

次世代型船底防汚塗料

「タカタクォンタム X-mile(エクスマイル)」の開発

The Next Generation Type of the Anti-fouling Paint , “TAKATA QUANTUM X-mile”



汎用塗料本部
船舶技術開発部(平塚)
中井一寿
Kazuhisa
Nakai



汎用塗料本部
船舶技術開発部(平塚)
秋葉保秀
Yasuhide
Akiba



汎用塗料本部
船舶技術開発部(平塚)
鈴木隼人
Hayato
Suzuki



NKMコーティングス(株)
技術本部
河島貴志
Takasi
Kawashima

1. はじめに

地球温暖化防止に向けての世界規模での取り組みが行われている中、国際海事機関(IMO)の2007年調査では、国際物流の9割を担う外航船の二酸化炭素(CO₂)排出量は8.7億トンで、全世界の2.7%に相当する(図1)ことが明らかとなっており、タンカーやコンテナ船など海外を行き来する世界中の外航船から排出されるCO₂の削減策が検討されている¹⁾。2010年、IMO海洋環境保護委員会で、国際海運からのCO₂の排出量規制について、新たに建造する船舶を対象に2025年までに現在の平均値と比べて30%削減することを義務付けることが大筋で合意された²⁾。

このような新たな規制に対して、さらに日本のCO₂削減目標宣言への対応も含めて、外航船のみならず内航船も併せて、日本の造船業界では得意とする環境分野でイニシアチブを取るため、CO₂の排出量の少ない『エコシップ』の研究開発が進められており、中韓のコスト競争力の強さや相対的な韓国ウォン安、中国の政策的な元安などに対抗しようとしている³⁾。

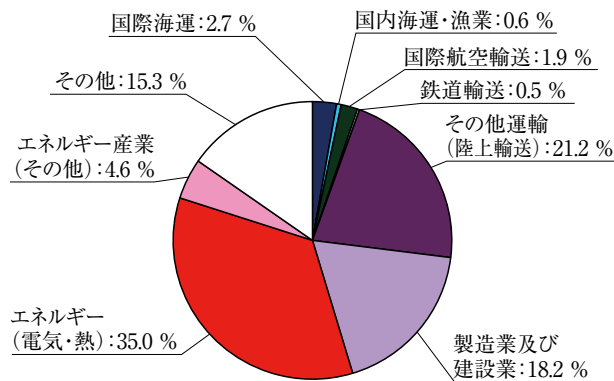


図1 全世界の二酸化炭素(CO₂)排出量比率

さらに、一連の金融危機や、新興国経済の経済成長に伴う石油需要の増大および投機マネーの石油市場への流入などにより、原油価格は大幅に上昇し、さらに不安定な国際状況の影響を受け、その変動も著しくなっている。当然のことながら、船舶の燃料として一般に使われるC重油の価格も上昇し(図2)⁴⁾、燃料費削減は船舶業界の利益確保に対する最大の課題となっている。その課題克服が、重油を燃焼することで発生するCO₂のみならず大気汚染物質でもある硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)の大気中への飛散をも減少させる副次効果も生じさせる。

そのCO₂排出量削減と燃料費削減に大きく寄与するのが船舶運航時の抵抗の低減である。船舶が航行する際に生じる抵抗の中で、船体表面と水の間に生じる摩擦抵抗は、一般的な船舶の場合、船速や船型によって異なるが、およそ50~90%と大きな部分を占めると言われている(表1)⁵⁾。元来、フジツボ、アオノリといった海棲生物の船体への付着防止のため、船底防汚塗料が塗装されている。海棲生物付着に伴う摩擦抵抗の増加が燃費性能を低下させる主要因であるためである。それに加えて、塗膜性能および性状も摩擦抵抗を生じさせる大きな要因であるため、各塗料メーカーでは、生物付着防止機能に加えて、さらに摩擦抵抗低減可能な船底防汚塗料の開発を行ってきた。

表1 船舶の全抵抗に占める摩擦抵抗の比率

船種	摩擦抵抗の比率 (%)
VLCC(30万DWTクラス)	:バラスト時 85 :満載時 95
大型コンテナ(8000TEU)	60
大型バルカー(ケープサイズ18万DWTクラス)	80
小型バルカー(ハンディ5万DWTクラス)	70
内航フェリー(10000DWTクラス)	75

(弊社調査データ)

