

## 断続光に対するマアジの行動反応に関する研究\*

小池 隆  
三重大学生物資源学部

### Studies on the Behavioral Response of the Japanese Horse Mackerel, *Trachurus japonicus*, to Intermittent light

Takashi KOIKE  
Faculty of Bioresources, Mie University

#### Summary

With regard to the behavioral response of fish to lights, studies have been conducted, mainly, on phototaxis-aided alluring, and the results are being applied widely to attracting fish. A constant light was used in most of these studies, however, the influence of the inconstant light on a fish school's behavior has hardly been examined, in spite of great concern about the effect of such stimulation.

The aim of this study was to clarify, from an ethological point of view, that an inconstant lighting condition, in which light goes on and off with a short cyclical time as an intermittent or flickering light, would give a different stimulation from that of a constant light to fish. The observations of the fish school's behavior in response to intermittent lights which have different blinking frequencies and contrast ratios between bright and dark light intensities and different wavelengths of lights were conducted. Then the difference between the fish school's behavior in response to the intermittent light under a state of dark adaptation and under light adaptation was examined by changing the background irradiances under these projected lights. In order to apply the obtained results to controlling the swimming behavior of a fish school, a prototype multiple beam projector was constructed and used to examine the barrier effect of a leader net made of projected beams, upon the behavior of fish.

#### I Response of a School of Japanese Horse Mackerel to Intermittent Light

##### 1) Method

An outdoor concrete round tank 7 m in diameter and 1.5 m in depth of Banda Marine Laboratory of Tokyo University of Fisheries was used for the experiments. The tank was facilitated with a set of partitions extending outward from its center leaving a circular free passage 1.3 m wide along the wall of the tank. The inside surface of the wall was coated with black paint. A light projector equipped with a light source, rotating shutter device and color filters was installed at a position 50 cm above the water level near the center of the tank. The free passage was illuminated diagonally from the light projector. The tank was covered with a lightproof roof and equipped with 8 miniature bulbs to regulate the background irradiances homogeneously.

---

昭和63年11月30日 受理

\* 東京大学審査学位論文

One-year-old Japanese horse mackerels, *Trachurus japonicus*, which had a striking phototaxis, were used for the experiments. Specimens were between 17 to 20 cm in total length. Vivid and healthy horse mackerels were selected at the site of a stationary trap net, transported to the laboratory and used for the experiments within 24~36 hours, in order to use them as much as possible under their natural conditions. Care was taken based on confirmation by a preliminary experiment that, when the fish were released into the circular free passage, they had a good command of cruising for about two days after being caught, after which their behavior as a school fell into disorder.

In the experiments, the projector was operated to give a constant light for 20 minutes and an intermittent light for 20 minutes, alternatively. Under such lighting conditions, the movements of the school were traced. Changes in schooling behavior were observed and characterized by the school's appearance times in the irradiated area. The irradiated area was located in the range of the fish's visual field in which a direct beam flux projected from the light source could be seen (the circular free passage was divided into 16 equal sections). The difference ratio (R) in appearance times was calculated from the data using the following equation:  $R=(1-D/S)\times 100$  (%) where "S" stands for the number of appearance times in the irradiated area under a constant light and "D" for those under an intermittent light.

The experiments were conducted only at night, in order to avoid artificial noises and lights around the tank. The same kind of experiments were repeatedly carried on, through different blinking frequencies and contrast ratios between bright and dark light intensities of intermittent light, and changing of wavelengths of projected lights and background irradiances. The experiments were carried on for a period from August to November each year, between 1983 and 1987. The total numbers of experiments and fish used for the study were 299 and 3,900, respectively. The water temperature in the tank was maintained in a range of 20~25°C.

## 2) Typical mode of response

There was a wide difference between the number of times the school appeared in the irradiated area under an intermittent light and under a constant light. That is, in the case of the constant light, the fish school approached the irradiated area, but the school avoided the intermittent light (the school did not approach the area at all when the intermittent light was projected). These results show that an intermittent light induces a high degree of aversion by the fish to light.

## 3) Response to different blinking frequencies of intermittent light

The number of times the school appeared in the irradiated area under intermittent lights varied with blinking frequencies. A minimum number of appearance times was seen when blinking frequencies were in the range of 0.62~1.36 c/s, with the difference ratio being 92~98%. When blinking frequencies were more or less than the aforementioned range, the number of times they appeared increased further.

Thus, it was concluded that the school of fish showed the highest degree of aversion to the intermittent light when the blinking frequency range was within the range of 0.62~1.36 c/s. These frequencies correspond to 1/37~1/17 of the critical fusion frequency of the horse mackerel's eye, obtained by means of electroretinography.

## 4) Response to different contrast ratios of intermittent light

The number of times the school appeared in the irradiated area under intermittent lights increased in comparison with a decreasing contrast ratio. In the case of the intermittent light having a contrast ratio of 60:1 or more when the background irradiance was kept at less than 0.01 lx, the difference ratios showed more than 75%; and in case of 2:1, it indicated 2%. Consequently, it was found that the school of fish showed a considerably high degree of aversion to the intermittent light when the contrast ratio was 60:1 or more, but the ratio at which the school did not show any aversion to light at all was 2:1. The

value of the differential threshold of brightness and darkness of fish's eye has been considered to be in the range of 0.02~0.2. The fish's aversion to the intermittent light was seen when the contrast ratio was at least 300 times as much as the threshold value, but disappeared when it decreased to 10 times that value.

#### 5) Response to different wavelengths of lights

The number of times the school appeared in the irradiated area under intermittent lights varied with the wavelengths of the projected lights. The difference ratio was obtained by projecting blue and red lights through certain color filters in addition to the white light (the entire spectrum). The difference ratio of the blue light was almost equal to that of the white light, and about twice as much as that for the red light. The underwater energy of the blue light was only 1/6 of that of the white light, and was about 2/5 of that of the red light.

The results showed a good correlation with the quantity of stimulation given to the eye, when the quantity was considered as the integrated value of energy which reached the eye multiplied by visual sensitivity.

#### 6) Response to different background irradiances

When the fish's dwelling environment became brighter, the state of the retina in the fish's eye changed from dark to light adaptation, and the number of appearance times into the irradiated area under intermittent lights began to increase.

The difference ratios were over 94% with background irradiances less than 0.01 lx, 56~28% with 0.01~0.02 lx, and 2% with 0.2 lx. The most prominent degree of aversion to the light was seen when background irradiance was less than 0.01 lx, and it decreased with increasing background irradiance but a certain degree of aversion still remained up to an irradiance of 0.02 lx and then, it disappeared when irradiance had reached 0.2 lx. A physiological study discloses that the retina of horse mackerel commences its retinomotor response even if environmental irradiance is less than 0.01 lx, and the state of the retina changes into light adaptation or fairly good approximation of light adaptation, under irradiances of 0.01 to 0.02 lx. Such a decrease of fish's aversion to light under irradiances of 0.01 to 0.02 lx was conceivable to be caused by the fish's eye changing from dark to light adaptation.

The relation between fish's aversion to the intermittent light and the contrast ratio of the intermittent light under a state of dark adaptation and under light adaptation was compared. The limits of the contrast ratio, within which the school showed a high degree of aversion to light, were more than 60:1 under the state of dark adaptation, and 5,000:1 under that of light adaptation. Furthermore, the limits of the contrast in which the school did not show any aversion to light at all were in the ratio 2:1 under the state of dark adaptation, and 500:1 under that of light adaptation. It was concluded, that the limits, within which the school showed aversion to the intermittent light under the circumstances of dark adaptation were different from such limits under light adaptation by  $10^2$ . A physiological study discloses that when each eye of fish undergoes light adaptation, sensitivity to light by each retina is decreased by  $10^{-2}$  to  $10^{-5}$  times. These physiological outcomes reasonably supported the results, which were induced from the present behavioral studies.

The outcomes introduced above, showed that an inconstant lighting condition in which a light goes on and off with a short cyclic time gave a considerable high degree of fish's aversion to light (avoidance behavior), quite contrary to an attracting influence (gathering behavior). Moreover, it was found that degrees of fish's aversion to light vary not only with blinking frequencies and contrast ratios of intermittent light and wavelengths of light, but also with the state of dark/light adaptation of fish's eye.

In addition, the limit within which the school showed aversion to the intermittent light were different from the limits obtained from the physiological studies, such as critical fusion frequency and the differential threshold of brightness and darkness.

Acclimation to light is another subject to be checked, when behavior of fish school in response to lights is observed. The experiment was undertaken to clarify the acclimational influence on the fish's aversion to intermittent light. There was almost no change in fish's appearance times, even after continuous projection of intermittent light for 4 hours. That is, an acclimation phenomenon was not detected.

On the contrary, it is known that the alluring effect of a fish attracting lamp on a school of horse mackerel, mackerel, and sardine starts to decrease 2~3 hours after the operation. It was concluded that the occurrence of the acclimation phenomenon in the fish's aversion to intermittent light was far less than for the case of the alluring effect by continuous lights.

Behavioral activation and inactivation can also be regarded as the general effects of light on the behavior of a fish school. Moving speeds of the fish school exposed to constant and intermittent lights were compared. The average moving speed under the constant light was about 20 cm/s, while the speed under the intermittent light was 14 cm/s. This means that the fish's moving speeds under the intermittent light was reduced by 30% of its speed under the constant light.

It seems that the slowing down of the fish's moving speeds can be considered as an indication of fish's aversion to the intermittent light.

## II Control of a fish school's behavior with a leader net made of a projected beam

In order to apply the above-mentioned results to the control of a fish school's behavior, a multiple beam projector was constructed.

### 1) Multiple beam projector

The multiple beam projector was designed to irradiate the 8 beams having an angle of 2 degrees to the optical axis, a diameter of 26 mm, and a maximum projecting irradiance of 2,000 lx. Both the blinking frequency and the contrast ratio could be changed. A light from a halogen lamp was converted into intermittent lights by a rotating shutter disk (optical chopper). The wavelength of light longer than 750 nm was cut out with infrared absorbing filter. The light was distributed to 8 optical fibers, and projected as 8 beams from the terminal lenses of each fiber.

For the experiments, 8 beams having a blinking frequency of 1.36 c/s were projected orthogonally and vertically to the circular free passage with 12 cm intervals, that is, by creating a leader net of light.

Under such lightings, the movements of the school were traced.

The same kind of experiment was repeatedly carried on, by irradiances of the beams being changed into 8 grades from 1,235 to 0.025 lx and background irradiances of 0.1 lx and 0.003 lx.

### 2) Response to the leader net made of light

The leader net of light having irradiances of the beam over 0.25 lx for dark adaptation (background irradiance, 0.003 lx), and over 506 lx for light adaptation (background irradiance, 0.1 lx) were confirmed to exert a prominent barrier effect on the swimming behavior of the school of fish. In other words, the obstruction effect of the net against the passage of a fish school occurred under a dark adaptation with the contrast ratio of the beam being more than 83:1 and under a light adaptation with the ratio being over 5,060:1.

In order to apply such an effect to practical fisheries, an estimation was made on the effective range of the leader net of light which could obstruct the passage of a fish school, using the coastal waters of Sagami Bay as an example. Results of the estimation indicated that a fish could find the leader net of light at a horizontal distance of 30 m, with the effective range of about 16 m. Factors were set as follows: underwater irradiance, less than 0.01 lx; differential threshold of the fish's eye, 0.05; and beam attenuation coefficient,  $0.5 \text{ m}^{-1}$ . Vertical downward projection of beams with 2,000 lx irradiance was

used as the condition for the construction of the leader net. Consequently, a satisfactory passage obstruction effect by the leader net of light can be expected in practical fisheries. Since it has been reported that underwater irradiance in the Sagami Bay was reduced by  $10^{-3}$  even at a depth of 20 m from the surface, application of natural lights to the leader net of light could be considered a support, by introducing the surface lights into the sea through optical fibers in the daytime. In addition, the behavior-controlling effect could be improved further by changing the direction and phase of the beam.

This study made it clear through a series of experiments on Japanese horse mackerel, *Trachurus japonicus*, that an inconstant lighting condition can exert a remarkable influence on fish schooling behavior. Further development of the achievement will result in its broad applications to fisheries and culture fisheries in the future, such as in the alluring and controlling of the swimming behavior of a fish school.

**Key words:** intermittent light, fish behavior, blinking frequency, contrast ratio, wavelength of light

## 第1章 緒 論

サンマ棒受網漁業やイカ釣り漁業では、古くから集魚灯が用いられているが、漁業者の間では集魚灯がちらつくくと魚群が逸散すると言われている。このように、視力のすぐれた走光性の強い水中動物は、海中のわずかな光の変化にも敏感に反応するものと思われる。すなわち、光の断続やちらつき現象のような光環境の短時間における変化は、魚類に対し定常的な光とは異なる刺激として作用するものと考えられる。

短時間で変化する光に対する魚の反応を明らかにするためには、まず魚の眼が明暗変化の周期や照度比を判別出来る限界を知る必要がある。この限界を示す指標として臨界融合頻度と明暗弁別閾値が使われている。臨界融合頻度は、明暗変化を感知できる最大頻度であり、明暗弁別閾値は明るさの変化を感知し得る最小の変化比  $\Delta I/I$  ( $\Delta I$ : 変化量,  $I$ : もとの明るさ) である。

臨界融合頻度は、ブルーギル *Lepomis macrochirus* で 50回/秒<sup>1)</sup>、コイ *Cyprinus carpio*、ウナギ *Anguilla japonica*、タケノコメバル *Sebastes oblongus*、アマジ *Trachurus japonicus* 等で 20~40回/秒、サケ *Salmo salar* で 47~97回/秒であり<sup>2-5)</sup>、ブルーギルについては行動学的手法により、その他は明暗周期を与えた際の網膜電図 (ERG) の平坦化を指標とした手法により求められた。

明暗弁別閾値は、行動学的手法によりハヤの類 *Phoxinus laevis* で 0.2~0.3<sup>6)</sup>、網膜電図 (ERG) の閾刺激を指標とした手法により底生性や夜行性魚類で 0.05~0.1、

昼行性魚類で 2.3~3.6 であると報告されている<sup>7)</sup>。

次に、光の波長組成の違いに対する魚の眼の感知能力については、色覚と分光感度が求められている。

キンギョ *Carassius auratus* は、赤色と緑色の色調の差を弁別する色覚を有することが行動学的手法により明らかにされている<sup>8)</sup>。一方、網膜電図 (ERG) や S 電位を用いた生理学的手法から、ボラ *Mugil cephalus* やコイおよびフナ *Carassius auratus* は色彩感覚に優れ、カツオ *Euthynnus pelamis* やクロダイ *Acanthopagrus schlegelii* は色盲であると報告されている<sup>9-11)</sup>。

分光感度については、カワマス *Salvelinus fontinalis*<sup>12)</sup>、フナ、コイ、マアジ、シログチ *Argyrosomus argentatus*<sup>2)</sup>、カツオ<sup>11)</sup> が網膜電図により、アイザメの一種 *Centrophorus squamosus*<sup>13)</sup> が網膜 (桿体の外節の視物質) の吸収スペクトルの測定により調べられている。それらの最も感度の高い波長は淡水魚のカワマスやフナおよびコイで 520~540 nm、海産魚のマアジやシログチおよびカツオで約 500 nm、深海性のアイザメの一種で約 480 nm である。

さらに、魚の眼の光に対する感知能力は、明るさに対する順応状態\* によって変わる。暗順応から明順応へ移

\* 魚が暗黒におかれるか (暗順応) 明るい所におかれるか (明順応) に応じて、視細胞の桿体と錐体の位置が交代し色素粒が移動する網膜運動現象が起こる。暗順応状態では、錐体のミオイドが伸長し錐体が後方に退き、桿体はそのミオイドが収縮して外限界膜上にならぶ。この状態では、明るさに対する感度は高いが色の弁別はできない<sup>21)</sup>。

