

トラフグ人工種苗の減耗要因の検討；天然魚と人工種苗の比較

清水大輔,^{1a*} 崎山一孝,¹ 阪倉良孝,² 高谷智裕,² 高橋庸一^{1b}

(2006年8月25日受付, 2006年11月14日受理)

¹ 佃水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所百島実験施設, ² 長崎大学水産学部Predation differences between wild and hatchery-reared tiger puffer
Takifugu rubripes juveniles in a salt pond mesocosmDAISUKE SHIMIZU,^{1a*} KAZUTAKA SAKIYAMA,¹ YOSHITAKA SAKAKURA,²
TOMOHIRO TAKATANI² AND YOH-ICHI TAKAHASHI^{1b}¹ Momoshima Station, National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, Onomichi, Hiroshima 722-0061, ² Faculty of Fisheries, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan

To compare the effects of predation on the post-release mortality of wild and hatchery-reared juveniles of the tiger puffer *Takifugu rubripes* we conducted release experiments in a semi-natural environment using a salt pond mesocosm (5,300 m²). We released hatchery-reared juveniles together with wild juveniles into a pond with predators. Survival of the hatchery-reared juveniles (56.0%) was significantly lower than that of the wild juveniles (86.0%). These results indicate that predation is a major cause of post-release mortality of this species. We also compared swimming depths of wild and hatchery-reared juveniles immediately after release into an experimental tank (33.5 cm in depth). Wild juveniles swam near the tank bottom and showed bottom-dwelling behavior, but hatchery-reared juveniles swam mostly in the water column. Similar behavioral differences were observed in release experiments in a mesocosm. We also compared body compositions of tetrodotoxin (TTX), which was detectable in the wild juveniles, but hatchery-reared juveniles had no detectable TTX. We concluded that predation shortly after release and behavioral defects in hatchery-reared juveniles, such as changes in swimming behavior and feeding behavior, might be among the main causes of mortality in the stock enhancement program of this species.

キーワード：人工種苗, 天然魚, トラフグ, 被食, 模擬放流試験

全国で栽培漁業が推進されるなかで、様々な魚種の人工種苗量産技術が開発され、多くの魚種で大量生産が可能になってきている。しかし、これらの人工種苗の放流効果は必ずしも上がっていないのが現状である。¹⁾ 放流効果の上からいえない要因として、最近では放流種苗の質的な側面、すなわち放流種苗としての適性(種苗性)²⁻⁵⁾が放流効果を左右するものとして注目されている。種苗性の高い人工種苗は、放流後の天然水域での歩留りが良く、かつ天然資源と混じり合う。放流した人工種苗が天然海域で生き残っていくためには、可能な限り天然の種

魚(以下、天然種苗)に近い諸性質を備えた種苗を生産する必要がある。そのためには、人工種苗と天然種苗の各種生物学的特性の比較による基礎知見の集積が必要である。^{6,7)} 種苗性評価に有効な指標を特定できれば、放流用の人工種苗を選別する技術、さらには天然種苗に近い行動特性を人工種苗に付与する技術の開発が可能となる。

トラフグ *Takifugu rubripes* は商品価値が高く、我が国の重要な漁業対象種であるが、近年は資源の減少が懸念され、各地で漁業規制や種苗放流が行われている。⁸⁾ しかし、天然水域でのトラフグ稚魚の定量的な生態調査

* Tel.: 81-193-63-8121. Fax: 81-193-64-0134. Email: dshimizu@affrc.go.jp

^a 現所属: 佃水産総合研究センター宮古栽培漁業センター (Miyako Station, NCSE, FRA, Miyako, Iwate 027-0097, Japan)^b 現所属: 佃水産総合研究センター小浜栽培漁業センター (Obama Station, NCSE, FRA, Obama, Fukui 917-0117, Japan)

例は少なく,⁹⁾天然種苗や放流後の人工種苗の行動特性は十分に解明されているとは言い難い。我々は前報で,¹⁰⁾トラフグ人工種苗の食害による減耗実態を解明するため、天然に近い環境を再現した実験池での模擬放流実験を行い、トラフグ人工種苗が放流直後の被食により減耗していることを示した。

本研究では、新しい環境に対する適応の度合いが人工種苗と天然種苗で異なるという仮説を立て、実験池に人工種苗と天然種苗を放流し、捕食者の存在する環境および存在しない環境での成長・生残と摂餌状況および行動を、各々の種苗について調べた。さらに、トラフグ人工放流種苗の放流後の行動を探るために、種苗を飼育している比較的大型の水槽から、観察用の小型水槽へ種苗を移す、移槽操作という放流モデルを設定した。そして移槽後に、天然種苗と人工種苗の行動特性を比較した。さらに本種稚魚は底棲性が強いこと⁹⁾や、潜砂習性を持っていることから、底質の有無と移槽前の馴致が、実験水槽に移槽後の行動に与える影響についても調べた。また、トラフグはフグ毒 (TTX) を蓄積することが知られているが、その蓄積量の比較も併せて実施した。

材料と方法

実験池 捕食魚の存在しない環境での人工種苗と天然種苗の混合放流試験 (試験 I) を 2003 年に、2004 年には人工種苗と天然種苗を別々に捕食魚の存在する環境に放流した試験 (試験 II) を、さらに 2005 年には捕食魚の存在する環境での人工種苗と天然種苗の混合放流試験 (試験 III) を行った (Table 1)。すべての放流試験には (独) 水産総合研究センター百島栽培漁業センター (現 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所百島実験施設) にある砂泥底の実験池¹⁰⁾ (底面積 5,300 m², 縦 126 m, 横 42.5 m, 水深 1.2-2.2 m) を使用した。なお試験中の出現生物は、本実験池での以前の調査^{11,12)} とほぼ同様で、動物プランクトンではコペポダ類やアミ類、ベントスでは多毛類、端脚類などが優占していた。

