

遊泳魚体の低抵抗性に関する基礎的研究*

奈良 迫 嘉 一**

Fundamental Studies on the Low-resistance of Swimming Fish

Yoshikazu NARASAKO

Abstract

It has been confirmed that the body-resistance of a living fish in water is far less than that of any fish-like-formed rigid-body.

And according to the hydro-dynamical calculations, between the co-efficient-values of their frictional resistances, there seems to be a difference of 1/10 order.

In order to clarify the process of this resistance-reduction, various resistance-tests were carried out, with the use of a lot of models, by the author, basing on the hitherto ascertained view-points, namely: 'Passive Fish-skin Effect', 'Slime Effect', 'Slotting Effect derived from the Gill-cover-holes', 'Active Fish-skin Effect' and the 'Caudal-fin Effect'.

(I) The Effects of Passive-skin, Slime and Slotting on the resistance-reduction

Having got a hint from Kraemer's Dolphin-model, the author measured the hardness of the bodies of living Scombroid and Frigate mackerel, and made models of silicone rubber having the hardness similar to those of the two fishes.

Some experiments were made, in order to make a resistance-comparison between the rigid and the flexible models, at the Kagoshima-University Circulating-water-channel, within the Reynolds number: $0.5 \times 10^5 \sim 9.0 \times 10^5$.

Consequently it was confirmed that generally there was little difference between the rigidly bodied model and the flexibly bodied one.

As to the effect of oil coated on the surface of the fish-model, it was ascertained that the fish-oil which was used usually, for example, a whale-oil, rather increased the resistance than otherwise, with the author's failure in confirming the effect of slime — 'Toms effect' by polymers.

And concerning the effects coming from the opened or the closed mouth of the fish, and from the opened or closed gill-cover of the fish, respectively; the expected slotting effect by jet-flow from gill-cover-holes was not recognized; conversely it was ascertained that the resistance was made rather larger by the effect coming from the opened mouth and the opened gill-cover.

Basing on the view-point of respiratory movement of fish in sea-water, the calculated velocity of jet-flowing from the gill-cover-holes was found to be quite negligible.

Consequently, the effect of slotting due to the motion of the gill-cover holes on resistance reduction was fixed to be negative.

* 東京大学審査学位論文 (Thesis submitted for the degree of Doctor of Agriculture at the University of Tokyo, Dec. 1975).

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

(II) The effect of active skin on resistance reduction

Furthermore, the effects of the active fish-skin generated by the harmonious motions of the scale-plates, or the influences of the quasi-harmonious-motion of the body-surface on the resistance-reduction were investigated.

For the realization of this, referring to the experimental results obtained by Frank Essapian (1955) on the living porpoise, the author prepared a two-dimensional streamline form model, called active skin, the both sides of which contain series of scale-plates undulating two-dimensionally with various periods.

The resistance-tests were carried out on the following two cases: the first case in which the scale-plates of the both sides were fixed, and the second case in which the scale-plates move quasi-harmoniously.

Furthermore, it was clarified experimentally that the model-resistance could be made decreased when the series of the scale-plates on the both sides move quasi-harmoniously with a proper frequency and with a proper phase-difference kept between Starboard side and Port side and the process of resistance-reduction was examined through the flow-visualization method.

The author found that the condition of maximum resistance-reduction was to be shown by the following experimental equations, with the effect of active skin having $\lambda/2$ phase-difference kept between S. and P..

Amplitudes of scale-plates, Fore part \rightarrow Aft part (gradual increase)

$$V = 0.099 + 0.546N$$

Amplitudes of scale-plates, F. \rightarrow A. (gradual decrease)

$$V = 0.015 + 0.648N$$

V : Advance velocity of model (Body Length/sec.)

N : Cycle per sec. of Progressive wave by scale plates

These equations have a close resemblance with the following Magnuson & Prescott's experimental equation for swimming velocity of Pacific bonito in the oval fish tank in the Marineland of the Pacific, Palos verdes, California.

$$V = 0.491 + 0.639N$$

V : Swimming velocity of fish (Body Length/sec.)

N : Tail-beat per second

Therefore we can assume that the swimming of any fish is being carried out while the fish is managing to keep the resistance of its body at its minimum in the water.

(III) The effects of Caudal Fin on resistance-reduction

To ascertain the effect of passive caudal-fin, the resistance-test of cylinder with vinyl fluttering-fin attached behind it in water was carried out, while in order to confirm the effect of active caudal fin the swimming motions of fishes in water with or without caudal fin were examined.

As the result of the above mentioned experiments, it was ascertained that the maximum reduction ratio of resistance was gotten when the length of the fluttering fin lay within the range from $3d$ to $7d$ (d : diameter of cylinder).

As the result of the latter experiment, it was assumed that the effect of caudal fin mainly contributed to make the course secured in the swimming motion of a fish.

Therefore the effect of the caudal fin was fixed to be quite important one in giving the resistance-reduction capacity to the motion of the swimming fish, as well as the effect of the active skin.

As the important factors in giving the low-resistance capacity to a swimming fish, the author proposed the effects of active skin, of caudal fin and of slime, in this order.

Especially, the former two effects were considered to be largely contributive to the

resistance-reduction capacity of the swimming fish body in the water, which perhaps may be due to the suppression of eddy resistance which is to be brought forth by the combined mutual actions of the active skin and the caudal fin.

Through these mutual actions, the formation of the boundary layer might be prevented and the flow-separation could be avoided, too.

目 次

I 緒 論	53	(ii) 流れの可視化	64
II 剛体と同形弾性体との比較(受動的表皮効果)	56	V-3 実験の結果	65
II-1 実験装置	56	V-4 能動的表皮効果の考察	66
II-2 剛体平板の実験	57	VI fluttering fin をつけた円柱の水中抵抗試験(尾鰭の効果)	67
II-3 剛体並びに同形弾性体の抵抗実験	58	VI-1 実験の方法	67
(i) 平板の実験	58	(i) 抵抗測定	67
(ii) サバの実験	58	(ii) 流れの可視化	67
(iii) カツオの実験	59	VI-2 実験の結果	67
(iv) 本体流線型の実験	59	VI-3 fluttering fin の効果の考察(受動的鰭)	68
II-4 受動的表皮効果の考察	59	VI-4 実物魚による(能動的)鰭の効果	70
III 粘液効果	60	VI-5 尾鰭効果の考察	71
IV スロット効果	60	VII 総合考察	72
IV-1 鰓蓋からの吹出しについての思考実験	61	VIII 結 論	76
IV-2 鰓蓋からの吹出しについての模倣型実験	63	謝 辞	77
IV-3 スロット効果の考察	63	文 献	77
V active skin の効果(能動的表皮効果)	63	附 録	
V-1 active skin 模型	63	その1 魚型模型の作製	78
V-2 実験の方法	64	その2 active skin のカム機構とその運動	79
(i) 抵抗測定	64		

I. 緒 論

生きている魚の水中抵抗は剛体模型に比べて小さく、流体力学的計算によれば両者の抵抗係数には1桁(1/10程度)の差があると言われる。この差の問題は昔からGray (1936)¹⁾のパラドックスとして動物学者、物理学者あるいは工学者の間でも有名である。Gray は体長2mのイルカが時速17ノット(8.8 m/sec)の船を10 m/secで軽々と追い抜いた事を自ら観測した。このときのレイノルズ数(\bar{R}_n 数)を 2×10^7 として通常の解析手順で流れに平行な薄い剛体平板の乱流境界層の摩擦抵抗係数を用いてイルカの表面摩擦抵抗を計算したところイルカの筋肉1kg当りのパワー(馬力)が7 m/secとなり、通常の人や犬の値の1.5 m/secの数倍に当ることを知った。これからイルカの筋肉が陸上動物のそれより異常に強いのか、あるいはイルカの流体摩擦抵抗が剛体に比べて異常に低いのか、その何れかであろうと推測した。また魚の場合にもイルカと同様な現象が認められることを発表したのはGero (1952)²⁾であって彼は釣獲したサメ、カマスの例でこのことを指摘している。

この問題の解明は今日に至るまで未だ充分になされたとは言えないが、従来の研究討議の概観を述べれば以下の通りである。

先ず、低抵抗の機序は弾性表皮にひそむのではないかという仮設の下に、表皮の柔軟なものと、全く同形の剛体との間の水中抵抗差を測った研究としては Kraemer (1960)³⁾ の論文がある。彼はイルカの表皮を模倣して油入りの空所をもたせた三重の複雑な構造をもつ非常に柔らかいゴム膜を作り、これを全長8フィート、直径2.5インチの細長い物体の表面に張って、モーターボートで曳航し、その摩擦抵抗を線歪み計で測定した。その結果 Fig. I-1 に示すようにその値が通常の剛体模型抵抗に対しレイノルズ数 \bar{R}_n 1.5×10^7 で59%も小さくなることを確かめた。彼はその後ロケット更に進んで水雷艇用被膜としてこのゴム膜を実用化し得たと云われるがその詳細については明らかでない。

之に対して実験的には徳川他3名 (1938)⁴⁾ が剛体魚型模型を以て試験を行ったが問題の核心にふれ得ず、種子田・本地 (1967)^{5), 6)} は剛体、弾性体の平板模型を用いて両者の間に殆んどその差がないことを確かめ Kraemer の結果に疑問を投げかけている。又理論的には Benjamin (1960)⁷⁾, Landahl (1962)⁸⁾, 竹松 (1970)⁹⁾ が線形安定理論を用い表面の flexibility を考慮に入れて検討したが層流境界層の安定を証明できず、寧ろ不安定化を示唆した結果を得ている。

次に粘液効果で低抵抗性を解明しようとしたものには田古里・金 (1969)¹⁰⁾ があげられる。彼等は Toms 効果* を利用、多孔質平板から高分子化合物の稀薄水溶液 (polyethylene oxide, 分子量約300万) を浸出させ乱流摩擦抵抗を測定した。そしてレイノルズ数 \bar{R}_n 2×10^6 , 溶液濃度 300 p.p.m., 浸出流量 285 cc/sec の時、最大の全摩擦抵抗減少率として41.2%を得ている。そのうち Toms 効果による減少率26.9%であることも確かめている。又田古里・芦立 (1969)¹¹⁾ は小型管摩擦計を試作、之を利用してドジョウ、ウナギの分泌液で管摩擦係数を測定、前者で12~13%, 後者で約30%の摩擦係数の減少を認め、魚の低抵抗は弾性表面膜の効果より、分泌液による Toms 現象のためであろうと推論している。また Rosen・Cornford (1970)¹²⁾ は魚体表皮腺分泌粘液 (高分子液) の作用を考えた実験を行ない、海水中の抵抗に比べ最高66%減の抵抗値となったことを報告しているがその中で Fig. I-2 に示すように高速のハガッオ (*Sarda lineolata*) の場合その分泌する粘液が抵抗減に何等の寄与もしていない事を附記している。

一方 Kempf (1935)¹³⁾ の行なった麻酔魚を水槽で曳航した実験では、粘液を拭い去っても抵抗の測定値に変化が認められなかったし、Richardson (1936)¹⁴⁾ の木製の模型に油を塗り静水中を落した実験でも全く油の効果が見られなかった。Gero (1952)²⁾ も亦数種の魚や剛体模型を使い、水中落下試験で抗力を求めたが、ここでも魚体表面の粘液は抗力を低下させる上で何らの役割も果していないことを示している。以上粘液効果についてもなおお定かでない点がある。

さらに active skin の効果 (能動的表皮効果) に関しては、先ず Essapian (1955)¹⁵⁾ が水中のイルカの生活を映画と写真で記録し、高速遊泳時の“速度しわ”の発生に気づいている。実験的には Wehrmann (1965)¹⁶⁾, Kendall (1970)¹⁷⁾, 種子田 (1972)¹⁸⁾ が平板或いは円柱を

* ある鎖状高分子を極く僅かだけ含む溶液中で物体が運動する場合、またはこの水溶液を管の中に流す場合、乱流摩擦抵抗が純粋の溶媒を用いたときに比べて著るしく減少するという効果。

用いその表面に微小な進行波運動を行なわせ、境界層に人工的に加えられた Tollmien-Schlichtung 波が境界層底部において著しく減少すること、ならびに剝離点が後退する現象とを認めている。以上の諸研究の結果を勘案しつつ著者は次のような立場から魚型水中生物の低抵抗性を解明しようとしたものである。

即ち動物学における生理、生態学的な知見によれば、陸上の獣類の発生馬力は体重 10 kg あたり 0.1 馬力以下 (Wilkie 1959)¹⁹⁾と云われ、魚やイルカの筋肉もこれより桁違いに大きな馬力を発生出来るとは思われないので、これら水中動物の高速遊泳能力は、その水中摩擦抵抗が魚型剛体のものよりも予想外に小さいことから生じているに違いない。

そこで著者は論を進めるに当り以下のように仮定して予め問題点を考察してみることにした。

- (1) 対比する魚、イルカ類は総て相互に体形は相似体であるものとする。
 - (2) 水温、水の密度、従って動粘性等の環境要因は殆ど差がないものとする。
 - (3) 上記魚、イルカ類の遊泳速度 (瞬間速度) はほぼ体長に比例するものとする。 (Fig. I-3 例示)。
 - (4) 生物の泳力は筋肉量即ち体の容積に比例するものとする。
- (1), (2) から泳速 V で前進する際の摩擦抵抗 D は体表面積 S 従って体長 l の 2 乗に比例する。

$$D = \frac{1}{2} C_x \rho V^2 S$$

ρ : 流体密度 (重力単位)
 C_x : 摩擦抵抗係数
 $= K \cdot C_x \cdot V^2 \cdot l^2$ I. 1
 K : const

(3) より

$$V = kl$$

k : const

従って I. 1 より

$$D = K \cdot C_x \cdot k^2 l^2 \cdot l^2$$

$$= K \cdot C_x \cdot k^2 l^4$$
 I. 1'

(4) より パワー (遊泳力) P は有効筋肉量 w , 従って体重 W , 従って体長 l の 3 乗に比例する。

$$P = K' l^3$$
 I. 3
 K' : const

一方遊泳力は次元式より

$$P = K'' DV$$

K'' : const

$$\therefore K' l^3 = K'' \cdot K \cdot C_x \cdot k^2 l^4 \cdot kl$$

$$\begin{aligned} \therefore C_x &= \frac{K'l^3}{K'' \cdot K \cdot k^3 \cdot l^5} \\ &= \frac{K'}{K'' K k^3 l^2} \end{aligned}$$

従って 抵抗 D は I. 1 より

$$\begin{aligned} D &= K \cdot C_x \cdot V^2 l^2 \\ &= K \cdot \frac{K'}{K'' K k^3} \cdot V^2 \\ &= K \cdot \frac{K'}{K'' K k^2} \cdot V \cdot l \\ &= \text{const } lV \end{aligned}$$

従って Fig. I-4 に示すように

$$lV \text{ 一定, 従って レイノルズ数 } \left(\bar{R}_n = \frac{lV}{\nu}, \text{ 但し } \nu: \text{ 動粘性係数} \right)$$

一定の下では抵抗一定で, 同じ抵抗の下では体長と遊泳速度の関係は双曲線となる。

このような泳速曲線が, 低抵抗性のため高速側へどのようにズレて行くかを考究して行くわけであるが, 従来も種々検討された次の三機序:

- i) 軟体表皮による乱流発生の抑圧 (受動的表皮効果)
 - ii) 体表皮に沿うて粘液 (高分子液) が分泌される事による層流安定の確保 (粘液効果)
 - iii) 吻から入った水が鰓孔から吹き出される際の噴流によるスロット効果
- だけでは諸研究の結果から考えても低抵抗性を説明し切れないことが予想される。

このように大中に低い抵抗を得るためには著者の云う active skin の効果を期待すべきであって, これにより発生乱流は後方へ送り出され結果として層流抵抗を維持するものと考え, 之を上記3要件に追加し,

- iv) active skin による層流安定確保 (能動的表皮効果)

として以上四機序をそれぞれ検討した。

更に著者は魚の尾鰭に関連して,

- v) fluttering fin の効果 (尾鰭の効果)

の検討も追補した。

II. 剛体と同形弾性体との比較 (受動的表皮効果)

前述 Kraemer のイルカ皮膚の模型実験に触発されて表皮の弾性効果を期待し, サバ (ゴマサバ *Pneumatophorus tapeinocephalus*), カツオ (ヒラソウダ *Auxis thazard*) 生魚の弾性を実測, それに合わせてシリコンゴムで弾性体模型魚を作り, 剛体, 弾性体の比較試験を行なった。

II-1. 実験装置

模型の抵抗試験は鹿児島大学水産学部大型回流水槽^{20), 21), 22)}に於て行なわれた。本水槽の概略

図を Fig. II-1, Photo II-1 (a, b) に示す。流水駆動装置としてはプロペラでなく可動翼水車（直径 3.00 m, 翼板 1.0 m×0.6 m×12 枚）をサイリスタ方式可変速 15 馬力モーターで作動せしめる。模型抵抗測定のための直線水路は巾 2 m, 水深 0.60 m である。測定装置としては流速用, 抵抗用に夫々広井式流速計並びにピトー管と, Geber 式抵抗検力計 (Fig. II-2) を用いた。

本水槽の流速分布の不均一度は自由表面, 側壁, 底に於て 2~5% の流速減少がみられるが, 模型の設置位置近傍では殆んど流速は均一とみなして差支えない程度である。(App. Table II-1, p. 162)

II-2. 剛体平板の実験

実験に使用する魚の大きさを考慮して, 長さ 0.340 m 及び 1.000 m の没水状態の剛体長方形平板模型を計測台車にとりつけ (Fig. II-2, Photo II-2 参照), trip wire のある場合とない場合について実験を行なった。尚 trip wire は乱流促進のために用いるものである。

これは, この回流水槽で使用可能な模型の大きさの限界を見極めるいわば本論の抵抗計測の基礎となる実験なのでやや詳しく論述する。平板模型は長さを L , 高さを B , 厚さを t とし, edge effect の影響を知るため B を種々変えている。使用模型は木製で $L=0.340$ m, $L=1.000$ m についてそれぞれ 3 枚宛計 6 枚を用意した。それ等の主要目 L, B, t を Table II-1 に示し, 前後端及び上下面の形状の代表例を Fig. II-3 に示す。表中で S は表面積, V は排水容積, L_{CB} 及び B_{CB} は浮心位置（ここでは平板の中央をとる）の前端及び下面からの距離である。Fig. II-4 参照。なお, 航走中板の安定をよくするためその下部に円形の鉛を埋め込み, Fig. II-2 及び Photo II-2 の模型に見えているように表面を滑らかに仕上げた。そして $L=0.340$ m の模型では 0.5 mmφ の trip wire を前端から 0.017 m の square station の位置に取り付け $L=1.000$ m の模型では 1 mmφ の trip wire を前端から 0.100 m の位置に取り付けた。

先ず平板を吊金具に取り付け, 抵抗を計測し, 次に吊金具だけの抵抗を求めて差引くと板自身の抵抗 R_f が得られる。之等の値を Fig. II-5 (a~f) に示す。 ρ を水の密度, V を流速, ν を動粘性係数とすれば,

摩擦抵抗係数 C_f 及びレイノルズ数 \bar{R}_n は

$$C_f = \frac{R_f}{(1/2)\rho SV^2}, \quad \bar{R}_n = \frac{VL}{\nu}$$

で定義される。

今 Fig. II-5 (a~f) の平板の抵抗 R_f の実験値を最小二乗法で fairing し, 且つ無次元化して摩擦抵抗係数 C_f を求めると, Fig. II-6 (a, b) のようになる。然し之等の値には edge effect が含まれているから, 幅 B の異なる板の抵抗 R_f の差をとり, 同じく無次元化すると, Fig. II-7 (a, b) のように 2 次元流れの中の摩擦抵抗係数 C_f が得られる。Fig. II-7 (a, b) に於て $L=0.340$ m の場合も $L=1.000$ m の場合も trip wire 付きの板の摩擦抵抗係数 C_f は Schoenherr line²³⁾ と略々平行に平均して約 0.002 だけ高めに出ており, trip wire 無し板の C_f はその line より低く出ている。殆んどの場合回流水槽の中に置かれた平滑な平板の周りの流れは乱流境界層であると云われているが Schoenherr line が乱流境界層に依る抵抗の正確な値を表わしているとする, 今のこの平板の周りの流れは trip wire なしの場合僅か

ではあるが層流部分が特に低速域で残っている事を表わし、他方 trip wire をつけると層流部分の消えた分と、その抵抗だけの分との和だけ抵抗が過大に出ている事を表わす。従ってこの回流水槽の流れが、0.5~1.0 mm ϕ 程度の trip では層流成分が残って見えるような scale (例えば trip wire の数百倍, cm で2桁 order) 規模の乱流であることも考えられよう。然し edge effect や実験精度等を考えると魚の模型の抵抗を比較する場合には大体 trip wire なしで十分乱流境界層による抵抗が得られるものと考えられる。

II-3. 剛体並びに同形弾性体の抵抗実験

平板, サバ, カツオについてそれぞれ同一寸法の木製の剛体模型とシリコーンゴム製の弾性体模型を作り, 抵抗の比較実験を行なった。前節 II-2 の結果によると回流水槽内の流れの中では物体表面に乱流境界層を生じているものと考えて差し支えないから以下の実験に於ては trip wire をつけない事にする。この場合シリコーンゴムの表面とラッカー仕上げの表面では粗度が異なる傾向にあるように思われたので粗度を同一にするため模型の表面に魚油を塗った実験を追加した。ここで模型の長さ L , 高さ B , 厚さ t , 表面積 S , 排水容積 V , 浮心位置の前端及び下面からの距離 L_{CB} , B_{CB} をそれぞれ Fig. II-8 のように定義する。

(i) 平板の実験

平板模型の形状を Fig. II-9a に, その主要寸法を Table II-2 に示す。ここで P はラッカー仕上木製剛体平板であり, P' は弾性体平板で表面はショワー硬度 13.0 のシリコーンゴム, 内部は wire frame で補強され, 更に前後は流れによる振動を止めるため tin plate で補強されている。Fig. II-9b 参照。

抵抗試験の結果を無次元化して得られた摩擦抵抗係数 C_f とレイノルズ数 \bar{R}_n の関係を Fig. II-10 (a, b) に示す。Fig. から魚油を塗った場合も魚油なしの場合も, 剛体平板の抵抗と弾性体平板の抵抗は殆ど等しく, レイノルズ数の高い側では Schoenherr line と殆んど一致している。弾性体平板は低速域 (レイノルズ数 \bar{R}_n 小) で Schoenherr line よりかなり低下する傾向にある。然しこの低下は層流域があるためか実験誤差のためか理由は明確でない。又低速の場合は魚油を塗った方が僅かに抵抗の増える傾向にある。

(ii) サバの実験

サバ模型 (尾叉長約 35 cm) の Lines を Fig. II-11, Photo II-3 (a, b) に, その主要寸法を Table II-3 に示す。ここで S はラッカー仕上木製剛体模型であり, S' は弾性体模型で表面はショワー硬度 13.0 のシリコーンゴム製である。そして各模型で口と鰓蓋が何れも閉じた場合を $S-C$, $S'-C$ とし, 両方とも開いた場合を $S-O$, $S'-O$ とし, また剛体模型で口が閉じて鰓蓋が開いた場合を $S-CO$ で表わす。なお剛体模型の Lines の鰓蓋の開き方は弾性体模型が流れの中にあるときの鰓蓋の開き方と殆んど一致するように選んだ。

(論文末尾 附録 その1 p. 78 参照)。

以上の模型について抵抗試験を行ない, その結果を比較すると Fig. II-12 (a, b) のようになる。ここで Fig. II-12a は (i) の平板の場合と同じ理由で表面に魚油を塗った場合と塗らない場合も比較している。之等の結果から見る限りサバの抵抗は Schoenherr の摩擦抵抗値より大きく, 一種の form effect があることが分る。又 Fig. II-12a 及び b に示すように口及び鰓蓋が閉じているときも, 開いているときも弾性体模型は剛体模型に比べて抵抗が幾ら

か小さくなっている。

(iii) カツオの実験

カツオ模型（尾又長約 40 cm）の Lines を Fig. II-13, Photo II-4 (a, b), 5 (a, b) に、その主要寸法を Table II-4 に示す。ここで K_1 , K_2 はラッカー仕上木製剛体模型であり、 K'_1-N , K'_2-N は弾性体模型で表面はショワー硬度 N ($N=16, 21, 23$ 等) のシリコンゴム製であることを示す。 K_2 , K'_2-N は実験の精度をあげるために作った K_1 , K'_1-N の 2 倍の大きさの模型である。これらの模型は何れも口も鰓蓋も閉じているが、 K_1 及び K'_1-23 のみは同じ大きさで口と鰓蓋の開いた模型を製作し、これらを K_1-O , K'_1-23-O で表わすことにする。

（論文末尾 附録 その 1 p. 79 参照）。

以上の模型について、表面に魚油を塗った場合と塗らない場合について実験を行ない、それ等の結果を Fig. II-14 (a~d) に示す。Fig. II-14a 及び b によればこの程度の硬度の差によっても亦魚油の有無によっても抵抗の差が認められない。即ちサバ模型では弾性体模型の方が抵抗が幾らか小さくなっていたが、カツオ模型では殆んど差が認められず、むしろ弾性体模型の抵抗値が僅かに増えている。このことは体形が異なるためと思われる。又 Fig. II-14c のように口と鰓蓋が開いているときも同じようなことが云える。Fig. II-14d のように模型の大きさを 2 倍に大きくして実験すると計測の精度が上り、而も硬度による抵抗のバラツキは小さくなっている。

(iv) 本体流線型（魚の尾鰭を取り去り体形を流線型にまとめたもの）の実験

カツオ模型 K'_2-10 の魚体を流れの中に置くと、流速 0.5 m/sec 以上のとき尾鰭が最大振幅 1.5 cm 左右にふれ、そのための抵抗増も考えられた。そこで魚の弾性体模型の場合、最後に尾鰭の振動の影響を除くため魚の本体のみの実験を行なった。この尾鰭無しのカツオ模型を Photo II-6 (a, b), 7 (a, b) に、主要寸法を Table II-5 に示す。Lines はカツオ模型から尾鰭を取去ったものと一致する。これらの剛体模型を $K_1^{(c.f.)}$, $K_2^{(c.f.)}$ で、又ショワー硬度 N (16, 23) のシリコンゴム製の弾性体模型を $K_1^{(c.f.)}-N$, $K_2^{(c.f.)}-N$ で表わす。何れの模型も口と鰓蓋を閉じている。又前のカツオ模型の実験で魚油を塗っても塗らなくても抵抗は殆んど変らなかったから、表面には魚油を塗らずに実験を行なった。抵抗試験の結果を Fig. II-15 (a, b) に示す。Fig. II-15a から模型が小さいときは硬度が柔らかくなるとともに抵抗は僅かに増大の傾向にあるが、Fig. II-15b のように模型の大きさが大きくなると計測値のバラツキは小さくなり、而も硬度によって抵抗は変らない。このことから、本体流線型の抵抗は殆んど硬度に無関係であると考えてよいと思われる。又 Fig. II-14a, d; II-15a, b を比較すると一般に尾鰭のある場合に比べて尾鰭の無い場合の方が、それも模型の大きさが大きい方が、摩擦抵抗係数 C_f は乱流境界層による摩擦抵抗係数を示す Schoenherr line に近くなっている。

II-4. 受動的表皮効果の考察

以上、著者の実験においても、平板及び魚形模型に於て、剛体、弾性体の間に殆んど抵抗の差は認められなかった。即ちサバ模型硬度 13.0 で若干の抵抗減をみたが、極く僅少の差であり、カツオ模型では硬度の差 (23, 21, 16, 10) によっても殆んど差が認められず寧ろ弾性体模型の抵抗値が僅かに増えている。これらは或いは何れも測定の誤差内の減少、増加かも知れない。著者が念のために行なったカツオ大型模型、更に尾鰭を除いた本体流線型模型の試験でも、計測精度の上昇、硬度に依る抵抗値のバラツキの小さくなることを認めただけで、何れも

剛体，弾性体の間に殆んど抵抗の差が認められない。

この実験結果について，模型作成上非常に困難な問題ではあるが，先ず生きている魚体と弾性体魚形模型との硬度の等価性が反省されるべきであろう。造化の妙と云われる魚体そのものの模型化は不可能としても，その弾性従って硬度の測定が適切，妥当であったか否かの考察に少しく立ち入ってみることは可能であろう。

魚及び弾性体（シリコンゴム）の硬度測定については，附録その1 で詳細に触れるように，J.I.S. ゴム硬度計を用い，静的にショワール硬度を測定したものであり，実際の生魚の遊泳時の動的弾性と果して正確に対応するものかどうかは大変疑問であって，或いは

$$\frac{\text{流速 cm/sec}}{\text{乱流規模 cm}} = n^{\text{sec}-1}, \quad (n \approx 1 \sim 20)$$

程度，多分 1~20 サイクル程度の振動圧力の下で魚肉と合致するような弾性ゴムを使えば，或いは多少異なる結果が出るのかも知れない。

このような検討は，本問題に関心をもつ次代の研究者の追求に期待するものであって，著者は受動的表皮効果のもたらす抵抗減についてはそれ程大きな期待をつなぐことが出来ず，第二，第三の抵抗要素の解明へと進んだものである。

III. 粘液効果

前章 I に述べた如く，田古里・金；Rosen・Cornford 等で代表される魚体表分泌粘液（高分子液）の効果を肯定する実験結果と，Kempf, Richardson, Gero 等で代表される粘液効果を否定する実験結果が共存している現状であるので，前章 II で触れたように今回魚油の本来の使用目的は模型表面粗度の整一化であったが，上記粘液効果を判定する意味もあって市販の魚油を平板及び魚形模型の表面に塗って剛体，弾性体の比較抵抗試験を行なった。実験の結果は平板で魚油の効果は現われず (Fig. II-10 (a, b))，魚体模型サバ (Fig. II-12a)，カツオ (Fig. II-14a, b; d) の場合は一般に抵抗が僅かに増加している傾向があり何れも Toms 効果は現われてこない。

この理由として考えられるのは，使用した魚油が肝油等雑多な油が混在しており，高分子溶液の Toms 効果の条件として知られる高分子が直鎖状であること，分子量が数十万以上大きい程有効であること，溶解性が良いことなどに関連して使用魚油の成分，溶解度，濃度等が，実際の魚体表皮に分泌される粘液と等価でなかったことが問われることになる。

従って著者の実験結果をもって直ちに魚の粘液効果を否定しうるものではないが，前章 I で述べたハガツオの粘液効果の例，或いはイルカの皮膚の疎水性等を考えると，抵抗減の要因としての粘液効果解明にはなお問題が残るようである。

IV. スロット効果

航空力学では主翼失速の防止方法として，翼の前縁附近に隙間（スロット）を設け，翼下面の正圧を翼上面の負圧部へ流し，層流剝離点を翼上面に沿ってなるべく後へと移す。その結果失速角をずっと大きくし，揚力も増すことになる。

魚の吻から入った水が鰓孔から吹き出される際の噴流によるスロット効果も同じような意味

で魚体側面の層流増により抵抗減をもたらすものと予想される。著者はこれを次の二つの面、即ち一つには魚の遊泳中の呼吸作用を生理、生態学的立場から検討した思考実験と、二つには実物魚の鰓孔構造模型による模型実験とを行なって検討した。

IV-1. 鰓蓋からの吹出しについての思考実験

魚の呼吸を見ると Fig. IV-1 に示すように先ず口が開いて水が吸いこまれ、暫らくして鰓蓋の下から水が吐き出され、この動作の繰返しとして鰓の上に不連続な流があるように見えるが、それは誤りで口腔と鰓と鰓蓋の間の空隙の間には変化はするが連続した圧力が保たれるので連続した水流があることが判っている。物理学的に考えれば口と鰓蓋腔とに互いに相の少しずれた二つのポンプが動いている。その働きは特殊な筋肉の運動による各々の容量の変化によっておこる。然し、サバ、マグロのように迅速に泳ぐ魚では、彼等が泳いでいる間はこの二つのポンプは働いておらず僅かに口吻を開いたまま水中を前進することにより侵入してくる海水で酸素補給を受けているように見える。魚の場合、体温の調節という面もあるが、酸素を含んだ新鮮な水の必要量が非常に高く、鰓に十分な水を通過させるためには続けて泳がなければならない。ここに鰓孔から吹き出しのスロット効果を考える余地が生れる。

さて Spoor (1946)²⁴⁾ は 32 gr の金魚の基礎酸素消費量は 23~25°C において 0.040 ml/min 附近であり、毎時体重 1 gr に対し 0.075 ml であることを見出しており、魚の呼吸の立場からは魚体に対する水流速度の過大な値は徒らに魚のエネルギーを無用に多く消耗させるとして、活動力 100 beat/min の泳速時に酸素消費量 0.175 ml/min を与えている。

又海水中に含まれる酸素の飽和溶解容量は大気圧 760 mmHg, 常温 15~20°C 下で 6 ml/l, 海洋観測例に見ると、表層 10, 20, 30 m 水深及び中層の 100 m 水深の海水で夫々 4.6, 4.6, 4.6 ml/l 及び 4.8 ml/l (ノーフォーク島海嶺, 6月, 鹿児島大学かごしま丸); 6.2, 6.1, 6.1 ml/l 及び 5.8 ml/l (日本海, 2月, 気象庁) で最大 4~5 ml/l 程度である。

今長さ 34 cm, 体重 730 gr のサバについて上記泳速時の酸素消費量を計算すると、消費量は体重に比例するとみなされるから

$$\begin{aligned} 0.175 \text{ ml/min} \times \frac{730 \text{ gr}}{32 \text{ gr}} &= 0.0029 \text{ ml/sec} \times \frac{730}{32} \\ &= 0.066 \text{ ml/sec.} \end{aligned}$$

従って上記必要酸素を供給する海水容量としては

$$\frac{0.066 \text{ ml/sec}}{5 \text{ ml/l}} = 0.0132 \text{ l/sec} \approx 13 \text{ cc/sec}$$

$$\text{遊泳速度} = 5 \text{ L/sec} = 170 \text{ cm/sec}$$

故に 呼吸に必要な口吻の開口面積

$$= \frac{13 \text{ cc/sec}}{170 \text{ cm/sec}} = 0.0765 \text{ cm}^2$$

又等量の海水を排出するためには鰓蓋後縁の長さを 3.7 cm として、鰓孔の隙間は

$$\frac{0.0765 \text{ cm}^2}{3.7 \text{ cm}} \approx 0.0207 \text{ cm} \approx 0.207 \text{ mm} \approx 0.21 \text{ mm}$$

今鰓蓋を 0.5 mm あけると必要酸素を供給する海水容量は

$$13 \text{ cc/sec} \times \frac{0.5 \text{ mm}}{0.21 \text{ mm}} \approx 30.9 \text{ cc/sec} \approx 31 \text{ cc/sec}$$

従って 口吻開口面積 1 cm^2 ならば泳速としては 31 cm/sec で充分であり、遊泳速度 170 cm/sec は呼吸に必要な泳速のほぼ5倍以上の速さとなって酸素供給は充分保証されることになる。

次に鰓呼吸面積はサバの場合、体重 1 gr について 11.580 cm^2 (Gray, 1954),

故に 体重 730 gr のサバで 8453 cm^2

従って 必要酸素を供給する海水容量として 13 cc/sec をとるならば、酸素交換用鰓に直接接触する海水の流速は

$$\frac{13 \text{ cc/sec}}{8453 \text{ cm}^2} = 0.0015 \text{ cm/sec}$$

所で Hughes (1961) らによると *Tinca* などのコイ科魚類の場合、鰓葉間に $0.2 \text{ mm} \times 0.04 \text{ mm}$ という断面の孔が形成されて、その中を呼吸水が流れてゆくと云う。今この値を使って試みにレイノルズ数 \bar{R}_n を計算してみると

$$\begin{aligned} \bar{R}_n &= \frac{VL}{\nu} = \frac{(1.5 \times 10^{-5}) \text{ m/sec} \times (4 \times 10^{-5}) \text{ m}}{(1.146 \times 10^{-6}) \text{ m}^2/\text{sec}} \\ &= 5.24 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

