動きのある物標による視覚刺激がマダイの摂餌行動に与える誘発効果

丘 明 城,¹ 石 崎 宗 周,^{2*} 金 碩 鍾,¹ 不 破 茂²

(2012 年 2 月 10 日受付, 2012 年 12 月 14 日受理)

¹济州大学校海洋科学大学, ²鹿児島大学水産学部Inducing effect of visual stimulus for moving targets in red sea bream *Pagrus major*MYUNG SUNG KOO,¹ MUNETSIKA ISHIZAKI,^{2*} SUK JONG KIM¹ AND SHIGERU FUWA²¹College of Ocean Science, Jeju National University, Jeju, Jeju-do 690-756, Korea, ²Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan

The effects on feeding behavior of red sea bream were observed and evaluated by the method of Fernö when three kinds of target (weight, lure, rectangular piece of squid bait) were stopped and moved. Though the inducing effects could be observed both in the static and in the moving targets, the effects of the moving targets were more significantly effective than those of the static ones. The significant differences of the inducing effects between the three kinds of targets, which were moving at 8 seconds cycles, and the static ones were clear, and the differences of the inducing effects between moving targets and static ones were not significantly different between the three targets. Additionally, the effect of coloring was suggested in inducing of the feeding behavior.

キーワード：スルメイカ、制御、摂餌行動、マダイ

韓国济州道は火山活動を起源としており、その周囲の沿岸海域には天然魚礁が多く分布している。また、沿岸には水産資源の増大を目的とした人工魚礁が広く設置されている。ここではマダイ *Pagrus major* を含む多くの魚類資源が生息しているがその資源利用に当っては、海底地形の関係で延縄漁法が多く使われている。この地域の漁業者は、遊泳能力のあるスルメイカ *Todarodes pacificus* (以下、イカ) を餌とした場合ではマダイの漁獲ができるが、遊泳能力がないイカでは漁獲ができないとしている。そのため、マダイを対象とした延縄漁業では遊泳能力があるイカを餌として使っており、このことからイカの動きがマダイの摂餌行動を誘発すると考えられる。一方で、この海域ではマダイが分布している時期よりイカの漁期が短いため、マダイの漁期は活イカを餌として利用可能な漁期に制限されているという問題がある。

一般に釣漁具を使用する際には、シャクリと称する釣針の上下方向への不規則な運動を与えることで漁獲効率を高めている。一方で、延縄漁具の場合、釣針を直接動かすことは出来ないため、餌として取り付けられている活イカの運動がこのシャクリに相当し、マダイを誘引し

ているものと考えられる。著者らは、マダイの漁期が餌としてのイカの供給に左右されずに継続可能となるための知見を得るため、人工物標に活イカの動きに近い最適な周期運動を再現することでマダイに摂餌行動を誘発する視覚刺激を与えることが可能かを検証した。すなわち、マダイの摂餌行動の誘発に最適な物標とその運動周期を明らかにし、これを再現する漁業機械を開発することができれば、マダイの漁期が活イカの供給可能な時期に制限される問題を解決することができるものと考えた。

魚類の摂餌行動を誘発する餌の運動周期に関する研究例として、往復運動する餌の動きが 1.5 cm/s 以上の場合、スズキ *Lateolabrax japonicus* に摂餌行動を誘発することが可能であると示されている。¹⁾

マダイについてはこの種の知見が見当たらない。そこで本研究では、はじめに物標の動きがマダイの摂餌行動を誘発可能であるかの検討を行い、マダイを擬餌で釣る際の最適な物標の運動周期を求めた (以下、物標の運動周期に対する反応)。また、人工的な物標の形状の異なりがマダイの摂餌行動の誘発に及ぼす影響について明らかにし (以下、物標の形状変化に対する反応)、マダイ延縄漁業において餌に用いられている活イカに代わる最

* Tel : 81-99-286-4232. Fax : 81-99-286-4015. Email : ishizaki@fish.kagoshima-u.ac.jp

