

コモイモナマコの呼吸樹での換水

山元憲一*¹・半田岳志*¹・白石亮之*¹・西岡 晃*¹・田渕清春*²
鎌野 忠*²・富賀見清彦*²・江野島岳友*²・日影忠久*²・浅野吉史*²

Ventilation in the Respiratory Tree of Sea Cucumber, *Molpadia roretzi* (Holothuroidea ; Molpadida)

Ken-ichi Yamamoto*¹, Takeshi Handa*¹, Masashi Siraishi*¹, Akira Nishioka*¹,
Kiyoharu Tabuchi*², Tadashi Kamano*², Kiyohiko Fukami*²,
Taketomo Enoshima*², Tadahisa Hikage*², and Yoshihumi Asano*²

Ventilation in the respiratory tree of a sea cucumber, *Molpadia roretzi*, living in the mud, was examined on the ship (Koyo-maru, 1,988ton) using the method which continuously measured the ventilation volume. One cycle of ventilation was composed of large one exhalation and small 3~10 (mean 4.6) inhalations. The parameters on the ventilation are as follows: inhalation period per one ventilation (T_{in}) = 58.6sec/cycle, inhalation volume per one ventilation (V_{g-in}) = 59.0ml/cycle/kg, exhalation volume per one ventilation (V_{g-ex}) = 58.4ml/cycle/kg, inhalation period per one inhalation = 12.7sec/stroke, exhalation period per one exhalation = 14.5sec/stroke, inhalation volume per one inhalation ($V_{g-in-st}$) = 12.8ml/stroke/kg, ventilation frequency (V_f) = 0.6cycle/min, ventilation volume (V_g) = 35.8ml/min/kg. T_{in} increased with increase of inhalation frequency per one cycle (I_f), and V_f decreased. V_{g-in} increased with increase of I_f . However, V_g showed almost constant, because $V_{g-in-st}$ showed almost constant and V_f decreased.

From the results, the ventilation in the respiratory tree of *M. roretzi* was similar to that of *Apostichopus japonicus* which inhabited on the surface; they fixedly maintained the ventilation volume per min, even if the inhalation frequency per one ventilation changed every ventilation. However, in *M. roretzi*, the ventilation volume in the respiratory tree per unit time was less than *A. japonicus*, and the inhalation and exhalation into/from the respiratory tree were slowly and largely carried out further than *A. japonicus*.

Key words : Sea cucumber ; Molpadida ; Respiratory tree ; Ventilation

1 緒 言

棘皮動物のナマコ綱は6つの目で構成されており、そのうち樹手目 (Dendrochirotida), マナマコ, *Apostichopus japonicus*が属している楯手目 (Aspidochiroda), コモイモナマコ, *Molpadia roretzi*が属している隠足目 (Molpadida)の種は、呼吸樹を備えており、触手を含めた体表と呼吸樹で呼吸を行っていることが知られている^{1,2)}。呼吸樹での呼吸は、主に総排出腔および体壁の筋肉の働きによって肛門から水を呼吸樹内に吸引し、排出することによって呼吸樹

を換水して行っている³⁾。このような換水は吸入を数回続けた後1回排出することを1換水周期として行っている³⁾。Brown and Shick⁴⁾は、呼吸室の水面の動きをキモグラフで記録することによって、このような基本的な換水の型には底泥に潜る種である*Sclerodactyla briareus*と岩礁の上に生息する*Cucumaria frondosa*では差違が無いことを報告している。しかし、山内⁵⁾は、パラオ沿岸のナマコ8種について1換水周期における吸入回数を調べ、1換水周期での吸入回数は1~23を示し、砂に潜る3種は他の5種よりも吸入回数が少なく、砂上では3回の場合が最も多く、砂に潜

2006年3月2日受付. Received March 2, 2006.

* 1 独立行政法人水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University, 2-7-1 Nagata-honmachi, Shimonoseki, Yamaguchi 759-6595, Japan).

* 2 独立行政法人水産大学校耕洋丸 (Koyo maru of training ship, National Fisheries University, 2-7-1 Nagata-honmachi, Shimonoseki, Yamaguchi 759-6595, Japan).

