暗環境下の飼育水槽中におけるスルメイカの行動観察

高山 剛,^{1,2} 長谷川誠三,^{1a} 桜井泰憲,³ 稲田博史,^{4*} 有元貴文⁴

(2013年4月15日受付, 2013年8月7日受理)

¹水産総合研究センター水産工学研究所, ²東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科,³北海道大学大学院水産科学研究院海洋生物資源科学部門, ⁴東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科海洋生物資源学部門Laboratory study on the behavioral patterns of Japanese common squid *Todarodes pacificus*
under light and dark conditionsGO TAKAYAMA,^{1,2} SEIZO HASEGAWA,^{1a} YASUNORI SAKURAI,³
HIROSHI INADA^{4*} AND TAKAFUMI ARIMOTO⁴¹National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Kamisu, Ibaraki 314-0408,²Graduate Course of Applied Marine Bioscience, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, ³Division of Marine Bioresource and Environmental Science, Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, ⁴Department of Marine Biosciences, Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

The behavior of Japanese common squid *Todarodes pacificus* in the laboratory tank was observed with an acoustic camera (DIDSON) under light and dark conditions to understand their behavioral response to light. To examine the effect of switching the light on and off, observations were conducted under four different lighting patterns consisting of combinations of light and dark conditions. The acoustic images of squid are useful for identifying their moving patterns with position and direction. Under the light condition, the squid tended to swim in the tank, away from the bottom and the walls. While in the dark condition, the squid rested mostly on the bottom, occasionally bumped their fins and arms against the walls with dashing movements, due to loss of visual perception. These behavioral patterns of squid under the light and dark conditions changed immediately upon switching the lighting condition, and were scarcely affected by the previous lighting condition.

キーワード: DIDSON, 音響カメラ, 行動観察, スルメイカ, 光環境

わが国周辺海域において, スルメイカ *Todarodes pacificus* は釣り, まき網, 底びき網, 定置網などの漁業によって漁獲され, 過去10年の水揚量は年間約20万トン前後で推移している。¹⁾ これら漁業種類のうち, 沖合, 沿岸を含めた釣り漁業による漁獲は平均で5割程度を占めている。¹⁾ イカ釣り漁業では主に夜間に漁灯を用いて操業を行い, スルメイカを集め, 擬餌針で釣獲することを特徴とする。漁業者一般には, 漁灯の明るさは漁獲量に直結すると考えられており, 漁灯の電化以来, 申し合わせによる漁灯総出力上限値が設定されるまで, 漁船の規模を問わず漁灯の重装備化が進んできた。²⁾ そ

の結果, イカ釣り漁業では燃油多消費型の経営形態³⁾が定着することとなった。

しかし, 近年では, 燃油価格の高騰の影響を受けて, 従来型の操業形態からの脱却が模索され始めており, LED漁灯をはじめとする省エネ型漁灯の技術開発や操業方法の見直しが検討されている。^{4,5)} また, 効率的な漁灯操法の再構築を目的とした漁獲過程解明の取り組みも行われている。これまでに, 水中灯光に対するスルメイカの応答や, 漁船周辺の光環境の把握等が行われ, 海中のスルメイカが漁灯光を視認してから漁獲されるまでの一連の過程について仮説が提案されている。⁶⁾ しかし

* Tel : 81-3-5463-0476. Fax : 81-3-5463-0360. Email : inadah@kaiyodai.ac.jp

^a 現所属 : 漁業技研 (Gyogyo Giken, Shimonoseki, Yamaguchi 751-0874, Japan)

ながら、漁灯との位置関係に応じて海中のスルメイカが受ける様々な光刺激の質や量、およびそれら光刺激に対する応答に関して既往の知見はまだ十分とは言えず、漁獲過程の全体像は明らかになっていない。一方、近年では、イカ類の飼育技術の向上によって、陸上水槽におけるスルメイカの飼育が可能となっている。^{7,8)} スルメイカの対光応答特性の把握を目的とした水槽実験は、漁獲過程の理解に有用な手法であると考えられるが、定量的な行動観察を実現するためには、対象生物の定位状況や遊泳位置を実験時の光条件に依存せずに測定する観察技術の確立が必要である。

