低摩擦型船底防汚塗料の実船評価

- 船底防汚塗料の低摩擦化への挑戦

矢 野 吉 治 山 盛 直 樹 河 合 和 弥

Actual Ship Evaluation of Low Friction Type Anti-Fouling Bottom Paint
-Challenge towards Reduction of Frictional Resistance of Bottom Paint

Yoshiji YANO, Naoki YAMAMORI, Kazuya KAWAI

The evaluation test of a newly developed self-polishing anti-fouling bottom paint has been carried out by the training ship Fukae-maru (449G/T) of the graduate school of maritime sciences, Kobe University. In the past four years, 4 types of bottom paints, including both low-friction coating and conventional paint types, have been evaluated through speed trials at Harima-Nada of the Seto Inland Sea. The hull frictional resistance based on the viscosity of sea water accounts for 70-80% of the total resistance at low speed range and accounts for 40-50% at high speed. Reducing the frictional resistance of the bottom shell plating leads not only to a decrease of ship's fuel consumption but also to a reduction of greenhouse gas emissions. Results of speed trials show a fuel saving of more than 4 % with low friction coatings as compared to that with conventional anti-fouling bottom paints.

1. はじめに

航行中の船体には摩擦抵抗、造波抵抗、形状抵抗や空気抵抗の他にうねりや風浪による衝撃などが作用し、船はこれら全ての抵抗と推進器が発生する推力とが釣り合った速力で航走する。さらに荒天時には船体動揺による抵抗の急激な変動から速力の低下が起こる。これらの抵抗の内、水の粘性に基づく船体の摩擦抵抗は、一般に低速域で全抵抗の70~80%を占め、船の速力が増すにつれて他の抵抗が増加し、高速域では全抵抗の40~50%程度になるとされ、肥大船では摩擦抵抗の割合がさらに増大する。このことから船体と水との摩擦抵抗を低減することは船の燃料消費量を削減すると同時に、昨今、地球規模で喫緊の課題である温室効果ガスの排出削減につながる。

近年、船体の摩擦抵抗を低減するために、海洋付着生物（以後、付着生物という）の船底への定着を阻止すると同時に低摩擦性を付加した新型の船底防汚塗料が登場している。神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船深江丸（以後、深江丸という）は1987（昭和62）年7月の進水以来、水線下に自己研磨型船底防汚塗料（以後、船底塗料という）を採用し、年1回の入渠工事において塗装する。2008年2月から新開発の低摩擦型船底塗料の評価試験に着手したが、2010年2月には基礎データ収集のために従来型の船底塗料を再

び試験塗装し、以後、1年間隔で低摩擦型に続く低摩擦発展型塗料の評価試験を展開する。

本稿では付着生物と船底塗料や船底整備を概説するとともに、従来型に続く3種類の低摩擦型船底塗料の実船での評価について、運航に直結する速力と燃料消費の観点から最新のデータを基にその現状を述べる。

練習船深江丸の主要目を表1に示す。

表1 深江丸の主要目

1	総トン数：449トン(国際総トン数：674トン)
2	全長：49.95メートル
3	幅：10.00メートル
4	深さ：6.10 / 3.75メートル
5	喫水：3.20メートル
6	航行区域：近海区域(GMDSS A2水域) 非国際
7	主機関：ディーゼル 1,100キロワット×1基
8	推進器：左回り 4翼CPP(可変ピッチプロペラ)
9	横移動装置：バースラスタ, スタンスラスタ
10	航海速力：12.5ノット(時速23キロメートル)
11	航続距離：3,000海里(5,500キロメートル)
12	船級：JG
13	最大搭載人員：64人(学生48人)
14	満載排水量：777トン
15	清水搭載量：82トン(100% FULL)
16	燃料搭載量：64KL (80% FULL)
17	水線面下外板表面積：518平方メートル
18	TPC(トンパーセンチ)：3.3(ton/cm)
19	就航年月日：1987(昭和62)年10月14日

2. 付着生物と船底塗料

水上輸送の始まりとともに水線下船底の保守とフジツボ類や藻類などの付着を阻止しながら水の抵抗を抑える目的で船底塗料はこれまで幾多の試行と改良がなされてきた。近代の鋼船にとって防汚塗料は防錆塗料とともに不可欠な装備であるにもかかわらず、自然界相手のこの分野では未だに決着を見ない実情にある。