ると吸入回数が減少したことを報告している。これらのことから、海底に潜入して息をするナマコは、1換水周期における吸入回数、吸入水量や排出水量あるいは単位時間当たりの換水周期の数や吸入水量などを含めた換水運動が潜らないものと異なる可能性が考えられる。一方、山元ら⁽⁶⁻⁸⁾は、換水量を連続記録する方法で海底に潜入しないマナマコの換水を明らかにしている。

そこで、潜入して息をするコモンイモナマコを東シナ海でトロールによって採捕し、これを用いて山元らの方法⁽⁶⁾で換水を調べ、同法の船上での利用の有効性を明らかにし、測定結果をもとにマナマコの換水運動と比較した。

2 材料および方法

実験には、体重 143 ± 54 g (平均値±標準偏差、以降同様

を表す)のコモンイモナマコ8個体を用いた。コモンイモナマコは、独立行政法人水産大学校耕洋丸での第136次航海で2005年4月15~17日に奄美大島北西(北緯30~31度、東経126~128度)の東シナ海(水深85~126m、低層水温12℃)でトロールで採集した。採集後、甲板上に設置した水槽(50x60x35cm)に水温18.5~19.0℃の海水を10l/min注入した状態(Fig. 1-F)で畜養し、直ちに同水温のもとで実験に供した。体重は実験終了時に-40℃で凍結し、帰港後測定した。

実験は、山元ら⁽⁶⁾に準じて、肛門の部分(Fig. 1-E)に小さな室(以下、チャンバーと略記する)を取り付ける手術を施した(Fig. 1-A)後、コモンイモナマコを計測用の水槽(Fig. 1-C)に入れて、呼吸樹への吸入水量とそれからの排出水量の変化を酸素飽和の状態で調べた。両水量は、水をチャンバーで受け、電磁血流計のプロープ(内



Fig. 1. Experimental system (A-D) and condition stocked a sea cucumber, *Molpadia roretzi*, into reservoir tank (E and F). Ch; small chamber for collecting ventilated water, Rm; rubber membrane, Pr; probe of electromagnetic flowmeter, Ec; experimental chamber, Rc; recorder (MacLab system), Ef; electromagnetic flowmeter, Mt; mouth, An; anus.

径1 cm, 1 l/min測定用, FF-100T, 日本光電, Fig. 1-B) を通過する水量を電磁血流計 (MFV3200, 日本光電) で測定し, 記録計 (MacLab/8, ADI) を用いて毎秒10回の速度で連続記録した (Fig. 1-D)。なお, 船の動揺やエンジンの振動などによる換水波形の乱れやそれらからのノイズを除去するために, 同プローブをチャンバー付近にもう一つ設置して電磁血流計を介して記録計で前記と同様に測定し, コモンイモナマコから測定される値からこの値をリアルタイムで差し引いたものを連続記録した。チャンバーは, ペットボトル (500ml) の口の部分を先端から約5 cmのところで輪切りにして作成し, これにゴムの薄膜を張って用いた (Fig. 1-A)。ゴムの薄膜は, ゴム製の手袋 (天然ゴム手袋極薄手No.282, 東和コーポレーション) の指の部分の長さ約4 cmに輪切りにし, その中心が約2 cmの円形に開くようにチャンバーへ被せて使用した。チャンバーは, 輪ゴム (No. 6, オカモト) を切断して作製した5本のゴム紐を縫合針 (外科弱角針10バネ穴, 秋山製作所) でほぼ等間隔に体壁へ5か所を通し, これらの紐を輪ゴムで止めてコモンイモナマコに装着した (Fig. 1-A, B)。海水は, 空気で十分に曝気し, 計測用の水槽 (33x 18x 22cm深さ) へ1 l/min注水し, 流し捨てとした (Fig. 1-C)。

