

トラフグ仔稚魚の成長における低塩分の有効性とその要因

誌名	水産増殖 = The aquiculture
ISSN	03714217
著者	多賀, 真 山下, 洋
巻/号	59巻2号
掲載ページ	p. 225-233
発行年月	2011年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



トラフグ仔稚魚の成長における低塩分の有効性とその要因

多賀 真・山下 洋*

Effectiveness and Relating Factors of Low Salinity on Growth of Larval and Juvenile Tiger Puffer *Takifugu rubripes*

Makoto TAGA and Yoh YAMASHITA*

Abstract: We examined ontogenetic-appropriate changes of salinity for tiger puffer *Takifugu rubripes* and the associated originating mechanisms of growth difference. Larvae and juveniles at every 10-day post hatch (dph) interval from 10-70 dph were reared in 10, 20 or 30 ppt water conditions for 15 days. There were no significant differences in growth during larval period (<30 dph) among salinities; however, juveniles in low salinities (10 and 20) showed significantly faster growth than at 30ppt. We also measured feed intake, feed efficiency and oxygen consumption for 10-23, 31-43 and 50-63 dph fish under same salinity conditions. Larvae (10-23 dph) in low salinity conditions exhibited the largest oxygen consumption, but there was no difference among salinities for 31-43 or 50-63 dph juveniles. On the other hands, feed intake and feed efficiency were highest in 10 ppt for 50-63 dph juveniles. This study indicates that the appropriate salinity for growth of tiger puffer changes at approximately 30 dph and salinity-induced growth differences among fish are mainly caused by the energy available for growth increased by feed intake and feed efficiency at low salinities.

Key words: Tiger puffer *Takifugu rubripes*; Salinity; Growth; Oxygen consumption

トラフグ *Takifugu rubripes* は本邦における主要な漁獲対象種であり、商業的価値が極めて高いことで知られる。本種は日本海・東シナ海・瀬戸内海系群と伊勢・三河湾系群に分けて資源評価がなされており、両系群の資源量の合計は1,500トン前後（うち、放流魚は約7%）である（水産庁・（独）水産総合研究センター 2010）。一方で、本種の海面養殖の生産量は年間約5,000トンと天然資源の漁獲量を上回っており（農林水産省 2009）、さらに平成20年度には全国で300万尾以上の種苗が放流されている（水産庁・（独）水産総合研究センター・（社）全国豊かな海づくり推進協会 2010）。このようなトラフグの種苗生産や養殖の現場では、海水のみを飼育水として用いることが多いが、本種稚魚は高い低塩分耐性を備えており（Lee et

al. 2005）、さらに天然環境下では、トラフグは稚魚期の育成場として干潟や河口域などの低塩分環境を利用することが報告されている（田北・Intong 1991; 松浦 1997; 中島ら 2008）。一般に、魚類が汽水域を利用することの利点の1つとして、浸透圧調節エネルギーの節約が挙げられる（田中 1991）。本種の仔稚魚を低塩分で飼育した場合、通常海水による飼育と比較して成長が速いことが報告されている（韓ら 1995; 神谷・辻ヶ堂 1995; Kikuchi et al. 2007; 今井ら 2010）。本種の産卵場は潮通しのよい海水域に形成されることから（神谷ら 1992; 松浦 1997; 柴田ら 2006）、海水域から汽水域へ来遊する仔魚期から稚魚期にかけての発育段階で、成長にとって好適な塩分が変化すると推定されるものの、発育段階と好適な塩分との関係の詳細は分かって

2010年11月17日受付；2011年1月17日受理。

京都大学フィールド科学教育研究センター（Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Maizuru, Kyoto 625-0086, Japan）。

*連絡先（Corresponding author）: Tel: (+81) 773-62-5512; Fax: (+81) 773-62-5513; E-mail: yoh@kais.kyoto-u.ac.jp (Y. Yamashita)。

いない。また、Kikuchi et al. (2007) は、トラフグ稚魚が低塩分で高成長を得られる理由として、浸透圧調節エネルギーの節約を挙げているが、これまでにこのようなメカニズムを検証した知見はほとんどなく、塩分が成長に影響する機構は明らかでない。

本研究は、トラフグ仔稚魚の成長に好適な塩分について発育段階との関係を詳細に調べ、トラフグの養殖や種苗生産現場での低塩分飼育水の利用による仔稚魚飼育技術の最適化に資することを目的とした。また、飼育塩分によってトラフグ仔稚魚に成長差が生じる要因を検討するために、異なる塩分で飼育した仔稚魚の摂餌量、飼料効率、および代謝量の指標としての酸素消費量を測定した。

材料および方法

初期飼育

能登島栽培漁業センターにおいて人工授精されたトラフグ受精卵（受精日：2009年5月20日，2010年5月23日）を京都大学舞鶴水産実験所に輸送し、速やかに濾過海水（塩分30.9-33.9）を約10回転/日で換水させた屋内のポリカーボネート製500 l 黒色円形飼育水槽2面に収容した。孵化水温は18℃とし、強通気を行った。卵は受精日から7-10日で孵化した。孵化後、飼育水槽の換水量を約1回転/日に弱め、弱通気を行った。飼育水温は約1週間かけて段階的に上昇させ（約0.4℃/日）、21℃に達した段階でこれを維持した。自然海水温が21℃を超えた時点で、飼育水温を自然海水温とした。孵化後3日から23日までは、生クロレラV12（クロレラ工業（株））、およびマリングロス（日清マリンテック（株））で栄養強化したL型シオミズボウムシ *Brachionus plicatilis* を、18日から36日までは、マリングロスで栄養強化したアルテミア孵化幼生 *Artemia* spp. を仔稚魚に与えた。孵化後25日以降は、配合飼料（おとひめ（S1, S2, EP1）、日清丸紅飼料（株））を給餌した。生物飼料を与えた36日齢までは1日に2回、配合飼料のみを与えた37日齢以降は1日に3回、それぞれ飽食となるように給餌を行った。光条件は屋内の自然光としたが、孵化後11日以降は、噛み合いを防止する目的で、昼間の水槽水面の照度が約150 lx になるように飼育水槽を目の粗い黒色ネットで覆った。

