

クロマグロの成長にともなう視力の変化

鳥澤真介,¹高木 力,²山根 猛^{2*}

(環境保全・資源動態グループ)

¹近畿大学水産研究所 COE 博士研究員, ²近畿大学農学研究科

*yamanety@nara.kindai.ac.jp

水産重要種であるクロマグロ *Thunnus orientalis* の資源量減少が懸念されているなかで、近年近畿大学水産研究所は本種の完全養殖に成功した。しかし、本種の幼魚養成期において生後 30 日令前後から 80 日令程度に至るまでは、当該幼魚の突進遊泳による生簀水槽壁面への衝突死が多発しており、種苗生産上の大きな問題となっている。¹⁾ 突進遊泳は外的刺激により引き起こされる驚愕反応によると考えられているが、この行動の発現メカニズムは未解明な部分が多く、対策を講じるには行動発現機構の解明が必要である。

本種の行動には視覚が最も影響を与えていることが知られており、²⁾ 突進遊泳による衝突死においても視覚の影響は大きいものと考えられる。Masuma *et al.*³⁾ は当該幼魚の衝突死の原因を解明するため幼魚期の網膜運動反応を調べ、薄明時には照度の変化に明暗順応の速度が追いつかないことが幼魚に衝突を引き起こさせる一因だと述べている。マグロ類では成魚の視力を Nakamura⁴⁾ が行動実験により、Kawamura *et al.*⁵⁾ が組織学的に求めているが、幼魚期の視力は調べられていない。魚類の視力は成長に伴って向上することが知られており、^{6,7)} 衝突多発期のような特定の成長段階での視力は成魚と異なるため体長別に求める必要がある。また、視覚の発達程度が行動に影響を与えることがシマアジで群行動の特性を指標として Miyazaki *et al.*⁸⁾ により示されており、本種においても水槽壁面への衝突は成長段階での視覚の未発達により視認能力が不十分なために起こるのかもしれない。

本研究では、クロマグロの衝突多発期とその前

後の成長段階での視力を組織学的に求め、成長に伴う視力の変化を調べた。衝突多発期とそれ以降の成長段階での当該魚の視力の比較を行い、衝突多発期の視覚発達の程度が行動に及ぼす影響について検討した。

試料および方法

近畿大学水産研究所で 2004 年および 2005 年に養成された孵化後 30 日令(TL=4.7cm), 35 日令(TL=6.2cm), 41 日令(TL=6.5cm), 46 日令(TL=11.1cm), 80 日令(TL=31.8cm)および 1 才魚(TL=102.6cm) のクロマグロ 6 個体を実験供試魚とした。

供試魚から眼球を摘出してブアン氏液により 1 昼夜固定した後、70%アルコールで保存した。固定した眼球から取り出した網膜は大きさに応じて 30-46 日令では 9 部位、80 日令では 25 部位、1 才魚では 33 部位に分割して、パラフィン包埋した。この標本をマイクロトームにより接線方向の厚さ 6 μ m の薄切片とし、ヘマトキシリン・エオジン染色を施して網膜組織標本を作製した。錐体細胞の観察は光学顕微鏡下で行い、錐体細胞配列の画像を撮影した。撮影した画像から網膜の各部位の 0.01mm²あたりの錐体細胞密度を計数した。

これらから、体長別に錐体細胞の最高密度の部位を求めて視軸の方向を特定した。さらに、錐体細胞の最高密度部位の細胞密度と水晶体の半径から以下に示す Tamura⁹⁾ の計算式により網膜の最小分離角を求めた。

$$\sin \alpha = \frac{1}{F} \left\{ 2 \frac{0.1 \cdot (1 + 0.25)}{\sqrt{n}} \right\}$$

ここで、 α は最小分離角(rad), n は 0.01mm^2 あたりの錐体数, F はMattiesson's ratioにより算出した水晶体の焦点距離(水晶体半径の2.55倍), 係数0.25は固定包埋による収縮率の補正值を示している。さらに、視力(VA)は以下の式で最小分離角(分)の逆数をとることにより算出した。

$$VA = \frac{\pi}{\alpha \cdot 180 \cdot 60}$$

結果

錐体細胞配列の顕微鏡写真を図1に示した。

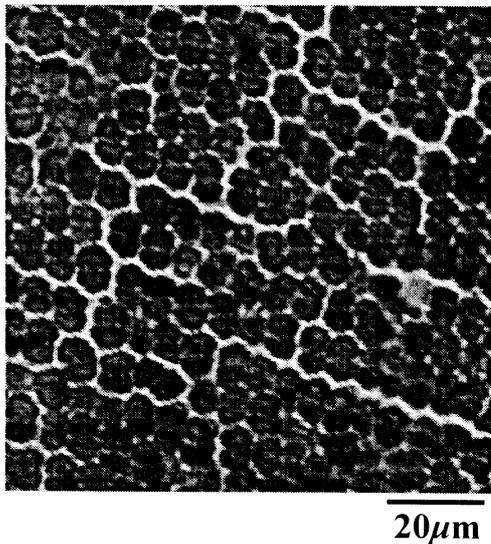


図1. クロマガロの錐体配列の顕微鏡写真

実験に用いたクロマガロでは、どの成長段階においても錐体細胞は主に双錐体から成る平行配列をしていた。単錐体の存在の頻度は低く、一様な配列や分布の傾向を示さなかった。