行する明るさは、カゴカキダイ *Microcanthus strigatus* で  $0.4 \sim 5.0 \text{ lx}^{14)}$ 、マアジでは  $0.01 \text{ lx}$  以下<sup>7)</sup>、ニシン *Clupea harengus* では  $0.01 \sim 1.0 \text{ lx}^{15-18)}$ 、スズキ *Lateolabrax japonicus* では  $0.01 \sim 0.04 \text{ lx}$ 、コイでは  $0.00006 \sim 0.0005 \text{ lx}^{19,20)}$  と報告されている。カゴカキダイでは行動学的手法より、その他は ERG 法や種々の明るさに順応させた網膜の組織切片を検鏡する手法より明らかにされた。

暗順応状態と明順応状態とは光に対する網膜の感度が異なる。フナ、ニジマス *Salmo gairdneri*、コイ<sup>7)</sup> およびエイの一種 *Dasyatis* sp.<sup>22)</sup> などでは、暗順応状態になると明順応状態の  $10^2 \sim 10^5$  倍に感度が増大する。

光に対するこれらの感知能力は、水温や刺戟光の強さ等により大きく変動することが報告されている<sup>23-25)</sup>。

光に対する魚類の反応行動については、主に走光性による誘致を目的とした研究がなされ、広く集魚に応用されている<sup>26)</sup>。照射光付近での魚の行動は、集魚灯の場合一定の明るさの位置に停滞するのではなく、明るい範囲とその周辺の暗い範囲とのあいだを活発に遊泳すること<sup>27-33)</sup>、また、このような照度勾配の大きな所を移動することにより視機能が一時鈍麻するため<sup>34,35)</sup> 照度勾配の穏和な  $10^{-2} \text{ lx}$  程度の低照度域に集まり、その結果ドーナツ型分布を示すこと<sup>36)</sup> などが明らかにされている。

一方、魚は  $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ lx}$  以上で群行動をとることが解明されている<sup>37-39)</sup>。

ところが、威嚇あるいは駆逐を目的として光を用いた研究は非常に少ない。わずかに、コイやハマチ *Seriola quinqueradiata* およびイワシ *Sardina pilchardus* がフラッシュ光や水面を移動する光に対し回避することを指摘した報告があるにすぎない<sup>40-42)</sup>。

本研究は、浮魚類のなかで水産上重要な魚種であり、かつ走光性の強いマアジを対象として、断続光の明暗周期、明暗照度比、波長組成および背景照度などの変化に伴う行動反応を調べ、最も強い嫌忌性を示す断続光の周期、明暗照度比、波長組成などを魚の暗順応および明順応状態において把握した。さらに、これらの結果を魚群の遊泳方向の制御等に応用するため多光束照射装置を試作し、従来試みられたことのない照射光束による光の垣網が魚の行動に及ぼす作用を研究し、この光の垣網が遊泳方向の制御効果をもつことを確認した<sup>43-45)</sup>。

本研究の結果は、魚群の誘導、遊泳方向の制御や囲い込み等、漁業や養殖業への幅広い応用が可能であると考えられる。

## 第2章 断続光に対するマアジ魚群の行動反応

本章では、実験装置と供試魚および実験手順について述べ、さらに断続光に対する魚群の反応について、反応の基本型、明暗周期を変えた場合、明暗照度比を変えた場合、背景照度を変えた場合、照射光の色を変えた場合の各種の実験結果を述べ論議を行った。

### 第1節 実験装置、材料および手順

#### <実験装置>

断続光に対するマアジの行動反応を調べる実験は、陸上の固定飼育水槽において行った (Fig. 1)。実験水槽は東京水産大学坂田実験場のコンクリート製屋外円形水槽 (直径 7 m, 深さ 1.5 m) であり、1 m 深まで海水を入れて使用した。水槽の中央部に、黒色ビニールシートを貼った長さ 1.5 m 高さ 1.5 m の遮光壁を中心から放射状に等角度で 8 方向に設置し (Fig. 1 左)、水槽壁に沿う 1.3 m 幅の水路を作った。水槽壁内側は黒色塗装した。水槽の中央よりの水路の斜め上方 50 cm に投光装置を取り付けた (Fig. 1 左)。投光装置によって直接照射される部位を中心として水路を左右 0 区～7 区、各遮光壁の間に 2 区ずつ、合計 16 区域に分けた (Fig. 1 右上)。水槽の上部には円錐形の屋根を載せ、これを遮光幕で覆った。屋根の内側の水面上約 1.5 m の位置に、背景照度調節用の小豆電球 8 個を取り付けた (Fig. 1 左、右下)。小豆電球の下方に乳白色ビニールシートを貼り、水面到達光を拡散光とすることにより、水路上の照度分布を均一にした。背景照度の調節にはスライダックを用いた。

投光装置 (36×36×92 cm, 重さ約 15 kg) は、光源に 200 W 白熱電球を用い、その前方に遮光回転体を取り付けた (Fig. 2)。遮光回転体は、正四角柱であり、回転軸に平行な 4 側面のうち、向かい合った 2 側面のみを黒色遮蔽板でおおった。これにより断続光の照射を可能とした。照射光のビーム幅は約 7 度とし、水路に対し斜め上方から直角に照射した。断続光の明暗照度比を変える場合には、遮蔽板の代わりにモジアミを用い、その枚数に

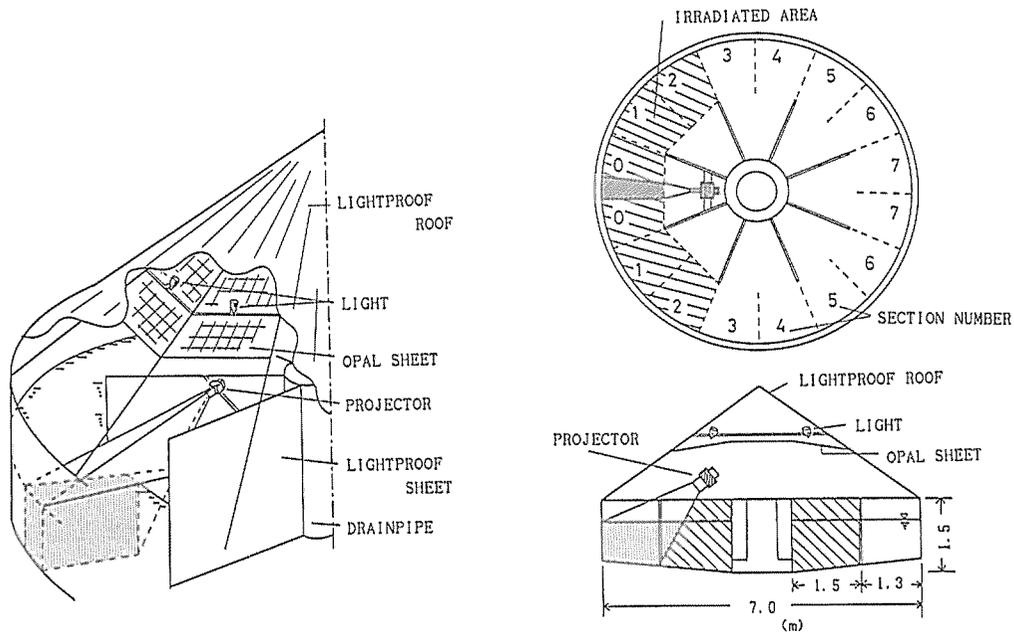


Fig. 1. Schematic sketch of the experimental tank.

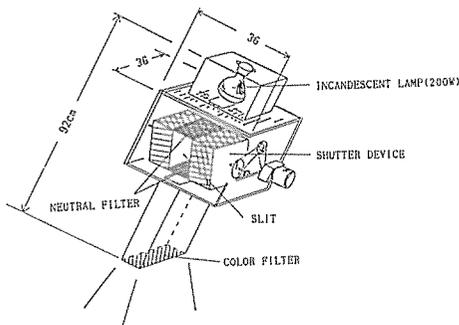


Fig. 2. Projector of light beam.

より明暗照度比を調節した。明暗周期の調節は、歯車の組み合わせを変えて行った。照射光の色の変換は、遮光回転体の前方に色フィルター（透過型）を設置することにより行った。設置位置は、熱によるフィルターの変形を防ぐため光源から約 60 cm 離れた。使用した色フィルターは、コーニング社製の青（5-56；最大透過波長 420 nm，半値幅 170 nm）と住友化学社製の赤（カーミン R400；波長 640 nm 以下の光をシャープカット）である。

#### 〈供試魚〉

実験には、浮魚類で走光性の強いマアジ *Trachurus japonicus* 全長 17~20 cm を用いた。これらの魚は早朝定置網漁船に乗船し、網おしの際にタモですくいあげて 80 l タンクに収容して運搬した。運搬後直ちに屋内水槽（180×90×80 cm）に移し、1~2 時間放置後、傷や異常行動の有無を調べ健全な魚のみを実験に使用した<sup>46-52</sup>。

使用した魚の年齢は梶原<sup>53</sup>、三谷・井田<sup>54</sup>、牟田<sup>55</sup> および須田<sup>56</sup> の査定法に基づき 1 才魚と判断された。

実験水槽内で、魚は一つの群として水路を同一方向に速度約 20 cm/s で遊泳し続けるが、その行動を示す期間は、採捕後約 2 日間が限度であることが確認された。その後は、①遊泳し続けなくなる、②群の先頭と後尾との距離が長くなる、③反応の持続性が低下する、などの現象があらわれはじめ、3 日以上経過するとさらに顕著になった。

以上のことから、全ての実験は採捕後 24~36 時間以内に行うこととし、実験毎に新しい魚と交換した。

実験に使用した総数は 3,900 尾であった。

### ＜実験手順＞

実験開始 8 時間前にマアジ 8 尾を水路内に放った。そのうち 1 尾の第 2 背鰭の前に、釣り針に結び付けた発光ダイオードとリウチム電池からなる目印（水中重量約 0.5 g）を取り付けた (Fig. 3)。マアジが 1 つの群として水路内を遊泳し続けていることを確認した後、20 分間ずつ連続光と断続光を交互に照射し、その間の魚群行動を観察した。

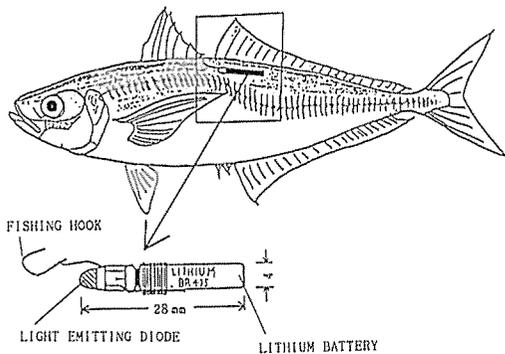


Fig. 3. A horse mackerel with a light emitting diode on its back just in front of its second dorsal fin and sectional diagram of the marker.

魚群の観察は目視で行った。魚群の位置は目印を付けたマアジの位置で代表させ、新しい区域に移動する毎にその番号を読み上げ、これをテープレコーダに録音した。観察終了後、このテープを再生して区域番号と経過時間(秒)をプロットし、Fig. 4 に例示した魚群の行動軌跡を求めた。

魚群行動の解析には、直接照射部位の両側 3 区域計 6 区域 (0~2 区; Fig. 1 参照) を特定区域とし、この区域への出現回数を求め、さらに相違率や移動速度を算出した。特定区域内で魚は照射光を視認できるが、3~4 区の一部を除く他の区域では遮光壁の陰になり視認することはできない。

ここで、

① 出現回数は魚群が 5 分間に特定区域内に進入した回数 (第 3 節以後は特定区域の左右両端の区域番号 2 へ進入した回数とした)

② 相違率 (R) は  $R = (1 - D/S) \times 100$  (%)

S : 連続光照射時の特定区域への出現回数

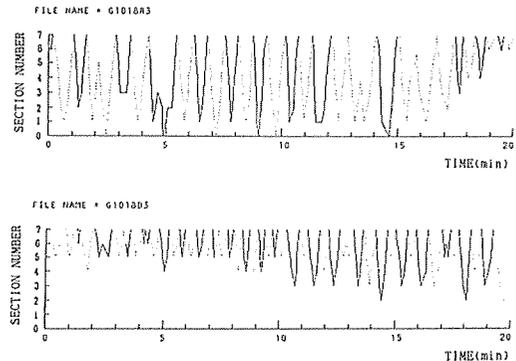


Fig. 4. An example of the trajectory of a fish school, in which the solid line and dotted line stand for each coordinate for a school of fish swimming within the right and left side section of the irradiated area.

(upper) Under the constant light

(lower) Under the intermittent light

### D : 断続光照射時の同区域への出現回数

③ 移動速度は魚群が移動した総距離を時間で割ったものである。なお、移動距離は魚群が常に水路の中央を遊泳したとみなし、移動した区域の総数と水路中央部における 1 区域分の長さ (112 cm) を乗じて求めた。

実験は、水槽周囲の人為的騒音の最も少ない夜間に行い、照射断続光の明暗周期、明暗照度比、照射光の色および背景照度などを変えて繰り返した。実験回数は明暗周期で 70 回、明暗照度比で 35 回、照射光の色で 25 回、および背景照度で 60 回であった。

実験の種類は、明暗周期 (3.0, 1.36, 0.62, 0.15 回/秒)、明暗照度比 (10,000 : 1, 60 : 1, 2 : 1)、照射光の色 (青色光, 赤色光, 全光)、背景照度 (0.003 lx 未満, 0.003 lx, 0.01 lx, 0.02 lx, 0.2 lx, 2.0 lx, 5.0~10.0 lx) とした。各実験の詳細を Table 1 に示す。

実験期間およびその間の水温範囲は 1983 年 7 月~11 月 23.5~25.5°C, 1984 年 9~10 月 21.3~25.1°C, 1985 年 9~11 月 20.7~22.4°C, 1986 年 5~10 月 18.6~24.2°C, 1987 年 8~9 月 24.4~25.5°C であった。

実験時期、実験種類、延べ日数、実験回数、供試魚総数および実験期間中の水温、塩分を Table 2 に示す。

### ＜水槽内の照度分布＞

投光装置から色フィルターなしの光を照射した時の、水槽水面および水中 50 cm 深 (実験時の平均的な魚群の

Table 1. Lighting conditions for experiments

Experiment	Frequency (c/s)* <sup>1</sup>	Contrast ratio* <sup>2</sup>	Wavelength of light	Background irradiance (lx)
(AA)	2.8	1,200 : 1	White* <sup>3</sup>	
(A)	3.0	10,000 : 1	White	less than 0.01
(B)	1.36	10,000 : 1	White	less than 0.01
(C)	0.62	10,000 : 1	White	less than 0.01
(D)	0.15	10,000 : 1	White	less than 0.01
(E)	3.0	60 : 1	White	less than 0.01
(F)	3.0	2 : 1	White	less than 0.01
(1)	1.36	10,000 : 1* <sup>4</sup>	White	less than 0.003
(2)	1.36	10,000 : 1	White	0.003
(3)	1.36	10,000 : 1	White	0.01
(4)	1.36	10,000 : 1	White	0.02
(5)	1.36	10,000 : 1	White	0.2
(6)	1.36	10,000 : 1	White	2.0
(7)	1.36	10,000 : 1	White	5.0~10.0
(8)	1.36	1,660 : 1	Blue* <sup>5</sup>	less than 0.003
(9)	1.36	1,540 : 1	Red* <sup>6</sup>	less than 0.003

\*<sup>1</sup> Blinking frequency of intermittent light\*<sup>2</sup> Contrast ratio between bright and dark light intensity of intermittent light\*<sup>3</sup> The entire spectrum\*<sup>4</sup> Even if the contrast ratio between brightness and darkness of the irradiated beam is fixed to a constant level, the ratio varies with a change of the background irradiance\*<sup>5</sup> Centroid wavelength; 487 nm\*<sup>6</sup> Centroid wavelength; 656 nm

Table 2. Experimental period, numbers of the fish, temperatures and salinities of the water in the tank

Period			Experiment*	No. of experiments	No. of fish	Temperature (°C)	Salinity (‰)
Days							
1983	Jul. ~Nov.	90	(AA)	78	1,200	23.5~25.5	approx. 34
1984	Sep.~Oct.	35	(A)~(F)	35	320	21.3~25.1	approx. 34
1985	Sep.~Nov.	70	(A)~(F)	70	1,050	20.7~22.4	approx. 34
1986	May~Oct.	90	(1)~(9)	85	950	18.6~24.2	approx. 34
1987	Aug.~Sep.	40	leader net of light	31	380	24.4~25.5	approx. 34

\* See Table 1

遊泳水深)における相対分光分布を Fig. 5 (上) に示した。これらの値は、8色水中照度計(石川産業製 SR-8型, 測定波長 337, 421, 481, 513, 570, 621, 653, 677 nm, 半値幅約 10 nm)で測定した。なお、水面における照射光の分光分布には、タングステン白熱電灯光の基準とさ

れている CIE 標準光 A 光源のスペクトル強度分布も参考にした<sup>57)</sup>。

同図より、魚の遊泳層における分光分布は、水深が浅いため可視域では水面上の分布とほとんど変わらず、短波長から長波長に向かってほぼ直線的に上昇しているこ

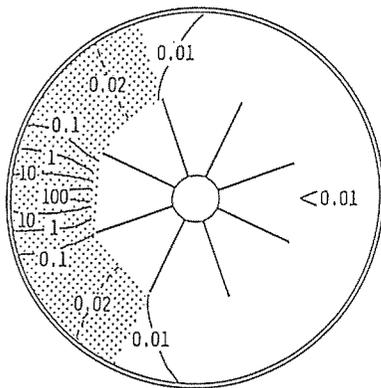
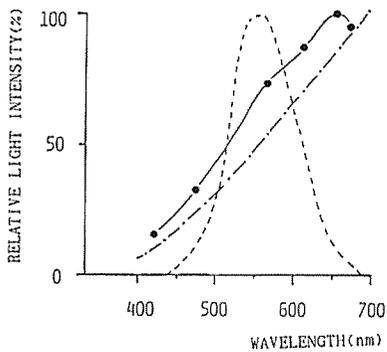


Fig. 5. (upper) Spectral distributions of the irradiated beam, in which the solid line with circle is in the layer of 50 cm deep and chain line is at the surface of the water. The broken line is the visibility curve.

