

クロアワビの夜間行動を抑制する水中の明るさ*

森川由隆**・小池 隆**・森永 勤**

Inhibition of locomotor activity by the light levels at nighttime in the Japanese abalone *Haliotis (Nordotis) discus**

Yoshitaka MORIKAWA**, Takashi KOIKE*** and Tsutomu MORINAGA**

Abstract: We have developed apparatus to detect abalone movement by measuring tension in wires from which the abalone's cage hangs. This apparatus using fixed light intensities has been used to examine the activity behavior under simulated day/night conditions. Under 12:12 simulated day/night conditions at 10 and 0 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$, respectively, abalones showed clear activity patterns, being stationary during day periods and showing locomotor activity in complete darkness. The light intensity during day periods was fixed at 10 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ and during night periods light levels brighter than $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ inhibited any locomotor activity. In light intensities of $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ and less, the same levels of lively activity were measured for replicates as for in complete darkness. From this, we conclude that locomotor activity is inhibited by light intensities brighter than $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$.

1. 序論

前報において、著者等はアワビ等の夜行性動物は月明かりレベルの極めて微少な明るさを感じ、行動に反映しているとの観点から、屋外の自然光下でクロアワビの行動観察と水中の明るさの連続測定を同時に行った。その結果、クロアワビは日没から夜明けまでの夜間に行動を行い、行動を開始する水中の明るさは約 $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以下であった。また、月夜には夜間行動が抑制されることが多く、その場合の水中の明るさは $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以上であることを明らかにした(森川他, 1993)。その際、クロアワビは目視観察できる明るさ未満の微弱な光にも何らかの反応を示す可能性が推察された。また、自然光による照明は明るさが天候や時刻あるいは夜間においては月齢によって変化し、微少で安定した値が得にくいことを指摘した。そこで微少な明るさに

よるクロアワビの行動の変化を詳細に把握するためには、行動計測の手段の中で赤外線感知装置やVTR画像解析装置のように光センサーを使うことなく、行動を観察する手法を開発すること、さらに水槽内を極微少な明るさで均一に照明することが望まれた。

本報ではクロアワビの行動におよぼす光の影響を解明する一環として、吊り下げ方式を用いたアワビの行動計測装置を開発し、さらに、装置内に光制御器を組み込んで微少な光条件を設定し、明・暗期における各行動の計測より、夜間行動を抑制する水中の明るさを検討した。

2. 実験装置および方法

2-1. 吊り下げ方式による行動自動計測装置の開発

個体を収容したカゴを水中に吊り下げ、カゴ内を個体が移動した際に生じる吊り糸の張力変化をセンサーにより検出し、行動を定量化する仕組みの装置を試作した。

装置の概要をFig. 1-Aに示す。樹脂製の黒色カゴ(EC: 47×34×21cm)を4隅に取り付けた4本のステンレス製ワイヤー(SW)で吊り下げた。4本のワイヤーのうち、片側の2本を固定し、もう片側の2本を電子天秤(EB A&D: EW-A/B)に接続した。電子天秤はRS 232Cインターフェイスを介してパーソナルコンピュータ(PC NEC: PC-9801VM)と接続し、コンピュータで

