

## 鶴洋丸のプロペラ塗装効果の実験—I

荒木 猛, 今田 忠志, 松山 晃, 西矢 豊就

Experimental Effect of Propeller-Coating  
of Training Ship Kakuyo Maru—ITakeshi ARAKI, Tadashi IMADA, Akira MATUYAMA  
and Toyonari NISIYA

While ships are constructed and after leaving dock, the bottom and the propeller of ships are smooth and clean, however, marine fouling animals adhere to the bottom and the propeller of anchored ships for a long time in harbour. As a result, frictional resistance of ships hull and a shaft horse power of ships increase. Therefore, the ships hull and the propeller of ships are cleaned and painted again in the dock.

The hull of Training Ship Kakuyo Maru had been painted self-polishing anti-fouling paint (SP type A/F) from 1978 to 1991, however, the SP type A/F were not used at present because of the ocean pollution.

In this study, prevention effects of marine fouling animals adhere to the bottom and the propeller which coated paint was made of a silicone resin, were examined.

As a result, it is seemed that the propeller coated with silicone resin prevented adhere to marine fouling animals, promoted decrease of frictional resistance, it turned out the ship speed didn't decrease and fuel consumption value didn't increase during this voyage.

**Key Words:** propeller-coating; プロペラ塗装, marine fouling animals; 海洋付着動物, shaft horse power; 軸馬力, ship speed; 船体速力

## 1. はじめに

海洋を活動の場とする船舶の船体浸水表面およびプロペラは、新造時や出渠直後は非常に平滑で清浄である。しかしながら、航海時間の増加に伴ってこれらの塗装面は、傷みや海洋付着動物（以下付着動物とする）の付着により次第に表面粗度は大きくなる。そして船体摩擦抵抗は増加し、推進機関の軸馬力（Ne）を増大させる。その結果、シーマージンは年2～3%増加し<sup>1)</sup> 推進機関はトルクリッチ状態となる。したがって、就航中の船舶を効率良く省燃費運航するには、船体の浸水表面とプロペラ表面を常に滑らかに保つことが大変重要である。このため、一般に船舶は定期的に入渠して、船底およびプロペラを洗浄し船底のみを再塗装している。

一方、プロペラは表面を十分に研磨し清浄な状態で、最大のプロペラ効率を発揮させて使用すべきである。しかし、近年はプロペラの防汚と防食の目的<sup>2)</sup> で、塗装する船舶が多くなっている。船体への付着動物の付着を防止するため上塗り塗料として、1978年にTPT（トリフェニル錫化合物）等有機錫を含む船底塗料2号（A/F）の使用が許可された。しかしながら、A/F塗料に含まれる有機錫は海水に溶解し、しかも溶出した有機錫は港湾等閉鎖性の高い海域においては、蓄積して海洋を汚染するばかりでなく、食物連鎖を介して人

体への影響<sup>3)</sup> が大きな社会問題となったために1994年には全面的に禁止となった。

練習船鶴洋丸は、毎年4月に入渠する運航計画が組まれている。そして、1978～1991年迄の入渠工事ではプロペラには自己研磨型防汚塗料（SP型 A/F）を使用していた。著者等はプロペラ本来の無塗装な姿への回帰を視野に入れながら、市販されている防汚塗料の組成とその効果を広く調査の結果、無公害のシリコン系特殊合成樹脂塗料バイオクリンDX<sup>4, 5)</sup>（B-DX）を、プロペラ用塗料として採用した。そこで1992年および1994年の入渠前と出渠後にそれぞれ推進性能試験を行った結果から、B-DXの防汚効果を検証した。一方、本船は年間200日程係船するので係船状態の防汚効果を調査するための基礎実験として、金属試験片にB-DXを塗装して、本船定繫港である長崎市内小江港の海中へ浸漬し静止状態での付着動物の付着状態と塗装膜の剥離状態を観察した。これらの結果について若干の知見を得たので報告する。

## 2. 材料と実験方法

実験に用いた鶴洋丸の主要目は、総トン数1044.38ton、全長58.00m 主機関連続最大馬力2800ps×600/265rpmである。プロペラの主要目をTable 1に、また、プロペラ塗装の方法

Table 1. Principal particulars of controllable pitch propeller

|                      |                                |
|----------------------|--------------------------------|
| Type                 | KAMOME CPC - 80                |
| Number of blade      | 3                              |
| Diameter             | 2,850 mm                       |
| Principle pitch      | 1,140 mm                       |
| Developed area ratio | 0.45                           |
| Material             | Aluminum, bronze and cast iron |

Table 2. Specification of painting for propeller blade

| Process                     | Treatment and paint                | Solvent  | Frequency | Drying time |
|-----------------------------|------------------------------------|----------|-----------|-------------|
| 1 Burnish of blade surface  | Used of sand paper                 |          |           |             |
| 2 Primary coat              | Coated with paint for prevent rust | Need not | 1         | 3 hour      |
| 3 Touch up paint first coat | Bioclean DX                        | Thinner  | 1         | 6 hour      |
| 4 Second coat               | Bioclean DX                        | Thinner  | 1         | 6 hour      |

## Remark

No. 80 sand paper was used by first experiment and No. 60 sand paper was used by second experiment.