レイノルズ数 \bar{R}_n が非常に小さいため呼吸水が鰓葉間通過時には摩擦抵抗が大きくなることが考えられる。

Fig. IV-2 に示すように、高さ 0.5 mm 、長さ 3.7 cm の鰓蓋開孔面積は

$$0.5 \text{ mm} \times 3.7 \text{ cm} = 0.185 \text{ cm}^2 \approx 0.2 \text{ cm}^2$$

従って口吻 1 cm^2 のとき、鰓蓋開孔 0.2 cm^2 でその大きさは 5:1 の比となる。

因みに飛行機に用いられるスロットを現用の DC-8, B-727 機でみると Fig. IV-3 の通りで、翼弦長 500 cm のときスロット $2 \sim 3 \text{ cm}$ の大きさ、従って翼弦長 35 cm に縮めた場合スロットは $0.15 \sim 0.2 \text{ cm}$ となり約 $1 \sim 2 \text{ mm}$ の order となる。

今魚と飛行機の場合のスロット効果を比較する意味で夫々のレイノルズ数 \bar{R}_n を計算してみる。

$$\begin{aligned} \text{魚の場合 } \bar{R}_n &= \frac{VL}{\nu_{\text{水}}} = \frac{(1.5 \times 10^{-5}) \text{ m/sec} \times (5 \times 10^{-4}) \text{ m}}{(1.146 \times 10^{-6}) \text{ m}^2/\text{sec}} \\ &= 6.545 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

飛行機の場合

$$\begin{aligned} \bar{R}_n &= \frac{VL}{\nu_{\text{空気}}} = \frac{97.8 \text{ m/sec} \times (3 \times 10^{-2}) \text{ m}}{2.212 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}} \\ &= 1.326 \times 10^5 \end{aligned}$$

即ち両者のレイノルズ数には格段の開きがあり、之からみても魚の場合のスロット効果はその極小レイノルズ数時の摩擦抵抗増大により到底期待出来そうにもない。

IV-2. 鰓蓋からの吹出しについての模型実験

サバ、カツオ死魚の頭部を利用し、シリコンゴムを使って魚の吻端から鰓蓋迄の精密な口腔内型を作り、之を元にして剛体、弾性体の魚形模型を作る。出来上がったサバ及びカツオ模型により夫々口吻開閉時の鰓蓋開孔、閉孔の組合せで鰓孔からの吹き出し流れのスロット効果を抵抗試験で調べた。Fig. IV-4, Fig. IV-5 に示すように常に鰓蓋開孔時に抵抗が大きく、鰓孔よりの噴流によるスロット効果は認められず口及び鰓蓋を閉じた場合に比べて何れも抵抗は逆に増加した。

IV-3. スロット効果の考察

魚の吻から入った水が鰓孔から吹き出される際の噴流によるスロット効果を、魚の遊泳中の呼吸作用の一貫として、水の流れを魚の形態的立場から検討したが、魚の鰓蓋によるスロット効果は飛行機のそれと違ってレイノルズ数が格段に小さく、水の粘性による摩擦抵抗が大きいため、到底期待出来そうもない。

又実物魚の鰓孔構造模型による模型実験結果については、恐らくスロット効果を生ずる条件である口吻開口、鰓蓋開孔時に、口腔内部に対する動圧、鰓蓋の開きによる後方渦流発生の影響であろうか、反って抵抗が増大している。更にまた、鰓の存在が流線の連続性を妨げると云ったような本質的な問題であるのか、或いは模型粗面が活魚口腔内の滑面と違って面積効果による抵抗増を生ぜしめたのかはこの段階では論ぜられないが、この実験の結果で見ると、抵抗減の要因としてのスロット効果に関しては否定的立場をとらざるを得ない。

V. active skin の効果（能動的表皮効果）

以上魚の抵抗減の要因として考えられる事項を次々と検討してきたが、何れも低抵抗の主因と判定し得るような充分な結果を得ることは出来なかった。そこで著者は実験の困難さを承知しつつも能動的表皮効果の検討試験にとり組んだ。

イルカの皮膚では高速遊泳時皺を生じ、それが進行波として動く場合、境界層内流れの層流から乱流への遷移を防ぐ機序となっているのではないかという仮設が始発点である。同様に魚が高速遊泳時に体をくねらせるとき、身体全体の屈伸と鱗の相互被覆率がくねりの外側で魚の頭側から次第に尾の方へ増す（又はくねりの内側で減少する）ような移り変りがイルカの皺の進行波と同じ意味をもつのではないかという仮設もなり立つ。

そこで進行波を発生できる鱗板二次元魚形模型を作り、これによって active skin の効果を検討した。

V-1. active skin 模型

魚体表面の渦発生を防ぐ或いは遅らせるための進行波的表面皺動の一つの皺の規模が生体側面の筋肉節又は鱗の大きさとはほぼ等しいと予想して、サバ体型に似せた全長 1.00 m、幅 0.16 m、深さ 0.22 m の二次元流線型潜水模型を作った。その左右両側面には頭部 0.3 m、尾部 0.1 m を除き夫々 30 枚宛の鱗板、縦長さ 216 mm×幅 25 mm×厚み 0.6 mm を互いに 5 mm 宛重ねて配置してある。そしてこの鱗板を含んだ模型全面を、魚体表皮に似せて厚さ 0.06 mm のビニール薄膜で被覆した。

又模型内部にカム機構を設け、左右両側の各鱗板の動きが側面に沿って遷移し得るように、

又左右両側の進行位相も変えられるように作った。(附録 その2 p. 79 参照)。

その鱗板後端の最大開きは 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm の5種で各鱗板を適当な振幅, 位相をもつように調整し, 波長 48 cm の表面皺動波を発生させ, このときの模型抵抗を測定出来るようにした。Fig. V-1, Photo V-1 (a, b) にその模型の詳細を示す。

V-2. 実験の方法

始め鱗板振幅量を前部で最大に, 後方へ通減した状態で, 左右両側の皺動波を同位相の場合と, 半波長ずれの場合との二種の運動を行なわせ, 夫々鱗板固定時抵抗との比較を行なった。次に逆に鱗板振幅量を後部で最大に, 前方へ通減した状態で半波長ずれの同種実験を行なった。同時に模型鱗板部の流れ, 後部渦流発生の模様を流れの可視化で検討した。

(i) 抵抗測定 実験水槽の寸法, 抵抗測定の要領等については前章 II で述べたのと殆ど同様である。新たに active skin 模型用に改造した抵抗計測装置を, Fig. V-2, Photo V-2 に示す。

模型は左右両側面の前方の鱗板 25 枚 (No. 1 から No. 25 迄, 但し 24 枚で 1 サイクル) が順にカム軸に位相角 $15^\circ \left(\equiv \frac{360^\circ}{24} \right)$ 宛の遅れで運動するように, しかも前方から夫々 5 枚宛その可動最大開きが 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5 mm の 5 つの群毎に通減するように設定されその結果, 左右両側の皺動波 (波長 $\lambda = 48$ cm) が同位相又は半波長ずれの運動が出来るように調整した。この皺動波は周期的に動くけれども振幅が前から後へ通減又は通増した 5 群の単振動の連成波であるため, 之を偽調和運動と称することにする。以後同位相というのは左右両側とも同一時点で No. 1 鱗板が最大に開いたときを意味し, $\lambda/2$ の位相差をもつとしているのは右側の No. 1 鱗板が最大に開いている時点で左側のそれは最小即ち閉じていることを表わす。

実験は始め固定, 作動何れの場合も右舷 No. 1 鱗板の最大開きが 2.5 mm になるように設定して, 鱗板の表面皺動波の進行速度 V' が回流水槽の流速 V のほぼ 0, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 倍になるように周期 $T' = \frac{\lambda}{V'}$ 又は毎分カム軸の回転数 $n' = \frac{60V'}{\lambda}$ を変えて実験を行なった。すなわち両側同位相, 半波長ずれの両者の夫々について鱗板を固定した場合及び鱗板を 6.0 sec から 0.5 sec の範囲の周期で変動させた場合の抵抗を計測した。ここで $V' = 0$ は鱗板固定 (或る種の trip を置いたような) の場合を意味する。実験時対応する回流水槽の流速 V は 0.174 m/sec から 1.077 m/sec 迄変えた。次いで上述とは逆に右側 No. 24 鱗板の最大開きが 2.5 mm になるように前方から後方へ向って鱗板振幅量を通増するように設定, 且つ左右両側の皺動波が半波長ずれの運動が出来るように調整して, 鱗板の表面皺動波の進行速度 V' が回流水槽の流速 V のほぼ 0, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 倍になるように, 周期 T' 又は毎分カム軸の回転数 n' を変えて実験を行なった。このようにして模型表面に時間的, 空間的波状を画いて作動する鱗板群の効果を調べた。所謂 active skin における側面進行波が抵抗増減にどのような影響を及ぼすかを試験した訳である。尚このときの模型の抵抗は別に計測された上下板及び支え金具の部分の抵抗を全抵抗から差し引くことによって求める。

(ii) 流れの可視化 発生渦の抑圧を目で見るためには流れの可視化をはからねばならない。著者は模型鱗板部の流れを可視化するため毛糸法を用い Fig. V-3 に示すように模型全面

に 1 cm 間隔で長さ 3 cm の黒糸（鱗板部）及び黄糸（木部）を規則正しく配列して取付け、抵抗試験と同じ要領で、鱗板部の流線を調べた。

又模型後方渦流が鱗板を作動させればどうなるかを調べる目的で水素気泡法も用いた。

Fig. V-4 に水素気泡発生装置を示す。陽極に直径 8 mm、長さ 1 m の銅棒、陰極に直径 0.5 mm、長さ 40 cm の白金線をキンク状に曲げて使用した。両極間に直流電圧を加えて水槽の水を電気分解しその際白金線のキンク部から発生する水素気泡を流れの観測のためのトレーサーとする。active skin 模型の後部に膚接して白金線を水平に且つ模型中心線に対して対称にセットし、模型後方の流線、伴流の変化を目視及び写真撮影で調べた。

V-3. 実験の結果

鱗板固定の場合、皺動波形の位置の影響を調べるために、左右両側面の No. 1 鱗板の開きを最大にしたとき、最小にしたときの組合せを考へて実験し、Fig. V-5 のように抵抗値に対して左右位置が $\lambda/2$ 入れかわっても殆んど影響を与えないことを確かめた。この抵抗曲線では流速 0.75 m/sec 附近の抵抗値が小さく出ている。これは本来その値は流速の二乗曲線上にあるべきだが高速のため模型の大きさに比べて水深の浅い影響が生じたものであろう。

一定の流速 V の下で皺動波進行速度 V' を変化させたときの結果を Fig. V-6 (a~h) に示す。鱗板固定の抵抗は上述のことから、左右両側面同位相・ $\lambda/2$ 位相差を問わず殆んど一定の値を示すから図に於て水平な直線で示されている。それらをまとめて Fig. V-7 に示す。

一般に鱗板の固定の場合と、作動の場合とを問わず左右 $\lambda/2$ の位相差をもつ場合が左右同位相の場合より抵抗が小さく出るようであり、特に鱗板作動時にその傾向が顕著である。Fig. V-6' (a~i), V-7' は位相差 $\lambda/2$ の場合だけについて進行波速度 V' の変化に対する抵抗値 R_i を求めたものである。之は前方から尾部側へ移るに従って振幅を大きくした場合であるから魚のくねり現象に近付いた動きに相当する。又 Fig. V-8' は位相差 $\lambda/2$ で振幅が前から後へ遞増した場合の抵抗減少率と、逆に遞減した場合との比較で、Fig. より明らかなように鱗板進行波の振幅変化がより魚のくねり現象に近い前者の場合に、抵抗減少率は大きく、平均して約 2 倍の値となって現われている。

この模型実験で可視化された流れを見ると Fig. V-8(b) 及び Photo V-3 で明らかなように、鱗板部の流線は完全に鱗板表面上を平行整一に流れて居り、active skin の効果を判定する意味では (b) の魚型平板付潜没二次元模型が適当であることが判る。

(a) 模型は、(b) の上・下魚型平板によって鱗板部の流線が乱される事を考へ、魚型平板の夫々上下位置に、半紡錘型をとりつけ、模型全体を出来るだけ流線型に近付けたものである。測定は (a) 模型全抵抗から (c) 模型抵抗を差引く。然し (a) での鱗板部の流線は低速、中速に於ては比較的安定した流れであるが、模型の大きさに比べて水槽水深が浅いことから表面重力波の影響によって、高速時に尾部上方で上昇流が起り、鱗板の効果を判定するには不適當であることが判った。

模型後方渦流発生状態を Photo V-4 (a, b) に示す。Photo は Fig. V-6'a で最高の抵抗減をみた進行波速度 $V'=0.9V$ (但し 流速 $V=0.179$ m/sec.) の記録である。

Photo V-4a で示すように鱗板固定時の流れは、白金線後方全般に亘って、渦発生のため気泡が多くみられ、白金線からの距離 30 cm の所で 2~3 cm ほど鱗板作動時より余計に拡がっ

ている。又白金線後方 7, 8 cm の所で目視、確認出来る渦が現われた。Photo V-4b は鱗板作動時のもので、固定時より気泡発生が少ないため澄んで透明に見え、渦領域も狭く小さくなっている。又白金線後方 12, 3 cm の所で目視、確認出来る渦が現われた。

両者を比較してみると、鱗板作動時が、固定時と比べて境界層の剝離、即ち渦の発生の後方への移動が見られ、その結果渦領域も狭く小さくなっていることが分る。

V-4. 能動的表皮効果の考察

第 II 章で述べたように単純な弾性皮膚という受動的な形での魚体表面の効果は摩擦抵抗の軽減に大きく寄与するとは認められなかったし、また弾性体模型では高速になると渦の発生のため尾が左右にふれ、抵抗が急激に増大することもあった。之に対して active skin を用いたこの実験では Fig. V-7, 7' に示すように一般に高速になるにつれて、左右両側の皫動波が同位相の場合の抵抗は、半波長の位相差があるときのそれより大きくなる傾向にある。このことから考えれば、Kraemer の passive skin の実験でも左右対称な流れしか生じない場合には大きな抵抗減を期待することは無理と考えられる。しかし他に何か特殊な条件（例えば柔らかい表皮の左右側面に半波長ずれの passive な皫動進行波が現われると云った現象）が生ずれば問題はまた別となり、次に説く理解の筋道に入ることとなる。

左右両側面半波長ずれの進行波、特に鱗板振幅量が前方から後方へ通増した場合（魚のくねり運動では後方の振幅が大きい、実際の生魚では遊泳時、体長の後部 1/2~3/5 が大きく左右にふれる所謂くねり運動をしている）、抵抗減の理由としては、第 1 に鱗板表面の流れが鱗板作動の場合に、固定時のそれと比べ、左右それぞれの側面で境界層の剝離点を後方にずらせ、渦発生の遅れ・渦領域の狭小化を来たすこと、第 2 としてそのような片側面での諸現象が尾部後方において合流する際、同位相進行波ではエネルギー消滅にならないのに対し、半波長ずれの場合には左右進行波の相互干渉により渦のエネルギーは減殺され渦も小さくなり圧力抵抗も減少してくること（moving skin の効果、Fig. V-9 (a, b) 参照）が考えられる。

著者は Fig. V-6, 6' を基に、鱗板振幅量が前方から後方へ向って通減及び通増した場合の最小抵抗値を示す条件として、鱗板進行波の毎秒周波数 N と、そのときの流速 V との関係を調べ、夫々次のような実験式を得た。

$$V = 0.015 + 0.648 N \quad (\text{通減の場合})$$

$$V = 0.099 + 0.546 N \quad (\text{通増の場合})$$

Fig. V-10, 10' 参照。

一方大型楕円形水槽で飼育中のハガツオ遊泳運動を観察した Magnuson・Prescott (1966)²⁵⁾ の報告によれば、これらのハガツオは平均して 88.2 cm/sec の速度で流れに逆って泳ぎ、毎秒あたり尾鰭の横打回数 (beat 数) が 1.42 回であった。

遊泳速度 V (Body Length/sec) と尾鰭横打頻度 (毎秒 beat 数) \bar{N} (cycle/sec) との間には

$$V = 0.491 + 0.639 \bar{N}$$

の関係がある。

著者の実験で、流速を魚の遊泳速度 V (B.L./sec) とみなし、鱗板進行波の毎秒周波数 (魚の毎秒当りのくねり数に相当) を beat 数 \bar{N} に等しいとみれば、Magnuson らの提示した実

験式と極めて類似することを知る。

この近似は魚が遊泳の瞬間瞬間に最も水中抵抗の小さい条件を選択して泳いでいることを示唆するものとして極めて興味深いものであり、何れにせよ、遊泳中の魚やイルカなど紡錘型動物の体表には渦の発生を防止するため、体側面進行波活用の生態的機構が自動制御的に備わっているものと推測される。

VI. fluttering fin をつけた円柱の水中抵抗試験 (尾鰭の効果)

流れの中に垂直におかれた円柱後流部に剛体 fin をとりつけて抵抗試験を行なった例はあるが、本研究では基礎的実験として魚の尾鰭のような薄いビニール膜を fluttering fin として円柱後流部にとりつけ、その形、寸法、厚さを変えて抵抗試験を行なった。魚体運動の中で尾鰭の果す役割を流体抵抗の立場から検討しようとしたものである。

VI-1. 実験の方法

(i) 抵抗測定 実験装置及び fluttering fin をつけた円柱の詳細を Fig. VI-1 に示す。円柱は直径 4.1 cm、高さ 34 cm の台湾桧製、表面をコーパル（ワニス）で防水塗装した。fluttering fin は厚さ 0.06 mm のビニール膜でその形は矩形状である。幅 20 cm、長さ l は円柱直径 d ($=4.1\text{cm}$) の函数として $l=0\sim 15d$ (ここで $l=0$ は円柱のみの意) に亘って変え、レイノルズ数 $\bar{R}_n=7\times 10^3\sim 3.4\times 10^4$ の範囲で一連の抵抗実験を行なった。又魚体尾鰭にならって fin の後方から V 型切り込みを入れた場合及び fin を水平方向に短冊型に刻んだ場合の抵抗試験も行なった。更に抵抗に及ぼすビニールの厚さの影響を調べる目的で $l=7d$ の条件 (そこで抵抗減少が著しい) で、厚さを 0.06, 0.5, 1.0 mm の三段階に変化させた実験も試みた。

(ii) 流れの可視化 抵抗変化の要因を探るため、流れを可視化し、これから新しい流れの現象の発見、流れの挙動を支配する法則の実証を試みた。

A. 水素気泡法 (回流水槽)

実験装置の詳細を Fig. VI-2, Photo VI-1 に示す。その他の事はほぼ前章に述べたことと同じである。

B. 煙霧法 (小型風洞)

ここで煙霧法を用いたのは水素気泡法と違って低速域の流れの解析に適しているからであり、実験装置の略図を Fig. VI-3 に示す。煙発生装置から発生する線香、パラフィン、煙草等の煙の粒子を翼型の噴出装置から噴出させ、それをトレーサーとして、円柱後方の流線、伴流の変化を目視観測で調べた。このときのレイノルズ数 $\bar{R}_n=1\times 10^3\sim 8\times 10^3$ である。

VI-2. 実験の結果

Table VI-1 に示すように円柱のみの抵抗よりも円柱後流部に矩形状のビニール膜の fluttering fin をつけた場合が一般的に抵抗は減少した。

Fig. VI-4a で明らかのように厚さ 0.06 mm の fin では $l=3d\sim 7d$ の範囲で特にその傾向が著しく、抵抗減少率 $(R_0-R_l)/R_0$ はレイノルズ数 \bar{R}_n に比例して減るように見える。上と同様な条件の下で fin の後方から長さ l の 1/4 の V 型切り込み所謂 1/4 V-cut, 更に深

く 1/2 V-cut の切り込みを入れて実験を行なったが、Fig. VI-4b (1, 2) で示すように cut 量と抵抗減少率との関係は複雑ではっきり傾向をつかむことは困難であった。fin の厚さを 0.06, 0.5, 1.0 mm と三段階に変えたときの抵抗変化は Fig. VI-4c (1, 2) から判るように厚さと抵抗との関係も必ずしも一義的に定らず、尚今後の検討が必要である。今回の実験では比較的薄い fin の方が抵抗減少率は大きいようである。最後に Fig. VI-4d に示すように厚さ 0.06 mm の矩形状 fin を水平方向に 2 cm 幅で短冊型に 10 等分し、海藻になぞらえた実験を行なったが、細長いビニールが互いにかまったりして抵抗の減少はみられず場合によっては円柱のみの時と同じか或いはそれよりも増加した。

次に水素気泡法を用いる流れの可視化実験は回流水槽の流速 0.173 m/sec, レイノルズ数 8×10^3 で行なわれた。Photo VI-2 に示すように円柱のみのときは $\bar{R}_n = 8 \times 10^3$, $C_D = 0.931$ で明らかに流層剝離が確認できる。又 Photo VI-3 に示すように円柱後部に厚さ 0.06 mm, $l = 7d$ の矩形状ビニール膜の fin をつけたときは $\bar{R}_n = 8 \times 10^3$, $C_D = 0.773$ となり、円柱のみのときの層流剝離と比較して剝離点が後方へ若干移動しており、伴流の規模も小さくなっている。Photo VI-4 (a, b) は上記 fin の後部に 1/4 V-cut, 1/2 V-cut を入れた場合の記録である。現在の所、之以上の流速における可視化は水槽の表面流の影響に加えて吾々の可視化技術の未熟さもあって成功しなかった。

煙霧法を用いた流れの可視化実験は、円柱のみの場合目視観測で境界層の剝離、円柱後方の不連続面の発生、渦及び伴流を確認できたが、之を写真に撮ることは撮影技術及び照明装置の不備で非常に困難であった。又円柱後流部にビニール膜の fluttering fin をつけたときは fin 自身の重みで空中に垂下し、fin が揚力を持ち得るような風速 1.7 m/sec 以上になると肝心のトレーサーとしての煙の粒子の拡散が著しく、可視化は失敗に終わった。

VI-3. fluttering fin 効果の考察 (受動的鰭)

一般に流れの中に物体が置かれると、その物体には流体の粘性による摩擦抵抗と物体下流に伴流があるために生ずる圧力抵抗の両者が作用する。その場合後流の規模の小さい流線型の物体を除いて一般に鈍な物体では伴流による圧力抵抗が摩擦抵抗に比べて極めて大きいことが知られている。この場合 Fig. VI-5 に示すように円柱の後流部に剛体の fin をとりつけて伴流による圧力抵抗を減らす試み (Hoerner (1965)²⁶⁾) が行なわれているが、ビニール膜のような自由に曲り易い fin をつけた場合は之迄詳しくは取扱われていないようである。

さて本実験では Fig. VI-6 に示すように一般に云われている臨界レイノルズ数 3.0×10^5 より小さいレイノルズ数 $8.0 \times 10^3 \sim 3.4 \times 10^4$ の所で円柱のみの抵抗係数が 0.829~0.936 となり、その値が通常の場合よりもやや小さい。之は表面流の影響の処理が不十分なためと考えられる。流れの可視化されたものから考えて境界層を調べてみると明らかに剝離を生じているものとみなせる。

Fig. VI-4 をみると円柱後流部にビニール膜の fin をつけたときは、円柱のみの時より抵抗が一般に減少してゐる。

普通臨界速度 U で運動する球の抵抗は $D = 6\pi\mu U a$ (a は球の半径) で与えられ Stokes' law として知られている。即ち抵抗は流速に比例する。今抵抗減少率 $(R_0 - R_i)/R_0$ が抵抗に比例すると仮定する。無次元化の定義からレイノルズ数 \bar{R}_n は流速に比例する。従って $(R_0 - R_i)/R_0$,

\bar{R}_n の関係が直線で表わせることになる。最小二乗法を使って近似的に処理してみると Table VI-1' の 1) のような結果が得られる。之から矩形状 fin の長さについては $l=3d\sim 7d$ の場合にレイノルズ数 \bar{R}_n に対する抵抗減少率 $(R_0-R_i)/R_0$ の絶対値が大きく、原点から離れている。即ち $(R_0-R_i)/R_0$ 軸上の切片 a の値がほぼ同じ order とみられるのに、直線の傾き b の絶対値が一番小さくなっている。換言すれば流速の増大にも拘らず抵抗減少率はそれ程急減せず魚の尾鰭効果としては望ましいことが分る。次に同様の処理を Table VI-1A, B, C の値について行ない、之を Table VI-1' の 2) の A, B, C に示す。 $t=0.50$ mm, $l=7d$ では矩形状 fin より V-cut fin の方が有利のようであるが、Fig. VI-4b, c で示すように今回の実験範囲では抵抗減少率と V-cut 量、或いは fin の厚みとの関係を一義的に定めることは困難で、今後更に精緻な実験継続が望まれる。著者としては又状尾鰭になぞらえた V 型切り込みの効果は、鰭の長さ、厚み、V-cut の量、流速のみならず、膜の柔軟性、流れの渦度など多くのパラメーターで定まるのではないかと考えている。

円柱後部に発生するカルマン渦列については、古典流体力学の中で示されているように、レイノルズ数 $10^3\sim 10^5$ の間では

$$\text{Strouhal 数 } C = \frac{fd}{V} \approx 0.20$$

ここに f : 円柱背後に生ずる渦列の振動数 (cycle/sec)

d : 円柱直径 (cm), V : 流速 (cm/sec)

であり、このとき発生する片列だけの渦間距離は $4.3d$ となることが計上される。fin の長さが $3d\sim 7d$ の場合、片列の渦間距離 $4.3d$ をはさみ込む長さであるから、膜の共振によって大量且つ容易に渦の運動エネルギーが、吸収されるものと考えれば、fin の効果として、渦列の整理による渦発生規模の縮減が理解できよう。fin の長さが $7d$ 以上では膜による渦の運動エネルギー吸収も効果的でなくなり、又膜面による摩擦抵抗も大きくなって fin の効果が減少するものと考えられる。又状尾鰭になぞらえ、矩形膜に後方から V 型切り込みを入れた fin の実験では、V 型切り込みのない場合より抵抗減少率の増大を認めたが、その理由についても上述の解釈を敷衍することで説明が出来るのではなからうか。

以上のように、受動的鰭の基礎実験として著者は円柱後流部にとりつけた fluttering fin を考えたが、実際の魚では紡錘型本体に又状尾鰭がついており、後流部に発生する渦の規模は、円柱から楕円体、楕円体から紡錘型になるにつれて小さくなり、従って尾鰭も円柱の場合より当然小さくて済むことになる。

最後に海草の例に倣った短冊状 fin の場合、Fig. VI-4d でも判るように、円柱のみの抵抗に比べて必ずしも抵抗減少が認められなかった。船乗りの間で“船体に海草が付着したときは反って船体抵抗が減少する”と云う俗説が流布されている。実際海草の場合、弾性、形、表面のねばねば等今回の実験の想定と必ずしも対応していないので、この実験結果をもって直ちに従来の俗説を否定する訳にはゆかない。このような抵抗減の可能性を示唆するものとして米科学雑誌の記事²⁷⁾がある。海中ケーブルに人工的に hair を取りつけると水中抵抗が 50% も減少すると云う。この問題は今後更に検討し、研究開発を進めるに値するものと考えられるが、本論文の意図する魚の抵抗減少と直接関連は少ないので今は一応措くこととする。

VI-4. 実物魚による(能動的) 鰭の効果

前節の論議はすべて尾鰭が受動的立場で考えられたが、実際の尾鰭は魚の遊泳運動に見られるように魚体表皮と同じく能動的である。従って著者は生魚を使って、魚体の遊泳運動に及ぼす尾鰭の役割を実験的に調べた。即ち回流水槽観測水路の中央に流体力学的にその遊泳方向を拘束した運動場を作り、この中に尾叉長 12~15 cm のヒブナ (*Carassius auratus*) 1群 10尾宛を入れて実験を行なった。運動場の詳細は Fig. VI-7 に示すように直方体の上下面と左右二側面を透明強化ガラスで囲み、前後端の水の出入部を網(クレモナ 8本, 10節)で閉鎖し、魚が運動場から逃げられぬようにしてある。

- 魚は ① 鰭の正常なるもの
 ② 背鰭のみを取除いたもの
 ③ 尾鰭のみを取除いたもの
 ④ 背鰭, 尾鰭共に取除いたもの

の4群に別けて、水深 18 cm, 流速 0 cm/sec より 60 cm/sec迄の夫々の魚群の運動を目視観測と 8 ミリ撮影により観察した。8 ミリ撮影は、流速 0 cm/sec~50 cm/sec, 55 cm/sec, 60 cm/sec を夫々所要時間最大 29 sec. 8.5 sec, 14 sec 延べ 51.5 sec で連続三段階に別けて撮影し、夫々のフィルムを editor を用いて比較検討した。

その結果を Fig. VI-8-① (a, b, c, c'), Fig. VI-8-② (a, b, c, c'), Fig. VI-8-③ (a, b, c, c'), Fig. VI-8-④ (a, b, c, c') に示す。ここで各 Fig. の (a) は押し流された魚の流速に伴う増加率の傾向, (b) は最高流速 60 cm/sec の魚の遊泳状態, (c), (c') は夫々 3 秒間, 2分 30 秒間の魚体運動の軌跡を editor を使って表わしたものである。

①の場合、流速 55 cm/sec 過ぎより押し流され始め 60 cm/sec, 経過時間 14 sec で総数の 20%弱のものが押し流されている。残りのものはほぼ安定静止の位置を保つ。

②の場合、流速 55 cm/sec より押し流され始め 60 cm/sec, 10 sec で、20%強のものが押し流されている。残りのものの大半は相対的静止位置を保つ。

③の場合、流速 50 cm/sec を越えると押し流され始め 60 cm/sec, 12 sec で、75~80%の魚が押し流される。残りの魚も相対的に静止位置を保てず非常に不安定な運動を示している。

④の場合、流速 50 cm/sec より押し流され始め 60 cm/sec, 10 sec で、80%の魚が下流の網口に押し流されている。残りの押し流されない魚も非常に不安定な運動で間もなく押し流されて了う。

Fig. VI-9 はそのまとめで、之より一目瞭然魚群の遊泳運動に尾鰭の存在が不可欠の要素であることが判る。一方背鰭の有無は魚群の遊泳運動にそれ程大きな影響を与えていないように見える。事実魚の運動状態を側面の観測窓から 8 ミリ撮影したものを editor にかけて分析すると、流水中に於て、魚は何れも背鰭の前部約 4/5 を閉ちて活用していないことが明らかとなった。

1958年 Bainbridge がウグイ、ニジマス、キンギョの3種について提示した魚の遊泳速度 V cm/sec, 魚の体長 L cm, 尾の横打ち頻度 f beat 数/sec との関係を示す実験式

$$V = 1/4(L(3f-4))$$

を使って、この平均体長 13.5 cm のヒブナの遊泳運動を Fig. VI-8 ①, ②, ③, ④ 中の夫々の C, C' の資料について吟味すると、2分 30 秒間の運動で、

鰭の状態		押し流された距離 cm	遊泳速度 cm/sec	尾の横打ち頻度 beat/sec
正	常	9.23	59.94	7.25
背	鰭無し	9.81	59.93	7.25
尾	鰭無し	15.00	59.90	7.25
背	鰭・尾鰭無し	19.62	59.87	7.25

尾鰭切り取りによる遊泳能力の低下，即ち，遊泳速度にはそれ程大きな変化や減少は見られない。又全遊泳距離 $60\text{cm/sec} \times 150\text{sec} = 9000\text{cm}$ に対し，押し流された距離の比は夫々 0.10, 0.11, 0.17, 0.22% で極く短い遊泳時間の比較では，それ程大きな差は認められない。然し実際の運動軌跡をみると，尾鰭を欠いたため魚体が方向安定性を失ない所謂ヨロメキ運動をしていることがはっきりと判る。今之を表示すれば

鰭の状態		進路に対する横方 向への最大フレ cm	2分30秒間の ヨロメキ回数 回
正	常	0	0
背	鰭無し	0.33	0
尾	鰭無し	1.50	1.8
背	鰭・尾鰭無し	1.60	2.0

之から尾鰭の効果としては魚の抵抗減に寄与することは勿論，動的方向安定性に寄与することが考えられる。Fig. VI-9 の結果も亦之を裏付けるもので，尾鰭切りの魚では方向安定性を失ない，遊泳速度にはそれ程大きな変化や減少は見られないのに，魚体のヨロメキ運動が多くなり流圧を受けて魚体が押し流される距離も大きくなり，更に推力不足を補うための疲労度も加わって高速時下流へ押し流される魚の割合も増加してゆくことが理解できよう。

VI-5. 尾鰭効果の考察

Magnuson らの実験式からも判断出来るように遊泳速度は尾鰭の横打頻度に，従って推力も之に比例する。推力が増加すれば渦発生も大きく抵抗が増大することになる。この場合受動的鰭，能動的鰭の両者の実験結果を基にして尾鰭の効果を論ずるならば，魚にとって尾鰭の存在は，遊泳運動に於て後流中に於ける渦発生を減少させることで抵抗減に寄与することはもとより，尾鰭のもつ微妙な動的方向安定作用により，安定した進路が保持できることが判る。

特に前のV章で著者が触れたように，最小抵抗値を示す条件として，鱗板進行波の周波数 N (cycle/sec) と，そのときの流速 V (Body Length/sec) との関係が，Magnuson・Prescott の提示した実際のハガツオの遊泳運動における尾鰭横打頻度即ち毎秒 beat 数 \bar{N} (cycle/sec) と，遊泳速度 V (Body Length/sec) との関係式に極めて接近，類似していることは注目すべき事実で，之より尾鰭の存在自身も亦 active skin の効果を増幅助長させるための重要な役割を果していることが窺われる。

因みに本論文では遊泳魚体の低抵抗性に論点を置いて検討をすすめたので，尾鰭本来の機能である横打作用に基づく推力発生の機序については立入らない。

VII. 総合考察

生きている魚の水中抵抗は剛体模型に比べて小さく流体力学的計算によれば、両者の抵抗係数には1桁(1/10程度)の差があると云われる。1952年 Gero がサメ、カマスで行なった実験をきっかけに、多くの学者、研究者が魚の低抵抗性の謎に挑戦して来た。従来検討されてきた低抵抗機序の順に考察をすすめるならば、先ず軟体表皮による乱流発生の抑圧が挙げられよう。1960年 Kraemer の行なった実験結果を除いて之迄多くの研究者の実験或いは理論計算の結果が何れも低抵抗性に否定的となったことは、このような受動的表皮効果の検討が単純な弾性体模型実験では、その本質に迫ることが如何に困難かを吾々に教えるもので、著者の行なった剛体と同形弾性体の抵抗比較試験に於ても、抵抗値は両者何れも同じか、もしくは反って弾性体の方が大きくなる傾向であった。著者は魚体の周りの流れの層流化が、泳速に応じて自動的に行なわれる仕組みが魚体内に存在すると考えており、そのような軟体表皮が人工的に果して作れるものかどうか。著者の実験に於ても模型と実物との硬度の等価性が反省されるべきであることを述べたのも、このような意味であって、Kraemer の実験結果についても同じような意味で今後是非とも追試、再検討が要求されるのではなからうか。

