

特集 海生動物行動実験装置

垂直温度勾配水槽
— ウマヅラハギの温度選好について —

土田修二^{*§}

Temperature Preference of the Black Scraper, *Thamnaconus modestus*,
in a Vertical Temperature Gradient

Shuji Tsuchida^{*§}

要約: 鉛直的な温度勾配下における魚類の選好温度を実験的に把握するため, 垂直温度勾配水槽を製作した。この装置の実験水槽の大きさは, L 1,500mm×W 600 mm×H 1,650mmで, 11台の熱交換機で5~40℃の範囲の温度をコンピュータで自動制御した。この装置の性能実験の結果, 実験水槽内では安定した温度成層状態が保持されていることが確認された。垂直温度勾配水槽を用いてウマヅラハギの選好温度を調べた。馴致温度10~28℃のウマヅラハギの短期・長期選好温度は, それぞれ13.9~26.2℃および16.9~24.4℃の範囲にあり, いずれも馴致温度の影響が認められた。これら結果から最終選好温度は23.0℃と推定された。

キーワード: 垂直温度勾配水槽, 実験装置, 選好温度, 最終選好温度, 行動, ウマヅラハギ

まえがき

魚類の選好・忌避など温度に対する反応行動を知ることは, その分布や回遊に与える温度影響を予測する上で重要な手がかりとなる。例えば, 温排水がある種の魚の選好温度より高い場合, その魚は温排水域から逃避し, 逆に選好温度より低い場合は温排水域に蟄集すると考えられる。こうした魚類の選好・忌避温度を実験的に計測する方法としては, 水槽内に任意の温度勾配を作り, 供試魚に至適温度を選択させる「至適環境選択法」が一般的に用いられる。供試魚に温度勾配を与える方法には温度勾配の配置方法によりいくつかの種類があるが, 本報告では著者らが1980~1981年に設計・製作し1982年から実験を開始した鉛直方向の温度勾配を形成させる「垂直温度勾配装置」の紹介と(土田・深滝, 1991), 本装置を用いたウ

マヅラハギ *Thamnaconus modestus*の実験結果について報告する。

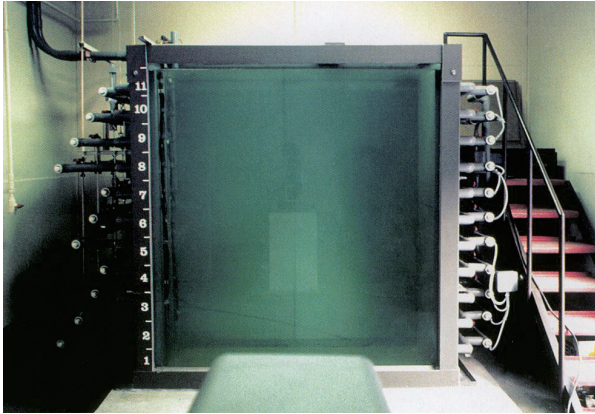
装置および方法

垂直温度勾配装置の構造 製作した垂直温度勾配装置は, 11段階の異なる温度に調節した海水を層状に実験水槽内に注入することにより, 鉛直方向に温度勾配を形成することができる。水槽の実験区内部の大きさは幅1,500mm×奥行き600mm×水深1,650mmで, 実験区内の海水容量は約1,500Lである(第1図)。水槽の前面と背面は耐圧ペアガラス, 左右両側面と底面は厚さ30mmの硬質ポリ塩化ビニル板からなり, ポリ塩化ビニル被覆仕上げの鋼鉄製フレームによって支持されている。水槽の上面は開口されており, 取り外し可能なアクリル製の蓋が設けられている。

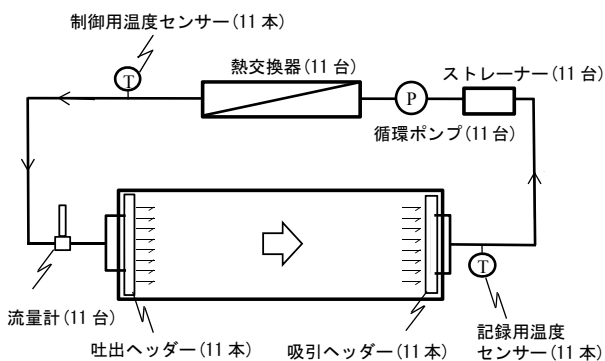
(2013年12月25日受付, 2014年2月19日受理)

