

## 海洋乱流がキハダマグロ仔魚の生残に与える影響

木村 伸吾,<sup>1\*</sup> 中田 英昭,<sup>2</sup> DANIEL MARGULIES,<sup>3</sup>  
JENNY M. SUTER,<sup>3</sup> SHARON L. HUNT<sup>3</sup>

(2003年6月12日受付, 2003年11月4日受理)

<sup>1</sup>東京大学海洋研究所, <sup>2</sup>長崎大学水産学部, <sup>3</sup>全米熱帯マグロ委員会

Effect of oceanic turbulence on the survival of yellowfin tuna larvae

SHINGO KIMURA,<sup>1\*</sup> HIDEAKI NAKATA,<sup>2</sup> DANIEL MARGULIES,<sup>3</sup>  
JENNY M. SUTER<sup>3</sup> AND SHARON L. HUNT<sup>3</sup><sup>1</sup>Ocean Research Institute, University of Tokyo, Nakano, Tokyo 164-8639, <sup>2</sup>Faculty of Fisheries, Nagasaki University, Nagasaki, Nagasaki 852-8521, Japan, <sup>3</sup>Inter-American Tropical Tuna Commission, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92037, U.S.A.

Tank experiments were conducted to study the effect of oceanic turbulence on the survival of first feeding larvae of yellowfin tuna. Several levels of turbulence intensity were provided by changing the amount of air bubbles released from air-stones in the tanks containing yellowfin tuna larvae. The results showed that there is an optimal turbulence intensity which enhances larval survival. This turbulence intensity was equivalent to approximately  $1 - 2 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$  as an energy dissipation rate, suggesting that the surface mixed layer of equatorial oceans used for spawning by the yellowfin tuna is a suitable environment for the survivals of larvae.

キーワード：乱流, 摂餌, 初期生残, キハダマグロ

魚類の発育初期の減耗機構を明らかにすることは、資源変動予測あるいは資源育成に関する重要な研究課題であり、摂餌開始時期における摂餌の成否が、減耗要因解明の大きな鍵と考えられる。最近の実験系を中心としたいくつかの研究から、同じ餌密度であっても海洋の乱流条件の違いによって仔魚の摂餌効率が異なること、効率的な摂餌にはある一定の乱流が必要であることが示唆され、マダラなどを対象としてその検証が進められている。<sup>1-4)</sup> この種の研究は、もともと、風や潮汐による表層水の乱流混合と、動植物プランクトンのバイオマス変動との応答過程を明らかにするための研究として進められ、魚類仔魚の摂餌に与える影響も含めた乱流混合が生物生産や成長に果たす役割に関する研究の総説が、すでにいくつかまとめられている。<sup>5-7)</sup> その中では、例えば、魚類の再生産と湧昇強度の関係について、湧昇強度が中程度で再生産が最大値を持つ放物線状の概念的なモデルが提唱されており (“optimum environmental window”<sup>8)</sup>), 稚仔の成長・生残と乱流強度の関係にも同じモデルを当てはめることができるものと考えられて

いる。<sup>9)</sup> 乱流の影響の定量的な見積もりは、このような魚類の再生産の成否、さらには水産重要魚種の増養殖技術の改善に向けた極めて重要な研究課題の一つといえる。

そこで、本研究では水産重要魚類であるマグロ類の一種であるキハダマグロ *Thunnus albacares* 仔魚を新たな対象として取り上げ、その摂餌に対する乱流の影響に関

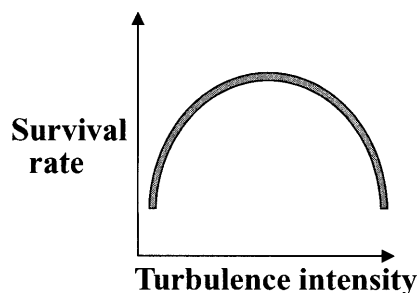


Fig. 1 A hypothetical relationship between turbulence intensity of environmental water and survival of fish larvae.

