海水潤滑ゴム軸受における軸スリーブ損傷の研究* -第1報

吉川文隆**
藤田健二****

矢野昭彦***
川添強*****

内田幸宏****
佐田裕之*****

Study on Damage of Propeller Shaft Sleeve for Seawater Lubricated Rubber Bearing-1st Report

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

Abstract

Propeller shaft diameter of ferries becomes larger in conjunction with requirements of higher vessel's speed and CPPs (controllable pitch propellers). Thus, it may lead into a tendency to reduce the life duration of stern tube bearing under seawater lubrication. Wear of the propeller shaft sleeve, i.e. bronze alloy, is typically greater than that of the rubber bearings, with triangularly shaped craters appearing on the sleeve surface.

In this paper, we describe the investigation of used sleeve sample taken from an actual vessel, as well as the wear characteristics of bronze alloys conducted under the corrosive wear condition which is equivalent to actual ferry service. The results indicated that corrosive wear was the main cause of sleeve wear. Comparing between the amount of wear in seawater and the one in distilled water, the influence of corrosion on sleeve wear was found to be substantial. Additionally, the craters are considered to be formed by the action of erosion corrosion

1. はじめに

船舶のプロペラ軸すべり軸受は、海水潤滑方式と油潤滑方式に分類される。沿岸を航行するフェリーでは、油漏洩による環境汚染を避けるため、主に海水潤滑方式の軸受が適用されている⁽¹⁾。プロペラ軸と軸受の材料については、プロペラ軸に嵌合された耐食性のある金属系スリーブ材とゴム軸受または樹脂軸受の組み合わせが一般的である。スリーブ材には銅合金（青銅，Cu-Ni 合金），ステンレス鋼，Ni 基合金が使われ，ゴム軸受にはNBR (acrylonitrile-butadiene rubber) やクロロブレンゴム，樹脂軸受には，ふっ素樹脂複合材，フェノール樹脂積層材，ポリウレタン樹脂などが使われている。この中でも，リグナムバイタ軸受材と相性の良かった青銅(BC2)スリーブ材が，そのままゴム軸受との組み合わせでも使われ⁽²⁾，現在最も一般的な材料の組み

合わせになっている。本研究では，フェリーが高速化やCPP化し，プロペラ軸径が大径化する中で問題になっている青銅スリーブの摩耗による軸受寿命低下について研究した。

ゴム軸受の軸受面は，松本ら⁽³⁾の報告にあるように，軸と軸受が水膜で十分には分離していない混合潤滑状態にある。スリーブとゴム軸受の両方に摩耗が生じ，軸受寿命は軸受すき間で管理される。軸受すき間が大きくなると，プロペラ軸の曲げ応力が過大となることから，各船級ではプロペラ軸径に応じた軸受すき間の限界値が規定されている。フェリーのプロペラ軸として一般的な軸径 $\phi 350 \sim \phi 600$ mm の場合，NK 及び JG 船級が定める軸受すき間の限界値は 9.5 mm である。軸受すき間は，初期すき間（すき間/軸径 = $2/1000 \sim 3.5/1000$ ）にスリーブとゴム軸受の各摩耗量を加えた値であるから，スリーブとゴム軸受の摩耗代の合計は，7.4～8.8 mm となる。しかし，プロペラ軸径が大径化するにつれて軸受寿命が10年から7年前後へと短くなっており，かつ，スリーブの摩耗がゴムに比べて大きい傾向がある。著者らの調査によれば，スリーブとゴム軸受の摩耗の比は 5:3 であり，軸受寿命に及ぼすス

*原稿受付 平成19年4月20日。

**正会員 株式会社（広島市西区楠木町3-11-2）。

***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 三菱重工業株式会社造船所（下関市彦島江の浦町6-16-1）。

*****正会員 長崎大学工学部（長崎市文教町1-14）。

リーブの影響が大きい。従って、軸受寿命延長のためには、スリーブの摩耗低減が不可欠である。大径スリーブにおいては、近年、スリーブ表面にクレーターが形成される場合がある。クレーターの形成メカニズムを含めて、スリーブの摩耗寿命の向上策が必要となってきた。

