クロソイ幼魚の温度反応

土田 修二, 瀬戸熊卓見

(1996年4月1日受付)

Temperature Responses of Young Schlegel's Black Rockfish *Sebastes schlegeli*Shuji Tsuchida*¹ and Takumi Setoguma*¹

Studies were conducted to clarify the temperature preference and tolerance, and the effects of temperature on the growth of young Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegeli*. A horizontal temperature gradient tank was used for the temperature preference test. The preferred temperature of the fish acclimated to 15–28°C ranged 17.8–22.8°C, with no clear dependence on the acclimation temperature. The final preferendum was estimated to be about 20.5°C. The upper and lower lethal temperatures of the fish exposed for 72 h to eight or nine constant test temperatures ranged 28.1–30.5°C and 2.0–9.5°C, respectively. The critical thermal maximum and minimum ranged respectively 31.2–34.6°C and 1.3–4.9°C. The ultimate upper lethal temperature, which could not be exceeded with elevating acclimation temperature, was 30.8°C. In a rearing experiment, where the fish were fed *Euphausia pacifica* to satiation for 21 days at seven constant temperatures between 12 and 30°C, the highest daily feeding rate, daily growth rate and food conversion efficiency of the fish were found at 25°C, 22°C and 20°C, respectively.

The final preferendum was thus found close to the temperatures for the highest growth rate and food conversion efficiency.

キーワード: クロソイ, 選好温度, 温度耐性, 成長適温

至適な温度環境を求めて、あるいは有害な温度環境から逃避しようとして体を移動させることは、哺乳類はもとより鳥類、爬虫類、両生類、魚類、甲殻類、昆虫など多くの動物に認められている。¹⁾ この行動は、自らの外的および内的温度環境を生命維持が可能な範囲に、さらには可及的に狭い範囲内で一定に保つことにより、種々の生理機能の恒常性を維持するのに役立つものと考えられている。

魚が温度勾配下で特定の温度域に移動する温度選好行動を示すことは、数多く報告されている。²⁻⁶⁾ また、こうした行動反応で与えられる選好温度が、生理機能上の最適温度に相当するという報告もある。例えば、魚類の選好温度と成長適温との関係については、ベニザケ *Oncorhynchus nerka*、ブルーギル *Lepomis macrochirus* などで最終選好温度が餌料転換効率や成長率が最大となる温度と一致し、また、選好温度と代謝率との関係については、カサゴ *Sebastes marmoratus* の最終選好温度が温度上昇に伴う酸素消費量の増加率の減少し始める温度とほぼ等しいことなどが指摘されている。⁶⁻¹⁰⁾ さらに、

最終選好温度と温度耐性との間に極めて高い相関関係が認められている。^{5,8)}

筆者らはクロソイ幼魚を用いて、温度に対する行動的反応および生理的反応の指標としての選好温度および成長適温を特定すると共に温度耐性を明らかにし、あわせてこれら3者間の関係について検討した。

材料および方法

供試魚 実験に供したクロソイ幼魚は、秋田県水産振興センターから種苗放流用稚魚を入手し、水温 22～24°C で約 2 カ月間養成飼育したものである。温度選好実験および温度耐性実験では、実験に先立ち供試魚を温度馴致用水槽 (500 l) 5 基に移し、15, 20, 23, 25, 28°C の 5 段階で温度馴致飼育を 14 日間以上行った。この間、調温海水を 1 水槽当たり毎時 500 l かけ流した。各馴致温度区において 10 分毎に測定した温度の標準偏差は、±0.2°C 以下に保たれた。供試魚を養成飼育時の温度から馴致温度へ移行する際には、1～3 日間をかけて緩やかに昇温あるいは降温し、急激な温度変化をさけ

*1 財海洋生物環境研究所中央研究所 (Central Laboratory, Marine Ecology Research Institute, Onjyuku, Isumi, Chiba 299-51, Japan).

た。養成飼育および温度馴致飼育期間中には、解凍したツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* を1日3回飽食するまで与えた。

温度選好実験 温度選好実験には、水平温度勾配反応実験装置を用いた。⁵⁾ この装置では、5基の独立した熱交換器によって異なる温度に調節された海水を実験水槽内 (L4,350 mm×W200 mm×D120 mm) に側方 (長軸に対し直角方向) から流入させ、その排水を熱交換器に戻して再循環する方式によって、水平的な温度勾配を形成することができる。水槽内の流速は約10 mm/secとした。水槽底面は等間隔に引かれた横断マーカで30区画に区分され、各区画の中心に熱電対温度計を設置した。また、水槽上方に吊るした40 W 蛍光灯8基の照明により、水面上の照度は300 lxであった。水槽内における供試魚の行動観察は、水槽上部に設置した2台の高感度ビデオカメラを通して別室で行い、ビデオデジタイザ (㈱朋栄製 FVW-910) を用い各供試魚の位置を特定した。実験前日に、水槽内全体が馴致温度と等しい温度無勾配状態の中に供試魚5尾を収容して1晩放置し、供試魚に異常な行動が無いことを確認した後、実験を開始した。実験水槽に供試魚を収容した後は、無給餌とした。

