

亜熱帯海域における資源造成：シロクラベラにおける種苗放流技術の開発

佐藤 琢^{*1}・河端 雄毅^{*2}・奥澤 公一^{*3}・浅見 公雄^{*4}・小林 真人^{*5}・
山田 秀秋^{*1}・福岡 弘紀^{*1}・與世田 兼三^{*6}・武部 孝行^{*5}・平井 慈恵^{*7}・
秋田 雄一^{*8}・名波 敦^{*1}・太田 格^{*9}・鈴木 伸明^{*1}・千村 昌之^{*10}・
青沼 佳方^{*1}・加藤 雅也^{*11}・澁野 拓郎^{*12}・照屋 和久^{*1}

Stock enhancement in black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii*

Taku SATO^{*1}, Yuuki KAWABATA^{*2}, Koich OKUZAWA^{*3}, Kimio ASAMI^{*4},
Masato KOBAYASHI^{*5}, Hideaki YAMADA^{*1}, Kouki FUKUOKA^{*1}, Kenzo YOSEDA^{*6},
Takayuki TAKEBE^{*5}, Narisato HIRAI^{*7}, Yuichi AKITA^{*8}, Atushi NANAMI^{*1},
Itaru OHTA^{*9}, Nobuaki SUZUKI^{*1}, Masayuki CHIMURA^{*10}, Yoshimasa AONUMA^{*1},
Masaya KATOH^{*11}, Takuro SHIBUNO^{*12}, and Kazuhisa TERUYA^{*1}

Abstract : Stock enhancement, in which mass hatchery-reared juveniles are released in the wild to help enhancing depleted stocks, is one of the fishery management tools of declining resources. Black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii* is a commercially high value resource in Okinawa, however, its commercial landings has decreased recently. Thus, we aimed to propose the optimal release strategy to enhance black-spot tuskfish stock through the experimental release trials, field investigations and laboratory experiments. Our study showed 1) bigger juvenile size for release, 2) pre-release conditioning to natural environment and their shelters, and 3) pre-release predator learning treatment will reduce post-release predation mortality by piscivorous fishes. However, these countermeasures against post-release predation need to take large labor and costly if mass release is conducted. Therefore, we further investigated whether release of small juveniles can be alternate way not only for attaining success of enhancement of the stock but also for economic feasibility. Our study

2012年10月15日受理 (Received on October 15, 2012)

- ^{*1} 水産総合研究センター西海区水産研究所亜熱帯研究センター石垣庁舎 〒907-0451 沖縄県石垣市字椋海大田148-446 (Research Center for Subtropical Fisheries, Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Fukai-ohta 148-446, Ishigaki, Okinawa 907-0451, JAPAN)
- ^{*2} 長崎大学水産・環境科学総合研究科環東シナ海環境資源研究センター 〒851-2213 長崎県長崎市多良良町1551-7 (Institute for East China Sea Research, Nagasaki University, Taira 1551-7, Nagasaki, Nagasaki 851-2213, JAPAN)
- ^{*3} 水産総合研究センター増養殖研究所南勢庁舎 〒516-0193 三重県度会郡南伊勢町中津浜浦422-1 (National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, Nakatsuhamaura 422-1, Minami-ise, Mie 516-0193, JAPAN)
- ^{*4} 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所海産無脊椎動物研究センター 〒722-0061 広島県尾道市百島町1760 (Momoshima Station, National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, Momoshima 1760, Onomichi, Hiroshima 722-0061, JAPAN)
- ^{*5} 水産総合研究センター西海区水産研究所亜熱帯研究センター八重山庁舎 〒907-0451 沖縄県石垣市字椋海大田148 (Research Center for Subtropical Fisheries, Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Fukai-ohta 148, Ishigaki, Okinawa 907-0451, JAPAN)
- ^{*6} 水産総合研究センター西海区水産研究所長崎庁舎 〒851-2213 長崎県長崎市多良良町1551-85 (Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Taira 1551-85, Nagasaki, Nagasaki 851-2213, JAPAN)
- ^{*7} 水産総合研究センター増養殖研究所志布志庁舎 〒899-7101 鹿児島県志布志市志布志町夏井205 (National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, Natsui 205, Shibushi, Shibushi, Kagoshima 516-0193, JAPAN)
- ^{*8} 沖縄県水産海洋研究センター石垣支所 〒907-0453 沖縄県石垣市字川平828-2 (Ishigaki Branch, Okinawa Prefectural Fisheries and Ocean Research Center, Azakabira 828-2, Ishigaki, Okinawa 907-0453, JAPAN)
- ^{*9} 沖縄県水産海洋研究センター 〒901-0305 沖縄県糸満市西崎1-3-1 (Okinawa Prefectural Fisheries and Ocean Research Center, Irizakil 1-3-1, Itoman, Okinawa 901-0305, JAPAN)
- ^{*10} 水産総合研究センター北海道区水産研究所 〒085-0802 北海道釧路市桂志116番地 (Hokkaido National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Katsurakoi 116, Kushiro, Hokkaido 085-0802, JAPAN)
- ^{*11} 水産総合研究センター本部 (海外派遣: SEAFDEC/MFRDMD) 〒220-6115 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-3クイーンズタワー B15階 (Fisheries Research Agency, 15F Queen's Tower B, 2-3-3 Minato-Mirai, Nishi, Yokohama, Kanagawa 220-6115, JAPAN)
- ^{*12} 水産総合研究センター増養殖研究所横須賀庁舎 〒238-0316 神奈川県横須賀市長井6-31-1 (National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, Nagai 6-31-1, Yokosuka, Kanagawa 231-0316, JAPAN)

showed the release of small juveniles to seaweed beds, acting as shelters and foraging habitat, can be the optimal way to enhance the stock if we can estimate the optimal fish density at release. A comprehensive understanding of the ecological interactions between released juveniles and target ecosystem is important in developing effective release strategy.

Key words : *Choerodon schoenleinii*, optimal release strategy, pre-release conditioning, pre-release learning predator, post-release predation, stock enhancement

目 次

1. はじめに
2. 体サイズの異なる種苗を用いた種苗放流の結果
3. 放流後の減耗要因の推定
 - 3-1. 逸散か？ 飢餓か？ 被食か？
 - 3-2. 魚食性魚類の出現パターンとその胃内容物
4. 「被食」を如何にして軽減するか？
 - 4-1. 『種苗の大型化』による被食の軽減
 - 4-2. 『基質・巣穴への馴致』による被食の軽減
 - 4-3. 『捕食者の学習』による被食の軽減
5. 小型種苗を用いた種苗放流
 - 5-1. 初期生態に基づいた種苗放流
 - 5-2. 放流密度が放流種苗の摂餌や成長に与える影響
6. 今後のシロクラベラ資源の回復に向けて
7. 謝辞
8. 引用文献

1. はじめに

我が国周辺水域における多くの水産資源が低位水準にある中、漁業者の経営安定化を図りつつ、沿岸資源の回復あるいは持続的な利用を図っていくことは重要な課題である。資源状態を改善する有効な手段として、間接的に資源の増加を図る漁業管理や育成場の造成・保護とともに、直接的に資源の増大や安定化を目指す種苗放流を行う「栽培漁業」が挙げられる。1963年に瀬戸内海からはじまった栽培漁業は、主に高価格な水産資源を対象にして、人工的に生産した種苗の放流によって資源の増大やその漁獲量の安定化を目指してきた。今日に至るまで様々な水産資源に対して種苗生産技術が確立されるとともに、放流技術が開発されてきた。シロザケ *Oncorhynchus keta* (大島・菅野, 1976) やマダイ *Pagrus major* (Kitada and Kishino, 2006), ヒラメ *Paralichthys olivaceus* (Kitada and Kishino, 2006), ホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* (北田・藤島, 1997) での放流効果に続き、近年ではクロソイ

Sebastes schlegeli (陳・野田, 2010) やトラフグ *Takifugu rubripes* (松村, 2006; 堀井・片町, 2012), サワラ *Scomberomorus niphonius* (山崎ら, 2007), マツカワ *Verasper moseri* (北海道ほか, 2004), ホシガレイ *Verasper variegatus* (島村ら, 2007) などにおいても種苗放流によって資源の添加や造成、底支えがなされている事例がみられている。このように種苗放流は直接的に資源の増加を図れることから沿岸漁業者の経営の安定に寄与する手段となりうる。しかし、これまで熱帯、亜熱帯域において種苗放流によって資源添加、資源造成に成功した事例はなく、熱帯、亜熱帯域における栽培漁業の効果は明らかにされていない。

シロクラベラ *Choerodon schoenleinii* はベラ科イラ属に属し、体長1mに達するベラ類最大級の大型種である。西太平洋の熱帯、亜熱帯域のサンゴ礁域に分布し、日本では主に沖縄県や奄美諸島に生息する。沖縄県では本種はスジアラ *Plectropomus leopardus*, ハマダイ *Etelis coruscans* とともに沖縄三大高級魚と呼ばれ、経済価値の高い水産資源である。しかし近年、シロクラベラの資源量は減少傾向にあり (太田ら, 2007), その回復が望まれている。そこで西海区水産研究所亜熱帯研究センターでは本種資源の回復を目指し、2006年から2010年にかけて「亜熱帯・熱帯地域特産種シロクラベラの資源回復に向けた研究開発」と題した水産総合研究センター運営交付金プロジェクト (以下、交付金プロジェクト) を実施してきた。その研究課題のひとつであった「異なる種苗放流がその後の滞留、分布、成長、生残および回収率に及ぼす影響」では、栽培漁業による本種資源の回復を目標に、熱帯・亜熱帯域における効果的な種苗放流技術の開発に取り組んできた。本稿では当該研究課題によって得られた知見を整理し、本種をはじめとした、熱帯・亜熱帯域において低位水準にある沿岸資源の回復・維持管理方策について考察する。

2. 体サイズの異なる種苗を用いた種苗放流の結果

種苗放流によって効率的に資源添加を試みる際、放

流に適した種苗の体サイズ、放流場所、放流時期の検討が重要である (Yamashita and Yamada, 1999)。そこで、本種の稚魚や成魚が観察され、その成育場と考えられる沖縄県石垣島西側にある名蔵湾を放流点として、まず体サイズの異なる種苗を放流することにより、種苗の体サイズが放流後の種苗の滞留状態 (放流後の種苗の逸散や被食等による死亡の結果、放流点で見られる種苗の残存数) や回収率 (各放流群の総放流個体数に対する再捕個体数の割合であり、放流効果を表すひとつの指標) に与える影響について調べた。

本研究課題の実施地である八重山諸島周辺海域の漁獲物が水揚げされる場所は限られており、そのほとんどは石垣島の八重山漁業共同組合鮮魚卸売市場と那覇市の沖縄県漁連地方卸売市場である。そこで、放流種苗の回収率について調べるため、八重山漁業協同組合鮮魚卸売市場では2006年から2010年に、沖縄県漁連地方卸売市場では2009年から2010年にかけて市場調査法 (北田, 2001) による全日全数調査を行った。市場調査法では調査員による標識の発見精度が高くなるため、視認性よりも持続性の高い標識を利用することができる (大河内, 2006)。そこで、放流する大型種苗 (平均全長50 - 100 mm) にはマーキングタイプの外部標識である腹鰭抜去標識 (大河内, 2006) を用いた。抜去した腹鰭の再生による標識の脱落率を把握するため、腹鰭抜去した各放流群から100尾程度の個体をランダムに抽出して飼育し、飼育下で継続観察を行うことによって、放流群ごとでの腹鰭再生率を調べ、各放流群の回収率を補正できるようにした。一方、腹鰭抜去標識は体サイズの小さな種苗には適用できないため、小型種苗 (平均全長10 - 20 mm) にはマーキングタイプの内部標識であるアリザリンコンプレクソン (以下、ALC) 標識を用いた。まず本種における ALC 標識の装着に最適な条件を調べるため、異なる濃度の ALC 溶液 (20 ppm, 40 ppm, 80 ppm) を用意し、それぞれに全長10 - 20 mm の小型種苗を浸漬した。浸漬時間を6時間、12時間、もしくは24時間とし、各浸漬条件における本種小型種苗の生残や標識の成否について調べた。その結果、本種の小型種苗には ALC 濃度80 ppm 溶液への24時間浸漬が適当であることがわかり、本研究課題ではこの方法で小型種苗に ALC 標識を装着した。

