

イタボガキの餌投与時の鰓換水

山元憲一^{1†}, 半田岳志¹, 栩野元秀²

Ventilation during Feeding in the Densely Lamellated Oyster *Ostrea denselamellosa*

Ken-ichi Yamamoto^{1†}, Takeshi Handa¹ and Motohide Tochino²

Abstract : Ventilation volume and oxygen uptake both during feeding *Chaetoceros gracilis* and during fasting were measured in the densely lamellated oyster *Ostrea denselamellosa*. At a feed density of 20,000 cells/ml, the ventilation volume at 16°C (5.57 l/min/kgWW, per wet weight of soft part of body) was about seven times that during fasting (0.84 l/min/kgWW) at 16°C. The ventilation volumes during feeding at 22°C (12.08 l/min/kgWW) and at 29°C (13.34 l/min/kgWW) increased to about 15 times those during fasting at 22°C (0.83 l/min/kgWW) and at 29°C (0.89 l/min/kgWW), respectively. At 16°C, the oxygen uptake during feeding (0.540 ml/min/kgWW) was almost similar to that during fasting (0.466 ml/min/kgWW). The oxygen uptake during feeding at 22°C (0.940 ml/min/kgWW) and at 29°C (1.070 ml/min/kgWW) were two times those during fasting 22°C (0.480 ml/min/kgWW) and at 29°C (0.530 ml/min/kgWW), respectively.

Key words : Densely lamellated oyster, Feeding, Ventilation, Oxygen uptake

二枚貝では、鰓の繊毛運動で水流を起こし、殻および外套膜の開閉や開く角度、鰓を通過させる水の抵抗などを総合して鰓を通過させる水量（換水量）を調節していると考えられている¹⁻⁶。そのため、二枚貝での換水量の調節は、代謝量の変化を伴わないと考えられている。タイラギ *Atriana* (*Servatrana*) *lischkeana* やアコヤガイ *Pinctada fucata martensii* では、*Chaetoceros gracilis*（以下、餌と略記する）に遭遇すると代謝量の増加を伴わずに換水量を増加させる^{7,8}。マガキ *Crassostrea gigas* では、餌に遭遇すると換水量を増加させるとともに、酸素摂取量も増加させる⁹。

イタボガキ *Ostrea denselamellosa* は、瀬戸内海に多く生息し、食用とされていたが、昭和29年に過去最高の822トンが漁獲されて以来減少し、昭和60年の2トンを最後に漁獲統計から姿を消している¹⁰。そこで、香川県では、平成14年より資源復活に向けて、種苗生産が試みられている¹⁰。

本研究では、イタボガキの増養殖を図るための生理特性を明らかにしておく目的で、タイラギ、アコヤガイおよびマガキの場合と同様に餌を投与して、その前後の換水運動の変化を調べた。

材料および方法

実験には、香川県の水産試験場より入手した殻長75.4 ± 5.5mm（平均値 ± 標準偏差、以下同様に表す）、殻高65.7 ± 5.4mm、殻幅21.3 ± 3.8mm、体重55.6 ± 12.8g、軟体部の湿重量11.1 ± 2.4g、軟体部の乾燥量2.07 ± 0.60gのイタボガキ60個体を用いた。イタボガキは、マガキの場合⁹と同様に、入手後、殻の付着物を除去し、殻に手術を施して屋内に設置したFRP水槽（170x 78x 40cm）に浮かべた籠（46x 32x 16cm）に収容した。飼育は、実験で設定した

2011年4月26日受付。 Received April 26, 2010.

¹水産大学校生物生産学科（Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University）

²香川県水産研究所（Kagawa Prefectural Fisheries Experimental Station, 75-5 Yashima higashimachi, Takamatu 761-0111, Japan）

[†]別刷り請求先（corresponding author）: yamagenk@fish-u.ac.jp

水温 ($16.3 \pm 0.6^\circ\text{C}$, $21.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ および $28.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$) ならびに塩分 35psu で 1 ヶ月以上, 生海水を注入 ($50\text{l}/\text{min}$) して行った。以降, 水温 $16.3 \pm 0.6^\circ\text{C}$ で行った実験は 16°C の場合, $21.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ は 22°C の場合および $28.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ は 29°C の場合と表す。餌は野外の 5ton 水槽 2 個で培養した植物プランクトン (優占種は *Pyramimonas* sp.) を前記の注入水中に連続投与 ($0.4\text{l}/\text{min}$) した¹¹⁾。手術は, イタボガキの外套皺襞部の殻に深さ約 10mm の V 型の切り込みを入れた。