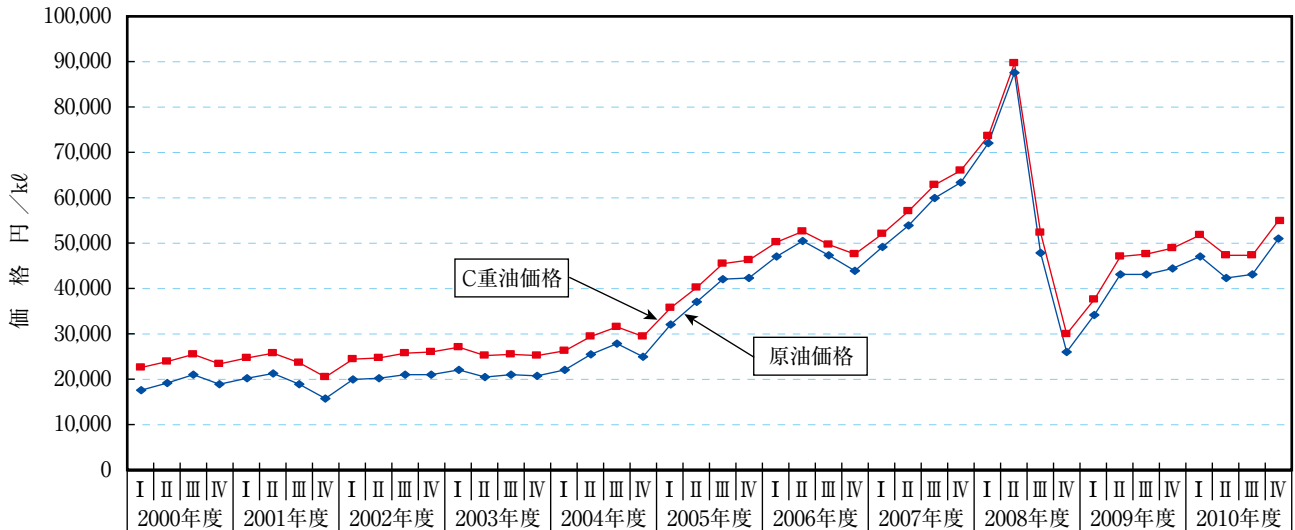


図2 燃料価格の推移

弊社 (NKMコーティングス/関西ペイント) は、加水分解型樹脂である特殊ケイ素樹脂を使用した加水分解型船底防汚塗料「タカタ クォンタム(TAKATA QUANTUM)」シリーズを上市し、これまで多数の実績を得てきた。「タカタ クォンタム (TAKATA QUANTUM)」は、安定した防汚性能で、船舶の航行に影響を与えるフジツボ等の大型生物やアオノリ等藻類の付着を抑制するとともに、船舶の航行に伴い、塗膜表面を溶解・更新し、塗膜の表面粗度を経時で低下させていくことにより、燃料費低減に貢献してきた^{6),7)}。

今回、燃料費低減に対する更なる市場要求の高まりに対応するべく、上記「タカタ クォンタム」で培った技術をベースに、新たに開発した「タカタ クォンタム X-mile (エクスマイル)」を紹介する。

2. 開発のコンセプト

前述した船底防汚塗料に求められる生物付着防止という基本機能を堅持した上でさらなる船体摩擦抵抗の低減手法について検討を行った。

船舶の燃料消費量を大きく左右する要因は船体抵抗であり、一般的な大型船舶の場合、表1に示すように、船体表面と水の間に生じる摩擦抵抗の占める割合が多い⁵⁾。そのため、摩擦抵抗を減らすことが燃費低減に直結する。摩擦抵抗を低減させる手法としては、リブレットやマイクロバブルなどに代表されるように、船体の表面構造や装置からのアプローチのほか、親水塗料や撥水塗料の使用といった塗料からのアプローチも検討されてきた⁸⁾。しかし、塗料・塗装から摩擦抵抗を低減させる最も合理的な方法は、塗装により船体表面を平滑にして粗度抵抗を低減させることである(図3)。表面粗度と出力・燃料消費量の関係は(1)式を基準に論じられるケースが多い⁵⁾。

$$\Delta P = 3.8 \times [(K_2)^{1/3} - (K_1)^{1/3}] \quad (1)$$

ΔP : 出力変化率 (%)

K_1 : 出渠時の表面粗度 (μm)

K_2 : 就航入渠時の表面粗度 (μm)

(1)式は出渠後、汚損などにより表面の平滑性が損なわれるケースでの出力変化率を計算するものであるが、塗装による表面粗度の差による出力変化率を示すこともできる。また、出力と燃料消費量はほぼ比例するため、燃料消費量増加率は表面粗度の影響を受けることが容易に類推できる。このため、平滑な表面を形成する塗料を塗装した場合と標準的な塗料では、その塗装初期の表面粗度の違いにより、航行時初期からの出力差つまり燃料消費量に差が発生すると考えられる。

「タカタ クォンタム X-mile」の開発に当たっては、塗料粘性の制御することで、従来から使用されてきた「タカタ クォンタム」よりも表面粗度を低下させることを目標とした。また、「タカタ クォンタム」シリーズの安定した溶解性と防汚性を保持しつつ、基体樹脂組成の最適化を行い、塗膜物性の向上を目指した。

3. 「タカタ クォンタム X-mile (エクスマイル)」の特徴ならびに機能

3.1 表面平滑性の向上

塗膜表面を平滑にするためには、一般に塗膜中の顔料/樹脂比を変更し、基体樹脂を増量するなど様々な手法がある。「タカタ クォンタム X-mile」の開発に際しては、エアレス塗装直後の仕上がり肌を可能な限り平滑にするべく、塗料粘性を制御することから始めた。

