

濁った水に対する海水魚の行動*

森永 勤**・小池 隆***・大友啓一**・松生 治**

Response of a fish school to turbid water*

Tsutomu MORINAGA**, Takashi KOIKE***, Keiichi OOTOMO**
and Kanau MATSUIKE**

Abstract: Using a TV-camera and VTR system, the responses of a fish school to turbid water were examined with an indoor water tank under constant illumination. The tank is of rectangular shape, provided with openings for water supply at both ends of the tank, and drains on both sides in the center. The fish used are Japanese horse mackerel *Trachurus japonicus* and parrot fish *Oplegnathus fasciatus*, specimens having total lengths of 6 to 10 cm. The matter suspended in turbid water consisted of four different substances: sand, phytoplankton, red clay and bottom mud. A beam attenuation coefficient (C , m^{-1}) is introduced as an index of turbidity of water.

To water turbid with sand, horse mackerels show an extreme response of avoidance, thus seeking out the least turbid parts. Parrot fish, on the other hand, seem much less sensitive to turbidity, and show little or no avoiding behaviour at all. The smallest value of beam attenuation coefficient for getting an avoidance response is $5.0 m^{-1}$ (concentration of sand in water, $4.9 mg/l$), i. e. the difference between the turbidity of test water and that of the water which the fish inhabited before the experiment. This coefficient has no connection with the turbidity of water inhabited and the kind of matter suspended. It is concluded from the discrimination of horizontal slope of irradiance that the action of avoidance depends heavily on visibility.

1. 緒言

近年、沿岸域における海中の濁りは非常に増加している。海中の濁りを生じさせる物質は主に、河川あるいは埋め立てや浚渫工事の各現場から流出した無機懸濁粒子と、プランクトンの異常発生などによる有機懸濁粒子である。これらの濁りが沿岸域に生息する魚類にいろいろな悪影響を及ぼすことは容易に推察される。したがって、海中の濁りが魚類の行動にどのような影響を及ぼすかを解明することは、沿岸漁業にとって極めて重要である。

この問題に関して、クロダイ幼魚は濁水に遭遇すると、その濃度や色彩の相違によって接近・後退・進入などの行動を示す(岩田, 1978)。又、アイゴ類(礁湖性魚類)が赤土濁りに対して定座静止、あるいは遊泳回避の回避運動をすることは明らかにされている(伊野波, 1978)。しかし、これらの研究では濁り濃度が十分定量化されていない。

本研究の特徴は、実験魚として沿岸漁業の重要対象魚種のうちマアジ(回遊魚)とイシダイ(根付魚)、かつ濁りの指標として濁り濃度の定量化ができる濁度(光束消散係数, m^{-1})を選択した点にある。本論文では、濁った水に対する魚の反応の魚種による相違、濁った水に遭遇した時の魚群の行動と濁り濃度との関係、回避行動を起こす限界の濁り濃度及びその原因について検討した。

* 1987年11月25日受理 Received November 25, 1987

** 東京水産大学 〒108 東京都港区港南4-5-7
Tokyo University of Fisheries, Konan-4, Minato-ku, Tokyo, 108 Japan

*** 三重大学生物資源学部 〒514 三重県津市江戸橋2-80 Faculty of Bioresources, Mie University, Edobashi 2-80, Tsu, Mie, 514 Japan

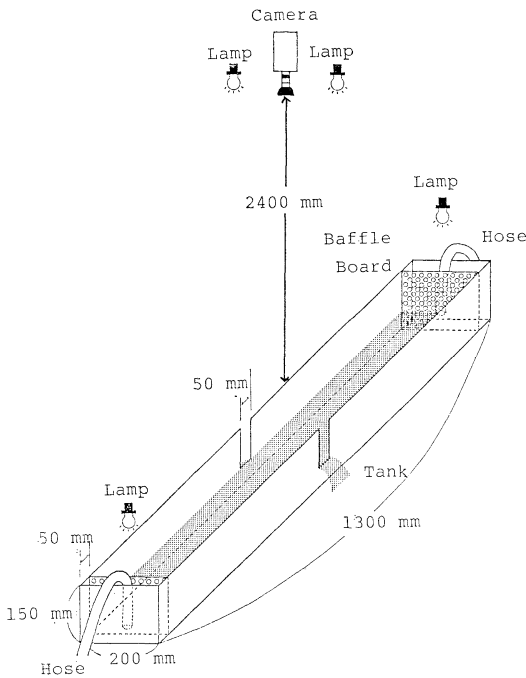


Fig. 1. Sketch of water tank and illumination.

2. 実験装置と方法

実験は Fig. 1 に示すような長さ 130 cm, 幅 20 cm, 深さ 15 cm の長方形水槽で行った。水槽両端に給水口を, 中央の左右両側壁に排水口をそれぞれ設けた (日高・立川, 1985)。水槽の上方約 2.4 m にテレビカメラ (CCTV-CAMERA HV-17TJ) と照明装置 (白熱電球 100W, 2W 各 2 個) を設置し, 周囲は暗幕で囲った。実験装置の配置は Fig. 2 のようである。2 ケの予備水槽 (容積 420 l) に貯めた海水を水槽両端より, 2 台のポンプで注水し, 中央に海水の明確な境界が出来るようにした。その時の流速は 1.2 cm/s であった。この場合, 魚の走流性や境界での行動変化は認められなかった。濁った水は, ろ過海水に土砂粒子, 植物プランクトン, 赤土及び海底土を懸濁させて作った。濁った水の濁り濃度は光束透過率計 (重心波長: 486 nm, 光路長: 1 m) を使用して, 正確にかつ連続的に測定した。光束消散係数 (C , m^{-1}) と懸濁物量 (SS, mg/l) とには下記のような直線関係があり, 相関係数 (r) は 0.99 以上で非常に高い。