をTable 2 に示す。

塗装の方法はプロペラ表面の下地処理として、付着動物を取り除いた後をサンドペーパーにて研磨する。そして、プロペラ表面を脱脂してから第一番目の塗装としてプライマー塗料を使用し、3時間の乾燥時間を設定した。仕上げ塗装はB-DXの2回塗り乾燥時間を6時間とした。1992年のプロペラ塗装は塗料をSP型A/FからB-DXへと変えて防汚効果の違いを調査した。また、1994年には研磨材の番数を80番から60番へと変えるとともに、脱脂溶剤を油性シンナーからアセトンに変更し、B-DX塗装膜の密着度を調査した。実験船での1992年、1994年の推進性能実験で、それぞれの入渠前に行った実験をExp-1とExp-2、出渠後をExp-1'とExp-2'とした。

1992年および1994年に行った実験船のプロペラへのB-DX塗装後の状態をFig. 1に示した。

Fig. 1によると、透明なB-DX塗装膜を通して黄色のエッチングプライマーがよく見える。また、塗装膜の厚を計測したところ平均0.03mmであった。

また、金属試験片から付着動物の付着状態の調査を行った基礎実験における試験片への塗装後の状態を、Fig. 2に示した。図中のa、bおよびcは基礎実験に用いた試験片材料であり、船体及びプロペラ基材に類似した鉄板、銅板およびアルミニウム合金板、の3種類である。各試験片は、板厚1~3mmのものをそれぞれ、長さ250mm×幅100mmに切断

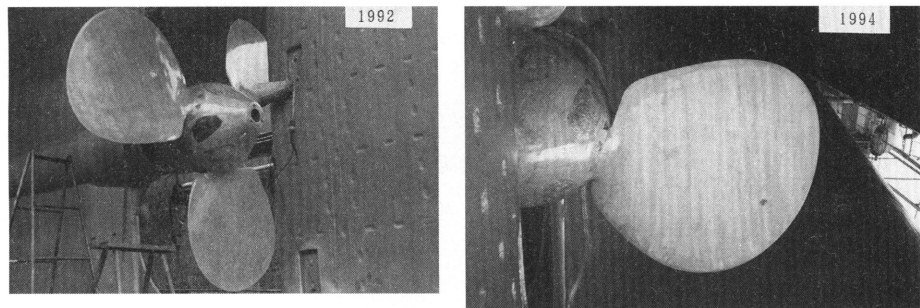


Fig. 1 Painting-coat of propeller blade at 1992 and 1994.

し、海中に吊り下げるため開穴して長さ2000mmのロープに取り付けた。なお、aの鉄試験片は全面塗装の試験片と浸漬中の電気腐食による衰耗状態を観察するために、片面には50φ×20mmの保護亜鉛を取り付けた試験片の2種類を製作した。cのアルミニウム合金板の片面は付着動物の付着状態良く知るために無塗装とした。

## 3. 係船時防汚効果調査の基礎実験

実験は1992年5月~1993年3月までの期間行ない、係留時B-DXの防汚効果を調べるために試験片は取り替えずに行った。また、これらの試験片は海中のプロペラと同一環境にするために、本船から距離3m離れた海面下約2mの位置の係留岸壁に固縛して吊した。そして、付着動物の付着状況と塗装膜の剥離を目視による定性的観察を主に行った。さらに、海水温度の変化と港の地形の相違が付着動物の付着状況にどのような影響を及ぼすかを知るために実験海域の環境を調査した。

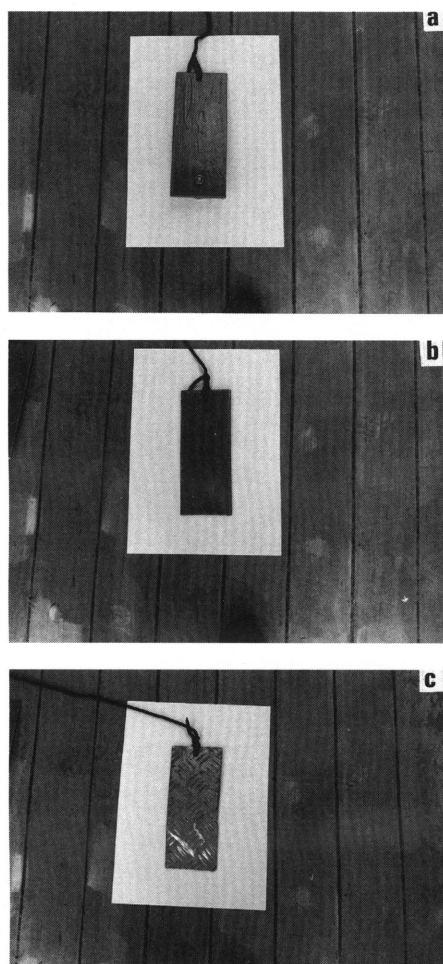


Fig. 2 Test peices by hand made.  
material

- a : iron with zinc,
- b : sheet copper,
- c : aluminium.