適な人工物標の形状に関する知見を得ることとした。

マダイの物標に対する摂餌行動の評価に Fernö ら²⁾による対餌行動の評価法を参考とした。

材料と方法

実験水槽 実験は2011年10月11日から10月14日まで、鹿児島大学水産学部海洋資源環境教育研究センター東町ステーションの屋外水槽施設で実施した。直射日光を遮られる内壁が白色のFRP水槽（縦400 cm，横145 cm，高さ100 cm および水深90 cm）を用いた。実験期間における水槽内の水温は23.5℃から24.9℃であった。水槽内に、ポリ塩化ビニルパイプ（以下，塩ビパイプ）のフレームに網地を固定した移動式の仕切りを取り付け，マダイの行動を記録する区画（以下，記録区画）と馴致時および記録時以外に待機させるための区画（以下，馴致区画）に二分した。

記録および馴致区画の縦はそれぞれ，300 cm および100 cm，高さはそれぞれ水槽の高さと同じ100 cmとした。記録区画の中央上部にナイロンテグスを通した塩ビパイプを取り付け，一端は水槽内の物標に，他端はモーター（SS40E20-L1-50，澤村電気：Fig. 1a）に取り付けたリールに接続し，物標をモーター制御により任意の

周期や振幅で上下の往復運動（以下，上下運動）ができるようにした。なお，モーターはドライバー（MS-100，澤村電気：Fig. 1b）とD/A変換機（CSI-340212，インターフェース）を接続したPC（Fig. 1c）によりプログラム制御される。モーター駆動により生じる物標の鉛直方向の運動振幅は，水槽の深さを考慮して10 cmに固定した。行動観察は，一般にマダイが摂餌行動を行う^{3,4)}とされる日出から正午の間に行った。記録は水槽上部に固定したビデオカメラ（DCR-PC120，SONY）で行い，記録中は供試魚の行動に影響を与えないよう，水槽から十分に離れた場所から市販のテレビモニター（Fig. 1d）でマダイの行動を観察した。また，水槽内の海水は記録時にはマダイの行動に影響がないように止水した。

供試魚 鹿児島県出水郡長島町の水産種苗センターから養殖マダイを実験前日の夕刻16時頃に入手し，実験水槽の記録区画に約14時間収容することで実験環境に馴致させた。物標の運動周期を変化させる実験では，1日目に3個体を翌日に1個体計4個体（42.9 cm BL，1340 g BW）を供した。物標の形状を変化させる実験では1日当たり3個体，2日間で計6個体（43.0 cm BL，1195 g BW）の行動を記録した。これらは，済州

Fig. 1 Schematic drawing of the experimental equipment used for the water tank tests. The experimental section was divided into a recording area and a domestication area. The bait was controlled by a motor control system (a, b and c). The movements of red sea bream in the water tank were recorded by a video camera which was set on the top of the water tank. (a) motor, (b) motor driver, (c) personal computer with D/A interface, (d) monitor.

道において漁獲対象となっているマダイと概ね同じ大きさである。

物標の運動周期に対する反応 水槽中央部に垂下する物標には、摂餌行動の誘発効果が高いとされる黄色⁵⁾に着色した直径 2.7 cm の鉛玉（以下、錘）を用いた。予備観察では、錘の上下運動の周期が 14 秒程度まで長くなると反応が悪くなったので、これより 2 秒長い 16 秒を最大周期とし、設定可能な最小周期との範囲内の 2, 4, 6, 8, 10, 12 および 16 秒を上下運動の設定周期とした。

実験の手順を Fig. 2a に示した。実験水槽に収容したマダイのうち記録対象のマダイ 1 個体のみを記録区画へ、他の個体は馴致区画に移動し、記録区画へ収容後、

さらに 30 分の馴致時間を設け、物標運動に対する行動記録を開始した。前述の 2～16 秒の設定周期からランダムに運動周期を選択して、物標を水中に垂下する前のブランク状態（ET）、水中で停止した状態（ST）および物標を設定周期で上下運動させた動餌状態（MT）の 3 状態の順にそれぞれ 5 分間ずつ記録した。記録終了後に供試魚を交換し、5 分の馴致時間を設けた後、同様に記録を継続した。そして、4 個体に対して 7 設定周期での記録を行った。

物標の形状変化に対する反応 物標の運動周期に対する反応実験で用いた球形の錘の他、形状と材質が異なる長さ 8 cm、幅 1 cm および直径 1 cm の市販のイカ型疑似餌（以下、疑似餌）およびイカの外套を疑似餌の大き

Fig. 2 Flowchart showing the processes of the water tank experiment.