成長実験（実験1）

孵化後10日から70日の仔稚魚を10日齢毎に、塩分の異なる飼育水（塩分10, 20, 30）で15日間飼育した。各塩分とも2反復の飼育を行った。10日齢，20日齢の飼育実験は2010年6-7月に行い、30日齢以降の飼

育実験は2009年6-8月に行った。塩分10, 20で飼育する個体を馴致するために、上述の2面の500 l 飼育水槽から比較的サイズの近いトラフグ仔稚魚をほぼ同数ずつ選別し、塩分20に調整したポリカーボネート製100 l 黒色円形水槽に移し、止水で1日間飼育した。翌日、塩分10, 20の飼育水約50 l を入れたガラス製水槽（60×29.5×36 cm: w×d×h）に、1水槽あたり仔稚魚30個体を静かに移送し、それぞれの飼育塩分に1日馴致させた後実験を開始した。塩分30で飼育する個体は、塩分10, 20で飼育する個体を50 l ガラス製水槽へ移送した日と同日に、500 l 飼育水槽から塩分30の飼育水を入れた50 l のガラス製水槽（同上）に仔稚魚30個体を移送し、1日馴致させた後実験を開始した。飼育水の塩分は砂濾過海水と1日以上静置した水道水を混合することで調整し、飼育水は水中フィルター（ロカボーイ，GEX（株））あるいは上部フィルター（ニッソースティングレー，NISSO（株））によって濾過循環した。水温の調節は行わず、室温とした。10日齢，20日齢の飼育実験は、上記と同様に栄養強化を行ったシオミズボウムシおよびアルテミアを1日に2回給餌した。30日齢の実験は栄養強化したアルテミアと配合飼料（おとひめS1）を1日に2回給餌した。生物飼料を与えた10日齢，20日齢，30日齢の実験では、フィルターによって生物飼料が濾過され、飼料が不足する可能性があったため、十分量を給餌し、各給餌前に水槽に飼料が残っていることを確認した。40日齢以降の実験は配合飼料（おとひめS1（40日齢）、おとひめS2（50日齢）、おとひめEP1（60日齢，70日齢））をそれぞれ1日に3回、飽食となるように給餌した。水温と塩分は導電率メーター（TCX-999i，東興化学研究所（株））で毎朝測定し、同時に死亡個体数を計数し、飼育水槽から除去した。実験開始日の個体数に対する飼育期間終了時の生残数から生残率を算出した。換水および底部の清掃は汚れに合わせて適宜行い、その都度塩分を調整した飼育水を追加した。DO についてはフィルターによる循環を行う際、十分量の酸素が溶け込むと考えられたため、測定は行わなかった。

各実験開始日にふたつの500 l 飼育水槽から、仔稚魚をランダムに15個体ずつ、計30個体取り出し、0.1%MS-222（ナカライテスク（株））で麻酔後に標準体長と湿重量を測定した。また、飼育実験終了時に全供試魚を0.1%MS-222で麻酔後、標準体長と湿重量を測定した。実験期間中、供試魚の体重は飼育日数に対し指数関数的に増加すると仮定し、体重あたり日間成長率を以下の式（Miyajima et al. 2011）より算出した（式（1））。

$$G_w(\%) = \left\{ (W_a/W_b)^{\frac{1}{d}} - 1 \right\} \times 100 \quad \dots \text{式 (1)}$$

$G_w(\%)$ は日間成長率, $W_b(\text{g})$ は実験開始前の体重, $W_a(\text{g})$ は実験終了後の体重, $d(\text{日})$ は実験を行った飼育日数を示す。

摂餌および代謝実験

10日齢, 31日齢, 50日齢の仔稚魚を, 塩分10, 20, 30の条件下で, それぞれ13 (10-23日齢), 12 (31-43日齢), 13 (50-63日齢) 日間飼育し, この間に消化速度, 日間摂餌量, 酸素消費量を測定した。飼育実験は各塩分2反復行った。飼育条件は成長実験と同様とした。

消化速度, 日間摂餌量, 飼料効率 (実験 2)

10-23日齢仔魚の実験は45×29.5×29.5 cm (w×d×h) のガラス製水槽を使用し, 各水槽300個体を実験に用いた。仔魚には, 1日に2回 (7時, 14時) シオミズツボワムシを常に飽食状態となるよう給餌し, 19日齢に達した仔魚を用いて日間摂餌量の推定を行った。夜明けから日没までに3時間毎に計4回 (2010年6月19日; 10時, 13時, 16時, 19時), 各ガラス水槽から仔魚10個体, 塩分区あたり20個体を取り出し, 80%エタノールで固定した。固定後, 個体ごとに実体顕微鏡を用いて消化管内容物を取り出し, ガラス繊維濾紙 (GF/A, Whatman (株)) で吸引濾過後, 濾紙と消化管内容物を取り除いた魚体を65℃で24時間乾燥させ, 乾重量を精密天秤 (MX5 ミクロ天びん, Mettler Toledo (株)) により1μgまで測定した。消化管内容物の乾重量を魚体の乾重量で割ることで, 各時間の魚体重あたりの消化管内容物の割合を算出し, 以下のElliott and Persson (1978) のモデルにより推定日間摂餌量を算出した (式 (2))。

$$I = \sum_{i=1}^m (S_i - S_{i-1}) e^{-R \cdot t_i} R t_i / (1 - e^{-R \cdot t_i}) \dots \text{式 (2)}$$

I は体重あたり日間摂餌量, t_i は各インターバル (i) の継続時間, S_i はインターバル (i) 終了時の消化管内容物の体重に対する割合, m は総インターバル数, R は消化管内容物の瞬間排出率を示す。夜間に全ての消化管内容物が消化されると仮定し $S_0=0$ とした。

また, 式 (2) に必要な各塩分条件下での消化管内容物瞬間排出率 (R) を求めるため, 上記飼育実験期間中に18日齢の仔魚を用いて消化実験を行った。早朝のワムシ給餌開始から1.5時間後に各ガラス水槽の供試魚50個体を, 同じ塩分のワムシを含まない飼育水の入ったガラス製水槽 (45×29.5×30 cm: w×d×h) に移送した。予備実験の結果, 仔魚は3-4時間で消化管内容物がほぼ空となることが明らかになったため,

