

## 鱗動進行波による推力発生の可能性について—II

中山 博\*・奈良迫 嘉 一\*

### On the Thrusting-Occurrence-Possibility by the Movement of the Scale Plates —II

Hiroshi NAKAYAMA and Yoshikazu NARASAKO

#### Abstract

By the model experiment it was ascertained that it was possible to bring forth a thrusting-force through the movements of the scale-plates opening slowly and shutting quickly; but it seems that no examination has been done yet on the living fishes.

This time, using carps, we made a few microscopic samples of sliced skins, to study the structure of scale-plates-cusps and to confirm the opening and shutting possibilities of the scale plates.

Using 16 mm camera, we filmed the surface of the fish-body (the series of scale plates) and visualized the flowing on its surface by the hydrogen-bubble method, and examined the thrusting-occurrence-possibility from the biological and physical points of view.

In case of carps, the results obtained are as in the following:

(1) Considering from the results obtained in the biological study it seemed that the scale-plates-cusps were not in independent and separated states, but were restricted by the tissues around the scale plates, therefore it was assumed that no wiggling of the fish-body caused the opening and shutting of the scale plates.

(2) Considering from the results obtained in the physical study, it was ascertained that there was a series of slipping of scale plates along the fish-body-axis at the time when the fish was swimming.

In case of the swimming fish with the body-length of 35 cm, apart from the swimming speed, the value of the slipping of scale plates was noted to be constant (at the mean value 0.9 mm) from the midship of the fish body to the back-end of the dorsalfin.

By visualization, it was ascertained that the flowing on the fish-body-surface showed a sort of laminar flow but, owing to the visualization limit of the hydrogen-bubble method, it was almost impossible to confirm the flowing state upon the fish-body-surface under the high speed flowing.

(3) In the experiment in which some amount of ink was dropped on the surface of the scale plates of the fish anesthetized on the dish, at the back-side of the scale-plate there was some attachment of blue-ink noted, both in the resting and in the wiggling states of the fish, which was in contradiction with the biological result described above.

Therefore, it was assumed that concerning the possibility of thrusting-force-occurrence, further physical and biological studies of the epidermis would be necessary.

---

\* 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)

## 1. 緒 言

魚の遊泳抵抗減少の要因の一つとして<sup>1)</sup> 側面進行波の発生が挙げられるが、この場合、関連して鱗板の開閉運動が考えられる。既報<sup>2)</sup> で述べたように鱗板の *quick return* 運動（緩開急閉運動）による推力の発生は模型実験的には確認されたが、このような現象が果して生魚の場合も認められるかはなお疑問である。推力の発生が予想される魚体鱗板部の構造については、之迄発表された文献<sup>3) 4)</sup> によると鱗板先端部が互いに独立遊離している場合 (Fig. 1 (a)) と独立遊離していない場合 (Fig. 1 (b)) の二つが考えられている。

本実験では、鯉の皮膚断面の顕微鏡標本を作成し、鱗板先端部の構造と鱗板開閉運動の可能性を調べ、同時に魚体表面（鱗板部）の 16mm 撮影と表面の流れを水素気泡法によって可視化、推力発生の可能性を生物学的・物理学的に調べてみた。

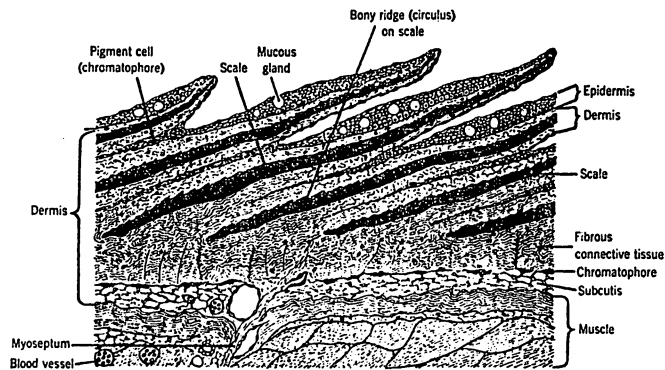
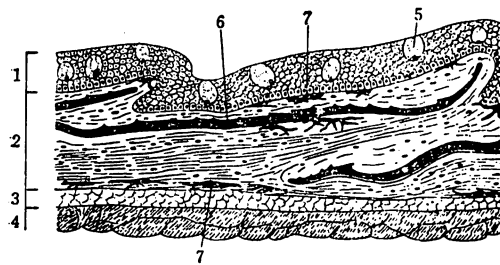


Fig. 1(a) Section of fish skin.