(lower) Distribution of downward light intensities (lx) of the irradiated beam in the layer of 50 cm deep.

とがわかった。

水面上と水中の分光分布がほとんど変わらなかったの  
で、本研究では明るさの単位にルクス (lx) を用いた。

水面における照度はデジタル照度計 (ミノルタ T-1M  
型; 受光面の直径 14 mm) で測定した。水中 50 cm 深に  
おける照度は次のように求めた。水槽内各区域において、  
8 色水中照度計を用いて水面と水中 50 cm 深における  
波長別光量を測定し、分光分布曲線を作った。さらに、  
この曲線より 10 nm 毎の波長別光量を得て視感度を乗  
じ、この積を可視域について積分した。その結果、水中  
50 cm 深の値は水面の 82%であった。そこで、水中の照  
度は水面の値より比例計算した。なお、第 5 節以後では

水中照度計 (アレック電子社製 Modl-ALM) による測定  
も行った。また、背景照度が 0.01 lx 以下の場合には、  
低照度域の測定は不可能であったので、あらかじめ遮光  
壁を固定する枠の上に 24 測点を設けて測光し、その照度  
分布と水面および水中 50 cm 深の照度分布の相関関係  
を求めて比例計算した。

この方法により求めた。背景照明なしで投光装置から  
連続光を照射した時の、水中 50 cm 深の照度分布は  
Fig. 5 (下) となった。照度は、直接照射部位である 0  
区の中央で最も高く約 100 lx, その位置から離れるに  
したがって急激に低くなり 2 区では 0.02 lx, さらに離れ

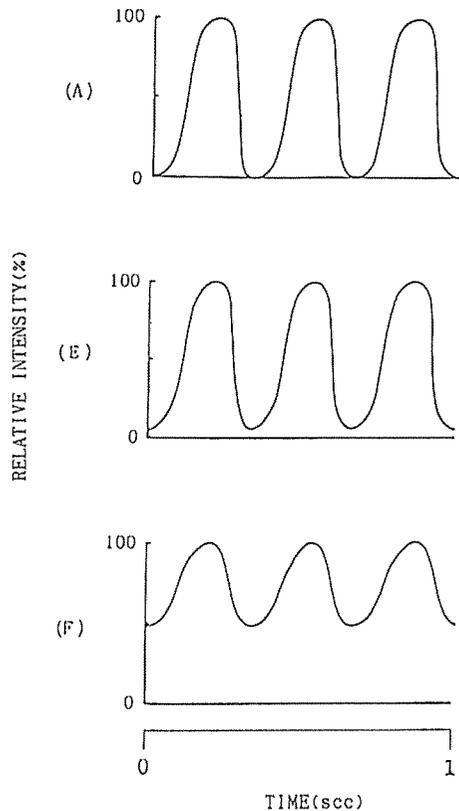


Fig. 6. Changes of relative intensity of intermittent light (see Table 1).

Contrast ratio\*

(A) 10,000 : 1

(B) 60 : 1

(F) 2 : 1

\* Contrast ratio between bright and dark light intensity

\*\* 3.0 c/s blinking frequency is kept constant

ると 0.01 lx 未満であった。なお、水槽底の反射率は約 15% であった。

Fig. 6 には、主要実験時の直接照射部位水面における断続光の相対照度の変化を示した。同図は、照射断続光の明暗変化をデジタル照度計（ミルノタ T-1M 型）で受け、その出力を高感度記録計（東亜電波 EPR-200A 型）で書かせたパターン図である。

断続光の明暗変化は、照度の上昇時に比べ下降が急であった。また、照度比 10,000 : 1 の場合、明るさの変化は 0~100 (%) であったが、照度比 60 : 1 では 1.7~100 (%)、2 : 1 では 50~100 (%) の変化であった。

## 第 2 節 反応行動の基本型

マアジ魚群に対して連続光を照射すると、直ちに整然とした群で特定区域（第 1 節実験手順参照）に接近し、最も明るい区域（0 区）の前面（1 区、下方向照度 0.1 lx 付近）で反転して逆方向に泳ぎ去った。その後反対側より再び特定区域に進入し、同様に反転した。この行動が繰り返された。また、移動速度は非常に安定し約 20 cm/s であった。

断続光（明暗周期 2.8 回/秒、明暗照度比 1,200 : 1）を照射すると、群としての行動には変化がないが、照射光が遮光壁の陰から見え始める位置（3~4 区）で反転して光の届かない区域へ泳ぎ去り、照射光の視認できる特定区域（0~2 区）へは進入しなくなった。

Fig. 7 は、連続光と断続光を 20 分間ずつ交互に各 4 回（計 160 分間）照射した実験 5 回分の、0~2 区への平均出現回数を示した。

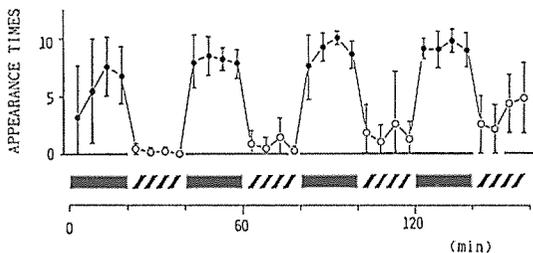


Fig. 7. Average appearance times of the fish school in Section Nos. 0 to 2 every 5 minutes, where the open and closed circle stands for each coordinate for the intermittent and the constant light, respectively. The vertical line is the standard deviation.

\* Blinking frequency is 2.8 c/s

\*\* Contrast ratio is 1,200 : 1

出現回数を示した。図中の縦軸は 5 分間あたりの平均出現回数、横軸は経過時間である。黒丸および白丸は連続光および断続光を照射した時の平均出現回数、縦棒は標準偏差をあらわす。

連続光照射時と比べ断続光照射時における出現回数は著しく少なく、その差は非常に大きかった。出現回数の増減は、照射光を切り替えると同時に起った。平均出現回数は、連続光で 8.0 回/5 分間（標準偏差 2.7）、断続光で 1.4 回/5 分間（標準偏差 2.4）であった。

この結果を F 検定によって分散の違いの検定をし、違いがない場合さらに t 検定で平均値の差の検定を行った。分散に違いがある時は Welch の方法を用いた。検定の結果、連続光照射時と断続光照射時の出現回数の平均値間には危険率 1% で有意な差があった (Table 3 参照)。

実験回数別にみると、連続光では初回 20 分間の平均出現回数が 5.7 回/5 分間（標準偏差 3.7）と少なくバラツキの幅も大きい。2 回目以降 4 回までは平均 8.7 回/5 分間（標準偏差 1.7）と安定した値であった。一方、断続光では初回 20 分間の平均出現回数 0.2 回/5 分間（標準偏差 0.4）が、最終の 4 回目では 3.4 回/5 分間（標準偏差 3.0）となり、出現回数およびバラツキの幅共に増加の傾向がみられた。

前述の方法で、実験回数毎に連続光と断続光に対する出現回数の平均値の差の検定を行うと、危険率 1% で有意な差が終始認められた。

以上より、断続光が魚群行動に著しい嫌忌的效果をおよぼしていると判断された。

また、これらの断続光は天然には存在しない全く人工的な現象ではあるが、魚の神経感覚器に受け入れられる強い刺激になることが明らかになった。

なお、本節では目印を使用せず、魚群の中心位置が照射光の視認区域（0~2 区）へ進入した回数を扱った。以後の節では、目印を付けたマアジの位置を魚群の位置とし、その移動する様子を 16 等分した水路内の区域番号で記録し解析した。後者では、目印を付けたマアジが他のアマジと一緒に行動した場合に限り実験を実施したので、これら 2 つの方法によるデータには実質的な差はなかった。

## 第 3 節 明暗周期を変えた場合の反応

断続光の明暗周期を変えた時の、光に対する魚群行動

**Table 3.** Average appearance times of the fish school in the irradiated area, every 5 minutes, its standard deviation, difference ratio, and t-values under different lighting conditions

Experiment* <sup>1</sup>	Appearance times		Difference ratio* <sup>2</sup> (%)	t <sub>0</sub> * <sup>3</sup>	
	Intermittent light	Constant light			
(AA)		1.4±2.4	8.0±2.7	83	15.11**
Blinking frequency	(A) 3.0 (c/s)	1.3±1.7	8.7±3.8	84	7.17**
	(B) 1.36	0.1±0.3	7.1±3.9	98	7.18**
	(C) 0.62	0.7±1.5	11.6±4.7	92	8.86**
	(D) 0.15	2.1±2.7	9.3±4.1	80	5.92**
Contrast ratio	(A) 10,000 : 1	1.3±1.7	8.7±3.8	84	7.17**
	(E) 60 : 1	1.9±1.9	7.9±2.8	76	5.47**
	(F) 2 : 1	8.5±3.0	8.7±2.8	2	0.20
Background irradiance	(1) less than 0.003 lx	0.1±0.3	7.1±4.0	98	6.69**
	(2) 0.003 lx	0.4±0.7	11.4±3.5	94	13.68**
	(3) 0.01	6.4±2.0	14.0±4.0	56	7.75**
	(4) 0.02	12.3±4.6	17.0±3.5	28	3.64**
	(5) 0.2	15.9±3.9	15.4±3.0	-3	0.41
	(6) 2.0	19.0±0.9	19.1±1.2	1	0.30
	(7) 5.0~10.0	12.9±2.8	13.0±2.2	2	0.14
Wavelength of light	(8) Blue	0.8±1.1	9.8±4.3	92	9.79**
	(9) Red	5.0±2.0	8.9±3.0	44	5.18**
	(1) White	0.1±0.3	7.1±4.0	98	6.68**

\*<sup>1</sup> See Table 1

\*<sup>2</sup> Difference ratio (R) between the number of the school which appeared in the irradiated area under a constant light (S) and that under an intermittent light (D).  $R=(1-D/S) \times 100$  (%)

\*<sup>3</sup> Difference in the variance was tested (F-test) and then a t-test was performed when no difference was found or Welch's method when there was a difference

※ The symbol "\*\*" indicates that a difference in the mean value is positive with the significant level of 1%.

の変化を Fig. 8 に示した。図中、縦軸は 0~2 区への出現回数 (回/5 分間)、横軸は経過時間である。また、黒丸および白丸はそれぞれ連続光および断続光の場合である。本実験は背景照度 0.01 lx 未満のもとで実施した。また、断続光の明暗照度比は 10,000 : 1 (以上) に固定し、明暗周期は 3.0, 1.36, 0.62 および 0.15 回/秒とした。

網膜電図 (ERG) 法にもとづいて求められた臨界融合頻度は、第 1 章で述べたようにマアジでは暗順応状態 (水温 10°C) で 23 回/秒と報告されている<sup>2)</sup>。本実験は、背景照度 0.01 lx 未満のもとで実施したから暗順応状態であったと考えられる。したがって、明暗周期 3.0,

1.36, 0.62, 0.15 回/秒はマアジの眼の臨界融合頻度の 1/8, 1/17, 1/37, 1/153 であり、マアジの眼の感知能力の範囲内と判断される。

断続光を照射した時の出現回数の減少は明暗周期によって異なり、出現回数が最も少なかったのは周期が 1.36~0.62 回/秒であった。これ以上周期が長くても短くても出現回数は多少多くなった (Table 3 参照)。

嫌忌的效果の強弱をあらわす指標としての相違率で示すと、周期 1.36 回/秒では 98%, 0.62 回/秒では 92%, 3.0 回/秒では 84%, および 0.15 回/秒では 80% となった。相違率の値が大きいのは嫌忌的效果が強いことを意味する。

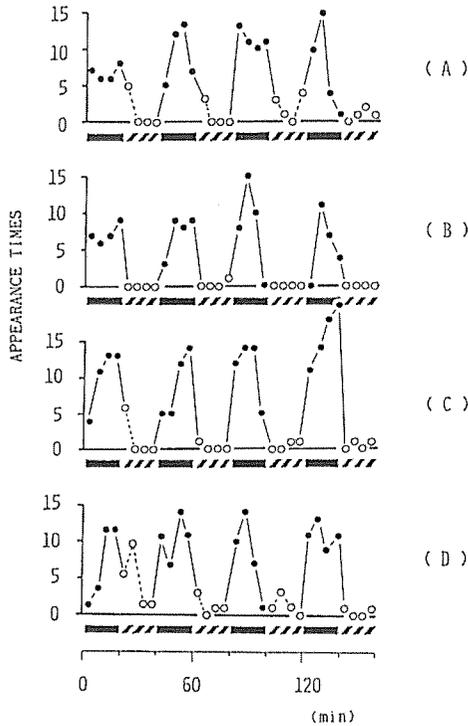


Fig. 8. Appearance times of the fish school in Section Nos. 0 to 2 for a period of 5 minutes, where the open and closed circle stands for each coordinate for the intermittent (oblique line) and the constant light (black bar), respectively.

