

スジアラ人工種苗の水温別酸素消費量と 低酸素耐性に関する予備的調査

橋本 博

Preliminary study of oxygen consumption and resistance for hypoxia in captivity of coral trout grouper *Plectropomus leopardus*

Hiroshi Hashimoto

Abstract: We investigated the oxygen consumption and resistance for hypoxia in captivity of coral trout grouper *Plectropomus leopardus*. The fish with an average bodyweight 3 g consumed 515, 667 and 654 mg/kg/h of oxygen at water temperature 25, 27 and 30°C, respectively. On the other hand, one with an average bodyweights 5 g consumed 468 and 804 mg/kg/h at 25 and 30°C. The former groups recorded a decrease in oxygen consumption rate from 5 mg/L. The latter groups recorded from 4 mg/L. In a water temperature ranges from 25 to 30°C, 3 g fish began to die at dissolved oxygen levels of 0.99 to 1.06 mg/L (oxygen saturation of 15.4 to 16.0%), while at 0.73 to 1.15 mg/L (oxygen saturation of 11.0 to 18.8%), 5 g fish groups began to die. This is a significant result and gives a scientific impact on hypoxia for coral trout grouper aquaculture.

Key words: *Plectropomus leopardus*, oxygen consumption, resistance for hypoxia, water temperature

緒 言

スジアラ *Plectropomus leopardus* は、南日本から西部太平洋、西部オーストラリアおよびインド洋に分布し、サンゴ礁域に生息するハタ科スジアラ属の魚類である^{1,2)}。当該魚種は世界的にも重要な沿岸漁業資源の一つであり、日本国内においては沖縄県で県三大高級魚のトップに位置づけられており、“アカジンミーバイ”と呼ばれて高級魚として扱われている³⁾。

スジアラは地先定着型の栽培漁業対象種として、日本栽培漁業協会において1986年から天然魚を用いた親魚養成技術開発が行われ⁴⁾、陸上水槽において水温が23°C以上になった4月から9月の間、新月の前後1週間で産卵させる技術が

開発されている⁵⁾。その後、得られた受精卵を使用して種苗生産技術開発が行われ、2009年に平均全長約3 cmのスジアラ人工種苗を34万尾生産することに成功している⁶⁾。スジアラ人工種苗を用いて放流試験を行ったところ、再捕率が極めて低いことが明らかとなり⁷⁾、栽培漁業対象種から養殖対象種として扱われるようになった。国立研究開発法人水産研究・教育機構(以下、水産機構)では2016年にスジアラの完全養殖技術に成功し、2017年より南西諸島におけるスジアラ養殖の企業化を目指し、事業化レベルで必要となる養殖技術開発に着手している⁸⁾。養殖技術開発の一環として成長段階別の適性密度飼育試験を実施しており、体重増加率が最も良好な飼育密度を明らかにしている。養殖技術のうち、適正な密度で飼育を行っている中でも特

2025年5月27日受付; 2025年7月22日受理; 2025年12月25日発行 (Received 27 May 2025; Accepted 22 July 2025; Published 25 December 2025)

水産大学校水産流通経営学科 (Department of Fisheries Distribution and Management, National Fisheries University)
hhashimoto@fish-u.ac.jp

©水産大学校研究成果委員会 〒759-6595 下関市永田本町 2-7-1 (Research Results Committee, National Fisheries University, 2-7-1 Nagata-honmachi, Shimonoseki 759-6595, Japan)

に注意する環境条件として、環境水中の溶存酸素量(以下、DO)がある。実際に、大型水槽を用いた養殖実証試験において、残餌等による飼育水の濁りが起き、一時的にDOが低下して問題となった事例がある⁹⁾。安定してスジアラ人工種苗を育成するためには、当該魚種の低酸素に対する耐性や水温別の酸素消費量についての基礎的な知見を蓄積する必要がある。