試験期間中の平均水温 (水温の範囲) は、それぞれ試験 I では 29.9°C (26.8~32.7°C), 試験 II では 29.9°C (26.8~32.9°C), 試験 III では 28.8°C (25.9~31.5°C) であった。

供試魚 人工種苗はそれぞれの試験を行った年に、屋島栽培漁業センターで天然由来の親魚から人工採卵し、供試サイズまで飼育された稚魚を、試験の 2 日前に百島実験施設へ輸送した。天然種苗は試験の 2~4 日前に岡山県笠岡市の大島漁業協同組合の小型定置網により捕獲された稚魚を、捕獲当日に百島実験施設へ輸送した。どちらも容量 0.5 kL の水槽に 300 尾/kL の密度で収容し、試験に供するまでの期間、無給餌とした。

試験 I : 人工種苗と天然種苗の混合放流 (捕食魚なし)

Table 1 Results of release trials for *Takifugu rubripes* juveniles in the experimental pond mesocosm

Trial	Year	Predators	No. fish released		Initial standard length (cm)		Method	Term (days)	No. fish recaptured		Survival rate*1		Final standard length (cm)		Growth rate*2 (%)	
			Reared	Wild	Reared	Wild			Reared	Wild	Reared	Wild	Reared	Wild	Reared	Wild
I	2003	None	100	100	91.9 ± 7.1	60.9 ± 12.4	Mix	25	37	48	54.0	58.3	93.3 ± 7.4	68.9 ± 11.0	0.11 ± 0.12*	0.22 ± 0.13*
II-1	2004	None	296	286	40.6 ± 3.5	43.9 ± 2.9	Separate	8	216	190	73.0	66.4	42.3 ± 3.7	49.6 ± 3.6	0.48 ± 0.30*	1.38 ± 0.56*
II-2	2004	N = 30, TL = 59.2 (51.9-66.7) cm	289	281	54.7 ± 4.5	56.5 ± 4.1	Separate	8	43	201	14.9**	71.5**	57.1 ± 5.3	64.1 ± 4.2	0.71 ± 0.39*	1.42 ± 0.54*
III	2005	N = 30, TL = 46.3 (40.0-55.2) cm	100	100	53.4 ± 4.7	52.8 ± 4.8	Mix	5	56	86	56.0**	86.0**	52.0 ± 5.3	55.6 ± 4.1	—	—

*1 Recaptured individuals from the feeding habit investigation were included in the survival rate of release trial I.

Significant difference between hatchery-reared and wild juveniles by χ^2 -test (**; $P < 0.001$).

*2 Growth rate = (final standard length - initial standard length) / (initial standard length × examination term (day)) × 100.

Significant difference between hatchery-reared and wild juveniles by Mann-Whitney U test (**; $P < 0.05$).

放流試験には実験池を5 mm 目合の仕切網で2面に区切った半面を用いた。供試魚には人工種苗、天然種苗をそれぞれ100尾ずつ用い、左右の胸鰭および臀鰭基部の計3カ所に9色のイラストマー標識(Northwest Marine Technology社製)を組み合わせて標識を装着し、個体識別をした。また、人工種苗には赤色、天然種苗には黄色のイラストマー標識を上面から確認しやすいよう上唇に装着し、観察時に両者が識別できるようにした。標識した種苗の体長および体重を測定し、肥満度(体重/体長³×10⁶)を算出した。

2003年8月1日に、供試魚に標識装着をし、測定後ただちに実験池に放流した。放流時の供試魚の体長(±標準偏差)は、人工種苗91.9±7.1 mm、天然種苗60.9±12.4 mmであった(Table 1)。試験期間は25日間とし、試験終了後に実験池の海水を全て排水して生残個体を回収した。

試験中には、放流した人工種苗と天然種苗の摂餌状況を比較するため、放流から5日おきにサンプリングを行い、胃内容物調査を行うとともに、肥満度、肝臓重量指数(肝臓重量/体長³×10⁷)の推移を把握した。

夜間の分布状況を把握することを目的として、夜間にボート上から行うライントランセクト調査^{10,13)}を、放流当日より5日おきに、22時から3時の間に合計6回行った。調査ではライントランセクト上に出現した個体の位置および、分布水深を目視により表層(水深0~10 cm)、中層、低層(着底および潜砂)と分けて記録した。

試験Ⅱ：人工種苗と天然種苗を区分して放流(捕食魚あり・なし) 人工種苗と天然種苗の食害状況を比較するため、人工種苗・天然種苗それぞれについて、捕食魚が存在しない環境での対照試験(試験Ⅱ-1)と、捕食魚の存在する環境での食害試験(試験Ⅱ-2)を行った(Table 1)。両試験ともに実験池を仕切網で二つに分け、人工種苗と天然種苗を個別に放流する試験区(人工種苗区・天然種苗区)を設けた。食害試験では、捕食魚としてカネト水産株式会社(広島県福山市)で生産された1歳のタイリクスズキ*Lateolabrax* sp.を用いた。各試験区へのタイリクスズキの収容は30尾ずつとし、試験開始の2日前に収容して馴致させた。タイリクスズキの平均全長(全長の範囲)は59.2 cm(51.9~66.7 cm)であった。

対照試験、食害試験ともに、供試魚には人工種苗、天然種苗をそれぞれ300尾ずつ用い、実験池への放流前日にイラストマー標識で個体識別を行った。対照試験における放流前日の平均体長および標準偏差は、人工種苗40.6±3.5 mm、天然種苗43.9±2.9 mmであった。同様に、食害試験では人工種苗54.7±4.5 mm、天然種苗56.5±4.1 mmであった。標識を装着した種苗は、翌日の放流まで実験池の各試験区内に設置した小割生簀(3

