

## サザエの鰓での酸素摂取に及ぼす水温の影響

山元憲一<sup>1†</sup>, 半田岳志<sup>1</sup>, 嶋田 誠<sup>2</sup>

### Effect of Water Temperature on Oxygen uptake at the gill in the top shell, *Turbo cornutus* (Gastropoda : Prosobranchia : Turbinidae)

Ken-ichi Yamamoto<sup>1†</sup>, Takeshi Handa<sup>1</sup> and Makoto Shimada<sup>2</sup>

**Abstract** : In the top shell, *Turbo cornutus*, the effects of water temperature on the oxygen uptake at the gill and the oxygen transport with the blood were examined by measuring the amount of oxygen uptake, oxygen utilization (U), ventilation volume (Vg), oxygen partial pressure, oxygen concentration and oxygen saturation of aortic and venous blood, mean oxygen gradient across gill epithelium, oxygen transfer factor of the gill (To<sub>2</sub>), volume of cardiac output (Vh), oxygen utilization of the tissues (Ut). The top shell probably coped with the increase in a oxygen demand by the increases of U, Vg, To<sub>2</sub>, Vh Ut, when the metabolism increased by the rise of the water temperature.

**Key words** : Top shell ; Gastropoda ; Blood ; Gill ; Oxygen uptake ; Water temperature

### 緒 言

サザエ *Turbo cornutus* は西日本沿岸域での水産資源として最も重要な種類の一つである。しかし、資源量の増大を図ったり、蓄養や活魚輸送を行う際に必要な基礎的知見の一つである呼吸生理については、宇野<sup>1)</sup> が酸素摂取量を調べている他には、研究が見当たらない。

そこで、著者らは、サザエの酸素摂取と鰓纖毛運動に及ぼす水温の影響<sup>2)</sup>、酸素飽和海水中での安静状態にあるサザエの鰓における酸素摂取<sup>3)</sup>、サザエの酸素摂取に及ぼす水温および低酸素の影響<sup>4)</sup>、サザエの鰓での酸素摂取に及ぼす低酸素の影響<sup>5)</sup> について明らかにしてきた。本研究では、サザエの鰓における酸素摂取および血液による酸素運搬に及ぼす水温の影響について調べた。

### 材料および方法

実験には、山口県漁業協同組合連合会より購入したサザエ480個体を用いた。大きさは、殻高 $65.2 \pm 7.6$  mm (平均値±標準偏差値、以降同様に表す)、殻径 $54.4 \pm 4.0$  mm、

体重 $72.6 \pm 5.2$  gおよび肉質部の湿重量 $35.2 \pm 5.1$  gであった。サザエは、購入後直ちに殻の付着物を取り除き、200~350個体を水槽(200 l)に入れ、それぞれの実験水温に調節した海水を50 l/min注水した状態で、餌として緑藻や褐藻を毎日十分量与えて1か月以上飼育した。

実験は、鰓における酸素摂取および血液による酸素運搬に及ぼす水温の影響を明らかにするために、酸素摂取量、酸素利用率、血中酸素および心拍出量に関する測定を行った。実験は、飼育水温 $13.0 \pm 0.1$  °Cから3°Cずつ60分毎に上昇させた場合(以降、13°Cの場合と示す)と飼育水温 $28.0 \pm 0.1$  °Cから3°Cずつ60分毎に上昇あるいは個体を換えて3°Cずつ60分毎に下降させた場合(以降、28°Cの場合と示す)について行った。酸素摂取についての測定はそれぞれ40個体ずつの合計120個体、酸素利用率ではそれぞれ40個体ずつの合計120個体、血中酸素ではそれぞれ80個体ずつの合計240個体を用いて実験を行った。各測定は、24時間絶食させた後実験装置にサザエを入れ、15時間経過後の午前9時より開始した。呼吸室は、直径100 mm、高さ80 mmの透明なアクリル製の円筒形で、底より15 mmのところから5 mm目合いの網を張り、底に回転子を入れたもの2個を

2008年6月23日受付. Received June 23, 2008.

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

2 水産大学校水産学研究科 (Graduate School of Fisheries Science, National Fisheries University)

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

用いた。実験中の呼吸室からの流出水量 ( $F$ ,  $l/min$ ) は  $0.060 \sim 0.100 l/min$  とした。ただし、血中酸素に関する測定は、流出水量を  $1 l/min$  とした。

測定が終了した個体は、濾紙の上に蓋の部分を下にして約30分間置き、殻の表面を乾かしたのちに体重を計測し、沸騰している海水に1分間浸して肉質部を取り出し、殻および蓋の重量を計測し、体重から殻および蓋の重量を引いて肉質部の湿重量（以降、湿重量と示す）を求めた。

### 酸素摂取量

酸素摂取量 ( $V_{O_2}$ ) は、山元ら<sup>4,5)</sup> に準じて、サザエを入れていない呼吸室からの流出水の溶存酸素量 ( $C_{i, O_2}$ ,  $ml/l$ ) とサザエを入れている呼吸室からの流出水の溶存酸素量 ( $C_{e, O_2}$ ,  $ml/l$ ) を Winkler 法<sup>6)</sup> で測定し、 $V_{O_2} = (C_{i, O_2} - C_{e, O_2}) \cdot F$  より計算し、体重当たりの値 ( $ml/min/kg$  TW) および湿重量当たりの値 ( $ml/min/kg$  WW) で表した。両呼吸室からの流出水の採水は、次の段階への上昇あるいは下降開始10分前に行った。この時、サザエを入れていない呼吸室からの流出水については、酸素分圧も酸素計 (pH/Blood Gas Analyzer 213, Instrumentation Laboratory Inc.) で測定した。