呼吸樹での換水は, 手術から1時間経過した後, 1換水周期 (Fig. 2に示したT1) 毎に呼吸樹への吸入および呼吸樹からの排出に分けて換水周期70回を連続して解析した。ただし, 1換水周期での吸入回数については350回を連続して計数した。1換水周期での吸入回数 (If, stroke/cycle), 1換水周期での吸入時間 (Tin, sec/cycle) および1換水周期での吸入水量 (Vg-in, ml/cycle/kg) はFig. 2にT2で示した部分を計測し, 吸入1回当たりの吸入水量 (Vg-in-st, ml/stroke/kg) および吸入1回当たりの吸入

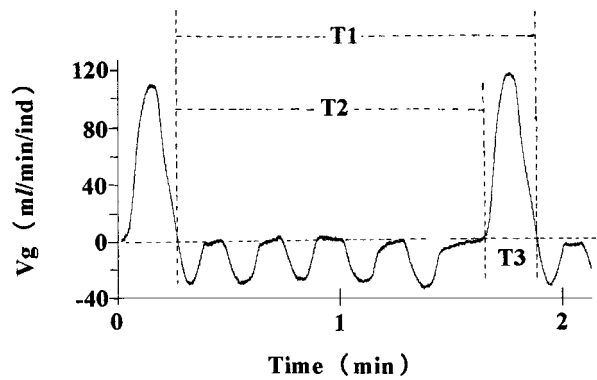


Fig. 2. Measurements on inhalation (T2) and exhalation (T3) at one ventilation (T1) in the respiratory tree of a sea cucumber, *M. roretzi*.

時間 (Tin-st, sec/stroke) はそれぞれTin, Vg-inをIfで割って求めた。また, 1分間当たりの吸入水量はT1の時間とVg-inから計算し, これを毎分吸入水量 (Vg, ml/min/kg) とした。一方, 1換水周期での排出水量 (Vg-ex, ml/cycle/kg) はFig. 2にT3で示した部分を計測した。呼吸数 (Vf, cycle/min) は, 1換水周期に要した時間 (Fig. 2に示したT1の時間) から計算した。

3 結果

コモンイモナマコの呼吸樹での換水を, 手術を施して計測用の水槽に設置した後からの連続記録例でFig. 3に示した。換水は, 設置後10~30分経過すると開始し, 開始当初には小さい吸入と排出を交互に繰り返す, 30~60分経過すると1回の大きな排出とそれに続いた複数回の吸入を1換水周期として繰り返した。このように, 本研究での測定は船上で行ったにもかかわらず, Fig. 3のように船の動揺や

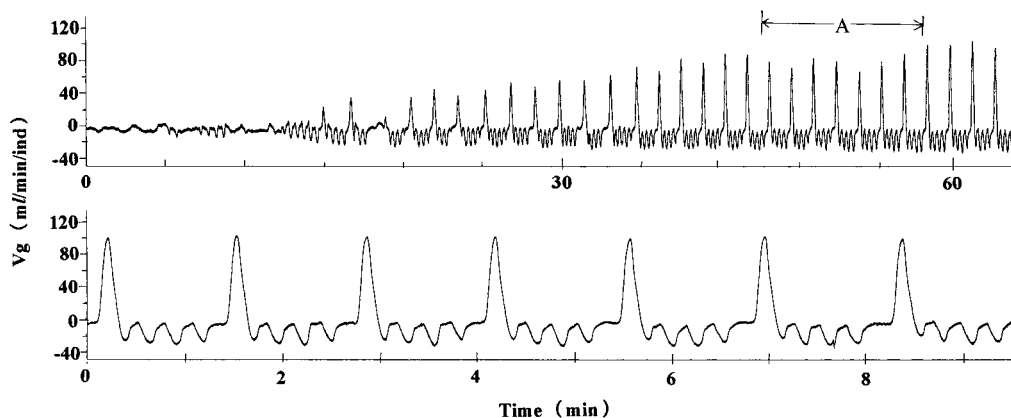


Fig. 3. A record of ventilation just after set into the experimental chamber in a sea cucumber, *M. roretzi*. Range of A above figure expands in under figure.