2.1 付着生物

付着生物には動物性と植物性があり、動物性で外殻をもつものの代表にフジツボ類、イガイ類やセルプラが、外殻を持たないものにヒドロ類やホヤ類がある。また、植物性ではアオノリやアオサなどの藻類と珪藻類があり、前者には緑藻、褐藻及び紅藻が、後者には緑色及び黒色スライムがある。図1に船底に付着する主な海洋生物を示す。船脚が遅く、かつ長期間停泊する深江丸では海水温が上昇する春から夏にかけてフジツボ類の活性が高く、防汚措置を施していない推進器などに一旦付着すると頑強で容易には脱落しない。フジツボ類はエビやカニと同じ分類で、ノープリウス幼生期のひと月ほどの間に6回程度脱皮を繰り返す。その後、固着のみを目的とするキブリス幼生に変態する。この幼生期では繁殖本能から同族を求めて移動し、船底などの付着に適した場所が見つかったら頭部のセメント腺から固着物質を分泌して着底し、幼体期を経て成体へと成長する。近年、日本近海で見られるようになったヨーロッパフジツボやアメリカフジツボは外国から船底に付着して運ばれてきた帰化種といわれる。

図1 船底に付着する主な海洋生物

2.2 TBT 船舶用塗料

1960年代から付着生物の阻止に極めて有効な有機スズ化合物 (TBT: Tributyl Tin) が船底塗料の素材として広く用いられた。しかし魚介類への蓄積性と強い環境ホルモンの作用が顕在化し、IMO (国際海事機関) において TBT 塗料の使用を禁止する気運が高まった。このような中、2001年の「船舶の有害な防汚方法の規則に関する国際条約」において『2003年1月1日以後の TBT 船舶用塗料の新たな塗布の禁止』に続

き、『2008年1月1日以後における TBT 船舶用塗料の船体への存在の禁止』が発効した。

2.3 自己研磨型船底防汚塗料 (SPC)

1970年代のオイルショックを契機に船舶の運航コスト削減と省エネルギー化を目的として登場した塗料に SPC (Self-Polishing Copolymer) がある。現在では船底塗料の主流を成し、最長 72 ヶ月仕様のものが登場している。船の航走により水との摩擦で塗膜表面が研磨され、防汚成分が常に表面に存在することで海洋生物の付着を阻止する。防汚剤を含有する船底塗料は『Biocidal Products: 殺生物剤』として殺虫剤や除草剤など同様の規制を受け、使用できる素材が国によって厳重に管理される。現状では亜酸化銅や亜鉛などのわずかに十数種に限られるが、一般にこれらは単独で用いられることはなく、船種や航行海域、航泊の状況や停泊環境など個々の事情を勘案し微妙に調査して塗装される。中でもその主流である亜酸化銅系の防汚剤はフジツボ類などの動物に対して有効であるが藻類などの植物には効きが弱いとされる。

3. 船底整備

入渠工事において船底を整備するが、船体と水との摩擦抵抗を極力抑えるため、過去の入渠のたびに塗り重ねてきた防錆及び防汚塗料を一掃するサンドブラストを数年に一度の周期で施工することが望ましい。サンドブラストでは細かく粉碎した鉱滓 (製鋼スラグ) を高圧空気により外板に吹き付けることで船底外板の表面を露出し、板厚計測の後、防錆と防汚塗装を順次施工。この工事により船底外板が新造時同様に若返る。図2は入渠直後の深江丸の船尾船底部を、図3は塗料の塗り重ねに起因する船底外板塗膜の剥離例を、図4は造船所におけるサンドブラストの施工風景を示す。また、図5は整備後の船尾船底部を、図6は船底塗膜を一新したドライドック注水中の深江丸を示す。

図2 入渠直後の船尾船底部

図3 船底外板塗膜の剥離例

図4 サンドブラストの施工風景

図5 整備後の船尾船底部

図6 ドライドック注水中の深江丸

4. 船底塗料の試験塗装と評価試験

2003年9月の入渠で深江丸の船底外板にサンドブラストを施工し、それまでの入渠工事で塗り重ねてきた防錆及び防汚塗料を一掃した。以後、入渠の度に船底塗膜剥離部の手入れと防錆塗装、最終仕上げとして水線下全面に防汚塗装を施すが、すでに10年が経過し、この間の塗料の塗り重ねと部分剥離などから船底塗膜表面自体の粗度がかなり進行している。新開発の低摩擦型船底塗料の評価試験が本格化する前年の2007年には従来型を試験塗装して基礎データを収集した。その後、2008年に低摩擦型を、2009年には従来型ではあるが、深江丸のように低速で航行し長期間停泊する船舶を想定して塗膜の溶出度を10%程度高めた改良従来型を試験塗装し、その有効性を検証した。さらに、2010年には基礎データを再度収集するために従来型をあえて塗装し、その後、低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型の試験塗装へと実船を用いた評価試験を実施した。この4年間、4回の試験塗装の概要は次のとおり。

4.1 従来型船底塗料（塗料A）

〈期間：2010年2月～2011年1月〉

亜酸化銅を防汚素材とする船底塗料であり、現在では広く用いられている。一般に出渠後の時間経過に伴う塗膜表面粗度の進行は不可避とされ、速力が次第に低下し燃料消費量は漸増する。