久米ら⁽⁴⁾は、青銅製プロペラ軸スリーブの早期減肉を報告している。プロペラ軸が回転中に軸アース不十分な場合、プロペラ防食電流が軸スリーブから船尾管内面を通して船体へ帰還するため、スリーブが腐食する現象である。しかしこの現象は、軸アースが不十分な場合に、シール装置に対面するスリーブ表面に発生するものであり、本研究で報告する軸受内部のスリーブ摩耗とは発生条件および場所が違っており、別の現象である。

純銅や銅合金の腐食については、Cornwell ら⁽⁵⁾が淡水の給水配管で生じる孔食を、Cohen ら⁽⁶⁾、Bianchi ら⁽⁷⁾は淡水と海水の給水配管で馬蹄形(horseshoe shaped)またはU型(U-shaped)の腐食痕を示す潰食(impingement attack)と呼ばれる腐食形態を報告している。潰食はエロージョンコロージョンの一種で、流速が速く金属表面の腐食保護膜が継続的に除去される場合に発生し、除去された部分は陽極となって腐食が加速される現象である。

銅合金の腐食量は流速とともに増えるが、プロペラ軸スリーブにおいては、軸周速が約6 m/sに達することに加えてゴム軸受との摩擦を伴うので機械的にも保護膜が除去され、腐食が加速されることが考えられる。クレーターの発生原因については、上述のエロージョンコロージョンの一種である潰食に加えて、キャビテーションエロージョンの可能性も否定できない。

本研究では第一に、実船のスリーブサンプルを調査し、摩耗とクレーターの実態を調べた。次に実船のすべり速度相当において基礎的なすべり軸受試験を行い、摩耗に及ぼす潤滑液、スリーブ材質の影響を調べた。その結果、スリーブの摩耗形態は腐食摩耗で、腐食の影響が大きいこと、クレーターはエロージョンコロージョンで発生したと考えられる知見を得たので報告する。

2. 実船スリーブの調査結果

フェリーのシャフトブラケット軸受で7年間使用され、クレーターを有する軸径約φ500 mmのスリーブの外観を図1に示す。軸受はNBRである。スリーブ表面は腐食状態や色合いから、A～Fの6箇所に区分される(両端および海水取入れ口の非摺動面を除く)。AとFは円周方向に線状傷があるものの滑らかな金属光沢面、

BとDはクレーターが散在する金属光沢面、Cはクレーターが散在する緑青色面、Eは黒緑色面である。E部の黒色は軸受ゴムが付着しているもので、その下にはC部と同じ緑青色面が存在していた。以下、各調査項目について、その結果を説明する。

図1 実船スリーブ材の外観と摩耗プロファイル

2. 1 スリーブの摩耗量、比摩耗量 スリーブの摩耗量を図1に示す。クレーターの穴部は避けて計測した。摩耗量は2 mm前後で全体に渡ってほぼ一様に摩耗している。比摩耗量は $4 \times 10^{-11} \text{ mm}^2/\text{N}$ と推定される。

2. 2 材質 表1にスリーブ材の化学成分を示す。化学成分はJIS規格のBC2を満足している。また、引張強さと伸びの測定値は 279.5 N/mm^2 と23.4%で、それぞれの規格値 245 N/mm^2 以上と20%以上を満足している。1 kgf 荷重でのビッカース硬さはHv 89であり、BC2として一般的な値であった。

表1 実船スリーブ材の化学成分

	Chemical Composition(wt%)					
	Cu	Sn	Zn	Pb	Ni	Fe
Sleeve Sample	86.2	8.22	4.85	0.18	0.49	0.04
BC2 Spec.	86.0~90.0	7.0~9.0	3.0~5.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.2