粘液効果については之迄これを否定する立場と、肯定する立場とから夫々多くの実験結果が出されている。著者の行なった実験でも否定的結果を得たが、既に第III章でも触れたように之は著者の使用した高分子溶液そのもの、或いはその使用濃度が適当であったかどうかが問題である。高分子溶液による Toms 効果の存在は今日多くの学者によって肯定され、もはや定説となりつつある。すなわち高分子はその構造が直鎖的で側鎖が少なく水平に並ぶ方式のもの、しかもその濃度が僅か数十 p.p.m. の薄溶液の場合に粘度が一番低く出ると云う。従ってこのような高分子溶液で魚体全面が包まれると当然に抵抗は低く出る筈である。著者の使用した魚油は元来その使用目的が模型粗度の整一化にあった。しかし上のような考え方にたつと魚油濃度の測定、高分子構造の検討を怠った事は反省されるべきで、著者の実験結果をもってそのまま粘液効果の判定と云う訳にはゆかない。唯、魚の場合、高速魚のハガツオに於てこの粘液が何等抵抗減に影響を与えていないと云う知見(Rosen その他(1970))が得られていること。又イルカの皮膚の疎水性等を考えた場合抵抗減の要因が必ずしも粘液効果のみに限定されるものでないことは明らかであろう。

吻から入った水が鰓孔から吹き出される際の噴流によるスロット効果については、著者が行なった魚の遊泳中の呼吸作用を生理生態学的立場から計算検討した思考実験と、実物魚の鰓孔構造模型による模型実験とから何れも否定的結論を得た。この場合著者はスロット効果をあく迄低抵抗の立場からしか論じていない。然し魚の実際の生理現象として、遊泳運動中の鰓による呼吸作用即ち海水中の溶存酸素の補給といった面から本質的に攻めるべきであって、之を低抵抗の立場から攻めたのは矢張り誤りであったのではないかと反省している。

active skin による層流安定確保の問題について著者の結果によれば、一般に鱗板固定時の抵抗は作動時の抵抗より高く、作動の場合高速になるにつれてその抵抗は左右両側面の皺動波同位相の場合半波長位相差の場合よりも大きくなる傾向にあることを認めた。先の Essapian の観察で、迅速に遊泳中のイルカが急に停止するとき、或いは跳躍の終了後、水中へ再び飛び込むときに皺の発生が認められているのは、この同位相皺動波によって水中抵抗を大きくしプレ

ーキ作用を利かせているものではないかと考えられる。従って左右対称な流れをもつと予想される Kraemer の passive skin を用いて抵抗減を来たすということは、上記 Essapian のブレーキ作用を考えると、他に何か特殊な条件（例えば進行波）でも与えられない限り一般には無理と考えられる。

鱗板作動時が固定時に比べて抵抗の低い理由は流れの可視化の実験からも判るように、境界層の剝離（即ち渦の発生）が後方へ移されており、又時間的にも剝離の遅れが見られるので、渦領域が狭く小さくなって圧力抵抗が減少することにあると思われる。その機序を考えると、イルカ、魚何れの場合も Fig. VII-1 に示すようにその外皮側面進行波は鰓後方に振幅最小で始発し、後半部で振幅最大となるような正弦波が外山の崩れた形（波長 λ は前半 λ' と後半 λ'' とで波長の異なる正弦波の継ぎ合せ）で進んでゆくものと考えられる。従ってそれらの波の谷に挟まれた水は体表皮に沿うて接線的に後方へ送り出されることになる。外皮を被った魚の鱗は Fig. VII-2 (a, b) に示すように非接線的に動くが、鱗が周期の遅い単純な単振動を行うとすると水の粒子は体側面と同種の往復運動をするのみで、時間平均をとれば、どちらにも駆動されない。しかし quick return 運動のときは遠心力の効果がより強い quick 行程で二次流れが生じ、slow 行程でもそれが壊されることなく存続する。そのため鱗の動きが緩く開き急に閉ぢる仕方で行なわれると、鱗の開き角に含まれた水は極く薄い層ながら表皮に沿って後方へ押される筈である。又鱗はその長さで互いに1/2程度重なりがあるので、面積では1枚の鱗の約1/4程度が上述の運動の増幅に寄与することになる。つまり、全面積の約25%が働くとして増幅率1.25程度の効果が見込まれることになろう。更に Fig. VII-3 に示すように魚のくねり運動に伴ない、体軸が真直になる度ごとに体側の大彎曲による鱗の重なり部分（即ち露出部と被覆部との間）に挟まれた水が、大彎曲の外側（体外）で後方へ押し出されて推力となり抵抗減を促進する可能性がある。又大彎曲の内側（体外）では露出部、被覆部は綺麗に重なりその上を流れる水は完全に層流化されこれも亦抵抗減に寄与するものと期待される。active skin または鱗の側面進行波は左右位相差の有無を問わずそれぞれの側面で先ず境界層流れの剝離（乱流抵抗増）を抑制し、更に半波長位相差の所謂魚のくねり運動で、左右進行波の相互干渉により尾部後方において渦のエネルギーが減殺され渦も小さくなり圧力抵抗も減少してくるし、鱗の動きによって推力すら発生する。之が魚体低抵抗性の重要な要因と考えられる。

著者の実験では左右両側面半波長ずれの進行波の場合のうち、鱗板振幅量を前方から後方へ遞増せしめて動かした所謂魚のくねり現象（実際の生魚では遊泳時、体長の後部はほぼ1/2~3/5が大きく左右にふれる）に近い場合の方が、抵抗減少率は大きく、遞減の場合の約2倍の値となっている。この理由の中には、前述の渦発生の抑制のほかに体の彎曲により、鱗の重なり部分が開きそこに挟まれた水が体軸を真直にする際、彎曲の外側で後方へ押し出され推力となるという可能性があることも含めて考えたい。この場合鱗板振幅量を前方より後方へ遞増すると当然遞減のときよりも、より多くの水を後方へ押し出し得る筈であって推力の増大を期待できるからである。

著者はこの場合の最小抵抗値を示す条件として、鱗板進行波の毎秒周波数 N と、そのときの流速 V との関係を調べ、鱗板振幅量が前方から後方へ、夫々遞増、遞減した場合に対し、実験式

$$V = 0.099 + 0.546N \quad (\text{通増の場合})$$

$$V = 0.015 + 0.648N \quad (\text{通減の場合})$$

が与えられることを見出した。

之等の式を、動物学者 Magnuson・Prescott が太平洋マリンランドの大型楕円形水槽で飼育中のハガツオに対して得た実験式

$$V = 0.491 + 0.639\bar{N}$$

或いは Yuen がホンガツオに対して得た実験式

$$V = 2.053 + 0.479\bar{N}$$

同じくキハダマグロに対して得た実験式

$$V = 2.446 + 0.567\bar{N}$$

ここに V : 遊泳速度 (Body Length/sec)

\bar{N} : 尾鳍横打頻度 (毎秒 beat 数)

と比較すると、著者の実験で流速を魚の遊泳速度とみなし V (B.L./sec), 鱗板進行波の毎秒周波数 (魚の毎秒当りのくねり数に相当) を beat 数 \bar{N} に等しいとみれば、上記 Magnuson・Prescott 或いは Yuen の提示した実験式と極めて類似することを知る。

著者の実験式では鱗板振幅通増の場合、 $V-N$ 直線の傾斜が通減の場合より多少小さい。上記カツオ (0.639) とマグロ (0.567) の場合の傾斜の比較からも判るように、之は振幅量の変化がそのまま魚型並びにそのくねり運動の大きさに関係するものと思われる。またこの実験式の常数項 ($N=0$ のときの V の値) がカツオやマグロの場合の値より 1~2 桁も小さくほとんど 0 に近いのは著者の実験が模型で行われ流速も 0 に近づけ得るのに対し、活潑な生魚で観察された場合は beat 無しでも前進出来ることや環境水が動いていた事などによるものであろう。

この近似は魚が遊泳の瞬間瞬間に最も水中抵抗の小さい条件を選択して泳いでいることを示唆するものとして極めて興味深いものであり、何れにせよ、遊泳中の魚やイルカなど紡錘型動物の体表には渦の発生を防止するため、体側面進行波活用の生態的機構が自動制御的に備わっているものと推測される。

魚体の尾鳍は周知のように一般に又状切れ込みをもち、且つ軟弾性の組織である。之を魚の抵抗の見地から受動的鳍と能動的鳍の両面について検討する。先づ受動的鳍の基礎的実験として、流れの中に垂直に置かれた円柱後流部に矩形状ビニール膜の fluttering fin をとりつけ抵抗試験を行なったところ、fin の厚み 0.06 mm のとき、長さとして $3d \sim 7d$ (d は円柱直径) で抵抗減少率が大きく且つレイノルズ数に対して絶対値が余り変らないことが判った。円柱後部に発生するカルマン渦列については、古典流体力学の中でレイノルズ数 $10^3 \sim 10^5$ の間では Strouhal 数がほぼ 0.20 となり、このとき発生する渦列間隔は $1.3d$ 、又片列だけの渦間距離は $4.3d$ となることが計上される。fin の長さが $3d \sim 7d$ の場合、片列の渦間距離 $4.3d$ をはさみ込む長さであるから、膜の共振によって大量且つ容易に渦の運動エネルギーが、吸収されるものと考えれば、fin の効果として、渦列の整理による渦発生規模の縮減が理解できよう。fin の長さが $7d$ 以上では膜による渦の運動エネルギー吸収も効果的でなくなり、又膜面による摩擦抵抗も大きくなって fin の効果が減少するものと考えられる。更に後流部に発生す

る渦の規模は、円柱から楕円体、楕円体から紡錘体になるにつれて上述の渦列間隔も次第に狭くなり、又片列だけの渦間距離も次第に小さくなる。更に渦も小さくなる。紡錘体に於て最大厚さ d の点から後方へ長さ $4.3d$ をとると、通常の翼厚比 15% (翼の最大厚さと翼弦長との比) の翼型を与え、 $4.3d$ の長さはほぼ翼弦長の 64% に等しい。魚の体形も之に近いことは衆知の通りであるが、魚には更に又状尾鰭がついている。円柱後流部に矩形状のビニール膜が fluttering fin としてとりつけてある場合、発生するカルマン渦は鉛直方向に同じ高さで並ぶが、もし矩形膜に後方から水平直線の切れ込みを入れるか或いは V 型切れ込みを入れると同上の位置で上下交互に違った高さで渦が並ぶ。実際の魚の尾鰭では上述の渦が殆んど上下に重なり渦消去に一段の効果を発揮できるものと思われる。

以上のように、受動的鰭の基礎実験として著者は円柱後流部にとりつけた fluttering fin を考えたが、実際の魚では紡錘型本体に又状尾鰭がついており、後流部に発生する渦の規模は、非常に小さくなり、従って尾鰭も円柱の場合より当然小さくて済むことになる。

能動的鰭の実験として、尾鰭切りりの効果を調べた結果、尾鰭切りの魚では方向安定性を減少させることが判った。遊泳速度にはそれ程大きな変化や減少を示さないのに、魚体のヨロメキ運動が多くなり流圧を受けて魚体が押し流される距離も大きくなる。更に推力不足を補うための疲労度も加わって高速時下流へ押し流される魚の割合も増加してゆく。Magnuson らの実験式に見る如く遊泳速度は尾鰭の横打頻度に比例する。この場合尾鰭の横方向からの投影面積と、尾鰭の掃過距離で定まる水量から受ける反力の進行方向成分が推力として作用し、その力が魚体抵抗と等しいときに一定遊泳速度を保持できる。このときに当然渦の発生と同時に圧力抵抗の増大を引き起す。魚のくねり効果や鱗動の進行波、所謂 active skin の効果 (抵抗減少作用) 等によって、この抵抗が減らされるものであろう。

受動、能動両方の実験結果から判断するに魚の尾鰭は、魚が推力を発生して泳ぐ際魚体後半 $1/2 \sim 3/5$ の部分に同調して所謂くねり運動を終端部で完結させ、更に微妙な尾鰭の動的方向安定機能によって進路を保持し、両作用相まって active skin による最小抵抗状態を継続補完させる重要な役割をもつものであると云い得る。

著者はバンクーバーのスタンレイ水族館飼育水槽において、雌雄二頭の白イルカの遊泳運動を目視と 8 ミリで観察、記録した。Photo VII-1 参照。長さ約 4.2 m、体高、体幅約 1 m で背鰭がなく、アイスバックの下も容易に泳げると云う。普通のイルカと違って頸椎が融着せず、そのため頭を自由に動かすことができ、イルカよりも曲り易い。遊泳速度は遅く約 50 cm/sec であったが、Photo VII-2 に見るように腹部外側にある二条の太い縦皺 (間隔 50~30 cm、幅 18~15 cm、高さ 15~13 cm、長さ 140~150 cm) を水平尾鰭と同調させ、魚のくねり運動の場合と同様に静かに上下にふれさせて前から後へ進行波を作り乍ら遊泳している。之も一種の active skin であって、原理的には魚の遊泳運動の場合と全く同じ進行波による低抵抗性の機序と考えられよう。この際二条の縦皺は後へ流れると共に、巾、間隔も狭くなってゆく。之は著者の提示した active skin の鱗板振幅量が前方から後方へ逓減した場合に当り、低速時の抵抗減の遊泳方法と理解できる。

遊泳魚体の低抵抗性に関する研究の発展は、海洋動物学の基礎的面から考えると、魚の遊泳能力についての解明及びその運動器官 (側線、筋肉、骨、鰭等) についての解剖学的、生理学

的説明等と重要な相互寄与的關係にあるものと考えられる。特に泳速の変化に応じて流圧の変動が予測されるが、感覚器官を動員して瞬間的に渦消去に寄与し得るような自動制御の仕組みを魚類がもつという事実は今後の研究の大きな焦点となろう。

魚の低抵抗性の機序の中で、現在最も有力視される鱗の動きによる能動的表皮効果と高分子溶液の Toms 効果に基因する粘液効果については、之を個別に或いは組合せて利用する多くの応用面が期待されよう。高速遊泳中の魚の屈伸の状態を高速度撮影することによって、魚の曲率の変化の移動（鱗相互被覆率の移動）の速度と鱗の大きさや遊泳速度などとの関係を計算し、それから乱流層の厚み・渦の大きさ・その移り変わり速度等を把握し得た暁には、之等多くの高速魚の実例と実船の船底流速分布の資料等とからそのレイノルズ数を合致させた適当な規模の大きさの鱗式皮膚を船体外壁につけることが出来るであろう。そして乱流の発生を抑制する進行波メカニズムを電子回路でつくり得たならば水中を航走する低抵抗潜水漁艇や水中を曳行し易い漁網等広義の水産漁具を開発することも可能となろう。粘液効果の活用についても高分子溶液を船体表面に塗布したり又は船底から浸出させる方式で新しい抵抗減少方法が展開されるものと期待される所である。

VIII. 結 論

遊泳魚体の低抵抗性の機序として、弾性表皮効果、粘液効果、鰓効果、active skin の効果、尾鰭効果を順に検討してきたが、最も有力なものは active skin、尾鰭並びに粘液の効果であり、特に前二者は互に補完して低抵抗性を維持していることを知った。

先ず弾性表皮について述べると人工の受動的模型表皮と生物軟体表皮との硬度の等価性が問題で、Kraemer のイルカ皮膚模型が果して正しくその静的弾性と生体の動的弾性とを等質化させ得たものか、なお疑問の残る所である。もし該模型の柔らかい表皮の左右側面に半波長ずれの passive な皺動進行波が実際に現われるとすれば、始めて吾々の Kraemer 実験に対する疑問も氷解するし、弾性表皮による抵抗減の可能性も生れてくると云えよう。粘液効果については著者の実験では失敗したが、一般に高分子溶液の Toms 効果に基づく抵抗減少の事実は公けに認められつつある。鰓効果について著者は低抵抗の立場からスロット効果なしと論断したが、元々魚の遊泳運動に於いて海水中の溶存酸素を体内に取り入れるための鰓呼吸作用としてその有効性を論ずべきで低抵抗の立場から論じたのは誤りであった。active skin 並びに尾鰭効果について述べると流速分布からみた回流水槽性能の限界、流速計、検力計等測定用機器の感度の限界もあって、流速最大 1 m/sec 程度、抵抗減少量も生体のそれに比べてそれ程大きな値としては検知されていない。然し魚の遊泳運動中この両者は相互に協力補完し合い、くねり運動を通じて体側面進行波活用により境界層の剝離点を後方にずらせ、渦発生の遅れ・渦領域の狭小化を来たす、更に尾部後方において左右進行波の相互干渉により渦のエネルギーが滅殺され渦も小さく圧力抵抗も減少する。之に加えてくねりの大彎曲時に鱗の動きによる境界層推力発生も期待されるなど之が遊泳魚体低抵抗の重要な要因と考えられる。以上をまとめると個別には今後なお追求さるべき多くの問題点はあるが、遊泳運動では左右両側面の半波長ずれの進行波と鱗の動き、之に高分子溶液の Toms 効果を加えて現在最も有力視される低抵抗

の要因に挙げることができる。

このような魚の低抵抗性に関する研究分野の発展は、海洋動物学の基礎的面から考えると、魚の遊泳能力についての解明及びその運動器官についての解剖学的、生理学的解明の研究等と互に寄与し合い乍ら進むものと考えられる。この結果をもし工学的に活用するとすれば水中を航走する低抵抗潜水漁艇あるいは水中を曳行し易い改良漁網、更には油・水等流体輸送用の低抵抗輸送管等広義の水産漁具の開発が期待される。又高分子溶液を船体表面に塗布したり、船底から浸出させる方式で新しい抵抗減少法が展開されるものとして期待して良い。

謝 辞

著者が本研究に入る端緒を与えられ、且つその進行に当り終始鞭撻と懇篤な指導・助言を、そして論文作成に当っては厳しい討論と周密な校訂を賜った東京大学海洋研究所黒木敏郎教授に謹んで感謝の意を表す。また同大学農学系各教授、助教授の有益な助言と批判に対しても深謝する。さらに実験にあたって終始熱心な協力を戴いた鹿児島大学水産学部中山博助手、又実験用機器の改良・製作に尽力戴いた機械工場永田政義、高岡勝義の両技官に深く謝意を表す。なおこの研究の一部は文部省科学研究費交付金によってなされたもので関係当局に対し心からお礼を申し上げる。

文 献

- 1) J. Gray (1936): Studies in animal locomotion. VI. The propulsive powers of the dolphin. *J. Exp. Biol.*, **13**, 192-199.
- 2) D. R. Gero (1952): The hydrodynamic aspects of fish propulsion. *Am. Mus. Novit.*, (1601), 32- .
- 3) M. O. Kraemer (1960): Boundary Layer Stabilization by distributed damping. *J. Amer. Soc. Nav. Engrs.*, **72**, 25-33.
- 4) 徳川武定・池上作太郎・大津義徳・鬼頭史城 (1938): 水中を進行する球、紡錘及び類似形態の抵抗に関する実験. 造船協会会報, No. 61, 41-163.
- 5) 種子田定俊・本地弘之 (1967): Flexible な表面をもつ平板の摩擦抵抗, 九州大学応用力学研究所所報, No. 26, 85-98.
- 6) 種子田定俊・本地弘之 (1967): 壁面の Flexibility が遷移におよぼす影響. 九州大学応用力学研究所所報, No. 27, 25-30.
- 7) T. B. Benjamin (1960): Effects of a flexible boundary on hydrodynamic stability. *J. Fluid Mech.*, **9**, 513-532.
- 8) M. T. Landahl (1962): On the stability of a laminar incompressible boundary layer over a flexible surface. *J. Fluid. Mech.*, **13**, 609-632.
- 9) M. Takematsu (1970): Stability of a laminar flow along a flexible boundary (III) *Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ.*, **18**, 87-100.
- 10) 田古里哲夫・金 信行 (1969): 高分子化合物水溶液浸出多孔質平板の抵抗試験. 日本機械学会講演論文集, No. 216, 29-32.
- 11) 田古里哲夫・芦立勲 (1969): 小型管摩擦計の製作とそれによる魚の抵抗に関する研究. 日本機械学会講演論文集, No. 216, 63-66.
- 12) M. W. Rosen and N. E. Cornford (1970): Fluid friction of the slime of aquatic animals. *Rep. Fleet Engineering Department*, 1-43.
- 13) G. Kempf (1935): Wasserwiderstand von Hechten, *Z. ver. Deutsch. Ing.*, **79**, 1016-1017.
- 14) E. G. Richardson (1936): The physical aspects of fish locomotion. *J. Exp. Biol.*, **13**, 63-74.

- 15) Frank S. Essapian (1955): Speed-induced skin folds in the bottle-nosed porpoise, *Tursiops Truncatus*. *Breviora*, No. 43, 1-4.
- 16) O. H. Wehrmann (1965): Tollmien-Schlichtung Waves under the Influence of a Flexible Wall. *Phys. of Fluids* 8, 1389-1390.
- 17) J. M. Kendall (1970): The turbulent boundary layer over a wall with progressive surface waves. *J. Fluid Mech.* 41, 259-281.
- 18) 種子田定俊・友成義正 (1972): 進行波運動による剥離の遅れに関する実験. 九大応力研所報, 38, 37-45.
- 19) Wilkie, D. R. (1959): The work output of animals "Flight by birds and by man-power." *Nature*, 183, 1515-16.
- 20) 奈良迫嘉一・金森政治 (1956): 大型対称式回流水槽について. 鹿児島大学水産学部紀要, 5, 64-77.
- 21) 奈良迫嘉一・金森政治 (1958): 大型対称式回流水槽について (続) 鹿児島大学水産学部紀要, 6, 99-105.
- 22) Y. Narasako and M. Kanamori (1959): A Large-sized experimental tank of twin symmetric elliptical circuits. *Modern fishing gear of the world*, 1, 205-208.
- 23) K. E. Schoenherr (1932): Resistance of flat surfaces moving through a fluid. *Trans. S. N. A. M. E.*, 40, 279.
- 24) Spoor (1946): A quantitative study of the relationship between the activity and oxygen consumption of the gold fish, and its application to the measurement of respiratory metabolism in fishes. *Biol. Bull.* 91, 312-325.
- 25) Magnuson & Prescott (1966): Courtship, locomotion, feeding, and miscellaneous behaviour of Pacific bonito (*SARDA CHILIENSIS*). *Anim. Behav.*, 14, 54-67.
- 26) S. F. Hoerner (1965): "Fluid-Dynamic Drag." 3-7 (Hoerner, New York)
- 27) 米科学雑誌記事: *Ocean Industry*. Feb. 1969, Vol. 4, No. 2, 74.

附 録

その1 魚型模型の作製

A. 鯖模型

鯖の Lines を先ず定める。(Fig. II-11 参照). 剛体模型は台湾桧を材料として製作し, 塗装はラッカー6回塗りとする. 次に之より弾性体模型をシリコンゴムを材料として製作する.

その詳細な作製要領は次の通りである. 即ち,

先ず J.I.S. ゴム硬度計を使用し, 種子ヶ島南岸沖操業中の巾着船第28照徳丸甲板上で生鯖の静的弾性測定を行ない. 流体抵抗に最も影響する体側線部の平均硬度 13.0 を得た.(Table (app)-1, Fig. (app)-1 参照).

次に弾性体模型製作の基礎資料を得るため 東芝シリコンラバー TSE350-5RTV, 加硫剤 CE60, CE61 及び硬度調整剤東芝シリコンオイル TSF451-100CS を使用し, 各種硬度の標本作製, その結果シリコンラバー重量に対してシリコンオイル 25%, CE 60 0.5%, 約2時間半で完全凝固状態でショワ硬度 13.0 を得た.(Table (app)-2 参照).

次に生鯖と略々同種, 同大の死魚鯖から魚の口腔内型(鰓吹き出し用)及び魚体の雌型を石膏及びシリコンゴムを用いて作製, 之を使って鯖生魚に等しい閉口, 閉鰓蓋; 開口, 開鰓蓋それぞれ1組の剛体模型用桧製ラッカー塗り模型及び弾性体模型用シリコンゴム製模型を作った. 尚尾鰭については剛体は木製, 弾性体は実物の尾又は frame 入りのシリコンゴム製の尾を使用した.

B. 鯉模型

鯖の場合と同じ要領で剛体模型と弾性体模型を製作した。ここで鹿児島県野間池で、ソーダカツオ、メチカの鯉生魚体の硬度測定（平均硬度 21）を行ない、之と略々同種同大の死魚鯉から魚口腔内型（鰓吹き出し用）及び魚体の雌型を作製、之を使って鯉生魚に等しい桧製及びシリコンゴム製実物大模型を作った。（Fig. II-13 参照）。

更に上記鯉の 2 倍の大型シリコンゴム模型作製の必要もあってシリコンゴム試験片厚さ 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm に依って 1 年半硬度の経年変化を調べたがその結果、厚さと無関係に硬度は略々 1 ヶ月で安定し、恒温、恒湿状態では長期に亘って殆んど変動しないが、温度、湿度の変化で硬度も一般に硬化する事が判った。（Table (app)-3 参照）。

その 2 active skin のカム機構とその運動

Fig. (app)-2 に示すように鱗板は大小二種類のカム 19φ (No. 1~24), 12.5φ (No. 25~28) とカム水平回転軸 6φ との組合せで作動、夫々のカムと接触する水平突き棒の長さは現場合せで例えば No. 1 で 56.5 mm, No. 14 で 49.5 mm の如く鱗板の最大開きが夫々所定の最大開き 2.5 mm, 1.5 mm になるように調整してある。大カム、小カム何れも突き棒先端 8 R として針点接触遊隙なしで Fig. (app)-3 のように図上計算すれば回転角に対する揚程、速度、加速度は夫々 Fig. (app)-4 のように表わされる。

この場合カムの偏心運動は単純な調和運動をなさず、隣接鱗板のヒンジ部で拘束を受けるため夫々図示のような 5 種類の波形の異なる進行波を重ね合せた複雑な偽調和運動をすることになる。

Figures, Tables and Photographs

Figures Contents

Fig. I- 1	The drag coefficient of various models as a function of Reynolds number. A : The rigid reference model B : Fully coated model with coating-stiffness of the cylindrical section (1600 PCI) C : Fully coated model with coating-stiffness of the cylindrical section (800 PCI) D : Fully coated model with coating-stiffness of the cylindrical section (600 PCI) <from Kraemer, 1960>	86
Fig. I- 2	Friction reduction of slimes of seawater fish, when dissolved in ocean water in various concentrations (from Rosen & Cornford, 1970).	87
Fig. I- 3	Relation between burst-speed and body-length.	88
Fig. I- 4	Relation between burst-speed and body-length at the constant resistance.	88
Fig. II- 1	The large circulating-water-channel of Faculty of Fisheries, Kagoshima University.	89
Fig. II- 2	Geber-typed Resistance dynamometer and rigid flat-plate.	90
Fig. II- 3	Shape of flat-plate end.	91
Fig. II- 4	Definitions of principal dimensions of flat-plate.	91
Fig. II- 5	Resistance test result of rigid flat-plate.	92
Fig. II- 6	$C_f-\bar{R}_n$ Curve (with no edge-effect correction).	95
Fig. II- 7	$C_f-\bar{R}_n$ Curve (with edge-effect correction).	96
Fig. II- 8	Definitions of principal dimensions of flat-plate and fish body model.	97
Fig. II- 9a	Shapes of rigid flat-plate and flexible flat-plate.	97
Fig. II- 9b	Details of flexible flat-plate.	97
Fig. II-10a	Resistance test results of flat-plates with no fish oil.	98
Fig. II-10b	Resistance test results of flat-plates with fish oil.	98
Fig. II-11	Lines of scombroid model.	99
Fig. II-12a	Resistance test result of scombroid model with or without fish oil.	100
Fig. II-12b	Mouth & gill-cover effects of scombroid model with no fish oil.	100
Fig. II-13	Lines of frigate mackerel model.	101
Fig. II-14a	Resistance test results of frigate mackerel model with no fish oil.	103
Fig. II-14b	Resistance test results of frigate mackerel model with fish oil.	104

Fig. II-14c	Resistance test results of frigate mackerel model with no fish oil.....	104
Fig. II-14d	Resistance test results of frigate mackerel model with or without fish oil.	105
Fig. II-15	Resistance test results of stream-line-form model.	108
Fig. IV- 1	Respiration method of fish (horizontal section of oral cavity along the body-axis).	109
Fig. IV- 2	Comparison between the sizes of snout and of gill-cover-hole.....	109
Fig. IV- 3	Slot of air plane (DC-8, B-727).....	109
Fig. IV- 4	Effect of slot due to snout and gill-cover-hole of scombroid model with no fish oil.	110
Fig. IV- 5	Effect of slot due to snout and gill-cover-hole of frigate mackerel model with no fish oil.	110
Fig. V- 1	Two dimensional stream-line-form-model supplied with active skin.	111
Fig. V- 2	Experimental apparatus of resistance test.	112
Fig. V- 3	Flow-visualization (tufts method).	113
Fig. V- 4	Experimental apparatus (hydrogen-bubble-method).	113
Fig. V- 5	Effect of phase-difference on resistance.....	114
Fig. V- 6	Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. → A. (gradual decrease)).	115
Fig. V- 7	Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. → A. (gradual decrease)).	123
Fig. V- 6'	Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. → A. (gradual increase)).	123
Fig. V- 7'	Effect of active skin.	131
Fig. V- 8'	Effect of active skin with $\lambda/2$ phase-difference between S. and P..	132
Fig. V- 8	Flow-visualization (tufts method) of the flow running over the surface of scale plates.	132
Fig. V- 9	Flow-pattern past rotating circular cylinders (from S. F. Hoerner 1965, Fluid-dynamic drag).	134
Fig. V-10	Effect of active skin with $\lambda/2$ phase-difference between S. and P..	134
Fig. VI-1	Resistance test of cylinder with fluttering fin attached behind it in water.	136
Fig. VI-2	Experimental apparatus (hydrogen-bubble-method).	137
Fig. VI-3	Small wind-tunnel (smoke-tunnel).	138
Fig. VI-4a	Curve of $(R_0-R_i)/R_0 \sim \bar{R}_n$	140
Fig. VI-4b	Curve of $(R_0-R_i)/R_0 \sim \bar{R}_n$ showing V-cut fin effect on resistance-reduction.	141

Fig. VI-4c	Curve of $(R_0-R_t)/R_0 \sim \bar{R}_n$ showing fin-thickness effect on resistance-reduction.	143
Fig. VI-5	Influence of "splitter"-plates on the drag-coefficient of the vortex-street-producing shapes (from S. F. Hoerner, 1965).	148
Fig. VI-6	Curve of $C_d \sim \bar{R}_n$	148
Fig. VI-7	Apparatus for observing the swimming fish.	150
Fig. VI-8-①	Swimming motion of normal fishes with dorsal fin and caudal fin.	152
Fig. VI-8-②	Swimming motion of fishes with no dorsal fin.	154
Fig. VI-8-③	Swimming motion of fishes with no caudal fin.	156
Fig. VI-8-④	Swimming motion of fishes with no dorsal fin and caudal fin.	158
Fig. VI-9	Relation between swimming motion of fishes and fin-effects.	159
Fig. VII-1	Progressive wave upon epidermis (dolphin, fish).	159
Fig. VII-2	Generation of thrust by fish-scale motion.	159
Fig. VII-3	The features of fish-scales on the concave and the convex body-surfaces.	159
Fig. (app.)-1	Inner-construction-profile of JIS hardness-tester.	163
Fig. (app.)-2	Details of cam and pushing-rod.	165
Fig. (app.)-3(a)	Calculation of cam-lift.	166
Fig. (app.)-3(b)	Lift of small cam 12.5 ϕ	167
Fig. (app.)-4(a)	Cam-diagram of large cam 19 ϕ	168
Fig. (app.)-4(b)	Cam-diagram of small cam 12.5 ϕ	169

Tables Contents

Table II-1	Principal dimensions of rigid flat-plates.	91
Table II-2	Principal dimensions of flat plate-model.	98
Table II-3	Principal dimensions of scombroid-model.	100
Table II-4	Principal dimensions of frigate mackerel-model.	103
Table II-5	Principal dimensions of frigate mackerel-model (caudal fin, cut off).	106
Table VI-1	Reduction-rate of resistance $(R_0-R_t)/R_0$ %. R_0 : Resistance of cylinder R_t : Resistance of cylinder with fluttering fin.	139
Table VI-1'	Relation between $(R_0-R_t)/R_0$ and \bar{R}_n . $(R_0-R_t)/R_0 = a + b \bar{R}_n$ a : Segment on $(R_0-R_t)/R_0$ -ax b : Inclination of straight line to \bar{R}_n -ax.	149

App. Table II-1	Distribution of flow-speed at point (x, y) in vertical cross section.	162
Table (app.)-1	Comparison of the Shore-hardness between the live scombroid and the dead one.	164
Table (app.)-2	Change of hardness of test pieces.	164
Table (app.)-3	Change of mean-hardness of silicone rubber (silicone oil 25 %, CE 60 0.5 %) for a month, immediately after its making.	164

Photographs Contents

Photo II-1a	Front view of the large circulating-water-channel.	89
Photo II-1b	Paddle-wheel, feathering type.	89
Photo II-2	Resistance test on rigid flat-plate.	90
Photo II-3a	Resistance test on rigid model of scombroid.	99
Photo II-3b	Resistance test on flexible model of scombroid.	99
Photo II-4a	Resistance test on rigid model of frigate mackerel.	101
Photo II-4b	Resistance test on flexible model of frigate mackerel.	101
Photo II-5a	Resistance test on rigid model of frigate mackerel (twice the size of the model).	102
Photo II-5b	Resistance test on flexible model of frigate mackerel (twice the size of the model).	102
Photo II-6a	Resistance test on rigid model of frigate mackerel (caudal fin, cut off).	106
Photo II-6b	Resistance test on flexible model of frigate mackerel (caudal fin, cut off).	106
Photo II-7a	Resistance test on rigid model of frigate mackerel (caudal fin, cut off) <twice the size of the model>.	107
Photo II-7b	Resistance test on flexible model of frigate mackerel (caudal fin, cut off) <twice the size of the model>.	107
Photo V-1a	Scale plate.	111
Photo V-1b	Mechanism of cam and scale plate.	111
Photo V-2	A part of experimental apparatus of resistance test on active skin-model.	112
Photo V-3	Flow running over the surface of scale plates.	132
Photo V-4a	Flow running behind the active skin-model (scale plates, fixed). ASA 200, 1/15; V 0.179m/sec, \bar{R}_n 1.5×10^5 ; I 3.0 amp, E 15 volt	133
Photo V-4b	Flow running behind the active skin-model (scale plates, operated). ASA 200, 1/8; V 0.179 m/sec, \bar{R}_n 1.5×10^5 ; I 3.0 amp, E 15volt ($V'=0.9$ $V=0.16$ m/sec)	133

Photo VI-1	Experimental apparatus (hydrogen-bubble-method).	137
Photo VI-2	Flow running behind the cylinder. ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec, \bar{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt	146
Photo VI-3	Flow running behind the cylinder with vinyl fluttering fin (rectangular form). t 0.06 mm, l 7d; ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec, \bar{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt	146
Photo VI-4a	Flow running behind the cylinder with vinyl fluttering fin (rectangular form, 1/4 V-cut). t 0.06mm, l 7d; ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec, \bar{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt	147
Photo VI-4b	Flow running behind the cylinder with vinyl fluttering fin (rectangular form, 1/2 V-cut). t 0.06mm, l 7d; ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec, \bar{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt	147
Photo VII-1	Arctic white whales and B.C. Tel pool (Vancouver aquarium).	160
Photo VII-2	Swimming motion of arctic whale.	160

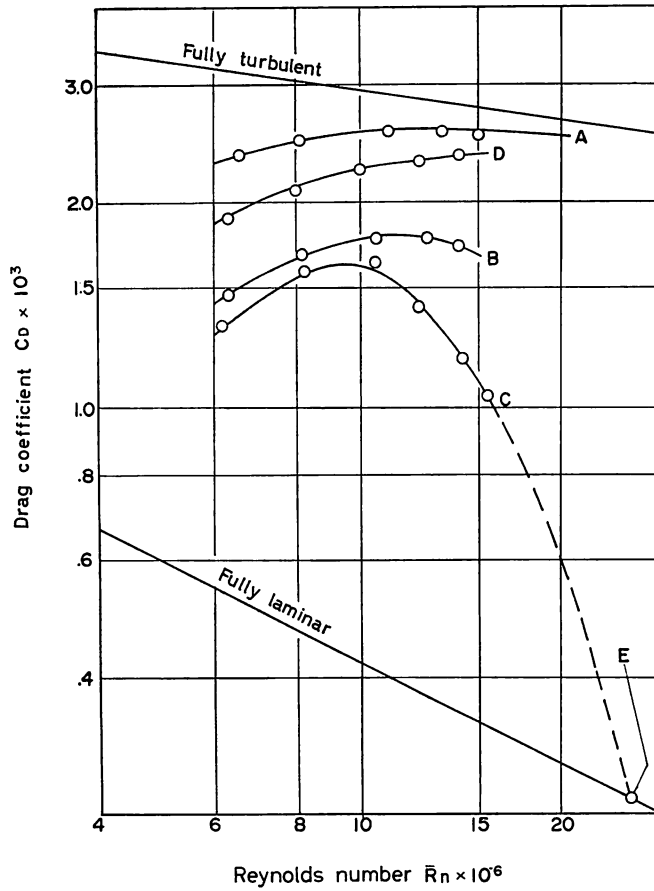


Fig. I-1 The drag coefficient of various models as a function of Reynolds number.