* 公益財団法人海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)

§ E-mail: tsuchida@kaiseiken.or.jp



第1図 垂直温度勾配水槽。



第2図 垂直温度勾配水槽の循環回路（平面図）。

水槽に向かって左側面内側には、11個の海水吐出ヘッダー（幅100mm×奥行き600mm×高さ150mm）が、また、これらに対向する右側面内側には11段の海水吸引ヘッダーが、それぞれ設けられている。実験区内の海水の整流状態を保持するために、両ヘッダー区と実験区との間はポリ塩化ビニル製の多孔板で仕切られている。

温度調節された海水の循環回路は、それぞれ設定温度に対応できる独立の11系統とした（第2図）。実験水槽内から吸引された海水は、系統毎にストレーナー、循環ポンプ、熱交換器、流量計を順次通過し、熱交換器内でそれぞれの設定温度に再調節されたのち、再び実験水槽内に注入される。各系統における最大流量は25L/minである。

水槽の上には40Wの白色蛍光灯6本が吊り下げられている。散光板を通過した後の光の照度は、水面上で800～1,000 luxである。

海水の加熱冷却は11基の熱交換器によって行われる。各熱交換器には電気ヒーターと冷却コイルが内蔵されている。温度制御用の機器を設置した機械室は、実験水槽室とは間仕切り壁で隔離され

ており、前述のストレーナー、熱交換器、循環ポンプが機械室内の3段の棚に収容され、間仕切り壁を貫通するパイプ類によって実験水槽と接続している。

各系統の循環回路中の熱交換器と海水吐出ヘッダーとの間に取りつけられた制御用の温度センサーは、コンピュータ室内のパッケージ計装制御システムと接続しており、このパッケージ計装制御システムで演算処理した出力信号によって、回路ごとに任意の温度に制御することができる。この制御には、電熱ヒーターの断続作動と、冷却コイル内を流れるブラインを電磁弁によって循環もしくはバイパスさせるオン・オフ制御方式が採用されている。

実験水槽内の各水深帯に対応する温度は、各回路の吸引ヘッダーとストレーナーの間に取りつけた記録用の温度センサーによって、設定した時間間隔毎に記録・解析用のコンピュータに自動入力される。

実験期間中は、供試魚の遊泳行動が周囲の諸条件によって攪乱されることを避けるため、実験水槽室内を無人化した。供試魚の行動や遊泳位置の観察・記録は、すべて実験水槽前面に設置した高感度ビデオカメラを通じて遠隔的に行った。

コンピュータ室内には、位置検出用のビデオデジタイザーおよびモニター用テレビを置き、前者の画面上でライトペンによって、実験期間中の所定時間間隔毎に各供試魚の遊泳位置をX、Y軸上の値として捉えた。それらの値はリアルタイムに記録解析用のコンピュータに入力するとともに、ビデオテープレコーダーに収録して、実験終了後におけるオフラインでのデータ処理もできるようにした。

実験装置の性能 実験水槽内に供試魚を収容していない状態で、装置自身のもつ垂直温度勾配形成機能を確認するための実験を行った。この性能実験では、実験装置の水温自動制御システムを運転しながら、実験水槽内に設置した温度計によって1分毎に1時間の測定を行った。この結果から、深さ165cmの水槽を15cm間隔で1℃ずつ異なる11層の温度勾配を形成したとき、各層内の温度を標準偏差で0.2℃内に維持できることが示された。

供試魚 実験に供したウマヅラハギは、静岡県沼津沖の定置網で漁獲されたものを活魚輸送業者に

よって千葉県御宿町にある当研究所中央研究所へ搬送し、濾過海水により数日間飼育した後、温度馴致飼育を行った。温度馴致には500Lの円形水槽を用いて1水槽当たり50尾収容した。馴致海水は当研究所既設の温海水（32℃）、冷海水（8℃）、濾過海水（自然水温18～21℃）を混合して所定の温度に調節し、1水槽当たり毎時500Lかけ流した。設定した馴致温度は10、15、20、25、28℃の5温度区で、それぞれ18日間以上の馴致飼育を行った。各馴致温度区において10分毎に測定した温度の標準偏差は±0.3℃以内であった。

