海水潤滑ゴム軸受における軸スリーブ損傷の研究 - 第2報*

吉 川 文 隆**
矢 野 昭 彦****

内 田 幸 宏***
川 添 強*****

藤 田 健 二***
佐 田 裕 之*****

Study on Damage of Propeller Shaft Sleeve for Seawater Lubricated Rubber Bearing-2nd Report

By Fumitaka Kikkawa, Yukihiro Uchida, Kenji Fujita, Akihiko Yano, Tsuyoshi Kawazoe, Hiroyuki Sada

Abstract

The previous report described the corrosive wear on propeller shaft sleeves, made of bronze, in seawater-lubricated stern tube bearings. Accompanying is the occurrence of craters on the sleeve surface due to the action of erosion corrosion. As a countermeasure, based on the mechanism, this second report will provide the development of a cathodic protection bearing, what prevents corrosion of the sleeve surface and reduces wear. Using anodes installed in some of the water channel grooves of the rubber bearings, this method is characterized by intermittent protection at best, and protection conditions were investigated by means of fundamental testing and using bearings of 140mm in diameter. As a result, a current density of 8A/m^2 was found to protect the sleeve from corrosive wear. Cathodically protected bearings were also applied to bearings of 500mm in diameter and equipped for a ferry vessel. The results are presented here in terms of bearing design, trial running, and successful reduction of wear during actual in-service use.

1. はじめに

フェリーの海水潤滑のプロペラ軸軸受において、青銅製プロペラ軸スリーブの摩耗が速く、かつスリーブ表面にクレーターが発生する問題に対し、第1報⁽¹⁾では、実船スリーブの調査と6m/sのすべり条件下（実船相当）における腐食摩耗の基礎試験について述べた。結論として、スリーブ摩耗の主因は腐食摩耗であること、クレーターはエロージョンコロージョンの作用で発生することを明らかにした。

第2報では、メカニズムに基づく対策として、すべり軸受に世界で初めてカソード防食を適用し、スリーブの腐食を抑制して摩耗を低減する方法を開発したので報告する。プロペラのカソード防食は一般的手法であり、吉井ら⁽²⁾による設計法が知られている。また井

谷⁽³⁾は、エロージョンコロージョンを防止するため舵板の前縁部に対するカソード防食を検討している。すべり面に対する電気化学的手法の適用については、Zhuら⁽⁴⁾、川添ら⁽⁵⁾の基礎試験があるが、海水潤滑すべり軸受へのカソード防食の適用は著者らの試みが初めてである。

具体的には、軸径 $\phi 140\text{mm}$ の基礎試験において、ゴム軸受の水路溝内にPtめっき/Ti陽極と基準電極を設置し、外部電源方式でスリーブをカソード防食した。スリーブをカソード防食する上での技術的課題は、間欠的な防食になることである。すなわち、実船軸受のすべての水路溝に陽極を設置することは工作上容易でないため、4箇所程度の設置になるが、スリーブは陽極のある水路溝部を通過するときだけカソード防食されるので間欠防食になる。本研究では、実船スリーブの防食に必要な防食電流密度を求めることを目的に、基礎的な軸受試験に取り組んだ。その結果、 8A/m^2 の電流密度で優れた腐食摩耗の抑制効果を確認した。さらに、この方式を軸径約 $\phi 500\text{mm}$ の実船フェリーへ適用した。軸受設計、試運転状況及び5年後の軸抜き検査の結果について報告する。

*原稿受付 平成19年10月25日。

**正会員 株式会社ミカサ（広島市西区楠木町3-11-2）。

***正会員 三菱重工業株式会社下関造船所（下関市彦島江の浦町6-16-1）。

****正会員 三菱重工業株式会社長崎研究所（長崎市飽の浦町1-1）。

*****正会員 長崎大学工学部（長崎市文教町1-14）

2. 基礎試験

2.1 防食の方式 一般に電気防食には流電陽極方式（犠牲陽極方式）と外部電源方式があるが、スリーブの電気防食を考えた場合、流電陽極方式では陽極の設置スペースがないこと、陽極の交換メンテナンスが容易でないこと、および消耗した陽極の一部が脱落し軸受に噛み込む危険性などの欠点があることから、外部電源方式を検討した。

