

資 料

海産魚11種の仔稚魚期における高温耐性

吉川貴志^{*1§}・木下秀明^{*2}

Thermal Tolerance of Larvae and Juveniles of Eleven Marine Fishes

Takashi Kikkawa^{*1§} and Hideaki Kinoshita^{*2}

要約：発電所取水の生物影響を評価するため、海産魚11種；シロギス、クロダイ、ヒラメ、イシダイ、マダイ、イサキ、ニベ、スズキ、トラフグ、キチヌ、およびアオギスのふ化後の初期発育段階を対象に、高温に暴露した際の半数致死温度（TL50）を評価した。暴露温度は42°Cを最高とし、7.5分から24時間の暴露を行った後、24時間後に得た死亡率からTL50を算出した。多くの魚種において、TL50はふ化直後で高く、脊索屈曲期前後で低下したのち、再び高くなる傾向が認められた。

キーワード：仔稚魚，高温耐性，半数致死温度，発電所取水

Abstract: Impact of elevated water temperature on the survival of post-hatch stages of 11 fish species; *Sillago japonica*, *Acanthopagrus schlegelii*, *Paralichthys olivaceus*, *Oplegnathus fasciatus*, *Pagrus major*, *Parapristipoma trilineatum*, *Nibea mitsukurii*, *Lateolabrax japonicus*, *Takifugu rubripes*, *A. latus*, and *S. parvisquamis*, was examined to assess the effect of power plant entrainment on marine ecosystem. Fish were exposed up to 42-degrees C for 7.5 minutes to 24 hours, and median lethal temperatures (TL50) were calculated from the mortalities. The TL50 values fluctuated, high in yolk-sac larvae, being lower to flexion larval stage, and elevated thereafter in almost all fish species.

Key words: larva and juvenile, thermal tolerance, median lethal temperature, power plant entrainment

まえがき

発電所の取放水が海洋生物におよぼす影響を予測評価するためには、生物の致死温度に関する知見が必要である。海産魚の初期生活史における高温耐性は古くから研究がおこなわれてきた (Blaxter, 1969)。高温耐性が受精後の胚発生に伴って変化することは、シロギス *Sillago japonica* (Oozeki and Hirano, 1985)、マダイ *Pagrus major* (木下・道津, 1989a)、スズキ *Lateolabrax japonicus* (木下・道津, 1989b)、キュウセン *Halichoeres poecilopterus* (柏木ら, 1991) およびヒラメ

Paralichthys olivaceus (柏木ら, 1992) 等について報告されている。一方、ふ化後の仔稚魚に関しては、特定の発育段階における高温耐性に関する報告がほとんどであり (例えば, Kuthalingam, 1959; 安永, 1975; Schubel *et al.*, 1977; Hettler and Clements, 1978; Yin and Blaxter, 1987)、発育に伴う変化について論じたものは、マダイ (石橋ら, 2003)、アオギス *S. parvisquamis* (吉川ら, 2007)、およびスズキ (吉川ら, 2009) に関する報告にとどまる。

公益財団法人海洋生物環境研究所 (以降「海生研」とする) では、1993 (平成5) 年度から1998 (平成10) 年度にわたり、通商産業省 (当時) 資源エ

(2022年11月16日受付, 2022年12月31日受理)

*1 公益財団法人海洋生物環境研究所 実証試験場 (〒945-0017 新潟県柏崎市荒浜四丁目7番17号)

§ E-mail: kikkawa@kaiseiken.or.jp

*2 公益財団法人海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)

ネルギー庁の委託による「大規模発電所取放水影響調査」事業の一環として、海産魚のふ化後の成長に伴う高温耐性の変化を室内実験により明らかにしてきた。この過程で行った実験においては、魚種によるプロトコルの相違などはあるものの、得られた結果は高温や昇温に対する魚類の耐性を評価するための基礎知見として有用であると考えられる。本稿では結果を総括し、今後の発電所温排水の生物影響の評価のための実験に資することを目的として取りまとめた。

材料と方法

供試材料

本研究では、シロギス、クロダイ *Acanthopagrus schlegelii*、ヒラメ、イシダイ *Oplegnathus fasciatus*、マダイ、イサキ *Parapristipoma trilineatum*、ニベ *Nibea mitsukurii*、スズキ、トラフグ *Takifugu rubripes*、キチヌ *A. latus*、およびアオギスの全11魚種の仔稚魚を供試材料とした（第1表）。いずれも海生研において種苗生産したものである。このうちアオギスおよびスズキの結果の一部は、吉川ら（2007）および吉川ら（2009）と同じ内容であり、本稿のとりまとめのためにデータを引用した。

仔魚期の発育段階はすべて Kendall *et al.*（1984）の分類に準拠し、ここでは各鰭条数が定数に達して以降を稚魚期と定義した。

試験条件の設定

試験には、温度制御が可能なウォーターバス水槽（恒温槽）を最大13個用いた。各魚種について試験直前の飼育水温またはその設定値を対照区水

温とし、42℃を最高温度として1℃～2℃間隔で10段階～12段階の高温暴露区を設定した。暴露を継続する時間は15分間を基本とした。この暴露時間は発電所復水器を冷却用海水が通過するために要する時間を根拠としている（Schubel *et al.*, 1978）。さらに、7.5分間、30分間、60分間、180分間、360分間、および1,440分間の中から複数の暴露時間を併せて設定した。このように比較的長時間まで設定した背景は、仔稚魚が放水口側で温排水のブルームにとどまるケースや、海水温上昇下での耐性を調べることも考慮していたためである。試験容器は、50mL試験管、50mLスクリー管、100mLビーカー、300mLビーカー、500mLビーカー、および1Lビーカーから、供試魚のサイズに合ったものを使用した。予備実験において酸欠による考えられる死亡が生じた場合には、パスツールピペットを用いて試験海水にエアレーションを施した。また仔魚の膜鰭の空気接触による死亡個体が多く見られる発育段階では、スクリー管を用いて気相を可能な限り減じて暴露を行った。試験容器は各試験区に対して1個ずつ準備した。試験期間中は無給餌とした。