×3×3 m、目合10 mm)に収容し、馴致した。

対照試験では2004年7月14日に、食害試験では7月27日に実験池への放流を実施した。両試験とも供試魚を収容した小割生簀を静かに開放し、人工種苗区と天然種苗区を同時に放流した。なお、小割生簀での馴致中に、対照試験では人工種苗11尾、天然種苗19尾が死亡したため、放流尾数はそれぞれ289尾、281尾となった。同じく食害試験では、人工種苗4尾、天然種苗14尾が死亡したため、放流尾数はそれぞれ296尾、286尾となった。試験期間は、両試験ともに8日間とした。試験終了後に実験池の海水を全て排水して生残個体を回収した。

食害試験では、放流種苗の被食状況を把握するため、放流当日から毎日、17~24時に刺網(目合50 mm)および銚つきでタイリクスズキを捕獲し、消化管内容物を調べた。また、試験区の捕食魚が20尾以下にならないよう、適宜新たなタイリクスズキを補充した。両試験共に分布状況把握を目的として、夜間ライントランセクト調査を放流当日から6日目まで毎日行った。

試験Ⅲ：人工種苗と天然種苗の混合放流(捕食魚あり) 放流試験には実験池を5 mm 目合の仕切網で2面に区切った半面を用い、捕食魚として平均全長(全長の範囲)46.3 cm(40.0~55.2 cm)のタイリクスズキ30尾を試験開始の2日前に収容した。

供試魚は人工種苗、天然種苗それぞれ100尾とし、実験池への放流前日に人工種苗には赤色、天然種苗には黄色のイラストマー標識で両群を識別した。人工種苗と天然種苗は実験池内に設置した同一の小割生簀内に収容し、24時間馴致後の2005年7月24日に放流した。試験期間は5日間とし、試験終了後に実験池の海水を全て排水して生残個体を回収した。放流前日の供試魚の平均体長および標準偏差は、人工種苗53.4±4.7 mm、天然種苗52.8±4.8 mmであった(Table 1)。

試験Ⅲでは、放流種苗の被食状況を把握するため、放流当日から毎日、17~24時に刺網(目合50 mm)および銚つきでタイリクスズキを捕獲し、消化管内容物を調べた。また、実験池内の捕食魚が20尾以下にならないよう、適宜新たなタイリクスズキを補充した。また、分布状況把握を目的として、夜間ライントランセクト調査を放流当日から4日目まで毎日行った。

人工種苗と天然種苗の行動比較実験 試験に供した人工種苗と天然種苗は、試験Ⅲの供試魚と由来の同じものを使用した。人工種苗、天然種苗ともに、百島実験施設への輸送から実験までの期間(7~10日間)、容量1 kLの飼育水槽で飼育した。人工種苗は、2面の飼育水槽に人工種苗を300尾ずつ収容し、市販の配合飼料(おとひめ2号、日清丸紅飼料株式会社)を与え飼育した。そのうち1面には底質として人工砂(ミクロスセラミ

ック MS-0, NORRA 株式会社) を敷いて馴致させた(砂馴致)。天然種苗は, 30 尾を 1 面の飼育水槽に収容し, 生きたイサザアミを与え飼育した。

飼育水槽から実験水槽への種苗の移槽実験は, 2005 年 7 月 17~28 日の期間に行った。移槽操作用の実験水槽には, 60 L 容の青色プラスチック製水槽(水面直径 49.0 cm, 底面直径 45.0 cm, 深さ 33.5 cm)を使用した。実験水槽に直径約 2 cm のホースを排水装置として水槽の側面に取り付けて 1 L/分で換水した。これらを屋内に 4 面用意し, 底面に人工砂を 3 L(底からの高さ 1~2 cm)敷き, ウォーターバス内に設置した。実験期間中の水温は 26.0~29.5°C であった。水槽上部に取り付けた蛍光灯を実験水槽への移槽(8:30)前に点灯させて 19:00 に消灯した。日中の水面照度は最大 743 lx であった。毎朝 8:30 に稚魚を各水槽に 3 尾ずつ移槽し, 移槽直後から計 9 回(8:30, 10:30, 11:00, 15:00, 16:30, 17:00, 19:00, 22:00, 6:30)トラフグ稚魚の行動について, 水槽上部からの目視観察を行い, さらに, 11:00, 17:00, 22:00 にはデジタルビデオカメラ(DCR-TRV9, SONY)による撮影を各々の観察時間に 10 分間ずつ行った。消灯中の 22:00 の撮影には赤外線ライト(HVC-IR, PHOTRON)を併用し, ビデオモニターから遊泳行動を観察した。この一連の観察を, 天然種苗について 4 回, 人工種苗について 8 回, 砂馴致人工種苗について 6 回繰り返した。

水深 33.5 cm の実験水槽を表層(水深 0~10.5 cm), 中層(水深 10.5~21.5 cm), 底層(水深 21.5~33.5 cm)の 3 層に分け, 各層に分布している稚魚の尾数を記録した。なお底面に着底および底質に潜砂している個体も底層での分布として記録した。撮影したビデオテープについて, 単位時間当たりの移動距離を遊泳速度と定義して解析を行った。まずビデオテープを 14 インチのモニター(KV-14GV1, SONY)に再生, コマ送りをしながら, 個体別に 30 秒間の行動の軌跡を OHP シートにトレースした。その後デジタルキルビメーター(PJ 型, 内田洋行)を用いて軌跡の距離を測り, 遊泳速度を算出した。また体長当たりの遊泳速度(相対遊泳速度)も求めた。

翌朝 6:30 の観察後, 全個体を採り上げ, 氷水で麻酔後, 全長および体長をデジタルノギス(CD-15CP, ミットヨ株式会社)で測定した。

天然種苗および人工種苗の魚体内 TTX の定量 試験Ⅱおよび試験Ⅲに供した天然および人工種苗トラフグ各 5 尾ずつにつき TTX の抽出まで -20°C で保存した。これらトラフグ稚魚については個別に体長と体重を測定後, 食品衛生検査指針・理化学編のフグ毒試験法¹⁴⁾に準じて毒の抽出を行った。フグ稚魚全体をホモジナイズ後, 0.1% 酢酸を加え, 沸騰水浴中で 10 分間加熱抽出

