

# 琉球大学学術リポジトリ

## 柔物体の抵抗に関する研究 第1報： 一様水流中におかれた柔平板について

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2013-10-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 永井, 實, 真栄田, 義才, 新里, 寛英, Nagai, Minoru, Maeda, Gisai, Sinzato, Kan-ei メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/26608">http://hdl.handle.net/20.500.12000/26608</a>

# 柔物体の抵抗に関する研究

## 第1報：一様水流中におかれた柔平板について

永井實\* 真栄田義才\*\* 新里寛英\*\*\*

### The Drag Force on Flexible Bodies

1st Report, On a flexible flat plate in the uniform water flow

By Minoru NAGAI, Gisai MAEDA and Kan-ei SHINZATO

#### SUMMARY

Effects of the flexibility of a flexible plate in the uniform water flow were examined.

Skin frictional drag force on a flexible plate was measured at the region of Reynolds number  $Rel=10^4\sim 4.5\times 10^5$  by the  $220\times 220\text{mm}^2$  water tunnel established in the laboratory. Friction coefficient of the flexible plate was higher than that of the rigid reference plate at the low Reynolds number, but the difference became small with the increase of the Reynolds number, and finally, the relation was reversed at  $Rel=3\times 10^5$ .

Then, fluttering of the flexible plate was observed. The frequency of the fluttering was proportional to about  $Rel^{-\frac{3}{2}}$  at the low Reynolds number and the Strouhal number calculated on the wake width of the plate was constant of 0.012 at the same region.

#### 1. 緒言

イルカやカマス等の水中動物が、その体重より推測される推進力に対して、予想以上に早い速度で遊泳することはすでによく知られており<sup>(1),(2)</sup>その原因として水中動物の表皮の柔かさあるいは表皮の分泌液の効果<sup>(3)</sup>等による摩擦抵抗の減少が考えられているが、その詳細については今日まで明確でない。

Kramer は、イルカの表皮と力学的に類似となるように、内部に種々の damping oil を満たしたゴム製の

表皮を軸対称物体表面の一部に貼りつけ、海中での曳行実験を行ったが、その結果柔表面の摩擦抵抗係数は剛表面のそれに較べて著しく減少すると報告した。<sup>(4)</sup> Kramer の報告以降、多くの研究者によって追実験あるいは理論的にこれを裏づけようとする試みがなされているが<sup>(5)</sup>いずれも確証を得るに至っていない。種子田らは、ソフランで表面を覆った平板を水槽中で曳行することによって種々の実験を行ったが、いずれも柔表面をもった平板の摩擦抵抗は剛表面平板のそれに同等かあるいはそれよりも高くなるという否定的な結論を得ている。<sup>(6)(7)</sup>

本研究は、物体の柔かさが摩擦抵抗に及ぼす影響を明らかにしようとするもので、その第一段階として最

受付：1975年4月30日

\* 琉球大学理工学部機械工学科

\*\* 琉球大学短期大学部機械工学科

\*\*\* 琉球大学理工学部機械工学科研究生

も簡単な一様水流中に置かれた柔平板（旗）の流動現象について調べたものである。旗に関する研究としては種子田による空気流中の旗の研究<sup>(8)</sup>があるが、水流中の旗と空気流中の旗の間には、流体と旗との密度差の相違や同一流速に対するレイノルズ数の相違など重要な相違点があり、互いに異なる流動現象を示すことが予想される。

本報告では、柔平板の摩擦抵抗曲線を剛平板の摩擦抵抗曲線と比較すると同時に水流中における柔平板の揺動の様子およびその周波数について実験結果を記述する。

2. 記号

本文に使用する記号を以下に掲げる。ただし掲載のない記号は本文中でそのつと説明する。

$C_f$  摩擦抵抗係数  $\left( = \frac{D_f}{\rho U^2 S} \right)$

$D_f$  平板に加わる摩擦抵抗

$d^*$  境界層の排除厚さより計算した平板後流の幅

$l$  平板の長さ

$N$  柔平板の揺動周波数

$Rel$  平板の長さを代表長さとしたレイノルズ数  $\left( = \frac{Ul}{\nu} \right)$

$S$  平板片面の面積

$St$  平板の長さを代表長さとしたストロハル数  $\left( = \frac{Nl}{U} \right)$

$St^*$  平板後流の幅を代表長さとしたストロハル数  $\left( = \frac{Nd^*}{U} \right)$

$t$  平板の厚さ

$U$  一様流の流速

$\delta^*$  境界層の排除厚さ  $\left( = 1.729 \sqrt{\frac{\nu l}{U}} \right)$

$\rho$  流体の密度

$\nu$  流体の動粘性係数

3. 実験装置とモデルの構造

3.1 柔物体研究用整流水槽 柔物体研究用に今回特別に製作した整流水槽を Fig. 3-1 に示す。本装置は前後端に大気に開放された給水槽と集水槽をもち、両水槽の水位差によって測定部の流速を 0 ~ 約 3 m/sec まで変化させることができる。流体工学実験室の地下水槽より汲み上げられた上水は、給水槽、助走部、ノズル、測定部、ディフューザ、集水槽を径て再び地下水槽

