マハタおよびクエ仔稚魚の成長にともなう体密度の変化

平田 喜郎,¹ 浜崎 活幸,^{1*} 照屋 和久,² 虫 明 敬 一³

(2008 年 12 月 2 日受付, 2009 年 2 月 6 日受理)

¹東京海洋大学海洋生物資源学科, ²舩水産総合研究センター志布志栽培漁業センター,³舩水産総合研究センター養殖研究所栽培技術開発センターOntogenetic changes of body density of larvae and juveniles in seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* and kelp grouper *Epinephelus bruneus*YOSHIRO HIRATA,¹ KATSUYUKI HAMASAKI,^{1*}KAZUHISA TERUYA² AND KEIICHI MUSHIAKE³

¹Department of Marine Biosciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, ²Shibushi Station, National Center for Stock Enhancement, Fisheries Research Agency, Shibushi, Kagoshima 899-7101, ³Stock Enhancement Technology Development Center, National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, Saiki, Oita 879-2602, Japan

Sinking death syndrome has been considered as one of the causes of early larval mortality during the seed production of seven-band grouper and kelp grouper. To elucidate the rearing period when larvae show strong minus buoyancy, ontogenetic change of body density was examined for larvae and juveniles of two species. Larvae tended to show nearly neutral buoyancy from hatching to growing to 3.5–3.9 mm in total length (TL) when the buds of the second dorsal fin and pelvic-fin spines appeared. Then, body densities greatly increased with increasing the length of fin spines and reached a plateau at 1.060–1.070 g/cm³ after the size of around 11 mm TL. Swim bladder inflation was not observed in the seven-band grouper; however, it was observed in the kelp grouper after 8.2 mm TL and the percentage of kelp grouper with inflated swim bladders largely increased after 18.6 mm TL. Body densities of kelp grouper with inflated swim bladders decreased to 1.024–1.035 g/cm³. It could be speculated that fin spines regulate the larval buoyancy by generating drag forces. It is therefore considered that larvae show strong minus buoyancy in rearing seawater at the initiation of great increase in body density when fin spines begin to elongate.

キーワード：開腔，クエ，仔稚魚，種苗生産，体密度，沈降死，マハタ

マハタ *Epinephelus septemfasciatus* およびクエ *Epinephelus bruneus* は、全長 1 m、体重 10 kg 以上に達する大型のハタ類であり、日本では本州以南から東シナ海に分布する。¹⁾ 両種とも高級魚として市場で取引されているが、漁獲量が少ないため、増養殖による生産に期待が高まっており、その種苗生産に関する技術開発研究が西日本の水産試験研究機関^{2–11)}や韓国¹²⁾などで行われている。近年、両種とも種苗の量産が可能になりつつあるが、^{4,5,10,11)} 飼育初期における仔魚の大量死（初期減耗^{2,5–10)}と稚魚期以降のウイルス性神経壊死症等の発症^{3,4)}により、安定して大量の種苗を生産するまでには

至っていない。

魚類の種苗生産における初期減耗には、卵質・ふ化仔魚の活力、餌料、水温、塩分、光、水質、飼育水の流動など様々な要因が影響を及ぼすものと考えられているが、現象的には浮上死と沈降死に大別されている。¹³⁾ 浮上死とは、仔魚が通気のための気泡によって水面に運ばれ、あるいは照度の上昇にともなって表層に移動し、粘液の分泌と水面の表面張力によって動けなくなり死亡する現象であり、特にハタ類で顕著であることが知られている。^{6,13–16)} この浮上死を防ぐために、ハタ類の種苗生産では、飼育水へフィードオイルを添加して水面に油膜

を形成することが行われている。^{2,7,8,15-17)} さらに、阪倉らの研究グループは、マハタ種苗生産における浮上死を防除する飼育技術を開発するために、通気による飼育水の流動が浮上死発生に及ぼす影響を精査し、飼育水槽への適正な通気量・通気方法を明らかにしている。^{6,7,9)} また、通気によらない飼育手法を開発するとともに、⁸⁾ 飼育容器の形状が浮上死発生に及ぼす影響を検討しており、¹⁶⁾ 種苗生産における浮上死低減方策が明らかになりつつある。一方、沈降死とは、主に夜間に仔魚が水槽底に沈降して死亡する現象であり、ブリ *Seriola quinqueradiata*,¹⁸⁾ クロマグロ *Thunnus orientalis*,^{13,19,20)} カンパチ *Seriola dumerili*,^{21,22)} マツカワ *Verasper moseri*²³⁾ などで報告されている。水槽底への沈降による仔魚の死亡原因は必ずしも明らかではないものの、水槽底との接触で生じる外傷や病原細菌の侵入¹³⁾あるいは水槽底の水の動きが弱い環境で仔魚のガス交換の効率が著しく劣る²³⁾ことなどが原因として考えられている。仔魚の沈降は、仔魚自体の重力沈降と遊泳力および飼育水の流動などに支配されるものと考えられ、沈降速度は体密度に比例する。¹⁹⁾ マダイ *Pagrus major*,²⁴⁾ クロダイ *Acanthopagrus schlegeli*²⁵⁾ およびヒラメ *Paralichthys olivaceus*²⁶⁾ の仔稚魚の体密度を調べた研究結果によると、ふ化後の内部栄養吸収期は中性浮力を示すが、卵黄・油球を吸収し、開口して摂餌を開始すると体密度が増大することが報告されている。クロマグロ仔魚^{19,20)}やカンパチ仔魚²²⁾では飼育水比重よりも高い体密度が知られており、この高い体密度によって仔魚は水槽底へ沈降し、死亡するものと考えられている。また、マツカワにおいても仔魚の体密度増加と沈降死の発生時期が一致することが確かめられている。²³⁾ このような沈降死対策として、マツカワでは、通気により飼育水を循環させることによって、仔魚の水槽底への沈降を低減し、生残率が向上したことが報告されている。²³⁾ また、クロマグロの種苗生産において、飼育水をポンプによって循環させ、仔魚の水槽底への沈降を低減することによって、初期生残率が大幅に改善されたことが報告されている。²⁷⁾