土砂粒子:

$$C_t - C_w = 1.02 \cdot SS + 0.01 \quad (r = 0.996)$$

植物プランクトン:

$$C_t - C_w = 0.10 \cdot Chl.a + 0.15 \quad (r = 0.998)$$

赤土:

$$C_t - C_w = 0.91 \cdot SS + 0.04 \quad (r = 0.998)$$

海底土:

$$C_t - C_w = 0.77 \cdot SS + 0.23 \quad (r = 0.989)$$

但し C_t : 濁った水の光束消散係数

C_w : きれいな水の光束消散係数

$Chl. a$: クロロフィル a 量 (mg/l)

各濁り物質の粒径分布は Fig. 3 のようである。

実験は 1986 年 6 月から 11 月にかけての 95 日間, 東京水産大学坂田実験実習場で行った。実験期間中の水温は 19.1~23.2°C, 塩分は約 34‰ であった。

供試魚には回遊性のマアジ *Trachurus japonicus*, 根付性のイシダイ *Oplegnathus fasciatus* (全長 6~10 cm) を用いた。定置網で採捕した後数時間安静にさせたものを使用し, 実験毎に新しい魚と交換した。実験魚の総数は 795 尾であった。

実験手順の概要を以下に述べる。実験水槽へ両側からきれいな海水を注入し続け, 実験魚 3 尾を收容する。この時の水面直下の照度は 20 lx とする。魚が群れとして水槽を万遍なく回遊することを確認したら水中照度を 60 lx とする。この状態で安定した往復運動 (1~5 往復/分) を行うようになった時点で, ビデオ録画を開始する。20 分後, 片方の注水を濁った水に切り替え, 更に 20 分間ビデオに録画する。次に, 濁り濃度を変えて実験を繰り返す。魚群行動をビデオの録画記録から 5 秒間隔で読取った。魚の位置は魚体の吻端とした。出現率は次式で求めた。

$$\text{出現率} = \frac{\text{濁った水側へ出現する個体の数}}{\text{水槽内の個体の総数}} \times 100(\%)$$

3. 結果及び考察

3-1 濁った水に対するマアジとイシダイの反応

きれいな水にいた魚群が濁った水に遭遇した時の反応は, マアジ (回遊魚) とイシダイ (根付魚) でどのような差がみられるかを調べた。Fig. 4 は両魚種における出現率の時系列を示す。時系列は 1 分毎の移動平均値である。A 図はきれいな水と濁った水 (濁り物質は土砂) との濁度差が $0.8 m^{-1}$, B 図はその濁度差が $6.6 m^{-1}$ の場合である。濁った水注入の開始前の出現率は変動が少ないので 10 分間のみの結果を示す (以下, 同様とする)。A 図の場合, マアジの出現率は低濁度水により 80% から 30% に激減するが, イシダイのそれは 45% 前後でまったく変化しない。一方, B 図の場合, マアジの出現率は高

