

特集 海生動物行動実験装置

平行流型低酸素反応行動実験水槽 －低酸素に対するマハゼ, シロギス, クルマエビの反応行動の解析－

島 隆夫^{*1§}・恩地啓実^{*1}・横田瑞郎^{*1}

Horizontal Parallel Flow Test Tank
－ Behavioral Response of *Acanthogobius flavimanus*, *Sillago japonica*
and *Marsupenaeus japonicus* to Low Dissolved Oxygen －

Takao Shima^{*1§}, Hiromitsu Onchi^{*1} and Mizurou Yokota^{*1}

要約: 試験チャンバー内に溶存酸素量が異なり, 物理的障壁が存在しない5つの区画を水平に設定できる低酸素反応行動実験システムを開発した。本実験装置を用いて行った実験の結果, マハゼ, シロギスは酸素飽和度が20%以下で, クルマエビは酸素飽和度が10%以下で明確な低酸素忌避行動を示した。本実験装置は貧酸素水塊発生時の生物影響を評価する際に強力なツールとなるものと考えられる。

キーワード: 低濃度溶存酸素実験装置, 平行流型, 貧酸素, 底生生物, 内湾, 忌避, マハゼ, シロギス, クルマエビ

まえがき

水中に棲む生物の生息環境の中で, 溶存酸素量は極めて重要な要素である。特に, 内湾域に生息する底生生物にとって, 夏季貧酸素水塊の発達が生残や生息場所に大きな影響を与える(城, 1989; 有山ら, 1997a, 1997b; 米田ら, 2003)。底生生物の貧酸素に対する耐性や忌避等の反応行動を解明することは貧酸素水塊発達時の生物影響を評価する際に有効と考えられる。海底に生息する生物は基本的に遊泳性が低く, 中層に留まることができないため, 貧酸素から逃れる場合は海底を二次元的に移動するものと考えられる。そのため, 試験装置には溶存酸素量の異なる区画を水平に設定できることが要求される。そこで, 底生生物に対応した平行流型低酸素反応行動実験システムの開発を行い, マハゼ *Acanthogobius flavimanus*, シロギス *Sillago japonica* およびクルマエビ

Marsupenaeus japonicus の低酸素反応行動について検討した。

装 置

低酸素反応行動実験システムは, 試験水槽, 溶存酸素量調節装置および溶存酸素量測定・記録装置で構成されている(第1図)。試験水槽(内寸1,000×500×100mm)は浸漬槽(1,200×750×300mm)内に全体が水面下に浸かるよう設置した。試験水槽の前室は奥行き50mm, 高さ100mm, 幅200mmの5つの区画に仕切られており, それぞれの区画に注入された海水は, 前スクリーンで整流され試験チャンバーに入り, 同構造の後スクリーンを通り試験水槽外へ抜け, 排水される。注水口より注入される海水は酸素飽和度が100%の濾過海水, または酸素飽和度を調節した濾過海水のいずれかを三方バルブによって切り替えた。海水の酸素飽

(2013年12月25日受付, 2014年2月17日受理)

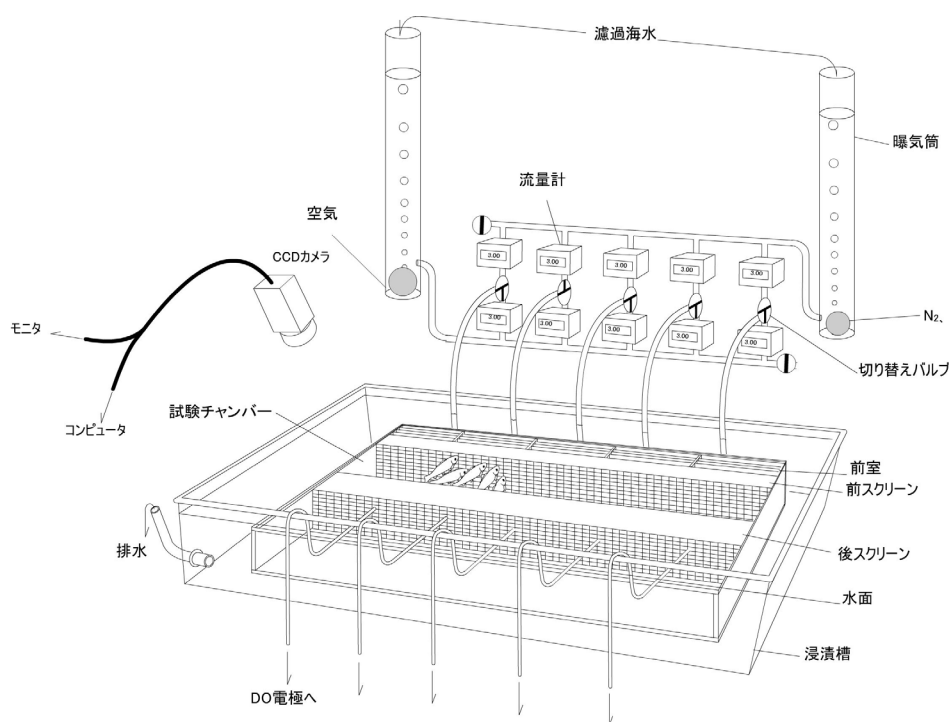
*1 公益財団法人海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒298-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)