\* Tel : 81-3-5351-6504. Fax : 81-3-5351-6506. Email : kimuras@ori.u-tokyo.ac.jp

する実験を行い, キハダマグロの増養殖技術の改善<sup>10)</sup>につながる新たな知見を提供しようとした。今回の実験では, Fig. 1 に模式的に示した仔魚の生残と乱流強度の関係をキハダマグロについて検証し, 最良の生残をもたらす乱流条件の推定と, 得られた結果と実際の海洋条件との対応を明らかにすることに重点を置いた。

## 方 法

実験は, 海外漁業協力財団の援助事業で完成したパナマの Achotines 実験所における飼育設備を利用し (Fig. 2), 同財団と全米熱帯マグロ委員会の協力のもとで 1999 年 7 月 23 日から 8 月 6 日の間に行った。この施設では, キハダマグロを含めた様々な魚類の飼育実験を行っており, 今回の実験は, そうした飼育実験の一環として共同で実施したものである。飼育水槽で飼育されているキハダマグロ親魚から自然産卵された受精卵を採取し, ふ化した仔魚を飼育タンクに移した後, タンク底部 4 カ所に設置したエアーストーンから生じる気泡の量を調整することによって乱流条件を設定した。そして, 乱流の強弱による仔魚の摂餌状態と生残率を調べることによって, それらに対する乱流の影響の有無およびその程度について検証した。

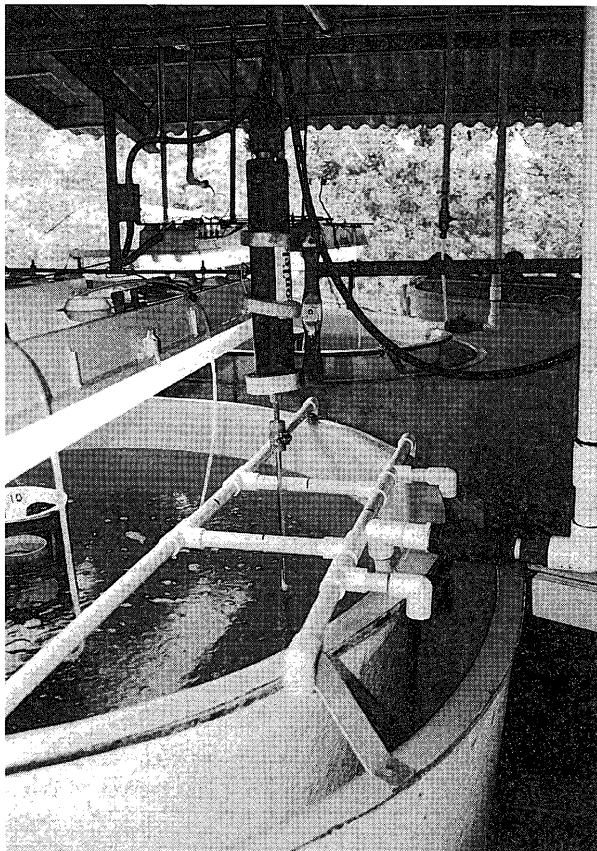


Fig. 2 Experimental tanks in Achotines Laboratory.

主実験では, 乱流強度を 5 段階に設定した直径 120 cm, 深さ 80 cm のタンク (水深 64 cm, 700 L) 各 2 個に, ふ化後 3 日経過し摂餌開始直後の平均体長 3.2 mm のキハダマグロ仔魚を 15 個体/L の密度で収容した。仔魚の餌としてのワムシ *Brachionus plicatilis* を 1000/L の密度で, また, 植物プランクトンの細胞数も概ね一定になるように調整しつつ, 毎時 60~90 L の割合でタンク中央部から換水した。一般に, 乱流強度は, 平均流速からの偏差の二乗平均値の平方根として定義されるが, 実験条件を容易に調整させたかったことと, エアーストーンから供給させる空気量を定量的に計測する装置を取り付けることができなかったため, 乱流強度の段階は, 表面に浮かせた発泡スチロール製フロートの移動速度で目視とビデオカメラを用いて 5 段階に調整した (10 cm/s (High), 7.5 cm/s (Semi-High), 5.0 cm/s (Med), 3.75 cm/s (Semi-Low), 2.5 cm/s (Low))。それらの対応関係は, 音響式ドップラー流速計 (Acoustic Doppler Velocimeter, SonTek 社製, 精度は計測値の 1%) で得られた流速データから, 乱流エネルギー散逸率を計算することによって定量的に比較した。そして, 1 日 2 回, 20 個体の仔魚を採取して摂餌状態 (別に報告の予定) を調べるとともに, タンク内の生残仔魚数を計数した。

また, エアーストーンの気泡が当たることによる魚体への直接的な影響を考慮し, 換水によってのみ乱流を起こさせる副実験を行った。この実験では, 換水率を毎分 1.5 L, 5 L, 17 L の 3 段階に調節したものを用意し, 主実験と同様の手法で実験を行った。毎分 1.5 L に調節したタンクは, 主実験でエアーストーンによる乱流が無い場合に相当する。