本研究では、スルメイカの基礎的な対光応答特性の把握と、行動観察技術の構築を目的として、音響カメラを用いて水槽内における暗環境下でのスルメイカの行動を観察し、明環境下での行動と比較した。

材料および方法

供試生物 明・暗環境下におけるスルメイカの行動観察は、北海道函館市の北海道大学大学院水産科学研究院が保有する水槽施設において2010年8月19日および21日に実施した。供試個体として、観察前日の日没後から当日の朝にかけて函館周辺海域で漁獲されたスルメイカを使用し、8月19日は外套長234 mmの雌個体（個体 α ）、8月21日は外套長211 mmの雄個体（個体 β ）を観察対象とした。

実験手順および光条件 実験では、直径約4 m、水深約1 mの完全閉鎖循環型の円形水槽を使用し、海水温を16°Cに設定した。水槽内壁には、明度の異なる2種類の緑色系の塗料によって市松模様（正方形の1辺の長さ約10 cm）が施されている。実験時における光条件は、明暗2種類とし、いずれの条件においても外光を遮光した上で、明条件時は実験施設の天井に設置された普通型演色性白色蛍光灯ランプを点灯、暗条件時は上記照明を消灯した。

光条件の切換がイカの行動に与える影響を考慮し、観察を行う環境として、次の4通りを設定した。すなわち、(1)明馴致後の明環境、(2)暗馴致後の明環境、(3)明馴

致後の暗環境、(4)暗馴致後の暗環境、である。各環境とも観察時間は30分とし、観察開始前の馴致時間は30分以上とした。2個体の供試スルメイカに対して、それぞれ夜間に上記4通りの光環境を与え、合計8例の観察を行った（Fig. 1）。なお、対光行動観察中は、水槽中に水流が発生しないように濾過水槽からの循環ポンプを停止した。水槽上側方から水槽を目視した場合、明条件下では全ての構造物が視認可能であったのに対し、暗条件下では全く視認できなかった。各条件における光環境は、ポータブル分光器（Ocean Optics社製USB4000）を用いて測定した。明暗両条件の水槽中央水面直上における分光光量子束密度をFig. 2に示した。水面直上における可視光域（380～780 nm）の光量子束密度の積分値は明条件下では $0.912 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、暗条件下では $0.036 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。明条件下の光量子束密度積分値は、計測されたスペクトルが白色蛍光灯ランプの特性をよく反映していることから、⁹⁾ センサの飽和やノイズによる計測誤差の影響は少なく、妥当な値であると判断された。他方、暗条件下で計測された光量子束密度積分値は、実験施設が十分に遮光されていたことから、センサのノイズに起因する誤差を含む値であると判断された。

Fig. 2 Photon flux density on the tank under light and dark conditions.

Fig. 1 Series of observations of behavior patterns of squid under light and dark conditions.

観察方法 スルメイカの行動観察には、音響カメラ (Sound Metrics 社製 DIDSON) を用いた。同装置は、水平方向に 0.3 度の幅を持つ超音波ビーム 96 本を扇形に送受信することにより、水中の光条件や透明度に依存することなく、水平方向に約 29 度、垂直方向に 14 度の範囲で動画によるイメージングを可能とする。同装置の特性を活用して、水産分野ではアイゴ *Siganus fuscus* の行動観察¹⁰⁾、ブリ *Seriola quinqueradiata* やアユ *Plecoglossus altivelis* の計数^{11,12)}、エチゼンクラゲ *Nemopilema nomurai* の観察¹³⁾ などに応用されているが、イカ類を対象とした観察事例は報告されていない。本研究では、スルメイカを音響カメラの視野内に留め、連続的に観察する目的で、円形水槽内に音響カメラの視野角に対応した黒色のプラスチックネット (トリカルネット、角目ピッチ 4.8 mm) 製のケージを作製し、この中にイカを収容した (Fig. 3)。観察用ケージの上面と長軸方向の両端面にはプラスチックネットが設置されていないが、音響カメラ側の端面はナイロンネット製のフェンスにより、音響カメラと反対側の端面は水槽の壁面により、それぞれ閉鎖し、音響カメラの視野外へのイカの逸脱を防止した。観察に際してはケージ内にスルメイカを 1 尾ずつ収容し、前述の 4 種類の光環境下における行動を音響カメラによって周波数 1.8 MHz、毎秒 10 フレームで撮影した。実験終了後、記録動画を再生し、それぞれの光環境下で発現する特徴的な行動パターンを抽出した。また、各パターンの出現頻度や持続時間、遊泳速度を計測した。

