

(昭和59年5月 日本造船学会春季講演会において講演)

表面粗度による抵抗増加の研究 (第2報)

正員 小野木 裕* 正員 山崎 芳嗣
 正員 仲渡 道夫** 正員 姫野 洋司***
 正員 田中 一朗**** 正員 鈴木 敏夫****

Resistance Increase due to Surface Roughness (2nd Report)

by Hiroshi Onogi, *Member* Yoshitsugu Yamazaki, *Member*
 Michio Nakato, *Member* Yoji Himeno, *Member*
 Ichiro Tanaka, *Member* Toshio Suzuki, *Member*

Summary

In the previous paper, the hydrodynamical characteristics of sand roughened surface and painted one were discussed and it was found that the differences of characteristics between two types of roughness were remarkable.

Trying to explain these differences, the simple wavy roughened surfaces are investigated experimentally in this report.

The main conclusions obtained are as follows ;

(a) In the fully developed state, the resistance curves of wavy roughened surfaces are nearly parallel to that of smooth one (Fig.2 ; W-1,2,4,5,6,7), and these features are the same as painted surfaces.

(b) However, the wavy roughness having steeper slope than about 1/10 shows the sand roughness characteristics (Fig.2 ; W-3) and the slope seems to be a critical value (Fig.2 ; W-2,3).

(c) In the fully developed region, the roughness functions of wavy roughened surfaces take constant values (Fig.5, Fig.6), whose magnitudes are nearly in proportion to the roughness heights (Fig.7).

(d) The empirical equations of roughness functions are introduced (Eq.(5), (6), (7)).

(e) For three dimensional wavy roughened surface, only one case is tested and the result is shown in Fig.3.

Finally, as an application the ΔC_F of a tanker whose skin plates are covered with various roughnesses are calculated (Fig.9).

1 緒 言

筆者らは前報¹⁾において、砂粗面管5種、塗装粗面管3種の管内流実験を行い、BSRA方式による mean apparent amplitude k_A と Nikuradse の等価砂粗度 k_S との関係を探ると共に、砂粗面と塗装粗面の摩擦抵抗特性の相違を論じた。また、局部摩擦抵抗増加 ΔC_f と roughness function $\Delta U/u_*$ の線形性、および摩擦抵抗の計測結果から roughness function を求める方法を論

じると共に、新しい粗度パラメータ $h(=(Uk/\nu) \cdot R_n^{-1/3})$ を提案した。しかしながら、色々な粗面に対する roughness function の決定という重要な課題は残されていた。

本報では規則的2次元波状粗面に関し、波長、波高と roughness function の関係を実験的に調べた。これは、船体外板のような複雑な粗面と roughness function の関係を論じる準備である。

第2章では実験を行った粗面管について記す。第3章では規則的2次元波状粗面管の管内流実験結果を示すと共に、規則的3次元波状粗面管の実験結果についても述べる。第4章では規則的2次元波状粗面管の実験結果から求めた、roughness function の実験式を示す。第5

* 日本鋼管(株)津研究所

** 広島大学工学部

*** 大阪府立大学工学部

**** 大阪大学工学部

章では応用例としてタンカー船型が色々な粗面で覆われた時の ΔC_F の計算を行う。

2 波状粗面管

2.1 粗面形状の選択

実験すべき規則的2次元波状粗面の形状は、前報における砂粗面と塗装粗面の抵抗特性の差を明らかにする目的で選んだ。砂粗面と塗装粗面の抵抗特性の差は次のとおりである。

(1) 管摩擦抵抗係数 f は、砂粗面では完全粗面流域に達した後はレイノルズ数 R_{nD} ($=\bar{u}D/\nu$: \bar{u} は管内平均速度, D は管内径, ν は水の動粘性係数) に関係なく一定値となり, その大きさは相対砂粗度 k_s/D (k_s は等価砂粗度) のみの関数となるのに対し, 塗装粗面では滑面の抵抗曲線とはほぼ平行に変化して, レイノルズ数の増加と共に減少する。

(2) roughness function $\Delta U/u_*$ (ΔU は境界層外端における速度欠損, u_* は摩擦速度) は, 砂粗面では粗度レイノルズ数 u_*k/ν (k は粗度高さ) の増加と共に増加するが, 塗装粗面では粗度レイノルズ数に関係なく, 粗度高さなどに応じて一定値となる。