乱流エネルギー散逸率 ( $\epsilon$ ) は, 音響式ドップラー流速計を用いてタンク内の 4 点 (一辺 20 cm の格子状) 各 2 層 (水面から 20 cm と 40 cm) で流速 ( $u$ ) を 1 秒ごとに 1 分間計測し, 次式<sup>11)</sup>に従って計算した。

$$\epsilon = \frac{15}{2} \nu \left( \frac{\partial u'}{\partial z} \right)^2$$

$\nu$  は分子粘性係数 ( $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ),  $z$  は鉛直方向の 2 層間の距離,  $u'$  は平均流速からの偏差を表す。なお, 一般に, 乱流が持つエネルギーを定量的に評価する場合には, 乱流エネルギー散逸率を用いることが多いので, 本論文もそれにならい検討することとした。

## 結果と考察

Fig. 3 の下段は, 1999 年に行った主実験の実験開始 6 日後の生残率を示したものである。実験は各乱流強度で 2 回ずつ行ったが, 失敗したものもあるため, ここでは 2 回のうち生残が高い方の結果を示した。同じ条件下で 3 段階の乱流強度で 1998 年に行った結果<sup>12)</sup>

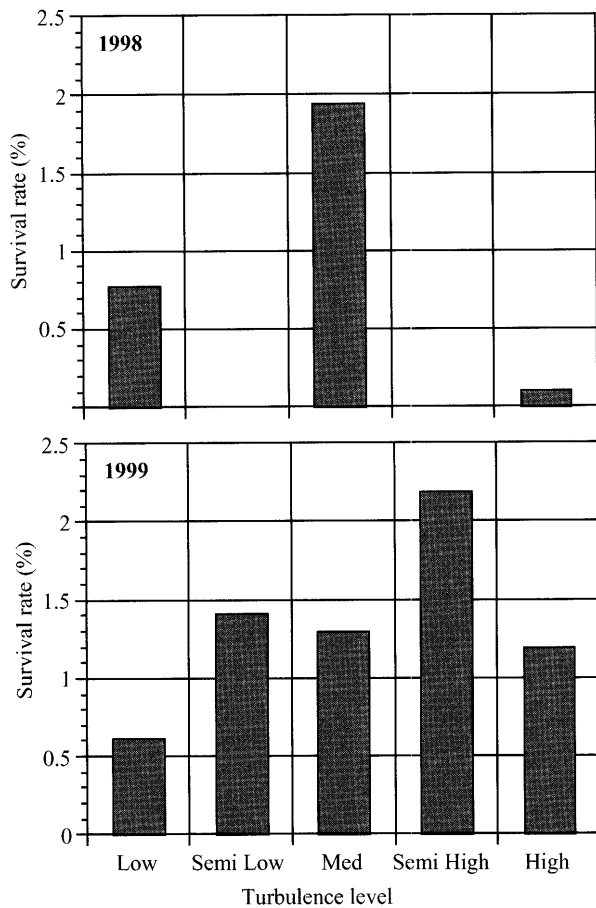


Fig. 3 Effect of turbulence (caused by air-stones) on the survival rate of yellowfin tuna larvae in the 1998 and 1999 experiments.

(Fig. 3 上段, 実験開始後 5 日後) を合わせて検討すると, 摂餌開始後 5-6 日後の生残率は, フロートの移動速度が中庸であった場合 (Med と Semi-High) に最も良かった。このことは, ある一定の乱流が仔魚の成長・生残に必要であることを示しており, Fig. 1 で期待されたような放物線状の関係が得られたことになる。これは乱流が強まることにより餌との遭遇確率が高くなることに起因するものと考えられ,<sup>1)</sup> 乱流という物理的な飼育条件が効率的なキハダマグロ仔魚の育成に必要であることを示唆するものである。

Fig. 4 は, 乱流エネルギー散逸率とフロートの移動速度の関係を示したものである。乱流エネルギーはフロートの移動速度の二乗に比例する回帰曲線で近似することができ, フロートの移動速度で乱流の強度を調整することが妥当であったことを示している。生残率が高かった乱流強度は, Med と Semi-High であったことから, これに対応する乱流エネルギー散逸率は  $1 \sim 2 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$  と見積られる。Sanford<sup>6)</sup>によれば, 砕波帯, 潮汐強混合域, 成層内部領域での乱流エネルギー散逸率は, そ

