

## 半導体圧力変換器による魚類の動作記録(Ⅱ)\*

(キック泳法の生理・生態学的分析)

大渡 敦・水江一弘\*\*・堀井大補\*\*\*

長崎大学教育学部工業技術教室

(昭和54年10月31日受理)

## The Record of the Fish Action by the Semiconductor Pressure Transducer (Ⅱ)

(A Physiological and Ecological Analysis of the  
Kick-swimming Form)

Atsushi OWATARI, Kazuhiro MIZUE and Daisuke HORII

Department of Technology, Faculty of Education,

Nagasaki University, Nagasaki, Japan

(Received Oct. 31, 1979)

### Abstract

The swimming forms of *Cyprinus carpio* in the fish farming water tank (10m in diameter, 2m in depth) were taken the photographs of with a 8mm camera. The Kick-swimming form, moving of its caudal fin, was transferred into electro circuit in order that the form might be simulated and observed. The grounds for its dashing straight were ascertained ecologically and hydrodynamically.

The results were obtained that the kick—swimming form was the most efficient one for fish swimming in water, and that the self-protection reflection functioned, it might be induced, most sensitive in fish.

### 1. 緒 言

魚の泳ぎ形については、a) 定常状態での泳ぎ<sup>1,2,3.)</sup>と、b) 外部刺激による異常状態のキ

\* 昭和48年度日本水産学会秋季大会(於鹿児島大学教養部)で発表(1973. 10. 18)

\*\* 現在, 東京大学海洋研究所

\*\*\* 現在, 長崎県立長崎工業高等学校

ック泳法<sup>4)</sup>があり、これらの泳ぎをコイ (*Cyprinus carpio*) の養魚池で、8 mm, カメラで撮影し、泳ぎの形式を再確認した。後者 b) による尾びれの動きの記録中、2相性・3相性のキック泳法の波形について analog computer で simulate し、電気現象と背・腹筋収縮との関連について考察するに、魚のキック泳法による直進は、生態学的に、かつ流体力学の面からも合理的な動きであって、その瞬間速度は9~18 (m/s) にも達することが判った。

## 2. 実験方法

### 尾びれの推進機構と泳ぎのパターン

2-1 尾びれを左右対称に振り推進する定常状態の泳法で、図-1 に示す、左右の側筋を中枢神経系の回路網<sup>5)</sup>によって制御される、安定な持続運動で前進する泳ぎ形であり、

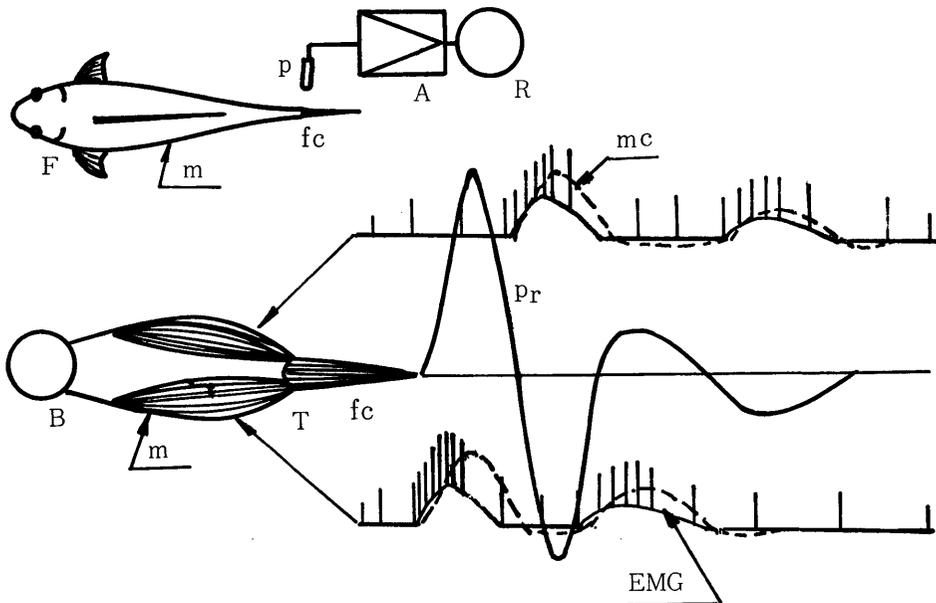


図1 背・腹筋電位と尾びれの動きの模式図

図-1 において、m: 背・腹筋肉, fc: 尾びれ, p: 圧-電変換マイクロホン, A: 増幅器, B: 中枢神経系, T: 電-機変換器, F: 魚体, EMG: 筋電図,  $m_c$ : 筋収縮図,  $p_r$ : 尾びれの筋振図。であって、骨格筋の収縮から弛緩には150~200 (ms) を要し、尾びれの緩やかな振動による泳ぎは、300~400 (ms), 2~3 ( $H_z$ ) の振動となり、この振りは筋肉の伸縮からみて、耐久速度の限界と思われる。