### 酸素利用率

酸素利用率 ( $U$ , %) は、山元ら<sup>4,5)</sup> に準じて、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 ( $P_{e, O_2}$ ,  $mmHg$ ) を測定して、 $U = 100 \cdot (P_{i, O_2} - P_{e, O_2}) / P_{i, O_2}$  より求めた。これらの酸素分圧は、次の段階への上昇あるいは下降開始20分前から吸入水と排出水の順にそれぞれ10分間ずつ測定を行い、酸素分圧の値が安定した後の5分間の平均値を用いた。測定は、殻に開けた穴（直径4 mm）に酸素電極（ロング酸素電極125/05 L, ダイヤモンドジェネラル）の先端部を静かに押し当て、酸素計（ケミカルマイクロセンサー I, ダイヤモンドジェネラル）を介して記録計（MacLab/4, ADI）で連続記録して行った。この時、呼吸室への流入水については、下記の換水量を求める式で使用するために、溶存酸素量 ( $C_{i, O_2}$ ,  $ml/l$ ) を Winkler 法<sup>6)</sup> で、酸素分圧 ( $P_{i, O_2}$ ,  $mmHg$ ) を前記の酸素計で同時に測定した。換水量 ( $V_g$ ) は、先に述べた酸素摂取量 ( $V_{O_2}$ )、外套腔への吸入水の酸素分圧 ( $P_{i, O_2}$ ,  $mmHg$ )、外套腔からの呼出水の酸素分圧 ( $P_{e, O_2}$ ,  $mmHg$ )、呼吸室への流入水の溶存酸素量 ( $C_{i, O_2}$ ,  $ml/l$ ) および呼吸室への流入水の酸素分圧 ( $P_{i, O_2}$ ,  $mmHg$ ) を用いて、 $V_g = 1000 \cdot V_{O_2} / [100 \cdot (P_{i, O_2} - P_{e, O_2}) \cdot (C_{i, O_2} / P_{i, O_2})]$  より

計算し、体重当たりの値 ( $ml/min/kg$  TW) および湿重量当たりの値 ( $ml/min/kg$  WW) で表した。

### 血中酸素

血液の酸素分圧、酸素含量および酸素容量は、山元ら<sup>4,5)</sup> に準じて、入鰓動脈あるいは出鰓動脈に針を刺して  $0.56 \pm 0.11 ml$  を1個体から1回のみ採取して測定した。採血は、次の段階への上昇あるいは下降開始5分前に呼吸室の蓋を開けて行った。以降、入鰓動脈から採取した血液を静脈血、出鰓動脈から採取した血液を動脈血と表す。

酸素分圧は  $0.3 ml$  の血液を用いて酸素計 (pH/Blood Gas Analyzer 213, Instrumentation Laboratory Inc.) で、酸素含量の測定は、 $0.02 ml$  の血液を専用のマイクロシリッジに分注して LEXO<sub>2</sub>CON-K (Lexinton Instrument Corp.) で測定した。酸素容量は、残りの血液（約  $0.24 ml$ ）を梨型フラスコ（ $20 ml$ ）に移し、これを各実験水温のもとで水蒸気で飽和した空気を流して30分間酸素飽和させ、前記と同様にして酸素量を測定して求めた。

動脈血の酸素飽和度 ( $S_{a, O_2}$ , %) および静脈血の酸素飽和度 ( $S_{v, O_2}$ , %) は、それぞれの酸素含量 ( $C_{a, O_2}$  および  $C_{v, O_2}$ , Vol. %) および酸素容量 ( $O_2Cap$ , Vol. %) を用いて、 $S_{a, O_2} = 100 \cdot C_{a, O_2} / O_2Cap$  および  $S_{v, O_2} = 100 \cdot C_{v, O_2} / O_2Cap$  から計算した。鰓での水と血液間の平均酸素分圧差 ( $\Delta P_{O_2}$ ,  $mmHg$ )<sup>30,31)</sup> は、動脈血の酸素分圧 ( $P_{a, O_2}$ ,  $mmHg$ )、静脈血の酸素分圧 ( $P_{v, O_2}$ ,  $mmHg$ )、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呼出水の酸素分圧 ( $P_{e, O_2}$ ,  $mmHg$ ) を用いて、 $\Delta P_{O_2} = [(P_{i, O_2} + P_{e, O_2}) - (P_{a, O_2} + P_{v, O_2})] / 2$  から計算した。鰓での酸素摂取効率 ( $To_2$ )<sup>7,8)</sup> は、酸素摂取量 ( $V_{O_2}$ ) および  $\Delta P_{O_2}$  を用いて、 $To_2 = V_{O_2} / \Delta P_{O_2}$  から計算し、体重当たりの値 ( $ml/min/mmHg/kg$  TW) および湿重量当たりの値 ( $ml/min/mmHg/kg$  WW) で表した。動脈血の酸素を組織へ渡す割合 ( $U_t$ , %) は、動脈血の酸素含量 ( $C_{a, O_2}$ , Vol. %) および静脈血の酸素含量 ( $C_{v, O_2}$ , Vol. %) を用いて、 $U_t = 100 \cdot (C_{a, O_2} - C_{v, O_2}) / C_{a, O_2}$  より計算した。心拍出量 ( $V_h$ ) は、先に述べた酸素摂取量 ( $V_{O_2}$ )、動脈血の酸素含量 ( $C_{a, O_2}$ , Vol. %) および静脈血の酸素含量 ( $C_{v, O_2}$ , Vol. %) を用いて、 $V_h = 100 \cdot V_{O_2} / (C_{a, O_2} - C_{v, O_2})$  より計算し、体重当たりの値 ( $ml/min/kg$  TW) および湿重量当たりの値 ( $ml/min/kg$  WW) で表した。また、心拍出量 ( $V_h$ ) と酸素摂取量 ( $V_{O_2}$ ) から、酸素  $1 ml$  を組織へ渡すのに必要な心拍出量 ( $V_h / V_{O_2}$ ) を計算した。