Fig. 1 には、実験期間中の温度推移を例示する。先ず、温度無勾配状態における1時間を0期とし、次いで10~30℃の間の温度勾配完成直後の1時間をⅠ期、

続く1時間をⅡ期、さらに、温度勾配完成から24時間後の2時間を前後1時間毎にⅢ、Ⅳ期に区分した。各期には1分毎に、各供試魚が分布した区画 (滞留位置) およびその区画の温度 (滞留温度) を同時記録した。従って、各期における供試魚の滞留位置または滞留温度の総数は300 (5尾×60回) となる。Ⅰ~Ⅳの各期に供試魚が分布した滞留温度の平均値をそれぞれ選好温度とし、温度勾配完成直後のⅠ期とⅡ期の選好温度を短期選好温度、24時間後のⅢ期とⅣ期の選好温度を長期選好温度と名付けた。実験は各温度馴致群あたり3回、合計15回行った。各実験終了時に測定した供試魚の体重は 5.6 ± 1.9 g (Mean $\pm$ S.D.) であった。

温度耐性実験 温度耐性を把握するために、温度接触実験、限界温度実験、臨界最高 (最低) 温度実験の3種類の実験を行った。

温度接触実験の方法は Fry ら¹¹⁾ に準じた。実験には容積25 lの塩化ビニール製の水槽を用い、馴致温度より高温側では7~8段階、低温側では5~7段階の実験温度に調節した海水を、各実験水槽毎にそれぞれ毎時2 l 流した。実験温度が安定したのち、供試魚10尾を馴致水槽から速やかに実験水槽に移し、以後72時間以内の致死判定を行った。判定は鰓蓋活動の停止をもって「死亡」とした。昼間の観察および致死判定は原則として目視によった。夜間は実験水槽前面に設置したビデオカメラを通じてタイムラプスビデオレコーダー (㈱ナッ

Fig. 1. An example of an actual process forming a horizontal temperature gradient for experimental fish acclimated to 20°C.

Following an initial isothermal condition of 20°C, a stable temperature gradient with a range of 20°C was formed. Then the stable temperature gradient was maintained for about 27 hours. Bars with Roman numerals indicate recording periods for swimming positions of individual fish in the experimental tank.

ク製 VS-10) に録画し、後日致死判定を行った。実験期間中は無給餌とし、酸素補給と水槽内の温度の均一化を図るため曝気を行った。10 分毎に測定した各実験温度の標準偏差は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下に保たれた。各実験終了時に測定した供試魚の体重は $4.2 \pm 0.8 \text{ g}$ (Mean $\pm$ S.D.)であった。

限界温度実験は、高温側の限界温度である最終致死温度 (UULT; ultimate upper lethal temperature)¹¹⁾を把握することを目的とした。実験水槽は温度接触実験と同じものを用いた。28 $^{\circ}\text{C}$ 馴致群 20 尾の供試魚を馴致温度と等しい実験水槽に収容し、この温度から 1 日毎に 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 、段階的に昇温した。各供試魚が死亡に至るまでの実験期間中、1 日 1 回解凍したツノナシオキアミを与え、摂餌状況を確認した。この実験から上昇する温度と供試魚の累積死亡率との関係が与えられ、さらに死亡率 50% に相当する温度を作図により求め、UULT とした。

臨界最高 (最低) 温度実験は、Cox¹²⁾の方法を参考にした。実験装置は、容積 38 l の塩化ビニール製の円形水槽内の温度を、温度コントロールユニットによって、所定の速度で上昇あるいは降下させることが可能な循環式となっている。馴致温度と等しい実験水槽中に供試魚

5 尾を収容し約 1 時間放置して、供試魚の行動に異常の無いことを確認した後、水槽内の温度を 5 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で上昇または降下させた。供試魚が体の平衡を失った時点の温度を臨界最高または最低温度 (CTMax, CTMin; critical thermal maximum or minimum) とし、さらに鰓蓋活動を停止した時点の温度を死亡温度 (DT) とした。各実験終了時に測定した供試魚の体重は $3.6 \pm 0.6 \text{ g}$ (Mean $\pm$ S.D.)であった。

