

PS-2 実船スケールにおける塗装粗面摩擦抵抗の推定法について

流体設計系 * 川島 英幹、濱田 達也、拾井 隆道、中国塗料株式会社 三重野 絳央

1. はじめに

粗面が摩擦抵抗に与える影響に関して、砂粒のように粗度の形状が鋭い砂粒粗面については、Schlichting¹⁾の図表など、粗度及び流体のパラメータと摩擦抵抗の関係が整理されている。一方、塗装による粗面のように、粗度の形状がなだらかな波状粗面については、その関係が整理されておらず、その尺度影響も明らかになっていない。そこで塗装粗面が摩擦抵抗に与える影響について調査するため、異なる粗度パラメータを持つ塗装粗面を持つ長短 2 種 (14m、2m) の平板模型の摩擦抵抗を水槽試験により評価し、その解析結果から塗装粗面の摩擦抵抗の推定式を導出し、実船スケールにおける塗装粗面の摩擦抵抗を推定²⁾した。

2. 水槽試験による塗装粗面摩擦抵抗評価

2.1 試験対象塗装粗面

塗装方法の工夫により、粗度の平均波長波高比を 27~60 の間で変化させた 3 種類の塗装粗面を製作した。各塗装粗面の粗度パラメータを表-1 に示す。粗度パラメータの計測は、三次元船体表面粗度計 (中国塗料株式会社製) により行い、30mm×30mm の計測区画を 2m 平板 1 枚当たり 200 カ所以上計測し、解析を行った。さらに粗度の高さ要素の分布を明らかにするため、ヒストグラム解析 (図-1) を行った。

表-1 供試塗装粗面の粗度パラメータ

	Number of measurement points	Maximum height	Average height	Average wavelength	Wavelength wave height ratio
		Rz (μ m)	Rc (μ m)	RSm (μ m)	RSm/Rc
Short wavelength roughness (2m plate)	228	149.7	65.1	1772	27.2
Medium wavelength roughness (14m plate)	1656	148.7	72.4	2907	40.1
Long wavelength roughness (2m plate)	235	133.4	70.3	4323	61.5

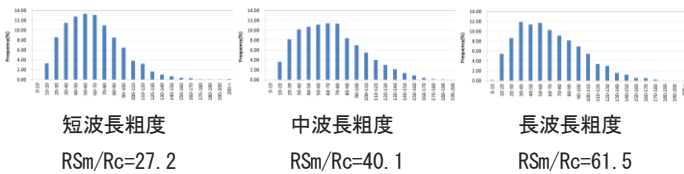


図-1 粗度高さのヒストグラム

2.2 水槽試験結果

水槽試験は、短波長と長波長の塗装粗面を施工した 2m 平板と、中波長塗装粗面を施工した 14m 平板を対象に実施した。平板は前後と底部に整流覆いを取り付けており、整流覆い部分には塗装を施していない。平板模型の要目を表-2 に示す。

2m 平板の水槽試験は、平行平板曳航法³⁾により、14m 平板の水槽試験は、二重ブランコ式曳航法⁴⁾により実施し、摩擦抵抗を評価した。水槽試験結果を図-2 に示す。

表-2 供試平板の要目

	14m plate		2m plate	
	Over all	Test surface	Over all	Test surface
Loa (m)	14.43	14.19	2.25	2.01
B (m)	0.01		0.01	
Depth (m)	1.16		1.16	
Draft (m)	0.81	0.80	0.76	0.75
Area (m ²)	23.52	22.69	3.44	3.02
Disp (m ³)	0.116		0.016	