これらの特性の相違の実例をあげると, 粗度高さは共に $k_A \approx 130 \mu\text{m}$ と等しい砂粗面管 No. 3 と塗装粗面管 No. 9 を比較すると, 砂粗面管は塗装粗面管に比べて抵抗係数 f が約2倍 ($R_{nD} = 5 \times 10^3$), roughness function $\Delta U/u_*$ が約4倍 ($u_*k/\nu = 100$) であった。

実験すべき波状粗面の波長, 波高の選定に当たり, この相違に着目し, 波高を前述の両粗面管 No. 3, 9 の k_A に等しい $130 \mu\text{m}$ と一定にし, 波長を 1.0 mm から 8.0 mm まで変化させた波長シリーズ5種類と, 波長を 4.0 mm と一定にし, 波高を変化させた波高シリーズ3種類を計画した。また, 粗面形状としては \sin 波形を採用したかったが, 製作上の困難から円弧の組み合わせにて連続した波状粗面を製作した。

2.2 波状粗面管の製作

実験に用いた管は前報の粗面管と同様に全長 4 m で, 長さ 200 mm の管を 20 個連結させて製作した。上流側 2 m は境界層の発達に必要な助走部で, その下流に損失圧力計測のための静圧孔 (1.0 mm^2) を 1.5 m 離れた2断面の管壁に各々4個ずつ設けた。

管内壁への波状粗面の加工には NC 旋盤を用いた。波状粗度の山, 谷が管軸と直角となるよう, すなわち, 流れに対して2次元粗面となるように加工してある。Fig. 1 に加工後の各粗面を触針式粗度計にて計測した結果を, Table 1 にはこれらの粗度計録から読み取った波高 波長の値を示す。波状粗面管 No. W-1~W-5 は波長シリーズを, W-4, 6, 7 は波高シリーズを構成する。

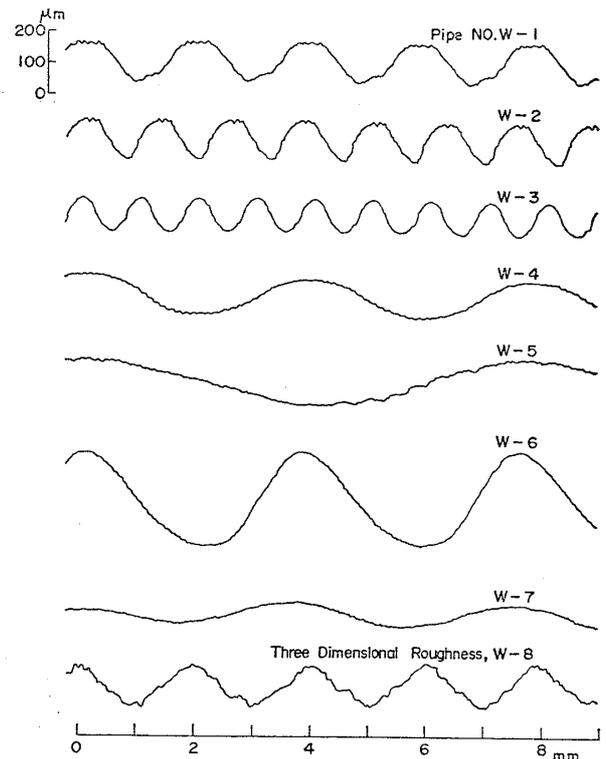
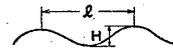


