

特集 海生動物行動実験装置

水平温度勾配水槽
— ホシギスの温度選好について —

土田修二*§

Temperature Preference of the Spotted Whiting, *Sillago aeolus*,
in a Horizontal Temperature Gradient

Shuji Tsuchida*§

要約：水平的温度勾配下における海産魚類の行動反応を通じて、それら魚類の選好温度や忌避温度を把握するため、新型の水平温度勾配反応実験装置を製作した。この装置の実験水槽の大きさは、L 4,400mm×W 100~300mm×D 50~150mmで、11台の熱交換器で5~40°Cの範囲の温度をコンピュータで自動制御した。馴致温度24~28°Cのホシギスの選好温度は28.4~31.1°Cの範囲にあり、馴致温度の影響は認められなかった。これら結果から最終選好温度は29.4°Cと推定された。

キーワード：水平温度勾配水槽，実験装置，選好温度，最終選好温度，行動，ホシギス

まえがき

水平型の温度勾配水槽は、水生動物の温度に対する選好忌避行動を把握する手法として、古くから多くの研究者によって利用されてきた（土田，2014）。著者らは魚類等の温排水に対する影響を把握する目的で、1980~1982年に水平的勾配水槽の設計・製作を行った。当初製作した水平勾配水槽は長軸方向の一端から冷水を注入して、その冷水を水槽底部に設置された5基の熱交換器によって11エリアの温度を次第に温める方式とした。しかし、この方式では各エリアの温度が不安定であったことから、1986年に5基の熱交換器を利用して水槽の短軸方向に温度調節された海水を注入して水平温度勾配を形成する方式に改良した（土田，2002）。この方式で各エリアの温度がある程度安定化することが明らかとなった。そこで1991年に温度の安定化を目指して熱交換器を11基に増

やした「新型水平温度勾配装置」を製作して、カサゴ *Sebastes marmoratus* など数魚種の選好温度を把握する実験を行った（Kita *et al.*, 1996; 土田，2002）。そこで本報告では新型水平温度勾配装置の紹介と、それをを用いたホシギス *Sillago aeolus* の温度選好について報告する。

装置および方法

新型水平温度勾配装置の構造 新型水平温度勾配装置は、11基の熱交換器によってそれぞれ温度制御された海水を水槽の長軸方向（温度勾配方向）に直交する注入方式とした（第1図）。実験水槽の内寸は長さ4,400mm×幅100~300mm×深さ50~150mmで水槽の幅および水深を供試材料の大きさに合わせて変えることができる。実験水槽は厚さ10mmの硬質塩化ビニル製で側面および底面は保温加工が施されている。実験水槽の長辺に添った

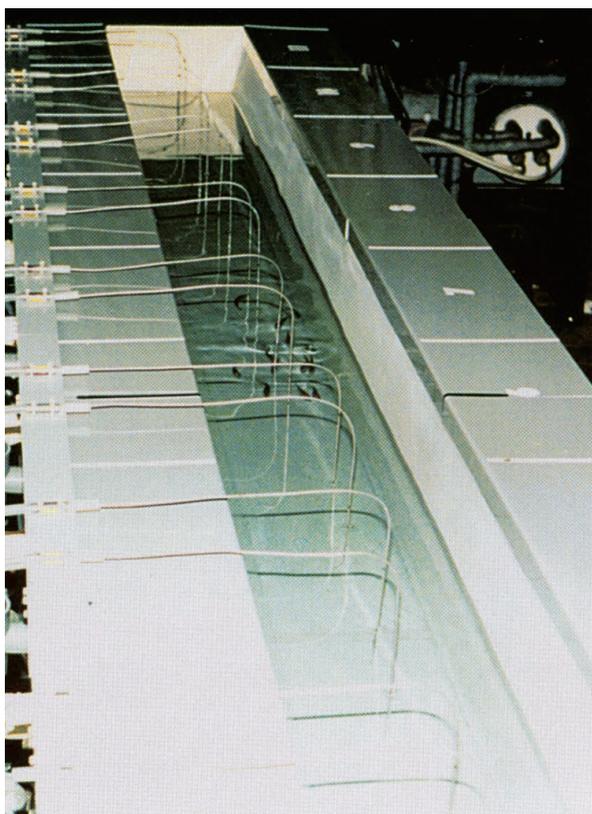
(2013年12月25日受付，2014年2月19日受理)