飼育実験 飼育実験には、容積 500 l の円形水槽を用いて 12, 15, 20, 22, 25, 28, 30 $^{\circ}\text{C}$ の 7 温度区を設け、各水槽に 50 尾の供試魚を収容した。養成飼育温度 (平均温度 23.2 $^{\circ}\text{C}$) から各実験温度への移行には、5 日をかけて緩やかに昇温もしくは降温し、さらに 2 日間の予備飼育を行った。実験飼育期間は 21 日間とした。餌料には解凍後計量したツノナシオキアミを用い、午前 10 時と午後 3 時の 1 日 2 回、供試魚の摂餌状況を確認しながら 1 時間内に飽食する量を与えた。摂餌量は、給餌終了後に残餌を回収して決定した。ただし、実験飼育開始日と終了日には無給餌とした。実験開始時と終了時には、供試魚を MS 222 で麻酔し、各個体の体長、体重を測定した。温度と成長を表す指標との関係を検討するため、各温度区毎に日間摂餌率、日間成長率、餌料転換

Fig. 2. A typical example of percentage frequency distribution of swimming fish among areas along a temperature gradient.

Temperatures preferred by individual fish were recorded 60 times for each one hour period of observation. 0, I, II, III, IV are the same periods as shown in Fig. 1.

効率を次式によって算出した。

$$\text{日間摂餌率(\%)} = 100 \times \{\Sigma f_i / (Fw + Iw) / 2\} / t$$

$$\text{日間成長率(\%)} = 100 \times \{(Fw - Iw) / (Fw + Iw) / 2\} / t$$

$$\text{餌料転換効率(\%)} = (\text{日間成長率} / \text{日間摂餌率}) \times 100$$

なお, Σf_i は総摂餌量 (湿重量), Iw は開始時平均体重, Fw は終了時平均体重, t は飼育日数である。

10 分毎に測定した実験期間中の各飼育温度の標準偏差は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以下に保たれた。また, 塩分は 33.1~34.3, pH は 8.13~8.25, 溶存酸素飽和度は 92~105% の範囲にあった。

各実験で得られたデータの統計解析は, 平均値の差の有意性 (t-検定法) あるいは回帰直線の勾配の有意性 (回帰分析) について行った。

結 果

温度選好 Fig. 2 には温度選好実験結果の 1 例を示す。温度無勾配 (0 期) において供試魚はたえず動きまわるということはなく, 実験水槽の一端に偏在し時々移動する程度であった。温度勾配形成に伴う温度の変化に対して, 供試魚はしきりに位置を変える行動を示した。温度勾配完成直後の I 期, II 期では, かなり広い温度域に滞留していたが, 24 時間以降の III 期, IV 期では滞留温度域の巾は明らかに狭まった。滞留温度の下・上限は I, II 期では $10\sim 30^\circ\text{C}$, III, IV 期では $14\sim 25^\circ\text{C}$ であった。このような温度選好の経過は, この種の一連の実験ではほぼ共通するものであった。

$15\sim 28^\circ\text{C}$ の各馴致温度群の I~IV 期に求められた選好温度を Table 1 にまとめた。I, II 期の短期選好温度は $18.1\sim 22.7^\circ\text{C}$, III, IV 期の長期選好温度は $17.8\sim 22.8^\circ\text{C}$ と, いずれも比較的狭い温度範囲にあり, 且つ馴致温度群間で短期選好温度または長期選好温度の平均値に有意差が認められなかった ($P>0.05$)。しかし, $20\sim 28^\circ\text{C}$ の各馴致温度群において長期選好温度は短期選好温度より平均値で約 1°C 低下し, 両者の間には有意差が認められた ($P<0.05$)。

温度耐性 馴致温度より高・低温側の温度接触実験結果を Table 2 に示す。 $15\sim 28^\circ\text{C}$ の各馴致温度群において, 供試魚の死亡が生じる時間経過に基づき死亡率が 50% に達する時間, すなわち 50% 致死時間 (Time to 50% mortality) を実験温度毎に求めた。さらに, 72 時間接触させた場合の死亡率と実験温度との関係から, 高・低温側の 72 時間 50% 致死温度 (72 h-ULT₅₀, -LLT₅₀; upper or lower lethal temperature) を得た。

Fig. 3 に高温側の実験温度と 50% 致死時間との関係を示す。いずれの馴致温度群とも実験温度が高いほど

Table 1. Summary of observations of temperature preferred by Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegelii* acclimated to various temperatures