マハタとクエの種苗生産においても、沈降死が初期減耗要因の一つに上げられており、^{4,10)} クエでは通気による飼育水の還流によって初期生残率の向上がみられている。¹⁰⁾ しかし、マハタとクエ仔魚の沈降（浮力）に関わる体密度の変化は知られておらず、沈降死の発生に注意すべき時期も明確ではない。そこで、本研究では、マハタとクエの種苗生産における初期生残を改善する基礎として、飼育した仔稚魚の体密度の変化を調べた。

材料および方法

採卵とふ化 マハタ、クエともに、鯛水産総合研究センター養殖研究所栽培技術開発センターで養成した親魚

を使用し、前者は2006年と2007年、後者は2007年に採卵を実施した。マハタでは、2006年には雌1尾（体重6.5 kg）と雄2尾（体重5.5 kgと10.4 kg）に、2007年には雌1尾（体重5.3 kg）と雄3尾（体重6.8～10 kg）に胎盤性性腺刺激ホルモン（ゴナトロピン5000、あすか製薬）を魚体重1 kgあたり600 IUの割合で背部筋肉内に注射し、48時間後（2006年6月3日、2007年6月6日）に腹部を圧搾して採卵・採精し、乾導法により人工授精を行った。得られた受精卵から沈下卵を取り除き、1 kL アルテミアふ化槽に収容し、流水条件下（水温21～22℃、流量2.5 L/分）で管理した。翌日、疾病防除の目的で受精卵を0.3 ppm オキシダント海水中で1分間消毒後、60 kL 種苗量産用水槽に2006年は30万粒、2007年は42万粒収容し、ふ化まで水温23℃で管理した。収容した卵に対するふ化率は2006年が58%、2007年が48%であった。クエでは、雌1尾（体重7.4 kg）と雄2尾（体重13.0 kgと13.7 kg）を用い、マハタと同様の方法で2007年6月22日に人工授精を行い、沈下卵を除いた受精卵を200 L アルテミアふ化槽で管理し（水温21～22℃、流量1 L/分）、翌日に受精卵2.2万粒を2 kL 水槽に収容した。収容卵に対するふ化率は100%であった。

仔稚魚の飼育 マハタ仔稚魚の飼育は60 kL 水槽を用いて行い、2006年（第1回調査）は51日齢、2007年（第2回調査）は61日齢まで実施した。飼育は26日齢（第1回）あるいは23日齢（第2回）まで無換水で、それ以降は流水条件下で行った。通気は水槽底面に設置した散気管（直径25 mm×1.5～2 m）（ユニホース、大和実業）と水槽中央に設置したセラミック製のエアーストン（AS-200、田中三次郎商店）1個を用いて行った。水温維持にはチタン製熱交換器を用い、ふ化時には23℃、ふ化後は1日につき0.5～1℃の割合で上昇させ、5日齢以降は26℃とした。飼育海水の比重は1.023～1.024で推移した。日長は6日齢までは24時間連続の明期、それ以降はタイマーを用いて14時間の明期とし、明期には蛍光灯と白熱灯を使用して水面直下の照度が2200 Lxになるように調整した。餌料には高度不飽和脂肪酸が強化された淡水クロレラ（スーパー生クロレラ V12、クロレラ工業）で栄養強化したSS型（第1回調査、3～11日齢；第2回調査、3～22日齢）、S型（第2回調査、8～51日齢）およびL型ワムシ *Brachionus plicatilis* sp. complex（第1回調査、12日齢～）を用い、6時と13時に飼育水中の密度を計測し、10 個体/mLを下回る場合に追加給餌した。また、30日齢からアルテミア *Artemia* sp. を0.1～0.3 個体/mLの基準で給餌した。アルテミア（北米産、アイ・エスシー）は水温28℃でふ化後12時間以上経過したものを高度不飽和脂肪酸強化餌料（バイオクロミスパウダー、クロレラ

工業)で6時間栄養強化した。また, 35~40日齢から配合飼料(種苗生産用リッチB~E, 科学飼料研究所)を給餌した。飼育水には毎日6時と15時にスーパー生クロレラV12を約10万細胞/mLになるように添加し, 6時と20時に水質改良剤(フィッシュグリーン, グリーンカルチャ)を40 g/kLの割合で散布した。飼育水面の油膜の除去は, 油膜除去装置²¹⁾を用い, アルテミアを給餌開始後に行った。