実験海域の港は、川の水が流れ込み海水の塩分濃度は25584 ppmと薄くまた、港口が外洋に向けて開いた地形であるが係留岸壁から距離約300m沖には、防波堤が築かれ港口が狭く閉鎖海域となっている。水温は、春季22~23℃、夏季24~26℃、秋季22.5~23℃、冬季16~18℃であった。また、潮流は干潮および満潮時の平均0.04ktと緩やかな流れである。試験片を海中より取り出し付着動物の付着状態を観察した時期は、付着動物の繁殖が盛んな夏季（7月）、やや緩やかになる秋季（10月）、そして繁殖がほとんど停止する冬季（2月）の3回である。

#### 4. 防汚効果検証の実船実験

実験Exp-1およびExp-2は、気象と海象が平穏でプロペラピッチ角度 ( $\theta_p$ ) は17° に設定し、航海速力を全速前進から半速前進へと段階的に変える状態で行った。そして、船体および推進機関の各運転諸元の値を計測した。これらの計測方法は、前報<sup>6)</sup>に報告した通りで、その内で負荷率 (L),

ポンプマーク (PI), プロペラピッチ角度 ( $\theta_p$ ), 主軸回転数 ( $N_p$ ), 船体速力 (V), 燃料消費量 (G), 軸馬力 (PS), 燃料消費率 (be) の8項目の計測値を基に、それぞれの単位当たり換算し、平均値を求めデータとした。

#### 5. 結果および考察

##### 5.1 基礎実験

B-DX塗料の防汚原理は、塗装膜が低臨界面張力のため撥水性があることを利用している。すなわち、シリコン系合成樹脂を石油系精製半固体物質で変性し塗装膜としているので、付着動物が体内から分泌する接着性物質が付着できないか、または付着力が弱められるからである。加えて分泌液が不活性なので、かりに付着動物が付着しても付着面積が減少して付着力は低下する。したがって、塗装膜表面が平滑になりやすい。しかも、塗料の低摩擦係数特性と塗装膜の弾性により付着動物が付着しても、わずかな物理作用により脱落してしまい汚損を防止する。

Fig. 3に、基礎実験におけるB-DX塗装膜の経時変化を示した。①は、浸漬後2箇月(1440h)経過した7月に観察した状態を示す。右側2枚は鉄板の試験片、左側は銅板とアルミニウム合金板である。各試験片共に卵から孵化して成長過程にあるカンザシゴカイ類、フジツボ類が付着している。しかし、その付着数は試験片1枚に5~6個であり、これらは指で押すと極く簡単に脱落し塗装膜を傷めることはなかった。塗装膜は剥離が全く無く試験片との密着は非常に良好であった。

②と③は、5箇月(3600h)経過した10月の状態を示す。②の右側は銅板および左側はアルミニウム合金板を示し、アルミニウム合金板の無塗装面にはシロホヤ (*Styela plicata*) の付着が見られた。③は鉄板試験片を示し、各試験片ともすでに付着していたカンザシゴカイ類、フジツボ類は大きく成長しているのがわかる。付着動物の付着状況は、試験片の材料と、その形状とに影響を受け付着数が相違した。特に、鉄板試験片の保護亜鉛を取り付けた面は付着数が多かった。保護亜鉛の取り付け面とその反対の面への付着状況に基づいて推察すると、付着動物はまず、無塗装の保護亜鉛に付着して成長し、その後開けた穴を通して塗装面へと増殖していったと考えられる。この原因については、不明であるが非常に興味ある現象と考えられ今後究明すべき課題である。また、保護亜鉛を計量したところその衰耗はほとんどなかった。これは鉄板試験片をB-DXで塗装したことにより、保護亜鉛の電気腐食が極めて少なかったと考えられる。全ての付着動物は布で極く簡単に拭き取るとができ、また、この観察では、全試験片の塗装膜の剥離は全く見られなかった。浸漬後9箇月(6480h)経過した1993年2月の観察においては、全試験片に部分的剥離が認められた。これは、試験片が浸漬中波浪の影響により岸壁に衝突し、その衝撃による結果と推察される。この剥離部分には、カンザシゴカイ類、フジツボ類が多く付着していた。また、吊り下げ用ロープにはシロホヤに加えムラサキイガイ (*Mytilus galloprovincialis*) の付着も見られた。1993年3月をもって、基礎実験を終了したが夏季~

