

塗膜面の特性が摩擦抵抗に及ぼす影響について^{*1}

正会員 田中寿夫^{*2}, 正会員 戸田保幸^{*3}
肥後清彰^{*4}, 山下和春^{*4}

Influence of Surface Properties of Coatings to Frictional Resistance

By Hisao TANAKA (Member), Yasuyuki TODA (Member),
Kiyooki HIGO and Kazuharu YAMASHITA

In order to clarify correlation between properties of coatings on ship hull surfaces and frictional resistance, experimental studies were carried out. A rotating cylinder type dynamometer was newly developed. It is possible to measure frictional resistance acts on coatings in higher Reynolds number flow similar to it around a actual ship. Measuring the frictional resistance and the change of its roughness of cylinders coated with self-polishing type paint or water repellent paints, correlation between properties of coatings and frictional resistance were investigated. Further, a simple method base on these experimental results was proposed, to estimate the frictional resistance acting on the surface of the actual ship hull.

Keywords: *Frictional Drag Reduction, Self-Polishing Paint, Water-Repellent Paint, Sand Roughness, Scale Effect.*

1. 緒言

船舶の省エネルギー対策として、船体形状を改良して船体に作用する造波抵抗あるいは粘性圧力抵抗を低減させる努力が積み重ねられたことにより、一般商船の推進性能は非常に向上した。しかし、船体抵抗の大半を占める摩擦抵抗については、様々な低減方法が提案され、その効果が実証されているものもあるが、一般商船等の実用に供されたものは見当たらず、その実用化のためには何らかの技術革新と思われる¹⁾。このような状況を踏まえ、平成10~13年度の4年間にわたって、社団法人日本造船研究協会第239研究部会(以下SR239と略称する)では「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」として、実船における各種の摩擦抵抗低減法について調査および実用化研究を実施した²⁾。本論文では、これらの研究のうち、塗膜による摩擦抵抗低減効果を調査した結果を述べる。

摩擦抵抗低減の手段として塗膜には、自己研磨型塗膜・

撥水性塗膜などがあり、これらの抵抗低減効果を示した研究³⁾⁴⁾もあるが、実船尺度の流れにおいて、表面状態との相関を示したものはあまりないと思われる。そこで、研究では、船体に作用する摩擦抵抗を、動力を用いない方法によって低減することを目的として、船体表面に作用する摩擦抵抗を、実船を模擬した状態で計測する方法を開発し、これを用いて実船に使用されている船底塗料の表面特性と摩擦抵抗の相関関係を調査した。さらに得られた結果を用いて、実船における摩擦抵抗の推定を試みたので以下に報告する。

2. 回転円筒型摩擦抵抗計測装置の開発

海水中に長時間暴露される船体表面には海洋生物が付着することが多い。船体表面に生物が付着すれば、船体表面の粗度が増大することになり、摩擦抵抗の増大による燃費の低下を招く。これを防止する目的で従来から様々な生物嫌悪物質を溶出する船底塗料が開発されてきた。このタイプの塗料の中で、現在最も広く使用されている塗料が自己研磨型塗料である⁵⁾。

自己研磨型塗膜は、塗膜に含まれる銅アクリル樹脂などが海水中で加水分解されて、生物嫌悪物質を溶出するものであり、海水接触面で加水分解が生じると、樹脂と

¹ 平成14年11月14日秋季造船三学会連合大会において講演、原稿受付平成14年11月29日

² ユニバーサル造船株式会社

³ 大阪大学大学院

⁴ 日本ヘイントマリン株式会社

⁵ 中国塗料株式会社

ともに防汚物質が溶出し、新しい塗膜面が現れる自己研磨作用が生じる。この自己研磨作用は塗膜表面粗度の凸部で選択的に生じるため、船舶が航行を続けると塗装時に存在した粗度が平滑化して摩擦抵抗が低下するといわれている²⁾。従って、その表面状態と摩擦抵抗の相関を検出するためには、長時間にわたって塗膜面が水流に暴露されていなければならない。模型船を用いた通常の水情試験でこれを計測することは困難である。そのため従来から塗装した円筒を用いて、これを長期間にわたって海水中で回転させ、回転トルクの変化から摩擦抵抗の増減を計測することが行われていた³⁾⁴⁾。しかし、これらの実験は円筒を無限流体中で回転させたため、円筒表面に形成される境界層が定常なものとはならず、また実船まわりの流れとの関係も明らかにはされていなかったように思われる。