塗膜表面を平滑化するには、レオロジーコントロール(流動性制御)技術を使って、塗料のレベリング性を向上させる必

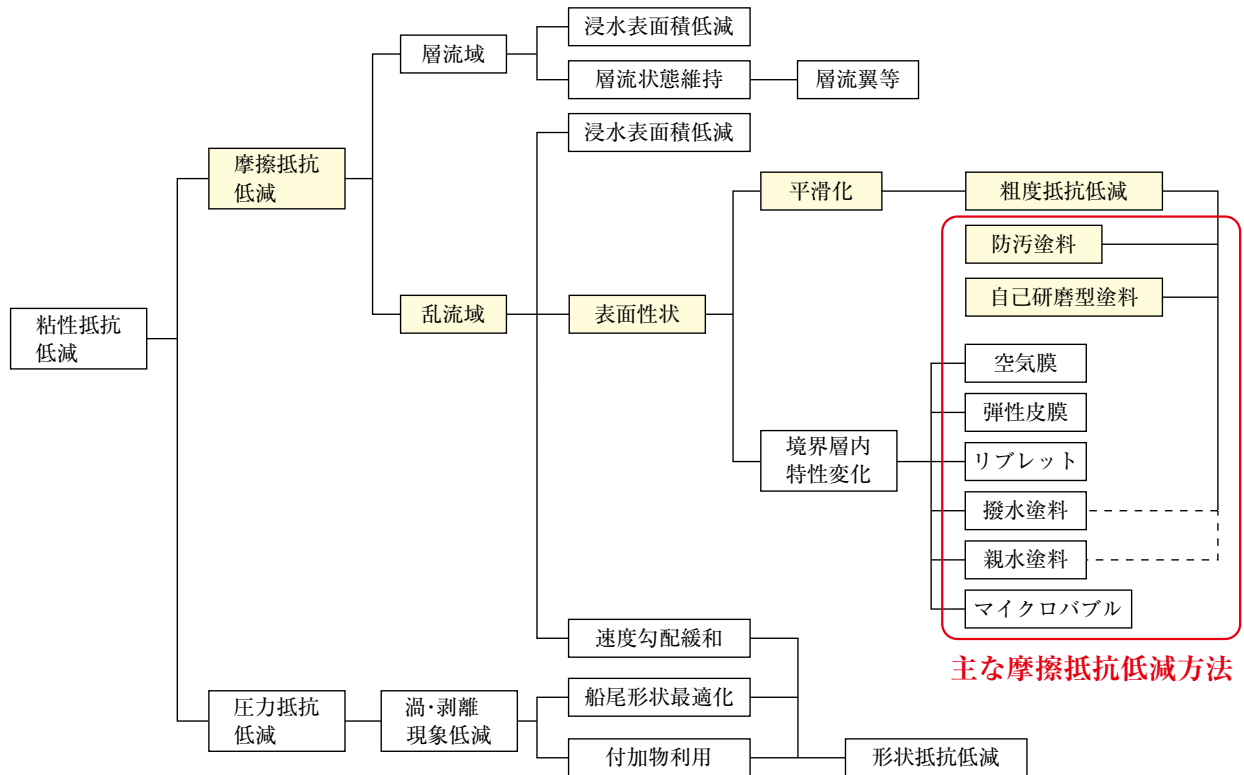


図3 粘性抵抗低減手法および表面性状改善による摩擦抵抗低減方法

要がある。しかしながら、レベリング性の向上は厚塗り性の低下に繋がるため、目的となる乾燥塗装膜厚が確保できることが必要となる。「タカタ クォンタム X-mile」では、現行品よりもハイソリッド化しているが、乾燥膜厚を確保するために塗料の固形分を上げると、それに伴い塗装粘度が上がるため、エアレス塗装時の霧化性が低下する可能性がある。図4にレオメータMARSII（サーモフィッシャー社製）を用い、ずり速度を変化させた時の粘度測定結果を示す。厚塗り性の目安となる低ずり速度領域（ $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ ）の粘度は「タカタ クォンタム X-mile」と現行の「タカタ クォンタム」で大きな差はなく、著しい厚塗り性の低下は発生しないと考えた。ま

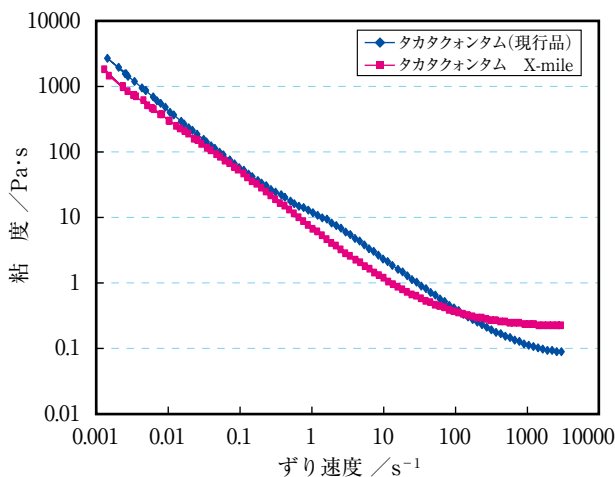


図4 粘度挙動

た、高ずり速度領域の粘度も、従来品よりもやや高いものの、大幅な粘度上昇は見られず、エアレス塗装作業性の低下は少ないと判断した。

次に、エアレス塗装時のレベリング性を確認するため、以下に示す粘度回復性の評価を行った。試験開始から50秒間は低ずり速度、続く10秒間は高ずり速度、再度低ずり速度と塗料に与える変形速度を変化させ、塗装からレベリングに至るまでの過程を想定し、粘度の応答挙動を確認した。図5の横軸は試験を開始してからの経過時間、縦軸は各過程での粘度を示す。