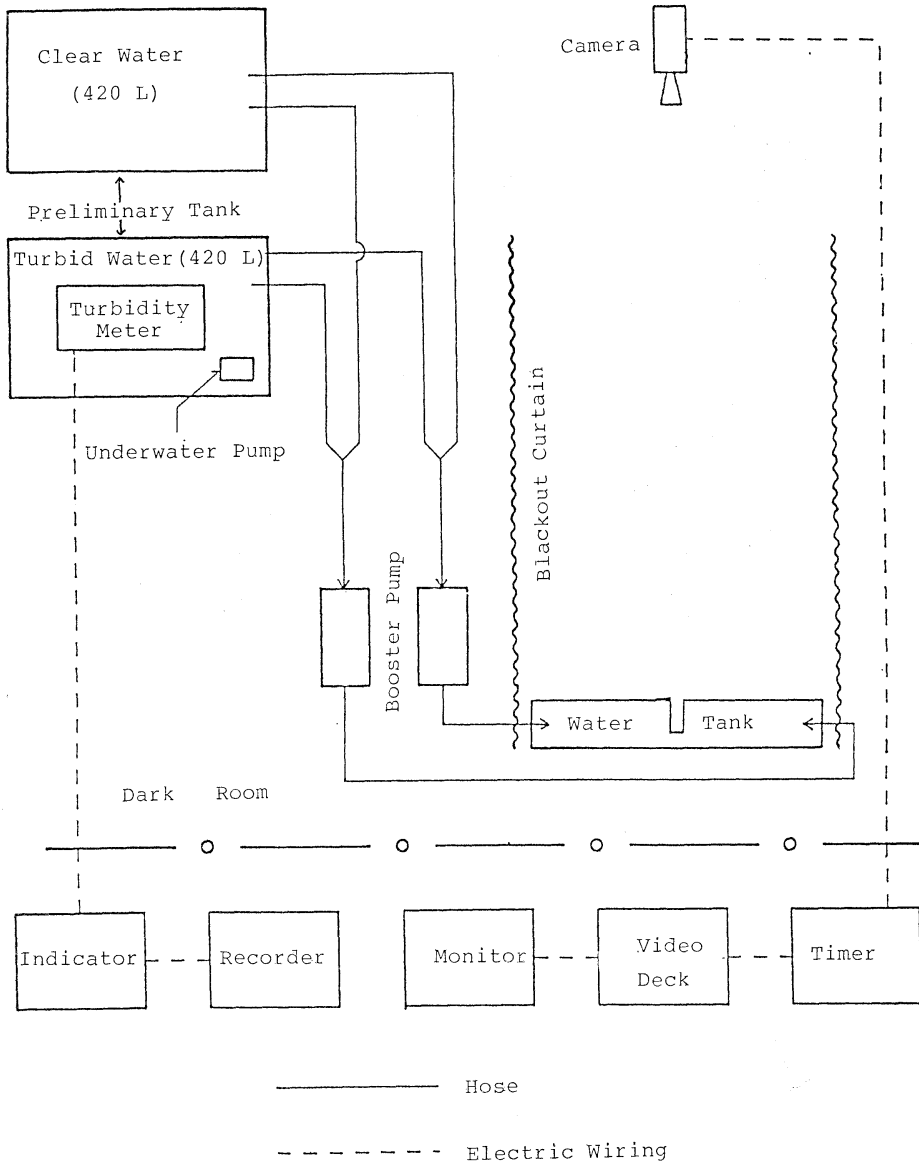


Fig. 2. Schematic diagram of equipment and arrangement.

Table 1. Values of swimming speed and differential rate at different turbidities.

Turbidity	Horse Mackerel		Parrot Fish	
	0.8 m ⁻¹	6.6 m ⁻¹	0.8 m ⁻¹	6.6 m ⁻¹
Before pouring	11.7 cm/s	10.8 cm/s	9.5 cm/s	8.1 cm/s
After pouring	15.4 cm/s	21.0 cm/s	7.1 cm/s	9.0 cm/s
Rate (%)	+31.7	+95.7	-25.7	+11.2

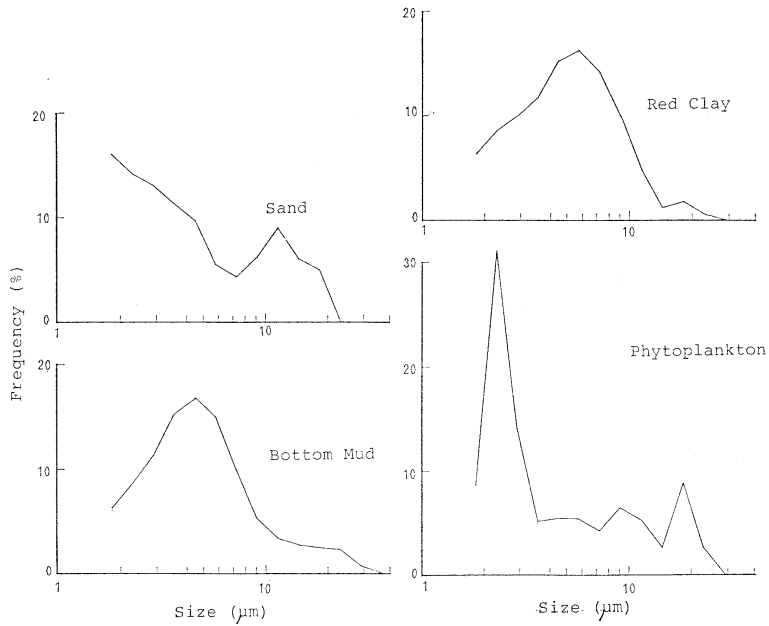


Fig. 3. Size distributions of suspended matters.

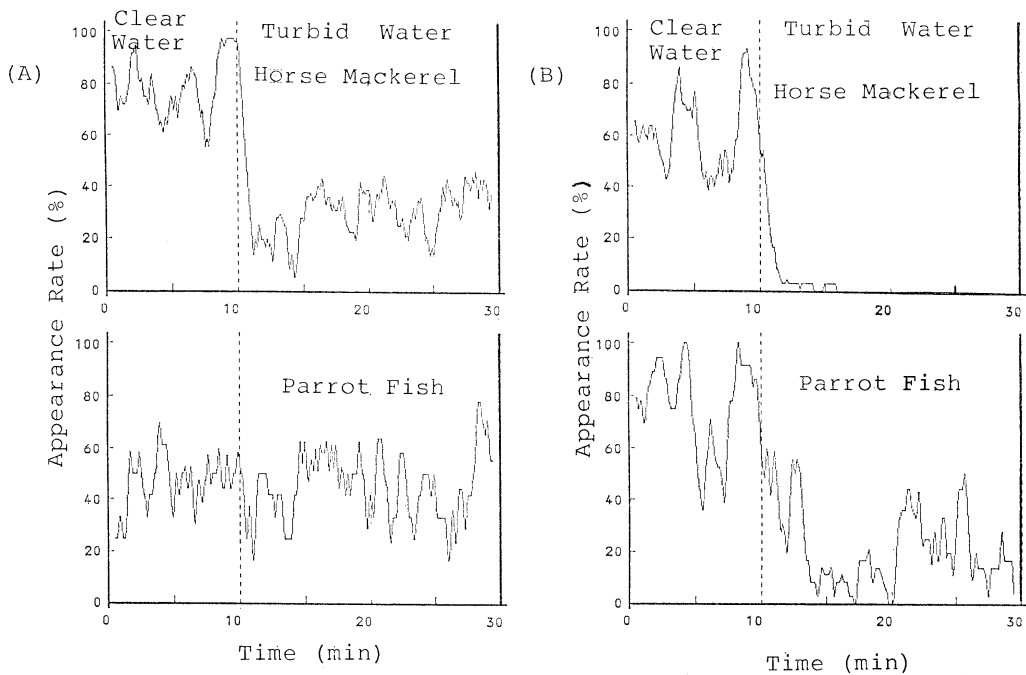


Fig. 4. Appearance rates of Japanese horse mackerel and parrot fish. A: $C_t - C_w = 0.8 \text{ m}^{-1}$, B: $C_t - C_w = 6.6 \text{ m}^{-1}$. These values are shown as differences between the turbidity of test water (C_t) and that of the water which fish inhabited before the experiment (C_w).