Fig. 1 Roughness records examples

Table 1 Wavy roughness characteristics

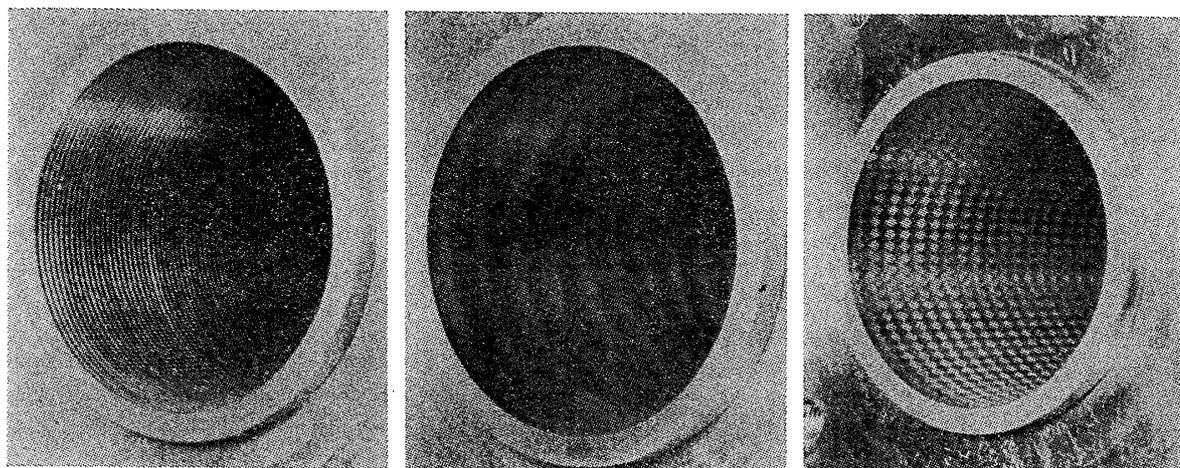
Pipe No.	Wave Shape		H/l	Diameter
	Height [H]	Length [l]		
W-1	120 μm	2.00 mm	1/16.7	52.00 mm
W-2	122	1.22	1/10.0	52.00
W-3	100	1.00	1/10.0	52.00
W-4	118	3.94	1/33.4	51.90
W-5	140	7.78	1/55.6	51.90
W-6	300	3.81	1/12.7	52.00
W-7	60	3.97	1/66.2	52.00
W-8*)	W-4(Longi.)+W-1(Trans.)		—	52.00

* Three-Dimensional Wavy Roughness



各波形共に高さ約 $10 \mu\text{m}$ 程度の小さな凹凸が主波形に重なっているが, これを除去することは困難であり, また, その過程で波状粗面形状を損うおそれがあったため再加工は行っていない。

一連の2次元波状粗面に対する管内流実験を行った後, 3次元影響を調べるため波状粗面管 No. W-4 をさらに加工し, 円周に沿っても波状粗度をつけた3次元波状粗面管 No. W-8 を製作した。加工は, NC ワイヤークット法で行い, その加工面の粗度計測結果を Fig. 1 中に示す。旋盤加工と異なり大容量電流を用いて素材を溶解させて加工するため, その表面は他の波状粗面に比べて粗くなっているが, 加工の困難を考えると致しかたない。Photo. 1 に波状粗面管 No. W-2, 5, 8 の外観を示す。



PIPE No. W-2

PIPE No. W-5

PIPE No. W-8

Photo.1 Examples of wavy roughened pipes

3 管摩擦抵抗および速度分布計測

$$f = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{2D}{\rho \bar{u}^2} \quad (1)$$

実験に使用した管内流計測装置は前報に示したものと同一であり、貯水槽 (2m³), ポンプ (揚程=38m, 吐出量=1.6m³/min), モーター, 流量計, バルブなどから構成されている。管摩擦抵抗係数 f は, 前章にて述べた波状粗面管の 1.5m 離れた 2 断面間の損失圧力から, (1) 式に示す Darcy-Weisbach の公式により求めた。

ここで, Δp は損失圧力, Δx は静圧計測断面間距離, D は管内径, \bar{u} は管内平均速度である。

このような方法で得られた各 2 次元波状粗面管の管摩擦抵抗係数を Fig.2 に示す。図中には比較のために砂粗面管 No.3, 塗装粗面管 No.9 の結果も合わせて示した。また, 図中の実線は Prandtl の滑面管に対する摩擦抵抗曲線²⁾ (2) 式である。