を行った。得られた抽出液は 0.45 μm メンブロンフィルターでろ過後, 限外濾過(分画分子量 10,000 da.)に付し, 得られた 10,000 da. 以下の画分について液体クロマトグラフィー/質量分析を行った。¹⁵⁾ LC/MS は, LC 部に alliance2690 (Waters 社製)および MS 部に Z-spray MS (Micromass 社製)をそれぞれ用いた ZMD-2000MkⅡシステムを使用した。検出された TTX 量は魚体重 1 g あたりのマウス致死量 (MU; mouse unit)として表した。

統計処理 放流試験区間の生残率の差を χ^2 検定により調べた。放流試験区間の稚魚の成長については, 式 1 により個体ごとの日間成長率 (Growth Rate) を求め, Mann-Whitney の *U* 検定により比較した。

$$GR(\%) = \frac{Ls2 - Ls1}{D \cdot Ls1} \cdot 100 \quad (1)$$

Ls1: 放流時の体長

Ls2: 取揚時の体長

D: 試験期間 (日)

遊泳水深, 遊泳速度の実験区間および観察時刻間の比較には, 一元配置分散分析 (ANOVA) を行い, 有意差 ($P < 0.05$) が検出された場合には, 多重比較検定 (Fisher's PLD test) を行った。

TTX の魚体内蓄積量の比較については, 天然種苗と人工種苗間で Student's *t*-test を用いた。

結 果

試験Ⅰ: 人工種苗と天然種苗の混合放流(捕食魚なし) 人工種苗と天然種苗は放流後直ちに実験池内に分散した。その後, 天然種苗は主に実験池の中央部で群れを形成した。人工種苗は水面に 2~5 尾程度の群れを作り, 実験池の周囲を遊泳した。人工種苗と天然種苗は経日的に混ざり合い, 放流後 20 日目には, トラフグの多くが周囲の池壁や実験池の隅に設置してある注水口付近に集まった。

1. 夜間の分布状況 夜間の目視調査では, 人工種苗, 天然種苗ともに仕切網や池壁付近の浅場に局在していた。人工種苗, 天然種苗共に表層~中層に浮かんで定位する個体が多く, その垂直分布に差はなかった (Fig. 1A)。

2. 生残と成長 人工種苗と天然種苗の摂餌状況を比較するため, 試験終了までに人工種苗 22 尾, 天然種苗 13 尾のサンプリングを行った。そこで, これらを各群の総間引き尾数と見なし, 放流尾数 - 総間引き尾数 - 自然死亡尾数 = 取揚げ尾数となるように 1 日あたりの自然死亡率 ($1-M$) を算出した。その結果, 人工種苗では $M=0.0247$, 天然種苗では $M=0.0216$ となり, 人工種苗の生残率は 54.0%, 天然種苗の生残率は 58.3% となった (Table 1)。

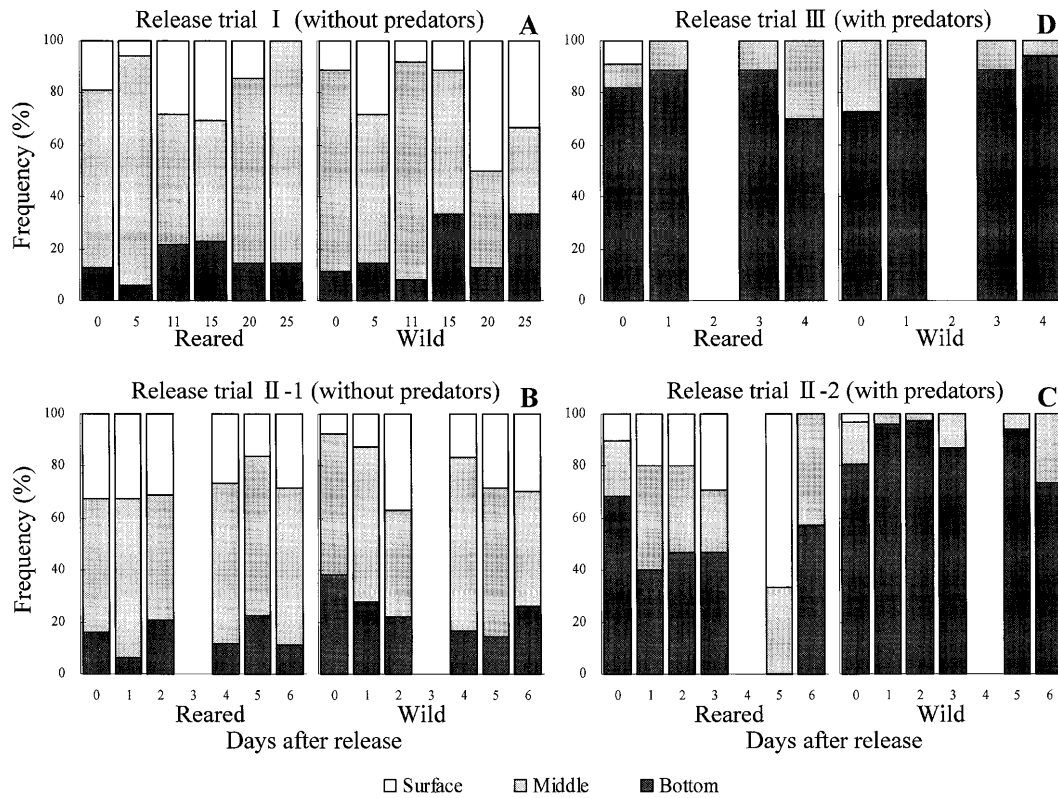


Fig. 1 Comparisons of swimming depth of tiger puffer juveniles after release into the experimental pond mesocosm, as observed using the line-transect method. Data are shown as the frequency (%) of fish observed at the following depths: open column for the surface area (0–10 cm in depth), shaded column for the middle area, and closed column for the bottom area and bottom-dwelling.

