

回流水槽に於ける平板の摩擦抵抗試験について

中山 博・奈良迫嘉一*

On the Flat-plate-frictional-resistance-test in the Circulating Tank

Hiroshi NAKAYAMA and Yoshikazu NARASAKO

Abstracts

The flat-plate-frictional-resistance-tests executed in the Circulating Tank of Kagoshima University enabled the authors to have some formulas concerning the influences coming upon the flat plates from the wetted surface area, roughness of surface, and the fluctuations in water-temperature and the flowing velocity.

In the present test, two kinds of flat plate models made of the Formosan cypress timber were used, which were of the same size as those used in Kyushu University, namely, the size of the one plate was 1 meter in length and 24 centi-meters in breadth, that of another was 1 meter in length and 9 centi-meters in breadth.

The present test was resulted in our derivating an approximate formula which was close to Mr. K.E. Schoenherr's and Mr. G. Hughes's, hither to publicly acknowledged as the formulas having proper values. The formula begotten in the Circulating Tank seems to have been correcter than the one obtained in the towing tank.

The quintessence of the testing results are as described below:—

The increasing contraction of the wetted surface area, the smoothing tendency of the surface roughness, the rising degree of the water-temperature and the lessening of the velocity of flowing water were ascertained to be matched by the decreasing fluid frictional resistance values.

Through these experiments-co-relating with Reynold's number (R_n), frictional resistance co-efficient (C_f) and frictional Resistance (R_f)—such results as mentioned below were obtained and assorted in the formulas.

In case of the circulating tank of our university

$$\text{with a smooth flat plate } C_f = 0.047 / (\log_{10} R_n - 2)^{1.68}$$

$$R_f = [0.047 / (\log_{10} R_n - 2)^{1.68}] \rho l L v^2$$

$$\text{with a rough flat plate } C_f = 0.0077 / (\log_{10} R_n - 2)^{0.20}$$

$$R_f = [0.0077 / (\log_{10} R_n - 2)^{0.20}] \rho l L v^2$$

In case of the towing tank of Kyushu university (opposite to above)

$$\text{with a smooth flat plate } C_f = 0.173 / (\log_{10} R_n - 2)^{2.55}$$

$$R_f = [0.173 / (\log_{10} R_n - 2)^{2.55}] \rho l L v^2$$

Notes. As the turbulence stimulation devices, piano wires of 1 mm in diameter were fitted around the plate-surfaces at the stations of 100 mm abaft the leading edges of the flat plates in Kyushu university.

* 漁船工学研究室 (Laboratory of Engineering of Fishing Vessel, Faculty of Fisheries, Kagoshima University)

1. 緒 言

流体中に置かれている物体はその流れの為に抵抗を受ける。その抵抗の大きさは物体の表面積の大きさ、表面の粗度、形状及び流体の状態等により異なる。そこで筆者等は、本学部回流水槽に於て、滑面平板と粗面平板を用いてそれらの流体摩擦抵抗を測定し、九州大学で行われた同種実験と対比して回流水槽に於ける平板摩擦抵抗算定の実験式を求めた。茲で九州大学曳航水槽に於ては流向に平行に置かれた平板には乱流促進用として、平板の前端から100 mm. 後方位置にトリップ・ワイヤ 1φ のピアノ線を取り付けて、摩擦抵抗を測定しているが、鹿児島大学回流水槽では、最初から流体が乱流であるから平板はそのまま、摩擦抵抗を測定したものである。

2. 試験平板模型と実験方法

実験に使用した平板模型は、九州大学の実験資料に基づき、鹿児島造船所で製作されたものである。(Fig. 1, Table 1 参照)