## 結 果

酸素摂取量 ( $\dot{V}_{O_2}$ ) は、13.0℃の場合では13.0℃で $0.458 \pm 0.093 \text{ ml/min/kg WW}$  ( $0.211 \pm 0.042 \text{ ml/min/kg TW}$ ) を示し、水温の上昇に伴って増加して31℃で $1.829 \pm 0.219 \text{ ml/min/kg WW}$  ( $0.846 \pm 0.103 \text{ ml/min/kg TW}$ ) と最大を示し、さらに水温を上昇させると減少した (Fig. 1)。28.0℃の場合では28.0℃で $1.636 \pm 0.194 \text{ ml/min/kg WW}$  ( $0.764 \pm 0.077 \text{ ml/min/kg TW}$ ) を示し、水温の上昇に伴って増加して31℃で $2.071 \pm 0.298 \text{ ml/min/kg WW}$  ( $0.966 \pm 0.110 \text{ ml/min/kg TW}$ ) と最大を示し、水温を低下させると減少した (Fig. 1)。酸素利用率 (U) は、13.0℃の場合では13.0℃で $42.4 \pm 11.0\%$  を示し、水温の上昇に伴って増加して31℃で $85.8 \pm 7.6\%$  を示した (Fig. 2)。28.0℃の場合では28.0℃で $52.7 \pm 4.1\%$  を示し、水温の上昇に伴って増加して37℃で $82.9 \pm 7.3\%$  を示し、水温を低下させると減少した (Fig. 2)。換水量 ( $\dot{V}_g$ ) は、13.0℃の場合では13.0℃で $179 \text{ ml/min/kg WW}$  ( $82 \text{ ml/min/kg TW}$ ) を示し、水温の上昇に伴って増加して31℃で $529 \text{ ml/min/kg WW}$  ( $244 \text{ ml/min/kg TW}$ ) を示した (Fig. 3)。28.0℃の場合で

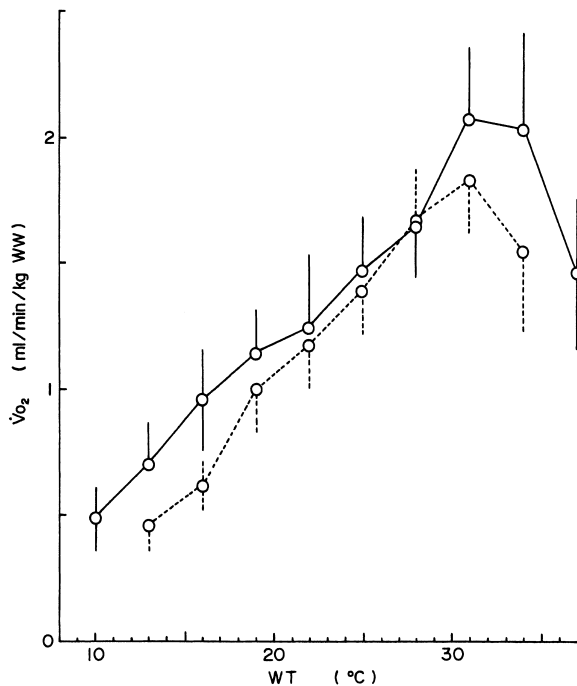


Fig. 1. Change of oxygen consumption ( $\dot{V}_{O_2}$ ) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . WW is wet weight, excluding shell and operculum. The results are shown in the mean values (circles) and the standard deviations (vertical lines).