2.3 表面形状 図2にA, C, D部の軸方向の形状測定結果を示す。A部は高低差 $100\ \mu\text{m}$ のうねりがあるものの滑らかな面である。C部は $200\ \mu\text{m}$ 程度のうねりに加えて、最大 $100\ \mu\text{m}$ 程度の細かいあらさがあり全面腐食の様相を呈している。D部には窪んでいるクレーターおよびクレーターが連結した円周方向の溝がある。クレーターの大きさは最大で $10\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ 程度で、その深さは $200 \sim 300\ \mu\text{m}$ 程度であるが、深いものでは $600\ \mu\text{m}$ に達する。D部のうちクレーター以外の金属光沢面は、高低差 $100\ \mu\text{m}$ のうねりがあるものの滑らかな面である。ただ、この面を拡大すると腐食の様相を呈していた。

図2 実船スリーブ材の表面プロフィール

2.4 クレーターの表面と断面 クレーターは軸方向に 45° の向きで広がっている。海水は軸受中央部に強制給水されているが、ブラケット軸受では航行中に船外からの海水流入量が多く、海水は軸受内を船首から船尾方向に流れる。軸受回転を考慮すると、海水は斜め船尾方向に流れると考えられ、クレーターの向きと矛盾していない。

クレーター表面の拡大を図3に、断面の拡大を図4に示す。図3に示すようにクレーター内には網目状の組織が確認できる。この組織は、X線回折から δ 相 ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) であると判断された。クレーターの底面は比較的滑らかであり、一部に腐食生成物と思われる薄層が存在するが、孔食のように腐食生成物が充満しているものではない。

図4に示す断面拡大の表層部分においても δ 相が選択的に残っていることが確認できる。断面の金属組織はBC2として標準的なものであり、 δ 相が網目状に析出している。断面組織には多数の空孔が存在するが、これは遠心铸造時のガス欠陥または凝固収縮に伴う铸巣

と思われる。断面方向からクレーター部のCu, Zn, Sn, Pb, Ni元素のEPMA面分析をした結果からは、脱亜鉛腐食など構成元素の離脱は認められなかった。

図3 クレーターの拡大写真

図4 クレーター断面の拡大写真

図5は実船スリーブ材からキャビテーション試験片

を切り出し、静止海水中において 400 W 超音波発信器を用いて発信周波数 18 kHz、振幅 30 μm の条件で作ったキャビテーション面である。(実船の軸振動数計測値は 11 Hz, 22 Hz で振幅 30 μm であるが、本試験では加速条件としている)。キャビテーション面は微細に荒れているものの、 δ 相が選択的に残る傾向はなく、実船クレーターの様相と異なっている。

図5 キャビテーションによって曝された表面

つぎに、クレーターの起点については、図3からわかるように、クレーターの先端に存在する空孔が起点となっていた。一方、図6に示す他の実船スリーブでは、クレーターが一行に並んでいる特長がある。列の間隔は 28 mm で NBR 軸受の水路溝幅に一致していることから、停船時に生ずるすき間腐食のピットがクレーターの起点になっている可能性が示唆される。以上のことから、クレーターの生成には表面に存在する凹部を起点に成長するメカニズムが考えられる。

図6 長期停船履歴のある実船スリーブの表面

実船スリーブの調査結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) スリーブは、部分部分で異なった様相を呈しているが、腐食摩耗面であることは共通している。また、

クレーターの有無にかかわらず、全体に渡って様に摩耗している。したがって、クレーターはスリーブ寿命に決定的な影響を及ぼさない。ただ、クレーターの面積率が高いほど接触面圧が増加するため、摩耗が加速する可能性がある。

- (2) クレーターは海水の流れと同じ方向に未広がりクレーター内には腐食生成物が充満せず δ 相が選択的に残存している特徴から、クレーターはエロージョンコロージョンによって発生したと推定される。すなわち、スリーブの材料欠陥、または軸受ゴムとの長期間の接触ですきま腐食が生じ、この微小ピットを起点として、高速の海水流れのエロージョンコロージョン作用によりクレーターに成長したと考えられる。キャビテーションエロージョンの損傷面には、 δ 相が選択的に残る傾向がないためクレーターの生成は考え難い。
- (3) スリーブ摩耗の低減策を探るためには、実船相当の摺動条件下で基礎的な腐食摩耗試験を行ない、腐食の影響、材質の影響を調べてみる必要がある。