Acclimation temperature (°C)	Test no.	SPT (°C)*1		LPT (°C)*2	
		I	II	III	IV
15	1	22.7	22.4	20.6	20.8
	2	18.1	18.3	18.6	18.9
	3	18.3	22.2	21.3	21.3
	(Mean $\pm$ S.D.)	20.3 $\pm$ 2.11		20.3 $\pm$ 1.09	
20	1	21.3	19.2	19.6	19.9
	2	22.1	22.0	20.0	20.8
	3	20.3	22.6	19.8	19.7
	(Mean $\pm$ S.D.)	21.3 $\pm$ 1.17		20.0 $\pm$ 0.39	
25	1	22.0	22.2	17.9	17.8
	2	21.6	22.1	22.5	22.4
	3	19.6	20.8	19.2	19.3
	(Mean $\pm$ S.D.)	21.4 $\pm$ 0.92		19.9 $\pm$ 1.93	
28	1	21.9	21.1	19.2	19.1
	2	22.6	22.3	22.5	22.8
	3	22.3	22.3	21.0	21.8
	(Mean $\pm$ S.D.)	22.1 $\pm$ 0.48		21.1 $\pm$ 1.47	

*1 Short-term preferred temperature (SPT) was given by averaging temperatures preferred by 5 fish during each recording period of I and II.

*2 Long-term preferred temperature (LPT) was given in the same way for III and IV recording periods.

50% 致死時間は急激に短縮する傾向を示した。同じ実験温度ではより高温に馴致した群で死亡に至るまでの時間は長く, 同じ 50% 致死時間ではより高温に馴致した群ほど実験温度は高かった。実験温度 (T , $^\circ\text{C}$) と 50% 致死時間 (t , 分) の対数との関係は次式で表されるような直線関係が認められた (いずれも $P<0.01$)。

$$15^\circ\text{C 馴致群: } \log t = 9.98 - 0.27 T \quad [r = -0.98]$$

$$20^\circ\text{C 馴致群: } \log t = 19.11 - 0.56 T \quad [r = -0.98]$$

$$25^\circ\text{C 馴致群: } \log t = 26.56 - 0.78 T \quad [r = -0.99]$$

$$28^\circ\text{C 馴致群: } \log t = 25.30 - 0.72 T \quad [r = -0.99]$$

一方, 低温側の実験では, 各温度馴致群で 50% 致死時間を求めることのできた実験温度区が少なかったが, 高温側とは逆に実験温度が高いほど 50% 致死時間は延長する傾向が見られた (Table 2)。

Fig. 4 には馴致温度と高・低温側の 72 時間 50% 致死温度 (72 h-ULT₅₀, 72 h-LLT₅₀) を示す。72 h-ULT₅₀ は $28.1\sim 30.5^\circ\text{C}$, 72 h-LLT₅₀ は $2.0\sim 9.5^\circ\text{C}$ の範囲にあった。72 h-ULT₅₀ および 72 h-LLT₅₀ は, いずれも馴致温度の影響を受けており, 馴致温度が高くなるほど両致死温度が高くなった。馴致温度 (T_a) と 72 h-ULT₅₀

Table 2. Upper and lower temperature tolerances in Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegeli* acclimated to various temperatures

Acclimation temperature (°C)	Upper				Lower			
	Test temperature (°C)	Time to 50% mortality (min) * ¹	72 h-mortality (%)	72 h-ULT ₅₀ (°C) * ²	Test temperature (°C)	Time to 50% mortality (min)	72 h-mortality (%)	72 h-LLT ₅₀ (°C) * ²
15	30.0	79	100	28.1	4.9	—	0	2.0
	29.5	125	100		4.1	—	0	
	29.0	143	100		3.0	—	0	
	28.4	225	100		2.1	—	40	
	27.9	—	20		1.2	1920	100	
	27.4	—	0					
	26.9	—	0					
20	31.0	83	100	28.9	6.1	—	0	4.6
	30.5	130	100		5.0	—	10	
	30.0	230	100		4.1	2500	100	
	29.6	520	100		3.0	1200	100	
	28.8	—	40		2.1	425	100	
	28.3	—	0		1.0	132	100	
	27.9	—	0					
25	31.5	112	100	29.6	8.7	—	0	7.4
	31.0	236	100		8.0	—	10	
	30.4	640	100		7.1	2200	70	
	30.0	1730	100		5.9	1780	100	
	29.3	—	10		5.0	1200	100	
	28.9	—	0		4.1	1200	100	
	28.5	—	0					
28	32.9	53	100	30.5	13.3	—	0	9.5
	32.4	97	100		11.9	—	10	
	31.9	193	100		10.9	—	20	
	31.5	590	100		10.0	—	30	
	31.0	1200	100		8.7	1760	80	
	30.5	2310	50		7.7	1450	100	
	29.9	—	0		6.9	1080	100	

*¹ Time to 50% mortality was obtained from relation with death time and the mortality of the fish.*² Upper or lower lethal temperature (72 h-ULT₅₀ or -LLT₅₀) is the temperature at which 50% of the fish are to die within 72 h.