実験は, アコヤガイやマガキでの装置^{8,9)}と同様のものを用いて, 餌の投与前後の換水量および酸素摂取量の変化を調べた。イタボガキを 3 日間絶食させた後, 各水温で 20 例ずつ測定した。呼吸室 ($19 \times 19 \times 19\text{cm}$) にイタボガキを設置して 14 時間以上経過した後, 呼吸室への餌の注入を開始し, その前後の換水量の変化を連続記録した⁷⁻⁹⁾。呼吸室へは, 濾過海水 $1\text{l}/\text{min}$ を流入させ, 同室を通過させた後, 流し捨てとした。濾過海水は, 化繊綿を詰めた筒, 次いで $0.5\mu\text{m}$ のフィルター (Model III, ORGANO) の順に生海水を通過させて作成した。餌 ($1.0 \times 10^8\text{ cells}/\text{ml}$, ヤンマー) は濾過海水で希釈し, 定量送液ポンプ (PST-050, IWAKI) で呼吸室への流入水中に注入して, 濃度 $20,000\text{ cells}/\text{ml}$ で連続投与した。酸素摂取量は, Fig. 1 に示したように, 餌の投与前および投与後に換水量が増加して値がほぼ一定した後に, それぞれ 5-6 回ずつ約 10 分間隔で外套腔への吸入水とそこからの排出水を注射筒 (1ml) で採水し, 酸素分圧を測定して算出した。酸素分圧は酸素計 (OM-200, Cameron instrument) を用いて測定した。

測定の終了後, 殻腔内の海水を排出させ, 約 1 時間殻の表面を乾燥させて体重 (TW, kg) を計測した後, 軟体部を摘出して軟体部の湿重量 (WW, kg) を計測した。次の

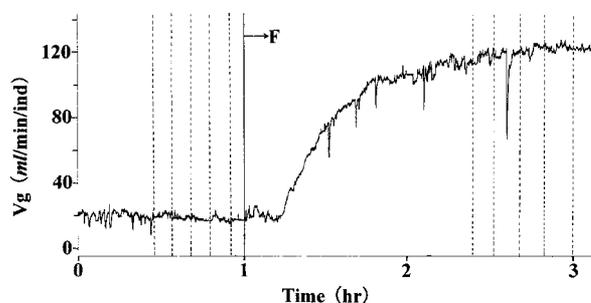


Fig. 1. Ventilation volume (V_g) in the densely lamellated oyster *Ostrea denselamellosa* recorded continuously. Broken lines show the time points for sampling the inhalant and exhalant water into/from the mantle cavity with syringes. F indicates the starting time of feeding *Chaetoceros gracilis* ($20,000\text{ cells}/\text{ml}$).

で, これを 105°C で 24 時間乾燥させて軟体部の乾燥重量 (DW, kg) を計測した。

換水量

換水量は, 電磁血流計のプロープ (内径 1.0cm , $1.0\text{l}/\text{min}$ 測定用, Model FF-100T, 日本光電) を換水量測定用の箱に取り付け, 電磁血流計 (MFV-3200, 日本光電) で測定し, これを記録計 (MacLab/8, ADI) を用いて毎秒 4 回の読み込み速度で連続記録した⁷⁻⁹⁾。換水量測定用の箱には, 楕円形 ($12 \times 5\text{cm}$) で高さ 3.5cm のものを用い, 約 $55 \times 8\text{mm}$ に中央を切り抜いて窓を開けたゴムの薄膜を設置した。

換水量 (V_g) は, 連続記録 (Fig. 1) をもとに各採水ごとに採水開始前 5 分間を平均し, 体重当たりの値 ($\text{l}/\text{min}/\text{kg TW}$), 軟体部の湿重量当たりの値 ($\text{l}/\text{min}/\text{kg WW}$) および軟体部の乾燥重量当たりの値 ($\text{l}/\text{min}/\text{kg DW}$) で表した。

酸素摂取量

酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}) は, 換水量 (V_g), 外套腔への吸入水の酸素分圧 (P_{I, O_2} , mmHg) および外套腔からの排出水の酸素分圧 (P_{E, O_2} , mmHg) を用いて, 次の式から計算し, 体重当たりの値 ($\text{ml}/\text{min}/\text{kg TW}$), 軟体部の湿重量当たりの値 ($\text{ml}/\text{min}/\text{kg WW}$) および軟体部の乾燥重量当たりの値 ($\text{ml}/\text{min}/\text{kg DW}$) として表した⁷⁻⁹⁾。

$$\dot{V}_{O_2} = V_g / 1000 \cdot (P_{I, O_2} - P_{E, O_2}) \cdot \text{Co}_2 / \text{Po}_2$$

