

## 水中の濁りと魚の視力との関係(3)

濁った水中における魚の小さなターゲット(餌)に対する反応\*

中村 善彦\*\*・松生 治\*\*

### Relationship between turbidity of water and visual acuity of fish

#### (3) Fish reaction to small bait target in turbid water\*

Yoshihiko NAKAMURA\*\* and Kanau MATSUIKE\*\*

**Abstract:** Influence of water turbidity on fish visual acuity was experimentally investigated with Japanese parrotfish *Oplegnathus fasciatus*. The reactive distance of the fish to small target was examined with different target sizes at different beam attenuation coefficients. Visual acuity of the fish in clear water was estimated to be 0.09. It decreased exponentially with increasing beam attenuation coefficient. It was confirmed that the present results were consistent with those of previous papers.

#### 1. 緒 言

内湾や沿岸域の海水は濁っており、光束消散係数は海域により季節により変化する。水中の濁りは光の透過を妨げ、海中の明るさを低下させるばかりでなく、魚の生理・生態に種々の悪影響を与えることは容易に推察される。なかでも、視覚への影響は餌や漁具など水中ターゲットに対する反応や回避に密接に関係するので非常に重要な課題である。

魚の餌に対する反応に関しては O'BRIEN *et al.* (1976), CONFER *et al.* (1978) および VINYARD and O'BRIEN (1976) らによって研究されている。O'BRIEN *et al.* (1976) は bluegill *Lepomis macrochirus* の素餌が視覚によるもので、大きな餌から順に摂餌されることを報告している。CONFER *et al.* (1978) は lake trout *Salvelinus namaycush* の餌に対する反応距離が餌の大きさに対して直線的に増大すること、濁りが増すと餌に

対する反応距離が減少することを明らかにしている。また、VINYARD and O'BRIEN (1976) は bluegill を用いて同様の結果を得ている。しかしながら、水中の光学的要因としての濁りと魚の行動の関係を定量的に捉えた研究は非常に少ない。

水中の濁りと魚の視力に関する第1報 (MATSUIKE *et al.*, 1981) では実験魚としてコイ *Cyprinus carpio* を用い、清澄な水中における視力を条件反射手法で求めた。次に、光束消散係数(重心波長, 486 nm)が増した場合、魚の視力がどの様な影響を受けるかを調べ、その原因について検討し理論式を求めた。第2報 (中村・松生, 1985) では小さなターゲットの光学物理量の特性を明らかにし、光束消散係数が増した場合に魚が小さなターゲットをどれほどの距離から視認出来るかを調べた。

本報では実験魚として自由に遊泳する海産魚のイシダ *Oplegnathus fasciatus* を用い、小さいターゲット(餌)に対する反応距離をターゲットの大きさおよび光束消散係数を変えて観察し、視認限界を求めた。さらに、第1, 2報の条件反射手法により得られた結果が、人為的影響を受けていない海産魚に適用されるか否かを検証した。

\* 1989年4月11日受理 Received April 11, 1989

1988年5月学術研究発表会において一部発表

\*\* 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

2. 実験装置および方法

2-1 実験装置

魚の反応の測定には長さ 200 cm, 幅 60 cm, 水深 30 cm の実験水槽を作製して用いた。その見取図と平面図の概略を Fig. 1 に示す。水槽内部は黒色布地で覆い, 前端から 75 cm の所で, 前部と後部に仕切った。仕切りの中中央には幅 16 cm の門を, その両側には誘導側壁を設けた。門から後端までの距離は 125 cm であり, その底部には 5 cm 間隔で目盛りを描いた。水槽内の照明には, 10 W の白色蛍光灯 4 本を水槽の後部上方にオパールガラスを介して設置した。また, 後部の斜め上方にはビデオカメラを取り付けた。

濁り物質として海底土を海水に再懸濁させ, 40 分間放置した後, その上澄み液を用いた。海底土は館山湾の川口付近で採取し, 2 日間にわたり天日乾燥した後, 殺菌用オーブンに入れて 120°C で 2 時間焼き, 殺菌・脱臭して用いた。水槽に濾過海水を水深 30 cm まで注入し, この上澄み液を加えることにより, 光束消散係数 (重心波長 486 nm) が 0.2 (濾過海水), 1.0, 2.0, 3.0 および 5.0 m<sup>-1</sup> の 5 種類の懸濁水を調整した。