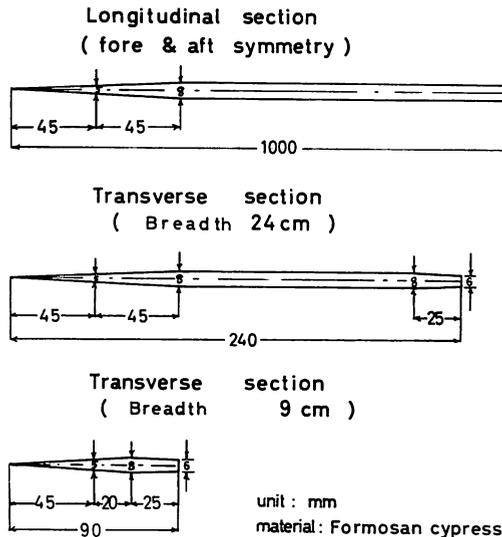
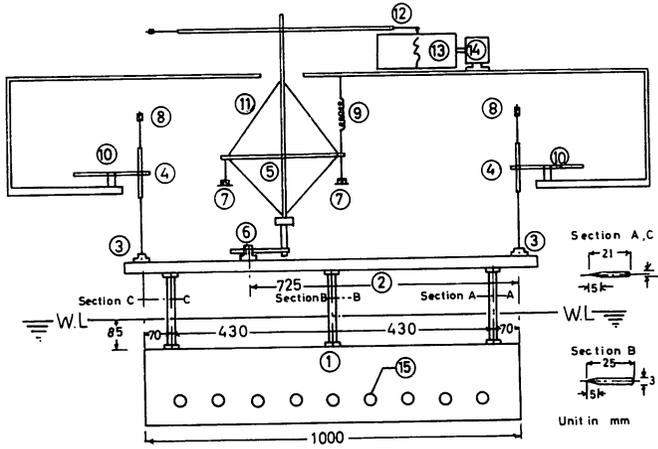


Fig. 1. Flat plates.

Table 1. Particulars of test plates.

Test no.	Length of plate in m.	Breadth or draft of plate in m.	Thickness of plate in mm.	Temperature of water in °C	Date of experiment	Test plate
1	1.00	0.240	8	20.2	Jun. 18, 1966	Smooth flat plate
2	1.00	0.240	8	13.0	Feb. 9, 1967	
3	1.00	0.090	8	19.4	Jun. 14, 1966	
4	1.00	0.090	8	15.0	Feb. 9, 1967	
5	1.00	0.240	8	16.0	Feb. 14, 1967	Rough flat plate
6	1.00	0.090	8	16.0	Feb. 14, 1967	

即ち平板は図の如く縦方向については前後端対称に流線型にしてある。上下方向については、下部は先細に上部は支持フレームに取付けられる様な面を持っている。材料は台湾桧を使用、平板下部にある円はバラスト用埋込み鉛である。(Fig. 2 参照)



- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| ① Flat plate | ⑨ Spring |
| ② Beam | ⑩ Knife edge of horizontal lever |
| ③ Pivoting point of swinging frame | ⑪ Triangle |
| ④ Knife edge | ⑫ Pen |
| ⑤ " " | ⑬ Recording drum |
| ⑥ Horizontal lever | ⑭ Motor |
| ⑦ Weight | ⑮ Lead |
| ⑧ Counter weight of frame | |

Fig. 2. Method of Resistance test.

予備実験の際、平板模型に鉛を入れずに実験をした所、平板の浮力のため下部が斜めに浮く傾向があり、その対策として平板を丸くえぐり取り、そこに鉛を埋込んだ後、平板全体にニスを塗布した。これに依って平板の重心が下へ降り、水中運動に対する安定性を高めた。又、粗面平板は、滑面平板上に理研 cc-180 の水ペーパーを貼布した。

実験は模型製作終了後、本学部大型回流水槽に於いて、昭和41年6月に滑面平板の流体抵抗を、昭和42年2月に滑面平板と粗面平板の流体抵抗測定を行った。滑面平板の抵抗測定を前後2回測定したのは、水温差による粘性のための流体抵抗変化をみるためである。

実験の要領は次の通り。

- (1) Fig. 2 に示す如く測定する平板を、平板支持枠に固着し、それを所定の位置まで水中に入れ前部取付金具の所と後部取付金具の所にバネ秤を掛け同時にそれらに掛る重量を求める。
- (2) (1)で測定した重量に等しいものを、各々の嚮導装置、垂直枠下端に取付け、上下方向のバランスを取った後、平板をセットする。