移送1時間後から3時間後まで1時間毎に, 各水槽から仔魚10個体を取り出し, 80%エタノールで固定した。得られたサンプルは, 前述の方法で魚体重あたりの消化管内容物の割合を算出し, 以下の式により瞬間排出率 (R) を算出した (式 (3))。

$$A_t = A_0 e^{-R \cdot t} \dots \text{式 (3)}$$

A_0 は $t=0$ の時の消化管内容物の体重に対する割合, A_t は t 時間後の消化管内容物の体重に対する割合を示す。

31-43日齢, 50-63日齢では60×29.5×36 cm のガラス製水槽を使用し, 31日齢群は各水槽50個体, 50日齢群は各水槽30個体を実験に用いた。両実験期間ともに, 配合飼料 (おとひめ S1, S2) を1日3回残餌が出ないように観察しながら与え, 毎日の摂餌量 (湿重量) を計量した。実験開始前日 (30日齢, 49日齢) に500 l 飼育水槽から稚魚30個体を別に用意したポリカーボネート製100 l 黒色円形水槽に移し, 止水・無給餌条件下で1日間飼育し, 翌日, 全個体を60℃で24時間乾燥させ, 乾重量を測定した。実験期間終了後は全供試魚を80%エタノールで固定し, 後日60℃で24時間乾燥させ, 乾重量を測定し, 式(1)により体重あたり日間成長率を算出した。さらに以下の式により飼料効率を算出した (式(4))。

$$FE = (Gp/Ip) \times 100 \dots \text{式 (4)}$$

FE は飼料効率(%), Gp は飼育期間 (p) 中の1個体あたり体重増加量 (g), Ip は1個体あたり総摂餌量 (g) を示す。体重増加量は実験開始前と終了時の1個体あたり平均体重の差とし, 毎日の餌消費量を生残個体数で割り, 1日あたり1個体あたり摂餌量の飼育期間中の合計を1個体あたり総摂餌量とした。また, 式(1)により稚魚の毎日の平均体重を算出し, 平均摂餌量を平均体重で割ることにより, 日間摂餌量の毎日の変化を推定した。

酸素消費量 (実験 3)

各代謝実験期間終了2日前から, 代謝量の指標である酸素消費量を測定した。測定法は Oikawa et al. (1991) の方法を改変して行った。24時間以上無給餌状態で飼育した供試魚を用い, 半止水式により明条件下で測定を行った。測定時の水温は21-23日齢では21.8-22.0℃, 41-43日齢では21.8-22.1℃, 61-63日齢では24.5-24.7℃であった。実験装置は空気を補給するための空気槽, 呼吸室を収容する実験槽, ブランク槽, ポンプにより空気槽へ飼育水を汲み上げるポンプ槽の4つの水槽からなり, 上記の順に飼育水を循環させた。呼吸室は21-23日齢では100 ml, 41-43日齢

では200 ml, 61-63日齢では500 ml 容の三角フラスコを使用した。供試魚を呼吸室に収容し、魚体が流れられない程度の水流で1時間馴致を行った後、21-23日齢、41-43日齢では1時間、61-63日齢では45分間止水した。止水後、三角フラスコから酸素瓶に試水を空気が入らないように注意しながら移し、ウインクラ法 (Carrit and Carpenter 1966) で滴定を行い、試水と供試魚を含まない対照区との差から酸素消費量を算出した。10-23日齢では10個体あたりの酸素消費量を各塩分6反復、31-43日齢、50-63日齢では1個体あたりの酸素消費量を各塩分12反復測定した。測定後の個体は60°Cで24時間乾燥し、魚体重あたりの酸素消費量 ($mlO_2/g/h$) を算出した。実験装置の都合上、実験終了2日前に塩分10、実験終了日前日に塩分20、実験終了日に塩分30の酸素消費量を測定した。

統計処理

体重あたりの日間摂餌量は repeated measures one-way ANOVA を用いて、酸素消費量は Student *t*-test を用いて、事前に同じ実験条件の2反復間に有意差がないことを確認し、2水槽の平均値を塩分区の値として検定に用いた。体長、体重、日間成長率は nested ANOVA により、酸素消費量は one-way ANOVA で塩分間の差を検定後、有意差が認められた場合には Tukey HSD test を用いて、日間摂餌量の塩分間の差は repeated measures one-way ANOVA を用いて検定した。すべての検定の有意水準は $P = 0.05$ とした。

結 果

成長速度

実験開始時及び終了時の体長、体重を Table 1 に示す。トラフグは孵化後約30日で各鱗の鱗条数が定数に達し、稚魚期に入った事を確認した。体重あたりの日間平均成長率は、10-25日齢では塩分間で差はなかった (塩分10, $22.4 \pm 2.0\%$; 塩分20, $23.2 \pm 2.3\%$; 塩分30, $22.7 \pm 2.9\%$; Fig. 1)。20-35日齢では有意差は認められなかったものの、低塩分ほど成長が良好な傾向が見られた (塩分10, $18.0 \pm 2.5\%$; 塩分20, $17.8 \pm 2.2\%$; 塩分30, $17.3 \pm 2.3\%$)。30-45日齢では塩分30 ($19.5 \pm 2.7\%$) に対し、塩分20 ($21.1 \pm 2.2\%$) と塩分10 ($21.9 \pm 2.6\%$) で有意に成長が速かった ($P < 0.05$)。40-55日齢では塩分間に有意差は見られなかったが (塩分10, $7.1 \pm 2.0\%$; 塩分20, $7.7 \pm 1.9\%$; 塩分30, $6.6 \pm 2.4\%$)、50-65日齢では塩分20 ($11.6 \pm 1.8\%$)、塩分30 ($10.9 \pm 1.6\%$) に対し、塩分10 ($12.7 \pm 1.5\%$) で有意に成長が速かった ($P < 0.05$)。60-75日齢 (塩分10, $10.0 \pm 1.1\%$; 塩分20, $9.4 \pm 1.1\%$; 塩分30, $8.7 \pm 1.0\%$) と70-85日齢 (塩分10, $6.8 \pm 1.0\%$; 塩分20, $6.2 \pm 1.1\%$; 塩分30, $5.1 \pm 1.0\%$) では塩分が低いほど有意に速い成長が得られた ($P < 0.05$)。体長、体重についても、成長率と同様の結果が得られた (Table 1)。生残率が他の日齢区と比較して低かった40-55日齢の結果を除くと、日齢が若いステージほど日間成長率は高い傾向にあった。40-55日齢で生残が悪かった理由として、40-55日齢の