A : The rigid reference model

B : Fully coated model with coating-stiffness of the cylindrical section (1600 PCI)

C : Fully coated model with coating-stiffness of the cylindrical section (800 PCI)

D : Fully coated model with coating-stiffness of the cylindrical section (600 PCI)

<from Kraemer, 1960>

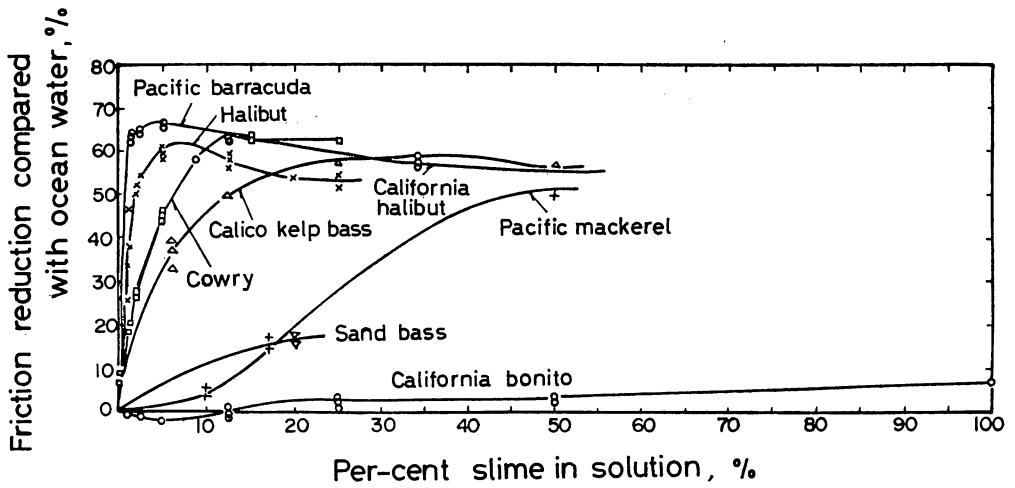


Fig. I-2 Friction reduction of slimes of seawater fish, when dissolved in ocean water in various concentrations (from Rosen & Cornford, 1970).

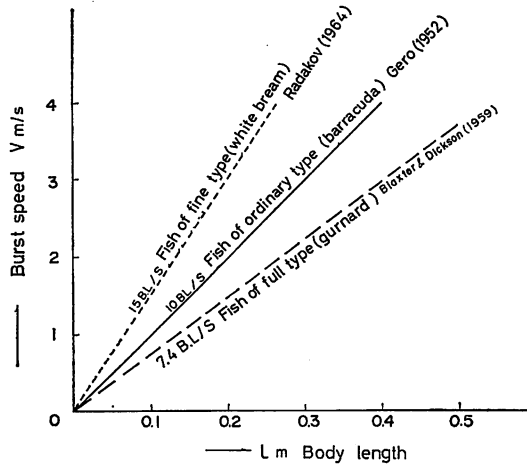


Fig. I-3 Relation between burst-speed and body-length.

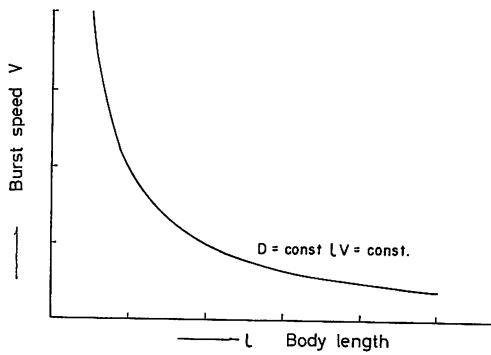


Fig. I-4 Relation between burst-speed and body-length at the constant resistance.

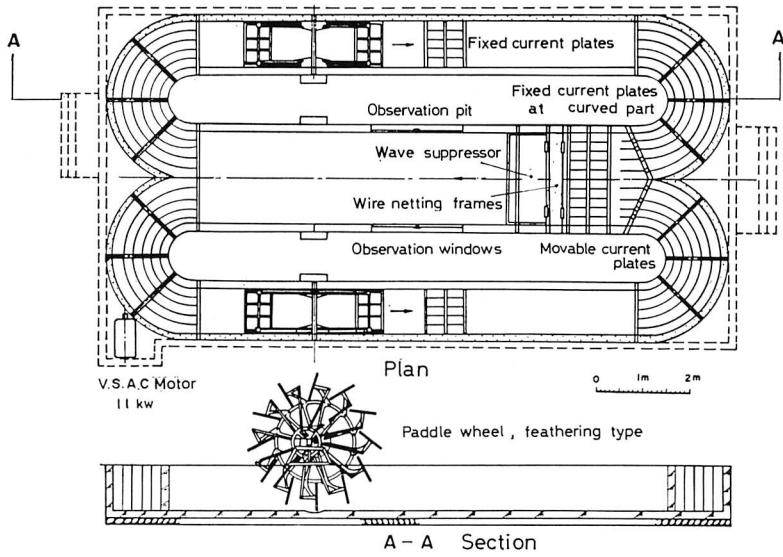


Fig. II-1 The large circulating-water-channel of Faculty of Fisheries, Kagoshima University.

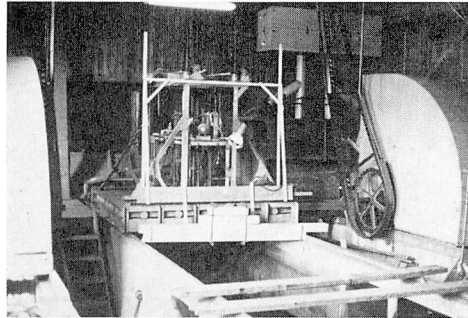


Photo II-1a Front view of the large circulating-water-channel.

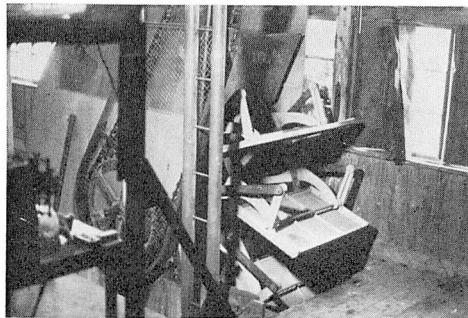


Photo II-1b Paddle-wheel, feathering type.

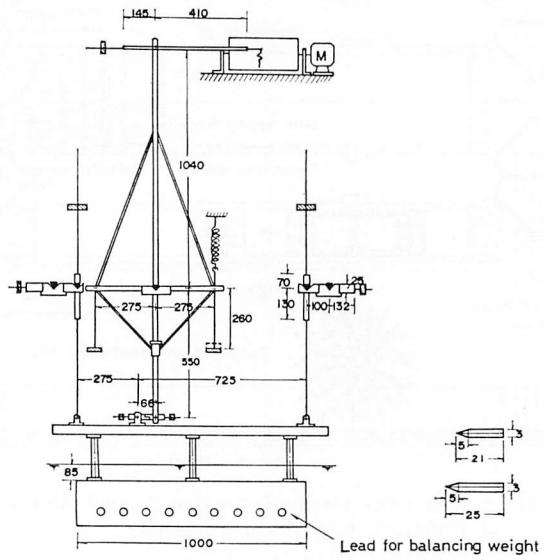


Fig. II-2 Geber-typed Resistance dynamometer and rigid flat-plate.

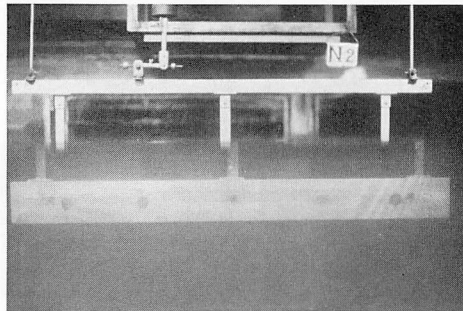


Photo II-2 Resistance test on rigid flat-plate.

Table II-1 Principal dimensions of rigid flat-plates.

Model	L (m)	B (m)	t (m)	S (m ²)	\bar{v} (m ³)	L_{CB} (m)	B_{CB} (m)
P ₁	0.340	0.096	0.008	0.0653	163×10^{-6}	0.170	0.0566
P ₂	0.340	0.071	0.008	0.0483	108×10^{-6}	0.170	0.0441
P ₃	0.340	0.048	0.008	0.0326	53×10^{-6}	0.170	0.0326
P ₄	1.000	0.240	0.008	0.480	1192×10^{-6}	0.500	0.142
P ₅	1.000	0.164	0.008	0.330	662×10^{-6}	0.500	0.105
P ₆	1.000	0.090	0.008	0.180	253×10^{-6}	0.500	0.056

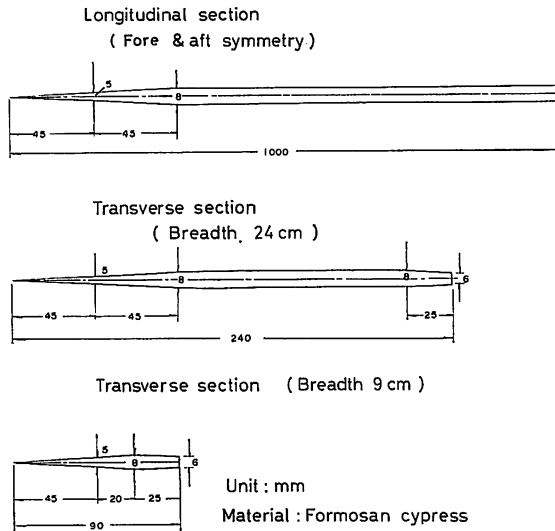


Fig. II-3 Shape of flat-plate end.

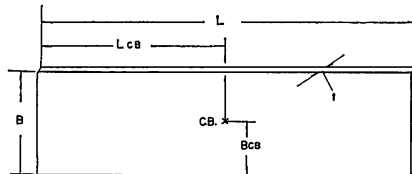


Fig. II-4 Definitions of principal dimensions of flat-plate.

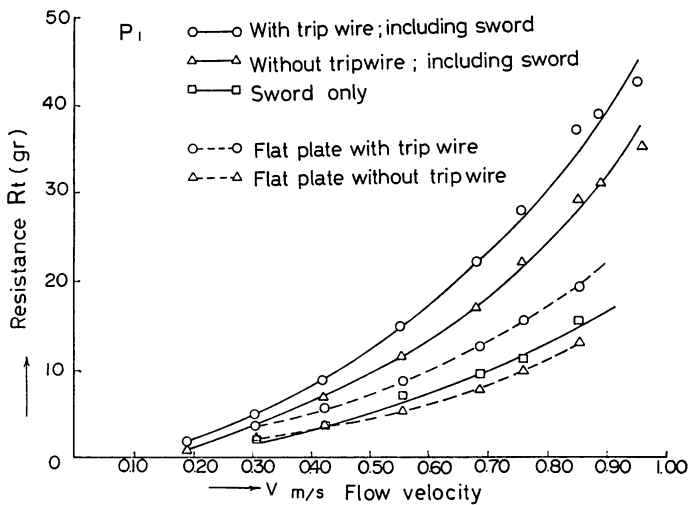


Fig. II-5a Resistance test result of rigid flat-plate.

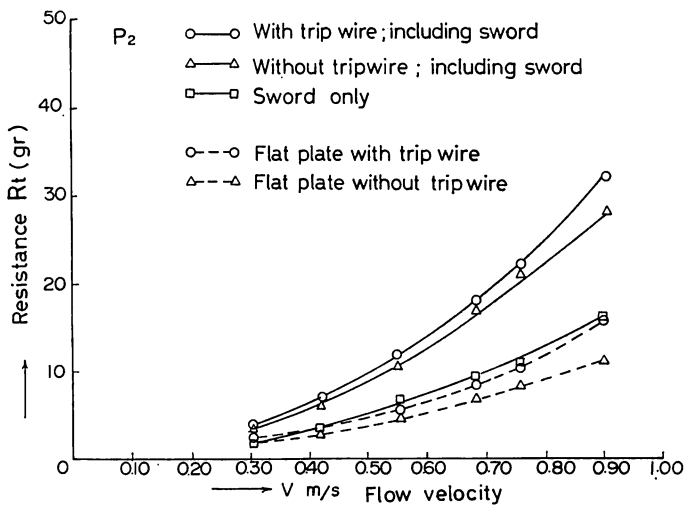


Fig. II-5b Resistance test result of rigid flat-plate.

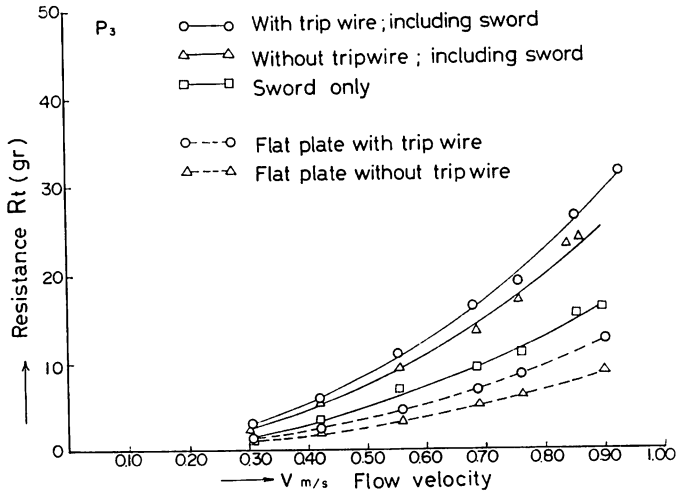


Fig. II-5c Resistance test result of rigid flat-plate.

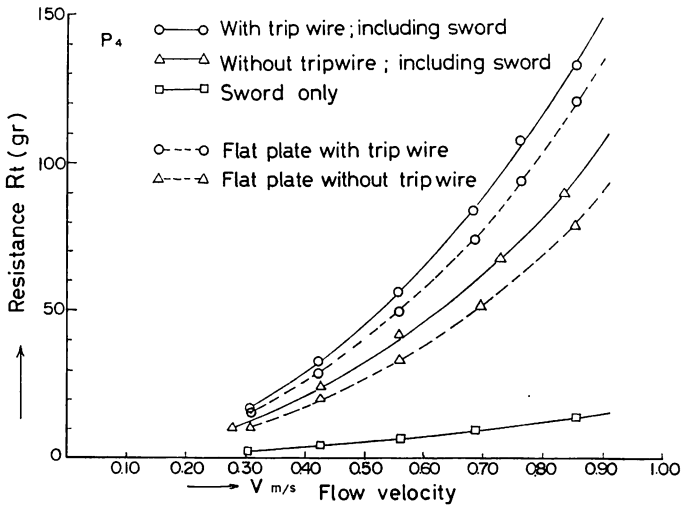


Fig. II-5d Resistance test result of rigid flat-plate.

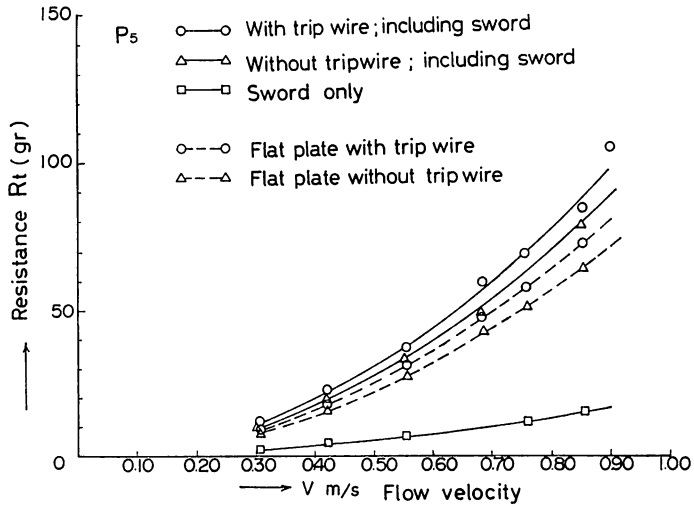


Fig. II-5e Resistance test result of rigid flat-plate.

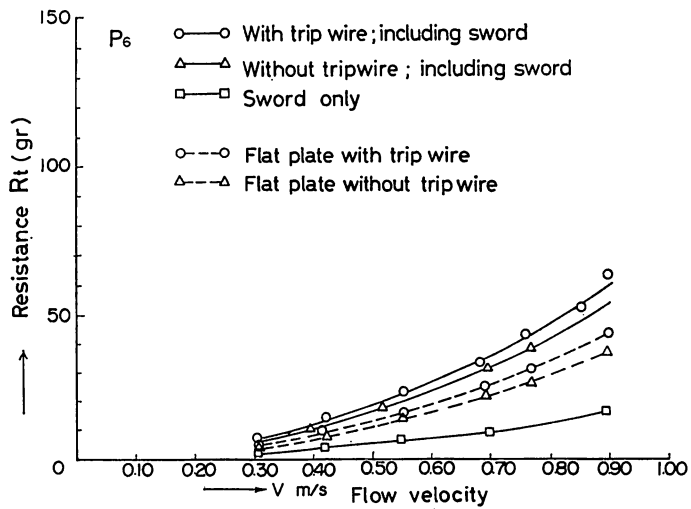


Fig. II-5f Resistance test result of rigid flat-plate.

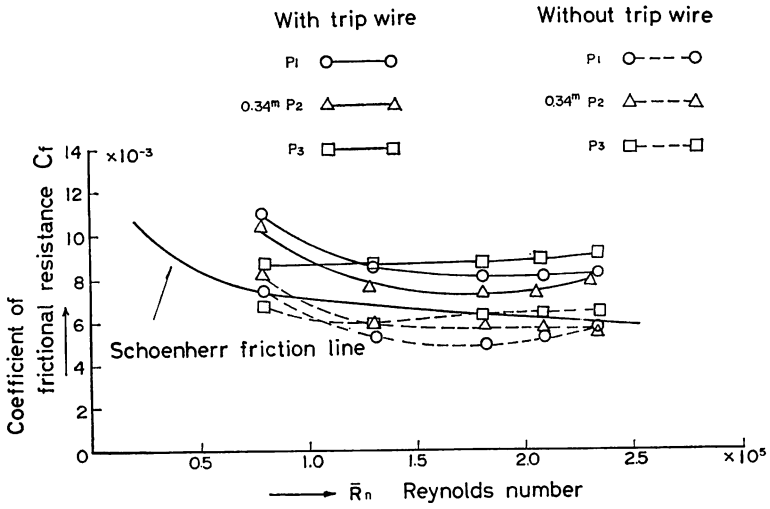


Fig. II-6a $C_f-\bar{R}_n$ Curve (with no edge-effect correction).

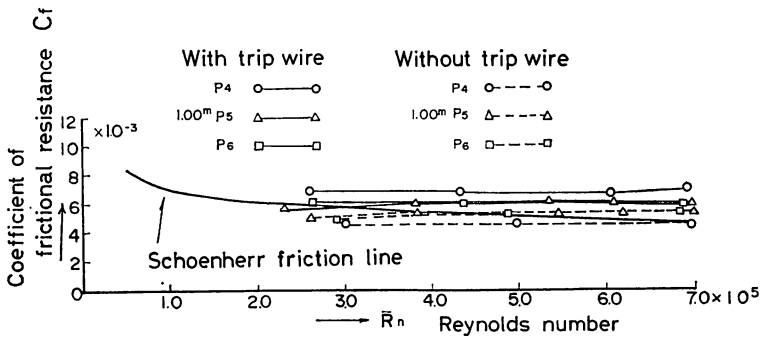


Fig. II-6b $C_f-\bar{R}_n$ Curve (with no edge-effect correction).

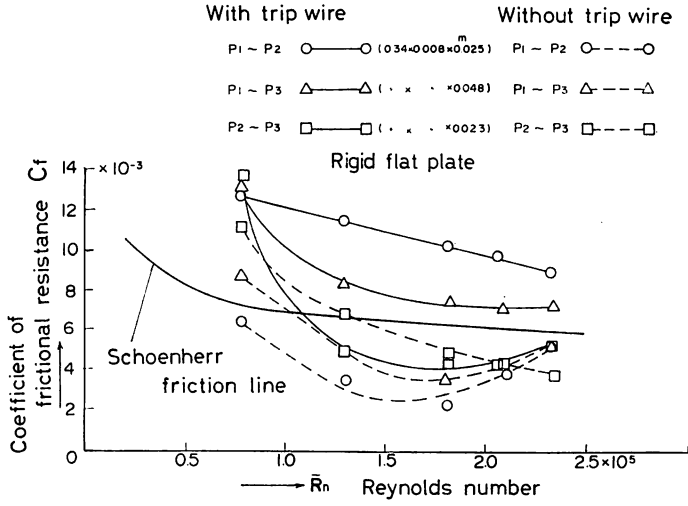


Fig. II-7a $C_f - \bar{R}_n$ Curve (with edge-effect correction).

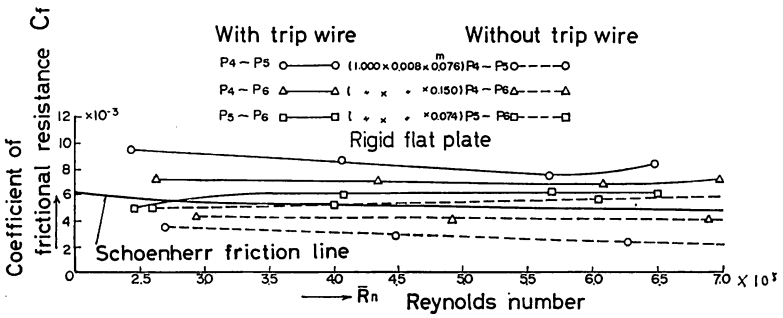


Fig. II-7b $C_f - \bar{R}_n$ Curve (with edge-effect correction).

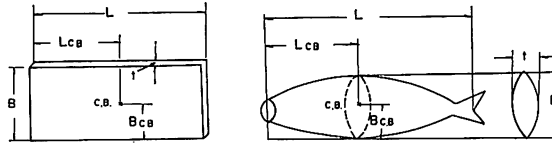


Fig. II-8 Definitions of principal dimensions of flat-plate and fish body model.

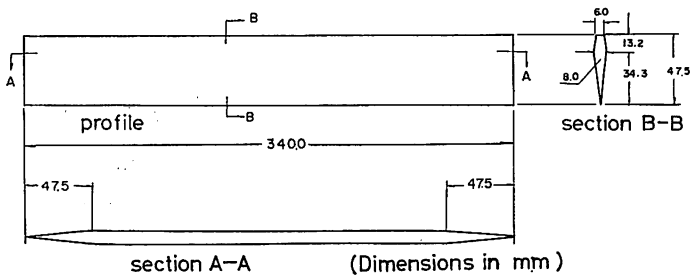


Fig. II-9a Shapes of rigid flat-plate and flexible flat-plate.

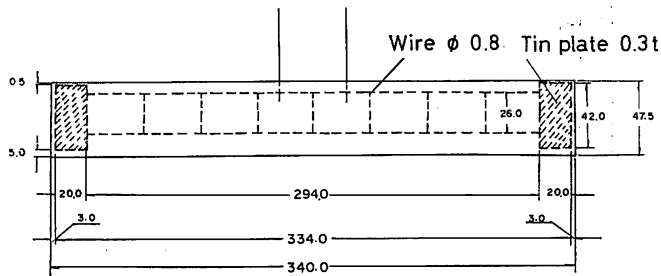


Fig. II-9b Details of flexible flat-plate.

Table II-2 Principal dimensions of flat plate-model.

Model	Shore Hardness	L (m)	B (m)	t (m)	S (m ²)	V (m ³)	L_{CB} (m)	B_{CB} (m)
P	100 (Rigid)	0.340	0.0475	0.008	0.0323	42×10^{-6}	0.170	0.0323
P'	13							

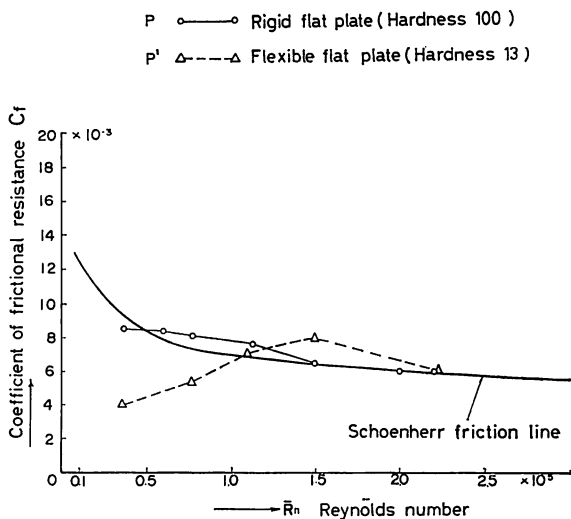


Fig. II-10a Resistance test results of flat-plates with no fish oil.

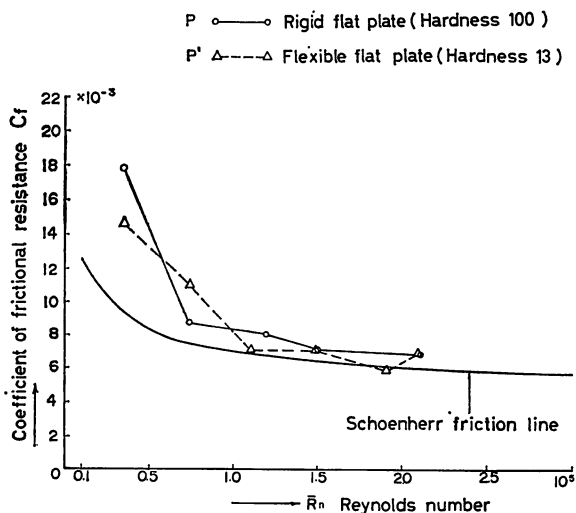
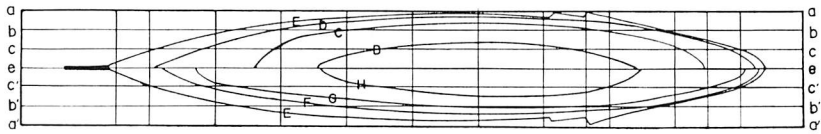
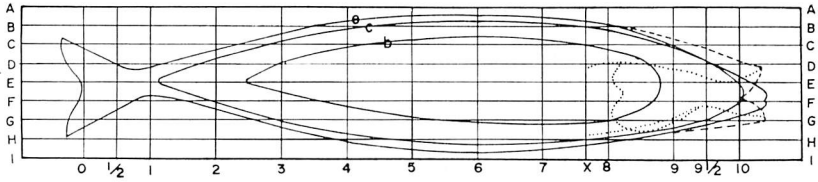
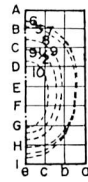
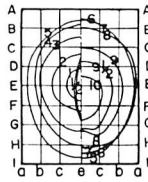


Fig. II-10b Resistance test results of flat-plates with fish oil.



Principal dimensions

Total length	0.360m
Body length	0.344m
Body breadth	0.053m
Body height	0.073m
Ordinates apart	0.035m
Waterlines apart	0.01m
Bow & buttock lines apart	0.01m
Displacement	0.589kg



— Closed mouth & closed gill cover S-C or S'-C-N

--- Open mouth & open gill cover S-O or S'-O-N

Fig. II-11 Lines of scombroid model.

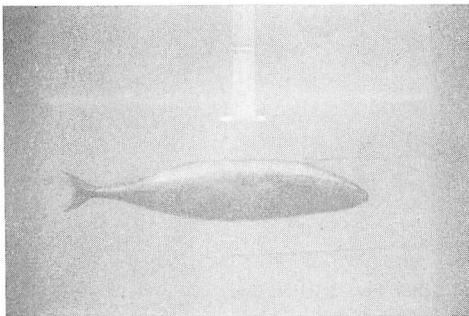


Photo II-3a Resistance test on rigid model of scombroid.

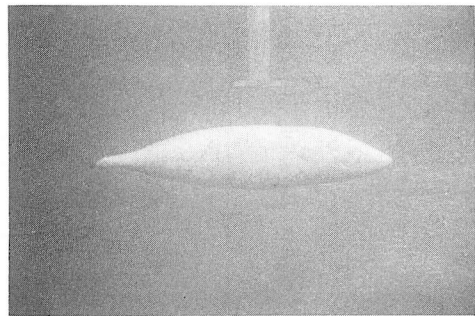


Photo II-3b Resistance test on flexible model of scombroid.

Table II-3 Principal dimensions of scombroid-model.

Model	Shore Hardness	L (m)	B (m)	t (m)	S (m ²)	V (m ³)	L_{CB} (m)	B_{CB}
S	100 (Rigid)	0.344	0.073	0.053	0.0473	310×10^{-6}	0.148	0.0361
S'	13							

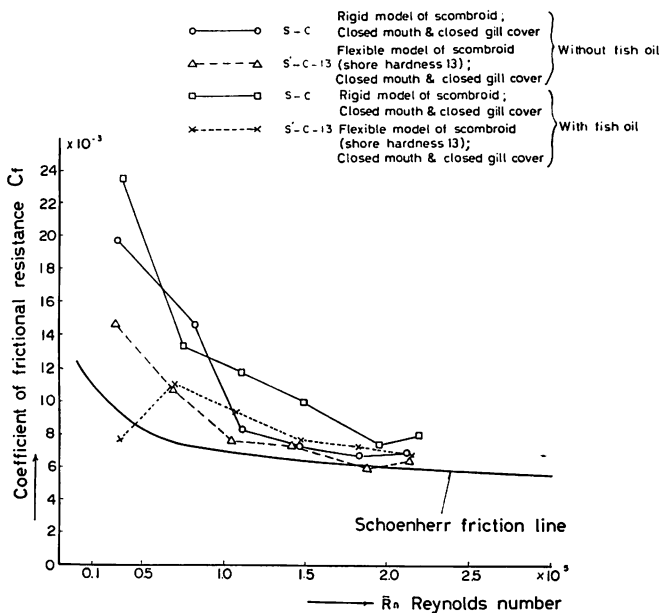


Fig. II-12a Resistance test result of scombroid model with or without fish oil.

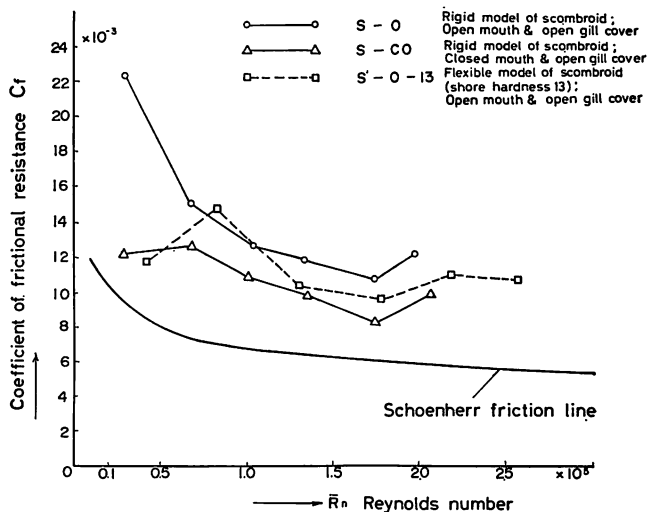


Fig. II-12b Mouth & gill-cover effects of scombroid model with no fish oil.

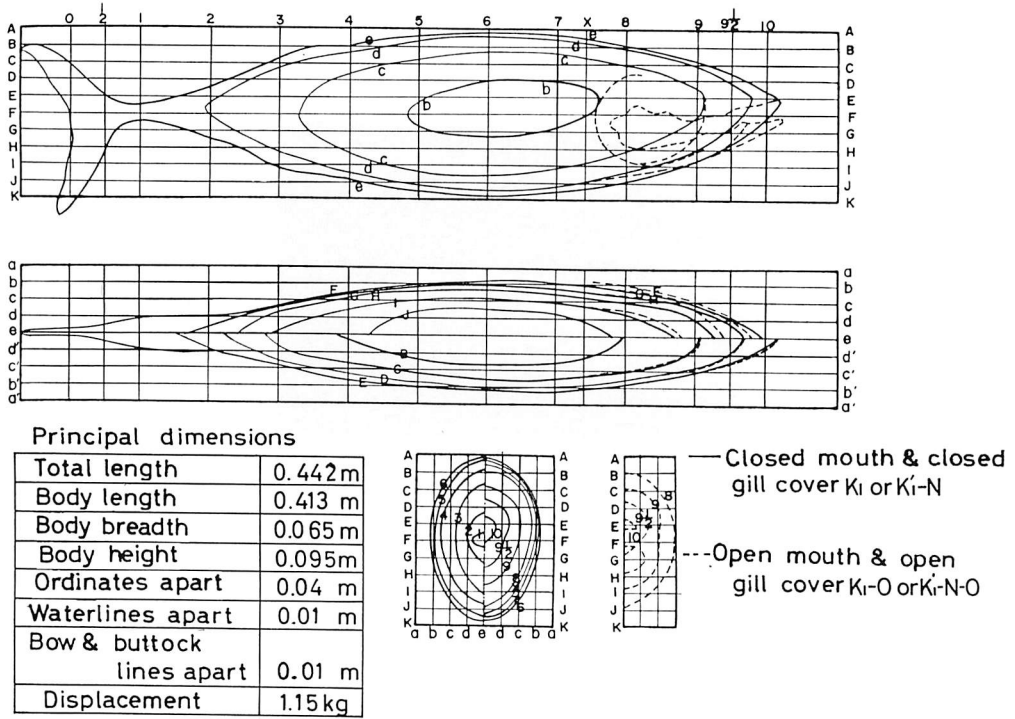


Fig. II-13 Lines of frigate mackerel model.

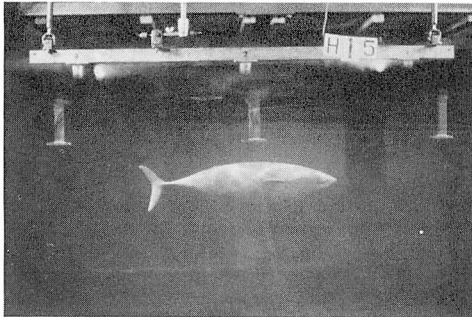


Photo II-4a Resistance test on rigid model of frigate mackerel.