2-2 天敵から逃避するときや、えさを捕食するための攻撃であり、外部刺激によって反射的に強大な瞬発力を発揮する異常状態のキック泳法であって、図-2 は尾びれ-求心性神経-一介在神経-運動神経-筋肉線維の反射弓回路<sup>6,7,8,9,10)</sup>を示す、図-2 において、

e: 終板 (end-plate), m: 筋線維 (muscular fiber)

s: シナプス (synapse), fc: 尾びれ (caudal fin)

l: 側線器官 (lateral line organs),

c: 弧立受容器 (cupula), p: マイクロホン,  $p_r$ : 尾びれのオシログラフを示す。

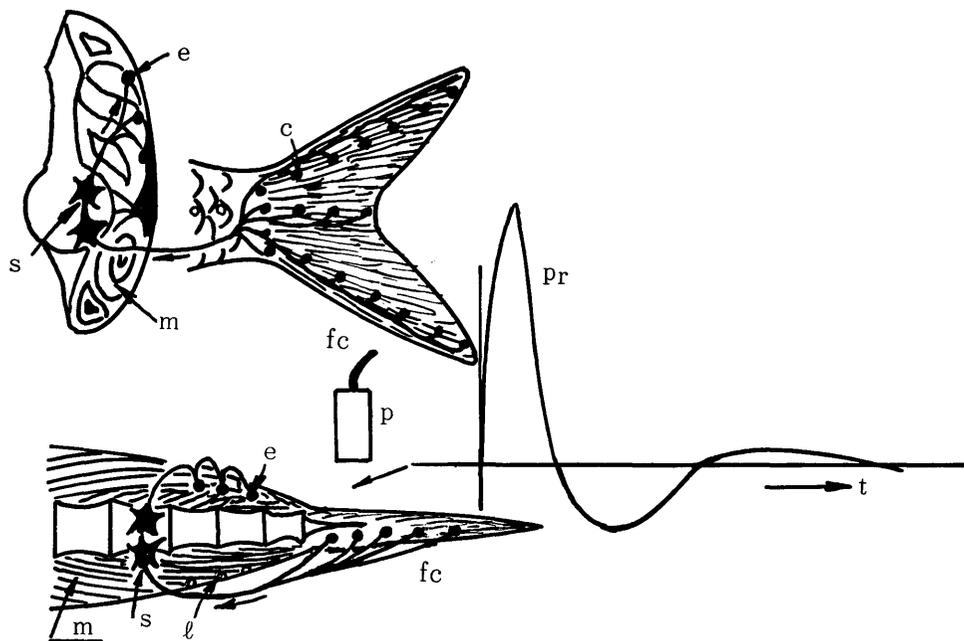


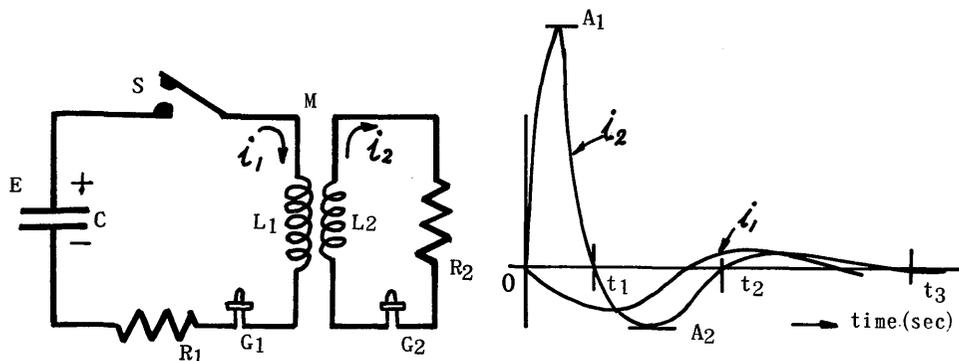
図2 尾びれ—求心性神経—介在神経—運動神経—筋肉線維の反射弓回路と尾びれの励振図