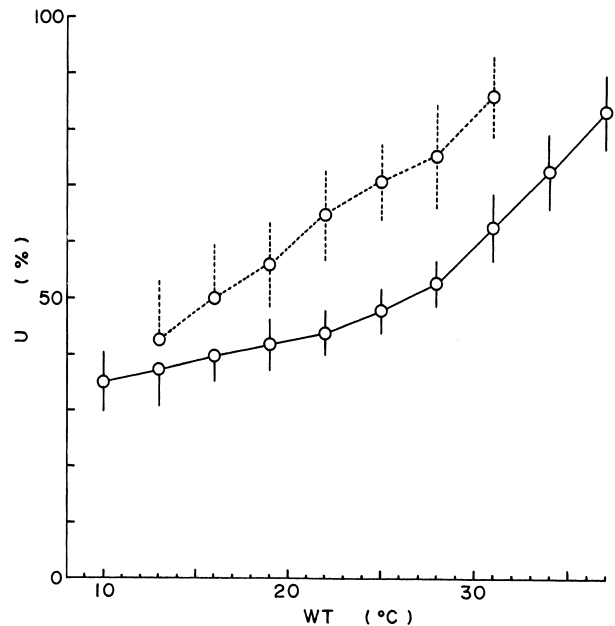


Fig. 2. Change of percent oxygen utilization (U) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . The results are shown in the mean values (circles) and the standard deviations (vertical lines).

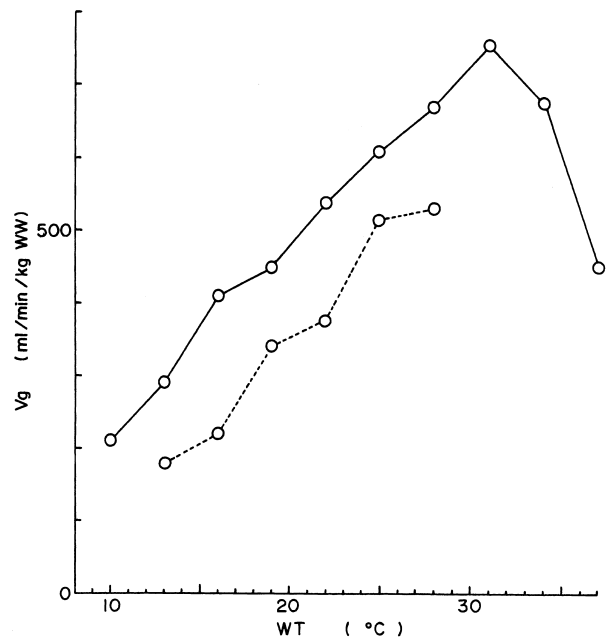


Fig. 3. Change of minute volume of the ventilation ( $\dot{V}_g$ ) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . WW is wet weight, excluding shell and operculum. The results are shown in the mean values (circles) and the standard deviations (vertical lines).

は、28.0°Cで670ml/min/kg WW (313ml/min/kg TW) を示し、水温の上昇に伴って増加して31°Cで756ml/min/kg WW (353ml/min/kg TW) を示し、水温を低下させると減少した (Fig. 3)。

動脈血の酸素分圧は、13.0°Cの場合では13.0°Cで95.0±13.6mmHgを示し、水温が上昇してもほぼ一定した値を示し、13.0°Cと25.0°Cの測定値の間には有意差が認められなかった ( $t=1.13$ ,  $P>0.05$ ) が、さらに水温を上昇させると減少した (Fig. 4)。28.0°Cの場合では28.0°Cで110.0±17.0mmHgを示し、水温の上昇に伴って減少し、水温を低下させると減少した (Fig. 4)。静脈血の酸素分圧は、13.0°Cの場合では13.0°Cで37.0±10.8mmHgを示し、水温の上昇に伴って減少した (Fig. 4)。28.0°Cの場合では28.0°Cで30.2±10.5mmHgを示し、水温の上昇に伴って減少し、水温を低下させると増大した (Fig. 4)。鰓での水と血液間の平均酸素分圧差 ( $\Delta P_{O_2}$ ) は、13.0°Cの場合では13.0°Cで53.6mmHgを示し、水温の上昇に伴って減少して25.0°Cで28.9mmHgを示し、さらに水温を上昇させると増大した (Fig. 5)。28.0°Cの場合では28.0°Cで44.0mmHgを示し、水温の上昇に伴って増大し、水温を低下させると減少して、水温25.0°Cで40.0mmHgを示し、さらに水温を低下さ

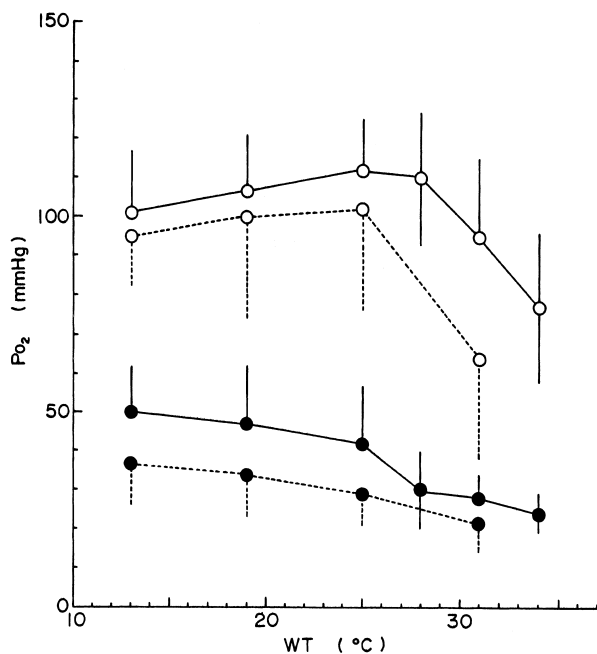


Fig. 4. Change of oxygen partial pressure ( $P_{O_2}$ ) into the blood in the efferent branchial vein (open circles) and in the afferent branchial vein (solid circles) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . The results are shown in the mean values (circles) and the standard deviations (vertical lines).

