

鱗動進行波による推力発生の可能性について*

中山 博**・奈良迫 嘉一**・黒木 敏郎***

On the thrusting-occurrence-possibility by the movement of the scale plates

Hiroshi NAKAYAMA, Yoshikazu NARASAKO and Toshiro KUROKI

Abstract

Wiggle-motion of a fish causes an opening to be made between the scales in the direction of body-breadth.

Irrespective of the small breadth of the opening, if the scale-rising on the body-surface is slow on the convex-side of the wiggle, returning quickly to the former state on the concave-side of it, the occurrence of thrusting is assumed.

This thrusting is supposed to decrease the swimming-resistance of fish in cooperation with the effect of the progressive-wave of the scale plates, running from forward to backward.

In order to ascertain this, a two-dimensional large-fish-scale model was made, and the following were investigated by experiments, existence of thrusting-occurrence, the scope and variations, e. t. c. .

The results are as follows: —

- (1) It was observed that the production of thrusting which is followed by a running of current, is to be brought forth by the movement of scale plates which are opening slowly and closing quickly.

It was confirmed that the shorter is the period of the movement, the faster is the current running along the scale plates; the maximum speed of the current being 14.5 cm/sec , the maximum of the dynamical pressure of the current being 7199.2 dyn/cm^2 (7.3 gr.wt./cm^2).

- (2) The water in the water-way began to circulate about 3 minutes after it started to move the scale plates, and about 10 minutes had passed before the current was settled.

1. 緒 言

水中に棲む魚類が高速で泳げるのは流線形と云う基本的に流体抵抗の少ない体形であることは勿論であるが、魚の遊泳抵抗を減少させる要因が他にも色々と存在するであろうことが考えられる。

* 本研究の要旨は昭和51年4月、日本水産学会春季大会で発表した。

** 鹿児島大学水産学部漁船工学研究室 (Laboratory of Engineering of Fishing Vessel, Faculty of Fisheries, Kagoshima University)

*** 東京水産大学海洋環境測定工学講座 (Laboratory of Environmental Instrumentation Engineering, Tokyo University of Fisheries)

例えば

- 1) 軟体表皮による乱流発生の抑圧 (受動的効果)
- 2) 魚体表皮に沿って高分子の粘液が分泌されることによる層流安定の確保 (粘液効果)
- 3) 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
- 4) Active Skin による層流安定の確保 (能動的効果)
- 5) Fluttering fin の効果

等¹⁾ がそれである。

本論文では之迄触れられていない魚の個々の鱗板群の運動効果について推力発生の立場から検討した。

魚の鱗は魚体のくねり運動に伴って体幅方向に開きを生ずると考えられる。その量はたとえ、わずかでも鱗がくねりの外側の体表でゆっくり持ち上がり、くねりの内側の体表で元の状態に速やかに戻る、いわゆる quick return 運動をするとすれば、推力の発生することが考えられる。これは前から後へ移動する鱗板進行波の効果と相まって魚の遊泳抵抗を減少させる要因ともなり得るであろう (Fig. 1 (a), (b)²⁾).

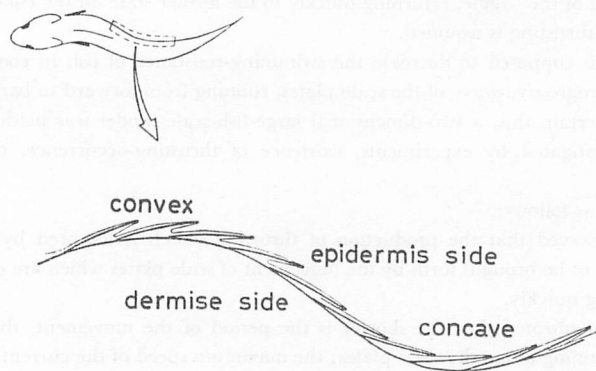


Fig. 1 (a). The features of fish-scales on the concave and convex body-surface.

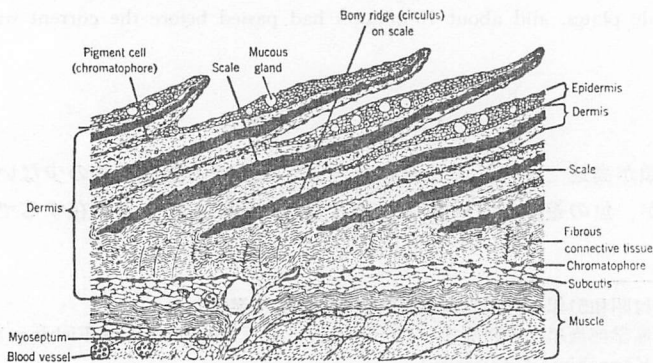


Fig. 1 (b). Section of fish skin. Source: General Biological Supply House.
(from E. Lagler · E. Bardach · R. Miller 1962, *ICHTHYOLOGY*)