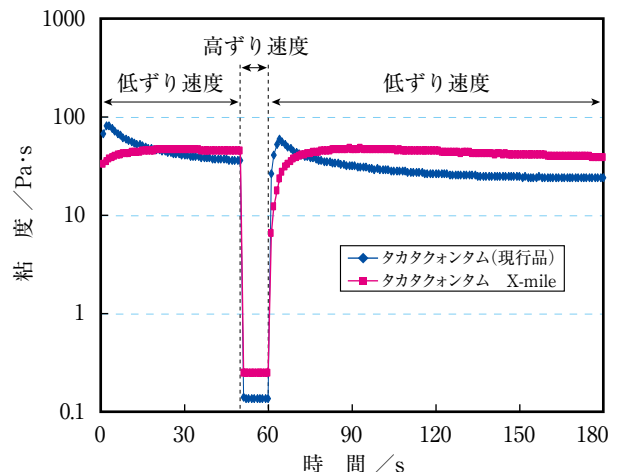
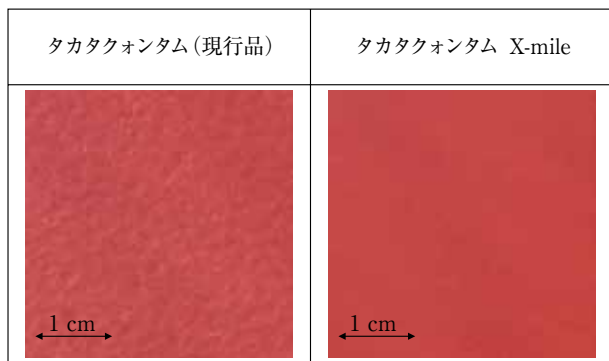


図5 粘度回復挙動

現行の「タカタ クォンタム」は急激に粘度が回復するため、「タカタ クォンタム X-mile」に比べると塗膜の凹凸が残りやすい。これは、現行の「タカタ クォンタム」をはじめとする加水分解型船底防汚塗料の防汚性能要求期間が近年長期化され、塗膜厚は増す傾向にあり、そのために施工時に厚く塗装できるように設計されてきたことに起因する。一方、「タカタ クォンタム X-mile」では、レオロジーコントロール（流動性制御）技術により粘度回復時間を延長することでレベリング性が改善され、塗装時の巻き込み泡が抜ける時間が確保できたこともあって、塗膜の平滑性を向上させることができた（写真1）。



- ・塗装仕様：100 μm×2回塗り（船底防汚塗料のみ）
- ・使用エアレスチップ：グラコスタンダードチップ633
- ・2次圧 12 MPa

写真1 エアレス塗装時の表面状態

レベリング以外に、乾燥過程にある塗膜にスプレーミストが当たると凹みなどが発生し、塗膜の平滑性が損なわれるケースもある。図6にエアレス塗装前後での塗料の表面張力を示す。「タカタ クォンタム X-mile」は、現行品よりも表面張力が低いことに加えて、エアレス塗装前後での表面張力差も小さいため、ミストが降りかかってもなじみ易く、凹みが発生しにくいことがわかる。

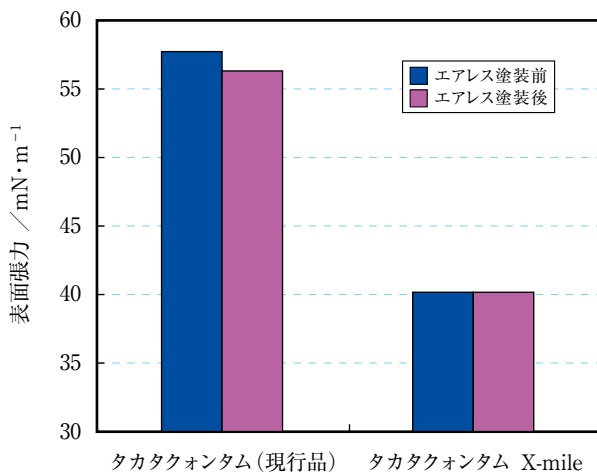
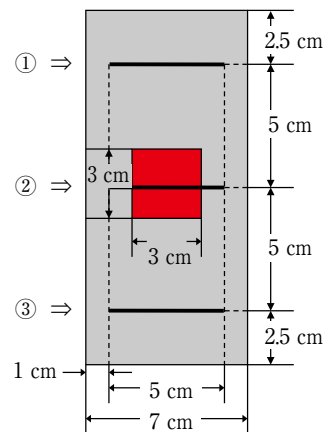


図6 エアレス塗装前後の表面張力 (Wilhelmy法 [プレート法])

エアレス塗装機を用いて、「タカタ クォンタム X-mile」および現行品を塗装し、それらの表面状態ならびに表面粗度をレーザーフォーカス変位計 LT-8100（キーエンス社製）を用いて測定した。表面粗度は、5cmの測定長さを計測し、JIS B 0601 (1994) に準拠した算術平均粗さ (Ra)、最大高さ粗さ (Ry)、十点平均粗さ (Rz) を得た。図7、8に測定方法および得られた塗膜の表面状態を示す。現行品は下地の影響に加えて、塗料粘性や表面張力の影響から凹凸が目立つ仕上がりになっている。それに対して、「タカタ クォンタム X-mile」は、レベリング性が向上した結果、下地の凹凸を覆い隠し、平滑な表面が得られるようになっている。