この神経回路で発生するオシログラフと前回報告(I)<sup>4)</sup>示した尾びれの振動記録が相似である条件を得るために、次の実時間シュミレートを行なう。

2-3 M結合回路

図-3はインダクタンス(M)結合回路<sup>11)</sup>と回路の1次, 2次電流の波形と, その位相関係を示し, 図-3において,

- C: 静電蓄電器 ( $\mu\text{F}$ ),
- R<sub>1</sub>: 1次回路抵抗 ( $\Omega$ ),
- L<sub>1</sub>: 1次側自己インダクタンス (H),
- M: 相互インダクタンス (H),
- S: 起動スイッチ,
- R<sub>2</sub>: 2次回路抵抗 ( $\Omega$ ),
- L<sub>2</sub>: 2次側自己インダクタンス (H),
- G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>: 電磁オシロ, ガルバノメーター



M-coupled circuit and  $i_1 \cdot i_2$  current.

図3 M結合回路と $i_1, i_2$ 電流

$i_1, i_2$ : 1次, 2次電流の瞬時値 (A)  
 を示し,  $A_1$  は  $i_2$  の  $0 \sim t_1$  (sec) 間の最大値を,  $A_2$  は  $t_1 \sim t_2$  (sec) 間の最大値を示し, この回路の方程式は

$$\left. \begin{aligned} R_1 i_1 + L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + M \frac{di_2}{dt} &= E \\ M \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

1式に  $q = \int i dt$ ,  $i = dq/dt$  を代入して  $q$  についての方程式に変換すると,

$$\left. \begin{aligned} R_1 \frac{dq_1}{dt} + L_1 \frac{d^2 q_1}{dt^2} + \frac{1}{C} q_1 + M \frac{d^2 q_2}{dt^2} &= E \\ M \frac{d^2 q_1}{dt^2} + R_2 \frac{dq_2}{dt} + L_2 \frac{d^2 q_2}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

となる。

2-4 低速形アナログコンピュータの計算手順

上記2式の方程式を低速形アナログコンピュータ<sup>12,13)</sup>で演算し, レコーダに解を記録するために, 尾びれの発する記録波形<sup>4)</sup>の振幅  $A_1=103$  (mm)  $A_2=27$  (mm) より,

振幅比  $\alpha = A_1/A_2 = 3.81 \div 4$

パルス幅	$\tau_1$ (sec)	$\tau_2$ (sec)	$\tau_1 + \tau_2 = T$	$T/\tau_1$ (パルス比)
	2.2	6.4	8.6	3.91
	2.5	9.6	12.1	4.84
	3.3	16.0	19.3	5.85

振幅比  $\alpha \div 4$ , パルス比  $T/\tau_1 \div 4$  を満足する波形を得る回路定数は,

$L_1=1.014$ (H),  $L_2=0.0568$ (H),  $C=103.1$ ( $\mu$ F)

$R_1=22.34$ ( $\Omega$ ),  $R_2=5.03$ ( $\Omega$ ),  $M=0.166$ (H)