なお, Co_2 (溶存酸素量, ml/l) と Po_2 (酸素分圧, mmHg) は餌の投与前に呼吸室への流入水を採水して, それぞれ Winkler 法と前記の酸素計で測定した値である。

統計解析

それぞれの水温における餌を投与前後の値は, Unpaired t -test を用いて検定を行った ($P < 0.05$)。

結果

換水量は, 餌の投与前には 16°C では $0.84 \pm 0.66\text{l}/\text{min}/\text{kg WW}$ ($0.16 \pm 0.14\text{l}/\text{min}/\text{kg TW}$, $4.64 \pm 3.69\text{l}/\text{min}/\text{kg DW}$), 22°C では $0.83 \pm 0.55\text{l}/\text{min}/\text{kg WW}$ ($0.14 \pm 0.09\text{l}/$

min/kg TW, 5.99 ± 4.62 l/min/kg DW), 29°C では 0.89 ± 0.49 l/min/kg WW (0.16 ± 0.09 l/min/kg TW, 6.30 ± 3.60 l/min/kg DW) を示していた (Fig. 2)。餌を投与した場合, 16°C では 5.57 ± 2.50 l/min/kg WW (1.12 ± 0.58 l/min/kg TW, 30.40 ± 13.71 l/min/kg DW) と投与前の約7倍に, 22°C では 12.08 ± 3.57 l/min/kg WW (2.03 ± 0.67 l/min/kg TW, 73.37 ± 25.63 l/min/kg DW) と投与前の約15倍に, 29°C では 13.34 ± 4.78 l/min/kg WW (2.41 ± 0.93 l/min/kg TW, 93.70 ± 36.10 l/min/kg DW) と投与前の約15倍に増加した (Fig. 2)。

酸素摂取量は, 餌の投与前には16°Cでは 0.466 ± 0.367 ml/min/kg WW (0.086 ± 0.078 ml/min/kg TW, 2.56 ± 2.14 ml/min/kg DW), 22°Cでは 0.480 ± 0.218 ml/min/kg WW (0.079 ± 0.037 ml/min/kg TW, 3.36 ± 1.57 ml/min/kg DW),

29°C では 0.530 ± 0.330 ml/min/kg WW (0.095 ± 0.058 ml/min/kg TW, 3.74 ± 2.37 ml/min/kg DW) を示していた (Fig. 2)。餌を投与した場合, 16°Cでは 0.547 ± 0.213 ml/min/kg WW (0.110 ± 0.050 ml/min/kg TW, 3.00 ± 1.23 ml/min/kg DW) となり, 投与前と有意な差は認められなかったが ($t=0.850$, $P>0.1$, Fig. 2), 22°Cでは 0.940 ± 0.284 ml/min/kg WW (0.157 ± 0.049 ml/min/kg TW, 5.67 ± 1.91 ml/min/kg DW) となり, 投与前の約2倍に, 29°Cにおいても 1.070 ± 0.310 ml/min/kg WW (0.193 ± 0.059 ml/min/kg TW, 7.347 ± 2.32 ml/min/kg DW) と, 投与前の約2倍に増加した (Fig. 2)。

考 察

餌を投与した場合, リシケタイラギは換水量を38倍, アコヤガイとマガキは2.6倍増加させる⁷⁻⁹⁾。イタボガキでも餌を投与すると, リシケタイラギよりも小さいが, アコヤガイやマガキよりも大きな増加(7~15倍)を示した。二枚貝は鰓の繊毛運動で水流を起こして換水を行い, 外套膜の開閉や外套膜を開く角度などを総合して換水量を調節している¹⁻⁶⁾。リシケタイラギおよびアコヤガイでは, 餌を投与すると酸素摂取量の増加を伴わずに換水量を増加させることが報告されている^{7,8)}。イタボガキでも16°Cの場合には, 同様に餌を投与すると酸素摂取量の増加を伴わずに換水量を増加させた。これらのことから, 二枚貝での換水量の調節(増減)は, 代謝量の変化を伴わずに行っていると考えられる。

