

ベンガル湾におけるまぐろ延縄漁具の枝縄の水中視認距離*

森永 勤**・小池 隆***・松生 治**

Underwater visibility of a branch line of longline gear to tuna in the Bay of Bengal*

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

Abstract: With regard to the materials used for the branch line of tuna longline gear, it is generally known that a nylon leader makes the catch efficiency much higher than a wire one. Such a phenomenon occurs regardless of the scale of tuna longline fishery and the operation position. It is considered that the rise in catch efficiency is due mainly to the difference in visibility (measured in meters) of the two kinds of branch lines. In order to confirm such a consideration, a series of investigations was carried on. First, the underwater optical environment of the Bay of Bengal was analyzed. Next, the optical and physical qualities of the two kinds of branch lines used were measured in a water-tank experiment. Based on these measurement, visibility (in meters) of the branch line to tuna at the limit of discrimination was estimated. As a result, it is known that the sea water of the operation area in the Bay of Bengal is very clear, and it corresponds "oceanic water type I" of the Jerlov's water-mass optical classification; and the turbidity of the water (beam attenuation coefficient) is low, showing $0.11-0.22 \text{ m}^{-1}$ (486nm). A nylon leader (#150, monofilament) is 2.0mm in diameter, and a wire leader (#28, 3×3) is 1.7mm. Under the reasonable conditions of clear water (beam attenuation coefficient, 0.14 m^{-1}) and high illumination level (illuminance in water, 2,000 lx), the inherent contrast of a nylon leader is 1.1 and that of a wire leader is 6.3. Supposing that the visual acuity of tuna is 0.9, a nylon leader is visible at 1.1m and a wire leader at 3.6m under the said conditions. This indicates that the visibility of a branch line for tuna changes with the material used, and is much less for nylon than for wire.

1. 緒 言

近年、沿岸の小型まぐろ延縄漁業では、省力化のために種々の方策が図られている。そのうち、漁具資材にはモノフィラメント製ナイロンテグスが利用されている。この試みは当初の目的を達成するばかりでなく、まぐろ釣獲率の向上にも役立つといわれている。

このようなまぐろ延縄の釣獲率の上昇は、遠洋の大型まぐろ延縄漁業が実施されているインド洋ベンガル湾においても確認されている(春日, 1990)。すなわち、

1988年の釣獲率はナイロンテグスが2.01%、従来の資材が0.34%であり、前者が著しく大きい。しかし、釣獲率の向上の主因は依然として不明のままである。

そこで、著者らは釣獲率上昇の主因を、まぐろの枝縄の視認距離の差異によるものと推測した。先ず、ベンガル湾の操業現場における光環境を把握し、次に実際に使用した2種類の枝縄を用い、水槽実験で光学的物理量を計測した。これらの結果と既往の知見から、枝縄の水中視認距離を算出した。

従来、この分野の研究に関し DUNTLEY (1963) は物体のコントラストの低下を海中光学理論から求め、人間の目のコントラストスレッシュールドを用い視程を算出した。TSUDA and INOUE (1973) は漁網の糸の視認距離を実験水槽での直接観察から求め、水産現場へ応用した。一方、VINYARD and O'BRIEN (1976) は実験魚に

*1990年5月24日受理 Received May 24, 1990

**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

***三重大学生物資源学部, 〒514 三重県津市上浜町 1515
Faculty of Bioresources, Mie University, Kamihamacho 1515, Tsu, Mie, 514 Japan

bluegill を用い、濁りが増すと餌に対する反応距離が減少することを報告した。また、中村 (1989) は、小さい物体に対する魚の視認距離は物体の見かけのコントラストが同一であっても、濁り濃度によって相違することを明かにした。しかし、延縄漁具の枝縄資材の種類による釣獲率向上の効果を、漁具の視認の観点から論議した研究は数少ない。

2. 現場観測及び水槽実験

ベンガル湾における光環境の観測は 1987 年 2 月に東京水産大学研究練習船神鷹丸で実施した。観測点を Fig. 1 に示す。本論文における海中の光環境は操業海域の南北ほぼ中央に位置する。Stn.4 ($86^{\circ}36.6'E, 11^{\circ}33.7'N$) の測定結果で代表させ、春日 (1990) の報告におけるまぐる延縄操業海域は Fig. 1 と同一漁場であった。

観測項目は水中照度及び濁度である。水中照度の観測は分光放射照度計 (石川産業 (株) 製, SR-8 型) を用い、443, 481, 513, 553, 599, 633, 682 及び 709 nm の 8 波長について分光照度を計測した。また、濁度の観測は現場用光束透過率計 (Martek 社製 XMS 型、