さに合わせた長さ 8 cm, 幅 1 cm および厚さ 0.5 cm の短冊状餌 (以下, イカ餌) の計 3 種の物標を用いた。疑似餌とイカ餌は水中重量が小さく, 水中での上下運動時にモーター駆動による上下運動に追従しなかったため, 5 g の噛み潰し鉛を物標とテグスの接続部に付加した。なお, ここで設定した物標の運動周期は 8 秒とした。これは球形の錘を用いた実験でマダイの摂餌行動誘発効果が有意に ($p < 0.05$) 高かった周期である。

記録対象のマダイ以外は, 物標の運動周期に対する反応の実験と同じ方法で馴致区画に移動させた。実験手順を Fig. 2b に示した。記録はブランク (ET), 静止 (ST) および上下運動 (MT) の順に 5 分間ずつ行った。3 状態の記録終了後に物標を交換し, 3 種類の物標すべての記録を行ってから供試魚を交換し, 同様に記録を行った。物標は錘, 疑似餌の順に用い, 匂いによる誘発効果が期待されるイカ餌を最後に用いた。

摂餌行動の評価 Fernö ら²⁾はマダラが釣針で釣られるまでの行動を 10 要素に分類してそれぞれに点数を与え (Table 1), 魚の一連の摂餌行動について評価点 (以下, TS) を点数の合計として求めることにより, 餌の付いている釣針への反応強度を評価している。李ら⁶⁾は釣獲過程中的のスケトウダラの行動を, 秋山ら⁷⁾はブリ, カンパチなど 4 魚種の行動をこれに従って評価している。

本研究におけるマダイの摂餌行動の数値化は Fernö

らに従ったが, 10 要素中 Approach (以下, APP), Taste (以下, TST) および Incomplete bite (以下, ICB) の 3 要素をマダイの摂餌行動の分類に用い, それぞれの評価点を Table 1 に示すように配点した。また, 物標から水槽壁面までの最短距離がマダイの体長の約 1.8 倍であったので, 物標から 1 BL を半径とする円 (以下, 1 BL 円) の内側にマダイが進入した場合を APP とした。さらに, 1 BL 円内での遊泳において, その最接近距離が 0.5 BL 以上 1 BL 以下の場合を APP₁, 0.5 BL 以下の場合を APP₂ とし, APP₁ より高い 1.5 点とした。ここで, APP₂ には吻端以外で物標に触れた場合や物標の下を通る場合を含む。錘を用いた場合は, 口内に含むことが不可能であり, ICB を示すことがあり得ないので, マダイが吻端で錘に接触した場合には, TST と ICB それぞれの評価点の中間点である 2.5 点とした。

APP₁ の評価に必要なマダイの運動軌跡は, 吻端の水平面への射影座標 (x_{h_i}, y_{h_i}) を 1 秒間隔で測読して求めた。また, APP₂, TST および ICB についてはその間の 0.5 秒間隔の補助座標も測読した。ここで, PC で測読された吻端と物標の水平面射影座標をそれぞれ $P_i(x_{p_i}, y_{p_i})$ と $O(x_o, y_o)$ とし, 実際のマダイの吻端位置と物標との水平距離 D_i を次式で求めた。

$$\begin{pmatrix} x_{h_i} \\ y_{h_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_{p_i} - x_o) C_x \\ (y_{p_i} - y_o) C_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