高温暴露の手順

高温暴露は次の手順で実施した。ろ過した自然海水を試験容器に満たし、試験開始2時間以上前に各暴露水温に設定した恒温槽内に置いた。試験容器にはプラスチック製の蓋をし、必要に応じてエアレーションを施した。飼育水槽からプラスチック製計量カップやタモ網等を用いて仔稚魚を取り上げ、ハンドリングのストレスを減じるために約1時間、恒温槽内に静置した。試験直前に棒

第1表 仔稚魚の高温耐性試験に用いた魚種、試験年度、発育段階、および採卵方法

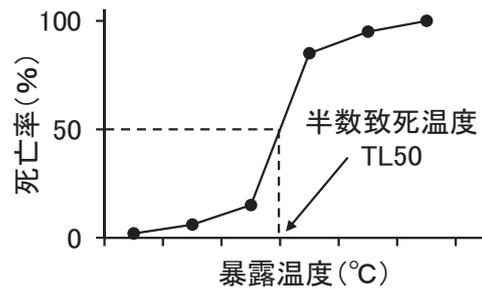
魚種	試験年度	発育段階	採卵方法
シロギス	1993	卵黄仔魚期～稚魚期	自然産卵
クロダイ	1993	卵黄仔魚期～稚魚期	自然産卵
イシダイ	1994	卵黄仔魚期～稚魚期	自然産卵
ヒラメ	1994	卵黄仔魚期～稚魚期	自然産卵
マダイ	1995	卵黄仔魚期～脊索屈曲期	自然産卵
イサキ	1995	卵黄仔魚期～稚魚期	自然産卵
ニベ	1996	卵黄仔魚期～稚魚期	自然産卵
スズキ	1996	卵黄仔魚期～稚魚期	人工採卵
トラフグ	1997	卵黄仔魚期～稚魚期	人工採卵
キチヌ	1998	卵黄仔魚期～後脊索屈曲期	自然産卵
アオギス	1998	卵黄仔魚期～稚魚期	自然産卵

状水銀温度計を用いて試験容器内の水温が設定水温に達していることを確認した。高温暴露は、正常に遊泳する約5個体あるいは約10個体を試験容器に移すことにより開始した。試験容器への供試個体の移動は、遊泳性の低い仔魚期初期は駒込ピペットあるいはガラス管を用いたピペッティングにより行い、発育が進んで遊泳能力が上昇した個体については50mLビーカーに海水とともにすくい取り、海水を極力減らした後に試験容器に流し込むことにより行った。稚魚期以降は小型のネットを用いて試験容器に収容した。所定の高温暴露時間が経過した時点で、試験容器を対照区水温に設定した恒温槽内に移動した。以上の操作は Schubel *et al.* (1978) に準拠しており、仔稚魚が冷却水とともに発電所内に取り込まれ、復水器を通過する際に経験すると考えられる急激な温度上昇と、通過後に温度が下がっていく過程を模した設定となっている。

高温耐性の評価

高温暴露終了から24時間後に供試個体の観察を行い、生死を判定した。生残個体のうち、行動異常（旋回遊泳、平衡喪失、けいれん、遊泳停止）や、形態異常が見られた個体は、死亡個体として扱った。各試験区および対照区ごとに、供試個体数に対する死亡個体数の割合を死亡率（%）とした。

暴露温度に対する死亡率から、半数致死温度（TL50）を算出した。TL50はJIS 工場排水試験方法（日本規格協会，1998）の「魚類による急性毒性試験」を準用して、以下の方法で算出した。暴露温度および死亡率をそれぞれ方眼紙の普通目盛りにとって、観察された死亡率が50%より上のも



第1図 暴露温度に対する死亡率と半数致死温度TL50との関係を示す模式図

のと下のものとして最も50%に近いものを記入し、この両点を直線で結び、死亡率50%の線と交わる点に相当する温度をTL50とした（第1図）。なお、TL50が2点以上算出できる場合は、最も高温側となる点を採用した。

高温耐性を飼育水温からの「昇温幅」で評価するため、TL50と暴露直前の飼育水温との差を「 $\Delta T50$ 」として示した。

結果と考察

半数致死温度TL50は、暴露時間が15分間のみの試行であったキチヌを除き、いずれの魚種においても暴露時間の増大とともに低下する傾向にあった（第2表～第12表）。すなわち暴露時間が長ければ長いほど生残し得る温度は低くなる。暴露時間の延長によりTL50は一定の値（incipient lethal temperature; Brett, 1956）に収束することが知られている。