- (3) 零点調整をする。その時はバネを Fig. 2 の⑨に付け⑦に重量を掛け適当なバネと重量を選び零点を決定する。
- (4) Fig. 2 の⑦に 20 gr. づつ重量を掛けて行き、記録紙上に 20, 40, 60, 80 gr. の基準となるラインを引く。
- (5) 100~600 r.p.m. の間に於いて、流体抵抗を測定する。

尚、以後のグラフ、表に出て来る抵抗値はすべて水中にある平板支持枠フレーム部分の抵抗値を差引いたもので、これを平板の流体摩擦抵抗とする。ここでは板の端縁効果の修正は行っていない。之については次の機会に触れる予定。

3. 実験結果及び考察

[I] 流速と流体摩擦抵抗について

一般に流速が増加するに伴い、流体摩擦抵抗も増加するが、グラフを検討すると平板の種類によって異なるけれども、ある流速の点で曲線の傾斜が変化しているのが分る。(Fig. 3, Table 2 参照) 即ちこの点の付近が臨界流速であり、層流と層流のくづれる乱流との境であろう。

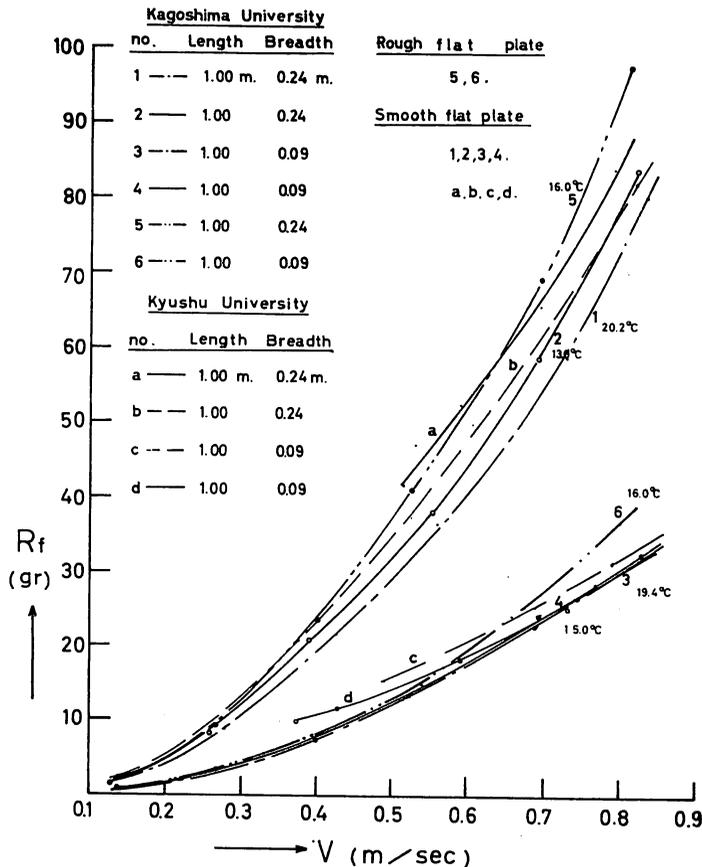


Fig. 3. Frictional resistance curve.

Table 2. Values of V and R_f were given at the Experiments of Kagoshima University.

Length (m)	1.000		1.000		1.000		1.000		1.000		1.000	
Breadth (m)	0.240		0.240		0.090		0.090		0.240		0.090	
Thickness (mm)	8		8		8		8		8		8	
Temperature(°C)	20.2		13.0		19.4		15.0		16.0		16.0	
Test number	1		2		3		4		5		6	
Uncorrected test results	m/sec	gr										
	0.128	1.40	0.126	1.42	0.124	0.05	0.136	0.86	0.138	2.24	0.128	0.22
	0.277	8.75	0.259	8.42	0.255	2.62	0.268	3.36	0.265	9.23	0.266	3.68
	0.425	21.55	0.390	20.81	0.395	8.25	0.401	7.62	0.404	23.70	0.386	8.95
	0.559	36.57	0.554	38.09	0.518	13.34	0.522	13.45	0.525	41.42	0.542	15.10
	0.727	58.70	0.691	58.84	0.691	23.11	0.691	24.30	0.698	69.82	0.677	25.60
	0.331	80.30	0.821	83.79	0.767	28.78	0.831	32.60	0.812	97.88	0.802	37.00
	V	R_f										