Source: General Biological Supply House,  
(from E. Lagler·E. Bardach·R. Miller 1962, *ICHTHYOLOGY*)



1. Epidermis 2. Dermis 3. Subcutis  
4. Muscle 5. Mucous gland 6. Scale  
7. Pigment cell (chromatophore)

Fig. 1(b) Section of fish skin.

(from K. Matsubara·A. Ochiai·T. Iwai 1970, *ICHTHYOLOGY* (Vol. 1))

2. 実験装置と方法

顕微鏡標本の作製

鯉の遊泳中、静止状態及び最大くねり状態（8mm 撮影及び肉眼観察によると尾から体長の1/3付近を中心として、くねり角度が最も大きく約35°）を想定、夫々、パラフィン法、セロイジン法、氷結法<sup>5)</sup>により鯉の皮膚断面の顕微鏡標本を作成して鱗板先端部の解剖学的構造を顕微鏡写真で調べた。

標本の作成には体長の尾から1/3付近（最大くねり点）、1/2（魚体中央部）、2/3付近（胸鰭上部）の3箇所、夫々、側線を中心線として上下対称に横（体軸方向）約1.5cm、縦1.0cmの矩形の皮膚を切り取った。

側線部を選んだ理由として、①魚体の曲率が最も大きく、くねり運動の際に最も鱗板開閉の可能性が大きい。②鯉の鱗板の厚さをマイクロメーターで測定した結果、側線部分が背、腹側の鱗板よりも厚く quick return 運動（単純に開閉するのではなく、ある程度の硬さを持つ鱗板がゆっくり開いて早く閉じる）の可能性が強い、の二点からである。

魚体表面の流れ

本学回流水槽内に流体力学的に遊泳方向を拘束した鯉の運動場を設置し実験を行なった。構造は Fig. 2 に示す様に側面と天井の板は透明アクリル板を使用、上面及び側面より観察できるようになっている。底板は可視化（水素気泡法）のため黒く塗ってある。運動場の天井板はのぞき眼鏡も兼ねて居る。運動場内に全長35cmの鯉を入れて、流速0.208m/sec, 0.313m/sec, 0.443m/secの三段階における遊泳状態を上方及び側面後方より、鯉の全身と部分の拡大

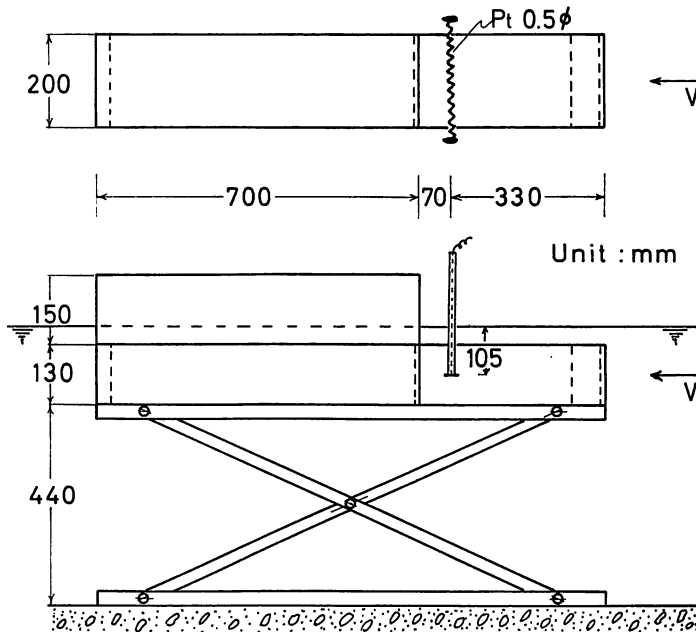


Fig. 2 Experimental apparatus (Swimming pool of fish)

撮影 (16mm, 64 frame/sec) を行ない、鯉のくねり運動による鱗の動き (ズレ及び開き) を調べた (Fig. 3 参照).

