

水中の濁りと魚の視力との関係 (2)

濁り濃度と視認限界における物標の大きさ及び距離*

中村善彦**・松生 洽**

Relationship between turbidity of water and visual acuity of fish (2)

Turbidity level, target size and distance at visual limits in case of small target*

Yoshihiko NAKAMURA** and Kanau MATSUIKE**

Abstract: In water with a large quantity of minute suspended particles, the distance at which carp, *Cyprinus carpio* could discriminate a small target was analyzed by conditioned reflex method and optico-physical measurement.

In different levels of water turbidity, the relationship of target size and distance (expressed as visual angle, min. of arc) to the apparent contrast at the visual limit was divided into three ranges: In the range 1 restricted by visual angle only, the angle and apparent contrast were limited to 10 min. and 0.8, respectively. At an angle less than 10 min., though the apparent contrast was high, the fish cannot discriminate the target. In the range 2 restricted by both the apparent contrast and the visual angle, the relationship of both factors to the visual limit was expressed by: $Y=9.05 X^{-0.876}$, where Y is the visual angle and X is apparent contrast. In the range 3 restricted by apparent contrast only, this apparent contrast limit is called as contrast threshold. At the contrast less than this, the fish cannot discriminate the target, even though the visual angle was large. In the case of small target, it is necessary to use the second relationship.

From the relationship between turbidity level, distance and apparent contrast with the above formula, target size and distance at the limit of discrimination in different water turbidity are calculated. For example, the limit distances for a target size of 5 mm with an inherent contrast of 70 are 1.6, 1.4, 1.0 and 0.7 m for the turbidity levels (beam attenuation coefficient, 486 nm) of 0.1, 0.4, 1.6 and 3.2 m^{-1} , respectively.

1. 緒言

現在、内湾や沿岸海域においては濁りが非常に増加している。このことは魚類の生理や生態にかなりの影響のあることが容易に推察される(宇田, 1984)。

本研究は微細な粒子の多く存在する水中の濁りが魚の視覚へどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的としている。

前報ではコイ (*Cyprinus carpio*) を用いて濁り濃度および物標の大きさを変化させ、視認距離を一定として、濁り濃度が増したときに、視力がどのように減少するかを生態学的手法から求めた。

本報告は濁った水中で、しかも小さな物標を対象とした場合の、視認限界における物標の大きさと距離を求めようとするものである。この問題は従来の研究で行なわれた清澄な水中での視力や、大きな物標の見掛のコントラストから論じられた視程の概念からのみでは十分に解明することはできない。その理由として、懸濁粒子による光の散乱に起因する見掛のコントラストの減少は、特に小さな物標を対象とした場合には複雑であり、大きな

* 1985年5月4日受理 Received May 4, 1985
昭和59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 4-5-7,
Minato-ku, Tokyo, 108 Japan

物標の場合とは異なること、魚の眼の視角内に存在する粒子自体による直接的な視認の妨げ（マスク現象）は小さい物体の場合には無視できない可能性のあること、その他粒子自体が眼に対して生理的に影響する可能性のあることなどが考えられる。これらの問題を明らかにするためには、濁り濃度、物標の大きさを変化させるばかりでなく、視認距離を変化させて更に生態学的実験を行うとともに、濁った水中における物標や背景からの輝度および下方向照度など光学物理量の測定が必要である。

従来、魚の視力に関しては、European minnow (BRUNNER, 1934) Convictfish (YAMANOUCHI, 1956), および Skipjack tuna (NAKAMURA, 1968) を用いた生態面からの研究があり、それぞれ 0.09, 0.2, および 0.18 という結果が報告されている。また、TAMURA (1957) は硬骨魚を用いて、その最少分離角 (Resolving power) が $4.2' \sim 15.4'$ の間にあることを生理学的に明らかにした。魚の視認距離に関しては、井上 (1978) が透明度の極めて良好な海中でも 30 m 以下であることを指摘している。DUNTLEY (1952) は人間の眼を対象として水中視程に関する理論を確立している。コントラストに関しては HESTER (1968) がキンギョの場合 0.05 であると報告している。魚の眼の遠近調節については SOMIYA and TAMURA (1973) が、水晶体の移動が明確な魚は無遠慮まで遠近調節が可能であるが、コイなどは移動が極めてわずかであることを明らかにしている。