第2表 シロギス仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度（TL50；℃）

日齢	発育段階	飼育水温	暴露時間（分）							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	24.8	37.3	37.5	37.3	36.0	—	—	—	29.3
1	Y	24.6	37.5	37.8	37.3	37.5	—	—	—	—
4	Pr	24.9	38.7	37.6	37.3	35.6	—	34.2	34.3	32.9
7	Pr	24.7	39.0	37.2	37.3	36.0	—	—	—	35.1
10	Pr	24.9	37.5	36.2	36.0	35.5	—	—	—	32.8
17	F	24.7	35.8	34.3	33.2	32.0	—	—	—	—
24	Po	24.9	35.5	33.6	34.5	34.1	—	—	—	33.1
29	J	24.9	36.0	35.7	34.7	34.4	—	—	—	31.6
42	J	25.2	36.3	35.8	35.8	35.0	—	—	—	33.4

発育段階：卵黄仔魚期（Y），前脊索屈曲期（Pr），脊索屈曲期（F），後脊索屈曲期（Po），稚魚期（J）

第3表 クロダイ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齡	発育 段階	飼育 水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	20.4	-	37.6	-	-	-	-	-	-
0	Y	20.6	-	37.1	-	-	-	-	-	-
0	Y	20.5	-	37.6	-	-	-	-	-	-
0	Y	20.3	37.6	37.4	37.0	36.0	-	-	-	31.4
0日齡平均値			37.6	37.4	37.0	36.0	-	-	-	31.4
1	Y	18.6	-	37.1	-	-	-	-	-	-
1	Y	20.3	-	36.0	-	-	-	-	-	-
1日齡平均値			-	36.6	-	-	-	-	-	-
2	Y	20.4	-	34.6	-	-	-	-	-	-
2	Y	20.3	-	36.1	-	-	-	-	-	-
2日齡平均値			-	35.4	-	-	-	-	-	-
3	Y	20.5	35.6	34.9	34.2	32.6	-	-	-	29.4
5	Pr	20.5	-	35.4	-	-	-	-	-	-
6	Pr	20.4	-	31.7	-	-	-	-	-	-
6	Pr	20.5	35.1	34.5	33.0	31.5	-	-	-	31.1
6日齡平均値			35.1	33.1	33.0	31.5	-	-	-	31.1
9	Pr	20.7	-	32.3	-	-	-	-	-	-
10	Pr	20.2	-	32.3	-	-	-	-	-	-
10	Pr	20.4	33.2	33.2	31.5	32.7	-	-	-	29.3
10日齡平均値			33.2	32.8	31.5	32.7	-	-	-	29.3
12	Pr	20.5	33.1	31.2	31.6	32.2	-	-	-	31.4
17	F	19.9	33.1	32.5	32.5	32.5	-	-	-	30.7
19	Po	20.5	-	32.8	-	-	-	-	-	-
20	Po	20.7	32.4	31.5	30.6	32.7	-	-	-	30.8
24	Po	20.2	34.3	34.4	32.9	32.1	-	-	-	31.8
26	Po	20.2	34.6	34.5	34.0	32.8	-	-	-	32.3
34	J	20.5	-	34.3	-	-	-	-	-	-
40	J	20.5	34.8	34.6	34.6	34.2	-	-	-	33.1
46	J	20.8	34.7	34.7	34.6	33.1	-	-	-	31.3
53	J	20.5	34.9	34.9	33.2	33.2	-	-	-	-
60	J	20.3	34.8	34.6	34.6	32.3	-	-	-	30.5
67	J	20.6	34.5	33.7	33.2	30.3	-	-	-	28.7
74	J	20.4	34.8	33.7	33.4	33.0	-	-	-	32.7
82	J	20.3	35.4	33.4	33.4	29.8	-	-	-	28.2
86	J	20.4	34.4	32.6	33.2	32.6	-	-	-	33.1

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

同日齡で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

第4表 イシダイ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齡	発育 段階	飼育 水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	22.2	39.5	38.6	36.9	35.1	—	—	—	30.5
0	Y	22.5	39.7	39.3	37.7	34.3	—	—	—	29.8
0	Y	22.7	38.2	38.4	38.0	35.8	—	—	—	31.0
0	Y	22.5	39.7	39.3	37.8	35.4	—	—	—	29.6
0日齡平均値			39.3	38.9	37.6	35.2	—	—	—	30.2
1	Y	22.4	39.6	38.1	36.2	33.3	—	—	—	29.3
4	Pr	22.2	37.4	36.5	35.1	35.2	—	—	—	—
5	Pr	23.4	36.8	36.5	34.8	35.0	—	—	—	29.0
5	Pr	22.1	—	—	—	—	—	—	—	33.5
5	Pr	22.8	37.8	35.6	34.4	34.8	—	—	—	33.5
5日齡平均値			37.3	36.1	34.6	34.9	—	—	—	32.0
7	Pr	22.3	32.3	34.8	34.5	34.9	—	—	—	33.0
8	Pr	22.1	34.5	33.0	—	—	—	—	—	—
9	Pr	22.7	36.0	32.9	33.5	32.3	—	—	—	31.1
10	Pr	22.1	—	33.0	—	—	—	—	—	—
11	F	22.1	34.0	33.3	31.5	30.1	—	—	—	28.2
13	Po	22.1	—	34.5	—	—	—	—	—	—
14	Po	21.8	35.7	34.5	33.5	32.3	—	—	—	30.8
18	J	22.1	35.4	34.9	32.5	33.4	—	—	—	31.9