* 1995年9月20日受理 Received September 20, 1995

** 東京水産大学海洋生産学科
Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo, 108 Japan

*** 三重大学生物資源学部
Faculty of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie, 514 Japan

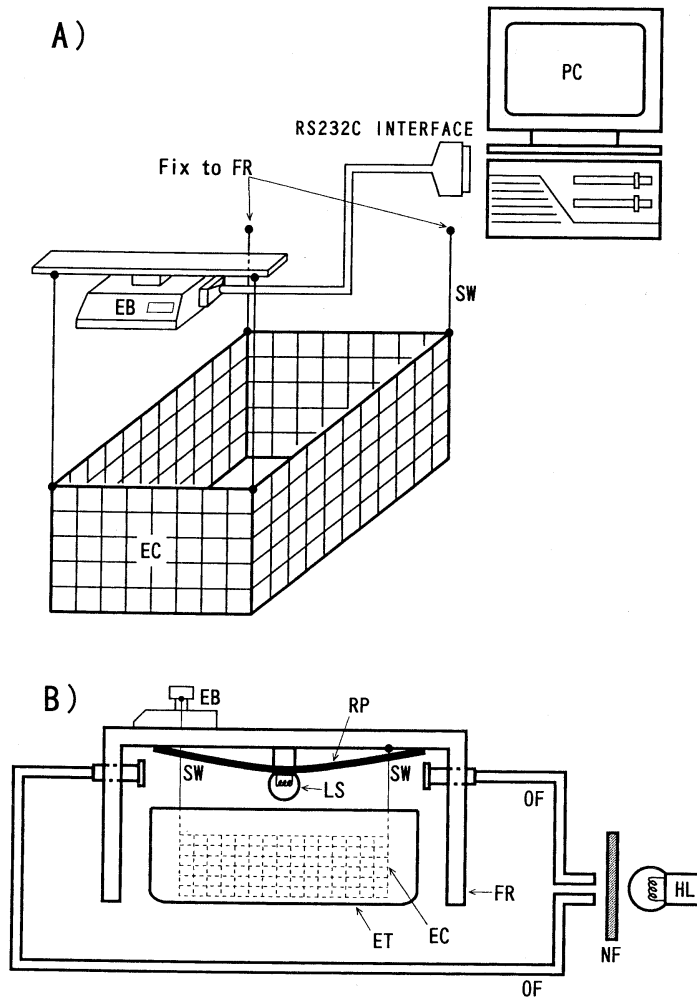


Fig. 1. Schematic sketch of the apparatus. PC: Personal computer, SW: Stainless wire, EC: Experimental cage, EB: Electronic balance, RP: Reflection plate, LS: Light source, OF: Optical fiber cable, FR: Frame, ET: Experimental tank, NF: Neutral filter, HL: Halogen lamp.

天秤の秤量値を一定時間間隔で自動的に読み取り、フロッピーディスクに記録できるようにした。

これらを Fig. 1-B に示した装置に組み込んだ。装置内の光環境は電球を光源として、電球にタイマーを接続することで明期と暗期を作り出した。明期は実験水槽の上部に100V 60Wの白色電球 (LS) を2個取り付け、水槽内に懸垂されたカゴの中をほぼ均一に $10 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ で直接照射するようにした。一方、暗期は月明かりレベルの微少な明るさを正確に作り出すために、装置の外部に100V 160Wのハロゲンランプ (HL) を用意し、光ファイバケーブル (OF) 2対によって装置の両側面より光を内部に導いた。光ファイバによって装置の

内部に導かれた光は、枠組み上部に取り付けた白色反射板 (RP) によって反射し、カゴの中をほぼ均一 (誤差率12%以内) に間接照射できるようにした。また水銀ランプと光ファイバケーブルの間には10%, 1%, 0.1% の減光フィルター (NF) をそれぞれ挿入することによって、カゴの中を 1×10^{-2} , 1×10^{-3} , 1×10^{-4} および $1 \times 10^{-5} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ の4種類の明るさに調節できるようにした。なお、水槽および枠組みには全て艶消しの黒色塗装を施し、さらに枠組みを黒色のビニールシートで覆い、外部からの光の進入を完全に遮断した。

この装置のカゴの中にクロアビを1個体収容し装置を作動させると、個体がカゴの中を移動するにともない、

張力の変化がコンピュータに記録された。これら張力の変化量と移動距離とはよく対応していた。そこで、これら張力変化量から個体の動きを簡便に表すために以下のような解析を行った。すなわち、ワイヤーの1分間における張力の差を算出することで張力の変化量を求め、その値が0.5g重以上であった場合の回数を行動頻度として1時間毎に計数した。ここで変化量を0.5g重以上に定めたのは、この値より大きい場合、移動方向を変えるような小さな動きを捉えることができず、逆に小さい場合は換水のためのカゴの小さな揺れによるノイズまで計測してしまうためである。