一般に流速が速くレーノルズ数の大きい所では、平板の乱流境界層の摩擦抵抗は層流の場合に比べて著しく大きい。之は乱流の拡散作用のため速度分布が一様に近づき、之に反して平板の壁の近くでは壁のために流体の混合現象が妨げられ、そのため壁の極く近くには流体が層流運動をなす極く薄い層（第二の層）が存在することが考えられ、又 STANTON により実験的にも確かめられているが、この層の厚さは非常に薄く層の外側の速度は相当大きいから第二の層内即ち壁面における速度勾配は非常に大きく、従って速度勾配に粘性係数を掛けて得られる摩擦応力は当然大きいと考えられる。従って当然、乱流になると流体抵抗は増加し、曲線の傾斜も大きくなる訳である。平板の幅、粗度によって、このグラフに現れた臨界流速は異なっているように見えるが、これはその臨界流速が記録として現れる点が異なるという事であって、同一レーノルズ数に対する臨界流速が異なるという事ではない。即ち、板幅が狭く、長さが短く、粗度が小さければそれだけ記録には臨界流速は低速時に現れにくく、高速時に於いて現れるのである。

この臨界流速を境にして流体摩擦抵抗は、それ以前よりも増加する割合が大きくなる。又、水温の差によっても流体抵抗も異なる傾度を示すようである。即ち、水温の減少と共に、水の粘性が大きくなり、平板の流体摩擦抵抗は増大する。

〔II〕 レーノルズ数と流体摩擦抵抗係数

平板摩擦抵抗の問題は W. FROUDE, F. GEBERS, G. KEMPF, K. E. SCHOENHERR, G. HUGHES 等に依って今までに行なわれて来たが、筆者等は九州大学の資料と対比して流体摩擦抵抗係数 (C_f) とレーノルズ数 (R_n) との関係から流体摩擦抵抗の分析を行なった。

即ち $R_n = VL/\nu$

$C_f = R_f/\rho L V^2$

V : 相対流速 m/sec

L : 平板の長さ m.

ν : 運動粘性係数 m^2/sec (Fig. 4 参照)

R_f : 流体中の摩擦抵抗 kg.

ρ : 水の比質量 $kg \cdot sec^2 \cdot m^{-4}$ (Fig. 4 参照)

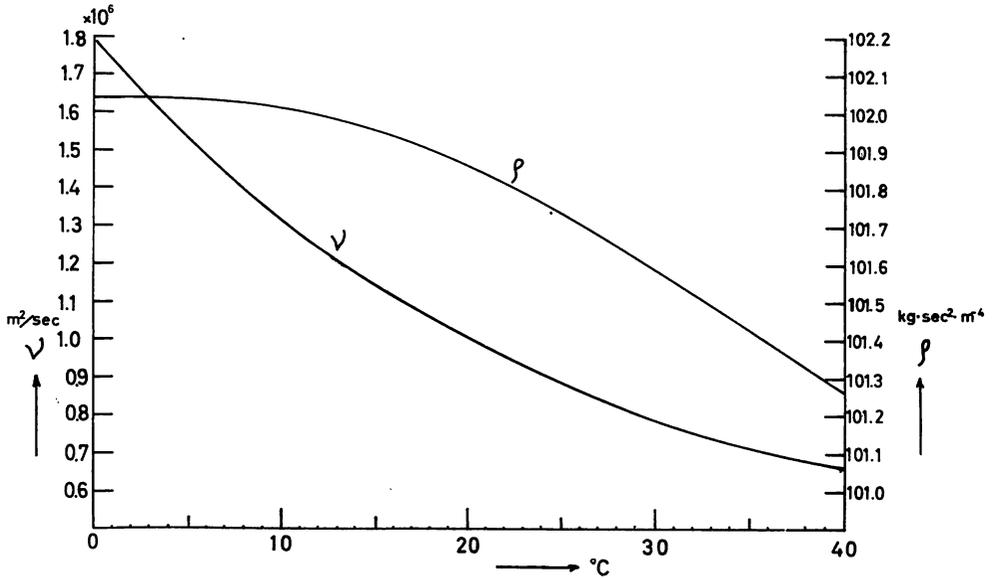


Fig. 4. Value of density and kinematic viscosity of water.

l : 平板面の半周 1/2 ガース m.