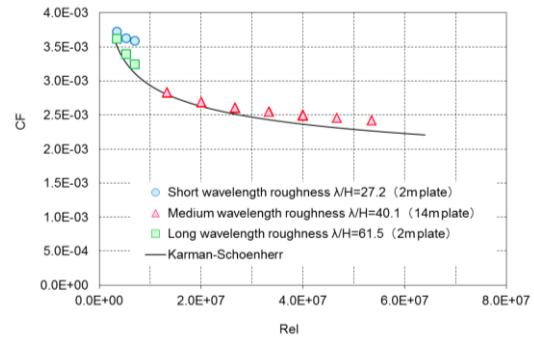


図-2 全長ベースのレイノルズ数と塗装粗面の摩擦抵抗係数

3. 塗装粗面の摩擦抵抗推定式

水槽試験結果を基に、塗装粗面の摩擦抵抗について以下の仮定と手順により整理し、摩擦抵抗の推定式を導出した。

① 塗装粗面のような波状粗面の滑面に対する摩擦抵抗増加分は、各粗度に生じる局所的な圧力抵抗の総和であり、塗装粗面のいわゆる摩擦抵抗は、平面部の摩擦抵抗と粗度の圧力抵抗の総和である。

② 粗度による抵抗増加は、粘性底層厚さよりも高い部分で発生し、粘性底層厚み以下の部分は不感帯となる。

③ 粗度による抵抗増加分を、粗度の粘性底層厚み以上部分に加わる動圧で除して、粗度の抵抗係数 $C_{d,roughness}$ とした。粗度の抵抗係数は、粗度の総体の抵抗係数となるため、個々の粗度間の干渉の度合いにより変化する。この干渉係数を α とする。

④ 粗度の抵抗係数を求めるための代表速度を滑面における粗度高さでの速度 V_k とした。

⑤ 抵抗増加に有効な粗度の平均的な粗度高さを平均有効粗度高さ R_{ce} として定義し、粗度高さのヒストグラムから、粘性底層厚さ以上の高さを持つ粗度のみを抽出し平均した。また波高波長比は、その塗装粗面に固有の値と考え、平均波長波高比から平均有効粗度波長 R_{Sme} を求めた。

⑥ 全粗度に占める、抵抗増に有効な粗度の割合 β (発現頻度) を粗度計測データのヒストグラムから算出する。

⑦ 粘性底層より露出する粗度の全前方投影面積 S_k は、粗度形状を高さ R_{ce} 、周期 R_{Sme} 正弦波形状で近似し、粘性底層厚みより高い部分の面積を求めて、全粗度数に β を乗ずる

ここで、有効な粗度数を計算することで算出した。

粗度に加わる動圧と摩擦抵抗増加量の関係はほぼ線形となり(図-3)、その傾きが抵抗係数となる。そして各粗度の抵抗係数は、波高波長比と比例する(図-4)ことが判る。

これらの関係を用いて、波状粗面の摩擦抵抗係数 C_F は、滑面の摩擦抵抗係数 C_{F0} 、船速 V 、浸水表面積 S を用いて(1)~(3)式により表せる。

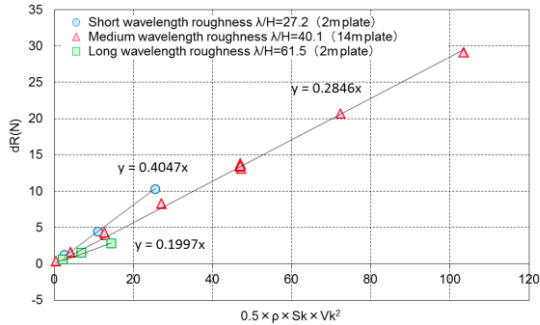


図-3 粗度における動圧と摩擦抵抗増加量の関係

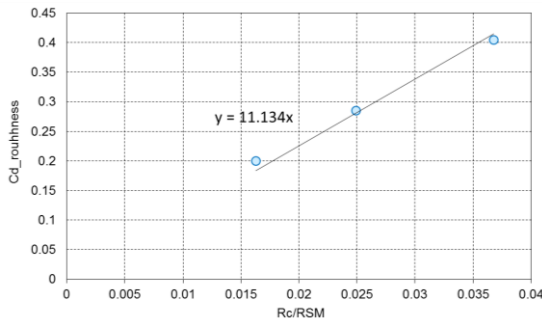


図-4 粗度の抵抗係数と粗度の高さ波長比の関係

$$C_F = C_{F0} + \left(\frac{V_k}{V}\right)^2 \frac{S_k}{S} \alpha C_{d_roughness} \quad (1)$$