2007年5月に ALC 標識を装着した小型種苗群 (平均全長10 mm 群7500尾と平均全長17 mm 群3000尾) を、2008年1月には腹鰭抜去標識を施した大型種苗群1800尾 (平均全長96 mm 群) を、また同年10月には腹鰭抜去標識を施した中型種苗群6400尾 (平均全長57 mm 群) を名蔵湾に放流し、潜水観察により放流後の種苗の様子を観察した。

その結果、小型種苗群では、放流直後から観察できる種苗数が急速に減少し、放流からわずか3時間後には放流点や放流点周辺において、まったく種苗を発見することができなくなった。放流した小型種苗の個体追跡を行ったところ、放流後まもなくハゼ類やギンポ類に捕食される様子が観察された。このことからこれら小型種苗群の放流では、自発的な逸散によって種苗の姿が見えなくなった可能性はあるものの、被食によって滞留している種苗数が急激に減少した可能性が高いと考えられた。

それに対して、中型種苗群と大型種苗群においては放流直後に種苗の姿が一切見られなくなるということではなく、放流点付近にて水柱中を群泳したり、岩陰に寄り添ったりする姿が観察された。例えば、サワラでは全長40 mm と100 mm の種苗群で比べた場合、放流種苗の体サイズが大きい方が混獲率が約3-4倍も高いことがわかっており (小畑, 2006)、本放流実験でも種苗の体サイズの増加が被食リスクを軽減した結果、生残率すなわち滞留率が向上したことが考えられた。しかし、中型、大型種苗群のどちらにおいても、放流から日数が経過するにつれて放流点付近に滞留している種苗数は徐々に減少し、放流14日後には種苗の姿は一切みられなくなった。

3. 放流後の減耗要因の推定

3-1. 逸散か？ 飢餓か？ 被食か？

小型種苗に比べて被食リスクの低いと思われた中型種苗群や大型種苗群においても、放流点周辺から種苗の姿が徐々に観察されなくなっていく原因のひとつとして、これまで「放流点からの種苗の自発的な逸散」が挙げられてきた。しかし、現在のところ、放流後の市場調査において、小型種苗群のみならず中型種苗群と大型種苗群のどちらからも一切の水揚げはない (2012年4月現在)。放流種苗の水揚げが全くない状況から、「放流点からの自発的な逸散」はあるものの、大部分の種苗は放流後に何らかの原因で死亡している可能性が高い。その死亡の原因としては「飢餓」や「被食」が考えられるだろう。

そこで、放流後に起こると予想される種苗の死亡が「飢餓」によるものかどうかを検討するため、2009年4月に大型種苗3000尾 (平均全長90 mm) をこれまでと同様に名蔵湾にて放流し、本種の放流種苗が野外において摂餌を行うかどうかについて調べた。放流2日後および3日後に採集できた放流種苗9尾の消化管内容物を調べた。その結果、8尾 (88.9%) の消化管からは貝虫類や甲殻類等の消化物がみられ (Fig. 1)、放流

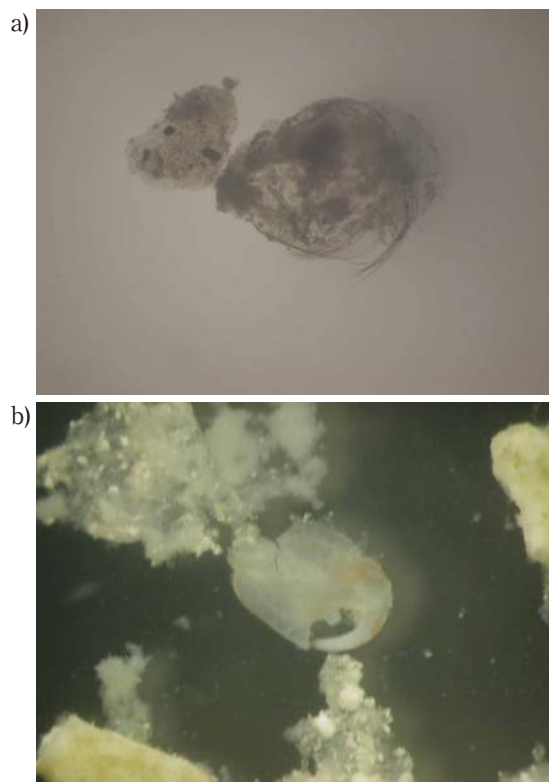


Fig. 1. Stomach contents of released black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juvenile. a) ostracod, b) a cheliped of crustacean.

種苗は野外環境下でも摂餌できることが明らかになった。したがって、放流種苗の水揚げが依然としてみられない主な原因は「飢餓」ではなく「被食」であると疑われた。近年、マダイやヒラメ、スジアラなどの放流においても、放流直後に稚魚が減耗する主要な要因として被食が挙げられている (Tsukamoto *et al.*, 1989; Yamashita *et al.*, 1994; 照屋ら 2003b; Sudo *et al.*, 2008)。もし、「被食」が放流直後からの本種放流種苗の急速な減少を招いているならば、その「被食」を軽減する放流技術の開発が種苗放流による本種の資源添加を実現させるために重要な要素となる。

3-2. 魚食性魚類の出現パターンとその胃内容物

では、本当にシロクラベラの中型、大型種苗は放流直後から捕食されているのか？ また、いつどのような捕食者によって捕食されているのか？ これらについて明らかにするため、2009年4月に平均全長90 mmの種苗群 (3000尾) を名蔵湾で放流し、放流点周辺において水中デジタルカメラによるインターバル撮影と放流点周辺で観察された魚食性魚類の胃内容物調査を行った。

その結果、放流点周辺では魚食性魚類のナミハタ

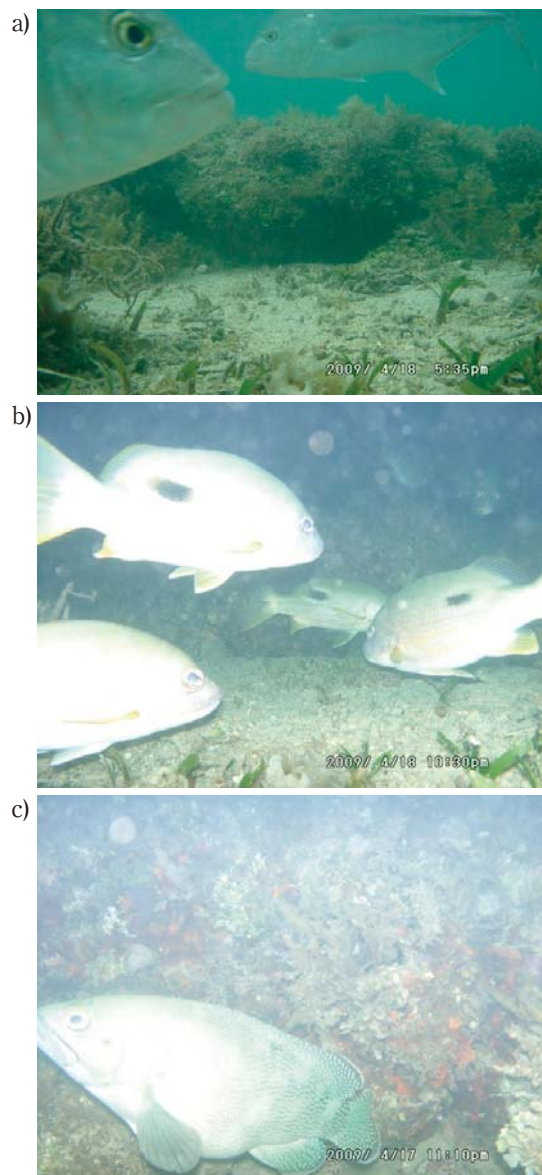


Fig. 2. Piscivorous fishes photographed at release point. a) *Caranx papuensis*, b) *Lutjanus fulviflamma*, c) *Epinephelus ongus*.

Epinephelus ongus, ニセクロホシフエダイ *Lutjanus fulviflamma*, オニヒラアジ *Caranx papuensis* が複数個体撮影され、放流点に滞留している種苗の群れに対して蟻集していると考えられた (Fig. 2)。魚食性魚類が撮影される時間は種によって異なり、ナミハタとニセクロホシフエダイは主に夜間に、オニヒラアジは朝夕の薄明期に見られた (Fig. 3)。また、日中に行った潜水による目視観察では、複数個体のオニヒラアジが滞留している種苗を捕食している様子が幾度も見られた。シロクラベラは昼行性であり、夜間は岩などの基質の下で寝る (Kawabata *et al.*, 2008)。そのため、日中に比べて夜間のほうが捕食を受けやすいことが想像

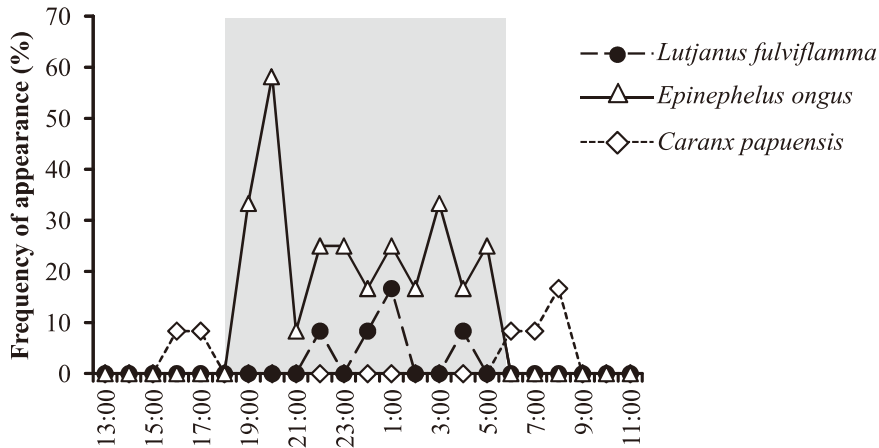


Fig. 3. Temporal variation in appearance frequency of piscivorous fishes photographed at release point. Frequency of appearance was estimated as: frequency of appearance = number of photo photographing piscivorous fish / number of photo taken within an hour × 100. Gray area represents nighttime.

される。

次に、放流点周辺で観察されたナミハタ、オニヒラアジ、オニダルマオコゼ *Synanceia verrucosa* を釣りや手鉈等によって捕獲し、その消化管内容物を観察したところ、それぞれの消化管内には複数の放流種苗が認められた。あるオニヒラアジからは種苗5尾（種苗の全長78 - 100 mm）、またあるオニダルマオコゼからは種苗9尾（種苗の全長60 - 104 mm）というように1個体の捕食者の胃の中から多くの種苗が同時に確認された（Fig. 4）。これらの観察結果から、放流種苗は放流直後から昼夜を通して高い捕食圧を受けていることが推測された。放流後における急速な滞留種苗数の減少には「被食」が強く関係しており、種苗放流による本種の資源添加を阻んでいる主要因であると考えられた。



Fig. 4. A total of 9 released black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juveniles were emerged from stomach of a stonefish *Synanceia verrucosa*.