懸濁粒子に関しては粒子重量と粒径分布を測定した。粒子重量はミリポアフィルター HA (0.45 μm) で濾過した後, 70°C で約 1 時間乾燥し, 秤量した。光束消散係数 α (m<sup>-1</sup>) と懸濁海底土の乾燥重量 G (mg/l) との

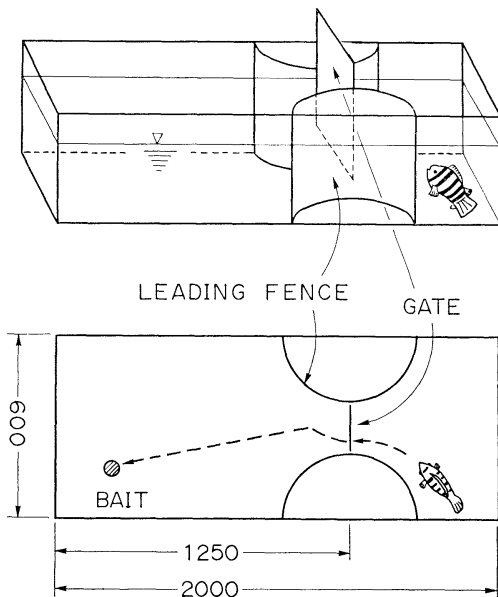


Fig. 1. Diagram illustrating the experimental tank used in the present study.

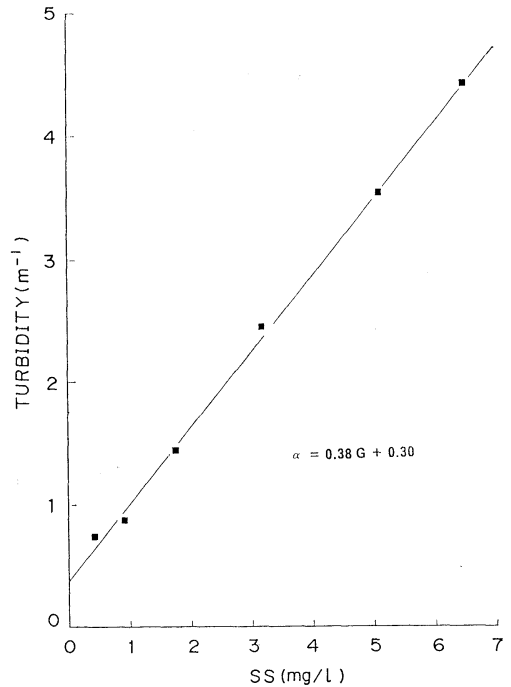


Fig. 2. Relationship between suspended particles (mg/l) and the turbidity (beam attenuation coefficient; wavelength of gravity center, 486 nm).

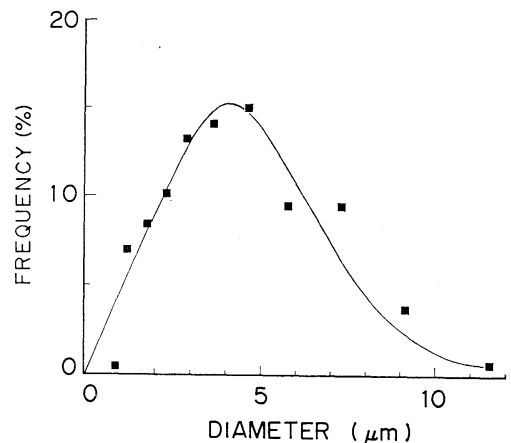


Fig. 3. Particle size distribution in turbid seawater prepared with sea bottom mud.

関係を Fig. 2 に示す。両者の間には次の実験式で示すような直線関係があり, 相関は非常に高い (相関係数 0.9)。

$$\alpha = 0.38G + 0.30 \quad (1)$$

このことから、懸濁物重量は光束消散係数（重心波長 486 nm）で表示した。なお、(1) 式の右辺の第 2 項は溶存態有機物質による吸収のためと考えられる。また、粒径分布は、コールターカウンターを用いて 1 μm から 30 μm までの粒子について測定した。粒径分布は Fig. 3 に示すような正規分布をしており、表面積平均粒径は 4.0 μm であった。

ターゲットとしての餌にはイカを円形に切ったものを使用した。その大きさは直径が 2 mm, 3 mm, 6 mm および 8 mm であり、厚さについては直径とほぼ同じ大きさに切り揃えた。