Blinking frequency of intermittent light

(A) 3.0 (c/s)

(B) 1.36

(C) 0.62

(D) 0.15

\* 10,000 : 1 contrast ratio is kept constant

\*\* Background irradiance is less than 0.01 lx

以上より、断続光が魚群におよぼす嫌忌的效果は明暗周期によって異なり、効果の最も強い周期は1.36～0.62回/秒と判断された。

次に、魚群に対する嫌忌的效果がおよぶ範囲を明らかにするために、断続光を照射した時の各区域別の出現回数を同一実験結果より算出し、Fig. 9に示した。縦軸は、各区域別の出現回数(左図)および各区域別の滞留時間を全照射時間に対する割合(%)で示し(右図)、横軸は区域番号である。

断続光の照射により、区域別の出現回数は直接照射部

位に近付くにしたがって減少し、この減少が認められる範囲は、断続光の明暗周期によってかなり異なった。周期1.36～0.62回/秒の場合には嫌忌的效果がおよぶ範囲が最も広くなった。効果のみられる区域は、照度が0.01 lx以上(0～3区)である。実験水槽が遮光壁によって環状型水路となっているので、嫌忌的效果の強い周期の場合、魚群は遮光壁の陰から照射断続光が見えるか見えないかの境界域(3～4区)で、すでに反転行動を起こしていることを意味する。

明暗周期が、これらより短い3.0回/秒や、長い0.15回/秒の断続光では、魚群は直接照射部位の近くまで出現した。

平均移動速度をTable 4に示した。断続光照射時と連続光照射時の移動速度を比べると、明暗周期3.0回/秒で32%、1.36回/秒で31%、0.62回/秒で27%、および0.15回/秒で49%低い値であった。すなわち、断続光照射は魚群行動を鈍化させたと結論されよう。このことは、感覚が鈍くなるためではなく、心理的に警戒心が強まって表面的な行動はゆるやかになると考えるのが妥当であろう。

もっとも、明暗周期0.15回/秒の断続光で移動速度の低下率が大きかったのは、次のような特異な反応行動のためであった。すなわち、この断続光を照射すると魚群は、光の減衰に対し、あたかも速さがる光を追いかけるように直接照射部位へ集合し、群としてのまとまりを失った。さらに、各個体の向きや動作がバラバラになり、頭を上にして垂直方向に定位したり、あるいは、光源に向かって突進したり、背鰭が水面から出るほど浮上するなどの行動がみられた。この状態に陥った魚群は、照射光直下で水面近くの浅い層を、胸鰭をさかんに動かしながら落ち着かない様子で小さきみに遊泳方向を変えて、個々に泳ぎまわった。

これらの行動は、集魚灯直下における魚群の行動観察結果より、VERHEIJEN<sup>58)</sup>が述べたダツの一種 *Belone belone* やトウゴロウイワシ科の魚 *Atherina* sp. と同様な攪乱状態に陥ったためと判断された。

この現象は、長周期(0.15回/秒)の断続光を照射した場合、その開始時に多く認められた(Fig. 8-(D))。

#### 第4節 明暗照度比を変えた場合の反応

断続光を照射した場合、照射光と背景照度との照度比

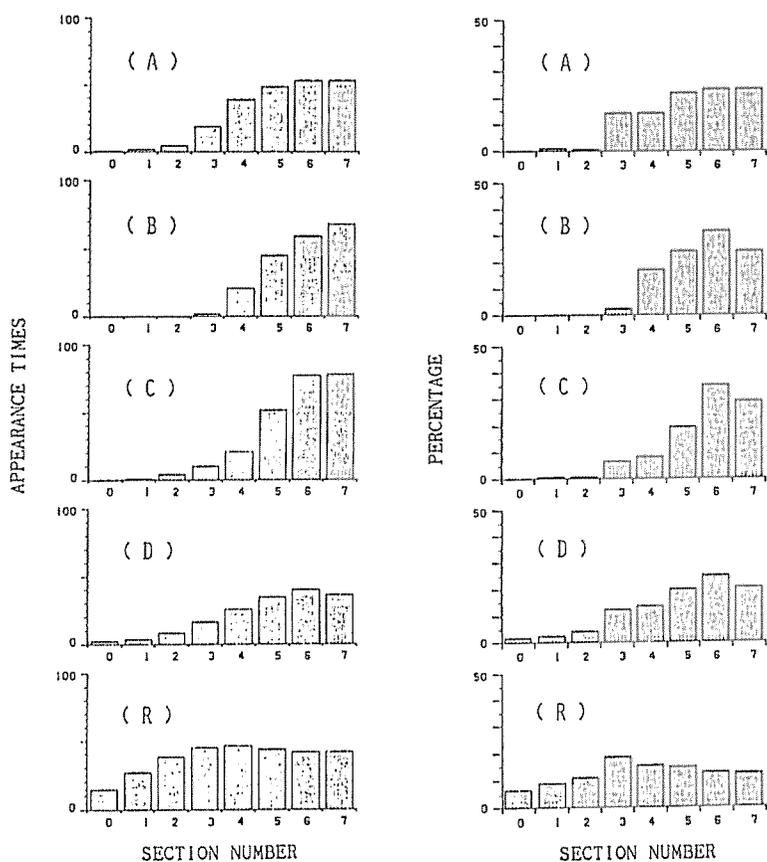


Fig. 9. Average appearance times of the fish school in each section for a period of 20 minutes (left), and percentages of time during which the fish school stayed in each section (right).

Blinking frequency of intermittent light

(A) 3.0 (c/s)

(B) 1.36

(C) 0.62

(D) 0.15

(R) Constant light

\* 10,000:1 contrast ratio is kept constant

\*\* Background irradiance is less than 0.01 lx

が小さい直接照射部位から離れた区域では (Fig. 9 参照), 出現回数の減少はみられず嫌忌の効果がないことを前節で述べた。そこで, 照射断続光の明暗照度比を変えた場合の魚群の反応を明らかにした。

断続光の明暗照度比を 10,000:1 (以上), 60:1 および 2:1 とした時, 魚群行動の変化を Fig. 10 に示した。本実験は背景照度 0.01 lx 未満のもとで実施した。また, 断続光の明暗周期は 3.0 回/秒に固定した。図中, 縦軸

は 0~2 区への出現回数 (回/五分間) 横軸は経過時間である。また, 黒丸および白丸はそれぞれ連続光および断続光の場合である。断続光の照射は 1 実験につき 20 分間ずつ 4 回としたが, 明暗照度比 60:1 と 2:1 の場合には比較のため 1 回目と 4 回目には明暗照度比 10,000:1 (以上) の断続光を照射した。

明暗照度比が 60:1 以上の断続光に対する出現回数は著しく少なかったが, 明暗照度比 2:1 で出現回数は急

**Table 4.** Average moving speeds of the fish's school, its standard deviation, and decreasing ratio under different lighting conditions

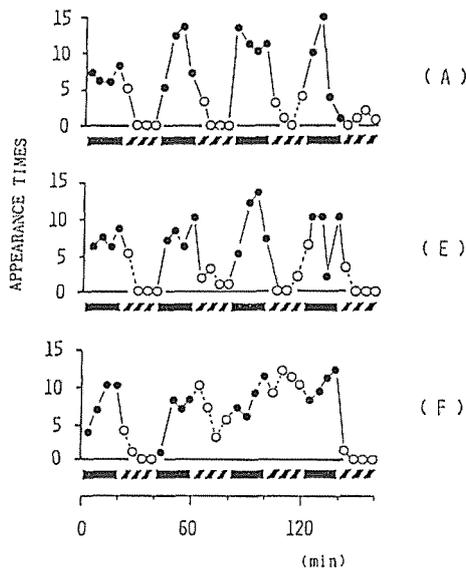
	Experiment*	Moving speed (cm/s)		Decreasing ratio** (%)
		Intermittent light	Constant light	
Blinking frequency	(A) 3.0 (c/s)	14.8±1.6	21.8±3.1	32
	(B) 1.36	14.5±1.4	20.9±5.0	31
	(C) 0.62	15.5±3.0	21.3±3.6	27
	(D) 0.15	10.2±2.1	20.6±2.1	49
Contrast ratio	(A) 10,000 : 1	14.8±1.6	21.8±3.1	32
	(E) 60 : 1	14.5±0.6	19.8±1.4	27
	(F) 2 : 1	19.7±3.5	21.0±4.5	6
Background irradiance	(1) less than 0.003 lx	16.8±2.0	22.9±6.6	27
	(2) 0.003 lx	18.6±2.6	25.8±3.5	35
	(3) 0.01	23.1±3.3	36.7±12.8	37
	(4) 0.02	31.6±6.6	43.4±9.1	29
	(5) 0.2	36.6±8.8	36.4±6.8	(0.5)***
	(6) 2.0	49.5±2.3	49.3±3.5	(0.4)***
	(7) 5.0~10.0	35.4±6.8	34.9±5.6	(1.4)***
Wavelength of light	(8) Blue	13.6±3.2	25.2±7.2	46
	(9) Red	18.3±1.8	24.2±3.0	24
	(1) White	16.8±2.0	22.9±6.6	27

\* See Table 1

\*\* The ratio between the moving speed of the school under a constant light and under a intermittent light

\*\*\* ( ) moving speed was increased

※ Moving speed was not obtained in the experiment (AA)

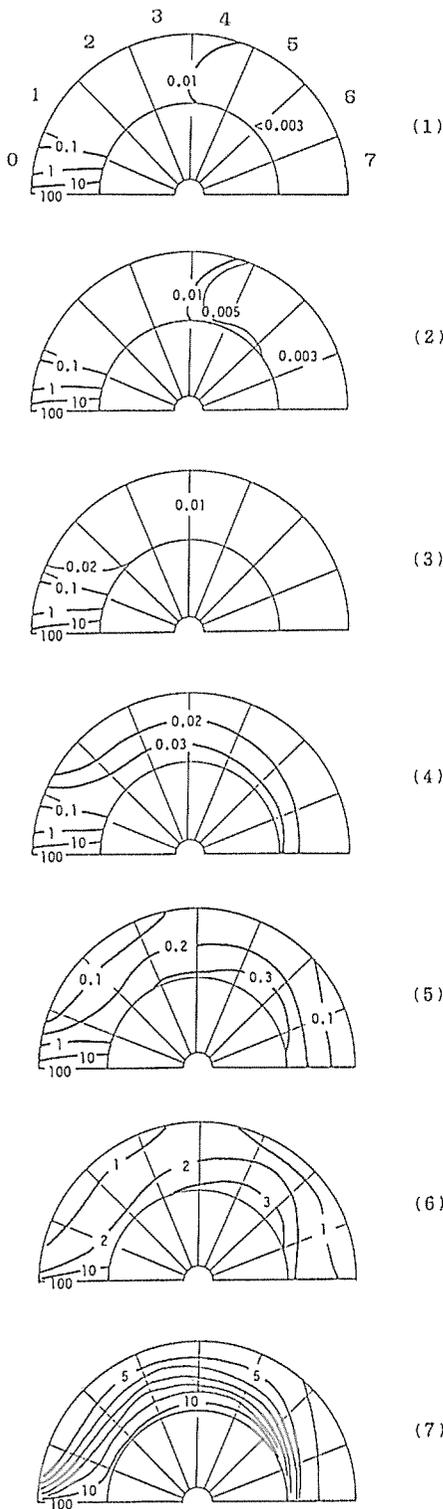


**Fig. 10.** Appearance times of the fish school when different contrast ratios of intermittent light are projected. The open and the closed circle stands for the respective numbers of appearance times under the intermittent (oblique line) and the constant light (black bar) every 5 minutes.

Contrast ratio  
 (A) 10,000 : 1  
 (E) 60 : 1  
 (F) 2 : 1

\* 3.0 c/s blinking frequency is kept constant

\*\* Background irradiance is less than 0.01 lx



激に増加し、連続光照射時と同等の値になった。このことを、嫌忌的效果をあらわす指標としての相違率でみると、明暗照度比 10,000 : 1 (以上) および 60 : 1 ではそれぞれ 84%, 76% であったのに対し、照度比 2 : 1 では非常に小さく 2% であった (Table 3 参照)。

魚の目の明暗弁別閾値は、行動学的実験の方法により 0.2~0.02 と報告されている<sup>6,59)</sup>。したがって、魚の目の明暗弁別能力の面からみて、2 : 1 の明暗照度比でも変化は十分認識できるのに、本実験の結果では 60 : 1 以上の明暗照度比でなければ嫌忌的效果は発現しなかった。このことは、魚が断続光を感知していても、それが行動に出るとはかぎらないことを意味する。

断続光照射時と連続光の場合の平均移動速度を比較すると、明暗照度比 10,000 : 1 (以上) で 32%, 60 : 1 で 27% および 2 : 1 で 6% の低下があった (Table 4 参照)。したがって、嫌忌的效果が強いほど平均移動速度が低下し、魚群の行動が鈍化した。この結果は前節と一致し、感覚が鈍くなるのでなく用心ぶかくなって表面的な行動はゆるやかになると考えるのが妥当であろう。

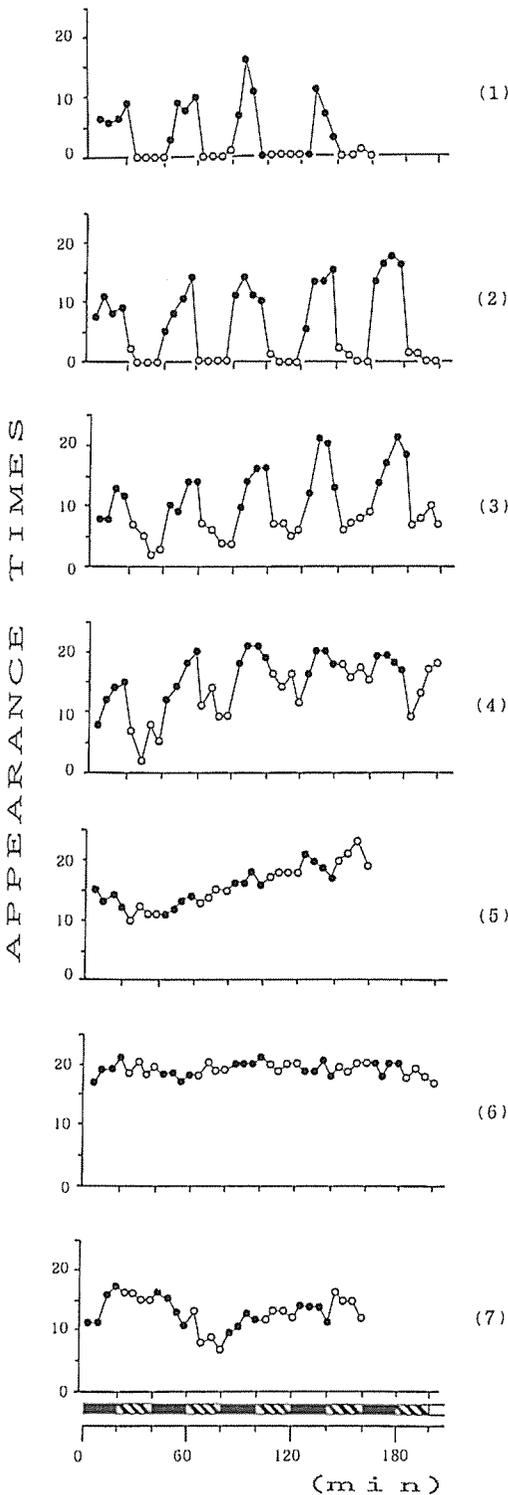
#### 第 5 節 背景の明るさを変えた場合の反応

魚が遊泳している海中の明るさ、すなわち背景照度は、海域、水深、時刻などにより変化が激しい。背景照度が変われば断続光の明暗照度比は変わり、また第 1 章で述べたように魚の目の感知能力も変わる。そこで、魚の目が暗順応状態の場合と明順応状態の場合における、断続光に対する魚群の反応行動の相違を調べた。

Fig. 11 (1)~(7)は、背景照度を (1)0.003 lx 未満、(2)0.003 lx、(3)0.01 lx、(4)0.02 lx、(5)0.2 lx、(6)2.0 lx、(7)5.0~10.0 lx に設定し、投光装置より照度 100 lx の連続光を照射した時の照度分布を示した。背景照度は、実験時の平均的な魚群の遊泳水深である 50 cm 深における照度を用いた。同図の値は、第 2 章第 1 節で述べた方法

Fig. 11. Distribution of downward irradiances (lx) at a depth of 50 cm in the experimental tank.