上式より R_n, C_f の関係を各々の平板の各流速 V について求め、これを表 (Table 3 (a), (b)) にした。又、それを両対数グラフに書いたものが、Fig. 5 である。Fig. 5 の (1)~(6) のグラフから本実験による Friction line を Fig. 6 に引いた。

この Friction line の式を $C_f = A / (\log_{10} R_n - 2)^n$ で表わせば滑面平板では $A = 0.047, n = 1.68$ を得る。従って鹿大回流水槽に於ける滑面平板では $C_f = 0.047 / (\log_{10} R_n - 2)^{1.68}$ となる。

Table 3-(a). Values of R_n and C_f were given at the Experiments of Kagoshima University.

Length (m)	1.000	1.000	1.000
Breadth (m)	0.240	0.240	0.090
Thickness (mm)	8	8	8
Temperature (°C)	20.2	13.0	19.4
Test number	1	2	3
	R_n C_f	R_n C_f	R_n C_f
Uncorrected test results	1.987 4.295	1.669 4.700	1.996 5.455
	2.981 4.864	2.504 5.539	2.994 4.606
	3.974 4.910	3.339 5.543	3.992 5.044
	4.968 4.794	4.174 5.231	4.990 5.367
	5.962 4.624	5.008 5.052	5.988 5.485
	6.955 4.550	5.843 4.979	6.986 5.387
	7.949 4.723	6.664 5.077	7.984 5.164

Note: values of R_n are given in units of 10^5 .
values of C_f are given in units of 10^{-3} .

Table 3-(b). Values of R_n and C_f were given at the Experiments of Kagoshima University.

Length (m)	1.000	1.000	1.000			
Breadth (m)	0.090	0.240	0.090			
Thickness (mm)	8	8	8			
Temperature (°C)	15.0	16.0	16.0			
Test Number	4	5	6			
Uncorrected test results	R_n	C_f	R_n	C_f	R_n	C_f
	1.754	5.450	1.802	5.314	1.802	5.450
	2.631	4.965	2.703	5.995	2.703	5.388
	3.508	5.313	3.607	5.927	3.607	5.518
	4.385	5.448	4.505	6.082	4.505	5.581
	5.262	5.571	5.405	5.950	5.405	5.843
	6.139	5.494	6.306	5.856	5.306	6.162
7.016	5.246	7.207	6.055	7.207	6.302	

Note: Values of R_n are given in units of 10^5 .
 Values of C_f are given in units of 10^{-3} .

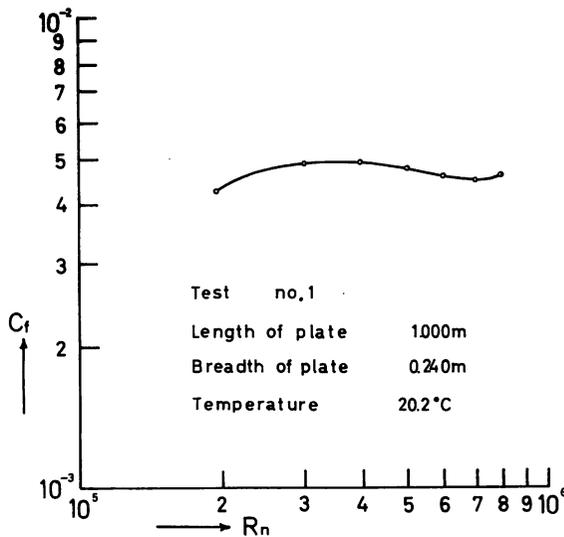


Fig. 5-(1). Friction Line.