および 72 h-LLT₅₀ との関係は、次式で表されるような直線関係が認められた (いずれも $P < 0.01$)。

$$72 \text{ h-ULT}_{50} = 25.39 + 0.18 \text{ Ta} \quad [r = 1.00]$$

$$72 \text{ h-LLT}_{50} = -6.70 + 0.57 \text{ Ta} \quad [r = 0.99]$$

限界温度実験では、温度が 29°C 以上になると供試魚の行動は鈍化し摂餌量が減少した。供試魚は 30.0°C では全個体が生存していたが、30.5°C では 20%、31.0°C では 70% の個体が死亡した。さらに、31.5°C まで昇温すると 8 時間以内に残りの全ての個体が死亡した。この結果から、クロソイ幼魚の高温側の最終致死温度 (UULT) は、30.8°C 付近と推定された。この値は上記

の馴致温度と 72 h-ULT₅₀ との関係式から Ta と 72 h-ULT₅₀ とが等しい値となる温度 (31.0°C) とはほぼ一致していた。

各馴致温度から 5°C/時で昇温あるいは降温することにより得られた臨界最高・最低温度 (CTMax・CTMin) および死亡温度 (DT) を Table 3 に示す。馴致温度 15~28°C の CTMax および高温側での DT は、各馴致温度群の平均値でそれぞれ 31.2~34.6°C、32.3~35.1°C の範囲にあった。また、CTMin は各馴致温度群の平均値で 1.3~4.9°C の範囲にあった。いずれも馴致温度が高いほど DT、CTMax および CTMin が高くなる傾向を

Fig. 3. Relations between test temperature (T) and time to 50% mortality (t) for Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegeli* acclimated to various temperatures (●, 28°C; ○, 24°C; ▲, 20°C; △, 15°C).

Dotted vertical lines correspond to upper lethal temperature for 72 hours (4,320 min).

示した (Fig. 4)。馴致温度 (T_a) と DT, CTMax および CTMin との関係は、次式で表されるような直線の関係が認められた (いずれも $P < 0.01$)。

$$DT = 29.04 + 0.22 T_a \quad [r = 0.99]$$

$$CTMax = 27.26 + 0.27 T_a \quad [r = 0.99]$$

$$CTMin = -2.95 + 0.28 T_a \quad [r = 0.99]$$

なお、低温側では 1°C まで実験温度を降下させたときも、鰓蓋活動あるいは接触刺激に対する反応が認められ、死亡を確認することはできなかった。

温度と成長 Table 4 には 12~30°C の各温度区における飼育結果を示す。実験開始時における供試魚の平均体重は、温度区間で有意差がなかった ($P > 0.05$)。21 日間の飼育実験期間中、12~22°C の各温度区では全個体が生存したが、25, 28°C の両区ではそれぞれ 1 尾の死亡が、また、30°C 区では 22 尾 (44%) の死亡が発生した。

日間摂餌率は、12~25°C では温度の上昇に伴って増加し、25°C 区で最大となり、28°C 以上の温度区で低下した。給餌に際して、20~28°C の各区においては終始活発な摂餌行動が観察されたのに対して、12°C 区においてはその行動は他の温度区に比較して緩慢であった。日間成長率はこの摂餌状況に準じて 20~25°C 間で明らかに上昇し、中央の 22°C 区で最高値を示した。供試魚

Fig. 4. Summary of the thermal responses of Schlegel's black rockfish against acclimation temperature (T_a).

The thermal tolerance polygon is represented by the area enclosed with 72 h-ULT₅₀, 72 h-LLT₅₀, ULLT (2°C) and UULT (30.8°C). See text for explanation.

DT, death temperature; CTMax, critical thermal maximum; CTMin, critical thermal minimum; 72 h-ULT₅₀, 72 h-upper lethal temperature, 72 h-LLT₅₀, 72 h-lower lethal temperature; UULT, ultimate upper lethal temperature.

Table 3. Critical thermal maximum and minimum (mean $\pm$ S.D.) for Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegeli* acclimated to various temperature

Acclimation temperature (°C)	N*2	Upper*1		Lower*1	
		DT*3 (°C)	CTMax*4 (°C)	N	CTMin*5 (°C)
15	5	32.3 $\pm$ 0.3	31.2 $\pm$ 0.2	5	1.3 $\pm$ 0.1
20	5	33.3 $\pm$ 0.3	32.6 $\pm$ 0.0	5	2.5 $\pm$ 0.1
25	5	34.4 $\pm$ 0.1	34.0 $\pm$ 0.1	5	4.0 $\pm$ 0.1
28	5	35.1 $\pm$ 0.0	34.6 $\pm$ 0.1	5	4.9 $\pm$ 0.0

*1 Water temperature was increased (upper) or decreased (lower) at the rate of 5°C/h.