2.2 試験装置と方法 $\phi 140$ mm の軸受において、軸スリーブのカソード防食を行なうため、軸受に電極を設置した。設置場所を図1に、カソード防食の電気回路を図2に示す。

図1 電極設置位置

図2 電気回路図

軸受の水路溝の一つを、実船軸受で電極が入る水路溝の大きさ（幅 40 mm）と等しく加工し、その中に Pt めっき/Ti 陽極と $\phi 3$ mm の PTFE チューブ（基準電極）を固定した。

Pt/Ti 陽極は、電気伝導度の点から Ti 合金ではなく純 Ti とし、 $\phi 2.4$ mm Ti 線の表面に Pt めっきを施している。防食電流は Pt/Ti 陽極からスリーブ方向へ流れる。基準電極の PTFE チューブは、軸受外に設けた飽和 KCl セルに導き、Ag/AgCl 基準電極と電気的に連通させた。

試験条件を表1に示す。Test-1 と Test-2 の防食イ

ンターバルは、軸径約 $\phi 500$ mm の実船軸受において 90 度おきの 4 箇所にもアノードを設けた場合に相当し、実船の防食条件を模擬している。防食電流密度は、試験に先立って電流密度とスリーブ電位 (V_s) の関係を求めた上で、後に述べるように -0.4 V の防食電位が得られる 8.0 A/m² に設定した。スリーブが一回転する間に、防食されている水路溝に滞在する時間割合は約 10% である。

表1 試験条件

	Test-1	Test-2
Operating pattern	Continuous run	4 times of 24h rest and 48h run
Bearing L/D	$\phi 140$ mm $\times$ 140mm	
Bearing pressure (MPa)	0.2	
Sliding velocity (m/s)	5.0	
Lubricants	Sea water	
Feed water temperature (°C)	35	
Test duration (hr)	202	288
Current density (A/m ²)	8.0	

Test-1 と 2 は同じ防食条件であるが、Test-2 では 24h の停止と 48h の運転を交互に 4 回繰り返した。これは、ある実船フェリーの運航パターンを模擬したもので、軸受停止はフェリーが港に入って停船している状態に相当する。なお停止中は、スリーブのアルカリ腐食を防止するため、同時に防食電流も停止させた。

2.3 試験結果と考察

(1) スリーブ電位の特性

軸径比 $L/D=1.0$ の軸受を用いてスリーブ電位の特性を調べた。図3に、Pt/Ti 陽極を設置した水路溝内の基準電極で測定したスリーブ電位 (V_s) と防食電流密度の関係を示す。まず、防食電流を流さない場合の電位、すなわち自然電位は、静海水中と給水条件下（水路溝内流速 0.58 m/s）で -0.21 V、5 m/s すべり条件下で -0.25 V であった。銅合金の自然電位は $-0.2 \sim -0.3$ V と言われているので⁽⁶⁾、測定結果はこれに一致している。つぎに防食電流を流した場合、電流密度の増加に伴いスリーブ電位は直線的に低下した。防食電位は経験的に（防食電位 = 自然電位 $- 0.2$ ）V と考えられているので、 -0.4 V 以下が防食領域である⁽⁷⁾。図3において、 -0.4 V の防食電位を示す電流密度は、静海水中で約 0.6 A/m² である。この値は、海水中における銅合金の一般的な防食電流密度 $0.15 \sim 0.30$ A/m² に比べると若干高いが、オーダーは一致している。

つぎに、同じスリーブ電位を得るのに、試験条件によって電流密度が異なっており、静海水中、給水条件、5 m/s すべり条件下の順に電流密度が大きくなる。例えば、 -0.4 V の防食電位を示す電流密度を比較すると、静海水中で 0.6 A/m²、給水条件下で 2.4 A/m²、5 m/s すべり条件下で 8.0 A/m² である。この違いは、スリー

ブ表面の酸素拡散層の厚さに関係していると考えられる。すなわち、スリーブ表面では式(1)に示す溶存酸素の還元反応（酸素拡散を伴う遅い反応）が生じているが、スリーブ表面の海水流れが速いほど拡散層の厚さは薄くなるため電流が流れ易い。