クエ仔稚魚の飼育は角型FRP水槽(容積2 kL)1面を用いて行い, 30日齢まで無換水で, それ以降は55日齢まで流水条件下で実施した。通気はセラミック製エアーストン(AS-10, 田中三次郎商店)4個を用いて行った。飼育水温は500 Wヒーター2本を用いて調節し, ふ化までは23°C, ふ化後は1日につき0.5~1°Cの割合で上昇させ, 5日齢以降は26.5°Cを維持した。飼育海水の比重は1.023~1.024で推移した。日長は蛍光灯とタイマーを用いて12時間の明期に調節し, 明期における水面直下の照度は1000 Lxであった。餌料には, 前述のマハタと同様にSS型(3~8日齢), S型ワムシ(8~53日齢), アルテミア(26~53日齢)および配合飼料(41~55日齢)を用いた。飼育水には毎日6時と13時にスーパー生クロレラV12を約10万細胞/mLになるように添加し, 同時刻に水質改良剤20 gを散布した。また, 水面の油膜除去はアルテミア給餌開始後に行った。

仔稚魚の測定 マハタの第1回調査では, 正常発生卵のふ化率が50%に達した2006年6月5日(0日齢)5時から仔魚の体密度の測定を開始し, 44日齢まで行った。0日齢は5時から23時まで6時間おきに, 1日齢から4日齢までは毎日14時と22時に, 同様に5日齢から10日齢までは2日ごと, 10日齢から20日齢までは3日ごと, 19日齢から44日齢までは5日ごとに測定を行った。第2回調査でも正常発生卵のふ化率が50%に達した2007年6月8日(0日齢)の14時から体密度の測定を開始し, 0~44日齢までは数日おきに, また46~58日齢の間は毎日および61日齢の14時に測定した。クエでは, 正常発生卵のふ化率が50%に達した2007年6月24日(0日齢)の14時から測定を開始し, 3~5日ごとに55日齢まで毎日14時に測定した。仔稚魚の採取は毎回30~70尾程度とし, 開口までは飼育水槽から直接採取した。開口後には, 消化管内容物が体密度に及ぼす影響を除くために, 無給餌条件(他の飼育条件は飼育水槽と同様)の100 L水槽に体密度測定の6時間前に移槽し, そこから採取した。

採取した仔稚魚は*m*-アミノ安息香酸エチルメタンスルホネート(200 mg/L)で麻酔し, Kitajima *et al.*²⁴⁾の方法に準拠して体密度の測定を行った。蒸留水にNaClを溶解して作製した食塩水シリーズ(2~4%は

0.2% おき, 4~6%は0.1% おき, 6~7%は0.2% おき, 7~11%では0.4% おき)に麻酔した仔稚魚を収容し, その浮沈によって中性浮力を示す塩分値を読み取り, その比重をもって仔稚魚の体密度(g/cm^3)とした。測定は毎回10~30尾を用い, 1尾ずつ行った。調査は24°Cに空調した室内で行い, 食塩水の比重は赤沼式海水用比重計および標準比重計(横田計器製作所)を用いて測定した。さらに, 体密度を測定した個体以外の仔稚魚10~30尾について全長を測定し, 鰾のガス保有の有無を顕微鏡下で観察した。体の黒色素が発達した25日齢以降には, 海水に浸した仔稚魚の鰾を解剖針で裂くことによって鰾内のガスの有無を確認した。なお, マハタの第1回調査では, 飼育終了時(51日齢)には全長のみを測定した。また, 背鰭第2棘と腹鰭棘が伸長した仔稚魚を5%ホルマリン溶液で固定し, 後日全長, 背鰭第2棘長および左腹鰭棘長を測定した(マハタ, $n=641$; クエ, $n=216$)。

マハタの第1回調査では, 採取した仔稚魚10尾を麻酔後に万能投影機で20~100倍に拡大し, 全長, 卵黄の長短径および油球の直径を測定した。卵黄, 油球については, 回転楕円形および球形とみなして, 体積を $V=4/3\pi ab^2$ (a =長径/2, b =短径/2, 球形の場合は $a=b$)によって算出した。さらに, 仔稚魚に働く浮力を求めるため, 体密度を測定した日の昼間に仔稚魚の湿重量と乾燥重量を測定した。湿重量が10 mg以上になるように仔稚魚10~50尾を計数して乾燥重量既知のカバーガラスに載せ, 体表の水分を注意深く濾紙で取り除き, 湿重量を測定後, 乾燥機(110°C)で22時間乾燥させ, 乾燥重量を測定した。測定は0.01 mgの単位で毎回3回くり返して行った。1個体の湿重量が10 mgを超えた29日齢以降は, 1個体ずつ計10個体について測定した。湿重量と乾燥重量から水分(%)を $\{(\text{湿重量}-\text{乾燥重量})/(\text{湿重量})\} \times 100$ として算出し, Kitajima *et al.*²⁴⁾と北島ら²⁶⁾の方法に準じて, 仔稚魚に働く浮力について検討した。なお, 魚体全体に働く浮力は, 魚体の水分, その他成分(乾物)および鰾内のガスによって規定されるが, 本研究では鰾内にガスを保有するマハタ仔稚魚は認められなかったことから, 前2成分について日齢別に検討した。Archimedesの定理により, 比重1.024の海水中で仔稚魚湿重量100 g(W)あたりに働く浮力(F)は, 仔稚魚の体密度を ρ とすると次式で求められる。

$$F=W\{(1.024/\rho)-1\}$$

水分による浮力は, 上式の W に仔稚魚湿重量100 gあたりの水分重量(g)を代入し, $\rho=1.0$ として求め, 乾物による浮力は全魚体の浮力から水分の浮力を除くことで求めた。