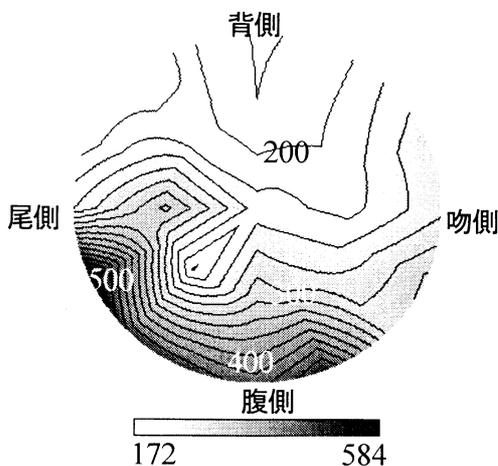


図2. クロマガロ80日令の錐体密度分布図

各部位の 0.01mm^2 あたりの双錐体と単錐体を合計した錐体細胞密度の分布を求めた。80日令の供試魚の網膜での錐体密度分布図を図2に示した。

各成長段階の網膜において錐体密度の最も高い部分は腹側付近からやや側頭部側に分布しており、この部位から水晶体を通して視認する視軸の方向は上方からやや前方にかけてであった。

次に、成長段階別に錐体密度の最大値を用いて算出した視力の結果を表1に示した。

表1. クロマガロの視力の算出結果

成長段階	全長 (mm)	水晶体半径 (mm)	最大錐体 密度	最小分離角 部位	最小分離角 (分)	視力
30日令	47	0.63	668	T	20.86	0.048
35日令	62	1.07	372	V	16.41	0.061
41日令	65	1.21	544	V	11.94	0.084
46日令	111	1.56	400	VT	10.84	0.092
80日令	318	3.34	584	VTT	4.17	0.240
1才魚	1026	7.57	240	VVT	2.88	0.347

供試魚の視力は30, 35, 41, 46, 80日令および1才魚でそれぞれ0.048, 0.061, 0.084, 0.092, 0.240および0.347となった。全長と視力の関係を図3に示した。

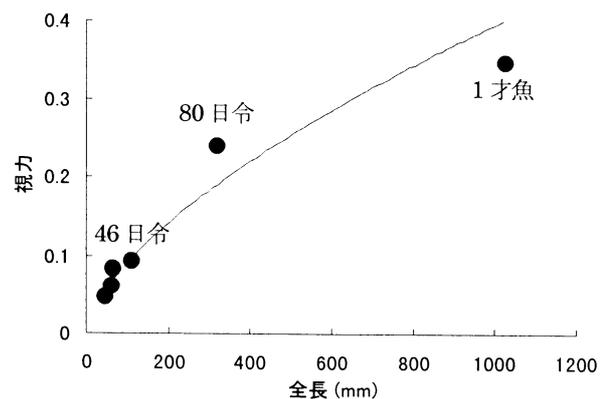


図3. クロマガロの全長と視力の関係

視力は成長に伴って向上しており、一般に用いられている相対成長式に準じて全長と視力の関係を累乗近似すると以下ようになる。

$$VA = 0.0048TL^{0.6397}, (r^2=0.90)$$

データ数が十分ではないが、近似した曲線は、既知の魚類の関係式と同様の傾向を示しており、クロマグロの視力変化の傾向を反映していると考えられる。

さらに、対象物をどの程度離れた距離から視認可能なかを表す指標の一つとして、網膜の最小分離角から1cmの間隔の2点を識別できる距離を算出した。それぞれの成長段階の識別距離は165, 210, 288, 317, 823 および 1195cm となる。

体長と1cmの間隔を識別可能な距離の関係を図4に示した。

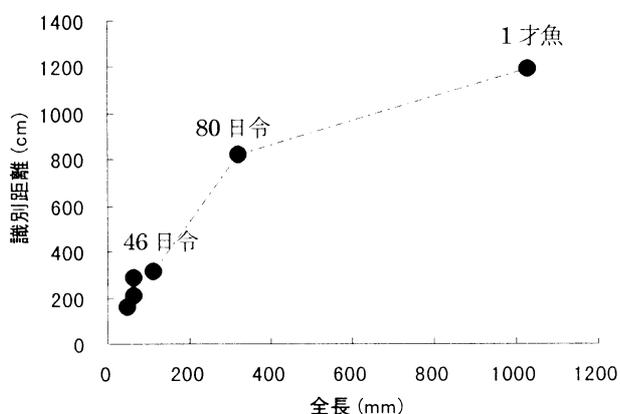


図4. クロマグロの全長と識別距離の関係

識別距離は単位長さの間隔を識別できる距離がその何倍となるかを表している。クロマグロの視力は成長とともに向上し、視認距離が長くなることが分かる。さらに、30日令から80日令までの全長に対する識別距離の増加率は高く、その後の増加率は低い傾向がみられる。