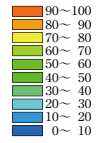
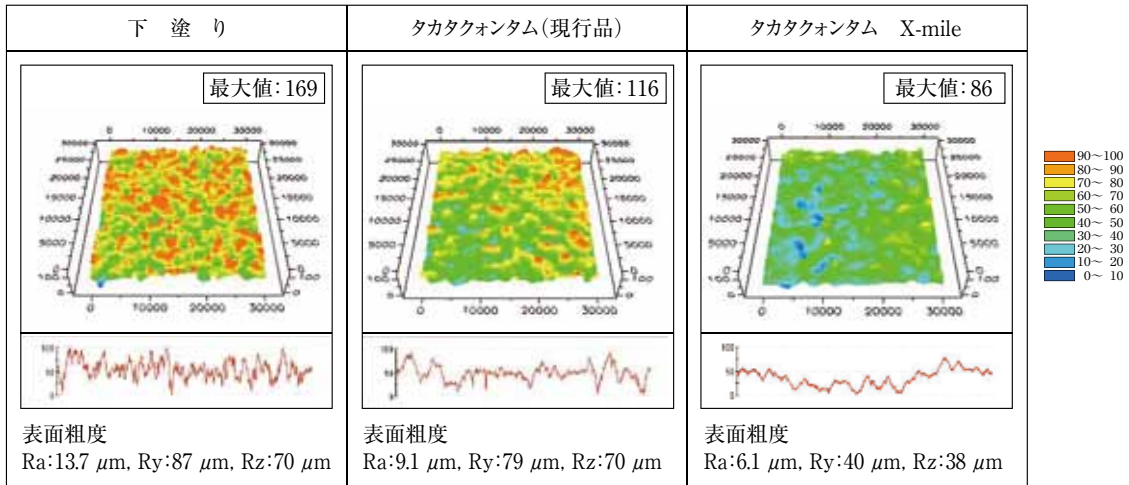
- 測定機器
レーザーフォーカス変位計 (LT-8100)
 - 表面状態 (3D画像) の測定および画像処理方法
測定箇所: 試験板の中央部 (赤色の箇所: 3×3 cm)
X軸測定ピッチ: 100 μm
Y軸測定ピッチ: 100 μm
ノイズカット: 11
Z軸レベルカット: 100 μm
 - 指示断面粗さの測定
測定箇所: 左図の①、②、③の箇所 (5 cm)
(②の箇所を代表として図示)
測定ピッチ: 50 μm
- 得られた指示断面図から、表面粗度 Ra・Ry・Rz (JIS B 0601 (1994) 準拠 [参考値]) の値を得る。表面粗度の値は①、②、③の測定値の平均値とした。

図7 測定用試験板の外観と表面状態測定方法

3.2 摩擦抵抗低減化

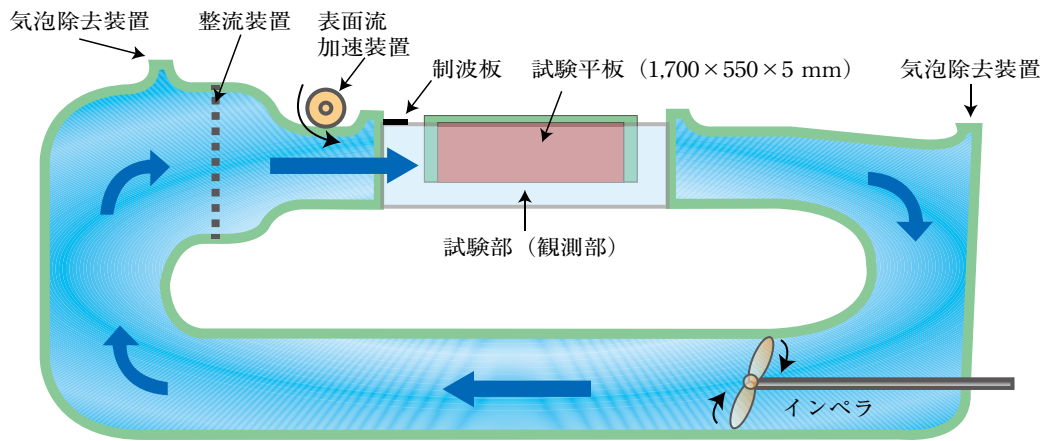
これまで、塗料の塗装面と水との乱流摩擦抵抗の評価は、二重円筒装置による試験、平板や模型船を用いた曳航水槽における試験などが行われてきた。今回、繰り返し試験が容易で、精度良く試験ができる平板模型を用いた回流水槽試験で摩擦抵抗を計測した。試験に用いた回流水槽の概略図を図9に、摩擦抵抗測定装置および試験用平板模型の概略図を図10に示す⁸⁾。平板模型は、長さ1700 mm、深さ550 mm、喫水50 mm、厚さ5 mmの薄い平板を使用し、さらに、造波抵抗成分と形状抵抗成分がほぼ無視できるよう

新技術



- ・塗装仕様
 - 下塗り エポマリンAC(M):200 μm~エポマリンACマーク2:100 μm
 - 上塗り タカタクォンタム(現行品)、タカタクォンタム X-mile:100 μm×2回塗り
- ・使用エアレスチップ 下塗り グラコスタンダードチップ629
上塗り グラコスタンダードチップ633
- ・2次圧 12 MPa