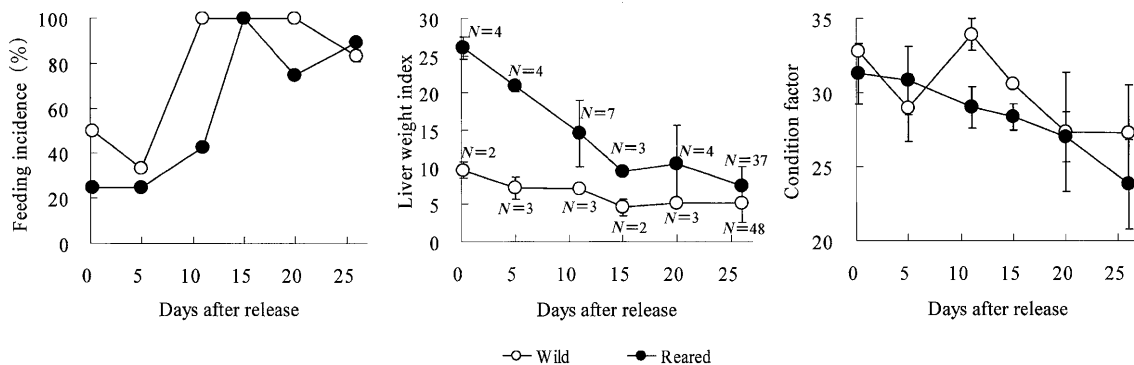


Fig. 2 Feeding incidence, liver weight index and condition factor of wild and hatchery-reared juveniles of tiger puffer under release trial I. Liver weight index = (Liver weight in g) / (Standard length in mm)³ × 10⁷. Condition factor = (Body weight in g) / (Standard length in mm)³ × 10⁶.

試験期間中の成長を把握するために、個体識別した生残魚の日間成長率を算出した。なお、放流時の人工種苗と天然種苗の平均全長が離れていたため、人工種苗と天然種苗の放流時の体長組成の重なる範囲 (70~100 mm) で比較したところ、天然種苗の成長が有意に良かった (Table 1, $P < 0.05$)。

3. 摂餌状況 試験期間中にサンプリングした個体の

消化管内から出現した餌生物は、人工種苗と天然種苗ともに小型のエビ・カニ類、甲殻類の幼生、ミオドコーパ類などが確認され、両群で明確な傾向は見られなかった。しかし、摂餌個体率を比較すると、天然種苗では10日目でほぼ全ての個体が摂餌していたのに対し、人工種苗では試験期間を通して低い値であった (Fig. 2)。さらに、肥満度・肝臓重量指数は、天然種苗ではほぼ一

定であったのに対し, 人工種苗では放流後 15 日目まで減少傾向にあった (Fig. 2)。

試験Ⅱ：人工種苗と天然種苗を区分して放流 (捕食魚あり・なし) 対照試験, 食害試験ともに放流直後の種苗は直ちに実験池内に分散した。対照試験では, 人工種苗は陸上からの目視観察で, 水面に 2~5 尾程度の群れを作り, 実験池の周囲を遊泳しているのが試験終了まで観察された。一方, 天然種苗は陸上からは観察できなかったが, 潜水調査では実験池の中央部で群れを形成しているのが確認された。

食害試験では, 放流直後から人工種苗が水面近くに群がる行動が観察され, その後群がり行動は試験終了時まで確認された。一方, 天然種苗の群がり行動はほとんど確認できず, 池の壁付近の浅場で池底に定位するトラフグが観察された。

1. 夜間の分布状況 夜間の目視調査では, トラフグは表層, 中層, 池底に定位して休止していた。それらの比率は人工種苗, 天然種苗共に捕食魚が存在する環境では, 池底に定位する個体が多く, 人工種苗と天然種苗の比較では, 天然種苗の方が池底に定位する個体が多かった (Fig. 1B, C)。また, 天然種苗は人工種苗と比べて池壁付近の浅場に集まりやすく, 特に捕食魚の存在する環境でその傾向が強かった。

2. 生残と成長 対照試験では, 人工種苗の生残率は 73.0%, 天然種苗の生残率 66.4% で有意差はなかった。食害試験では, 人工種苗の生残率 (14.9%) は天然種苗 (71.5%) よりも低かった (Table 1, $\chi^2=186.8$, $P<0.001$)。

個体識別した生残魚の日間成長率を算出したところ, 対照試験, 食害試験の両試験ともに, 天然種苗が人工種苗より高かった (Table 1, 対照試験, 食害試験; $P<0.05$)。

3. 被食状況 食害試験においては, タイリクスズキの捕獲調査を実施した。その結果, 人工種苗区では放流当日に捕獲したタイリクスズキ 1 尾がトラフグ 2 尾を捕食していた。その後, 放流後 5 日目に捕獲したタイリクスズキがトラフグ 1 尾を捕食していた。天然種苗区では, 試験期間を通してトラフグの捕食は確認できなかった。

試験Ⅲ：人工種苗と天然種苗の混合放流 (捕食魚あり) 人工種苗と天然種苗は直ちに実験池中央部に向かい, 陸上からはほとんど観察できなくなった。放流翌日から, 水面付近に人工種苗と天然種苗が混在する 20 尾程度の群がり観察され, それは試験終了まで観察された。潜水調査では, 実験池の壁付近の浅場で池底に定位する天然種苗が観察され, 中には体の半分程度を潜砂した個体も見られた。

1. 夜間の分布状況 夜間の目視調査では, 人工種

苗, 天然種苗ともに, 仕切網や池壁付近の浅場に局在していた。人工種苗, 天然種苗共に池底に定位または潜砂している個体が多く, その垂直分布に差はなかった (Fig. 1D)。

2. 生残 試験Ⅲでは, 人工種苗の生残率 (56.0%) は, 天然種苗の生残率 (86.0%) よりも有意に低かった (Table 1, $\chi^2=21.9$, $P<0.001$)。