*2 N, number of individuals tested.

*3 DT, death temperature for cessation of opercular movement.

*4 CTMax, critical thermal maximum.

*5 CTMin, critical thermal minimum.

Table 4. Daily growth rate, Daily feeding rate and feed conversion efficiency of Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegelii* held at seven constant temperatures for 21 days

Temperature Mean±S.D. (°C)	Rearing period (days)	Number of fish	Initial weight Mean±S.D. (g)	Final weight Mean±S.D. (g)	Mortality (%)	Daily growth rate (%) ^{*1}	Daily feeding rate (%) ^{*2}	Feed conversion efficiency (%) ^{*3}
12.1±0.34	21	50	1.79±0.27	2.88±0.81	0	2.22	17.5	12.7
15.0±0.06	21	50	1.83±0.30	4.52±0.72	0	4.03	25.7	15.7
20.0±0.07	21	50	1.70±0.29	6.22±1.58	0	5.44	29.7	18.3
22.0±0.13	21	50	1.82±0.28	7.53±1.72	0	5.82	32.5	17.9
25.1±0.09	21	50	1.70±0.24	6.49±1.45	2	5.57	34.3	16.2
28.0±0.07	21	50	1.75±0.26	4.57±0.99	2	4.25	30.1	14.1
30.1±0.08	21	50	1.76±0.25	2.28±0.28	44	1.23	17.3	7.1

^{*1} Daily growth rate (%) = $100 \times \{ (Fw - Iw) / (Fw + Iw) / 2 \} / t$

^{*2} Daily feeding rate (%) = $100 \times \{ \Sigma f_i / (Fw + Iw) / 2 \} / t$

^{*3} Feed conversion efficiency (%) = (Daily growth rate / Daily Feeding rate) × 100

Iw, initial fresh weight of fish (g); Fw, final fresh weight of fish (g); t, rearing period (days); f_i , wet weight of diet consumed by fish at the each feeding (g).

の約半数の死亡が認められた 30°C 区の日間成長率は、28°C 区に比べより低い値であった。以上の結果から餌料転換効率は 20~22°C で最大となり、日間摂餌率および日間成長率のピークを示す温度より幾分低温側にずれることが明らかになった。

考 察

温度無勾配条件下でクロソイ幼魚はあまり動きまわることなく、実験水槽の一端に留まる時間が長かった。温度勾配形成直後では広い温度範囲に滞留し、その後時間の経過に伴って特定の温度帯へ集中する傾向が強まった。温度無勾配条件および水平温度勾配下でのこのような行動反応は、同属(メバル属)のカサゴ幼魚でも観察されている。¹⁰⁾ また、着底後のヒラメ *Paralichthys olivaceus* (体長約 8 cm)、ムラソイ *Sebastes pachycephalus pachycephalus* (体長約 20 cm) では温度勾配下でも特定の温度に移動する温度選好行動が認められていない(未発表)。一方、常に泳ぎ回るマアジ *Trachurus japonicus* やイシダイ *Oplegnathus fasciatus* 等では、温度勾配完成直後から特定の温度帯へ集中する結果が得られている。^{4,5)} 本実験に供したクロソイ幼魚(体長約 5 cm)は、流れ藻に付いて生活する時期から着底直後に相当する大きさであった。この様に、常に遊泳し移動している種(マアジ、イシダイ等)と底生生活期の個体(ヒラメ、ムラソイ)とでは、温度勾配下における行動反応も大きく異なっている。また、同じ底生魚種においても着底前の成長段階の個体(クロソイ、カサゴ)と着底後の底生生活期の個体(ヒラメ、ムラソイ)で、その行動反応も大きく異なっており、それぞれの生態的特徴が深く係わっている可能性も考えられる。

多くの魚類は、温度勾配下に長時間静かに放置されると最終的には、それぞれの種に固有の温度を選択するものとされ、この時の温度は最終選好温度(final preferendum)と呼ばれる。この最終選好温度は、また馴致温度と選好温度とが等しくなる点として定義されている。¹³⁾ クロソイ幼魚は温度勾配完成後、時間の経過に伴って特定の温度域へ移動し、馴致温度に係わり無く 18~23°C の比較的狭い温度範囲を選好した。これらの結果から、クロソイ幼魚は最終選好温度が 20.5°C 前後にあるものと推定される。この値はカサゴ幼魚の最終選好温度(20.7°C)¹⁰⁾ とほぼ一致する。