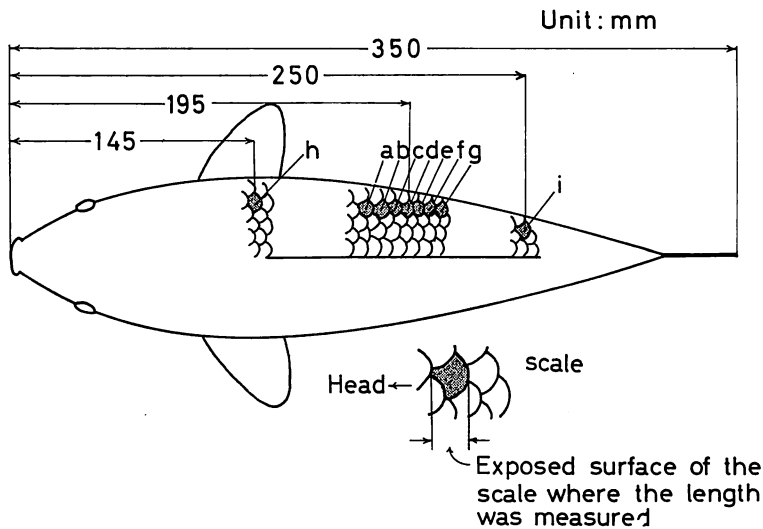


Fig. 3 Points where scale-slippings were measured.

次に魚体表面 (鱗板部) の流れを可視化する目的で水素気泡法を用いて実験を行なった<sup>9)</sup>。これは仮に鱗の開閉運動が存在するとすれば、魚体周縁の流れ (流向, 流速) に何らかの影響がある筈で、鱗の開閉及び推力発生を間接的に証明できると考えたからである。水素気泡を観察する場合、観察方向と照明方向とのなす角が気泡での反射・屈折光の集中する  $90^{\circ}\sim 145^{\circ}$  位が望ましく運動場の上下位置はこの条件によって決定される。陰極線に直径  $0.5\text{mm}$  の白金細線を用い、これを  $5\text{mm}$  間隔にキンク状に曲げて、運動場の前方  $7\text{cm}$ 、水深  $10.5\text{cm}$  の所に水平に設置した。水素気泡法では直流高電圧を印加するため、これによる鯉の感電防止を考え、運動場周囲の四隅に裸銅線  $1.2\phi$  (陽極) を張り、運動場内が等電位になるように設定した。電源には可変直流定電圧、定電流電源装置 (PAD 110-5) を使用した。印加電圧は DC100V, 0.3A。写真撮影及び  $8\text{mm}$  撮影の場合、流速  $0.122\text{m/sec}$ ,  $0.167\text{m/sec}$  で、 $16\text{mm}$  撮影の場合、流速  $0.208\text{m/sec}$  で実験を行なった。

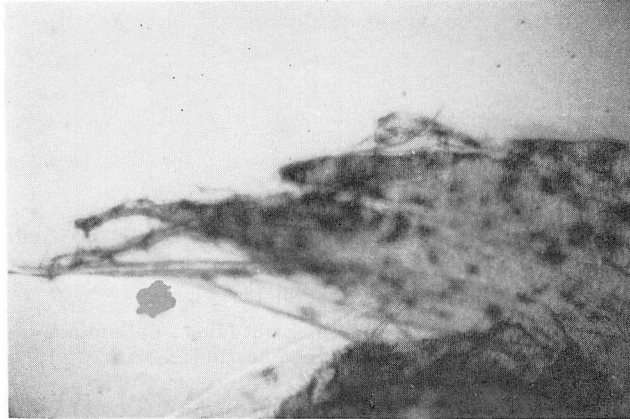
更に補充実験として、青インクの滴下実験を行ない、静止状態に対しては、カルバミン酸エチル (ウレタン)  $5\%$  水溶液中に供試魚の鯉を入れて麻酔させ、仮死状態になってから平らな容器に入れガラス管でインクを体表に滴下して体側を染める。また最大くねり状態に対しても前と同様、麻酔させてから供試魚にインクを滴下、そのあとくねり運動を強制的に数回行なわせ、数分後インクが乾いた所で鱗板を抜き取り、顕微鏡により鱗板裏側へのインクの付着状態を検査、更に写真撮影を行なった。