4.2 低摩擦型船底塗料（塗料B, C, D）

低摩擦・低燃費型塗料（LFC: Low Friction Coating, Less Fuel Consumption）と呼ばれる塗料はマグロやイルカなどが効率よく遊泳するメカニズムにヒントを得て開発された新型塗料でヒドロゲル技術が応用されている。船の航走に伴って塗膜表面細部の凹部に流れが束縛された水の層（Water Trap Layer）を形成し、この層の発現により塗膜表面凹凸の段差を減じると同時に塗膜表面からの水流の剥離をある程度効果的に抑える。低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型の試験期間は次のとおり。

- ・Ⅰ型（塗料B）〈期間：2011年2月～2012年1月〉
- ・Ⅱ型（塗料C）〈期間：2012年2月～2013年1月〉
- ・Ⅲ型（塗料D）〈期間：2013年2月～2014年1月〉

なお、低摩擦Ⅲ型の8月以後については速力試験時の気象海象条件に恵まれなかったこと、推進器への生物付着、主機関負荷の関係でCPPの前進翼角を最大でも17.6度までしか上げることができなかったことなどの理由から前進18.0度の速力試験のデータは収集できていない。個々の速力試験には不特定の外乱に起因する誤差が含まれることを前提に、速力試験のデータとして、従来型で24回、低摩擦Ⅰ型で19回、同Ⅱ型で21回、同Ⅲ型では18回を採用した。

5.4 速力試験区間における速力と燃料消費量の推移

図9は2010年2月の出渠から2013年7月までの3年半、表2に示した4種類の塗料について、速力試験の結果から得られた速力と燃料消費量の推移をその平均的な傾向を示す直線とともに表す。既述のとおり、各速力試験は同一条件で実施することができないことからばらつきが見られるが、従来型の船底塗料は運航の現場でこれまで経験的に示唆されているように出渠後の時間経過に伴い速力が漸減し燃料消費量は漸増している。また、低摩擦型3種類の速力は概ね横ばいに推移したが、燃料消費量は漸増傾向を示した。

6. 燃費改善率の試算

各塗料の1年間における速力試験の結果、平均排水量にはそれぞれ若干の差があるものの、従来型に比べて低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型の船底塗料では年間の平均速力がごくわずかではあるが上回った。そこで、一定距離（ここでは16.0海里：29.6km）あたりの燃料消費量は速力の自乗に比例し、同じく排水量の3分の2乗に比例するという一般論から、低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型船底塗料の年間平均速力を従来型の12.4ノットに、また、平均排水量を従来型の760.4トンと同一にした場合の燃料消費量を推算した。表2の下段に低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型船底塗料の速力と排水量を従来型と同一にした場合の推算値を示す。燃料消費量は従来型の242.0リットルを100(%)として、低摩擦Ⅰ型で230.9リットル：95.4(%)、同Ⅱ型で226.5リットル：93.6(%)、同Ⅲ型では224.7リットル：92.8(%)になり、速力及び排水量を補正した従来型に対する低摩擦型船底塗料の燃費改善率は、現状において、Ⅰ型で4%強、Ⅱ型で6%強、Ⅲ型では7%程度あると試算した。

表2 従来型と低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型船底塗料の平均速力と平均燃料消費量（1年間）

実験期間 (速力試験回数)	従来型 (塗料A)		低摩擦Ⅰ型 (塗料B)		低摩擦Ⅱ型 (塗料C)		低摩擦Ⅲ型 (塗料D)	
	平均速力 ノット	平均燃料消費量 リットル	平均速力 ノット	平均燃料消費量 リットル	平均速力 ノット	平均燃料消費量 リットル	平均速力 ノット	平均燃料消費量 リットル
	ノット	リットル	ノット	リットル	ノット	リットル	ノット	リットル
2010年2月～2011年1月 (24)	12.4	242.0	—	—	—	—	—	—
2011年2月～2012年1月 (19)	—	—	12.5	235.2	—	—	—	—
2012年2月～2013年1月 (21)	—	—	—	—	12.5	228.2	—	—
2013年2月～2013年7月 (18)	—	—	—	—	—	—	12.6	227.8
従来型を基準(100)としたときの比率(%)	100	100	100.8	97.2	100.6	94.3	101.2	94.1
年間平均排水量(速力試験時)	760.4		763.1		754.4		749.1	
速力を従来型と同一にした場合の燃料使用量	12.4	242.0	12.4	231.5	12.4	225.3	12.4	222.4
速力と排水量を従来型と同一にした場合の燃料使用量		242.0		230.9		226.5		224.7
従来型を基準(100)としたときの燃料使用量の比率(%)	100		95.4		93.6		92.8	
従来型に対する低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型の燃費改善率(%)	—		4.6		6.4		7.2	