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

同日齡で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

第5表 ヒラメ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齢	発育段階	飼育水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	17.4	35.5	32.4	30.3	29.8	-	-	-	26.6
0	Y	17.6	34.4	33.5	32.0	30.8	-	-	-	28.1
0日齢平均値			35.0	33.0	31.2	30.3	-	-	-	27.4
2	Y	17.6	34.6	34.3	33.3	32.2	-	-	-	26.7
3	Y	17.3	35.0	34.1	32.9	31.6	-	-	-	29.5
6	Y	17.4	35.5	34.1	32.8	32.0	-	-	-	29.6
10	Pr	17.4	34.3	30.5	30.2	29.6	-	-	-	27.8
13	Pr	17.4	31.4	31.3	30.3	29.6	-	-	-	27.6
17	F	17.3	29.8	28.6	28.6	28.3	-	-	-	27.1
20	F	17.4	31.4	31.3	29.9	28.9	-	-	-	27.9
24	Po	17.4	33.1	32.8	32.3	31.3	-	-	-	29.8
27	Po	17.4	34.3	33.8	32.9	31.8	-	-	-	29.9
31	Po	17.5	34.1	34.1	32.9	32.3	-	-	-	31.1
32	Po	17.5	-	32.8	-	-	-	-	-	-
33	J	17.4	-	34.3	-	-	-	-	-	-
34	J	17.6	34.4	34.3	34.1	32.8	-	-	-	31.3
38	J	17.6	34.6	34.1	34.1	32.7	-	-	-	31.3
47	J	18.0	34.3	33.8	33.8	32.8	-	-	-	30.8

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

同日齢で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

第6表 マダイ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齢	発育段階	飼育水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	20.0	37.1	37.3	35.8	34.2	-	-	-	29.6
0	Y	20.0	35.8	36.1	35.8	34.3	-	-	-	29.8
0日齢平均値			36.5	36.7	35.8	34.3	-	-	-	29.7
1	Y	20.0	37.3	37.1	35.8	33.9	-	-	-	27.7
1	Y	20.0	37.3	37.3	37.3	35.8	-	-	-	28.4
1	Y	20.0	37.4	36.9	37.4	35.8	-	-	-	27.0
1日齢平均値			37.3	37.1	36.8	35.2	-	-	-	27.7
5	Pr	20.0	33.5	-	33.5	31.4	-	-	-	27.4
6	Pr	20.0	35.4	34.7	33.8	32.5	-	-	-	28.3
8	Pr	20.0	34.8	32.7	33.9	33.8	-	-	-	27.9
15	F	24.8	34.3	34.1	32.8	33.3	-	-	-	30.8
15	Pr	20.0	27.6	29.2	28.2	29.0	-	-	-	26.9
15日齢平均値			32.2	32.0	31.6	32.0	-	-	-	28.5

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)

同日齢で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

複数の飼育個体群を用いているため日齢と発育の進行が整合していない箇所がある。

第7表 イサキ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齡	発育 段階	飼育 水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	22.0	38.4	36.9	33.8	33.9	-	-	-	28.7
0	Y	22.0	37.0	37.1	37.1	33.1	-	-	-	31.2
0	Y	22.0	35.9	37.0	35.9	34.2	-	-	-	31.0
0 日齡平均値			37.1	37.0	35.6	33.7	-	-	-	30.3
1	Y	22.0	37.1	35.0	35.3	33.7	-	-	-	28.7
1	Y	22.0	38.7	36.8	36.1	35.3	-	-	-	31.3
1 日齡平均値			37.9	35.9	35.7	34.5	-	-	-	30.0
2	Y	22.0	38.6	37.0	36.7	32.0	-	-	-	30.3
5	Pr	22.0	35.5	34.2	33.9	34.1	-	-	-	31.0
7	F	25.0	35.0	35.6	32.8	34.2	-	-	-	30.1
8	Pr	22.0	33.8	33.5	33.6	33.5	-	-	-	30.5
15	Po	22.0	32.6	34.1	30.8	34.1	-	-	-	24.9
15	Po	24.9	37.3	37.3	35.8	35.8	-	-	-	32.8
15 日齡平均値			34.6	35.0	33.4	34.5	-	-	-	29.4
19	Po	21.4	34.2	34.1	34.0	33.6	-	-	-	32.6
20	J	25.2	36.5	36.1	34.8	35.3	-	-	-	34.2
23	J	21.7	35.3	34.2	34.2	33.9	-	-	-	32.7
23	J	21.8	37.3	36.0	35.8	35.0	-	-	-	32.7
23 日齡平均値			36.4	35.4	34.9	34.7	-	-	-	33.2
28	J	21.8	34.4	34.7	34.2	34.0	-	-	-	32.5
28	J	24.3	36.3	35.9	35.6	34.3	-	-	-	32.8
28 日齡平均値			35.7	35.3	34.9	34.3	-	-	-	32.8
34	J	22.0	34.3	34.0	33.0	33.0	-	-	-	32.8
35	J	24.9	37.0	37.0	35.8	35.5	-	-	-	34.2
42	J	22.0	33.9	34.2	33.9	32.7	-	-	-	32.7
49	J	22.0	33.9	34.2	34.2	34.5	-	-	-	32.7