2-2. 材料および実験方法

実験に使用した材料は千葉県館山市伊戸地先および同県外房の千葉大学理学部付属海洋生態系研究センター小湊実験場の各保護水面において、スクーバ潜水によって採取したクロアワビ *Haliotis (Nordotis) discus* で、その殻長は89.0~103.3mmであった。採取後は屋外の自然光のもとで十分量の餌料（アラメ *Eisenia bicyclis*, カジメ *Ecklonia cava*, ワカメ *Undaria pinnatifida*）を与えて数ヶ月間放養した。用意した個体は27個体であったが、その中から行動が活発な個体12個体を選別し実験に供した。

行動測定装置のカゴの中に内径10cm、長さ12cmの半円形シェルターを固定し、その中にクロアワビ1個体を収容した。明暗周期は6:00から18:00を点灯（ $10 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ ）、18:00から6:00までを消灯（ $0 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 暗黒状態）することによって与えた。この状態で3日間個体を馴致した後、実験を開始した。実験は6日間を1実験段階として、3段階の計18日間継続して行い、この18日間を実験単位とした。実験中、明期の明るさは常に $10 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ とし、暗期の明るさを実験段階毎に変えた。すなわち、暗期の1段階目および3段階目のそれぞれ6日間は明るさがない暗黒状態（ $0 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ ）とし、2段階目の6日間のみ照明した。2段階目の暗期の明るさは 1×10^{-2} から $1 \times 10^{-5} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ までの範囲内の4種類で、1実験単位毎にその明るさを変えた。これにより、暗期に光がまったくない状態と明るさを与えた状態での行動の変化を比較し、夜間行動が抑制される明るさを求めた。なお、実験中の投餌は一切行わず、実験単位毎に新しい個体と交換した。また、装置の外部には調温用の水槽を設け、水流ポンプによって実験水槽と約5l/minの割合で海水を循環させながら、海水クーラーおよびヒーターにより、水温を常に18~20℃に調節

した。

3. 結果

暗期に明るさ 1×10^{-2} および $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ を与えた場合について行動頻度の経日変化をFig. 2に示す。明期の明るさは $10 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ と常に一定である。

Fig. 2-Aにおける暗期が暗黒状態では、実験段階I、IIIの双方において光の明暗に同調した行動の周期性がみられた。すなわち、クロアワビは明期にはほとんど動かず、暗期に入ると同時に行動を開始し、その後明期になる前には行動を停止した。この行動の周期性は6日間継続して確認されたが、行動量は実験段階IIIが少し減少した。つぎに、暗期が $1 \times 10^{-2} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ の明るさ（実験段階II）では、行動の周期性に変化が現れた。すなわち、暗期における行動頻度が実験段階I、IIIと比較して著しく減少した。この減少傾向は6日間失われることがなかった。

Fig. 2-Bにおける暗期の明るさが暗黒状態では、Fig. 2-Aの場合と同様に明暗に同調した明確な行動の周期性がみられた。しかし、行動頻度は前者に比較して減少する傾向がみられた。暗期が $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ の明るさでは、ある程度の明確な行動の周期性がみられた。行動頻度は実験段階I、IIIの場合より減少し、この傾向は6日間継続した。

Fig. 3に暗期12時間における行動頻度の積算値の経日変化を、前述のそれぞれの明るさについて示す。図中のA1、A2、A3、C1、C2およびC3はそれぞれ実験個体を表す。

同図より、暗期の明るさ $1 \times 10^{-2} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ では、実験を行った3個体とも暗期に明るさを与えると明らかな行動頻度の減少が認められた。しかし、 $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ では行動頻度は経過日数によって多少変動するが、3個体とも暗期の明るさとは無関係であった。すなわち、暗期の明るさ $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ では $1 \times 10^{-2} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ のような行動頻度の減少は見られなかった。

次に、クロアワビの行動を抑制する明るさを求めるため、 1×10^{-2} 、 1×10^{-3} 、 1×10^{-4} および $1 \times 10^{-5} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ の各々の明るさにしたときの暗期12時間における行動頻度を各実験段階ごとに平均し、差を検定した。それらの結果をTable 1に示す。

暗期の明るさ $1 \times 10^{-2} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ （実験段階II）の行動頻度は、暗黒状態（実験段階IとIII）に比較して明らかに差がみられ、およそ10~20%程度にまで減少した。この傾向は実験を行った3個体に共通して認められ、実

