塗膜のキャビテーション壊食に及ぼす膜厚の影響

望月 敬美^{*1}, 鈴木 隆^{*2}, 服部 修次^{*3}, 武田 宗也^{*4}, 横田 源弘^{*5}

Influence of film thickness on cavitation erosion of coating film

Hiromi MOCHIZUKI^{*1}, Takashi SUZUKI^{*2}, Shuji HATTORI^{*3},
Muneya TAKEDA^{*4} and Motohiro YOKOTA^{*5}^{*1} Formerly of Tokyo University of Marine Science and Technology, 491-20 Kashiwagi, Komoro-shi, Nagano 384-0055, Japan^{*2} Farm Suzuki Co., Ltd., 37-2 Higashino Tarumi, Osakikamijima-cho, Toyota-gun, Hiroshima 725-0231, Japan^{*3} Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910-8507, Japan^{*4} Kamome Propeller Co., Ltd., 690 Kamiyabe-cho, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 245-8542, Japan^{*5} National Fisheries University, 2-7-1 Nagatahonmachi, Shimonoseki-shi, Yamaguchi 759-6595, Japan

Received: 21 February 2018; Revised: 16 April 2018; Accepted: 22 July 2018

Abstract

The influences of film thickness of vinyl and silicone resin coatings on cavitation erosion were examined quantitatively in seawater using a vibratory apparatus. The maximum instantaneous volume loss rate indicates the increase, decrease, or constant with a decreased top coat thickness less than the critical thickness, depending on the combination of the top coat and primer of the acoustic impedance. The critical thickness can be calculated approximately from the duration of impulsive force and propagation velocity of a longitudinal wave created by the collapse of a cavitation bubble, when covered with a resin coating material.

Keywords : Cavitation erosion, Coating film, Film thickness, Resin, Vibratory method

1. 緒 言

船用プロペラは、海洋生物が付着して汚損されると回転時の摩擦抵抗が増大し、燃料消費率が高くなる (Sato et al., 1984). このため、生物が付着し難く、付着しても回転中に取れ易い高分子材料の塗料が開発され、その効果が報告されている (桑島, 伊丹, 2009). 一方、プロペラの高速回転により発生する翼面のキャビテーション・エロージョン (以下、キャビテーション壊食と言う) は、形状の改良により抑制されてきている. しかし、アルミニウム青銅等のプロペラ材料と比較して硬さが著しく軟らかい塗膜では、残留付着物の凹凸により生じる壊食量が多いと推測される. また、プロペラ後方の回転流中に位置する舵板では塗膜の壊食量が多い.

高分子材料の耐キャビテーション壊食性は、これまで様々な研究者により明らかにされてきている. Lichtman と Kallas はナイロン (Lichtman and Kallas, 1967), また Topchiashvili はポリエチレン (Topchiashvili et al., 1970) が優れていることを報告している. 北條らは磁歪振動法を用いて純水中でバルク材の壊食試験を行い、ポリスチレンなどの脆性材料は壊食量が多いこと、延性材料では結晶性高分子材料の結晶化度が高いポリエチレンとポリアセタールが純鉄より高い耐キャビテーション壊食性を示すこと、フェノール樹脂の複合材料と繊維強化プラスチックでは低強度箇所が優先的に損傷を受けやすいことなどを報告している (北條, 津田, 1985). 著者らの一人らは、熱硬化性樹脂 (エポキシ樹脂), 熱可塑性樹脂 (ポリプロピレン), 高密度ポリエチレンおよびポリアミド 66 は音響インピーダンスが非常に低いために同じインテンシティの下でも材料に作用する衝撃力が低くなるが、気泡崩

No.18-00100 [DOI: 10.1299/transjsme.18-00100], J-STAGE Advance Publication date : 31 July, 2018