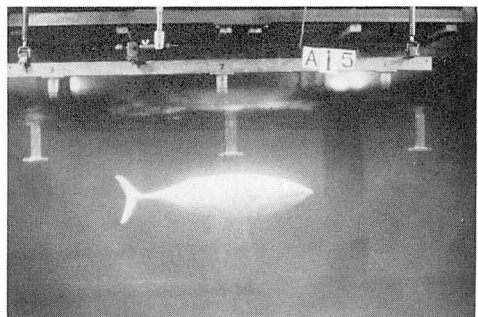


Photo II-4b Resistance test on flexible model of frigate mackerel.

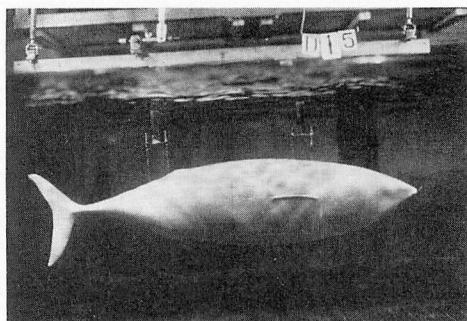


Photo II-5a Resistance test on rigid model of frigate mackerel (twice the size of the model).

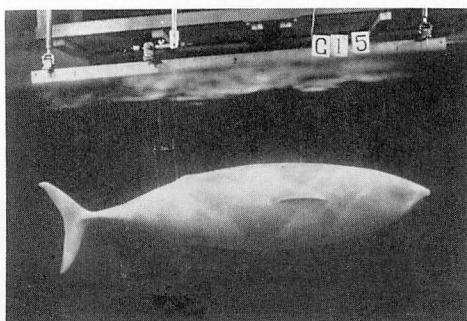


Photo II-5b Resistance test on flexible model of frigate mackerel (twice the size of the model).

Table II-4 Principal dimensions of frigate mackerel model.

Model	Shore Hardness	L (m)	B (m)	t (m)	S (m ²)	\bar{v} (m ³)	L_{CB} (m)	B_{CB} (m)
K_1	100 (Rigid)	0.400	0.095	0.065	0.0731	550×10^{-6}	0.160	0.0452
K'_1	21							
K_2	100 (Rigid)	0.800	0.190	0.130	0.2934	4400×10^{-6}	0.351	0.0820
K'_2	21							

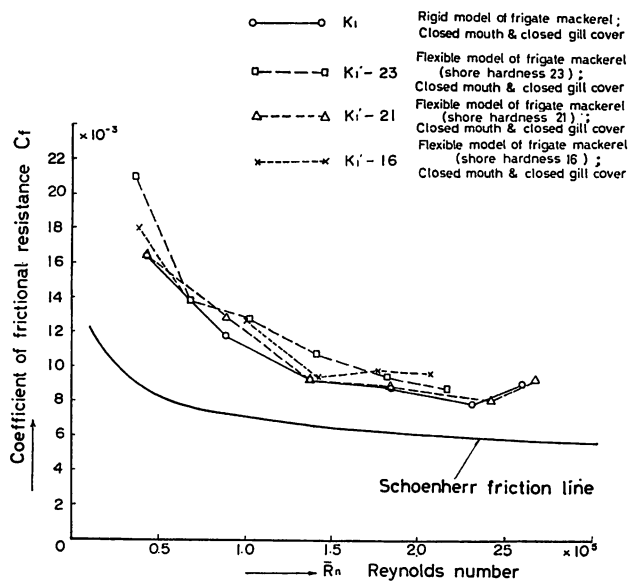


Fig. II-14a Resistance test results of frigate mackerel model with no fish oil.

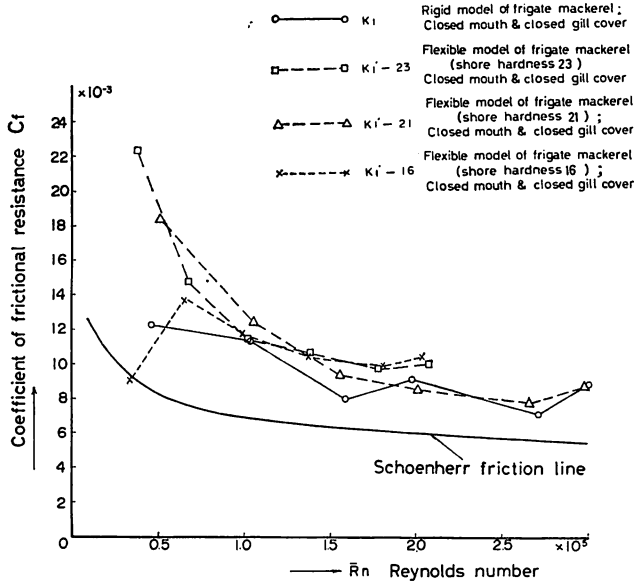


Fig. II-14b Resistance test results of frigate mackerel model with fish oil.

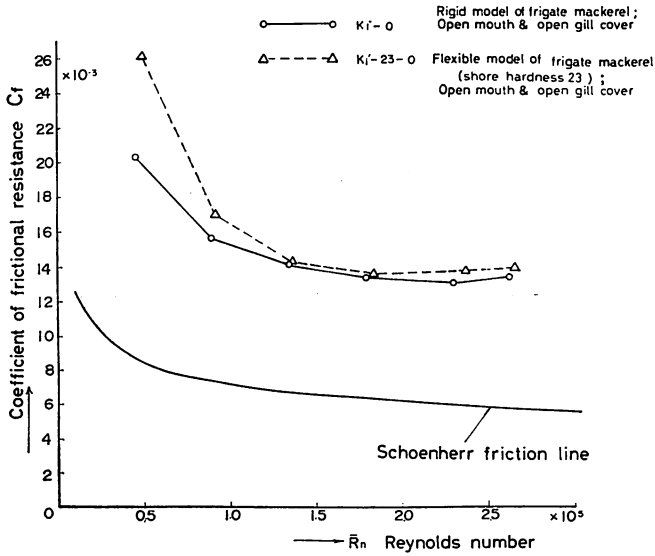


Fig. II-14c Resistance test results of frigate mackerel model with no fish oil.

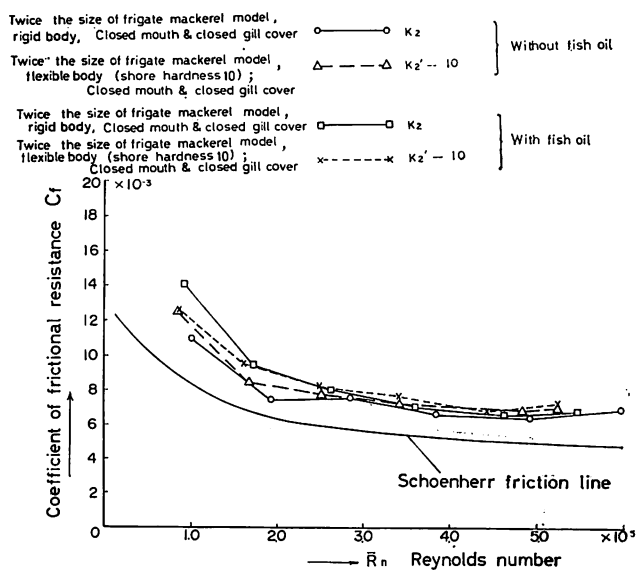


Fig. II-14d Resistance test results of frigate mackerel model with or without fish oil.

Table II-5 Principal dimensions of frigate mackerel model
(caudal fin, cut off).

Model	Shore Hardness	L (m)	B (m)	t (m)	S (m ²)	\bar{v} (m ³)	L_{CB} (m)	B_{CB} (m)
K_1 (c.f.)	100 (Rigid)	0.400	0.095	0.065	0.0690	550×10^{-6}	0.160	0.0452
K'_1 (c.f.)	23, 16							
K_2 (c.f.)	100 (Rigid)	0.800	0.190	0.130	0.2762	4490×10^{-6}	0.351	0.0820
K'_2 (c.f.)	10							

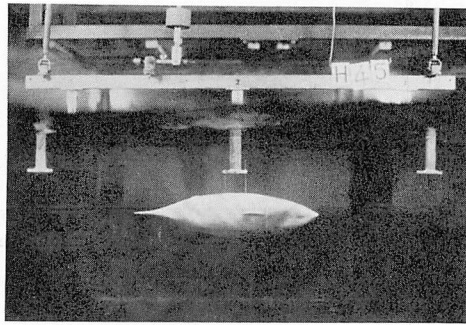


Photo II-6a Resistance test on rigid model
of frigate mackerel
(caudal fin, cut off).

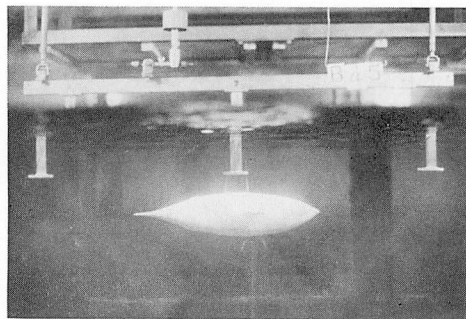


Photo II-6b Resistance test on flexible model
of frigate mackerel
(caudal fin, cut off).

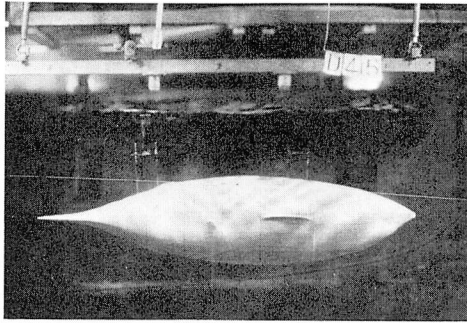


Photo II-7a Resistance test on rigid model of frigate mackerel (caudal fin, cut off) (twice the size of the model).

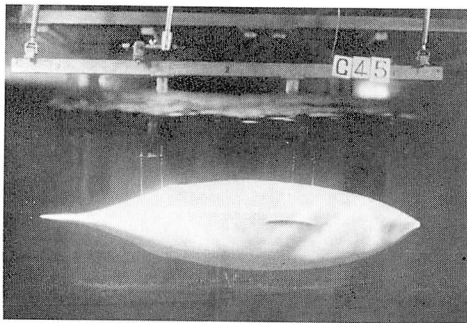


Photo II-7b Resistance test on flexible model of frigate mackerel (caudal fin, cut off) (twice the size of the model).

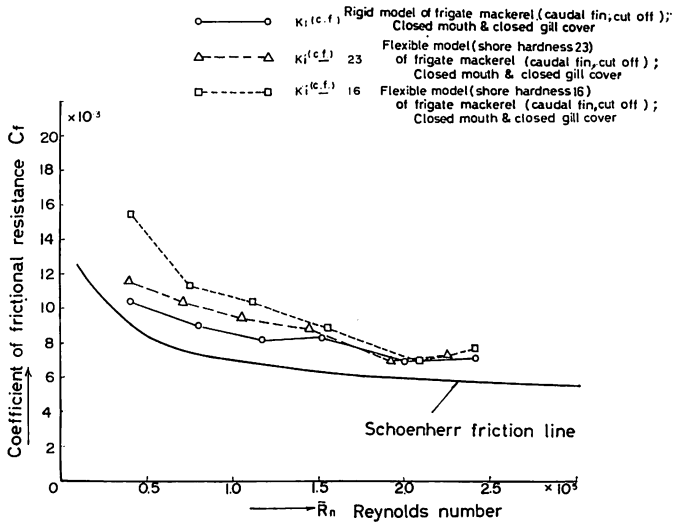


Fig. II-15a Resistance test results of stream-line-form model.

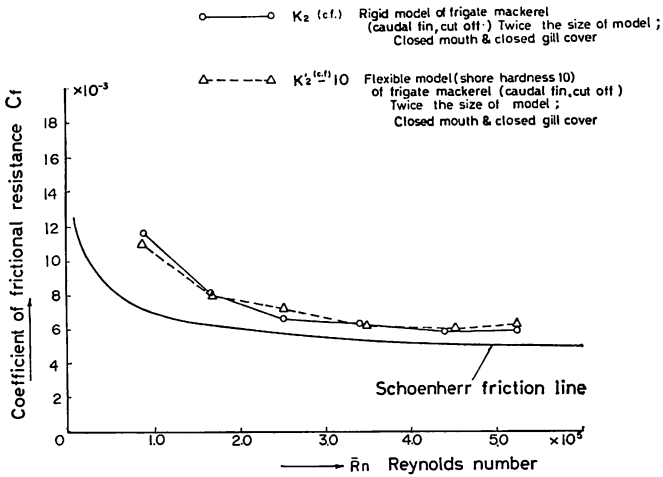


Fig. II-15b Resistance test results of stream-line-form model.

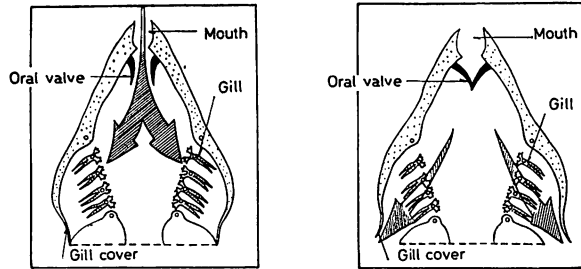


Fig. IV-1 Respiration method of fish (horizontal section of oral cavity along the body-axis).

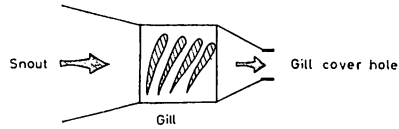


Fig. IV-2 Comparison between the sizes of snout and of gill-cover-hole.

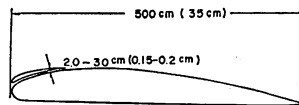


Fig. IV-3 Slot of air plane (DC-8, B-727).

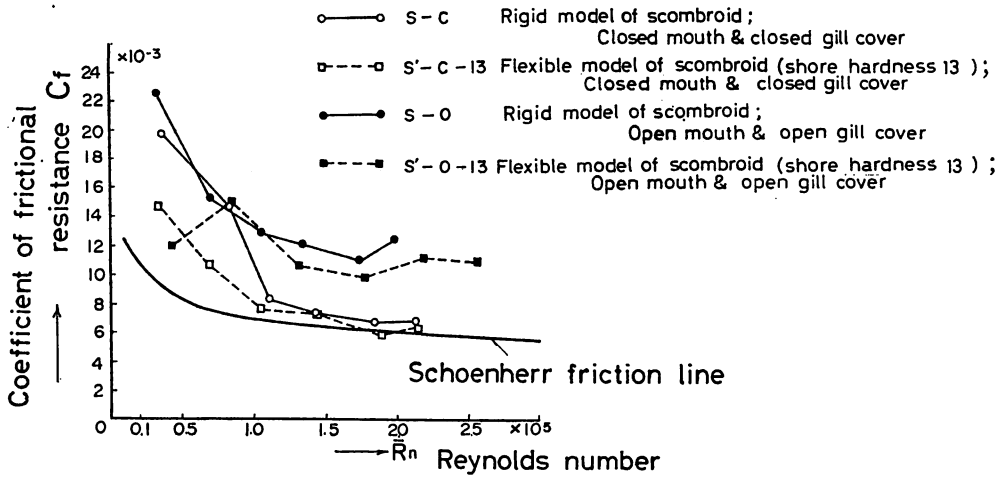


Fig. IV-4 Effect of slot due to snout and gill-cover-hole of scombroid model with no fish oil.

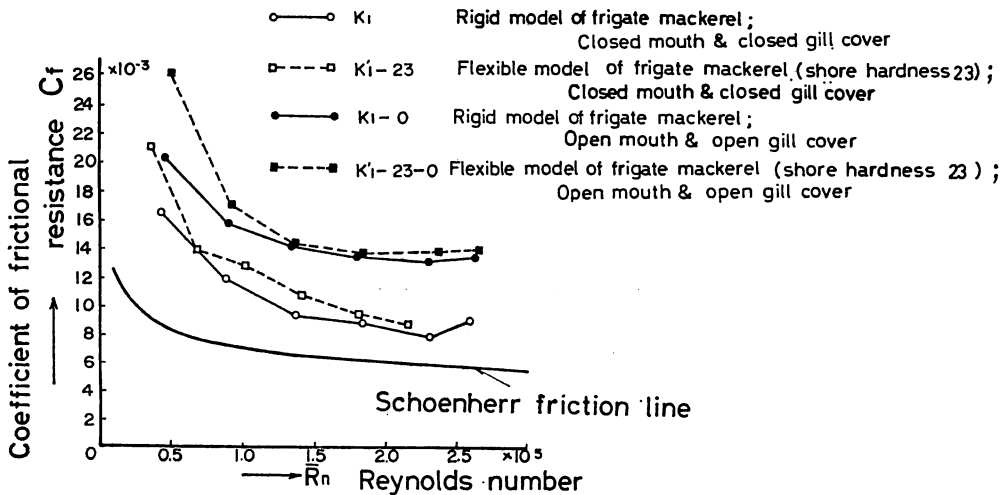


Fig. IV-5 Effect of slot due to snout and gill-cover-hole of frigate mackerel model with no fish oil.

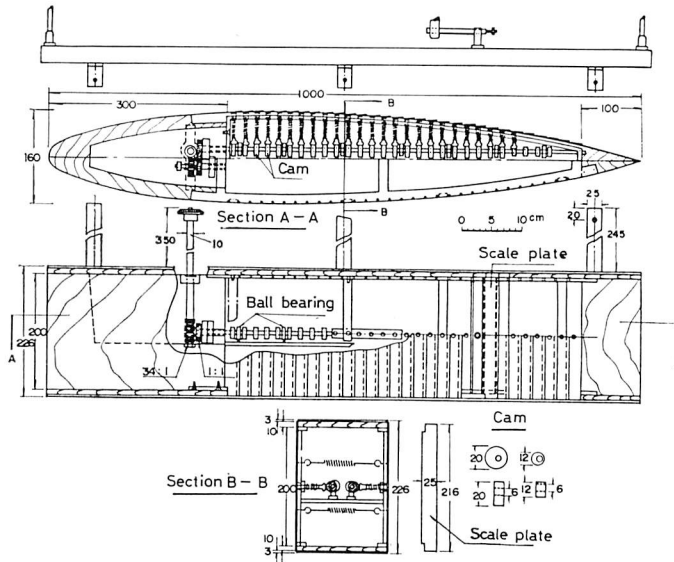


Fig. V-1 Two dimensional stream-line-form-model supplied with active skin.

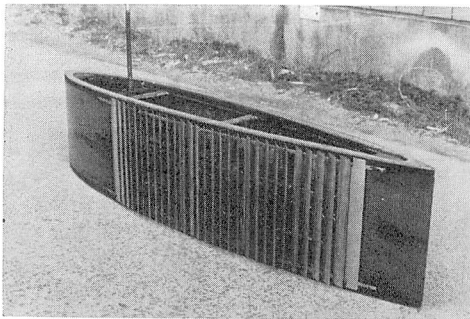


Photo V-1a Scale plate.

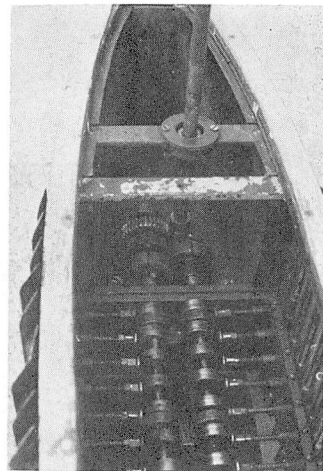


Photo V-1b Mechanism of cam and scale plate.

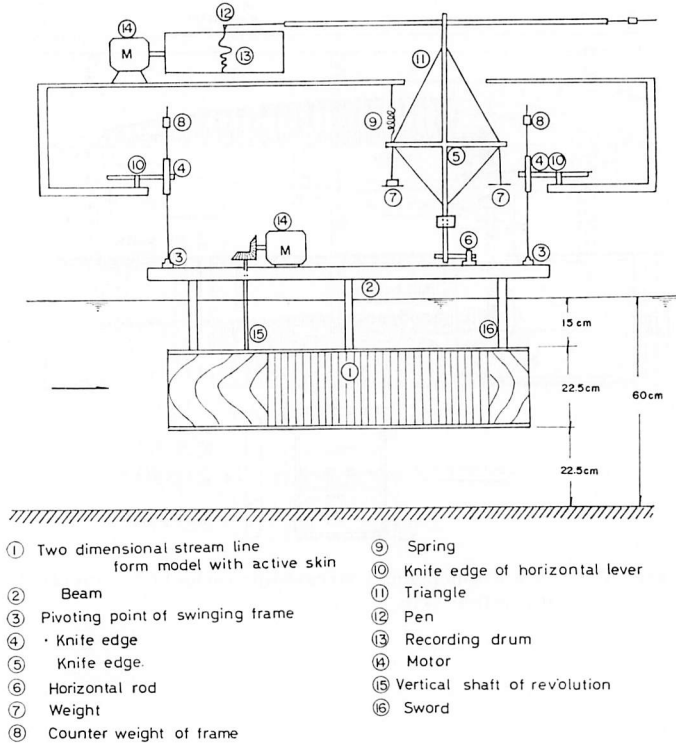


Fig. V-2 Experimental apparatus of resistance test.

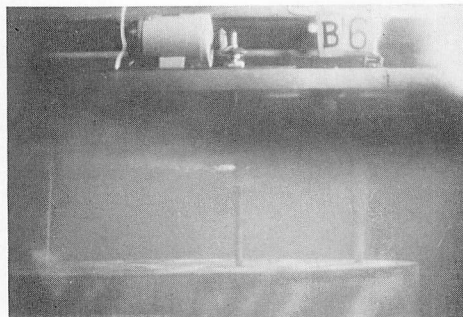


Photo V-2 A part of experimental apparatus of resistance test on active skin-model.

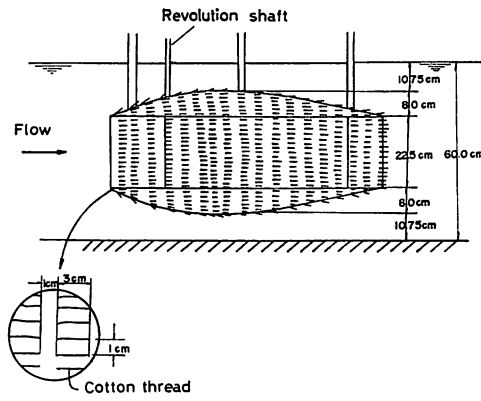


Fig. V-3 Flow-visualization (tufts method).

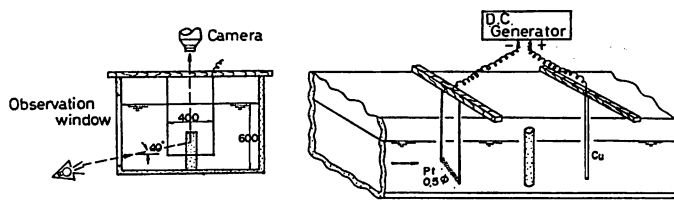


Fig. V-4 Experimental apparatus (hydrogen-bubble-method).

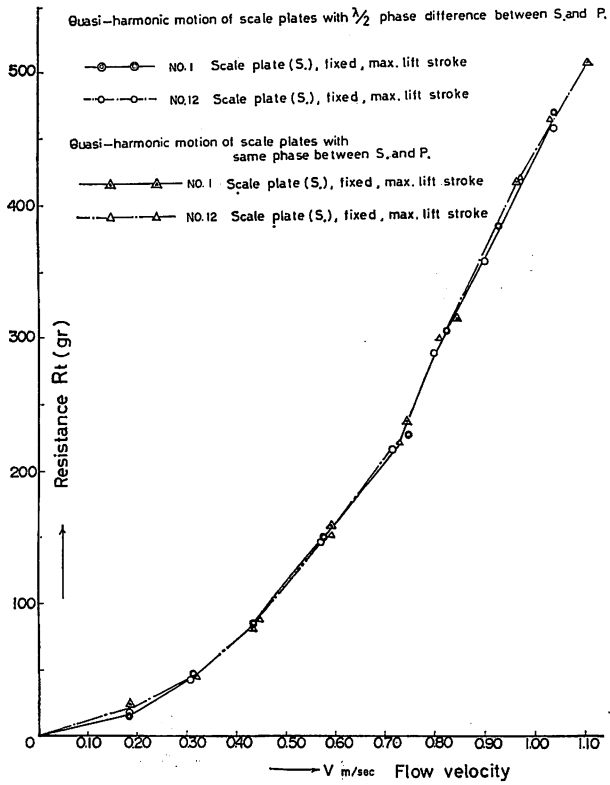


Fig. V-5 Effect of phase-difference on resistance.

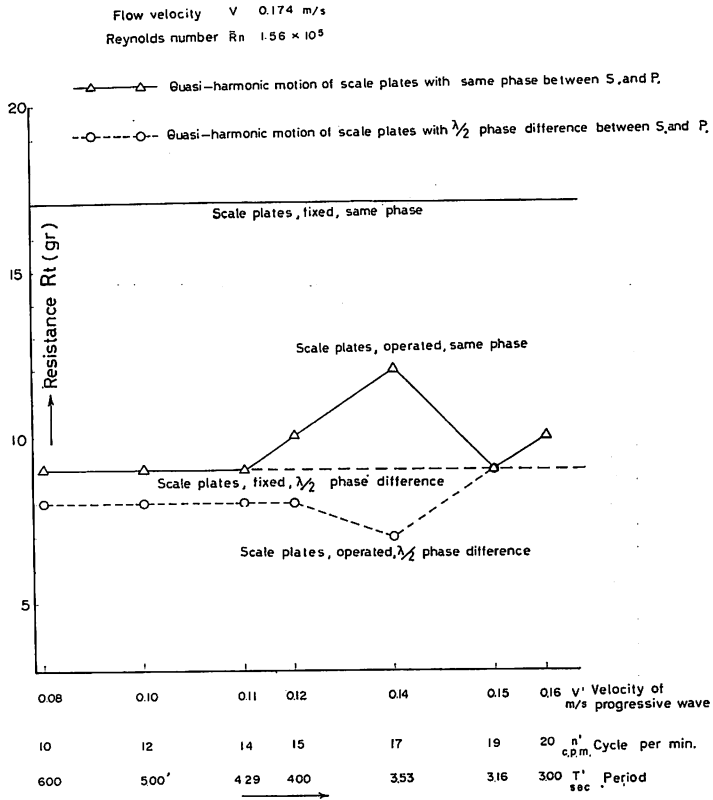


Fig. V-6a Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$, (gradual decrease)).

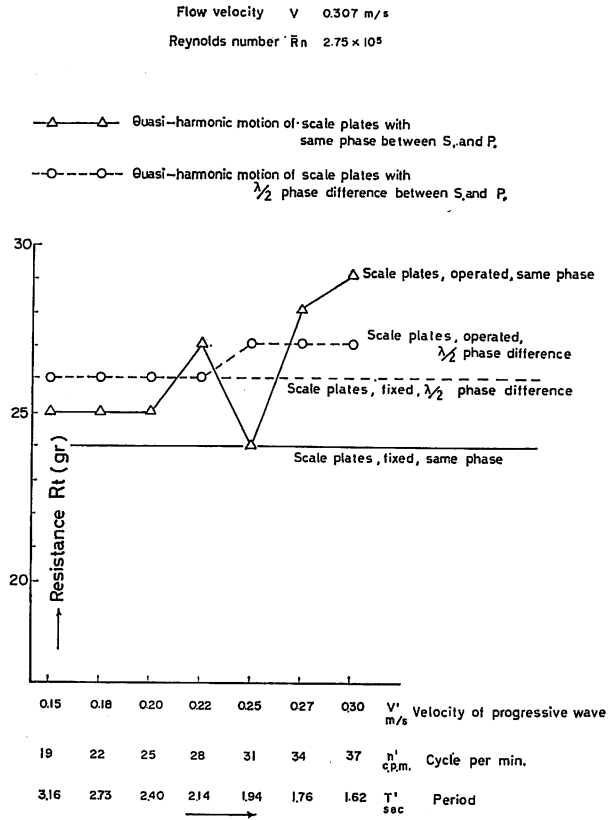


Fig. V-6b Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. \rightarrow A. (gradual decrease)).

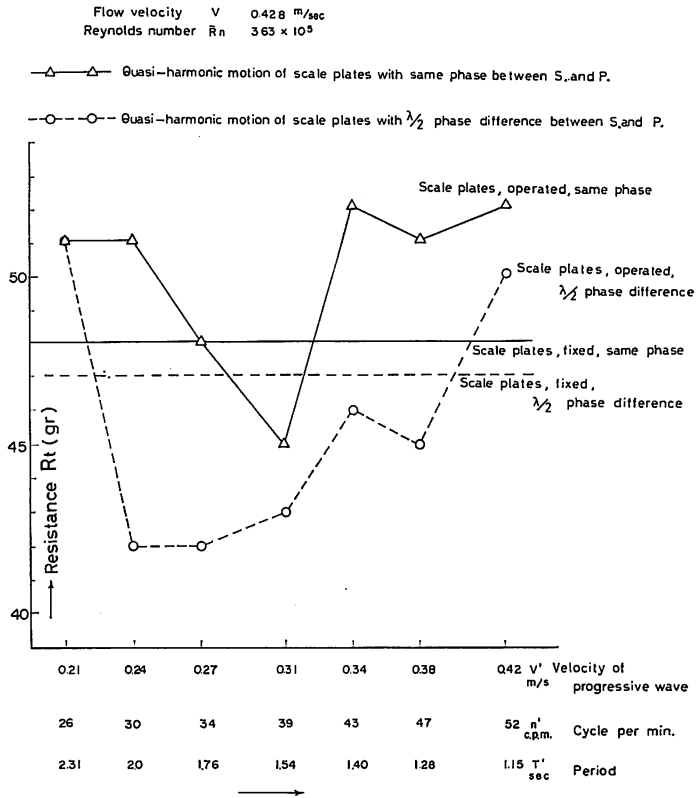


Fig. V-6c Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$, (gradual decrease)).

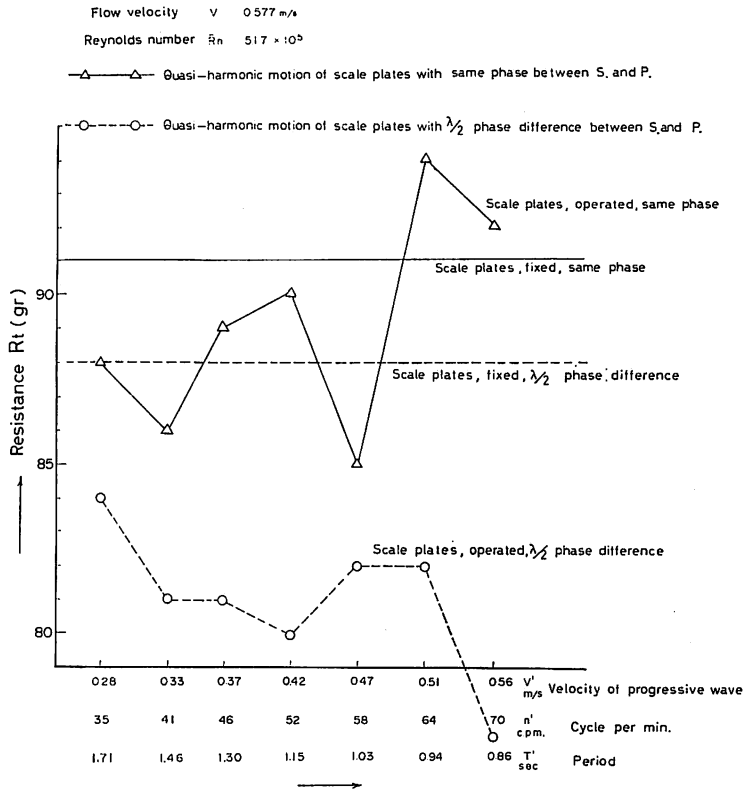


Fig. V-6d Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. → A. (gradual decrease)).

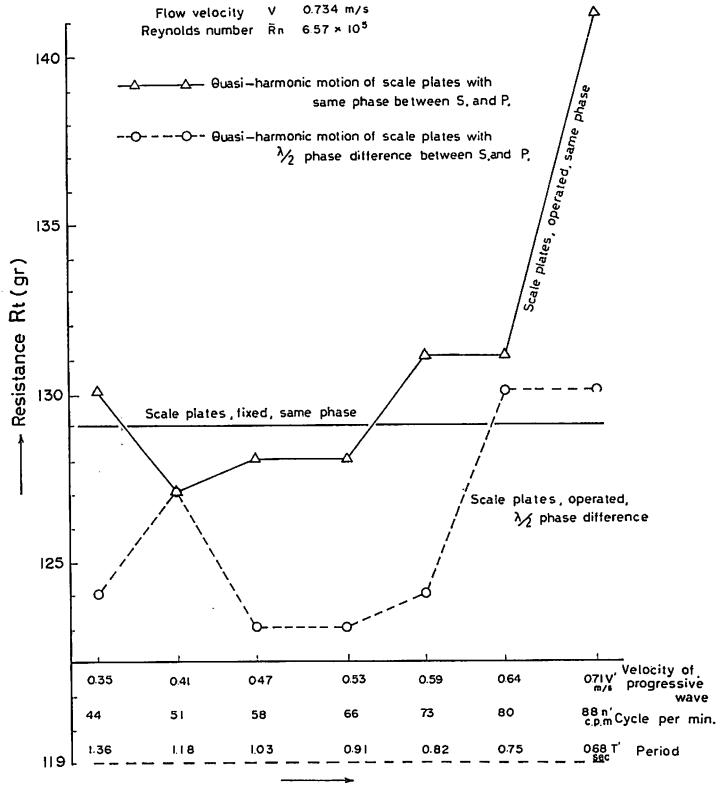


Fig. V-6e Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$. (gradual decrease)).

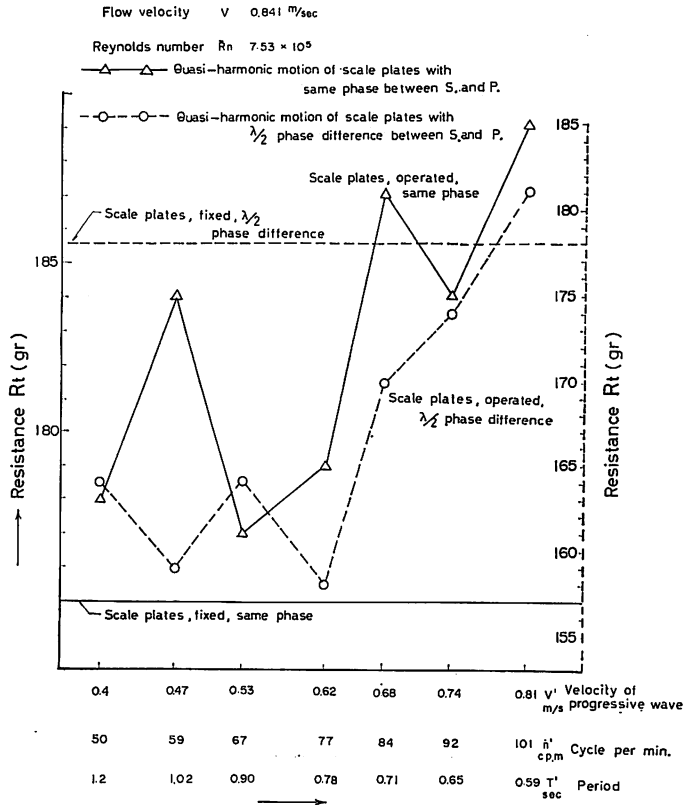


Fig. V-6f Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. → A. (gradual decrease)),

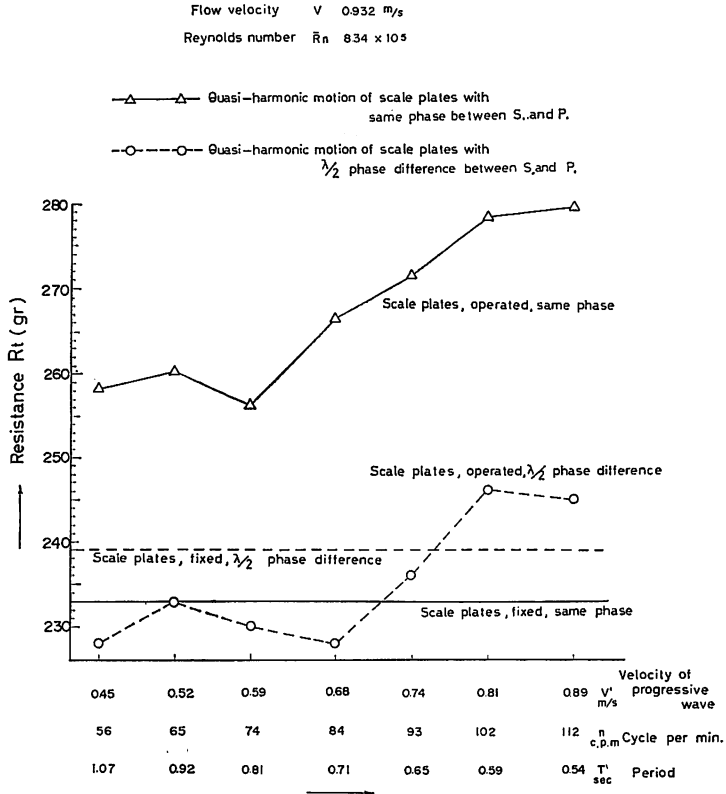


Fig. V-6g Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$. (gradual decrease)).