さて鱗板の運動効果については先に著者等が行なった Active Skin 模型（ビニール膜を表面に貼らず）の抵抗試験結果によれば³⁾ 進行波による抵抗減少は認められず反って抵抗値は増大した。これは個々の鱗板が単振動を行うため、発生する一次流れの強さは往路も復路も同じで方向が逆であるから互いに干渉して安定した二次流れを生じないで渦抵抗の増大をもたらしたものとみられる。これに対し松井の論文⁴⁾ の示唆によれば、鱗板が quick return 運動を行うと quick 行程でより強い二次流れを生じ、之によって鱗板表面に亘って安定した二次流れの存続、従って推力発生の可能性が考えられる。

この様な仮設のもとに実験的にこれらの事実を確かめるために大型二次元鱗板模型を作り推力発生の有無、その規模、流れの変化等を調べた。

2. 実験装置と方法

大型二次元鱗板模型

構造は Fig. 2 (a) に示す様な内外二重楕円の箱型水槽で内部楕円の直線部側壁に接続して、No. 1, No. 2, No. 3 の順に大型鱗板 3 枚を取り付けてある。鱗板は縦 10cm, 横 15cm, 厚み 0.1cm の薄い鉄板製で隣接鱗板との重なりは 6cm である。この鱗板を Fig. 2 (b) に示す様な揚程曲線（カム軸の回転角、零度から180度までは揚程零、180度から360度まで単弦運動

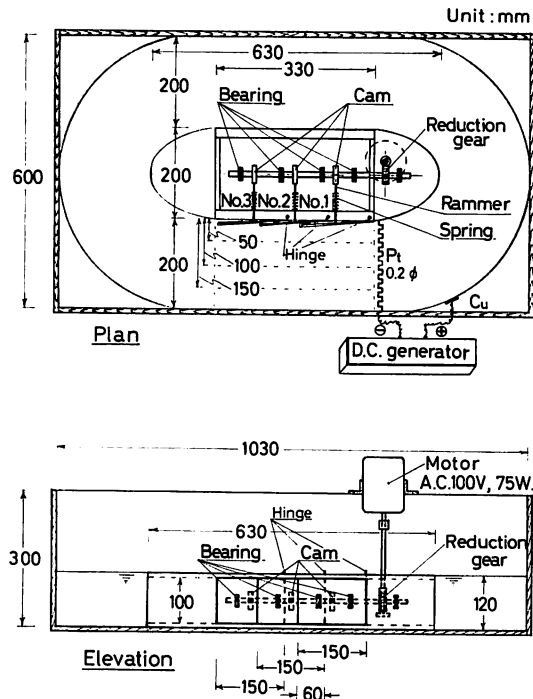


Fig. 2 (a). The two-dimensional large-fish-scale model.

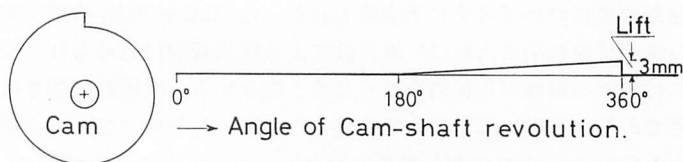


Fig. 2(b). The cam diagram.

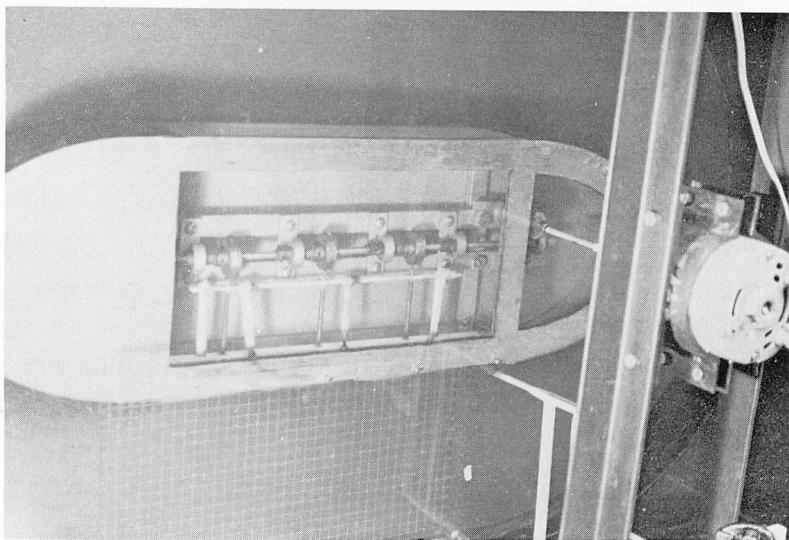


Fig. 2(c). Photograph of experimental apparatus. The two-dimensional large-fish-scale model.

にて次第に上昇，最大揚程 3mm ，次の瞬間，零度で零に急降下する）を持つカムを利用して，鱗板が開く時はゆっくり，閉じる時はバネの力で急速に閉じる様にしてある．3個のカムはそれぞれ 120° 宛ずらしてあり，その結果，鱗板は最大開き先端にて 6mm ，位相差 120° で緩開急閉の繰返し運動を行う事が出来る．尚，鱗板の外側には魚の表皮に似せて，厚さ 0.06mm のビニール膜を被せ，鱗板の重なり 6cm の部分にもビニール膜を折り込んで膚接させてある (Fig. 2 (c)).