Table 1. Initial and final standard length, wet body weight (mean \pm SD) and survival rate in tiger puffer reared under three different salinity conditions for 15 days

	Salinity (ppt)	Experimental period in day post hatching						
		10-25	20-35	30-45	40-55	50-65	60-75	70-85
Standard length (mm)								
Initial		4.65 \pm 0.32	7.77 \pm 0.52	9.42 \pm 1.14	15.8 \pm 1.69	25.4 \pm 1.42	34.4 \pm 2.00	45.9 \pm 2.07
Final	10	10.7 \pm 0.9 ^a	18.4 \pm 1.9 ^a	25.4 \pm 2.9 ^a	37.7 \pm 4.3 ^a	50.0 \pm 3.9 ^a	58.6 \pm 4.1 ^a	63.8 \pm 2.8 ^a
	20	11.2 \pm 1.1 ^a	18.6 \pm 1.6 ^a	24.8 \pm 2.5 ^a	38.9 \pm 3.1 ^a	47.7 \pm 4.2 ^b	55.4 \pm 3.3 ^b	61.9 \pm 3.1 ^b
	30	11.0 \pm 1.2 ^a	17.9 \pm 1.7 ^a	23.1 \pm 2.6 ^b	36.8 \pm 4.1 ^a	46.7 \pm 3.6 ^b	53.9 \pm 2.8 ^c	59.6 \pm 3.1 ^c
Wet body weight (g)								
Initial		0.0029 \pm 0.0006	0.023 \pm 0.005	0.034 \pm 0.015	0.17 \pm 0.06	0.83 \pm 0.12	1.84 \pm 0.21	3.64 \pm 0.29
Final	10	0.060 \pm 0.014 ^a	0.28 \pm 0.08 ^a	0.67 \pm 0.22 ^a	2.38 \pm 0.63 ^a	5.05 \pm 1.04 ^a	7.70 \pm 1.15 ^a	9.78 \pm 1.39 ^a
	20	0.067 \pm 0.015 ^a	0.27 \pm 0.07 ^a	0.60 \pm 0.17 ^a	2.58 \pm 0.69 ^a	4.37 \pm 1.02 ^b	7.09 \pm 1.03 ^b	9.00 \pm 1.34 ^b
	30	0.064 \pm 0.020 ^a	0.26 \pm 0.07 ^a	0.50 \pm 0.16 ^b	2.25 \pm 0.72 ^a	3.97 \pm 0.86 ^b	6.46 \pm 0.88 ^c	7.74 \pm 1.04 ^c
Survival rate (%)								
	10	75.0% (88.3, 66.7)	73.3% (60.0, 86.7)	74.5% (71.0, 78.1)	51.7% (43.3, 60.0)	86.7% (86.7, 86.7)	93.3% (100.0, 86.7)	91.7% (93.3, 90.0)
	20	53.3% (50.0, 56.7)	80.0% (86.7, 73.3)	78.3% (83.3, 73.3)	55.0% (46.7, 63.3)	81.7% (93.3, 70.0)	88.3% (93.3, 83.3)	80.0% (83.3, 76.7)
	30	70.0% (73.3, 66.7)	80.0% (73.3, 86.7)	75.0% (73.3, 76.7)	50.0% (53.3, 46.7)	95.0% (93.3, 96.7)	88.3% (83.3, 93.3)	91.7% (86.7, 96.7)
Water temperature (°C)								
		22.0 \pm 1.1	23.6 \pm 1.1	23.8 \pm 1.5	26.0 \pm 1.1	25.4 \pm 0.9	25.7 \pm 1.1	26.5 \pm 1.0

Values in parentheses indicate each survival rate of the two tanks.

Different letters over the values indicate significant differences between salinity conditions.

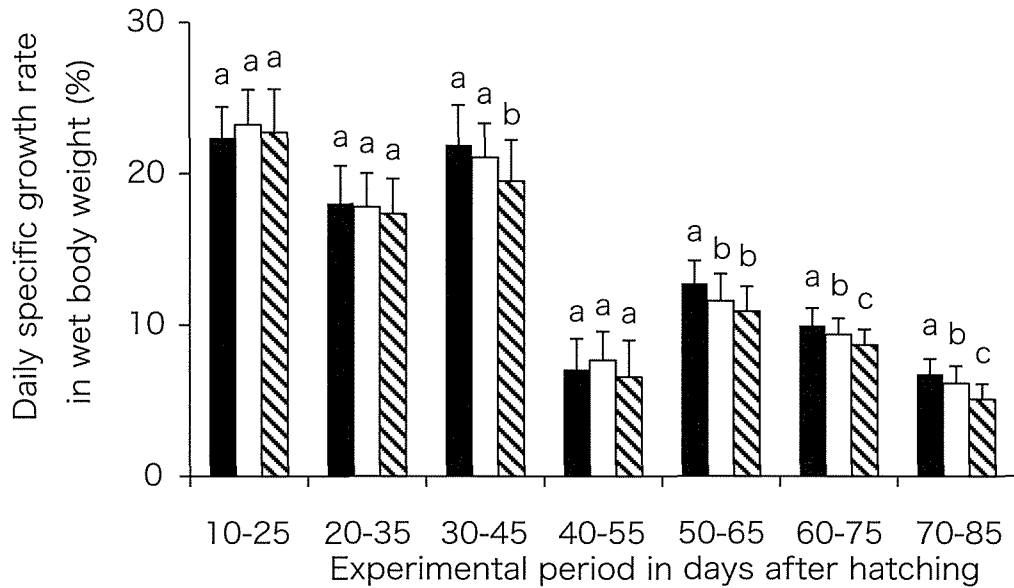


Fig. 1. Daily specific growth rate (mean ± SD) of tiger puffer reared under three different salinity conditions (10 (■), 20 (□) and 30 (▨)) in wet body weight. Different letters over the bars indicate significant differences between salinity conditions.

Table 2. Instantaneous rate of gut evacuation (R) of 18-day-old and daily ration (I) of 19-day-old tiger puffer larvae at three different salinity conditions

Salinity (ppt)	Instantaneous evacuation rate (R)	Daily ration (I)	Number of observations	r ²
10	0.367	52.8	46	0.993
20	0.318	48.3	46	0.996
30	0.229	39.4	46	0.632

Daily ration is expressed as percent to larval body weight in dry basis.

r² indicate coefficient of determination.