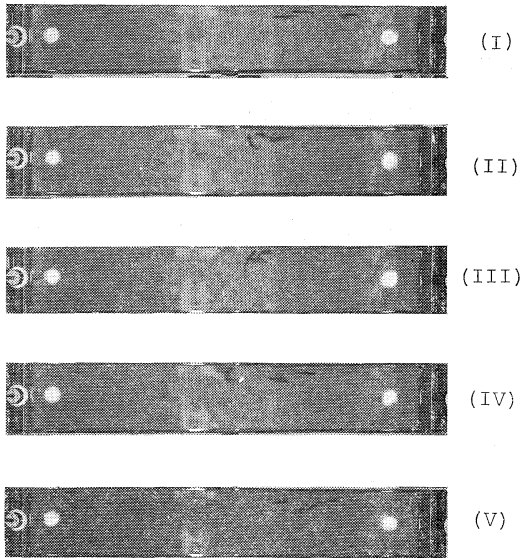


Fig. 5. Action of avoidance by Japanese horse mackerel. The part of clear water (0.3 m^{-1}) is on the right side, and the turbid water (6.9 m^{-1}) on the left side. In the fourth scene, a fish is turning around.

濁度水注入の開始後、数分で零になる。インダイのそれは注入開始後低下するが、約10分後に再び増加している。これらより、濁った水に対する忌避反応はマアジの方がより強く、インダイでは高濁度水の場合のみ、少し認められる。

Fig. 5 はマアジが濁った水に遭遇した場合の連続写真の一例である。濁った水 (光東消散係数, 6.9 m^{-1}) は水槽の左側, きれいな水 (同上, 0.3 m^{-1}) は右側である。第4番目の場合において, マアジが濁った水ときれいな水との境界付近で反転し, 濁った水域から後退するのを観察できる。忌避反応をより詳しく知るため, 魚が反転後, 濁った水域から回避する時の遊泳速度を調べた。Fig. 6 がその結果である。黒丸印がマアジ, 白三角印がインダイをそれぞれ示す。これらの値は反転後1秒間の移動距離から速度を算出し, 1分毎に平均したものである。又, (A)と(B)の図は低濁度水 (0.8 m^{-1}) と高濁度水 (6.6 m^{-1}) の場合である。両図より, マアジの遊泳速度は急激に増加するが, インダイのそれはほとんど変化しない。濁った水注入前後の平均遊泳速度の値と変化率は Table 1 のようである。

以上から, 濁った水に対する魚の反応はマアジとインダイでは相違し, 前者は著しく強い忌避反応を示すとい

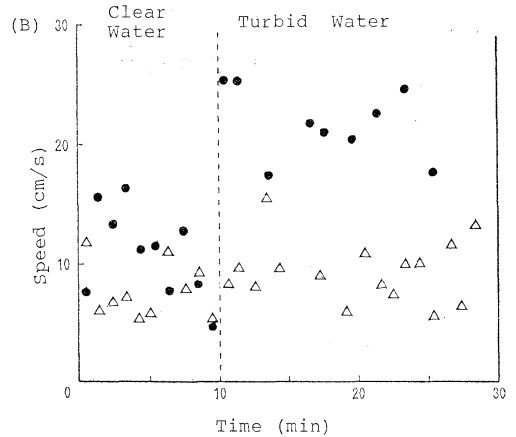
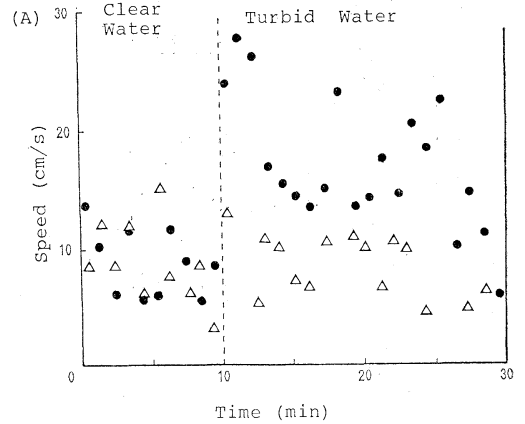


Fig. 6. Variations of swimming speed due to turbid water. Circles and triangles mean Japanese horse mackerel and parrot fish, respectively. (A) $C_t - C_w = 0.8 \text{ m}^{-1}$; (B) $C_t - C_w = 6.6 \text{ m}^{-1}$.