せると増大した (Fig. 5)。鰓での酸素摂取効率 ( $To_2$ ) は、13.0°Cの場合では13.0°Cで0.00855ml/min/mmHg/kg WW (0.00393ml/min/mmHg/kg TW) を示し、水温を上昇させると増大して25.0°Cで0.04783ml/min/mmHg/kg WW (0.02205ml/min/mmHg/kg TW) を示し、さらに水温を上昇させてもその大きな値を維持していた (Fig. 6)。28.0°Cの場合では、28.0°Cで0.03718ml/min/mmHg/kg WW (0.01740ml/min/mmHg/kg TW) を示し、水温を上昇させると増大して水温31.0°Cで0.04602ml/min/mmHg/kg WW (0.02147ml/min/mmHg/kg TW) を示し、水温を低下させると減少した (Fig. 6)。

動脈血の酸素含量は、13.0°Cの場合では13.0°Cで1.49±

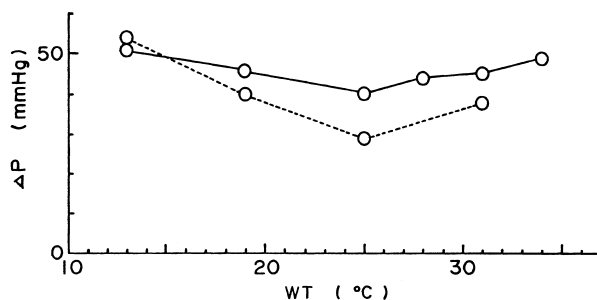


Fig. 5. Change of the oxygen gradient between blood and water across the gill epithelium ( $\Delta P$ ) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ .

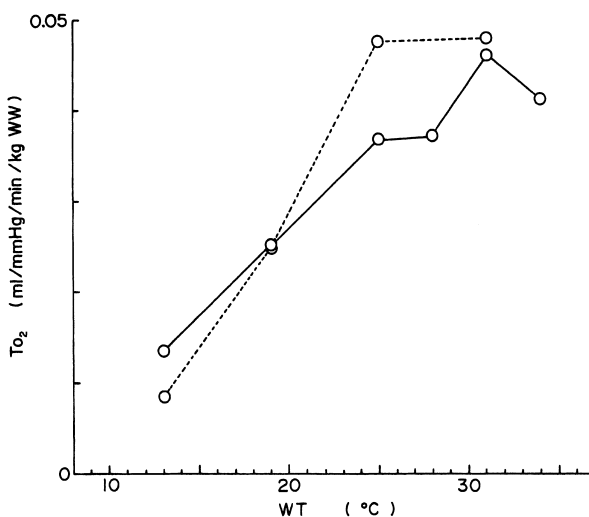


Fig. 6. Change of the oxygen transfer factor of the gills ( $To_2$ ) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. WW is wet weight, excluding shell and operculum. Solid and broken lines are the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$  and  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , respectively.

0.25vol.%を示し、水温の上昇に伴って減少した (Fig. 7)。28.0℃の場合では28.0℃で $1.16 \pm 0.17$ vol.%を示し、水温を上昇させてもほぼ一定した値を示したが、31.0℃より上昇させると減少した (Fig. 7)。一方、水温を低下させると減少して、28.0℃と13.0℃の間で有意な差が認められた ( $t=11.569, P<0.001$ ) (Fig. 7)。静脈血の酸素含量は、13.0℃の場合では13.0℃で $0.90 \pm 0.22$ vol.%を示し、水温の上昇に伴って減少した (Fig. 7)。28.0℃の場合では28.0℃で $0.51 \pm 0.15$ vol.%を示し、水温を上昇させてもほぼ一定した値を示し、水温を低下させると増加して、28.0℃と13.0℃の測定値の間には有意な差が認められた ( $t=7.158, P<0.001$ ) (Fig. 7)。動脈血の酸素飽和度は、13.0℃の場合では13.0℃で $75.1 \pm 6.7\%$ を示し、水温が上昇してもほぼ一定した値を示した ( $t=0.113, P>0.05$ ) が、さらに水温を上昇させると減少した (Fig. 8)。28.0℃の場合では28.0℃で $96.4 \pm 6.3\%$ を示し、水温の上昇に伴って減少したが、水温を低下させてもほぼ一定した値を示していた (Fig. 8)。静脈血の酸素飽和度は、13.0℃の場合では13.0℃で $55.6 \pm 8.9\%$ を示し、水温の上昇に伴って減少した (Fig. 8)。28.0℃の場合では28.0℃で $56.7 \pm 10.7\%$ を示し、水温の上昇に伴って減少したが、水温を低下させると増大した (Fig. 8)。動脈血中の酸素を組織へ渡す割