飼育温度を自然温度から馴致温度へ移行する際には、1～3日間をかけて緩やかに昇温あるいは降温し、急激な温度変化を避けた。温度馴致期間中には、解凍したオキアミ100gを1日2回与えた。各実験終了時に測定した供試魚の平均体重は170.1g、平均体長は20.4cmであった。

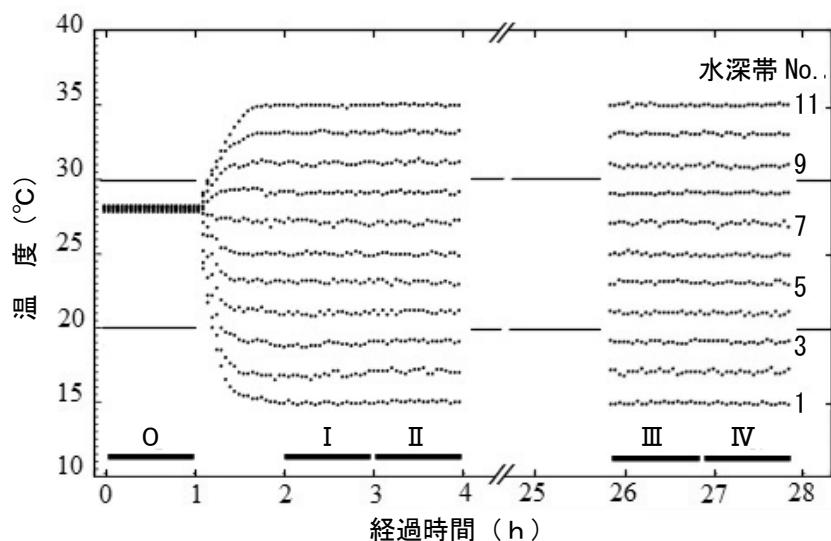
実験方法 実験前日に水槽内全体が馴致温度と等しい温度無勾配状態の中に供試魚5尾を収容して1晩放置し、供試魚に異常な行動がないことを確認した後、実験を開始した。実験水槽に供試魚を収容した後は無給餌とした。

第3図には、実験期間中の温度推移を例示した。まず、温度無勾配状態における1時間を0期とし、次いで温度勾配完成直後の1時間をⅠ期、続く1時間をⅡ期、さらに温度勾配完成から24時間後の2時間を前後1時間毎にⅢ、Ⅳ期に区分した。各期

間中、供試魚が分布した滞泳位置およびその水深帯の温度（滞泳温度）を3分毎に同時記録した。Ⅰ～Ⅳの各期の選好温度は、各期間中に供試魚が分布した位置に相当する水深帯の温度の平均値とした。すなわち各期の選好温度測定の実測温度の数は100（5尾×20回）である。さらに、温度勾配完成直後のⅠ期とⅡ期の選好温度を短期選好温度、24時間後のⅢ期とⅣ期およびⅤ期の選好温度を長期選好温度とした。実験は各温度馴致群あたり3回行った。