える。すなわち, マアジでは完全に忌避する濁った水に対しても, インダイではそれへ侵入する。また, 濁った水に遭遇した時の反転直後の遊泳速度が, マアジでは非常に大きく変化するけれども, インダイではまったく変わらない。

3-2 忌避行動を起こす限界の濁り濃度

濁った水に対し敏感に反応したマアジを用いて, 完全に忌避する限界の濁り濃度を検討した。Fig. 7 は濁り濃度別における出現率の時系列である。時系列は1分毎の移動平均値で示す。又, 濁り物質は土砂粒子で, 図中のC値はきれいな水と濁った水との濁度差を表示する。濁った水注入の開始前 (10分以前), 出現率はいずれのC値においても, 50~80%の範囲内にある。濁った水注入

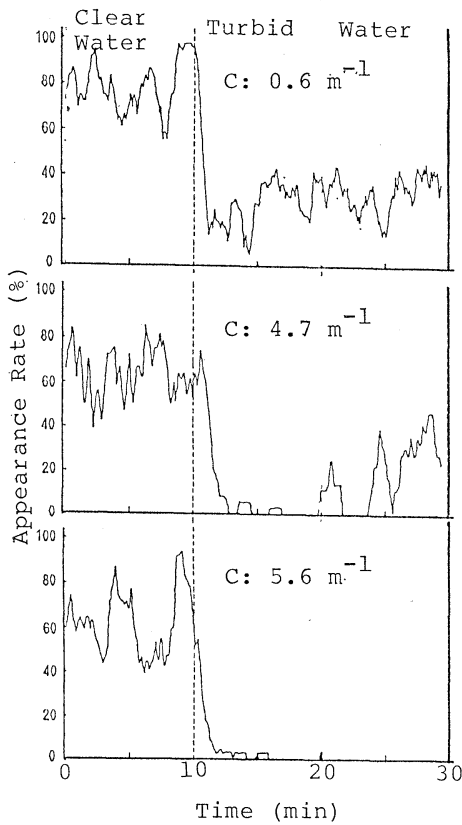


Fig. 7. Variation of appearance rates as a function of turbidity of water. The values of C are shown in the same way as in Fig. 4.

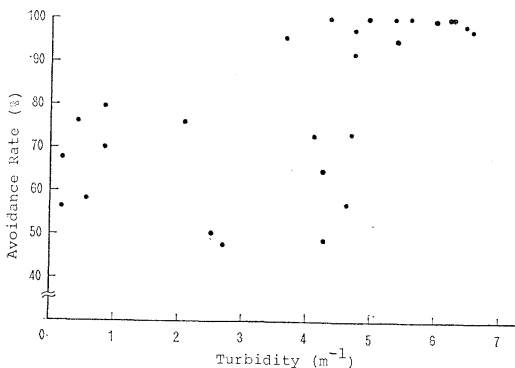


Fig. 8. Relation between avoidance rate and turbidity of water. The values of turbidity are the same as in Fig. 7.

の開始後(10分以後), これらの出現率は C 値が大きくなる程小さくなる。特に, C 値 5.6 m^{-1} では出現率が零になり, 濁った水を完全に忌避しているといえる。そこ

で, マアジが忌避する濁り濃度の限界値をさらに詳しく知るため, 次式で求めた忌避率 (Ar) と濁度差との関係を Fig. 8 に示す。

$$Ar = \frac{K - N}{K} \times 100 (\%)$$

但し, K : きれいな水の注水時, 10分間に滞在する個体の総数

N : 濁った水の注水時, 10分間に滞在する個体の総数

ここで, 忌避率 (Ar) が100%であれば, 魚が濁った水域へ1回も侵入しなかったことを意味する。同図より, 忌避率が約100%になる濁度差はおよそ 5.0 m^{-1} であることが判る。したがって, 魚はこれ以上の濁り濃度の高い濁った水に遭遇した時, その水塊を完全に忌避することは明白である。

次に, 濁った水にいたマアジがさらに濁った水に遭遇した時の行動反応を調べた。Fig. 9は高濁度水(試験

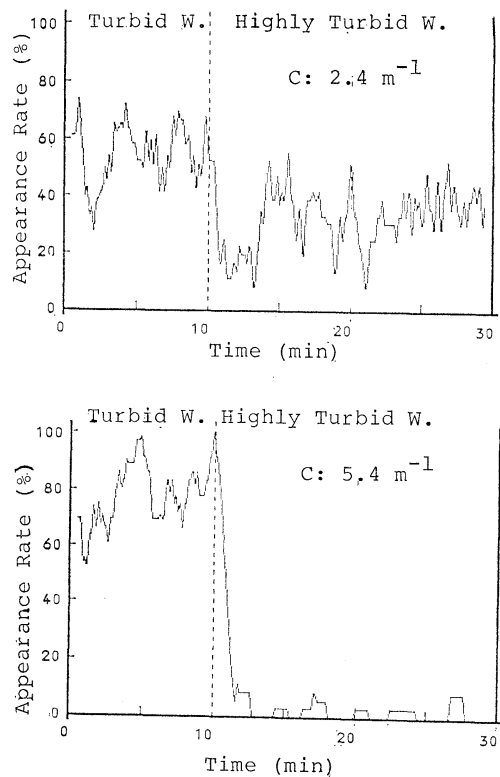


Fig. 9. Variation of appearance rates due to turbid water versus water with much higher turbidity. Upper part: 4.2 m^{-1} (turbid water). Lower part: 1.0 m^{-1} (turbid water). The values of C are shown in the same way as before.