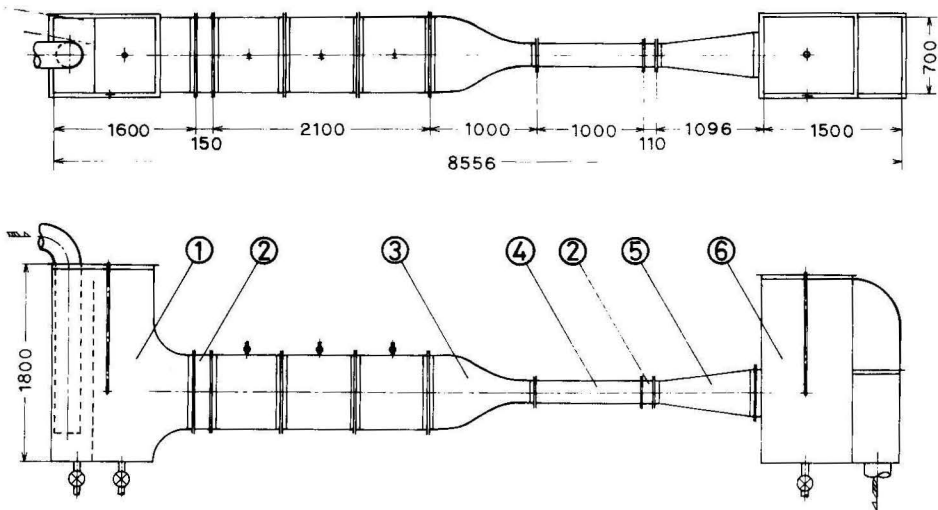


Fig. 3.1 Water channel

- (1. Plenum tank, 2. Flexible joint, 3. Nozzle,
- 4. 220 mm<sup>2</sup> test section, 5. Diffuser, 6. Settling tank.)

へ排出される。測定部の乱れを小さくするために助走部の長さは管の等価直径(700mm)の3倍で入口側に整流板を設置してある。ノズルは断面積縮少率を1/10としその形状は文献(9)のものを採用した。測定部は220mm<sup>2</sup>の正方形断面、長さ1mの直管で、流れの可視化のために4側面は厚さ10mmの透明アクリル板で構成されている。

本水槽の測定部入口における速度分布の代表例を Fig. 3.2 に示す。速度分布はピトー管を上下方向にト

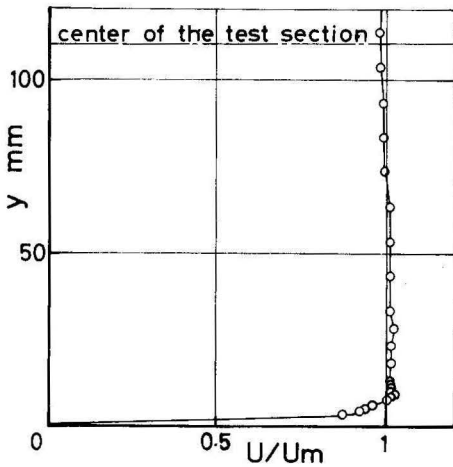


Fig. 3.2 Velocity distribution at the inlet of the test section ( $U_m=95.5\text{cm/sec}$ )

ラバスさせることによって測定した。図より明らかに測定部壁面に発達する境界層は十分に薄く、主流部の速度分布には中央付近にや、速度の減少が見られるが平均速度からのずれは約 1.5%の範囲内にあり、本実験の目的に十分供しうることが認められた。

**3.2 抵抗測定法** 摩擦抵抗の測定方法および抵抗検出素子を Fig. 3.3 および Fig. 3.4 に示す。供試平板に加わる摩擦抵抗は、支軸を介して抵抗検出素子の板バネに伝えられ、板バネに貼付された歪みゲージの歪量を静歪測定器で読みとることによって測定される。抵抗検出素子の検定は、実験の都度、供試平板を実験状態と同様の条件下で静止水中に吊り下げ、流れ方向に既知の荷重をかけることによって行った。歪一抵抗曲線の一例を Fig. 3.5 に示す。

