短

報

クロマグロ仔魚の成長に伴う比重変化

坂本 亘*, 岡本杏子, 上土生起典,
家戸敬太郎, 村田 修^a

(2004 年 4 月 9 日受付, 2004 年 9 月 14 日受理)
近畿大学水産研究所白浜実験場

Specific gravity change of bluefin tuna larvae

WATARU SAKAMOTO*, KYOKO OKAMOTO,
TATSUNORI UEHABU, KEITARO KATO
AND OSAMU MURATA^a

Fisheries Laboratory, Kinki University, Shirahama,
Wakayama 649-2211, Japan

キーワード: クロマグロ, 比重, 仔魚, 沈降速度

近畿大学水産研究所では 2002 年クロマグロの完全養殖に成功したが、親魚になるまでの生存率はまだ低い。養殖産業魚種として本種を定着させるためには、孵化後の死亡率を減少させる具体的な方法を見出さなければならない。死亡の主な原因としては、孵化直後から 9 日目までの前期仔魚に見られる初期減耗、稚魚期に見られる共食い、幼魚期に見られる生簀内衝突死などがあげられる。中でも、孵化から 10 日目までの浮上死と沈降死は特に大きく、早急に解決すべき課題とされている。孵化後の仔魚は、飼育水槽内で鉛直移動を繰り返す。浮上死とは、仔魚が上下移動を繰り返す間に水表面に浮上した後、再度水中に戻ることができずに死亡することであり、海水の表面張力が個体の遊泳力より大きいことが原因とされている。一方沈降死はこれとは逆に、飼育水槽底部まで沈降した後、浮上できずに死亡する現象である。個体の重力沈降と遊泳力の均衡に関係するが、どちらも成長に伴い変化する。沈降速度を支配する孵化後のクロマグロ比重についてはまだ報告がない。クロマグロ卵は発生初期から中期には、産出された海水より比重が小さいことが報告されている(田中ら, 1995)。¹⁾ さらに田中らによると 18 時間から 24 時間後の孵化直前には、卵は急激に比重を増加させ、産出された海水の比重に近くなる。孵化後の比重は発育にともなって増加すると考えられている。個体の鉛直的な移動を、孵化から仔魚期までに限って追うと、最初海表面に浮上し発生が進むにつれ産出された海水の比重と等しくなり、さらに孵化後は大きな比重となって下層に沈降することが考えられる。

初期減耗率を低下させるにはこのような過程を考慮して、個体の成長に合わせて飼育水槽の規模や水温・塩分の調整を行うことが必要と思われる。しかし孵化後の比重変化については測定されていないので、具体的な方法を見出せずにいる。我々は孵化直後(0 日齢)から 9 日齢までの仔魚について比重を測定し、成長に伴う比重変化の影響を考慮した飼育方法を検討する基礎資料を得ることを試みた。実験を 9 日齢迄に限定したのは、この間が最も致死率が高く遊泳力も小さいことによる。これ以後は沈降速度は個体の鰾で調節可能となるため、正確な比重測定はできなくなる。

仔魚の比重は麻酔した個体の沈降速度を測定することから計算した。沈降速度の測定はすでに Smayda (1970)²⁾により植物プランクトンで試みられている。しかし沈降速度から海洋生物の比重を測定することはまだ試みられていない。仔魚は抵抗係数が成長に伴い変化するためストークス則は適用できない。そのため比重測定には別な方法を工夫する必要がある。海水中をレイノルズ数(Re) 1.0 以下の状態で物体が沈降する際の抵抗力は、沈降速度 V 、個体の抵抗係数 C_d および海水の粘性率 η に比例する。この抵抗力が物体に働く重力と浮力の和とつりあったとき、速度との関係は、

$$C_d \eta V = S(\rho_f - \rho_e)g \quad (1)$$

となる。ここで、 S は仔魚の体積、 ρ_f はその比重、 ρ_e は海水の比重、 g は重力加速度を示す。重層状にした上下 2 層(1, 2)の海水の粘性率、比重をそれぞれ η_1 , η_2 , ρ_{e1} , ρ_{e2} とする。上層(1)から下層(2)に個体が連続して沈降する際の、各層における加速度成分が 0 となる、いわゆる終速度 V_1 , V_2 の比は