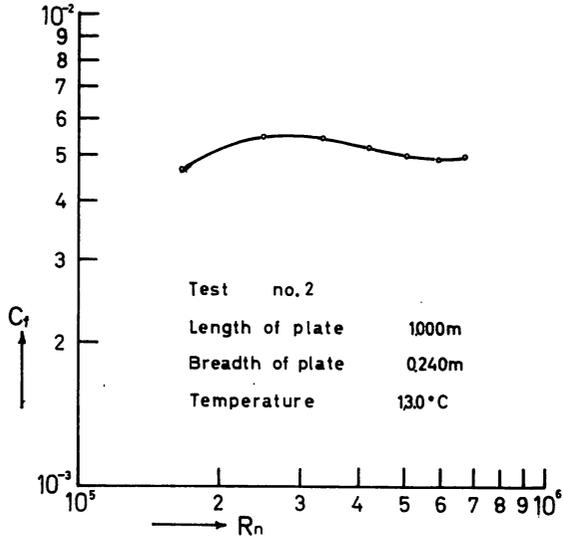


Fig. 5-(2). Friction Line.

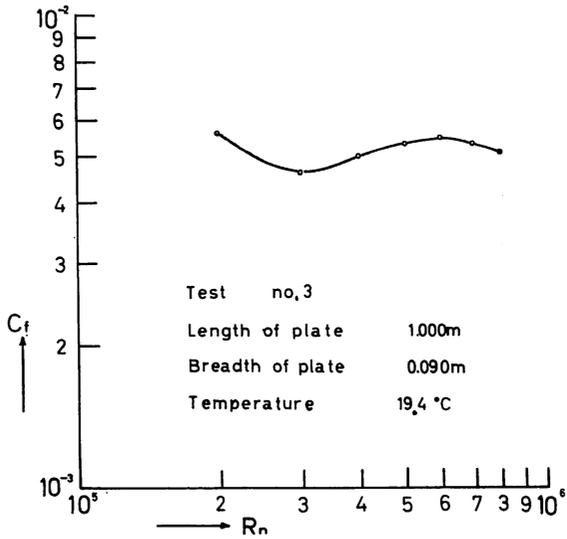


Fig. 5-(3). Friction Line.

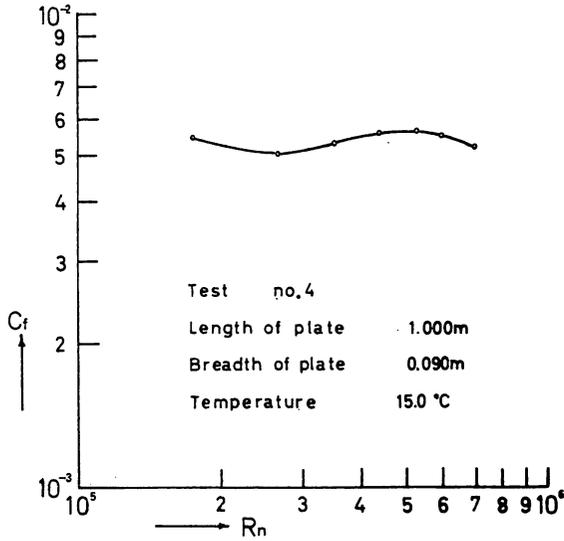


Fig. 5-(4). Friction Line.

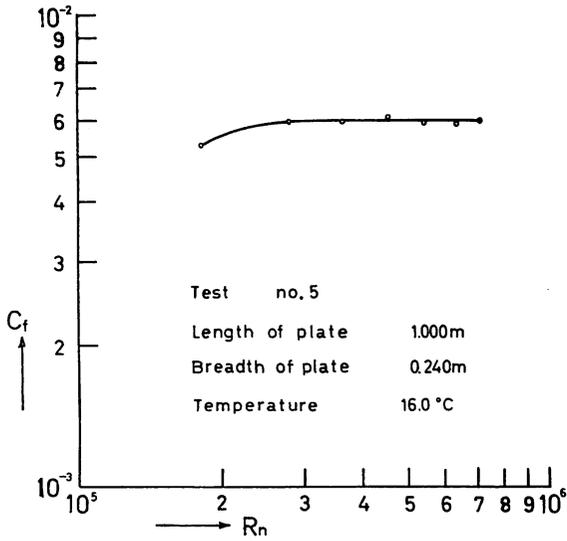


Fig. 5-(5). Friction Line.