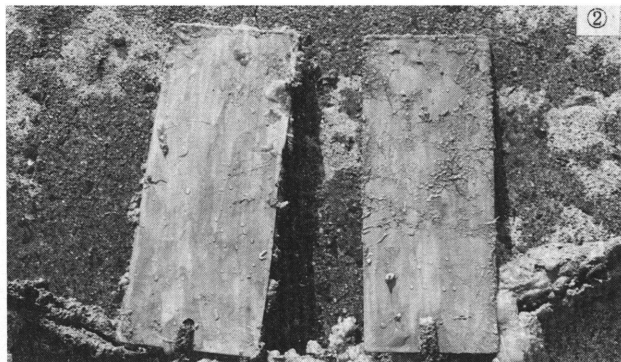
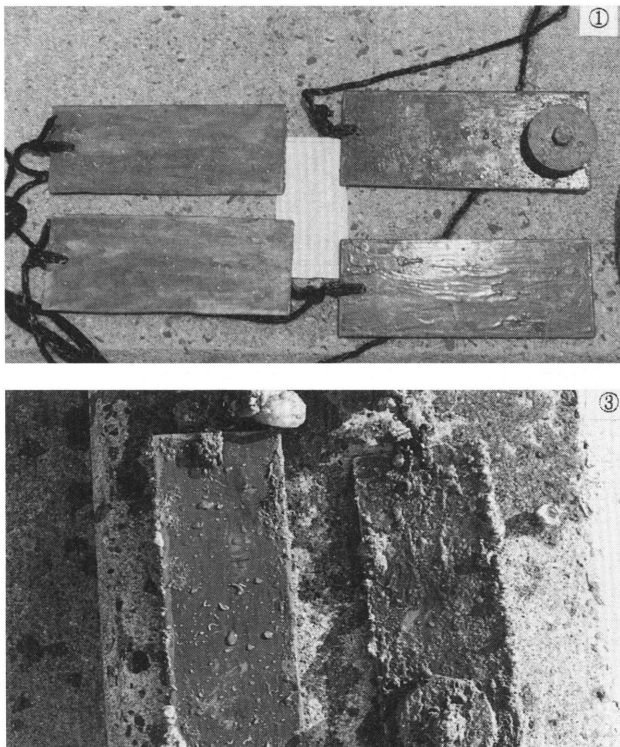


Fig. 3 Observation of prevention of attaching fouling animal by anti-fouling paints Bioclean.

- ① : right upper side is iron with zinc, lower side ; only iron at July 1992.  
left upper side is sheet copper, lower side ; aluminum at July 1992.
- ② : right side is copper, left side ; aluminum at December 1992.
- ③ : right side is iron with zinc, left side ; only iron at December 1992.

冬季の観察から、付着動物は春に産卵して孵化し、海水温度が上昇する夏季に繁殖は盛んとなり秋季には大きく成長し、冬季にその繁殖は衰えるのがわかった。

一般にわが国沿岸における付着動物の繁殖は、夏季が最も盛んで冬季は衰える。報告<sup>7)</sup>と小江港の場合も同じことが言える。

5.2 プロペラ回転数—船体速力

船舶が航走中に生ずる摩擦抵抗は、水中の船体外板、いわゆる浸水面積に比例し船体速力 (V) のほぼ自乗に比例する<sup>8)</sup>。また、船舶を推進するプロペラ有効仕事は軸馬力 (Ne) に、そして、Vはスリップ率が一定の範囲なら主軸回転数 (Np) にそれぞれ比例する<sup>9)</sup>。実船実験における推進性能の計測結果をTable 3 に示す。表はθpをほぼ17° に設定しNp

を最高回転数から、操業実習での投網時のNp回転数である3/5回転数までを、段階的に変化させて船体と推進機関の運転諸元を計測した。θpが17°の時、実験結果のVとNpとの関係から計算した直線回帰式は次のように求められる。