- (1) less than 0.003 lx
- (2) 0.003 lx
- (3) 0.01 lx
- (4) 0.02 lx
- (5) 0.2 lx
- (6) 2.0 lx
- (7) 5.0~10.0 lx



で求めた計算値である。また、低照度の測定は不可能であったので、あらかじめ水槽上の特定位置の照度分布と水面の照度分布の関係を求め、比例計算した。

背景照度の設定は、前述のように背景照明用電球の電源電圧をスライダックによって調節して行った。

Fig. 12 (1)~(7)は、それぞれの背景照度における0~2区への出現回数を示した。明暗照度比は(1)33,000:1(以上), (2)33,000:1, (3)10,000:1, (4)5,000:1, (5)500:1, (6)50:1, (7)20:1(以下)であり、明暗周期は嫌忌的効果の最も強い1.36回/秒とした。縦軸は0~2区への出現回数(回/5分間)、横軸は経過時間である。図中、黒丸および白丸は連続光および断続光の場合である。また、同一結果より背景照度を変えた実験毎の0~2区への平均出現回数を Fig. 13 に示した。

断続光照射時の0~2区への出現回数は、背景照度0.003 lx 以下では非常に少なかったが、背景照度0.01~0.02 lx の間で急増(6.4~12.3回/5分間)した。さらに背景照度0.02 lx 以上で出現回数は多いま安定した。連続光照射時の出現回数と比較すると(Fig. 13)、背景照度が0.01 lx 以下では断続光照射時の出現回数が著しく少なく、差が最も大きかった。背景照度0.01~0.02 lx では、前述のように断続光照射時の出現回数が急増したため、連続光との差は縮小した。背景照度がさらに高く0.2 lx 以上では、断続光照射時においても連続光でも出現回数は多く、両者の差は完全に消失した。

また、第2節で用いた方法で背景照度毎に断続光照射時と連続光照射時の出現回数の平均値の差の検定を行った。その結果、平均値間の差は、背景照度0.02 lx 以下

Fig. 12. Appearance times under each grade of background irradiance, where the open and the closed circle stands for respective numbers of appearance times under the intermittent (oblique line) and the constant light (black bar) every 5 minutes.

Background irradiance	Contrast ratio
(1) less than 0.003 lx	more than 33,000 : 1
(2) 0.003 lx	33,000 : 1
(3) 0.01 lx	10,000 : 1
(4) 0.02 lx	5,000 : 1
(5) 0.2 lx	500 : 1
(6) 2.0 lx	50 : 1
(7) 5.0~10.0 lx	less than 20 : 1

\* 1.36 c/s blinking frequency is kept constant

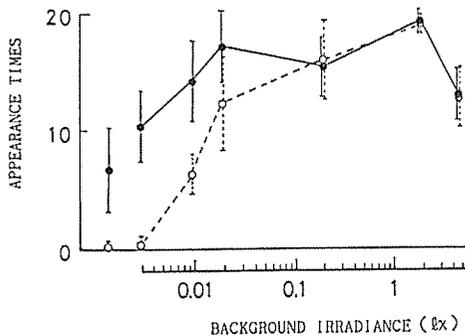


Fig. 13. Average appearance times of the fish school under each grade of background irradiance every 5 minutes, where the open and the closed circle stands for each coordinate for the intermittent and the constant light, respectively. The vertical line is the standard deviation.

では危険率1%で有意であり、背景照度0.2 lx以上では有意な差はなかった。

嫌忌の効果の強弱をあらわす指標として相違率で示すと、背景照度0.003 lx未満で98%, 0.003 lxで94%, 0.01 lxで56%, 0.02 lxで28%, 0.2 lxで-3%, 2.0 lxで1%, 5.0~10.0 lxで2%となった (Table 3 参照)。

したがって、断続光が魚群行動におよぼす嫌忌の効果は、背景照度0.003 lx以下で最も顕著であり0.02 lxではまだ効果はあるが、0.2 lxでは事実上消滅したと判断された。

マアジの眼の網膜運動現象は、第1章で述べたように、網膜の組織切片を作り桿体と錐体の位置を調べる方法によって、0.01 lx以下で始まり暗順応から明順応へ移行すると報告されている<sup>25)</sup>。

本実験の背景照度0.01~0.02 lxの間でみられた、断続光照射時における0~2区への出現回数の急激な増加は、マアジの眼が暗順応から明順応へ移行したためと判断された。すなわち、魚の行動軌跡と背景照度分布図とを検討してみると、魚は背景照度を0.01 lx以下とした場合には、この値より低照度(0.01 lx以下)域に留まる時間が長く、逆に背景照度0.02 lx以上とした場合には、常にこの値より高い照度域にさらされていることがわかった。

ここで前節で述べた結果をあわせて、断続光が魚群行動におよぼす嫌忌の効果と明暗照度比との関係を、暗順

応状態と明順応状態(暗順応から明順応への移行状態を含む)の場合に分けて Fig. 14 に示した。図中、縦軸は相違率、横軸は明暗照度比である。また、黒丸および白丸はそれぞれ明順応および暗順応の場合である。同図は、第4節の背景照度を一定として照射断続光の照度比を変えた場合と、第5節の背景照度を変えて照射断続光を一定とした場合の、2つの実験結果をあわせて求めた(暗順応; Fig. 10 (A), (E), (F), Fig. 12 (1), (2) 明順応; Fig. 12 (3)~(7))。嫌忌の効果の強弱は相違率で示した。

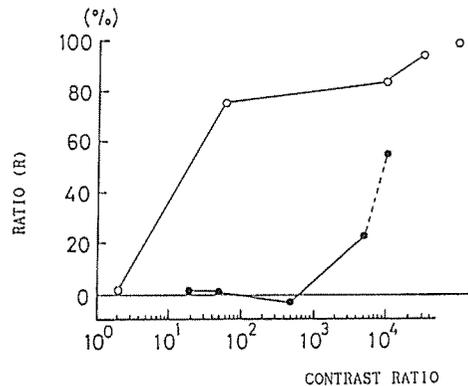


Fig. 14. Difference ratio (R) under the different contrast ratios of intermittent light. The open circle indicates a state of dark adaptation and the closed circle stands for the coordinate under light adaptation.

暗順応の場合、相違率は明暗照度比  $6 \times 10^1$  で既に75%を越えた。明順応では、相違率の急上昇が照度比  $5 \times 10^3$  より認められ、この値が50%を越えたのは照度比が  $10^4$  であった。したがって、断続光の嫌忌的效果は、マアジの眼が暗順応の場合、明順応の場合より2~3桁低い明暗照度比で認められた。

Fig. 13の結果と合わせ検討すると、嫌忌の効果の認められる断続光の明暗照度比は、断続光照射時の0~2区への出現回数が急激に変わる背景照度0.01~0.02 lxを境界として著しく異なることがわかった。すなわち、この境界より暗い場合は明るい場合の2~3桁低い明暗照度比で十分な効果を持つと判断された。

以上より、暗順応状態で嫌忌的效果が強く認められる明暗照度比は60:1以上、全く認められない照度比は2:1であり、明順応状態で効果の認められる明暗照度

比は5,000:1以上、消滅する照度比は500:1であると結論された。

第1章で述べたように、暗順応状態での網膜の感度は明順応に比べて $10^2 \sim 10^5$ 倍高いことがERG法による生理学的実験から明らかにされている<sup>7,22)</sup>。本研究のマアジを使った行動学実験では、暗順応状態において嫌忌的效果の認められる明暗照度比は、明順応の場合と比較して2~3桁低い値であった。この結果は、上記の生理学的実験の結果とさほどかけ離れたものではないと判断された。

魚群の移動速度は、背景照度の変化に伴ってFig. 15のように変化した(Table 4参照)。図中、縦軸は平均移動速度、横軸は背景照度、縦棒は標準偏差をあらわす。また、黒丸および白丸はそれぞれ連続光および断続光の場合を示す。

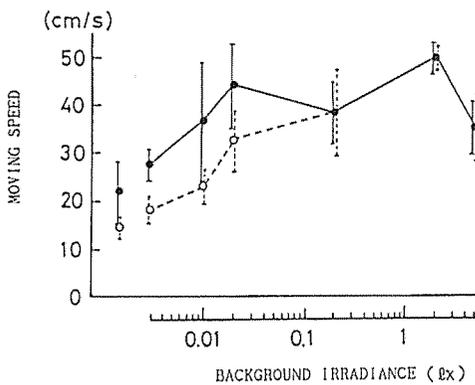


Fig. 15. Moving speed of the fish's school under each grade of background irradiance, where the open and the closed circle stands for each coordinate for the intermittent and the constant light, respectively. The vertical line is the standard deviation.

背景照度 0.02 lx 以下で断続光照射時には、連続光照射時より平均移動速度が約30%低下した。背景照度が0.2 lx 以上では、この速度低下が全くみられなかった。これらのことは、前節の嫌忌的效果の強弱と魚群行動の鈍化との関係をさらに裏付けた。

#### 第6節 照射光の色を変えた場合の反応

海中では空中に比べて光の減衰が非常に大きく、かつ減衰量は波長によって異なる。この光学的特性は、海水

中の懸濁粒子や溶存有機物の散乱や吸収による影響が大きいことにもとづく。これらの質や量は海域や水塊によってかなり異なるので、海中における光の分光分布は海域や水塊によって相当に異なる<sup>60-62)</sup>。また、魚類の眼は、生息している水中の光環境に良く適応していることが明らかにされている<sup>63)</sup>。したがって、照射断続光の波長組成により、嫌忌的效果の強さも変わるものと思われる。

海中へ透過する光は可視光の範囲なので、そのうち最も良く透過し卓越している青色光と、逆に減衰が激しくごく浅い層で消滅する赤色光をとりあげ、さらに全光(白色光)を加えてそれぞれの断続光に対する魚群の反応行動の相違を調べた。背景照度は0.003 lx未満とし、明暗周期は嫌忌的效果の最も強い1.36回/秒に固定した。

各照射光の、魚の遊泳層(50 cm深)における分光分布をFig. 16に示した。同図は、第2章で述べた方法に準じて、水面における分光分布としてタングステン白熱電灯光の基準とされているCIE標準光A光源のスペクトル強度分布の値を用い、この値に各色フィルターの分

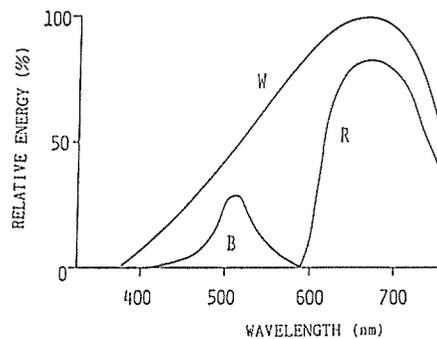


Fig. 16. Calculated spectral distributions of blue (B), red (R), and white (W) lights at a 50 cm depth in the experimental tank.

※ For the estimation of relative spectral distribution on the surface of the water, spectral intensity distribution of CIE standard source A, which is being used as the standard for the light of tungsten incandescent lamp, was used. The relative spectral distribution was calculated by multiplying the spectral intensity distribution by a spectral transmittance of each color filter and that of sea water (50 cm) which was measured using an eight color underwater irradiance meter.

光透過率と海水 50 cm の分光透過率を乗じて求めた。同図より、各分光分布曲線で囲まれる範囲を可視域につき積分し、青色光と赤色光および全光の水深 50 cm における相対エネルギー量を求めた。その結果、青色光と赤色光および全光のエネルギー量の比は 1.0 : 2.4 : 5.7 であった。

Fig. 17 には、青色光と赤色光および全光を照射した時、魚群が 0~2 区へ出現する回数を示した。図中、縦軸は出現回数(回/5 分間)横軸は経過時間である。黒丸および白丸はそれぞれ連続光および断続光の場合である。

平均出現回数(回/5 分間)は、青色光照射時に連続光と断続光で  $9.8 \pm 4.3$  と  $0.8 \pm 1.1$ , 赤色光照射時にはそれぞれ  $8.9 \pm 3.0$  と  $5.0 \pm 2.0$ , 全光では  $7.1 \pm 4.0$  と  $0.1 \pm 0.3$  であった。相違率で示すと、青色光, 赤色光および全光でそれぞれ 92%, 44% および 98% となった (Table 3 参照)。

青色光と赤色光の場合を比較すると、魚の眼に到達したエネルギー量は、青色光が赤色光の約 2/5 であったのに、相違率は約 2 倍であった。また、青色光と全光の比較では、青白光は全光の約 1/6 のエネルギー量であったが、相違率ではほぼ同等の値であった。したがって、青色光はマアジ魚群に対し非常に効果的に嫌忌の効果をお

よぼすと判断された。

ここで、マアジの眼が受ける刺戟量をマアジの眼の分光感度<sup>2,64)</sup>と眼に到達する波長別エネルギー量とを乗じ、その積を可視域について積分した値として計算した。その結果、青色光と赤色光および全光の刺戟量は 1.0 : 0.16 : 2.7 となった。すなわち、青色光と比較して、赤色光はエネルギー量では 2.4 倍であったが刺戟量は 0.16 倍と少なく、全光はエネルギー量では 5.7 倍であったが刺戟量は 2.7 倍であった。したがって、エネルギー量が同一であれば青色光の刺戟量が最も多く、青色光が非常に効果的であるという前述の結果は合理的に裏付けられた。

断続光照射時の平均移動速度を連続光照射時の場合と比較すると、青色光で 46%, 赤色光で 23%, 白色光で 27% 低下した (Table 4 参照)。前節までの結果と同様、断続光の嫌忌の効果により魚群の行動が鈍化した。

## 第 7 節 論 議

従来、光と魚群行動とのかわりあいについては、灯火漁業に应用されているように、走光性についての研究がなされてきた。この場合は光をエネルギーや明るさとして捉えている。しかし、光を魚類への刺戟として捉え

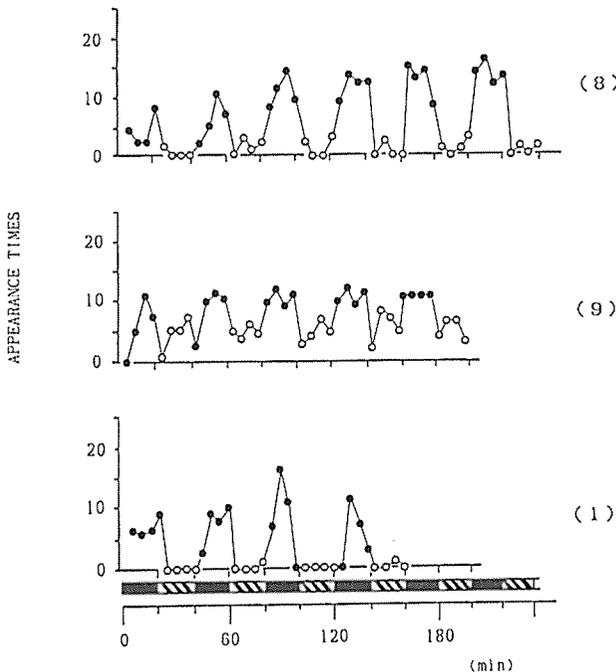


Fig. 17. Appearance times of the fish school in Section Nos. 0 to 2 when each blue (8), red (9), and white (1) light is projected. The open and the closed circle stands for each coordinate for the intermittent (oblique line) and the constant light (black bar) every 5 minutes.