図8 エアレス塗装時の表面状態、および表面粗度



寸法:長さ7.0 m×幅1.8 m×高さ2.6 m、水量:約15 t
試験部(観測部):長さ3.0 m×幅1.2 m×高さ0.85 m、水深0.6 m

図9 回流水槽の概略図

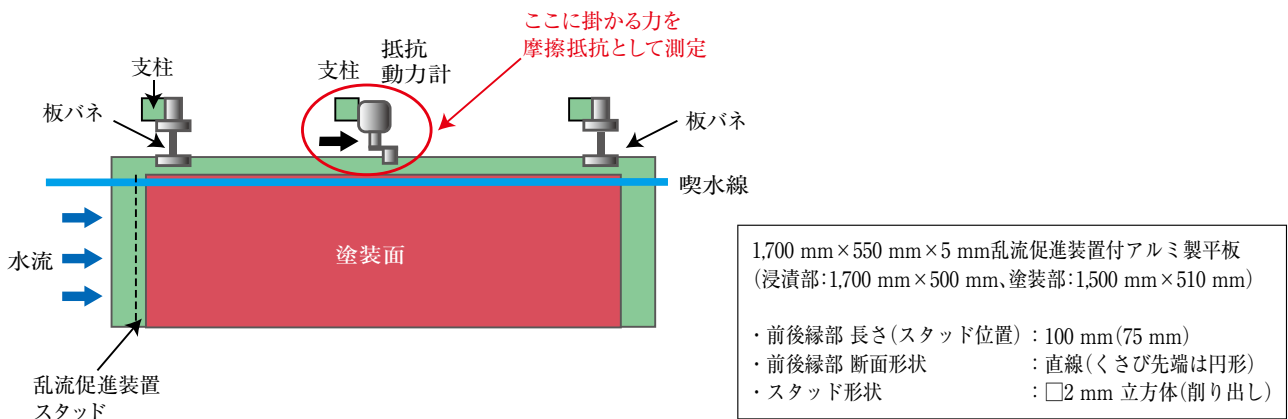


図10 乱流促進装置(スタッド)付平板模型の概略

前後端を加工した。また、実船のまわりの流れと同様、乱流条件下で試験できるように、試験平板の前方に乱流促進装置（スタッド）を取り付けた。回流水槽内に試験対象とする2枚の試験平板を平行に吊り下げ、水流を加えることで抵抗を測定した。平板模型は、前後の板バネでブランコ式に吊り下げること、横方向の相対運動を抑制した。平板模型にかかる抵抗は、板バネの間に設置した抵抗動力計により計測した。

エポキシ樹脂系下塗、変性エポキシ樹脂系バインダーコート、船底防汚塗料からなる、新造船仕様に準拠した塗装仕様（表2）で平板模型を塗装した。それぞれ塗装した平板模型を回流水槽内に設置し、流速を変動させ、各流速に対する摩擦抵抗 R_f を測定した。得られた摩擦抵抗から、(2) 式をもとに、摩擦抵抗係数 C_f を算出した。

$$C_f = R_f / \{ (1/2) \rho U^2 S \} \quad (2)$$

- R_f : 摩擦抵抗 (N)
- ρ : 水の密度 (kg/m^3)
- U : 流速 (m/s)
- S : 浸水面積 (m^2)

回流水槽試験では、レイノルズ数が 10^6 程度であるのに対し、実船でのレイノルズ数は $10^8 \sim 10^9$ と異なっている。図11に層流から乱流域でのレイノルズ数と平板の摩擦抵抗係数（理論値）との関係を示すが、今回の実験では平板模型のま

わりの流れが層流もしくは層流から乱流に移行する遷移域となる可能性もあり、得られた結果を実船に適用するのが困難となる場合も考えられる。そのため、得られた摩擦抵抗係数をレイノルズ数 $R_n = UL/\nu$ に対してプロットし、乱流域での摩擦抵抗係数を表わすプラントル・シュリヒティングの公式(3)に沿って変化しているか確認することにより、乱流条件下で試験が行なわれているかを判断することとした。

$$C_f = 0.455 / (\log_{10} R_n)^{2.58} \quad (3)$$

- R_n : レイノルズ数
- L : 試験平板の長さ (m)
- ν : 水の動粘性係数 (m^2/s)

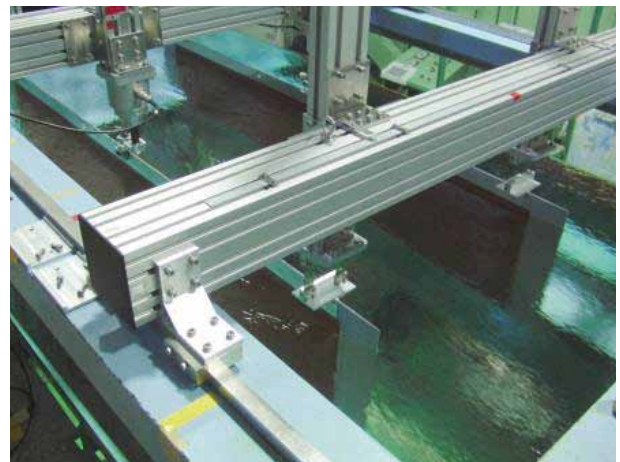


写真2 平板模型を用いた回流水槽試験の状況

表2 平板模型の塗装仕様

塗装工程		塗料	塗装回数	膜厚 (μm)
1	下塗	エポマリンAC(M)	1	200
2	バインダーコート	エポマリンACマーク2	1	100
3	上塗	タカタクォンタム (現行品)	1	100
4		もしくは タカタクォンタム X-mile	1	100