そこで、本研究では以下に示すような回転円筒を用いた摩擦抵抗計測装置を製作し、一定期間実海水中で回転させた塗装済み円筒の回転トルクを計測することによって、表面変化に伴う摩擦抵抗低減量を計測することを試みた。

2.1 回転円筒型摩擦抵抗計測装置の概要

Fig.1 に本研究で製作した回転円筒型の摩擦抵抗計測装置を示す。図に示すように円筒は二重となっており、内側の塗装した円筒を回転させ、回転軸に作用するトルクを計測することによって、塗膜面に作用する摩擦抵抗を検出する。塗装円筒上下端の端部影響および水面影響を排除し、流れの上下方向の対称性を維持するために、塗装円筒上下端に近接して水平板を設けている。また回転軸は偏心運動を避けるために上下両端支持とした。なお、本試験装置では、設置場所に隣接する海域から天然海水を汲み上げて作動流体として使用している。

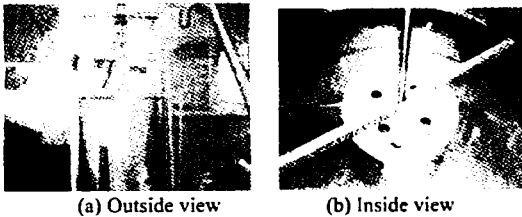


Fig.1 Frictional resistance measurement system.

2.2 回転円筒まわりの流れ

本装置の設計にあたっては、回転円筒まわりの流れが乱流となり、内外円筒表面付近で壁法則が成り立ち、その速度が滑らかにつながると仮定して、速度分布および摩擦応力を求める手法を検討した。壁法則によれば、境界層内の速度分布は

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B - \Delta B \quad (1)$$

である。 ΔB は roughness function であり、これが粗度レイノルズ数などの関数となる。この値が推定できれば、実船相当平板の摩擦抵抗は境界層計算に組み込むことにより、容易に推定できる。

本装置の場合、回転円筒の半径を r 、表面に作用するせん断応力を τ とすると、 τ/r^2 が一定であることから、内側の摩擦速度を u_s とすれば内側の壁法則から

$$1 - u = u_s \left(\frac{1}{\kappa} \ln (Rn u_s (r-1)) + B - \Delta B \right) \quad (2)$$

となり、外側の壁法則から

$$u = \frac{1}{3} u_s \left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(Rn \frac{1}{3} u_s (3-r) \right) + B - \Delta B_{out} \right) \quad (3)$$

となる。両者が滑らかにつながるという条件より u_s が定まり速度分布が決定される。 ΔB_{out} は外側の壁の等価粗度によるものであり、 $\kappa_{sout} = 500 \mu\text{m}$ とした。 ΔB については Cebeci らの Nikuradse の砂粗度 κ_s に対する

$$\kappa_s^+ = \frac{u_s \kappa_s}{\nu} \quad (4)$$

$$\kappa_s^+ < 2.25 \quad (5)$$

$$\Delta B = 0$$

$$2.25 \leq \kappa_s^+ < 90$$

$$\Delta B = \left(B - 8.5 + \frac{1}{\kappa} \ln \kappa_s^+ \right) \times \sin(0.24258(\ln \kappa_s^+ - 0.811)) \quad (6)$$

$$\kappa_s^+ > 90$$

$$\Delta B = \left(B - 8.5 + \frac{1}{\kappa} \ln \kappa_s^+ \right) \quad (7)$$

を用いた。ただし、 $\kappa = 0.42, B = 5.2$ である。

2.2 計測装置の検定

本装置の測定精度を検証する目的で、滑面円筒および粗面円筒（粗度は側面のみ）を用いて速度分布および回転軸に作用するトルクを計測した。検定に用いた3種類の無塗装円筒（塩ビ製）の要目を Table1 に示す。計測した回転円筒と外筒間の周方向速度分布を、前節に示した境界層理論に基づく推定結果と併せて Fig.2 にしめす。速度分布は Fig.1 に示すように外筒側から差し入れた直径 1mm のピトー管で計測した。

Table 1 Sample drum for examination.