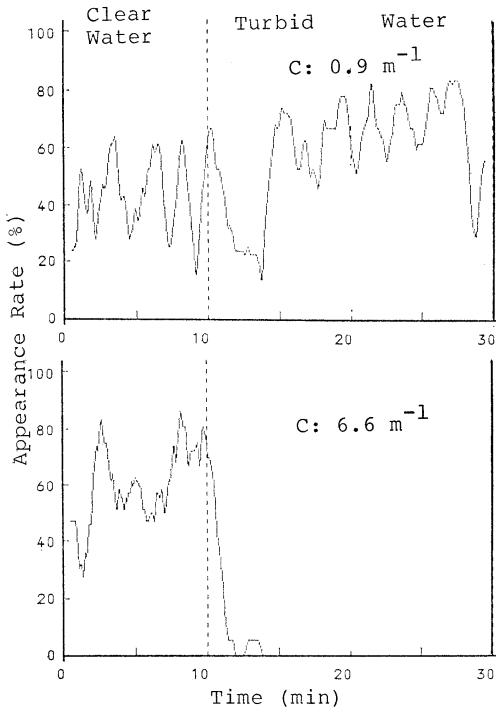


Fig. 10. Variation of appearance rates due to water turbid with phytoplankton. The values of C are the same as before.

水)側の出現率の時系列である。上・下図は試験水注入の開始前、濁った水の濁り濃度が 4.2 m^{-1} と 1.0 m^{-1} の場合である。図中の C 値は Fig. 7 の場合と同様、濁った水と試験水との濁度差を示す。両図において、試験水注入の開始前、出現率は $50\sim 80\%$ の範囲にある。注入開始後、これらの値は C 値 2.4 m^{-1} では 30% と低下している。また、 C 値 5.4 m^{-1} ではほとんど零に激減する。この結果は Fig. 7 の下図の場合と一致している。したがって、濁った水に遭遇した魚がその水塊を完全に忌避するのは、もといいた環境水の濁度に関係なく、濁度差が 5.0 m^{-1} 以上の高濁度水に遭遇した場合であると判断できる。

以上に述べた結果は濁り物質が土砂粒子の場合であった。これに対し濁り物質が植物プランクトン *Tetraselmis* の場合を Fig. 10 に示す。図において、濁った水注入の開始前、出現率は $50\sim 60\%$ の範囲にある。注入開始後、これらの値は C 値 6.6 m^{-1} (5.0 m^{-1} 以上) において零になり、マアジが完全に忌避していることが判る。同様な結果は濁り物質が赤土及び海底土の場合においても得られた。しかし、植物プランクトンの濁り物質

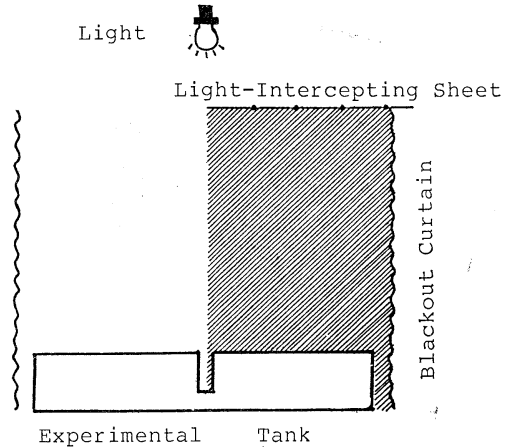


Fig. 11. Establishment of horizontal gradient of irradiance in clear water.

では他の濁り物質の場合と異なり、Fig. 10 の上図 ($C: 0.9\text{ m}^{-1}$) のように濁った水に好んで接近・侵入する傾向がみられた。したがって、マアジが濁った水に遭遇した時完全に忌避するのは、もといいた環境水の濁度や濁り物質の種類に関係なく、もといいた環境水と濁った水との濁度差が 5.0 m^{-1} 以上の場合であるといえる。

3-3 忌避行動を起こす原因

外界の変化(刺激)に対して魚が反応行動を起こす場合、視覚・嗅覚・味覚・触覚・聴覚の各感覚が働いているものと考えられる。マアジが濁った水に対して完全な忌避行動を起こす濁り濃度は濁度差が 5.0 m^{-1} 以上の場合であり、この濁度差は濁り物質を変えても一定であることを 3-2 で明かにした。したがって、マアジが濁った水を感じ、これを回避するのは視覚の働きに依るところが大きいと考えられる。すなわち、海中の明るさの相違あるいはそれに基づく照度勾配を魚が判別していることになる。

そこで、水槽内に照度差(水平方向の照度差)をつくり、その時のマアジの行動を観察した。Fig. 11 で示すように、水槽上の空間を遮光幕で半分蔽い、明域と暗域ができるようにした。明域の照度は前項と同様、水面直下 60 lx 、暗域の照度は $45, 25, 15, 10$ 及び 3 lx とした。Fig. 12 は各照度差における低照度側の出現率の時系列である。図中の E 値は明域と暗域との照度差を示す。また、水槽内の海水の濁度は 0.3 m^{-1} である。水槽全体を明域にした場合、出現率は $50\sim 60\%$ の範囲にある。水槽上を明域と暗域とに区分した場合、これらの値は E 値 45 lx 以上で零になる。すなわち、マアジは照