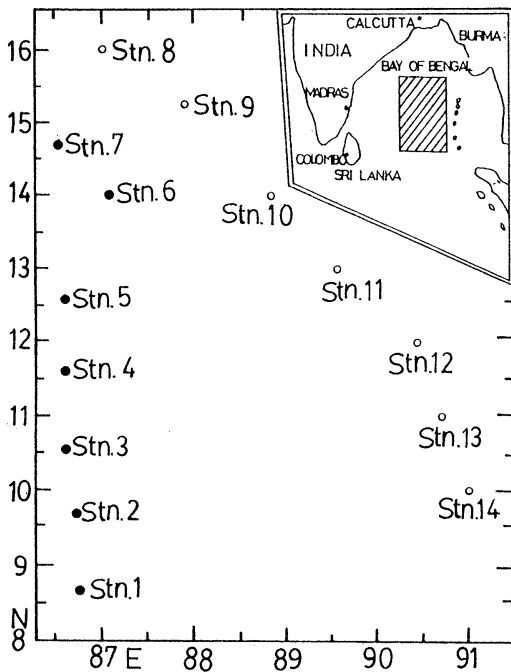


Fig. 1. Operation and optical observation stations in the Bay of Bengal. Solid circles for the operation and optical observation stations, and open circles for the optical observation stations.

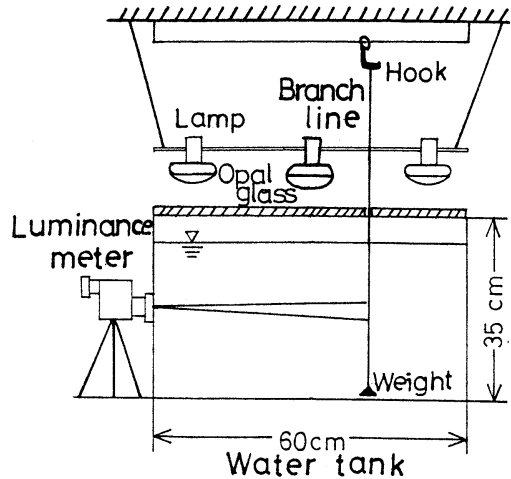


Fig. 2. Equipment and arrangement of the experiment.

光路長 1m, 重心波長 486nm) を用い、表層から約 100m 深まで連続的に光束透過率を求めた。濁度は海水の光束消散係数 (m^{-1}) で表示した。

水槽実験における枝縄の光学的物理量の計測は次の通りである。Fig. 2 は実験装置の模式図である。実験水槽は長さ 60cm × 幅 30cm × 高さ 35cm のものを用い、その内壁を黒色に塗装し、暗室に設置した。水槽の端の外側に輝度計 (TOPCON 製 BM-3 型) を据え付けた。試水は水道水をろ過したものを用い、その光束消散係数は $0.14m^{-1}$ (486nm) であった。また、水槽は昼光ランプ (東芝レフレクタランプ 500W) で水面上からオパールガラスを介して照明し、水中の明るさを均一にした。水槽底面における照度は約 2,000 lx とした。

光学的物理量の計測に用いた枝縄はクレモナロープ

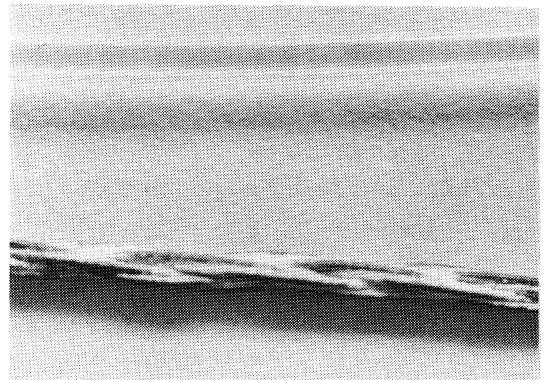


Photo. 1. Samples of branch line. Upper: nylon leader (#150, monofilament). Lower: wire leader (#28, 3 × 3).