Fig. 3 Experimental tank for observing behavior with an acoustic camera.

結果

音響カメラによる観察画像 音響カメラによって得られた水槽内の画像を Fig. 4 に示した。音響カメラの画像は超音波ビーム走査領域内の物体が扇形の平面に投影される形で表示される。音響カメラからの距離約 3.3 m から 3.5 m に存在する円弧状の強度の高い反射は水槽壁面、0.75 m 前後の横方向の直線的な反射は逸脱防止フェンス、観察領域の左右境界はケージ左右の壁面に相当する。また、観察範囲内で比較的輝度の高い領域は、ケージの底面のやや盛り上がった箇所に相当する。得られた映像では、水槽やケージ壁面の反射の影響は少なく、ケージ内のいずれの場所にスルメイカが位置しても、頭足部を含む全長で 35~40 ピクセル前後の像として確認することができた。スルメイカの全体像をカバーするピクセル数が少ないため、静止画では体軸方向の判断が困難であったが、明環境下における目視観察と音響カメラによる動画観察結果を比較したところ、鰭を開閉の様子や頭足部の動きなどから頭尾方向を判別することが確認された。音響カメラの観察領域の水平方向は多数の超音波ビームによって構成されるが、垂直方向は単一のビームしか存在しないため、観察面に対して垂直方向の物体の位置は画像上で表示することができない。しかし、底面に投影される超音波ビームの陰影と後述するイカの動きから、離着底の状態は判断することができた。

行動の類型化 実験水槽中のスルメイカの行動パターンは 3 通りに大別された。すなわち、腹側を下にしてケージの底面に座る「着底行動」、スルメイカが離底した状態にある「遊泳行動」、体の前端 (腕先) または後端 (鰭先) がケージまたは水槽壁面に接触する「衝突行動」である。各パターンの音響カメラによる観察事例を Fig. 5a-c に示した。着底行動は、音響カメラの映像で

Fig. 4 Acoustic image of squid in the observation area, obtained by the acoustic camera.

Fig. 5 Three patterns of squid behavior observed in the experimental tank using the acoustic camera. (a) Resting on the cage bottom, (b) Swimming and hovering, (c) Bumping against the wall. In each set of figures, the left image is the actual camera record, with the arrow indicating the squid position. The three images on the right are the traced illustration of the squid position with elapsed time.

は、スルメイカが緩やかに沈降した後に、底面上でしばらくの間静止する状態として観察された。着底行動中のスルメイカでは、呼吸にともなう外套膜の収縮は確認できるものの、水平方向の移動は観察されなかった (Fig. 5a)。遊泳行動は、スルメイカが離底し、一箇所に静止しない状態として観察され、着底行動との区別が容易であった (Fig. 5b)。離底したスルメイカは、水面付近において水平ないし頭足部がやや下がった姿勢で前後方向への微動を繰り返しながらほぼ同じ位置に留まる行動 (ホバリング) から、後述の衝突行動の直前に観察された急激な突進まで、活動状況が異なるさまざまな行動を呈した。離底状態にあるスルメイカは、移動速度の変化が連続的で、行動を特定の相として区別することが困難であったため、ここで述べる遊泳行動は、着底していないあらゆる状態を含む行動として定義した。衝突行動は、音響カメラの映像では、スルメイカが加速した後に体の一部が壁面に接触する様子として観察された (Fig. 5c)。衝突行動の際には、鰭先方向への遊泳の結果、外套膜の後端部が壁面に接触する 경우가ほとんどであるが、ケージ内の壁面間隔が狭隘な領域では、まれに腕先方向から衝突する場合も見られた。衝突行動は、軽微な接触から激突まで、その程度の区別が困難であったた