Exp-1の時  

$$V = 4.353 \cdot 10^{-2} \cdot Np + 1.17 \quad \text{--- (1)}$$
 Exp-1'の時  

$$V = 4.542 \cdot 10^{-2} \cdot Np + 1.965 \quad \text{--- (2)}$$
 Exp-2の時  

$$V = 4.618 \cdot 10^{-2} \cdot Np + 1.642 \quad \text{--- (3)}$$
 Exp-2'の時  

$$V = 4.414 \cdot 10^{-2} \cdot Np + 2.41 \quad \text{--- (4)}$$

Table 3. Data of propulsion performance test

|    | Exp - 1              |       |        |        |        | Exp - 1'              |       |       |        |        | Exp - 2              |       |       |        |        | Exp - 2'              |       |       |        |
|----|----------------------|-------|--------|--------|--------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|----------------------|-------|-------|--------|--------|-----------------------|-------|-------|--------|
|    | before dock ( 1992 ) |       |        |        |        | after undock ( 1992 ) |       |       |        |        | before dock ( 1994 ) |       |       |        |        | after undock ( 1994 ) |       |       |        |
| Np | 160                  | 176   | 219    | 238    | 258    | 160                   | 179.6 | 219   | 239    | 258.6  | 160.9                | 181.3 | 221.6 | 240    | 264.4  | 149                   | 180   | 242   | 264    |
| L  | 13.4                 | 21.9  | 44.2   | 56.8   | 72.4   | 11.9                  | 16.7  | 35.5  | 48     | 63.3   | 13.4                 | 21.9  | 44.2  | 56.8   | 72.4   | 8.8                   | 19.5  | 51.5  | 67.2   |
| Pi | 12.4                 | 14    | 18     | 21.3   | 24.1   | 11.3                  | 12.1  | 15.7  | 18.9   | 21.7   | 13                   | 14.6  | 19.6  | 22.5   | 24     | 11                    | 12.6  | 18.6  | 22.1   |
| θp | 17                   | 17    | 17     | 17     | 17     | 17                    | 17    | 17    | 17     | 17     | 17                   | 17    | 17    | 17     | 17     | 16.9                  | 16.9  | 16.9  | 16.9   |
| V  | 8                    | 9     | 10.6   | 11.7   | 12.3   | 9.2                   | 10.1  | 12    | 12.9   | 13.6   | 8.8                  | 10    | 11.8  | 12.5   | 13     | 9.1                   | 10.2  | 13.1  | 14.1   |
| G  | 4.3                  | 122.3 | 214.7  | 271.2  | 341    | 76.7                  | 99.6  | 176.7 | 172.5  | 169.1  | 94.3                 | 131.6 | 236.5 | 300.7  | 321    | 61.2                  | 112.1 | 248.2 | 317.4  |
| Ne | 376.1                | 613.3 | 1237.1 | 1591.5 | 2036.7 | 332.5                 | 468.4 | 992.5 | 1344.7 | 1770.9 | 434.3                | 673.2 | 1369  | 1773.7 | 1941.2 | 278                   | 545   | 1443  | 1881.5 |
| be | 224.1                | 199.4 | 173.5  | 170.4  | 167.4  | 230.8                 | 212.6 | 177.7 | 172.5  | 169.1  | 217.1                | 195.5 | 172.7 | 169.5  | 168.4  | 241.3                 | 205.4 | 171.9 | 168.7  |

Remarks: Various conditions throughout the above measurements were:  
 1) displacement of Kakuyo Maru: 1600 ~ 1700 tons  
 2) smooth sea with portbow waves and light air(1~2m/sec.)  
 Np : Revolution per minute of propeller (rpm)  
 L : Load factor (%)  
 Pi : Fuel pump index (mm)  
 θp : Propeller pitch angle (°)  
 V : Ship speed (knot)  
 G : Consumption value of fuel oil (Kg/h)  
 Ne : Shaft horse power (PS)  
 be : Consumption rate of fuel oil (g/PS · h)

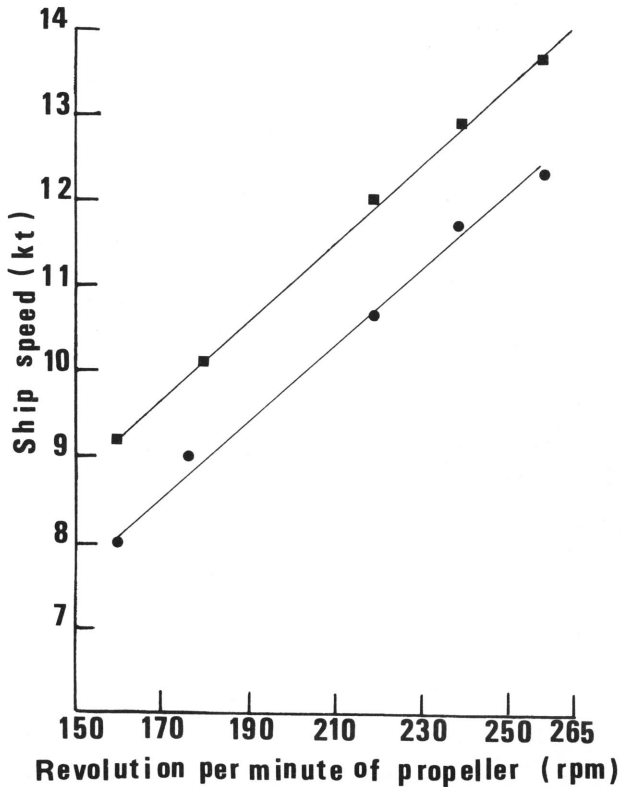


Fig. 4 Interrelation between ship speed (V knot) and propeller revolution (Np rpm) on first experiment.

