

沿岸性魚類の温度選好に関する実験的研究

土田修二

Experimental Study on Temperature Preference of Japanese Marine Fish

Shuji Tsuchida^{*1}

要約: 変温動物である魚類の体温は、外界の温度とともに変化する。従って、温度は魚類の生活に大きな影響を及ぼす重要な環境要因の一つである。近年、発電所からの温排水が及ぼす影響に関連して、温度の変化が魚類に与える影響の研究が数多くなされている。しかし、日本沿岸に生息する海産魚類の選好温度に関する知見は極めて少ない。本研究では、日本沿岸に生息する水産上重要な魚類38種の選好温度を特定するとともに、選好温度が温度耐性や成長などの温度依存的な生理学的反応といかなる関係を持つかを明らかにし、さらに温度以外の要因が選好温度に及ぼす影響について把握することを目的とした。選好温度は新型の垂直・水平温度勾配装置を用いて測定した。本研究の成果を要約すると以下の通りである。

マアジ、イワシなどの比較的遊泳力のある30種では、温度勾配形成に伴う温度変化に対して、特定の温度域を好む行動が認められた。これら30魚種の最終選好温度は8~30℃の範囲にあった。一方、ヒラメ、マコガレイなどの底生性魚類では、致死温度に接触した場合に忌避的行動を示したが、特定の温度域へ移動する行動は必ずしも明瞭に認められなかった。

海産魚類の高温耐性を把握する実験は臨界最高温度試験法 (critical thermal maximum test) を参考に行った。38種の臨界最高温度 (CTM) と死亡温度 (DT) はそれぞれ26~39℃, 27~40℃の範囲にあった。各魚種で馴致温度と臨界最高温度および死亡温度との間には直線関係が認められた。また、30種の最終選好温度と、最終選好温度を馴致温度とした場合の高温側の温度耐性との間には、正の関係が認められた。これら二つの関係から、比較的簡易な方法で最終選好温度の推定が可能となると考えられた。

クロソイの日間成長率および餌料転換効率が最大となる温度はそれぞれ23℃, 20℃であり、後者は最終選好温度 (20.5℃) とほぼ一致していた。カサゴの酸素消費量は温度の上昇と共に増加し、23℃でピークを示したが、 Q_{10} は20℃以上で減少した。酸素消費量の増加率が最大となる温度 (20℃) は最終選好温度 (20.7℃) とほぼ一致した。これらの結果から、最終選好温度が生理・生化学的反応と深い係わりを持っていることが示唆された。

29℃で温度馴致されたズキは、酸素飽和度が75~200%の時は垂直温度勾配下で29~30℃を選好した。しかし、ズキの選好温度は溶存酸素量の減少に伴って急激に低下した。絶食させた飢餓状態のマアジは、非絶食群に比べて約2℃低い温度を選好した。これらの対温度調節行動は、より低い温度を選好して代謝率を低下させ、エネルギーを保持するのに有効であると考えられた。

2~8か月齢のイシダイでは、成長に伴って選好温度 (28.6~24.7℃) が低下していく傾向が認められたのに対し、8か月齢以上のイシダイは25~26℃を選好した。

これら結果から、温度に対する魚類行動の予測、選好温度と野外データとの比較、最終選好温度と成長適温の簡易的な推定について考察した。

キーワード: 海産魚類, 選好温度, 最終選好温度, 温度耐性, CTM

(2001年10月25日受付, 2002年1月15日受理)

*1 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)
E-mail: tutida@beige.ocn.ne.jp

Abstract : Body temperature of fish, the belonging to poikilotherm, varies with ambient temperature, and the temperature is one of the most important environmental factors to affect various life processes in fish. In recent years a number of studies have focused on the responses of fish to temperature changes, particularly in relation to ecological assessments of thermal discharge from power plants. But, there have been only a few data available on temperature preference of marine fishes inhabiting the coastal waters of Japan. The present study was carried out to clarify the temperature preferences in 38 commercially important species. In addition, the author investigated the interactions between the temperature preference and the thermal physiology, and the effects of other factors on the temperature preference. Preferred temperatures were determined by means of a newly developed set of vertical and horizontal temperature gradient tanks. The results of the present study are summarized as follows.