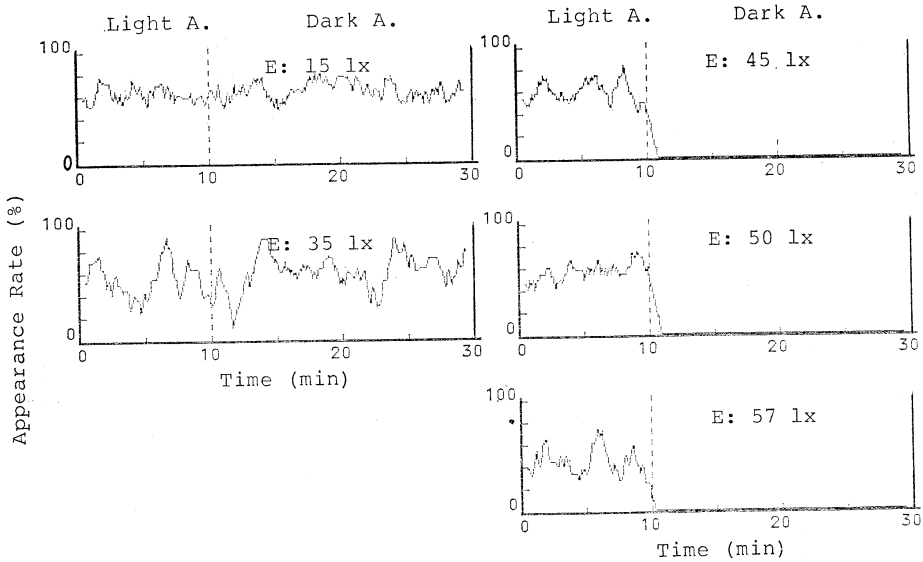


Fig. 12. Variation of appearance rates as a function of irradiance in clear water. The values of E are shown as differences between the irradiance of the illuminated water area and that of the dark water area.

度差 35 lx 以下では明暗両水域を自由に遊泳する。しかし、照度差 45 lx 以上では暗い水域へまったく侵入しない。このことから、マアジが暗い水域への侵入を回避するのは水中照度の差（あるいは水平方向の照度勾配）の判別であるといえよう。したがって、マアジが濁った水を忌避する時、上記と同じ原因であることを証明できれば、忌避行動は視覚に依存していることになる。

濁った水で生じる水中照度の差（あるいは水平方向の照度勾配）を水槽において実測することは非常に困難なので、モデルを用いた理論計算から推定した。今、きれいな水と濁った水で生じる照度勾配 (Case I) と、きれいな水中において明域と暗域で生じる照度勾配 (Case II) の2つのモデルを考える (Fig. 13)。水面直下の下方向照度 $E_d(0)$ は JERLOV (1976) によると

$$E_d(0) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(0, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (1)$$

である。ただし、 $L(0, \theta, \phi)$ は水面直下で天頂角 θ 、方位角 ϕ における輝度とする。また、水深 Z における下方向照度 $E_d(Z)$ は(1)式と同様に

$$E_d(Z) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(Z, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (2)$$

である。ただし、 $L(Z, \theta, \phi)$ は水深 Z で天頂角 θ 、方位角 ϕ における輝度とする。

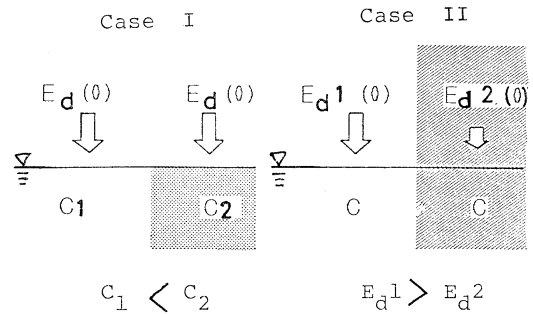


Fig. 13. Concept of a model for estimating horizontal slopes of irradiance. $E_d(0)$: Irradiance beneath water surface. C : Beam attenuation coefficient.

位角 ϕ における輝度とする。なお、 $L(0, \theta, \phi)$ と $L(Z, \theta, \phi)$ とは下記のような関係にある。

$$L(Z, \theta, \phi) = L(0, \theta, \phi) \cdot \exp[-C \cdot Z \cdot \sec \theta] \quad (3)$$

ただし、 C は光束消散係数である。ここで、Fig. 14 に示すように、境界から水平距離 X 離れた水深 Z での下方向照度 $E_d(Z)$ を $E_Z(X)$ と置換する。 $E_d(0)$ 、 C 及び Z が与えられれば、 $E_Z(X)$ は X の関数として次式で表すことができる。

Case I の場合

$$E_z(X) = E_a(0) \left\{ \int_{\theta=0}^{\pi/2} f_1(\theta) d\theta + \int_{\theta=0}^{\theta'} f_1(\theta) d\theta + \int_{\theta=\theta'}^{\pi/2} f_2(\theta) d\theta \right\} \quad (4)$$

ただし,

$$\begin{aligned} f_1(\theta) &= \exp[-C_1 \cdot Z \cdot \sec \theta] \cos \theta \cdot \sin \theta \\ f_2(\theta) &= \exp[-\operatorname{cosec} \theta \{X(C_2 - C_1) + C_1 \cdot Z \cdot \tan \theta\}] \cos \theta \cdot \sin \theta \\ \theta' &= \tan^{-1}(X/Z) \end{aligned}$$

Case II の場合

$$\begin{aligned} E_z(X) &= E_{a1}(0) \left\{ \int_{\theta=0}^{\pi/2} f(\theta) d\theta + \int_{\theta=0}^{\theta'} f(\theta) d\theta \right\} \\ &+ E_{a2}(0) \int_{\theta=\theta'}^{\pi/2} f(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