2. 実験方法

(1) 生態学的実験

生態学的実験に関しては前報 (MATSUIKE et al. 1981) とほぼ同様であるが、異なる点は物標の視認距離（仕切板の長さ）を自由に変えるようにしたことである。実験水槽の概要は Fig. 1 のようである。水槽の上面よりオパールガラスを介して照明し、水槽内を均一に照射するようにした。水槽内には 30 cm まで汙過水を満し、培養クロレラ (*Chlorella ellipsoidea*) を加えることにより種々な粒子濃度の懸濁水を作った。実験における最大濁り濃度を 3 ppm (光束消散係数 3.5 m^{-1} 、重心波長 486 nm) とした。このときの水槽底面での明るさは 480 lux であった。水温は温度調節器により 20°C に保った。物標は白色アクリル板に黒色正方形を描いたもの（固有のコントラスト、約 70、コントラストに関しては光学的物理量測定結果参照）の他に、固有のコントラストの異なる 3 種類のねずみ色正方形を描いたもの（固有のコントラスト、5.5, 2.3 および 1.1）を用いた。

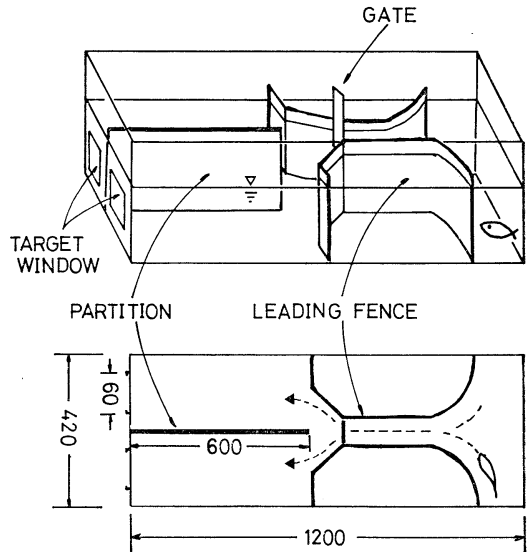


Fig. 1. Experimental tank (mm).

実験には体長 7~10 cm のコイ 5 尾を使用した。

条件付け学習は次のように行なった。Fig. 1 に示す水槽左端に設けた左右の Target window のいずれかに、物標を左右にランダムに設置し、コイがその区画に入ってきた場合には正解として餌を与え、その正解率（正解回数 / 実験回数）が 90% 以上になるまで続けた。この条件付け学習は 5 尾のコイについて全て個別に行なった。この間 40 数日を要した。次に物標を小さくした場合、正解率の底下が確認されたので、更に小さな物標による条件付けを行い、正解率が常に 90% 以上になるまで続けた。これに約 30 日を要した。

本実験は条件付けの完了したコイ 5 尾について個別に、濁り濃度、および視認距離を変化させ、更に物標の大きさ（正方形の一辺の長さ）を 7.5 mm から 0.5 mm まで小さくした場合について、それぞれに正解率を測定した。濁り濃度は汙過水（クロレラ無添加、光束消散係数 0.1 m^{-1} ）、クロレラ濃度 1 ppm (1.25 m^{-1}), 2 ppm (2.50 m^{-1}) および 3 ppm (3.75 m^{-1}) の 4 段階、視認距離は 20, 40 および 60 cm の 3 段階とした。