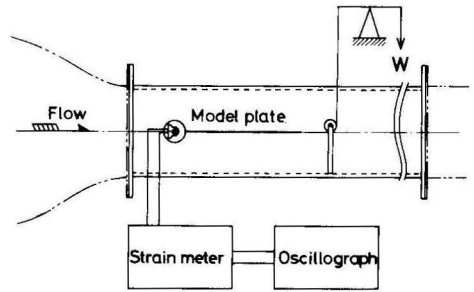


Fig. 3.3 Schematic diagram of the drag measurement

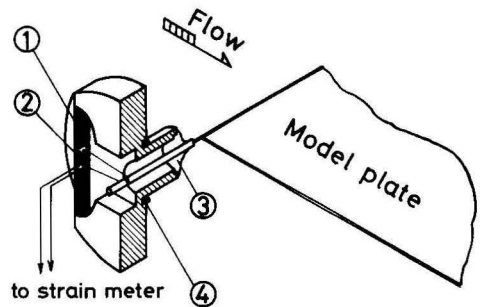


Fig. 3.4 Drag measuring element

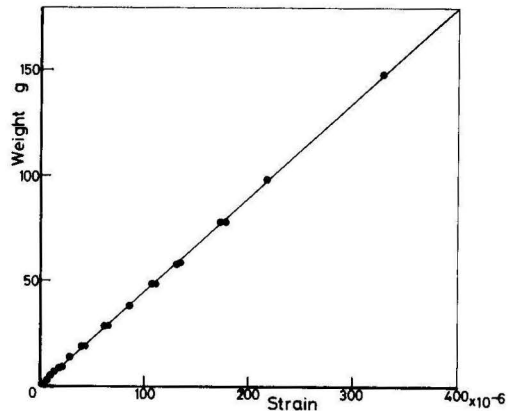


Fig. 3.5 Drag (Weight)-strain curve

**3.3 供試平板** Fig. 3.6 に実験に使用した1種類の剛平板と2種類の柔平板を示す。剛平板は幅200、長さ300、厚さ0.6mmのプリキ板で、板の先端に支軸として外径1.0mmのステンレス管をハンダ付してある。柔平板は幅と長さは剛平板と同一寸法で、厚さ0.1mmの十分に flexibility のあるビニール膜である。この場

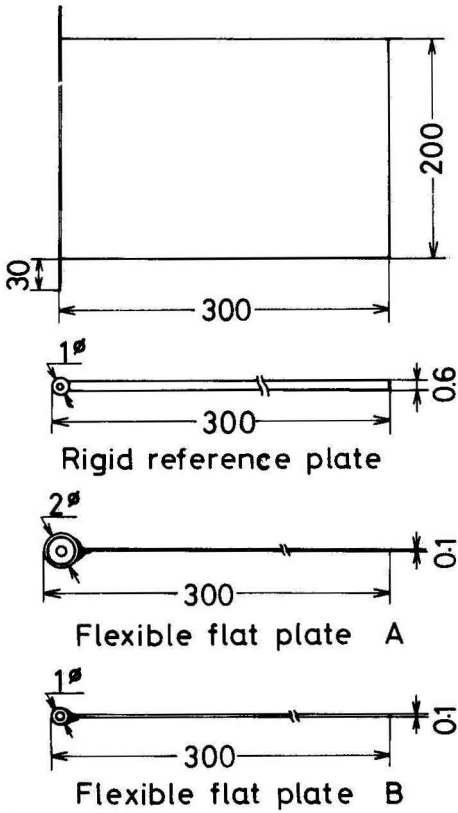


Fig. 3.6 Model plates.

合、支軸の強度の必要性から、平板の厚さに対して軸の直径がかなり大きくなるので、その影響を見るため、直径が2.0mmおよび1.0mmの支軸を取り付けた2種類の柔平板を用意し、それぞれ柔平板Aおよび柔平板Bとした。

4. 実験結果とその考察

4.1 剛平板の摩擦抵抗 剛平板の実験結果をFig. 4.1に示す。図の横軸はレイノルズ数  $Rel = Ul/\nu$ 、縦軸は摩擦抵抗係数  $C_f = D_f/\rho U^2 S$ である。図には数回の実験によって得られた測定値の平均値とそのバラツキ  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$  を同時に示した。ただし  $n$ は測定回数、 $x_i$ は測定値で  $\bar{x}$ は測定値の平均値である。図中の二つの実線のうち下の実線は層流境界層の摩擦抵抗に関する Blasius の式