光束消散係数や距離の変化に基づく餌のアパレントコントラスト  $C(r)$  は、次のような DUNTLEY (1962) の式を用いて求めた。

$$C(r) = C(0) \exp(-\alpha r) \quad (2)$$

ここで、 $r$  は魚の眼から餌までの距離 (m)、 $\alpha$  は光束消散係数 ( $m^{-1}$ )、 $C(0)$  は距離 0 におけるコントラストである。なお、 $C(0)$  は餌の反射率を測定し、海中における背景の反射率を 0.02 (TYLER, 1968) として算出した。Table 1 は、距離 1 m における餌のアパレントコントラスト  $C(r)$  を (2) 式を用いて計算したものである。餌のアパレントコントラストは、最も濁った海水中でも、魚のコントラストスレッショールド 0.05 に比べてはるかに大きい。従って、視力の実験に支障はないものと判断した。

実験魚には、館山湾内の定置網で採捕した全長 14~20 cm のインダイ *Oplegnathus fasciatus* 25 尾を、薄暗くした飼育水槽に 1~3 日間収容したあとを用いた。

Table 1. Apparent contrast of bait at a distance of 1 m for different turbidities.

Turbidity ( $m^{-1}$ )	0.1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Apparent contrast	10.9	4.5	1.6	0.6	0.2	0.1

Table 2. Percent of the fish that took bait of different sizes at different turbidities.

Turbidity ( $m^{-1}$ )	Bait size (mm)			
	2	3	6	8
0.2	40	80	93	100
1.0	40	73	100	86
2.0	30	83	97	100
3.0	63	93	100	100
4.0	25	85	95	100

## 2-2 実験方法

実験は東京水産大学坂田実験実習場において次の手順で行なった。

- 1) 実験魚 1 尾を、薄暗くして隔離してある飼育水槽から、門を閉めた状態の実験水槽前部に移す。
- 2) 魚が落ち着いたのを確認してから、Fig. 1 に示すように、餌を水槽底後部に無作為に置く。
- 3) 門を開けると、魚は薄暗い前部から明るくしてある後部に入り、餌を発見すると Fig. 1 に点線で示すように直進する。
- 4) 餌摂取後、魚が前部に戻ったところで門を再び閉じる。

ここで、餌に反応して直進する点を反応位置とし、反応位置から餌までの距離を反応距離とした。なお、餌は円形の部分が魚に面するように置いた。

実験は 1 尾につき 10 回ずつ、3 尾について行ない、餌の大きさ、設置場所および光束消散係数を変えて繰り返し、実験総数は 600 回であった。

魚の餌に対する反応を水槽後端部から観察し、その反応位置を水槽底に描いた距離目盛から読み取った。また、魚の行動を斜め上方からビデオカメラで連続的に撮影した。

魚は満腹によって反応の鈍化 (CONFER *et al.*, 1978) をおこすことが予想されるので、餌は実験中に与えるだけとし、次の実験まで約 20 時間絶食状態で薄暗くした飼

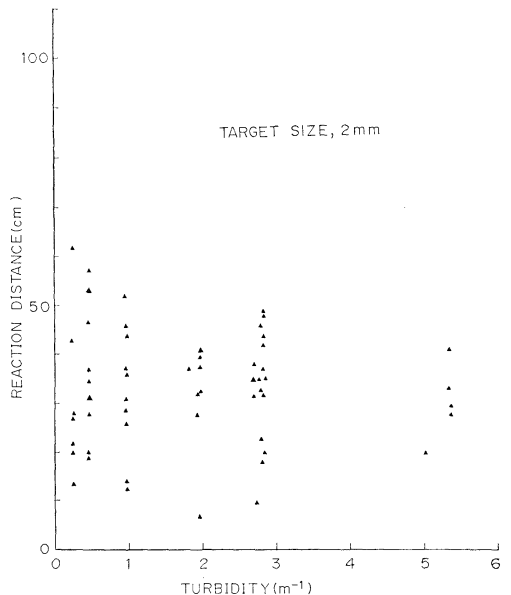


Fig. 4. Distribution of the reaction distance to bait 2 mm in diameter at different turbidities.