(2) 光学物理量の測定

それぞれの濁り濃度の水中における物標からの反射輝度、下方向照度、および光束消散係数をそれぞれ、輝度計 (Topcon BM-5)、分光照度計、および光束透過率計 (Martek, XMS, 光路長 1 m, フィルター波長 486 nm) を用いて測定した。

懸濁粒子に関しては粒径分布と粒子量を測定した。前

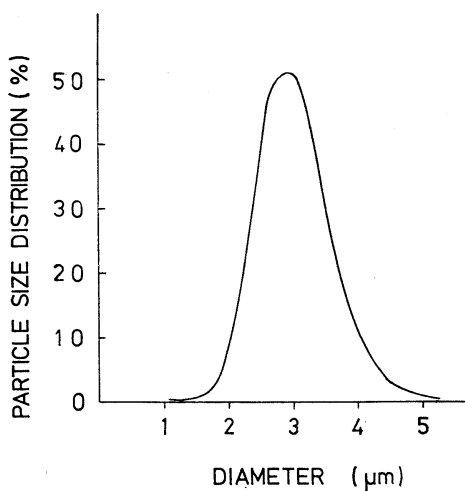


Fig. 2. Particle size distribution of *Chlorella ellipsoidea* used.

者はコウルターカウンタを用いて 1 μ 以上の粒子について行い、後者はミリポアフィルター HA (0.45 μ) で濾過後、70°C で約 1 時間乾燥したのち秤量した。粒径分布は Fig. 2 のようであり、平均粒径は 3 μ である。

光束消散係数 (α) と懸濁物量 (G) との関係は次式のように表わされる。

$$\alpha = \frac{3 \cdot Q(D, \lambda, m)}{2 \cdot \bar{D} \cdot \rho} \cdot G$$

ここで λ は波長、 m は海水に対する粒子の相対屈折率、 ρ は粒子の密度、 Q は消散に関する Efficiency factor であり、また \bar{D} は次式で表わされる粒子の平均粒径である。 $\bar{D} = \sum N(D_i) \cdot D_i^3 / \sum N(D_i) \cdot D_i^2$ 、 D_i は粒径、 $N(D_i)$ は粒径 D_i の粒子数。

この場合 Q は粒径が光の波長よりもかなり大きいので、ほぼ 2 と考えて差支えない。従って両者の関係の勾配は平均粒径と密度によって決まる。本実験で用いた培養クロレラ粒子の場合には Fig. 3 に示すような直線関係があり、非常に良い相関 ($r=0.99$) がある。

3. 結果と考察

(1) 生態学的実験結果

濁り濃度、物標の大きさ、および視認距り(仕切板の長さ)を変えて行なった生態学的実験結果を Fig. 4-(1)、および (2) に示す。Fig. 4-(1) は視認距りが 20 cm と 40 cm の場合、Fig. 4-(2) は 60 cm の場合である。物標の大きさと視認距離の変化に関する実験結果を統一的に表示するために見込角(分)を用いた。見込角(θ')と距

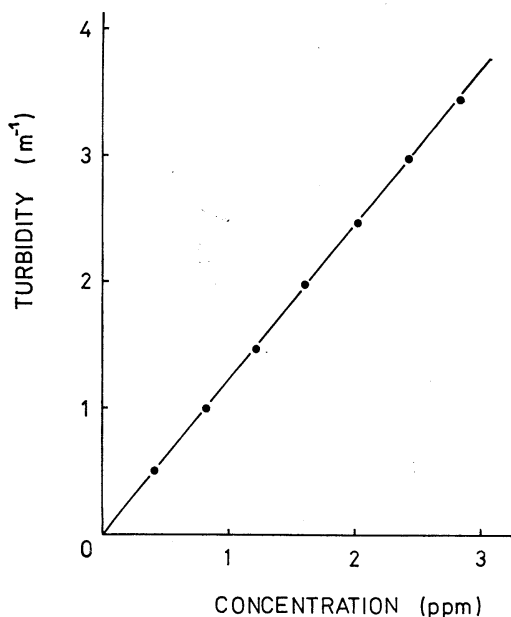


Fig. 3. Relationship between *Chlorella* concentration (ppm) and beam attenuation coefficient (m^{-1} ; wavelength of gravity center: 486 nm).