本研究では、生産したスジアラ人工種苗を用いて水温別の酸素消費量を調査するとともに、低酸素耐性について予備的な調査を行ったので報告する。

材料と方法

試験1 平均体重3 gにおけるスジアラの水温別酸素消費量と低酸素耐性の調査

供試魚

独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所亞熱帶研究センター八重山庁舎(現:水産機構水産技術研究所八重山庁舎)において、2013年5月10日にふ化した仔魚を用いて6月24日まで種苗生産した人工種苗を試験に使用した。種苗生産方法は、武部ら⁶⁾の方法に準じた。生産結果は、50 kL水槽2基を用いて平均全長37 mmの人工種苗を10.7万尾(生残率17.8%)取り上げた。取り上げ後、試験を実施するまでの間は50 kL水槽1基において中間育成を行った。

試験区の設定

水温別の酸素消費量試験には、25°C、27°Cおよび30°Cの3試験区を設けた。低酸素耐性試験は前述の3試験区のうち、25°Cおよび27°Cの2試験区で調査した。供試魚は、水温25°C、27°Cおよび30°Cで、それぞれ平均全長60.9 mmおよび平均体重3.1 g、同57.6 mmおよび同2.7 g、同60.6 mmおよび同3.0 gとした。試験を行った7月上旬は、石垣島近辺ではすでに水温が30°C程度であったことから¹⁰⁾、試験水温25°Cおよび27°Cについては供試魚を試験水槽に収容後、海水氷を用いて徐々に設定水温まで降温した後、数時間の馴致期間を設けて試験を開始した。供試魚を試験水槽に収容後は、エアーストーン1個を用いてプロワーによる通気を行った。

試験水槽には75 L黄色ポリエチレン水槽(実水量50 L、ポリタル、スイコー株式会社)を各水温区1基ずつ用いて試験を行った。水槽には、上述の供試魚を各試験区あたり100尾収容した。設定水温に到達し数時間の馴致後、試験

水槽に酸素用エアーストーン1個を用いて純酸素を通気し、環境水中のDOを過飽和状態となる10 mg/L近くまで上昇させた。DO測定のため蛍光式溶存酸素計(HQ30d、HACH社)を用いた。蛍光溶存酸素計のプローブを水槽壁面に設置した後、試験水槽内の水面と空気が接触しないように透明のビニールシートで水面全体を覆った。なお、測定中はプロワーによる通気、酸素通気および換水は行わなかった。水槽壁面とビニールシートの間にプローブによる隙間ができるないように自作の留め具(外径9 mmのビニールチューブに太さ2 mmのステンレスの棒を通し、直径47 cmのリング状にしたもの)と水槽壁面の間にビニールを挟んで固定した。なお上記の設置方法は、カタクチイワシ*Engraulis japonicus*の水温別低酸素耐性を調査した小田ら¹¹⁾の方法に準じている。

酸素消費量の測定方法

前述した蛍光式溶存酸素計により、タイマーを用いて3分ごとに試験水槽内の環境水のDOを計測した。小田ら¹¹⁾の方法と同様に、試験開始6分経過後から最初の死亡個体が確認されるまでの時間内の値を用いて、DOが減少していく中の1 mg/L単位ごとの酸素消費速度の平均値を計算した。また上述の酸素消費速度とは別に、水温別の酸素飽和度を計算し、酸素飽和度100%から酸素飽和度60%を下らない範囲¹²⁾で得られたDOデータを使用して、この間の酸素消費速度についても求めた。

酸素消費速度の計算

前述した3分間隔のDOの測定結果をもとに、各水温における供試魚1 kgあたり、1時間あたりの酸素消費速度を(1)式より計算した。計算方法についても小田ら¹¹⁾の方法に準じた。

(計算例: 試験開始6分後からn分までの酸素消費速度)

$$X = 60,000 (DO_6 - DO_n) V / (n - 6) / S_n / W \quad (1)$$

X: 酸素消費速度 (mg/kg/h)

DO₆: 試験開始より6分後のDO (mg/L)

DO_n: 試験開始よりn分後のDO (mg/L)

V: 水量 (L)

S_n: n分後の生残数 (=収容数)

W: 平均体重 (kg)

