(昭和 35 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

船用推進軸系の腐食現象に関する 流電回路の考察

正員 佐 熊 純 一*

On the stray current circuit related
to the corrosion of marine propeller and its shaft sleeve

By Junichi Sakuma, *Member*

Abstract

There are several reports on the erosion or corrosion of the propeller and its shafting. But we have as yet very little information on the stray current of them.

Recently, it have been shown that usually there exists the electric resistance (R) between hull and shafting on a running ship. This resistance appeared on all bearing surfaces of propeller shafting and engine. In this case, it may be assumed that the potential difference between the Zn anodes and propeller enforces to flow the stray current from sleeve surface to sterntube.

The present experiments were designed to secure the following two points.

- (1) Possibility of stray current above mentioned. In this experimental circuit, when the outer resistance (equivalent to R) increase and exceed some value, the stray current start up on the surface of the brass specimen (equivalent to shaft sleeve).
- (2) Suitability of the usual Zn anode protection.

As noted above, when the shafting become independent of the hull at running period, then the Zn anode on the hull a slight protecting effect on the propeller. If this anode should be attached to the front of the propeller boss, the effect is better than that, but is not sufficient.

The best method is to have good connection between main shaft and bearing with the pertinent ring and brush.

1. 緒 言

近年船舶の大型化並びに大馬力化に伴って、推進器翼、推進軸被金等の腐食が益々重要視されるようになってい。従来からこの種の腐食または潰食に対しては、水力学、材料、電気化学の各方面から研究が行なわれているが、特に推進軸被金面の腐食および磨耗については、納得できない点があり、他部からの流電回路を検討する必要があるのではないかと考える。この船体、推進軸系を通る迷走電流に関しては、現在まで余り研究が行なわれていないように思われるので、今回は主として船体後部に取付けられた保護亜鉛によつて生ずる流電回路について追求し、近時云われているごとく、航行時に船体軸間に電気抵抗が生じた場合に、その電流がいかに影響をおよぼし得るかという点に関して試験を行ない、それによつて実船の場合に起り得る腐食および防止法の考察を行なつた。

2. 船体軸系間に発生する電気抵抗

最近、航行中の船体と推進軸系間に電気抵抗を生ずることが明かになり、このことは本報告の流電回路に重要な関係を有するので、初めにふれることにする。推進軸系および主機関回転中は、各回転部は軸受との間に油膜を生じているはずであり、その間は絶縁状態になつてい。るはずである。また逆にその間に電氣的導通のあること

原稿受付 昭和 35 年 1 月 9 日

* 播磨造船所研究部

は、軸受面に、金属接触即ち焼付の発生するおそれがあるのではないかと云う疑問が生ずる。この点について、潤滑理論の方からは次のようなことが云える。周知のごとく、軸受の潤滑状態は大別して、粘性潤滑および境膜潤滑に分れるが、境膜潤滑状態になっている部分においては、膜厚が普通 $30 \text{ \AA}$ 以下になることが報告されている²⁾³⁾。一方この種の接触面における電流の通過については、量子力学的トンネル効果と称される漏洩現象が認められているため数 $\text{\AA}$ の絶縁膜ならば大した抵抗なくして導通が行なわれることが云われている⁴⁾。したがつ

第1図 実船 (28,000D, W, T.) における船体、軸系間電圧及び船体、推進器電位 (航行中)

て回転中の軸受面に金属接触がない場合も、一部に境膜潤滑状態が発生しておれば、導通があり得ることになる。この境膜潤滑は、軸または軸受面に部分的凹凸面があれば荷重が集中することによって発生し易いから、軸および軸受が新しい間は導通状態になり易く、これがときを経て軸受面がならされると粘性潤滑になり絶縁がおこり易いはずである。

これら両潤滑状態の領域と軸の運転状態の関係について調べると、 $\eta N/P$ (η は粘度, N は回転数, P は荷重) が、ある値より大きい場合に粘性潤滑、ある値より下ると境膜潤滑の領域に入るとされているから⁵⁾、回転数が上り、また軸受荷重が下る程、粘性潤滑状態になることが判り、したがって軸受部で絶縁状態が起り易い。この N に関する点は実船の計測結果からも傾向として見受けられる。

