



クロマグロ(*Thunnus orientalis*) 幼魚の魚群行動に与える照度の影響

福田 漢生*・鳥澤 眞介**・石橋 泰典**・倉田 道雄***
澤田好史***・鈴木勝也****・高木 力**

*近畿大学大学院農学研究科水産学専攻

**近畿大学農学部水産学科

***近畿大学水産研究所

****北海道大学大学院水産科学研究科

Effect of illumination intensity on schooling behaviour in the juvenile bluefin tuna

H. Fukuda*, S. Torisawa**, Y. Ishibashi**, M. Kurata***,
Y. Sawada***, K. Suzuki****, T. Takagi**,

Program in Fisheries Science, Graduate school of Agriculture, Kinki University
3327-204 Naka-machi NARA 631-8505, Japan.

Synopsis

Effect of illumination intensity on schooling behaviour was examined in cultivated bluefin tuna juveniles with behavioural and histological approaches. The schooling behaviour under different illumination conditions were observed using video camera. They formed polarized school under 700 to 5 lx where their vision adapted photopic. As illumination intensity dropped below 0.5 lx, they formed school with disorder and their vision adapted scotopic. At illumination condition was 0.01 lx, they were so dispersed as to no longer form a school. Thus, darkness condition may cause disoriented behaviour of them. This result suggests that bluefin tuna formed school by synchronizing their swimming speed and direction for most part on their vision.

緒言

群れ行動は魚類が示す最も普遍的な行動の1つであり、被食リスクの軽減や索餌効率の向上、あるいは生殖効率の向上のために群れを形成すると考えられている¹⁾。

魚がどのようにして群れを形成するかは一見複雑そうに見えるが、群れを形成する各個体が受ける感覚刺激に対する反応行動とそれに伴う各個体間の連鎖によって創発すると考えられる。通常、群れを形成・維持する上で視覚は最も重要な感覚器の一つである。魚群行動に与える光などの物理環境の影響はすでにいくつかの種で研究が進んでお

り、ほとんどの種で照度が下がるにつれて群れを形成しなくなることが報告されている²⁻⁵⁾。また幼魚期における魚群行動はサバ科の多くの種でも研究されているが、近年人工種苗生産に成功したクロマグロに関しては幼魚期の行動に関する知見が殆ど無い。本研究対象種であるクロマグロ *Thunnus orientalis* は高速巡航遊泳能力をもち、太平洋の熱帯・温帯域を大回遊するサバ科の大型魚である。高い商業的価値を持つ魚であるが、近年その資源数が減少し続けているといわれている。市場への安定供給と天然資源の回復のため近畿大学水産研究所では種苗生産・養殖技術の研究を行っており、2002年には完全養殖を達成した。

しかし未だいくつかの問題を抱えており、その一つに種苗生産過程での大規模初期減耗がある。大規模減耗の主な要因は孵化直後から起こる浮上沈降斃死、孵化後2週間頃からの共食い、孵化後30日頃から起こる生簀水槽壁面への突進遊泳・衝突死の3段階に分けられる⁹⁾。突進遊泳は音や光などの環境変化や、水槽壁にものが当たるなどの物理刺激に反応して起こる。他魚種にもみられる行動ではあるが、衝突死することは殆どなくマグロ養殖特有の問題である。

Masuma *et al.* (2001) は生理学的観点から、幼魚の衝突は明け方の急激な照度変化時に網膜運動反応が追いつかずに視覚的不定位に陥って起こると報告している⁷⁾。観察からも幼魚の驚愕には照度変化が強く影響していると考えられているが、その量的評価は行われていない。そこで本研究では衝突多発期のクロマグロ幼魚を対象に、照度環境が当該幼魚にどのような影響を与えているのかを組織生理学的手法と詳細な観察を伴う行動の定量評価から解明することを目的とする。幼魚の行動に与える照度の影響を明らかにすることで、衝突死問題の解明への有益な情報提供を試みる。

方法

供試魚であるクロマグロ幼魚には、近畿大学水産研究所串本大島実験場で人工種苗生産されたものを用いた。卵は2004年7月26日に孵化し、実験は孵化後35-6日令（平均BL；7.0cm, 平均BW；4.8g）の個体を用いて同年8月30-31日に行った。