育水槽に隔離した。

実験中の水槽中央部における底面の明るさは濾過海水中で 340 lx, 光束消散係数が  $5.0 \text{ m}^{-1}$  では 240 lx であり, 水温は  $22\sim 24^\circ\text{C}$  であった。

### 3. 結果および考察

#### 3-1 濁った水中における魚の餌に対する 視認限界距離

餌を水槽底の後部にランダムに置き門を開けると, イシダイは後部に入り, 餌を見つけると遊泳速度を増して直進し, 摂餌する行動を繰り返した。Table 2 は海中の光束消散係数が増した場合の摂餌率を, 餌の大きさ別に示したものである。摂取率は, 3尾のイシダイを用い, 個体別にそれぞれ 10回餌を与えた場合の餌を食べた割合である。

清澄な海中 (光束消散係数  $0.2 \text{ m}^{-1}$ ) における摂餌率は, 餌の大きさが 8 mm および 6 mm では 90% 以上, 3 mm では 80% 以上であるが, 2 mm では 40% 以下に大きく減少した。2 mm の餌に対しては, 10回の測定において全く反応しない個体もあった。この場合でも, イシダイは餌の上あるいは横の至近距離を通過していた。ま

た, 光束消散係数が増すと, 摂餌率は 3 mm 以上の餌ではほとんど変わらないが, 2 mm の餌では減少している。以上の結果から, 餌の大きさが 2 mm 程度では非常に見つけ難いことが分かる。

Fig. 4, Fig. 5 および Fig. 6 は, 餌の大きさがそれぞれ 2 mm, 3 mm および 6 mm の場合について, 餌に対する反応距離を整理し示したものである。同図より, イシダイの餌に対する反応距離と光束消散係数の関係は餌の大きさによって変化することが分かる。2 mm の餌では, 反応距離は光束消散係数が増しても変化は少ない。餌を 3 mm および 6 mm に大きくすると, 光束消散係数の増加に伴って反応距離が減少する傾向が明らかに認められる。ここで, 水中の光束消散係数および餌の大きさを変えた場合の餌に対する反応距離の中で最も大きい反応距離を, イシダイが餌を視認できる限界の距離と考えた。

Fig. 7 は, 視認限界距離と光束消散係数との関係を餌の大きさ別に示したものである。なお, 視認限界距離については, イシダイ 3尾につきそれぞれ 10回の実験を行い, その反応距離の最大値から求めた。各シンボルマーク  $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$  および  $\nabla$  は, 餌の大きさがそれぞれ 2 mm,

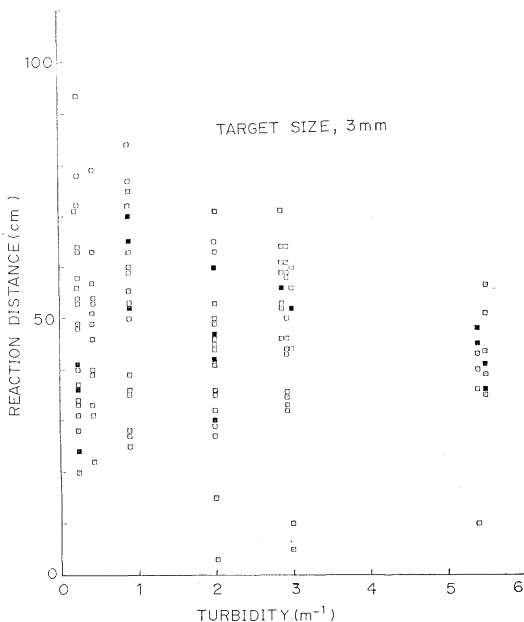


Fig. 5. Distribution of the reaction distance to bait 3 mm in diameter at different turbidities.

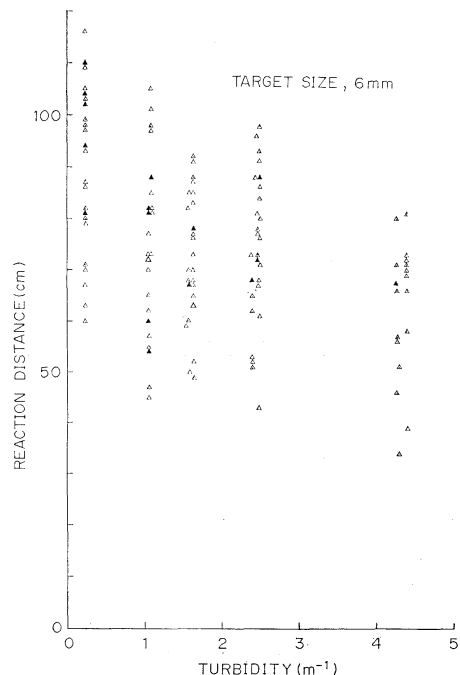


Fig. 6. Distribution of the reaction distance to bait 6 mm in diameter at different turbidities.