流れの可視化（水素気泡法）

鱗板側の水路の流れ（鱗板による推力の発生）を可視化する目的で水素気泡法^{5), 6), 7)}を用いた．

実験では陰極線に直径 0.2mm の白金細線を用い，これを 5mm 間隔にキック状に曲げ水深 6cm の所に水平に設置，陰極は水路の水の流れを乱さない様に水槽外壁に縦 16cm ，横 4cm の銅板を貼った．水素気泡の発生には，可変直流定電圧定電流電源 (PAD110-5) を使用し両極間に直流電圧 $100\sim 110\text{V}$ ，電流 $0.1\sim 0.6\text{A}$ を印加した．

流速測定

鱗板開閉周期 0.96秒 ， 0.46秒 ， 0.32秒 ， 0.25秒 ， 0.20秒 ， 0.17秒 を設定し，Motor 始動時

より20秒, 40秒, 60秒, 80秒, 100秒, 120秒経過毎に1秒間隔でパルス電圧を印加し, 水素気泡を流し, 写真撮影により水素気泡流の長さから流速を求め静止状態からの流れの過渡現象を調査した (Fig. 3 参照).

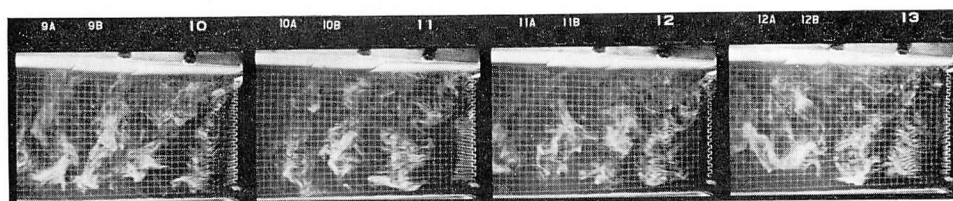
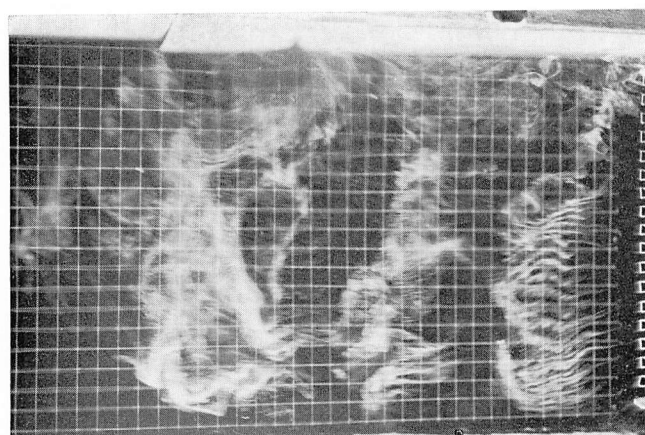


Fig. 3. Photograph of flowing pattern in water channel. Scale period 0.96 sec.
ASA 200, 1/8, 6 I: 0.1 amp., E: 100 volt.

その後5分, 10分, 20分, 30分, 40分, 50分, 60分経過毎に流速変化を求めた (Table 1 (a), (b); Fig. 5, 6 参照). 尚流速測定の写真撮影には鱗板開閉の影響を考慮して, 夫々時間差10秒の開きで2枚の写真を撮り, 観測点群は鱗板外壁より5cm, 10cm, 15cmとした. 又始動後1時間までの流速測定に続いて, 更に長期の流速変化を調べるため鱗板開閉周期0.4秒での連続実験を行った. 即ち, Motor 始動時より10分, 20分, 30分, 40分, 50分, 60分以降は1時間毎に水素気泡を発生させ連続45時間迄の流速変化を求めた (Table 2 参照).

水素気泡流の長さを写真で読み取るために, 流速測定部分の底板に1cm 間隔の方眼目盛が黒地に白く引かれている.

流動圧の測定

半導体小型圧力変換器 (TOYODA PMS-5) を使用し, Fig. 4(a) に示す様に直流増幅器 (THA-I) を通して, 直記式電磁オシログラフ (TYPE-2901) で記録した. 又圧力変換器を測定個所に設置するため, バンドで固定し, それを縦33cm, 横2cm, 厚み0.3cmの亚克力板のアームに取り付けた. 測定は前述の水素気泡による流速測定と同様, 鱗板の中央部水

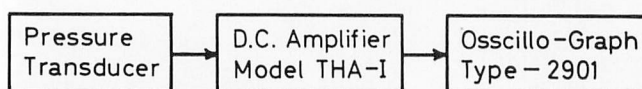
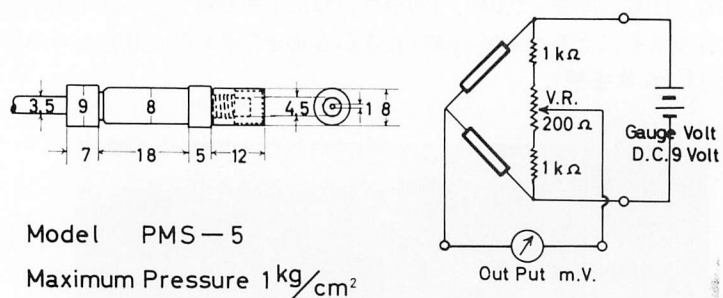


Fig. 4(a). Pressure transducer of miniature type semiconductor: Block-diagram showing pressure measurement.