実験から上部フィルターを使用した方が、上部フィルターからの水流が強すぎたために、稚魚にストレスがかかったと考えられ、噛み合いが加速した様子が観察された。全実験期間を通して、生残率に塩分間で明瞭な傾向は認められなかった (Table 1)。

摂餌量、飼料効率および酸素消費量

18日齢仔魚の消化管内容物瞬間排出率は、低塩分ほど高い傾向が見られた (Table 2)。この瞬間排出率を用いて19日齢の仔魚について推定された体重あたり日間摂餌量は39.4%~52.8%であり、低塩分ほど摂餌量が多い傾向が認められた (Table 2)。なお、10-23日齢の仔魚においては、消化速度、日間摂餌量推定のために標本を取り出したことにより、実験終了時の体重が塩分間で不均一になると考えられたため、日間平均成長率は算出できなかった。

31-43日齢稚魚の体重あたり日間平均成長率は、塩分30に比べ、塩分10、20でやや高い値が得られ、低塩

Table 3. Initial dry body weight, daily specific growth rate and feed efficiency in tiger puffer reared under three different salinity conditions

	Salinity	Experimental period in DPH	
		31-43	50-63
Initial body weight (mg, mean ± SD)		11.3 ± 2.5	116.6 ± 17.6
Daily specific growth rate (% , mean ± SD)	10	13.8 ± 3.7 ^a	8.6 ± 2.6 ^a
	20	14.2 ± 3.5 ^a	
	30	13.2 ± 3.1 ^a	5.8 ± 2.6 ^b
Feed efficiency (%)	10	24.6 (24.0, 25.1)	31.9 (32.4, 31.4)
	20	24.1 (24.2, 24.1)	
	30	22.7 (22.7, 22.8)	28.6 (29.7, 27.5)
Water temperature (°C mean ± SD)		24.4 ± 0.6	27.2 ± 0.5

Values in parentheses indicate each feed efficiency of the two tanks.

Different letters over the values indicate significant differences between salinity conditions.

分区で成長が良好な傾向が見られた (Table 3)。さらに、この傾向は50-63日齢でより顕著になり、塩分30に比べ塩分10で有意に高成長が得られた (Table 3)。31-43日齢稚魚の魚体重あたり日間摂餌量は、実験期間の中期まで塩分10においてやや多い傾向が見られたが、最終的には塩分間に有意差は認められなかった (Fig. 2A)。50-63日齢稚魚では、塩分20で2水槽ともに飼育開始直後から摂餌行動がほとんど見られず、

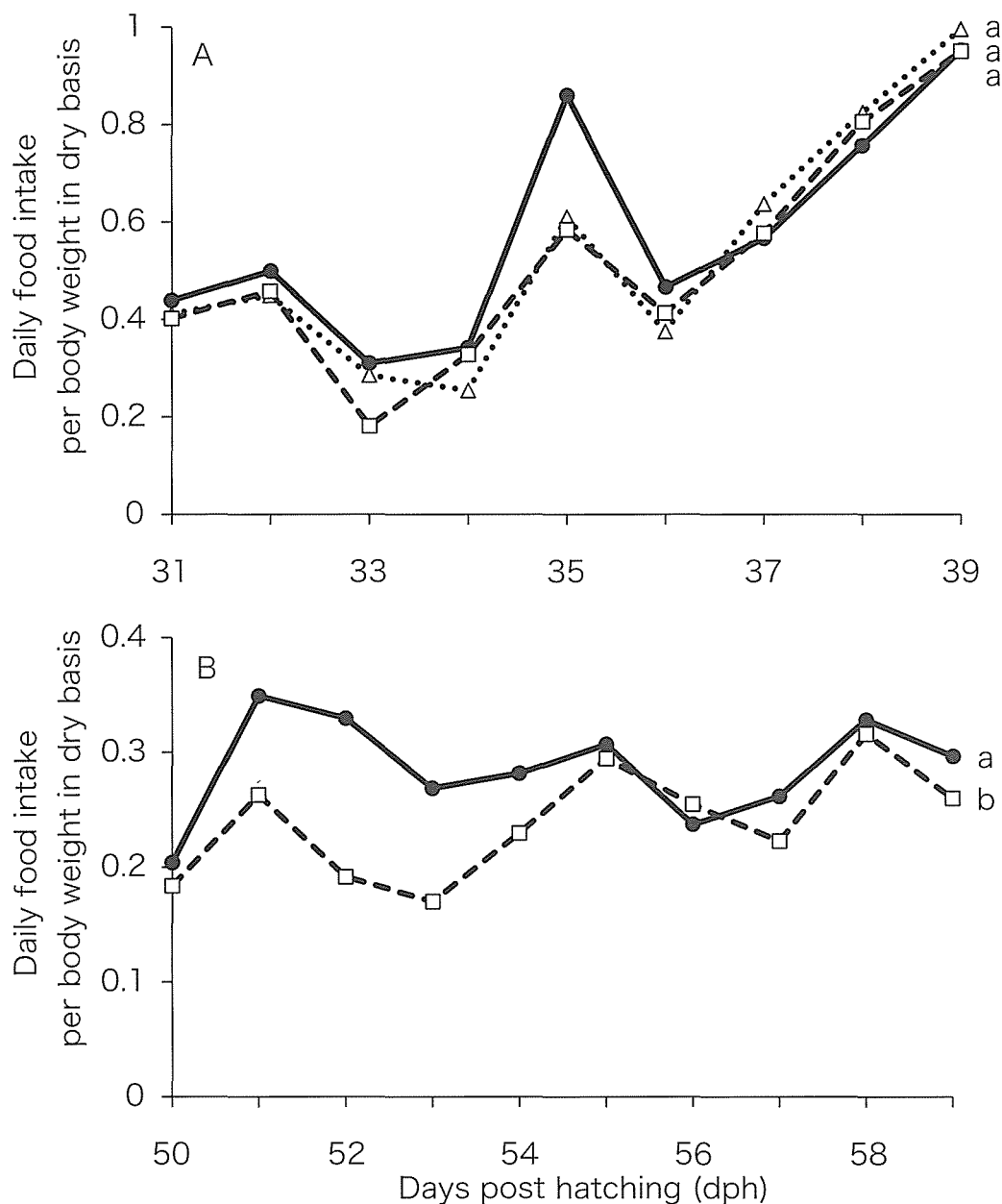


Fig. 2. Daily food intake (dry weight) of tiger puffer at 31-43 day post hatch (A) and 50-63 day post hatch (B) under three different salinity conditions (10 (●), 20 (△) and 30 (□)). Different letters next to the lines indicate significant differences between salinity conditions.

