が発生すると、推進器に対して電流が流れにくくなることは周知のとおりである^{1,2)}。この場合に R を小さくする目的で、推進器軸をブラシ結合によって船体と連結させることが行なわれているが²⁾、この模型について考えると、それは図4の R を減少させることに相当するから I_T が減少している。

すなわちこの方式は、推進器軸面の漏洩電流を減少させる意味においても望ましい方法であることが確認できた。

2.2 船尾管内面の塗装による防食法

次に上記の I_T すなわち船尾管内における漏洩電流を防止する方法としては (1) 式において、 K/A_T の項を大きくとる方法も考えられる。すなわちこの項は、船尾管内におけるランタンリング（ただし実船の場合はリグナムパイタ止金、グラント抑え等もはいる）内面と、それに向き合った推進器軸面の分極を大きくすることである。そのためにはランタンリング面の分極の係数 K の値を大きくすることがよいであろう。そこでリング内面に塗装を行なって、2.1 の試験と同様 R を変化させてみると、図4の下の実線のようになることがわかる。この線では I_T がほとんど負の値をとっているから船尾管内では漏洩電流を生じていないはずであり、消極的ではあるが、推進器軸面の防食法として簡単でよい方法であるように考える。しかしこの方法は推進器に対しては何んら効果が期待できない。

2.3 外部電源による防食法

最近外部電源による防食法が研究され、一部では実施されつつあるが、従来この種の方法では船体に直接電流が流されていた。しかし特に船尾の腐食に関しては、推進器電位が船体電位より貴電位にあることも主要な原因となっているので、この外部電源も船体に接続するよりはむしろ推進軸系に接続し直接推進器に電流を流してこれを船体電位に近づけることもまた船体の防食になるはずであるということが考えられている。この点は図3か

ら考えれば当然有効であると思われるので、2.1 に述べた模型について実験を行なってみた。回路は図6のように考えておけばよい。試験結果は図6のようになる。図で $E_H = E_p$ になると、船尾管内の漏洩電流 I_T を生じる起電力がなくなることになるので当然 $I_T = 0$ になるはずであるが、これは前述のように外部陽極から直接軸に入る電流もあるので、同図実線のようにかなり外部電流の小さい状態から I_T は負になる。

今船内における船体・推進軸系間が完全絶縁状態と考えると、 $R = \infty$ であるから (1) 式において、 R の入った項を除いて考える。海水中における亜鉛推進器間電圧 E_0 は (1) 式においては一定と考えたが、今の場合

$$E_p = E_0 - KI_M/A_p \dots\dots\dots (2)$$

E_p : 外部電源を使用した場合の亜鉛・推進器間電圧

I_M : 外部電源からの電流

他は (1) 式の場合と同一

この式の E_p を (1) 式の E_0 の代わりに入れて、かつ上述のように R の入った項を除くと次のようになる。

$$I_T = (E_0 - KI_M/A_p) / [(r_1 - K/A_p) + (r_2 + 2K/A_r)] \dots\dots\dots (3)$$

$K = 0.2 \Omega \cdot m^2$, $E_0 = 0.6 V$ として (3) 式を図示すると点線のようになる。また、外部陽極が船体・推進軸系の両方に接続されている場合（これは $R = 0$ の場合に外部陽極を船体に接続したことに相当するが）には、船体・推進器の電位および電流状況は図7のようになる。この場合にも電位差の大きい推進器のみに一方的に入るものでなく、船体、推進器の両者に大体均等に流れるようである。ただその両者では面積が異なるので、電流密度にすれば推進器の方が大きい値になる。

図6 曳航陽極を推進器軸に接続した場合における外部電流と軸面腐食電流の関係

図7 外部電源による船体、推進器の防食（船体、推進器が完全に導通している場合）

3. 推進器ボスまたは船尾の亜鉛による推進器軸面の防食効果

2.1 で述べたように推進器軸の末端の推進器に近い部分は海水中に露出しているの、船尾の亜鉛または、推進器ボスに亜鉛を取り付けた場合などにはこれから軸面に防食電流が流れることは当然考えられるわけであるが、これらがどの程度船尾管の内部に入るかという点について検討を行なってみた。この電流分布について知るために、図8のように考える。間隙は非常に小さいから、間