No.	Surface Roughness			t(°C)	$\rho(\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4)$	$\nu(\text{m}^2/\text{s})$
	Maximum	Mean				
	Rmax (μm)	Rz (μm)	RzD (μm)			
1	11.9	6.2	4.4	11	104.68	1.3164×10^{-4}
3	20.2	16.6	19.5			
5	133.2	100.5	93.8			

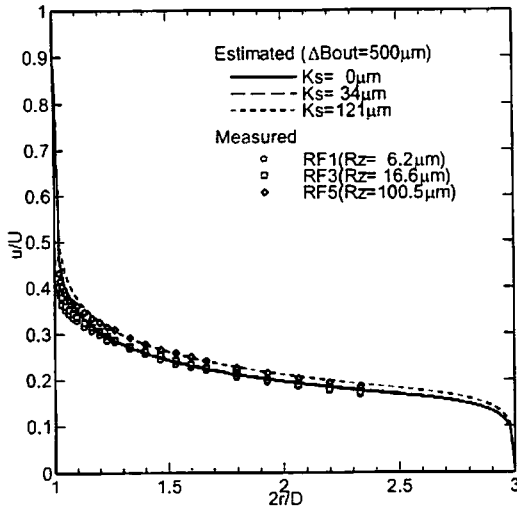


Fig.2 Velocity profile in boundary layer.

滑面とみなせる円筒 RF1 については表面砂粗度 κ_s を $0\mu\text{m}$ 、また粗度を有する円筒 RF3 および RF5 については、 κ_s をそれぞれ $34\mu\text{m}$ および $121\mu\text{m}$ とすると、前節で示した方法で求めた速度分布の推定結果は実験結果とよく一致しており、円筒間に生じる境界層は、前節で示した予想に概ね従っているとみなせる。

次に上記 3 種類の円筒の抵抗計測結果を示す。計測には回転軸に取り付けた・回転計トルクメータを用い、各供試円筒について $0\sim 700\text{rpm}$ の範囲で回転数・トルクを計測した(軸の摩擦によるアイドルトルクは別途計測して差し引いている)。計測された回転数およびトルクは以下の方法で無次元化した。代表長として回転円筒周長(直径 0.3m)、代表速度として円筒表面周速度をとり、レイノルズ数 R_n および円筒表面に作用する無次元抵抗係数 C_t を

$$R_n = \frac{UL}{\nu} \quad (8)$$

$$C_t = \frac{Q(D/2)}{1/2\rho U^2 S} \quad (9)$$

と定義した。U, L, S はそれぞれ代表速度(単位: m/s)、代表長さ(単位: m)・円筒の側面積(単位: m^2)であり

$$U = \frac{\pi DN}{60} \quad (10)$$

$$L = \pi D \quad (11)$$

$$S = \pi DH \quad (12)$$

として求めた。また、

D : 円筒直径(=0.3m) H : 円筒高さ(=0.3m)

N : 回転数(単位: rpm) Q : トルク(単位: $\text{N}\cdot\text{m}$)

ρ : 水の密度(単位: kg/m^3)

ν : 水の動粘性係数(単位: m^2/s)

である。

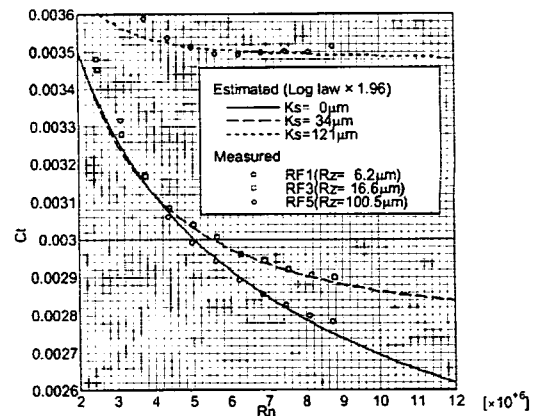


Fig.3 Resistance coefficient of rough surface.