### 3. 実験結果及び考察

先づ、生物学的検討の結果であるが、鱗板先端部の解剖学的構造は Fig. 4 (a) にその一例

を示すように、遊泳中静止状態で鱗板先端部を表皮が包み、完全に水の入り込む事を防止している。また、くねり状態に対しても **Fig. 4 (b), (b)'** に示すようにパラフィン法、セロイジン法、氷結法の何れの場合も静止状態と同様、鱗板先端部は互いに独立遊離の状態にはない。

総括すると、その構造は **Fig. 8** に示す如く、互いに独立した状態ではなく (**Fig. 1 (b)**), また鱗板にそって表皮が真皮の中まで入り込んでおり (**Fig. 1 (a)**) 両者の折衷状態である。



**Fig. 4(a)** A microscope photograph

(Skin section of the carp photographed at the part near the caudal fin with the length of 1/3 of the total length)

Rest condition (Freezing method)

Fixation: 10% Formain, Stain: Hematoxyline, Magnification:  $\times 35$ .



**Fig. 4(b)** A microscope photograph

(Skin section of the carp photographed at the part near the caudal fin with the length of 1/3 of the total length)

The convex-side of the wiggle

Fixation: 10% Formalin, Embedding: Celloidin,  
Stain: Hematoxyline, Magnification:  $\times 90$

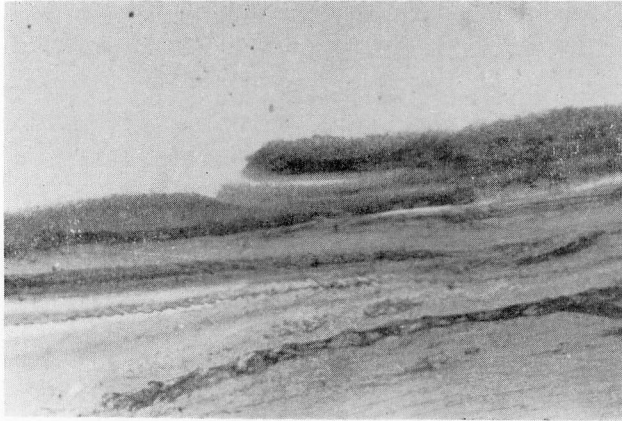


Fig. 4(b)' A microscope photograph

(Skin section of the carp photographed at the part near the caudalfin with the length of 1/3 of the total length)

The concave-side of the wiggle

Fixation: 10% Formalin, Embedding: Celloidin,  
Stain: Hematoxyline, Magnification:  $\times 90$

この事からくねり運動中の鱗板先端部は、周辺組織の拘束を受けて、模型実験の場合のような独立遊離した緩開急閉運動を行なうことは無理と考えられる。

次に物理学的検討の結果であるが、本学回流水槽における  $16\text{ mm}$ ,  $64\text{ frame/sec}$  撮影における測定結果を **Table 1 (a), (b)** に示す。上面及び側面後方からのいずれの場合にもくねり運動による鱗板の開閉運動は認められず、鱗板間相互の体軸方向へのズレが認められた。即ち **Fig. 3** に示す如く背鰭付根から下方へ4列、頭から  $19.5\text{ cm}$  の所の鱗を中心として体軸方向へ連続した7個 (*a~g*) の鱗について **Fig. 5** の如く鯉のくねりの状態10段階 (1~10) に対応<sup>7)</sup> し、その動きに対するズレの量を調べた。その結果、7個の連続した鱗のズレは体長  $35\text{ cm}$  の場合、流速に関係なく平均  $0.9\text{ mm}$  であった (**Fig. 6** 参照)。また背鰭付根から下方5列目で頭より  $14.5\text{ cm}$  の位置の鱗と背鰭付根から下方3列目で頭より  $25\text{ cm}$  の位置の鱗のズレは、夫々平均  $0.3\text{ mm}$ ,  $0.9\text{ mm}$  であった。これは明らかに頭部付近でのくねりの量が小さい事を示している。鱗板のズレによって境界面に何らかの変化が生じていることは想像に難くないが今後の検討が望まれる。