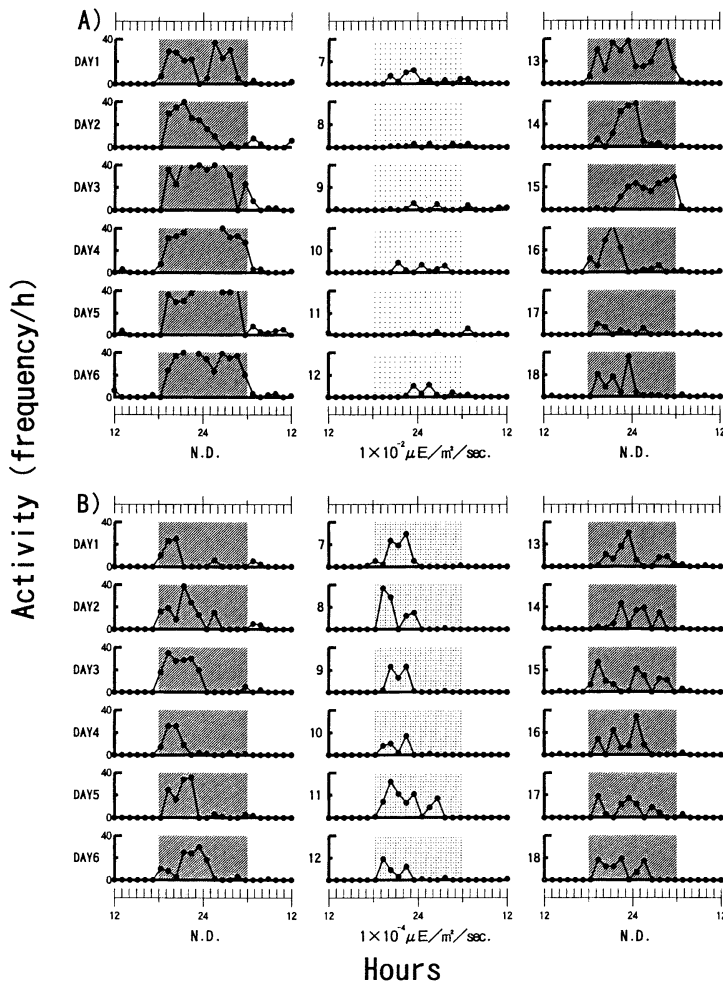


Fig. 2. Locomotor activity of individual abalone *Haliotis discus* over 18 day/night periods to examine the effect of varying light levels. Replicate abalones A) were maintained for 1-6 nights in light intensities below detectable levels (N. D.) then for nights 7-12 at $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ then at N.D. levels for 13-18 and B) under the same light regime but nights 7-12 at $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$. Activity is expressed as the sum of movements registering $>0.5\text{g}/\text{min}$ over a 1 hour period. Shaded areas denote night periods.

験段階Ⅱの行動頻度は実験段階ⅠおよびⅢとの間に危険率1%において有意な差がそれぞれ認められた。また、この減少傾向は暗期の明るさ $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ でも同様に確認され、危険率1%でB2の1個体が、他の2個体(B3については実験段階Ⅱと実験段階Ⅲの間のみ)は危険率5%で有意な差がそれぞれ認められた。さらに、暗期の明るさ $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ では3個体とも明るさによる行動の差は全く認められなかった。しかし、暗期の明るさ $1 \times 10^{-5} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ ではD2およびD3の個体において実験段階ⅡとⅠの間に危険率1%の有意差があっ

た。ただし、これらの個体は実験段階ⅡとⅢの間には差が全く見られなかった。

以上のことから、クロアワビの暗期における行動は、明るさ $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以上において顕著に抑制されることが確認された。

4. 考 察

従来、動物の行動を測定するための方法としては、目視観察以外に赤外線カメラ等を用いたVTR画像解析法(森永他, 1988)や光電スイッチ法(永田他, 1977; REID