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

同日齡で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

複数の飼育個体群を用いているため日齡と発育の進行が整合していない箇所がある。

第8表 ニベ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齡	発育 段階	飼育 水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
1	Y	23.8	38.0	36.7	36.0	32.6	—	30.6	29.3	28.5
1	Y	24.5	37.9	36.7	34.9	32.6	—	31.7	29.7	28.5
1	Y	24.8	38.2	37.6	36.6	33.7	—	31.8	29.2	27.7
1日齡平均値			38.0	37.0	35.8	33.0	—	31.4	29.4	28.2
2	Y	23.8	37.9	35.3	33.7	31.8	—	30.2	27.9	26.4
2	Y	24.5	36.5	36.0	33.5	32.1	—	29.1	29.0	27.4
2	Y	25.8	37.8	36.8	36.3	33.7	—	30.5	29.0	29.4
2日齡平均値			37.4	36.0	34.5	32.5	—	29.9	28.6	27.7
3	Pr	26.0	35.3	34.7	33.9	33.4	—	33.1	31.7	29.7
5	Pr	24.3	33.6	32.3	30.8	31.5	—	31.9	26.5	27.3
7	Pr	25.0	34.5	34.5	34.5	33.9	—	33.4	33.1	30.0
10	F	25.4	34.9	35.0	34.6	34.6	—	33.6	32.5	31.8
13	F	25.3	34.8	34.8	34.1	33.5	—	32.8	33.0	32.4
16	Po	25.3	36.0	35.3	34.9	33.6	—	33.6	33.4	32.1
20	J	25.3	36.8	36.8	35.3	33.9	—	33.3	32.4	30.6
25	J	25.0	35.8	35.4	34.8	33.8	—	32.8	32.3	32.4
30	J	25.0	35.8	36.3	33.8	33.8	—	33.3	31.8	32.3
40	J	25.2	36.8	35.8	35.1	34.0	—	33.6	33.3	32.3

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

同日齡で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

第9表 スズキ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齢	発育 段階	飼育 水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	16.0	35.0	35.0	33.0	30.9	—	—	—	25.0
0	Y	16.0	34.8	34.8	34.0	33.3	—	30.9	29.2	25.1
0日齢平均値			34.9	34.9	33.5	32.1	—	30.9	29.2	25.1
1	Y	16.0	35.0	34.8	35.0	32.8	—	28.9	28.7	23.6
1	Y	16.0	34.9	34.9	34.9	32.8	—	30.8	27.4	25.1
1日齢平均値			35.0	34.9	35.0	32.8	—	29.9	28.1	24.4
2	Y	16.0	34.9	35.0	34.9	32.4	—	27.2	27.0	25.4
3	Y	16.0	34.9	35.0	34.9	32.4	—	27.2	27.0	25.4
3	Y	16.0	34.9	32.7	30.5	31.0	—	25.8	25.3	24.7
3日齢平均値			34.9	33.9	32.7	31.7	—	26.5	26.2	25.1
5	Y	16.0	34.8	32.4	25.0	29.0	—	24.3	24.3	24.0
5	Y	16.0	34.7	33.4	26.0	30.4	—	27.3	26.0	26.9
5日齢平均値			34.8	32.9	25.5	29.7	—	25.8	25.2	25.5
7	Pr	16.0	34.0	32.5	30.7	28.5	—	28.4	27.0	27.1
10	Pr	16.0	32.8	30.9	26.6	25.1	—	23.3	24.0	24.0
13	Pr	16.0	29.7	30.4	29.2	28.8	—	28.3	27.1	26.0
16	Pr	16.0	28.6	28.8	27.6	27.3	—	27.4	26.9	24.7
21	F	16.0	29.0	28.2	28.6	26.8	—	26.5	26.8	26.9
24	F	16.0	27.3	27.0	23.7	25.1	—	—	—	—
31	Po	16.0	30.7	28.9	27.0	26.0	—	25.4	26.2	24.8
38	Po	16.0	31.4	29.1	29.0	27.7	—	25.7	24.7	24.6
45	J	16.0	31.0	29.7	28.8	27.0	—	23.7	23.5	22.8
52	J	16.0	31.0	30.8	30.8	28.8	—	26.7	23.4	22.6

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

同日齢で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

第10表 トラフグ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齢	発育 段階	飼育 水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	18.5	—	38.2	—	—	—	—	—	—
2	Y	18.7	37.9	37.0	35.1	34.3	—	—	—	—
7	Pr	18.7	34.9	33.3	31.2	31.5	—	—	—	30.2
15	Pr	18.7	32.8	32.0	31.2	30.4	—	—	—	29.2
22	F	18.7	33.9	32.7	32.4	31.6	—	—	—	29.0
36	Po	18.9	33.5	31.4	29.7	28.8	—	—	—	27.2
69	J	20.1	—	33.4	—	—	—	—	—	—
83	J	20.2	—	33.3	—	—	—	—	—	—

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

第11表 キチヌ仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

日齢	発育段階	飼育水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
0	Y	20.0	-	36.3	-	-	-	-	-	-
2	Y	20.0	-	37.2	-	-	-	-	-	-
4	Y	20.2	-	34.9	-	-	-	-	-	-
6	Pr	20.2	-	33.5	-	-	-	-	-	-
9	Pr	20.2	-	30.2	-	-	-	-	-	-
12	Pr	20.1	-	32.5	-	-	-	-	-	-
16	F	20.1	-	29.6	-	-	-	-	-	-
19	Po	20.2	-	34.3	-	-	-	-	-	-
25	Po	20.0	-	32.4	-	-	-	-	-	-

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)

第12表 アオギス仔稚魚の高温暴露に対する半数致死温度 (TL50 ; °C)