計測で得られた無次元抵抗係数を、表面砂粗度を Fig.2 の速度分布から仮定して推定した結果と比較して、Fig.3 に示す。無次元抵抗係数 C_t には、円筒側面に作用する摩擦抵抗以外に、上下面に作用する摩擦抵抗および円筒と端板間で生じる圧力抵抗が含まれているが、これらをすべて摩擦抵抗に比例する形状抵抗とみなし、船舶の抵抗試験に倣って、形状影響係数の形で定める。滑面とみなせる円筒 RF1 の抵抗係数の推定値を 1.96 倍すると、全速度域にわたって計測値と一致することから、回転円筒の形状影響係数は 0.96 と推定されるので、以下ではすべての計算値に 1.96 を乗じて実験値と比較する。速度分布の推定結果に基づいて、RF3 および RF5 の砂粗度 κ_s を $34\mu\text{m}$ および $121\mu\text{m}$ とそれぞれ仮定して抵抗係数を求めると、Fig.3 に示すように抵抗係数も実験結果とよく一致している。以下では回転円筒の抵抗を計測し、これと一致する摩擦抵抗となる砂粗度 κ_s を、等価砂粗度 κ_e とみなし、等価砂粗度を用いて塗膜面の表面特性と摩擦抵抗の相関を評価する。

3. 塗膜面に作用する摩擦抵抗の評価

自己研磨型塗膜および撥水性塗膜の表面状態の経時変化と摩擦抵抗の相関関係を明らかにするために、動的浸漬試験を、日本ペイント株式会社岡山臨海研究所（岡山県玉野市）の試験用海水プールで実施した。海水プールで塗装回転円筒を長期間にわたって一定速度で回転させることにより、実船の塗膜面が長時間水流に暴露される運航状況を模擬することができる（これをエイジングと称する）。試験では、エイジング期間中に定期的に回転円筒試験装置で回転トルクを計測するとともに、表面粗度を計測し、各塗膜面の粗度・抵抗係数を無塗装滑面円筒と比較した。本試験ではエイジング期間を3～12ヶ月とし、その期間中に初期状態（浸漬前の状態）を含めて約1ヶ月間隔で計測を行った。各実験では塗膜面の抵抗を回転円筒試験装置で計測するとともに、JIS方式の表面平均粗度 R_z および表面最大粗度 R_{zmax} を光学式非接触表面粗度計で計測した。なお、計測が長期間にわたったので、再現性の確認のために、参照用データとして滑面円筒RF1の抵抗を、各実験時に計測した。これによればRF1の抵抗値は、水温に依存することなく一致しており、時期の異なる計測結果の比較も可能と判断された。

3.1 自己研磨型塗膜の表面粗度と摩擦抵抗の相関

エイジングによる抵抗係数の変化の一例を Fig.4 に、また平均粗度 R_z の経時変化を Fig.5 に示す。初期粗度が大きい塗膜では自己研磨作用によって大きく抵抗が減少しているのに対し、初期粗度が小さい塗膜ではほとんど抵抗が変化していない。SF-1N および SF-1RN の消耗度は SF-5・SF-5R のおよそ半分程度であるが、エイジング速度が逆に2倍程度となっているため、単位時間あたりの平均粗度の減少量は2倍以上となっている。

同一 Reynolds 数 ($Rn=8 \times 10^6$) における抵抗係数と平均粗度の相関関係を Fig.6 に示す。すべての供試塗膜で粗度高さがある一定値を超えると急速に抵抗が増大しており、概ね粗度平板の実験結果と同様な傾向にある。図中には前節に示した壁法則に基づいて推定した粗度を有する円筒表面の摩擦抵抗係数を併せて示しているが、これと実験結果を比較すると定性的な傾向はよく一致していることがわかる。なお SF5RR の抵抗係数が推定結果と大きく食い違っているが、これは SF5RR が塗膜の剥離を模擬した表面となっているためであり、剥離によって生じた抵抗増加分を差し引けば、他の塗膜面と同様な傾向となることを確認している。

Table 2 Properties of painted drums.