したがって、同じ電位差を生じさせる場合、酸素拡散層の厚さが薄いほど大きな電流を必要とする。5 m/s すべり条件下で最も電流密度が大きいのはこのためである。

図3 スリーブ電位と電流密度の関係

(2) カソード防食試験結果

Test-1 試験中のスリーブ電位と摩擦係数を図4に示す。スリーブ電位は、試験開始時に-0.4 Vであったが、その後若干上昇し-0.37 V で安定した。摩擦係数については、時間とともに低下しており、良好な経過を示した。試験後のスリーブ表面の外観を図5に示す。

(1) Sleeve potential

(2) Friction coefficient

図4 スリーブ電位と摩擦係数の変化

スリーブ表面は金属光沢を呈しており防食されている。

図5 Test-1 試験後のスリーブ外観

次に Test-2 の試験中のスリーブ電位と摩擦係数を図6に示す。自然電位は-0.18~-0.25 V であり回転中に防食された場合の電位は-0.32~-0.4 V で、-0.33 V に安定化している。8 A/m² 設定で-0.4 V 狙いであったが、幾分高い電位を示した。回転中の電位は回転初期に下がり、次第に増加する傾向がある。摩擦係数については、0.02 に安定化している。発停試験後のスリーブ表面の外観を図7に示す。スリーブ表面には、停止時に生じたと思われる軸受パッドの痕跡が僅かに残っているが、ゴムの移着はなく、金属光沢があり防食されている。

以上の試験結果から、8 A/m² の電流密度で実船の防食が可能である目処が得られた。

図6 発停試験におけるスリーブ電位と摩擦係数

図7 Test-2 試験後のスリーブ外観

3. 実船フェリーへの適用

3. 1 実船軸受の設計と製作 カソード防食軸受を2本のプロペラ軸を有する高速フェリーの船尾管軸受に適用した。海水潤滑軸受は各軸について前後の2箇所あり、全4軸受に適用した。軸受の仕様を表2に示す。Pt/Ti 陽極が設置された水路溝内の電流密度を 8 A/m^2 に設計した。以下の項目について説明する。

表2 実船におけるカソード防食の仕様

	Fore-side bearing	Aft-side bearing
Shaft diameter D(mm)	499	524
Bearing length L(mm)	1090	2260
Bearing L/D	2.2	4.3
Revolution(rpm)	170	
Bearing pressure(MPa)	0.13	0.18
Sliding velocity(m/s)	4.4	4.7
Lubricants	Sea water	
Current density(A/m ²)	8.0	
Number of anode	4	

(1) 電源の仕様

外部電源として定電流の直流電源を用意した。表3に必要電圧を示す。電圧降下は、Pt/Ti 陽極電圧、スリーブ防食電圧、海水および導線の抵抗で発生し、船首側軸受で2.8 V、船尾側軸受で3.8 Vと見積もられる。したがって、余裕をみた上で、軸受毎にDC 8 V、7 Aの電源を用意した。また、スリーブのアルカリ腐食を防止するため、プロペラ軸回転数とリンクするリレー回路を設け、プロペラ軸が低回転の場合に電源がOFFになるようにした。

表3 カソード防食電気回路の必要電圧

	Fore-side bearing	Aft-side bearing
Pt/Ti electrode potential (V)	1.4 ($2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$)	
Sleeve potential (V)	0.4	0.4
Electric resistance (V)	Sea water	0.12
	Cable from electric source to Pt/Ti anode	0.47
	Cable from sleeve to electric source	0.42
Total voltage drop(V)	2.8	3.8

(2) 電極の設置場所と方法

Pt/Ti 陽極は、図8に示す通り、負荷面を避けた円周方向の4箇所に設置した。Pt/Ti 陽極の長さは軸受長さに等しい。Ag/AgCl 基準電極については、軸受上半分のどちらか一方のPt/Ti 陽極に併設し、軸方向位置は軸受中央に設置した。また、電解液にはKCl 飽和溶液に替わり自然海水を使用した。

図8 軸受内における陽極と基準電極の設置場所

つぎに、Pt/Ti 陽極の形状と軸受内への設置方法を図9に示す。Pt/Ti 陽極の断面形状は台形とし、水路溝内にさらに円形溝を掘り、その中にPt/Ti 陽極を納めた。Pt/Ti 陽極と円形溝の空間には充填剤を封入し、陽極が外に飛び出さないようにした。Pt めっきは短辺の面に施した。