Each of thirty species of pelagic fishes, including horse mackerel, anchovy and so on, showed a strong tendency to concentrate at a specific (preferred) temperature of a temperature gradient. The final temperature preferendum determined in 30 species of these marine fish ranged from 8 to 30°C. On the other hand, bottom-dwelling fishes including flounder, rockfish and so on, showed less clear temperature preference behavior, though they avoided the higher lethal temperature level of the temperature gradient.

Upper temperature tolerance of marine fish was evaluated on the basis of critical thermal maximum (CTM) test. The ranges of CTM and DT (death temperature) determined in 38 species were respectively 26-39°C and 27-40°C. A linear relationship was found between CTM or DT and acclimation temperature for individual species. Another highly positive correlation was noticed between the final preferendum and the values of CTM or DT at acclimation to final preferendum in 30 species. The combination of these two relations will make it feasible to estimate the final preferendum of a new species through much simpler CTM test.

The highest daily growth rate and food conversion efficiency of young Schlegel's black rockfish, *Sebastes shlegeli* were found each at 23°C and 20°C, and these temperatures coincided closely with the final preferendum of 20.5°C.

Oxygen consumption rate of marbled rockfish, *Sebastes marmoratus* increased with temperature to 23°C, but Q_{10} declined above 20°C. The final preferendum of 20.7°C corresponded well to the temperature at which oxygen consumption rate turned to gradual lessening while the temperature was approximately 20°C. These results suggest that the final preferendum is closely connected with biochemical and physiological processes.

The preferred temperature of sea bass *Lateolabrax japonicus* acclimated to 29°C was 29-30°C in a vertical temperature gradient when oxygen level was maintained between 75 and 200%. But the preferred temperature of sea bass decreased rapidly with decrease in dissolved oxygen. The preferred temperature of the starved group of young house mackerel *Trachurus japonicus* was declined by about 2°C as compared with that of the fed group. The thermoregulatory behavior of these fish may be effective in sparing the endogenous energy reserves.

Two to eight months old striped beakperch, *Oplegnathus fasciatus*, preferred a progressively cooler temperature from 28.6 to 24.7°C as they grew. Fish older than 8 months preferred a narrower temperature range of 25 to 26°C.

Based on these results, the author discussed 1) accurate predictions of fish behavior to temperature changes, 2) the relationship of preferred temperature and field data, and 3) easy determinations of final preferendum and optimum growth temperatures.

Key words : Marine fishes, preferred temperature, final preferendum, temperature tolerance, critical thermal maximum, CTM

緒 言

変温動物に属する魚類の多くは、その体温が周辺の環境水温とほぼ一致し、それに応じて変動する。そのため、環境水温の急激な変化は、魚の死亡といった極端な影響ばかりか、正常の生活が行われる温度範囲内においても種々の生理機能や生化学反応に著しい変化を引き起こす。例えば、細胞分裂や発生の速度、心拍数、鰓蓋運動、酸素消費量、成長速度などは温度変化によって大きく影響を受ける。また、魚体内部では温度の変化による生理機能や代謝速度の変化などに対する補償的な反応もおこり、内部の恒常性を維持するための機構が働くほか、自身も体温の変化を防ぎ、これを最小限にするための行動を起こすこともある。さらに、水温に対応した行動が漁場形成や回遊経路などの分布や生態的にも大きな役割をはたし、このため水温の時空間的分布が漁場の形成や発見に有力な手掛かりを与えるものとなっている。このように、温度は魚類の生活にとって支配的な環境要因の一つであり、温度に対応する魚の行動や生理学的あるいは生化学的反応に関する基礎的知見の集積とその解明は、生物学的に、また応用研究としても極めて重要であると考えられる。

大容量の水域では比熱が大きいという水の特性と相まって、陸上に比べ安定した温度環境を形成している。このため、昼夜間あるいは季節による水域の温度の変化は、空気中の温度変化よりゆるやかである。しかし、近年、文明の発達により人間活動が自然に対してさまざまな影響を与えつつある。1970年代頃から各地に建設された大規模な火力発電所や原子力発電所もその一つである。これらの発電所は冷却水として海水を利用するため、取水された海水は温められ温排水として放出される。また、LNG気化器からは取水海水が冷やされ冷排水として放出される。そして、これらの産業排水による沿岸域の局所的な温度変化が水産生物にいろいろな影響を及ぼすと考えられ、このような現実を明確に把握しておくことが産業立地や自然保護、水産などの面からも重要と考えられる。一方、漁業に関わる国内・外のさまざまな情勢の変化に伴い、栽培漁業や新しい養殖対象種および養殖技術開発の必要性が増している。これらの技術開発のうち、特に種苗生産や育成管理などにおいて、対象魚種の温度に関する知見は極めて重要な要件の一つでもある。このような状況のもとで