実験は条件を一定に保つため、同実験場屋内の暗室内に設置した直径約2mの円形水槽にて行った (Fig. 1)。白色光源（ハロゲンコールドランプ：MORITEX社製MHF150L）に白色紙フィルターを重ねることにより水面直上の上方照度を0.01lx未満、0.4lx, 5lx, 50lx, 700lxの5段階に設定した。各照度環境下での水槽内20個体の幼魚の遊泳行動を、水槽中央上方に設置したデジタルビデオカメラ（Sony社製：DCR-TRV50）によって撮影した。5lx以下の低照度環境下での撮影は、近赤外線LEDライト（ピーク波長945 nm）で赤外光を照射しながら行った。本研究では解析対象とする幼魚の行動を二次元に限定するため、水深は10-15cmとした。水温は $27.7 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に設

定した。また各照度環境下での実験個体の網膜順応状態を組織学的に確認するために、撮影終了後に水槽内の個体を無作為に選択しブアン氏液で固定した。

撮影された動画画像から、それぞれの個体の吻端を個体位置座標として0.1秒間隔で記録した。幼魚の行動を定量化するために、時系列位置座標データから魚群行動を評価する指標としてNND（最小個体間距離）とSSI（分離遊泳指数）を算定した (Fig. 2)⁸⁾。NNDとは最も近くにいる個

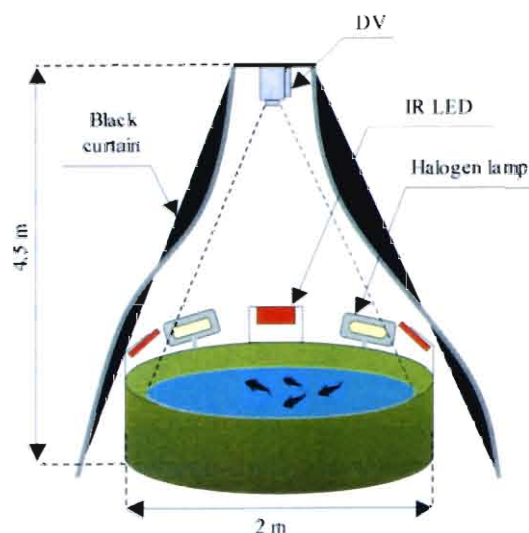


Fig. 1 Equipment

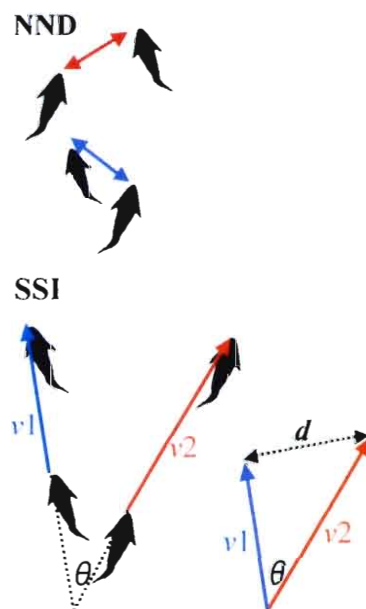


Fig. 2 Analysis of the NND and SSI.

$$SSI = 2d / (v1 + v2).$$

体同士の距離であり、個体同士の接近性の指標として用いた。魚群行動を評価する指標として一般的に用いられているものであり、他魚種との比較に用いるために実験個体の体長で標準化した。静止画上で水槽中央付近にいる5個体を解析対象魚とし、それぞれの個体にとっての最近接個体との吻端同士の距離をNNDとした。各照度環境下での実験について無作為に選択した10フレームの静止画から、50個体分のNNDを測定した。SSIとは近接魚同士の移動ベクトルの同期性であり、群れの並行遊泳性を示す指標として用いた。SSIはNNDを測定したフレームと同じフレームとその1秒前の1フレームから算定した。SSIを算定するために、NNDを測定した解析対象魚の1秒間の移動ベクトルを位置座標データから抽出する。移動ベクトルの開始位置を近接魚の移動ベクトルの開始位置と重ね、2つの移動ベクトルの終点の距離を進んだベクトルの平均で割った。SSIは0–2.0の間の値を取り、群れを形成する全ての個体と同じ方向に泳ぐ時には0に近い値を取り、ランダムな方向に泳ぐときには1.27に近い値をとる。また、個体が0.1秒間に進む距離から遊泳速度を算出した。これらのパラメータは異なる照度環境でBonferroni多重比較検定を用いて比較した。