め、全てのケースを含むものとした。

各光環境下における行動パターン スルメイカの着底・遊泳の各行動と衝突前 0.5 秒間における遊泳速度の経時的な出現状況、および衝突前遊泳速度の頻度分布を光環境別に Fig. 6 に、壁面への衝突箇所を Fig. 7 に示した。

明馴致後の明環境下においてスルメイカは、いずれの個体も連続的な遊泳行動を示した (動画, 電子付録 Appendix_1; https://www.jstage.jst.go.jp/article/suisan/79/6/79_13-00029/_article/supplement/-char/ja/)。個体 β では衝突行動はみられなかったが、個体 α では 30 分間に 14 回の離散的な衝突行動が観察され、衝突前遊泳速度は、全て $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を下回っていた (Fig. 6a)。衝突箇所は、ケージ内の観察領域前端 (音響カメラ側頂点) から $0.5 \sim 1.25 \text{ m}$ の距離で、音響カメラから見て左側の壁面に集中していた (Fig. 7a)。

暗馴致後の明環境下では、明馴致後の明環境下と同様、スルメイカはほとんど遊泳行動を続けたが、動画 (電子付録 Appendix_2; https://www.jstage.jst.go.jp/article/suisan/79/6/79_13-00029/_article/supplement/-char/ja/) に示すように、明馴致後の明環境下に比べ高頻度の衝突行動が観察され、30 分間の衝突行動は個体 α では 59 回、個体 β では 203 回であった。衝突前遊泳速度はほとんどが $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を下回っていた (Fig. 6b)。衝突箇所は、個体 α では観察領域前端から $0.25 \sim 0.8 \text{ m}$ の左側壁面、個体 β では $0 \sim 1 \text{ m}$ の範囲の右側壁面に集中した (Fig. 7b)。

明馴致後の暗環境下では、スルメイカは大部分の時間で着底行動を続けたが、30 分間に 13~31 回の頻度で離散的な衝突行動が観察された。衝突前遊泳速度は、 $0.0625 \sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の階級に広く分布し (Fig. 6c)、動画 (電子付録 Appendix_3; https://www.jstage.jst.go.jp/article/suisan/79/6/79_13-00029/_article/supplement/-char/ja/) に示すように、着底行動中のイカが鰭先方向へ突然加速し、短時間の遊泳行動を経て衝突に至るケースがほとんどであった。衝突箇所は、個体 α では観察領域前端部で多く、個体 β では左右および正面の壁面に散在した (Fig. 7c)。

暗馴致後の暗環境下においてもスルメイカはほとんどの時間、着底行動をとり、30 分間に 8~22 回の頻度で離散的な衝突行動を示した。衝突前遊泳速度は $0.125 \sim 0.875 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲で、明馴致後の暗環境下同様、着底行動中のイカが急加速して壁面に衝突するケースが主であった (Fig. 6d)。衝突箇所は、両個体とも、音響カメラの近傍から正面の壁面まで、広い範囲に分布した (Fig. 7d)。

暗条件から明条件へと光環境が変化した場合 (Fig. 6b)、個体 α では切換直後に短時間の着底行動が観察さ

Fig. 6 Time series analysis of behavior patterns of squid under light and dark conditions for each individual, α and β . The swimming phase is shown as a gray background, and the resting phase as white, with the solid bar representing the moving speed at 0.5 second before bumping against the wall. Histograms indicate the frequency distribution of bumping speed.