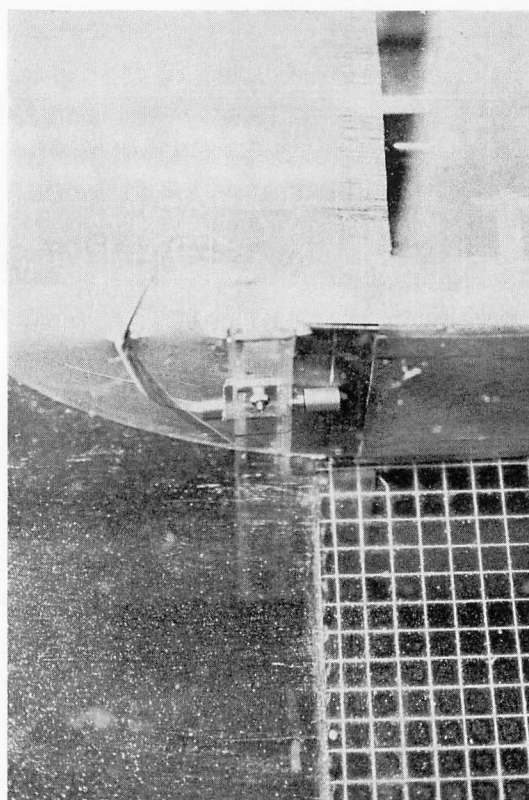


Fig. 4(b). Photograph of experimental apparatus (for measuring the dynamical pressure of current).

深 6cm の所とし、鱗板後方 1cm の所に圧力変換器を水平に設置した (Fig. 4(b)). 又, No. 1, No. 2 の鱗板後方の圧力測定には, すぐ後の鱗板の開閉の影響を考え, すぐ後の鱗板の最大開きに圧力変換器の先端を合わせ模型直線部と12度の角度で設置した. 尚, No. 3 の鱗板後方の測定時の圧力変換器は模型直線部に平行に接触させた. 鱗板開閉周期を0.60秒, 0.40秒, 0.30秒, 0.24秒, 0.20秒の5段階について流動圧を測定した.

測定方法は記録紙に基準目盛として, 水深 6cm, 9cm, 12cm の静水中における水圧を記録させ, 水の密度を ρ [g/cm³] として, 水位 3cm の圧力差を $3\rho g$ [dyn/cm²] に押える.

之に対応する記録紙上の基準目盛からの変位量を a cm とすると圧力変換器設置場所の流動圧は $3\rho g \times \text{変位 [cm]} / a$ [cm] [dyn/cm²] 本例では, 圧力変換器の設置水深 6cm のそれを基準目盛とした.

3. 実験結果及び考察

鱗板の quick return 運動により推力流が起こり水が循環 (写真では右から左の方へ) を始める. その時の流れの模様の 1 例を水素気泡流で可視化すると Fig. 3 となる. この場合鱗板の開閉運動によって水粒子の往復運動と渦発生との影響を受ける範囲は鱗板表面より外側へ約 6cm のあたりまでであった.

各鱗板開閉周期における流速の測定結果を Table 1(a), (b); Fig. 5, 6 に示す. 各鱗板

Table 1(a). The relations between the flowing-speed and the time elapsed in each scale-period.

Scale Period (sec.)	Time Elapsed (min.)	Measuring Points			
		E (cm/sec.)	F (cm/sec.)	G (cm/sec.)	Mean (cm/sec.)
0.96	5	4.5	3.50	4.75	3.94
	10	3.0	4.00	4.25	
	20	3.75	3.00	3.50	
	30	2.75	3.25	5.50	
	40	3.00	5.50	5.25	
	50	3.25	4.50	4.50	
	60	3.00	3.75	4.25	
0.46	5	4.00	3.50	4.50	5.83
	10	4.75	6.25	6.75	
	20	5.00	5.75	7.50	
	30	6.00	6.00	7.25	
	40	5.25	6.00	6.75	
	50	4.25	5.50	8.50	
	60	5.75	6.25	7.00	
0.32	5	5.00	6.00	7.00	6.95
	10	7.00	7.25	8.00	
	20	5.00	5.75	8.50	
	30	6.00	6.50	8.00	
	40	7.00	7.00	8.25	
	50	7.00	6.25	8.25	
	60	6.00	7.75	8.50	

E: Measuring values at the points 5 cm away from the scale-wall.

F: Measuring values at the points 10 cm away from the scale-wall.

G: Measuring values at the points 15 cm away from the scale-wall.

Table 1(b). The relations between the flowing-speed and the time elapsed in each scale-period.