エンジンの振動などによる換水波形の乱れやそれらをノイズとして拾うこともなかった。

設置から1時間経過した後の連続記録から8個体について個体毎に合計2,800回の換水周期について計測すると、1換水周期で吸入は3~10回の範囲で変化していたが、4回が1,000回で最も多く、次いで3回の600回であった。また、個体毎に換水周期70回を連続して計測すると、Table 1に示したように、1換水周期の時間は99.9sec/cycle、1換水周期での吸入時間は58.6sec/cycle、1換水周期での吸入水量は59.0ml/cycle/kg、1換水周期での吸入回数は4.6 stroke/cycle、吸入1回当たりの吸入水量は12.8ml/stroke/kg、吸入1回当たりの吸入時間は12.7sec/stroke、毎分換水量は35.8ml/min/kgで、1換水周期での吸入水量は体重の約25%に相当した。1換水周期での排出時間は14.5sec/cycle、1換水周期での排出水量は58.4ml/cycle/kg、呼吸数は0.6cycle/minを示した。

1換水周期での吸入回数 (If) との関係を見ると、Ifが増加すると1換水周期での吸入時間 (Tin) は直線的に増大し、呼吸数 (Vf) は反対に直線的に減少して、それぞれ $Tin = 11.31 If + 6.61$ [$R^2 = 0.93$]、 $Vf = -0.06 If + 0.89$ [$R^2 = 0.91$]を示した (Figs. 4, 5)。また、Ifが増加すると1換水周期での吸入水量 (Vg-in) も直線的に増大し、 $Vg-in = 9.66 If + 12.96$ [$R^2 = 0.92$]を示した (Fig. 6)。しかし、吸入1回の水量 (Vg-st-in) および換水量 (Vg) はIfが増加してもほぼ一定した値を示した (Figs. 7, 8)。

一方、呼吸樹への吸入とそれに引き続く排出の順に1

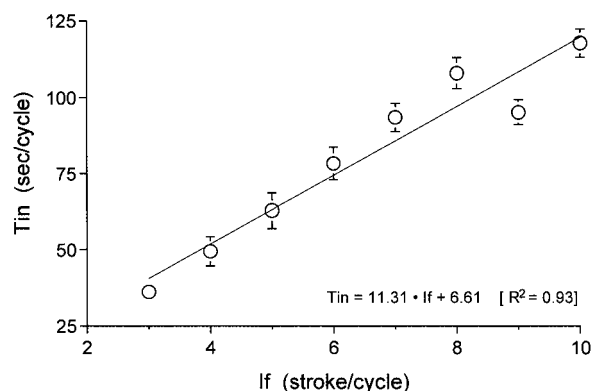


Fig. 4. Relationship between inhalation frequency per one ventilation (If) and inhalation period per one ventilation (Tin) in a sea cucumber, *M. roretzi*. Circles and vertical lines show the mean and standard deviation, respectively.

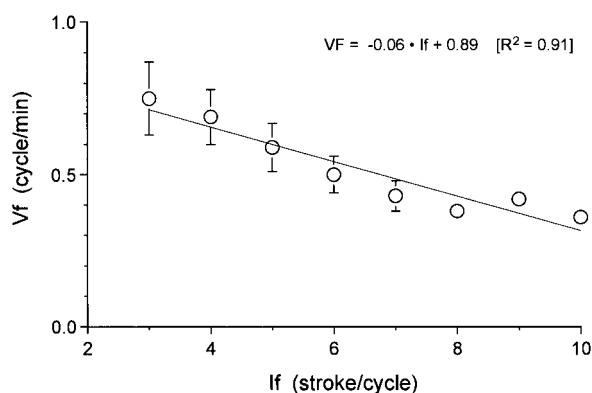


Fig. 5. Relationship between inhalation frequency per one ventilation (If) and ventilation frequency per minute (Vf) in a sea cucumber, *M. roretzi*. Circles and vertical lines show the mean and standard deviation, respectively.

Table 1. Ventilation in the respiratory tree of a sea cucumber, *Molpadia roretzi*.