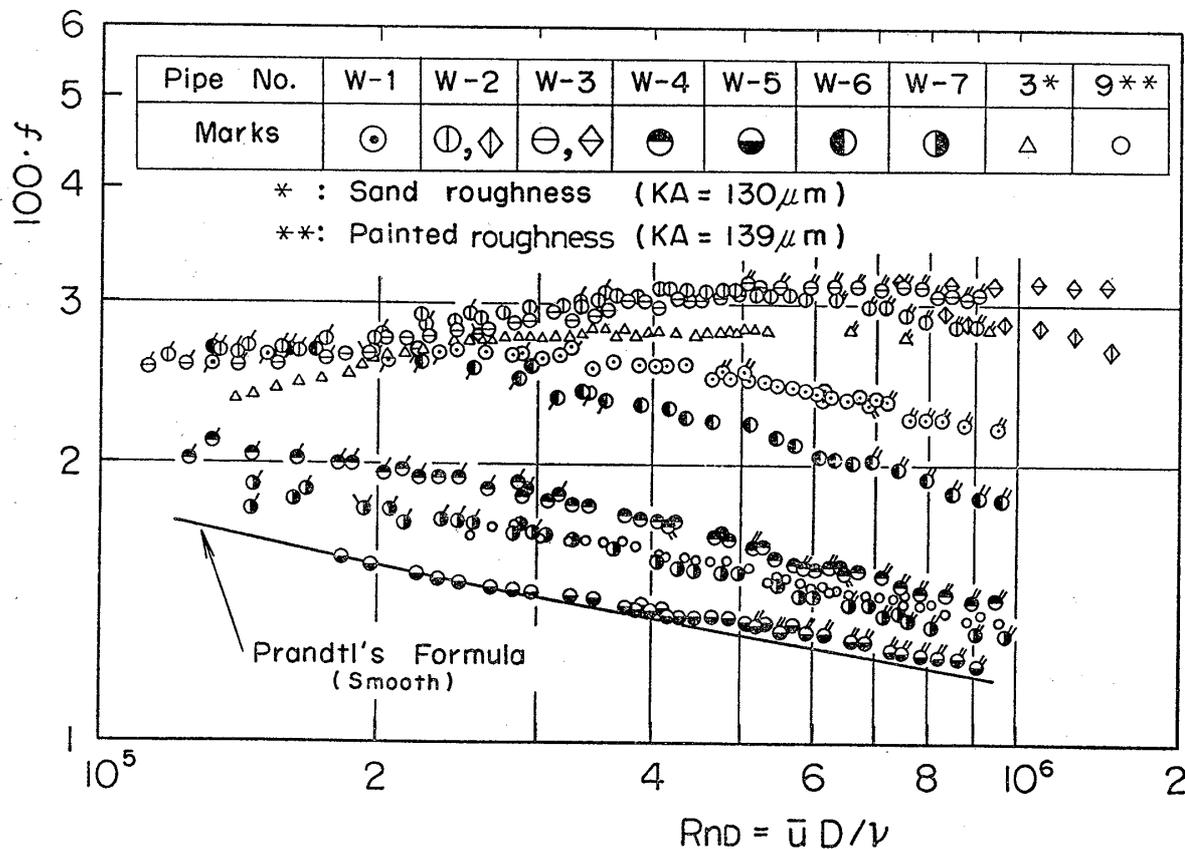


Fig.2 Frictional resistance in roughened pipes

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \left(\frac{\bar{u}D}{\nu} \sqrt{f} \right) - 0.8 \quad (2)$$

滑面管の実験結果が(2)式とほぼ一致することは、すでに前報で確認している。また、流速の調整のみによるレイノルズ数 R_{nD} の変化の範囲では波状粗面管の抵抗特性を明確に把握できなかったため、水温を下げた低レイノルズ数域の計測 (Fig. 2中「'」付き記号)、あるいは水温を上げた高レイノルズ数域の計測 (同じく「''」付き記号) も行った。さらに、波状粗面管 No. W-2, 3の実験については前述のものより大容量のポンプ・モーターに交換し、より高いレイノルズ数域での追加計測も行った (同じく記号 ⊕, ⊙)。

波状粗面管の抵抗曲線は、W-3を除きすべて、実験を行ったレイノルズ数の範囲で塗装粗面と同様に滑面のそれにはほぼ平行に変化し、滑面との差は波長、波高によって異なっている。

波長シリーズで比較すると、管摩擦抵抗係数は、波長が長くなるに従い小さくなっており、最も波長の長い W-5 (波高=140 μm, 波長=7.78 mm) では滑面の値より僅かに約3%増加するに過ぎない。

波高シリーズでは当然ながら摩擦抵抗係数は、波高の大きさの順となっているが、W-1とW-6、そしてW-5とW-7を比較した場合、いずれも波高は低いが、波長の短いW-1, W-7の方が抵抗係数は大きくなっており、波状粗面の勾配影響が現われている。

また、波状粗面管 No. W-2とW-3も興味ある結果を示している。粗面形状は、勾配 (波高/波長) は共に1/10と同一値であるが、波高、波長はW-2がやや大きく、抵抗係数もレイノルズ数 $R_{nD} < 5 \times 10^5$ ではW-2がやや大きい。しかし、 $R_{nD} > 5 \times 10^5$ ではW-2が波状粗面の抵抗特性を示し、レイノルズ数の増加と共に減少するのに対し、W-3は砂粗面の抵抗特性を示し、レイノルズ数にかかわらず一定値となっている。このことから、砂粗面と波状粗面との勾配の限界値はおおよそ1/10であると推論できる。この値は笹島らが Fromm の縞板を用いた実験結果から推定した限界値 1/12 とほぼ一致している。