Scale Period (sec.)	Time Elapsed (min.)	Measuring Points			Mean (cm/sec.)
		E (cm/sec.)	F (cm/sec.)	G (cm/sec.)	
0.25	5	6.50	7.50	9.00	7.83
	10	6.50	7.50	8.75	
	20	6.00	6.00	8.00	
	30	5.50	8.50	9.00	
	40	—	8.00	7.00	
	50	—	7.00	11.00	
	60	6.50	8.00	11.75	
0.20	5	7.50	12.00	12.00	9.88
	10	—	11.50	—	
	20	—	9.00	—	
	30	6.00	11.50	9.75	
	40	—	12.00	8.50	
	50	—	9.00	—	
	60	—	—	—	
0.17	5	14.50	11.50	11.50	9.22
	10	8.00	9.50	12.25	
	20	8.00	7.00	9.00	
	30	—	10.00	8.00	
	40	—	9.00	8.00	
	50	—	8.00	10.00	
	60	—	7.00	8.25	

E: Measuring values at the points 5 cm away from the scale-wall.

F: Measuring values at the points 10 cm away from the scale-wall.

G: Measuring values at the points 15 cm away from the scale-wall.

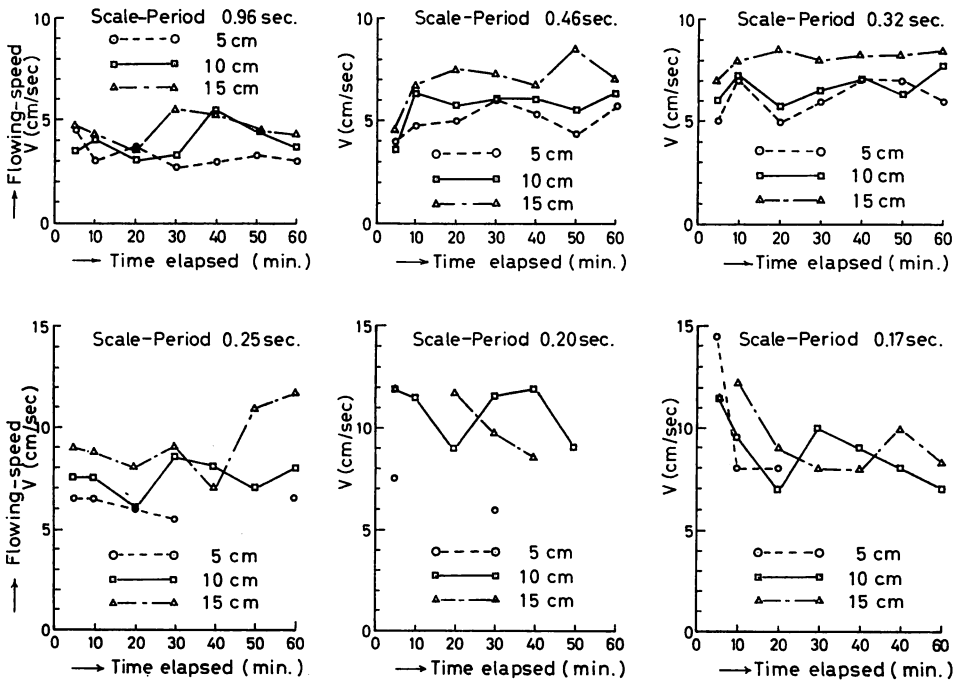


Fig. 5. The relation between the time elapsed and flowing-speed at each scale-period.

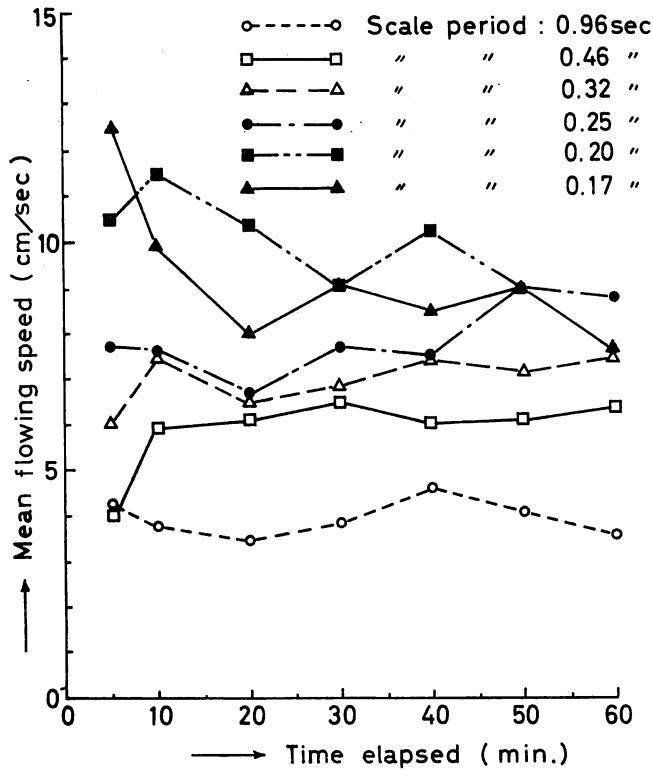


Fig. 6. The relation between the time elapsed and the mean flowing-speed at each scale-period.