酸素飽和度の計算

酸素飽和度の計算方法についても小田ら¹¹⁾の方法に準じた。試験期間中の気圧は1気圧とし、使用した石垣島近辺の海水の塩分34 PSUの値¹⁰⁾を用いてTruesdale et al.¹³⁾の式[2]式により、水温t°Cにおける飽和溶存酸素量K (mg/L)を求め、(3)式により試験期間中の水温t°Cにおける酸素飽和度を計算した。

$$K = 14.161 - 0.3943t + 0.007714t^2 - 0.0000646t^3 - 34(0.0841 - 0.00256t + 0.0000374t^2) \quad (2)$$

$$\text{酸素飽和度 (\%)} = \text{DO (mg/L)} / K (\text{mg/L}) \quad (3)$$

低酸素耐性の調査方法

25°Cおよび27°C区において、土田ら¹⁴⁾の方法に従って鰓蓋活動の停止をもって死亡と判断し、1尾目の死亡が確認された際の酸素飽和度を求めた。なお、30°C区は死亡が発生する前に酸素消費量試験を終了したため、本調査は実施していない。

試験2 平均体重5 gにおけるスジアラの水温別酸素消費量と低酸素耐性の調査

供試魚

同八重山庁舎において、2013年4月11日にふ化した仔魚

を用いて5月29日まで種苗生産した人工種苗を試験に使用した。種苗生産方法は試験1と同様とした。50 kL水槽1基を用いて平均全長36 mmの人工種苗を3.9万尾(生残率12.9%)取り上げた。取り上げ後、試験を実施するまでの間は50 kL水槽1基において中間育成を行った。

試験区の設定

水温別の酸素消費量試験および低酸素耐性試験には、25°Cおよび30°Cの2試験区を設けた。供試魚は、水温25°Cおよび30°Cで、それぞれ平均全長74.9 mmおよび平均体重5.7 g、同74.3 mmおよび同5.4 gとした。試験水槽には、各試験区あたり100尾収容した。試験水槽等の設定は試験1と同様とした。

致死状況の把握

試験2では、試験1と同様に土田ら¹⁴⁾の方法に従って鰓蓋活動の停止をもって死亡と判断し、試験開始後から目視により3分間隔で積算死亡数を計数し、時間経過後およびDO低下にともなう生残率を求めた。