図8 推進器ボスまたは船尾の亜鉛による推進器軸面の防食電流密度分布

隙の各断面における電流密度は、 x 方向に一次的に変化すると、 Δx 間における電流値について考える。今、紙面に垂直方向は単位長さをとる。また、 Δx 間の液中の電位差 $\Delta\phi$ と、軸表面の電位差 ΔE は等しいと考えると、

$$\rho I_x \Delta x / h = -\Delta\phi = \Delta E \dots (4)$$

ρ : 海水の比抵抗

したがって

$$dE_x / dx = \rho I_x / h \dots (5)$$

今簡単に電流密度過電圧関係を直線的とすると、

$$E_x = -k(dI_x / dx) \quad k: \text{定数} \dots (6)$$

これを(5)式に入れて、

$$d^2 I_x / dx^2 - (\rho / kh) I_x = 0 \dots (7)$$

$x=0$ において $I_x = I_0$, $x=\infty$ において, $I_x = 0$ を考慮すると、

$$I_x = I_0 \exp(-\sqrt{\rho / kh} x) \dots (8)$$

軸表面の x 点における電流密度 i_x は

$$\begin{aligned} i_x &= -dI_x / dx = I_0 \sqrt{\rho / kh} \exp(-\sqrt{\rho / kh} x) \\ &= i_0 \exp(-\sqrt{\rho / kh} x) \dots (9) \end{aligned}$$

ただし、 i_0 は $x=0$ における軸面の電流密度で

$$i_0 = I_0 \sqrt{\rho / kh}$$

すなわち、軸面の電流密度の分布は(9)式で示されるように、船尾管内部に入るにしがって減少する。今、 $k=0.2 \Omega \cdot \text{m}^2$ で一定としたとき、軸面間隙、すなわち h の値を変化させた場合の電流分布を画いてみると、図9(下図)の実線のようになる。

i_0 : 推進器軸末端部の電流密度 h : 軸受間隙
 i_x : 末端から x の距離における電流密度
 E_{end} : 軸受末端部における軸面電位
 i_L : 流動海水中的の青銅の限界電流密度

図9 推進器軸末端付近の電流密度分布

次に、軸面の一部が限界電流密度になっている場合は、その部分における電流密度は i_L で一定であるから、 $x=x_L$ なる点まで限界電流密度になっているとすれば、その点から奥は、

$$i_x = i_L \exp[-\sqrt{\rho/kh}(x-x_L)] \dots\dots\dots (10)$$

となり、図8下図に示すような電流分布になると考えられる。図10に示す実験装置によって行なった試験結果を図9に示す。この下の図は限界電流密度に達していない場合、上の図が一部限界電流密度に達した場合を示す。

図10 推進器末端部における電流分布計測実験要領

いずれの場合も h の値が大きくなるほど電流分布が奥まで達する傾向を知ることができる。

4. 推進器ボスに亜鉛を取り付ける方法の検討

前述のように推進軸系が船体から電気的に遊離した場合の対策として、推進器に直接亜鉛を取り付けることが考えられる¹⁾。これによって、推進器には直接その亜鉛から防食電流が流れるばかりでなく、推進器自体を卑電位に保つから、船体との電位差が少なくなり、船体および推進器軸に対しても効果が期待できるであろう。しかしこの方法の主要なねらいは、推進器そのものの防食であり、なかんずく翼端のエロージョン・コロージョンの防止が重要であるから、ボス部にある亜鉛から翼端に対して十分な電流が流れているかという点では検討の要があると考えられる。実船の運転中においてこのような計測は今のところ困難と思われたので、計算による略算値および実験装置によって検討を行なった。

計算法としては、実船のままの推進器では形状が複雑で厳密な方法は困難と思われたので、図12のように全体を1枚の円盤と仮定し、かつその中央断面をとって、二次元的に考え、分極の影響も無視して行なった。

計算法は等角写像法^{4,5)}によるものであるが、本文の目的を離れるので省略し、結果のみを示すと、

$$j_{v=0} = [2a_2(a_3^2 - a_2^2)^{1/2} \phi_0 / \rho \pi] (x^2 - a_2^2)^{-1} (a_3^2 - x^2)^{-1/2} \dots\dots\dots (11)$$