Table 1 Numerical values assigned to behaviors

Behavior patterns in this study	Description	Value
Approach 1 (APP ₁)	Swimming towards the bait. The approach area ranges from more than 0.5 BL to 1 BL or less from the target.	1
Approach 2 (APP ₂)	Swimming towards the bait. The approach area is less than 0.5 BL from the target. The bait is touched by the body.	1.5
Taste (TST)	Touching the bait with the lips.	2
Incomplete bite (ICB)	Sucking the bait into the mouth. But the whole bait is never within the closed mouth.	3
Behavior pattern by Fernö	Description	Value
Approach	Swimming towards the bait while looking at it and turning before touching the bait.	1
Taste	Touching the bait with the trailing barbel or lips. If tasting was followed by bite or incomplete bite, it had to last at least two seconds in order to be recorded.	2
Incomplete bite	Differs from bite in that the whole bait is never within the closed mouth, either because the fish takes only a part of the bait in the mouth or because the mouth is not completely closed.	3
Bite	Sucking the bait into the mouth.	4
Jerk	A rapid movement of the head with the bait in the mouth, typically directed to the side.	5
Pull	Swimming around with stretched snood with the bait in the mouth.	5
Chew	Manipulating the bait in the mouth with chewing movements.	5
Shake	Several rapid lateral movements with the head and body while the bait is in the mouth. Cod show this behavior pattern when separating the softer part of a mussel from the shell.	5
Rush	Swimming rapidly forward with the bait in the mouth.	6
Hooking	The hook is retained in the mouth for at least 20 s while the fish fights violently.	7

$$D_i = \sqrt{x_{hi}^2 - y_{hi}^2} \quad (2)$$

ただし, C_x と C_y はそれぞれ PC 画面での水平方向および鉛直方向 1 ピクセルに相当する水槽内の距離である。

統計処理 評価点の平均値の差の検定は, はじめに母集団の等分散性を F 検定 ($p < 0.05$) または Bartlett の検定 ($p < 0.05$) で確認した。ここで, 等分散性が確認できた場合, t 検定 ($p < 0.05$) または分散分析 ($p < 0.05$) を行った。等分散性が確認できなかった場合は, Welch の検定 ($p < 0.05$) を行った。

水中照度と物標への学習 実験時の物標直下の水中照度は, 水中照度計 (UA-002, Onset) を用いて計測した。実験開始から終了までの水中照度は, 535 lx から 3272 lx の範囲であった。

物標が水槽に垂下されていないブランク状態 (ET) での供試魚 30 秒当たりの 1 BL 円内の滞在時間とこの範囲に進出した回数 (以下, 接近回数) を求めた。いずれの供試魚においても分散分析 ($p < 0.05$) によりブラ

ンク状態での平均滞在時間と平均接近回数に有意差がないことを確認した。このことから, 物標の位置の学習や照度変化の影響はないものと判断した。

結 果

行動の特徴 実験で得られたマダイの 20 秒間の運動軌跡の代表例を, Fig. 3 に示した。ここで運動軌跡は特徴を示す部分を黒色の実線で示し, その前後の補助的な部分を点線で示した。また, 遊泳軌跡の開始座標には Start を終了座標には End を示した。物標位置から 1 BL 円を実線のコ円で, 0.5 BL 円を点線のコ円で示した。

ビデオ映像にはマダイが物標に向かわずに遊泳する行動 (自由遊泳: FSW) も記録された (Fig. 3a, b)。Fig. 3c は APP₁ の例であり, マダイは物標から離れた位置から物標に向かったが 0.5 BL 円に入らなかった場合である。Fig. 3d は APP₂ の例であり, 遊泳を続けて 0.5 BL 円に入った場合である。Fig. 3e は TST に分類された例で, マダイは 0.5 BL 円に進出し物標に吻端を接触

Fig. 3 Example of movement patterns of red sea bream seen from above. In these figures, black filled circles show the position of the head of the red sea bream at 1-second intervals. Diamond symbols indicate the position of the head of the sea bream at 0.5-second intervals. The dotted-line circle indicates the body length (0.5 BL) of the red sea bream, the solid-line circle indicates the body length (1 BL) of the red sea bream, and the thick-line circle indicates the position of the target.

させた。物標の一部を噛んだ後、0.5 BL 円への進入経路とは異なる方向へ遊泳した Fig. 3f に示したのは ICB の例である。物標に対して全く関心を示さない FSW とわずかに物標に関心を示して接近する APP は物標の存在や動き (ST や MT) あるいはその素材に関わらず、いずれの場合も観察された。これに対し、物標に直接噛みつきを試みた TST と ICB はわずかに観察されたに過ぎなかった。

物標の運動周期による摂餌行動の誘発効果 錘の上下運動の設定周期 (2~16 秒) ごとに物標に動きのある (MT) および動きのない (ST) の各評価点および両者の差 ($DP_F = (MT \text{ 評価点} - ST \text{ 評価点})$) を求め Fig. 4 に示した。

Fig. 4 Total scores obtained in the different weight cycles. MT is the condition of moving target, ST is the condition of static target and DP_F is difference points of MT and ST. a to c indicate a significant difference (a: $p < 0.05$, Bartlett's test and ANOVA; b and c: $p < 0.05$, F -test and t -test).