	<i>Molpadia roretzi</i> (Present study)	<i>Apostichopus japonicus</i> (Yamamoto <i>et al.</i> ³)
Inhalation frequency per one ventilation (sec/cycle)	4.6 ± 1.2	10.3 ± 2.9
Period per one ventilation (sec/cycle)	99.9 ± 22.6	90.3 ± 25.0
Inhalation period per one ventilation (sec/cycle)	58.6 ± 17.5	79.5 ± 26.3
Inhalation period per one inhalation (sec/stroke)	12.7 ± 0.7	7.8 ± 1.6
Exhalation period per one ventilation (sec/cycle)	14.5 ± 3.6	10.6 ± 1.3
Ventilation frequency per min (cycle/min)	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.1
Inhalation volume per one ventilation (ml/cycle/kg)	59.0 ± 20.3	95.8 ± 26.4
Inhalation volume per one inhalation (ml/stroke/kg)	12.8 ± 3.3	9.8 ± 1.8
Exhalation volume per one ventilation (ml/cycle/kg)	58.4 ± 33.	95.5 ± 20.0
Ventilation volume per min (ml/min/kg)	35.8 ± 10.7	67.5 ± 18.8

Values show mean and standard deviation.

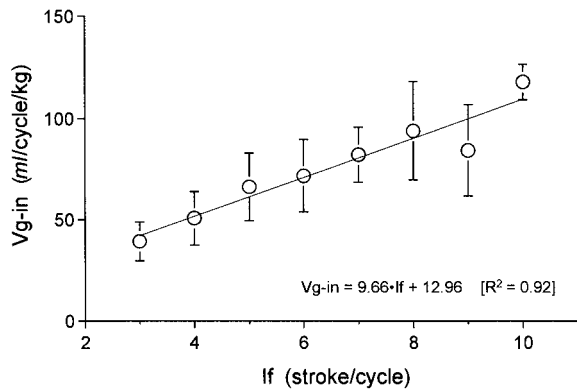


Fig. 6. Relationship between inhalation frequency per one ventilation (If) and inhalation volume per one ventilation (Vg-in) in a sea cucumber, *M. roretzi*. Circles and vertical lines show the mean and standard deviation, respectively.

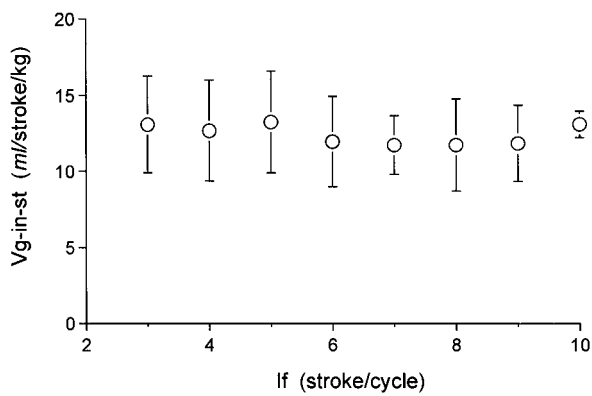


Fig. 7. Relationship between inhalation frequency per one ventilation (If) and inhalation volume per one inhalation (Vg-in-st) in a sea cucumber, *M. roretzi*. Circles and vertical lines show the mean and standard deviation, respectively.

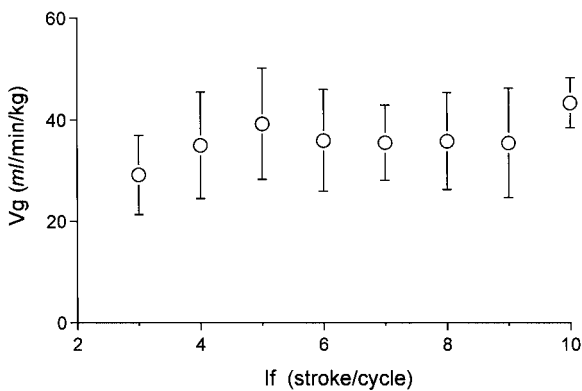


Fig. 8. Relationship between inhalation frequency per one ventilation (If) and ventilation volume per minute (Vg) in a sea cucumber, *M. roretzi*. Circles and vertical lines show the mean and standard deviation, respectively.