$$C_f = 1.328 Rel^{-1/2} \tag{1}$$

で、上の実線は乱流境界層に対する理論式

$$C_f = 0.074 Rel^{-1/5} \tag{2}$$

である。

同図より、本実験の場合、平板上の境界層が層流境界層である領域は  $Rel$ で約  $1.6 \times 10^5$  以下の領域と思わ

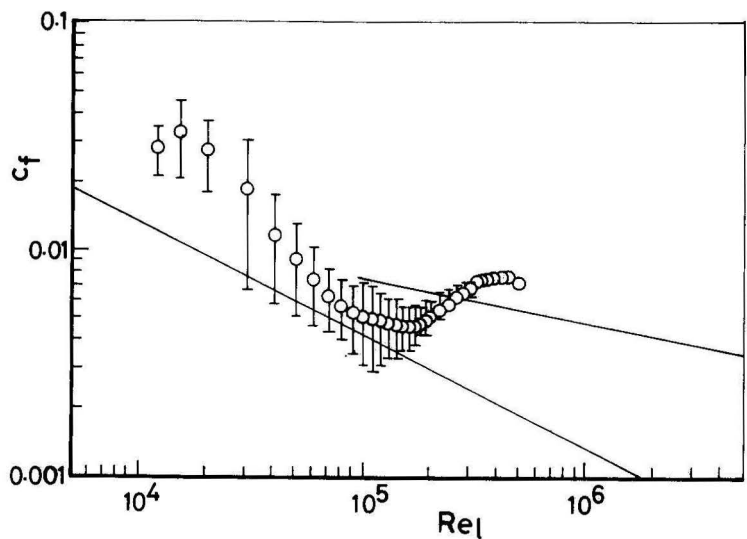


Fig. 4.1 Friction coefficient for the rigid reference plate as a function of the Reynolds number

れる。ただし、 $Rel$ が約 $1.5 \times 10^4$ 付近では測定値は理論値の3～4倍程度高く $Rel$ の増加につれて徐々に理論値に近づいている。 $Rel$ が約 $1.6 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$ における $C_f$ のなだらかな上昇はこの領域が境界層の遷移領域であることを示しており、 $Rel$ が約 $4 \times 10^5$ 以上では完全に乱流境界層の領域であると思われる。

本実験結果は、全体として理論値より高めの $C_f$ 分布曲線を示しているが、平板の摩擦抵抗の他に付加抵抗

として、平板前端の支軸および平板後端で平板を測定部に吊り下げるためにとりつけた直径約0.3mmの細糸に加わる抵抗を流れに直角におかれた円柱の抗力を考えることによって、推定したところ、低レイノルズ数領域の異常に高い領域を除いて、測定値と理論値の差をほぼ説明することができた。

4.2 柔平板の摩擦抵抗 Fig. 4.2 (a)および(b)に、柔平板AおよびBの実験結果を示す。図は剛平板の場合

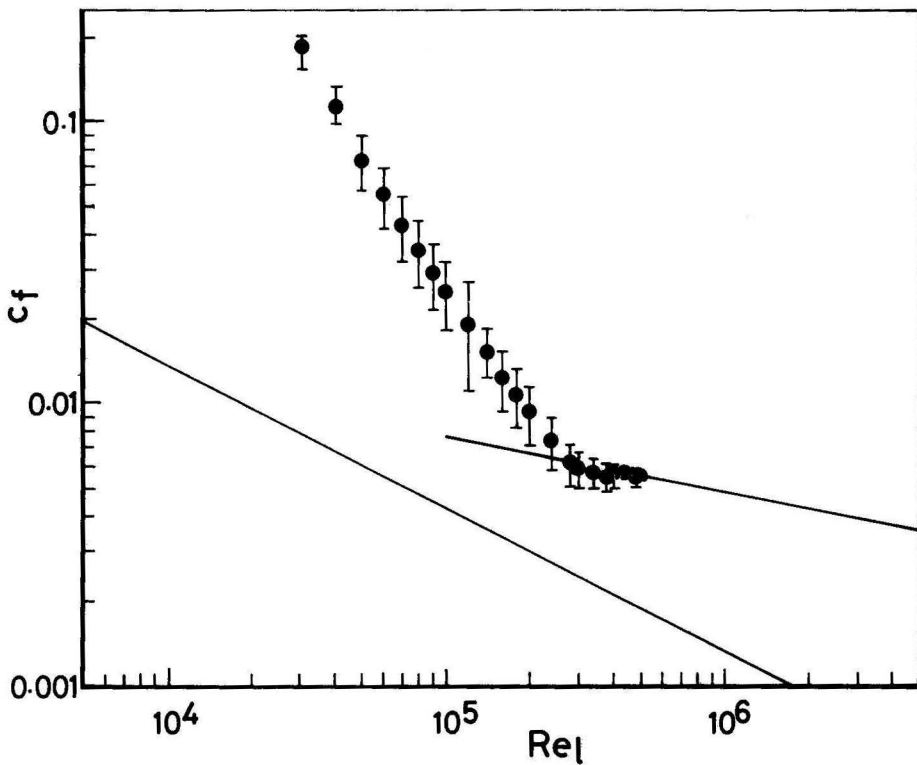


Fig. 4.2 Friction coefficient for the flexible flat plate as a function of Reynolds number (a) Flexible flat plate A