$$C_{d_roughness} = c \frac{Rc}{RSm} \quad (2)$$

$$c = 11.134 \quad (3)$$

4. 実船スケールにおける塗装粗面摩擦抵抗の推定

塗装粗面の摩擦抵抗係数の推定式(1)を用いて、粗度パラメータが流体摩擦抵抗に与える尺度影響を推定した。船長200mの船舶の船速を10ktから40ktまで変化させた場合の滑面に対する摩擦抵抗増加率を図-5に示す。船速の増加に伴い、摩擦抵抗の増加率が増加するが、船速の増加に伴い、摩擦抵抗増加率が次第に飽和していくことが判る。

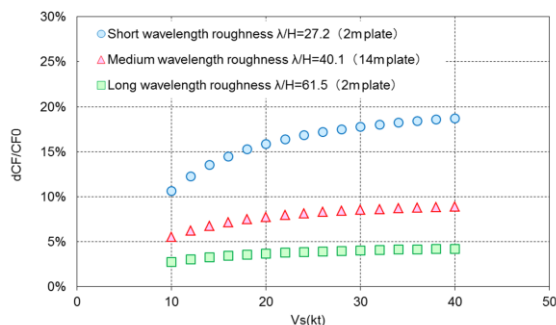


図-5 全長200mの船の船速と摩擦抵抗係数増加率の関係

続いて、船速を15ktに固定して、船の長さを50mから500mまで変化させた場合の滑面に対する摩擦抵抗増加率を図-6に示す。船速の場合とは逆に、船の長さの増加に伴い、摩擦抵抗の増加率が低減していき、摩擦抵抗増加率の低減が次第に飽和していくことが判る。

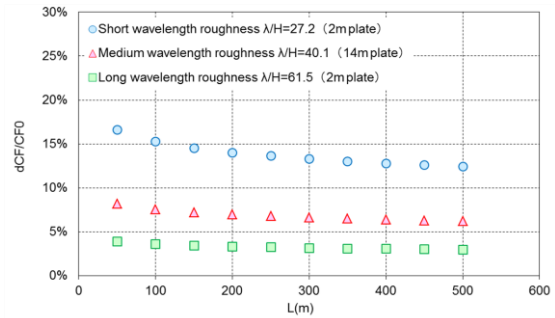


図-6 船速15ktの船の全長と摩擦抵抗係数増加率の関係

5. まとめ

粗度の高さの分布と粘性底層厚みの関係から得られる有効粗度高さとその発現頻度、粗度の平均波長から求める粗度の総個数、これらから算出できる粗度の総前面投影面積、粗度の波高波長比から求める抵抗係数により、波状粗面の摩擦抵抗係数の推定式を導出した。

推定式により波状粗面の摩擦抵抗に与える尺度影響を検討したところ、速度の増加に伴い、摩擦抵抗増加率は増加するが、増加率の増加は次第に飽和していくこと、船長の増加に伴い、摩擦抵抗増加率が低減するが、増加率の低下は次第に飽和していくことが判った。

謝辞

本研究は国土交通省の「次世代海洋環境関連技術開発支援事業」及び日本海事協会の共同研究テーマの一部として実施しました。

参考文献

- 1) H. Schlichting: Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill Book Company, 1968
- 2) 川島英幹他: 塗装粗面摩擦抵抗の尺度影響について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第24号, 2017, pp. 729-734.
- 3) 川島英幹他: 平行平板曳航法による塗装面の乱流摩擦抵抗計測, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第5号, 2012, pp. 7-12.
- 4) 濱田達也他: 摩擦抵抗評価のための二重ブランコ式曳航法による長尺平板水槽試験の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第24号, 2017, pp. 725-728.