\* 1.36 c/s blinking frequency is kept constant

\*\* Background irradiance is less than 0.003 lx

るもう一つの側面がある。魚類に対する刺激は光の物理量からみれば変化率であって、これが魚類の生理や生態にいろいろな影響を及ぼす可能性がある。本研究は後者の観点にたって行った。

その結果、光環境の短時間における変化(断続光)の影響は、集魚効果(蝸集行動)とは全く逆の嫌忌的效果(回避行動)としてあらわれた。しかも、その効果は断続光の明暗周期や明暗照度比および照射光の色のみならず眼の順応状態によって大きく変わることがわかった。また、これらの反応は生理学的な面から求められた光に対する感知限界すなわち臨界融合頻度や明暗弁別閾値とは異なる範囲でおこった。

マアジの臨界融合頻度は、水温 10°C で 23 回/秒であり<sup>2)</sup>、さらに、魚の眼の臨界融合頻度は水温の上昇によって直線的に増加することがサケとキンギョを用いて明らかにされている<sup>4)</sup>。これらの結果は、網膜電図(ERG)の平坦化を指標とした方法によって求められた。本実験は水温 20~25°C で行った。この水温の場合、前述のサケとキンギョの臨界融合頻度はいずれも水温 10°C の約 1.5 倍と報告されている。この結果を本研究で使用したマアジの臨界融合頻度にあてはめると約 35 回/秒と概算された。

連続光には正の走光性を示したマアジ魚群は明暗周期 3.0 回/秒の断続光には嫌忌性をあらわし、さらに嫌忌性は 1.36~0.62 回/秒では最も強く、0.15 回/秒ではやや減少傾向を示した。したがって、マアジの眼の感知能力範囲でしかも臨界融合頻度よりかなり低い頻度で嫌忌的效果がみられることがわかった。

魚の眼の明暗弁別閾値は、濃度が異なる灰色紙片を見分けさせる学習法によりハヤの類 *Phoxinus laevis* で 0.2~0.3<sup>5)</sup>、パネル上の種々の明るさの光を見分けさせる行動学的方法によりウグイの仲間 *rudd Scardinius erythrophthalmus* で 0.03~0.07<sup>65)</sup>、投影された光点に反応するよう学習させた魚の心拍数の変化を解析する方法によりタラ *cod Gadus morhua* で 0.02<sup>59)</sup>と報告されている。本実験で嫌忌的效果が認められたのは明暗照度比 60:1 以上であり、2:1 で消滅した。したがって、嫌忌的效果は少なくとも明暗弁別閾値の約 300 倍でみられ約 10 倍で消滅すると判断された。

さらに、魚類の対光行動を観察する際に注目される点として、光に対する馴れの問題がある。そこで、断続光

による嫌忌的效果に対する馴れの影響を調べた。その結果を Fig. 18 に示す。同図は本章第 2 節で述べた断続光(明暗周期 2.8 回/秒, 明暗照度比 1,200:1)を連続 4 時間照射した時、照射光の視認区域(0~2 区)への出現回数である。縦軸は出現回数(回/5 分間)横軸は経過時間である。

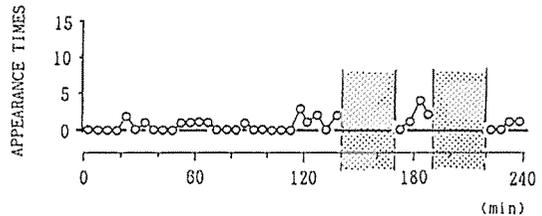


Fig. 18. Appearance times of the fish school in Section Nos. 0 to 2 when continuous projection of intermittent light occurs for 4 hours. The mesh mark indicates no measurement.

\* 2.8 c/s blinking frequency is kept constant

\*\* 1,200:1 contrast ratio is kept constant

同図より、断続光を 4 時間連続照射しても出現回数は増加せず、嫌忌的效果の減少はみられなかった。すなわち実験を行った範囲内では馴れは生じないことがわかった。

他方、集魚灯によるマアジやサバおよびイワシ魚群の誘導効果は 2~3 時間で減少することが報告されている<sup>66,67)</sup>。したがって、断続光による嫌忌的效果は連続光による誘導効果よりはるかに馴れの現象がおきにくいと判断された。

また、光が魚群行動に及ぼす一般的影響として行動の活発化および鈍化の問題がある。このことに関して調べた結果、連続光照射時には平均約 20 cm/s で遊泳していた魚群が、断続光を照射すると行動が鈍化し平均約 14 cm/s に低下した。すなわち、約 30% の行動鈍化があった。この行動の鈍化は、感覚が鈍くなるためではなく、心理的に警戒心が強まって表面的な行動はゆるやかになると考えるのが妥当であろう。

さらに、明暗の変化がゆっくりと起こる 0.15 回/秒の断続光に対しマアジは、遊泳の停止、浮上、垂直上方向への定位、光源へ突進などの異常行動や、各個体の向きがバラバラになって群としてのまとまりを失うことがしばしば観察された。この場合、魚群は断続光の照度の減

少時に、あたかも逃げて行く光をおいかけるかのごとく直接照射部位に集合・浮上した。そこで再び照度の増加が起こるため、マアジはたちまち眩しくなって、視機能の一時的鈍麻が避けられないことになる。この状態は、VERHEIJEN<sup>58)</sup>によって“Optical Disorientation”として説明された集魚灯直下でみられる魚の異常な行動に相当する<sup>34,35)</sup>と考えられた。

以上が断続光照射に対する魚群行動の特徴である。

### 第3章 光の垣網による魚群の行動制御

第2章の諸実験結果にもとづき、嫌忌的效果を広範囲にわたって効率よく展開させるため、断続光を光束として鉛直に照射し、これを一列に並べた光束列(光の垣網と呼ぶ)を用いて、魚群の遊泳方向の制御を試みた。

実験時期、延べ日数、実験回数、供試魚総数および実験期間中の水温・塩分はTable 2に示した。

#### 第1節 光の垣網発生装置の開発

光の垣網を作るための海中多光束照射装置を考案・試作した。この装置は8本の指向性の強い断続光光束を任意の方向へ同時に照射することができる。その構成は光源部2個と光ファイバー・集光レンズ部およびモーター・コントローラー部からなる。Figs. 19, 20に外観と内部構造の写真および断面図を示した。外観の大きさは、高さ35 cm、幅30 cm、長さ60 cmで重さは約18 kgである。

光源にはハロゲンランプ(ウシオ JCD 100 V-650 WC、色温度 3,000°K)を用い、その前面に取り付けた遮光回転板(開口部と遮蔽部の面積比率が1:1の円盤)によって断続光を作り、熱線吸収フィルター(HA-30)で750 nm以上の光をカットした後、光ファイバーを通して先端レンズより光束として照射するようにした(Figs. 19, 20)。Fig. 21に、電源電圧100 Vとした時の水深50 cmにおける照射光の分光分布、光源からの光の分光分布、熱線吸収フィルターの分光透過率、8色水中照度計で測定した水槽中の海水50 cmの分光透過率を示した。照射光の分光分布は、620 nm付近が最も高いなだらかな山型となった。これは熱線吸収フィルターと海水による長波長側の減衰が大きいためである。

各部の機能と役割を述べる。遮光回転板の回転速度は、

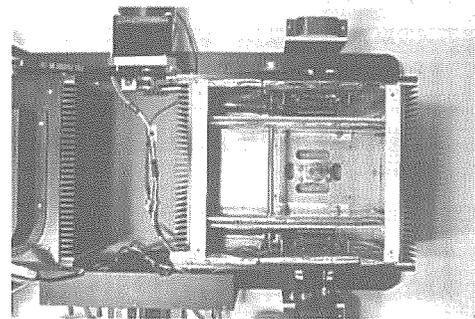
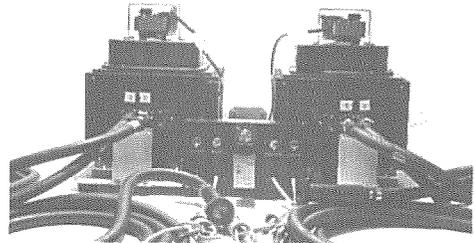


Fig. 19. Photographs of the multiple beam projector.

A: side view

B: inside structure of the light source mounting block viewed from above

レーザバブルモーター(オリエンタル製, 3RJ10RGA-A2)とコントローラー(SS21-L)で調節し(Fig. 20上)、明暗周期0.2~10.0回/秒の光束断続光の照射を可能とした。各光ファイバーは、その受光面と光源ランプのフィラメントとの距離が全て等しくなるよう取り付け(Fig. 20上, 中)、各光束の明るさの均一化を計った。光ファイバーの長さは4 m、直径0.5 mmの芯線(三菱レイヨン製, エスカ SK-20)を束ねて有効内径10 mmとして使用した。透過率は約0.37/4 mであった。光ファイバーの先端にある集光レンズ部は(Fig. 20下)、焦点距離80 mmのレンズとスペーサーおよび防水ケースからなり、直径26 mm広がり角約2度の光束を照射する。

レンズより24 cm離れた光束内で、照度計を用いて測定した最大照度は2,000 lxであった。これより低い

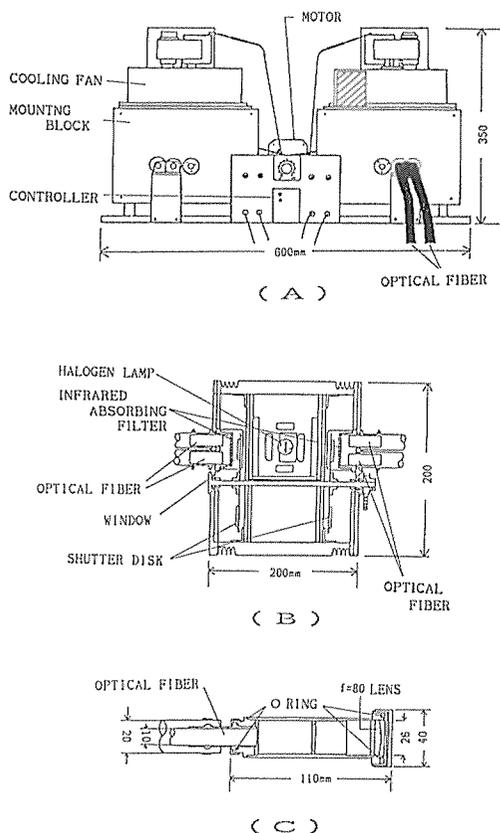


Fig. 20. Diagrams of multiple beam projector.  
 A: side view  
 B: inside structure of the light source mounting block viewed from above  
 C: terminal lens unit

照度の設定は、電源電圧をスライダックで調節することにより行った。

第2節 光の垣網の効果

本実験では、光の垣網が前記実験水槽の水路を直角に横切るよう照射孔を12cmの等間隔で並べ、垂直下方へ向けた。背景照度は0.003lx未満(暗順応)および0.1lx(明順応)の2通りとした。光の垣網の照射照度は暗順応実験では142lx, 16.5lx, 1.9lx, 0.25lx, 0.025lx, 明順応実験では1,235lx, 506lx, 285lxとした。また、全実験とも明暗周期は、前章で明らかになった最も嫌忌的効果の強い1.36回/秒に固定した。照度は、平均的な魚群の遊泳水深である50cm層の値を用い、前章と同

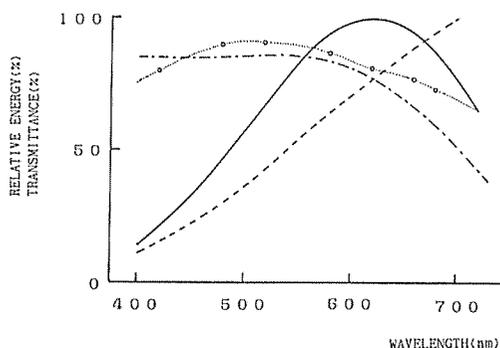


Fig. 21. Calculated spectral distribution of leader net of light at a 50 cm depth (Solid line).  
 Broken line: Spectral distribution of halogen lamp (color temperature, 3,000°)  
 Chain line: Spectral transmittance of infrared absorbing filter  
 Dotted line: Spectral transmittance of water in the tank (50 cm)

様な方法で算出した。なお、光の垣網の照度は、同じ水深における個々の光束内の値である。

魚群の行動解析には、光の垣網(0区の中央線)を通過した回数と0区への出現回数を求めた。また、魚群行動の基準として、光の垣網が照射されていない状態、すなわち背景照明以外の光刺激はない環境における、魚群が0区の中央線を通過した回数と同区への出現回数を用いた。さらに、第2章で述べた方法に準じて、光の垣網の照射されていない場合の0区への出現回数(S)と、光の垣網のある場合の同区への出現回数(D)を用いて相違率(R)を求めた。

$$R = (1 - D/S) \times 100 \quad (\%)$$

Figs. 22, 23には、魚群が光の垣網(0区の中央線)を通過した回数と0区へ出現した回数を示した。図中、縦軸は5分間における通過回数と0区への出現回数であり、横軸は経過時間である。黒棒と黒丸および白棒と白丸は、それぞれ光の垣網が照射されてない時および光の垣網が照射されている時の通過回数と出現回数である。

暗順応状態(Fig. 22)における平均通過回数(回/5分間)は、光の垣網の照度1.9lx以上でゼロ(0)、0.25lxで0.4±0.7、0.025lxで1.0±0であった。

また、出現回数は光の垣網の照度1.9lx以上では著しく少なかったが、0.25lx以下では多少認められた。

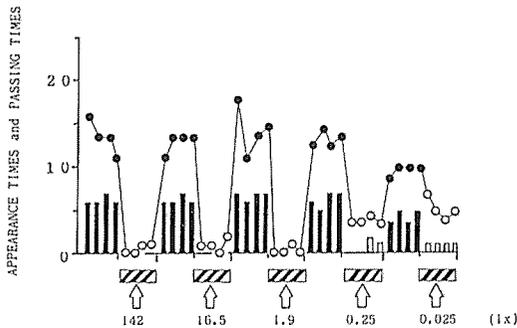


Fig. 22. Appearance times of the fish school in the Section No. 0 and passing times through the projection site (center line in the 0-section), every 5 minutes, when the leader net of light with each grade of irradiance is projected under the state of dark aptation. The open and the closed circle stands for respective numbers of appearance times in the presence (oblique line) and absence of the leader net of light, whereas the white and the black vertical bar indicates respective numbers of passing times.

\* 1.36 c/s blinking frequency is kept constant

\*\* Background irradiance is 0.003 lx

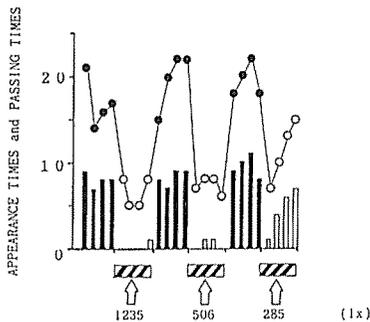


Fig. 23. Appearance times of the fish school in the Section No. 0 and passing times through the projection site (center line in the 0-section), every 5 minutes, when the leader net of light with each grade of irradiance is projected under the state of light adaptation.

The open and the closed circles stand for respective numbers of appearance times in the presence (oblique line) and absence of the leader net of light, whereas the white and the black vertical bars indicate respective numbers of passing times.