4. 「被食」を如何にして軽減するか？

4-1. 『種苗の大型化』による被食の軽減

では、どのようにして放流直後から起こっている「被食」を軽減するか？ 様々な魚種において、1) 大きい種苗ほど生残に優れていること、2) 種苗の体サイズが放流後の種苗の生残や回収率に大きな影響を与えることが知られている（Bilton *et al.*, 1982; Tukamoto *et al.*, 1989; Yamashita *et al.*, 1994; Secor *et al.*, 1995; 村上ら, 2005; 小畑ら, 2007）。その理由として、1) 捕食者にとって捕食可能な餌サイズは口径によって制限されるため（Shireman *et al.*, 1978; 照屋ら, 2003a）、大きな個体ほど捕食されるリスクが低いこと、また2) 大き

な個体ほど逃避能力に優れていること（矢野・小川, 1981）などが挙げられる。

そこで、まずシロクラベラにおいても放流種苗の体サイズを大きくすることによって放流種苗の生残率や回収率を向上させることができるのかどうかについて調べることにした。様々な体サイズの本種種苗10尾（全長65 - 120 mm）と捕食者3尾（ナミハタ：全長208 - 277 mm）を同一水槽内に同居させる水槽実験を行い、同居開始から14日後の種苗の生残を記録することにより、種苗の体サイズが被食減耗に与える影響について調べた。その結果、大きな種苗ほどより生残し、本水槽実験にて捕食者として利用した体サイズのナミハタに対しては、半数の種苗が生残する体サイズは全長98

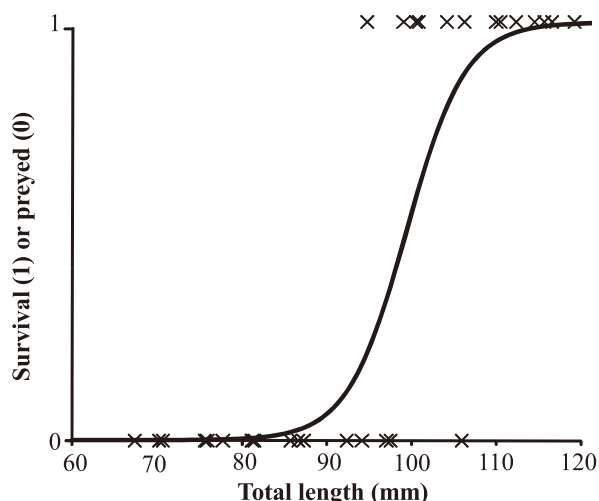


Fig. 5. Relationship between body size and survival of black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) in the laboratory experiment. Survival and death of the fish are plotted as 1 and 0, respectively, by X. The logistic curve for the survival probability in relation to tuskfish size is shown. The size at 50% survival was estimated to be 98 mm in total length (TL). Redrawn after Kawabata *et al.* (2011a) with permission.

mmであった (Fig. 5, Kawabata *et al.*, 2011b)。このことから放流種苗の体サイズを大きくすることによって、被食環境下での、つまり放流後の生残率を向上させられることが示唆された。

しかし、本水槽実験で使用した捕食者はナミハタのみであり、かつその体サイズは限られている。実際に野外の放流点周辺ではより多くの種類の捕食者に加え、使用したナミハタよりはるかに体サイズの大きな捕食者 (例えばオニヒラアジ: 全長675 mm) が捕獲されており、全長98 mm以上の種苗を放流すれば半数の種苗が生残できるわけではないだろう。実際に2008年1月に放流した平均全長96 mmの種苗群 (1800尾) では、放流から1週間後までしか放流点において種苗は観察されず、その後の市場調査でも放流種苗は見つからない。これらのことは野外で被食される種苗の体サイズは本水槽実験で用いた個体より大きく、より大きな種苗を放流しなければ放流種苗は生残できず、放流効果を得ることはできないことを示している。

そこで、本種の種苗を野外へ放流する場合、どれくらいの体サイズであれば生残することができるのかについて調べるため、超音波バイオテレメトリーを用いた放流実験を行った (Kawabata, 2010)。まず体サイズの異なる本種種苗20尾 (全長118 - 300 mm) の腹腔

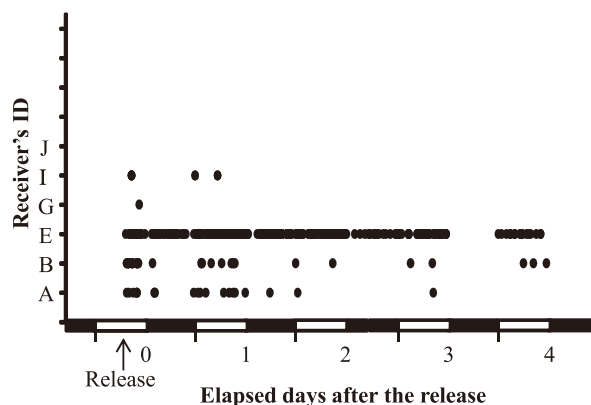


Fig. 6. Typical post-release detection pattern of a released black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) of 300 mm in total length. White and black bars at the bottom of figure indicate daytime and nighttime, respectively.

内に超音波発信機 (V7-2L もしくは V9P-2H, Vemco 社製) を外科的手術により装着した。超音波発信機の装着から少なくとも4週間は、装着による種苗の生残や成長に対して悪影響はないことがわかっている (Kawabata, 2010)。石垣島北側の浦底湾内に受信機 (VR2 もしくは VR2 W) を設置し、その海域へ発信機を装着した種苗を放流した。複数台の受信機を配置し、一定の時間間隔で受信することにより、発信機装着個体の移動や日周性を把握し、それによって放流後の種苗の生残や行動について調べた。

その結果、放流の2日後に体長200 mmのある個体の受信が途絶えたものの、その1尾を除いた体長170 mm以上の種苗13尾全てについては、放流後2週間にわたって受信が続いた。これらの種苗からの発信は、1) 日中においてのみ、広範囲に配置された複数台の受信機によって受信され、2) 夜間においては主に特定の受信機によって受信された (Fig. 6)。このような受信パターンは、日中は広範囲を遊泳し、夜間はある場所に留まる、つまり岩などの基質の下で寝るというシロクラベラの昼行性とよく一致した。そのため、これらの個体はその受信パターンから放流後2週間以上は生存していたと考えられた。

一方、体長170 mm以下の6尾 (全長118 - 128 mm) からの受信は放流から5日以内には全て受信が途切れた。これらの種苗の受信パターンには昼夜にかかわらず広範囲での発信機の移動がみられた (Fig. 7)。このような受信パターンは捕食者が示す活動性と類似していたことから、おそらく体長170 mm以下の種苗は放流後短期間のうちに捕食されたと考えられた。本放流実験の結果、2週間の放流期間に半数の種苗が生残

する体サイズは全長167.9 mmであり、放流後の生残は種苗の全長が120 mmから170 mmの間で急激に向上することが示された (Fig. 8, Kawabata, 2010)。野外では捕食される種苗の体サイズは上述の水槽実験に比べてはるかに大きかった。

本実験の結果から、放流する種苗サイズの大型化は放流種苗の生残率の向上に繋がること示された。ただし、半数の種苗が生残した全長約170 mmまでに本種種苗を育成するためには1年半から2年程度の長期間を要する。放流種苗の体サイズが大きいほど放流後の生残がよいとしても、大きな放流サイズに成長させるまでの飼育経費を考えると、「放流種苗の大型化」による被食の軽減は種苗放流の現場における現実的な手段として捉えることは困難であり、他の手段を模索する必要がある。

4-2. 『基質・巣穴への馴致』による被食の軽減

シロクラベラ種苗放流後の被食を軽減させる他の方法として、種苗の「馴致」が挙げられる。一般に定住性魚類は休息や捕食回避のために巣穴を利用したり (Hixon and Beets, 1993)、砂に潜ることによって捕食を回避する (Kruuk, 1963; Ellis et al., 1997)。つまり、放流種苗が野外環境において、巣穴を形成して利用すること (Brown and Day, 2002) や潜砂行動をとること (Kellison et al., 2002; Sparrenvohn and Sttøtrup, 2007) は放流後のそれらの生残に大きく影響する。しかし、水槽内で飼育された種苗が放流された野外環境において種本来の生態的な行動を発現するまでには、ある程度の期間が必要であることが知られている。例えば、アカアマダイ *Branchiostegus japonicus* は巣穴

を利用するが、放流種苗が巣穴を形成し、利用しはじめるまでには放流から1週間以上かかる (Yokota et al., 2006)。また、ドーバーソール *Solea solea* は潜砂行動を示すが、種苗が野生個体と同様の潜砂行動を行うようになるのには12日程度の期間を必要とする (Ellis et al., 1997)。このような種苗の行動的欠陥に起因して、放流種苗の多くは放流された野外環境に順応するまでの間に捕食されていることが懸念される。以上のような背景の中、放流する前に種苗を放流環境に馴致することによって、種苗の捕食者回避能力を向上させ (例えば *Paralichthys olivaceus*, Kellison et al., 2002; Hossain et al., 2002; ウィンターフラウンダー *Pseudopleuronectes americanus*, Fairchild and Howell, 2004; イシビラメ *Psetta maxima*, Sparrenvohn and Sttøtrup, 2007)、放流後の種苗の生残率を上げる試みがなされている。シロクラベラでは岩などの基質の下を掘ることにより巣穴を持つことが知られており (Fairclough et al., 2008)、種苗を放流環境に馴致したのちに放流することにより、放流後の被食を軽減することができるかもしれない。

水槽実験：そこで、シロクラベラ種苗 (全長84 ± 5 mm) と捕食者 (ナミハタ：全長200 - 280 mm) を用

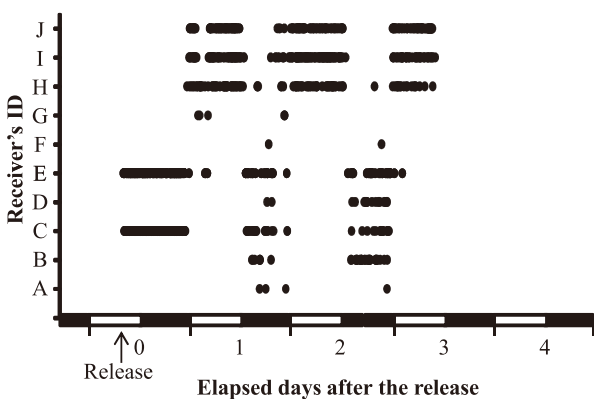


Fig. 7. Typical post-release detection pattern of a released black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) of 118 mm in total length. White and black bars at the bottom of figure indicate daytime and nighttime, respectively.

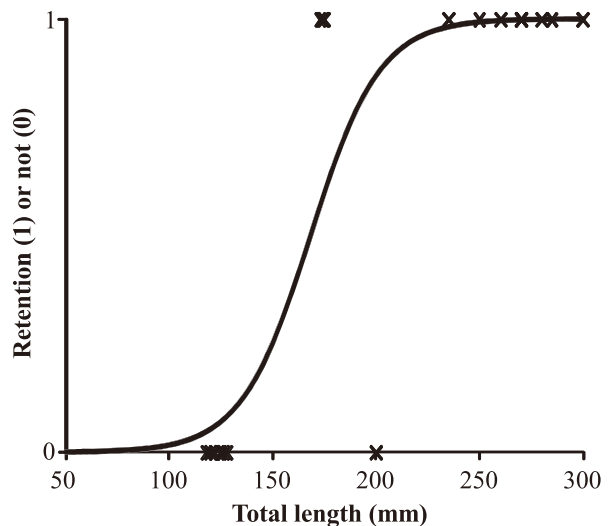


Fig. 8. Relationship between body size and retention of released black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) to Urasoko Bay. The retention and no retention of the fish are plotted as 1 and 0, respectively, by X. The logistic curve for the retention probability in relation to tuskfish size is shown. The size at 50% retention was estimated to be 167.9 mm in total length (TL). Redrawn after Kawabata (2010) with permission.