り (l mm) と物標の大きさ (D mm) の関係は $\theta = 120 \tan^{-1} (D/2l)$ で表わされる。図中の各シンボルマーク \circ , \blacktriangle , \bullet および \blacksquare はそれぞれ濃度 I (濾過水, 光束消散係数 $0.1 m^{-1}$), II (クロレラ濃度 1 ppm, $1.25 m^{-1}$), III (2 ppm, $2.50 m^{-1}$), および IV (3 ppm, $3.75 m^{-1}$) の場合を表わし、各点は個別別に 30 回ずつ行なった実験結果の平均値である。

Fig. 4-(1) では濁り濃度の増加と見込角の減少に伴って正解率が比較的なだらかに低下していくことが明白に現われている。また視認距離が異なっても正解率には何ら影響を与えていない。

これに対し Fig. 4-(2) では正解率の低下パターンが Fig. 4-(1) とは大きく異なっている。即ち、I では Fig. 4-(1) と全く同様の正解率を示すが濃度が増加するに従って見込角の大きな所で正解率が低下し、更に見込角の減少に伴う正解率の低下が急激である。

本実験において濁り濃度の最も大きい IV の場合でも水中の明るさは充分であり (NAKAMURA, 1968 は視力に影響をおよぼす限界の明るさを 170 lux と報告している), しかも見掛のコントラストも魚のコントラスト閾 (キンギョ 0.05, HESTER, 1968) よりもはるかに大きい (次節の光学物理量の測定結果を参照) のにかかわら

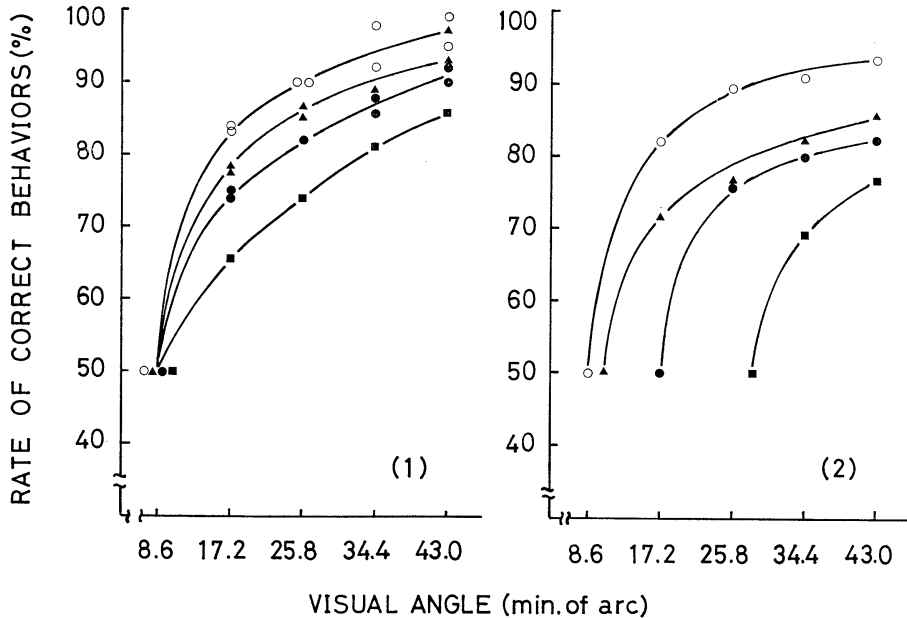


Fig. 4. The rate of "correct behaviours" for different target visual angles after changing turbidity level at distances (partition length) of 20, 40(1), and 60 cm(2). Symbols \circ , \blacktriangle , \bullet and \blacksquare stand for the mean values in pure water (I), and turbid water of 1(II), 2(III), and 3 ppm (IV), respectively.