\* 1.36 c/s blinking frequency is kept constant

\*\* Background irradiance is 0.1 lx

阻止効果の強弱をあらわす指標としての出現回数の相違率で示すと、光の垣網の照度 142 lx で96%, 16.5 lx で93%, 1.9 lx で99%, 0.25 lx で76%, 0.025 lx で45%となった。

したがって、暗順応状態での光の垣網の阻止効果は、照射照度 0.25 lx 以上で非常に強いと判断された。

一方、明順応状態 (Fig. 23) における平均通過回数 (回/5分間) は、光の垣網の照度 1.235 lx で  $0.3 \pm 0.5$ , 506 lx で  $0.5 \pm 0.6$ , 285 lx で  $4.5 \pm 2.6$  であった。

平均出現回数 (回/5分間) はいずれの場合も多く、そのうち光の垣網の照度が 285 lx で最も多く  $11.3 \pm 3.5$  であった。相違率で示すと、光の垣網の照度が 1.235 lx で62%, 506 lx で63%, 285 lx で42%となった。

したがって、明順応状態で光の垣網の阻止効果は照度 506 lx 以上で強いと判断された。

以上から、光の垣網による魚群の通行阻止効果は、暗順応状態では明暗照度比およそ 83 : 1 以上、明順応状態ではおよそ 5.060 : 1 以上で発現するものと判断された。

#### 第4章 論 議

アマジは断続光に対して嫌忌性をあらわし、嫌忌性の強さは断続光の明暗周期、明暗照度比、波長組成および背景照度によって変わった。最も強い嫌忌性のあらわれる明暗周期は 1.36~0.62回/秒であった。強い嫌忌性のあらわれる明暗照度比は暗順応状態では 60 : 1 以上であり、2 : 1 で消滅した。明順応状態では 5,000 : 1 以上で強く 500 : 1 で消滅した。暗順応から明順応への移行が終了する明るさは 0.01~0.02 lx であった。また、効率のよい波長組成は青色光域であった。

これらの現象は生理的な感知能力の限界とは直接的には関係していない。

以上のように魚群に対し強い嫌忌の効果を持つ断続光は、漁業や養殖業へ幅広く応用することが出来る。その一つとして光の垣網を試作し、その効果を確認した。

海洋現場へ適用するには、海中における光の特性を十分に考慮する必要がある。すなわち、海中では空中に比べて光の減衰が非常に大きく、かつ波長により異なる。さらにこれらの光学的特性は、海域や水塊によって変わる。たとえば、黒潮水と相模湾の沿岸水および東京湾内水を例にとると、これらの海域の海水は、Jerlov's opti-

cal classification を引用して示せば<sup>68)</sup>, それぞれ Oceanic type IB, Coastal type 3, および Coastal type 5 に該当する<sup>69,70)</sup>. そこで, 光の透過距離 10 m あたりの透過率を海域別に示せば, 青色光 (475 nm) ではそれぞれ, 72.0%, 5.5%, 1.4%, 緑色光 (550 nm) では, 49.0%, 15.0%, 5.0%, 橙色光 (600 nm) では 8.6%, 3.7%, 1.8% である。また, 海中の明るさの面からみると, 例えば 20 m 深では海面の 10.0%, 0.29%, 0.02% となる。

海中において物体や灯火等の見える距離は, 海中における光の減衰と直接関係する。したがって光の垣網によって魚群の遊泳方向の制御を行う場合, 海域の光学的特性を考慮する必要がある。

今回試作した光の垣網を相模湾の沿岸海域に入れた場合について, 阻止効果の認められる距離すなわち有効範囲を検討する。有効範囲は光の減衰によるコントラストの低下によってきまる。海中における物体固有のコントラスト ( $C_0$ ) とその物体から  $r$  の距離におけるみかけのコントラスト ( $C_r$ ) は次式で示される。

$$C_0 = (B_0 - B_{b0}) / B_{b0}$$

$B_0$  : 物体の位置で物体からの反射輝度

$B_{b0}$  : 同位置で背景からの反射輝度

$$C_r = (B_r - B_{br}) / B_{br}$$

$B_r$  :  $r$  の距離で物体からの反射輝度

$B_{br}$  : 同距離で背景からの反射輝度

これらの間には次の関係があることが明らかにされている<sup>71)</sup>。

$$C_r(z, \theta, \phi) / C_0(z_1, \theta, \phi) = \exp \{-\alpha(z) r + K(z, \theta, \phi) r \cos \theta\}$$

$\alpha$  : 光束消散係数

$K$  : 下方向照度の消散係数

$r$  : 物体の深さ  $z_1$  と深さ  $z$  の観測位置との距離

$\theta, \phi$  : 視程方向の方位角および天頂角

水平方向の場合には  $\theta = \pi/2$  であるから

$$C_r / C_0 = \exp(-\alpha r)$$

両辺の自然対数を求めると

$$r = |\ln C_0 - \ln C_r| / \alpha$$

この式で  $C_r$  を魚のコントラスト閾値におきかえれば  $r$  は視程となり, 暗順応したマアジの場合  $C_r = 83$  とすれば (第 3 章第 2 節参照) 阻止効果の認められた有効範囲が求まる。すなわち, 海中の背景照度が 0.01 lx 以下の時, 照度 2,000 lx の光の垣網を垂直下方向に照射した場合に, 魚は水平距離 30 m で光の垣網を視認し, 有効範囲は水平距離で 16 m と算出された。光束消散係数は  $0.5 \text{ m}^{-1}$ , 魚の眼のコントラスト閾値は 0.05 とした<sup>59,72)</sup>。

一方, 遊泳中の魚が前方の垂直に張られた糸の列を発見してから, これを避けるため遊泳方向を変えるまでの回避に要する距離 ( $Y \text{ cm}$ ) は, 遊泳していた速度 ( $X \text{ cm/s}$ ) に関係し, イシダイでは  $Y = 4.3X - 91$  であると報告されている<sup>73-76)</sup>。この関係式がマアジに適用できると仮定すると, 魚群が 1 m/s の速度で光の垣網に向かって泳いで来た場合, 回避に要する距離は 3.4 m と算出された。光の垣網の有効範囲がこの距離以上であれば魚群は通過しない。したがって上記の場合には, かなりの速度で接近してきても魚群の通行を阻止できると推察される。

またこの海域 (相模湾沿岸) の水中の明るさは, 水深 20 m で既に海面の  $10^{-3}$  へ減少するので (海面の明るさ 10,000 lx の時この水深では 29 lx と推定される)<sup>52,53,60,77)</sup>, 日中は天空光を光ファイバーにより海中に導き, 光の垣網として利用する可能性も考えられる。

今回の実験は, 光束を垂直下方向に照射する場合のみについて実施したが, 光束の方向を上または横に向けた場合, あるいは網目状にしたり, 光束毎の明暗のタイミングを個々にずらして照射することなどにより, 魚群の遊泳方向の制御効果はさらに高くなる可能性がある。

魚群の遊泳方向を制御するには音や電気を使用する方法もある。船舶航行の多い所, 流れの強い水深のある所, あるいは河川のように流下物が多い所などでは, 従来の柵や網の使用は難しい。そこで, 特定海域への魚群の進入の阻止, あるいは溯下途中のサケ・マス仔魚が用水などへ迷い込むのを阻止するなどの目的で音や電気を応用しようとするものである。

魚が嫌う音質や音圧の音を放声することで, 魚群の遊泳方向の制御を試みた黒木<sup>78)</sup>の結果では, 魚群の阻止率は 60~70% であり, 今回の断続光による阻止効果の方がはるかに強かった。

また、電気刺戟によって魚群の遊泳方向を制御する手法では、無形の刺戟のため感知できる範囲が狭く、魚種や体長に合わせて電場を形成する必要がある<sup>79)</sup>。また、魚が進行するのにもなって遭遇する電位勾配を幾何級数的に増加するよう設定しなければならない<sup>80)</sup>。さらに電気によって麻痺した状態でもそのまま惰性で通過したり、麻痺魚の回収等の問題が残ったままである。これに対し断続光では魚にならぬ損傷を与えない。

物理的障害にならず、流れや水深に規制されることなく、魚群の自然成長をさまたげたり致命的損傷を与えることのない魚群の遊泳方向制御手法の開発がまたれており、断続光は広く応用可能と考える。

最後に、実際の海の中でみられる断続光現象につき検討する。

まず、海面の動揺による水中光の“ゆらぎ”がある。波による水中の明るさの変化を知るために、波浪水槽の底に水中照度計（アレック電子社製 Model-ALM）を設置し、この出力変化を高感度記録計で連続記録して、波の高さと明暗照度比との関係を求めた。結果は、水深 90 cm の位置で波高 2 cm の場合に明暗照度比は 1.13 : 1 であり、波高 6 cm では 1.14 : 1 であり、12 cm で 1.47 : 1、15 cm で 1.30 : 1 であった。これらの比率は、水深が増した場合や濁りが増加するとさらに減少すると考えられた。したがって、波によって起こる水中の明るさの変化は、魚が嫌忌性をあらわす明暗照度比のレベルには達しないと推察された。

次に、沿岸域周辺を走行する車等からの、移動する光の問題がある。車のライトが海面に達することを想定し、約 50 m 離れた位置でその下方向照度を測定すると 0.5 lx 以下であった。この光が海中に入射する場合には、さらに海面反射や海水による散乱・吸収により減衰し、10 m 透過すれば 0.013 lx 以下になると計算された（海水の光学的特性 Coastal type 3）。したがって、魚群に対する嫌忌の効果はほとんど生じないと考えられた。

これらより、実際の海の中では魚類が嫌忌性を示すような断続光は存在しないと判断された。

以上、本研究は、一定周期で明暗が繰り返される断続光が魚群に対し著しい嫌忌的效果をもつことを行動学的に初めて明らかにした。さらに、これを利用して魚群の遊泳方向の制御が可能であることを検証した。

今後は、この成果を発展させることにより、魚群の誘

導や遊泳方向の制御など漁業や養殖業などへの幅広い応用が可能であると考えられる。

## 要 約

従来、光に対する魚類の反応行動については、主に走光性による誘致を目的とした研究がなされ、広く集魚に應用されている。しかし、その際用いられるのはほぼ定常光に限られており、光の断続やちらつき現象のような光環境の急激な変動の有する刺戟効果は、関心をもたれながらも具体的に検討されることはほとんどなかった。

本研究は、断続光が魚群行動におよぼす影響を行動実験の方法で明らかにすることを目的として行われた。まず、断続光の明暗周期、明暗照度比、波長組成の変化にともなう行動の変化、次に魚の光に対する順応状態すなわち暗順応および明順応の時の断続光に対する行動反応の違いを調べた。さらに、これらの結果を魚群の遊泳行動の制御に應用するため多光束照射装置を試作し、従来試みられたことのない照射光束の垣網が魚の行動に及ぼす作用を検討した。

## I 断続光に対するマアジ魚群の反応

1) 方法 実験には、陸上に固定した直径 7 m、深さ 1.5 m の円形水槽を使用した。水槽中央部には放射状に遮光壁を設置し、側壁に沿った幅 1.3 m を環状型の水路とした。水槽中心側の水面上 50 cm に光源と遮光回転体および光学フィルターを組み込んだ投光装置を固定し、斜め上から水路を照らした。水槽上部は円錐型の屋根で覆い、内側 8 箇所背景照明用豆電球を取り付け、水槽内を均一に照明できるようにした。供試魚には走光性の強いマアジ 1 年魚（全長 17~20 cm）を用いた。マアジは可能なかぎり自然に近い状態で使用するため、定置網の網おこしの現場で健全なものを選んで輸送し、24~36時間以内に実験に供した。これは、予備実験として魚を環状型水路に放流した際、水路を一定方向に規則正しく遊泳する期間は採捕後約 2 日間で、それ以後は群としての行動が乱れるのを確認したことによる。本実験においては、連続光と断続光を 20 分間ずつ交互に照射し、魚群の行動軌跡を調べ、魚が照射光を視認できる特定区域（環状型水路を直接照射部位を基点として 16 等分したときの基点の両側 3 区域合計 6 区域）へ出現する回数を

測定した。これより次式で示される相違率 (R) を求めた。 $R = (1 - D/S) \times 100$  (%) ここで、S は連続光照射時の特定区域への出現回数、D は断続光照射時の同区域への出現回数である。

実験は水槽周辺の人為的騒音を避けるため夜間に行い、照射断続光の明暗周期、明暗照度比、照射光の色および背景照度を変えて繰り返した。実験期間は1983~1987年の8~11月であり、その間の実験回数は延べ299回、供試魚の使用総数は3,900尾、水槽水温は20~25°Cであった。

2) 反応行動の基本型 断続光照射時と連続光照射時における特定区域への出現回数は顕著に異なった。すなわち、連続光照射時には特定区域へ遊泳してきた魚群が、断続光照射時には特定区域へ近づかなくなった。このことから断続光が魚群行動に著しい嫌忌的效果を及ぼすと判断された。

3) 明暗周期 断続光照射時における特定区域への出現回数は明暗周期を変えることによって変わった。出現回数が最も少なくなる明暗周期は0.62~1.36回/秒であり、この時の相違率は92~98%であった。周期がこれ以上長くても短くても出現回数は増加した。嫌忌的效果は明暗周期0.62~1.36回/秒で最も強いといえる。この周期は網膜電図 (ERG) の平坦化を指標として得られた臨界融合頻度の1/37~1/17であった。

4) 明暗照度比 断続光の明暗照度比を小さくすると、特定区域への出現回数は増加した。背景照度0.01 lx未満において明暗照度比が60:1以上では相違率が75%以上であり明暗照度比が2:1では2%であった。したがって、嫌忌的效果は明暗照度比が60:1以上では顕著にあらわれるが2:1では無視し得ることがわかった。魚類の明暗弁別閾値は0.02~0.2とされており、嫌忌的效果は少なくとも明暗弁別閾値の約300倍以上でみられ、約10倍で消滅した。

5) 照射光の色 照射断続光の波長により特定区域への出現回数は変わった。全光 (白色光) に加えて色フィルターを通して得られる青色光および赤色光の断続照射を行い、相違率を求めた。青色光照射時の相違率は、エネルギー量が約6倍の全光とほぼ同等であり、かつ2.5倍の赤色光の場合の2倍となった。魚眼への刺戟量を、到達した分光エネルギー量と眼の分光感度との積の積分値としてあらわすと、上記の結果と良い相関がみられた。

6) 背景照度 背景照度が変わると魚の眼の明・暗順応状態が変わり、特定区域への出現回数も変わった。相違率は、背景照度0.01 lx未満で94%以上、0.01~0.02 lxで56~28%、0.2 lxで2%であった。すなわち、嫌忌的效果は、背景照度0.01 lx未満で非常に強く、背景照度0.01~0.02 lxで減少しはじめ、0.2 lxでは事実上消滅した。マアジの眼の網膜運動現象は0.01 lx以下で始まり暗順応から明順応へ移行することが知られており、0.01~0.02 lxでの嫌忌的效果の減少は暗順応から明順応への移行によるものと考えられた。

暗順応状態および明順応状態に分けて嫌忌的效果を比較すると、明暗照度比が暗順応状態では60:1以上、明順応状態では5,000:1で強い効果がみられ、明暗照度比が暗順応状態では2:1、明順応状態では500:1で効果が消滅した。すなわち、断続光の嫌忌的效果が発現する明暗照度比は、暗順応と明順応では約 $10^2$ 倍異なった。網膜の感度は暗順応から明順応へ移行すると $10^{-2}$ ~ $10^{-5}$ に低下するといわれており、この生理学的方法による結果は、本論文の行動学的方法による結果とかなり良く対応した。

以上のとおり光環境の短時間における変化の影響は、集魚効果 (蜉集行動) とは全く逆の嫌忌的效果 (回避行動) としてあらわれた。しかも、その効果は断続光の明暗周期や明暗照度比および照射光の色のみならず眼の順応状態によって大きく変わることがわかった。また、これらの反応は生理学的な面から求められた光に対する感知限界、すなわち臨界融合頻度や明暗弁別閾値とは異なる範囲で生じた。

さらに、魚類の対光行動を観察する際に注目される点として、光に対する馴れの問題がある。そこで断続光による嫌忌的效果に対する馴れの影響を調べたところ、断続光を4時間連続照射しても出現回数にほとんど変化がみられなかった。すなわち、この実験範囲では馴れの現象はみられなかった。これに対し、集魚灯によるマアジやサバおよびイワシ魚群の誘導効果は2~3時間で減少することが知られている。したがって、断続光による嫌忌的效果は連続光による誘導効果よりはるかに馴れの現象がおきにくいと判断された。

また、光が魚群行動に及ぼす一般的影響として行動の活発化および鈍化の問題がある。これに関し移動速度を

求めた結果、連続光照射時には平均約 20 cm/s であったが、断続光を照射すると行動が鈍化し平均約 14 cm/s に低下した。すなわち、約30%の行動鈍化があった。このことは、感覚が鈍くなるためだけでなく心理的に警戒心が強まって表面的な行動はゆるやかになると考えられた。