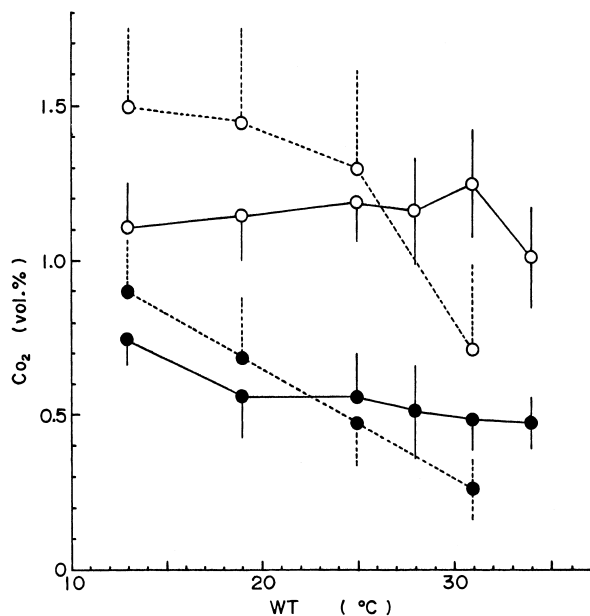


Fig. 7. Change of oxygen contents ( $Co_2$ ) into the blood in the efferent branchial vein (open circles) and in the afferent branchial vein (solid circles) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . The results are shown in the mean values (circles) and the standard deviations (vertical lines).

合 (Ut) は、13.0℃の場合では13.0℃で40%を示し、水温の上昇に伴って増大して25.0℃で63%を示し、さらに水温を上昇させると減少した (Fig. 9)。28.0℃の場合では

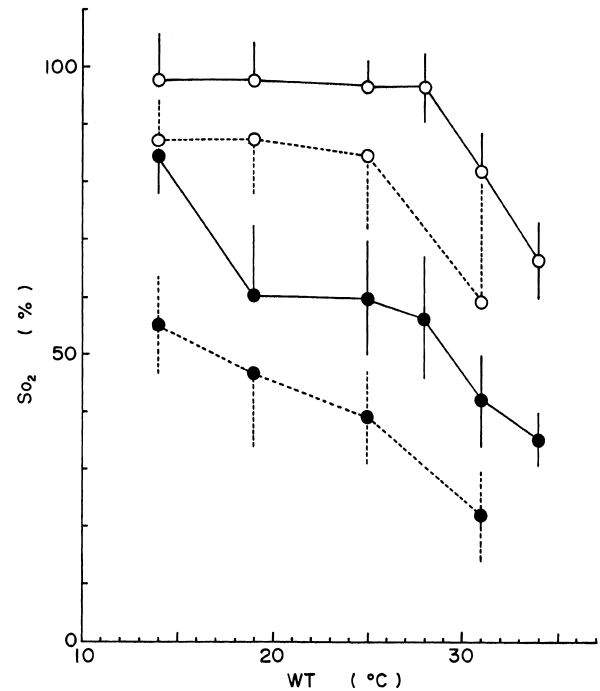


Fig. 8. Change of oxygen saturation ( $So_2$ ) of the blood in the efferent branchial vein (open circles) and in the afferent branchial vein (solid circles) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . The results are shown in the mean values (circles) and the standard deviations (vertical lines).

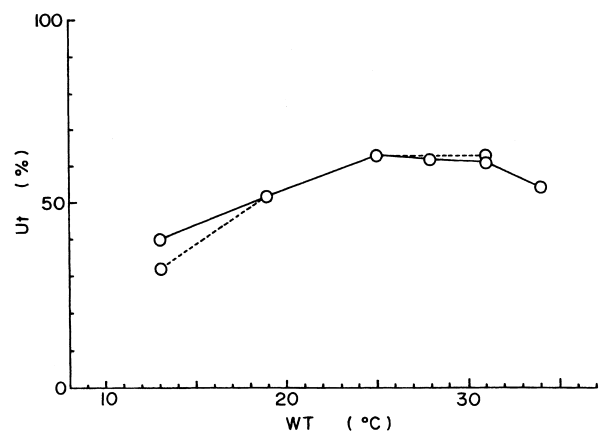


Fig. 9. Change of percent oxygen utilization at the tissues (Ut) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Ut was calculated by  $Ut=100(Ca_{o_2}-Cv_{o_2})/Ca_{o_2}$ .  $Ca_{o_2}$  and  $Cv_{o_2}$  were the mean value of content of the blood in the efferent branchial vein and in the afferent branchial vein, respectively. Solid line shows the results at  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and broken line shows that at  $13.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ .

28.0℃で62%を示し、水温を上昇させても31.0℃まではほぼ同じ値を示し、さらに上昇させると減少し、水温を低下させると、25.0℃まではほぼ同じ値を示したが、さらに低下させると減少した (Fig. 9)。

心拍出量 (Vh) は、13.0℃の場合では13.0℃で78ml/min/kg WW (36ml/min/kg TW) を示し、水温が上昇すると増加して、水温31.0℃で407ml/min/kg WW (188ml/min/kg TW) を示した (Fig.10)。28.0℃の場合では28.0℃で252ml/min/kg WW (118ml/min/kg TW) を示し、水温の上昇に伴って増加して34.0℃で362ml/min/kg WW (162ml/min/kg TW) を示し、水温を低下させると減少した (Fig.10)。酸素1mlを組織へ渡すのに必要な心拍出量 (Vh/Vo<sub>2</sub>) は、13.0℃の場合では13.0℃で169を示し、水温が上昇すると減少して19.0℃で132を示し、さらに水温を上昇させると増大した (Fig.11)。28.0℃の場合では28.0℃で167を示し、水温が上昇すると増大したが、水温を低下させると、19.0℃まではほぼ同じ値を示し、さらに水温を低下させると増大した (Fig.11)。