3. 海水中、蒸留水中におけるすべり軸受試験

3.1 試験装置 図7に試験装置の模式図を、図8に試験片の寸法を示す。外径 $\phi 140\text{ mm}$ のスリーブ材は回転軸に固定され、サーボモーターによって一定速度で回転する。ここで、モーターからの電氣的な影響を遮断するため、スリーブを電気絶縁した。軸受には NBR ゴム軸受 (体積固有抵抗 $1 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$) を用い、軸受内径を $\phi 140.5\text{ mm}$ 、幅 50 mm ($L/D = 0.36$) の 12 パッドとした。供試軸受を固定しているハウジング A は、転がり軸受を介してハウジング B で支持されており、自動調心して片当たりを防ぐとともに、ハウジング A の両側に設けたロードセルで摩擦力を検出できる。海水は 200 l の自然海水を循環して使用し、試験毎に全量交換した。スリーブ外径は旋削仕上げで、表面あらさは実船スリーブのあらさと同程度の $2.0 \mu\text{mRa}$ とした。スリーブの摩耗量は、スリーブの非摺動面の一部にペイントおよびエポキシ系接着剤によるマスキングをしておき、マスキング部を基準に触針式の形状測定から摩耗深さを求めた。

3.2 供試材料と試験条件 供試スリーブ材料を表2に、試験条件を表3に示す。試験の狙いは以下の3点である。

- (1) 現用の青銅材について、蒸留水中と海水中での摩耗量を比較し、腐食の影響度を調べた。蒸留水中では腐食作用が弱いと機械的摩耗が主体と考えられるのに対し、海水中では腐食摩耗が生じる。

図 7 試験装置の模式図

図 8 試験片の寸法

- (2) スリーブ電位も腐食に大きく関係することが考えられ、静海水中、流動海水中および実船摺動条件下における電位について測定した。スリーブ電位の測定電気回路を図 9 に示す。
- (3) BC2 の代替材料として、青銅系銅合金の範囲で材料スクリーニングを行った。BC2 については、Ni を添加することで δ 相が微細化し耐摩耗性が向上する報告⁽²⁾があり、現用の BC2 (0.5%Ni) と JIS 規格上限の BC2 (1.0%Ni) を比較した。また、BC 材より耐食性が高いとされるりん青銅 (PBC2)、アルミニウム青銅 (AIBC3) を評価した。いずれの材料も実船と同じ遠心鋳造法で製造した。

表 2 供試スリーブの化学成分と硬度

	Chemical Composition (wt%)								Hardness (Hv)
	Cu	Sn	Zn	Pb	Ni	P	Mn	Al	Fe
BC2(0.5%Ni)	87.5	7.4	4.3	0.1	0.50	—	—	—	—
BC2(1.0%Ni)	86.9	7.6	4.4	0.1	0.99	—	—	—	—
BC3(0.5%Ni)	86.9	9.6	2.8	0.1	0.50	—	—	—	—
PBC2	89.3	9.7	—	—	—	0.27	—	—	—
AIBC3	80.8	—	—	—	4.6	—	1	9.3	4.2

表 3 試験条件

	This Study	Actual Bearing
Projective Pressure	1.0MPa	0.11~0.18MPa
Sliding Velocity	6.0m/s(820rpm)	3.0~5.7m/s
Lubricants	Seawater, Distilled Water	Seawater
Lubricants Temperature	30°C	max.25°C
Flow Rate	10 Liter/min.	—
Test Duration	280h	—

図 9 スリーブ電位の測定電気回路

面圧については、実船では 0.11~0.18 MPa の範囲であるが、片当たりを考慮し、かつ短時間で摩耗量を進捗させる加速試験を行う意味から 1 MPa に設定した。