No.	Aging Term	Exhaustion Rate ($\mu\text{m}/\text{year}$)	Initial Roughness $R_z(\mu\text{m})$	Aging Velocity (kt)
SF1	00/09～00/12	82	10.5	5.5
SF3	00/09～00/12	41	21.8	5.5
SF5	00/09～00/12	151	11.2	5.5
	01/01～01/04			
	01/06～01/09			
SF5R	00/09～00/12	151	57.2	5.5
	01/01～01/04			
	01/06～01/09			
SF1N	01/06～01/09	82	11.9	10
SF1RN	01/06～01/09	82	82	10
SF5N	01/09～01/12	151	17.6	10
SF5RN	01/09～01/12	151	80.2	10
SF5RRN	01/09～01/12	151	58.6	10

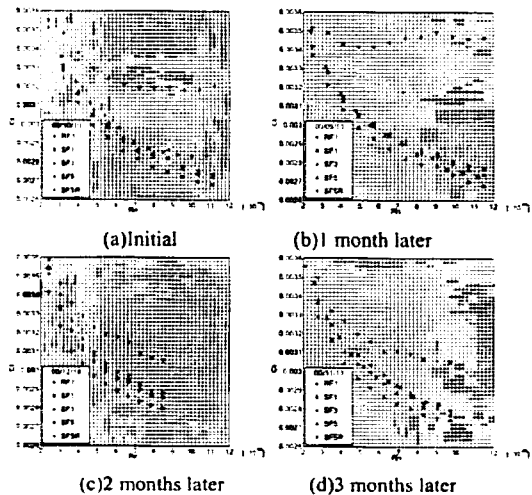


Fig. 4 Change of resistance coefficient of self polishing coats.

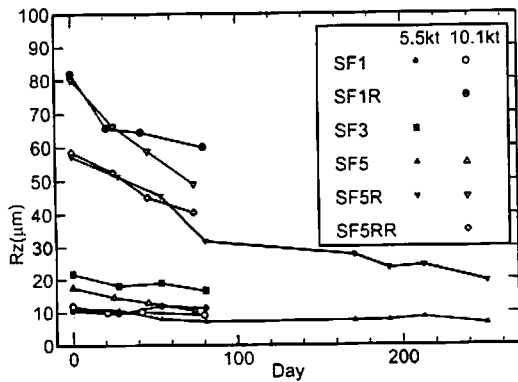


Fig.5 Change of surface roughness.

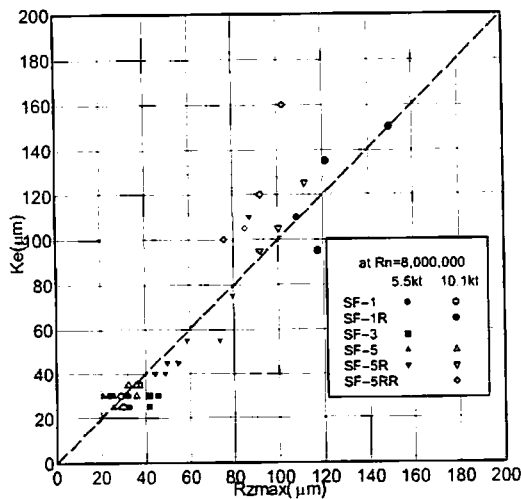


Fig.6 Correlation between resistance coefficient and surface roughness.

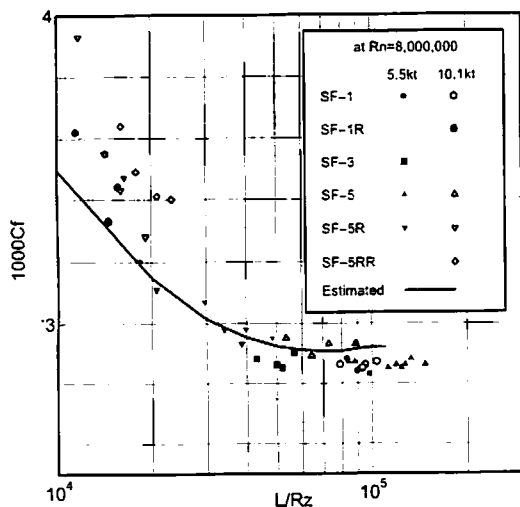


Fig.7 Correlation between Rz and Ke.

3.2 撥水性塗膜

撥水性塗膜も摩擦抵抗低減材料として注目されており、層流域については、その効果を実験的に示した研究もある⁹⁾。そこで、本研究では撥水性塗膜についても、自己研磨型塗膜と同様なエイジング試験を約3ヶ月間にわたって実施し、摩擦抵抗を回転円筒試験装置で計測した。供試した塗膜の要目をTable 3に、1ヶ月ごとに計測した抵抗係数をFig.7にそれぞれ示す。エイジングのどの時点においても抵抗係数はRF1よりも若干大きいが大差はなく、また表面粗度もほとんど変化していない。本試験の結果からは、少なくとも乱流域においては撥水性塗膜の摩擦抵抗低減効果はないと判断される。

Table 3 Properties of water repellent coats.