$j_{v=0}$: 推進器表面における電流密度

ϕ_0 : 亜鉛と推進器面の平均電位差

ρ : 海水の比抵抗

π : 円周率

その他は図9参照。

この式において、 $\pi_0 = 0.5$ V, $\rho = 25 \Omega \cdot \text{cm}$ として計算した結果は図11のようになる。この図において大型船の推進器の翼端付近の電流密度は非常に悪くなる（先端で計算上は上がるが、実際はこれほど上がらない）。したがって、この電流分布を先端によくするために、推進器面中央付近に絶縁塗装をした場合（ただし亜鉛面は塗装しない）について、考えてみることにする。

図11 推進器ボスに取り付けた陽極による電流密度分布

前と同様

円盤と考

えて、そ

の中央

断面を

とると

図12

のよう

になる

。この

図で

a_2-b

間は

絶縁塗

装に相

当する

部分

であ

る。こ

れに

つい

て、前

同様

等角写

像を適

図12 推進器円盤上の陽極部近傍を絶縁塗装した場合

像を適用して解くと前の場合に比べて途中の計算法に困難な点が生じるが、最終的に、

$$j_{v=0} = [2b(a_3^2 - b^2)^{1/2} \phi_0 / \pi \rho] (x^2 - a_2^2)^{-1/2} (x^2 - b^2)^{-1/2} (a_3^2 - x^2)^{-1/2} \dots\dots (12)$$

符号説明は図12参照

この式について計算した結果は図13の点線のようになる。図中の実線で示すものは図14のような実験装置

図 13 円盤陰極の中央にある陽極による防食電流密度分布の概算値(点線)と実験値(実線)

図 14 円盤中央の陽極による電流密度分布実験装置略図

問題は各船個々の場合についてかなり様相の異なった場合もあり、この点十分注意する必要があると考えるが、事故の発生をみた場合、まず以上のような軸系回路によってみて、次いで特異な要素を折込んで考慮し、防食方法をこうざることがこの種の問題の手順ではないかと考える。

6. 質疑応答

問 模型実験においては船尾管内面に絶縁塗装がして

あるのか。

答 塗装を全く行っていない状態で漏洩電流の生じることを確認し、次にランタンリングに相当する部分の内面のみに、絶縁塗装を行なって実験した。

問 推進器ボスの亜鉛による電流密度の実験では回転数または、海水の流動の模様によって、電流分布がかわるのではないか。

答 250 rpm で回転させたが(ただし、図 15 の装置は模型円盤を固定し周囲の水を動かしている)当然流動状況がひどく異なる場合には電流密度分布は変わってくる。しかし、マンガン黄銅の場合は、20時間も流動海水中に浸漬すると、流動状況による差は少なくなる。

問 軸系に流れる防食電流、漏洩電流等は、電極になっている各部品の表面状況の変化、特に酸化膜の影響などで変化するのではないか。

答 電極表面の状況の変化により当然電流値にも影響があると思われるが、本文中の(1)式、(3)式等における分極の係数 K の値を変えることによりそれは加味されることになる。

問 図 3 の装置において推進器と軸の間に入っているアクリライト絶縁物の構造について。

答 構造はアクリライトの内、外径にネジを切ってはめこんである。これにより推進器および軸系間を絶縁して両者を外部で接続し、その間の電流を計測しうるようにしてある。

問 アルミ青銅のキャピテーション海水中における耐食性について。

答 流動海水(ただし 20 m/sec まで試験)中ではほとんど腐食されないが、キャピテーション中ではたとえその機械的強度が弱い場合でも孔食を発生した。しかしその損傷量はマンガン黄銅に比べてわずかであり、また、低い電流密度(0.1 A/m² 程度)において防食が達成されるようである。

(昭和 36 年 4 月 10 日受理)

文 献

- 1) 賀田秀夫, 宮島時三: “碇泊中および航行中の船体電位と推進軸系電位”, 防蝕技術, 8, No. 5, 195 (1959)
- 2) 賀田秀夫, 宮島時三, 森田 豊: “推進軸系の電気防食に関する模型実験”, 防蝕技術, 8, No. 4, 150 (1959)
- 3) 筆者: “船用推進軸系の腐食現象に関する流電回路の考察”, 造船協会論文集, 107 号, 217 (1960)
- 4) J. T. Waber: Mathematical Studies on Galvanic Corrosion, I, Coplanar Electrodes with Negligible Polarization”, *J. Electrochem. Soc.*, 101, No. 6, 271 (1954)
- 5) 筆者: “推進器ボスに取り付けた陽極による防食電流密度分布の概算” 石川島播磨重工業技報 (1961) Feb.