## II 光の垣網による魚群の行動制御

上記の結果を魚群の行動制御に応用するため多光束照射装置を試作した。

(1) 多光束照射装置 光源からの光を遮光回転板により断続光とし、熱線吸収フィルターで 750 nm 以上の光をカットした後、光ファイバーを通して先端レンズより光束として照射するようにした。光束の直径は 26 mm、広がり角は約 2 度、最大照射照度は約 2,000 lx であり、明暗周期および照射照度を自由に変換し得る。光ファイバー 8 本を 12 cm 間隔で並べ、多光束照射を行った。この多光束照射を環状型水路に直角かつ垂直に当て、すなわち光の垣網を作った場合の魚群の行動を観察した。明暗周期は 1.36 回/秒とし、光束の照度は 1,235 ~ 0.025 lx の間で 8 段階、背景照度は 0.003 lx と 0.1 lx に変えて実験を繰り返した。

(2) 光の垣網の効果 暗順応状態（背景照度 0.003 lx）では光束の照度 0.25 lx 以上、明順応状態（背景照度 0.1 lx）では 506 lx 以上で顕著な効果が得られた。すなわち、光の垣網による魚群の通行阻止効果は、暗順応状態では明暗照度比 83 : 1 以上、明順応状態では 5,060 : 1 以上で発現した。

これを海洋現場へ応用した場合の考察として、相模湾沿岸水域で、光の垣網が魚群の通過を阻止し得る有効範囲を概算した。海中の明るさが 0.01 lx 以下の時、光束の照度 2,000 lx の光の垣網を垂直下方向に照射した場合、魚の眼の明暗弁別閾値を 0.05、海水の光束消散係数を  $0.5 \text{ m}^{-1}$  とすると、魚は水平距離 30 m で光の垣網を視認し、有効範囲は水平距離約 16 m であった。また、嫌忌的效果が発現してから回避するまでの距離は遊泳速度に関係することが報告されており、これがマアジに適用できると仮定すると、1 m/s の速度で垣網に向かってきた魚が回避に要する距離は 3.4 m と算出された。光の垣網の有効範囲が回避距離以上であれば魚群は通過しない。

この海域の水中の明るさは、水深 20 m で既に海面の  $10^{-3}$  へ減少すると報告されているので、日中は天空光を光ファイバーにより海中に導き、光の垣網として利用する可能性も考えられる。さらに、光束の方向とか位相を変えることにより行動制御効果はいっそう高くなる可能性がある。

以上、本研究によって断続光に対するマアジの行動反応が初めて明らかにされた。今後は、この成果を発展させることにより、魚群の誘導、遊泳方向の制御など漁業や養殖業などへの幅広い応用が可能であると考えられる。

## 謝 辞

本論文を取り纏めるに当たり、終始御懇切なる御指導と御校閲を賜った東京大学農学部教授羽生 功博士には心から感謝申し上げます。

本研究に関し、終始御懇切なる御教示と御校閲を賜った下関水産大学校長青山恒雄博士に衷心より感謝の意を表す。

そして、この研究の端緒を与えられ、終始変わらぬ御討議と御鞭撻を賜った東京水産大学教授松生 治博士に謹んで深謝の意を表す。

さらに、実験に御助力をいただいた東京水産大学坂田実験実習場小池康之講師はじめ職員の方々に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) WOLF, E. and G. ZERRAHN-WOLF. Threshold intensity of illumination and flicker frequency for the eye of the sun-fish, *J. Gen. Physiol.*, **19**: 495-502 (1936).
- 2) KOBAYASHI, H. A comparative study on electroretinogram in fish, with special reference to ecological aspects, *J. Shimonoseki Coll. Fish.*, **11**: 17-148 (1962).
- 3) 田村 保. 魚の眼の機能の研究, 日水誌, **29**: 75-88 (1963).
- 4) HANYU, I. and M. A. ALI. Electroretinogram and its flicker fusion frequency of different temperature in light-adapted salmon (*Salmo salar*), *J. Cellular and Comparative Physiology*, **63**: 309-320 (1964).

- 5) TAMURA, T. and I. HANYU. The flicker electroretinogram of the carp eye, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **25**: 10-12 (1959).
- 6) SGONINA, K. Das Helligkeitsunterscheidungsvermögen der Elritze, *Zeit. Vergl. Physiol.*, **18**: 516-523 (1933).
- 7) 小林 博. 水産動物における光感覚と明度の関係, 日水誌, **38**: 913-920 (1972).
- 8) MCCLEARY, R. A. and J. J. BERNSTEIN. A unique method for control brightness cues in study of color vision in fish, *Physiol. Zool.*, **22**: 284-292 (1959).
- 9) TAMURA, T. and H. NIWA. Spectral sensitivity and color vision of fish as indicated by S-potential, *Comp. Biochem. Physiol.*, **22**: 745-754 (1967).
- 10) TAMURA, T., I. HANYU, and H. NIWA. Spectral sensitivity and color vision in skipjack tuna and related species, *Nippon Suisan Gakkaish*, **38**: 799-802 (1972).
- 11) HANYU, I., T. TAMURA, and H. NIWA. Electrorretinograms and retinal ganglion cell responses in the skipjack tuna, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **37**: 265-273 (1973).
- 12) KOBAYASHI, H. and M. A. ALI. Electrorretinographic determination of spectral sensitivity in albino and pigmented brook trout (*Salvelinus fontinalis*, Mitchill), *Canadian J. Phy. Pharma.*, **49**: 1030-1037 (1971).
- 13) DENTON, E. J. and T. I. SHOW. The visual pigments of some deep-sea elasmobranchs, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **43**: 65-70 (1963).
- 14) YAMANOUCHI, T. The visual acuity of the coral fish *Microcanthus strigatus* (CUVIER & VALENCIENNES), *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.*, **V**: 133-156 (1956).
- 15) BLAXTER, J. H. S. and B. B. PARRISH. The importance of light in shoaling, avoidance of nets and vertical migration by herring, *J. du Conseil*, **30**: 40-57 (1965).
- 16) BLAXTER, J. H. S. and M. P. JONES. The development of the retina and retinomotor responses in the herring, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **47**: 677-697 (1967).
- 17) BLAXTER, J. H. S. and M. STAINES. Pure-cone retinae and retinomotor responses in larval teleosts, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **50**: 449-460 (1970).
- 18) BLAXTER, J. H. S. and J. R. HUNTER. in "Advances in Marine Biology" ed. by BLAXTER, RUSSELL and YONGE, Academic Press, London, p. 131-223 (1982).
- 19) TAMURA, T. A study of visual perception in fish, especially on resolving power and accommodation, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **22**: 536-557 (1957).
- 20) 田村 保. 魚類網膜の明暗順応の状態と照度との関係, 日水誌, **22**: 742-746 (1957).
- 21) 田村 保. 魚類生理学概論, 恒星社厚生閣, p. 233 (1977).
- 22) HAMASAKI, D. I. and C. D. BRIDGES. Properties of the electroretinogram in three elasmobranch species, *Vision Res.*, **5**: 483-496 (1965).
- 23) HANYU, I. and M. A. ALI. Flicker fusion frequency of electroretinogram in light-adapted goldfish at various temperature, *Science*, **140**: 662-663 (1963).
- 24) ALI, M. A. and H. KOBAYASHI. Temperature: Influence on the electroretinogram flicker fusion frequency of the sunfish (*Lepomis gibbosus* L.), *Rev. Can. Biol.*, **26**: 341-345 (1967).
- 25) KOBAYASHI, H. Note on retino-motor phenomena in some fishes under the various light conditions, *J. Shimonoseki Coll. Fish.*, **7**: 169-177 (1957).
- 26) 井上 実. 漁具と魚の行動, 恒星社厚生閣, 東京, p. 173-186 (1985).
- 27) 黒木敏郎, 中馬三千雄. 灯に集まる魚群の立体的記録例について, 鹿大水紀要, **6**: 77-81 (1958).
- 28) 川村軍蔵. ゴマサバの視覚とその釣漁法への応用に関する基礎的研究—III 網膜運動反応, 日水誌, **45**: 553-555 (1979).
- 29) 川村軍蔵. ゴマサバの視覚とその釣漁法への応用に関する基礎的研究—IV 釣獲時の網膜の順応状態, 日水誌, **45**: 667-671 (1979).
- 30) 川村軍蔵. ゴマサバの視覚とその釣漁法への応用に関する基礎的研究—V 集魚灯の強さの吟味, 日水誌, **45**: 1237-1240 (1979).
- 31) 川村軍蔵. ゴマサバの視覚とその釣漁法への応用に関する基礎的研究—VI 釣獲時系列より推測される集魚灯下の魚群運動, 日水誌, **45**: 1241-1247 (1979).
- 32) 川村軍蔵. ゴマサバの視覚とその釣漁法への応用に関する基礎的研究—VII 集魚灯下の魚群運動の魚探機による観察, 日水誌, **45**: 1355-1358 (1979).
- 33) 川村軍蔵, 清原貞夫, 米盛 亨. 集魚灯下における漁獲対象群の交替, 日水誌, **48**: 1397-1400 (1982).
- 34) 羽生 功. 魚類の対光行動とその生理, 日水誌, **38**: 919-920 (1970).
- 35) 羽生 功. 光刺戟と海洋動物の行動, 海洋科学, **4**: 60-65 (1972).

- 36) 今村 豊. 漁業における火光の集魚効果とその操法の研究(II), うみ, 6: 32-43 (1968).
- 37) ALI, M. A. The ocular structure, retinomotor and potobehavioral responses of juvenile pacific salmon, *Canadian J. Zool.*, 37: 965-996 (1959).
- 38) JOHN, K. R. Illumination, vision, and schooling of *Astyanax mexicanus* (Fillipi), *J. Fish. Res. Bd. Canada.*, 21: 1463-1457 (1964).
- 39) HUNTER, J. R. Effects of light on schooling and feeding of jack mackerel, *Trachurus symmetricus*, *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 25: 393-407 (1968).
- 40) 黒木敏郎, 中馬三雄. 漁業用嫌忌光の研究—I 振回し光束について, 日水誌, 18: 26-29 (1953).
- 41) 高橋 正. 移動光膜の魚類行動に及ぼす影響について, 日水誌, 44: 869-874 (1978).
- 42) MUZINIC, R. Observation on the reaction of the sardine to intermittent white light, *FAO Fish. Rep.*, 62: 861-872 (1967).
- 43) 小池 隆. 断続光に対する魚類の反応, 日水誌, 51: 1097-1102 (1985).
- 44) KOIKE, T. and K. MATSUIKE. Response of a fish school to different blinking frequencies and intensity ratios of intermittent light, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53: 925-932 (1987).
- 45) KOIKE, T. and K. MATSUIKE. Response of a fish school to different wavelengths of intermittent lights and different background irradiances under projected light, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 54: 829-835 (1988).
- 46) BREDER, C. M. Studies on social grouping in fishes, *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.*, 117: 393-482 (1959).
- 47) NORTHMORE, D., F. C. VOLKMAN, and D. YAGER. in "The Behavior of Fish and Other Aquatic Animals" ed. by D. I. MOSTOFKY, Accademic Press, New York, p. 79-136 (1978).
- 48) AOKI, I., T. INAGAKI, and LE VAN LONG. Measurement of the three-dimensional structure of free-swimming pelagic fish schools in a natural environment, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 52: 2069-2077 (1986).
- 49) 川田三郎, 田原陽三, 吉牟田長生. 魚群探知機の記録から魚群の遊泳速度を測定する一つの試み(予報), 日水誌, 24: 1-4 (1958).
- 50) 小池 篤. 定置網に対する魚群の行動, 日水誌, 37: 242-248 (1971).
- 51) 井上喜洋. 定置網周辺における魚群の規模と移動状況, 日水誌, 53: 1307-1312 (1982).
- 52) HARA, I. Swimming speed of sardine school on the base of aerial survey, 53: 223-227 (1987).
- 53) 梶原 武. 若年マアジの生態学的研究—1, 長崎大水産研究報, 5: 13-22 (1957).
- 54) 三谷文夫, 井田悦子. マアジの成長と年齢, 日水誌, 30: 968-977 (1964).
- 55) 牟田邦甫, 小川信次, 浜崎清一. マアジの飼育による標識実験とその成長, 西水研研報, 36: 85-101 (1968).
- 56) SUDA, Y., M. SHIMIZU, and Y. NOSE. Confirmation of spawning groups of Japanese jack mackerel *Trachurus japonicus* in the low stock level period, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53: 1789-1796 (1987).
- 57) 角田蒼見. 工業色彩物理学. 精興社, p. 85-87 (1967).
- 58) VERHEJEN, F. V. The mechanism of the trapping effect of artificial light sources upon animals, *Netherland J. Zool.*, 13: 1-107 (1959).
- 59) ANTHONY, P. D. Visual contrast thresholds in the cod *Gadus morhua L.*, *J. Fish Biol.*, 19: 87-103 (1981).
- 60) PRIENDORFER, R. W. Extract reflectance under a cardioidal luminance distribution, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 83: 540 (1957).
- 61) MATSUIKE, K. A study on optical nature in oceanic water, *La mer*, 11: 1-44 (1973).
- 62) 松生 洽. 海洋環境測定, 黒木敏郎編, 恒星社厚生閣, 東京, p. 31-70 (1982).
- 63) 田村 保. 魚類生理, 川本信之編 恒星社厚生閣, p. 451-479 (1970).
- 64) PROTASOV, V. R. Vision and Near Orientation of Fish, Translated from Russian, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, p. 54-70 (1970).
- 65) MUNTZ, W. R. A. and D. P. M. NORTHMORE. The independence of the photopic receptor systems underlying visual thresholds in a teleost, *Vision Res.*, 11: 861-876 (1971).
- 66) 井上 実. 8 そう張網操業中に観察される集魚灯による魚群の誘引, 日水誌, 29: 925-927 (1963).
- 67) 大渡 敦, 古野清孝, 古野清賢. 魚群探知機によるイワシ群の生態, 日水誌, 18: 669-674 (1953).
- 68) JERLOV, N. G. Optical classification of ocean water. in "Physical Aspects of Light in the Sea" Univ. Hawaii Press, Honolulu, Hawaii, p. 45-49 (1964).
- 69) MATSUIKE, K. and T. MORINAGA. Beam attenuation and particle-size distribution in the Kuroshio area, *La mer*, 15: 82-93 (1977).
- 70) MATSUIKE, K., T. MORINAGA, and T. HIRAOKA. Turbidity distributions in Tokyo Bay and movement of

- the turbid water, *J. Tokyo Univ. of Fisheries*, **73**: 97-114 (1986).
- 71) DUNTLEY, S. Q. Underwater visibility, in "The Sea", ed. by M. N. HILL, John Wiley & Sons, New York, p. 452-455 (1962).
- 72) HESTER, F. J. Visual contrast thresholds of the goldfish (*Carrasius auratus*), *Vision Res.*, **8**: 1315-1335 (1968).
- 73) 森永 勤, 松生 治, 小野昭喜. 濁った水中における写真撮影範囲と色の移動, 東京水産大研報, **72**: 71-83 (1985).
- 74) MATSUIKE, K., Y. SHIMAZU, and Y. NAKAMURA. Relationship between turbidity of water and visual acuity of fish (1), *La mer*, **19**: 159-164 (1981).
- 75) 中村善彦, 松生 治. 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および距離, うみ, **23**: 123-129 (1985).
- 76) 中村善彦, 松生 治. 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糸群に対する行動, 日本水産学会昭和62年度秋季大会講演要旨集, p. 8 (1987).
- 77) MATSUIKE, K., Y. NAKAMURA, and M. HAGA. Aerial and submarine spectral solar energy distributions and optical characteristics of the waters in the Bering Sea during the summer, *La mer*, **17**: 1-10 (1979).
- 78) 黒木敏郎. 音響による魚群の大規模駆集効果の研究報告書, 1-189 (1979).
- 79) 前畑英彦, 釜田 浩, 大工博之, 大谷誠二, 田畑重行, 伊勢田弘志. 電気スクリーン方式による海域遮断技術の開発, 日本水産学会昭和62年度春季大会講演要旨集, p. 126 (1987).
- 80) 三善清旭. 電気スクリーン, "農電普及叢書第5集・水産と電気" 大島泰雄・宮崎千博, 監修, 電力中央研究所 発行, p. 43-55 (1966).