合同様に横軸に $Rel$ 、縦軸に $C_f$ をとり数回の測定値の平均値とバラツキ $\sigma$ を示してある。両図より、柔平板の摩擦抵抗係数は、低レイノルズ数領域において理論値よりもかなり高く理論値の数倍ないし10倍程度に達しており、 $Rel$ の増加とともに次第に乱流境界層の場合の理論値に漸近することがわかる。柔平板上の境界層の遷移領域は、図4.2 (a)の $3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$ 付近

にや、その傾向が認められる程度で判然としないが、両図の場合ともほぼ $4 \times 10^5$ 以上の領域では乱流境界層の領域と考えられ、この値は先の剛平板の場合と一致する。

つぎにFig. 4.2(a)とFig. 4.2(b)を比較すると、 $Rel$ が $2.0 \times 10^5$ 以下の低レイノルズ数領域でFig. 4.2(b)の場合の方が(a)の場合よりもいくらか低い。したがって支

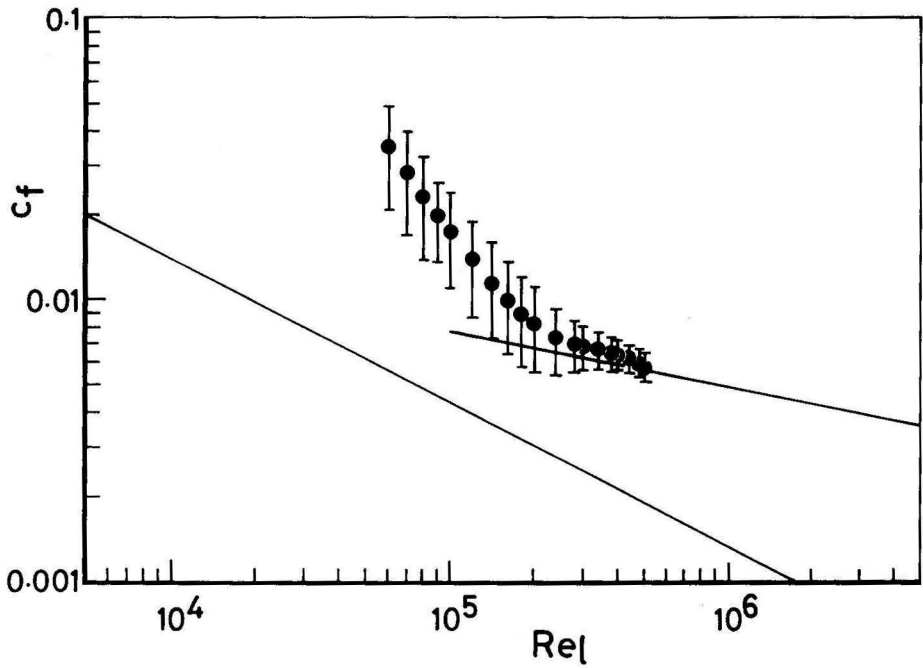


Fig. 4.2 (b) Flexible flat plate B

軸の直径が小さい程前に述べた付加抵抗が小さくなることを示していると思われる。ただし、その変化率は小さく、支軸による付加抵抗をもって実験値と理論値の大きな差を説明するには無理があるように思われる。