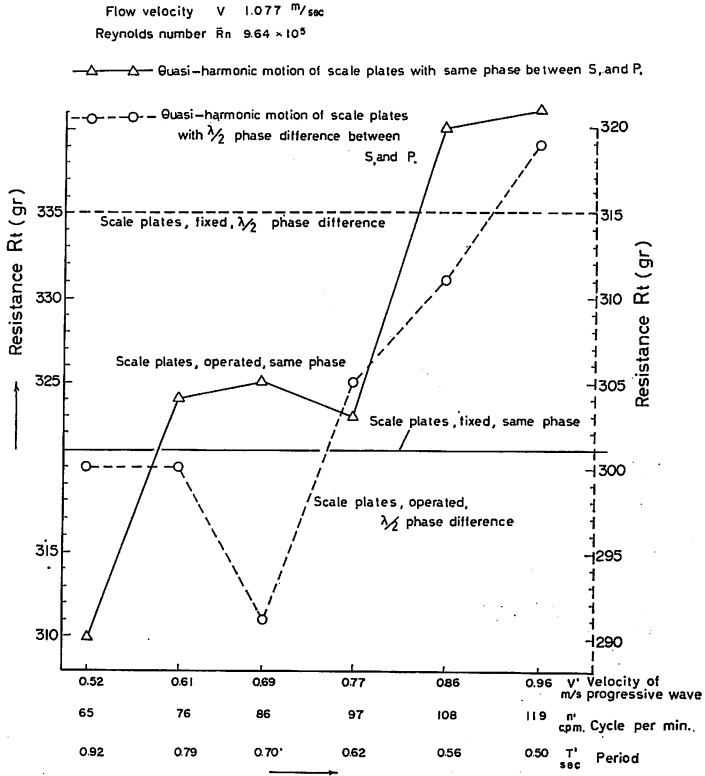


Fig. V-6h Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. → A. (gradual decrease)).

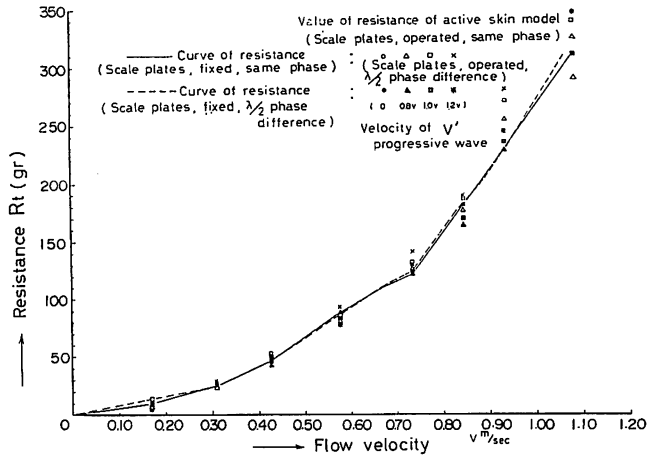


Fig. V-7 Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$. (gradual decrease)).

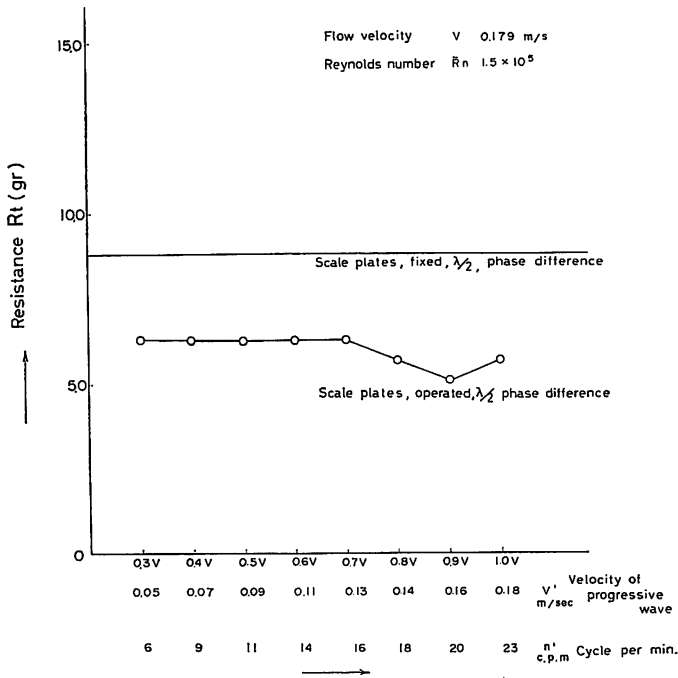


Fig. V-6'a Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$. (gradual increase)).

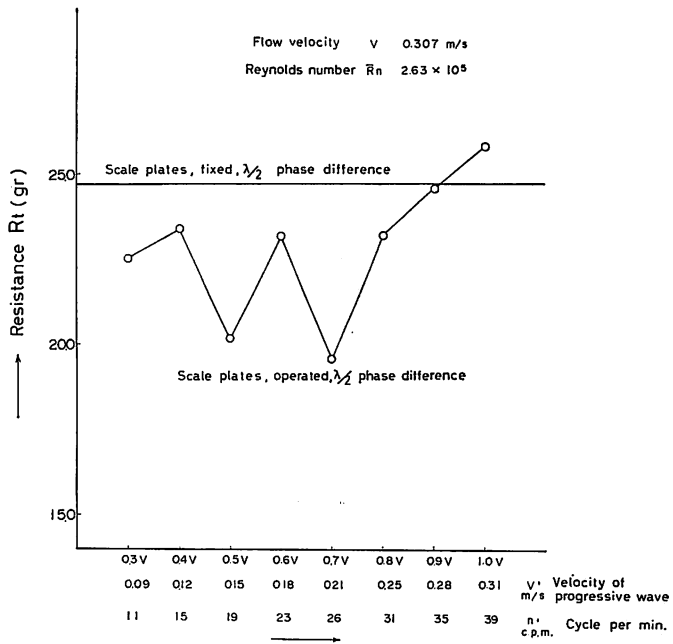


Fig. V-6'b Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F.→ A. (gradual increase)).

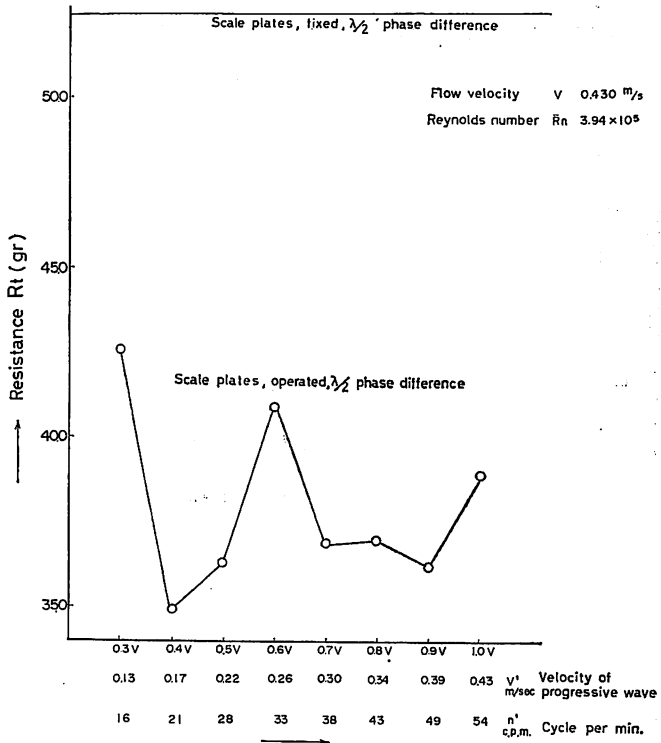


Fig. V-6'c Effect of active skin (amplitudes of scale plates $F \rightarrow A$. (gradual increase)).

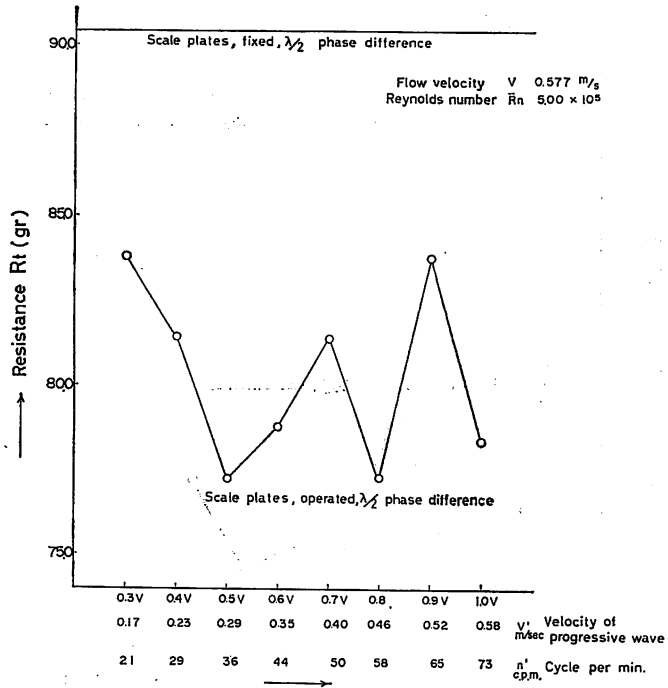


Fig. V-6'd Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. \rightarrow A. (gradual increase)).

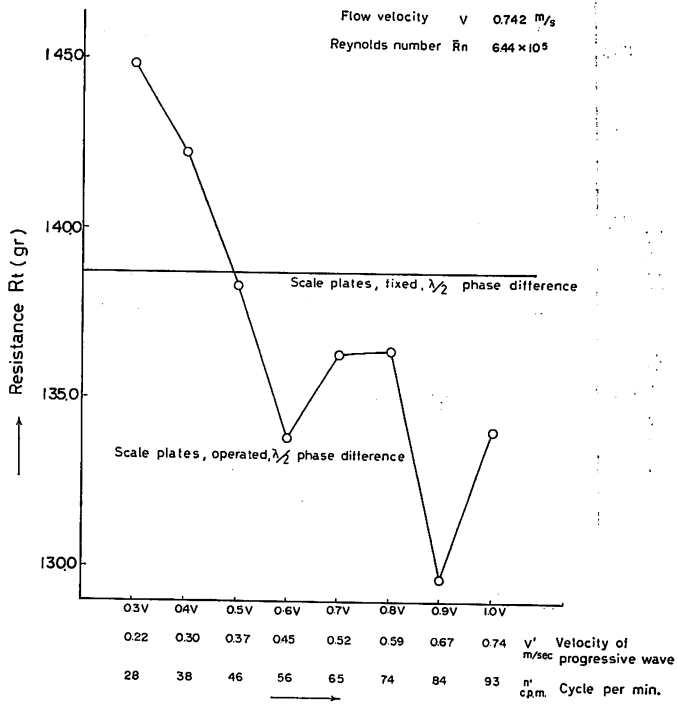


Fig. V-6/e Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F. \rightarrow A.$ (gradual increase)).

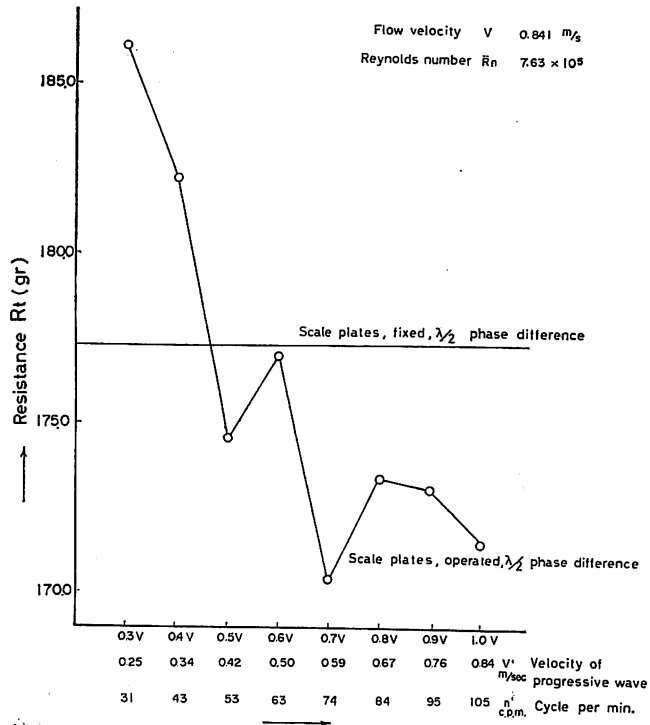


Fig. V-6/f Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. → A. (gradual increase)).

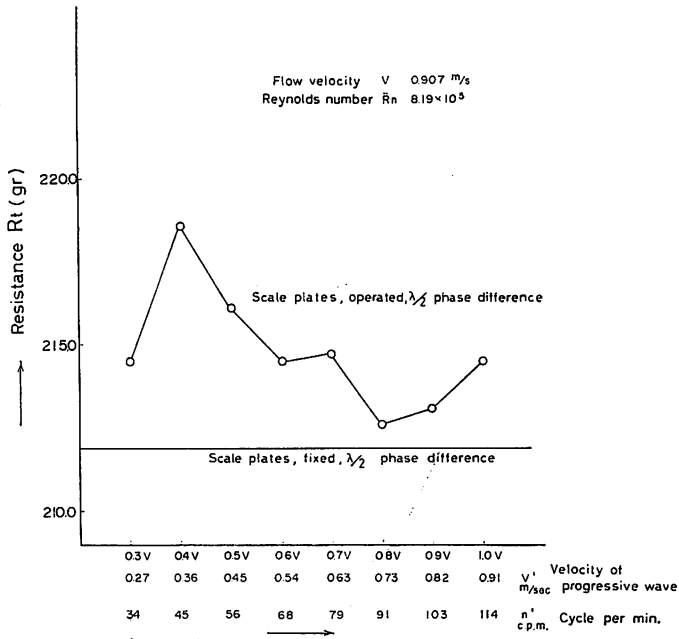


Fig. V-6'g Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. \rightarrow A. (gradual increase)).

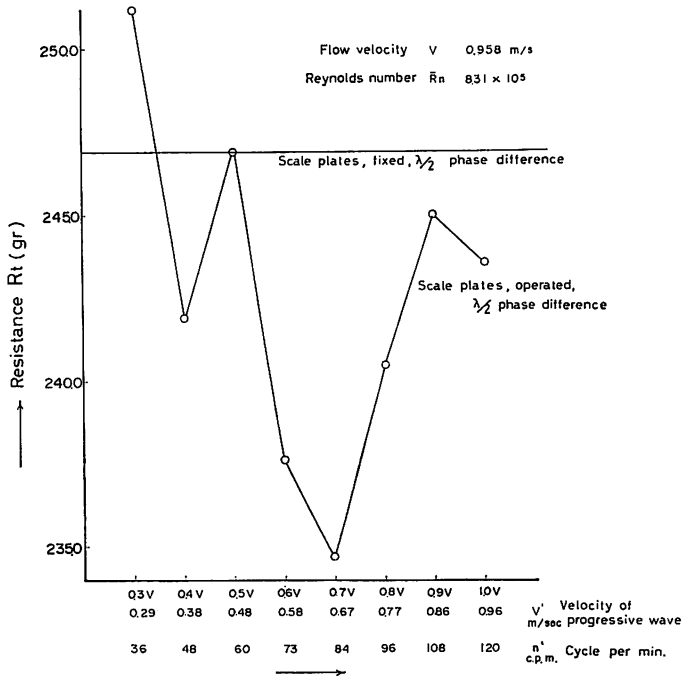


Fig. V-6'h Effect of active skin (amplitudes of scale plates, F. \rightarrow A. (gradual increase)).

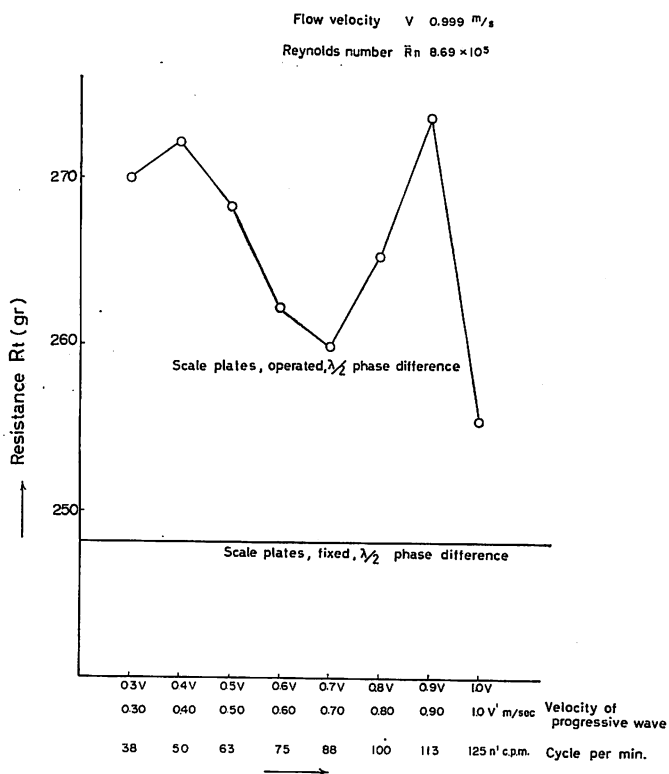


Fig. V-6'i Effect of active skin (amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$. (gradual increase)).

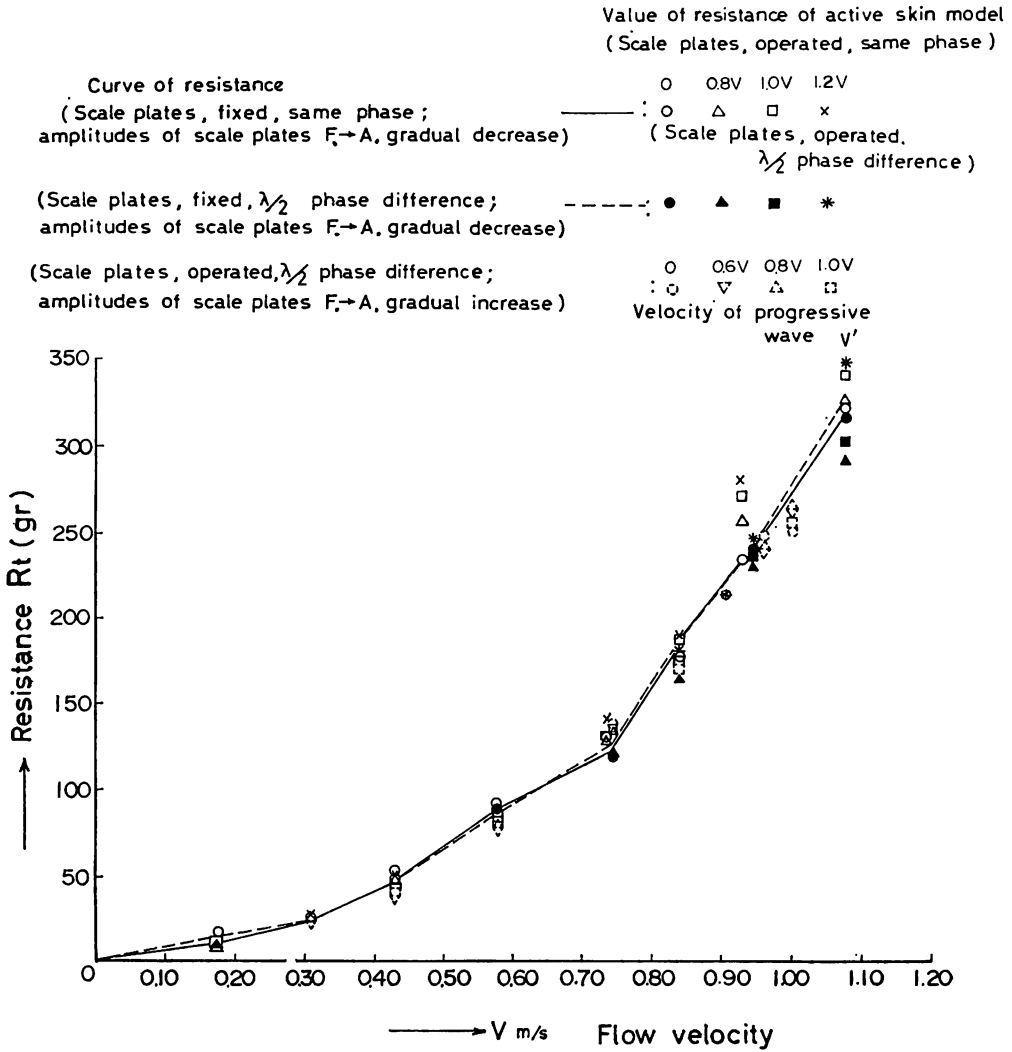


Fig. V-7' Effect of active skin.

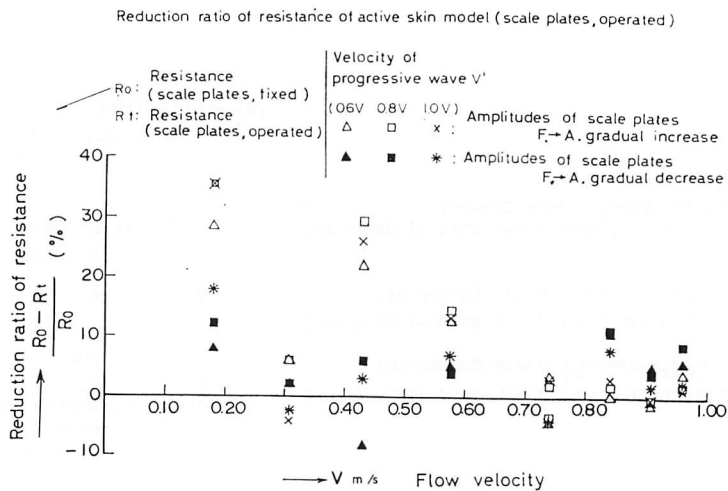


Fig. V-8' Effect of active skin with $\lambda/2$ phase-difference between S. and P.

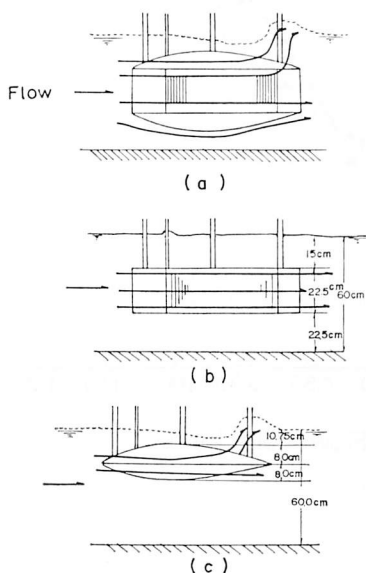


Fig. V-8 Flow-visualization (tufts method) of the flow running over the surface of scale plates.

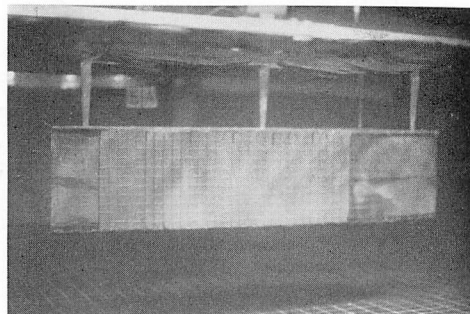


Photo V-3 Flow running over the surface of scale plates.

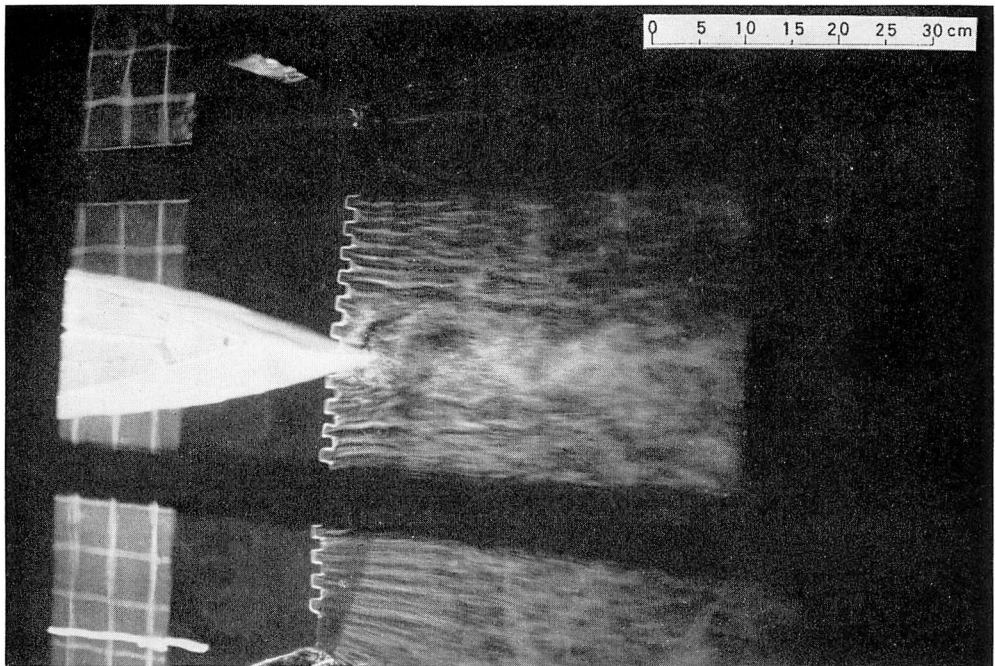


Photo V-4a Flow running behind the active skin-model (scale plates, fixed). ASA 200, 1/15; V 0.179 m/sec, \bar{R}_n 1.5×10^5 ; I 3.0 amp, E 15 volt

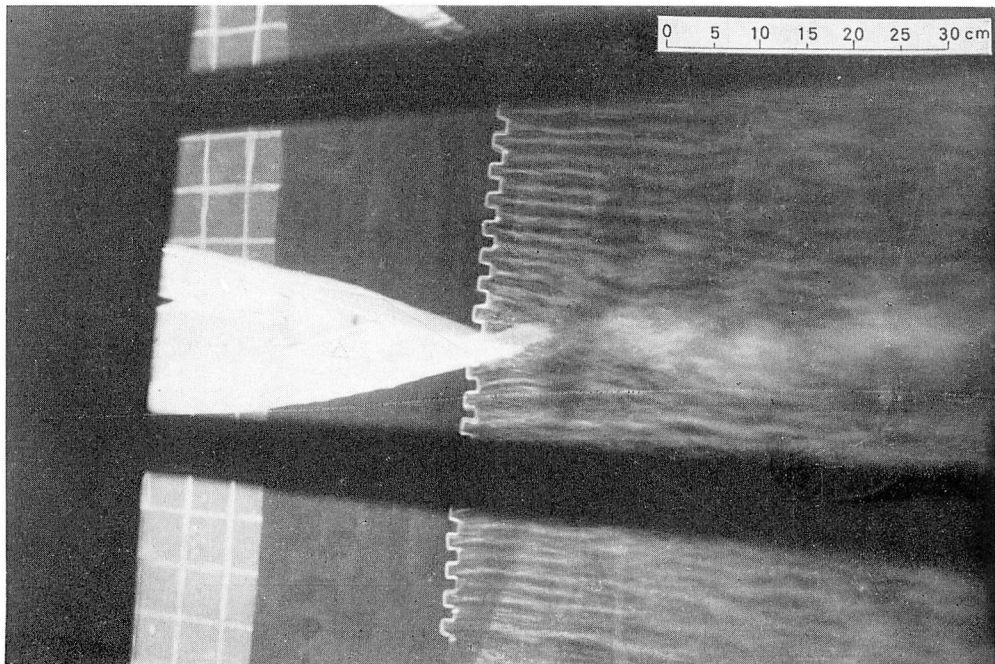
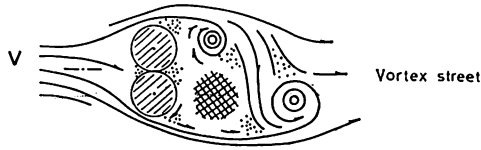
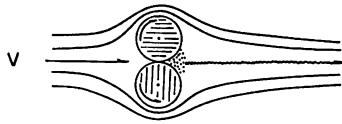


Photo V-4b Flow running behind the active skin-model (scale plates, operated). ASA 200, 1/8; V 0.179 m/sec, \bar{R}_n 1.5×10^5 ; I 3.0 amp E 15 volt ($V' = 0.9$ $V = 0.16$ m/sec)



(a) Separated flow pattern with vortex street
 Vortex street : $C_D = 1.54$



(b) Cylinders as presented by Prandtl (1936)
 $C_D = 0$, to be expected

Fig. V-9 Flow-pattern past rotating circular cylinders (from S. F. Hoerner 1965, Fluid-dynamic drag).

Amplitudes of scale plates, $F \rightarrow A$, gradual decrease

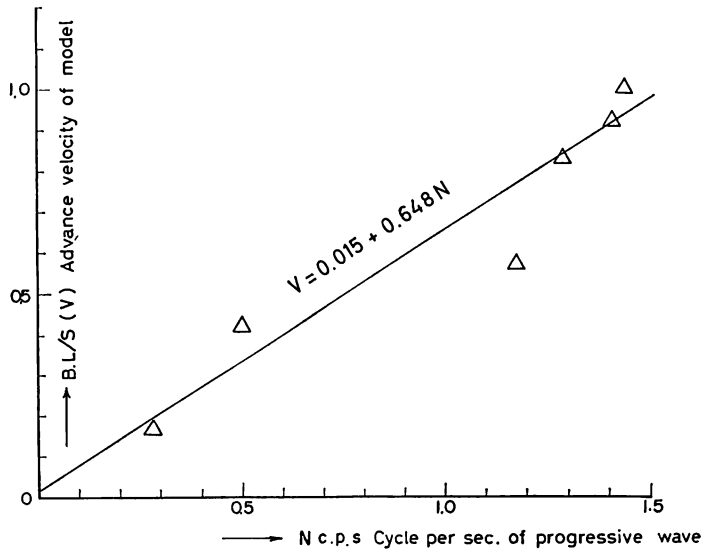


Fig. V-10 Effect of active skin with $\lambda/2$ phase-difference between S. and P..

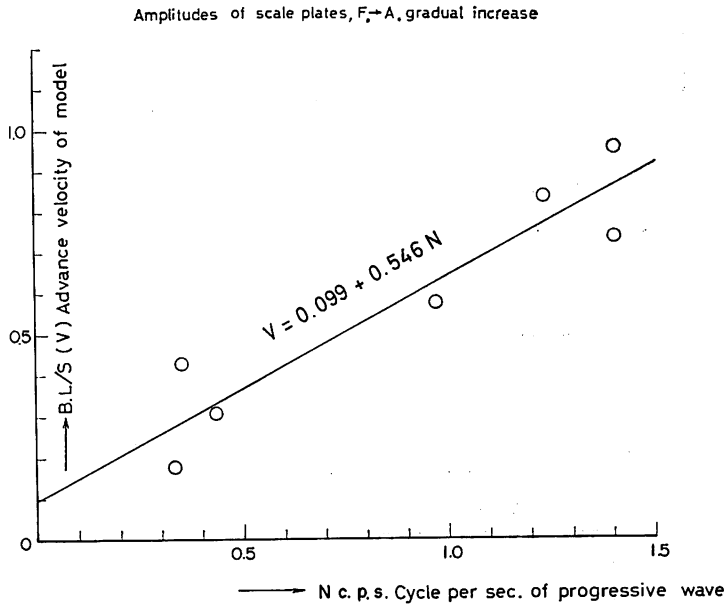


Fig. V-10' Effect of active skin with $\lambda/2$ phase-difference between S. and P..

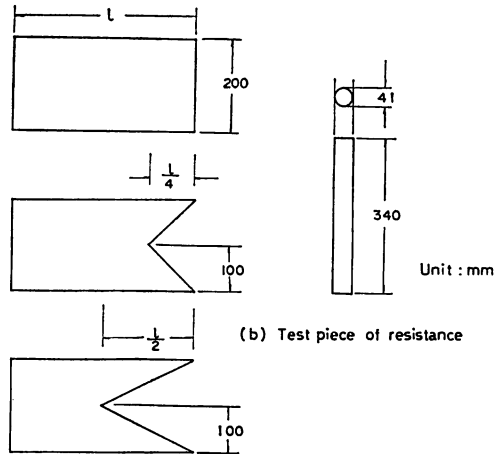
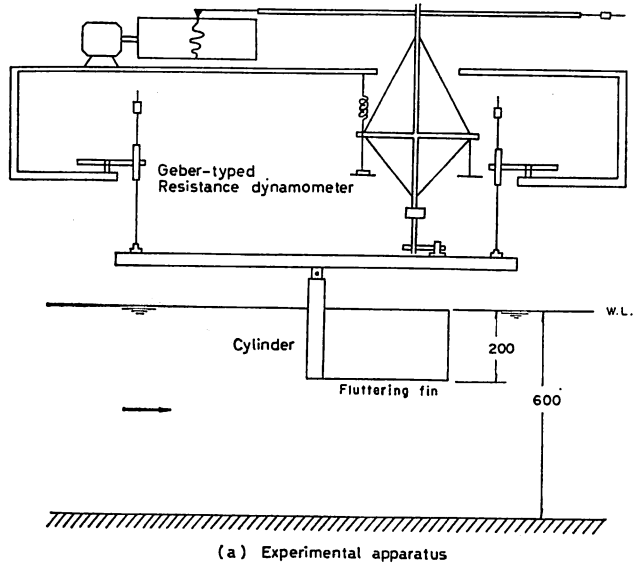


Fig. VI-1 Resistance test of cylinder with fluttering fin attached behind it in water.

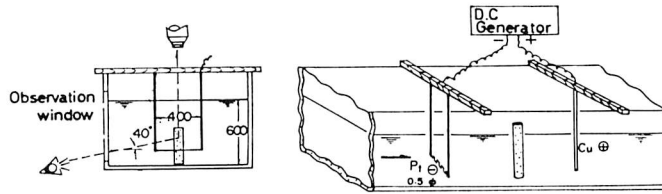


Fig. VI-2 Experimental apparatus (hydrogen-bubble-method).