いた水槽実験によって、本種の放流環境への馴致の有無が種苗の巣穴の形成や利用行動、さらに被食率に与える影響について調べた (Kawabata *et al.*, 2011b)。まず、砂を敷いた水深0.8 mの角型水槽 (1.4 m × 3.0 m) に飢餓状態のナミハタを3尾入れることにより水槽内を被食環境とした。次に、この水槽の一部にふたつの仕切りカゴ (60 cm × 60 cm × 高さ60 cm) を設置することにより捕食者が侵入できないエリアを2箇所つくった。カゴで仕切ったエリア内で種苗に対して次のような異なる3つの操作を行う、3つの実験群を設けた (Fig. 9)。

操作①：ひとつのエリア内には、種苗が隠れることができ、また巣穴を作る際にその下を利用できる、トンネル型の基質を種苗1尾と一緒に入れ、基質に隠れたり、巣穴を形成することができる状態に種苗をおいた (n = 17)。

操作②：ひとつのエリア内には上記と同様の基質が入っているが、種苗1尾はもう片方のエリアにいれ、基質を利用できない状態に種苗をおいた (n = 16)。

操作③：どちらのエリアにも基質はなく、片方のエリアに種苗1尾だけをいれた (n = 9)。

各操作の状態で45時間、種苗を馴致させた後、ふたつの仕切りを取り除くことによって種苗を被食環境にさらした。すなわち、操作①では被食環境になる前から種苗は基質へ馴致されている状態であり、操作②では被食環境になって初めて種苗が基質の使用可能な状態となる。一方、操作③では被食環境になる前後において、ともに基質がないため、種苗は隠れることも、巣穴を掘ることもできない状態である。仕切りを取り除いた後は、4時間ごとに種苗の行動と生残について記録し、24時間にわたって観察を続けた。

その結果、操作③では、仕切りを取り外してから12時間以内には全ての種苗が捕食された (Fig. 10)。また、操作②では、仕切りを取り外した8時間後にはじめて基質に隠れる個体が出現したが、実験終了時の24時間後まで生残した種苗は1尾のみ (6%) であり、ほとんどの種苗が12時間後には捕食された (Fig. 10)。それに対して、操作①において被食環境にさらされる前から基質への馴致を行った場合は、仕切りを取り除いた直後から既にほとんどの種苗は基質に隠れており、かつ種苗の76%は基質の下に巣穴を形成していた。その結果、実験終了時まで7個体 (41%) が生残した (Fig. 10)。

この水槽実験の結果は、1) 本種では基質を利用しはじめるまで、また巣穴を形成しはじめるまでにある程度の時間がかかること、2) 種苗の基質への馴致が基質の利用や巣穴の形成を促し、その行動は被食率の低下

に貢献することを示している。また、操作③では、実験開始の8時間後から12時間後の、照度が低下した時間帯に急激に被食率が上昇する結果が得られており、これは夜間に活動を休止するため捕食されやすくなるだろう本種にとって、隠れる場所や巣穴の有無はその

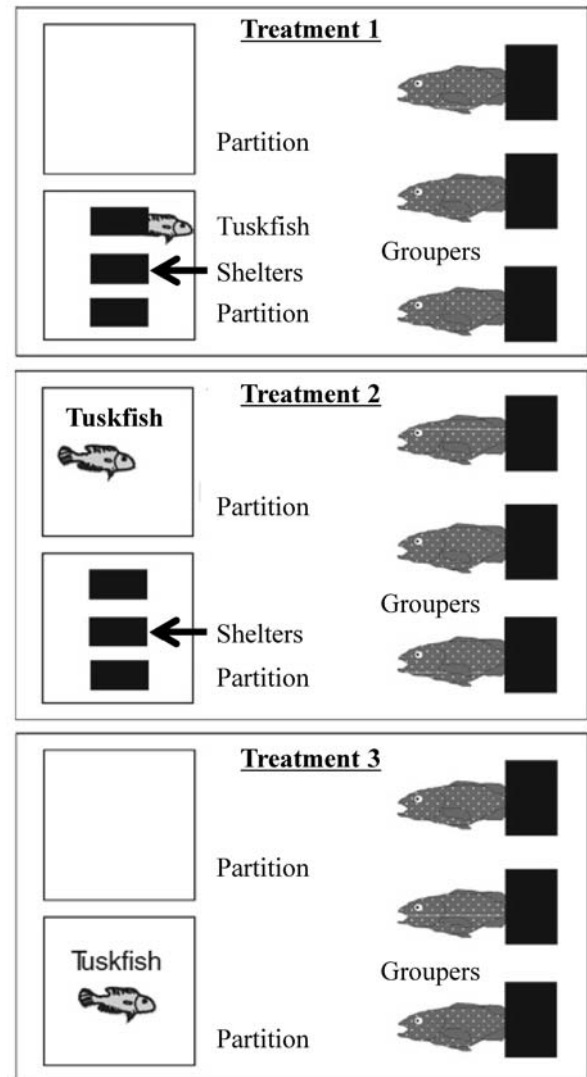


Fig. 9. A schematic drawing of the overhead view of the three treatments. Treatment 1 (top): black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) were acclimated to shelters prior to exposure to white-streaked groupers (*Epinephelus ongus*). Treatment 2 (middle): black-spot tuskfish were not acclimated to shelters but shelters were available during exposure to groupers. Treatment 3 (bottom): black-spot tuskfish were not acclimated to shelters and no shelters were available during exposure to groupers. Partitions were removed at the start of the experiment. Redrawn after Kawabata *et al.* (2011a) with permission.

生残に大きく影響を与えることを示している。これらのことから、本種でも放流前に種苗を基質に馴致し、巣穴の形成、利用を促すことによって、放流後の被食を軽減できることが示唆された。

野外実験：室内実験の結果を基に、実際に野外へ種苗を放流する際に、放流前の基質への馴致が種苗の被食率の軽減に繋がるのかどうかを調べるため、超音波バイオテレメトリーを用いた野外放流実験を行った (Kawabata, 2010)。本実験では下記のような異なる操作によって3つの放流群を設けた。

群①：放流前から基質に隠れることができ、かつ巣穴を形成できる状態で野外環境に馴致した群 (n = 4)。

群②：放流前には野外環境には馴致されているが、

基質に隠れたり、巣穴を形成できない状態で馴致された群 (n = 4)。

群③：一切の馴致を行わず、野外環境へ直接放流された群 (n = 6)。

まず、受信機 (VR2もしくはVR2 W) を設置している浦底湾内の砂泥底に、海底に接する底面部が欠けている立方体状のカゴ (60 cm × 60 cm × 高さ30 cm) を8つ設置した。設置したカゴのうち4つには、カゴ内の砂泥底面上に種苗が隠れることができ、また巣穴を作る際にその下を利用できる、トンネル型の基質を設置した。次に本種種苗14尾 (全長128 ± 9 mm) の腹腔内に超音波発信機 (V7-2L, Vemco 社製) を外科的手術により装着した。そのうち4尾は基質を設置した4つのカゴに1尾ずつ入れ (群①)、さらに4尾は残り4つの基質の入っていないカゴに1尾ずつ入れ (群②)、異なる条件下で放流環境への馴致を行った。5日間の馴致の後、馴致した計8尾のカゴを取り除き、放流した。それと同時に、残りの種苗6尾も同じ海域へ馴致を経ずに直接放流し (群③)、これら計14尾の放流後の行動・生残について調べた。

その結果、群③では、放流後すぐに1個体が受信可能海域から移出し、残り5個体からの受信は放流から5日以内に途切れた (図 Fig. 11)。受信が途切れるまでのそれら5個体からの受信パターンを見てみると、

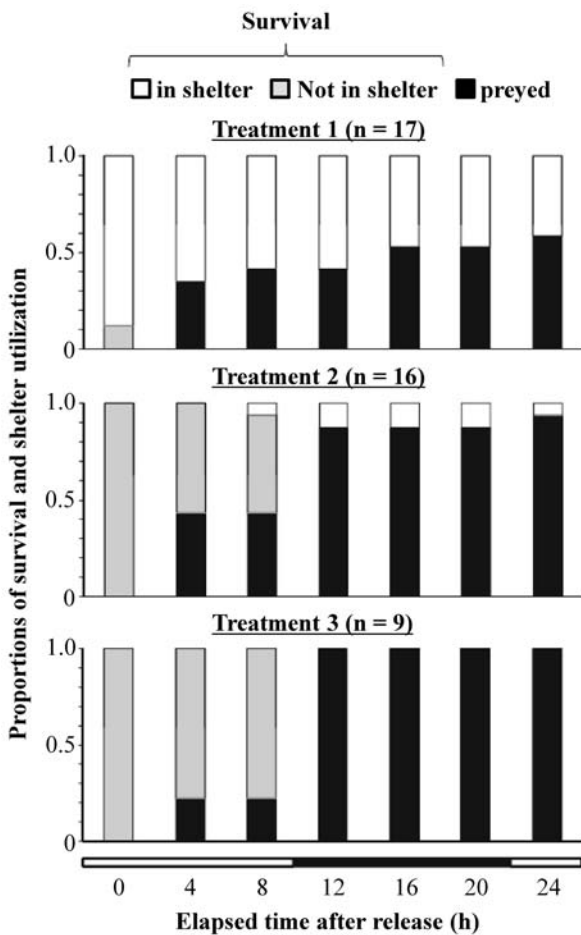


Fig. 10. Time-series survival and shelter utilization rates of black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) under each treatment regime. Details of treatments are shown in Fig. 9. White and black bars on the bottom represent daytime and nighttime, respectively. Redrawn after Kawabata *et al.* (2011) with permission.

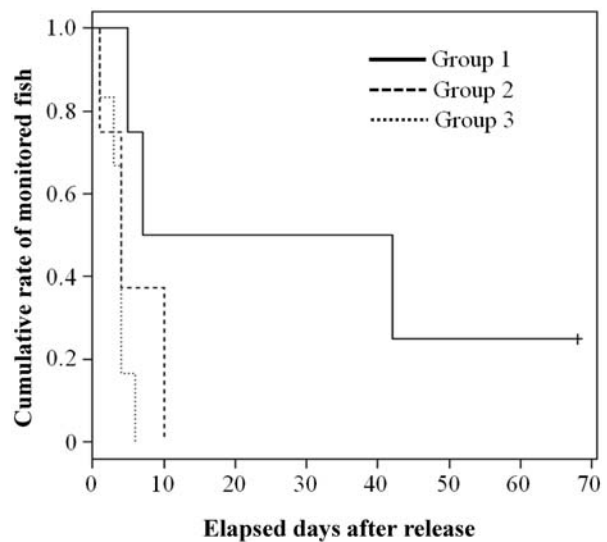


Fig. 11. Time-series retention rates of black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) in three different Groups. Group 1: black-spot tuskfish were acclimated to shelters prior to release. Group 2: black-spot tuskfish were not acclimated to shelters but environments prior to release. Group 3: black-spot tuskfish were not acclimated to shelters and environments prior to release.

うち4個体(80%)では明らかにシロクラベラとは異なる日周期性(夜間における広範囲にわたる遊泳)が見られ(Fig. 12),少なくともこの4個体(80%)は放流から4日以内には捕食されたことが推測された。残り1個体については受信パターンから捕食されたのか,移出したのかを判断することはできなかった。群②では放流直後に1尾から発信機が脱落してしまい,またもう1尾は受信可能海域から移出してしまった。残り2個体については,その受信パターンから捕食されたのか,移出したのかを判別できないが,どちらも10日以内には受信が途切れた(Fig. 11)。それに対して,群①では,連続的に受信できた3個体の受信パターンはシロクラベラに本来見られるような明確な昼行性を示しており,これらの放流種苗は設置した基質もしくは周辺の岩,形成した巣穴などに隠れる行動を示していたことが推測された。また,うち2個体は1カ月以上にわたり受信可能海域においてその生存が確認され,実験終了時の放流後68日目でも少なくとも1個体は生存していることが確認された(Fig. 11)。

この野外実験の結果は,放流前に本種種苗を放流環境下で基質に馴致させることによって,基質の利用,巣穴の形成を促すことができること,またそのような行動を発現させることによって,放流後の生残率を向上させることが可能なことを示している。今後,種苗放流によって本種の資源添加を試みる際,その放流効果の向上に「基質や巣穴への馴致」という放流手法は適用可能なツールのひとつといえるだろう。

4-3. 『捕食者の学習』による被食の軽減

放流後の被食を軽減させるもうひとつの方法とし

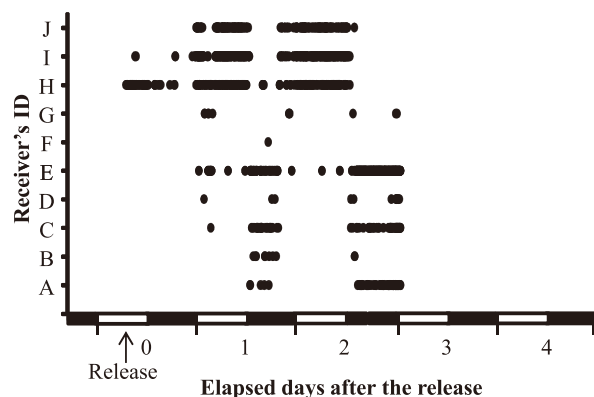


Fig. 12. Typical post-release detection pattern of a directly released black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) of 125 mm in total length without acclimation to shelters and environment conditions. White and black bars at the bottom of figure indicate daytime and nighttime, respectively.