ただし,

$$f(\theta) = \exp[-C \cdot Z \cdot \sec \theta] \cos \theta \cdot \sin \theta$$

(4)式に $E_a(0) = 60 \text{ lx}$, $C_1 = 0.3 \text{ m}^{-1}$, 及び $C_2 = 5.8 \text{ m}^{-1}$, (5)式に $E_{a1}(0) = 60 \text{ lx}$, $E_{a2}(0) = 25 \text{ lx}$, 15 lx 及び $C = 0.3 \text{ m}^{-1}$ をそれぞれ代入した計算結果を Fig. 15 に示す。図中の点線は Case I, 実線は Case II の場合である。実線において, 上方は水面下の照度 $E_{a2}(0)$ が 25 lx (照度差: 35 lx), 下方はそれが 15 lx (照度差: 45 lx) を意味する。同図より, 点線は境界付近 (水平距離で約 5 cm の範囲) で両実線の間中に位置している。又, この時の照度勾配の値 (水平方向の) は $4\%/ \text{cm}$ である。この結果から, 魚群が濁った水を忌避する場合に, その境界域で形成されている照度勾配と, 明るい水域にいる魚群が暗い水域を忌避する時の照度勾配の限界値とは, ほぼ一致することが証明される。

実際の海洋でこれだけの著しい照度勾配がみられる場所は, 内湾の濁った水と湾外のきれいな水とのフロント付近や沿岸での工事現場等である。マアジは特に満 1 才までに沿岸域の分布が最も広がるので (田中等, 1981), 沿岸の濁りがマアジの来遊を妨げているとみるのが当然であろう。

4. 要約

(1) 濁った水に対する反応は回遊魚のマアジと根付魚のインダイでは異なる。マアジは濁った水に対し強い忌避反応を示すが, インダイはそのような反応をほとんど示さない。すなわち, 濁りに遭遇すると, マアジの場合には回避し, かつ反転後の遊泳速度が急激に上昇する。一方, インダイの場合には通常侵入し, かつその速度があまり変化しない。

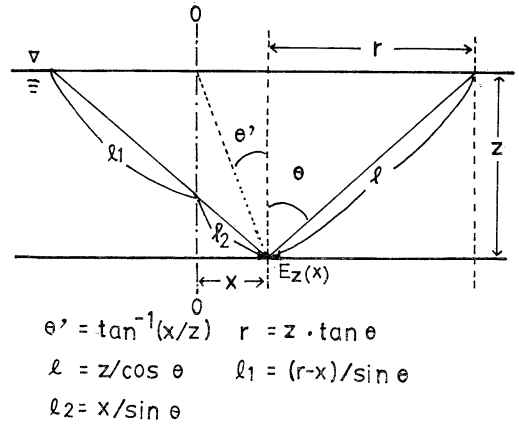


Fig. 14. Definition sketch for calculating underwater irradiance in the vicinity of boundary between light and dark area.

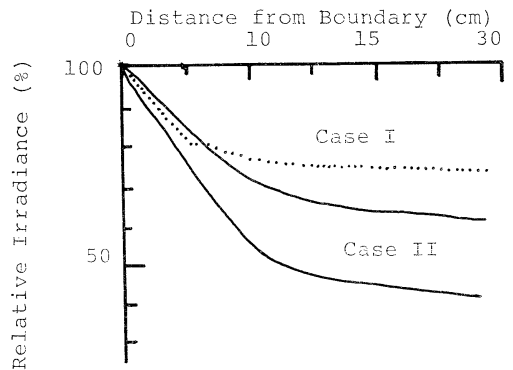


Fig. 15. Horizontal gradient of irradiance obtained by numerical calculations. In case I, the value of $C (=C_2 - C_1)$ is 5.5 m^{-1} . In case II, the upper and the lower lines indicate $E_{a2} = 25 \text{ lx}$ and $E_{a2} = 15 \text{ lx}$, respectively.

- (2) マアジが忌避行動を起こす限界の濁り濃度は, もといた環境水と濁った水との濁度差 5.0 m^{-1} (土砂量換算: 4.9 mg/l) である。このことは, もといた環境水の濁度や濁り物質の種類に関係しない。
- (3) きれいな水中において照度勾配 (水平方向の) が約 $4\%/ \text{cm}$ より急な場合, マアジは高照度域から低照度域に侵入しない。この照度勾配はきれいな水と濁った水との濁度差 5.0 m^{-1} の場合にほぼ一致する。このことから, 濁りに対するマアジの忌避行動は視覚に依存していることが示唆される。

謝 辞

本研究の実験にご助力を頂いた東京水産大学坂田実験
実習場の小池康之講師ならびに技官の方々に深甚なる謝
意を表します。

文 献

日高秀夫・立川 涼 (1985): 魚類による化学物質の忌
避試験法(1). 生態化学, 7(4) 17-25.
伊野波盛仁 (1978): 赤土濁りに対する魚類の嫌忌性実

験. 赤土の流出による漁場の汚染状況調査報告書.
沖縄県.

岩田清二 (1973): 魚類の行動におよぼす濁りの影響.
本州四国連絡架橋 漁業影響 調査報告書 4. 日本水
産資源保護協会.

JERLOV, N.G. (1976): Marine Optics. Elsevier Sci.
Publ. Co., Amsterdam.

田中昌一・川崎 健・森田 祥・土井長之 (1981): 水
産資源各論. 新水産ハンドブック. 講談社, 東京.