れたが、約2分後には遊泳行動に移行し、以後観察中はほとんど遊泳行動を継続した。また、個体 β では切換後即座に遊泳行動に移行した。明条件から暗条件へ変化した場合 (Fig. 6c)、個体 α では切換約3分後までは短時間の遊泳行動と着底行動を繰り返し、 β では約2分間は遊泳行動を示したが、両個体ともその後、着底行動を主とする状態に移行した。観察前の光条件が明暗いずれの場合でも、各観察事例における着底行動の合計時間は暗環境下で長く、観察時間30分のうち81~92%を占めたのに対し、明環境下での着底時間は0~6%であった (Table 1)。スルメイカの着底時間を対象として、馴致時間中の光条件と観察中の光条件を要因とした二元配置の分散分析を行ったところ (Table 2)、観察中の光環境の明暗群間の比較では暗環境下の着底時間が有意に長かった一方 ($P=8.8 \times 10^{-6}$)、観察前の光環境の明暗群間では着底行動の合計時間に有意差はなく ($P=0.26$)、要因間の交互作用も認められなかった ($P=0.78$)。

考 察

暗環境下における着底行動 今回の観察では、暗環境下におけるスルメイカは、大部分の時間で着底行動をとることが確認された。飼育下にある成熟した雌のスルメイカは、産卵直前に水槽底面に座る行動をとることが知られているが、¹⁴⁾今回観察対象とした個体は雌雄とも未熟個体であったことから、今回観察された着底行動は、産卵前にみられるものと同様の現象ではなく、暗環境下における特有の行動であると考えられた。魚類では、シロイトダラ *Pollachius virens* やマサバ *Scomber japonicus* 等、視覚が機能しない環境下でも側線感覚による他個体認識が可能な種が存在することが知られている。^{15,16)} イカ類でも頭部および腕部に側線に類似した器官として表皮有毛細胞 (epidermal hair cells) を持ち、これらが他個体や静止物体等の認識に寄与する可能性も示唆されている。¹⁷⁾ しかし、イカ類を水槽で飼育する場合、水槽壁面への衝突を防ぐには、水槽内面の視認性を上げる必要があることや、^{7,8)} スルメイカを活魚輸送する際、水槽内

Fig. 7 Positions of bumping into the wall in the observation area under light and dark conditions for each individual, α and β . Each mark on the wall represents the bumping position observed by the acoustic camera.

を完全に暗黒にするとイカが互いにかみ合い、共食いが起こることが知られており,¹⁸⁾ イカ類は、物体、および他個体との位置関係の保持において、機械的な刺激の受容器官よりも視覚が果たす役割がより主導的である可能性が高い。以上のことから、暗環境下で観察されたスルメイカの着底行動は、視覚による空間感覚の把握が困難となったことに起因する行動であると考えられた。

衝突行動 衝突行動は、明暗いずれの環境下でも観察されたが、その特徴はそれぞれの環境で異なった。明環境下における衝突は、速度が遅く、発生箇所は音響カメラに近いケージ側壁面が多かった。明環境時に点灯した実験施設天井の照明装置は、音響カメラ側に偏って設置されており (Fig. 3)、観察用ケージを使用しない通常の飼育環境下でも、光源に近い領域にスルメイカが偏在する傾向が観察されている。このことから、明環境下における衝突行動は、光源方向に遊泳する行動が、ケージの壁面によって妨げられた結果発生するものと考えられ

Table 1 Total duration in seconds of resting on the cage bottom, under each lighting condition

		Lighting condition during experiment			
		Light		Dark	
Lighting condition before experiment	Light	α	0 (0.0%)	α	1,449 (80.5%)
		β	0 (0.0%)	β	1,629 (90.5%)
	Dark	α	108 (6.0%)	α	1,598 (88.8%)
		β	0 (0.0%)	β	1,654 (91.9%)