開閉周期における平均流速では経過時間による流速増加は認められない。又、鱗板開閉周期 0.20sec, 平均最大流速 9.88cm/sec までは周期が短くなる程、鱗板部の流速は増加しているが、開閉周期 0.17sec 以下になると逆に平均流速は減少している。その理由は鱗板開閉周期が短くなると薄鉄板であるため鱗板の剛性不足と水の動圧によるたわみによって実際には鱗板の開閉作用が充分に行われていないためと考えられる。

更に 1 時間以降の流速変化を調べるために行った連続実験の結果を Table 2 に示す。最初 48 時間連続実験の予定であったが、鱗板突き棒の摩擦によるカムの摩擦が激しく、又 Motor の過熱による回転の不安定等のため 45 時間で実験を中止せざるを得なかった。

一般に水深 6cm の水流は Motor 始動後、約 3 分で循環し始め、流速整定まで約 10 分を要した (Fig. 5 参照)。

次に流動圧の測定結果を Table 3, Fig. 7 に示す。No. 1, No. 2 の鱗板では閉じる瞬間、すぐ後の鱗板が既に 1/3 (鱗板の先端で 2mm) だけ開いており、No. 3 の鱗板のみ完全に閉じる事が可能である。このような装置の構造上、No. 1, No. 2, No. 3 の鱗板はそれぞれ少しずつ運動条件が異なっており、この中で魚の鱗の重なりに近い運動を行うのは、No. 2 鱗板と考えられる。この鱗板群の流動圧は、鱗板開閉周期 0.40sec から 0.30sec で急激に増大し、0.30sec から 0.20sec にかけて減少している。之は流速測定の所で述べた様に鱗板の剛性不足と水の動圧によるたわみによって鱗板が開閉作用を充分に行っていないためと考えられる。

一般に周期が短くなると流動圧(推力)は増加する。即ち魚の鱗がくねりの外側の体表でゆっくり持ち上がり、くねりの内側の体表でもとの状態にすみやかに戻る、いわゆる quick return 運動をすれば推力の発生が認められる。一方、予備実験として行ったアルミ粉による流れの可視化でも quick 行程でより早い流れが生じ slow 行程でそれが壊される事なく安定した quick 行程方向の流れ、いわゆる推力流れを生じている事が確かめられた。

この様に模型実験では鱗動による推力の発生が認められたが果して実際の生魚の鱗ではどの様になるのか、1例として全長 20cm のコイをウレタン 1% 溶液に 5 分間浸し、麻酔をかけた状態で空气中に於いて、手で体幅方向に約 120 度前後、彎曲させた (Fig. 8)。

肉眼的には鱗は長さで互いに 2/3 程度の重なりがあり、外側に少し凸出した彎曲面をもち

Table 2. The relations between the flowing-speed and the time elapsed in the 0.40 sec-
ond scale-period.

Time Elapsed	Measuring Points				Time Elapsed	Measuring Points			
	E (cm/sec.)	F (cm/sec.)	G (cm/sec.)	Mean (cm/sec.)		E (cm/sec.)	F (cm/sec.)	G (cm/sec.)	Mean (cm/sec.)
10 min	7.50	9.50	8.75	8.58	21 hour	—	6.50	9.25	7.88
20	9.25	8.75	7.25	8.42	22	—	8.25	8.25	8.25
30	9.00	9.25	8.50	8.92	23	—	—	—	—
40	7.50	5.75	8.00	7.08	24	—	6.75	9.75	8.25
50	9.50	8.25	8.00	8.58	25	—	7.75	8.00	7.88
1 hour	9.00	8.50	9.50	9.00	26	—	6.00	6.25	6.13
2	8.00	7.75	10.50	8.75	27	—	6.00	6.75	6.38
3	7.25	9.25	9.00	8.67	28	—	6.75	8.50	7.63
4	8.50	8.75	7.00	8.08	29	—	6.75	8.00	7.38
5	8.50	9.50	10.00	9.33	30	—	7.50	8.50	8.00
6	—	8.00	11.00	9.50	31	—	8.00	8.25	8.13
7	—	9.75	10.00	9.88	32	—	7.50	8.75	8.13
8	—	10.00	9.75	9.88	33	—	7.00	6.75	6.88
9	—	8.00	10.25	9.13	34	—	7.00	7.00	7.00
10	—	9.50	10.25	9.88	35	—	6.00	7.50	6.75
11	—	7.75	8.75	8.25	36	—	7.00	7.25	7.13
12	—	11.75	9.25	10.50	37	—	5.75	6.00	5.88
13	10.50	9.75	9.50	9.92	38	4.50	7.25	7.50	6.42
14	—	7.75	8.75	8.25	39	6.50	7.50	8.25	7.42
15	7.50	9.25	9.75	8.83	40	5.00	6.50	6.50	6.00
16	—	6.00	7.50	6.75	41	—	6.50	7.25	6.88
17	—	8.50	9.00	8.75	42	5.50	6.50	7.50	6.50
18	—	8.50	7.50	8.00	43	—	8.75	7.50	8.13
19	—	8.75	8.75	8.75	44	—	6.50	6.50	6.50
20	—	8.75	10.50	9.63	45	—	5.75	6.00	5.88

E: Measuring values at the points 5 cm away from the scale-wall.