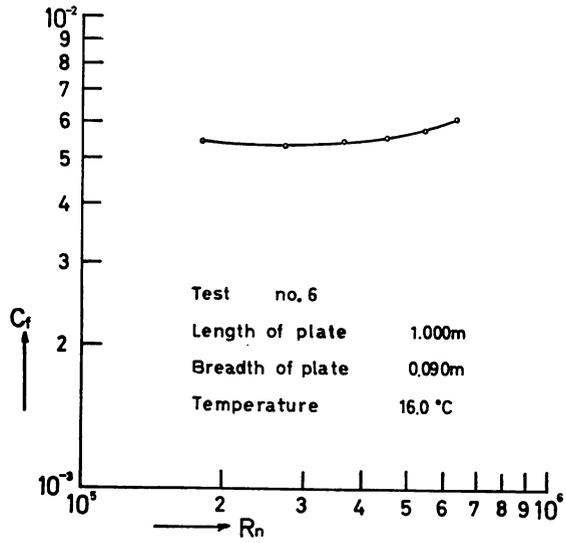


Fig. 5-(6). Friction Line.

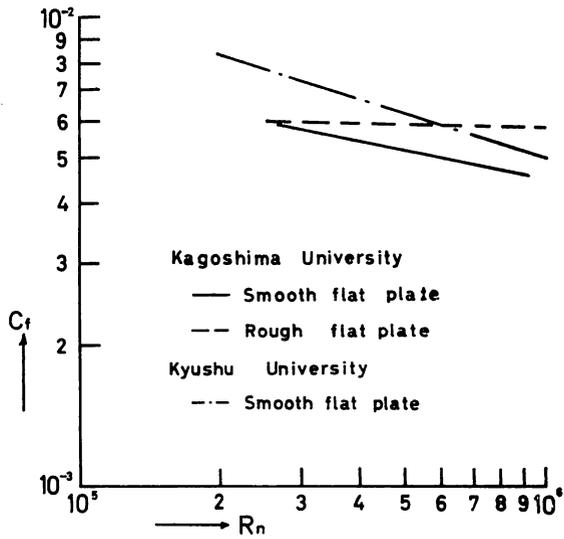


Fig. 6. Friction Line.

之に対比すべき九州大学曳航水槽滑面平板では、Fig. 6 の九州大学の Friction line の式 $C_f=0.173/(\log_{10}R_n-2)^{2.55}$ である。

九州大学の実験は R_n が $10^5 \sim 10^7$ の範囲で行われているが、鹿児島大学の実験は平板の大きさと、回流水槽の性能から現在の所、 R_n を $10^5 \sim 10^6$ の範囲内に限定せざるを得ず、この間での R_n と C_f の関係を分析した。又、九州大学曳航水槽に於ける抵抗値 R_f としては測定値 R_{f_0} に、トリップ・ワイヤ使用に基づく修正量 $\Delta R_{f_0}=0.001\rho x l V^2$ を加え平板の端縁効果に基づく修正量 R_{f_e} を差引き、相対流速 V は、測定時の曳航速度 V_0 に水槽の周縁効果に基づく修正量 $\Delta V=1.1m\left(\frac{L}{B}\right)^{3/4} V_0$ 、 $m=\frac{a}{A}$ (m: Blockage of model test) を加えたものであって、その資料 (Table 4) を Fig. 3 中に追記して、回流水槽実験のものと比較対比した。

Table 4. Values of R_n and C_f were given at the Experiments of Kyushu University.