第1図は船体・軸系間の抵抗状態を知るために行なつた計測結果の一例である。同様の計測を行なつた結果は第1表に一括して表わしてあ

第1表 船体・推進軸間絶縁状況計測結果

船名	要 目			完成および計測月日		計 測 結 果			
	船種* D. W. T.	主機**	推 進 器	完成年月	計測年月	推進器電位 (最 高) mVs. c. e	船体電位 mVs. c. e	船体軸間 電圧(最高) mV	判 定
A	T. 28,245	T. 12,500	4翼 6,700	1953, 7	1959, 2	-319	-620	305	絶 縁
B	T. 47,248	T. 15,840	5翼 6,750	1958, 11	1959, 4	-652	-670	18	絶 縁
C	T. 38,889	T. 19,250	5翼 7,000	1959, 8	1959, 5	-570	-775	200	絶 縁
D	T. 11,226	D. 3,500	4翼 4,000	1959, 9	1959, 9	-480	-720	240	絶 縁
E	C. 10,477	D. 5,500	4翼 —	1952, 11	1959, 10	-575	-605	25	絶 縁
F	C. 13,500	D. 5,000	4翼 4,900	1959, 10	1959, 10	—	—	15	絶 縁
G	G. T. Tag 180	D. 750×2	3翼双2,100	1958, 5	1959, 12	-275	-642	360	絶 縁
H	G. T. Tag 192	R. 400×2	3翼双 —	—	1959, 12	-580	-678	100	絶縁傾向
I	C. 560	D. 375	3翼 1,560	1959, 12	1959, 12	—	—	290	絶 縁
J	L. P. 650	D. 630	3翼 1,700	1959, 12	1959, 12	—	—	280	絶 縁

* T: Tanker, C: Cargo, Tag: Tagboat, LP: LPG Tanker

** T: Turbine, D: Diesel, R: Reciprocating steam engine

*** 完全絶縁時以外は船体電位の影響を含む。電位は S. C. E 基準。

る。この計測に当つては、直接、船体・軸系間の電気抵抗を計測しようとしても、海水中で両者が導通しているため計測が不可能である。したがって第2図に示すように中間軸と軸受 (船体と直結) の間に発生する電圧を計測する⁶⁾。このようにすると、その間の抵抗が増加した場合、軸系は船体から電氣的に遊離状態になる傾向を示すから、海水中にある推進器および軸被金等の銅合金は自然電位に近づき、船体亜鉛系の電位との間の電位差が、計測点で電圧となつて読まれ、間接的に船体・軸系間の抵抗の生じたことが判る。この電圧が船体・軸系の電位差に由来するものであることを確認するために第2図(a)のようにして標準電極を曳航して各個別に電位を計測した結果を第1表中に示してある。この電位差をとつて見ると、同表船体・軸間電圧 (船内、中間軸・軸受間で計測) と等しいことが示される。

第2図 船体・軸系間電圧および推進器電位計測要領

3. 保護亜鉛によつて生ずる船体軸系間の流電回路

3.1 実船における流電回路

第3図は 28,000 D. W. T. 級油槽船の船尾構造であるが、同部の外板および艀に取付けられている保護亜鉛からは船体外板に流電が行われていると同時に、推進器に対しても流電されている。今、後者の回路について考えると、同図白矢印のごときものが考えられる。その中、推進軸被金面から船尾管内側の特に銅合金部品との間に流れていると思われる電流については、従来関心が払われていないが、前述のように船体・軸系間に抵抗が生じた場合は、当然考慮されるべきものと考えられ、軸被金面の腐食および磨耗に対して重要な関係があるように思う。

これ等の回路を考えるに当つて、先づ各抵抗の概略値について考えて見よう。軸受部における抵抗 (R) は前述のごとく、運転状態によつて変化する値であるから、その値は変数として考える。

保護亜鉛と推進器間の海水抵抗 (r_1) は、その実際の配置は第3図に示すごときもので、精密な計算はできないので、概算法として第4図のごとく、推進器をそれと同一表面積の円板で置き換え、また推進器とはば一定の距離を保つて配置されている周囲の亜鉛は、その全表面積に等しい一つの亜鉛円板と考え、これを同図のごとく推進器円板と同心に一定距離を距てて配置し、この間の海水抵抗を同図点影部の抵抗として計算すると

$$r_1 = \frac{1}{2} \int_{l_1}^{l_2} \frac{\rho}{\pi (Dl/2l_2)^2} dl = \frac{2\rho l_2^2}{\pi D^2} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right)$$

(式中の各文字は第4図参照)、この式で同図の r_1 を求めると

$$r_1 = 1.2 \times 10^{-1} \Omega \quad (\text{海水比抵抗 } \rho = 25 \Omega \text{cm とする。})$$

つぎに亜鉛と推進軸被金間の海水抵抗 (r_3) は、推進器ボスに近い被金面に対しては小さいが、よく腐食するのは船尾管内に $2d$ (d : 推進器外径) 程度から奥であるから、それより奥までの海水抵抗を計算すると、上記の船の場合、軸受間隙の面積 $7 \times 10^{-3} \text{m}^2$ として、 $r_3 \approx 70 \Omega$ 、この部から更に奥のグランドパッキング附近もよく腐食および磨