とくに Fig. 4.2 (a) の場合、測定値のバラツキも小さく、実験の再現性はあると思われるので、他に何らかの抵抗増大をもたらす原因を考えなければならない。

4.3 従来の実験結果との比較 Fig. 4.3に剛平板と

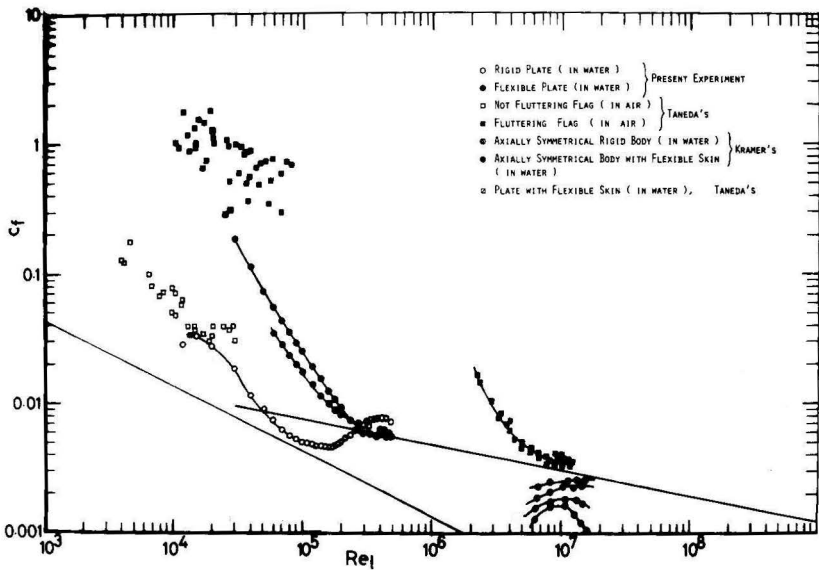


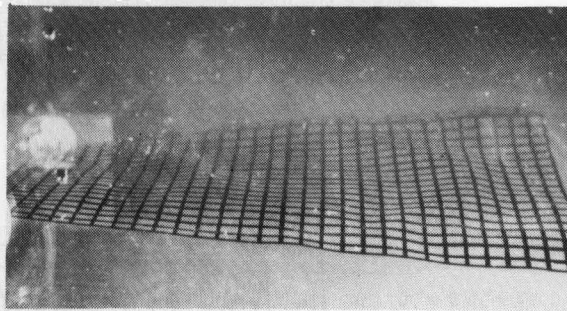
Fig. 4.3 Friction drag coefficients by various experiments

柔平板の摩擦抵抗係数および従来行なわれた同種の実験結果を比較のために示す。同図より明らかなように、本実験において、低レイノルズ数領域においては、柔平板の摩擦抵抗は剛平板のそれよりもかなり高く、その差は  $Rel$  の増加とともに次第に減少し、 $Rel$  が約  $3 \times 10^5$  以上で逆に柔平板の摩擦抵抗の方がわずかに低くなることが認められる。

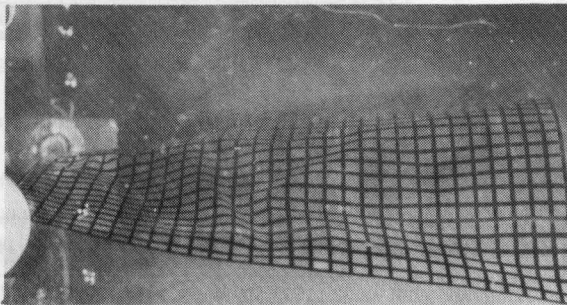
つぎに図より、本実験の剛平板に関する実験曲線の低レイノルズ数領域への延長線上には、種子田による気流中で揺動 (fluttering) していない旗に関する実験結果 (□印) があり、本実験の柔平板に関する実験曲線の低レイノルズ数領域への延長線上には、同じく種子田による気流中で揺動している旗の実験結果 (■印) があることがわかる。<sup>(8)</sup> 揺動していない旗の状態を剛平板と考えるならば、本実験と種子田の実験は、いずれも理論値よりかなり高い値を示しているが、レイノルズ数の異なる領域で互いに補い合う結果を示している

ように思われる。また種子田らがレイノルズ数の高い領域 ( $10^6 \sim 10^7$ ) で行った柔表面をもつ平板の摩擦抵抗係数は理論値よりかなり高い値を示しているが、本実験の場合も含めて、摩擦抵抗係数が理論値よりも高い領域においては、 $C_f$  はほぼ  $Rel$  の  $-\frac{4}{3}$  乗程度に比例して減少しており、この勾配は層流境界層の場合の勾配  $-\frac{1}{2}$  に較べてかなり高いことが注目される。なお図には先述の Kramer の実験結果も示してある。図より明らかなように本実験によれば、境界層の遷移領域における柔物体の摩擦抵抗係数が、Kramer の実験ほど顕著に減少することは認められない。

**4.4 柔平板の揺動** 実験中の観察によれば、柔平板は流れとともに常に進行波状の揺動をしていることが認められた。Fig. 4.4 はその時の写真で、柔平板上に 1 cm 間隔で描かれた格子縞によって揺動状態を知ることができる。



(a)  $U = 104.6 \text{ cm/sec}$



(b)  $U = 147.7 \text{ cm/sec}$

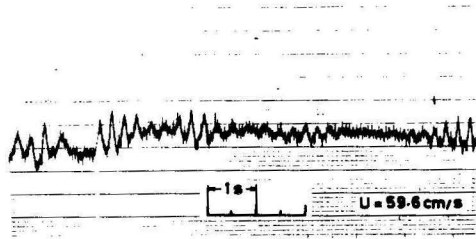
Fig. 4.4 Picture showing the fluttering motion of the flexible plate (Plate B)



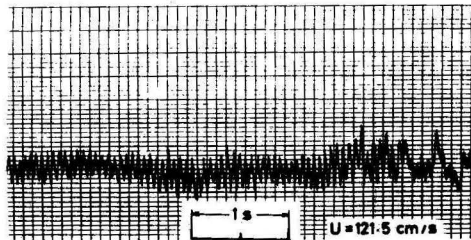
次に柔平板の揺動周波数を、周波数が低いときには直接肉眼とストップウォッチで計測し、周波数が高いときには、柔平板の揺動と支軸の変動が一致すると考