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\eta_2(\rho_f - \rho_{e1})}{\eta_1(\rho_f - \rho_{e2})} \quad (2)$$

となる。速度比をとることにより、個体の体積、抵抗係数、重力については消去でき、仔魚の比重は、異なった海水中を沈降する速度比、異なる海水の粘性率・比重の関数となる。

重層した 2 層を形成させるために、メスシリンダー内に最初に比重の大きい海水(2)を 500 mL 入れ、その上に比重の小さい海水(1)を 500 mL 混合しないように注入して形成させた。このとき境界を明確に保つために、海水(2)の上に厚さ 1 mm の発泡スチロール板を載せ、上からピペットにより上層用の海水(1)を静かに滴下させた。実験個体は、形成させた上下 2 層の海水上

* Tel : 81-739-42-2625. Fax : 81-739-42-2634. Email : sakamoto@coral.cypress.ne.jp

^a 現所属 : 近畿大学水産研究所 (Fisheries Laboratory, Kinki University, Shirahama, Wakayama 649-2211, Japan)

Table 1 Experimental condition for the specific gravity measurement on bluefin tuna larvae

	Time (days after hatching)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temp (1)	27.0	27.9	27.4	25.4	24.4	25.6	27.2	28.1	28.8	28.5
Temp (2)	27.0	27.8	27.4	27.4	28.0	27.8	27.4	28.0	29.1	30.0
Salinity (1)	17.0	16.9	17.0	16.0	16.8	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9
Salinity (2)	33.9	33.8	33.9	33.8	33.6	33.8	33.8	33.7	33.7	33.7
Length (mm)	2.77	2.44	2.92	2.68	2.99	3.43	4.18	4.71	5.35	5.92
Height (mm)	0.48	0.43	0.54	0.58	0.59	0.63	0.76	0.88	1.10	1.30

部からピペットにより1尾ずつ入れた。すべての個体は0.1% フェノキシエタノールで麻酔して自由落下させ、加速度成分0となった終速度状態で沈降速度を実測した。頭部を下にして沈降した個体は、1~3分後には再び遊泳を開始した。粘性率を理科年表³⁾から求め、また海水の比重を水温、塩分から計算した値⁴⁾を代入すると、個体の比重 ρ_f が計算できる。Table 1に、用いた上層(1)と下層(2)の水温・塩分および仔魚の平均体長と体高を示した。

実験試料には、2003年7月26日に鹿児島県大島郡瀬戸内町の近畿大学奄美実験場で養成中の天然クロマグロ親魚より、自然産卵によって得られた卵から孵化した個体を用いた。産卵後、採卵ネットで集めた卵をナイロン袋に封入し、断熱用発泡スチロール箱に入れ採卵翌日空輸により近畿大学白浜種苗センターまで運んだ。輸送した卵は200 L パンライト水槽に移し、水温24.8℃~29.0℃、塩分34.0、海水の比重1.0226~1.0210の環境下で飼育した。孵化後2日齢からナノクロロプシスを100万 cells・mL⁻¹となるよう添加した。開口確認後栄養強化済みワムシを10個体・mL⁻¹に保つよう給餌した。この200 L パンライト水柱57 cmから毎日正午に、上層(水表面から15 cm)、中層(水表面から21.0 cm~36.0 cm)、下層(42 cmから底面まで)の3層より、各5尾を採集した。これはそれぞれの水深にいる個体は、一定の水深を保てるほど遊泳力をもっている個体であり、表層や底部にいる個体はすでに均衡が保てない個体であることを検討しようとしたものである。もし表層や底部にとどまり続けているものが、特に比重が平均値より偏っていれば、各層採集個体の分布状態は比重の大小から差が見出せる可能性がある。1回の測定は計15尾ないし16尾おこなった。