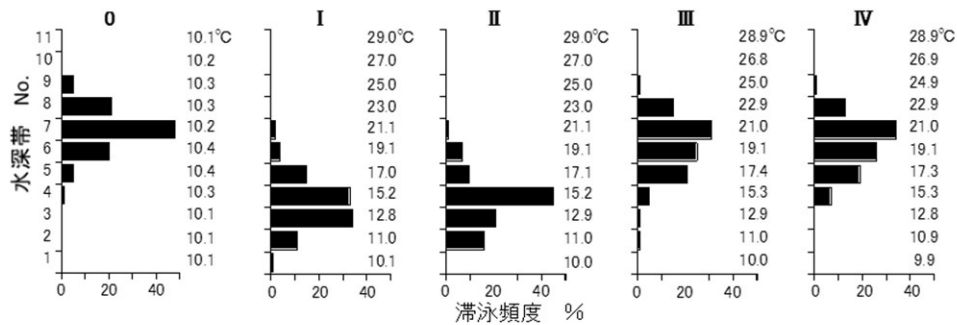
結果および考察

第4図には、10℃馴致群と25℃馴致群の実験例を示した。10℃馴致群の場合、温度無勾配期における供試魚は中層部を中心に遊泳していたが、9～29℃の温度勾配が形成されたⅠ期およびⅡ期において、供試魚はやや下層部の水深帯No.2～5（温度11～17℃）を遊泳した。同じ温度勾配下で24時間経過すると、初期に比べてより高い温度帯の水深帯No. 6, 7（温度19～23℃）に供試魚は移動した。25℃馴致群の供試魚は温度無勾配期に水槽全体を活発に遊泳していたが、15～35℃の温度勾配が形成されたⅠ期およびⅡ期では、供試魚は中層部の水深帯No. 4～7（温度21～25℃）に集中して遊泳した。同じ温度勾配下で24時間経過した場合においても、供試魚の遊泳水深帯はほとんど変わらず主に水深帯No. 4～7（温度21～25℃）を遊泳

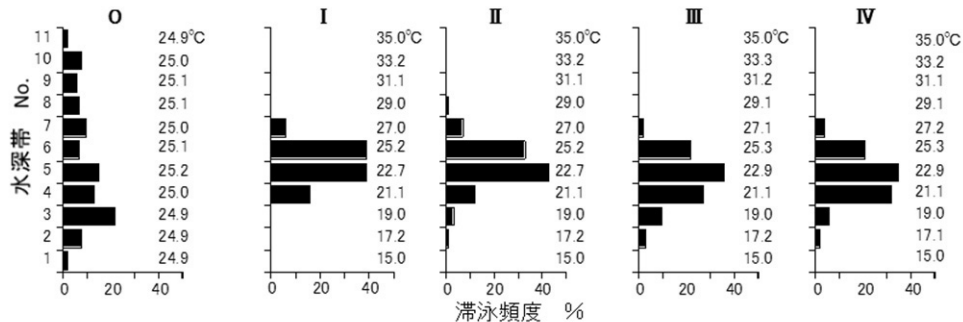


第3図 温度選好実験期間中における温度推移とウマヅラハギの滞泳位置データ収録時間区分（0～Ⅳ期）。

A. 10℃馴致群の試験例



B. 25℃馴致群の試験例



第4図 ウマヅラハギの垂直温度勾配下における滞泳頻度と水深帯の平均温度。0～Ⅳ期は第3図の遊泳位置データ収録時間区分に対応する。0期は温度無勾配期，Ⅰ期とⅡ期は温度勾配完成直後の2時間，Ⅲ期とⅣ期は温度勾配完成から24時間後の2時間を示している。

した。この他の温度馴致群においても温度勾配の形成に伴って特定の温度域を選択する温度選好行動が認められた。

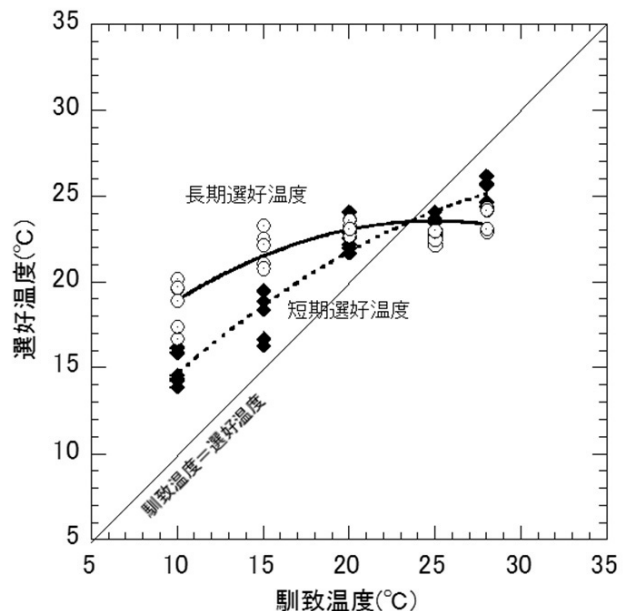
第5図には各温度馴致群と選好温度との関係を示した。短期選好温度（Ⅰ期，Ⅱ期）は13.9～26.2℃，長期選好温度（Ⅲ期，Ⅳ期）は16.9～24.4℃の範囲にあった。10～28℃の馴致温度と短期・長期選好温度との関係を以下の二次曲線式で表した。