(55本×3×3, φ6 mm), セキヤマ (#28, 3×3) 及びカナヤマ (#28, 3×3) で構成される従来の資材と、ナイロンテグス (#150, モノフィラメント製) のみで構成される新資材とした (春日, 1990)。ここで, 従来の資材における計測箇所は餌 (釣鉤) に最も近い点を考慮して, カナヤマ (釣元ワイヤ) とした (Photo. 1 参照)。釣元ワイヤ及びナイロンテグスの太さ (直径) は, それぞれ 1.7 mm 及び 2.0 mm であった。

計測方法は枝縄を鉛直にし, たるみを取り除くため錘りを取りつけて水槽内の中央部に吊り下げた。反射輝度は輝度計から枝縄資材までの距離を変え, 枝縄からの反射輝度及び背景 (枝縄を取り去った状態) からの反射輝度をそれぞれ測定した。なお, 測定距離は 20, 30, 40 及び 50 cm とした。

3. 結果及び考察

3-1. ベンガル湾の操業現場の光環境

Fig. 3 は Stn. 4 における波長 443, 481, 553, 599 及び 633 nm の相対照度分布を示す。この図から, 相対照度の深さによる減衰割合は短波長から長波長へいくに従い, 増大した。すなわち, 水深 30 m における相対照度は青色光 (481 nm) が 31.9%, 緑色光 (533 nm) が 22.3% 及び赤色光 (599 nm) が 4.03% であった。また, Table 1 は同じ観測点における照度の消散係数を示す。例えば, 青色光 (481 nm) の値は 0.038 m^{-1} で, 芳賀・松生 (1981) が北部北太平洋で観測した値 0.10 m^{-1} (484 nm) に比べて約 $1/3$ と小さい値であった。更に, この表を基に JERLOV (1964) に従って光学的水型分類をすると, この海水は "oceanic water type 1" に該当し, 非常に清澄であるといえる。

Fig. 4 は Stn. 4 における海水の光束消散係数 (486

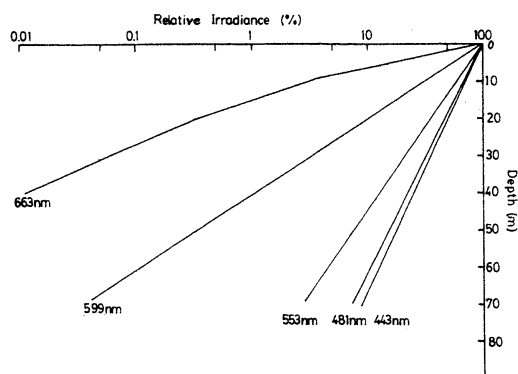


Fig. 3. Depth distributions of spectral relative irradiance at Stn. 4.

Table 1. The diffuse attenuation coefficient for irradiance of seawater in the upper layer at Stn. 4.

Wavelength (nm)	443	481	553	599	663
Diffuse attenuation coefficient (m^{-1})	0.036	0.038	0.050	0.107	0.247

nm) の鉛直分布を示す。数値が小さくなる程海水は清澄になることを意味する。表層から水深 80 m まででは光束消散係数は $0.13 \sim 0.16 \text{ m}^{-1}$ の範囲にあり, その値は小さくかつ鉛直変化も少なかった。それ以深では, 深さと共に減少し, 水深 100 m で 0.10 m^{-1} になった。従って, 海水中に懸濁粒子が非常に少ないといえる。また, 当海域の光束消散係数は黒潮海域の $0.11 \sim 0.12 \text{ m}^{-1}$ (486 nm) (MATSUIKE and MORINAGA, 1977) に近似していた。また, 光環境の観測と同時に釣獲試験を実施した。当海域におけるまぐろの分布水深は 38 m から 69 m の範囲であると推測される (森永ら, 1987)。この水深範囲における水中照度の相対値を Table 2 に示す。青色光 (481 nm) の照度ではまぐろの分布の上限 (38 m) が 24%, 下限 (69 m 深) が 7.6% であった。また, まぐろの分布水深における海水の光束消散係数は $0.11 \sim 0.22 \text{ m}^{-1}$ (486 nm) である。

3-2. 枝縄漁具の光学的物理量の変化

水中における物体の固有のコントラスト及び見かけの

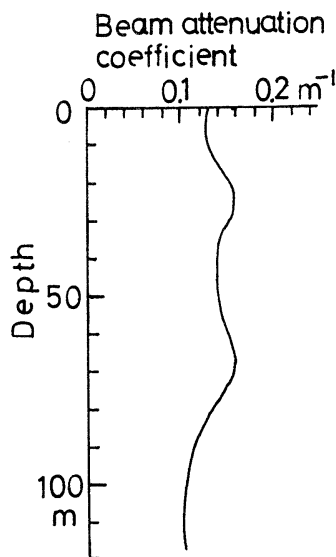


Fig. 4. Vertical distribution of turbidity of water (beam attenuation coefficient, m^{-1}) at Stn. 4.