統計処理 2群の平均値の比較は, 統計解析ソフトウ

エア R2.8.0²⁸⁾を用いて Welch の t 検定により行い、有意水準を 5% に設定した。

結 果

仔稚魚の成長 第 1 回調査では、マハタ仔魚の平均全長(TL)はふ化直後には 1.84 mm であった (Fig. 1a)。仔魚は、ふ化後 18 時間で卵黄と油球をそれぞれ当初の 24% と 51% の量まで急速に吸収し (Fig. 1b), 2.41 mm TL まで直線的に成長したが、成長率は内部栄養の減少とともに低下した。3 日齢 (2.71 mm TL) の仔魚は眼に黒色色素が発現 (以下、発眼) して開口し、摂餌を開始したが、その後の成長率は低く、10 日齢で 3.01 mm TL であった (Fig. 2a)。13 日齢 (3.73 mm TL) になると、マハタ仔魚の特徴である背鰭第 2 棘と腹鰭棘の伸長が認められる個体が出現した。棘伸長個体の割合が 100% に達したのは 19 日齢 (5.87 mm TL) であり、それ以降の成長は著しく、51 日齢で 45.6 mm TL に達した。第 2 回調査では、仔魚 (ふ化時 2.24 mm TL) の成長・発育状況は第 1 回調査と同様の傾向を示し、13 日齢 (3.48 mm TL) に鰭棘の伸長個体が出現し、58~61 日齢で 31.0~36.4 mm TL まで成長した (Fig. 2b)。クエ仔魚 (ふ化時 2.49 mm TL) の成長様式はマ

ハタと類似し、10 日齢 (3.86 mm TL) に鰭棘の伸長個体が出現し、55 日齢で 28.0 mm TL まで成長した (Fig. 2c)。

次に、第 1 回調査におけるマハタ仔稚魚の湿重量、乾燥重量および水分の変化を Fig. 3 に示した。魚体重の推移をみると、湿重量、乾燥重量ともに 1 日齢 (2.58 mm TL) にかけてやや減少し、それ以降は大きく変化しなかったが、乾燥重量は摂餌を開始した翌日の 4 日齢 (2.77 mm TL) から、湿重量は鰭棘の伸長が確認された 13 日齢 (3.73 mm TL) から増加傾向を示した (Fig. 3a)。仔魚の水分 (%) は、0 日齢から 6 日齢 (2.86 mm TL) までは 91~94%、その後は徐々に減少し、10 日齢前後 (約 3 mm TL) に 89~91%、20 日齢前後 (約 6 mm TL) に 86%、29 日齢 (11.7 mm TL) 以降 77~81% 程度となった (Fig. 3b)。

Fig. 1 Changes in total length (a), and yolk sac volume (YV) and oil globule volume (OGV) (b) of seven-band grouper larvae until three days after hatching in the first experiment. Symbols and vertical bars show mean values and standard deviations, respectively.

Fig. 2 Changes in total length of seven-band grouper (a, first experiment; b, second experiment) and kelp grouper (c) larvae and juveniles reared in the laboratory. Symbols and vertical bars show mean values and standard deviations, respectively, for larvae and juveniles without fin spines (●) and those with fin spines (○).

Fig. 3 Changes in wet and dry body weights (a) and water content (b) of seven-band grouper larvae and juveniles in the first experiment. Y-axis for body weight was represented by a logarithmic scale. Symbols and vertical bars show mean values and standard deviations, respectively.

仔稚魚の背鰭第2棘と腹鰭棘の発達 マハタ仔稚魚の背鰭第2棘長は10~12 mm TLまで急激に伸長し、以後大きくは変化しなかった (Fig. 4a)。また、背鰭第2棘長のTLに対する相対比は、9~10 mm TL程度まで急激に増大してピークに達した後、指数関数的に減少した (Fig. 4b)。腹鰭棘長も10~12 mm TLまで急激に伸長し、以後緩やかに増加する傾向を示した (Fig. 4a)。また、腹鰭棘長のTLに対する相対比は背鰭第2棘長と同様の变化を示した (Fig. 4b)。クエ仔稚魚の背鰭第2棘長と腹鰭棘長は8.5~12 mm TLまで急激に伸長したが、それ以降は前者では大きく変化せず、30 mm TLを超えるとやや縮小する傾向を示し、後者では緩やかに増加した (Fig. 4c)。また、第2棘長と腹鰭棘長のTLに対する相対比の変化は、基本的にはマハタと同様の傾向を示した (Fig. 4d)。

仔稚魚の体密度の変化 第1回調査におけるマハタのふ化直後 (1.84 mm TL) の平均体密度は1.0224 g/cm³で、開口前日の2日齢 (2.67 mm TL) までは1.0221~1.0246 g/cm³で推移し、飼育海水の比重 (1.023~1.024) と同等の値を示した (Fig. 5a)。3日齢の14時 (2.70 mm TL) には、体密度は1.029 g/cm³まで増加したが、22時 (2.72 mm TL) には1.024 g/cm³まで有意に減少した ($P<0.001$)。3日齢以降の連続した昼間 (14時) と夜間 (22時) の調査における仔魚の体密度を比較すると、8日齢 (3.06 mm TL) までは昼間大きく (1.025~1.026 g/cm³ > 飼育水比重)、夜

Fig. 4 Changes in second dorsal spine length (○) and pelvic-fin spine length (●) of seven-band grouper (a) and kelp grouper (c), and the percent ratios of these spines to total length of seven-band grouper (b) and kelp grouper (d).