※ 数値は小数第二位を四捨五入

図9 従来型と低摩擦Ⅰ、Ⅱ及びⅢ型船底塗料の出渠後時間経過に伴う速力と燃料消費量の推移

7. おわりに

人間活動に伴う温室効果ガスの排出削減が地球規模で最重要課題に挙げられる昨今、国際海運から排出される温室効果ガスはそのほとんど（約 95%）が炭酸ガスであるとされ、その量は世界全体の炭酸ガス排出量の約 3%との推計がある。船底塗料の低摩擦化により船舶の省エネルギー化と同時に温室効果ガスの排出削減を目指した本研究では 1 年ごとに種類を違えた船底塗料を深江丸の水線下船底の全面に試験塗装した。また、評価の手法として一定区間を直線航走する速力試験を採用し、船の運航現場において重要な要素である速力と燃料消費の観点から分析を試みた。その結果、従来型に比べて低摩擦型では 4~7%程度の燃費改善率を試算した。また、低摩擦型も従来型と同様の仕様で船底に施工できることも実験の過程で検証できたことから、新造船のみならず既存船においても燃料消費の低減が期待できる。深江丸は航海速力が 12.5 ノット（時速約 23km）の低速船であり、これ以上の速力域における評価ができない。そこで、フェリーやコンテナ船等の高速域におけるデータとあわせて低摩擦発展型の船底塗料を総合的に評価する必要がある。

本研究は、国土交通省の補助対象事業「船舶からの CO₂ 削減技術開発支援事業」及び一般財団法人日本海事協会との共同研究「国際海運における温室効果ガス削減技術に関する研究開発」として 2011~12 年度に実施した。現状ではその防汚成分として銅や亜鉛などの重金属を含む船底塗料が主流を占めるが、防汚剤の種類やそれらの溶出量が規制される方向にあることから、将来的には防汚剤を含まない船底塗料の開発が世界的に強く望まれる。2013~14 年度において本研究が国土交通省の「次世代海洋環境関連技術開発支援事業」として、また、2013 年から日本海事協会との共同研究「次世代海洋環境関連技術開発支援事業」として採択されたことから、2014 年 2 月上旬の出渠前には、世界初の試みであるが、防汚剤を含まない（防汚剤フリー）船底塗料を試験塗装して評価試験に臨む計画である。加えて、船底塗料の評価試験の一環で 2014 年 1 月末からの定期検査入渠工事では 10 年ぶりに外板へのサンドブラストを計画し、この間に塗り重ねてきた防錆及び防汚塗料を一掃する。船底塗料の評価にあたり新たな局面を迎えることから、出渠後のできるだけ早い時期に Speed-Power 曲線作成のためのデータを収集し、新造時のそれと比較することで低摩擦型船底塗料の性能や特性を検証したい。一種類の船底塗料の評価に 1 年を要するが、この成果が船舶の省エネルギー化対策、さらには船舶からの温室効果ガスの排出削減に寄与できることを願ってやまない。

参考文献

- (1) A-LF-Sea カタログ, No.NPMC-081-J, 日本ペイントマリン株式会社, 2013
- (2) 矢野・前田・古荘：新型船底防汚塗料による船舶の省エネルギー化, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 第 9 号, pp.79-87, 2012 年 8 月
- (3) 矢野・古荘・戸田・山盛：船底付着生物の実態と船底防汚塗料の表面粗度進行対策, 日本航海学会シンポジウム, 船体生物付着に関する諸問題と海洋環境への影響・現状と今後-, 資料集 pp.3-9, 2011 年 11 月 25 日
- (4) 矢野・古荘・戸田・山盛：船底防汚塗料の実船評価, 日本航海学会論文集, No.125, pp.221-226, 2011 年 9 月
- (5) N. Yamamori, Y. Toda and Y. Yano : Frictional Resistance Reduction using Lower Frictional Paint, Proceedings of the 8th International Symposium on Marine Engineering (ISME), CT-1, Busan, Korea, Oct. 2009

著者紹介

矢野 吉治

- ・1957 年生
- ・神戸大学大学院海事科学研究科
- ・神戸商船大学商船学部航海学科卒, 船舶海洋工学
- ・深江丸船長（教授・博士）

山盛 直樹

- ・1952 年生
- ・日本ペイントマリン株式会社技術本部本部長
- ・大阪大学大学院工学研究科卒
プロセス工学専攻 高分子化学（修士）

河合 和弥

- ・日本マリンエンジニアリング学会正会員
- ・1980 年生
- ・神戸大学大学院海事科学研究科
- ・神戸商船大学商船学部機関学科卒, 船舶海洋工学
- ・深江丸機関長（講師）