## 考 察

サザエの成長にとって好適な水温は12℃以上から30℃の範囲であると報告されている<sup>1)</sup>。本研究の結果では、酸素

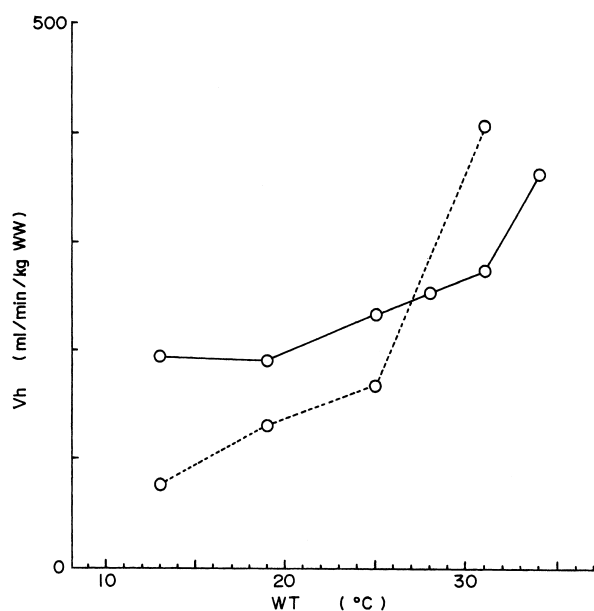


Fig. 10. Change of minute volume of the cardiac output (Vh) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. WW is wet weight, excluding shell and operculum. Solid line shows the results at 28.0±0.1℃, and broken line shows that at 13.0±0.1℃.

摂取量 (Vo<sub>2</sub>) は飼育水温13℃および28℃のいずれの場合にも水温の上昇に伴って増加して、31℃で最大を示した。これらのことから、サザエは成長にとって好適な水温とされている水温範囲では、水温が上昇すると代謝量が増大し、しかも代謝量は生息していた水温 (順応水温) に影響されずに水温31℃で最大を示すと考えられる。

この時、換水量 (Vg) および酸素利用率も水温の上昇に伴って増加した。魚類では、換水量が増加すると酸素利用率は減少することが一般に知られている<sup>9)</sup>。サザエでは、酸素要求量の増加に伴って増加させる換水量の増加率は魚類に比べると著しく小さいと報告されている<sup>5)</sup>。これらのことから、サザエは、水温の上昇に伴って代謝量が増大した場合、換水量を増加させるだけでは酸素要求を満たすことができず、酸素利用率も同時に増大させて対応していると考えられる。このように換水量と酸素利用率を増加させる現象は、サザエと同じ腹足綱である *Crepidula fornicatam* でも認められている<sup>10)</sup>。

サザエは、水温が上昇すると次のような調節を行うことによって換水量の増加と同時に酸素利用率も増大させて酸素摂取量を増加させていると考えられる。水温が25℃に上昇するまでは、鰓での水と血液の平均酸素分圧差 ( $\Delta P_{O_2}$ ) は水温の上昇に伴って減少した。このことから、水温の上昇に伴って鰓での水から血液への酸素の拡散は低下していると考えられる。しかし、酸素摂取量 (Vo<sub>2</sub>) は増加した。この時、鰓での酸素摂取効率 (To<sub>2</sub>)、心拍出量および動脈血中の酸素を組織へ渡す割合 (Ut) は水温の上昇に伴っ

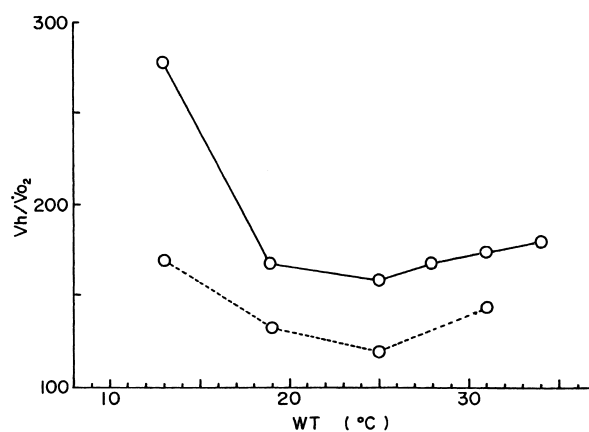


Fig. 11. Change of perfusion requirement (Vh/Vo<sub>2</sub>) with the increase and the decrease of water temperature (WT) in the top shell. Vh/Vo<sub>2</sub> was calculated as  $Vh/Vo_2 = 100 / (Ca_{o_2} - Cv_{o_2})$ .  $Ca_{o_2}$  and  $Cv_{o_2}$  were the mean value of content of the blood in the efferent branchial vein and in the afferent branchial vein, respectively. Solid line shows the results at 28.0±0.1℃, and broken line shows that at 13.0±0.1℃.