F: Measuring values at the points 10 cm away from the scale-wall.

G: Measuring values at the points 15 cm away from the scale-wall.

Table 3. The result of the dynamical flowing-pressure in the respective measuring points.

Dynamical pressure of flowing in the point ㉔ of No. 1 scale backward.		
Scale period (sec.)	Pressure	
	(dyne/cm ²)	(gr.wt./cm ²)
0.60	2816.0	2.9
0.40	4113.8	4.2
0.30	7199.2	7.3
0.24	6195.2	6.3
0.20	5117.8	5.2
Mean	5088.4	5.2

Dynamical pressure of flowing in the point ㉕ of No. 2 scale backward.		
Scale period (sec.)	Pressure	
	(dyne/cm ²)	(gr.wt./cm ²)
0.60	3868.9	3.9
0.40	3868.9	3.9
0.30	6856.4	7.0
0.24	6023.8	6.1
0.20	5950.3	6.1
Mean	5313.7	5.4

Dynamical pressure of flowing in the point ㉖ of No. 3 scale backward.		
Scale period (sec.)	Pressure	
	(dyne/cm ²)	(gr.wt./cm ²)
0.60	5276.4	5.4
0.40	5468.1	5.6
0.30	5583.0	5.7
0.24	5723.6	5.8
0.20	6043.0	6.2
Mean	5618.8	5.7

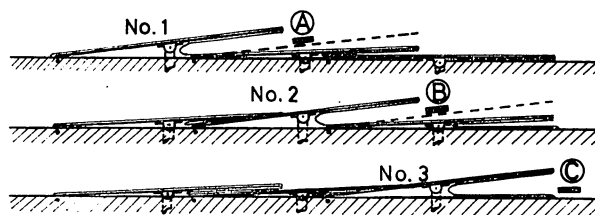
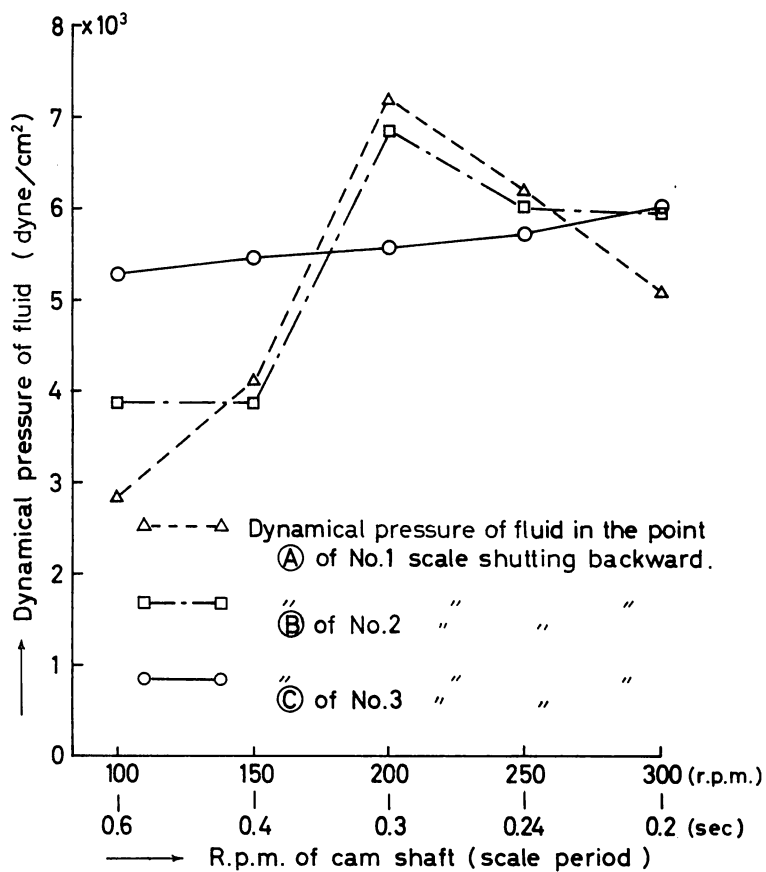


Fig. 7. The relation between the dynamical pressure of fluid in each scale shutting backward and the r.p.m. of cam (or scale period).