沿岸性魚類の温度に対する行動や生理学的あるいは生化学的反応に関する基礎的知見の集積は急務となり、特に遊泳によって移動可能な魚類の対温度行動の正確な把握は緊急度を増している。

温度に対する魚類の行動については、これまで数多くの研究が行われており、それに関する総説なども多く報告されている。特に、1970年代に発電所の温排水に関連した魚への温度影響に関するシンポジウムが行われ、その数も増した(Gibbons and Sharitz, 1974; 有賀ら, 1975; Esch and McFarlane, 1976; Richards *et al.*, 1977など)。

温度に対する魚の行動を知るための方法はいろいろ工夫されているが、大きくは野外における行動観察・記録と実験室的観察・測定に分けることができる。

野外における行動の観察・記録には、漁獲物とその漁獲された場の水温との関係から各魚種の適水温範囲などを求める方法(宇田, 1963)、潜水観察(Ehrlich *et al.*, 1979b)、水温や水深情報を得ることができる発信器を魚に装着あるいは挿入して、その行動を追跡するバイオテレメトリー手法(Coutant, 1975; Kelso, 1976; 石塚・中村, 1979)、および魚群探知機を用いて魚群の分布および量的規模を把握する方法などが用いられている。しかし、野外における調査研究では水温変化に対する魚群の反応あるいは生息分布などマクロな側面がとらえられるが、これには水中の物理化学的要因や生物学的要因が多く含まれ、またそれらが複雑に関与していることから、詳しい解析が困難な場合が多い。

一方、室内実験では要因を単純化することができ、温度に対する魚の行動を生理学的反応や生化学的反応と関連して検討することができる。初期の研究では魚の行動観察および記録を、長時間にわたり目視によって行っていたが、近年、ビデオカメラやフォトセンサーなどの光学機器の利用や(Reynolds and Casterlin, 1976; 松田ら, 1984; 兼広ら, 1985; 有元・井上, 1985; Birtwell and Kruzynski, 1987)、画像解析による対象魚の位置測定の自動化などハード面での進歩が著しく、これらが行動観察および解析をより容易にし、温度に対する行動の研究の進展にも大きく貢献している。

McCauley (1977) は温度に対する行動の観察・測定方法を10通りに分類した。これまで用いられ

た装置はいずれも温度勾配が装置の主体であり、空間的勾配と時間的勾配とに分けられる。空間的勾配はさらに、水平温度勾配と垂直温度勾配に分けられる。これらは、いずれも温度勾配を作り、供試魚に至適温度を選択させる方法、いわゆる至適環境選択法により観察するものである(中山, 1981)。McCauleyの分類のうち、2室装置、放射型装置、水平的勾配装置、横軸勾配装置、十字型装置、垂直的勾配装置などには至適環境選択法が用いられている。時間的勾配装置を活用した装置もかなり使用され、電子式シャトルボックスやドーナツ型時間的勾配装置などがある。これら時間的勾配装置は、オペラント行動観察法による研究を基礎にしている。いずれの装置もそれぞれ長短があり、魚の行動あるいは生態的特性に合わせて用いる必要がある。

温度勾配中に置かれた魚の多くは至適な温度環境を求めて、あるいは有害な温度環境を忌避しようとして移動を行う。魚のこうした行動によって選択された温度は、普通『preferred temperature』、時として『selected temperature』と呼ばれ、温度勾配中で魚が分布した温度の最頻値、中央値、平均値などで表されている(Reynolds, 1977; Giattina and Garton, 1982など)。また、その行動は成長や代謝などの生理学的により良い温度条件に体温を維持するのに役立つものと考えられ、行動的体温調節(behavioral thermoregulationあるいはbehavioral temperature regulation)とも呼ばれている(Bligh and Johnson, 1973; 中山, 1981)。

本論文では、温度勾配下で魚がある温度域を“prefer”する、すなわち選び好むと言う意味でこの行動を『温度選好』、魚が選び好んだ温度を『選好温度』と呼ぶことにする。また、魚が有害な温度を忌避し移動する行動およびその温度を、それぞれ『温度忌避』『忌避温度』とする。