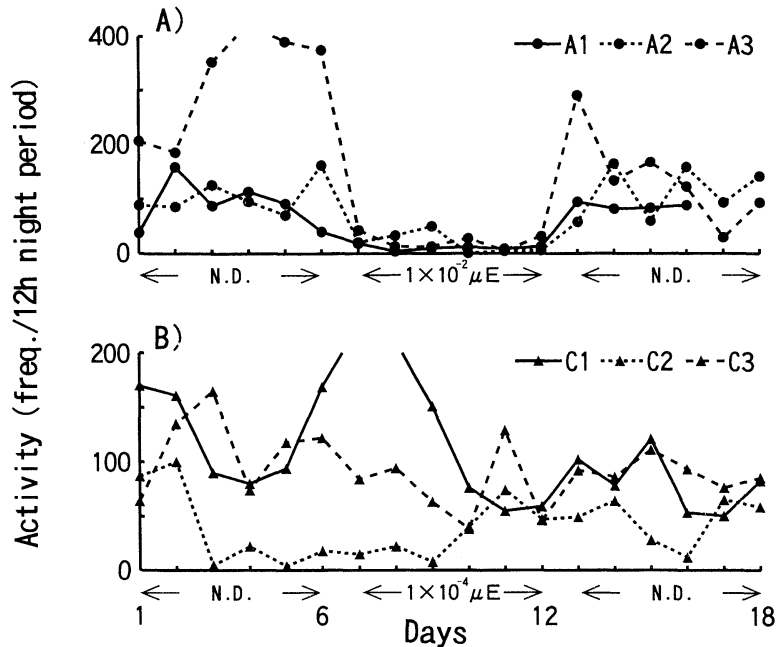


Fig. 3. Variation in locomotor activity of replicate abalones *Haliotis discus* A) maintained for 1-6 nights in light intensities below detectable levels (N. D.) then for nights 7-12 at $1 \times 10^{-2} \mu E/m^2/sec$ then at N. D. levels for 13-18 and B) under the same light regime but nights 7-12 at $1 \times 10^{-4} \mu E/m^2/sec$. Activity is expressed as the sum of movements registering $>0.5g/min$ over the 12 hour night period. Only values for night periods are shown.

Table 1. Light conditions and locomotor activity (mean \pm S. D.). Activity is expressed as the sum of movements registering 0.5 g/min over the 12 hour night period. The mark * and * represent significant differences compared to data of E.S. II at $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

Individual No.	Light intensity of night period at E.S. II ($\mu E/m^2/sec$)	Activity (frequency/12h night period)		
		I (1-6)	Experimental Stag (days) II (7-12)	III (12-18)
A1	1×10^{-2}	88.5 \pm 41.9*	11.2 \pm 4.5	87.5 \pm 5.0*
A2	↓	105.0 \pm 30.4*	19.3 \pm 17.6	113.0 \pm 44.5*
A3	↓	322.0 \pm 91.3*	22.5 \pm 12.9	140.0 \pm 79.7*
B1	1×10^{-3}	105.8 \pm 74.6**	29.2 \pm 15.4	121.4 \pm 66.9**
B2	↓	107.0 \pm 27.4*	21.3 \pm 19.4	129.8 \pm 45.4*
B3	↓	54.3 \pm 12.1	38.2 \pm 28.8	83.6 \pm 28.1**
C1	1×10^{-4}	127.3 \pm 39.7	129.5 \pm 70.2	81.0 \pm 25.2
C2	↓	39.3 \pm 39.0	34.3 \pm 22.3	46.0 \pm 19.7
C3	↓	113.0 \pm 34.7	75.7 \pm 30.8	90.5 \pm 10.7
D1	1×10^{-5}	159.5 \pm 31.0	125.7 \pm 36.4	75.7 \pm 11.1
D2	↓	213.3 \pm 59.4*	83.7 \pm 30.5	70.7 \pm 30.8
D3	↓	164.5 \pm 30.2*	28.3 \pm 18.8	25.2 \pm 9.1

and NAYLOR, 1985; TABATA *et al.*, 1991) が最も多用されてきた。しかし、これらの方法では測定手段に光を用いるため、本研究の論旨からは望ましくない。本研究では光を用いない測定手法の一つとして吊り下げ法(森田他, 1983; 小池他, 1993)を採用した。吊り下げ法は従来、ウナギなど体型の細長い魚類の行動測定に使用されてきた。森田他(1983)はヤツメウナギを収容した直径10cm円筒形の筒を、4本のバネで吊り下げ、その一端をまとめて張力検出器につないで行動リズムを計測した。吊り下げ法は機械的な作動部分が少なく、長期間にわたり測定ができる。さらに、張力センサーとコンピュータを接続することでデータの連続記録、解析処理が簡便に行えることなどの利点もある。