え、支軸に連結された歪ゲージの出力の変動を電磁オシログラフに記録することによって測定した。Fig. 4.5は電磁オシログラムの代表例であり、計測結果は表4.1

(a)



(b)



(c)

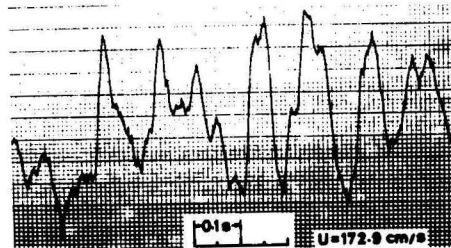


Fig. 4.5 Oscillograms showing the fluttering motion of the flexible plate (Plate B)

流 速 U cm/sec	18.78	25.20	32.90	42.56	53.24	59.60	89.20	108.5	121.5	137.2	148.9	162.4	172.9
揺動周波数 N Hz	0.5	0.77	1.33	1.67	2.33	3.73	7.83	14.14	16.73	8.34	7.54	8.84	13.33
	肉眼による直接計測						電磁オシログラムによる間接計測						

Table 4.1 Measured values of the fluttering frequency at various velocities

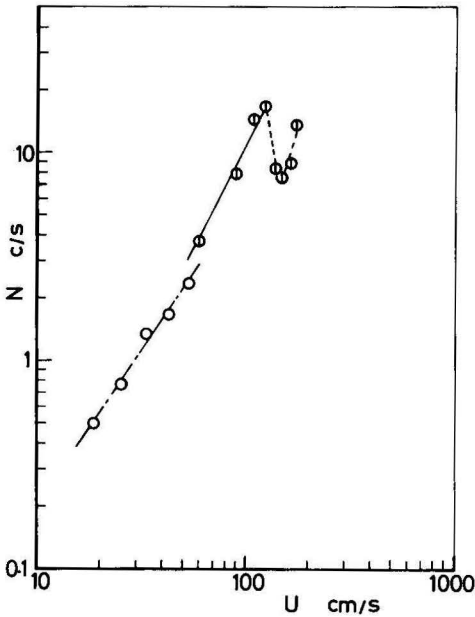


Fig. 4.6 Fluttering frequency as a function of the velocity

に整理した。Fig. 4.6 に揺動周波数  $N$  と主流速度  $U$  の関係を示す。同図より明らかなように  $N$  と  $U$  の間にはほぼ

$$N = \text{const} \cdot U^2 \quad (3)$$

の関係があるように思われる。ただし直接計測による実験点のみに注目すればほぼ

$$N = \text{const} \cdot U^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

なる関係が得られる。また  $U \approx 130 \text{ cm/sec}$  を境にして、 $N$  は急減することが認められる。

Fig. 4.7 は横軸にレイノルズ数、縦軸に平板の長さ  $l$  を代表長にとったストロハル数  $St = Nl/U$  をとって整理したもので、同図には比較のために、剛平板の後流に発生したカルマン渦列の周波数に関する実験値<sup>(10)</sup> と気流中の旗の揺動周波数に関する測定例<sup>(8)</sup> を示してある。同図より次の諸点が明らかになった。すなわち本実験によれば低レイノルズ数領域における  $St$  と  $Rel$  の間にはほぼ

$$St = \text{const} \cdot Rel^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

なる関係が得られるが、これは剛平板後流に発生するカルマン渦列の場合と比例定数は異なるが、勾配が良く一致している。また電磁オシログラフによって測定した高レイノルズ数領域では  $St$  の  $Rel$  に対する勾配はやや高くなってはば

$$St = \text{const} \cdot Rel \quad (6)$$

となる。一方、気流中で揺動している旗の場合には、 $St$  はほぼ  $Rel^{-\frac{1}{2}}$  に比例し、水流中の場合に較べて勾配が逆であることが注目される。

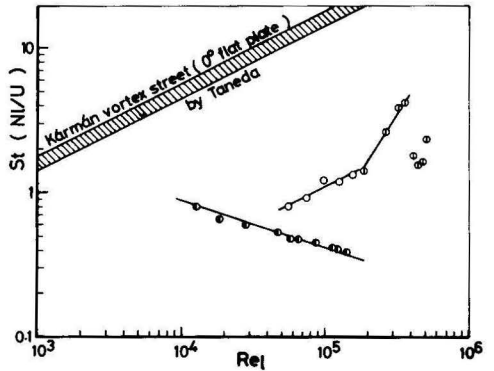


Fig. 4.7 Strouhal number calculated on the plate length

つぎに Fig. 4.8 は、層流境界層の理論的な排除厚さ  $\delta^*$  を計算することによって得た平板直後の後流の幅  $d^*$  を代表長とした場合のストロハル数  $St^* = Nd^*/U$  (ただし  $d^* = 2\delta^* + t$ ) と  $Rel$  の関係を示したものである。比較のために剛平板後流のカルマン渦列に関する  $St^*$  は文献(11)より計算によって求めた。同図によれば、本実験において直接計測を行った  $Rel$  が約  $1.6 \times 10^5$  以下の領域では、