一般に、生体内で行われる化学的反応のほとんどすべては酵素によって触媒されており、酵素による反応速度は大きく温度に依存している。特に魚類などの変温動物では、体温は外界温度にほぼ等しく、あらゆる生体内の反応は環境水温の影響を強く受ける(板沢, 1977)。このことから温度選好が、生化学的反応や体内の生理学的反応と深い係わりを持つことが考えられる。Brett(1971)はベニザケの選好温度や温度耐性、および水温による代謝、遊泳速度、成長、摂餌、消化

速度、心拍数など生理学的パラメーターの変化を検討し、各パラメーターの最適水温が15℃付近にあることを明らかにした。さらに、湖の水温が成層状態となる時期のベニザケの鉛直移動を、生理学的な温度調節機構から論じている。

魚の温度耐性を把握することは、選好温度や忌避温度を理解する上に役立つことと考えられる。温度耐性と温度選好との関係については、選好温度が高温側限界と低温側限界の中央値でなく、高温側の限界温度により接近しているという報告がある(Reynolds *et al.*, 1976; Reynolds and Casterlin, 1979; Reynolds and Casterlin, 1980; Giattina and Garton, 1982)。また、Jobling(1981)は既往知見を整理して選好温度と温度耐性との間に直線的関係を認め、温度を介しての行動と生理学的反応との密接な結び付きを指摘している。

温度に対する生理学的あるいは生化学的反応は、前歴の温度条件(馴致温度; acclimation temperature)によって異なる。同様に、温度選好や温度忌避といった行動も魚種によって異なるだけでなく、馴致温度によっても異なる(Doudoroff, 1938; Fry, 1947; Reynoldes and Casterlin, 1978など)。この他、低酸素、塩分、光条件などの環境要因、および成長段階、群れ、飢餓条件などの生物学的要因によっても選好温度が変化する場合のあることが報告されている(Javaid and Anderson, 1967b; Barans and Tubb, 1973; Otto *et al.*, 1976; McCauley and Read, 1973; Kwain and McCauley, 1978; Reynolds and Casterlin, 1978; Coutant, 1987など)。

このように魚の温度に対する行動に関する研究は多方面から取り組まれているが、その多くは淡水魚を対象としており、海水魚、特に日本沿岸に生息する魚類に関する基礎的知見は極めて不十分である。本研究は日本沿岸に生息する水産上重要な魚類38種を対象に、温度選好や温度忌避などの温度に対する行動を明らかにすることを目的とした。これら魚類の行動の測定には、垂直的および水平的温度勾配を、高い精度で温度制御可能な新型の装置を設計・製作して用いた。筆者は、温度勾配下における各魚種の行動を明らかにするとともに、これらの結果をふまえて魚類の行動と温度耐性や成長適温などの生理学的反応との関係を検討した。さらに、温度以外の溶存酸素量や飢餓状態が選好温度に与える影響を把握する実験を行った。

海産魚類の温度選好

新型の温度勾配試験装置を用いて海産魚類38種の選好温度を特定するとともに、温度勾配下における行動反応および選好温度と馴致温度との関係について検討した。

1. 試験装置の概要

温度選好実験には、垂直および水平方向に異なる温度層を形成することができる垂直温度勾配反応試験装置と水平温度勾配反応試験装置を設計・製作^{*2}して用いた（土田・深滝，1991；Kita *et al.*，1996）。各装置の概要を以下に述べる。