^{*1} 正員, 元 東京海洋大学 (〒384-0055 長野県小諸市柏木 491-20)^{*2} (株) ファームスズキ (〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野垂水 37-2)^{*3} 正員, 福井大学大学院工学研究科 (〒918-8507 福井県福井市文京 3-9-1)^{*4} かもめプロペラ (株) (〒245-8542 神奈川県横浜市戸塚区上山部町 690)^{*5} 正員, 水産大学校 (〒759-6595 山口県下関市永田本町 2-7-1)

E-mail of corresponding author: mochizuki@ctknet.ne.jp

壊に伴う衝撃エネルギーを考慮すれば、壊食抵抗は疲労強度から得られるひずみエネルギーで定量的に評価できることを明らかにしている（服部他，2005）。しかし、これらの報告は高分子材料単体についての結果である。

構造用金属材料の防食に使用される表面被覆高分子材料、例えばネオプレンやポリウレタンなどは、エラストマの弾性効果等により優れた耐キャビテーション壊食性を示すが、素地金属との良好な接着が必要条件となることが報告されている（Kallas and Lichtman, 1968）。壊食に及ぼす被覆厚さの影響は、炭素鋼に硬質クロムメッキを厚く施すと壊食初期で質量減少率が低くなることが明らかにされている（岡田他，1987）。森らは三層型制振材料（金属/プラスチック/金属）、肉盛り材料および表面被覆材料（金属メッキなど）について、内部の応力波の伝ば挙動と材料表面に生じる壊食量の関係を検討した（森他，1996，1997）。そして、キャビテーション気泡の崩壊圧は直接作用する表面の金属層の厚さが 2~3 mm 以下になると、表面に作用する圧縮波と音響インピーダンスの小さい制振シートで反射した引張波が干渉して圧縮応力が減少するために壊食量が減少し、厚さが 0.5 mm では単位時間当たりの壊食量が厚さ 3 mm 以上に比べて約 20 % に減少することを見出した。

本報では、ビニール樹脂塗料とシリコーン樹脂塗料のキャビテーション壊食試験を、海水中で磁歪振動法を用いて行った。最大壊食速度と塗膜厚さおよび気泡崩壊の衝撃力持続時間と縦波の伝ば速度の関係から、壊食量に及ぼす膜厚の影響を検討した。

2. 試験片および試験方法

2・1 試験片

試験に用いた高分子材料は、ビニール樹脂塗料（V-1, V-2）、シリコーン樹脂塗料（S-1, S-2, S-3）の合計5種類である。表1に各供試材料の物理的および機械的性質を示す。表中、樹脂塗料の縦弾性係数は298 Kで引張・圧縮試験を行って求めた。図1に試験片の形状と寸法を示す。試験片は三層構造で、キャビテーションにさらされる表面層から順に第1層の上塗り材（厚さ T_1 ）、第2層の下塗り材（厚さ T_2 ）、第3層の母材（アルミニウム青銅，厚さ T_3 ）である。直径 27 mm、厚さ 8 mm の母材表面を #150~240 のエメリー紙で研磨後、各メーカー指定の下塗り材をビニール樹脂塗料では 0.05 mm、シリコーン樹脂塗料の S-1, S-2, S-3 ではそれぞれ 0.02 mm, 0.03 mm, 0.01 mm の厚さに塗装した。下塗り材を塗装すると母材と上塗り材の付着性が向上する。所要の乾燥時間を十分に経た後、上塗り材をビニール樹脂塗料は 0.10~1.21 mm、シリコーン樹脂塗料は 0.01~0.54 mm の厚さで塗装した。

Table 1 Physical properties at 298K of the test materials and test liquid.