No.	Aging Term	Contact Angle (°)	Rz(μm) (Initial)	Rz(μm) (3 Month Later)	Aging Velocity (kt)
SW1	00/09 ~00/12	83	4.5	3	5.5
SW3	00/09 ~00/12	132	5.1	4	5.5

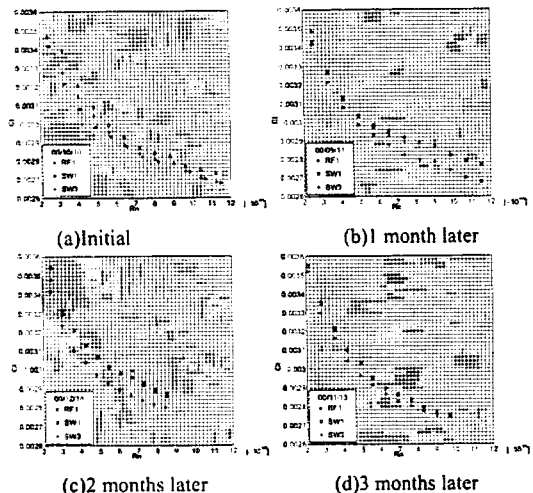


Fig. 8 change of resistance coefficient of water repellent coats.

3.3 実船の粗度による摩擦抵抗増加の推定

実船の表面粗度が摩擦抵抗に及ぼす影響を調査した研究は多数あるが⁹⁾¹⁰⁾、自己研磨型塗膜の表面粗度の経時変化と、摩擦抵抗の関係を直接的に扱ったものは、一部を除いてあまり見当たらない⁹⁾⁷⁾。ここでは、自己研磨型塗膜のエイジング試験の結果に基づき実船の摩擦抵抗の変化を推定した結果を述べる。実船の表面粗度は、必ずしも砂粗度のような粗度高さと波長が同程度の長さの粗さではなく、うねりに相当する成分も含まれている。しかし、局所的には砂粗度状となっていることが多

いので、ここでは船体表面を砂粗度とみなして摩擦抵抗の増減を推定することを試みる。

2. 3節で述べた方法により、エイジング試験で得られた抵抗係数に一致するように等価砂粗度 κ_e を求めた。その結果を粗度計で計測した最大表面粗度 R_{zmax} と比較して、Fig.8 に示す。両者は概ね一致しており、表面粗度を計測すれば等価砂粗度がある程度推定可能である。等価砂粗度 κ_e が得られればさまざまな式により粗度修正量 ΔC_f が推定できる。ここでは White の式¹⁾を用いた ΔC_f の推定結果を Fig.9 に示す。 κ_e と船長および船速がわかればこの図から ΔC_f が推定できるが、等価砂粗度と船長で整理されている図面があればわかりやすいので、船速を 15kt (海水 15°C) として整理したものを Fig.10 に示す。図中の点線は ITTC78 の推定法であり ($\kappa_e=150\mu\text{m}$)、かなり傾向が異なる。エイジング試験の結果を Fig.10 に当てはめてみると、Fig.7 で初期の等価砂粗度 κ_e が約 $110\mu\text{m}$ であった自己研磨型塗膜 RF5 は 5.5 ノットで約 1 年間航行することにより、等価砂粗度が約 $40\mu\text{m}$ まで低下しているから、この塗膜が船長 300m の実船に塗装されていたとすると、Fig.10 から粗度修正量 ΔC_f は、およそ 0.0002 程度低下することになる。実際の船舶では、船体表面の位置により、研磨作用は異なるからこのような単純な計算とはならないが、船体表面の複数の位置で等価砂粗度を評価すれば、より正確な粗度修正量を得ることは可能である。

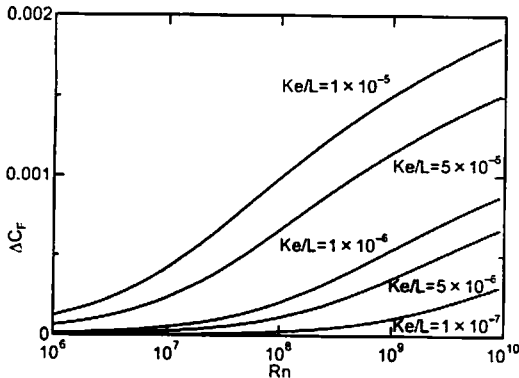


Fig.9 Correlation between roughness and ΔC_f .