3. 被食状況 タイリクスズキの捕獲調査の結果, 放流当日に捕獲したタイリクスズキ 4 尾中 3 尾がトラフグを捕食しており, 人工種苗が合計 8 尾, 天然種苗が 1 尾捕食されていた。その後, 放流後 2 日目に捕獲したタイリクスズキ 4 尾中 1 尾が人工種苗 1 尾を捕食していた。

人工種苗と天然種苗の行動比較実験 移槽直後には天然種苗と人工種苗の間に底層に分布する個体の割合に有意差がみられ (Fig. 3), 天然種苗 (体長 51.8 ± 3.2 mm) は 75% であったのに対し, 人工種苗 (体長 46.9 ± 5.2 mm) は 38% であった (ANOVA, $df=2$, $F=5.151$, $P<0.05$; Fisher's PLSD test, $P<0.05$)。一方, 砂馴致人

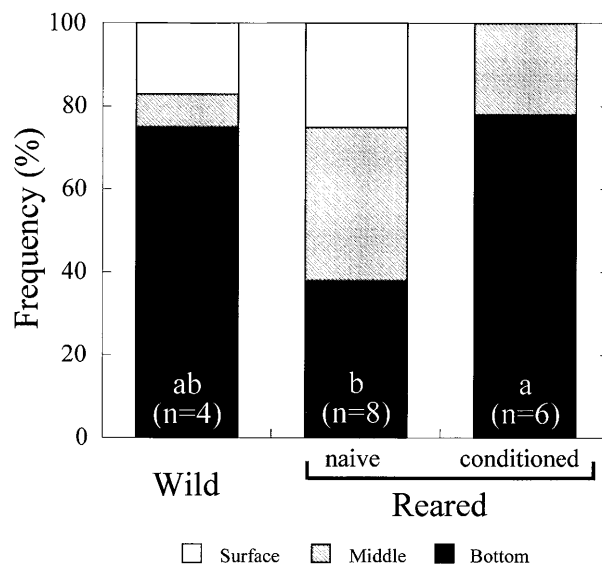


Fig. 3 Comparisons of swimming depth of tiger puffer juveniles just after the release into an experimental tank (49.0 cm in diameter and 33.5 cm in depth); Wild: wild caught juveniles (51.8 ± 3.2 mm SL), naïve: hatchery-reared juveniles (46.9 ± 5.2 mm SL) and conditioned: hatchery-reared juveniles (50.6 ± 5.6 mm SL) acclimatized in a tank covered with sand on the bottom. Data are shown as the average frequency (%) of fish observed at the following depths: open column for the surface area (0–10.5 cm in depth), shaded column for the middle area (10.5–21.5 cm), and closed column for the bottom area (21.5–33.5 cm). Numbers in parentheses denote replicates, and letters alphabet indicate statistical significance ($a>b$, Fisher's PLSD test, $P<0.05$).

工種苗（体長 50.6 ± 5.6 mm）は 78% の個体が天然種苗同様の高い割合で底層に分布していた。

天然種苗は、移槽から夜間の観察時まで 60~80% の個体が底層に分布していたが、翌朝の観察時には底層に分布している個体の割合は 42% に減少した。一方、人工種苗は非馴致と砂馴致種苗の双方のほとんどの個体が、移送後 2 時間を経過すると表層および中層を遊泳していた。しかし、夜間および翌朝の観察時には、人工種苗もまた天然種苗と同様の分布を示した。天然種苗、人工種苗および砂馴致人工種苗の移槽後の時間経過ともなう遊泳速度・相対遊泳速度を比較した。遊泳速度は 4.0 ± 0.8 cm/sec (2.2-5.6), 相対遊泳速度は 0.8 ± 0.2 cm/sec/cm SL (0.4-1.1) で、種苗および撮影時間の間での有意差はみられなかった。

天然種苗および人工種苗の魚体内 TTX の定量 TTX 解析に供した試験Ⅱの天然種苗（1 回目体長 43.0 ± 2.2 mm, 体重 2.1 ± 0.4 g, 2 回目体長 66.6 ± 2.7 cm, 体重 9.1 ± 1.4 g）は、人工種苗（1 回目体長 34.6 ± 2.9 mm, 体重 1.7 ± 0.2 g, 2 回目体長 50.6 ± 3.13 mm, 体重 3.6 ± 0.9 g）よりも大きかった (t -test, $P < 0.05$)。試験Ⅲの天然種苗（体長 58.6 ± 3.9 mm, 体重 6.5 ± 1.1 g）は人工種苗（体長 53.8 ± 5.0 mm, 体重 4.5 ± 1.4 g）とほぼ同じ大きさであった。天然種苗からは全ての個体で TTX が検出（試験Ⅱ-1: 0.27 ± 0.06 MU/g, 試験Ⅱ-2: 0.27 ± 0.03 MU/g, 試験Ⅲ: 0.14 ± 0.05 MU/g）されたのに対し、人工種苗からは検出されなかった (< 0.05 MU/g; t -test, $P < 0.01$)。

考 察

人工種苗の放流後の主たる減耗要因は、食害と飢餓とされているため、放流後の生残を高めるためには、捕食者からの逃避能力と天然水域での索餌能力を備えさせる必要性が指摘されている。^{2,6,7} トラフグ天然種苗は天然海域で生き残った個体であり、放流用人工種苗の究極の目標といえる。したがって、天然種苗と人工種苗の生態的・生理的な比較が、トラフグ人工種苗の放流後の天然水域への適応に必要な形質を探る手掛りとなる。本研究では、天然海域を模した実験池にトラフグ人工種苗と天然種苗とを同条件で放流し、両者の食害状況や摂餌と成長を比較した。さらに、実験環境下で天然・人工の各々の種苗の行動を比較するとともに、両者の TTX の蓄積量を調べた。

実験池での放流実験では、捕食魚の存在しない環境に人工種苗と天然種苗を放流したところ、両者の生残に差はなかったが、捕食魚の存在する環境では人工種苗の減耗が大きく、人工種苗は天然種苗に比べて食害を受けやすいことが明らかとなった。放流後の天然種苗、人工種苗の行動観察では、人工種苗は水面付近で群れを作りや