Fig. 5 Changes in body density of seven-band grouper (a, first experiment; b, second experiment) and kelp grouper (c) larvae and juveniles reared in the laboratory. Body density was measured in the daytime (14:00) and nighttime (22:00) in the first experiment of seven-band grouper and in the daytime (14:00) in other experiments. Symbols and vertical bars show mean values and standard deviations, respectively, for larvae and juveniles without inflated swim bladder (without fin spines, ○ (daytime), ● (nighttime)); with fin spines, □ (daytime), ■ (nighttime)) and larvae and juveniles with inflated swim bladder (with fin spines, △ (daytime)).

間小さい ($1.024 \text{ g/cm}^3 \approx$ 飼育水比重) という日周性が確認されたが ($P < 0.05$), その差は小さかった。また, 10 日齢 (3.10 mm TL) でも同様の傾向が認められたが, それ以降は昼夜の測定値にほとんど差はなかった ($P > 0.05$)。体密度は鰭棘の伸長個体が出現した 13 日齢 (3.73 mm TL) 以降に大きく増加し, 29 日齢 (11.7 mm TL) に 1.066 g/cm^3 に達した後, 1.065 g/cm^3 程度で推移した。第 2 回調査におけるマハタ仔稚魚の体密度の変化をみると (Fig. 5b), 第 1 回調査とはほぼ同様に推移し, 鰭棘の伸長個体が出現した 13 日齢 (3.48 mm TL) 以降に増大し, 34 日齢 (11.0 mm TL) には

Fig. 6 Changes in proportion of initial swim bladder inflation (SBI) of kelp grouper larvae and juveniles. SBI (%) = number of larvae and juveniles with an inflated swim bladder/number of larvae and juveniles examined $\times 100$.

1.060 g/cm^3 を超え, 39 日齢 (11.4 mm TL) 以降には 1.065 g/cm^3 前後で推移した。第 1 回, 第 2 回調査とも, 鰾にガスを保有する開腔個体は認められなかった。

クエのふ化直後 (2.49 mm TL) の平均体密度は 1.0241 g/cm^3 で, マハタよりは大きいものの飼育海水の比重と同等の値を示した (Fig. 5c)。摂餌を開始した 3 日齢 (2.95 mm TL) の平均体密度は 1.0258 g/cm^3 まで増加し, それ以降は基本的にはマハタ仔稚魚の体密度変化と同様の傾向を示した。鰾内にガスを保有しない未開腔個体では, 鰭棘の伸長個体が出現した 10 日齢 (3.86 mm TL) 以降に著しく増大し, 30~40 日齢 (8.81~12.8 mm TL) に 1.060 g/cm^3 に達した。その後, 45~50 日齢 (14.9~18.6 mm TL) には $1.066 \sim 1.068 \text{ g/cm}^3$ でピークを示したが, 55 日齢 (28.0 mm TL) には 1.050 g/cm^3 まで低下した。25 日齢 (8.16 mm TL) 以降に出現した開腔個体の体密度は, 明らかに未開腔個体に対して小さく $1.024 \sim 1.035 \text{ g/cm}^3$ で推移し, 測定個体数が多かった 50 日齢と 55 日齢では開腔個体に対して有意差が認められた ($P < 0.001$)。開腔個体の出現率は 25~45 日齢までは 10% 前後で, 50 日齢には 62%, 55 日齢には 86% に達した (Fig. 6)。

魚体浮力の変化 第 1 回調査におけるマハタ仔稚魚の魚体浮力の変化を Fig. 7 に示した。飼育海水中で正の浮力として働く水分の力は, ふ化当初 (1.84 mm TL) には魚体湿重量 100 g あたり約 2.2 g であった。その後, 水分の減少とともに漸減し, 44 日齢 (19.4 mm TL) には約 1.9 g になった。一方, 魚体全体の浮力はふ化当初の中性 (100 g あたり 0.1 g) から漸減し, 10 日齢 (3.10 mm TL) には 0.24 g の下向きの力が働くようになった。その後, 負の浮力は増大して 29 日齢 (11.7 mm TL) には 4 g に達し, 以後 3.4~4 g で推移した。

Fig. 7 Changes in upward or downward buoyancy produced by water (disorder dotted line), dry matter (dotted line) and the whole body (solid line) of seven-band grouper larvae and juveniles.

水分と魚体全体の浮力から求めた乾物による負の浮力は、ふ化から10日齢までが平均2.3 g、それ以降著しく増大して29日齢に5.9 gを示し、それ以降5.3~5.9 gで推移した。

考 察

マハタ仔魚の体密度はふ化時(1.84~2.24 mm TL)の1.022 g/cm³から徐々に増加し、卵黄と油球をほぼ吸収し終わって摂餌を開始した3日齢の昼間(2.70 mm TL)には1.029 g/cm³に達した。その後11日齢(3.58 mm TL)頃まで体密度の増加傾向は認められなかったが、昼間増大(1.025~1.026 g/cm³)、夜間減少(1.024 g/cm³)の日周変化を示すようになった。体密度が昼間増大、夜間減少する現象は、有鰾魚であるマダイとクロダイ仔魚の開腔個体と未開腔個体および無鰾魚であるヒラメ仔魚において、環境照度の変化に応じて生起することが知られている。²⁴⁻²⁶⁾ 本研究では、ふ化から6日齢まで24時間連続照明を行ったにも関わらず、体密度変化に日周性が認められたことから、この体密度変化は概日リズムによるものと考えられる。