て,種苗による捕食者の認識能力の向上,つまり「捕食者の学習」が挙げられている。捕食者の正確な認識は個体の生存や効率的な活動において必要不可欠な能力である。いくつかの種において,捕食者の認識は生来のものではなく,学習によって獲得されるものであることが知られている。例えば,スズメダイの一種 *Dascyllus marginatus* では,着底直後の稚魚は成体とは異なり,捕食者を適切に判断することができないが,成体の対捕食者行動を視覚的に認識することによって,捕食者を判断できるようになる(Karplus *et al.*, 2006)。また,ニジマス *Oncorhynchus mykiss* では,捕食者の匂いと同種他個体が傷ついた時に出る匂いに同時に暴露された種苗は,その後しばらくの間,捕食者からの匂い(化学的刺激)によって危険を回避する行動をとる(Brown and Smith, 1998)。このような「捕食者の学習」を放流後の種苗の被食軽減に利用する試みが近年なされており,多くの種において,放流する前に種苗に捕食者を学習させることによって,種苗の捕食回避能力を向上させられることが報告されている(例えばギンザケ *Oncorhynchus kisutch*, Olla and Davis, 1989; *Pagrus major*, 藤川・佐々木, 2001; *Paralichthys olivaceus*, Kellison *et al.*, 2002; Hossain *et al.*, 2002; Arai *et al.*, 2007)。シロクラベラにおいても,放流前に捕食者を学習させることによって種苗の捕食回避能力を向上させることができるならば,放流後の被食を軽減する手法として利用できるかもしれないと考えた。

そこで,シロクラベラ種苗(全長約56 mm)と捕食者としてカンモンハタ *Epinephelus merra*(全長180 ± 18 mm)を用いた水槽実験を行い,捕食者を学習することが種苗の捕食回避能力におよぼす影響について調べた(河端ら 2011)。この実験ではふたつのタイプの水槽を使用した(Fig. 13a, b)。まず,ひとつめのタイプの水槽は,水深11 cmの水槽(44 cm × 29 cm)で,その水槽は水の行き来が可能で,かつ透明な仕切りによってふたつのエリアに分けられている(以下,経験用水槽, Fig. 13a)。経験用水槽の片方のエリアには捕食者1尾とその捕食者が隠れる場所として捕食者用のシェルターが1基入っている。もうひとつのタイプは,水深11 cmの水槽(87 cm × 12 cm)で,その水槽内には仕切りはなく,捕食者1尾と捕食者用シェルターが1基入っている(以下,行動観察用水槽, Fig. 13b)。以下に実験操作を概説する。

まず,経験用水槽の捕食者が入っていない方のエリアに,これから被食の様子を経験させる種苗を1尾入れた。その後,捕食者のいるエリアへ新たに他の種苗を2尾入れ,捕食者によってそれらを捕食させた。こ

の操作によって、もう片方のエリアに先に入れていた個体に、同種他個体が捕食される様子を視覚的にも化学的にも経験させた。次に、この捕食の様子を経験した個体（以下、経験個体）を行動観察用水槽へ移し、水槽に設置した塩ビパイプ内で水槽環境に馴致した。馴致後、塩ビパイプを取り除くことによって経験個体を被食環境にさらした。行動観察用水槽内の経験個体の様子はビデオカメラによって観察し、経験個体の行動と生残について調べた (n = 6)。また、捕食の様子を経験させることによる種苗の行動や生残への影響を調べるために、経験用水槽内で捕食の様子を経験させていない種苗（以下、非経験個体, n = 6）を用いて、行動観察用水槽内で同様な行動観察を行い、その実験

結果を経験個体と比較した。

実験の結果、観察中に非経験個体では全ての個体が捕食され、経験個体でも1尾を除いて全ての個体が捕食された。これは被食者が隠れる場所もなく、狭い水槽内という被食者にとって不利な実験環境に起因すると考えられた。しかし、種苗の生残や行動には経験の有無によって差が見られた。まず、経験個体は非経験個体に比べて生存期間が長かった (Fig. 14)。また行動観察の結果、種苗の被食は、種苗が捕食者のいる捕食者用シェルターから0 - 145 mmの範囲（以下、危険エリア, Fig. 13）に接近した際に起こっていたが、経験個体は非経験個体に比べて、実験開始からその危険エリアに初めて侵入するまでの時間が長かった (Fig. 15)。つまり、経験個体は捕食者を認識し、その捕食者への接近を避けていた結果、生存期間が長くなった可能性がある。しかし、ニジマスでは被食の危険を感じた場合、活動範囲や活動量を低下させることが知られている (Brown and Smith, 1998)。本実験でも経験用水槽内での捕食の様子を経験したことが、その後の経験個体の活動範囲や活動量を制限した結果、単純に捕食者への接近を遅らせ、生存期間を長くしていただけかもしれない、必ずしも被食シーンの経験が捕食者の認識につながったとは言い切れない。

そこで、経験個体が本当に捕食者への接近を避けていたのかどうかについて調べるため、行動観察用水槽内に捕食者を入れていないという点以外は、上述と同様の実験を再度行った。その結果、行動観察用水槽に捕食者がいない場合では、経験個体と非経験個体の間

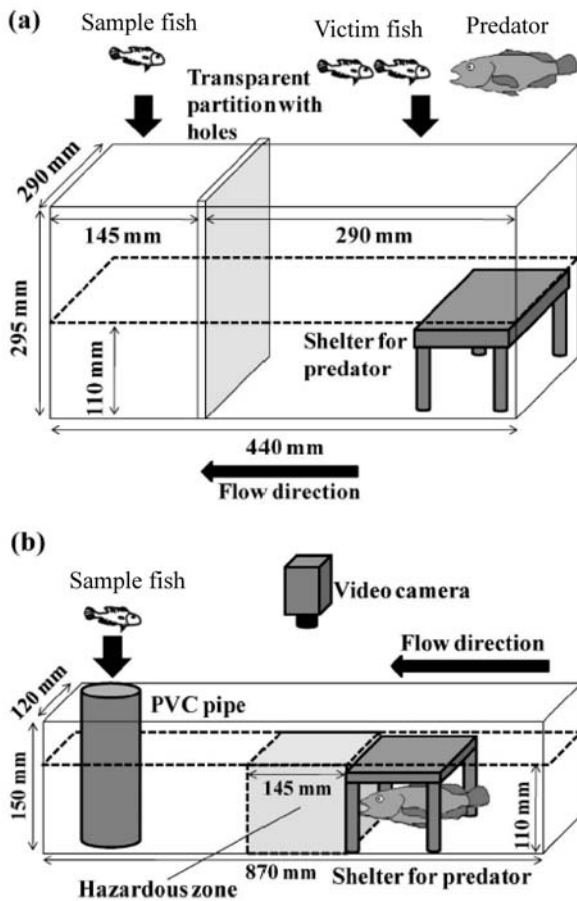


Fig. 13. Schematic drawings of the experimental tanks: (a) the experiencing tank and (b) the behavioral observation tank. The sample black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) in the behavioral observation tank was the fish that had been conditioned in the experiencing tank. The PVC pipe in the behavioral observation tank was removed when the observation was started. Redrawn after Kawabata *et al.* (2011b) with permission.

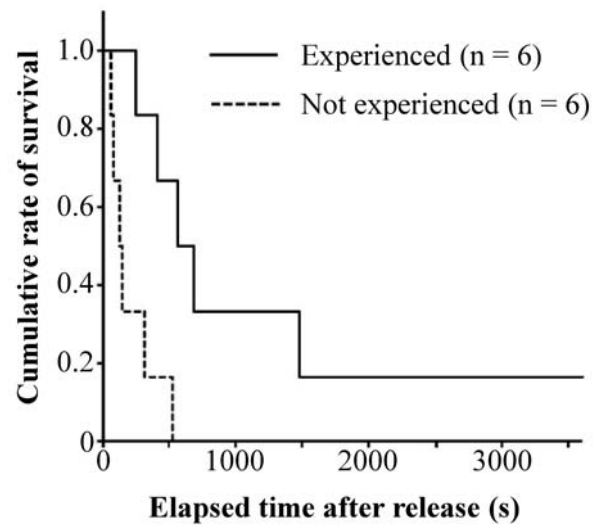


Fig. 14. Time series cumulative rates of survival of black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) in the behavior observation tank. Redrawn after Kawabata *et al.* (2011) with permission.

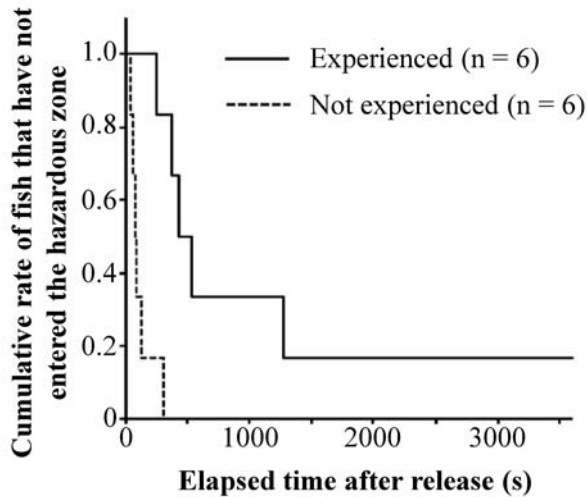


Fig. 15. Time series cumulative rates of black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) that have not entered the hazardous zone in the behavior observation tank. Redrawn after Kawabata *et al.* (2011) with permission.