すく、天然種苗は中層から低層で人工種苗より個体間距離の大きい群がりを作る傾向があった。また、天然種苗には単独で池底に定位または潜砂する個体も観察されたが、人工種苗で潜砂する個体は観察されなかった。捕食魚のいる環境では、捕食魚の存在しない環境に比べて、人工種苗、天然種苗ともに群がりの個体間距離が短くなる傾向があった。また、捕食魚が存在する環境では、夜間になると人工種苗、天然種苗ともに池底に定位する個体が多くなり、とりわけ天然種苗の方が池底に定位する個体が多かった。これらのことから、群がりや夜間の池底への着底行動は、捕食魚に対するトラフグの反応であり、このような行動の差が生残率の差につながった原因の一つであると考えられた。

人工種苗と天然種苗の行動比較実験より、天然種苗は移槽直後に底層を遊泳したのに対し、人工種苗は表層を泳ぐ個体が多いことが明らかになった。この結果は、放流実験時の実験池中の各々の種苗の行動と一致しており、小型水槽を用いた移槽操作でも種苗の放流後の行動を推測可能であることを示していると考えられる。また、砂を敷いた水槽で馴致した人工種苗は、移槽操作後に天然種苗と同様の分布水深を示した。このことは、飼育水槽に底質を設置して 1 週間という比較的短い期間で、人工種苗に天然魚に近い行動特性を付与できることを示唆すると考える。トラフグ人工種苗は、人工種苗生産の過程で、硬質でなめらかな底面の水槽で水面より配合飼料を給餌されることにより、本来示すはずの底層での遊泳行動を示さなくなったものと推察される。一方、遊泳速度そのものは、天然・人工種苗間に差は見られなかった。アユ *Plecoglossus altivelis* 稚魚の最大遊泳速度¹⁶⁾や接触刺激に対するヒラメ *Paralichthys olivaceus* 稚魚の瞬発遊泳速度¹⁷⁾は、天然種苗と人工種苗の間に明瞭な差がなく、種苗の遊泳能力そのものが人工種苗の放流後の減耗には寄与しないことが示唆されている。さらに、アユ稚魚の場合は遡上行動¹⁸⁾、ヒラメ稚魚の場合には摂餌行動の素早さや捕食者に対する反応が¹⁹⁾ 各々の種の人工種苗の放流後の生残に強く関わっていることが明らかになり、アユの場合にはとびはね行動を指標とする種苗の選別¹⁸⁾や、ヒラメの場合には底質への馴致¹⁸⁾や捕食者を提示した水槽での学習²⁰⁾によって放流効果が向上することが示されてきている。トラフグの実際の放流現場では、食害は放流後ごく短期間に起こること、天然種苗が人工種苗に比べて池底につきやすい（潜砂）こと、このサイズのトラフグの食性がプランクトンからベントスに変化すること⁹⁾から、仕切り網等による砂への馴致が放流初期の減耗と摂餌能力の増幅に役立つ可能性がある。今後、今回把握した指標を基に、中間育成方法の検討を進める必要がある。

捕食魚の有無にかかわらず、放流後のトラフグ稚魚の

成長は人工種苗より天然種苗の方が高かった。摂餌状況の調査でも放流初期の人工種苗は空胃個体が多く、肥満度、肝臓重量指数は減少した。人工種苗は天然の生物餌料に対して捕食能力が劣り、その結果として成長に差が出たと考えられた。人工種苗は放流後15日目にほとんどの個体が摂餌しており、肥満度、肝臓重量指数も天然種苗とほぼ同じ値となった。天然水域で実施したトラフグ人工種苗の放流後の調査でも、同様の傾向が見られ、放流後10日程度で天然環境へ馴化する傾向のあることが報告されている。²¹⁾したがって、放流後に被食を回避できた個体が天然水域に馴致するまでには、放流後10日以上期間を要すると考えられる。トラフグ人工種苗を底質馴致などの中間育成方法により種苗性を付与できたかどうかを評価するためには、捕食回避のみならず、天然水域でいかに早く天然餌料を摂餌するようになるか、という点も調べる必要がある。

トラフグはベントスを介した食物連鎖によりTTXを蓄積する。^{22,23)}一方、人工種苗生産後に有毒餌生物を遮断した環境で養殖されたトラフグは無毒となるが、^{24,25)}人工種苗でも、TTXを含む餌を提示されると強い摂餌選択性を示すこと²⁶⁾から、TTXがトラフグの初期生活史において重要な意義を持っていることは疑いのないことと思われる。今回試験に使用した天然種苗は低毒性ではあるが全ての個体がTTXを蓄積していたのに対し、人工種苗からはTTXが検出されなかった。フグ類はハンドリングなどのストレスに対し、吸水によって腹部を膨張させると同時に皮膚よりTTXを放出することから、TTXは外敵に対する防御手段の一つとして認識されている。²⁷⁾したがって、天然種苗と人工種苗の食害状況に差があったのは、TTXの有無が関係している可能性もある。TTXを添加した飼料で人工トラフグがTTXを蓄積することが実験的に明らかにされているため、^{28,29)}TTXを保有する人工種苗を作出し、その人工種苗の食害試験を行うことで、TTXによる食害や潜砂行動への影響を明らかにする必要がある。また、トラフグ体内のTTXが食物由来であることから、放流種苗の天然水域への馴致の程度を、TTXの蓄積量を追うことで評価出来る可能性がある。

謝 辞

本論文に有益なコメントをいただいた2人の査読者に謝意を表す。本研究の遂行にあたり、(株)水産総合研究センター屋島栽培漁業センターの岩本明雄場長、藤本宏主任技術開発員(現小浜栽培漁業センター)をはじめ職員の皆様には、試験に使用したトラフグ人工種苗を提供していただいた。長崎大学水産学部の萩原篤志教授と荒川修教授には適切な助言を、長崎大学水産学部の酒井知治氏には行動実験の実施・解析の補助を賜った。本研