Remarks

- — ● : measurements before dock,
- — ■ : after undock.

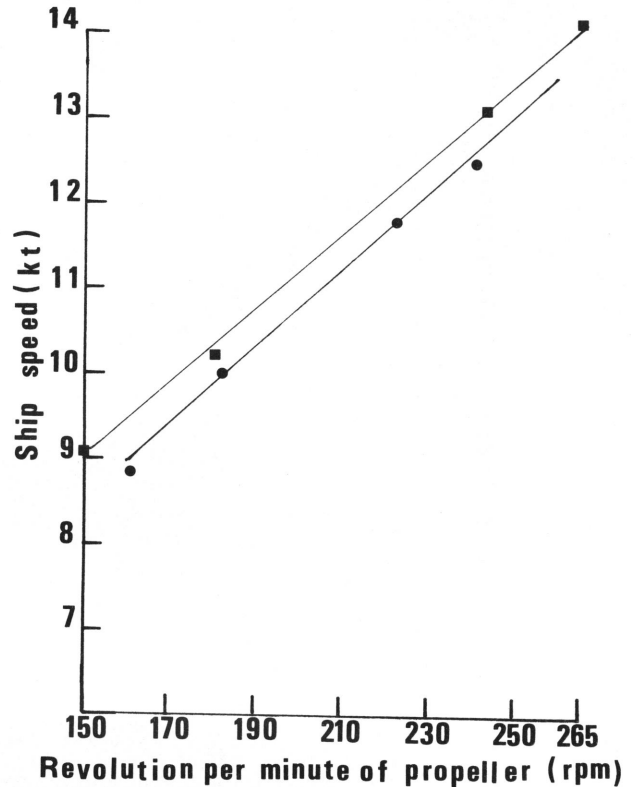


Fig. 5 Interrelation between ship speed (V knot) and propeller revolution (Np rpm) on second experiment.

Remarks

- — ● : measurements before dock,
- — ■ : after undock.

また、実験で得たVとNpとの関係を縦軸にV、横軸にNpをとり、Exp-1の場合をFig. 4, Exp-2の場合をFig. 5に示す。Np=160~255rpmの範囲でVとNpとの関係を与える(1)~(4)に式による回帰直線もそれぞれ示した。実験船の航海速度12.5ktでNpが255rpmの時の、出渠後と入渠前とのVの差を回帰直線からそれぞれ求めると、Exp-1では、1.2kt, Exp-2では0.25ktとなり共に出渠後のVは大きい。これは既に述べたように、出渠後、船体の浸水表面およびプロペラ表面が清浄な状態に回復してそれぞれの摩擦抵抗が減少したことを示している。Fig. 4とFig. 5の、それぞれのVの回帰直線を比較すると、入渠前後のVの差に入渠前および出渠後の大きな開きがある。すなわち、同一のNpにおいてExp-2の場合よりExp-1のVの差は4.8倍もある。この原因の一つは、防汚塗料をSP型A/F塗料からB-DX塗料へと変更した結果である。

Fig. 6は1994年出渠後、約5箇月経過したプロペラ羽根の水中写真である。プロペラには、全く付着動物の付着が見られず、また塗装膜の剥離も無い。そして、1995年の入渠時のプロペラ観察によると、プロペラ最先端部の塗装膜が斑状に剥離していたものの、B-DXはプロペラ表面の約97%の範囲で本来の塗装膜が認められた。これは、既述の通りプロペラへの塗装膜の密着度を高めるため、下地処理で使うサンド



Fig. 6 Photograph of propeller blade in underwater.

ペーパーの番手を小さくして荒目とし、また脱脂溶剤に脱脂力の非常に強いアセトンを使用した効果によるものと考えられる。その結果、B-DXは一年間を通じて防汚効果は残っていたと言える。しかしながら、プロペラ周速度の大きくなる先端部については、B-DX塗装膜の密着度を大きくする工夫が今後の課題である。