§ E-mail: shima@kaiseiken.or.jp

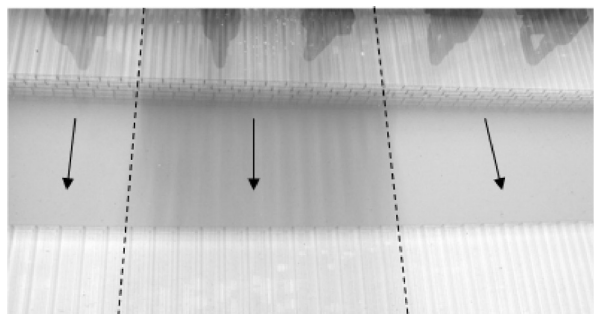
和度は曝気筒内で窒素ガスを曝気することにより調節した。各区画の溶存酸素量は、後スクリーンより内径2.5mmのタイゴンチューブで毎分約50mL採水し、溶存酸素濃度連続測定システム（環境システム株式会社, Auchn3）により50秒間隔でパーソナルコンピュータに連続記録した。

各区画に毎分2L注水した場合、試験区画内の海水の流れは層流であり、隣り合う区画の海水は境界で混じり合うことなく試験チャンバーを通過

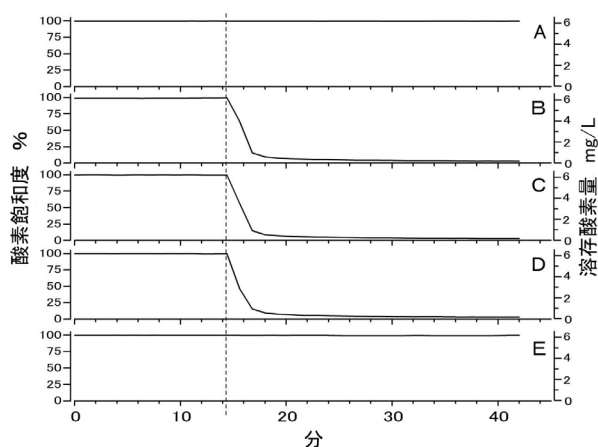
した（第2図）。1区画のみに酸素飽和度2.5%の海水を流した場合、低酸素区画間で酸素飽和度に差は認められず、隣り合う区画との境界で酸素飽和度が明確に分離していることが確認された（第3図）。試験中の魚の動きは、実験水槽上方2mにCCDカメラ（パナソニック、WV-G920A）により撮影し、パーソナルコンピュータに動画ファイルとして記録した。



第1図 低酸素反応行動実験システムの概要。



第2図 低酸素反応行動実験システム試験チャンバー内の水流。中央の区画にはインスタントコーヒーで着色し、比重を調整した海水を流した。図中の矢印は流向を、破線は区画の境界を示す。



第3図 低酸素反応行動実験システム試験チャンバー内の酸素飽和度。B, C, Dは酸素飽和度2.5%の海水を流した区画の両端（境界面から5mmの位置：B, D）と中心（C）で測定した。D, Eは両隣の酸素飽和度100%の海水を流した区画の端（境界面から5mmの位置）で測定した。

方 法

魚は試験前日に酸素飽和度100%の海水を注水した試験水槽に収容した。試験は酸素飽和度100%の海水を全区画に注水した状態から開始し、5分毎に区画5から順に、区画2までの注入水を低酸素のものに切り替えた（第4図、フェーズ1）。区画1のみが酸素飽和度100%が注水されている状態になると、今度は酸素飽和度100%の海水を注入した区画（飽和区）を、区画2, 3, 4, 5の順に5分間隔で移動させた（第4図、フェーズ2）。行動解析にはフェーズ2の25分間のデータを用いた。以上の手順終了後、すべての区画を酸素飽和度100%の海水に切り替え、20分経過した後に次の段階の溶存酸素量の試験を行った。低酸素反応行動試験は、酸素飽和度60%より始め、順に低い溶存酸素量で行った。この試験手順により、フェーズ2の25分間は常に5区画中1区画が飽和区で、他の4区画が低酸素区となるため、魚がまったく移動しない、またはランダムな遊泳をするなど、忌避行動が認められない場合に予想される飽和区出現頻度は20%である。