で危険エリアに侵入するまでの時間に差が見られなかった。このことから先の実験において、経験個体の生存期間が長かったのは、経験個体が確実に捕食者の存在を認識して、その捕食者への接近を回避していたことによっていたと考えられた。つまり、シロクラベラでも1)捕食者を学習し、認識すること、2)放流前に種苗に捕食者を学習させることによって放流後の被食を軽減できる可能性があることがわかった。今後、捕食者を学習させた個体を野外へ放流することによって、野外環境においても「捕食者の学習」が放流後の種苗の生残に貢献するのかどうかについて調べる必要があるだろう。

しかし、野外には本種にとって様々な種類の捕食者がみられるため、放流効果をあげるためには、放流種苗に複数種の捕食者を学習させる必要があるかもしれない。もしそうならば、多様な魚食性生物すなわち潜在的捕食者が多数生息する熱帯、亜熱帯海域において、「捕食者の学習」を用いた放流種苗の被食率の軽減、それによる放流効果の向上は、種苗放流の現場で試みることはなかなか難しいだろう。これは前節の「基質や巣穴への馴致」を用いた被食率の軽減に対しても同様にいえる。本研究で示したような手法では、大量の本種種苗に対して一斉に「基質や巣穴への馴致」や「捕食者の学習」を行うことは少なくとも現段階では非現実的である。馴致や学習をより簡便にコストをかけずに、大量の種苗に対して行うことができる手法の開発に今後取り組む必要がある。

5. 小型種苗を用いた種苗放流

5-1. 初期生態に基づいた種苗放流

より簡便にコストをかけずに種苗を放流するには、体サイズの小さな小型種苗を放流することがその一手法として考えられる。だが、前述のように小型種苗の放流は、放流からわずか3時間後にはその姿が見られなくなり、とても放流効果のあがる方法とは考えにくい。しかし、本当に小型種苗放流は本種において適していない放流手法なのだろうか？種苗放流によって資源添加を試みる際、種苗の体サイズの他にも、放流に適しているかどうか検討すべき事項として放流時期や放流場所がある (Yamashita and Yamada, 1999)。例えば、2007年に名蔵湾にて平均全長10 mmのシロクラベラ小型種苗群を放流したが、その放流は5月上旬に高潮線付近の海草のまばらな、潮干帯域の非常に狭い砂地を放流点として行われた。放流を行った時点では、全長10 mmの本種稚魚がいつ、どのような場所に出現するのかについてほとんどわかっていなかった。つまり、小型種苗の放流に最適な時期や最適な場所（藻場などの環境状態）について十分に検討されていない状態で放流が行われた。そのため、この小型種苗の放流は効果的なものにならなかったのかもしれない。

その後、本交付金プロジェクトの他研究課題の実施を通じて本種の初期生態についての知見が大幅に蓄積されてきた。例えば、本種は体長10 - 15 mm程度が着底サイズであり、着底稚魚は主に3月から4月にかけて、遠浅な潮間帯に形成される褐藻群落に着底することが明らかになった (Yamada *et al.*, 2012)。この知見と照らしあわせると、2007年に行った放流は明らかにその時期や場所（環境）が、種苗にとって最適ではないものだったと判断される。そのため、小型種苗放流を行う時期や場所について再検討したうえで、小型種苗を用いた放流の有効性を再評価する必要がある。また、種苗の学習能力は小さな個体ほど高いことが報告されていることから (藤川・佐々木, 2001)、小型種苗は放流環境への適応能力が高いと期待され、低い生産コストで実施できる小型種苗放流についてその有効性を再検討する価値は十分にある。

そこで、小型種苗放流の有効性を再評価するために、まず放流する時期と場所とを操作した小型種苗放流を行った。放流場所とした名蔵湾の岩礁性干潟では、本種の着底場所となる褐藻群落が3月から4月にかけて繁茂し、5月には枯死することがわかっている。そこで次のようなふたつの放流群を設定した。

藻場あり群：平均全長15.1 ± 1.2 mmの小型種苗群 (9000尾) を4月中旬に褐藻群落内へ放流した群。

藻場なし群：平均全長 14.1 ± 1.1 mmの小型種苗群(12000尾)を5月中旬に、既に褐藻群落枯死した状態の、藻場あり群と同じ場所へ放流した群。

各放流群の放流点は2点とし、各放流点には囲い網(2 m × 2 m × 0.8 m)を1基ずつ設置した。藻場あり群では、囲い網の中に褐藻が繁茂している状態となるように囲い網を設置した。放流種苗にはALC標識を装着し、その装着回数によって放流群を識別できる

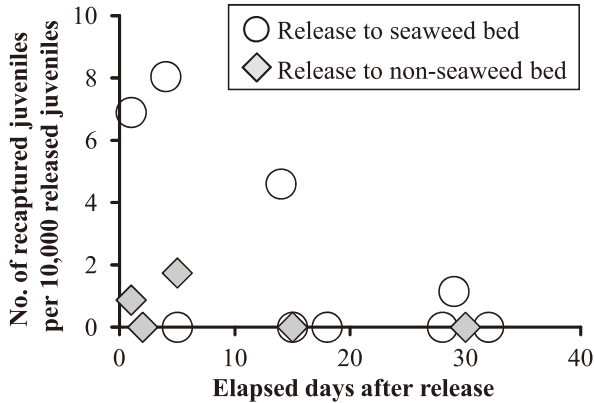


Fig. 16. Relationship between number of recaptured black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juveniles per 10,000 released juveniles and number of elapsed days after release.

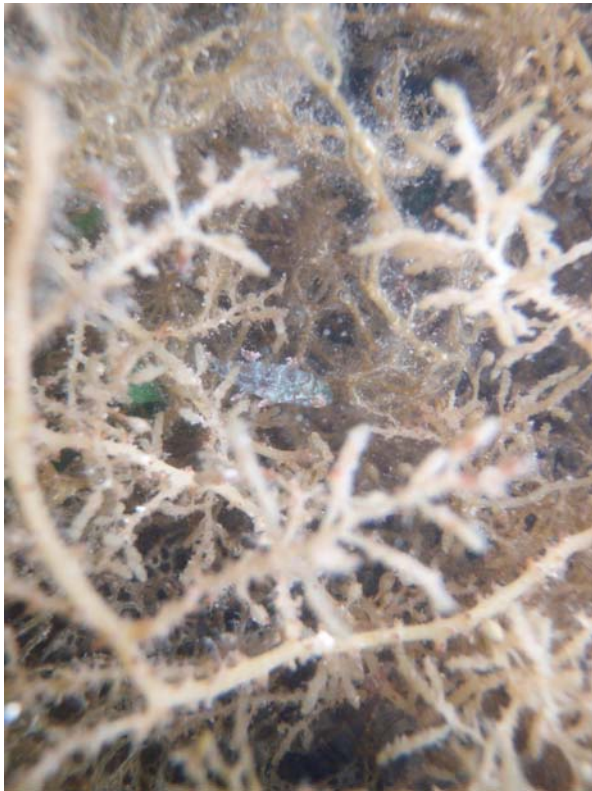


Fig. 17. A released black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juvenile hiding in seaweed bed just after release.

ようにした。種苗を囲い網の中で放流環境に24時間馴致したのち放流した。放流群間で放流後の種苗の生残について比較するため、放流点を中心として25 - 129 mの距離に合計18点の調査定点を設定し、各調査定点において押し網(縦70 cm, 幅65 cm, 目合約1 mm)を用いて、定期的に放流点周辺における放流種苗の滞留状況について調べた。

その結果、藻場なし群では放流後5日目を最後に、その後一切の放流種苗の再捕はなかった (Fig. 16)。それに対して、藻場あり群では放流からの日数の経過に伴い、再捕数に減少は見られたものの、調査定点で放流後29日目までは再捕が見られた (Fig. 16)。藻場あり群の放流時には、放流種苗が放流後すぐに褐藻群落の中に入り込む様子が確認され (Fig. 17)、複雑な空間構造を持つ褐藻への放流が放流後の被食リスクを軽減したのかもしれない。

また、放流後における種苗の摂餌や成長について把握するために、調査定点以外の点においても放流種苗を再捕し、より多くの再捕がみられた藻場あり群についてその胃内容物や全長について調べた。その結果、放流1日後には摂餌している個体の割合は80%で、放流4日後には全ての個体が摂餌していることが確認された。また、放流種苗と同時に採集された天然個体と消化管内容物重量指数(体重あたりの消化管内容物重量 × 100)を比較したところ、放流種苗は放流4日後には天然個体とほぼ同量の餌生物を摂餌できていることがわかった (Fig. 18)。餌料重要度百分率(%IRI: 各餌生物の重量や出現頻度、摂餌個体の割合から計算される、摂餌者にとっての各餌料の重要性を表す指数、Cortés, 1997)を比較してみても、放流4日後には天

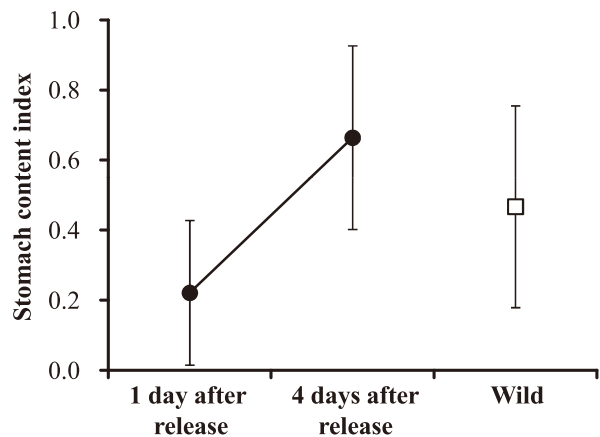


Fig. 18. Post-release change in mean (± SD) stomach content index (SCI) of hatchery-reared black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juveniles after release to seaweed bed and the mean SCI of wild juveniles.

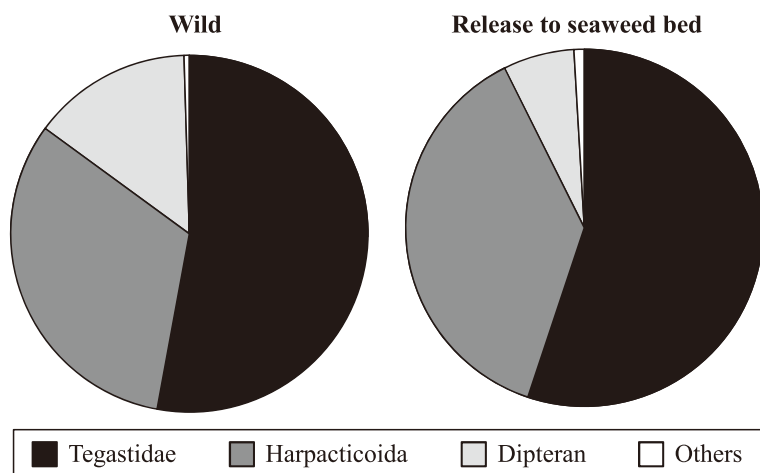


Fig. 19. Stomach contents composition (index of relative importance, IRI) of wild black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juveniles and the IRI of hatchery-reared juveniles at 4 days after release to seaweed bed.

然個体とほぼ同様の餌生物を摂餌していることが示された (Fig. 19)。さらに、藻場あり群の放流種苗は良好な摂餌結果を示すとともに、放流後の日数の経過に伴って成長していた (Fig. 20)。

これらの小型種苗放流実験における滞留 (生残) や摂餌、成長の結果から、1) 小型種苗は天然と同様な摂餌能力を持っていること、2) 本種小型種苗の褐藻群落への放流はその放流効果を上げるに効果的であろうことがわかり、初期生態に関する知見に基づき、その種に適切と判断される時期や場所 (環境) への放流が種苗放流には重要であることが改めて認識された。

5-2. 放流密度が放流種苗の摂餌や成長に与える影響

褐藻群落への小型種苗放流は、種苗の生産コストも低く、かつ複雑な馴致操作を要しないため、今後のシロクラベラにおける有用な種苗放流方法となることが予想される。しかし、藻場のような限られた空間へ放流する場合、放流効果をさらに向上させるには、種苗の体サイズや放流時期と場所に加えて検討すべき課題に「密度効果」が挙げられる。一般に放流種苗数は放流地域の資源量と環境収容力を考慮して決定されるべきであり (Kitada and Kishino, 2006; Hamasaki and Kitada, 2008)、環境収容力を超える放流が行われた際には、放流種苗は密度効果による死亡や種苗による天然資源との置き換え等が起こりうる (Kitada and Kishino, 2006)。密度効果が生じる要因には様々なものが考えられるが、例えば本種の小型個体にとって餌場としての機能を有する褐藻群落では、過剰な放流密度は放流後の種苗の摂餌や成長に対して負の効果を与

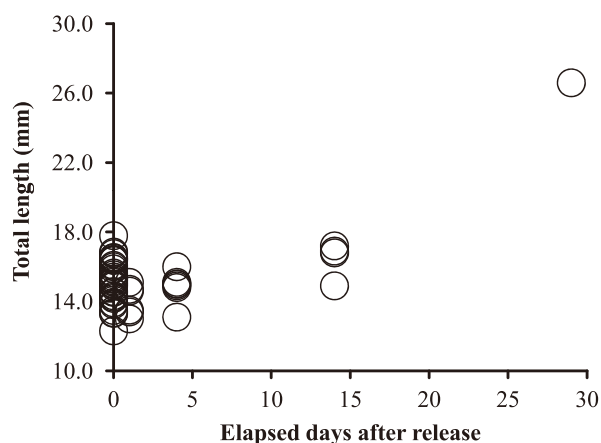


Fig. 20. Relationship between number of elapsed days after release and total length of hatchery-reared black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juveniles that had been released to seaweed bed.