* 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）

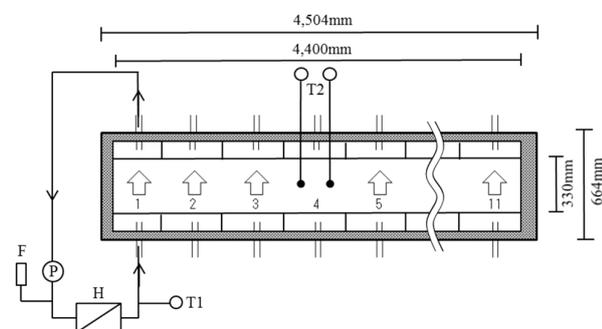
§ E-mail: tsuchida@kaiseiken.or.jp

両側壁に、それぞれ11個の海水注入区と排水区を設け、これらの両区と中央の実験水路の間は、整流機能をもたせるために、硬質塩化ビニル製の多孔板で仕切った。

実験水槽内から排出された海水は、各系統にストレーナー、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16L/minである(第2図)。



第1図 新型水平温度勾配水槽。



第2図 新型水平温度勾配装置の海水循環回路(平面図)。11エリアで温度制御され、水平方向の温度勾配が形成される。
T1：制御用温度センサー(11本)、T2：記録用温度センサー(22本)、H：熱交換機(11台)、P：循環ポンプ(11台)、F：流量計(11台)。

実験水槽の上(水面から2m上方)には5対の白色蛍光灯(40W)計10本が吊り下げられており、散光板を通過した後の光の照度は、水面上で約300luxである。

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に設置され、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注入区との間には温度制御用のセンサー(Pt100)が取り付けられており、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いる。各系統の熱交換器内には加熱・冷却用コイルが内蔵されており、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、加熱・冷却コイル内を流れるブライン量を電磁弁と電動弁の開閉によって調整されている。温度制御範囲は5~45℃である。温度制御はいずれも自動的に行われ、熱交換器の先に取り付けた温度センサーからの信号によって制御用コンピュータで、系統ごとに設けられた電磁弁、電動弁を作動させ、熱交換器内に流れる加熱用および冷却用ブラインの流量を制御する仕組みとなっている。

両装置の観察記録部は、ビデオカメラ、ビデオレコーダー、デジタイザー、記録解析用コンピュータから成っている。実験水槽の直上には2台のビデオカメラが天井から吊り下げられており、これらによってとらえられた水槽内の映像は、コンピュータ室内のモニターテレビ画面上に、上下2段に表示される。また、同じ映像が同室内のデジタイザー画面上にも表示され、観察者がライトペンでプロットすることによって、各供試魚の分布した位置に関する情報がX、Y軸上の数値として記録解析用コンピュータに入力される。実験水路内は11エリアに分割されている。各エリア2箇所(合計22箇所)に設置されたシース型T熱電対温度計により、魚の位置情報と同時刻の温度情報が記録される。

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、装置自身のもつ水平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、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。その結果、新型水平温度勾配装置の各エリアの水温の変動は極めて小

さく、水温の標準偏差は0.2℃以下であった。

供試魚 実験に供したホシギスは、千葉県御宿町にある当研究所中央研究所で飼育している親魚が自然産卵した受精卵を孵化させて養成飼育したものである。実験前に温度馴致飼育を行った。馴致には室内に設置した容量500LのFRP製円形水槽を用い、1槽に100尾ずつ収容した。馴致条件として、20、24、28℃の3温度段階を設定し、馴致用水槽に収容する前の飼育温度から所定の馴致温度への移行は、1～3日をかけて緩やかに昇温もしくは降温させた。各馴致温度で14～28日間飼育を行った。馴致期間中における飼育海水の置換率は1回/hとし、馴致飼育の期間中には、マダイ卵および配合飼料を1日3回飽食するまで投与した。

各実験終了時に測定した供試魚の平均体長は52.3±4.2mm（平均値±標準偏差、以下同様）、平均体重は1.76±0.45gであった。

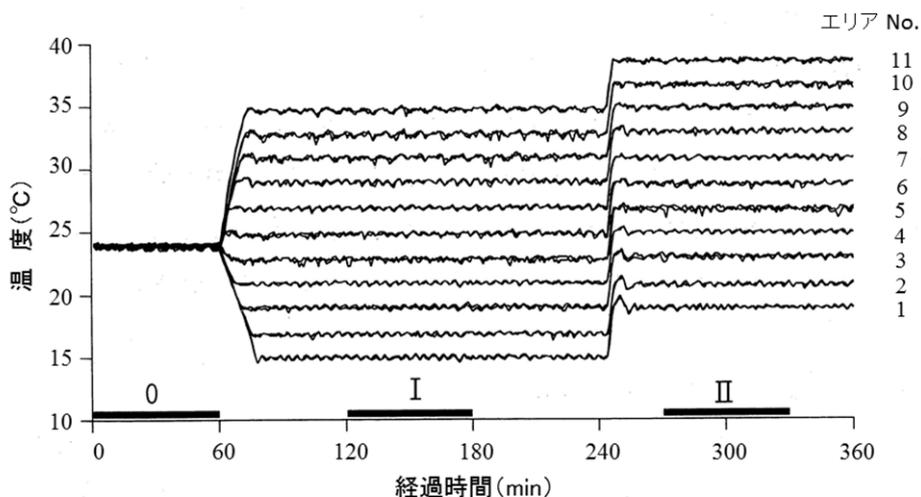
実験方法 実験前日に水槽内全体が馴致温度と等しい温度無勾配状態の中に供試魚5尾を収容して1晩放置し、供試魚に異常な行動がないことを確認した後、実験を開始した。実験水槽に供試魚を収容した後は無給餌とした。