上層、中層、下層から採集した仔魚について0日齢から9日齢間で沈降速度を測定したが、すべての個体は頭部を下にして垂直に沈降した。上層および下層内での沈降速度から求めた個体の平均比重に標準偏差を加えて示すと、Fig. 1に示すようになる。0日齢と2日齢では変動が激しく、比重は1.022から1.033までばらつ

Fig. 1 Temporal changes in the specific gravity of bluefin tuna larvae (Bars: $\pm$ SD)

た。6日齢以後は明確な比重の増加傾向が現れたが、とくに7日、8日、9日齢の実験では個体によるばらつきは少なくなり、すべての個体で比重は増加していった。また0日齢から9日齢まで、採集層上、中、下別に見た個体の比重には有意な差は見出せなかった(Kruskal-Wallis, $P > 0.05$)。つまり、特定の層にいる個体の比重が、特に他のものと異なっていたりはなかった。

魚卵で連続的密度変化水柱を用いた比重測定が、Coombs (1981)⁵⁾により試みられ、マサバ卵では水温15℃で比重は産卵直後1.025、孵化直後の40時間後で1.028の値を得ている。クロマグロ仔魚比重も平均値では同じ値を示したことになる。一方、同じ方法を用いた田中(1993)⁶⁾の結果では、孵化前のマイワシ卵は16℃水温で比重1.020~1.025の間に分布し、孵化後は1.025から1.030にばらつくことが報告されている。しかし特殊な水槽を用いなければ実験ができないため、成長段階ごとに測定を行うのは困難であった。

魚類の中には卵の期間は比重が海水より小さいため表層を浮遊し、孵化後急激に比重が増加して沈降するものがある。分離浮性卵であるクロマグロ卵は、産出された環境海水より比重が小さく産出初期には浮上する。発生初期の比重は海水より 6×10^{-3} 小さく、静水中の浮上

速度 $1.7 \text{ mms}^{-1} \sim 3.5 \text{ mms}^{-1}$ と報告されている¹⁾。親魚の産卵行動については、地中海や日本で報告されており、地中海では表層で雌1尾に対して数尾の雄が追尾しながら行われた報告がある⁷⁾。また日本でも同じ追尾行動が生簀の水面近くで観察されている⁸⁾。このことから見て卵が産出される水深は、表層付近と考えられる。もしそうなら、卵は表層付近を浮遊しながら、発生が進むのであろう。平均水温 (T) と孵化開始までの所要時間 (Y) との関係は、宮下 (2002)⁸⁾によると、 $Y = 0.121T^2 - 8.06T + 155$ ($r = 0.983$) であらわされる。産卵場水域の表層水温が 25°C であれば孵化までに 29 時間を要する。少なくとも産出後約 1 日間は表層で過ごしその後、比重は増加し沈降してゆくことになる。

孵化後の個体の油球と卵黄の縮小は顕著であることが指摘されている⁸⁾。したがって孵化直後の個体には油球吸収が終了した個体と、そうでない個体とが混在する。このことが孵化後 0 日齢と 1 日齢の個体比重のばらつき、標準偏差値が大きくなった原因であろう。日数経過にともなって、比重は次第に増加していった。また 3 日齢と 4 日齢では開口し餌を捕食している個体とそうでない個体とに分かれることが、個体ごとのばらつきとなったと考えられる。変動幅は 5 日齢以後次第に減少し、個体差は少なくなってゆく。鰾の形成が 8 日齢以後の比重のばらつきに影響した可能性がある。