$$St^* = 0.012 \quad (7)$$

となり、 $St$  は  $Rel$  に無関係に一定値となることがわかる。剛平板後流のカルマン渦列の  $St^*$  は 0.20 となり、このとき  $Red^* (= Ud^*/\nu)$  はほぼ  $10^3$  程度である。この値は円柱後方のカルマン渦列の  $St (= Nd/U, d$  は円柱直径) が  $Red (= Ud/\nu)$  の  $10^3$  近傍で示す値と良く一致している。両者を比較すると、本実験の場合の  $St^*$  はカルマン渦列の  $St^*$  の  $\frac{1}{15}$  の程度になるが、このことより柔平板は必ずしも平板後流のカルマン渦列に

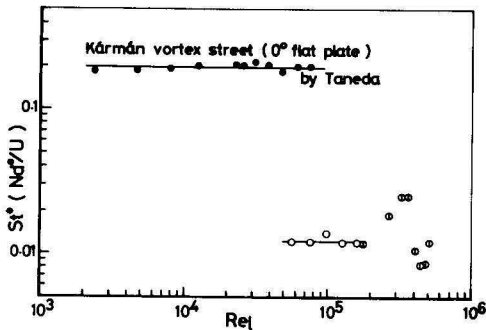


Fig. 4.8 Strouhal number calculated on the wake width of the plate

同期して揺動するのではなく、その $\frac{1}{15}$ 程度の低い周波数で揺動しながら、渦列を放出しているように推察される。

## 5. 結 言

水流中に平行におかれた剛平板および柔平板の流動現象を観察した結果以下の諸点が明らかになった。

(1) 柔平板の摩擦抵抗係数は、境界層が層流と思われる低レイノルズ数領域で、剛平板のそれよりも高いが、両者の差はレイノルズ数の増加とともに減少し、境界層の遷移領域と思われる $3 \times 10^5$ を境として高レイノルズ数領域では逆に柔平板の摩擦抵抗係数の方がわずかに低くなる。

(2) 剛平板、柔平板の場合とも低レイノルズ数領域の摩擦抵抗係数は理論値に較べてかなり高いが、その値は、さらに低いレイノルズ数の領域で測定された気流中の揺動しない旗、揺動する旗の摩擦抵抗係数にそれぞれ良く接合している。

(3) 柔平板は、一樣流速が増加するとともに最初はゆるやかにそして次第にはげしく揺動するが、それはほぼ進行波状の運動である。その揺動周波数は、境界層が層流と思われる低レイノルズ数の領域において主流速度のほぼ1.5乗に比例し、平板後流の幅を代表長としたストロハル数 $St^*(=Nd^2/U)$ は $Re_l$ に無関係で一定値約0.012を示す。この値は剛平板後流にみられるカルマン渦列の $St^*$ に比較してかなり低い。

以上、本研究によって二、三の興味ある事実が明らか

かになったが、本報告では問題提起の程度にとどめ、今後、より精密な測定を行いつつ、詳細な分析を進める予定である。

本研究は計画段階より、千谷教授を始め熱流体研究会の諸先生に貴重な助言と激励をいただいた。また、実験装置の製作と実験の遂行には、機械工作工場の方々および佐久川恵博、渡嘉敷兼正、城田俊、長嶺由政の諸氏になみなみならぬ御協力をいただいた。ここに記してこれらの方々には厚く感謝申し上げる。

## 参 考 文 献

- (1) Lighthill, M. J., *J. Fluid Mechanics*, 9 (1960), 305.
- (2) 谷一郎, *科学*, 34-9(1964), 471.
- (3) Ling, S. C. and Ling, T. Y., *J. Fluid Mechanics*, 65-3(1974), 499.
- (4) Kramer, M. O., *J. Amer. Soc. Nav. Engrs.*, 72(1960), 25.
- (5) Landahl, M. T., *J. Fluid Mechanics*, 13(1962), 609.
- (6) 種子田と本地, 九州大学応力研究所報, 26(昭42), 85.
- (7) 種子田と本地, 九州大学応力研所報, 27(昭42), 25.
- (8) Taneda, S., *J. Phys. Soc. Japan*, 24-2(1968), 25.
- (9) 堀栄一, *航空学会誌*, 11-115(昭38-8), 229.
- (10) Taneda, S., *J. Phys. Soc. Japan*, 13-4(1958), 418.