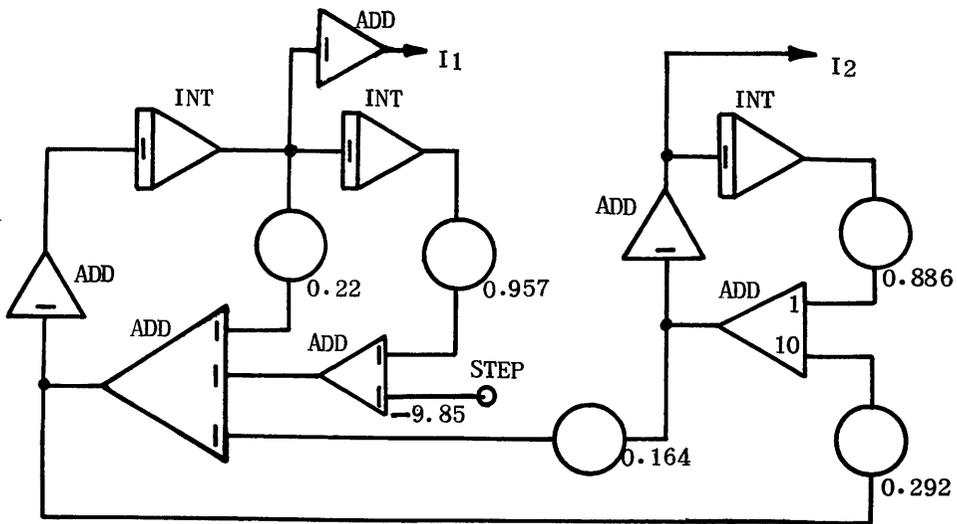


図-4 ブロックダイアグラム

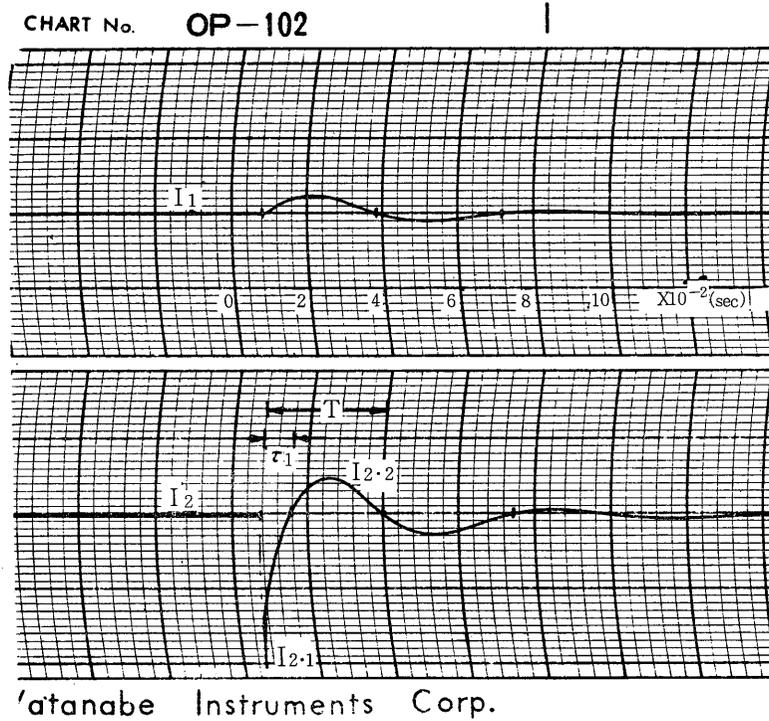


図-5  $I_1, I_2$  のオシログラム

Scale factor  $\alpha = 10^4$   
 time scale factor  $\beta = 10^2$  とすると machine equation は次式のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 Q_1}{dT^2} &= -0.22 \frac{dQ_1}{dT} - 0.957 Q_1 - 0.164 \frac{d^2 Q_2}{dT^2} + 9.85 \\ \frac{d^2 Q_2}{dT^2} &= -0.886 \frac{dQ_2}{dT} - 0.232 \frac{d^2 Q_1}{dT^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

この3式の machine equation を解く、ブロックダイアグラムを図-4に、その解の記録を図-5に示す。

2-4 魚体の遊泳抵抗

船体抵抗<sup>14)</sup>は摩擦抵抗  $R_f$ 、造波抵抗  $R_w$ 、造渦抵抗  $R_o$ 、空気抜抗  $R_a$  より成り、その総抵抗  $R_t$  は、 $R_t = R_f + R_w + R_o + R_a$  となる。

上式を魚体に適用するに当って、魚が水中で遊泳する状態では、上式の  $R_w$ 、 $R_a$  は省略される、従って、キック泳法時における魚体の総抵抗  $R_{tF}$  は、 $R_{tF} = R_f + R_o$  となり。