ボンゴネット採集による、遠洋水産研究所のクロマグロ仔魚採集調査報告⁹⁾では、仔魚採集水深は水深 70 m 以浅であった。採集水域の水温、塩分、比重の調査結果と我々が用いた実験用海水を比較すると次のようになった。もっとも仔魚の平均的採集層と思われる 50 m 水深の水温、塩分は、 $23.0^\circ\text{C} \sim 23.5^\circ\text{C}$, $34.6 \sim 34.8$, 比重は $1.023 \sim 1.024$ であった。我々は下層の海水には、飼育水槽の海水と同じものを用いた。それらは $25.4^\circ\text{C} \sim 30.0^\circ\text{C}$, $33.5 \sim 34.0$, 比重は $1.0225 \sim 1.0239$ であった。飼育水槽内と自然環境とでは水温差が大きく、飼育水温は産卵水域より $2.4^\circ\text{C} \sim 4.3^\circ\text{C}$ 高いことになる。このことは初期の発育を促すのには有利だが、飼育水槽内での上下移動に要する運動エネルギーは水温とともに増加し、体力の消耗を自然水域より大きくする可能性がある。

沈降浮上回数から体力に与える影響を見ると、比較的個体差の少ない 8 日齢, 9 日齢の個体の平均沈降速度を、それぞれ、 6.35 mms^{-1} とすると、水深 57 cm の飼育水槽内を上から底迄沈降するのに要する時間は静水中で約 80 s となる。つまり表層にいた個体でも 80 s 後に

は底に着くことになり、それを防ぐためには 80 s に一回は表層に向かって遊泳行動をとらねば沈降したままに終わる。頻繁な上下移動は過剰な運動となって個体のエネルギー消費をもたらすことが考えられ、急速な体力消耗が初期減耗の大きな原因となりうる。木村ら (2004)¹⁰⁾はキハダマグロ仔魚について、遊泳水深維持のためには、適度な乱流状態が有効であると報告している。クロマグロ仔魚飼育水槽についても乱流条件を検討する必要がある。このほか海洋における産卵場周辺の環境条件と、仔魚飼育水槽内での環境条件を比較すると、飼育水槽内初期減耗率減少のためには水温を低めに管理して代謝速度を軽減させると同時に、塩分を 34 以上に保って個体と海水との比重差を少なくし、さらに飼育水槽の高さを増して表層と底層に接する機会を少なくすることなどがあげられる。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費「クロマグロ資源増殖に関する生物・生化学的研究」(課題番号 14104007) により支援を受けました。研究の機会を与えてくださった研究代表者熊井英水博士に深謝いたします。

文 献

- 1) 田中祐志, 宮下 盛, 滝井健二, 瀬岡 学, 熊井英水. 養成クロマグロ卵の比重と浮上速度. 平成 7 年度日本水産学会春季大会講演要旨集, 1995; 61.
- 2) Smayda TJ. The suspension and sinking of phytoplankton in the sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 1970; **8**: 353-414.
- 3) 「理科年表, 2003 年版」(国立天文台編) 丸善出版, 東京. 2002; 942.
- 4) 「海洋観測常用表」(日本海洋学会編) 日本海洋学会, 東京. 1985; 96.
- 5) Coombs SH. A density-gradient column for determining the specific gravity of fish eggs, with particular reference to eggs of the mackerel *Scomber scombrus*. *Mar. Biol.* 1981; **63**: 101-106.
- 6) 田中祐志. マイワシ卵の比重変化と鉛直移動. 沿岸海洋研究ノート, 1993; **31**: 17-26.
- 7) 藤田 清. マグロの種類と生態. 「マグロの生産と消費」(小野征一郎編) 成山堂書店, 東京. 1998; 1-48.
- 8) 宮下 盛. クロマグロの種苗生産に関する研究. 近畿大学水産研究所報告, 2002; **8**: 1-171.
- 9) 遠洋水産研究所クロマグロ仔稚魚採集調査. 俊鷹丸第 1 次調査航海報告書, 1999, p. 89.
- 10) 木村伸吾, 中田英昭, Margulies D, Suter JM, Hunt SL. 海洋乱流がキハダマグロ仔魚の生残に与える影響. 日水誌 2004; **70**: 175-178.