それぞれ 15, 20, 25°C に馴致したクロソイ幼魚の高温側の 72 時間 50% 致死温度(72 h-ULT₅₀)は、28.1~29.6°C であった。魚を種々の温度にある時間接触させることによって求める 50% 致死温度は、接触時間の延長に伴ってより低い値を示すことになるが、同じ馴致温度における同属のウスメバルの 24 時間 50% 致死温度は 25.5~28.8°C で、¹⁴⁾ 接触時間の長いクロソイ幼魚の 50% 致死温度の方が高く、ウスメバル稚魚よりも高温に対する耐性を有していると言える。また、同じ馴致温度における同属のカサゴ幼魚¹⁰⁾ の DT, CTMax および CTMin と比較すると、DT および CTMax では 1~2°C クロソイ幼魚が高く、CTMin では約 4°C クロソイ幼魚が低く、カサゴ幼魚よりも温度耐性が広いことが明らかとなった。

供試魚の温度を馴致温度から異なるレベルへ昇・降温した時、ちょうど 50% の死亡を生ずる温度がいわゆる初期致死温度(ILT; incipient lethal temperature)である。¹¹⁾ この高・低温側の初期致死温度および最終致死温度(UULT, ULLT)で囲まれた領域(温度耐忍領域:

thermal tolerance polygon) は、魚種によりその広さが異なることから、これを面積 (平方摂氏度) で表すことによって、温度耐性の範囲を容易に比較することができる。¹⁵⁾ ILT は、無制限の長期実験が実際には不可能なことから、普通 24~96 時間の実験により求められている。そこで、クロソイ幼魚の高・低温側の ILT を 72 h-ULT₅₀, 72 h-LLT₅₀ とした。また、クロソイ幼魚の ULLT を得る実験は行われなかったが、15°C 馴致群の 72 h-LLT₅₀ が 2°C であったことから、ULLT を 2°C と仮定した。これら温度 (72 h-ULT₅₀, -LLT₅₀, UULT および ULLT) に囲まれるクロソイ幼魚の温度耐忍領域は、少なくとも 686°C² と推定された (Fig. 4)。マダいの温度耐忍領域は 527.8°C² と報告されている。¹⁶⁾ さらに冷水性魚類に属するカラフトマス *Oncorhynchus gorbuscha* (450°C²), サケ *O. keta* (458°C²), ベニザケ *O. nerka* (505°C²), ギンザケ *O. kisutch* (528°C²) の値 (これらサケ属の ULLT はいずれも 0°C としている) と比較して、¹⁵⁾ クロソイ幼魚の温度耐忍領域は高い値を示しており、これらの海産魚と比べても広い温度耐性を有することが示された。

本研究におけるクロソイ幼魚の温度選好実験、温度耐性実験および飼育実験の結果を Table 5 に要約した。温度勾配が形成された直後の I, II 期の滞留温度の上・下限値 (31~10°C) は、72 h-ULT₅₀ および 72 h-LLT₅₀ の範囲 (それぞれ 28.1~30.5°C, 2.0~9.5°C) に匹敵したが、72 h-ULT₅₀, -LLT₅₀ 付近の温度域での滞留頻度は極めて少なく、一時的な滞留であることが観察された。一方、温度勾配形成後 24 時間経過した III, IV 期の滞留温度の範囲は 14~25°C とはるかに狭まった。日間摂餌率は 25°C で最高を示したが、25°C 以上の温度域では殆ど滞留しなかった。また、28°C から 30°C の間で日間摂餌率、日間成長率および餌料転換効率は激減している (Table 4)。さらに、30°C で半数近くが死亡したことや、温度耐性実験においても高温側の最終致死温度が 30.8°C であったことから、30°C を越える高温では生理的変調を生ずる可能性が考えられる。一方、日間成長率は 22°C で、餌料転換効率は 20°C でそれぞれ最大を示し、クロソイ幼魚の成長最適温度域は 20~22°C 付近にあると考えられる。この成長最適温度域は滞留頻度の高い温度帯および選好温度 (17.8~22.8°C) の範囲内にあると共に、餌料転換効率および日間成長率が最大となる温度と最終選好温度 (20.5°C) とはほぼ一致している。

これまでに餌料転換効率あるいは成長率が最大となる温度と最終選好温度がほぼ一致するという結果は、シマアジ^{*2} *Pseudocaranx dentex*, ベニザケ, ブルーギル

Table 5. A list of of temperatures (°C) as controlling some behavioral responses and physiological activities in Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegelii*