Materials			Density ρ [kg/m ³]	Elastic modulus E [MPa]	Acoustic impedance Z [Ns/m ³]	Acoustic velocity c [m/s]	Vickers hardness HV
Coating material (paint)	Vinyl resin	V-1	1.305×10^3	218	5.3×10^5	409	29
		Primer	1.40×10^3	152	4.6×10^5	330	37
	Vinyl resin	V-2	1.96×10^3	158	5.6×10^5	284	28
		Primer	1.71×10^3	137	4.8×10^5	283	14
	Silicone resin	S-1	1.02×10^3	0.8	2.9×10^4	28	—
		Primer	0.915×10^3	140	3.6×10^5	391	33
	Silicone resin	S-2	1.16×10^3	2.6	5.5×10^4	47	—
		Primer	1.71×10^3	137	4.8×10^5	283	14
	Silicone resin	S-3	0.993×10^3	1.1	3.3×10^4	33	—
		Primer	$(0.834 \sim 0.933) \times 10^3$	111	$(3.0 \sim 3.2) \times 10^5$	345~365	68
Metal	Aluminum bronze		7.54×10^3	1.21×10^5	3.0×10^7	4005	284
Liquid	Sea water		1.02×10^3	—	1.5×10^6	1475	—

Fig. 1 Shape and dimensions of test specimen.

Fig. 2 Variations of maximum instantaneous volume loss rate and primer exposure time with clearance between the tip and test specimen. Primer exposure time increases with a decreased clearance. Maximum instantaneous volume loss rate increases with decreased clearance followed by a maximum value at 0.4 mm.

2・2 キャビテーション壊食予備試験

壊食試験はASTM G32-16 (ASTM ed., 2016) に規定されている磁歪振動装置を用いて、静置試験片法で行った。増幅ホーンの先端に取り付けた直径16 mmのステンレス鋼のチップから隙間 h mm隔てて試験片を対向させて固定し、チップを振動させることによって隙間に発生したキャビテーションで、試験面に壊食を起こした。振動子の共振周波数は19.5 kHzである。壊食量は所定時間ごとに下塗り材が露出するまでの質量減少量を精密天秤（感度0.01 mg）で測定し、材料の密度で除して求めた体積減少量である。チップ先端の全振幅 $A\ \mu\text{m}$ （peak to peak）は体積減少量の多いビニール樹脂塗料では $A=9\ \mu\text{m}$ 、体積減少量の少ないシリコン樹脂塗料では $A=50\ \mu\text{m}$ 一定とした。振動子と試験面の隙間が広がると中央付近に気泡が集中するため、壊食面積と壊食されて下塗り材が現れるまでの時間が変わると推測される。図2にビニール樹脂塗料の隙間と下塗り材が現れるまでの時間 t および最大体積減少速度 $MVLR$ （体積減少量曲線の傾きの最大値）の関係を示す。隙間が狭くなると下塗り材が現れるまでの時間が長くなり、 $MVLR$ は $h=0.35\ \text{mm}$ 付近でピークを示す。さらに、隙間を若干広くして壊食面積が広がることも勘案して、ビニール樹脂塗料の実験では $h=0.4\ \text{mm}$ とした。シリコン樹脂塗料でも同様に検討した結果、隙間が狭くなると下塗り材が現れるまでの時間は $h=0.6\ \text{mm}$ でピークを示し、 $MVLR$ は隙間が狭くなるに伴い低くなる。さらに壊食面積が広がることも勘案して、シリコン樹脂塗料の実験では $h=0.5\ \text{mm}$ とした。試験液は塩分濃度に換算すると3.1%の自然海水である。液温は恒温装置により $298\pm1\ \text{K}$ に保持した。

Fig. 3 Cumulative volume loss curves of V-1 vinyl resin. Volume loss increases with exposure time, but shows no unitary relationship between volume loss and film thickness.

Fig. 4 Cumulative volume loss curves of V-2 vinyl resin. Volume loss increases with exposure time, but shows no unitary relationship between volume loss and film thickness.

Fig. 5 Cumulative volume loss curves of S-1 silicone resin. Volume loss and their curve gradient indicate a decreasing tendency with film thickness between 0.01 mm to 0.07 mm, but they change to an increasing tendency with thickness between 0.07 mm to 0.51 mm.