マハタ仔魚は、ふ化後11日齢(3.58 mm TL)頃までの夜間には飼育水比重とはほぼ同じ体密度(=中性浮力)を示したことから、この時期の仔魚は飼育水の流動が適正であれば遊泳を止める夜間には飼育水中に広く分散するものと推察される。一方、背鰭第2棘と腹鰭棘の伸長個体が出現した13日齢(3.48~3.73 mm TL)以降には、体密度は日周変化を示さなくなるとともに著しく増大し、29~34日齢(11.0~11.7 mm)には1.060~1.066 g/cm³に達し、それ以降1.065 g/cm³前後で推移した。魚体水分と体密度(昼間測定値)から算出したマハタ仔魚の魚体湿重量100 gあたりに働く水分による

正の浮力と魚体乾物による負の浮力は、ふ化から10日齢(約1.8~3 mm TL)まではそれぞれ平均2.2 gと2.3 gで正負はほぼ拮抗し、13日齢(3.48~3.73 mm TL)以降に前者はやや減少・後者は大きく増加し、29日齢(11.7 mm TL)にはそれぞれ1.9 gと5.9 gとなった。このように、13日齢以降の急激な体密度の増大は、成長にともなう魚体乾物の負の浮力が増大することに起因するもので、この間に進行する骨化¹⁷⁾と関連しているものと推察される。

北島ら²⁴⁻²⁶⁾によると、マダイ、クロダイおよびヒラメ仔魚の魚体湿重量100 gあたりに働く水分による正の浮力はいずれも約2 gであり、魚体乾物による負の浮力は約3 mm TLと12 mm TLではマダイがそれぞれ2.5 gと4 gを超え、クロダイが3 gと5 g、ヒラメが2 gと3.5 g程度である(いずれも北島らの図からの読み取り値)。マハタ仔魚は約3 mm TLまでは無鰾魚のヒラメに類似して中性に近い浮力を示し、約12 mm TLでは魚体乾物による負の浮力がこれら4魚種中では最も大きい値を示している。魚体乾物の浮力が魚種によって異なる原因は明らかでなく、今後ミネラルや脂質などの体構成成分について分析・比較する必要がある。

クエでは、ふ化から数日ごとに昼間に体密度を測定したところ、マハタ仔魚の体密度と同様に推移し、体密度は鰾棘が伸長する10日齢(3.86 mm TL)以降に著しく増大した。体密度は30~40日齢(8.82~12.8 mm TL)以降1.060~1.070 g/cm³で推移したが、55日齢(28.0 mm TL)にはやや低下して1.050 g/cm³となった。一方、マハタ仔魚では鰾にガスを保有する開腔個体は認められなかったが、クエでは25日齢(8.16 mm TL)から出現し、50日齢(18.6 mm TL)以降急増して、55日齢には86%に達した。開腔個体の体密度は、鰾内のガスによる正の浮力^{24,25)}によって未開腔個体よりも著しく小さくなり、1.024~1.035 g/cm³で推移した。55日齢の未開腔と判断した個体の体密度がやや低下していたのは、鰾にガスを保有し始めていることに起因する可能性がある。

いくつかの魚種では、飼育実験や鰾の組織学的観察によって鰾の開腔メカニズムが検討されており、²⁹⁻³⁷⁾ 鰾が消化管と気管でつながった仔魚時代に水面からの空気飲み込みによって鰾へ最初のガスが導入され、開腔することが示されている。マダイでは、この最初の開腔に失敗すると鰾にガスを欠いたまま成長するが、40日齢頃(20 mm TL)になると開腔がみられるようになり、これは循環系によるガス交換能の発達によると考えられている。³⁰⁾ また、種苗生産においては、飼育の経過にともない発生する水面の油膜によって仔魚の空気飲み込みが阻害されることから、鰾の開腔を促すには油膜を除去することが重要とされる。^{32,33,36)} 本研究では、仔魚の浮上

死を防ぐために、アルテミアの給餌を開始した 30 日齢まで水面の油膜除去を実施せず、クエでは 50 日齢 (18.6 mm TL) 以降に開腔個体の出現率が高まった。本研究のマハタでは 31.0 mm TL (61 日齢) でも開腔個体は認められなかったが、Nagano *et al.*¹⁷⁾は、マハタの開腔個体は平均体長 30.1 mm (60 日齢、北島ら³⁸⁾の相対成長式から計算した TL は 36.9 mm) で初めて出現したことを報告しており、クエよりも成長が進んだ段階で開腔するようである。このようなことから、マハタとクエ仔稚魚はマダイ²⁹⁾と同様にガス交換能の発達によって鰾にガスを保有することができるものと推察される。