換水周期での吸入水量 (Vg-in) と排出水量 (Vg-ex) の関係を見るとFig. 9 に示したように、Vg-inが大きな値を示した次のVg-exは必ずしも大きな値を示すことはなく、小さな値を示した次に大きな値を示す場合などまちまちで (Fig. 9), 両者の間には一定の関係が認められなかった (Fig.10)。

4 考 察

Crozier³⁾ は、ナマコの換水は吸入を数回行った後に排出を1回行うのを1周期として繰り返すとしている。山内⁵⁾ は、肉眼による観察によって海底上に生息する種と砂に潜るものではこのような換水に差違が無いことを報告している。同様に、Brown and Shick⁴⁾ は、呼吸室の水面の動き

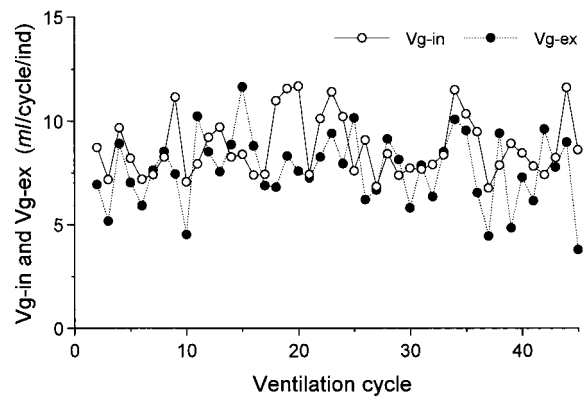


Fig. 9. Changes of the inhalation volume (Vg-in) and exhalation volume (Vg-ex) with the ventilation in a sea cucumber, *M. roretzi*.

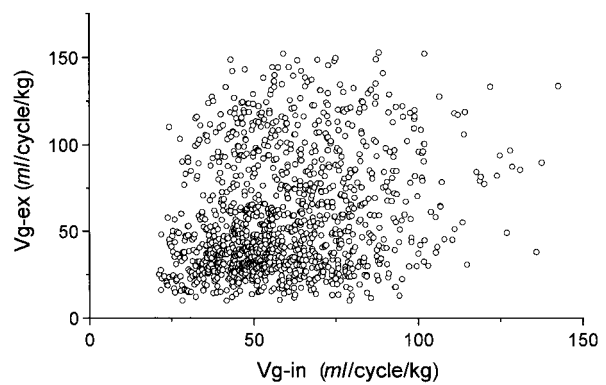


Fig.10. Relationship between inhalation volume per one ventilation (Vg-in) and exhalation volume per one ventilation (Vg-ex) at the same cycle of ventilation in a sea cucumber, *M. roretzi*.

をキモグラフで記録することによって、岩礁の上に生息する *Cucumaria frondosa* と底泥に潜る種である *Sclerodactyla briareus* では換水に差異が無いことを報告している。電磁血流計を用いた本研究の結果でも、底泥に潜入して生息するコモイモナマコは海底上に生息するマナマコ⁽⁶⁻⁸⁾ と換水に差違が認められなかった。これらのことから、ナマコ類での呼吸樹での換水は、基本的には生息域に関係なく数回の吸入と1回の排出を1周期として行っていると考えられる。

一方、1換水周期での吸入回数は、山内⁽⁵⁾ は、パラオ沿岸のナマコ8種を総合すると1~23回を示し、同一種でも体の状態によって変化するが、砂に潜って生息する3種は海底上に生息する5種よりも回数が少ない傾向を示し、砂中で1回、砂上で3回が最も多かったと報告している。その理由として、1換水周期での吸入水量と排出水量が少なければ胴体の運動の差が小となり、換水運動により体にかぶさった砂が移動する率はそれだけ減少するとしている。また、海底上に生息する種の例としては、*Holothuria grisea* は約10回⁽⁹⁾、*Stichopus* sp. は8~9回⁽¹⁰⁾、マナマコは10.3回⁽⁶⁾ と報告されている。本実験の結果から、海底に潜入して生息するコモイモナマコは、海底上に生息するそれらの種よりも吸入回数が少なく、4回の場合が最も多く、平均4.6回を示した。これらのことから、コモイモナマコは海底に潜入して生息する種特有の吸入回数の少ない換水を行っていることが明らかとなった。