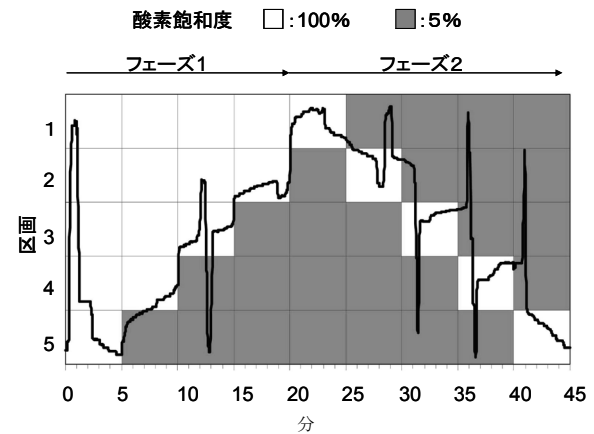
魚の位置は2次元動画像移動計測ソフトウェア（株式会社デジモ、Image Tracker PTV）により1/30秒毎に魚の吻の位置座標を求めた。魚の行動解析にはフェーズ2の25分間のデータを用い、各酸素飽和度段階について飽和区出現頻度を求めた。

結 果

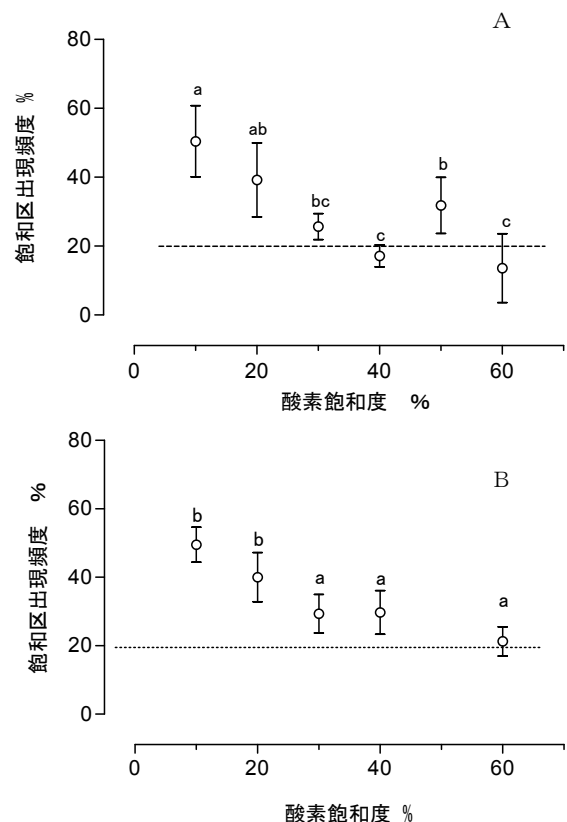
低酸素反応行動実験システムを用いた、水温14℃でマハゼ（全長12cm）の低酸素反応行動の記録例を第4図に示す。マハゼは試験開始時に区画5に定位していたが低酸素区画に沿って移動し、フェーズ2開始時には区画1に定位していた。フェーズ2では移動する飽和区に追従して移動しており、定位していた位置が低酸素になった場合は遊泳速度が速くなり、再び飽和区に入るとそこで定位した。

水温25℃で行ったマハゼ（体重 4.8 ± 0.6 g）およびシロギス（体重 9.9 ± 1.3 g）の低酸素に対する反応行動解析例を第5図に示す。両魚種とも酸素飽和度が60%から30%の間では飽和区出現頻度に差は認められず、飽和区出現頻度は、忌避行動が認められない場合に予想される20%に近い値で

あった。両種とも酸素飽和度を20%まで下げると、飽和区出現頻度はそれよりも高い酸素飽和度と比べ有意に高い値を示し、酸素飽和度を10%まで下げると飽和区出現頻度はさらに増加した。



第4図 低酸素反応行動実験システムを用いた、水温14℃におけるマハゼの低酸素反応行動の記録例。図中の実線はマハゼが移動した軌跡を示す。



第5図 水温25℃におけるマハゼ (A) およびシロギス (B) の酸素飽和度と飽和区出現頻度の関係。平均±標準偏差 ($n=5$)。異なるアルファベットは統計的に有意な差があることを示す（一元配置分散分析, $P < 0.05$ ）。図中の破線は低酸素忌避行動が認められない場合に予想される水準(20%)。