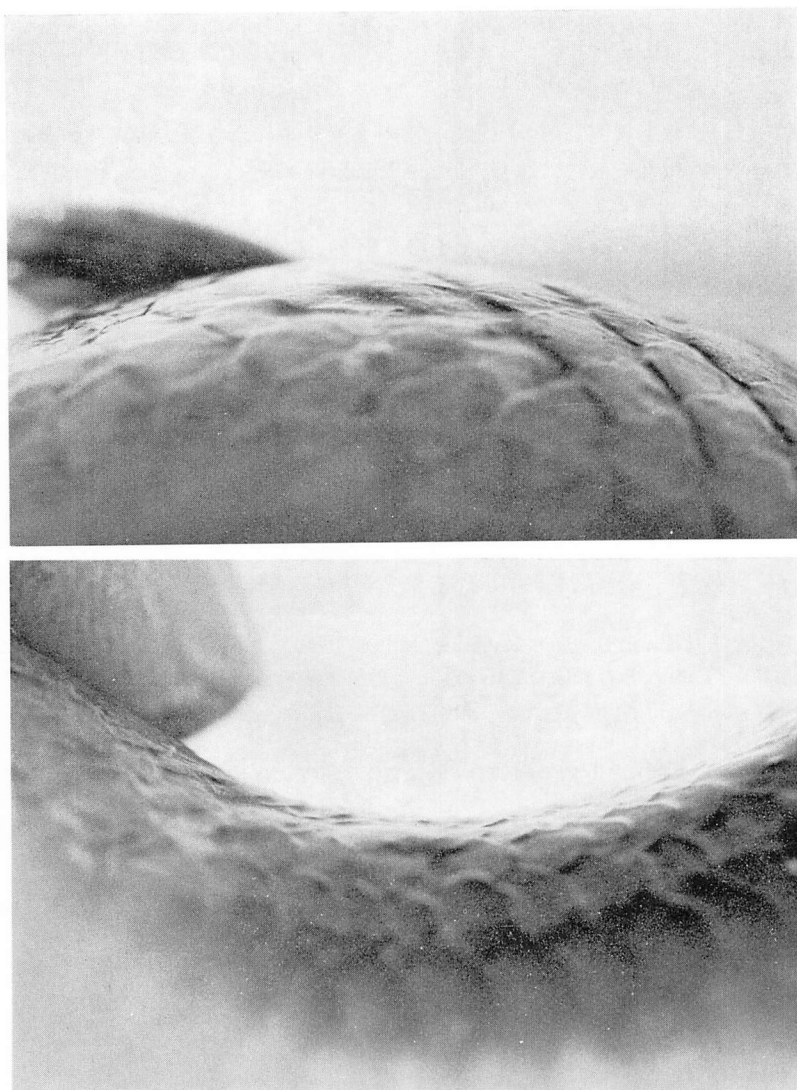


Fig. 8. Photographs of the features of fish-scale on the concave and convex body-surface.
(*Cyprinida*)

露出部分のふちの囲りは 0.5mm 位の幅の表皮で被われている。コイの場合、鱗はくねり運動によって開きは認められないが、彎曲面では、その長さで互いに $1/2$ 程度（約 3mm ）のズレを生じ彎曲した重なり部分に極く薄い層乍ら、水或いは粘液を含んでいる可能性がある。しかもこの場合は重力の支配している状態での現象であって実際の生きている魚の遊泳状態ではこの重力に対して水の浮力も作用している訳で推力流の発生について、果して空気中のそれと同じかどうかは今後の研究課題である。

4. 結 論

模型実験的には鱗板を緩開急閉の繰返し運動をさせる事により推力の発生が認められ、その周期が短い程、鱗板部の流れは速く、最大 7199.2 dyn/cm^2 (7.3 g/cm^2) の流動圧 (推力) を生じた。

今回の実験では鱗板開閉周期 0.96 sec で平均 3.94 cm/sec , 0.46 sec で 5.83 cm/sec , 0.32 sec で 6.95 cm/sec , 0.25 sec で 7.83 cm/sec , 0.20 sec で 9.88 cm/sec , 0.17 sec で 9.22 cm/sec の流速であった。又鱗板後方で流動圧 (推力) を測定した結果、No. 1 の鱗板後方では平均 5088.4 dyn/cm^2 , No. 2 の鱗板後方では 5313.7 dyn/cm^2 , No. 3 の鱗板後方では 5618.8 dyn/cm^2 の大きさであった。

又水路の水は鱗板始動後、約3分で循環し始め、流速整定まで約10分を要した。

文 献

- 1) 奈良迫嘉一 (1976): 遊泳魚体の低抵抗性に関する基礎的研究. 鹿児島大学水産学部紀要 Vol. 25, 51-169
- 2) Karl F. Lagler・John E. Bardach・Robert R. Miller (1962): "ICHTHYOLOGY" 108-120
- 3) 奈良迫嘉一 (1969): 魚の抵抗—Active Skin の効果 (表皮なし)—未発表
- 4) 松井辰彌・永田 拓 (1971): 同心二重円筒間の非定常流. 岐阜大学工学部研究報告 No. 21 113-123
- 5) 遠藤英男・林 盈司・中山泰喜 (1973): 水素気ほう法による流れの観察. 東京大学宇宙航空研究所 流れの可視化に関するシンポジウム No. 1 131-134
- 6) 三坂喜晴 (1973): 水素気ほう法による水流の速度分布測定. 東京大学宇宙航空研究所 流れの可視化に関するシンポジウム No. 1 135-138
- 7) 奈良迫嘉一 (1975): Active Skin Model の抵抗試験と流れの可視化. 東京大学宇宙航空研究所 流れの可視化に関するシンポジウム No. 3 131-134