すべり速度については、実船のすべり速度は 3.0~5.7 m/s の範囲にあるが、近年の高速化でスリーブの早期減肉が顕在化していることから 6.0 m/s に設定した。試験時間は、実船スリーブの調査で得られた比摩耗量 $4 \times 10^{-11} \text{ mm}^2/\text{N}$ を基に計算して、評価に十分な数十 μm の摩耗が予測される 280 時間とした。

3.3 試験結果と考察 試験後のスリーブの外観を図 10 に示す。BC2 (0.5%Ni) の摺動面には、1 mm 前後の金属光沢部と灰黒色部の斑点が認められる。これに対して非摺動面 (マスキング部を除く) は、茶色に変色し腐食しているものの斑点はなく、機械加工面は原形を留めていることがわかる。摺動面の拡大写真を図 11 に示す、摺動面は腐食の様相を呈し、金属光沢のある X 領域では δ 相が残存し、灰黒色の Y 領域ではクラックを伴った腐食領域が見られるが、その一部は脱落している。この腐食面は、図 1 に示した実船スリーブ

図 10 試験後のスリーブの外観写真

の B, D 部の腐食面 (クレーターを除く) と似ていた。BC2 (0.5%Ni) の平均摩耗量は $27.4 \mu\text{m}$ で比摩耗量は $1.2 \times 10^{-11} \text{mm}^2/\text{N}$ と計算される。この値は実船スリーブの比摩耗量の 1/3.2 であるが、オーダーは一致している。以上のことから、本試験は実船における摩耗を模擬していると考えられる。

つぎに、3つの試験の狙いに対して得られた結果を以下に説明する。

(1) 腐食の影響

海水中と蒸留水試験の比較から、BC2 (0.5%Ni) スリーブの外観は、海水中で試験したスリーブが腐食の様相を呈しているのに対し、蒸留水中のスリーブは金属光沢を呈している。図 10 に示す蒸留水中のスリーブにおいて、X部とY部では色合いが異なっているが、X部は試験後の軸受開放までの時間 (約 12 時間) NBR パッドが接触していた部分に相当する。X部を拡大観察すると腐食面であり、すきま腐食が発生したと考えられる。図 12 に示すようにスリーブの摩耗量は、海水中の摺動面が $27.4 \mu\text{m}$ 、非摺動面がほぼ $0 \mu\text{m}$ であるのに対して、蒸留水中では摺動面でも表面あらさが取れる程度の $2.1 \mu\text{m}$ である。海水中での摩耗量は、摩擦を伴わない流動海水下での腐食量や蒸留水下での機械的摩耗に比べて著しく大きく、腐食と機械的摩耗の相乗効果、いわゆる腐食摩耗によって過大な摩耗が発生すると考

えられる。

腐食摩耗の条件下では、スリーブ表面に生成する腐食保護膜が、絶えず機械的摩擦で取り去られるため過大摩耗が発生すると解釈される。

図 11 BC2(0.5%Ni) 摩耗表面の拡大写真 (In seawater)

図 12 試験後のスリーブの平均摩耗量

(2) 電位計測

電位の計測結果を図 13 に示す。静海水中において、スリーブ電位は青銅の自然電位とされる $-200 \sim -300 \text{mV}$ に近い値を示したのに対し、流動海水中やしゅう動条件下では電位が上昇した。すなわち、しゅう動状態のスリーブは、強い腐食環境下に曝されている