酸素消費量の測定方法、酸素消費速度の計算、酸素飽和度の計算および低酸素耐性の調査方法

試験1と同様の方法で測定および計算した。

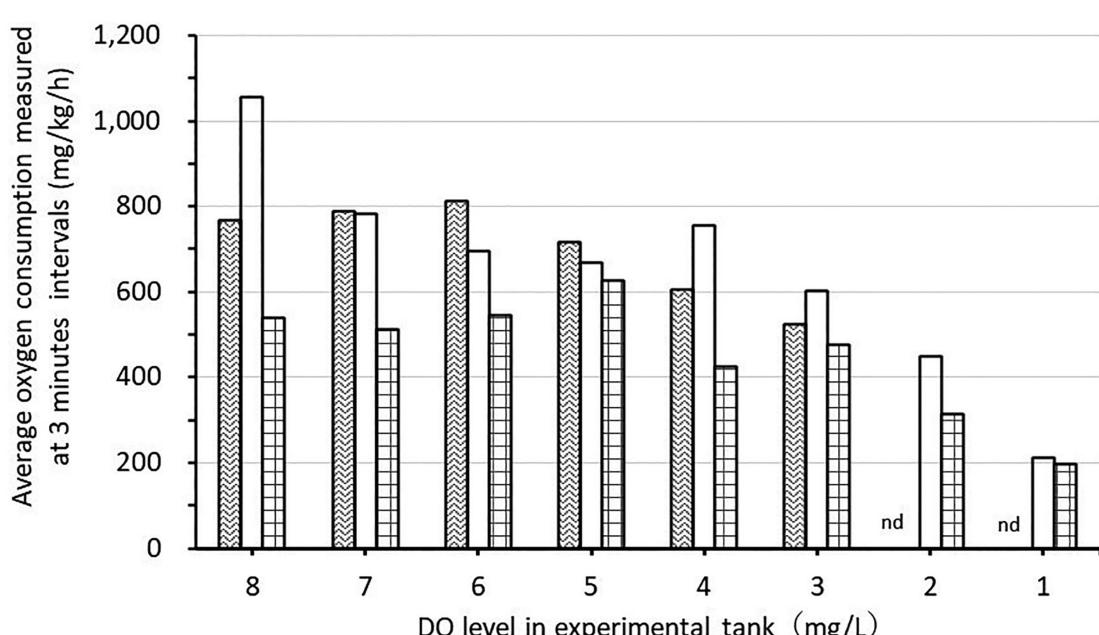


Fig. 1. Relationship between oxygen consumption and DO by water temperature in coral trout grouper juvenile (average bodyweight: 3 g). DO levels show median values. For example, 8 means 7.5 or more and less than 8.5. ■ WT 30°C - BW 3.0 g fish group; □ WT 27°C - BW 2.7 g fish group; ▨ WT 25°C - BW 3.1 g fish group.

結 果

試験1 平均体重3 gにおけるスジアラの水温別酸素消費量と低酸素耐性の調査

水温別酸素消費量

水温別のDOと酸素消費速度の関係をFig. 1に示した。DO値は中央値を示しており、例として、X軸上の8の値は7.5以上8.5未満を意味している。各試験区の酸素消費速度の平均値は、25°C区では2 mg/L以下、27°C区では3 mg/L、30°C区では5 mg/LでDOの減少とともにその平均値は減少した。酸素飽和度100%から酸素飽和度60%を下らない範囲で得られたDOデータを使用して、この間の酸素消費速度についても計算した結果、25°C区、27°C区および30°C区のそれぞれで515 mg/kg/h、667 mg/kg/hおよび654 mg/kg/hであった。なお、環境水中のDO低下に要する時間に関して、10 mg/Lを基点として、5 mg/L、3 mg/Lおよび2 mg/Lの値を切るまでに要したそれぞれの時間は、25°C区で84分、129分および150分、27°C区で81分、111分および132分、30°C区で60分、96分およびデータ無しであった。

低酸素耐性

死亡個体の出現は、25°C区でDOは1.06 mg/L、酸素飽和度は16.0%，27°C区でDOは0.99 mg/L、酸素飽和度は15.4%の時点で確認された。

試験2 平均体重5 gにおけるスジアラの水温別酸素消費量と低酸素耐性の調査

水温別酸素消費量

水温別のDOと酸素消費速度の関係をFig. 2に示した。各試験区の酸素消費速度の平均値は、25°C区では4 mg/L以下、30°C区では2 mg/LでDOの減少とともにその平均値は減少した。酸素飽和度100%から酸素飽和度60%を下らない範囲で得られたDOデータを使用して、この間の酸素消費速度についても計算した結果、25°C区および30°C区のそれぞれで468 mg/kg/hおよび804 mg/kg/hであった。なお、環境水中のDO低下に要する時間に関して、10 mg/Lを基点として、4 mg/Lおよび2 mg/Lの値を切るまでに要したそれぞれの時間は、25°C区で60分および81分、30°C区で45分および66分であった。

低酸素耐性

死亡個体の出現は、25°C区でDOは0.73 mg/L、酸素飽和度は11.0%，30°C区でDOは1.15 mg/L、酸素飽和度は18.8%の時点で確認された。

致死状況の把握

試験水槽内のDOの変化と生残率の関係をFig. 3に示した。水温が高い30°C区でDOが急速に減少し、死亡個体の出現までの時間が短かった。試験開始81分後に死亡個体が