次に、3次元波状粗面管 W-8 の管摩擦抵抗の計測結果を Fig. 3 に示す。図中に比較のため塗装粗面管 No. 9 ($k_A = 130 \mu\text{m}$)、2次元波状粗面管 No. W-4 の計測結果も記入してあるが、W-8 の管摩擦抵抗係数はレイノルズ数 $R_{nD} < 6 \times 10^5$ ではW-4より小さく、 $R_{nD} > 6 \times 10^5$ ではW-4とほぼ一致している。したがって、2次元波状粗面、3次元波状粗面の摩擦抵抗係数は共に滑面值に対してほぼ平行に変化するが、3次元粗面の方が傾斜は緩やかである。刷毛目を管軸に直角となるよう粗度を施した塗装粗面管 No. 9も3次元波状粗面管と同様の傾向

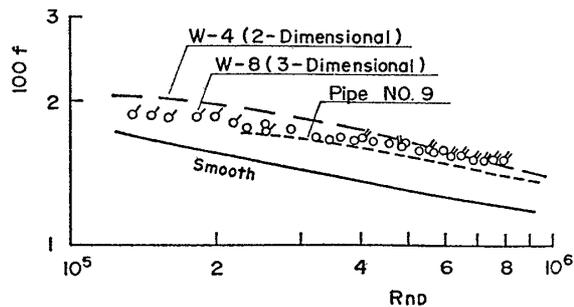


Fig. 3 Frictional resistance in three dimensional wavy roughened pipes

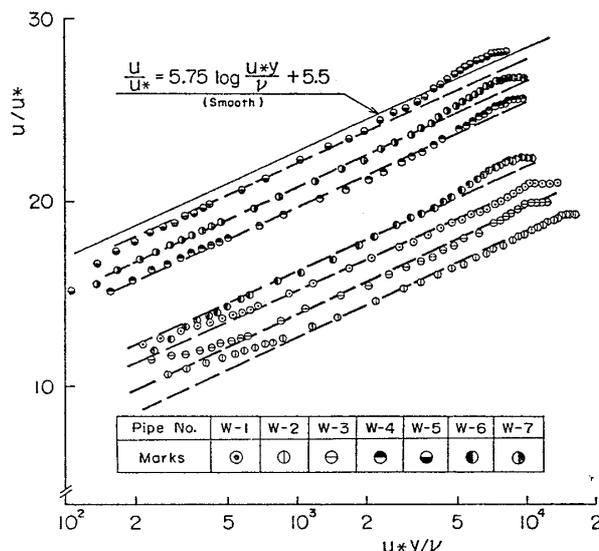


Fig. 4 Universal velocity profiles in two dimensional wavy roughened pipes

にあり、粗面に3次元性を含んでいたものと思われる。

2次元波状粗面管の速度分布計測結果を壁法則表示にて Fig. 4 に示す。各粗面に対する摩擦速度 u_* は管摩擦抵抗計測結果から求めた ($u_* = \bar{u} \cdot \sqrt{f/8}$)。 y は壁からの距離であり、ここでは波状粗面の谷底部を原点としている。各波状粗面の計測結果の平均線は、図中に示した滑面管の値 (3) 式

$$u/u_* = 5.75 \log(u_*y/\nu) + 5.5 \quad (3)$$

とほぼ平行となっている。この平行移動量 $\Delta u/u_*$ (粗度影響による境界層内速度欠損量 Δu は層内でほぼ一定であり、境界層外端における値 ΔU と等しいと考えてよい) が粗度特性量 roughness function であり、波状粗面の抵抗増加量も砂粗面と同様に roughness function と関係づけられる。

そこで、波状粗面形状と roughness function の関係を調べるため、管摩擦抵抗計測結果から roughness function を求めた。結果を Fig. 5 に示す。図中の△記号は Fig. 4 の速度分布計測結果から求めた roughness function であるが、摩擦抵抗値から求めた値とほぼ一