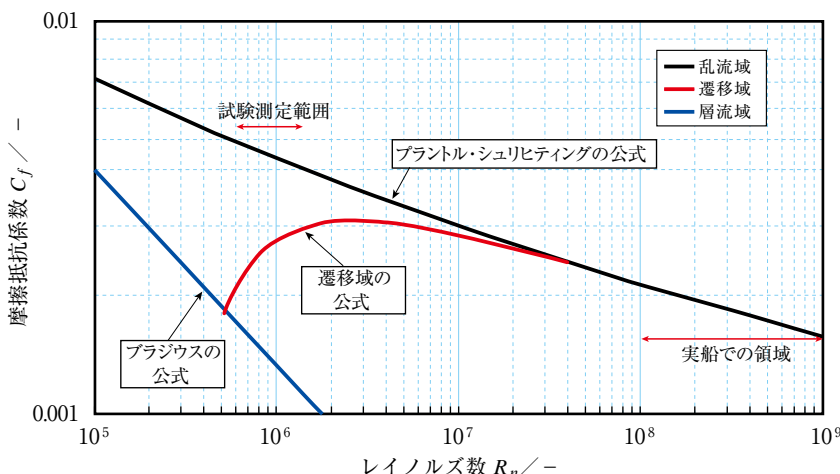


図11 層流域、遷移域、乱流域の平板摩擦抵抗公式に基づく抵抗特性

試験の様子を写真2に、摩擦抵抗係数の変化を図12に示す。プラントル・シュリヒティングの公式に近似した変化を示したことから今回の試験は乱流条件下で行われたと判断でき、なおかつ精度が高く再現性の良い結果が得られることがわかった。「タカタ クォンタム X-mile」塗装板（表面粗度 R_y : $40 \mu\text{m}$ [参考値]）は、現行品（表面粗度 R_y : $79 \mu\text{m}$ [参考値]）と比較した場合、6%の摩擦抵抗低減効果が確認できた。

船速、船型によっても異なるが、一般的な船舶の全抵抗のうち、摩擦抵抗の占める割合はおおよそ50~90%であり⁵⁾、6%の摩擦抵抗を低減させることで、船体の受ける抵抗が3~5%低下することを示唆している。船舶の受ける抵抗の低下が、燃料消費量低下に繋がると考えると、「タカタクォンタム X-mile」を塗装することで、現行品と比べておおよそ3~5%

の燃料消費量低減効果があると推測できる。なお、現時点では表面粗度の差と摩擦抵抗低減率との間に明確な相関は得られておらず、表面粗度の測定方法などを含め、今後の検討課題となっている。

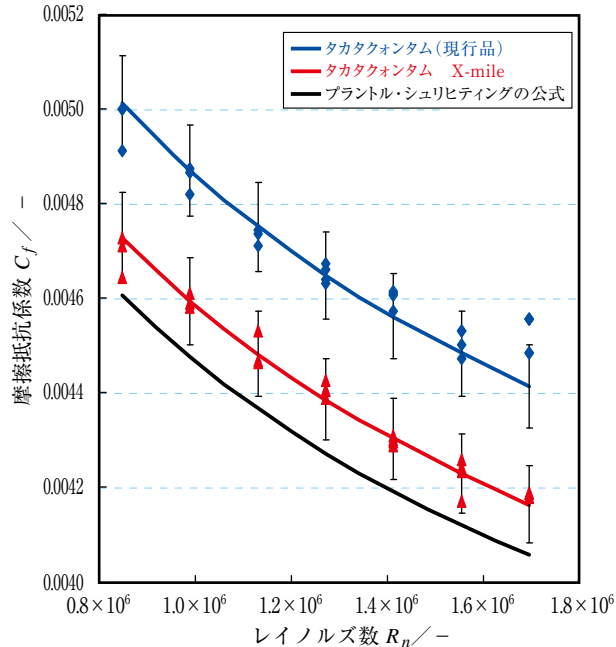


図12 摩擦抵抗測定結果(初期条件)

3.3 塗膜物性の向上

「タカタ クォンタム」シリーズは安定した溶解性と防汚性を示すが、塗装条件や航行条件、特にドックインターバルの延長などにより、稀に塗膜にクラックが発生することもあった。このようなクラックは塗膜剥離などにつながり、それ自体が船体の摩擦抵抗を増やすだけでなく、場合によっては、生物付着による汚損を引き起こしかねない。「タカタ クォンタム X-mile」は、航行条件等によるクラック発生を抑制するため、従来からの防汚性・磨耗性を維持させつつ、基体樹脂組成の最適化検討を行った。40℃耐水物性促進試験の結果を写真3に示す。樹脂組成の変更により、加水分解前後で基体樹脂の物性変化が減少し、その結果、クラックの発生を抑制することができた。また、静置防汚性については、「タカタ クォンタム」シリーズの性能を踏襲しており、安定した防汚性を示す(写真4)。

3.4 VOC排出量削減

「タカタ クォンタム X-mile」は、塗料粘性を制御するとともに、現行品よりもハイソリッド化し、約12%のVOC量低減を達成した。また、図13に示すように、塗装仕様を現行仕様から低VOC仕様に変更することで、システム全体のVOC量を約20%低減することも可能になった。

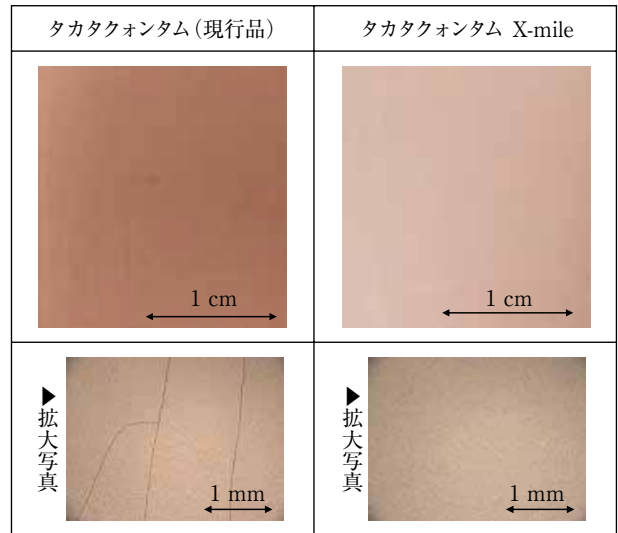


写真3 耐水物性促進試験後の塗膜表面状態 (40℃温水浸漬22ヶ月間)