各照度環境下での網膜順応状態を組織学的に確認するために、実験後に固定した個体の眼球を用いて網膜に対して鉛直方向の光学顕微鏡用の切片標本プレパラートを作製した。定法に従い脱水、パラフィン包埋、H-E染色を施し作成したプレパラートを光学顕微鏡下で撮影した。網膜順応状態はMasuma *et al.* (2001) の手法に従い、視細胞層の厚みに対する色素上皮層とミオイドの厚みの比率で求めた。明順応状態では、ミオイドは短くなり錐体細胞外節は外境界膜に近くなる。暗順応状態では色素上皮層が薄くなり、ミオイドが長くなることで錐体細胞外節は外境界膜から遠くなる。

結果

明環境下 (700lx)、暗環境下 (0.01lx未満) での行動の典型的な例として、水槽内10個体の3秒間の移動軌跡を示した (Fig. 3)。明環境下では個体間距離が短く、各個体の遊泳方向もほぼ一方向であった。しかし暗環境下では個体間距離は

長く、遊泳方向も群れとして特定の方向があるわけではなく個体によって様々であった。照度環境によって群れの並行遊泳性や接近性が変化することは明らかである。

Fig. 4a, bには各照度環境下でのSSIとNNDの値を示した。クロマグロ幼魚はより高い照度環境下で高い並行遊泳性と接近性を見せた ($P < 0.0001$, Bonferroni多重比較検定)。また0.01lx未満の照度環境下でのSSI値が並行遊泳性の完全に失われた時の値である1.27に近い値をとっていることから、クロマグロ幼魚は暗環境下

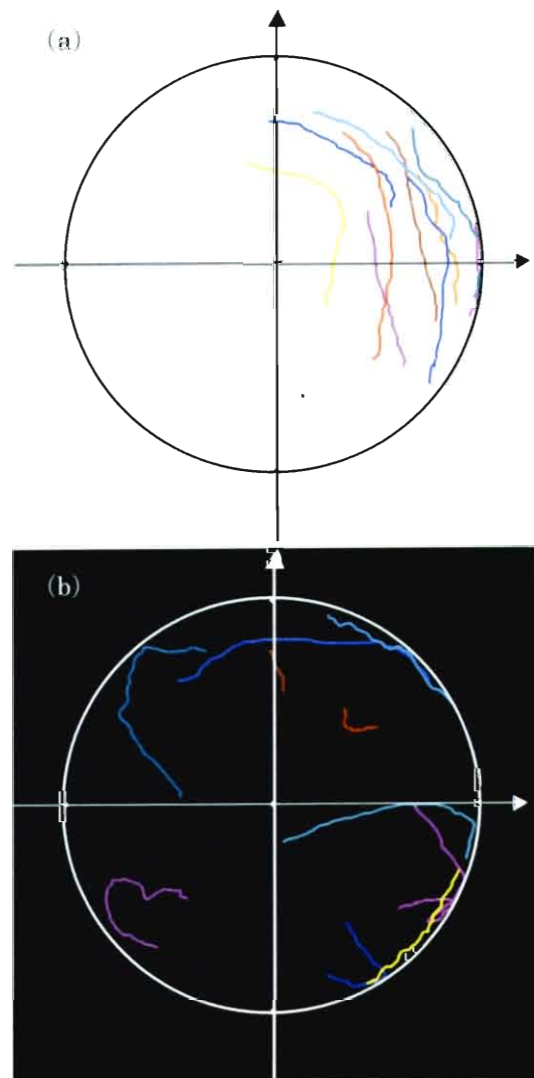


Fig. 3 One of the typical swimming behaviour under light (700lx : a) and darkness (<0.01lx : b) conditions. The tracks of each ten fishes in the experimental tank are described.