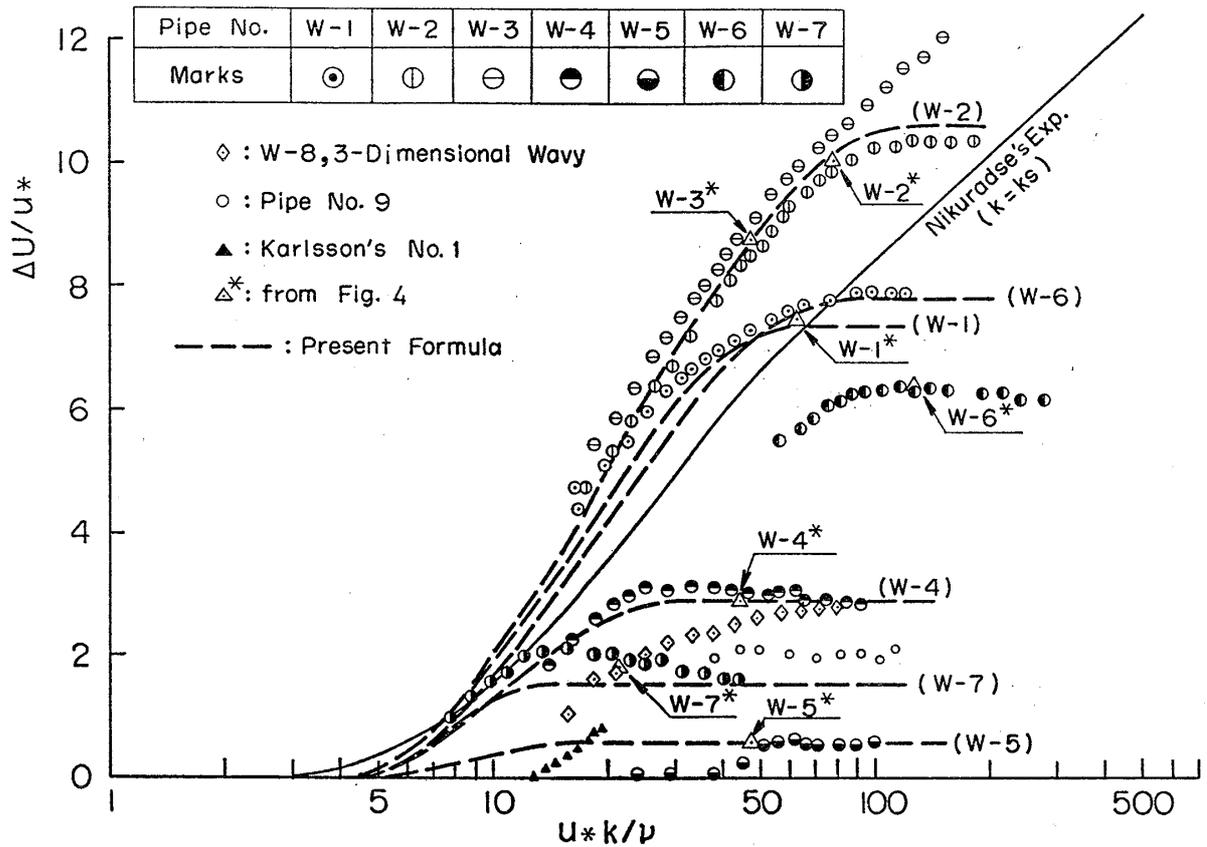


Fig. 5 Roughness function $\Delta U/u_*$ of wavy roughened surfaces

致している。Fig. 5 中には比較のため塗装粗面管 No. 9, Karlsson の実船レプリカ粗面 No. 1⁴⁾, Nikuradse の砂粗面の実験値を合わせて示す。ただし、横軸の粗度レイノルズ数 u_*k/ν に用いる粗度高さ k は、本来すべての粗面に共通した値を用いるべきではあるが、ここではまちまちであり、波状粗面に対しては k =波高、塗装粗面に対しては 50 mm 区間の平均振幅 (mean apparent amplitude) k_A , 砂粗面に対しては等価砂粗度 k_s を採用した。

波状粗面の roughness function は粗度レイノルズ数の増加に伴って大きくなり、ある限界の粗度レイノルズ数に達した後は一定値になり塗装粗面と同様の性質を示す。それに対し砂粗面では粗度レイノルズ数の増加と共に roughness function も大きくなり、一定値になる傾向はない。したがって、塗装粗面は複雑な形状ではあるが波状粗面に属する抵抗特性を持っており、すべての単純な粗面は大別して砂粗面的なものと同様に波状粗面的なものに分けて良いと考えられる。