3. 試験結果及び考察

3・1 キャピテーション壊食挙動

図3にビニール樹脂塗料 V-1 の厚さ T_1 を変えて塗布した試験片の体積減少量曲線を示す。 $T_1=0.11\sim0.42$ mm の場合、体積減少量は試験開始からほとんど増加しない潜伏期を経た後、3 min 頃から塗膜が損傷して急激に増加し、最大速度期に至る。 $T_1=0.52$ mm と 0.75 mm では体積減少量は 2 min から同様な傾向で増加し、 $T_1=0.11\sim0.42$ mm の場合より多く、体積減少量曲線の勾配も大きい。 $T_1=1.02$ mm と 1.19 mm では体積減少量は 3 min から同様な傾向で増加し、 $T_1=0.11\sim0.42$ mm の場合より少なく、曲線の勾配も穏やかである。 このように、膜厚が $T_1=0.11\sim0.42$ mm より厚くなると体積減少量は増加し、さらに厚くなると減少する傾向を示す。

図4にビニール樹脂塗料 V-2 の体積減少量曲線を示す。 $T_1=0.10\sim0.26$ mm, 0.40 mm, 0.51 mm の場合、体積減少量は潜伏期間経過後 4 min から同様な傾向で増加し、曲線の勾配も大きい。 $T_1=0.31$ mm と 1.02 mm では体積減少量は 5~8 min から同様な傾向で増加するが、前者より体積減少量は少なく、曲線の勾配も小さい。 $T_1=0.76$ mm と 1.21 mm では体積減少量は同様な傾向で増加し、15 min 頃から $T_1=1.21$ mm では少なくなるが、両者の体積減少量と曲線の勾配は最小である。 V-2 の各膜厚での体積減少量曲線の勾配の差異は V-1 のそれと比べて小さい。

図5にシリコーン樹脂塗料の体積減少量曲線を、S-1を例に示す。体積減少量に及ぼす膜厚の影響は著しく大きい。ため、体積減少量曲線を図5(a) $T_1=0.01\sim0.07$ mmと図5(b) $T_1=0.07\sim0.51$ mmに分けて示した。比較のために $T_1=0.07$ mmの曲線を両図に記載した。 $T_1=0.01$ mmの場合、体積減少量は実験開始直後から急激に増加し、曲線の勾配も著しく大きく、膜厚が薄いため3~4 minで下塗り材が露出した。 $T_1=0.02\sim0.05$ mmでは体積減少量は実験開始直後から同様な傾向で増加し、曲線の勾配が $T_1=0.01$ mmより緩やかである。 $T_1=0.07$ mmでは体積減少量は30 minまで一様に増加し、その後僅かに増加した後60 minから再び増加するが、体積減少量と曲線の勾配は他に比べて小さい。一方、図5(b)の $T_1=0.07$ mmと0.09 mmの場合、体積減少量は20 min後から同様な傾向で増加し、 $T_1=0.10$ mmはこれより僅かに少なく、曲線の勾配も小さい。 $T_1=0.21$ mmでは体積減少量は230 minまで増加し、その後緩やかになるが、体積減少量と曲線の勾配は $T_1=0.07\sim0.10$ mmより大きい。 $T_1=0.31\sim0.51$ mmでは体積減少量は同じ傾向で増加し、200 min頃から傾きが緩やかになるが、体積減少量と曲線の勾配は $T_1=0.21$ mmより大きい。すなわち、 $T_1=0.01\sim0.07$ mmでは塗膜が厚くなるに伴い体積減少量と体積減少量曲線の勾配は減少するが、 $T_1\geq 0.07$ mmでは塗膜が厚くなるに伴い体積減少量と曲線の勾配は増加する傾向を示す。