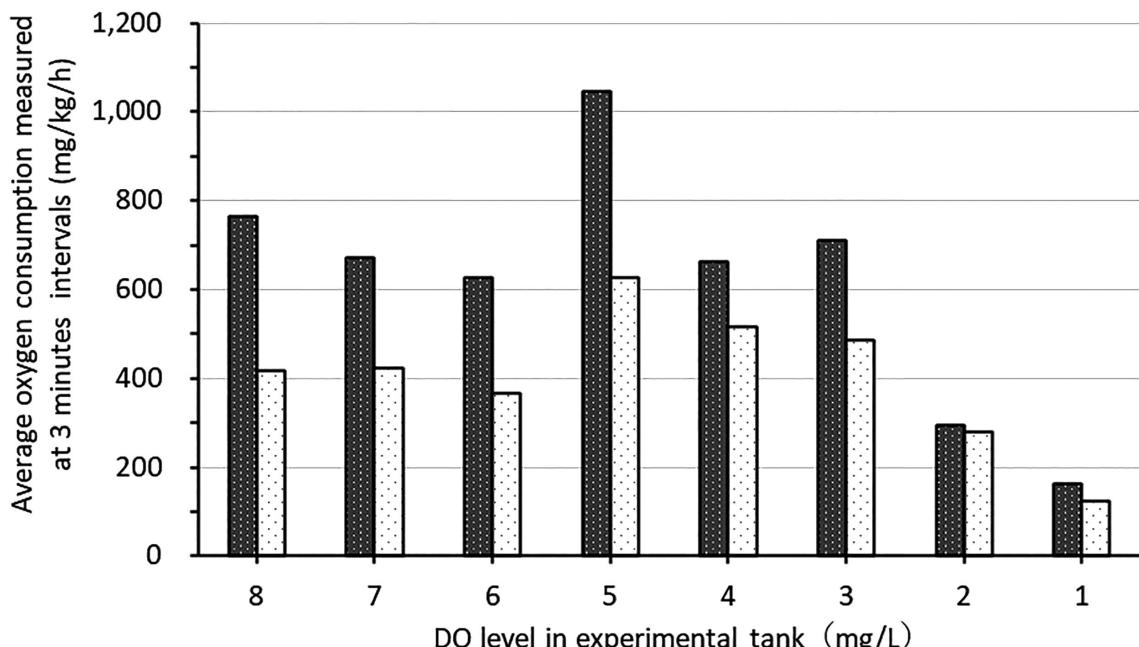


Fig. 2. Relationship between oxygen consumption and DO by water temperature in coral trout grouper juveniles (average bodyweight: 5 g). DO levels show median values. For example, 8 means 7.5 or more and less than 8.5. ■ WT 30°C - BW 5.4 g fish group; □ WT 25°C - BW 5.7 g fish group.

確認され (DO = 1.15 mg/L; 酸素飽和度18.8%), 試験開始117分後に全個体が死亡した (DO = 0.85 mg/L; 酸素飽和度13.9%)。一方, 水温25°C 区では試験開始114分後に死亡個体が確認され (DO = 0.73 mg/L; 酸素飽和度11.0%), 試験開始159分後に全個体が死亡した (DO = 0.62 mg/L; 酸素飽和度9.4%)。

考 察

魚類養殖において、海上生簀または陸上水槽で発生する育成期間中のDO低下による酸欠での死亡は、疾病による減耗と異なり一晩で全滅するため養殖業を営む企業の経営面および作業従事者に対する精神面へのダメージが非常に大きい。実際に、陸上水槽で行ったスジアラ養殖において、一時的にDOが低下して問題となっている⁹⁾。対策としては、常に環境水中のDOを測定しておくことや、扱っている養殖魚のDO値の下限を知っておくことが重要である。

本研究では、スジアラ人工種苗の体重3 gおよび5 gサイズの水温別の低酸素耐性について予備的な調査を行った。体重3 gサイズでは25~30°Cの範囲でDOが2~5 mg/Lに

なった時点から、体重5 gサイズでは25~30°Cの範囲でDOが2~4 mg/Lになった時点から、それぞれ酸素消費速度の平均値が減少することが確認された。魚の酸素消費量は環境水中のDOがある濃度に低下するまでは、DOの低下と関わりなく正常時と同じ値を維持するが、さらにDOが低下すると酸素消費量は徐々に低下することが知られている¹⁵⁾。この酸素消費量の低下は魚が酸素不足症 (hypoxia) の状態に陥ったことを示している。魚が正常に生息するためには、環境水中のDOは魚の酸素消費量の低下を引き起こさせない濃度以上であることが必要である。山元ら¹⁶⁾は多種の海産魚を用いて低酸素下における酸素消費量の調査を行っており、多少の差異はあるものの、DOがおよそ2.0 mL/L以下になると魚は酸素不足症に陥ることを報告している。また、丸茂・横田¹⁷⁾は魚類・甲殻類に生理的変化を引き起こす臨界濃度として3.0 mL/Lであることを報告している。DOの単位の換算値について、丸茂・横田¹⁷⁾を参考にして本文中では1 mL/L = 1.43 mg/Lとして変換すると、山元ら¹⁶⁾の結果は2.86 mg/L、丸茂・横田¹⁷⁾の結果は4.29 mg/Lとなる。今回のスジアラ人工種苗を用いた調査結果から、少なくとも5 mg/L以上のDOを維持しておけば酸素不足症