Table 2. The spectral relative irradiance at the upper and the lower depth of swimming layer of tuna in the Bay of Bengal.

Wave length (nm)	Swimming layer	
	Upper (38m)	Lower (69m)
481	24 %	7.6 %
533	14	2.9
599	1.3	0.042

コントラストは次式のように表示される。

$$C(o) = \frac{Bt(o) - Bb(o)}{Bb(o)} \dots\dots\dots(1)$$

$$C(r) = \frac{Bt(r) - Bb(r)}{Bb(r)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、C(o)は物体の位置での固有のコントラスト、C(r)は物体からの距離 r での見かけのコントラスト、Bt(o)と Bb(o)は物体の位置での物体及び背景からの反射輝度、及び Bt(r)と Bb(r)は物体からの距離 r での物体及び背景からの反射輝度である。見かけのコントラストと固有のコントラストとの関係は次式のようなのである。(DUNTLEY, 1963)。

$$C(r) = C(o) \cdot \text{EXP} [-r(\alpha - K \cdot \cos \theta)] \frac{Bb(o)}{Bb(r)} \dots(3)$$

ここで、 α は光束消散係数、Kは照度の消散係数及び θ は入射角である。

本研究では水平方向からの視認を考えているので ($\theta = 90^\circ$)、(3)式は次式のように示される。

$$C(r) = C(o) \cdot \text{EXP}(-\alpha \cdot r) \frac{Bb(o)}{Bb(r)} \dots\dots\dots(4)$$

枝縄の見かけのコントラストと枝縄からの距離との関係についての測定結果を Fig. 5 に示す。図中の上部が釣元ワイヤ、下部がナイロンテグスである。これらの値は5回の測定の平均値で示されている。同図から、見かけのコントラストは釣元ワイヤがナイロンテグスより約6倍大きい値であることが判った。また、枝縄からの距離の増加に伴う見かけのコントラストの低下が釣元ワイヤ及びナイロンテグスともほとんどないことも明らかになった。この現象は森永ら (1985) の結果と一致する。ここで、背景からの反射輝度は物体の位置でも距離 r 離

れた位置でも変わらないこと、すなわち、(4)式の右辺の $Bb(o)/Bb(r)$ を1と仮定し、見かけのコントラストと距離との関係を最小自乗法で直線と表示した。更に、これらの直線を距離零 (すなわち、物体の位置) に外挿して、固有のコントラストを推定した。その結果、釣元ワイヤが6.3、ナイロンテグスが1.1になった。

3-3. まぐろの枝縄の水中視認距離

水中で魚が物体を視認し得るか否かは物体の大きさ、物体のコントラスト及び海中の明るさの3要素で決まる (中村, 1989)。

まず、視認し得る物体の大きさは見た位置での視角 (見込角) で限定され、次式の関係がある。

$$D = 2 \cdot r \tan \frac{\phi}{2} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、Dは物体の大きさ、rは物体からの距離、及び ϕ は視角 (物体の見込角) である。ここで、視角 ϕ の逆数を分単位表示したものが視力と定義されている。まぐろの視力は skipjack tuna の場合 0.18 である (NAKAMURA, 1968)。また、物体の形が本研究の枝縄のように非常に細長い時、通常の視力に代り、線視力が適用される。線視力は視力の数倍から十数倍になると報告されているから (SCHWASSMANN, 1974)、まぐろの線視力を0.90 (視力の5倍) と仮定した。

次に、物体を視認し得る限界のコントラストはコントラストスレッシュールドで表示され、ここでは0.05 (HESTER, 1968) とした。

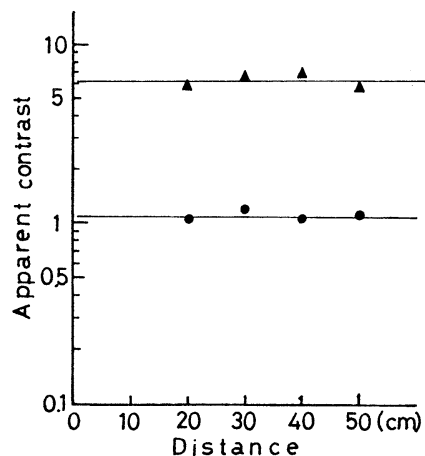


Fig. 5. Apparent contrast versus distance between branch line and luminance meter. Upper: wire leader. Lower: nylon leader.