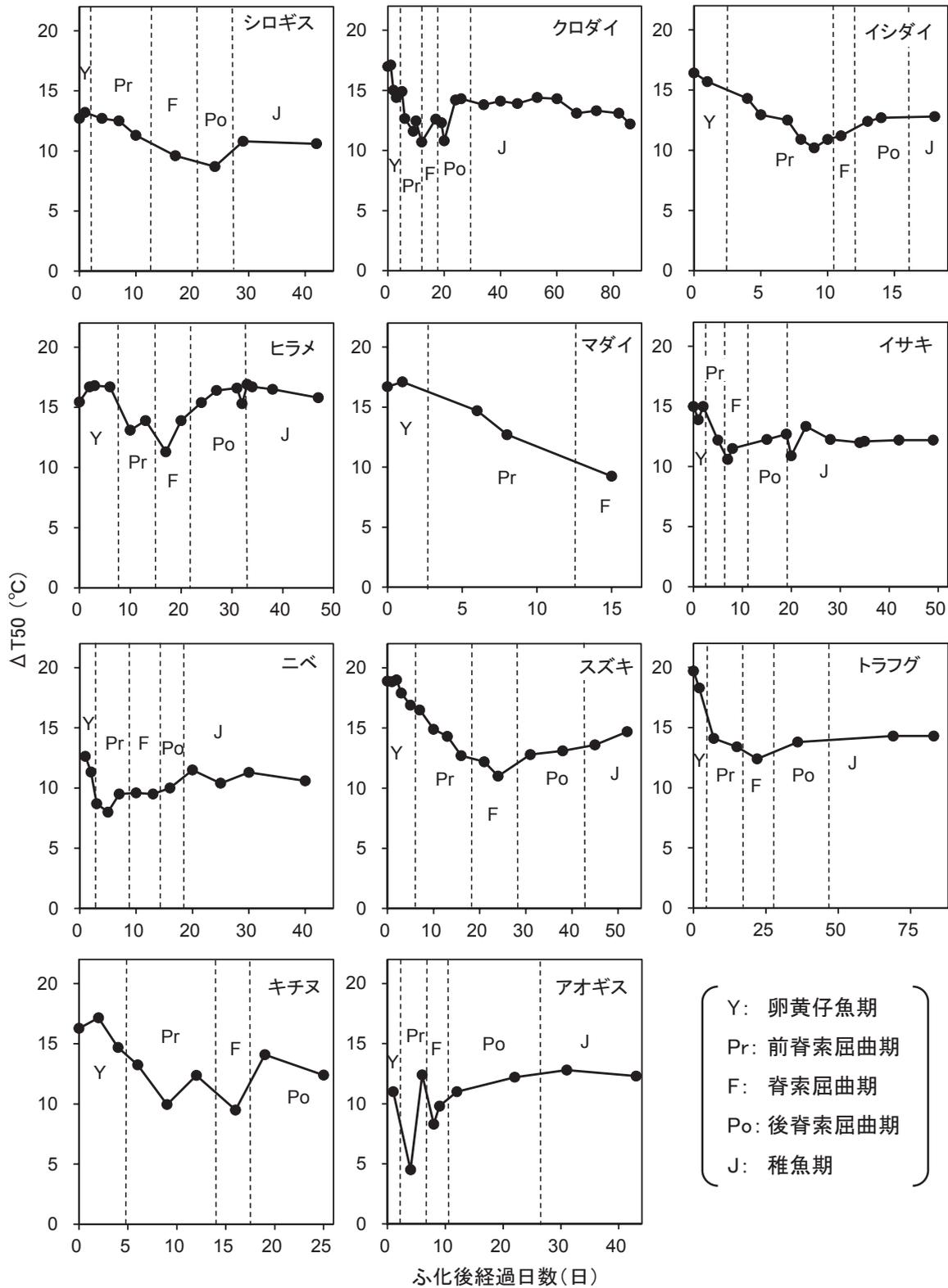
日齢	発育段階	飼育水温	暴露時間 (分)							
			7.5	15	30	60	90	180	360	1,440
1	Y	26.1	-	37.1	-	-	36.1	-	-	33.8
4	Pr	25.2	-	29.7	-	-	28.4	-	-	-
6	Pr	26.0	-	38.4	-	-	35.6	-	-	30.0
8	F	25.8	-	34.1	-	-	33.1	-	-	28.9
9	F	26.1	-	35.9	-	-	35.3	-	-	27.9
12	Po	25.8	-	36.8	-	-	36.0	-	-	33.5
22	Po	26.2	-	38.4	-	-	37.1	-	-	33.7
31	J	26.0	-	38.8	-	-	36.5	-	-	-
43	J	26.1	-	38.4	-	-	37.2	-	-	35.5

発育段階：卵黄仔魚期 (Y)，前脊索屈曲期 (Pr)，脊索屈曲期 (F)，後脊索屈曲期 (Po)，稚魚期 (J)