1) 垂直温度勾配反応試験装置

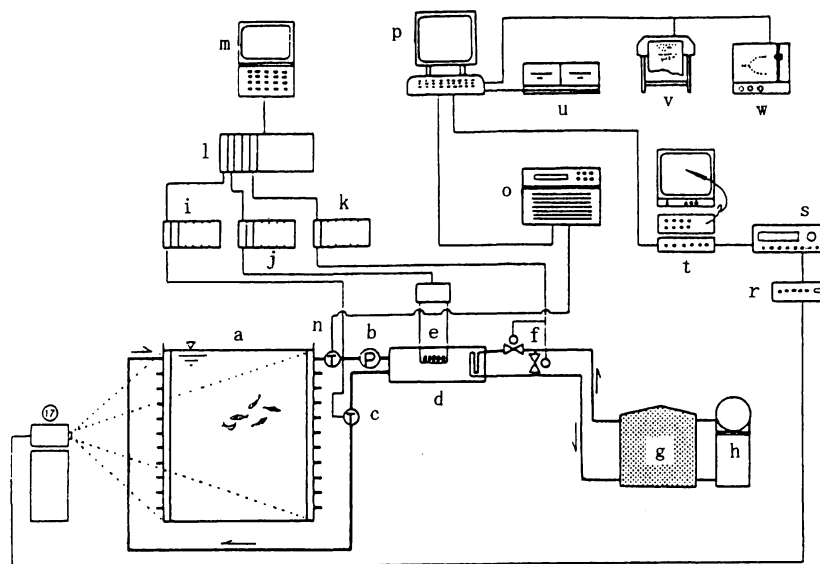
垂直温度勾配反応試験装置（以下、垂直温度勾配装置）は11の異なる温度に調節した海水を層状に試験水槽内に注入し、垂直方向の温度勾配を形成することができる。本装置の構成を第1図に示す。この試験装置の主要部分は、試験水槽部、温度自動制御部、観察記録部からなる。

(1) 試験水槽部

試験水槽の試験区内部の大きさは、幅1,500mm×奥行き600mm×水深1,650mmで、試験区内の海水容量は約1,500Lである（付図1）。水槽の前側面と背側面は耐圧ペアガラス、左右両側面と底面は厚さ30mmの硬質ビニル板からなり、塩化ビニル被覆仕上げの鋼板製フレームによって支持されている。水槽の上面は開口しており、取り外し可能なアクリル製の蓋が設けられている。

水槽の左側面内側には、幅100mm×奥行き600mmの水平隔板で仕切られた11段の海水吐出ヘッダー区が、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区が、それぞれ設けられている（第2図）。各ヘッダー区は上下幅は150mmで、その中央には各1対の吐出管、もしくは吸引管が水槽外部から接合されている。両ヘッダー区の間、すなわち試験区内の海水の整流状態を保持するために、両ヘッダー区と試験区との間は塩化ビニル製の多孔板で仕切られている。

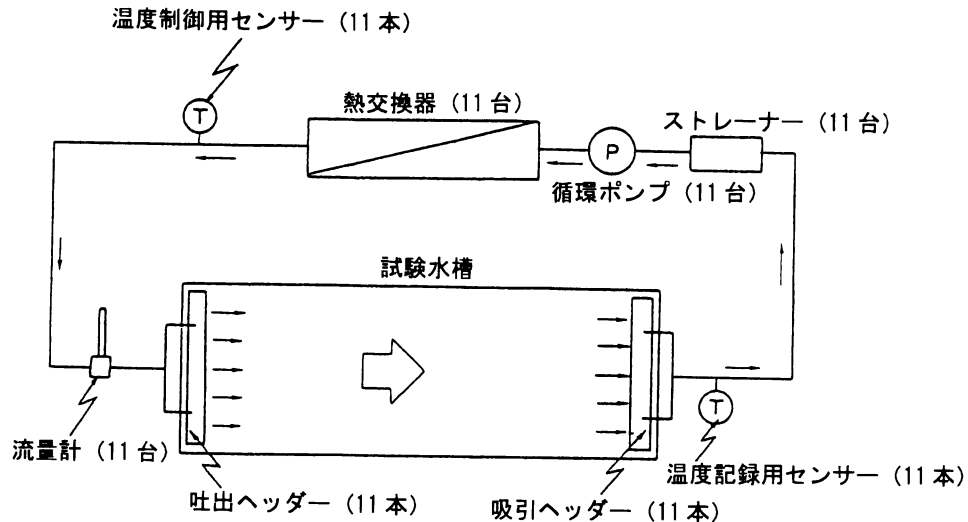
温度調節された海水の循環回路は、それぞれ設定温度に対応できる独立の11系統とした（第2図）。



第1図 垂直温度勾配反応試験装置の構成模式図

a; 試験水槽, b; 循環ポンプ*, c; 制御用温度センサー*, d; 熱交換機*, e; 電気ヒーター*, f; 電磁弁*, g; プライントラック, h; チラーユニット, I; 温度変換器, j; リレーボックス, k; リレーボックス, l; フィールドコントロールユニット, m; オペレーターコンソール, n; 記録用温度センサー, o; 温度記録計, p; パーソナルコンピュータ, q; ビデオカメラ, r; ビデオタイマー, s; ビデオレコーダー, t; ビデオデジタルライザーシステム, u; ディスクドライブ, v; プリンタ, w; プロッタ
[*をつけた機器は×11台を示す]