ず、濃度が増すに従って Fig. 4-(1), および (2) の正解率に大きな違いが現われるということは従来の視程や視力に関する研究結果からは説明しえない現象である。このことは前にも述べた見込角内の粒子による複雑な光学現象や粒子自体によるマスク現象、その他生理的な影響が起因しているものと思われる。

コイの視認限界における正解率を二項分布の片側検定において、有意水準を1%として求めると、63%以上で有意な差が認められる。これより視認限界の見込角を求めると Fig. 4-(1) の場合、I で 9.4', II で 10.3', III で 11.1' および IV で 15.4' となる。視力はこの逆数であり、視力に換算すると前報とほぼ同一の結果が得られていることが確認された。さらに、Fig. 4-(1) および (2) の I より、最少分離角が約 10' であることが判明した。この結果は TAMURA (1957) の生理学的手法から求めた値 4.2~15.4' のほぼ中間に位置する。Fig. 4-(2) から同様に視認限界の見込角を求めると、I で 10.3', II で 12.1', III で 18.9', および IV で 30.3' と大きな値になる。

(2) 光学的物理量の測定結果

固有のコントラストおよび見掛のコントラストは次式のようなものである。

$$C(o) = \frac{B_t(o) - B_b(o)}{B_b(o)}$$

$$C(r) = \frac{B_t(r) - B_b(r)}{B_b(r)}$$

ここで、 $C(o)$ は固有のコントラスト、 $C(r)$ は距離 r における見掛のコントラスト $B_t(r)$ は距離 r における物標からの反射輝度および $B_b(r)$ は距離 r における背景からの反射輝度である。

水中における固有のコントラストと見掛のコントラストの関係は次式のように示される。

$$C(r) = C(o) \cdot \exp(-ar) \cdot \frac{B_b(o)}{B_b(r)}$$

本実験における見掛のコントラストの濁り濃度（光束消散係数）や距離の増加に伴う減少は Fig. 5-(1) のようである。但しこの場合には物標は充分大きいものを使用した。濁り濃度や距離の増加に伴う見掛のコントラストの減少は正確には指数函数的であるとはいえない。このことは照明の位置が近いために水槽内における $B_b(o)/B_b(r)$ が影響しているためと考えられる。