電源へ接続する銅線とPt/Ti 陽極との結線に関しては、結線部に海水が浸入して腐食し、断線するトラブルが想定される。そこで、図10に示すようにPt/Ti 陽極にTi線を溶接して延長し、Pt/Ti 陽極から離れた場所で銅線に接続した。また、図9に示すハウジングAと軸受の間にある空間Bを充填剤で充満させて接続部を保護した。

図9 Pt/Ti 陽極の設置方法

図10 Pt/Ti 陽極装着写真

3. 2 試運転結果

(1) 自然電位

係留運転に先立って、プロペラ軸停止中に 1 Hz のサンプリング速度でスリーブの自然電位を測定した。左舷前部軸受の結果を図 1 1 に示す。自然電位は -0.25 V 前後で、振れ幅は 0.01 V 未満で小さいことがわかる。図 3 に示した流動海水下における自然電位は -0.21 V で、それよりも低い値を示した。その理由は、基準電極の電解液を変更したことによる。基礎試験では電解液に飽和 KCl 溶液を、実船軸受では自然海水を用いたので、スリーブ電位は見掛け上 0.05 V 低下して良い。

基準電極の種類	電位 (vs. SCE)
Ag/AgCl/飽和 KCl	+0.1959
Ag/AgCl/自然海水	+0.2505

図 1 1 プロペラ軸停止中の自然電位

(2) 電流密度とスリーブ電位の関係

定格の 77 % のプロペラ回転数 (130 rpm) で係留運転している際に、 -0.4 V 程度のスリーブ電位になるように防食電流を流し、100 Hz のサンプリング速度でスリーブ電位を計測した。すべり速度は前部軸受で 3.4 m/s、後部軸受で 3.6 m/s である。右舷と左舷は一致した結果が得られたので、右舷の測定結果を図 1 2 に示す。前部軸受、後部軸受ともに振れは 0.03 V 程度で小さかった。

図 1 2 プロペラ軸 130 回転時におけるスリーブ電位

つぎに、定格の回転数 (170 rpm) において、電流密度

とスリーブ電位の関係を測定した。その結果を図 1 3 に示す。

図 1 3 プロペラ軸 170 回転での電流密度とスリーブ電位の関係

図中には基礎試験 (図 3) で得られた結果を、基準電極の補正をした上で併記している。図から、 -0.45 V 以下の防食電位に必要な電流密度は、前部軸受で約 8 A/m²、後部軸受で約 5.5 A/m² である。基礎試験で得られた必要電流密度は 8 A/m² であったので、前部軸受はこれに一致しているが、後部軸受ではより低い電流密度になっている。スリーブ電位が低下し易い原因として、プロペラ軸アースの不良と非摺動面での計測の二つが考えられる。前者のアース不良の場合、アース部で発生する電圧降下が見掛け上スリーブ電位に上乗せされる。しかし、アース抵抗を実測した結果、 $0.002 \sim 0.003 \Omega$ の低い値であり、スリーブ電位への影響は考えられない。一方、後者の非摺動面での計測については、基準電極を軸受中間に位置する給水用水路溝に設けているため、非摺動面のスリーブ電位を計測している可能性が考えられる。図 6 中に示した基礎試験結果からわかるように、すべりを伴わない場合、低いスリーブ電位が得られる。しかし、基準電極の設置に関して前部軸受と後部軸受は同じであり、後部軸受だけ電位低下する原因を説明するには至らない。

スリーブ電位を低くし過ぎると、スリーブ表面にゴムの移着が生じる危険性に配慮し、実船の電流密度を最初から 8 A/m² に設定するのではなく、図 1 3 中で -0.4 V のスリーブ電位が得られる範囲に設定し、経過を見ることにした。具体的には前部軸受を 5.4 A/m²、後部軸受を 4.0 A/m² に設定した。

3. 3 就航状況 カソード防食軸受を適用したフェリーは、12 hr の運航と 12 hr の停船を繰り返す運行パターンをもつ。電源装置に付随してノートパソコンを設置し、1 秒のサンプリング速度で各軸受の印加電圧とスリーブ電位をモニタリングした。就航後、約