3 mm, 6 mm および 8 mm の場合であり, 各実線は最小二乗法により求めた回帰曲線である。

光束消散係数が  $0.2 \text{ m}^{-1}$ , 餌の大きさが 2 mm, 3 mm, 6 mm および 8 mm の場合の視認限界距離は, それぞれ 62 cm, 93 cm, 116 cm および 117 cm であり, 3 mm 以上のターゲットでは距離差が小さい。ターゲットの大きさが 3 mm から 2 mm に減少すると, わずか 1 mm の違いで 30 cm の距離差が生じている。また, 光束消散係数が増すと, 視認限界距離はどのターゲットでも指数関数的に減少している。

Fig. 7 から, ターゲットの大きさに対する視認限界距離を求めることによってインダイの視力を算出することができる。前述のように 2 mm のターゲットに対しては反応が悪かったこと, また 6 mm のターゲットに対する視認限界距離は水槽の長さが十分とは言いがたく, その影響が入ることが考えられるので, 3 mm の餌の結果を用いて試算した。

餌の大きさが 3 mm で, 光束消散係数が  $0.2 \text{ m}^{-1}$ ,  $0.9 \text{ m}^{-1}$ ,  $2.0 \text{ m}^{-1}$ ,  $2.8 \text{ m}^{-1}$  および  $5.2 \text{ m}^{-1}$  の場合にお

ける視認限界距離は, それぞれ 93 cm, 83 cm, 71 cm, 70 cm および 56 cm であった。これらより, 視認限界距離  $R_V$  (cm) は光束消散係数  $\alpha$  ( $\text{m}^{-1}$ ) の関数として次式で示される (相関係数  $-0.9$ )。

$$R_V = 91 \exp(-0.10 \alpha) \quad (3)$$

視力  $A_c$  は, 明るさおよびアパレントコントラストが十分大きいので, 距離  $L$  とターゲットの大きさ  $D$  から次式で求めることが出来る。

$$A_c = (120 \tan^{-1} \frac{D}{2L})^{-1} \quad (4)$$

光束消散係数が  $0.1 \text{ m}^{-1}$ , 餌の大きさが 3 mm の場合, 視認限界距離 90 cm が得られ, (4) 式を用いて計算するとインダイの視力は 0.09 になる。

インダイの視力については, 生理学的手法を用いて 0.14 (川村・下和田, 1983) であることが報告されている。この視力は本研究で求めた視力に比べて約 1.6 倍大きい。他の魚種においても生理学的手法で求められた視力の方が大きく, convictfish (YAMANOUCHI, 1956) で 1.4 倍, skipjack tuna (NAKAMURA, 1968) で 1.3 倍

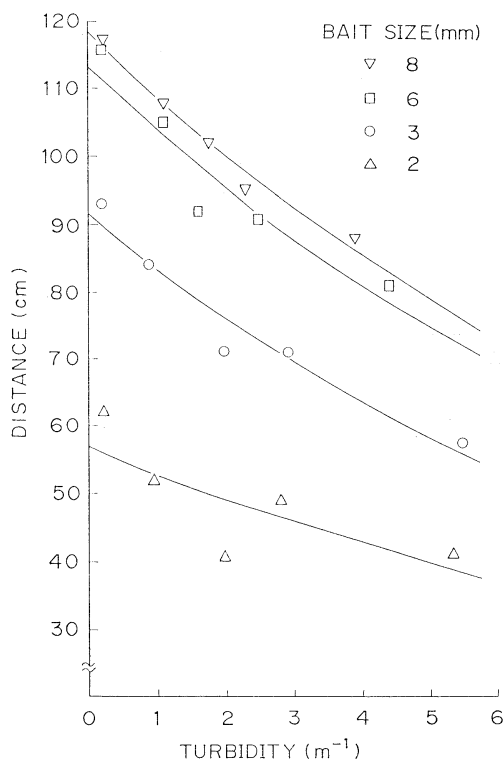


Fig. 7. Relation of the distance to bait at discrimination limit to the turbidity at different bait sizes.