えることが懸念される。

そこで、放流密度が放流後の本種種苗の摂餌や成長に与える影響について調べるために、上述の「藻場あり群」との比較対象として、次のような放流群を設定し、放流後の種苗の摂餌や成長について比較した。

分散放流群：上述の藻場あり群の放流と同年の4月下旬に、平均全長 12.7 ± 1.0 mmの小型種苗群19000尾を褐藻群落18点へ分散して放流した群。

上述の藻場あり群では、2つの放流点にて囲い網による野外環境への馴致を経たのち、その2地点で集中的に種苗を放流した。そのような集中放流とは異なり、この分散放流群では、囲い網を用いた野外環境への馴

致は行わず、岩礁性干潟域のうちのおよそ13350 m²のエリア内にて、点在する褐藻群落を合計18地点選び、各地点へ種苗をおよそ1000尾ずつ直接放流することにより、藻場あり群に比べて広い範囲へ、かつ低い密度で種苗が分散して放流されるようにした。種苗はALCの装着回数によって群を識別できるようにした。放流後は定期的に押し網によって放流種苗を再捕し、その摂餌状況や成長について調べた。

その結果、分散放流群では藻場あり群よりも早くから摂餌がみられ、放流から1.5時間後および1日後には既に全ての個体が摂餌をしていた。さらに分散放流群の消化管内容物重量指数は、放流直後から藻場あり群

より高い値を示し、その群間の差は放流4日後に藻場あり群の値が上昇することによってようやく見られなくなった (Fig. 21)。また、分散放流群の消化管内容物重量指数は放流直後から既に天然個体とほぼ同等かそれ以上の高い値を示した (Fig. 21)。次に、藻場あり群と分散放流群の放流後の成長を比較したところ、より早くに、多くの摂餌をしていた分散放流群において、速い成長速度がみられた (Fig. 22)。また、分散放流群の成長速度は、天然個体のものとほぼ同等であった (Fig. 22)。

ふたつの放流群には、体サイズに若干の相違があるうえ、放流実施時期に2週間のずれがあり、餌環境や水

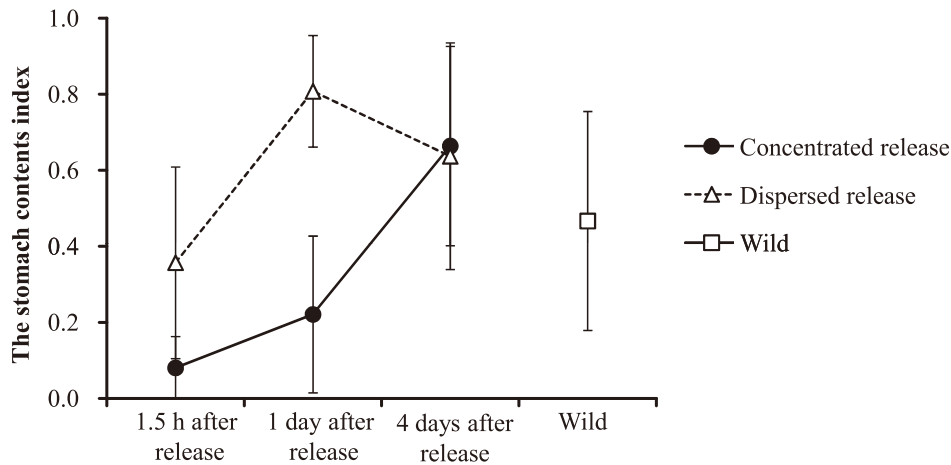


Fig. 21. Post-release changes in mean (\pm SD) stomach content index (SCI) of hatchery-reared black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juveniles that had been released under various densities of conspecific juveniles and the mean SCI of wild juveniles.

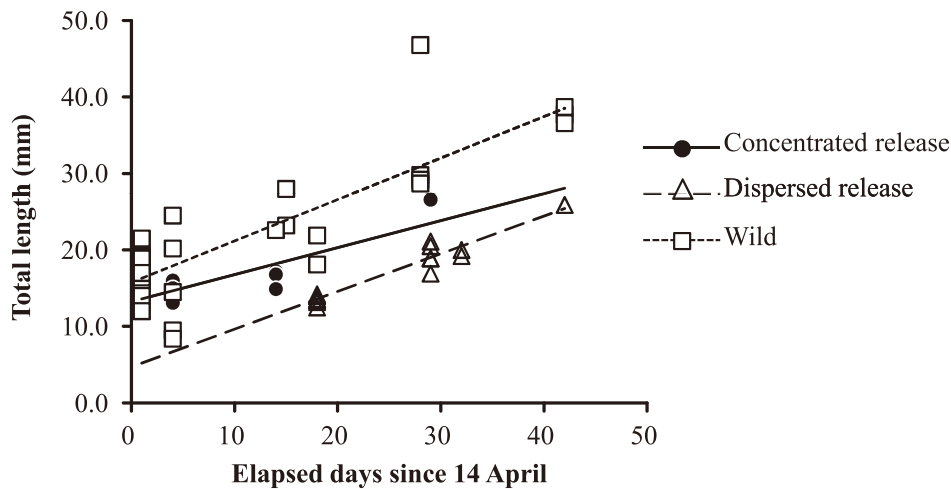


Fig. 22. Relationships between number of elapsed days after release and total length of hatchery-reared black-spot tuskfish (*Choerodon schoenleinii*) juveniles or that of wild juveniles.

温が異なるため単純に比較することはできないが、これらの結果は藻場あり群におけるある点への集中した大量放流は種苗間の餌をめぐる競争を生じさせ、種苗の摂餌と成長を制限していたことを示唆している。短期間とはいえ飢餓はその成長だけではなく、摂餌行動の後敏性を著しく低下させることがヒラメ稚魚において報告されており（田中，1993）、藻場あり群のような集中放流は放流後の被食による減耗を加速させることが懸念される。さらに、サンゴ礁性魚類において、高い生息密度下では捕食者の機能的かつ数的反応による高い被食率、つまり密度依存的な死亡が生じることからも（Webster, 2003）、一時的とはいえ生息密度を高める集中放流は避けるべき放流方法と考える。ただし、餌量をはじめとした環境収容力の範囲内であり、かつ捕食者による機能的かつ数的反応がない状況、すなわち捕食者の空間分布が均一であるならば、ある程度高い密度で放流することは種苗の生残率を向上させるのに効果的な手段となりうる。適切なシロクラベラの放流密度の推定には摂餌や成長に加えて、放流密度に対する捕食者の行動的反応についても今後調べる必要があるだろう。

少なくとも本種種苗の褐藻群落への放流には適切な放流密度があり、放流効果の向上には放流密度を考慮する必要があることが明らかとなった。今後、放流密度を操作した放流を行い、放流種苗の摂餌や成長、放流密度に対する捕食者の行動的反応について調べるとともに、飼育実験によって種苗の摂餌状況と捕食回避能力の関係についてもあわせて調べることによって、本種の種苗放流における適正密度を把握することが小型種苗放流による放流効果の向上に重要である。また、適正な放流密度を把握するとともに、小型種苗が着底場所として利用する褐藻群落の量（例えば面積）や天然個体の着底量についてもあわせて調べれば、その地先への最適な放流尾数を決定することも可能とってくるだろう。

本実験では残念ながら、藻場あり群も分散放流群も放流からおよそ1カ月後の再捕を最後に、その後は放流種苗の生存は確認されなかった。この放流試験を行った年は、水温などの環境条件から天然個体の着底時期が早く、天然個体は放流した種苗に比べて大きかった（Fig. 22）。天然個体に比べて小さかった放流種苗は野外環境における種間競争（および種内競争）において不利であったと考えられ、それが放流種苗の生残に不利に働いたのかもしれない。年変動する環境やそれに伴って変化する種間競争の強度および天然資源の産卵・着底動態の時期的変動を把握し、その年の小型種苗放流の実施に最適な時期をより詳細に捉えてい

くことがより効果的な小型種苗放流の実施のために重要だろう。

6. 今後のシロクラベラ資源の回復に向けて

栽培漁業は資源の回復を図る資源管理ツールのひとつである（Blaxter, 2000; Bell *et al.*, 2008）。栽培漁業における種苗放流には、資源量の維持・増大にくわえ、1)天然資源による加入量変動の補償・安定化、2)マツカワやニシン *Clupea pallasii* のような崩壊資源の再構築にも貢献することが期待されている。しかし、種苗放流のみならず漁業管理による資源管理が実を結ぶ際には常に環境収容力、つまり増やそうとした資源分が利用できる余剰な環境収容力が必要となる。だが、例えば多くの種がその生活環において利用する藻場は1978年からの30年間で、干潟は1945年からの50年で、ともに約40%も日本全体で消失したと見積もられている（水産庁，2009）。シロクラベラはその初期生活史から、褐藻藻場と海草藻場との両方が連続的に存在していることが生息に不可欠であるが（Yamada *et al.*, 2012）、本研究課題を実施した、本種の育成場所として知られる名蔵湾においても藻場面積の減少が懸念されており、その藻場域の減少が現在の本種資源の低迷を招いていることが十分に考えられる。今後、本種資源の増大を試みる際は、種苗放流による効率的な資源添加技術の開発にとどまらず、本種の生息環境の保全、つまり環境収容力の維持や藻場造成による環境収容力の創出にも注力していく必要がある。これは低位水準にある他の沿岸資源においてもその回復・維持管理を達成するのに極めて重要なことだろう。

これまで熱帯、亜熱帯域において種苗放流による顕著な資源添加の成功例はみられず、残念ながら本研究課題においても実施期間中に放流種苗が水揚げされることはなかった。近年、熱帯、亜熱帯域では、藻場域の減少に加えてサンゴ礁の衰退もみられており、環境収容力の低下が懸念されている。また、他の気候帯に比べて、圧倒的に多くの種が共存するため、それぞれの種が有するニッチは狭く、種苗放流による単一種の資源量増加を図ることは困難のようにみえる。それに加えて、熱帯、亜熱帯域では水産資源として利用されている種ですら、その生活史を通じた生態について明らかになっている種は少ない。

しかし、例えば八重山海域の沿岸性魚類資源における漁獲努力量あたりの漁獲量（太田ら，2007）から各々の資源量を推測すると、種によっては資源量に大きな年変動がみられ、シロクラベラの資源量にもある程度の年変動がみられる。このことはそれぞれの種のニッ

チが狭く、種苗放流による大幅な資源添加が困難であるとしても、種苗放流によってある程度の資源量の底上げが期待できることを意味するだろう。また、本種は水温などの環境変化の激しい、ごく浅い岩礁性干潟域に加入することや、産卵期と加入時期が年変動することから、毎年の加入量には大きな変動がみられる(Yamada *et al.* 2012)。そのため、例えばシロクラベラの加入量の少なかった年には、放流種苗が利用できるニッチが見込めることになり、小型種苗放流を行うことによって加入量の補償・安定化ができれば、種苗放流による本種資源への貢献は十分に期待できる。熱帯、亜熱帯域に期待される栽培漁業とは、これまで多くの魚種に対して行われてきた大量種苗放流による一代再捕型ではなく、天然資源の変動やそれによる加入量の変動を補償・安定化することを目的としたものではないかと考える。

本研究課題において放流魚の水揚げはみられなかったものの、本種において効果的と目される放流技術の開発は進み、さらにそれを洗練する材料となる生態的知見も十分に蓄積されてきた。今後、種苗放流による本種の資源添加の試みが、熱帯、亜熱帯における栽培漁業の進展へ貢献することを期待したい。ただ、種苗放流は資源回復を図る直接的なツールのひとつに過ぎず、上記でも触れたように環境収容力の維持・創出に加えて、漁業管理（漁獲量規制、サイズ規制、禁漁期、禁漁区等）といった間接的ツールと種苗放流が並行して行われてはじめて、熱帯、亜熱帯域における沿岸資源の回復に栽培漁業が貢献し得ることを忘れてはならない。