水温25℃で行ったクルマエビ（体重 0.7 ± 0.06 g）の低酸素反応行動の解析例を第6図に示す。クルマエビの飽和区出現頻度は酸素飽和度が60%から20%の間では、ほぼ忌避行動が認められない場合に予想される20%の水準であった。さらに酸素飽和度を10%まで下げると飽和区出現頻度はやや増加する傾向があり、5%まで下げると酸素飽和度が20%以上の場合に比べ有意に高い値を示した。

考 察

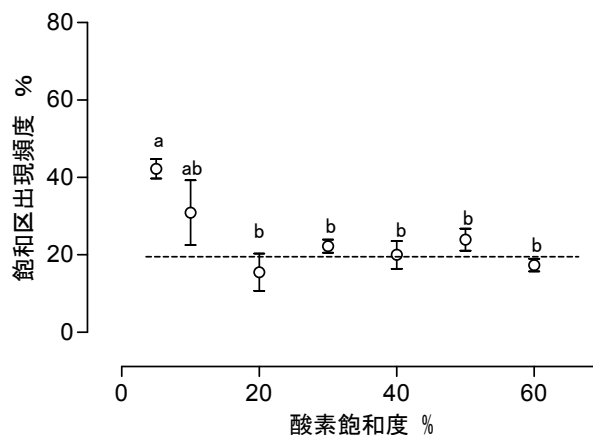
開発した低酸素反応行動実験システムは、試験チャンパー内に溶存酸素量が異なる物理的障壁が存在しない5つの区画を設定できることが示された。本システムでは溶存酸素量が区画境界面で明確に分離しているため、魚の吻の位置から魚がどの溶存酸素量の海水を呼吸しているのかを把握することが可能であり、水槽内に溶存酸素量勾配を設定する場合（Wu *et al.*, 2002）よりも反応行動の閾値を明確に検出することができると考えられる。また、ここで行った5区画中1区画のみの飽和区を移動させる実験手順により、生物が動かない、自発遊泳が活発であるなど、従来のY字水路では忌避・選好の判定が困難な状況においてもより高精度で反応行動の検出が可能である。

本試験装置を用いて行った試験例では、マハゼ、シロギスは両種とも酸素飽和度が20%になると明確な忌避行動を示した。これに対してクルマエビに明確な低酸素忌避行動が認められたのは酸素飽和度が10%以下になってからであった。

有山ら（1997a, 1997b）は大阪湾奥部の大型底生生物の夏期貧酸素水塊発達時の生残状況を貧酸素耐性と移動能力により5つのパターンに分類している。また、魚類の貧酸素耐性限界は種により様々で、致死時溶存酸素量はマアジで1.39ml/L、ギンポ、ムラソイ、メバル、マフグで0.17ml/Lとされている（日本水産資源協会, 1989）。これら多様な生物について貧酸素水塊発生時の影響を評価するには、低酸素に対する反応行動を検討する必要がある、その際に本試験装置は強力なツールとなるものと考えられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり供試魚を飼育して頂いた公益財団法人海洋生物環境研究所中央研究所



第6図 水温25℃におけるクルマエビの酸素飽和度と飽和区出現頻度の関係。平均±標準偏差（ $n=5$ ）。異なるアルファベットは統計的に有意な差があることを示す（一元配置分散分析, $P<0.05$ ）。図中の破線は低酸素忌避行動が認められない場合に予想される水準（20%）。

瀬戸熊卓見氏および吉野幸恵氏に感謝の意を表します。なお、本研究は水産庁より委託された平成18～20年度漁場環境再生発電所取放水活用調査事業として実施された成果の一部である。

引用文献

- 有山啓之・矢持 進・佐野雅基（1997a）. 大阪湾湾奥部における大型底生動物の動態について I. 甲殻類と魚類の種類数・個体数・湿重量の季節変化. 沿岸海洋研究, **35**, 75-82.
- 有山啓之・矢持 進・佐野雅基（1997b）. 大阪湾湾奥部における大型底生動物の動態について II. 主要種の種類数・分布・体長組成の季節変化. 沿岸海洋研究, **35**, 83-91.
- 城 久（1989）. 大阪湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 87-98.
- 日本水産資源保護協会（1989）. 漁場環境容量策定事業報告書（第1分冊）. 日本水産資源保護協会, 東京, 1-1003.
- Wu, R.S.S., Lam, P.K.S. and Wan, K.L. (2002). Tolerance to, and avoidance of, hypoxia by the penaeid shrimp (*Metapenaeus ensis*). *Environ. Poll.*, **118**, 351-355.
- 米田佳弘・吉田 司・小山善明（2003）. レーダー画像解析による大阪湾のマアナゴ漁場の変動把握. 水産海洋研究, **67**, 1-8.