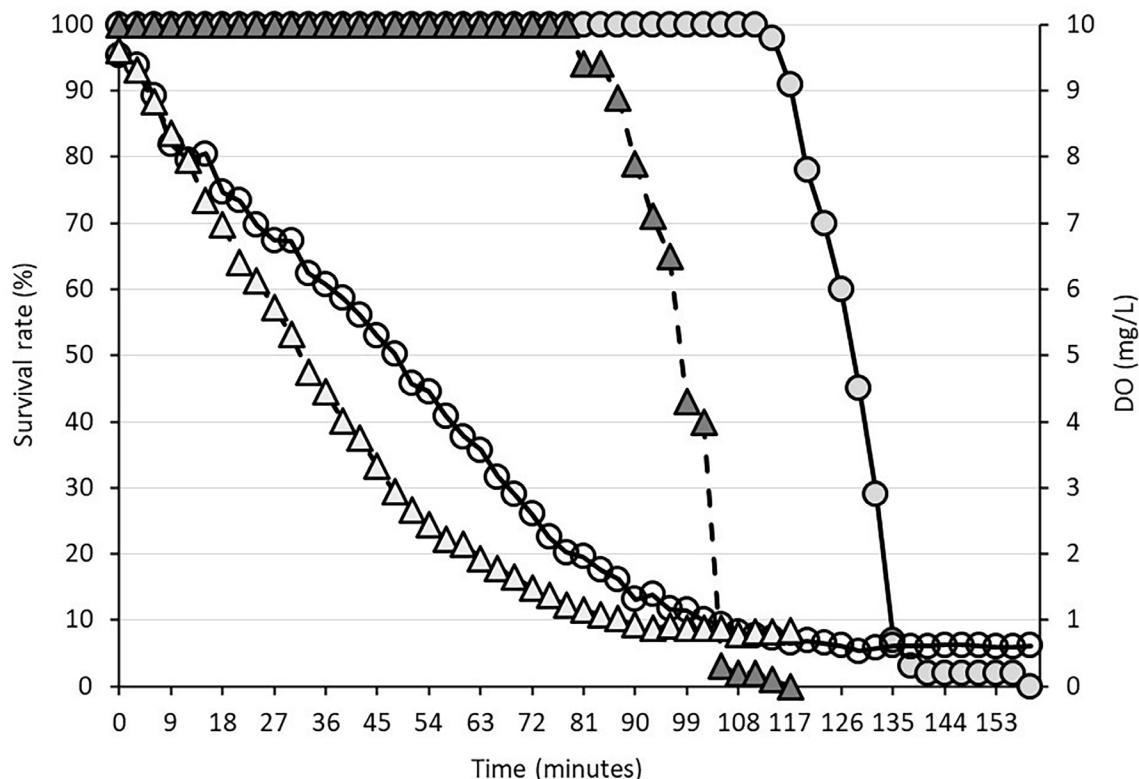


Fig. 3. Relationship between survival rate of coral trout grouper juvenile (average bodyweight: 5 g) and DO in the experimental tank at water temperature 25 and 30°C. ○ and ▲ represent survival rate (%) of 25°C (5.7 g) fish group and 30°C (5.4 g) fish group, respectively. ○ and ▲ represent DO (mg/L) in the experimental tank of 25°C (5.7 g) fish group and 30°C (5.4 g) fish group, respectively.