このように体積減少量と膜厚が一元的な関係を示さないことは、気泡崩壊の衝撃力によって発生する応力波伝ばのメカニズムが塗膜厚さにより異なることを示唆している。

3・2 壊食に及ぼす塗膜厚さの影響

体積減少量に及ぼす膜厚の影響を詳細に検討するために、各体積減少量曲線から最大体積減少速度 $MVLR$ を求め、膜厚 T_1 との関係を整理した。図6にビニール樹脂塗料V-1とV-2の $MVLR$ と T_1 の関係を示す。図中V-1については詳細に検討するために、図3中に示す以外の結果も示している。これよりV-1は T_1 が薄くなると $MVLR$ は若干増加する傾向を示すが、一定値からは変曲して僅かに低下することがわかる。一方、V-2は T_1 がある一定値以下になっても $MVLR$ はほとんど変わらない。

図7にビニール樹脂塗料と同様に求めたシリコーン樹脂塗料S-1、S-2、S-3の $MVLR$ と T_1 の関係を示す。図中S-1については詳細に検討するために、図5中に示す以外の結果も示している。これより、S-2は T_1 が薄くなっても $MVLR$ はほとんど変わらないが、ある一定値以下になるとV-1と異なり増加することがわかる。S-1、S-3では T_1 が

Fig. 6 Relationship between film thickness of the first layer and maximum instantaneous volume loss rate of vinyl resin. Maximum instantaneous volume loss rate of V-1 increases with film thickness, but it decreases slightly from 0.3 mm. Maximum instantaneous volume loss rate of V-2 shows almost no change for thin film thickness.

Fig. 7 Relationship between film thickness of the first layer and maximum instantaneous volume loss rate of silicone resin. Maximum instantaneous volume loss rate of S-2 is a constant value for thin film thickness but it increases rapidly from 0.05 mm. Maximum instantaneous volume loss rate of S-1 and S-3 decrease slightly with thin film thickness, but they increase rapidly from 0.06 mm.

Fig. 8 Schematic of stress wave at $T_1 < T_c$.

薄くなるに伴い $MVLR$ が若干減少する傾向を示し、ある一定値から S-2 と同様に増加する。このことは、S-1 の体積減少量曲線において膜厚が $T_1=0.07 \text{ mm}$ より薄い場合は T_1 が薄くなるに伴い体積減少量が増加し、 $T_1=0.07 \text{ mm}$ より厚い場合は反対に T_1 が厚くなるに伴い増加する結果を裏付けている。三層型制振材料と表面被覆材料では、厚さが一定値以下になると母材との音響インピーダンスの組み合わせにより壊食量が増加、減少、不変の挙動を示す臨界塗膜厚さ T_c の存在が知られている（森他，1996，1997）。そこで、図6と図7中の変曲点である T_c を最小二乗法で求めると、ビニール樹脂塗料 V-1 と V-2 ではそれぞれ 0.41 mm と 0.27 mm ，シリコン樹脂塗料 S-1，S-2，S-3 ではそれぞれ 0.03 mm ， 0.04 mm ， 0.035 mm である。

図8には、膜厚 T_1 が臨界膜厚 T_c より小さい場合の気泡崩壊による衝撃力波形と界面からの応力伝ばのメカニズム（森他，1997）を示す。図8(a)は、第1層塗膜の音響インピーダンス Z_1 が第2層塗膜の音響インピーダンス Z_2 より高い場合である。表面に直接作用する圧縮波（一点鎖線）が第1層塗膜厚さ T_1 内を伝ばし、第2層塗膜厚さ T_2 との接合面で反射した引張波（破線）と干渉して、合成波（実線）は干渉しない場合の圧縮波の最大値よりも小さくなる。図8(b)は $Z_1 < Z_2$ の場合で、表面に直接作用する圧縮波（一点鎖線）と第2層塗膜厚さ T_2 との接合面で反射した圧縮波（破線）が干渉して、合成波（実線）は干渉しない場合の圧縮波の最大値より大きくなる。従って、 T_1 が T_c よりも薄くなると、第1層の上塗り塗膜と第2層の下塗り塗膜の音響インピーダンスの組合せにより、V-1 のように最大体積減少速度が僅かに減少したり、V-2 のようにほとんど変化しなかったり、S-1，S-2，S-3 のように増加する傾向を示すと考えられる。