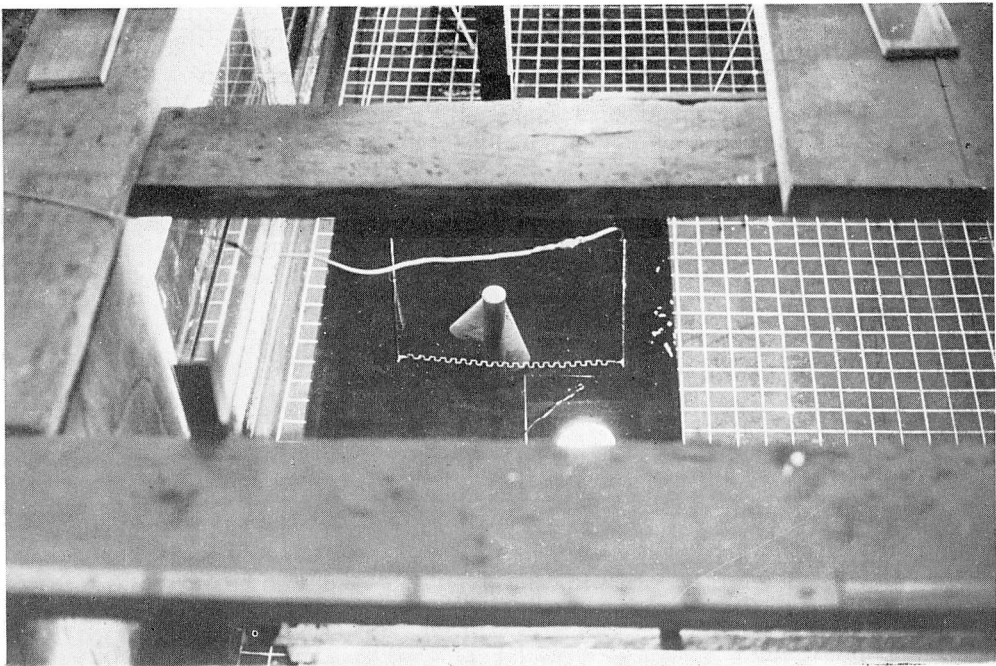


Photo VI-1 Experimental apparatus (hydrogen-bubble method).

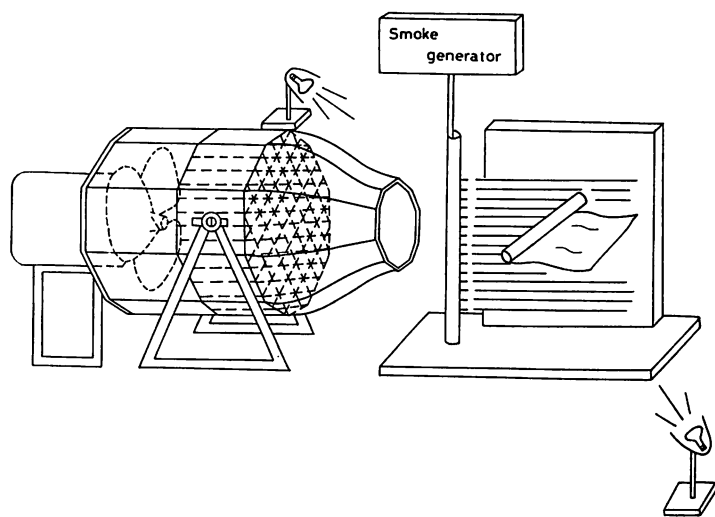




















Fig. VI-3 Small wind-tunnel (smoke-tunnel).

Table VI-1 Reduction-rate of resistance
 $(R_o - R_t)/R_o$ %.
 R_o : Resistance of cylinder
 R_t : Resistance of cylinder
 with fluttering fin




A $t = 0.06 \text{ mm}$, t : Thickness of vinyl fluttering fin

L \ V	m/s						
	0.173	0.314	0.433	0.546	0.664	0.727	
		19.3	19.8	10.9	9.2	4.9	9.3
3d		20.2	15.2	10.3	9.0	4.8	5.4
		16.0	- 0.2	8.5	8.7	4.2	3.3
		21.0	15.8	19.7	15.1	7.9	10.2
5d		13.4	10.3	15.4	10.2	11.8	2.4
		16.0	3.4	9.0	8.6	6.3	2.2
		16.0	21.2	18.5	19.5	10.2	3.3
7d		23.5	4.3	17.5	18.9	9.8	1.4
		16.0	11.5	19.7	19.3	10.2	8.0

B $t = 1.00 \text{ mm}$

		13.4	7.7	6.0	11.8	2.6	- 1.6
3d		16.0	2.0	11.8	10.3	14.0	4.2
		16.0	10.3	10.9	10.0	4.4	3.1
		16.0	2.3	8.1	7.4	1.5	1.7
5d		- 6.7	5.7	14.0	9.9	4.0	1.4
		16.0	- 8.3	24.1	7.6	3.3	2.0
		13.4	8.3	8.2	8.5	1.3	- 2.9
7d		11.8	1.7	5.9	6.5	1.4	- 0.3
		12.6	5.7	7.5	8.7	2.9	2.7

C $t = 0.50 \text{ mm}$

		16.0	5.7	5.1	5.9	- 1.6	- 1.6
7d		13.4	5.7	7.9	5.8	- 0.8	0.6
		16.0	8.9	10.3	8.7	2.2	- 1.0

d: Diameter of cylinder l: Length of fluttering fin

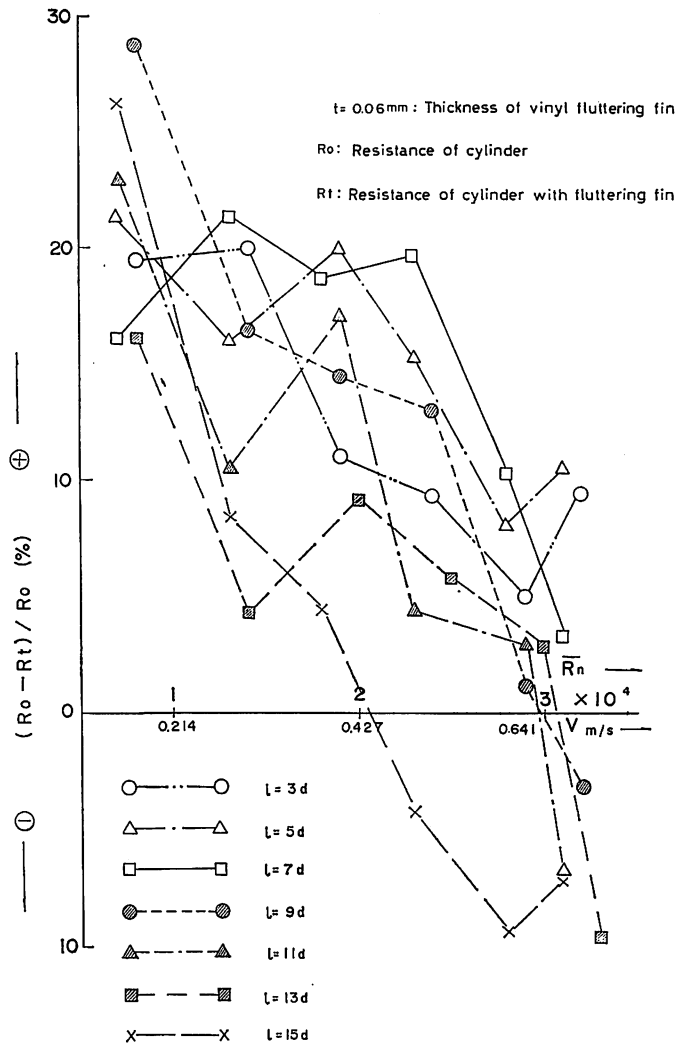


Fig. VI-4a Curve of $(R_0 - R_t) / R_0 \sim \bar{R}_n$.

R_0 : Resistance of cylinder
 R_t : Resistance of cylinder with fluttering fin
 t : Thickness of vinyl fluttering fin
 L : Length of vinyl fluttering fin
 d : Diameter of cylinder

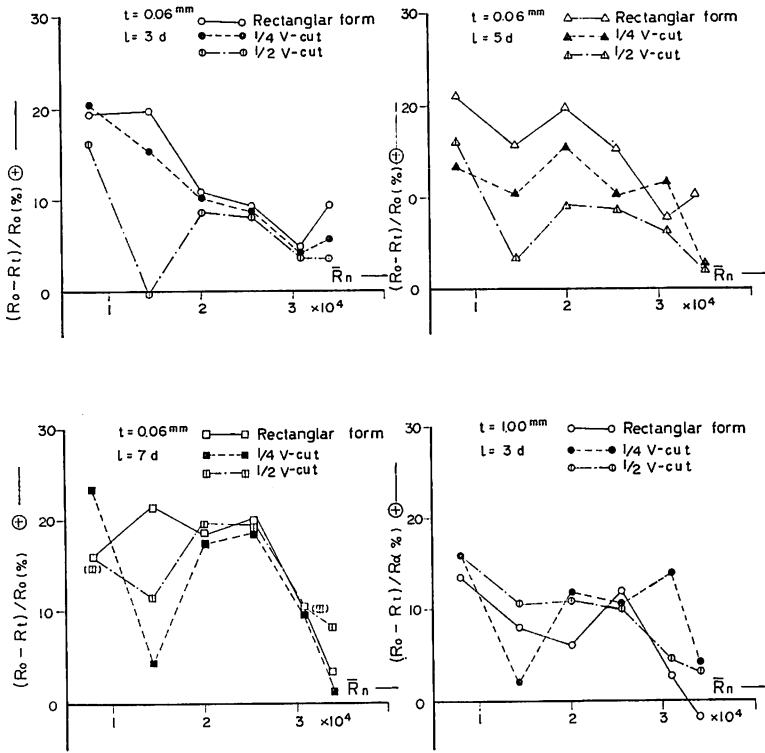


Fig. VI-4b₁ Curve of $(R_0 - R_t) / R_0 \sim \bar{R}_n$ showing V-cut fin effect on resistance-reduction.

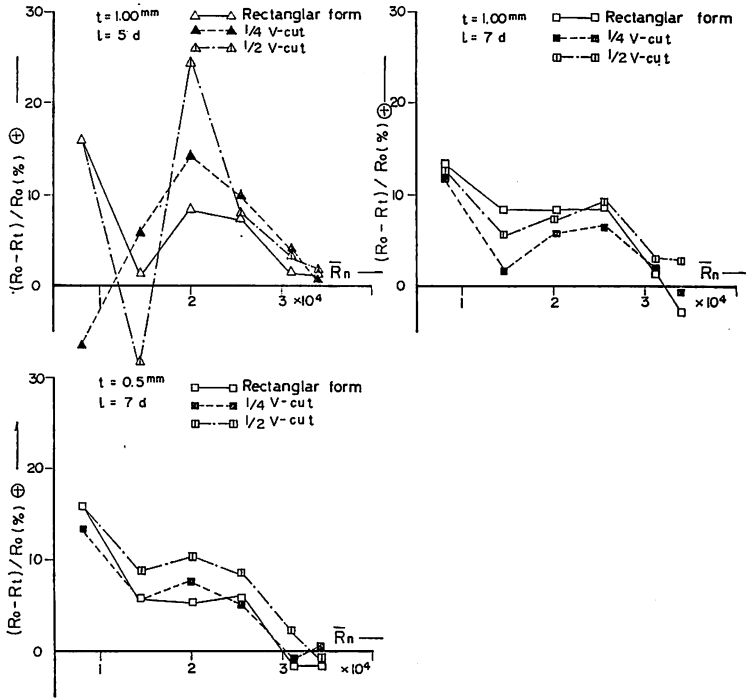


Fig. VI-4b₂ Curve of $(R_o - R_t) / R_o \sim \overline{R}_n$ showing V-cut fin effect on resistance-reduction.

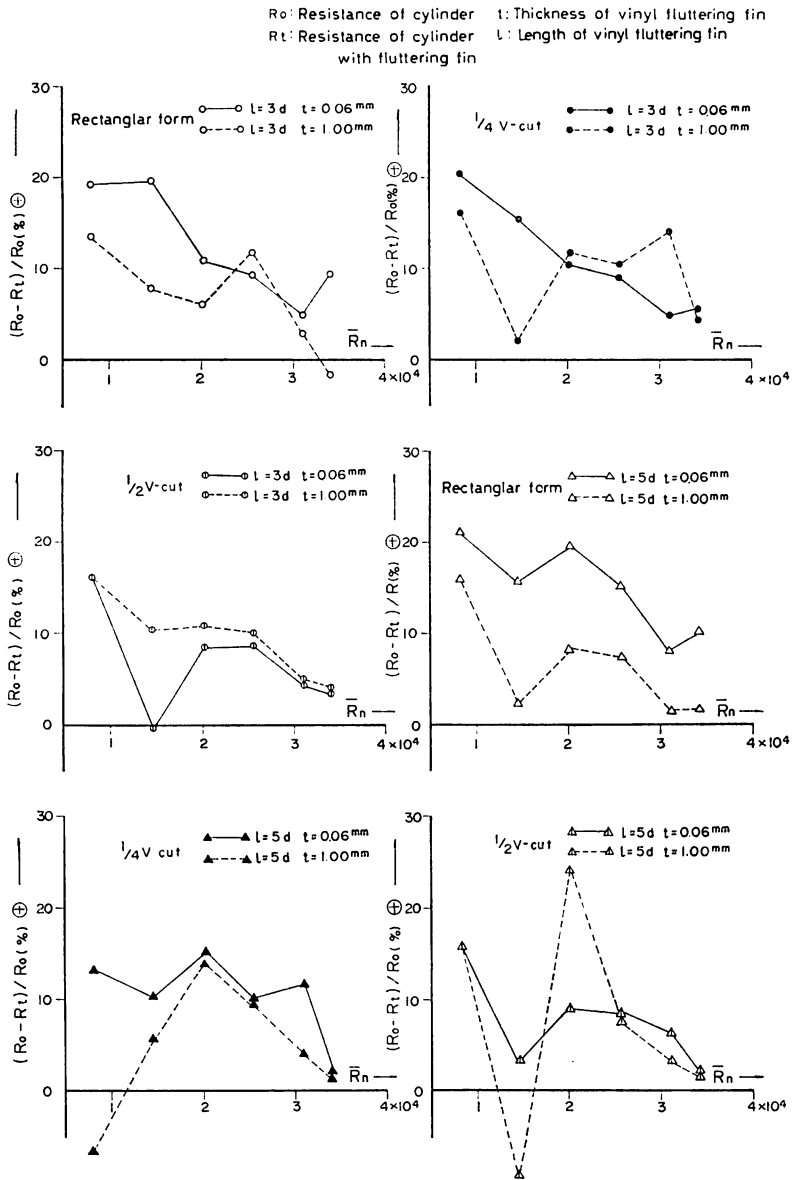


Fig. VI-4c₁ Curve of $(R_o - R_t) / R_o \sim \bar{R}_n$ showing fin-thickness effect on resistance-reduction.

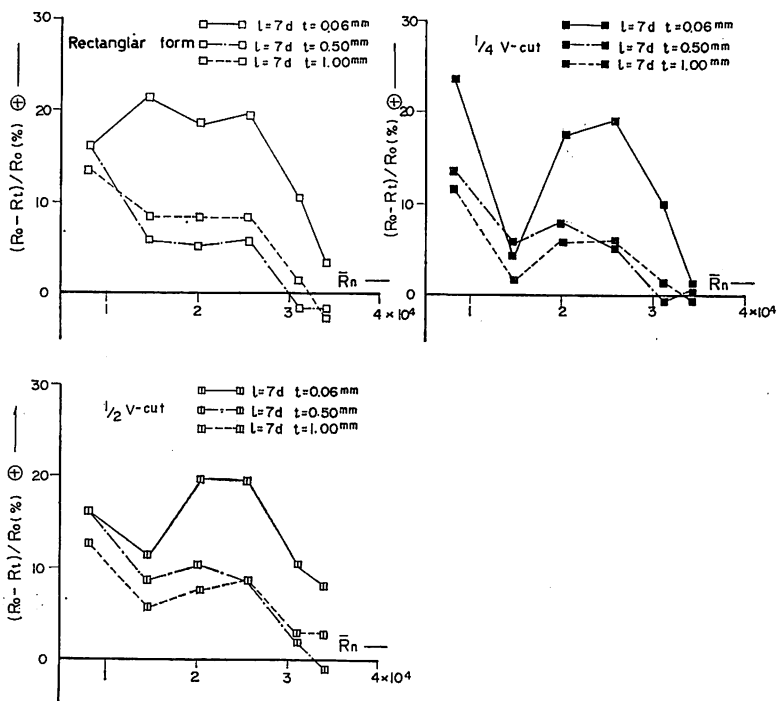


Fig. VI-4c₂ Curve of $(R_o - R_t) / R_o \sim \bar{R}_n$ showing fin-thickness effect on resistance-reduction.

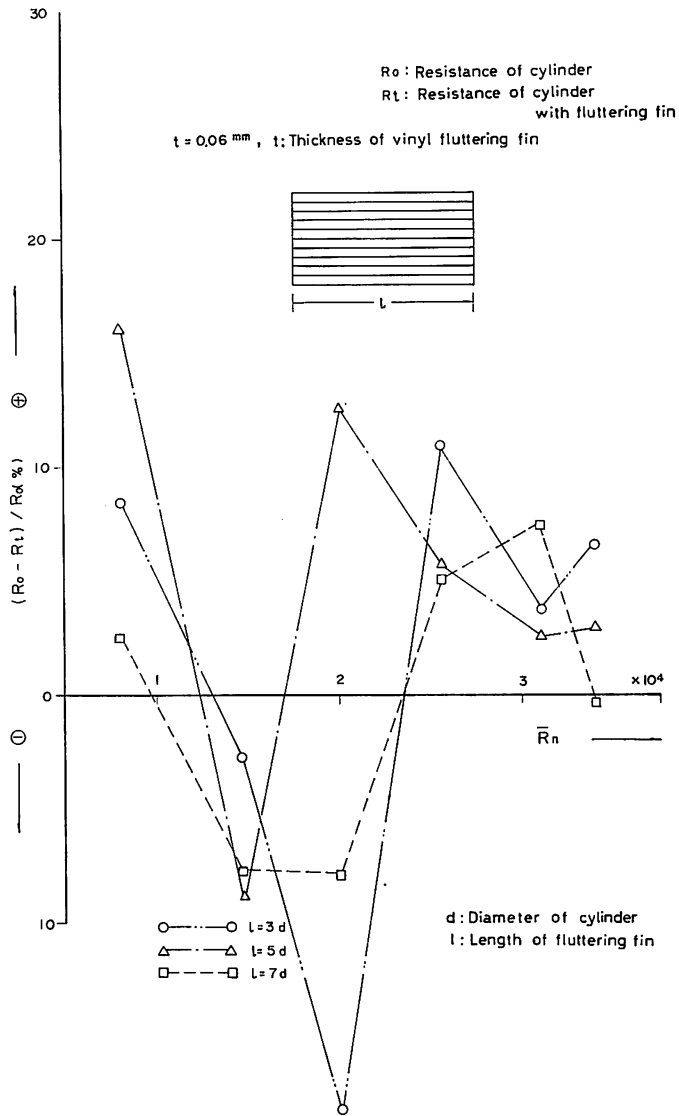


Fig. VI-4d Curve of $(R_0 - R_t) / R_0 \sim \bar{R}_n$.

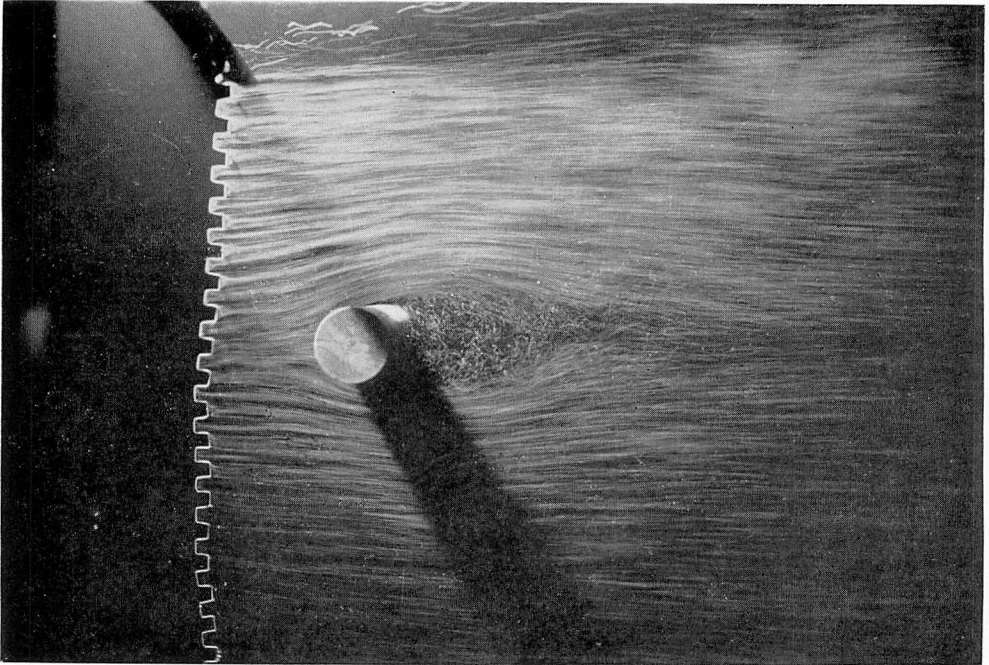


Photo VI-2 Flow running behind the cylinder, ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec, \overline{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt

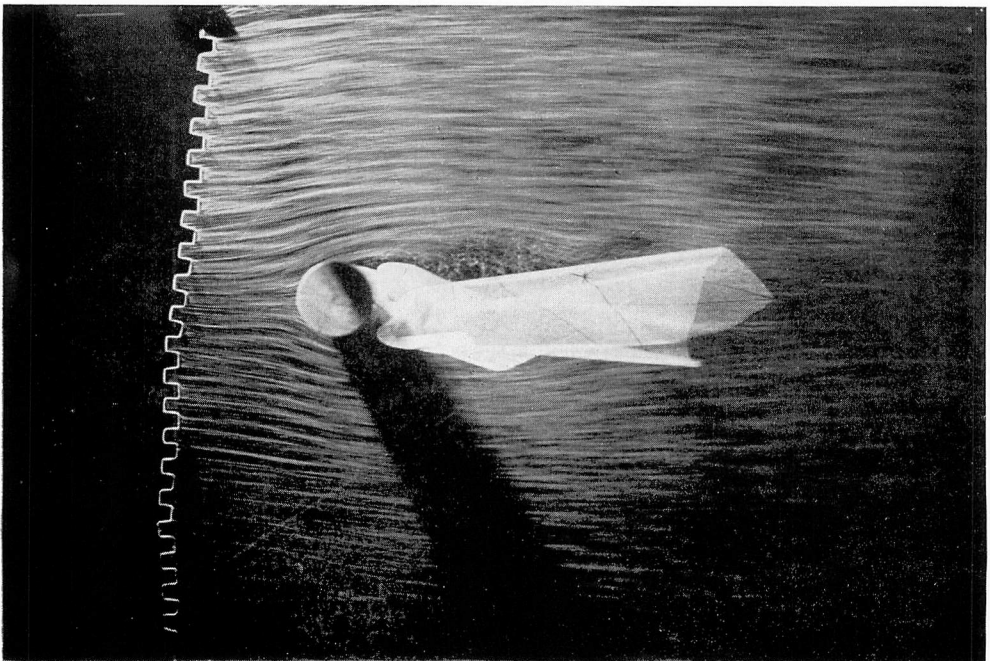


Photo VI-3 Flow running behind the cylinder with vinyl fluttering fin (rectangular form) t 0.06 mm, l 7d; ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec. \overline{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt

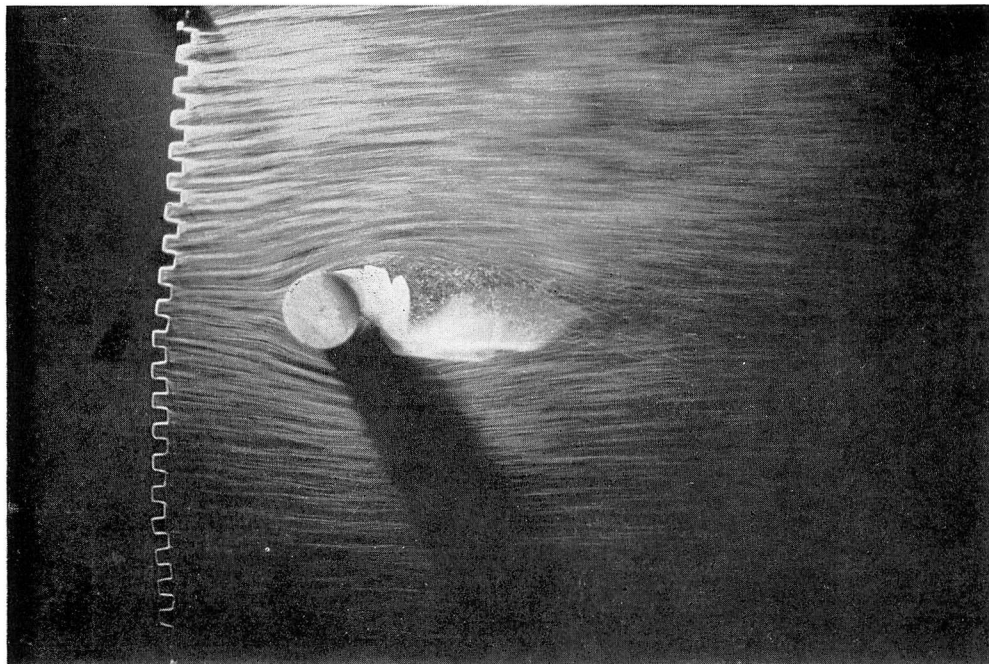


Photo VI-4a Flow running behind the cylinder with vinyl fluttering fin (rectangular form, 1/4 v-cut). t 0.06 mm, l 7d; ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec, \overline{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt

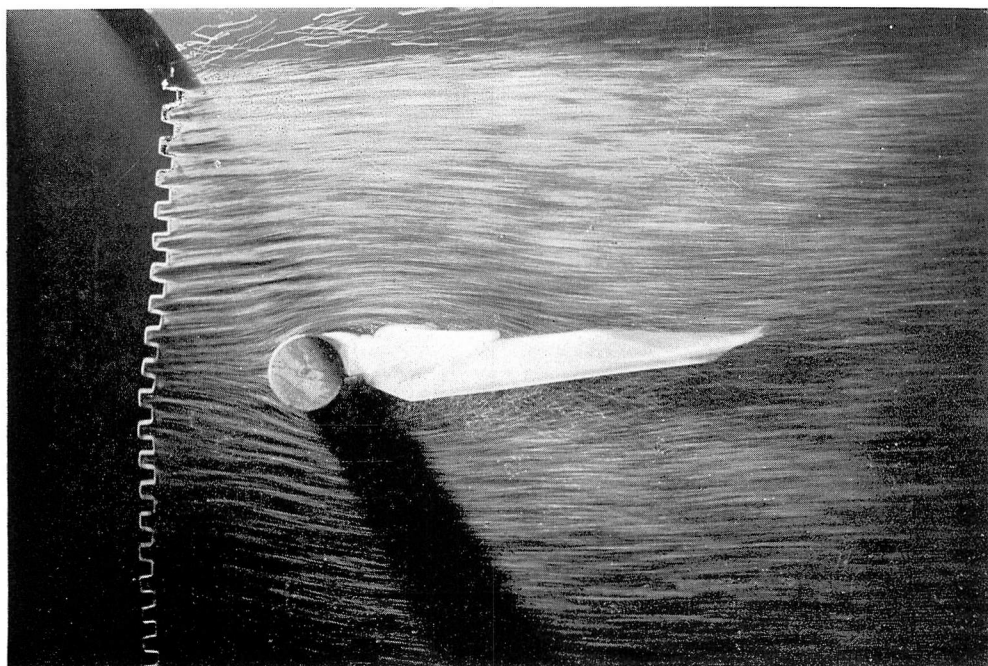


Photo VI-4b Flow running behind the cylinder with vinyl fluttering fin (rectangular form, 1/2 v-cut). t 0.06 mm, l 7d; ASA 200, 1/8; V 0.173 m/sec, \overline{R}_n 8.0×10^3 ; I 3.3 amp, E 20 volt

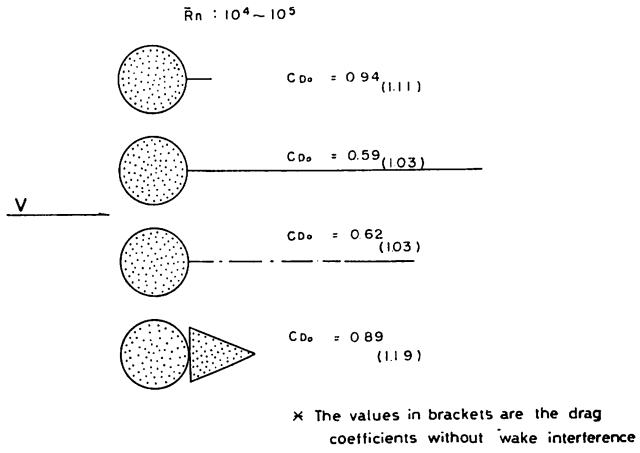


Fig. VI-5 Influence of "splitter"-plates on the drag-coefficient of the vortex-street-producing shapes (from S. F. Hoerner, 1965).

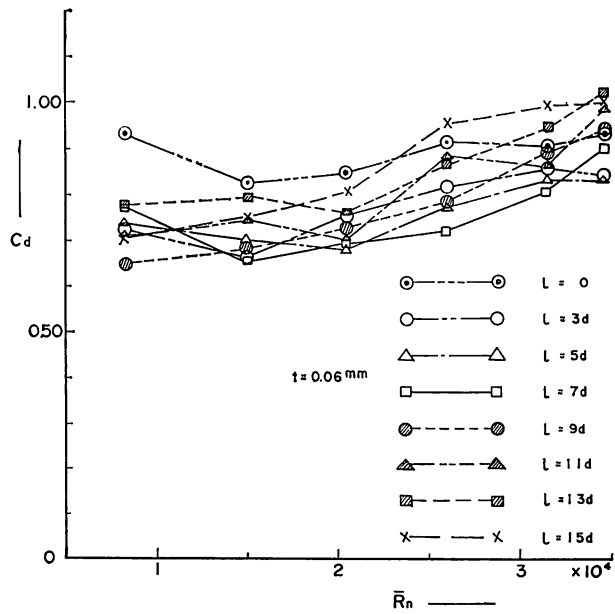


Fig. VI-6 Curve of $C_d \sim \bar{R}_n$.

Table VI-1' Relation between $(R_o - R_l)/R_o$ and \bar{R}_n .

$$(R_o - R_l)/R_o = a + b \bar{R}_n$$

a: Segment on $(R_o - R_l)/R_o$ -ax

b: Inclination of straight line to \bar{R}_n -ax

1) Rectanglar vinyl fin ($t=0.06$ mm)

l	a	b
3 d	24.25	-0.56×10^{-3}
5 d	24.92	-0.47×10^{-3}
7 d	25.38	-0.50×10^{-3}
9 d	36.49	-1.16×10^{-3}
11 d	29.86	-1.03×10^{-3}
13 d	22.28	-0.85×10^{-3}
15 d	31.37	-1.37×10^{-3}

2)

	3 d			5 d			7 d		
	Rectanglar form	1/4 v-cut	1/2 v-cut	Rectanglar form	1/4 v-cut	1/2 v-cut	Rectanglar form	1/4 v-cut	1/2 v-cut
A. $t = 0.06$ mm									
a	24.25	23.89	13.00	24.92	16.24	14.96	25.38	23.40	18.96
b	-0.56×10^{-3}	-0.61×10^{-3}	-0.29×10^{-3}	-0.47×10^{-3}	-0.28×10^{-3}	0.35×10^{-3}	-0.50×10^{-3}	-0.51×10^{-3}	-0.23×10^{-3}
B. $t = 1.00$ mm									
a	16.66	14.73	19.08	15.42	-0.19	13.59	18.23	11.88	13.61
b	-0.47×10^{-3}	-0.32×10^{-3}	-0.47×10^{-3}	-0.43×10^{-3}	0.23×10^{-3}	-0.29×10^{-3}	-0.57×10^{-3}	-0.35×10^{-3}	-0.32×10^{-3}
C. $t = 0.50$ mm									
a	—	—	—	—	—	—	18.32	16.02	20.24
b	—	—	—	—	—	—	-0.63×10^{-3}	-0.49×10^{-3}	-0.60×10^{-3}

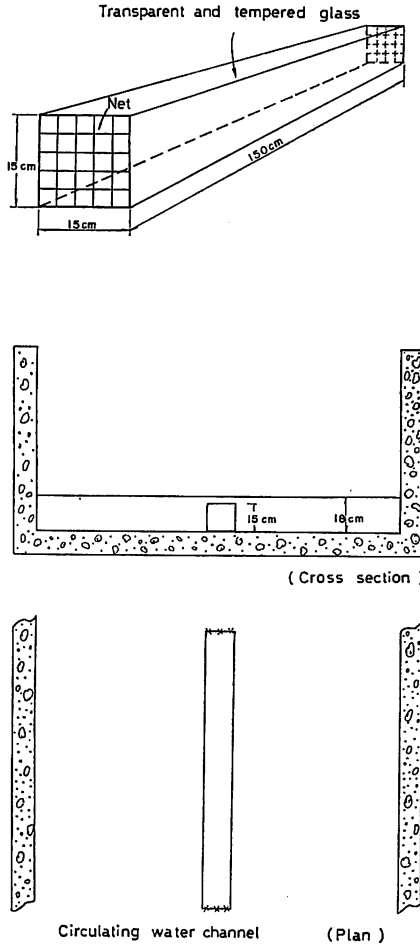
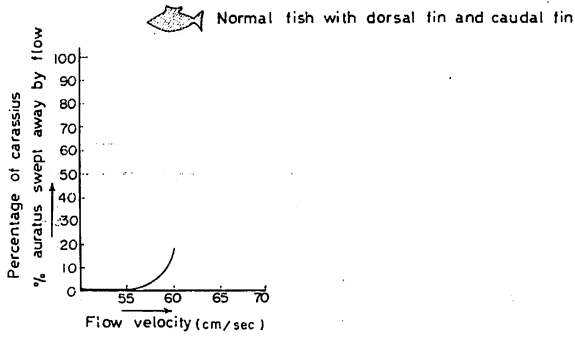
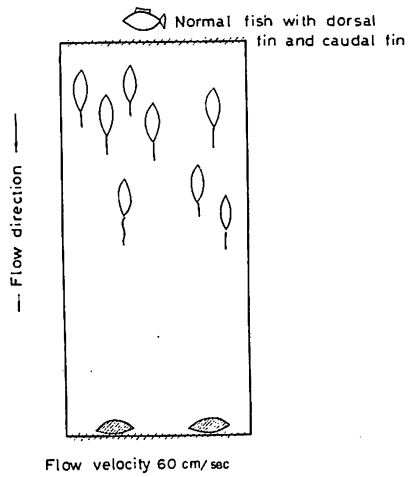


Fig. VI-7 Apparatus for observing the swimming fish.