次に $B_b(o)/B_b(r)$ の影響する範囲を調べるために更に距離を延長して測定した。結果は Fig. 5-(2) のようである。

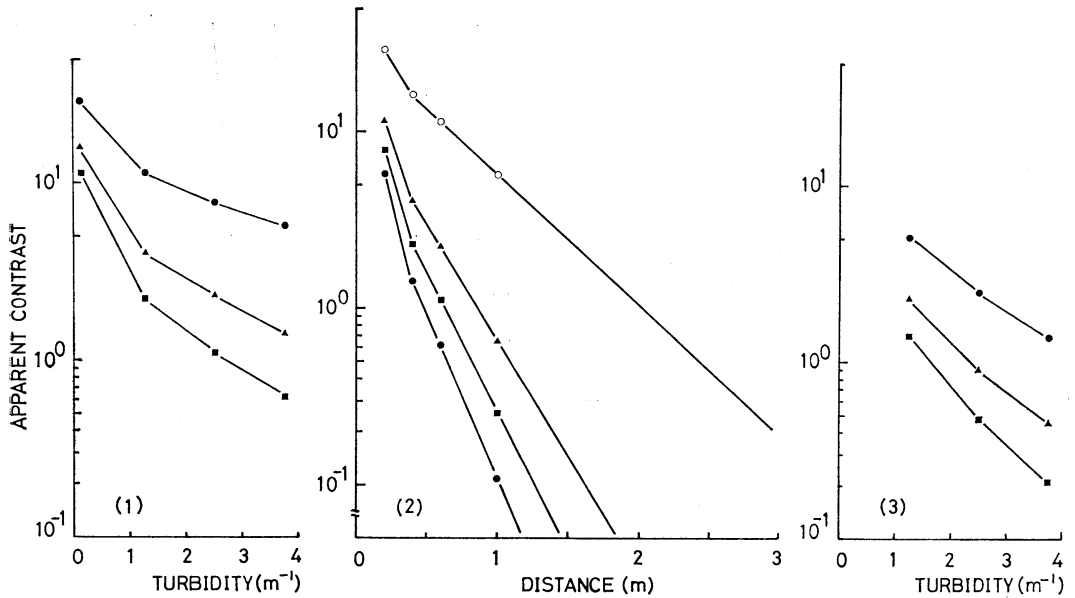


Fig. 5. (1) Apparent contrast of large target for different turbidity levels (beam attenuation coefficient, m⁻¹) after changing distance. Symbols ●, ▲ and ■ stand for the experimental value at distances of 20, 40, and 60 cm, respectively.
 (2) Apparent contrast of different distances after changing turbidity level. Symbols ○, ▲, ■ and ● stand for the experimental values in I, II, III and IV, respectively.
 (3) Apparent contrast of small target (the side of the square, 3 mm) for different turbidity levels (m⁻¹) after changing distance. Symbols same as in (1).

物標がある限度以下に小さくなると、濁り濃度や距離の増加に伴う見掛のコントラストの減少は更に大きくなる。Fig. 5-(3) は物標の大きさが 3 mm の場合の見掛のコントラスト、濁り濃度、および距離の関係を示したものである。同図より距離が 60 cm の場合を例にとると、小さな物標の見掛のコントラストは大きい物標にくらべて II, III, および IV でそれぞれ 35%, 55%, および 65% 減少していることが判る。この現象は前に述べた粒子による影響が、小さい物標の場合にはより顕著に現われたものと考えられる。

小さい物標を対象とした場合の視認限界における見掛のコントラストの、濁り濃度および距離の増加に伴う減少は Fig. 6 のようである。

(3) 視認限界における濁り濃度、物標の大きさおよび距離の関係

以上の生態学的実験結果と光学的物理量の測定結果の双方から、視認限界における見込角と見掛のコントラストの関係を求めた。結果は Fig. 7 のようである。図中のマーク○, ▲, ■および●はそれぞれ濁り濃度 I, II, III および IV の場合であり△は I においてねずみ色物標を用い、その固有のコントラストを変えることによっ

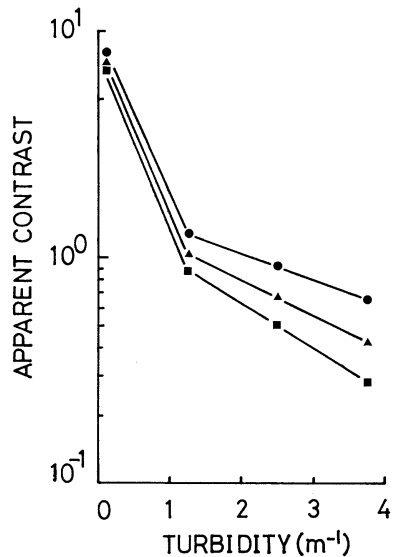


Fig. 6. Apparent contrast of the small target at the limit of discrimination for different turbidity levels (m⁻¹) after changing distance. Symbols same as in Fig. 5-(1).