に陥ることはないと考えられ、丸茂・横田¹⁷⁾の結果に近い。以上のことから、環境水中のDO値を調整しやすい陸上水槽では、酸素発生装置などによる適度な純酸素の通気を行い5 mg/L以上を常に維持することで、酸素不足症を防ぐことが可能である。

続いて、環境水中のDO低下による酸素不足症が進行すると、魚は窒息状態に陥り死亡する¹⁵⁾。スジアラ人工種苗において死亡が確認されたDOおよび酸素飽和度は、体重3 gサイズでは25~27°Cの範囲でDOは0.99~1.06 mg/L (酸素飽和度15.4~16.0 %) であった。体重5 gサイズでは25~30°Cの範囲でDOは0.73~1.15 mg/L (酸素飽和度11.0~18.8%) であった。山元ら^{16,18)}は海産魚において窒息死とその時点における酸素飽和度を調査しており、ブリ *Seriola quinqueradiata*で34.9 %、マダイ *Pagrus major*で29.8 %、クラカケトラギス *Parapercis sexfasciata*で22.2 %、トラフグ *Takifugu rubripes*で19.1 %、カワハギ *Stephanolepis cirrhifer*で15.7 %、ネズミゴチ *Repomucenus richardsonii*で13.7 %と報告している。調査した各魚種の体サイズの差異はあるものの、スジアラはトラフグ、カワハギおよびネズミゴチに近い値であった。また、全個体が死亡したDOおよび酸素飽和度は、体重5 gサイズで25~30°Cの範囲においてDOは0.62~0.85 mg/L (酸素飽和度9.4~13.9%) であった。小田ら¹¹⁾はカタクチイワシで同様の調査を行っており、全個体が死亡したDOは0.72~1.39 mg/L (酸素飽和度9.0~22.3%) であり、本研究の結果と同様の傾向を示した。

酸素飽和度100%から酸素飽和度60%を下らない範囲での酸素消費速度は、体重3 gサイズでは25°C区と比べて27および30°C区で約30%近く上昇し、体重5 gサイズでは25°C区と比べて30°C区では約70%近く上昇していた。水温が上昇することで酸素消費速度が上昇する結果についても、小田ら¹¹⁾のカタクチイワシでの調査結果と同様の傾向を示した。環境水温が上昇することで飼育魚の酸素消費速度が上昇し、Fig. 3でも示しているとおり高い水温ほど環境水中のDOは急激に減少するため、スジアラ養殖の酸欠防止という観点においては環境水温とDOの関係を十分理解しておく必要がある。

本研究では、スジアラ養殖に必要な基礎的知見である水温別の酸素消費量および低酸素耐性を明らかにした。今後は、スジアラ養殖の拡大を目的として、生産した人工種苗の輸送に関する基礎的な知見を蓄積していく。

謝 辞

本研究にあたって、親魚養成および種苗生産に従事してくださった当時の独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所亜熱帯研究センター八重山庁舎職員一同に感謝いたします。

引用文献

- 瀬能 宏: ハタ科. 中坊徹次 (編) 日本産魚類検索. 東海大学出版会, 東京, 601-603 (1993)
- 益田 一, 小林安雅: ハタ科. 日本産魚類生態大図鑑. 東海大学出版会, 東京, 104 (1994)
- 武部孝行, 照屋和久: 8章ハタ科魚類の新たな養殖と戦略～スジアラを例として～. 日本水産学会 (監); 征矢野清, 照屋和久, 中田 久 (編) ハタ科魚類の水産研究最前线. 恒星社厚生閣, 東京, 109-124 (2015)
- 日本栽培漁業協会: II 栽培漁業技術開発の歩み. 2 - (2) 親魚養成技術開発. ⑦スジアラ. 日本栽培漁業協会40年史. 日本栽培漁業協会, 東京, 42 (2003)
- 山本和久, 興世田兼三: 飼育条件下におけるスジアラの産卵生態について. 栽培漁業センター技報, 4, 9-13 (2005)
- 武部孝行, 小林真人, 浅見公雄, 佐藤 琢, 平井慈恵, 奥澤公一, 阪倉良孝: スジアラ仔魚の沈降死とその防除方法を取り入れた種苗量産試験. 水産技術, 3, 107-114 (2011)
- 浜崎活幸, 竹内宏行, 塩澤 聰, 照屋和久: サンゴ礁域に放流したスジアラ人工種苗の滞留, 摂餌および被食に及ぼす囲い網による環境馴致効果. 日本水産学会誌, 70, 22-30 (2004)
- 開発調査センター: <スジアラ養殖の企業化に向けた技術開発>の調査結果概要. 平成29年度海洋水産資源開発事業報告書 (2018): https://www.fra.go.jp/jamarc/work/gaiyo/files/10_h29_gaiyou_sujiar.pdf (2025年4月25日閲覧)
- 開発調査センター: <スジアラ養殖の企業化に向けた技術開発>の調査結果概要. 平成30年度海洋水産資源開発事業報告書 (2019): https://www.fra.go.jp/jamarc/work/gaiyo/files/09_h30_sujiar.pdf (2025年4月25日閲覧)
- 阿部和雄, 福岡弘紀: 石垣島宮良川沖沿岸海域表面水中的ケイ酸塩, リン酸塩, 及び溶存カドミウムについて. 日本サンゴ礁学会誌, 10, 59-70 (2008)