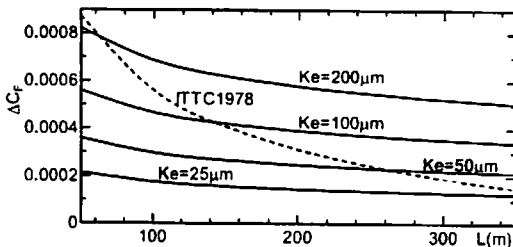


Fig.10 Estimated value of ΔC_f

4. 結言

自己研磨型塗膜・撥水性塗膜などの表面状態と摩擦抵抗の相関関係を明らかにすることを目的として、実験的な研究を実施した。得られた結果を以下に要約する。

- 1) 回転円筒試験装置を開発し、これを用いて塗膜面に作用する摩擦抵抗の計測に成功した。
- 2) 長期間エイジングした塗装円筒の摩擦抵抗を回転円筒試験装置により計測するとともに、表面粗度の経時変化を計測することにより、塗膜表面状態と摩擦抵抗の相関を定量的に評価した。従来、塗膜の抵抗低減効果は燃料消費量の増減からのみ評価されていたが、本方法により表面粗度との直接的な相関が明らかになった。
- 3) 回転円筒試験の結果を用いて、塗膜面の表面粗度が実船における摩擦抵抗に及ぼす影響を定量的に推定する方法を開発した。本推定法を用いることにより、塗膜面の粗度を計測すれば、実船の粗度修正量を推定することが可能となった。
- 4) 上記試験を、現用されている自己研磨型塗膜について実施したところ、粗度低下による摩擦抵抗低減は認められたものの、滑面の摩擦抵抗を下回る積極的な抵抗低減効果は認められなかった。
- 5) 撥水性塗膜についても表面特性と摩擦抵抗の相関を評価したが、表面状態の経時変化は少なく、摩擦抵抗が低減することもなかった。

謝 辞

本研究は、社団法人日本造船研究協会第 239 研究部会の「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」の一部として実施したものであり、熱心な討論を賜った部会長鈴木敏夫大阪大学教授をはじめとする委員各位にお礼申し上げます。また、エイジング試験における海水の物性値の測定にご協力いただいた独立行政法人産業技術総合研究所川口靖夫博士にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 永松哲郎：摩擦抵抗低減法に関する研究動向，日本造船学会誌 836 号 pp113-123, 1999.
- 2) 日本造船研究協会第 239 研究部会：「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」成果報告書，2002.
- 3) 山盛直樹：環境負荷を低減する防汚塗料，材料と環境 48 号 pp544-549, 1999.
- 4) 渡辺敬三他：超撥水性矩形管の抵抗減少効果に関する研究，日本機械学会論文集 B 編 62 巻 601 号 pp102-106, 1996.
- 5) 大黒久夫：最近の低毒性・無毒性船底防汚塗料について，塗装工学 27 巻 3 号 pp4-7, 1992.

- 6) 日本造船研究協会第 172 研究部会：「長期防汚塗料の開發と促進試験方法の研究」報告書(研究資料 No.327) pp77-95, 1980.
- 7) 日本造船研究協会第 189 研究部会：「船舶の防食防汚の性能と經濟性向上に関する研究」報告書(研究資料 No.364) pp35-40, 1983.
- 8) Kaname S. et al. : Some Consideration in Energy Conservation of Fishing Boats, 日本航海学会論文集 68 号 pp43-54, 1983.
- 9) 笹島秀雄他：船体外板粗度と摩擦抵抗増加に関する実験的研究, 日本造船学会論文集 117 号, 1965.
- 10) 姫野洋司:「ペイント粗面の摩擦抵抗に関する考察」, 関西造船協会誌 191 号 pp11-15, 1983.
- 11) White, F.M. : VISCOUS FLUID FLOW (Second Edition), McGrawHill, 1991.