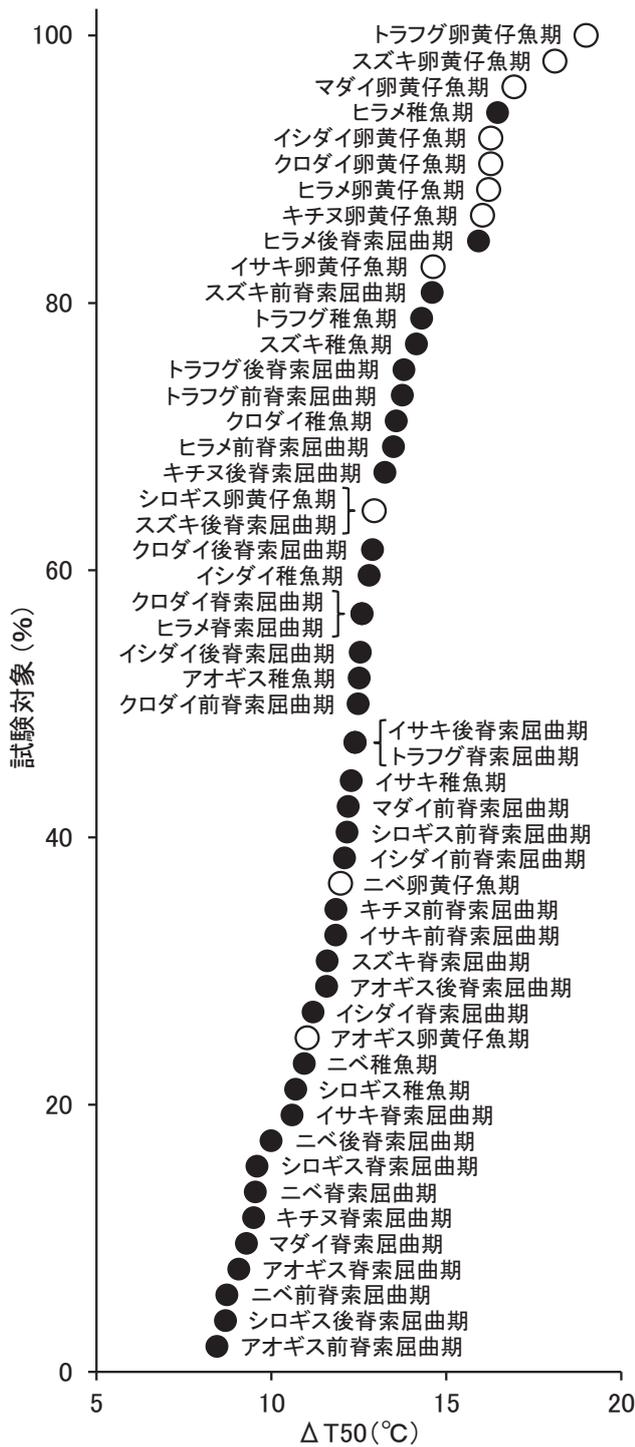
同日齢で複数回試行した場合は TL50 の平均値を併記した。

全ての魚種について得た15分間暴露における発育段階ごとの $\Delta T50$ を第2図に示す。多くの場合、 $\Delta T50$ は卵黄仔魚期から脊索屈曲期前後にかけて、成長に伴って低下した。全魚種の15分間の $\Delta T50$ を合一した場合も、卵黄仔魚期は概ね高い値となっていることがわかる (第3図)。 $\Delta T50$ は一旦低下した後、ふ化後経過日数の経過とともに高くなる傾向にあった (稚魚期の試験を実施していないマダイを除く)。 $\Delta T50$ が「高温耐性」であるとするならば、高温耐性は多くの魚種でふ化後から一旦低下すると言えそうである。高温耐性が一時的に低下することについては、Pérez *et al.* (1999) や石橋ら (2003) も報告しており、水温ストレスのみならず、塩分、アンモニアに対しても同様の傾向が示されている (石橋ら, 2003)。

ふ化後にストレス耐性が低下することは、マダイでは、脊索屈曲期前後に基礎代謝が活発化することにより活動余地に相当するエネルギー代謝が低下し、負荷に適応するためのATP量を十分に供給できなくなることによるものと理解されている (石橋ら, 2003)。一般的に魚類の初期発育では卵黄吸収後に自発摂餌をはじめめる時期や、体制が大きく変化する脊索屈曲期前後は、「critical period」として、大量減耗の起こる時期であることが知られている (Blaxter, 1988)。高温耐性試験の既報においても飼育群で同様の現象が報告されており (Pérez *et al.*, 1999 ; 吉川ら, 2009)、ハンドリングへの感受性も稚魚期と比べると明らかに高く、安定した結果を得ることが難しい。なお、稚魚期での耐性の増大は、活動余地の回復が原因の一つ



第2図 11魚種の仔稚魚期における15分間高温暴露に対する $\Delta T50$ （飼育水温から半数致死温度までの昇温幅）の推移



第3図 11魚種の仔稚魚期における15分間高温暴露に対するΔT50（飼育水温から半数致死温度までの昇温幅）による感受性比較（白丸：卵黄仔魚期；黒丸：その他の仔稚魚期）

であると考えられている（石橋ら，2003）。ここでの報告では各魚種について類似した傾向を得ており，スズキ目，カレイ目，フグ目と，複数の分類群を網羅していることを考慮すると，多くの海産魚に共通する傾向であると推察できる。他方，これらとは異なるストレスで，例えば高二酸化炭素に対する仔稚魚の耐性についての報告では，前脊索屈曲期前後に耐性が高く，稚魚期に向かって低下するような例もあった（Kikkawa *et al.*, 2003）。

本稿では，暴露温度に対する死亡率の提示を省略した。第1表に示した「試験年度」は，委託事業の報告書年度そのものであり，当該報告書を参照することで，TL50の導出に至るまでの試験区ごとの生残個体数や死亡個体数といった観察値を得ることができる（平成5年度～平成10年度「通商産業省資源エネルギー庁委託大規模発電所取放水影響調査『温排水生物影響調査報告書』」の分冊「微小生物温度・連行耐性試験」で報告している）。仔稚魚を用いた温度応答試験は，海洋の温暖化や海洋酸性化との複合影響，またエネルギー産業をはじめとした海域利用に伴う環境アセスメントなどで，今後とも必要となるであろう。このようなシナリオにおいて，本稿で示したデータは予備的考察あるいは基礎資料として活用されるものと期待する。