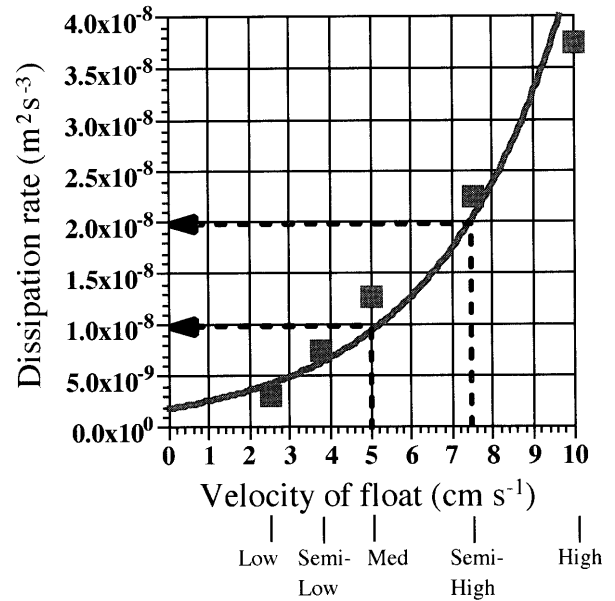


Fig. 4 Estimated dissipation rates for each level of turbulence intensity in the 1999 experiments.

れぞれ  $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ ,  $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ ,  $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  と見積もられていることから, 今回得られた結果は, 成層内部領域でやや混合が激しいところと位置付けられる。

乱流混合層モデルにおける乱流エネルギー方程式の乱流エネルギー散逸率の項は, 速度スケールの変動量 ( $q$ ,  $q$  は乱流エネルギーを  $E$  とした場合  $E = q^2/2$  として定義される) と乱流スケール ( $l$ ), 定数項 ( $B_1 = 16.6$ ) から成っている ( $\epsilon = q^3/B_1 l$ )。<sup>3,13)</sup> 乱流エネルギー散逸率を先に見積もった  $1 \sim 2 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$  とし, 乱流のスケールを  $1 \sim 10 \text{ m}$  とすると,  $q$  は  $0.01 \text{ m s}^{-1}$  ( $0.005 \sim 0.014 \text{ m s}^{-1}$ ) 前後で推移する。黒潮流域における乱流強度の数値シミュレーション結果によれば,<sup>14,15)</sup> 風速  $5 \text{ m s}^{-1}$  で与えた水深  $10 \text{ m}$  以浅の海洋表層の  $q$  は  $0.01 \text{ m s}^{-1}$  を中心とする範囲にあることから, 外洋域においては風による表層混合層域が今回の実験と同程度の乱流エネルギー散逸率を持つ領域となる。キハダマグロは, 赤道域一帯の外洋表層に地球を取り巻くリボンのように産卵海域を持つことから, 風による表層混合域が生残に適した海域になっているものと考えられる。

なお, 副実験として換水率を変化させることによって乱流強度を調節する実験を行っており, Fig. 5 はその結果を示したものである。前述した計算手法では, 毎分  $1.5 \text{ L}$ ,  $5 \text{ L}$ ,  $17 \text{ L}$  の換水率で生成される乱流エネルギー散逸率は, それぞれ  $2.8 \times 10^{-10} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$ ,  $6.2 \times 10^{-9} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$ ,  $3.6 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$  と見積もることができる。換水率  $1.5 \text{ L min}^{-1}$  は主実験でエアーストーンによる乱流発生が全く無い場合に相当し, この場合の生残率はほぼ

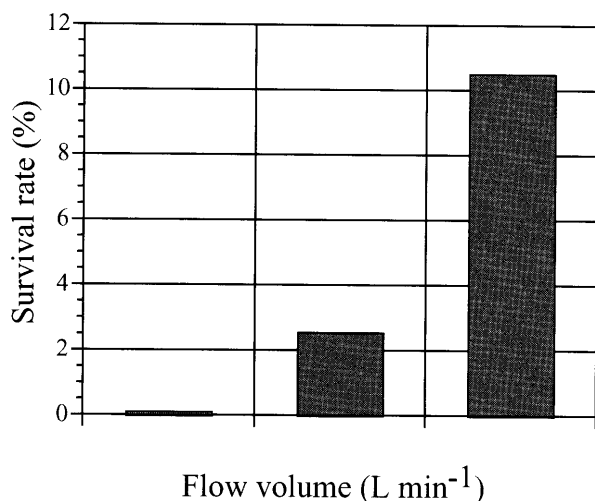


Fig. 5 Effect of turbulence (caused by changing the water exchange rate) on the survival rate of yellowfin tuna larvae in the sub-experiment.