飼育3日目にほぼ全ての個体が死亡したため、データから除外した。50-63日齢の実験期間中の日間摂餌量は、塩分30に比べ、塩分10で有意に多かった ($P < 0.05$, Fig. 2B)。飼育期間中の飼料効率、31-43日齢、50-63日齢ともに、低塩分ほど高かった (Table 3)。

体重あたり酸素消費量は、21-23日齢では塩分20 ($3.1 \pm 0.2 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$) と30 ($3.3 \pm 0.3 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$) に比べ、塩分10 ($4.3 \pm 0.4 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$) で有意に高かった ($P < 0.05$, Fig. 3A)。41-43日齢では酸素消費量に塩分間の有意差は見られなかった (塩分10, $3.6 \pm 0.7 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$; 塩分20, $3.3 \pm 0.9 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$; 塩分

30, $3.7 \pm 0.6 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$; Fig. 3B)。61-63日齢では、有意な違いとはならなかったものの、塩分10 ($3.2 \pm 0.6 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$) の方が塩分30 ($2.7 \pm 0.5 \text{ mlO}_2/\text{g/h}$) よりも高い傾向が見られた ($P = 0.0511$, Fig. 3C)。

考 察

本研究の結果では、塩分10-30の範囲では、トラフグは仔魚期には成長や生残に塩分の影響をほとんど受けなかった。一方、生残が低かった40-55日齢区を除くと、稚魚期に入った30日齢以降は低塩分で成長が有

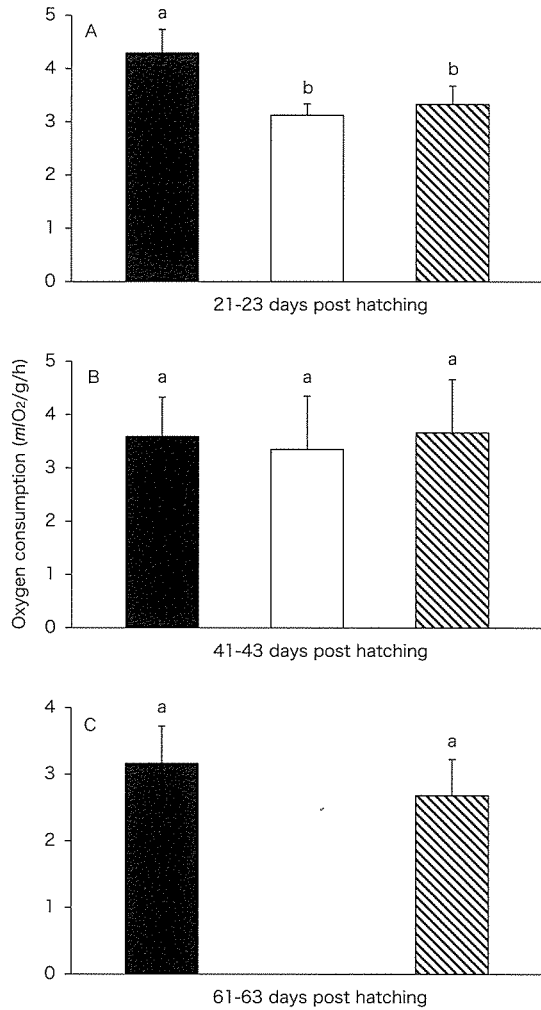


Fig. 3. Oxygen consumption per hour per dry body weight (mean ± SD) of tiger puffer at 21-23 day post hatch (A), 41-43 day post hatch (B) and 61-63 day post hatch (C) under three different salinity conditions (10 (■), 20 (□) and 30 (▨)). Different letters over the bars indicate significant differences between salinity conditions.

意に速い結果となった。トラフグでは、低塩分飼育により幼期の成長が向上することが報告されている（韓ら 1995; 神谷・辻ヶ堂 1995; Kikuchi et al. 2007; 今井ら 2010）が、どの発育段階から低塩分が成長に有利になるかについては明確にはわかっていない。神谷・辻ヶ堂（1995）は、孵化仔魚を塩分10.1～35.5で10日間飼育した実験においても、塩分10.1で成長が最もよかったことを報告した。また、今井ら（2010）は、孵化仔魚から40日間の飼育において、塩分32に比べ、塩分16と24で成長が速かったことを報告している。一方、韓ら（1995）は32-51日齢の飼育では塩分25.6～32.0の方が12.8～19.2よりも成長がよく、75-101日齢の飼育では塩分10で最も成長の良いことを報告している。本研究では、10日齢から70日齢までの仔稚魚について、発育段階を10日齢ごとの詳細な間隔に区切って15日間の飼育実験を行い、10-25日齢、20-35日齢の飼育では

塩分間に成長差はなく、30-45日齢の飼育実験以降成長差の生じることを確認した。また、摂餌量等の推定のために31日齢から12日間の飼育を行った飼育実験においても、飼育期間が短いため有意差は認められなかったものの、同様に低塩分区で成長がよい傾向が見られ、50-63日齢では塩分30に比べ塩分10で有意に成長が速かった。仔魚期の成長と塩分との関係について異なる結果が得られているが、水槽の形状やサイズ、収容密度、飼育水温、飼育期間などの実験条件によって成長速度は大きく影響されることが考えられる。特に収容密度は、神谷・辻ヶ堂（1995）では10個体/l、今井ら（2010）では10.9個体/l、韓ら（1995）の32日齢開始の実験では2個体/l、本研究では0.6個体/lと大きく異なっている。収容密度はトラフグ仔稚魚の成長に影響することが知られているため（韓ら 1994）、収容密度の影響などについて今後検討する必要があるが、本研究により、30日齢以降の稚魚期に入ると、成長速度に対する低塩分の効果が明瞭になり始めることが示された。