Table 2 Results of two-way ANOVA on total resting duration

		Factors			
		df	Sum of squares	F	P
Lighting condition before experiment	1		9,940.5	1.7	0.264
Lighting condition during experiment	1		4,839,160.5	820.2	8.847×10^{-6} **
Interaction	1		544.5	0.1	0.776

** Significant difference ($P < 0.01$).

た。暗馴致後の明環境下で観察された連続的な衝突行動は、水深が浅く左右の壁間隔が狭い領域に特に集中した (Fig. 7b)。このような領域に進入した場合、体軸を曲げることができないスルメイカは方向転換が困難となる。個体によっては同じ環境下で全く衝突を起さない状態も観察されたことから、連続的な衝突行動は、偶発的に狭隘な領域に進入した後、光源に定位する行動の結果発生したものと考えられる。

他方、暗環境下における衝突は、明環境下よりも速い速度で起こる場合が多く、ほとんどのケースで発生箇所は壁面全域に及んでいた。観察に際しては、水流や振動、観察者の動きなどの刺激源を排除していたことから、急激な遊泳とその結果起こる衝突行動は、視覚が機能しない暗環境下で自発的に発生した可能性が考えられる。また、衝突箇所が壁面全域に分布した理由として、暗環境下では、視覚的に定位する対象が得られないため、遊泳の方向が定まらなかったものと推察される。明馴致後の暗環境下における個体 α では、音響カメラ近傍壁面への衝突箇所の集中が観察されているが (Fig. 7c)、集中箇所に刺激源が存在せず、同環境の他個体では同様の現象が認められないことから、観察用ケージの構造により遊泳時の進行方向が制限された結果起こった現象であると推察される。

光条件の切換に対する反応 光条件の変化がスルメイカの行動に与える影響を検証するため、明馴致後の明環境、暗馴致後の明環境、暗馴致後の明環境、暗馴致後の暗環境の4種類の環境を設定して行動観察を行った。

その結果, スルメイカは明環境中では遊泳行動, 暗環境中では着底行動を主体とする状態を示し, 暗環境下での着底時間は馴致期間中の光条件に関わりなく, 明環境下と比較して有意に長かった。このことから, 水槽内におけるスルメイカの着底・遊泳行動は, 直前の光条件の明暗の影響を受けず, 専らその場の光条件に影響されて発現することが示唆された。

頭足類の網膜では視細胞外節中の黒色色素顆粒の移動により, 明暗順応が起こることが知られている。^{19,20)} 網膜の順応が完了するまでの時間は, アメリカケンサキイカ *Loligo pealei* で 5 分から 15 分程度,²⁰⁾ アカイカ *Ommastrephes bartramii* で 10 分から 30 分程度²¹⁾ を要するが, 今回観察されたスルメイカの遊泳・着底の行動は光条件の切替に即応して変化し, 緩慢な過渡的状态を示さなかった。また, 水槽中で人工光源直下に置かれたスルメイカの網膜は, 照射開始から 2 時間を経ても完全な明順応には至らなかったことが確認されており,²²⁾ 明・暗環境下に置かれた供試スルメイカはともに暗順応状態であったと推定される。これらのことから, それぞれの光環境において発現した行動は, 網膜の順応状態を背景とした反応ではないと考えられる。

船上灯を用いたイカ釣り操業時, 海中に水中灯を垂下し点灯した場合, それまで船下に集群していたスルメイカが逃避し, 水中灯の消灯後に再集群する現象が観察されている。²³⁾ 船下のイカ群の動きは水中灯の点消灯に即応しており, 水槽内と同様, 海中でも光環境の変化に対してスルメイカは迅速に応答を示すものと考えられる。スルメイカが光環境の変化に敏感であることは漁業者にはすでによく知られており, 機序は不明ながら, 操業終盤において船上の漁灯を大幅に減灯し, 釣獲をうながす操法に応用されている。²⁴⁾ これらの事例は, 光環境のコントロールによるイカ群の効果的な制御の可能性を示唆するものである。しかし, 通常のイカ釣り操業時には, 操業途中における積極的な漁灯の操作は行われておらず, その手法を開発する余地が残されている。