また、2次元波状粗面 No. W-4 と3次元波状粗面 No. W-8 の roughness function を比較すると、飽和領域における大きさは等しい ($\Delta U/u_* \approx 3$) が、遷移領域では Fig. 3 に現われた傾斜の相違が出ており、3次元粗面の方が小さくなる。将来、複雑な粗面を取扱う場合にはこの差について考察することが必要である。

4 波状粗面に対する roughness function の検討

本章では先に得られた2次元波状粗面の roughness function $\Delta U/u_*$ を実験式で整理すると共に、塗装粗面の roughness function との比較について述べる。

実験式を導くに当り、波状粗面の roughness function を Fig. 6 に示すように (1) 飽和領域、(2) 遷移領域、(3) 滑面領域の3つの領域に分けて考える。

(1) 飽和領域

波状粗面管 No. W-4, 6, 7 は波長を一定 (約 4 mm) とした波高変更シリーズであるとみて Fig. 5 より飽和

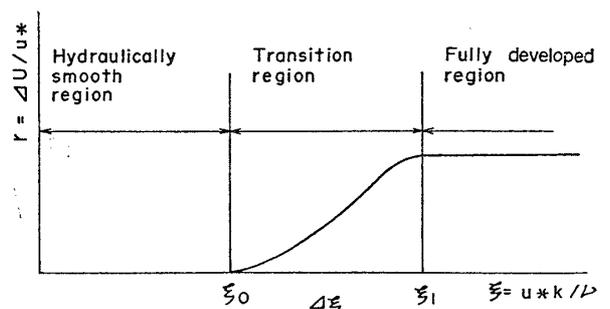


Fig. 6 Three regions of wavy roughness function

す。

次に、実船外板のような塗装粗面の roughness function について考える。塗装粗面の roughness function には、前報にて詳しく述べたが、笹島らの人工劣化塗装粗面平板の抵抗試験結果⁵⁾から求めた値 (前報 Fig. 9¹⁾) や、Karlsson の実船外板レプリカを用いた実験結果⁴⁾ (No. 1 のみ Fig. 5 中に記載) などがある。これらの roughness function は粗度レイノルズ数に対して右上りの傾向を示しており、前報では筆者らの塗装粗面管とは性質が異なっているように思われた。しかしながら、これまでの波状粗面に対する考察に従えば、笹島らや Karlsson の塗装粗面は未だ遷移領域にあって飽和領域に達していないと考えられる。ただし、塗装粗面の roughness function を整理するには粗面形状を表わす量、たとえば、波長、勾配、密度などを導入する必要があると思われるが、ここでは粗度高さ k_A (mean apparent amplitude) のみを考慮している。

5 ΔC_F の計算例

roughness function がわかれば滑面に対する局部摩擦則と組み合わせ、3次元乱流境界層計算法に組み込むことにより船体の抵抗増加 ΔC_F の計算を行うことができる。本章では応用計算例として粗度高さが $130 \mu\text{m}$ の波状粗面、塗装粗面、砂粗面で一様に覆われた船体の各々の ΔC_F の計算結果を示す。局部摩擦則は前報と同様 Coles の wall-wake law を用い、各粗面に対しては以下の5種類の roughness function を用いた。

(1) 波状粗面

2次元波状粗面に対しては前章に示した実験式 (波長は波状粗面管 No. W-4, 5 に相当する 4 mm と 8 mm の2種類) を、3次元波状粗面には W-8 の実験結果を用いた。

(2) 塗装粗面

塗装粗面管 No. 9 と Karlsson のレプリカ No. 1 を同一粗面とみなした関数と、既存の多くの実験結果を近似的に fitting した姫野の式⁶⁾の2種類を用いた。

(3) 砂粗面

Dvorak の近似式⁷⁾を用いた。

供試船は $L \times B \times d = 385 \text{ m} \times 70 \text{ m} \times 23.27 \text{ m}$ の主要目をもつタンカー船型であり、レイノルズ数 $R_n = 2.70 \times 10^9$ について計算を行った。Fig. 9 に各 Sq. St. における局部摩擦抵抗係数 C_f の平均値 \bar{C}_f の船長方向の分布を示す。Table 3 には Fig. 9 を積分して求めた各粗面の ΔC_F を示す。前報にて砂粗面と塗装粗面の roughness function の比較から、塗装粗面の ΔC_F は砂粗面の約 $1/4$ 程度であると推定したが、今回の計算によってそのことが確認できた。また、波状粗面の場合、同じ