では群れを形成できないことが明らかになった。

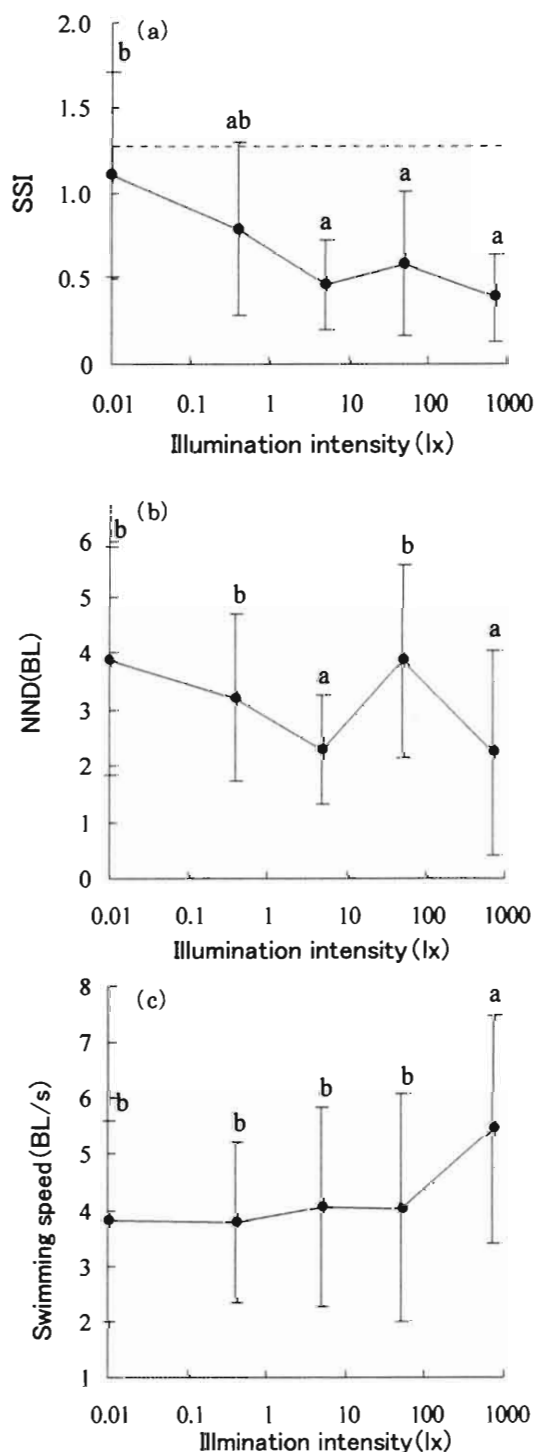


Fig. 4 (a) SSI, (b) NND, (c) Swimming speed under different illumination intensity; vertical bars indicate standard deviation

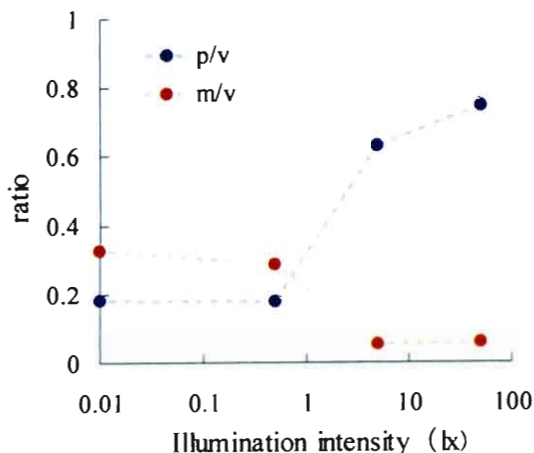


Fig. 5 The indices of retinal adaptation under different illumination intensity. The indices p/v and m/v indicate the expansion of the pigment epithelium and the contraction of cone

クロマグロ幼魚はより高い照度環境下でより速い遊泳速度を示した (Fig. 4c)。この結果は並行遊泳性の高い集団がより速い速度で遊泳するとした Viscido *et al.* (2004) の報告を支持するものである⁹⁾。

Fig. 5には各照度環境下での、網膜の順応状態を示した。5 lx以上の照度環境ではクロマグロ幼魚は明順応状態であるといえる。これは、クロマグロ幼魚の各照度環境での網膜順応状態を組織学的に求めた Masuma *et al.* (2001) の実験結果と一致した。魚群行動の指標と網膜順応状態の指標の傾向が一致したことから、クロマグロ幼魚は 5 lx以上の照度環境で明順応状態となり、整然とした群れを形成することが示された。