Length (m)	1.000	1.000	1.000	1.000
Breadth (m)	0.240	0.240	0.090	0.090
Thickness (mm)	8	8	8	8
Temperature (°C)	7.5	21.2	8.3	20.0
Test number	a	b	c	d
Corrected test results	R_n C_f	R_n C_f	R_n C_f	R_n C_f
	3.65 6.389	3.83 5.908	3.57 6.361	5.11 4.446
	4.17 6.196	4.45 7.124	4.30 6.111	5.87 5.692
	4.91 5.560	5.40 5.480	5.03 5.889	3.73 7.566
	5.52 5.639	5.94 5.127	5.54 5.885	4.26 7.088
	6.37 6.308	6.19 5.619	5.83 5.539	6.43 5.403
	6.97 5.236	6.76 5.316	6.78 5.526	6.92 5.081
	7.76 5.220	7.10 5.409	7.29 5.291	7.30 5.056
	8.54 5.271	7.89 1.485	6.41 5.677	7.66 5.423
	9.18 5.015	7.85 5.035	8.16 5.113	8.28 5.307
9.89 7.629	8.44 4.979	9.03 4.879	8.69 5.924	

Note: Values of R_n are given in units of 10^5 .
 Values of C_f are given in units of 10^{-3} .

既述の如く回流水槽に就いては端縁効果の修正は行っていないので、厳密な意味での鹿児島大学回流水槽の抵抗値は之よりやや下廻ることになる。Fig. 3 のグラフによると低速時に於ては回流水槽の抵抗値と曳航水槽のそれとの差が大きく、高速時に於てはその差が少なくなるが、傾向としては後者の値が前者の値よりかなり大きいようで、その結果はむしろ現在迄の所では回流水槽の実験値の方が従来正しいとされて来た K.E. SCHOENHERR, G. HUGHES らの値に近い。

同様にして粗面平板の流体摩擦抵抗に於ける R_n と C_f との関係を求めたが、滑面平板の場合よりも C_f は当然高く、且つ、ゆるやかに変化するようである。

$$C_f=0.0077/(\log_{10}R_n-2)^{0.202}$$

4. 結 論

一般に流向に対して平行に置かれた薄い平板の流体摩擦抵抗はその平板の表面積及び表面粗度、水温、流速等によって決定される。

即ち、平板の表面積及び表面の粗度が小さく、水温が高く、流速がおそい程、流体摩擦抵抗は小さい。レイノルズ数 (R_n) と摩擦抵抗係数 (C_f) 及び摩擦抵抗 (R_f) との関係は次式の通りで、夫々回流水槽の乱流中で流行に平行に置かれた平板は次式を満足する様な、流体摩擦抵抗を受ける。

滑面平板では

$$C_f = 0.047 / (\log_{10} R_n - 2)^{1.68}$$

$$R_f = [0.047 / (\log_{10} R_n - 2)^{1.68}] \rho l L V^2$$

粗面平板では

$$C_f = 0.0077 / (\log_{10} R_n - 2)^{0.20}$$

$$R_f = [0.0077 / (\log_{10} R_n - 2)^{0.20}] \rho l L V^2$$

本実験では模型の大きさと回流水槽の流速の限界から現在、 R_n は $2 \sim 9 \times 10^5$ 程度であるが、その間に於いては C_f は曳航水槽の値、即ち、九州大学、上野氏提案の修正実験式

$$C_f = 0.173 / (\log_{10} R_n - 2)^{2.55}$$

の値より小さく、むしろ K.E. SCHOENHERR, G. HUGHES のそれに近い。

文 献

- 1) 植松時雄(1963): “水力学” 43~45 (産業図書株式会社, 東京, 日本)
- 2) 藤本武助(1957): “水力学概論” 38~62 (養賢堂, 東京, 日本)
- 3) 石原藤次郎・本間仁(1957): “応用水理学上” 11~40 (丸善, 東京, 日本)
- 4) UENO, K., M. TORUNAGA., and T. HARA (1963): “On the Flat Plate Experiments of Kyushu University”, 27, 35~60. (Journal of the society of Naval Architects of west JAPAN)
- 5) 藤本武助(1941): “応用流体力学” 407 (丸善株式会社, 東京, 日本)
- 6) 谷一郎(1967): “流れ学” 161 (岩波書店, 東京, 日本)