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、次いで隣り合うエリアの差温が2℃でエリアNo.1～No.11に15～35℃の温度勾配を形成するように

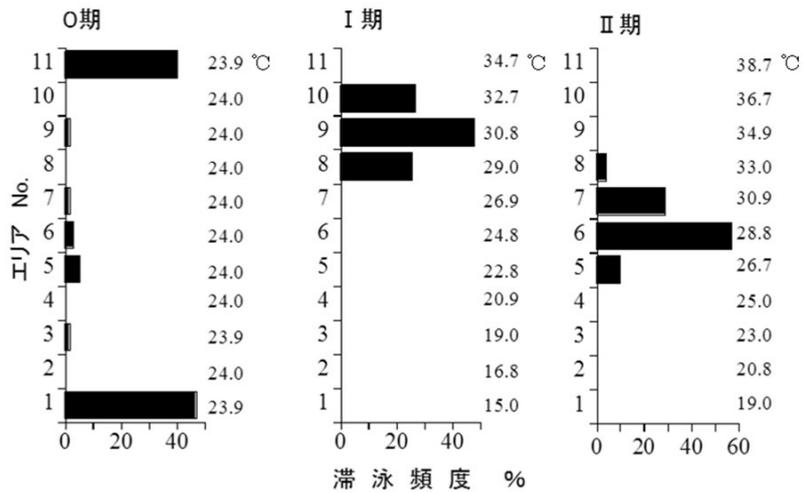
温度制御システムを作動させた。温度勾配完成直後の1時間をI期、続く1時間をII期に区分した。各期間中、供試魚が分布した位置（滞泳エリア）とその滞泳エリアの温度を1分毎に同時記録した。I、II期のそれぞれの選好温度は、各期間中に供試魚が分布した位置に相当するエリアの温度の平均値とした。すなわち各期における滞泳温度の総数は300（5尾×60回）となる。実験は各温度馴致群あたり3回行った。

結果および考察

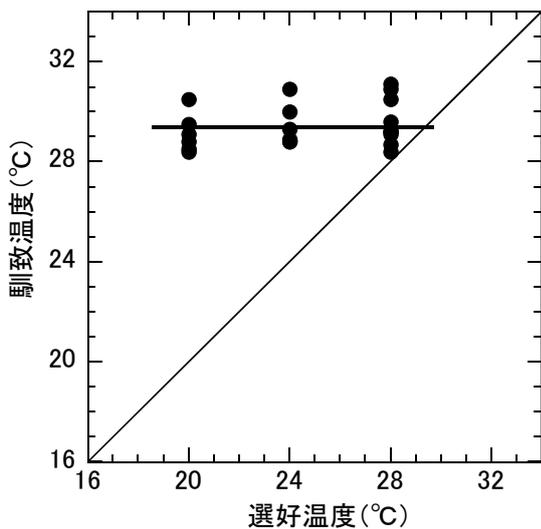
実験水槽に移されたホシギスは、一夜放置後の温度無勾配期（0期）の期間、水槽の両端のNo. 1あるいはNo. 11のエリアに偏在するケース、水槽中央付近を中心に遊泳するケース、さらに水槽全体にわたって遊泳するケースなどさまざまであった。第4図には24℃馴致群における実験結果の1例を示した。この実験の0期における供試魚は、水槽の両端のNo. 1あるいはNo. 11のエリアに偏在する傾向が認められた。0期測定終了後に温度勾配の形成が開始され、実験水槽内に安定した温度勾配が形成されると（I期）、供試魚は29～33℃付近のエリア（エリアNo. 8～10）に集まるようになった。I期測定終了後に15～35℃の温度勾配を19～39℃の温度勾配に変化させると（II期）、供試魚はI期に集中していたエリアと同じ温度のエリア（No. 5～7）へ移動した。