2-4.1 摩擦抵抗<sup>15)</sup>  $R_f$

$$R_f = C_f b L \frac{\rho U^2}{2} = 0.73 b l \sqrt{\mu \rho} U^3 L$$

上式において、

$$C_f = \frac{1.46}{\sqrt{R_1}} : \text{摩擦係数, } L : \text{魚体長}$$

$$R_1 = \frac{UL}{\nu} : \text{レイノルズ数, } \mu : \text{粘性係数,}$$

$\frac{\rho U^2}{2}$  = 動圧,  $b$  : 先頭からの投影面直径,

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  : 動粘性係数,  $\rho$  : 密度

$U$  : 一様流速,

#### 2-4.2 渦流抵抗 $R$ 。

渦流抵抗  $R$ 。について、魚体は背髄に対し、左右対称であり、かつ流線形である形態の魚類は、キック泳法の瞬間高速度に対しては、渦流損を最少にする姿勢で泳ぐのが観測されるから、その時の渦流抵抗は圧力抵抗<sup>15)</sup>  $R_p$  であり、 $R_p = 3\pi\mu Ub$  で表わされる。従って、

$$R_{tr} = R_r + R_p = C_r L b \frac{\rho U^2}{2} + 3\pi\mu Ub \dots\dots(4)$$

上式において、体長  $L$  は成長と共に増加する値であり、 $b$  は各ひれの動きによって魚体抵抗を変化する要因を有し、魚体の行動に影響するものと判断した。

写真 1. 2 は尾びれ (caudal fin) や胸びれ (pectoral fin) などの動きと遊泳速度の関係を示すもので、養魚池 (10m, diameter, 2 m, depth) の錦ゴイについて、FUJICA single 8, 2800, 撮影コマ数 18 で撮り、写真判定法により、魚体の動き、遊泳速度  $v$  を計算した。

$$v = l/t = 1/\frac{1}{18} = 1 \times 18 (\text{m/s})$$

$l$  は 1 コマ間に進行したコイの距離 (m),

$t$  は 1 コマ送りに要した時間 (sec), 撮影した養魚池のコイの体長 (BL: 30~60cm) であった。 $l = 1 \sim 1.5 (\text{m})$ ,  $t = 1/18 (\text{sec})$  であるから、

$$v = 1 \times 18 \sim 1.5 \times 18 = 18 \sim 27 (\text{m/s})$$

にも達し、一方小庭園で L 字形の泉水 [  $W = 0.5 \sim 1$ ,  $L_p = 6$ ,  $D = 0.3 \sim 0.5 [\text{m}]$  ] のコイ (BL 10~30cm) では  $l = 0.5 (\text{m})$  以下であった、従って

$$v = 0.5 \times 18 = 9 (\text{m/s}) \text{ となる。}$$

このように瞬間速度  $v$  が異常に高く、

$v = 9 \sim 27 (\text{m/s})$  にも達す、このことについて、電子工学の分野では、磁電管の衝撃波せん頭出力  $P (w)$  は、平均出力  $P_0 (W)$ , 衝撃時間  $T (\mu s)$ , 衝撃繰返し間隔  $T_0 (\mu s)$  および衝撃波形による係数  $k$  として、

$P = k \cdot T_0 / T \cdot P_0$  なる関係式<sup>16)</sup> で算出される。一般に物理現象に対し、生物現象には影響する要因が多い、しかしまた得られる現象には相似点が多く、近似的に求めると、前記の振幅比  $\alpha = A_1/A_2 \div 4 \sim 6$ , パルス比  $\tau = T/\tau_1$  および巡航速度 (Cruising speed)  $v_c (\text{m/s})$  より、ダッシュ速度 (dashing speed)  $V_d$  は、