餌を投与した場合の換水量は, 22°Cの場合には16°Cの約2倍大きな値を示したが, 29°Cに上昇しても22°Cとほぼ同じ値を示していた。鰓の繊毛運動の活動度は水温の上昇に伴って増大し, リシケタイラギでは30.6~32.0°C, アコヤガイでは30.0~35.0°C, マガキでは35.0~37.9°C, クマサルボウ *Scapharca globosa ursuss*では31°C, ヒオウギガイ *Chlamys nobilis*では37.1°C, アカガイ *Scapharca broughtonii*では30.1°Cで最大を示すことが報告されている^{6,12-16)}。これらのことから, イタボガキでも鰓の繊毛運動の活動度は, 22°Cよりも29°Cのほうが増大していると考えられる。鰓を通過させる水量は, 鰓の繊毛の活動度と正の相関があることが知られている⁵⁾。また, 二枚貝では, 鰓の繊毛運動で起こした水流で殻腔内に取り込んだ直径0.5 μm以上の懸濁物は全て, それ以下の直径のものも鰓糸の表皮から分泌された粘液に絡めて鰓で捕捉することが知られている⁵⁾。

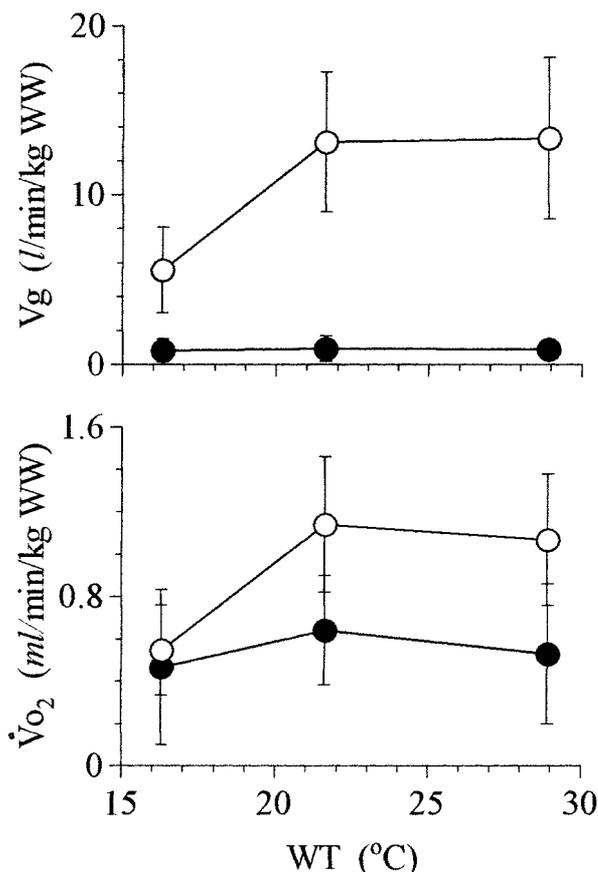


Fig. 2. Changes in the ventilation volume (V_g) and the oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}) during feeding *C. gracilis* (20,000 cells/ml) at $16.3 \pm 0.6^\circ\text{C}$, $21.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ and $28.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ in the densely lamellated oyster. Circles and vertical lines show mean and standard deviation. Open circle, during feeding; closed circle, during feeding; WW, wet weight of soft body.

これらのことから、イタボガキは、餌に遭遇すると水温が22℃に上昇するまでは換水量を増加させて捕食量を増加させていると考えられる。しかし、鰓の繊毛運動の活動度からみると29℃に上昇すると22℃よりも換水能力が増大していると考えられるが、繊毛の調節による換水量を増大させる機能には限界があり、29℃に上昇しても22℃とほぼ同じ換水量を示したと考えられる。従って、22℃から29℃に水温が上昇しても、捕食量は変わらないと推測される。

一方、マガキは餌を投与すると換水量を2.6倍増加させ、酸素摂取量も2.6倍増加させる⁹⁾。イタボガキでも22℃および29℃の場合には、換水量を15倍増加させ、酸素摂取量も2倍増加させた。潮干帯に生息する二枚貝類は、潮汐周期に従って周期的に消化活動を行っていることが知られている¹⁷⁻²³⁾。Morton²⁴⁾は、ヨーロッパヒラガキ*Ostrea edulis*で、満潮時に捕食を行いこれに伴って直ちに晶体の溶解が始まり、中腸腺細管での粒子の食作用による細胞内取り込みが行われ、干潮時までには中腸腺細管が崩壊し、次の満潮時までには晶体および中腸腺細管が再生することを観察している。このように短時間で消化管の様相が変化することから、イタボガキでの捕食時の酸素摂取量の増加は、マガキ⁹⁾と同様に主に消化に要する代謝量の増大に伴うものであると推測される。また、前記の一連の消化の速度は水温の上昇に伴って増大すると考えられることから、餌の投与後換水量が増加したが酸素摂取量は変化しなかった16℃の場合と酸素摂取量が増加した22℃および29℃の場合との相違は、水温上昇に伴う消化速度の違いに起因していると考えられる。