考察

クロマグロの視力と同様に、多くの魚類^{6,7)}でも視力は成長に伴って向上することが知られている。視力は網膜の最小分離角の逆数を表し、水晶体の焦点距離と錐体細胞の密度により決定されるため、水晶体半径の増加と錐体細胞密度の増減との相互作用により変化する。成長に伴って水晶体は大きくなるが、網膜も大きくなるため錐体細胞が新たに形成されなければ単位面積あたりの細胞密度は低くなる。水晶体の焦点距離と錐体細胞の間隔と

の関係が幾何学的な相似を保つと視力は一定の値をとることになるが、多くの魚類では成長に伴って錐体細胞が新たに形成されるために視力は向上する。

成長に伴う視力の変化は他魚種でも相対成長式として累乗近似式を用いて求められており、宮城ら⁷⁾はブリの体長と視力の関係が $V.A.=0.0051BL^{0.6223}$ となると報告している。本研究で算出したクロマグロでは全長と視力の関係は $V.A.=0.0048TL^{0.6397}$ となり、相対成長式のべき数が1以下の値をとる劣成長となっており、他の魚種と同様に成長が進むにつれて視力の増加率は低くなっている。

本研究の結果、当該魚の80日令から1才魚に至る成長段階では、錐体細胞密度は減少するが、これよりも水晶体半径の増加の割合が大きいため視力が向上するという一般的な魚類と同様の視力の増加傾向を示した。

これに対して、幼魚期の30日令から80日令に至るまでは、網膜が大きくなるにも関わらず、錐体細胞の最大密度はばらつきがあるものの顕著な減少傾向を示さず、成長に伴う水晶体半径の増加を直接反映して視力は著しく増加している。この結果は80日令に至るまでの成長段階では、若令であるほど視認能力が相対的に大きく劣ることを表している。幼魚期の成長に伴う視覚の発達過程では、視力の大きい変化が行動に影響を与えている可能性が高い。

Miyazaki *et al.*⁸⁾ は成長に伴う視力の発達が行動の変化を反映していると報告しており、クロマグロの視覚の発達過程で、当該幼魚の視力の高い変化率は行動に反映されることが予想される。本研究で算出した視力は対象物をどの程度細かく視認可能なを示す網膜の分解力であるが、これは視認能力の指標となる。相対的に視力が著しく低い若令魚では、対象物を視認可能な距離が非常に短くなると考えられる。

生簀水槽での養成時に幼魚が水槽壁面を視認するには若令であるほど極端に近距離まで近づかなければならないことになる。このことから壁面へ

の衝突に至る際に視力が大きな影響を与えていることが示唆される。今後、成長に伴う視力の変化と成長段階別の行動の変化とを統合して解析を行うことにより、これらの関係の解明が可能になると考えられる。

視認や視覚特性と誘発される行動の関わりを検討するためには、Masuma *et al.*³⁾ が示唆しているように、明るさにより変化する視認能力が行動に反映されるため明暗順応の程度の考慮も必要となる。さらに、マグロ類ではあまり重要な役割を果たさないと考えられている分光感度や側線感覚といった刺激の受容と対象物の知覚に関わる感覚特性も行動発現機構を検討する際には無視できない。これらを考慮した研究は今後行わなければならない課題だと考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり近畿大学農学部の石橋泰典助教授、塚正泰之助教授および近畿大学水産研究所の澤田好史助教授に供試魚を提供して頂いた。ここに敬礼申し上げます。

文献

- 1) Miyashita S., Sawada Y., Hattori N., Nakatsukasa H., Okada T., Murata O. and Kumai H. Mortality of Northern Bluefin Tuna *Thunnus thynnus* Due to Trauma caused by Collision During Growout Culture. *Journal of The World Aquaculture Society* 2000; **31**: 632-639.
- 2) 川村軍蔵, マグロ類の生理, 月刊海洋 1994; **26**: 529-533.
- 3) Masuma S., Kawamura G., Tezuka N., Koiso M. and Namba K. Retinomotor responses of juvenile bluefin tuna *Thunnus thynnus*. *Fisheries Science*, 2001; **67**: 228-231.
- 4) Nakamura E. L. Visual Acuity of Two Tunas, *Katsuwonus pelamis* and *Euthynnus affinis*. *COPEIA* 1968; **1**: 41-49.
- 5) Kawamura G., Nishimura W., Ueda S. and Nishi T. Vision in tunas and Marlins. *Mem. Kagoshima Univ. Res. Center, S. Pac.* 1981; **1**: 3-47.
- 6) Douglas RH, Djamgoz MBA (1990) The visual system of fish. Chapman and Hall, London.
- 7) 宮城美加代, 秋山清二, 有元貴文, ブリの視力の成長にともなう変化, 日本誌 2001; **67**: 455-459.
- 8) Miyazaki T., Shiozawa S., Kogane T., Masuda R., Maruyama K. and Tsukamoto K. Developmental changes of the light intensity threshold for school formation in the striped jack *Pseudocaranx dentex*. *Mar Ecol Prog Sci*, 2000; **192**: 267-275.
- 9) Tamura T. A study of visual perception in fish, especially on resolving power and accommodation. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1957; **22**: 536-557.