$$V_d = \alpha \cdot \tau v_c (\text{m/s}) \dots\dots(5)$$

$$\alpha = 103/27 (\text{泳ぎの記録}) = 3.81 \div 4$$

$$= 21/5.5 (\text{シュミレータ記録}) = 3.81 \div 4$$

$$\tau = 8.6/2.2 (\text{泳ぎの記録}) = 3.91 \div 4$$

$$= 0.032/0.008 (\text{シュミレータ記録}) = 4.0 = 4$$

$$V_d = 4 \times 4 \times 0.75 = 12 (\text{m/s})$$

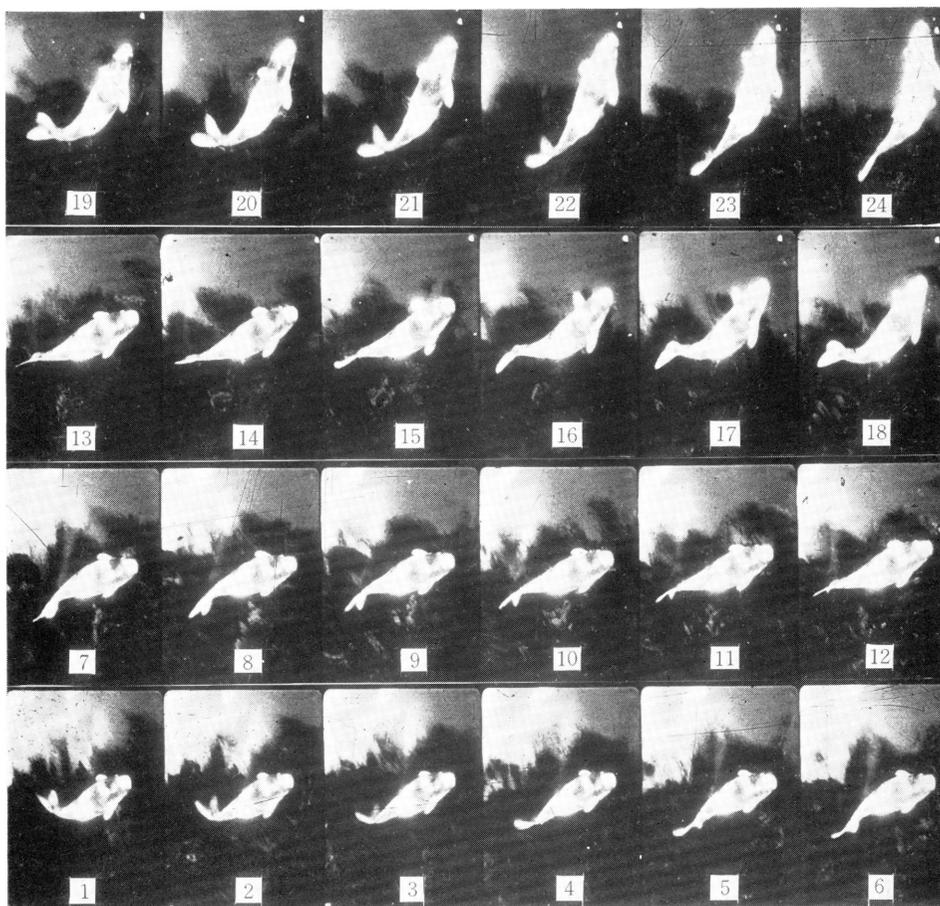


写真 1 尾びれを左右対に振り進行する泳ぎ

写 真 の 説 明

写真-1の泳ぎは、本文2-1で説明した、中枢神経系からの制御により、推進する泳ぎで、左下1より右にコマ撮りして、右上24枚目に至る、尾びれと胸びれは常に動揺しており、3-23枚目で尾びれは元の状態に一巡してある、その周期と周波数は、

$T = 21 \times 1/18 = 1.16 \text{ (sec)}$  ,  $f = 1/T = 1/1.16 = 0.86 \text{ (Hz)}$  となり、筋肉疲労を生じぬ、いかにもゆうゆうと泳いでいる様子が判る。

写真-2に示す泳ぎは、本文2-2で説明した、キック泳法で、左下1より右にコマ撮りして右上55枚目に至る、写真より

白色 1 ~ 11, 12 ~ 15, 16 ~ 27, 28 ~ 31 (枚)

<u>12</u>	4	<u>12</u>	4	(コマ)
0.66	0.22	0.66	0.22	(秒)

紅白 1 ~ 22, 23 ~ 27, 28 ~ 42, 43 ~ 47 (枚)

<u>23</u>	5	<u>15</u>	5	(コマ)
1.27	0.27	0.83	0.27	(秒)

表中、4、5枚の尾びれを振る加速時、または20~22枚目の個体が近接場面では、速度、方向制御のために、胸びれや尾びれを作動して減速しており、また対称的なのは、コマ数12、15、23枚の期間は2匹共に直進形の姿勢で胸びれもよく腹部に密着して、表面積を最少に保持し流体抵抗を最小限にしていることが判る。