流速が  $0.208\text{ m/sec}$ ,  $0.313\text{ m/sec}$ ,  $0.443\text{ m/sec}$  と増加しても鱗のズレの量には余り変化が認められない。之は流速が増加しても鯉のくねりの毎秒ビート数が多くなるだけで、くねりの振幅は変らない事を示唆している。

また流れの可視化実験では魚体表面での流れの剝離はみられず水素気泡はなめらかに魚体表面に膚接して流れており、気泡が尾鰭近くにくると鯉のくねり運動により魚体近くの気泡は拡散し測定は不可能であった (**Fig. 7, 7'** 参照)。今回はトレーサーとして水素気泡を用いたが、この方法では使用流体である水を直接に電気分解してトレーサーを作り出すこと、電氣的に制御が容易なことなど、多くの優れた点があるにもかかわらず直流高電圧を使用するため、実験魚を感電させる恐れがあること、また魚自身気泡を避けて泳ぐ性質があることなど生物実験用の

Table 1(a). Length of scales along the body-axis at each flowing velocity.

| Flowing velocity<br>m/sec. | Steps of<br>wiggling<br>motion | Measuring points |           |           |           |           |           |           |
|----------------------------|--------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                            |                                | a<br>(mm)        | b<br>(mm) | c<br>(mm) | d<br>(mm) | e<br>(mm) | f<br>(mm) | g<br>(mm) |
| 0.208                      | 1                              | 5.8              | 6.2       | 6.7       | 6.8       | 6.9       | 6.0       | 7.1       |
|                            | 2                              | 5.6              | 6.0       | 6.7       | 7.0       | 6.9       | 6.2       | 7.1       |
|                            | 3                              | 5.9              | 6.4       | 7.0       | 6.8       | 6.9       | 7.1       | 7.0       |
|                            | 4                              | 6.5              | 6.6       | 7.5       | 6.8       | 7.3       | 6.9       | 7.4       |
|                            | 5                              | 6.4              | 6.8       | 7.4       | 6.8       | 7.3       | 6.8       | 7.2       |
|                            | 6                              | 6.5              | 6.8       | 7.5       | 6.8       | 7.3       | 7.2       | 7.2       |
|                            | 7                              | 6.4              | 6.9       | 7.7       | 6.8       | 7.8       | 7.3       | 7.7       |
|                            | 8                              | 6.6              | 7.0       | 7.6       | 6.6       | 7.7       | 7.2       | 7.6       |
|                            | 9                              | 6.1              | 6.6       | 7.2       | 6.7       | 7.2       | 7.3       | 7.4       |
|                            | 10                             | 5.6              | 6.6       | 7.1       | 6.6       | 6.6       | 6.9       | 6.7       |
| 0.313                      | 1                              | 6.0              | 5.8       | 6.8       | 6.7       | 6.6       | 6.5       | 6.9       |
|                            | 2                              | 5.6              | 5.8       | 7.0       | 6.7       | 6.7       | 6.1       | 6.7       |
|                            | 3                              | 5.7              | 5.8       | 6.9       | 6.9       | 6.6       | 6.7       | 6.9       |
|                            | 4                              | 6.3              | 6.4       | 7.3       | 7.1       | 6.7       | 6.6       | 6.9       |
|                            | 5                              | 6.2              | 6.6       | 7.3       | 7.4       | 7.0       | 7.5       | 7.1       |
|                            | 6                              | 6.8              | 6.7       | 7.6       | 7.2       | 7.2       | 7.2       | 7.6       |
|                            | 7                              | 6.9              | 6.6       | 7.6       | 7.0       | 7.6       | 7.5       | 7.9       |
|                            | 8                              | 5.9              | 6.5       | 7.3       | 7.1       | 7.2       | 6.8       | 7.7       |
|                            | 9                              | 5.8              | 6.2       | 7.3       | 6.9       | 7.4       | 7.0       | 6.7       |
|                            | 10                             | 5.9              | 6.1       | 7.3       | 6.8       | 7.1       | 6.7       | 6.5       |
| 0.443                      | 1                              | 5.6              | 6.0       | 6.4       | 6.6       | 6.8       | 6.4       | 6.9       |
|                            | 2                              | 5.6              | 6.2       | 6.7       | 7.1       | 6.8       | 6.3       | 6.5       |
|                            | 3                              | 5.6              | 6.2       | 6.6       | 6.8       | 7.0       | 6.3       | 6.8       |
|                            | 4                              | 6.0              | 6.1       | 7.0       | 7.1       | 7.2       | 6.4       | 6.8       |
|                            | 5                              | 5.9              | 6.7       | 6.9       | 7.2       | 7.2       | 6.6       | 7.0       |
|                            | 6                              | 6.2              | 6.7       | 7.0       | 7.5       | 7.3       | 6.9       | 7.4       |
|                            | 7                              | 6.4              | 6.5       | 7.6       | 7.7       | 7.6       | 7.0       | 7.2       |
|                            | 8                              | 6.0              | 5.8       | 7.3       | 7.3       | 7.0       | 6.9       | 7.1       |
|                            | 9                              | 5.9              | 6.2       | 7.0       | 6.9       | 7.2       | 6.8       | 7.0       |
|                            | 10                             | 5.8              | 6.1       | 6.8       | 7.0       | 6.7       | 6.6       | 7.0       |