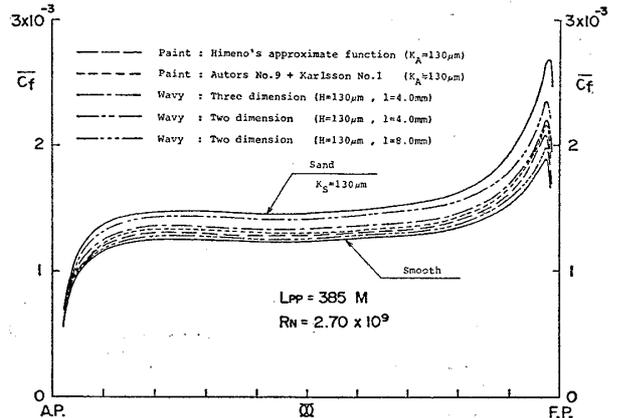


Fig. 9 Calculated local skin frictions

Table 3 ΔC_F calculated by the three dimensional boundary layer theory

Kind of Surface	Calculated ΔC_F ($\times 10^4$)
Himeno's Paint ($K_A = 130 \mu\text{m}$)	0.60
Authors' Pipe NO.9 + Karlsson's Replica No. 1 ($K_A = 130 \mu\text{m}$)	0.86
3-Dimensional Wavy ($H = 130 \mu\text{m}$, $l = 4.0 \text{ mm}$)	1.20
2-Dimensional Wavy ($H = 130 \mu\text{m}$, $l = 4.0 \text{ mm}$)	1.99
2-Dimensional Wavy ($H = 130 \mu\text{m}$, $l = 8.0 \text{ mm}$)	0.36
Sand ($K_S = 130 \mu\text{m}$)	2.70

波高であっても波長によって滑面付近から砂粗面付近までの ΔC_F を取り得ることがわかる。

6 結 言

波状粗面に関し、波長、波高と抵抗増加の関係を調べるため、規則的2次元波状粗面の管内流実験を行い以下の結果を得た。

(1) 飽和領域において、波状粗面の摩擦抵抗係数は滑面值とはほぼ平行に変化する。また、roughness function $\Delta U/u_*$ は一定値となり、その大きさは波高にほぼ比例する。この特性は塗装粗面の特性と同一である。

(2) 波状粗面形状であっても勾配 (波高/波長) が大きい場合は砂粗面と同じ特性を示し、その限界値はおおよそ $1/10$ である。

(3) 実験結果を整理し、規則的2次元波状粗面に対する roughness function を、波高、波長、勾配を用いて表わす実験式を示した。

(4) 一例の実験結果ではあるが、2次元波状粗面と波高、波長の等しい3次元波状粗面の roughness function は飽和領域では2次元波状粗面と等しいが、遷移領域では小さくなる。これは塗装粗面と同一の傾向である。

以上、規則的波状粗面の粗面形状と抵抗特性の関係を大略明らかにすることができたが、船体外板粗度による ΔC_F を精度良く推定するには、複雑な粗面へ議論を進める必要がある。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費の補助によった。

参 考 文 献

- 1) 山崎芳嗣, 小野木 裕, 仲渡道夫, 姫野洋司, 田中一朗, 鈴木敏夫: 表面粗度による抵抗増加の研究(第1報), 日本造船学会論文集, 第153号(昭和58年).
- 2) Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, McGraw-Hill Book Company (1960).
- 3) 笹島秀雄, 吉田栄一: 波状粗面の摩擦抵抗, 造船協会論文集, 第95号(昭和29年).
- 4) Karlsson, R. I.: The effect of irregular surface roughness on the frictional resistance of ships, Proc., Int. Symp. Ship Visc. Resist., SSPA, Göteborg, 1978.
- 5) 笹島秀雄, 寺尾貞一, 横尾幸一, 仲渡道夫, 小川陽弘: 船体外板粗度と摩擦抵抗増加に関する実験的研究, 造船協会論文集, 第117号(昭和40年).
- 6) 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, 第191号(昭和58年).
- 7) Dvorak, F. A.: Calculation of Turbulent Boundary Layers on Rough Surfaces in Pressure Gradient, A. I. A. A. Journal, Vol. 7, No. 9 (1969).