究の一部は長崎県地域結集型共同研究事業、日本学術振興会科学研究費補助金、文部科学省特別教育研究経費・連携融合事業「東アジア河口域の環境と資源の保全・回復に関する研究調査」、および平成17年度長崎大学高度化推進経費の助成を受けた。

文 献

- Masuda R, Tsukamoto K. Stock enhancement in Japan: review and perspective. *Bull. Mar. Sci.* 1998; **62**: 337-358.
- 福原 修. 種苗の健全性. 「マダイの資源培養技術」(田中克・松宮義晴編) 恒星社厚生閣, 東京. 1986; 26-36.
- 塚本勝巳. 種苗性のはなし. *さいばい* 1990; **55**: 20-24.
- 塚本勝巳. 種苗の質. 「放流魚の健苗性と育成技術」(北島 力編) 恒星社厚生閣, 東京. 1993; 102-113.
- Tsukamoto K, Kuwada H, Uchida K, Masuda R, Sakakura Y. Fish quality and stocking effectiveness: behavioral approach. In: Howell BR, Moksness E, Svåsand T (eds). *Stock Enhancement and Sea Ranching*. Blackwell Science Publications, Oxford. 1999; 205-218.
- 福原 修. 人工種苗の質の問題点-天然魚と人工魚はちがうか. *水産の研究* 1989; **8**: 67-72.
- 田中 克. 飼育魚と天然魚の比較. 「放流魚の健苗性と育成技術」(北島 力編) 恒星社厚生閣, 東京. 1993; 19-30.
- 林 小八. 現状と展望. 「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. 1997; 9-15.
- 田北 徹, Sumanta I. 有明海におけるトラフグとシマフグの幼期の生態. *日本水誌* 1991; **57**: 1883-1889.
- 清水大輔, 崎山一孝, 高橋庸一. トラフグ人工種苗の食害: メソコスムでの放流実験による検討. *日本水誌* 2006; **72**: 886-893.
- 足立純一, 高橋庸一. 模擬放流試験に用いる素堀池の環境-I 水底質と出現プランクトン. *栽培技研* 2002; **29**: 107-120.
- 足立純一, 河原郁恵, 高橋庸一. 模擬放流試験に用いる素堀池の環境-II ベントスの出現状況. *栽培技研* 2003; **30**: 111-119.
- 清水大輔, 崎山一孝. 素堀池に放流したトラフグの生残尾数推定法の検討. *栽培漁業センター技報* 2004; **2**: 89-91.
- 厚生省生活衛生局. 「食品衛生検査指針II 理化学編」日本食品衛生協会, 東京. 1993; 296-300.
- Tsuruda K, Arakawa O, Kawatsu K, Hamano Y, Takatani T, Noguchi T. Secretory glands of tetrodotoxin in the skin of the Japanese newt *Cynops pyrrhogaster*. *Toxicon* 2002; **40**: 131-136.
- Tsukamoto K, Masuda S, Endo M, Otake T. Behavioral characteristics of the ayu, *Plecoglossus altivelis*, as predictable indices for stocking effectiveness in a river. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1990; **56**: 1177-1186.
- Miyazaki T, Seikai T, Kinoshita I, Tsukamoto K. Comparison of escape behavior of wild and hatchery-reared juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. *Fish. Sci.* 2004; **70**: 7-10.
- Tsukamoto K, Uchida K. Spacing and jumping behaviour of the ayu *Plecoglossus altivelis*. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1990; **56**: 1383-1392.
- 古田晋平. 放流技術と健苗性. 「放流魚の健苗性と育成技術」(北島 力編) 恒星社厚生閣, 東京. 1993; 94-101.
- Hossain ARM, Tanaka M, Masuda R. Predator-prey interaction between hatchery-reared Japanese flounder

- juvenile, *Paralichthys olivaceus*, and sandy shore crab, *Matuta lunaris*: daily rhythms, anti-predator conditioning and starvation. *J Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2002; **267**: 1-14.
- 21) 町田雅春, 武部孝行. 資源添加技術開発の概要, トラフグ. 平成7年度日本栽培漁業協会事業年報, 日裁協, 東京. 1997; 286-291.
- 22) 谷 巖. 「日本産フグの中毒学的研究」帝国図書, 東京. 1945; 15-27.
- 23) 加納碩雄, 野口玉雄, 大塚正人, 橋本周久. カラス *Fugu rubripes chinensis* とトラフグ *Fugu rubripes rubripes* の毒力の比較. 食衛誌 1984; **25**: 436-439.
- 24) 斉藤俊郎, 丸山純一, 加納碩雄, 銭 重均, 野口玉雄, 原田照雄, 村田 修, 橋本周久. 養殖トラフグの毒性とテトロドトキシン抵抗性. 日水誌 1984; **50**: 1573-1576.
- 25) 野口玉雄, 高谷智裕, 荒川 修. 囲い養殖法により養殖されたトラフグの毒性. 食衛誌 2004; **45**: 146-149.
- 26) Saitou T, Kageyu K, Goto H, Murakami K, Noguchi T. Tetrodotoxin attracts pufferfish ("torafugu" *Takifugu rubripes*). *Bull. Inst. Oceanic Res. Develop. Tokai Univ.* 2000; **21**: 93-96.
- 27) 野口玉雄. 「フグはなぜ毒をもつのか」日本放送出版協会, 東京. 1996.
- 28) Matui T, Hamada S, Konosu S. Difference in accumulation of puffer fish toxin and crystalline tetrodotoxin in the puffer fish, *Fugu rubripes*. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1981; **47**: 535-537.
- 29) 本田俊一, 荒川 修, 高谷智裕, 橘 勝康, 八木基明, 谷川昭夫, 野口玉雄. テトロドトキシン添加飼料投与による養殖トラフグ *Takifugu rubripes* の毒化. 日水誌 2005; **71**: 815-820.