考察

クロマグロ幼魚は、全ての個体が個体間距離の小さいまとまった群れを形成するわけではなく、個体間距離を大きくとって近くを泳ぐ数個体だけで群れを形成した。これは同じサバ科であるサワラ幼魚の群行動に類似し、またマサバ幼魚が集群性の高い群れを形成するのとは大きく異なる点であった^{8,10)}。これには稚魚期以降の生活史における食性の違いが関係していると思われる。生活史の早期から魚食性に移行するサワラやクロマグロ

の養殖では、孵化後数週間の間に起こる共食いによって種苗数が大量に減少することが問題となっている。クロマグロやサワラは個体間距離の大きい群れを形成することによって、共食いのリスクを軽減させているのかもしれない。

上述したように、クロマグロ幼魚は5lx以上の照度環境において明順応状態となり整然とした群れを形成するが、0.01lx未満では群れを形成することができずにランダムな行動を見せた。マサバでは0.01lx未満の照度環境下でも遊離感丘や管側線神経系などの機械刺激受容器を用いて群れを形成することが報告されており¹¹⁾、セイス(タラ科)でも、一時的に完全に視覚を無効化処理した個体が群れを形成したといった報告もされている¹²⁻¹³⁾。魚類の視覚も人間の視覚と同じく明所視の状態では最適な視力を示すことから、魚類の視力も低照度環境下では低下し、視覚による他個体や構造物の認識が困難になることが考えられる。

これらの結果はクロマグロが視覚によって他個体を認識して群れを形成していることを示唆しており、当該幼魚の行動に与える照度の影響がマサバなどと比較して非常に大きいことを示している。

要約

クロマグロ幼魚の群行動に与える照度の影響について行動学的手法と組織生理学的手法を用いて検討した。異なる照度環境下での魚群行動をビデオカメラを用いて観察した。クロマグロ幼魚は5lx以上の照度環境において、明順応状態となり整然とした群れを形成するが、0.01lx以下の照度環境下では群れを形成しないことが明らかとなった。これらの結果はクロマグロが視覚によって他個体を認識して群れを形成していることを示唆しており、当該幼魚の行動に与える照度の影響がマサバなどと比較して非常に大きいことを示している。

謝辞

本稿を終えるにあたり、ご指導ご鞭撻を賜りました近畿大学農学部水産学科漁業生産システム研究室の山根 猛教授、光永 靖講師に深く感謝致します。

本研究は21世紀COEプログラム「クロマグロ等の魚類養殖産業支援型研究拠点」の研究の一部によったことを付記するとともに、本プログラム遂行にあたりご協力いただいた関係者各位に深謝致します。

文献

- 1) Pitcher TJ, Parrish JK (1993)
In : Pitcher TJ (ed) Behaviour of teleost fishes, 2nd edn. Chapman & Hall, New York, p363-439
- 2) Glass CW, Wardle CS, Mojsiewicz WR
J. Fish Biol. 29 Supplement A: 71-81 (1986)
- 3) Higgs DM, Fuiman LA
J. Fish Biol. 48: 979-991 (1996)
- 4) Ryer CH, Olla BL
Mar. Ecol. Prog. Ser 167: 215-226 (1998)
- 5) Miyazaki T, Shiozawa S, Kogane T, Masuda R, Maruyama K, Tsukamoto K
Mar. Ecol. Prog. Ser 192: 267-275 (2000)
- 6) 澤田好史
海洋理工学会平成16年度秋季大会講演論文集: 37-44 (2004)
- 7) Masuma S, Kawamura G, Tezuka N, Koiso M, Namba K
Fisheries Science 67: 228-231 (2001)
- 8) Nakayama S, Masuda R, Shoji J, Takeuchi T, Tanaka M
Fisheries Science 69: 670-676 (2003)
- 9) Viscido SV, Parrish JK, Grunbaum D
Mar. Ecol. Prog. Ser 273: 239-249 (2004)
- 10) Masuda R, Syoji J, Nakayama S, Tanaka M
Fisheries Science 69: 772-776 (2003)
- 11) 鈴木勝也, 高木 力, 鳥澤真介, 福田漢生, 村田修, 山本真司, 宮下和士
数理水産科学 3: 15-20 (2005)
- 12) Pitcher TJ, Partridge BL, Wardle CS
Science 194: 963-965 (1976)
- 13) Partridge BL, Pitcher TJ
J. Comp. Physiol. A 135: 315-325 (1980)