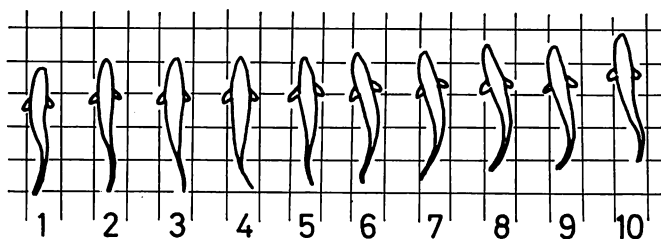


Fig. 5 Steps of wiggling motion.

Table 1(b). Length of scales along the body-axis at each flowing velocity. (maximum, minimum and mean)

| Measuring points | Flowing velocity |           |                |           |                |           | Mean      |           |
|------------------|------------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------|
|                  | 0.208 (m/sec.)   |           | 0.313 (m/sec.) |           | 0.443 (m/sec.) |           |           |           |
|                  | max. (mm)        | min. (mm) | max. (mm)      | min. (mm) | max. (mm)      | min. (mm) | max. (mm) | min. (mm) |
| a                | 6.6              | 5.6       | 6.9            | 5.6       | 6.4            | 5.6       | 6.6       | 5.6       |
| b                | 7.0              | 6.0       | 6.7            | 5.8       | 6.7            | 5.9       | 6.8       | 5.9       |
| c                | 7.7              | 6.7       | 7.6            | 6.8       | 7.0            | 6.4       | 7.4       | 6.6       |
| d                | 7.0              | 6.6       | 7.4            | 6.7       | 7.7            | 6.6       | 7.4       | 6.6       |
| e                | 7.8              | 6.6       | 7.6            | 6.6       | 7.6            | 6.7       | 7.7       | 6.6       |
| f                | 7.3              | 6.0       | 7.5            | 6.1       | 7.0            | 6.3       | 7.3       | 6.1       |
| g                | 7.7              | 6.7       | 7.9            | 6.5       | 7.4            | 6.5       | 7.7       | 6.6       |
| h                | 7.3              | 6.9       | 8.0            | 7.6       | 7.8            | 7.6       | 7.7       | 7.4       |
| i                | 6.8              | 6.1       | 7.3            | 6.2       | 7.3            | 6.3       | 7.1       | 6.2       |