硬骨魚類の幼期における浮遊機構として、「体密度の減少」と「体の表面積が相対的に大きいこと、および体形の特長化による沈下に対する抵抗の増大」の 2 点が挙げられている。³⁹⁾ 前者の代表例は鰾であり、後者の例としてはハタ類仔魚の鰭の棘状突起も記載されている。³⁹⁾ 本研究では、マハタおよびクエ仔稚魚の背鰭第 2 棘長と腹鰭棘長は 3.5~3.9 mm TL から 8.5~12 mm TL まで急激に伸長し、以後の変化は小さかった。また、鰭棘長の TL に対する相対比は、既報^{38,40)}とほぼ同様に 9~10 mm TL まで急激に増大し、それ以降は減少した。マハタとクエ仔稚魚の鰭棘が伸長して最大に達する体サイズは、体密度が増大しピークに達して定常状態となる体サイズにはほぼ一致しており、これら仔稚魚の浮遊機構を考える上で大変興味深い現象である。開口して鰭棘が伸長し始めるまでのマハタとクエ仔魚は、未開腔のまま無鰾魚のヒラメと同様に中性に近い浮力を保持できていた。また、ハタ類仔魚が積極的に水面へ接触する行動は、浮上死を助長する可能性がある。¹⁴⁻¹⁶⁾ このようなことから、ハタ類仔魚はマダイのように開口から数日間で積極的に水面から空気を飲み込んで鰾にガスを保有して浮力を得るのではなく、体密度の増大による沈下に対して、鰭棘状突起の伸長による抗力の増大で浮遊性を確保している可能性が考えられる。

例えマハタとクエ仔魚が水面からの空気飲み込みによって鰾を開腔することができるとしても、前述したようにハタ類の種苗生産では浮上死を防止するために油膜除去は行われないことから、本研究で示したような仔稚魚の体密度変化が一般的なものであると考えられる。仔魚の鰭棘伸長開始期 (10~13 日齢以降の数日間、約 3.5~3.9 mm TL) には、棘による抗力はまだ小さいものと考えられ、体密度が急激に増大し始めるこの時期の夜間が、マハタとクエの種苗生産において最も沈降しやすい時期とみなすことができる。今後はこの時期を中心に沈降死の実態を明らかにするような取り組みが必要である。

謝 辞

飼育実験にご協力いただいた佃水産総合研究センター養殖研究所栽培技術開発センターの職員各位、同センター志布志栽培漁業センターの橋本 博技術開発員、および当時の東京海洋大学学生の片山俊之、鶴岡廣哉、林知宏の諸氏に深謝する。また、仔稚魚の体密度の測定方法に関して懇切丁寧なるご助言を賜った元九州大学水産実験所教授北島 力先生に心よりお礼申し上げる。

文 献

- 1) 瀬能 宏. ハタ科. 「日本産魚類検索」(中坊徹次編) 東海大学出版会, 東京, 1993; 601-613.
- 2) 土橋靖史, 栗山 功, 黒宮香美, 柏木正章, 吉岡 基. マハタの種苗生産過程における仔魚の活力とその生残に及ぼす水温, 照度およびフィードオイルの影響. 水産増殖 2003; **51**: 49-54.
- 3) 土橋靖史, 栗山 功, 黒宮香美, 柏木正章, 吉岡 基. マハタの種苗生産におけるウイルス性神経壊死症 (VNN) の防除対策の検討. 水産増殖 2002; **50**: 355-361.
- 4) 照屋和久. マハタの親魚養成における VNN 抑制技術と健苗生産技術開発. 栽培漁業センター技報 2004; **1**: 67-70.
- 5) 照屋和久, 與世田兼三, 岡 雅一, 西岡豊弘, 中野昌次, 菅谷琢磨, 浜崎活幸. 光周期がマハタ仔魚の生残, 成長および摂餌に及ぼす影響. 日水誌 2008; **74**: 645-652.
- 6) 阪倉良孝, 萩原篤志, 塩谷茂明. 水槽内の流場制御によるマハタ仔魚飼育. 日水誌 2006; **72**: 267-270.
- 7) Sakakura Y, Shiotani S, Chuda H, Hagiwara A. Improvement of the survival in the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* larvae by optimizing aeration and water inlet in the mass-scale rearing tank. *Fish. Sci.* 2006; **72**: 939-947.
- 8) Sakakura Y, Shiotani S, Shiozaki M, Hagiwara A. Larval rearing without aeration: a case study of the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* using a wave maker. *Fish. Sci.* 2007; **73**: 1199-1201.
- 9) Shiotani S, Hagiwara A, Sakakura Y, Chuda H. Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation—a case of two-dimensional flow. *Aquacult. Eng.* 2005; **32**: 465-481.
- 10) 照屋和久, 與世田兼三. クエ仔魚の成長と生残に適した初期飼育条件と大量種苗量産試験. 水産増殖 2006; **54**: 187-194.
- 11) 照屋和久, 與世田兼三, 岡 雅一, 西岡豊弘, 中野昌次, 森 広一郎, 菅谷琢磨, 藤井あや, 黒川優子, 川合真一郎, 浜崎活幸. 光周期がクエ仔魚の生残, 成長および摂餌に及ぼす影響. 日水誌 2008; **74**: 1009-1016.
- 12) Song BY, Oh RS, Seo PJ, Ji GB, Lim SB, Lee DY. Larval development and rearing of longtooth grouper *Epinephelus bruneus* in Jeju Island, Korea. *J. World. Aquacult. Soc.* 2005; **36**: 209-216.
- 13) 宮下 盛. 種苗生産における浮上および沈降死. 日水誌 2006; **72**: 947-948.
- 14) Kaji T, Yamaoka K, Isshiki T, Yamada T. Mucus cell development on the body surface in larvae of red spotted grouper, *Epinephelus akaara*. *Bull. Mar. Sci. Fish. Kochi Univ.* 1995; **15**: 117-120.
- 15) Yamaoka K, Nanbu T, Miyagawa M, Isshiki T, Kusaka