で増大し、酸素 1 ml を組織へ渡すのに必要な心拍出量 ( $V_h/V_{O_2}$ ) は減少した。鰓での酸素摂取効率の増大は、魚類では鰓を流れる血液の分配を変化させることによる鰓での有効ガス交換面積の増大や水と血液間の酸素拡散距離の減少などを行って水から血液中への酸素の摂取量を増加させることによって達成させることが一般に認められている<sup>9)</sup>。サザエでも、鰓葉の構造<sup>12)</sup> からみて、代謝量が増大して酸素摂取量を増加させる際には各鰓葉の鰓軸血管内を流れて入鰓静脈から出鰓静脈へ短絡して流れている血液量を減少させて鰓葉の全体へ分配して流すように調節することによって鰓葉での有効ガス交換面積を増大させていると考えられる。また、心拍出量の増加は、鰓で摂取した酸素を体組織へ多く運ぶことが可能となることは明らかである。動脈血中の酸素を組織へ渡す割合 ( $U_t$ ) の増大および酸素 1 ml を組織へ渡すのに必要な心拍出量 ( $V_h/V_{O_2}$ ) の減少は、血液から体組織への酸素の受け渡しの効率を上昇させる調節が働いていることを示している。これらのことから、サザエが換水量と酸素利用率を共に増大させたのは、換水量の増加率が小さいために、換水量の増加に伴う鰓での水と血液の平均酸素分圧差の増大を利用することができず、これを補うために血液循環の調節によって鰓での酸素摂取効率を増大させ、合わせて組織へ酸素を渡す効率も増大させて酸素摂取量を増加させた結果と考えられる。

水温が25℃よりも上昇すると、鰓での水と血液の平均酸素分圧差 ( $\Delta P_{O_2}$ ) は増大し、酸素摂取量も増加した。これらのことから、25℃よりも上昇した場合には、25℃までの調節に加えて、鰓での水から血液への酸素の拡散を増大させることによって酸素摂取量を増加させる結果として、換水量と酸素利用率を共に増大させていると考えられる。しかし、動脈血中の酸素を組織へ渡す割合 ( $U_t$ ) は水温の上昇に伴って減少し、酸素 1 ml を組織へ渡すのに必要な心拍出量 ( $V_h/V_{O_2}$ ) は増大した。これらのことは、心拍出量の著しい増加に伴って大量に運ばれてくる酸素を25℃以下の状態のように血液から体組織へ効率よく渡すことができなくなっている結果であると考えられる。

## 要 約

サザエの鰓での酸素摂取と血液による酸素輸送について明らかにする目的で、酸素摂取量、酸素利用率、換水量、血液の酸素分圧、酸素含量および酸素飽和度、鰓での水と血液間の平均酸素分圧差、鰓での酸素摂取効率、心拍出量、組織へ酸素を渡す効率などに及ぼす水温の影響について調

べた。サザエは、水温が上昇して代謝量が増大すると、酸素利用率、換水量、鰓での酸素摂取効率、心拍出量および体組織へ渡す効率を増大させて酸素要求の増大に対応していると推測した。

## 引用文献

- 1) 宇野寛：サザエの増殖に関する基礎研究，特に生態と成長の周期性とに関して．東京水産大学特別研究報告，6，1-76 (1962)
- 2) 山元憲一，河原邦昌，嶋田誠，藤井淳，寺戸寛史：酸素飽和海水中で安静状態にあるサザエの鰓における酸素摂取，水大校研報，44，89-95 (1996)
- 3) 山元憲一，河原邦昌，藤井淳：サザエの酸素摂取と鰓組織毛運動に及ぼす水温の影響，水大校研報，46，33-37 (1997)
- 4) 山元憲一，半田岳志，河原邦昌：サザエの酸素摂取，水大校研報，56，237-249 (2008)
- 5) 山元憲一，半田岳志，嶋田誠：サザエの鰓での酸素摂取に及ぼす点酸素の影響，水大校研報，56，299-310 (2008)
- 6) 日本海洋学会：海洋観測指針 (中央气象台)．田中幸和堂，東京，pp. 174-180 (1955)
- 7) Randall D J, Holeton G F and Stevens E D : The exchange of oxygen and carbon dioxide across the gills of rainbow trout. *J Exp Biol*, 46, 339-348 (1967)
- 8) Piiper J and Baumgarten-Schumann D : Effectiveness of  $O_2$  and  $CO_2$  exchange in the gills of the dogfish (*Scyliorhinus stellaris*). *Resp Physiol*, 5, 338-349 (1968)
- 9) Shelton G : The regulation of breathing. In Hour W S and Randall D J (eds) *Fish Physiology*. Academic Press, New York and London, 239-359 (1970)
- 10) Newell R C, Johnson L G and Kofoed L H : Effects of environmental temperature and hypoxia on the oxygen consumption of the suspension-feeding Gastropod *Crepidula fornicata* L. *Comp Biochem Physiol*, 59A, 175-182 (1978)
- 11) Ghiretti F : Respiration. In Wilbur K M and Yonge C M (eds) *Physiology of Mollusca*, Academic Press, New York and London, 175-208 (1996)
- 12) 山元憲一，半田岳志，近藤昌和：サザエの鰓構造，水大校研報，56，273-285 (2008)