$$Spt = -0.0156At^2 + 1.1879At + 4.4508 \quad (r=0.9712)$$

$$Lpt = -0.0206At^2 + 1.0272At + 10.784 \quad (r=0.8801)$$

ここに，Sptは短期選好温度，Lptは長期選好温度，Atは馴致温度，rは相関係数である。

両選好温度とも馴致温度に依存して変化する傾向が認められ，Sptの範囲が大きいのに対し，Lptではその差が小さくなっていた。馴致群別に見ると低温の10℃，15℃馴致群ではSptよりLptで4℃ほど上昇し，高温の25℃，28℃馴致群は低温馴致群とは逆にLptで1～2℃ほど低下した。中間の



第5図 ウマヅラハギの馴致温度と選好温度との関係。第4図の各温度勾配期における選好温度は，供試魚の分布位置に相当する水深帯の温度の平均値とした。また，Ⅰ期とⅡ期の選好温度を短期選好温度，Ⅲ期とⅣ期の選好温度を長期選好温度とした。

20℃馴致群のSptとLptは、ほとんど変わらなかった。このように本試験における20℃以下の比較的低温の温度馴致群では24時間経過すると選好温度が高温側に移行し、逆に高温馴致群では低温側に移行するといった結果は、土田ら（1991）によるイシダイ *Oplegnathus fasciatus* 1年魚の結果と類似している。

多くの魚類は、温度勾配下に長時間静かに放置されると最終的には、それぞれの種に固有の温度を選択するものとされ、この時の温度は最終選好温度（final preferendum）と呼ばれている（Coutant, 1970; Reynolds and Casterlin, 1979）。この最終選好温度は、また馴致温度と選好温度とが等しくなる点として定義されている（Reynolds and Casterlin, 1979; Jobling, 1981; 土田ら, 1991）。本実験において、ウマヅラハギの馴致温度と温度勾配形成直後のSptおよび温度勾配形成から24時間後のLptとの関係から、馴致温度とSptおよびLptとが等しい温度はどちらも23.5℃であり、ウマヅラハギが馴致温度に係わりなく最終的に選好する温度、すなわち最終選好温度は23.5℃と推定された。土田（2002）は沿岸性魚類36種について温度選好実験を行っている。ウマヅラハギの最終選好温度は、同じカワハギ科のカワハギ *Stephanolepis cirrifer* (27.6℃) よりも低く、シマアジ *Pseudocaranx dentex* (22.5℃) やマアジ *Trachurus japonicus* (24.0℃) に近似していた。

謝 辞

本稿とりまとめに際し有益なご助言を賜った（公財）海洋生物環境研究所の木下秀明博士、道津光生博士および藤井誠二研究参事に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Coutant, C.C. (1970). Biological aspects of thermal pollution. I. Entrainment and discharge canal effects. *CRC Crit. Rev. Env. Contr.*, **1**, 341-381.
- Jobling, M. (1981). Temperature tolerance and the final preferendum - rapid methods for the assessment of optimum growth temperatures. *J. Fish. Biol.*, **19**, 439-455.
- Reynolds, W.W. and Casterlin, M.E. (1979). Behavioral thermoregulation and the final preferendum paradigm. *Am. Zool.*, **19**, 211-224.
- 土田修二 (2002). 沿岸性魚類の温度選好に関する実験的研究. 海生研研報, **No.4**, 11-66.
- 土田修二・深滝 弘 (1991). 新型垂直温度勾配反応実験装置の構造と性能. 海生研報告, **No.91201**, 1-20.
- 土田修二・渡辺幸彦・鈴木繁美 (1991). イシダイ1年魚の選好温度と高温耐性. 海生研報告, **No.91202**, 1-24.