トレーサーとしては余り適当とは云えないようである。

最後に補助的に行なったインクの滴下実験では静止状態及びくねり状態何れの場合も、夫々の個所の鱗板裏側へ青インクが付着していたが、この事は顕微鏡標本の結果と矛盾する。鱗板を抜き取る時に青インクが充分乾ききっていなかったため、インクが多少裏側へ流れ込んだものか、或いはインクが表皮に浸透したものかとも考えられる。

然し表皮の防水性<sup>8)</sup>等を考えると、なお今後の検討が必要であろう。

#### 4. 結 論

##### A. 生物学的検討

鯉の鱗板先端部の構造は顕微鏡標本の結果 Fig. 8 に示す如く、互いに独立遊離した状態ではなく、また鱗板にそって表皮が真皮の中まで入り込んでいる。従って、鯉の鱗板先端部は周辺組織の拘束を受けて、くねりに伴う鱗板自身の開閉運動は難かしいと考えられる。

##### B. 物理学的検討

くねりの外側体表での鱗の開きはみられないが、鱗板相互間には体軸方向に対し、後方へのズレがみられ、その値は(体長 35 cm の場合)流速に関係なく魚体中央より後方背鳍付近まで体軸方向にほぼ一定(平均 0.9 mm)であった。

また魚体表面の流れは剝離がなく層流であることが認められたが、水素気泡法の限界から高速状態の確認がなお不充分である。

インクの滴下実験では静止状態及びくねり状態何れの場合も鱗板裏側への青インクの付着がみられ、上記生物学的検討結果と矛盾した。

従って、推力発生の可能性については更に今後表皮の生物・物理学的検討が必要であろう。



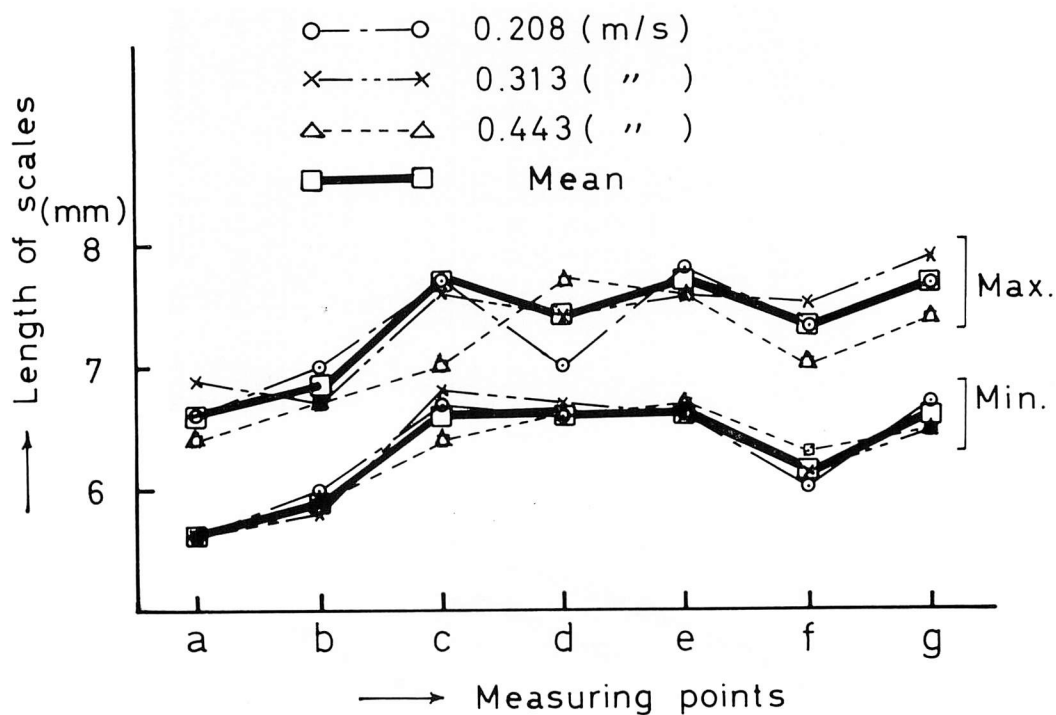
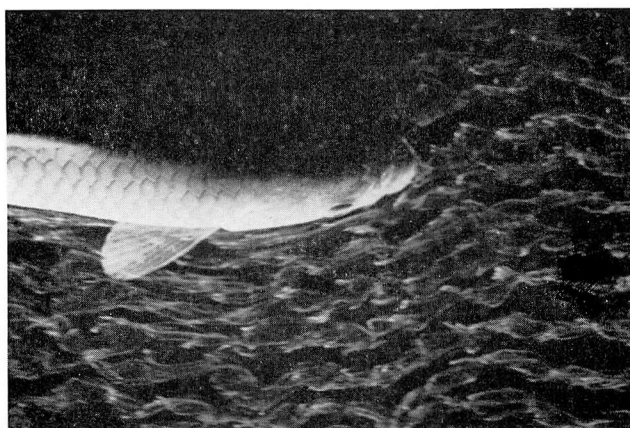
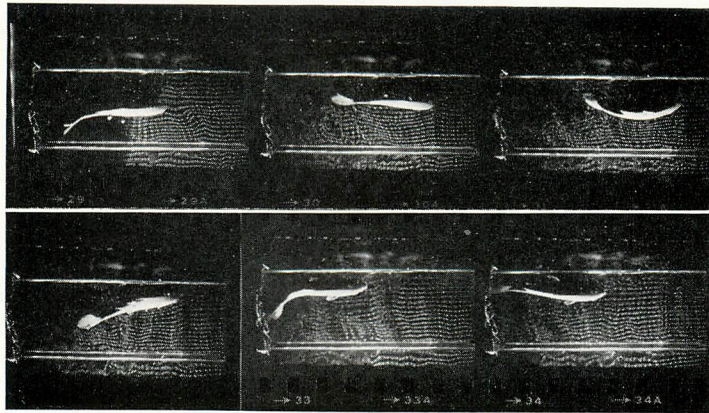