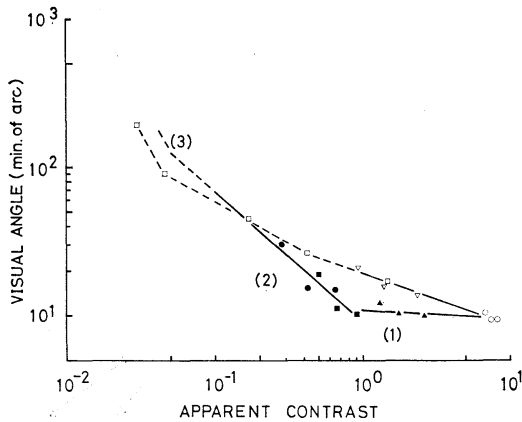


Fig. 7. Relationship between target visual angle (min. of arc) at the limit of discrimination and apparent contrast. Symbols \circ , \blacktriangle , \blacksquare and \bullet stand for the experimental values for black painted targets in pure water (I), and turbid water of 1(II), 2(III) and 3 ppm (IV), respectively. Symbols \triangle and \square stand for gray painted targets in pure water and the results of HESTER (1968), respectively.

で見掛のコントラストを変化させた場合である。更に \square は HESTER (1968) の結果である。

同図より最も注目されることは、視認限界が見込角のみによって決まる部分 (1), 視認限界が見掛のコントラスト, および見込角の双方の影響を受ける部分 (2), および視認限界が見掛のコントラストのみで決まる部分 (3), の3つに分けられることである。

第1は見掛のコントラストが充分大きい場合で、その限界は見掛のコントラストが約 0.8, 見込角が約 $10'$ である。これ以下の小さな見込角では見掛コントラストがいくら大きくても視認することはできない。即ちコイが視認しうる最少分離角といえる。

第2は本論文の最も重点とする部分であり、視認限界における見込角と見掛のコントラストとの関係は次式のように表わされる。

$$y = 9.05 x^{-0.876} \quad (= -0.92)$$

ここで y は物標の見込角(分), x , は見掛のコントラストである。

上記の関係は清澄な水中において固有のコントラストを変えた場合の両者の関係とは明白に異なる。固有のコントラストを変えた場合の結果は、HESTER (1968) の生理学的実験結果と非常によく合致している。このことから懸濁粒子の多く存在する水中では視認限界に特殊性

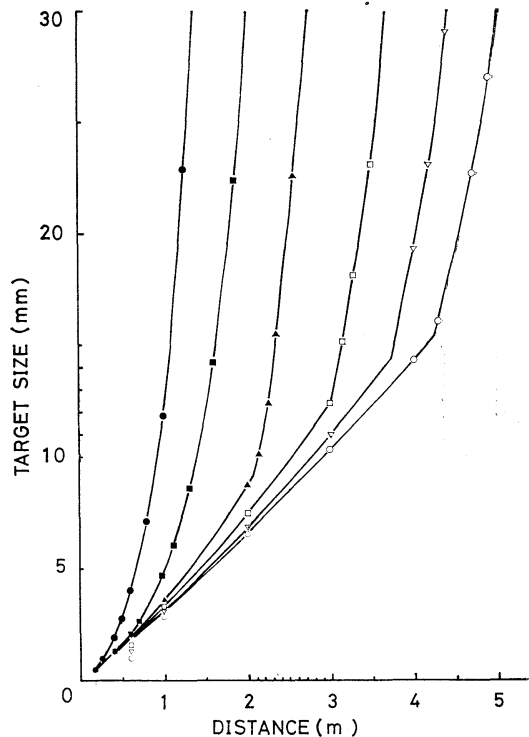


Fig. 8. Relationship between target size (mm) and distance (m) at the limit of discrimination after changing turbidity level (beam attenuation coefficient, m^{-1}). Symbols \circ , ∇ , \square , \blacktriangle , \blacksquare and \bullet stand for the values calculated from the experimental results in pure water ($0.1 m^{-1}$), and turbid water of 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 and $3.2 m^{-1}$, respectively.