半年経過した時点における右舷の前部軸受のサンプリングデータを図14に示す。停船時に2回ずつ短時間起動しているのは、港内で船体の向きを変えるためプロペラ軸が一時的に回転するためである。図から、防食装置は規則的に作動していることがわかる。防食電流は、前部軸受 5.4 A/m^2 、後部軸受を 4.0 A/m^2 のままであるが、スリーブ電位は就航直後の -0.4 V から次第に低下し、 $-0.55 \text{ V} \sim -0.6 \text{ V}$ を示すようになった。

図14 就航中の印加電圧とスリーブ電位

その原因として、基準電極が軸受中間の水路溝に設置されており、この領域のスリーブ表面が非摺動であるため、スリーブ表面がエレクトロコーティングで覆われ、電位低下し易くなったことが考えられる。このため、今後、基準電極はすべり領域に設置する方が適切であると考ええる。

つぎに、就航後約5年（約25,000時間）での軸抜き点検時において、スリーブの外観観察と摩耗量を計測した。スリーブ外観を図15に、NBR軸受を用いた従来船スリーブの25,000時間における摩耗量平均と、今回カソード防食を装備した本船の摩耗量の比較を図16に示す。スリーブ表面については、銅合金の金属光沢を呈しており、腐食している様子もなく、クレーターの発生も見当たらなかった。摩耗量については、軸受をカソード防食することによって、スリーブ摩耗量を約1/4程度に低減できることを確認した。

図15 就航5年後のスリーブ外観

図16 スリーブの平均摩耗量の比較

4. 結論

フェリーの海水潤滑プロペラ軸受において、腐食摩耗によって軸スリーブの寿命が短く、かつスリーブ表面にエロージョンコロージョンの作用でクレーターが発生する問題に対し、スリーブ表面をカソード防食して長寿命化する方法を検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) $\phi 140 \text{ mm}$ （実船の1/3.7モデル）の軸受試験機を用いて青銅製スリーブをカソード防食する基礎試験を行い、スリーブの腐食が抑制され、摩耗を低減できる可能性を確認した。
- (2) ゴム軸受の特定の水路溝だけに Pt/Ti 陽極を設ける間欠的防食において、電流密度 8 A/m^2 、防食時間割合約10%の条件で防食効果を確認した。
- (3) 軸径約 $\phi 500 \text{ mm}$ の2軸フェリーに、世界で初めてカソード防食軸受を実船搭載した。スリーブは防食電位を維持しており経過は良好である。また、就航後約5年（約25,000時間）の点検において、スリーブ摩耗量を防食なしの場合に比べて約1/4に低減できることを確認した。また、スリーブ表面は銅合金の光沢を呈しており、クレーターの発生も見当たらなかった。

5. 謝辞

本研究を行なうにあたり、腐食摩耗のメカニズムでご助言をいただいた九州大学芸術工学研究院の佐木邦夫教授殿、実船装備における定電流電源装置の設計から施工までご協力を頂いた(株)中国電気サービス社殿に感謝申し上げます。

6. 参考文献

- (1) Kikkawa, F. Yano, A. Uchida, Y. Fujita, K. Kawazoe, T. Sada, H. (2008), "Study on Damage of Propeller Shaft Sleeve for Seawater Lubricated Rubber Bearing -1st Report," JIME, Vol.43-1, pp123-129

- (2)Yoshii, T. and Ueda, K. (1974), “Cathodic Protection of Ship Hull,” Mitsubishi Jyuko Giho, 11, 2, pp167-175
- (3)Itani, J., Japan Patent No.3344427(2002).
- (4)Zhu, Y., Ogano, S., Kelsall, G. and Spikes, H. A. (2000), “The Study of Lubricant Additive Reactions Using Non-Aqueous Electrochemistry,” STLE Tribology Transactions, 43, 2, pp175-186.
- (5)Kawazoe, T., Ura, A. and Nakashima, A. (2000), “Effect of Applied Potentials on Tribocorrosion of Metals in Seawater,” Proceedings of the International Tribology Conference, Nagasaki, pp467-471.
- (6)Treseder, R. S., “The NACE Corrosion Engineer’s Reference Book,” Nasional Association of Corrosion Engineers (1980)
- (7)BS7361(1991), “Cathodic Protection Part 1. Code of practice for land and marine applications,” .