コモイモナマコの換水をマナマコと比較すると、1換水周期での吸入時間 (58.6sec/cycle) および呼吸数 (0.6 cycle/min) はともにマナマコ (79.6sec/cycle, 0.7 cycle/min) よりも小さい値を示した。また、1換水周期での吸入水量 (59.0ml/cycle/kg)、排出水量 (58.4ml/cycle/kg) および換水量 (35.8ml/min/kg) はともにマナマコ (95.8ml/cycle/kg, 95.5ml/cycle/kg, 67.5ml/min/kg) よりも小さい値を示した (Table 1)。一方、コモイモナマコの1回の吸入時間と排出時間 (12.7sec/stroke, 14.5sec/stroke) はともにマナマコ (7.8sec/stroke, 10.6sec/stroke) よりも大きく、1回の吸入水量 (12.8ml/stroke/kg) もマナマコ (9.8ml/stroke/kg) よりも大きい値を示した。これらのことから、コモイモナマコはマナマコに比べて、単位時間に呼吸樹を換水する水量が少なく、しかも1換水周期での1回の吸入および排出をとともにゆっくりと大きく行っていることが明らかとなった。これらの特色は、1換水周期での吸入回数、吸入水量および排出水量を小さくすると同時に1換水周期での1回の吸入と排出をとともにゆっくり

と行うことによって、山内⁽⁵⁾ も推測しているように、砂泥中での体の周囲の砂泥の動きを小さくして、呼吸樹からの海水の排出の際の体の体積の減少に伴って移動した砂泥を呼吸樹からの海水の吸入に伴う体の体積の増加分を押し戻すのに要するエネルギーを出来るだけ小さくする適応を示したものと考えられる。

吸入回数は換水周期によって変化し、これに伴って1換水周期での吸入時間 (T_{in}) は吸入回数 (I_f) の増加に伴って直線的に増大した。しかし、そのような増大によって、呼吸数 (V_f) は直線的に減少した。1換水周期での吸入水量 (V_{g-in}) は吸入回数 (I_f) の増加に伴って直線的に増大したが、1回の吸入量 ($V_{g-in-st}$) はほぼ一定で、呼吸数 (V_f) が減少したことによって、換水量 (V_g) は吸入回数 (I_f) が増加してもほぼ一定していた。これらのことから、コモイモナマコは、マナマコ⁽⁶⁾ と同様に、1換水周期での吸入回数が増加しても単位時間で呼吸樹を換水させる水量を一定に維持していることが明らかとなった。このような調節は、1換水周期での吸入回数を変化させて換水量を常に一定に維持することによって、体の大きさを変化させた場合でも酸素摂取に必要な水量の換水を行うために機能していると考えられる。

しかし、1換水周期での吸入水量 (V_{g-in}) と排出水量 (V_{g-ex}) は必ずしも一致していない。このことから、換水周期毎に呼吸樹内の海水が全部入れ替わらず、死腔として呼吸樹内に水を残していることが明らかである。また、吸入水量が大きい後に小さい排出水量を示す場合が再々認められることから、コモイモナマコはかなり頻繁に体の大きさを変化させ、これに伴って呼吸樹の容積を変化させていると考えられる。

以上のことから、本研究は、船上で行った実験ではあるが、コモイモナマコの呼吸樹での換水の特色を明らかにすることができたと判断した。同様に、他のナマコ類の呼吸樹での換水についても、長期航海の途中あるいは採集後実験室に持ち帰ることが出来ない場合でも船上で実験を行うことが十分可能であると考えられる。また、コモイモナマコについては、砂泥中に潜入した状態での換水についても調べる必要があると考えている。