トラフグ稚魚の河口域への来遊は、体長8～20 mm前後から認められている（田北・Intong 1991; 中島ら 2008）。本研究において、平均体長9.4 mmから約25 mmまで成長した30-45日齢において、低塩分区（塩分10および20）で有意に成長が速まったことは、フィールドでの調査結果に対応するものと判断することができる。

酸素消費量は、21-23日齢の仔魚においてのみ塩分間に差が認められ、塩分10において有意に高かった（Fig. 2）。また、61-63日齢稚魚においても、塩分10の方が塩分30よりも高い傾向が示唆された。このことから、低塩分においてトラフグ稚魚の成長が速いことと代謝量との間に直接的な関係は認められず、浸透圧調節に起因する代謝エネルギーの差が成長速度へ影響するという機構を確認することはできなかった。

消化速度と日間摂餌量を推定した18, 19日齢（10-23日齢区）の仔魚では、低塩分ほど消化速度が速く摂餌量の多い傾向が認められた（Table 2）。しかし、仔魚期には成長速度に塩分間で差は生じておらず、これは仔魚期には低塩分において酸素消費量も多いことが関係している可能性が示唆された。仔魚期に低塩分条件下で酸素消費量が多い原因としては、低塩分に対する生理的適応の準備が完全ではなく、生理的ストレスなどの影響を受けていることも考えられるが、仔魚期の代謝についてはさらに詳細な研究が必要である。

一般に、魚類のエネルギー収支は以下のように表される（山下 1991）。

$$I = G + M + E \cdots \text{式 (5, a)}$$

ここで、Iは摂餌されたエネルギー、Gは成長に利用されたエネルギー、Mは呼吸により代謝されたエネルギー、Eは不消化物や尿などとして排出されたエネルギーを示す。飼料効率はG/Iで表されるため、上記の式を変形すると以下の式が得られる。

$$G/I = 1 - \{(M+E)/I\} \cdots \text{式 (5, b)}$$

稚魚期のトラフグでは、30-43日齢区では必ずしも明瞭とはいえないが、50-63日齢区では明らかに摂餌エネルギー(I)は低塩分で多かった(Fig. 2)。低塩分では、摂餌エネルギー(I)の増大に対応して排出エネルギー(E)も増えることが考えられるが、代謝エネルギー(M)に塩分間で差がない(Figs. 3B, 3C)ことから、式(5, b)の $\{(M+E)/I\}$ は低塩分で(I)の増加とともに減少し、右辺全体 $(1 - \{(M+E)/I\})$ は増加することが推察される。これを左辺でみると、飼料効率の増大を意味しており、左辺では(I)の増加とともに成長量(G)がより高い効率で増加したことになる。すなわち、低塩分でトラフグ稚魚の成長が速い要因として、低塩分では摂餌量の増大により摂取エネルギー(G+M)が増大するが、塩分間で代謝量(M)に差がないことから、摂取エネルギーの増大分は成長(G)へ回され、成長量と飼料効率が増加した可能性が考えられた。ただし、本研究における絶食状態で呼吸室に閉じ込めた測定条件下での代謝は、基礎代謝と平常代謝の中間的な状態と考えられ、これは飼育水槽内でのトラフグ稚魚の代謝の状態とは異なる。また、本研究では摂餌量の増加と消化効率との関係や特異動的作用への影響なども測定できなかつた。トラフグにおいて稚魚期に低塩分で成長が速いメカニズムについては、代謝や消化に関するさらに詳細な研究が求められる。

なお本研究では、実験1~3において標本の重量測定法が異なっているので、エネルギー収支の各項目(I, G, M)の数値を直接利用することはできない。しかし、塩分条件間では同じ手法で測定していることから、式(5, b)についてこの様な分析を行うことに問題はないと考えられる。

ヒラメ稚魚は、100%海水区に比べ50%海水区で高い成長を示し、その要因は摂餌量・飼料効率の増加、および安静時の酸素消費量の低減にあることが報告されている(斎藤ら1990)。また、稚魚期に海に降るサケの仔魚を用い、0-100%海水で飼育実験を行ったKoshiishi(1986)は、飼育開始から1週間後までは高塩分ほど摂餌量、飼料効率、成長が低く、飼育5週目では塩分とともに摂餌量が増加したものの、淡水で飼料効率が高くなるために、高塩分で飼育するよりも淡水で飼育することで高成長が得られたと報告して

いる。このように、塩分と成長速度との関係は、魚種や発育段階によって大きく異なることが示されており(Boeuf and Payan 2001; Yamashita et al. 2001)、トラフグにおいても、摂餌量の重要性が示唆された。

本研究結果やこれまでの知見(韓ら1995; 神谷・辻ヶ堂1995; Kikuchi et al. 2007; 今井ら2010)から、トラフグでは、少なくとも、稚魚期には低塩分条件で飼育することにより、成長および飼料効率の増加が期待される。近年では、閉鎖循環システムを活用した種苗生産施設により、低塩分飼育が容易になってきている(丸山ら1999; 鴨志田ら2006; Kikuchi et al. 2006)。これらの技術をトラフグの生理・生態学的知見と効果的に連関させることで、飼育期間の短縮や種苗生産コストの低減など、より効率的な種苗生産技術に発展できる可能性が期待される。

要 約

トラフグ仔稚魚の成長にとって好適な塩分の発育に伴う変化と、塩分により成長差が発生する要因を検討した。10-70日齢の仔稚魚を、10日齢毎に塩分10, 20, 30の飼育水で15日間飼育した。その結果、10, 20日齢の仔魚では塩分間に成長差はなかったが、30日齢以降の発育段階では、低塩分において成長が速い傾向が認められた。また10日, 31日, 50日齢の仔稚魚を、同上の3塩分区で12-13日間飼育し、摂餌量、飼料効率、代謝量の指標となる酸素消費量を調べた。酸素消費量は10-23日齢では塩分10で高かったが、31-43日齢、50-63日齢では、塩分間に差はなかった。一方、50-63日齢の摂餌量、飼料効率は低塩分で高い結果となった。以上のことから、トラフグの成長における好適塩分は稚魚期(30日齢前後)に入ると低塩分へ推移し、低塩分が高成長となる要因として、摂餌量と飼料効率の増加の重要性が示された。