一般に、塗料の防汚効力が残っている出渠後6箇月迄は、

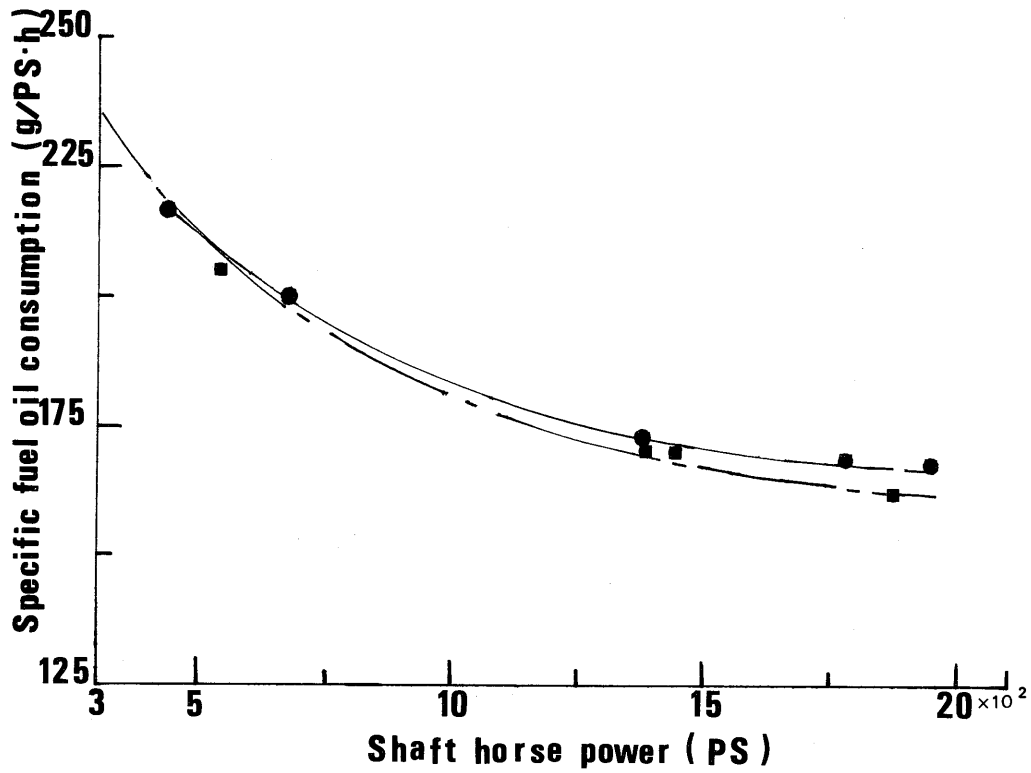


Fig. 7 Interrelation between specific fuel oil consumption (be g/ps · h) and shaft horse power (Ne ps) on first experiment.

Remarks

● — ● : measurements before dock, ■ — — ■ : after undock.

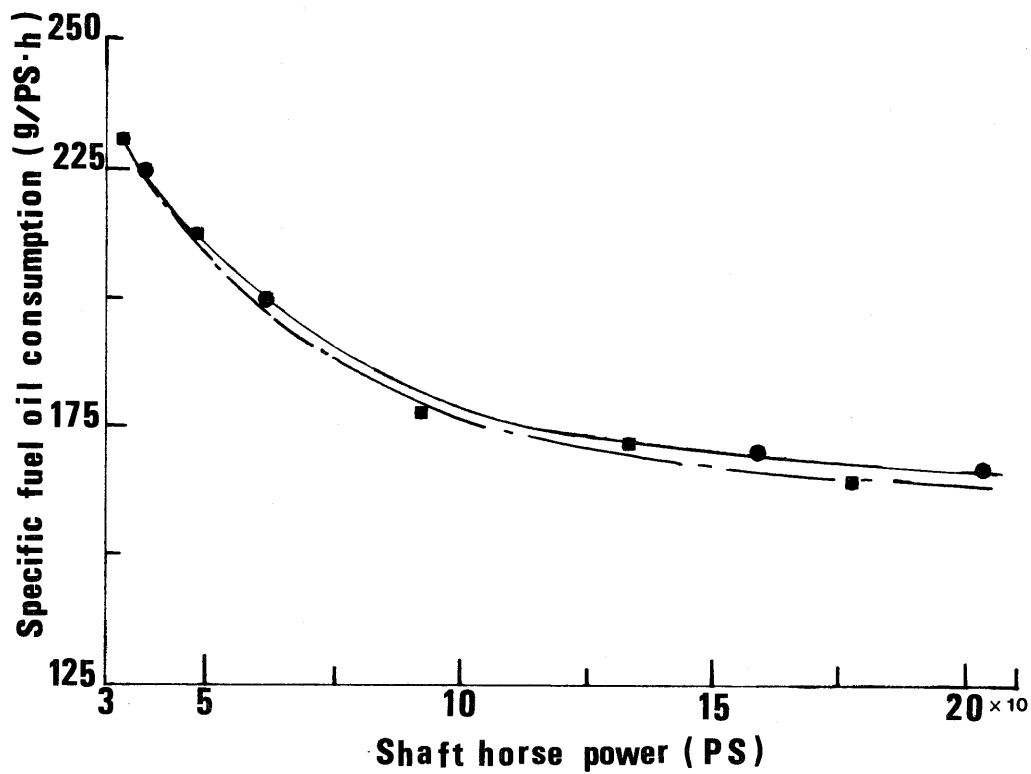


Fig. 8 Interrelation between specific fuel oil consumption (be g/ps · h) and shaft horse power (Ne ps) on Second experiment.