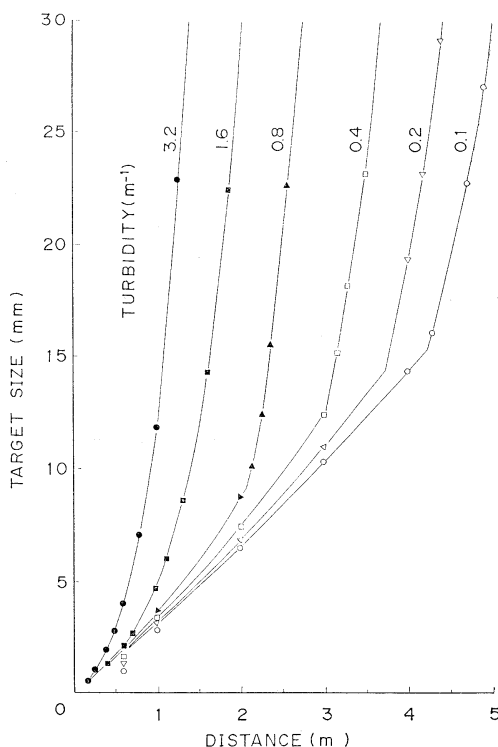


Fig. 8. Relationship between the target size and the distance to bait at discrimination limit under different turbidities.

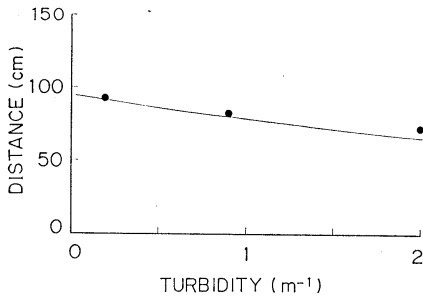


Fig. 9. Relation of the distance to bait 3 mm in diameter at discrimination limit to the turbidity. The line was calculated on the basis of Fig. 8. Solid circles indicate the highest values obtained in the present study.

の結果が得られている。

### 3-2 条件反射手法から求めた視力との整合性

前述のように本研究で得られたインダイの視力は0.09であり、第1報 (MATSUIKE *et al.*, 1981) で条件反射手法を用いて求めたコイの視力は0.11であった。これらは瀧過海中または汙過水中で求めたものであるが、水中の光束消散係数が増した場合について検討すると次のようになる。光束消散係数の増加に伴う視認限界の変化について、ターゲットの大きさと視認距離の関係を第2報 (中村・松生, 1980) から Fig. 8 に示す。同図は、コイを供試魚とし、条件反射手法を用いて測定した結果である。同図から、大きさ3 mmのターゲットを用いた場合、光束消散係数の増加に伴う視認限界距離の減少を求め、その結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 の黒丸 (●) は Fig. 7 で用いたインダイの3 mmのターゲットに対する視認限界距離を示したものであり、実線は Fig. 8 から求めたものである。両者は良く一致している。

以上のことから、コイとインダイの視力には大きな差

はないものと判断できる。このように、両者の整合性が高いことから、条件反射手法で求めた結果はコイと同じ程度の視力をもつ海産魚の視覚反応の解析に適用できるものと考えられる。

## 文 献

- CONFER, J.L., G.L. HOWICK, M.H. CORZETTE, S.L. KRAMER, S. FITZGIBBON and R. LANDESBURG (1973): Visual predation by planktivores. *Oikos*, **31**, 27-37.
- DUNTLEY, S.Q. (1962): Underwater visibility. p. 452-455. In M.N. HILL (ed.), *The Sea*, I. John Wiley, London.
- 川村軍蔵・下和田隆 (1983): インダイの帯模様弁別能. *日水誌*, **49**, 55~60.
- MATSUIKE, K., Y. SHIMAZU and Y. NAKAMURA, (1981): Relationship between turbidity of water and visual acuity of fish (1). *La mer*, **19**, 159-164.
- NAKAMURA, E.L. (1968): Visual acuity of two tunas, *Katsuwonus pelamis* and *Euthynus affinis*. *Copeia*, 1986(1), 40-48.
- 中村善彦・松生 治 (1985): 水中の濁りと魚の視力の関係(2) 濁り濃度と視認限界における物標の大きさおよび距離. *うみ*, **23**, 123-129.
- O'BRIEN, W.J., N.A. SLADE, and G.L. VINYARD (1976): Apparent size as the determinant of prey selection by bluegill sunfish *Lepomis macrochirus*. *Ecology*, **57**, 1304-1310.
- TYLER, J.E. (1968): The Secchi disk. *Limnol. Oceanogr.*, **13**, 1-6.
- VINYARD, G.L. and W.J. O'BRIEN (1976): Effects of light and turbidity on the reactive distance of bluegill *Lepomis macrochirus*. *J. Fish. Res. Board Can.* **33**, 2845-2849.
- YAMANOUCI, T. (1956): The visual acuity of the coral fish *Microcanthus strigatus* (Cuvier and Valenciennes). *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.*, **5**, 133-156.