謝 辞

トラフグ受精卵・L型ワムシを提供してくださった(独)水産総合研究センター日本海区水産研究所能登島戸舎の榮健次氏、小磯雅彦氏に篤く御礼申し上げます。酸素消費量測定実験について、ご指導・助言を頂いた九州大学大学院生物資源環境科学府附属水産実験所の及川信准教授、同八木光晴氏に深く感謝申し上げます。また英文校閲をして頂いたNew Hampshire大学のMichelle Walsh氏、トラフグの飼育・実験方法・統計方法に関して的確な指導、有益な助言を頂いた京都大学フィールド科学教育研究センターの皆様には謝意を表します。

文 献

- Boeuf, G. and P. Payan (2001) How should salinity influence fish growth? *Comp. Bioche. Physiol.*, **130**, 411-423.
- Carrit, D. E. and J. H. Carpenter (1966) Comparison and evaluation of currently employed modification of the Winkler method for determining dissolved oxygen in sea water; a NASCO report. *J. Mar. Res.*, **24**, 286-318.
- Elliott, J. M. and L. Persson (1978) The estimation of daily rate of food consumption for fish. *J. Anim. Ecol.*, **47**, 977-991.
- 韓 慶男・松井誠一・古市政幸・北島 力 (1994) トラフグ幼稚仔の収容密度が成長、生残率及び尾鰭欠損率に及ぼす影響. 水産増殖, **42**, 507-514.
- 韓 慶男・莊 恒源・松井誠一・古市政幸・北島 力 (1995) トラフグ幼稚魚の成長、生残、および飼料効率に及ぼす飼育水塩分の影響. 日水誌, **61**, 21-26.
- 今井 正・荒井大介・森田哲男・小金隆之・山本義久・千田直美・遠藤雅人・竹内俊郎 (2010) 閉鎖循環式種苗生産におけるトラフグの成長、生残および飼育水の浄化に及ぼす低塩分の影響. 水産増殖, **58**, 373-380.
- 神谷直明・辻ヶ堂諱・岡田一宏 (1992) 伊勢湾口部安乗沖におけるトラフグの産卵場. 栽培技研, **20**, 109-115.
- 神谷直明・辻ヶ堂諱 (1995) トラフグ幼稚魚に対する塩分の影響. 栽培技研, **23**, 113-115.
- 鴨志田正晃・山崎英樹・山本義久 (2006) 閉鎖循環システムを用いたマダイの種苗生産. 栽培技研, **33**, 67-76.
- Kikuchi, K., N. Iwata, T. Furuta, T. Kawabata and T. Yanagawa (2006) Growth of tiger puffer *Takifugu rubripes* in closed recirculating culture system. *Fish. Sci.*, **72**, 1042-1047.
- Kikuchi, K., T. Furuta, H. Ishizuka and T. Yanagawa (2007) Growth of tiger puffer, *Takifugu rubripes*, at different salinities. *J. World Aquacult. Soc.*, **38**, 427-434.
- Koshiishi, Y. (1986) Effect of salinity on food intake, growth and feed efficiency of chum salmon, *Oncorhynchus keta* (Walbaum), and ayu, *Plecoglossus altivelis* Temminck & Schlegel. *Bull. Jap. Sea Reg. Fish. Res. Lab.*, **36**, 1-14.
- Lee, K. M., T. Kaneko and K. Aida (2005) Low-salinity tolerance of juvenile fugu *Takifugu rubripes*. *Fish. Sci.*, **71**, 1324-1331.
- 丸山俊朗・鈴木祥広・佐藤大輔・神田 猛・道下 保 (1999) 泡沫分離・硝化システムによるヒラメの閉鎖循環式高密度飼育. 日水誌, **65**, 818-825.
- 松浦修平 (1997) 生物学的特性. トラフグの漁業と資源管理 (多部田修編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 16-27.
- Miyajima, Y., R. Masuda, A. Kurihara, R. Kamata, Y. Yamashita and T. Takeuchi (2011) Juveniles of threadsail filefish, *Stephanolepis cirrhifer*, can survive and grow by feeding on moon jellyfish *Aurelia aurita*. *Fish. Sci.*, **77**, 41-48.
- 中島博司・津本欣吾・沖 大樹 (2008) 伊勢湾の砂浜海岸碎波帯に出現したトラフグ稚魚について. 水産増殖, **56**, 221-229.
- 農林水産省 (2009) 平成 21 年漁業・養殖業生産統計, 農林水産省大臣官房統計局, 東京, pp. 142-143.
- Oikawa, S., Y. Itazawa and M. Gotoh (1991) Ontogenetic change in the relationship between metabolic rate and body mass in a sea bream *Pagrus major* (Temminck & Schlegel). *J. Fish Biol.*, **38**, 483-496.
- 斎藤節男・佐々木陸子・李 海鷗・清水幹博・山田寿郎 (1990) ヒラメ稚魚の成長と代謝に及ぼす低塩分環境の影響. 北水試研報, **34**, 1-8.
- 柴田玲奈・青野英明・町田雅春 (2006) トラフグの産卵生態. 水研七研究報告, 別冊 **4**, 131-135.
- 水産庁・(独)水産総合研究センター (2010) 平成22年度トラフグ日本海・東シナ海・瀬戸内海系群および伊勢・三河湾系群の資源評価. 平成22年度資源評価票 (ダイジェスト版), <http://abchan.job.affrc.go.jp/digests22/html/2268.html>, <http://abchan.job.affrc.go.jp/digests22/html/2269.html>.
- 水産庁・(独)水産総合研究センター・(社)全国豊かな海づくり推進協会 (2010) 種苗生産, 放流実績 - 魚類. 平成 20 年度栽培漁業種苗生産, 入手・放流実績 (全国), 東京, pp. 8-9.
- 田北 徹・S. Intong (1991) 有明海におけるトラフグとシマフグの幼期の生態. 日水誌, **57**, 1883-1889.
- 田中 克 (1991) 接岸回遊の機構とその意義. 魚類の初期発育 (田中 克編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.119-132.
- 山下 洋 (1991) エネルギー収支. 魚類の初期発育 (田中 克編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 71-85.
- Yamashita, Y., M. Tanaka and J. M. Miller (2001) Ecophysiology of juvenile flatfish in nursery grounds. *J. Sea Res.*, **45**, 205-218.