Remarks

Symbols are all same in Fig. 7

塗装膜は非常にきれいで平滑であるためにVは余り低下しないが約8~10箇月を過ぎるとその防汚効力は殆ど失われて、海藻やカキの付着でVは著しく低下するとされている<sup>10, 11)</sup>。

### 5.3 燃料消費率-軸馬力

船用ディーゼル機関は、負荷率(L)60~100%の使用基準で設計される。したがって、低負荷域での連続運転は燃料噴射系統及び掃・排気系統の作動不良から燃焼が悪化する。その結果、燃料消費率(be)は大きくなる。過負荷域では、シリンダ内に噴射された燃料の燃焼速度は機関回転数に比例して大きくならない。これに反して、燃料噴射ポンプの一回当たりの噴射量は大きくなる。このため、空気過剰率は小さくなり、給気量不足から燃焼不良を起こす。すなわち、beは大きくなる。実船実験のExp-1とExp-2における、実験結果のbeとNeとの関係からべき乗回帰分析した式は次のように求められる。

$$\text{Exp-1の時} \\ be = 6.2809 \cdot 10^2 \cdot Ne^{-0.1764} \quad \text{--- (5)}$$

$$\text{Exp-1'の時} \\ be = 7.0462 \cdot 10^2 \cdot Ne^{-0.1946} \quad \text{--- (6)}$$

$$\text{Exp-2の時} \\ be = 5.965 \cdot 10^2 \cdot Ne^{-0.1684} \quad \text{--- (7)}$$

$$\text{Exp-2'の時} \\ be = 7.0131 \cdot 10^2 \cdot Ne^{-0.1922} \quad \text{--- (8)}$$

縦軸にbeを横軸にNeをとり、Ne=300~2100PSの範囲で(5)、(6)式をFig.7に(7)、(8)式をFig.8に示す。両図中の実線はExp-1の回帰線を示し、一点鎖線はExp-2の回帰線を示す。また、●と■の符号は計測点のNeにおけるbeを計算して求めた値を示す。Exp-1とExp-2において入渠前後の同一Neに対するbeの差は、負荷率、60%(1680PS)で3.6g/PS・hおよび2.51g/PS・hとなる。そこで出渠後、1680PSで航走したと仮定すれば24時間燃料消費量は燃料の比重を約0.85(l/kg)とするとそれぞれ、171.8l/dayと119.8l/dayを節約できることとなる。すなわち、実験当時の燃料単価(37円および30円)で燃料費を

換算するとそれぞれ、6356.6円および3594円の節約となる。Fig.7, 8によると、負荷率、50%を境にしてbeは高負荷域では負荷の増加につれて減少する。しかし、低負荷域では燃料噴射系統が適合しないことと、過給機特性が悪化するのべは急激に増加する。

### まとめ

今回の、考察から得られた結果は、次の通りである。

- 1) プロペラに使用する防汚塗料は、その選定が非常に重要である。また、B-DX塗装膜の防汚効果は、一年間十分に有効である。さらに、出渠後一年間経過した時のSP型A/F塗料膜に比較して、Vの低下は1/4.8以内におさえられた。また、beは30.3%も大きく減少した。
- 2) 出渠直後の船体およびプロペラが、清浄な状態のVを基準にすると船体およびプロペラの汚損状況は、Vの経時低下から推定できる。したがって、 $N_p - V$ の相関資料をデータバンク化すると、最適な入渠時期の選定が可能になる。

おわりに、本研究にご協力頂いた秋重祐章船長および機関部の諸氏に深謝いたします。

### 文 献

- 1) 松井利幸: マリンエンジニア誌, 444, 34 (1984.)
- 2) 佐藤 要 他5名: 日本航海学会誌, 71, 15 (1984.)
- 3) 佐藤敬一郎: マリンエンジニア誌, 529, 7 (1991.)
- 4) 中国塗料(株): バイオクリン組織表
- 5) 小川量也 他1名: 日本船用機関学会誌, 2534 (1998.)
- 6) 西矢豊就 他5名: 本誌, 68, 72 (1990.)
- 7) 北村 等 他1名: 本誌, 74/75, 26 (1993.)
- 8) 大串雅信: 理論船舶工学(下), 海文堂, 東京100 (1958.)
- 9) 隈元 士: 船用プロペラと軸系, 成山堂, 東京 61 (1985.)
- 10) 大串 雅信: 理論船舶工学(下), 海文堂, 東京104 (1958.)
- 11) 高城 清: 実用船舶工学, 海文堂, 東京, 163 (1975.)