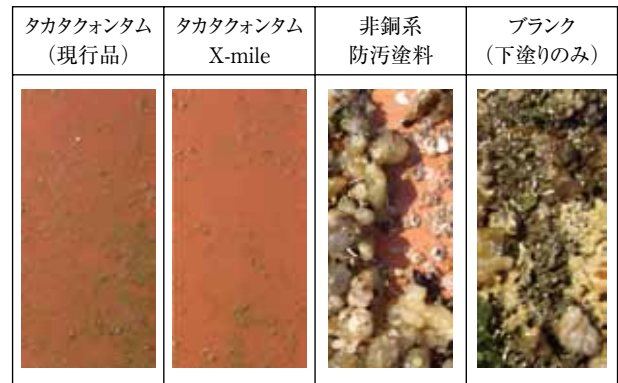


写真4 静置防汚性(三重県11ヶ月経過)

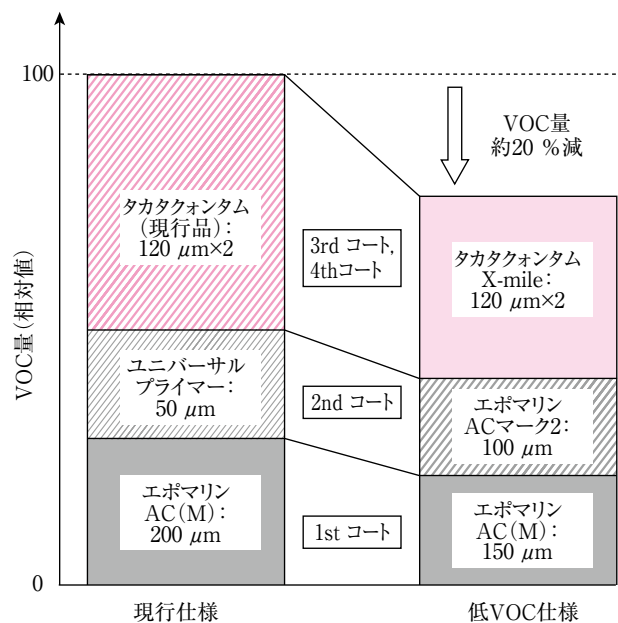


図13 VOC量の比較[現行仕様での発生量を100として計算] (24ヶ月航行での計算例)

表3 「タカタクォンタム X-mile」の製品ラインナップ

製 品 名	色 名	容 量	船 種
タカタクォンタム X-mile 001	ブリック・マルーン	20 kg・18 ℓ	外航船用低磨耗
タカタクォンタム X-mile 002	ブリック・マルーン	20 kg・18 ℓ	外航船用中磨耗
タカタクォンタム X-mile 003	ブリック・マルーン	20 kg・18 ℓ	外航船用高磨耗
タカタクォンタム X-mile 005	ブリック・マルーン	20 kg	内航船用低磨耗
タカタクォンタム X-mile 006	ブリック・マルーン	20 kg	内航船用中磨耗
タカタクォンタム X-mile 007	ブリック・マルーン	20 kg	内航船用高磨耗

4. 「タカタ クォンタム X-mile (エクスマイル)」 の製品ラインナップ

「タカタ クォンタム X-mile」は、現行の「タカタ クォンタム」シリーズの開発で培った塗膜磨耗性制御技術を継承し、様々な船種、船速、航行条件に対応できるよう、表3に示す製品をラインナップしている。

5. おわりに

弊社は、これまで船舶用塗料市場において、市場ニーズに沿った塗料の提供を行ってきた。しかし、塗料そのものを高機能・高性能化するだけの時代から、環境への配慮も求められる時代になっている。「タカタ クォンタム X-mile (エクスマイル)」というネーミングには、“extra-mile (低燃費)”と“eco-smile (環境に優しい)”という意味が込められており、経済性とCO₂排出量削減への貢献を意識したものである。「タカタ クォンタム X-mile」は、市場ニーズだけでなく、時代のニーズにも対応した製品である。今後、更なるハイソリッド化を目指し技術力を向上させ、環境に配慮した製品を開発していく。

6. 謝 辞

「タカタ クォンタム X-mile」の開発に際し、回流水槽試験を行うに当たり多大なご協力・ご指導をいただきました。横浜国立大学大学院工学研究院の鈴木和夫教授、日野孝則教授、岡田功技術専門職、間瀬貴行大学院生に、この紙面を借りて心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) MEPC 59th Session Agenda Item 4, Second IMO GHG Study 2009, MEPC 59/INF.10 (2009)
- 2) “国土交通省報道発表資料：国際海事機関(IMO)第61回海洋環境保護委員会(MEPC61)の開催結果”、国土交通省ホームページ、<http://www.mlit.go.jp/city/> (参照2011年5月20日)
- 3) “造船関係資料 2011 (2011年3月発行)”、社団法人日本造船工業会ホームページ、<http://www.sajin.or.jp/> (参照2011年5月20日)
- 4) “燃料価格推移表(平成6年度～平成22年度)”、日本長距離フェリー協会ホームページ、<http://www.jlc-ferry.jp/> (参照2011年5月20日)
- 5) 中尾 学：“船舶の塗料と塗装”、p.86-96、株式会社船舶技術協会(1988)
- 6) 河島貴志：塗装技術、45 [8]、41-45 (2006)
- 7) 舩岡茂：塗料の研究、152、47-51 (2010)
- 8) 鈴木和夫：“流体力学と流体抵抗の理論”、p.157-193、成山堂書店(2006)