のあることが判る。

第3は見込角が充分大きく、コントラスト関のみで視認限界が決められる部分である。コイの場合もキンギョのコントラスト関 (HESTER, 1968) と大差ないものと考え、これ以下では見込角をいくら大きくしても視認することはできない。

Fig. 6 および 7 に示される関係より、小さな物標を対象とした場合の種々の濁り濃度における、視認限界の物標の大きさと距離の関係を求めることができる。その結果は Fig. 8 のようである。

同図より、水中における濁り濃度 (光束消散係数) が判れば、どの大きさの物標が、どの距離から見えるかが簡単に判る。例えば、相模湾では光束消散係数が $1.6 m^{-1}$ 程度、黒潮では約 $0.1 m^{-1}$ であるが、ここにおける物標の大きさが 10 mm の場合の視認限界距離はそれ

ぞれ約 1.4 m, および 3.0 m といえる。

また最少分離角の面から, 3 mm の物体は, いくら見掛のコントラストが大きくても, 即ちきれいな水中においても, 1 m 以上では視認できないことが判る。

以上は固有のコントラストが 70 の物標の場合であるが固有のコントラストが変わった場合についても上記の関係から容易に算出できる。

4. 結 語

微細な粒子の多く存在する水中においては, 魚(コイ)が小さい物標を視認する限界は大きい物標を対象とした場合とは異なる。種々な濁り濃度の水中で小さい物標に対する視認限界における物標の大きさと距離(見込角表示)と見掛のコントラストの関係は次式のように示された。

$$y = 9.5 x^{-0.576} \quad (r = -0.92)$$

ここで y は見込角(分), x は見掛のコントラストである。

上式の適用範囲は見込角が 10' ~ 約 100' である。視認限界の最少見込角は 10' でありこのときの見掛のコントラストは 0.8 である。即ち見掛のコントラストがこれ以上いくら増大しても, 見込角が 10' 以下では視認することはできない。この結果は TAMURA (1957) の生理学的手法から求めた最少分離角 (4.2~15.4) とほぼ一致する。これに対し適用範囲の最大値はキンギョの見込角 100' 以上でのコントラスト閾 0.05 (HESTER, 1968) を引用した。また濁った水中ときれいな水中では, 見掛のコントラストが同一であっても, 視認限界における見込角はかなり異なることが判った。

上式と, 濁り濃度, 距離, および見掛のコントラストの関係から, 小さい物標を対象とした場合の視認限界の物標の大きさと距りを求めた。例えば 5 mm の物標(固有のコントラスト, 70)の場合, 光束消散係数が 1.6m^{-1}

で視認距離 1 m, 0.1m^{-1} で 1.4 m となる。また, 3 mm の場合視認距離 1 m 以上では見ることはできない。

海中の濁りは海域によりかなり異なるので特に小さい物標に対する視認限界を求める場合には注意する必要がある。

本研究は網等の漁具への応用や, 魚の索餌行動等の生態学的な研究の基礎として役立つものと思う。

文 献

- BRUNNER, G. (1934): Über die Sehscharfe der Elritze (*Phoxinus laevis*) bei verschiedenen Helligkeiten. *Zeit. vergl. Physiol.*, **21**: 297-316.
- DANTLEY, S.Q. (1952): The visibility of submerged objects. *Visibility Laboratory, Mass. Inst. Technol., Cambridge, Mass.*, 74.
- HESTER, F.J. (1968): Visual contrast thresholds of the goldfish (*Carassius auratus*). *Vision Res.*, **8**: 1315-1335.
- 井上 実 (1978): 魚の行動と漁法. 恒星社厚生閣
- MATSUIKE, K., SHIMAZU, Y. and NAKAMURA, Y. (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*, 40-48.
- SOMIYA, H. and TAMURA, T. (1973): Studies on the visual accommodation in fishes. *Japan. J. Ichthyol.* **20**, 193-206.
- TAMURA, T. (1957): A study of visual perception in fish, especially on resolving power and accommodation. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **22**, 536-557.
- 宇田道隆 (1981): 海と漁の伝承. 玉川大学出版部
- YAMANOUCHI, T. (1956): The visual acuity of the coral fish *Microcanthus strigatus* (Cuvier and Valenciennes). *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.*, **5**, 133-156.