- A. Water surface tension-related deaths in prelarval red-spotted grouper. *Aquaculture* 2000; **189**: 165–176.
- 16) Ruttanapornvareesakul Y, Sakakura Y, Hagiwara A. Effect of tank proportions on survival of seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg) and devil stinger *Inimicus japonicus* (Cuvier) larvae. *Aquacult. Res.* 2007; **38**: 193–200.
- 17) Nagano N, Hozawa A, Fujiki W, Yamada T, Miyaki K, Sakakura Y, Hagiwara A. Skeletal development and deformities in cultured larval and juvenile seven-band grouper, *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg). *Aquacult. Res.* 2007; **28**: 121–130.
- 18) 山崎英樹, 塩澤 聡, 藤本 宏. 日本栽培漁業協会におけるブリ種苗生産の現状. 水産増殖 2002; **50**: 503–506.
- 19) 坂本 亘, 岡本杏子, 上土生起典, 家戸敬太郎, 村田修. クロマグロ仔魚の成長に伴う比重変化. 日水誌 2005; **71**: 80–82.
- 20) Takashi T, Kohno H, Sakamoto W, Miyashita S, Murata O, Sawada Y. Diel and ontogenetic body density change in Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis* (Temminck and Schlegel), larvae. *Aquacult. Res.* 2006; **37**: 1172–1179.
- 21) 塩澤 聡, 竹内宏行, 廣川 潤. カンパチ種苗生産方法の改良. 栽培技研 2003; **31**: 11–18.
- 22) 照屋和久, 浜崎活幸, 橋本 博, 片山俊之, 平田喜郎, 鶴岡廣哉, 林 知宏, 虫明敬一. カンパチ仔魚の成長にともなう体密度と水槽内鉛直分布の変化. 日水誌 2009; **75**: 54–63.
- 23) 萱場隆昭, 杉本 卓, 松田泰平. マツカワ種苗生産における仔魚の大量沈下減耗. 水産増殖 2003; **51**: 443–450.
- 24) Kitajima C, Yamane Y, Matsui S, Kihara Y, Furuichi M. Ontogenetic change in buoyancy in the early stage of red sea bream. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1993; **89**: 209–216.
- 25) 北島 力, 山根康幸, 松井誠一. クロダイ仔稚魚の発育に伴う比重の変化. 日水誌 1994; **60**: 755–762.
- 26) 北島 力, 山根康幸, 松井誠一. ヒラメ仔稚魚の発育に伴う比重の変化. 日水誌 1994; **60**: 617–623.
- 27) Kato Y, Takebe T, Masuma S, Kitagawa T, Kimura S. Turbulence effect on survival and feeding of Pacific Bluefin tuna *Thunnus orientalis* larvae, on the basis of a rearing experiments. *Fish. Sci.* 2008; **74**: 48–53.
- 28) R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008.
- 29) 山下金義. マダイの鰾の分化. 魚類学雑誌 1982; **29**: 193–202.
- 30) 北島 力, 塚島康生, 藤田矢郎, 渡辺 武, 米 康夫. マダイ仔魚の空気呑み込みと鰾の開腔および脊椎前彎症との関連. 日水誌 1981; **47**: 1289–1294.
- 31) Kitajima C, Watanabe T, Tsukashima Y, Fujita S. Lordotic deformation and abnormal development of swim bladder in some hatchery-bred marine physoclistous fish in Japan. *J. World Aquacult. Soc.* 1994; **25**: 64–77.
- 32) Friedmann B, Shutty KM. Effect of timing of oil film removal and first feeding on swim bladder inflation success among intensively cultured striped bass larvae. *North Am. J. Aquacult.* 1999; **61**: 43–46.
- 33) Chatain B, Ounais-Guschemann N. Improved rate of initial swim bladder inflation in intensively reared *Sparus auratus*. *Aquaculture* 1990; **84**: 345–353.
- 34) Battaglene SC, Talbot RB. Effects of salinity and aeration on survival of and initial swim bladder inflation in larval Australian bass. *Prog. Fish-Cult.* 1993; **55**: 35–39.
- 35) Trotter AJ, Pankhurst PM, Battaglene SC. Morphological development of the swim bladder in hatchery-reared striped trumpeter *Latris lineate*. *J. Appl. Ichthyol.* 2004; **20**: 395–401.
- 36) Trotter AJ, Pankhurst PM, Battaglene SC. A finite interval of initial swim bladder inflation in *Latris lineate* revealed by sequential removal of water-surface films. *J. Fish Biol.* 2005; **67**: 730–741.
- 37) Rieger PW, Summerfelt RC. Microvideography of gas bladder inflation in larval walleye. *J. Fish Biol.* 1998; **53**: 93–99.
- 38) 北島 力, 高屋雅生, 塚島康生, 荒川敏久. マハタの卵内発生および飼育による仔稚魚の形態変化. 魚類学雑誌 1991; **38**: 47–55.
- 39) 内田恵太郎. 魚類の浮游幼期に見られる浮泛機構に就いて(I). 科学 1937; **7**: 540–546.
- 40) Sawada Y, Kato K, Okada T, Kurata M, Mukai Y, Miyashita S, Murata O, Kumai H. Growth and morphological development of larval and juvenile *Epinephelus bruneus*. *Ichthyol. Res.* 1999; **46**: 245–257.