謝 辞

本試験を実施するにあたり，供試生物の準備と生産を担当した海生研の瀬戸熊卓見氏（現，蝶々魚研究所）を筆頭とした飼育技術部門の関係者，作業を分担した歴代の実験担当研究員，実験を補佐していただいた当時の補助職員，ならびにデータの再整理と図表作成にご尽力賜った同スタッフの篠原智依氏および松井美砂氏に深く感謝する。本研究を委託事業の一環として実施するにあたり，当時技術的なご指導を賜った東京大学名誉教授の（故）平野禮次郎博士，（故）羽生 功博士，および渡部終五博士，また実施の機会を与えてくださった委託元に感謝する。本稿執筆を完遂するにあたっては，海生研の菊池弘太郎業務執行理事および海生研研究報告の編集委員各位，ならびに東京海洋大学名誉教授の石丸 隆博士より，叱咤激励と懇切丁寧な指導をいただいた。ここに記して御礼申し上げる。

引用文献

- Blaxter, J.H.S. (1969) Development: eggs and larvae. In "Fish Physiology" (eds. Hoar, W.S. and Randall, D.J.), Vol. 3, Academic Press, London, 178-252.
- Blaxter, J.H.S. (1988). Pattern and variety in development. In "Fish Physiology" (eds. Hoar, W.S. and Randall, D.J.), Vol. 11A, Academic Press, California, 1-58.
- Brett, J.R. (1956). Some principles in the thermal requirements of fishes. *Quart. Rev. Biol.*, **31**, 75-87.
- Hettler, W.F. and Clements, L.C. (1978). Effects of acute thermal stress on marine fish embryos and larvae. In "Fourth national workshop on entrainment and impingement" (ed. Jensen, L.D.), Ecological Analysts, New York, 171-190.
- 石橋泰典・小澤 勝・平田八郎・熊井英水 (2003). マダイ *Pagrus major* 仔稚魚の発育に伴う各種環境ストレス耐性の変化. 日水誌, **69**, 36-43.
- 柏木正章・鄧 亜光・岩井寿夫 (1991). キュウセン *Halichoeres poecilopterus* 卵の発生に伴う高温耐性の変化. 三重大生物資源紀要, **5**, 91-95.
- 柏木正章・鄧 亜光・岩井寿夫 (1992). ヒラメ, *Paralichthys olivaceus* 卵の発生に伴う高温耐性の変化. 水産増殖, **40**, 1-5.
- Kendall, A.W.JR., Ahlstrom, E.H. and Moser, H.G. (1984). Early life history stages of fishes and their characters. In "Ontogeny and Systematics of Fishes" (eds. Moser, H.G. *et al.*), American Society of Ichthyologists and Herpetologists, Special Publication No. 1, Allen Press, Lawrence, 11-22.
- Kikkawa, T., Ishimatsu, A. and Kita, J. (2003). Acute CO₂ tolerance during the early developmental stages of four marine teleosts. *Environ. Toxicol.*, **18**, 375-382.
- 吉川 貴志・賀久基紀・瀬戸熊卓見・木下秀明 (2009). ふ化後発育に伴うスズキ *Lateolabrax japonicus* の高温耐性変化. 水産増殖, **57**, 405-409.
- 吉川 貴志・喜田 潤・木下秀明・瀬戸熊卓見・伊元九弥・松井誠一 (2007). アオギス *Sillago parvisquamis* の初期発育段階における高温耐性. 海生研報, **No.10**, 1-8.
- 木下秀明・道津光生 (1989a). マダイ卵の高温耐性. 水産増殖, **37**, 15-20.
- 木下秀明・道津光生 (1989b). スズキ卵の高温耐性. 水産増殖, **37**, 21-26.
- Kuthalingam, M.D.K. (1959). Temperature tolerance of the larvae of ten species of marine fishes. *Curr. Sci.*, **28**, 75-76.
- 日本規格協会 (1998). 魚類による急性毒性試験. JIS K 0102工場排水試験方法, 日本規格協会, 東京, 297-300.
- Oozeki, Y. and Hirano, R. (1985). Effects of temperature changes on the development of eggs of the Japanese whiting *Sillago japonica* Temminck et Schlegel. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, **51**, 557-572.
- Pérez, R., Tagawa, M., Seikai, T., Hirai, N., Takahashi, Y. and Tanaka, M. (1999). Developmental changes in tissue thyroid hormones and cortisol in Japanese sea bass *Lateolabrax japonicus* larvae and juveniles. *Fish. Sci.*, **65**, 91-97.
- Schubel, J.R., Coutant, C.C. and Woodhead, P.M.J. (1978). Thermal effects of entrainment. In "Power Plant Entrainment" (eds. Schubel, J.R. and Marcy, B.C.Jr.), Academic Press, New York, 19-93.
- Schubel, J.R., Smith, C.F. and Koo, T.S.Y. (1977). Thermal effects of power plant entrainment on survival of larval fishes: a laboratory assessment. *Chesapeake Sci.*, **18**, 290-298.
- 安永義暢 (1975). ヒラメ卵稚仔の発生・生残に及ぼす水温塩分の影響について. 東海水研報, **81**, 151-169.
- Yin, M.C. and Blaxter, J.H.S. (1987). Temperature, salinity tolerance, and buoyancy during early development and starvation of Clyde and North Sea herring, cod, and flounder larvae. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **107**, 279-290.