5 要 約

コモイモナマコの換水を換水量の直接測定法を用いて船上で調べた。換水は、1回の排出と3~10回 (平均4.6回) の吸入を一周期として繰り返していた。1換水周期で

の吸入時間 (T_{in}), 吸入水量 (V_{g-in}) と排出水量 (V_{g-ex}) はそれぞれ58.6sec/cycle, 59.0ml/cycle/kg, 58.4ml/cycle/kg, 1回の吸入時間, 排出時間と吸入水量 ($V_{g-in-st}$) はそれぞれ12.7sec/stroke, 14.5sec/stroke, 12.8ml/stroke/kgを示した。呼吸数 (V_f) と換水量 (V_g) はそれぞれ0.6cycle/min, 35.8ml/min/kgを示した。 T_{in} は1換水周期での吸入回数 (I_f) の増加に伴って直線的に増大し, V_f は直線的に減少した。 V_{g-in} は V_f の増加に伴って直線的に増大したが, $V_{g-in-st}$ がほぼ一定で, V_f が減少したことによって, V_g はほぼ一定であった。しかし, 換水周期毎の V_{g-in} と V_{g-ex} は一致していなかった。以上のことから, コモンイモナマコはマナマコと同様に1換水周期での吸入回数が増加しても単位時間に呼吸樹を換水させる水量を一定に維持しているが, マナマコに比べて単位時間に呼吸樹を換水させる水量が少なく, しかも1回の吸入と排出をゆっくりと大きく行うことが明らかとなった。

謝 辞

本研究を行うに当たり, 機関の振動および機関や種々の機器からのノイズに関する有意義なご教示, ご助言を頂いた独立行政法人水産大学校耕洋丸機関長安成幹男氏, 機関専任教員小松和也氏, 二通 (通信士) 細川哲樹氏に深く感謝いたします。標本の採集や畜養に関して多大なるご尽力を頂いた耕洋丸甲板部および機関部の皆様に篤くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 小黒千足(1974): ナマコ(海鼠)類, 動物系統分類学第8巻(中)棘皮動物, 内田亨監修, 中山書店, 東京, pp. 333-384.
- 2) 椎野季雄(1969): 水産無脊椎動物学, 培風館, 東京, pp. 285-309.
- 3) Crozier, W. J.(1916): The rhythmic pulsation of the cloaca of holothurians. *J. exp. Zool.*, **20**, 297-356.
- 4) Brown, W. I. and J. M. Shick (1979): Bimodal gas exchange and the regulation of oxygen uptake in holothurians. *Biol. Bull.*, **156**, 272-288.
- 5) 山内年彦(1941): パラオ産有用ナマコ類に関する研究, 科学南洋, **2**, 132-148.
- 6) 山元憲一・半田岳志・茅野昌大・藤本健治・原田裕子・丸岡詳治(2002): マナマコの呼吸樹での換水運動の測定, 水産増殖, **50**, 183-188.
- 7) 山元憲一・半田岳志・藤本健治(2002): マナマコのアカ・アオ・クロの呼吸樹での換水運動からみた低塩分に対する抵抗性の違い, 水産増殖, **51**, 321-326.
- 8) 山元憲一・半田岳志・藤本健治(2002): 体色の異なるマナマコの換水運動に及ぼす水温の影響, 水産増殖, **53**, 67-74.
- 9) Pantin, C. F. A. and P. Sawaya.(1953) Muscular action in *Holothuria grisea*. *Zoologia (S. Paulo)*, **18**, 51-59.
- 10) Crozier, W. J.(1920): Note on some problems of adaptation. 3. The volume of water involved in the cloacal pumping of holothurians (*Stichopus*). *Biol. Bull.*, **39**, 130-132.
- 11) Robertson, D. A.(1972): Volume changes and oxygen extraction efficiency in the holothurian, *Stichopus mollis* (Hutton). *Comp. Biochem. Physiol.*, **43A**, 795-800.
- 12) Newel, R. C. and W. A. M. Courtney (1965): Respiratory movements in *Holothuria forskali* Delle chiaje. *J. exp. Biol.*, **42**, 45-57.