- 11) 小田憲太朗, 橋本 博, 増田賢嗣, 今泉 均, 薄 浩則, 照屋和久: 飼育下におけるカタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性に関する研究. 水産技術, **10**, 1-7 (2018)
- 12) 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, **8**, 101-109 (2002)
- 13) Truesdale GA, Downing AL, Lowden GF: The solubility of oxygen in pure water and sea-water. *Journal of Applied Chemistry*, **5**, 53-62 (1955)
- 14) 土田修二, 田端重夫, 永井 彰: 宮城県万石浦産ニシン幼魚の温度選考と温度耐性. 東海大学紀要海洋学部, **43**, 117-129 (1997)
- 15) 難波憲二: 5. 酸素消費量. 会田勝美 (編) 魚類生理学の基礎. 恒星社厚生閣, 東京, 53-55 (2002)
- 16) 山元憲一, 廣中孝始, 山下秀幸, 締石慶太: 低酸素下におけるブリ, クラカケトラギス, カサゴ, ネズミゴチ, トラフグの酸素消費量の変化. 水産増殖, **38**, 35-39 (1990)
- 17) 丸茂恵右, 横田瑞郎: 貧酸素塊の形成および貧酸素の生物影響に関する文献調査. 海洋生物環境研究所研究報告, **15**, 1-21 (2012)
- 18) 山元憲一, 細本 誠, 上村達也: 低酸素下におけるマダイ, アオハタ, カワハギ, キュウセン, ハナオコゼの酸素消費量の変化. 水産増殖, **35**, 143-148 (1987)

スジアラ人工種苗の水温別酸素消費量と 低酸素耐性に関する予備的調査

橋本 博

要旨: スジアラは種苗生産が確立され、次のステージである養殖技術の開発が行われている。安定した養殖を行うためには、特に低酸素に対する耐性や水温別の酸素消費量についての基礎的な知見を集積する必要がある。本研究では、生産したスジアラ人工種苗を用いて水温別の酸素消費量を調査した結果、体重3 gサイズでは25°C, 27°Cおよび30°Cのそれぞれで515, 667および654 mg/kg/h、体重5 gサイズでは25°Cおよび30°Cのそれぞれで468および804 mg/kg/hの酸素量を消費していた。また、25~30°Cの範囲において、体重3 gサイズではDOが2~5 mg/L、体重5 gサイズではDOが2~4 mg/Lになった時点から、それぞれ酸素消費速度の平均値が減少することが確認された。さらに、最初に死亡が確認されたDOおよび酸素飽和度は、体重3 gサイズでは25~27°Cの範囲でDOは0.99~1.06 mg/L (酸素飽和度15.4~16.0%)、体重5 gサイズでは25~30°Cの範囲でDOは0.73~1.15 mg/L (酸素飽和度11.0~18.8%) であった。以上の結果から、スジアラ養殖に必要な基礎的知見である水温別の酸素消費量および低酸素耐性を明らかにした。