口であった。つまり、このことは、乱流が仔魚の生残にとって重要な要件の一つであることを示している。換水率が高まると生残率が飛躍的に良くなるが、乱流エネルギー散逸率と比較した場合、主実験での生残率に比べてそれらの値は4倍ほど高い。これは、5 L min<sup>-1</sup>と17 L min<sup>-1</sup>では換水率が高すぎて仔魚の餌生物の密度を一定に保つことができなかつたため、主実験に比べて高い餌密度を与えたことによるものと考えられる。したがって、一概に主実験と副実験を比較することはできないが、副実験でも乱流が強い方の生残率が高い傾向にあることが分かった。

本研究では、乱流強度が変化することによって、一定のピークを持った生残率の違いがキハダマグロ仔魚に認められることが明らかにされた。エアレーションによる溶存酸素量の変動を含めた乱流の与え方に検討の余地があること、餌密度が変化することによって生残率の変化が大ききことなど、今後解決すべき諸課題が残されているものの、今後の種苗生産技術の向上に向けて、乱流が重要な役割を果たす可能性が示唆された点には多くに注目すべき点と考える。また、飼育実験で計測した乱流エネルギー散逸率と実際の海洋条件との比較の妥当性についても、今後検討の必要がある。今後は上述した検討課題を解決した上で、飼育に最適な乱流強度をより定量的に推定すべく研究を進めていく予定である。

#### 謝 辞

パナマの Achotines 実験所における飼育実験では、海外漁業協力財団の支援を受け、また同財団の中澤昭夫氏

ならびに丹羽幸泰氏に様々な便宜を図って頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) MacKenzie BR, Kjørboe T. Encounter rates and swimming behavior of pause-travel and cruise larval fish predators in calm and turbulent laboratory environments. *Limnol. Oceanogr.* 1995; **40**: 1278-1289.
- 2) Lough RG, Mountain DG. Effect of small-scale turbulence on feeding rates of larval cod and haddock in stratified water on Georges Bank. *Deep-Sea Res. II* 1996; **43**: 1745-1772.
- 3) Werner FE, Perry RI, Lough RG, Naimie CE. Trophodynamic and advective influences on Georges Bank larval cod and haddock. *Deep-Sea Res. II* 1996; **43**: 1793-1822.
- 4) Werner FE, MacKenzie BR, Perry RI, Lough RG, Naimie CE, Blanton BO, Quinlan JA. Larval trophodynamics, turbulence, and drift on Georges Bank: A sensitivity analysis. *Sci. Mar.* 1996; **65** (Suppl. 1): 99-115.
- 5) Dower JF, Miller TJ, Leggett WC. The role of microscale turbulence in the feeding ecology of larval fish. *Adv. Mar. Biol.* 1997; **31**: 169-220.
- 6) Sanford LP. Turbulent mixing in experimental ecosystem studies. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1997; **161**: 265-293.
- 7) Petersen JE, Sanford LP, Kemp WM. Coastal plankton responses to turbulent mixing in experimental ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1998; **171**: 23-41.
- 8) Cury P, Roy C. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1989; **46**: 670-680.
- 9) MacKenzie BR, Miller TJ, Cyr S, Leggett WC. Evidence for a dome-shaped relationship between turbulence and larval fish ingestion rates. *Limnol. Oceanogr.* 1994; **39**: 1790-1799.
- 10) Margulies D, Wexler JB, Bentler K, Suter JS, Masuma S, Tezuka N, Teruya K, Oka M, Kanematsu M, Nikaido H. Food selection of yellowfin tuna *Thunnus albacares* larvae reared in the laboratory. *Inter-Am. Trop. Tuna Comm. Bull.* 2001; **22**: 9-51.
- 11) Oakey NS. Determination of the rate of dissipation of turbulent energy from simultaneous temperature and velocity shear microstructure measurements. *J. Phys. Oceanogr.* 1982; **12**: 256-271.
- 12) Inter-American Tropical Tuna Commission. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission 1999, La Jolla. 2001; 32-37.
- 13) Mellor GL, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982; **20**: 851-875.
- 14) Kimura S, Kasai A, Nakata H, Sugimoto T, Simpson JH, Cheok JVS. Biological productivity of meso-scale eddies caused by frontal disturbances in the Kuroshio. *ICES J. Mar. Sci.* 1997; **54**: 179-192.
- 15) Kimura S, Sugimoto T. Biological productivity and behavior in an eddy in the lee of isolated island on the basis of research using ADCP and fluorometers. Proceedings on International symposium on advanced techniques of sampling gear and acoustical surveys for estimation of fish abundance and behavior, Hakodate. 2001; 180-190.