錘の上下運動はいずれの周期においても 4 個体間の平均 DP_F 間に有意な差が認められた (分散分析: $p < 0.05$)。また、設定周期 8 秒の時のみ MT 評価点が ST 評価点を有意に (t 検定: $p < 0.05$) 上回り、これらから、錘が上下運動する方が、静止状態よりもマダイの摂餌行動を誘発する効果が高くなる上下運動周期は 8 秒の場合であると判断された。

物標の種類による摂餌行動の誘発効果 6 個体の供試魚について物標ごとに上下運動のある (MT) およびない (ST) に対する評価点および両者の差 ($DP_T = (MT \text{ 評価点} - ST \text{ 評価点})$) を求め Fig. 5 に示した。 DP_T は 3 種の物標で 1 例ずつ負になったが、それ以外は正の値となったことから、錘が静止した状態 (ST) より動い

Fig. 5 Total score obtained for respective targets. MT is the condition of moving target, ST is the condition of static target and DP_T is difference points of MT and ST. a to d indicate a significant difference (a and b: $p < 0.05$, F -test and Welch's test; c and d: $p < 0.05$, F -test and t -test).

ていた方 (MT) が摂餌行動の誘因効果が大きくなる傾向があると判断した。

錘を用いた場合, Welch の検定による有意な差が認められなかった ($p > 0.05$)。疑似餌とイカ餌を用いた場合は, 上下運動のある疑似餌とイカ餌は有意に (t 検定: $p < 0.05$) 評価が高いことが認められた。DP_T については Welch の検定 ($p < 0.05$) を行ったところ, 物標ごとの平均 DP_T に有意な差は認められなかった。これらのことから, 物標間の誘引効果の違いは確認できなかった。

考 察

本研究は動きを与えたり, 形状を変化させたりして物標に対するマダイの反応行動に評価点を与えて検証するものであったが, ここではまずマダイが水槽内の任意の位置から物標を視認できたかどうかについて検討した。塩原ら⁸⁾はマダイの視精度を求める次式から照度 500 lx におけるマダイの視精度を 0.24 とした。

$$VA = \left\{ 2 \times \arctan \left(\frac{\phi}{2TD} \right) \times \frac{180}{\pi} \times 60 \right\}^{-1} \quad (3)$$

ここで, VA は視精度, ϕ は視覚目標の直径, TD は目標までの距離である。

本研究での実験時の最低水中照度は 535 lx であることから, 塩原らが求めた 500 lx におけるマダイの視精度 0.24 を用いることとし, (3) 式の ϕ に本実験で用いた物標の一つである錘の直径 27 mm を代入すると, 視覚目標までの距離 TD が 2250 mm として求められる。本実験での記録区画の縦と横 (3000 mm と 1450 mm) から求まる物標までの最大距離は 1666 mm であり, マダイの視精度を 0.24 とした時の 27 mm の物体の視認距離が 2250 mm 以内と考えられるため, 水槽内のいずれの場所においても明瞭に物標を視認していたものと推測される。

李ら⁶⁾はスケトウダラの釣獲過程中的行動を本研究で評価した 3 要素に 6 要素 (Jerk, Jerk series, Rush, Spitting out, Bait stolen および Hooking) を加え 9 要素で説明している。ここでは, 本研究で定義した摂餌行動でない通常の自由遊泳 (FSW) を示してはいないが, スケトウダラでも存在すると推測されるのでこれら 9 要素に FSW を加えた要素で示すことができると考えられる。スケトウダラの摂餌行動は, FSW → APP → TST → ICB (李らでは Bite) に引き続き, 本研究では評価していない 6 要素が示されている。本実験でもこの 4 要素 (FSW, APP, TST および ICB) での行動の流れが観察できており, マダイについても概ね同じように説明できると考えられるが, 記録時間が短く, 4 要素の任意の組み合わせで示されるのか, 李のような流れで示されるのかどうかは明確でない。この点は今後明らかにする。