行動の長期間にわたる測定において考慮せねばならない問題点として給餌、シェルターなどの巢の設置および排泄物の処理等が挙げられる。光電スイッチ法ではこれらは遮光の対象となり障害物になるが、本装置では海藻などの水中重量が軽い餌であれば給餌による影響は全くなく、シェルター等の巢もカゴに固定しておけば使用することができる。また、排泄物はカゴの編み目より下に落ちるため、行動範囲に堆積することはない。これらのことから、アワビのような匍匐生物の長期間にわたる行動の測定には、吊り下げ法による測定装置はきわめて有効な手段であるといえる。

本実験ではクロアワビの行動が顕著に抑制された明るさは $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以上であった。 $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以下の明るさでは行動頻度に変化がなかったことから判断すると、行動を抑制する明るさの閾値は両者の値の中間にあると考えられる。前報(森川他, 1993)において、屋外の自然光のもとでクロアワビがシェルターから出現したときの水中の明るさは $1 \times 10^{-3} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以下であること、シェルター外での匍匐行動が抑制されたときの明るさは $1 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以上であることを報告した。これら屋外観察、室内実験の双方を比較すると、両者で得られた結果はほぼ一致する。

また、著者等は、イセエビ *Panulirus japonicus* の夜

間行動を抑制する明るさが $5.2 \times 10^{-3} \text{lux}$ 以上であることを報告した(小池他, 1993)。経験則*から照度 *lux* を光量子量に換算すると $5.2 \times 10^{-3} \text{lux}$ はおよそ $1.0 \times 10^{-4} \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ に相当し、イセエビの方が1/10ほど低い値となった。この原因は、光受容器の構造の差に起因しているのではないかと考えられる。

謝 辞

本文を取り纏めるにあたり、この研究の端緒を与えられ、終始変わらぬご教示を賜った農林水産省水産大学校長松生治博士に深謝の意を表します。実験に御助力いただいた東京水産大学坂田実験実習場小池康之主任ならびに同実習場の伊東順一、益子正和および石川尚仙技官諸氏に心から感謝申し上げます。実験材料の特別採捕においてご協力賜った館山市漁民組合および千葉大学理学部付属海洋生態研究センター小湊実験場の皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 小池 隆, 森川由隆, 前川行幸, 森永 勤 (1993): イセエビの夜間行動におよぼす水中の明るさの影響。日水誌, **59**, 1689-1694.
- 森川由隆, 小池康之, 森永 勤 (1993): 自然光下における水中の明るさとクロアワビの夜間行動。うみ, **31**, 199-204.
- 森永 勤, 小池 隆, 大友啓一, 松生 治 (1988): 濁った水に対する海水魚の行動。うみ, **26**, 19-28.
- 森田之夫, 田畑満生 (1983): ヤツメウナギの行動と松果体。「現代の行動生物学, 行動のリズムと学習」(久保田競, 堀田凱樹編), 産業図書, 東京, p.35-45.
- 永田 正, 宇野 寛, 篠田 厚 (1977): 匍匐性水産動物の運動経路の自記装置。うみ, **15**, 213-218.
- REID, D. G. and E. NAYLOR (1985): Free-running, endogenous semilunar rhythmicity in a marine isopod crustacean. Journal marine biological Association of the U.K., **65**, 85-91.
- TABATA, M., M. MINH-NYO and M. OGURI (1991): The role of the eyes and the pineal organ in the circadian rhythmicity in the catfish *Silurus asotus*. Nippon Suisan Gakkaishi, **57**, 607-612.

* LI-COR Inc./LI-COR Ltd.: Instruction Manual, P.7-8