スルメイカ本来の生息環境とは異なる水槽における行動実験は, フィールドでの行動パターンを忠実に再現しうるものではないが, 実験条件の設定によっては, 対光行動現象の要素を理解する手段として有用である。今後, 水槽実験では, 光条件による群性性状の変化や, 光源に対する定位状況など, 漁業現場での把握が困難な現象について, 解明を進める必要がある。

音響カメラの有効性と応用 本研究では, 音響カメラを用いて暗環境および明環境下で水槽内のスルメイカの経時的な観察を行い, 従来, 目視を含めた光学的観察手法では解明できなかった暗環境下におけるスルメイカの行動特性を明らかにした。また, 本研究では, 観察対象個体の行動を連続的に把握する必要があったことから,

音響カメラの視野角に適合する観察用ケージにスルメイカを収容して観察を行った。その結果, 音響反射等の影響なく対象個体の連続的な観察が可能となった。音響カメラの視野範囲は, 細長い扇形の形状に限定されることから, これまで実施された同装置を用いた生態観察では, 観察対象生物の移動経路と視野範囲が交差する位置関係となるよう音響カメラを設置し, 視野範囲への生物の出現頻度を計数するケースが多かった。本研究では, 観察用ケージを用いることで, 比較的移動性が高く, かつ特定の移動方向を持たない生物の行動の連続観察にも音響カメラが有効であることを示した。スルメイカを対象とした本手法は, 透明度や照度の低い環境下で実施される水槽中の行動観察にも幅広く応用可能な技術であると考えられる。

他方, 遊泳性の高いスルメイカを対象として, 光源に対する定位状況等を音響カメラで観察する場合, 狭隘な観察用ケージの使用により, イカの行動に何らかの影響が現れることが懸念される。これを解消するためには, より広い空間的範囲の観察が可能な手法を開発する必要がある。具体的には, 観察対象生物にとって不可視な照明と, 高感度カメラの組み合わせによる光学的な手法の採用が考えられる。²⁵⁾ 今回明らかになった暗環境下における着底行動は, 視覚が機能しない状況に起因する行動であり, 観察用光源がスルメイカの行動に与える影響を評価する際に有効な指標となると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたりご協力頂いた, 北海道大学水産科学院および東京海洋大学の学生諸氏に感謝申し上げます。なお, 本研究の一部は農林水産技術会議委託プロジェクト研究「生物の光応答メカニズムの解明と省エネルギー, コスト削減利用技術の開発 有用水産生物の光応答メカニズムの解明および高度利用技術の開発」として実施された。ここに記して関係各位に深く感謝する。

文 献

- 1) 平成 14~23 年度 漁業・養殖業生産統計年報 (農林水産省大臣官房統計部編). 農林統計協会, 東京. 2002~2011.
- 2) 荒川久幸. 集魚灯技術. 「スルメイカの世界: 資源・漁業・利用」(有元貴文, 稲田博史編) 成山堂書店, 東京. 2003; 203-221.
- 3) 長谷川 勝男. わが国における漁船の燃油使用量と CO₂ 排出量の試算. 水産技術 2010; 2: 111-121.
- 4) 稲田博史, 有元貴文. 漁業用灯光の現状と開発動向 (特集: 生物への光応用技術). 照明学会誌 2007; 91: 199-209.
- 5) Matsushita Y, Yamashita Y. Effect of a stepwise lighting method termed "stage reduced lighting" using LED and metal halide fishing lamps in the Japanese common squid jigging fishery. *Fish. Sci.* 2012; 78: 977-983.