第3図 船体亜鉛系・推進軸系間の流電回路

第4図 亜鉛—プロペラ間抵抗概算用略図

耗を生じ易いことはよく知られているが、この附近になると、 100Ω 以上になる。つぎに軸被金面と船尾管内の金属面、特に船尾管内に取付けられている銅合金部品（リグナムパイタ止金、パッキング嵌輪等）との間にある海水抵抗（ r_2 ）は、この場合も船尾管に $2d$ 入った所から奥を対称にすると、 $3.6 \times 10^{-8}\Omega$ 程度になる。すなわち亜鉛・推進器間および推進軸被金と船尾管の抵抗は非常に低いものである。ただし後者の抵抗については、その接水面積が小さいため分極が大きく、抵抗値の示す程電流は流れない。

3.2 模型回路における実験

上記の実船における回路を簡略にして、第5図(a)のごとき等価回路で表わてし見ると、この回路では亜鉛と各電極は同一海水槽にある海水抵抗（ r_3 ）を距てて浸漬されており、それ等の電極はまた電流密度によつて分極

第5図 船体・推進軸系間の等価回路

のと考えて、 P, T, S の分極のみを考慮する。この黄銅板の分極曲線は第6図のようになり、直線関係として取扱うと*

$$\Delta E_P = -K i_P / A_P, \quad \Delta E_T = +K i_T / A_T, \quad \Delta E_S = -K i_S / A_S = -K i_T / A_T \quad (2)$$

A_P, A_T, A_S ; 黄銅板 P, T, S の面積、ただし $A_T = A_S$
 K ; 分極線の傾斜 dE/di_D , i_D は電流密度

(2) 式を (1) に入れると

$$\left. \begin{aligned} R \cdot i_R + (r_1 + K/A_P) \cdot i_P &= E_0 \\ (r_1 + K/A_P) \cdot i_P + (r_2 + 2K/A_T) \cdot i_T &= E_0 \\ i_R - i_P + i_T &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3) 式から i_P, i_T を求めると

* 正確には電流密度の対数値と直線関係または第6図のごとき折線とする。

電位を示すものである。したがつて第5図(a)は回路 I, II, III, IV 等を含んでいる。この回路において、 R (船体・軸系間抵抗に相当) と i_P (推進器に流れる防食電流に相当), i_T (軸被金より出る腐食電流に相当) の関係を調べるため先ず第5図(a)で r_3 (亜鉛と軸被金または船尾管内面間の抵抗に相当) が大きく、 $Zn-T$, $Zn-S$ 間に電流はほとんど流れないものと考え、電圧、電流関係式は

$$\left. \begin{aligned} R i_R + r_1 i_P &= E_P - E_{Zn} = E_0 + \Delta E_P \\ r_1 i_P + r_2 i_T &= (E_P - E_{Zn}) - (E_T - E_S) \\ &= E_0 + \Delta E_P - \Delta E_T + \Delta E_S \\ i_R &= i_P - i_T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

E_P, E_T, E_S ; 黄銅板 P, T, S の電位、ただし E_{Zn}

(亜鉛電位) 基準

$\Delta E_P, \Delta E_T, \Delta E_S$; P, T, S の過電圧

E_0 ; 黄銅板の自然電位、ただし E_{Zn} (亜鉛電位)

基準

ただし分極に対する取扱いを簡単にするため、本装置においては亜鉛面積を比較的大きくとしてあり、各極との起電力を考える場合、亜鉛はほとんど分極せぬも

第6図 黄銅板の分極曲線 (自然海水中、攪拌)

$$i_P = \frac{E_0}{\left(\frac{r_1 + K/A_P}{r_2 + 2K/A_T} + 1 \right) R + r_1 + K/A_P} \quad (4)$$

$$i_T = \frac{E_0}{(r_1 + K/A_P) + (r_2 + 2K/A_T) + \frac{(r_2 + 2K/A_T)(r_1 + K/A_P)}{R}} \quad (5)$$

すなわち R が増すにつれて推進器の防食電流に相当する i_P が (4) 式のごとく減少し、反対に推進軸被金面より流出する腐食電流に相当する i_T は (5) 式の如く増大することが判る。また、第 5 図の T, S の分極の影響を示す K/A_T (K は正なることに注意) について見ると、その値が増すことは i_T の減少に有効であることが (5) 式より判る。したがって、実船の場合、推進軸被金面の塗装はできないが、船尾管内の特に銅合金部品面に絶縁塗装を行なつて、その K/A_T を大きくしておくことは被金の防食上有効であろう。

つぎに、第 5 図(a) と同一の回路をもつた実験装置によつて、 R を変化させた場合の i_T の値を計測してみると、第 7 図のごとくなる。ただしこの場合の r_1, r_2, r_3 の値は図中に示す。これによると、前述の r_3 の非常に大きい場合、すなわち $r_3 = 1030 \Omega$ の曲線においては (5) 式で示したとほぼ同様になるが、 r_3 が減少した場合、例えば 295Ω の場合についてみると、 R がある値までは $-i_T$ が流れている。この原因は第 5 図回路Ⅳの i_{T2} によるもので、 r_3 が減少し、 R が低い場合にはこの回路および回路Ⅲを考慮する必要がある。