45

46

47

48

49

50

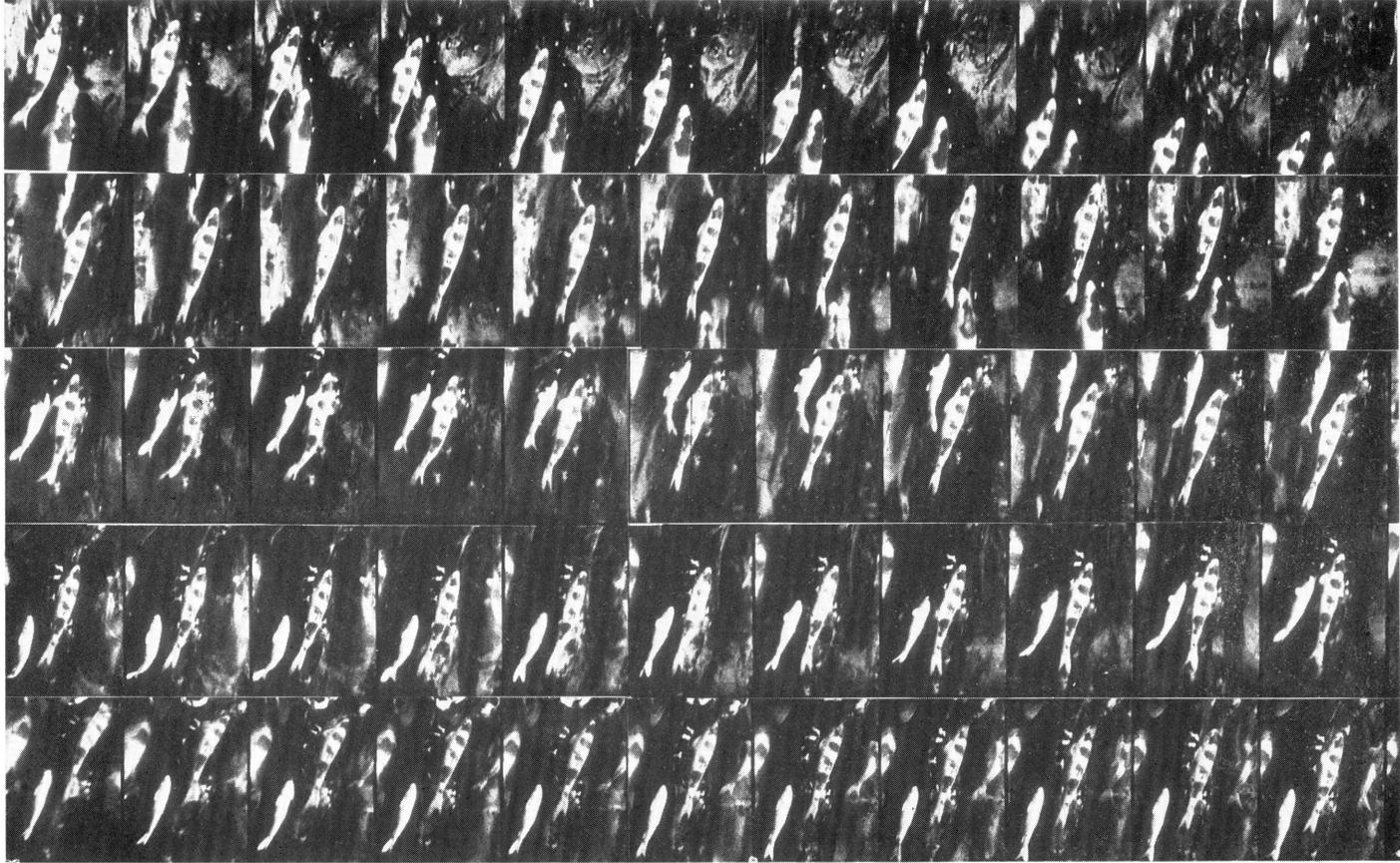
51

52

53

54

55



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

×11

写真 2 プラチナ（白コイ）と紅白（4段模様）のキック泳法

### 3 結果の考察

a) コイは前方からの刺激に対して、その反応は条件反射作用によるものと判断される。それは中枢神経系回路網 (図-1) を介して行動を起し、そのためスタートや速度は共に敏速でなく、動作は環境に対応する場 (生活水温 PH, えさなど) を指向して、各自の遊泳能力に応じた速度で移動をする。