- 6) 四方崇文. イカ釣り漁業. 「漁灯を活かす技術・制度の再構築へ」(稲田博史, 有元貴文, 長島徳雄, 飯田浩二編) 恒星社厚生閣, 東京. 2010; 121-133.
- 7) Matsumoto G, Shimada J. Further improvement upon maintenance of adult squid (*Doryteuthis bleekeri*) in a small circular and closed-system aquarium tank. *Biol. Bull.* 1980; **159**: 319-324.
- 8) Ikeda Y, Sakurazawa I, Sakurai Y, Matsumoto G. Initial trials of squid rearing, maintenance and culture at the brain science institute of RIKEN. *Aquaculture* 2003; **51**: 391-400.
- 9) 奥野郁弘. 蛍光ランプ. 「照明ハンドブック」(照明学会編) オーム社, 東京. 2006; 106-116.
- 10) 本多直人, 藤田 薫, 秋山清二. 音響カメラ DIDSON による水槽内でのアイゴの日周行動の観察. 水産工学 2010; **47**: 47-51.
- 11) Han J, Honda N, Asada A, Shibata K. Automated acoustic method for counting and sizing farmed fish during transfer using DIDSON. *Fish. Sci.* 2009; **75**: 1359-1367.
- 12) Han J, Asada A, Mizoguchi M. DIDSON-based acoustic counting method for juvenile ayu *Plecoglossus altivelis* migrating upstream. *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.* 2009; **36**: 250-257.
- 13) 本多直人, 渡部俊広. 音響カメラによるエチゼンクラゲの観察. 日水誌 2007; **73**: 919-921.
- 14) Bower J, Sakurai Y. Laboratory observations on *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) egg masses. *Amer. Malac. Bull.* 1996; **13**: 65-71.
- 15) Pitcher TJ, Partridge BL, Wardle CS. A blind fish can school. *Science* 1976; **194**: 963-965.
- 16) 鈴木勝也, 高木 力, 鳥澤真介, 福田漠生, 村田 修, 山本真司, 宮下和土. 魚群行動における視覚と側線感覚機能の数理モデルによる評価. 数理水産科学 2005; **3**: 15-20.
- 17) Budelmann BU, Bleckmann H. A lateral line analogue in cephalopods: water waves generate microphonic potentials in the epidermal head lines of *Sepia* and *Loliguncula*. *J. Comp. Physiol. A* 1988; **164**: 1-5.
- 18) 鈴木恒由. スルメイカの飼育と活輸送. 「イカ: その生物から消費まで」(奈須敬二, 奥谷喬司, 小倉通男編) 成山堂書店, 東京. 1991; 217-235.
- 19) Young JZ. Light- and dark-adaptation in the eyes of some cephalopods. *Proc. Zool. Soc. London* 1963; **140**: 255-272.
- 20) Daw NW, Pearlman AL. Pigment migration and adaptation in the eye of the squid, *Loligo pealei*. *J. Gen. Physiol.* 1974; **63**: 22-36.
- 21) 高山 剛, 稲田博史, 渡部俊広. 灯光に対するアカイカの網膜運動反応と虹彩の遮光機能. 日水誌 1998; **64**: 631-635.
- 22) Inada H. Retinomotor response and retinal adaptation of Japanese common squid *Todarodes pacificus* at capture with jigs. *Fish. Sci.* 1996; **62**: 663-669.
- 23) 四方崇文, 島 敏明, 稲田博史, 三浦郁男, 臺田 望, 貞安一廣, 渡部俊広. イカ釣り操業時に船上灯光により形成される船底下陰影部のスルメイカの誘集・釣獲過程における役割. 日水誌 2011; **77**: 53-60.
- 24) 四方崇文. イカ釣り漁業におけるスルメイカの誘集・釣獲過程. スルメイカ資源評価協議会報告 (平成 22 年度), 日本海区水産研究所, 新潟. 2011; 14-21.
- 25) Churnside J, O'Driscoll R, Jech M, Jones E, Macaulay GJ, McElderry H, Smith SJ, Tenningen E. Applications. In: Churnside J, Jech M, Tenningen E (eds). *Fishery applications of optical technologies*. ICES Cooperative research report No. 312, Copenhagen. 2012; 45-68.