次に、臨界厚さについて検討する。最初に材料表面に発生した圧縮波が第1層内を伝ばして第2層に達すると、応力波の一部は透過し、一部は反射する。この反射波が再び表面に到達する時間は第1層の厚さが薄いほど短くなる。界面で反射した応力波の立ち上がり始める時間が、最初に材料表面に発生した衝撃力（圧縮波）の持続時間 Δt の半分より早くなると、圧縮の最大衝撃力が低下したり、上昇したりすることになる。従って、臨界厚さが T_c の場合には Δt の半分と応力波が第1層内を往復する時間が等しくなる（森他，1997）ので、縦波の伝ば速度を c とすると

$$\frac{2T_c}{c} = \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

となり、

$$T_c = \frac{\Delta t \cdot c}{4} \quad (2)$$

の関係が成立する。そこで、本実験の Δt を衝撃力頻度分布等計測システム（森他，1996）を用いて、受圧センサ

Fig. 9 Relationship between $(\Delta t \cdot c)/4$ and critical coating thickness. These experiment results and calculation results according to No.2 equations almost agree when it is considered that a young's modulus of coating film spread in seawater is drastically higher.

の表面に膜厚0.8 mmの塗膜を接着した場合と接着しない場合で測定したところ、両者の差は無く、計測数各30点で平均 $2.22 \mu\text{s}$ ($1.9 \sim 2.5 \mu\text{s}$)であった。図9にこの Δt と c を式(2)の右辺に代入して求めた値と、本実験の図6と図7から得られた T_c の関係を示す。図中には、森らが行った三層型制振材料と表面被覆材料の結果も示している(森他, 1996, 1997)。これより実験点は原点を通る直線より若干上側に位置している。しかし、海水中に3ヶ月浸漬後の塗膜の縦弾性係数が大幅に増大した事実(日本船用工業会, 2006)を考慮すると、縦波の伝ば速度は縦弾性係数の平方根に比例するので、縦波の伝ば速度も増速する。その結果、式(2)による数値が大きくなるため、実験点が図中の直線に近づくとして推測される。図9に示すように、実験点は若干ばらつきがあるものの、ほぼ一對一の直線関係が得られ、被覆塗料の縦弾性係数と密度がわかれば、臨界塗膜厚さをある程度推定できる。

4. 結 言

ビニール樹脂塗料2種類とシリコン樹脂塗料3種類を用いて海水中でキャビテーション壊食試験を行い、キャビテーション壊食量に及ぼす塗膜厚さの影響を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 塗料などの表面被覆材料では、第1層の上塗り塗膜厚さが臨界塗膜厚さ以下になると、上塗り塗膜と第2層の下塗り塗膜の音響インピーダンスの組み合わせによってキャビテーション壊食速度が増加、減少、不変の挙動を示す。
- (2) 三層型制振材料のキャビテーション壊食に及ぼす層厚さの影響に関する森らの理論(森他, 1996)は、塗料の表面被覆材料にも適用できることを確認した。すなわち、臨界塗膜厚さ T_c は塗装材によって異なり、キャビテーション気泡崩壊による衝撃力の持続時間 Δt と縦波の伝ば速度 c から次式で求められる。

$$T_c = \frac{\Delta t \cdot c}{4}$$

文 献

- ASTM ed., ASTM G32-16 Standard method for cavitation using vibratory apparatus (2016), pp.1-20.
 服部修次, 伊藤隆基, 森啓之, 高分子材料の耐キャビテーション壊食性, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.705(2005), pp.838-843.
 北條英光, 津田健, 高分子材料のエロージョン性, 潤滑, Vol.30, No.4(1985), pp.233-238.

日本船用工業会, 平成 17 年度先進的海洋・造船塗装の開発研究報告書(2006), 日本財団図書館.