更に、水中の明るさが170 lx以上あれば魚の視力やコントラストスレッシュールドへの影響はない(NAKAMURA, 1968)。本実験はこの点を考慮して十分明るい条件下(2,000 lx)で実施した。

Fig. 6は視認限界における枝縄の見かけのコントラストと視角(見込角)との関係を示す。図中の▲印が釣元ワイヤ、●印がナイロンテグスである。これらの値は前記の(4)式と(5)式から算出した。また、図中のA、Bの点線は両資材の固有のコントラストを示す。

図より、釣元ワイヤでは視角が小さくなると(距離が大きくなる)、見かけのコントラストは点線Aから次第に小さくなり、低下していくことが判る。このことはナイロンテグスにおいても同様な傾向があった。しかし、枝縄そのものの大きさが非常に小さい(細い)ので、物体に隣接する背景や光路中に存在する粒子による散乱光の影響が顕著に現われると考えられる(森永ら, 1985)。そこで、中村(1989)の方法により、清澄な水中における視認限界範囲を線視力0.90として求め、Fig. 6に直線Xで示した。すなわち、直線Xより右上方側では視認可能であり、左下方側では視認不可能である。従って、両資材の曲線と直線Xとの交点a及びbが釣元ワイ

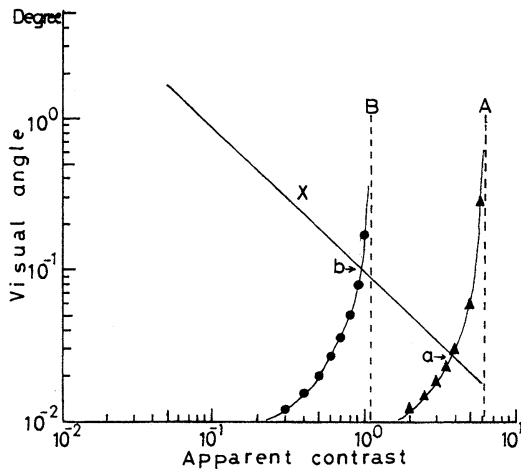


Fig. 6. Apparent contrast versus visual angle with regard to a wire leader and a nylon leader. Symbols ▲ and ● denote a wire leader and a nylon leader, respectively. Dotted lines A and B indicate inherent contrast of 6.3 and 1.1, respectively. The line X shows the relationship between visual angle at the limit of discrimination and apparent contrast. Points a and b stand for the positions crossed with the line X.

イヤ及びナイロンテグスの視認限界の視角及び見かけのコントラストである。同図より、交点aとbにおける各視角と各見かけのコントラストを求めた。視認限界距離は釣元ワイヤで3.6 m、ナイロンテグスで1.1 mとなる。

枝縄の視認距離はナイロンテグスの方が釣元ワイヤの約1/3で短い。すなわち、餌に向かって突進してきたまぐろは、釣元ワイヤの場合、枝縄の手前3.6 mの距離で、ナイロンテグスの場合、枝縄の直前1.1 mの距離でそれぞれ視認することになる。すなわち、枝縄の視認距離が資材の種類で変り、短くなる。このことが釣獲率の上昇に寄与しているものと考えられる。

なお、枝縄に吊り下げた餌の視認距離を試算した(まぐろの視力は0.18とした)。試験操業で使用した餌料はサバ(体長約25cm)で、釣鉤には背掛けの状態であった。また、サバの固有のコントラストを枝縄と同じ測定方法で求めると、その値は16.0であった。これらにより、サバを視認できる限界距離は27.3 mである。

以上の結果は水中が十分明るい2,000 lxの場合である。しかし、水中の明るさは水深、天候及び時刻によって変化する。今、まぐろの遊泳水深を69mと仮定して、明るさがまぐろの視認に影を及ぼす170 lx(NAKAMURA, 1968)になる水面の照度を求めた。Table 2の緑色光(533 nm)の深さによる減衰比を用いて海面照度を逆算すると約5,862 lx(170 lx × 100/2.9)になった。冬季ベンガル湾の晴天日では、海面照度が正午頃約10万 lxに達することから、釣獲率の向上が期待できる操業時刻は朝から夕方までの昼間といえる。

また、まぐろが分布する水深の海水の濁り、すなわち光束消散係数は0.11~0.22 m⁻¹であることは前述した。海水の濁りが光束消散係数0.22 m⁻¹に増大した場合、視認距離は釣元ワイヤで3.2 m、ナイロンテグスで0.91 mと変化する。これは、視認距離が前述の場合に比し、0.2~0.4 mに減少する。このことは本研究の結論にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