Fig. 6 Length of scales along the body-axis at each flowing velocity. (maximum, minimum and mean)



V: 10.4cm/sec., E: 100volt, I: 0.3amp., Pt: 0.5φ, ASA 400, 1/60.

Fig. 7 Flowing visualization around the carp by hydrogen-bubble method.



V: 10cm/sec, E: 80volt, I: 0.2amp., Pt: 0.3φ, ASA 400, 1/60.

Fig. 7' Flowing visualization around the carp by hydrogen-bubble method.

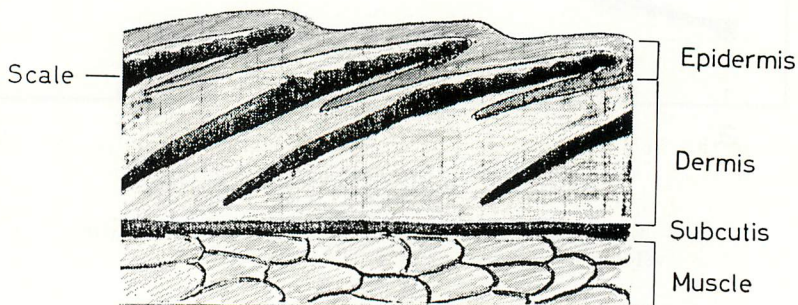


Fig. 8 Section of the carp skin.

### 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. 鹿大水紀要, **25**, 51-169.
- 2) 中山 博・奈良迫嘉一・黒木敏郎 (1977): 鱗動進行波による推力発生の可能性について. 鹿大水紀要, **26**, 191-204.
- 3) Karl F. Lagler・John E. Bardach and Robert R. Miller (1962): "ICHTHYOLOGY", 108-120.
- 4) 松原喜代松・落合 明・岩井 保 (1970): "魚類学(上)", 35-41 (恒星社厚生閣, 東京).
- 5) 田中克己・浜 清 (1977): "顕微鏡標本の作り方", 47-128 (裳華房, 東京).
- 6) 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, **3**, 131-134.
- 7) 柳田為正訳 (1963): James Gray "動物の運動", 29-31 (岩波書店, 東京).
- 8) 川本信之 (1966): "新版魚類生理生態学", 311-313 (恒星社厚生閣, 東京).