田村¹⁾は, 餌を周期的に往復運動させた場合と等速度直線運動させた場合のスズキ幼魚の反応行動について検討し, 特に 1.5 cm/s 以上の速度で往復運動した場合に摂餌行動を誘発する効果があったと報告している。これに対して本研究のマダイでは, 物標が静止した ST でも摂餌行動を誘発することもあったが, 物標が 2.5 cm/s の速度 (8 秒周期) で周期的に往復運動している時 (MT) のみ静止状態 (ST) よりも明らかな反応行動をとった。マダイが特定周期で往復運動する物標に対してのみ摂餌行動を引き起こすのであれば, 人工的な物標の運動を制御することでマダイを選択的に漁獲することが可能であることも示唆する。一方で, 本実験では運動振幅を 10 cm に固定したため, 速度と周期のいずれが行動を引き起こすトリガとなったかが明瞭ではない。これらの点については, 更に検討していく必要がある。

本研究で用いた水槽壁は白色であり, 摂餌行動が表れにくいとされる条件であった。⁹⁾ 味覚や嗅覚を刺激することがなく, 形状も最も単純な球形物標である錘の場合, 物標が動く場合 (MT) の方が静止状態 (ST) よりも摂餌行動の誘発効果が当然高くなったが, 他の刺激要因と物標との違いは確認できなかった。錘を物標とした場合, 物標の種類による実験での物標に動きのある (MT) および動きのない (ST) の各評価点との差の平均は, 3.8 ± 3.2 であり, 疑似餌の平均 6.8 ± 5.5 およびイカ餌の平均 6.3 ± 6.1 より小さかった。これは, 錘の平均が比較的大きいことが影響しており, 錘を黄色に着色することにより摂餌行動を誘発する効果が見られたと推測される。ただし, 物標の色による摂餌行動の誘発効果には個体差が大きいものと推察される。

臭いの効果が期待されたイカ餌については, 物標に動きのある (MT) および動きのない (ST) の各評価点との差の平均が臭いがしない錘より大きくなった。また, 動きがない (ST) の評価点は疑似餌より大きくなり, イカ餌の臭いによる摂餌行動を誘発する効果が見られたと推測される。

マダイを人工的な物標を用いて漁獲することを試みる場合, 物標の往復運動周期を 8 秒程度に設定することで, 静止物標より摂餌行動を誘発する可能性が高いと推測されるが, 物標の色の影響については, 本研究では明らかにしておらず, 実用化に向けて解明する必要がある。一方で, 止まっている物標であっても着色により摂餌行動の誘発効果が期待できることから, 物標の色に関する効果も明確にしていく必要がある。

文 献

- 1) 田村 保. スズキ幼魚の摂餌感覚. 日水誌 1952; 17: 296-300.
- 2) Fernö A, Huse I. The Effect of Experience of the Behavior

- of COD (*Gadus Morhua* L.) Towards a Baited Hook. *Fish. Res.* 1983; **2**: 19–28.
- 3) Sudo H, Azuma M, Azeta M. Diel Changes in Predator-Prey Relationships between Red Sea Bream and Gammaridean Amphipods in Shijiki Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1987; **53**: 1567–1575.
- 4) 岡田啓介. 黄海産若齢マダイの摂餌生態について. 日水誌 1965; **31**: 999–1005.
- 5) 伊奈和夫, 領木決一, 東 久美. マダイ (*Chrysophrys major*) の色に対する反応性. 日水誌 1979; **45**: 1–5.
- 6) 李 春雨, 五十嵐脩蔵, 見上隆克, 山下成治. スケトウダラの餌と餌付き釣針に対する行動と釣針形状. 日水誌 1989; **55**: 1553–1558.
- 7) 秋山清二, 安田浩二, 有元貴文, 田原陽三. 曳縄漁具に対する魚の行動の水中観察. 日水誌 1995; **61**: 713–716.
- 8) 塩原 泰, 有元貴文. マダイの視力の照度による変化と網膜順応状態. 日水誌 2003; **69**: 632–636.
- 9) 畑中宏之. トラフグ稚魚の成長と尾鰭の形状に及ぼす飼育水槽の色, 照度及び飼育密度の影響. 日水誌 1997; **63**: 734–738.