Kallas, D. and Lichtman, J., Environmental effect on polymeric materials, 1(ed. by Rosato, D. V. & Schwartz, R. T.), John Wiley & Sons (1968), 223(5).

桑島隆志, 伊丹良治, 内航船の船体汚損と入渠時機に関する一考察, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.44, No.5(2009), pp.782-786.

Lichtman, J. and Kallas, D., Erosion resistance of coatings methods for evaluating erosion (cavitation) damage, Materials Protection, Vol.4, No.40 (1967), pp.40-45.

森啓之, 柴田勝博, 服部修次, 岡田庸敬, キャビテーション気泡崩壊圧の伝ば挙動と壊食量, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.62, No.600 (1996), pp.1820-1826.

森啓之, 柴田勝博, 服部修次, 岡田庸敬, キャビテーション気泡崩壊圧の伝ば挙動から考察した表面被覆材料の壊食, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.63, No.615 (1997), pp.2424-2430.

岡田庸敬, 岩井善郎, 藤枝徹, 栗津薫, キャビテーション・エロージョンにおける硬質クロムめっきの効果, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.53, No.496 (1987), pp.2203-2210.

Sato, K., Takahashi, T., Akizawa, H., Saotome, Y., Inoue, K. and Miyazaki, Y., Some considerations in energy conservation of fishing boats, Japan Institute of Navigation, Vol.71, September (1984), pp.11-21.

Topchiashvili, M. I., Andrianov, K. A. and Shalnev, K. K., Use of polymeric materials for protection against cavitation erosion, IAHR/AIRH Symposium 1970, Stockholm (1970), pp.1-7.

References

ASTM ed., ASTM G32-16 Standard method for cavitation using vibratory apparatus (2016), pp.1-20.

Hattori, S., Itou, T. and Mori, H., Cavitation erosion resistance of high polymer materials, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.71, No.705 (2005), pp.838-843 (in Japanese).

Hojo, H. and Tuda, K., Erosion Behavior of plastic materials, Lubrication, Vol.30, No.4 (1985), pp.233-238 (in Japanese).

Japan Marine Equipment Association, Development research report of advanced marine / shipbuilding coating in 2005 (2006), The Nippon Foundation Library (in Japanese).

Kallas, D. and Lichtman, J., Environmental effect on polymeric materials, 1(ed. by Rosato, D. V. & Schwartz, R. T.), John Wiley & Sons (1968), 223 (5).

Kuwashima, T. and Itami, Y., Considerations of dry dock time and hullstain of coastal ships, Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, Vol.44, No.5 (2009), pp.782-786 (in Japanese).

Lichtman, J. and Kallas, D., Erosion resistance of coatings methods for evaluating erosion (cavitation) damage, Materials Protection, Vol.4, No.40 (1967), pp.40-45.

Mori, H., Shibata, K., Hattori, S. and Okada, T., Cavitation erosion based on the propagation of stress waves (Result of 3-Layer damping materials), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.62, No.600 (1996), pp.1820-1826 (in Japanese).

Mori, H., Shibata, K., Hattori, S. and Okada, T., Cavitation erosion of coating materials based on the propagation of stress waves, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.63, No.615 (1997), pp.2424-2430 (in Japanese).

Okada, T., Iwai, Y., Fujieda, T. and Awazu, K., Effects of hard chromium plating on cavitation erosion. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.53, No.496 (1987), pp.2203-2210 (in Japanese).

Sato, K., Takahashi, T., Akizawa, H., Saotome, Y., Inoue, K. and Miyazaki, Y., Some considerations in energy conservation of fishing boats, Japan Institute of Navigation, Vol.71, September (1984), pp.11-21.

Topchiashvili, M. I., Andrianov, K. A. and Shalnev, K. K., Use of polymeric materials for protection against cavitation erosion, IAHR/AIRH Symposium 1970, Stockholm (1970), pp. 1-7.