b) 後方からの刺激に対し、特に anal fin 以後の側線器、殊に Caudal fin の孤立受容器が感受する、すなわち後方から襲う、外敵に対しては異常な逃避能力を発揮している。それは生理学的に、図-2 の反射弓回路へ、尾びれの受容器が感受して、神経電気信号として伝送し、途中シナプス s で連絡した最短回路であり、反対側の側筋に興奮性 (筋収縮) 信号を供給する。その距離はわずか 10cm 以内で、パルスの伝達時間は 10ms 以下であり、無条件反射作用となる。また疲労のない筋肉は電一音変換効率は高く、かつ短距離回路の伝送損失は少く、従って最初のパルスには強力に応答する。磁電管に例をとれば、連続発振時出力  $P_0=8.8$  (W) に対し、せん頭出力  $P=2.6$  (Kw) となり、実に 295 倍の出力が得られ、用途によりパルス出力の効果が判る、これだけの大出力に増倍するには、勿論、連続発振時の陽極直流電圧  $E_a$  も  $17.3 \times E_b$  に上昇している、もし陽極直流電圧を上昇しない  $E_b$  の状態では、陽極損失が増大して、せん頭出力は 17 倍程度に低下する。これはコイのキック泳法における、瞬時最大速度を 5) 式で示す  $\alpha \cdot \tau = 16$  となり、一致する。これは魚体が、防禦本能をキック泳法でダッシュスピードをかける生理機能を有し、外敵の攻撃から身を守っていることが判った。

c) 4 式において、速度  $U$  を 10 倍にとると、 $R_{tr} = K_1 U^2 + K_2 U$  は  $110 \times R_{tr}$  となり、密度  $\rho$  の高い水中で、10 倍の速度上昇に対して、抵抗は 100 倍になり、大きな速度上昇は期待できない。しかし魚体は、写真-2 で判明するように、遊泳姿勢はキック泳法によって、直進中は、魚体の表面積を最小にして、魚体抵抗を減少する生態作用が働いている。

e) 稚魚の遊泳能力は低く、え餌として、ねらわれる率が多い。しかしキック泳法で逃避するときの高速度では、魚体の抵抗は、4 式より、体長  $L$ 、最大縦断面積の直径  $b$  との  $b \times L$  の体積に比例するから、稚魚の方が加速が容易で、外敵の追撃に対する逃避能は生態的に優勢で、各自平等に生命を守る生態機能をもっている。しかしキック泳法では最大能力を、ふりしぼったの行動であり、連続繰返し攻撃に対しては、ダッシュ速度は急速に減衰する。

以上、キック泳法は前方からの刺激 (捕食、逃避) には弱く反応し、後方からの刺激には強く反応する、ここにも自然界の法則が厳正に生態行動の上に守られておる。

謝辞 この研究は、昭和 45 年度・総合研究 (A)、課題番号 2009・代表者・東大海洋研・黒木敏郎教授の指導の下で、実験を行ったものであり、また、長大水産学部竹村暁助教授のご協力をいただき深甚の謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) R. BAINBRIDGE : J. Exp. Biol, **35**, 109—133 (1958)
- 2) K. TSUKAMOTO, T. KAJIHARA, and M. NISHIWAKI : Jap. Soc. Sci. Fish., **41**, 2, 167—174 (1975).
- 3) 塚本勝己：梶原武：水産土木. **10**, 1, 31—36 (1974).
- 4) 大渡敦：長崎大学. 教育. 自然科学研究報告**30**, 123—132 (1979).

- 5) 内菌耕二：生体の電気現象（I），コロナ社．106—113（1967）．
- 6) 内菌耕二：生体の電気現象（I），コロナ社．8—10（1967）．
- 7) 川本信之：魚類の生理，恒星社．519—530（1977）．
- 8) 岩瀬善彦．玉重三男．古河太郎：生物電気，南江堂．347—452（1970）．
- 9) 橋本 亨：生物のコミュニケーション，オーム社．**24**，6，98—100（1979）
- 10) 伊藤 薫：脳と神経の生物学，培風館．80—82（1975）．
- 11) 額田 巖：電気過度現象，修教社．49—52（1940）．
- 12) 佐藤達男：電子計算機，オーム社，167—186（1967）．
- 13) 平山 博．小原啓義：電子計算機，コロナ社．1—46（1969）．
- 14) 遠山貞之助：全国造船教育研究会誌，2（1966）．
- 15) 市川常雄：水力学．流体力学，朝倉書店．71—88（1973）．
- 16) 森田 清：超短波，修教社．430—433（1945）．