7. 謝辞

本研究課題の実施にあたり、琉球大学理学部海洋自然科学科 立原一憲准教授、沖縄県水産海洋研究センター石垣支所 照屋忠敬前支所長、渡辺利明支所長、(独)水産総合研究センター本部の大河内裕之氏には、有益な助言や励ましを頂いたことに深く感謝致します。西海区水産研究所の亀田卓彦博士、下田徹氏、栗原健夫博士、鈴木豪博士、瀬戸内海区水産研究所の團重樹氏、国際水産資源研究所の阿部寧博士、また鹿熊信一郎博士をはじめ沖縄県八重山支庁農林水産整備課の皆様、長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター泉田大介氏、片山翔太氏には、野外調査等において多忙な中、ご協力を賜ったことに厚く御礼を申し上げます。また、八重山漁業協同組合 上原亀一代表理事組合長には調査実施に対する協力にご快諾いただいたことに深謝致します。最後に査読者の方々には本稿に対して適

切なご指導やコメントを頂いたことに感謝いたします。

8. 引用文献

- Arai, T., Tominaga, O., Seikai, T., and Masuda, R., 2007: Observational learning improves predator avoidance in hatchery-reared Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* juveniles. *J. Sea Res.*, **58**, 59-64.
- Bell, J. D., Leber, K. M., Blankenship, H. L., Loneragan, N. R., and Masuda R., 2008: A new era for restocking, stock enhancement and sea ranching of coastal fisheries resources. *Rev. Fish. Sci.*, **16**, 1-9.
- Bilton, D., Alderdice, F., and Schnute, J. T., 1982: Influence of time and size at release of juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) on returns at maturity. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **39**, 426-447.
- Blaxter, J. H. S. 2000: The enhancement of marine fish stocks. *Adv. Mar. Biol.*, **38**, 1-54.
- Brown, C., and Day, R., 2002: The future of stock enhancements: bridging the gap between hatchery practice and conservation biology. *Fish Fish.*, **3**, 79-94.
- Brown, G. E., and Smith, R. J. F., 1998: Acquired predator recognition in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): conditioning hatchery-reared fish to recognize chemical cues of a predator. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **55**, 611-617.
- 陳炳善, 野田勉, 2010: クロソイ: 栽培漁業による資源増殖の現状と将来展望. 日本水産学会誌, **76**, 254-255.
- Cortes, E., 1997: A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **54**, 726-738.
- Ellis, T., Hoowell, B. R., and Hughes, R. N., 1997: The cryptic responses of hatchery-reared sole to a natural sand substratum. *J. Fish Biol.*, **65**, 1-19.
- Fairchild, E. A., and Howell, W. H., 2004: Factors affecting the post-release survival of cultured juvenile *Pseudopleuronectes americanus*. *J. Fish Biol.*, **65** (Suppl. A), 69-87.
- Fairclough, D. V., Clarke, K. R., Valesini, F. J., and Potter, I. C., 2008: Habitat partitioning by five

- congeneric and abundant *Choerodon* species (Labridae) in a large subtropical marine embayment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **77**, 446-456.
- 藤川祐司, 佐々木正, 2001: 人工種苗マダイの捕食者回避における学習効果. *水産増殖*, **49**, 151-156.
- Hamasaki, K., and Kitada, S., 2008: The enhancement of abalone stocks: Lessons from Japanese case studies. *Fish Fish.*, **9**, 243-260.
- Hixon, M. A., and Beets J. B., 1993: Predation, Prey Refuges, and the Structure of Coral-Reef Fish Assemblages. *Ecol. Mono.*, **63**, 77-101.
- 北海道, 青森県, 岩手県, 宮城県, 福島県, 千葉県, 鳥取県, 2004: 平成15年度資源増大技術開発事業報告書 魚類Cグループ. 1-30.
- 堀井豊充, 片町太輔, 2012: I-3. トラフグ資源の現状. *日本水産学会誌*, **78**, 84.
- Hossain, M. A. R., Tanaka, M., and Masuda, R., 2002: 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.*, **267**, 1-14.
- Karplus, I., Katzenstein, R., and Goren, M., 2006: Predator recognition and social facilitation of predator avoidance in coral reef fish *Dascyllus marginatus* juveniles. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **319**, 215-223.
- Kawabata, Y., 2010: Studies on the behaviour and ecology of hatchery-reared black-spot tuskfish for its optimal release strategies. *Kyoto University Doctoral thesis*. 111pp.
- Kawabata, Y., Asami, K., Kobayashi, M., Sato, T., Okuzawa, K., Yamada, H., Yoseda, K., Arai, N., 2011a: Effect of shelter acclimation on the post-release movement and putative predation mortality of hatchery-reared black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii*, determined by acoustic telemetry. *Fish. Sci.*, **77**, 345-355.
- Kawabata, Y., Asami, K., Kobayashi, M., Sato, T., Okuzawa, K., Yamada, H., Yoseda, K., Arai, N., 2011b: Effect of shelter acclimation on the post-release survival of hatchery-reared black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii*: laboratory experiments using the reef-resident predator white-streaked grouper *Epinephelus ongus*. *Fish. Sci.*, **77**, 79-85.
- Kawabata, Y., Okuyama, J., Asami, K., Yoseda, K., Arai, N., 2008: The post-release process of establishing stable home ranges and diel movement patterns of hatchery-reared black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii*. *J. Fish Biol.*, **73**, 1770-1782.
- 河端雄毅, 山田秀秋, 佐藤 琢, 小林真人, 平井慈恵, 照屋和久, 荒井修亮, 2011: シロクラベラ人工種苗の被食回避における捕食者学習効果. *日本水産学会誌*, **77**, 625-629.
- Kellison, G. T., Eggleston, D. B., and Tanaka, M., 2002: Density-dependent predation and implications for stock enhancement with Japanese flounder. *J. Fish Biol.*, **60**, 968-980.
- 北田修一, 藤島浩晃, 1997: 北海道におけるホタテガイの種苗放流効果の検討. *日本水産学会誌*, **63**, 686-693.
- 北田修一, 2001: 栽培漁業と統計モデル分析, 共立出版, 東京, 334pp.
- Kitada, S., and Kishino, H., 2006: Lessons learned from Japanese marine finfish stock enhancement programmes. *Fish. Res.*, **80**, 101-112.
- Kruuk, H., 1963: Diurnal periodicity in the activity of the common sole, *Solea vulgaris* Quesnel. *Netherl. J. Sea Res.*, **2**, 1-28.
- 松村靖治, 2006: 有明海におけるトラフグ *Takifugu rubripes* 人工種苗の産卵回帰時の放流効果. *日本水産学会誌*, **72**, 1029-103.
- 村上倫哉, 吉岡孝治, 相田 聡, 海野徹也, 中川平, 2005: 広島県生野島のアマモ場に放流した人工種苗メバルの放流サイズと初期生残について. *日本水産学会誌*, **71**, 354-362.
- 小畑泰弘, 2006: 瀬戸内海東部海域におけるサワラの種苗放流への取り組み. *日本水産学会誌*, **72**, 459-462.
- 小畑泰弘, 山崎英樹, 竹森弘征, 岩本明雄, 奥村重信, 藤本 宏, 山本義久, 北田修一, 2007: 異なるサイズで放流したサワラ人工種苗の資源添加効率の比較. *日本水産学会誌*, **73**, 55-61.
- 大河内裕之, 2006: 栽培漁業技術開発の最前線 - II 放流効果の調査手法と標識技術. *日本水産学会誌*, **72**, 450-453.
- 大島泰雄・菅野 尚, 1976: 移植・放流, 「新版つくる漁業」(社団法人資源協会編著), pp. 115-125.
- 太田格, 工藤利洋, 海老沢明彦, 2007: 八重山海域沿岸性魚類資源の現状. 平成17年度沖縄県水産試験場

- 事業報告書, 165-175.
- Olla B. L., and Davis, M. W., 1989: The role of learning and stress in predator avoidance of hatchery-reared coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) juveniles. *Aquaculture*, **76**, 209-214.
- Secor, D. H., Houde, E. D., and Monteleone, D. M., 1995: A mark-release experiment on larval striped bass *Morone saxatilis* in a Chesapeake Bay tributary. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 87-101.
- 島村信也, 安岡真司, 水野拓治, 佐々木恵一, 根本芳春, 2007: ホシガレイに関する研究 - II 漁業実態と福島県沿岸における生活史. 福島水試研報, **14**, 69-90.
- Shireman, J. V., Colle, D. E., and Rottman, R. W., 1978: Size limits to predation on grass carp by largemouth bass. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **107**, 213-215.
- Sparrevohn, C. R., and Støttrup J. G., 2007: Post-release survival and feeding in reared turbot. *J. Sea Res.*, **57**, 151-161.
- Sudo, H., Kajihara, N., Fujii, T., 2008: Predation by the swimming crab *Charybdis japonica* and piscivorous fishes: a major mortality factor in hatchery-reared juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* released in Mano Bay, Sado Island, Japan. *Fish. Res.*, **89**, 49-56.
- 水産庁, 2009: 平成20年度水産白書, http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h20_h/index.html.
- 田中克, 1993: 放流魚の健苗性と育成技術, 放流魚の健苗性と育成技術 (北島力編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 19-30.
- 照屋和久, 浜崎活幸, 竹内宏行, 2003a: スジアラ人工種苗の口径と捕食したデバスズメダイの最大体サイズの関係. 水産増殖, **51**, 35-40.
- 照屋和久, 浜崎活幸, 皆川恵, 竹内宏行, 林原毅, 佐野元彦, 玉城泉也, 2003b: 石垣島浦底湾のサンゴ礁域に放流したスジアラ人工種苗の滞留, 摂餌および被食. 水産増殖, **51**, 151-156.
- Tsukamoto, K., Kuwada, H., Hirokawa, J., Oya, M., Sekiya, S., Fujimoto, H., and Imaizumi, K., 1989: Size-dependant mortality of red sea bream, *Pagrus major*, juveniles released with fluorescent otolith-tags in News Bay, Japan. *J. Fish Biol.*, **35** (Suppl. A), 56-69.
- Webster, M. S., 2003: Temporal density dependence and population regulation in a marine fish. *Ecology*, **84**, 623-628.
- Yamada, H., Nanami, A., Ohta, I., Fukuoka, K., Sato, T., Kobayashi, M., Hirai, N., Chimura, M., Akita, Y., Kawabata, Y., 2012: Occurrence and distribution during post-settlement stages of two *Choerodon* species in shallow waters around Ishigaki Island, southern Japan. *Fish. Sci.* **78**, 809-818.
- Yamashita, Y., Nagahara, S., Yamada, H. and Kitagawa, D., 1994: Effects of release size on survival and growth of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* in coastal waters off Iwate Prefecture northern Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **105**, 269-276.
- Yamashita, Y., and Yamada, H. 1999: Release strategy for Japanese flounder fry in stock enhancement programmes. In *Stock Enhancement and Sea Ranching* (eds. by Howell, B. R., Moksness, E., and Svåsand, T), Fishing News Books, Blackwell Science, Oxford, pp. 191-204.
- 山崎英樹, 竹森弘征, 岩本明雄, 奥村重信, 藤本 宏, 山本義久, 小畑泰弘, 草加耕司, 北田 修一, 2007: 瀬戸内海東部海域におけるサワラの種苗放流効果. 日本水産学会誌, **73**, 210-219.
- 矢野勲, 小川良徳, 1981: マダイ稚仔魚の遊泳速度. 養殖研報, **2**, 49-54.
- Yokota, T., Mitamura, H., Arai, N., Masuda, R., Mitsunaga, Y., Itani, M., Takeuchi, H. and Tsuzaki, T., 2006: Comparison of behavioral characteristics of hatchery-reared and wild red tilefish *Branchiostegus japonicus* released in Maizuru Bay by using acoustic biotelemetry. *Fish. Sci.* **72**, 520-529.