ことがわかった。

したがって、電気防食などの方法によって腐食作用を減じることが出来れば、スリーブの摩耗量を蒸留水中並みに低減できる可能性が示唆される。

図13 海水中的のスリーブ電位測定結果

(2) Ni の影響と代替材料

図10に示すBC2(0.5%Ni)とBC2(1.0%Ni)の外観を比較すると、BC2(1.0%Ni)の斑点は2~3 mmと大きい。摩耗量に大差はないものの、断面形状を比較すると、BC2(1.0%Ni)の方が摩耗面の凸凹が大きく荒れている。したがって、Ni を増量添加した効果はなく、BC2(0.5%Ni)現用材の方が優れている。両者の金属組織を比較してもδ相の析出状態について特に相違はなく、BC2(1.0%Ni)での荒れの原因については不明である。BC3(0.5%Ni)についてもBC2(1.0%Ni)と同様に大きな斑点があり、優れているとは言い難い。

BC2 よりも耐食性が高いPBC2 とA1BC3 については、PBC2 は1~3 mmの斑点が存在し、BC2(1.0%Ni)と同様に面荒れが大きかった。他方、A1BC3 に斑点はないが、中央部に比べ面圧が高いと思われる軸受両端部で摩耗が大きかった。したがって、BC2(0.5%Ni)が青銅系銅合金の中では最も優れた耐腐食摩耗性を有していると評価される。

4. 結論

フェリーの青銅製プロペラ軸スリーブの摩耗が速く、かつ、クレーターが発生する現象について、実船スリーブを調査するとともに、実船相当の6 m/s のすべり条件下で青銅系銅合金の腐食摩耗試験を行ない、スリーブの摩耗特性を調べた。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 実船スリーブの調査から、スリーブ摩耗の主因は腐食摩耗であると考えられる。クレーターは、スリーブの材料欠陥、停船時に発生するすきま腐食のピ

ットなど表面凸凹部を起点に、エロージョンコロージョンの作用で成長すると考えられる。

- (2) 腐食摩耗の基礎試験から、BC2(0.5%Ni)現用スリーブ材の海水中的での摩耗量は、流動海水下での腐食量や蒸留水下での機械的摩耗に比べて著しく大きい。腐食と機械的摩耗の相乗効果、いわゆる腐食摩耗によって過大な摩耗が発生すると考えられる。腐食の影響が大きいことから、電気防食法で腐食作用を減じれば、スリーブの摩耗を低減できる可能性がある。
- (3) 青銅系銅合金の中では、BC2(0.5%Ni)現用材が最も耐腐食摩耗性に優れている。

5. 謝辞

本研究を行なうにあたり、実船スリーブの調査でご協力頂いたMHI ソリューションテクノロジー(株)殿、キャビテーションエロージョンの試験でご協力頂いた(株)コベルコ科研殿に感謝申し上げます。

6. 参考文献

- (1) Suzuki, K. (1998), "Shafting for High Speed Ship," Journal of the M. E. S. J., 33, 9, pp634-641.
- (2) 日本造船研究協会編(1969), "第93研究部会 船尾管部軸系に関する調査研究第5編 プロペラ軸スリーブ材と船尾管軸受材との適合性に関する模型実験" pp49-70.
- (3) Matsumoto, S., Saki, K., Oimatsu, R. and Ikeuchi, Y. (1991), "海水潤滑ゴム軸受の摺動特性," 日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集 福岡, PP49-52.
- (4) Kume, H. (1983), "Corrosin Damage at Propeller Shafting due to Electric Potential Difference and Some Possible Countermeasures," Journal of the M. E. S. J., 18, 2, pp73-92.
- (5) Cornwell, F. J., Wildsmith, G. and Gilbert, P. T. (1973), "Pitting Corrosion in Copper Tubes in Cold Water Service," Br. Corros. j., 8, September, pp 202-209.
- (6) Cohen, A. and Lyman, W. S. (1972), "Service Experience with Copper Plumbing Tube," Materials Protection and Performance, 11, 2, pp48-53.
- (7) Bianchi, G., Fiori, G., Longhi, P. and Mazza, F. (1978), "Horse Shoe Corrosion of Copper Alloys in Flowing Sea Water: Mechanism and Possibility of Cathodic Protection of Condenser tubes in Power Stations," CORROSION-NACE, 34, 11, pp396-406. Technical Report, 25, 2, pp74-80.