(a) Tendency of increasing rate of no. of fishes swept away by flow



◐ Fish swept away by flow

(b) Aspect of swimming motion of fishes at max. flow velocity 60 cm/sec

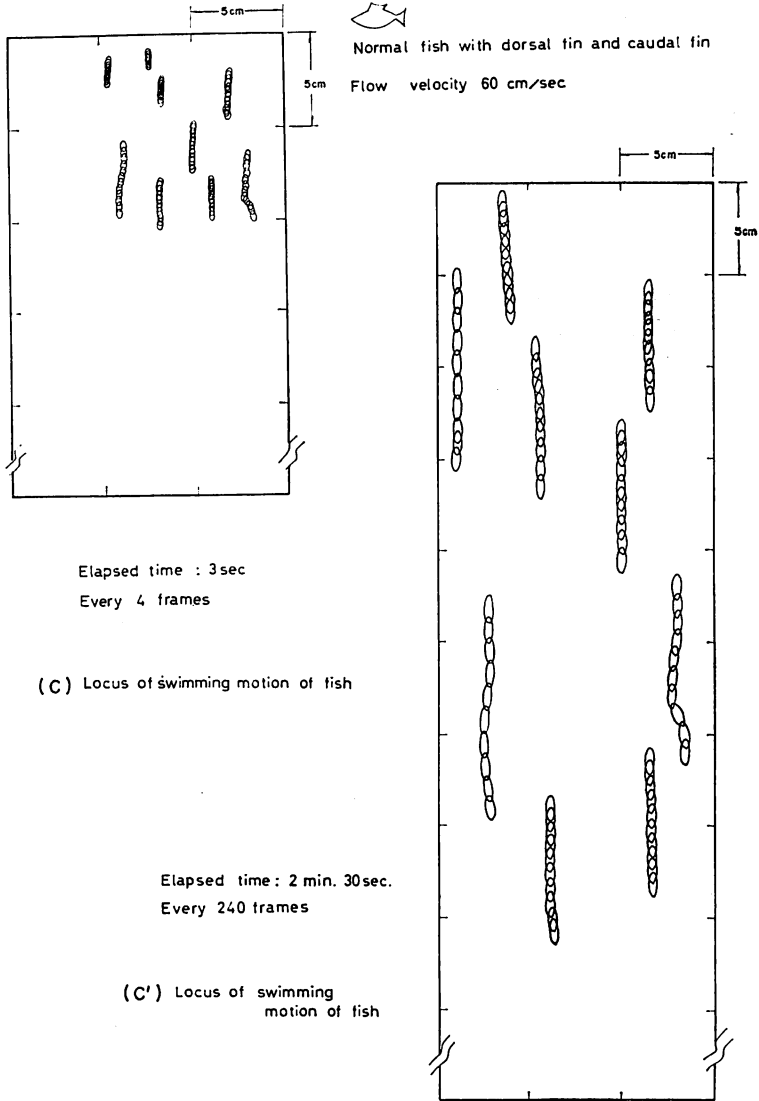
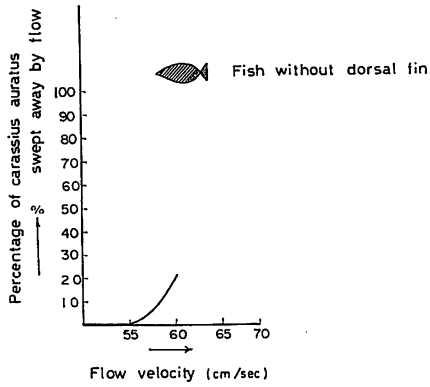
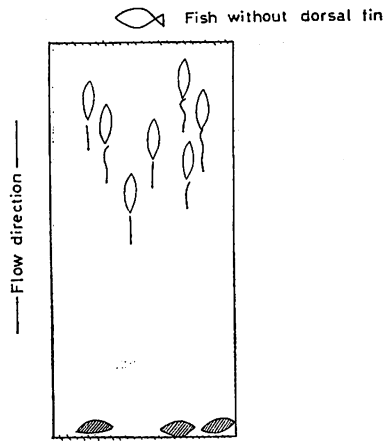


Fig. VI-8-① Swimming motion of normal fishes with dorsal fin and caudal fin,



(a) Tendency of increasing rate of no. of fishes swept away by flow



Flow velocity 60 cm/sec

● Fish swept away by flow

(b) Aspect of swimming motion of fishes at max. flow velocity 60 cm/sec

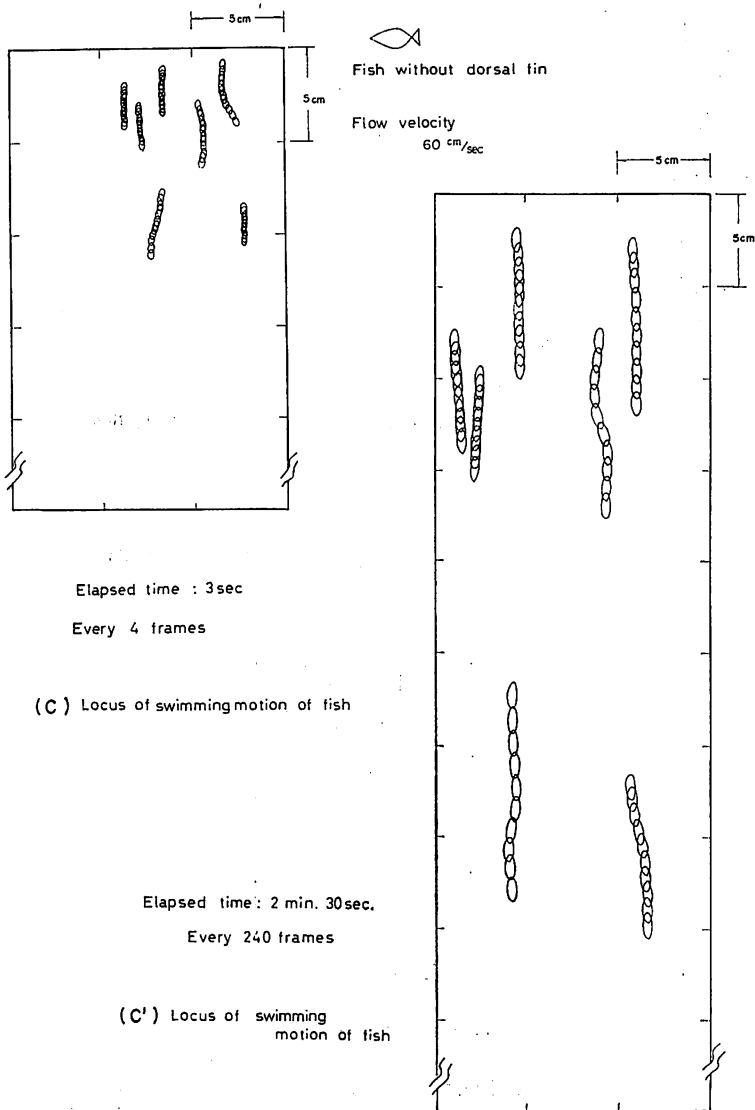
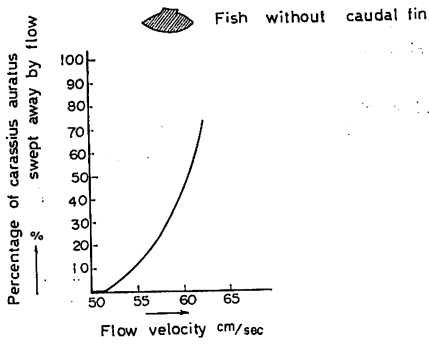
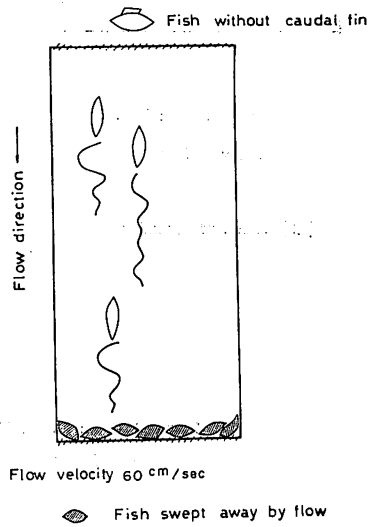


Fig. VI-8-② Swimming motion of fishes with no dorsal fin.



(a) Tendency of increasing rate of no. of fishes swept away by flow



(b) Aspect of swimming motion of fishes at max. flow velocity 60 cm/sec

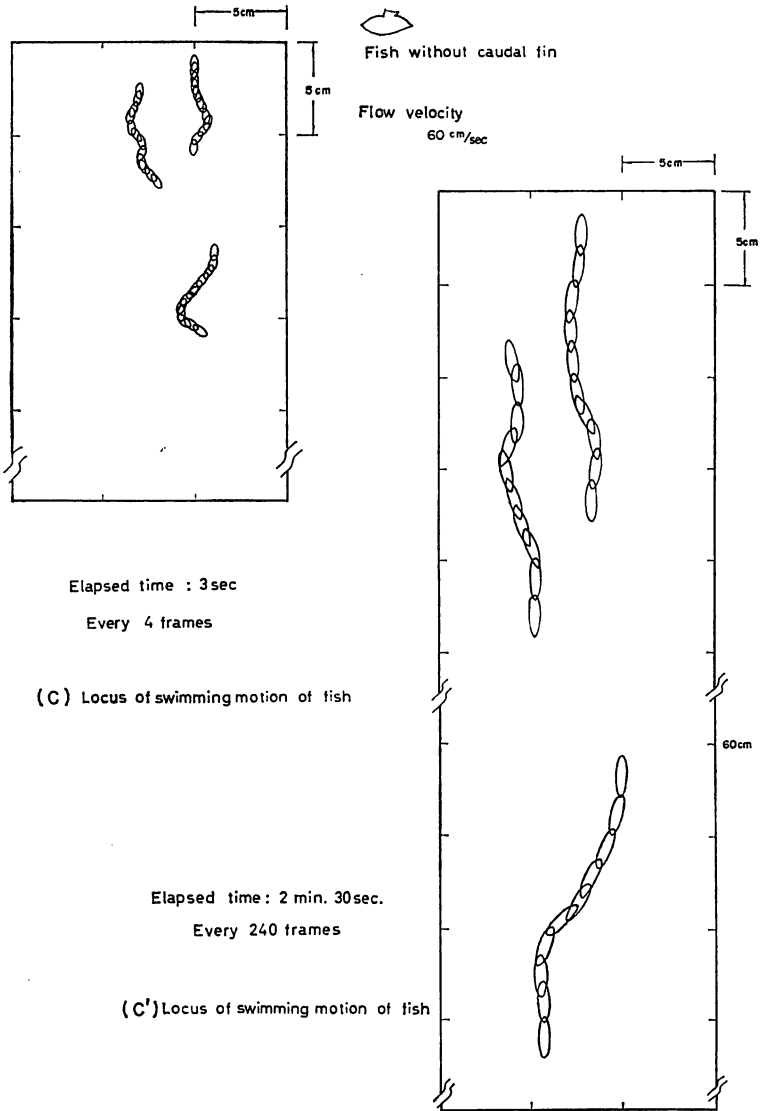
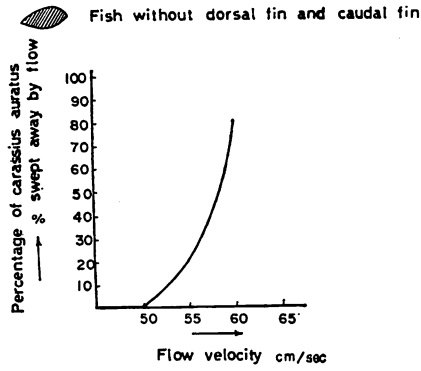
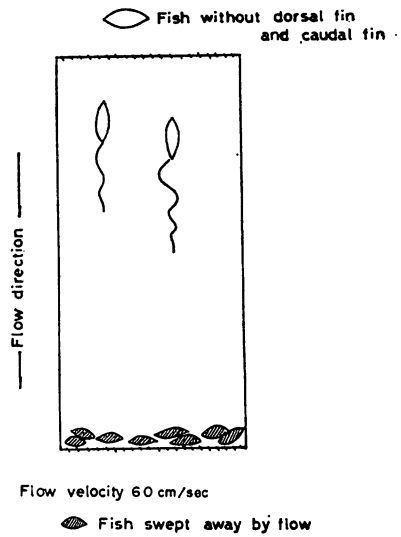


Fig. VI-8-③ Swimming motion of fishes with no caudal fin.



(a) Tendency of increasing rate of no. of fishes swept away by flow



(b) Aspect of swimming motion of fishes at max. flow velocity 60 cm/sec

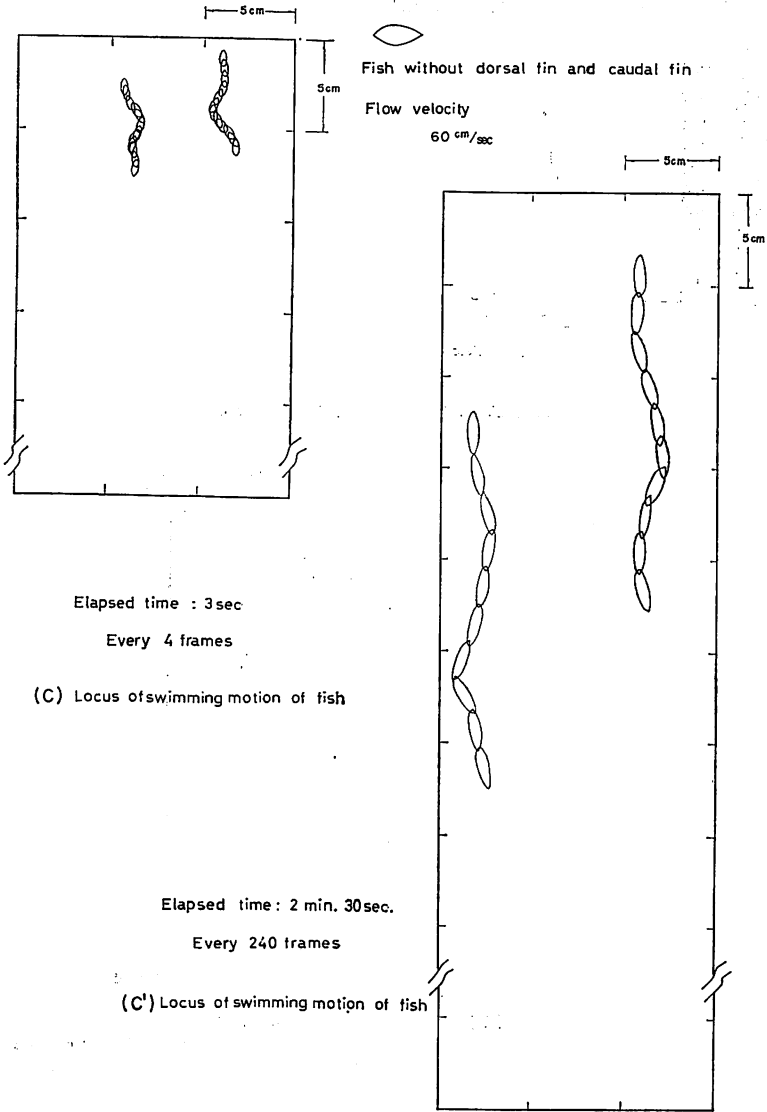


Fig. VI-8-④ Swimming motion of fishes with no dorsal fin and caudal fin.

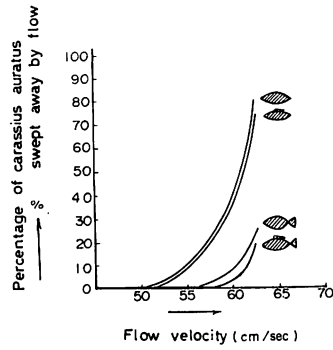


Fig. VI-9 Relation between swimming motion of fishes and fin-effects.

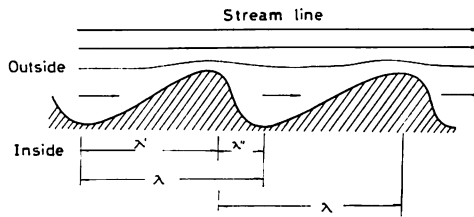


Fig. VII-1 Progressive wave upon epidermis (dolphin, fish).

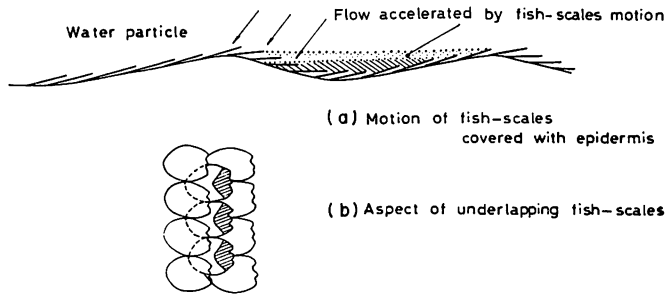


Fig. VII-2 Generation of thrust by fish-scale motion.

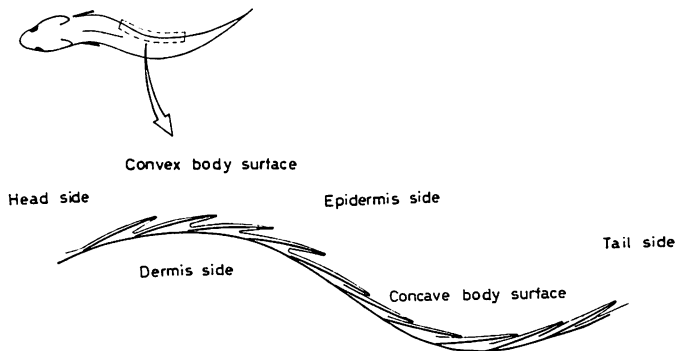


Fig. VII-3 The features of fish-scales on the concave and the convex body-surfaces.

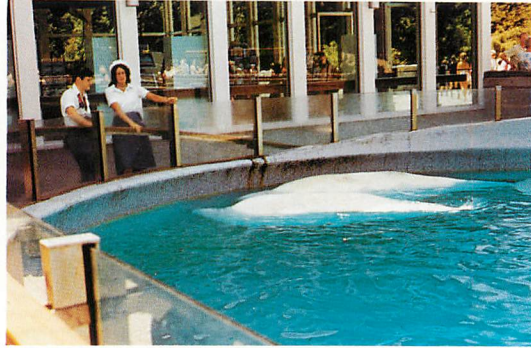


Photo VII-1 Arctic white whales and B. C. Tel pool (Vancouver aquarium).



Photo VII-2 Swimming motion of arctic white whale.

Appendix - Figures and - Tables

App. Table II-1 Distribution of flow-speed at point (x,y)
in vertical cross section.

V.S Motor (r.p.m.)	X(m) Y(m)	-0.90	-0.60	-0.30	0	+0.30	+0.60	+0.90
		(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
100	0.050	0.14	0.16	0.18	0.18	0.19	0.18	0.16
	0.175	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17
	0.300	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	0.425	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	0.550	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18
200	0.050	0.24	0.26	0.29	0.28	0.29	0.28	0.26
	0.175	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28
	0.300	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28
	0.425	0.28	0.29	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28
	0.550	0.27	0.26	0.27	0.31	0.29	0.29	0.29
300	0.050	0.36	0.39	0.43	0.43	0.44	0.42	0.40
	0.175	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.43
	0.300	0.41	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.43
	0.425	0.43	0.45	0.45	0.46	0.45	0.45	0.43
	0.550	0.41	0.44	0.44	0.47	0.43	0.45	0.45
400	0.050	0.55	0.57	0.58	0.57	0.57	0.57	0.57
	0.175	0.56	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.56
	0.300	0.55	0.57	0.58	0.58	0.58	0.57	0.56
	0.425	0.48	0.54	0.57	0.58	0.58	0.55	0.51
	0.550	0.51	0.52	0.58	0.55	0.58	0.57	0.51
500	0.050	0.57	0.60	0.73	0.73	0.73	0.73	0.62
	0.175	0.71	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72
	0.300	0.71	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72
	0.425	0.66	0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.71
	0.550	0.63	0.58	0.65	0.72	0.70	0.68	0.70
600	0.050	0.71	0.76	0.83	0.78	0.87	0.76	0.74
	0.175	0.86	0.88	0.88	0.87	0.88	0.88	0.85
	0.300	0.80	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88
	0.425	0.83	0.87	0.87	0.88	0.88	0.83	0.88
	0.550	0.78	0.78	0.78	0.88	0.78	0.85	0.82
700	0.050	0.76	0.91	0.93	0.87	0.96	0.93	0.85
	0.175	0.97	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.97
	0.300	0.92	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
	0.425	0.92	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.97
	0.550	0.88	0.81	0.91	0.96	0.79	0.91	0.91
800	0.050	0.91	1.10	1.10	1.10	1.06	1.05	0.90
	0.175	1.08	1.13	1.11	1.11	1.11	1.11	1.05
	0.300	1.05	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.06
	0.425	1.05	1.11	1.11	1.11	1.10	1.11	1.08
	0.550	1.00	0.97	0.80	1.11	0.80	1.11	1.03

X: Distance from centre line in m.

Y: Water depth in m.

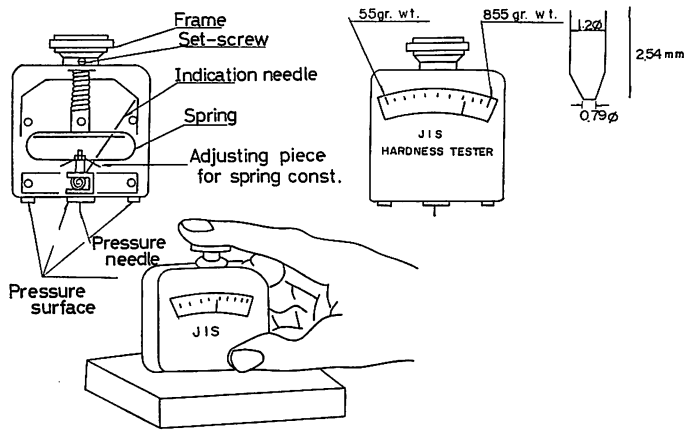


Fig. (app.)-1 Inner-construction-profile of JIS hardness-tester.

Table (app.)-1 Comparison of the Shore-hardness between the live scombroid and the dead one.

Measurement point Fish no	Body length cm	(A)	(B)	(C)	(D)	Measurement point Fish no	(A)	(B)	(C)	(D)
1	40	19	24	13	10	1	8.0	3.0	10.5	14.0
2	30	15	9	13	20	2	12.0	12.0	8.0	12.0
3	35	13	14	14	19	3	18.0	18.0	24.0	23.0
4	40	20	14	12	15	4	19.0	18.0	21.0	22.0
5	—	11	22	14	19	5	11.0	14.0	13.0	32.0
6	—	19	5	12	21	6	15.0	21.0	16.0	35.0
Mean		16.2	13.0	13.0	17.3	7	20.0	25.0	18.0	34.0
(The live scombroid)						Mean	14.7	16.0	15.8	24.6
						(The dead scombroid)				

Mean shore hardness of fish body	Measurement point	(A)	(B)	(C)	(D)
The live scombroid		16.2	13.0	13.0	17.3
The dead scombroid		14.7	16.0	15.8	24.6

Measurement point for shore hardness

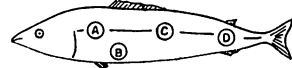


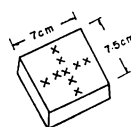
Table (app.)-2 Change of hardness of test pieces.

Silicone oil	0 %	0 %	0 %	0 %	5 %	5 %	5 %	5 %
Catalyzer	CE60 05%	CE61 01%	CE61 05%	CE61 10%	CE60 05%	CE61 01%	CE61 05%	CE61 10%
Date of making	41.12.22	41.12.17	41.12.18	41.12.20	41.12.15	41.12.15	41.12.15	41.12.15
Date of measurement	41.12.23	26.4	47.8	46.4	42.4	27.6	38.2	40.4
	42.1.28	38.0	47.8	47.2	42.4	29.1	39.2	40.9
Silicone oil	10 %	10 %	10 %	10 %	15 %	15 %	15 %	15 %
Catalyzer	CE60 05%	CE61 01%	CE61 05%	CE61 10%	CE60 05%	CE61 01%	CE61 05%	CE61 10%
Date of making	41.12.16	41.12.16	41.12.16	41.12.16	41.12.22	41.12.17	41.12.18	41.12.20
Date of measurement	41.12.23	20.0	40.4	35.6	33.0	14.2	29.6	31.6
	42.1.28	21.2	33.5	35.5	33.7	20.4	31.1	31.5
Silicone oil	20 %	20 %	20 %	20 %	25 %	25 %	25 %	25 %
Catalyzer	CE60 05%	CE61 01%	CE61 05%	CE61 10%	CE60 05%	CE61 01%	CE61 05%	CE61 10%
Date of making	41.12.22	41.12.17	41.12.18	41.12.20	41.12.22	41.12.17	41.12.18	41.12.20
Date of measurement	41.12.23	11.6	27.2	28.6	25.0	9.4	24.4	24.6
	42.1.28	17.9	27.5	29.6	25.6	12.9	24.4	25.0

Table (app.)-3 Change of mean-hardness of silicone rubber (silicone oil 25%, CE60 0.5%) for a month immediately after its making.

C	B	A	1	2	3	4	5	6
43.1.20	12.0	9.89	9.33	9.33	9.56	9.78	9.44	
1.21	10.5	10.67	10.22	10.11	10.67	10.67	10.44	
1.25	15.0	13.20	12.60	12.60	13.30	13.10	12.40	
1.29	15.0	14.30	13.80	13.60	14.40	14.20	14.10	
2.13	10.8	16.20	16.00	15.90	16.30	16.20	16.10	

- A : Thickness of test piece (cm)
- B : Room temp. (°c)
- C : Date of measurement



Test piece

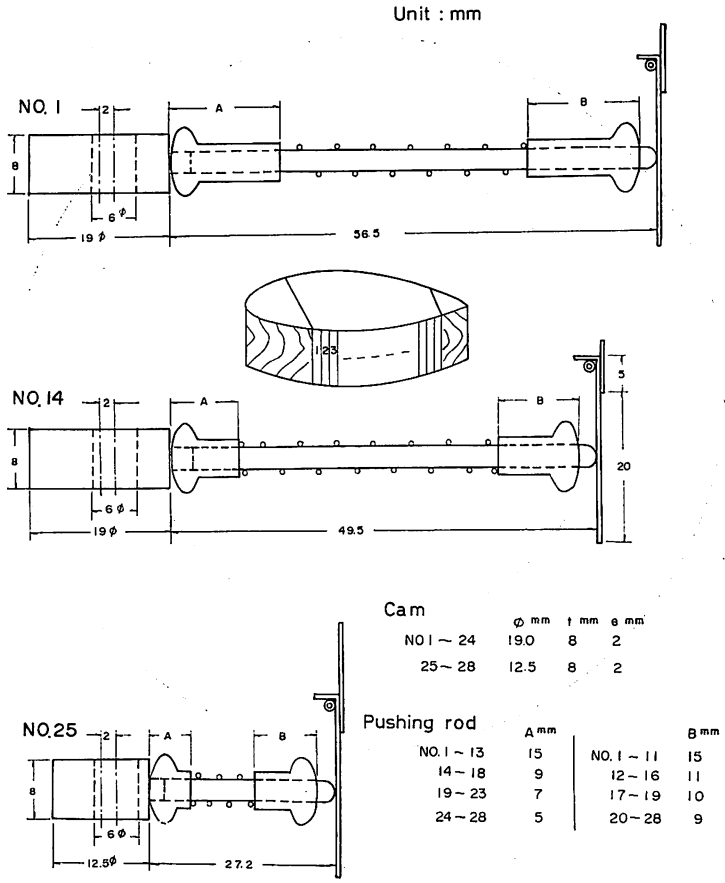
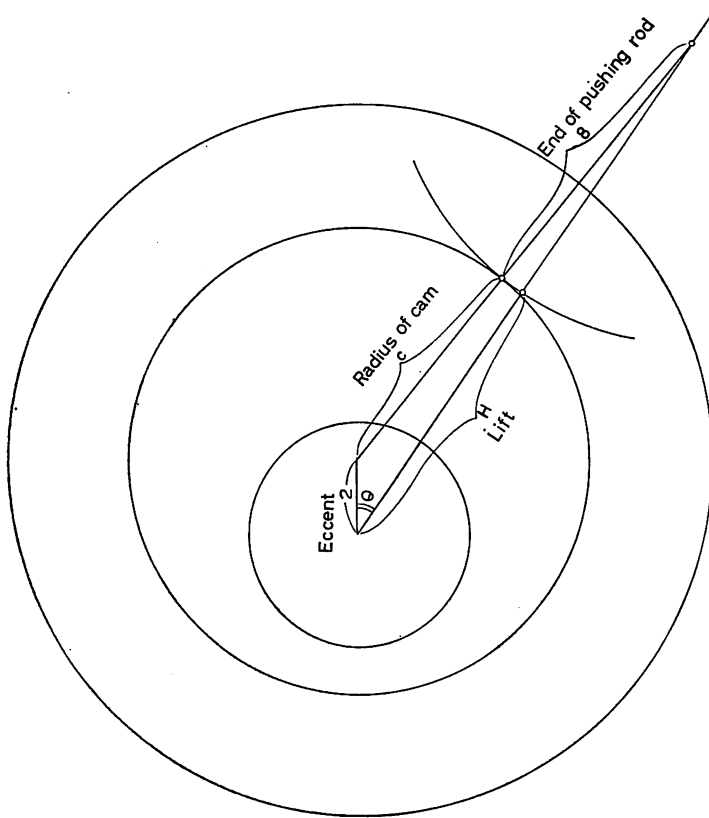


Fig. (app.)-2 Details of cam and pushing-rod.



$$H = 2 \cos \theta \pm \sqrt{(C + B)^2 - 4 \sin^2 \theta} - B$$

Large cam : 19ϕ , $C = 9.5$

$$HL = 2 \cos \theta + \sqrt{306.25 - 4 \sin^2 \theta} - 8$$

Small cam : 12.5ϕ , $C = 6.25$

$$H_s = 2 \cos \theta + \sqrt{203.06 - 4 \sin^2 \theta} - 8$$

Fig. (app.)-3(a) Calculation of cam-lift

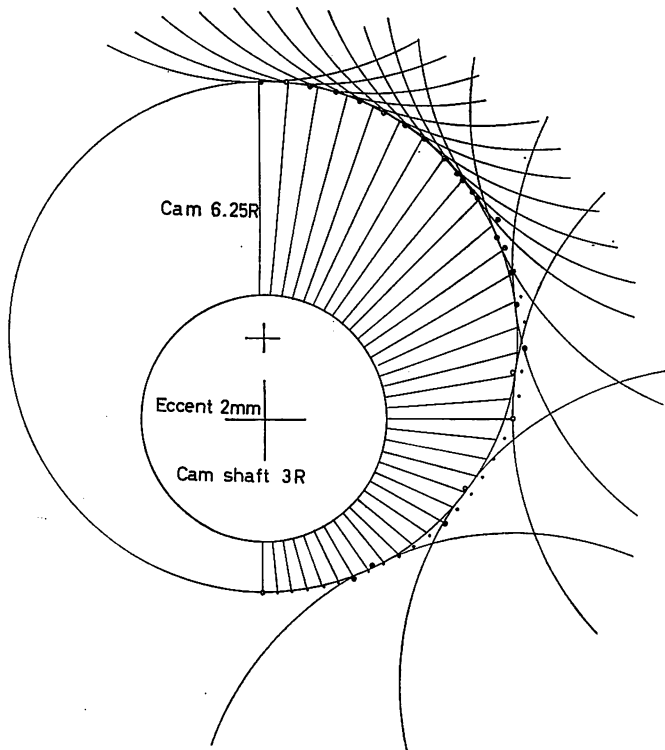


Fig. (app.)-3(b) Lift of small cam 12.5 ϕ .

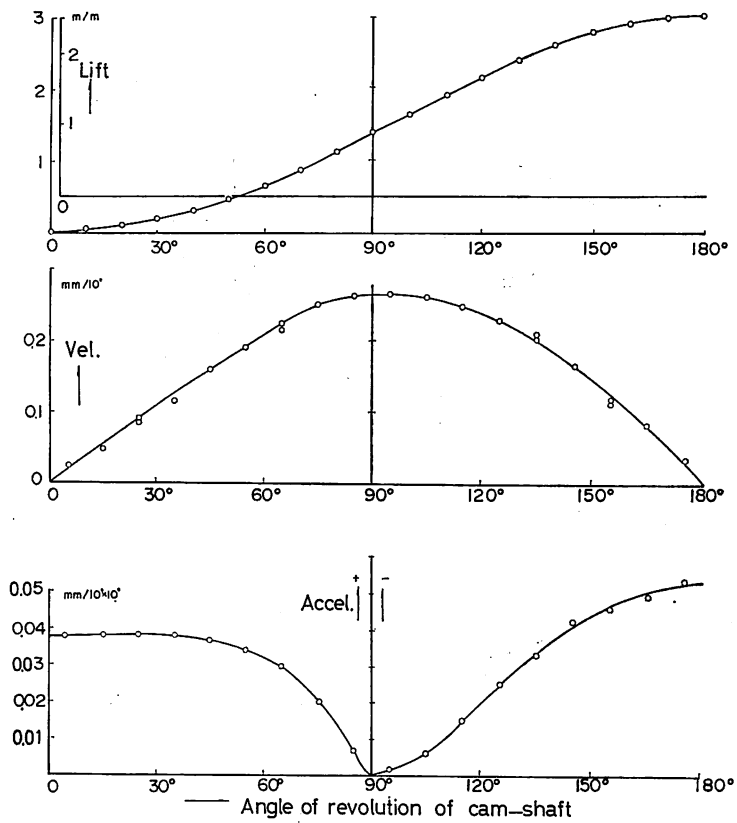


Fig. (app.)-4(a) Cam-diagram of large cam 19 φ.

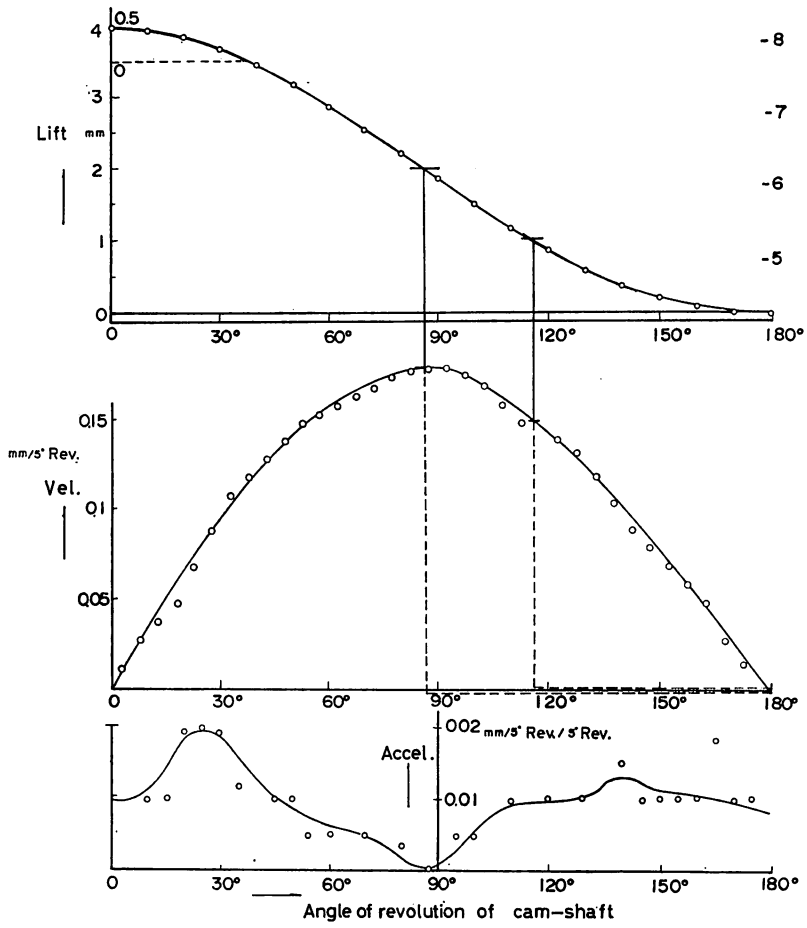


Fig. (app.)-4(b) Cam-diagram of small cam 12.5 φ.