4. 結 語

まぐろ延縄漁具の枝縄にモノフィラメント製ナイロンテグスの資材を使用すると、釣獲率は従来の資材(釣元ワイヤ)に比較して向上することが知られている。この現象はまぐろ延縄漁業の規模や操業海域にかかわらず発生している。

著者らはこの現象の主因をまぐろによる枝縄の視認限界距離の差異によるものと考え、(1)操業現場における光環境の把握、(2)現場の光環境と近似の条件下にお

る枝縄の光学的物理量の計測, 及び(3)まぐろの枝縄視認距離の算出から検討した。結果は以下のように要約される。

(1)ベンガル湾の操業海域の海水は JERLOV (1964)の光学的水型分類の“oceanic water type I”に該当し, 非常に清澄といえる。また, 海水の光束消散係数は $0.11 \sim 0.22 \text{ m}^{-1}$ (486 nm) で, 懸濁粒子が少ない。

(2)現場で使用されたナイロンテグス (#150, モノフィラメント製) と釣元ワイヤ (#28, 3×3) の太さ(直径)はそれぞれ 2.0 mm, 1.7 mm である。また, 清澄な水中(光束消散係数, 0.14 m^{-1}) で十分な明るさ(水中照度, 2,000 lx) の条件下における枝縄の固有のコントラストは, ナイロンテグスで 1.1, 釣元ワイヤで 6.3 である。

(3)まぐろの線視力を 0.90 (視力の 5 倍) と仮定し, 上記の結果を適用した時の視認限界距離はナイロンテグスで 1.1m, 釣元ワイヤで 3.6 m である。このことはまぐろの枝縄の視認距離が資材の種類で変わり, 小さくなることを示唆し, 釣獲率の向上に寄与するものと判断される。

謝 辞

ベンガル湾における光環境の観測に御協力を戴いた東京水産大学研究練習船神鷹丸船長井上 清教授(当時), 士官及び乗組員の皆様に感謝の意を表す。また, 試験操業に用いた枝縄資材を御提供いただいた神鷹丸一等航海士春日 功助教授に衷心より御礼申し上げる。この研究の一部は科学研究費補助金(まぐろの視程に関する研究, 課題番号 02454078) で実施された。

文 献

- DUNTLEY, S. Q. (1963): Underwater visibility, M.N. Hill(ed.), The Sea. John Wiley & Sons, New York. p. 452-455.
- EMERY, W. J. and J. MEINKE (1986): Global water-masses; Summary and review. *Oceanol. Acta*, **9**: 383-391.
- 芳賀正隆・松生 治 (1986): 夏季ベーリング海における光環境と植物プランクトン光合成の量子収率. *La mer*, **19**: 115-124.
- HESTER, F. J. (1968): Visual contrast thresholds of the goldfish *Carassius auratus*. *Vision Res.*, **8**: 1315-1335.
- JERLOV, N.G.(1964): Optical classification of ocean water. *Physical aspects of light in the sea*. Univ. Hawaii Press, Honolulu, p. 45-49.
- 春日 功 (1990): テグス(モノフィラメント)製鮪延縄漁具による試験操業について. *水産技術と経営*, **200**: 55-62.
- MATSUIKE, K. and T. MORINAGA (1977): Beam attenuation and particle-size distribution in the Kuroshio area. *La mer*, **15**: 82-93.
- 森永 勤・井上 清・春日 功・今関昭博・武田誠一・荒川久幸(1987): ベンガル湾におけるマグロ・カジキ類の分布と海洋構造. 昭和 62 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集.
- 森永 勤・松生 治・小野昭喜(1985): 濁った水中における写真撮影範囲と色の移動. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **72**: 71-83.
- NAKAMURA, E. L. (1968): Visual acuity of two tuna, *Katsuwonus pelamis* and *Euthynnus affinis*. *Copeia*, 41-49.
- 中村善彦(1989): 水中の濁りが魚の視力に与える影響に関する基礎的研究. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **76**: 83-122.
- SCHWASSMANN, H. O. (1974): Refractive state, accommodation, and resolving power of the fish eye. M. A. Ail(ed.), *Vision in fishes*. Plenum Press, New York, p. 279-288.
- TSUDA, R. and N. INOUE(1973): Study on the underwater visibility of net twines by human eye - II Underwater visibility of dyed and transparent twines. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **39**: 243-252.
- 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.