 第 7 図 模型回路における $R-i_T, R-E_T$ の関係

4. 防食対策の検討

4.1 防 蝕 方 法

以上の試験の結果、亜鉛から推進器に防食電流を有効に流し、更にこの電流が推進軸被金面から流出することを防止するためには先ず R をできる限り小さくすることが最も重要であり、且、適切な対策である。しかし亜鉛と推進器間の起電力は 0.8 V 程度が限度であるから、これによつて $5 \sim 10 \text{ Amp.}$ (大型船の場合) を流電するためには、推進器と軸受間の接触を 0.1Ω 以下に常時保持する必要がある。その点多少問題がある。したがって現在は、航行中の推進器に確実に流電が行なわれるように、推進器ボスの前面に直接亜鉛を取付けることを実施している。このようにすると、推進器へ流電が行なわれると同時に、推進器の分極によつて船体にある亜鉛陽極との間の電圧を減少させる傾向になるから、推進軸被金面からの電流 i_T に対しても悪影響はない。

4.2 推進器ボスに取付けた亜鉛による電流分布の検討

この亜鉛の目的は前述のように、軸系が遊離傾向をもつたときにおいても、これで推進器に流電を行なうものであるが、その流電の対象は、主として翼端の海水流動状況の激しい部分にあるから、この部にある程度の電流密度で流電が行なわれないと有効でない。この電流分布について、第 8 図のごとき模型実験を行なつた結果を第 9, 10 図に示す。第 9 図において、円板が静止している場合はその分極が大きいため微小電流が全面一様に分布し、電位は全面ほぼ一定である。しかし回転中においては電流、電位の分布が中心に片寄り周辺部は可なり小さくなる。つぎに実体の大きさを模型の m 倍とすると、両者における海水抵抗の影響に相似性をもたせるため、今模型の海水の比抵抗を m 倍にしておく必要がある。この場合の電位分布の状態は第 10 図の $m=30$ における結果を見ると、前述の $m=1$ の場合 (同図点線で示す) に比べて周辺の分極状態が非常に少ないことが判る。実船においては推進器の周辺における流動状況は本実験よりは更に悪いから、第 10 図の結果より悪くなることも考えられるが、一方中心から $2/3$ 半径附近までの推進器面は、一例を示すと $\text{CaCO}_3 75\%$, $\text{Mg}(\text{OH})_2 9\%$ のとき

第8図 回転円板による電流、電位分布試験要領

第10図 中心に亜鉛と取付けた銅合金円板の電位分布 (海水の比抵抗を増した場合)

第9図 中心に亜鉛を取付けた回転円板(黄銅)上の電位及び電流、分布(自然海水中)

被膜でおおわれており、これらが流電に対して抵抗を示すから、したがって、周辺に対する電流分布を良好にする効果がある。

5. 結 言

以上を要約すれば、航行中に船体と推進軸系間に電気的抵抗が発生し、軸系が船体から遊離する傾向を示すになると、推進器に対する主要な流電回路が絶たれるのみでなく、船体亜鉛系と推進器間の電圧が推進軸被金と船尾管内面の間にかかり、その部の海水を通じて生ずる漏洩電流が被金面の腐食を促進するおそれがある。この対策としては、船体・軸系間をなんらかの方法で十分電気的に接触させておくことが必要であるが、船尾管内の銅合金面(リグナムパイタ止金、グランドパッキング嵌輪、第3図参照)を絶縁塗装することも有効であろう。

また軸系の遊離状態時における推進器防食等のため、推進器ボス前面に直接亜鉛を取付ける方法は、翼先端部

に対する電流分布が悪いので、やはり船体・軸系間の導通によって、推進器周辺の船尾部に配置されている亜鉛から流電させる方法が必要である。

終りにのぞみ、本報告中の船体・軸系間の絶縁事項に関しては、商船大学、賀田教授の御研究より示唆を受ける所が多かつたことに対し感謝致す次第である。

参 考 文 献

- (1) 賀田秀夫・宮嶋時三；防食技術，Vol.8，No.5，193，(1959)，May.
- (2) W. Claypoole；Trans. A.S.M.E.，61，321，(1931).
- (3) 伊勢村；Bull. Chem. Soc. Japan，15，467，(1940).
- (4) 電気化学便覧；電気化学協会編，217.
- (5) D.P. Barnard，H.H. Myers，H.P. Forrest；Ind Eng. Chem.，16，347，(1924).
- (6) (1)と同じ文献。
- (7) James，T. Waber；Corrosion，Vol.13，No.2，95t，(1957) Feb.