文 献

- 1) Hopkins A E : Experiments on the feeding behavior of the oyster *Ostrea gigas*. *J exp Biol*, **64**, 469-494 (1933)
- 2) Jørgensen C B : Efficiency of particle retention and rate of water transport in undisturbed lamellibranchs. *J Cons Int Explor Mer*, **26**, 94-116 (1960)
- 3) Jørgensen C B, Larsen P S, Mohlenberg F, Riisgard H U : The bivalve pump : properties and modelling. *Mar Ecol Prog Ser*, **45**, 205-216 (1988)
- 4) Silvester N R : Hydrodynamics of flow in *Mytilus* gills. *J exp mar Biol Ecol*, **120**, 171-182 (1988)
- 5) Winter J E : A review on the knowledge of suspension-feeding in lamellibranchate bivalves, with special reference to artificial aquaculture systems. *Aquaculture*, **13**, 1-33 (1978)
- 6) 山元憲一 : アコヤガイの呼吸に及ぼす水温の影響. 水産増殖, **48**, 47-52 (2000)
- 7) 山元憲一, 半田岳志, 茅野直登 : リシケタイラギの摂餌時における換水の変化. 水産増殖, **55**, 381-385 (2007)
- 8) 山元憲一, 半田岳志, 松原利晃 : アコヤガイの餌投与に伴う鰓換水運動の変化. 水産増殖, **58**, 447-451 (2010)
- 9) 山元憲一, 半田岳志 : マガキの餌投与に伴う鰓換水運動の変化. 水産増殖, **59**, 203-206 (2011)
- 10) 山賀賢一 : イタボガキの種苗生産・養殖試験. 香川水試事報, **6**, 64-68 (2006)
- 11) 山元憲一, 半田岳志, 中村真敏, 橘川和正, 北 靖史, 滝本真一, 西川 智 : アコヤガイの呼吸に及ぼすオゾン処理海水の影響. 水産増殖, **47**, 241-248 (1999)
- 12) 山元憲一, 田中 実, 田中直樹, 神菌真人, 秋本恒基 : マガキ, クマサルポー, タイラギの鰓のほふく速度に及ぼす低酸素と水温の影響. 水産増殖, **41**, 435-438 (1993)
- 13) 山元憲一, 安達 智, 田村征生, 荒水多希, 河邊 博 : ムラサキイガイ, タイラギ, アコヤガイ, ヒオージガイ, マガキの鰓の繊毛運動に及ぼす低酸素と水温上昇の影響. 水大校研報, **44**, 137-142 (1996)
- 14) 山元憲一, 田村征生, 栩野元秀 : アカガイのろ水量と鰓繊毛運動に及ぼす水温の影響. 水大校研報, **45**, 95-101 (1996)
- 15) 山元憲一, 半田岳志 : リシケタイラギの換水に及ぼす水温の影響. 水産増殖, **55**, 71-75 (2007)
- 16) 山元憲一, 半田岳志 : マガキの鰓換水に及ぼす水温の影響. 水大校研報, **60**, 61-64 (2011)
- 17) Langton R W : Synchrony in the digestive diverticula of *Mytilus edulis* L. *J mar biol Ass U K*, **55**, 221-230 (1975)
- 18) Langton R W : Digestive rhythms in the mussel *Mytilus edulis*. *Mar Biol*, **41**, 53-58. (1977)
- 19) Langton R W and Gabbott P A : The tidal rhythm of extracellular digestion and the response to feeding in *Ostrea edulis*. *Mar Biol*, **24**, 181-187 (1974)
- 20) Mathers N F : The effects of tidal currents on the

- rhythm of feeding and digestive cycles in *Venerupis decussata* and *Chlamys varia*. *J exp mar Biol Ecol*, **24**, 271-283 (1976)
- 21) Morton B S : The tidal rhythm and rhythm of feeding and digestion in *Cardium edule*. *J mar biol Ass U K*, **50**, 499-512 (1970)
- 22) Morton B S : A note on the cytological structure and function of the digestive diverticula of *Macoma balthica* correlated with the rhythm of the tide. *Malacol Rev*, **3**, 115-119 (1970)
- 23) Owen G : Lysosomes, peroxisomes and bivalves. *Sci Prog, Oxf*, **60**, 299-318 (1972)
- 24) Morton B S : The diurnal rhythm and tidal rhythm of feeding and digestion in *Ostrea edulis*. *Biol J Linn Soc*, **3**, 329-342 (1971)