Final preferendum	20.5
Temperature of maximum feeding rate	25
Temperature of maximum growth rate	22
Temperature of maximum feed conversion efficiency	20
Ultimate upper lethal temperature	30.8
Range of temperatures occupied by fish for I and II recording periods	10-31
Range of temperatures occupied by fish for III and IV recording periods	14-25
Range of preference temperature of III and IV recording periods	17.8-22.8
Range of 72 h-ULT ₅₀ for fish acclimated at 15-28°C	28.1-30.5
Range of 72 h-LLT ₅₀ for fish acclimated at 15-28°C	2.0-9.5

等^{6,7,9)}で報告されている。また、Jobling⁸⁾は、魚類の成長適温と行動実験から推定した最終選好温度に関する 19 魚種の文献値を整理した結果、両者の値がほぼ等しいことを見ている。因みに、ザリガニの 1 種 *Procambarus spiculifer* でも成長率が最大となる温度と最終選好温度が一致し、最終選好温度を越える温度で成長率が低下する結果が得られている。¹⁷⁾ これら結果から、行動的反応で示される最終選好温度と生理的反応を代表する成長適温とは深い係わりがあることが示唆される。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、有益な御助言と御校閲を頂いた東京大学名誉教授羽生 功博士に深謝の意を表す。また、供試魚の飼育管理を担当して頂いた当研究所の磯貝嘉孝技術員に、多大な協力を得たことに心より感謝する。なお、本研究の一部は通産省資源エネルギー庁の委託業務「温排水生物影響調査」の一環として行われたことを記して、関係者各位に御礼申し上げる。

文 献

- 1) 堀 哲郎: 行動性体温調節, 「温熱生理学」(中山昭雄編), 理工学社, 東京, 1981, pp. 313-339.
- 2) C. C. Coutant: Compilation of temperature preference data. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **34**, 739-745 (1977).
- 3) A. Furukawa, H. Fukataki, and S. Tsuchida: Temperature preference of immature horse mackerel, *Trachurus japonicus*, in a vertical temperature gradient. *NOAA Tech. Rep. NMF*, **69**, 19-23 (1988).

*2 土田修二, 吉田澄夫: シマアジ 0 年魚の成長適温と選好温度. 平成元年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 1989, p. 31.

- 4) 土田修二, 渡辺幸彦, 鈴木繁美: インダイ1年魚の選好温度と高温耐性. 海生研報, **91202**, 1-24 (1991).
- 5) S. Tsuchida: The relationship between upper temperature tolerance and final preferendum of Japanese marine fish. *J. Therm. Biol.*, **20**, 35-41 (1995).
- 6) J. R. Brett: Energetic responses of salmon to temperature: a study of some thermal relations in the physiology and freshwater ecology of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Am. Zool.*, **11**, 99-113 (1971).
- 7) T. L. Beitinger and J. J. Magnuson: Growth rates and temperature selection of bluegill, *Lepomis macrochirus*. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **108**, 378-382 (1979).
- 8) M. Jobling: Temperature tolerance and the final preferendum—rapid methods for the assessment of optimum growth temperatures. *J. Fish. Biol.*, **19**, 439-455 (1981).
- 9) R. L. Kellogg and J. J. Gift: Relationship between optimum temperatures for growth and preferred temperatures for the young of four fish species. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **112**, 424-430 (1983).
- 10) J. Kita, S. Tsuchida, and T. Setoguma: Temperature preference and tolerance and oxygen consumption of the marbled rockfish, *Sebasticus marmoratus*. *Mar. Biol.*, **125**, 467-471 (1996).
- 11) F. E. J. Fry, J. S. Hart, and K. F. Walker: Lethal temperature relations for a sample of young speckled trout, *Salvelinus fontinalis*. *Univ. Toronto Stud. Biol. Ser.*, **54**, 1-35 (1946).
- 12) D. K. Cox: Effects of three heating rates on the critical thermal maximum of bluegill, in "Thermal Ecology" (ed. J. W. Gibbons and R. R. Sharitz), CONF-730505, Nat. Tech. Inf. Serv., Virginia, 1974, pp. 158-163.
- 13) W. W. Reynolds and M. E. Casterlin: Behavioral thermoregulation and the "final preferendum" paradigm. *Am. Zool.*, **19**, 211-224 (1979).
- 14) 大池一臣: ウスメバル稚魚の耐温性. 日本研報, **28**, 1-8 (1977).
- 15) J. R. Brett: Some principles in the thermal requirements of fishes. *Quarterly Rev. Biol.*, **31**, 75-87 (1956).
- 16) N. Y. S. Woo and A. C. Y. Fung: Studies on the biology of the red sea bream *Chrysophrys major*. I. Temperature tolerance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **3**, 121-124 (1980).
- 17) R. C. Taylor: Crayfish (*Procambarus spiculifer*) growth rate and final thermal preferendum. *J. Therm. Biol.*, **15**, 79-81 (1990).