第3図 ホシギス24℃馴致群の温度選好実験期間中における温度推移と滞泳位置データ収録時間区分(0～II期)。
0：温度無勾配期， I：15～35℃の範囲の温度勾配期， II：19～39℃の範囲の温度勾配期。



第4図 ホシギス24°C馴致群の温度選好実験結果の1例。第3図の実験期間中における滞泳位置データ収録時間区分に対応する各エリアにおける供試魚の滞泳頻度分布と平均温度を示している。



第5図 ホシギスの馴致温度と選好温度の関係。選好温度は第4図の各温度勾配期間中における供試魚の分布位置に相当するエリアの温度の平均値とした。

第5図に馴致温度と選好温度の関係を示した。各馴致群の選好温度は20°C馴致群が28.4~30.5°C、24°C馴致群が28.8~30.0°C、28°C馴致群が28.4~31.1°Cといずれも比較的狭い範囲にあり、20~28°Cの馴致温度群間と選好温度の平均値に有意差が認められなかった ($P > 0.05$, ANOVA)。この結果からホシギスの選好温度は、馴致温度20~28°Cの範囲内で影響を受けることはないものと考えられる。温度勾配完成後の比較的短期における選好温度が馴致温度の影響を受けずにほぼ等しい値を示すといった結果は、レイクト

ラウト *Salvelinus namaycush* (McCauley and Tait, 1970)、クロソイ *Sebastes zonatus schlegeli* (土田・瀬戸熊, 1997)、ニシン *Clupea pallasii* (土田ら, 1997) などでも報告されている。

一般に、魚類は温度勾配下において長時間放置された場合比較的低い温度で馴致された群は馴致温度よりも高い温度を選択し、次第にそれぞれの魚種固有の温度（最終選好温度）を選択すると考えられている (Coutant, 1970; Reynolds and Casterlin, 1979)。また、この最終選好温度は馴致温度と選好温度が一致する温度として定義されている (Reynolds and Casterlin, 1979; Jobling, 1981; 土田ら, 1991)。ホシギスは温度勾配の完成後、馴致温度に関わりなく28~31°Cの比較的狭い範囲の温度帯を選好した。この結果からホシギスは最終選好温度が29.4°C前後にあると推定される。

日本沿岸には、ホシギスと同じキス属のシロギス *Sillago japonica*、アオギス *S. parvisquamis*、モトギス *S. sihama* が生息している。このうちシロギスとアオギスについては温度選好実験が行われている (土田, 2002)。

シロギスは北海道南部から九州、朝鮮半島南部、台湾、フィリピンに広く分布している。また、アオギスはかつて東京湾、伊勢湾、和歌山県、徳島県などの干潟とその周辺に生息していたが、近年捕獲記録がなく、それら海域では生息している可能性は極めて低いと考えられており、現在は豊前海、大分県守江湾、山口県厚東川河口、鹿児島県吹上浜などの一部に生息している絶滅危惧種 (環

境省RB；絶滅危惧IA類，水産庁RB；絶滅危惧）である（Mckay, 1992；重田・薄，2007）。また，ホシギスは琉球列島以南，台湾，東南アジア，インド，アフリカ東岸に生息する南方系のキス属の1種である。キス属3種の最終選好温度は，南方系のホシギス（29.4℃）が最も高く，次いで干潟域に生息するアオギスが28.5℃で，北方域にも生息するシロギスは25.5℃と低い値であった（土田，2002）。

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.

Kita, J., Tsuchida, S. and Setoguma, T. (1996). Temperature preference and tolerance, and oxygen

consumption of the marbled rock fish, *Sebastes marmoratus*. *Mar. Biol.*, **125**, 467-471.

McCauley, R.W. and Tait, J.S. (1970). Preferred temperature of yearling lake trout, *Salvelinus namaycush*. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **27**, 1729-1733.

Mckay, R.J. (1992). Sillaginid fishes of the world (Family Sillaginidae). FAO Species Catalogue, 14, FAO, Rome. i-vi+1-87.

Reynolds, W.W. and Casterlin, M.E. (1979). Behavioral thermoregulation and the final preferendum paradigm. *Am. Zool.*, **19**, 211-224.

重田利拓・薄 浩則 (2007). 干潟のシンボル，絶滅危惧種アオギスの生息状況と生息環境. 瀬戸内通信, **No.7**, 16-17.

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 (2014). 総説：海生動物の選好忌避行動反応に関わる実験水槽. 海生研研報, **No.18**, 3-14.

土田修二・瀬戸熊卓見 (1997). クロソイ幼魚の温度反応. 日水誌, **63**, 317-325.

土田修二・田端重夫・永井 彰 (1997). 宮城県万石浦産ニシン幼魚の温度選好と温度耐性. 東海大学紀要海洋学部, **No.43**, 117-129.

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.