*2 垂直温度勾配反応試験装置および水平温度勾配反応装置の設計・製作等の検討は、当研究所古川 厚元常務理事、深滝 弘元中央研究所長、故中谷 茂元中央研究所長代理、柏木正章総括研究員（現在三重大学教授）、須藤静夫主任研究員（現在中央研究所長代理）、(株)アクアレックスらの委員によって行われた。



第2図 垂直温度勾配反応試験装置の海水循環回路 (平面図)

試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、再び試験水槽内に吐出される。各系統における最大流量は25 L/分である。

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800~1,000lux、水槽前面のガラス面上で50~120luxであった。

(2) 温度自動制御部

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、試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段の棚に收容され、間仕切り壁を貫通するパイプ類によって試験水槽と接続している(付図2)。

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(付図3)、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、回路ごとに独立に設定可能な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・オフ方式が採用されている。

(3) 観察記録部

試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、試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、すべて試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(付図3、4)。

(4) 試験装置の性能

試験水槽内に供試魚を收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試験を行った。この性能試験では、試験装置の水温自動制御システムを運転しながら、試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。これらの結果から、深さ165cmの水槽を15cm間隔で1°Cずつ異なる11層の温度勾配を各層内の温度の分散を標準偏差で0.2°C内で形

成することができることが示された。

(5) 既往試験装置との比較

Brett (1952) は、垂直的な温度勾配を形成させた試験水槽内において、太平洋産サケ属5種の稚魚を対象にして、それらの最頻遊泳層を通じて各魚種の選好温度を把握する試験を行った。彼が用いた試験水槽はガラス板と鉄枠で構成された箱型のもので、その大きさは高さ 914mm、長さ914 mm、幅 508mmであった。この水槽の底層部から冷水を注入し、表層部からオーバーフローさせるとともに、水槽内壁の近くに熱交換用の銅管製の細い螺旋状コイルを設けて、その管内に表層部から底層部方向へ温水を通し、これらの槽内注入冷水と細管内通過温水の温度と流量を適宜調整することによって、所定の温度勾配を得るといった方式を採用している。

Brettの用いたものとほぼ同形同大の試験装置が、原型を部分的に改良した程度のみで、カナダの研究者によって、yellow perch (*Perca flavescens*)、ニジマス (*Salmo gairdneri*)、lake trout (*Salvelinus namaycush*) などを対象にした試験にも使用された (Ferguson, 1958; Garside and Tait, 1958; McCauley and Pond, 1971; McCauley and Tait, 1970; McCauley and Read, 1973)。これらの報告で部分的な改良点として記載されているものを列挙すると、水槽を構成する材質に透明アクリル板とベニヤ板を併用した、熱交換用コイルの材質にアルミニウムを用いた、コイルの懸垂位置を上下に移動できるようにした、熱交換用コイルを複式にして、表層から底層方向に温水を通すものとは別に、底層部には冷凍用ブラインを循環させるコイルを設けた、供試魚の位置の記録用に35mmカメラを採用した、などであり、いずれも本格的な改良ではなかった。その後もカナダの研究者は、種々の大きさの箱型水槽内に熱交換用複式コイルを設けた装置を用いて、カワマス (*Salvelinus fontinalis*)、イトヨ (*Gasterosteus aculeatus*)、メダカ目2魚種 (*Fundulus heteroclitus*, *F. diaphanus*)、ニジマスを対象にした試験を行った (Peterson, 1973; Garside and Morrison, 1977; Garside *et al.*, 1977; Kwain and McCauley, 1978)。

一方、米国では円筒型の試験水槽内に垂直的な温度勾配を形成させた試験装置が採用された。すなわち、大西洋産の海産魚など13種、ニシン科の1種 alewife (*Alosa pseudoharengus*)、ボラ属の

1種 (*Mugil cephalus*)、スズキ目やコイ科の魚3種についての試験が行われた (Otto *et al.*, 1976; Wyllie *et al.*, 1976; Major, 1978; Kellogg and Gift, 1983)。また、Purcell and Shrode (1983) は幼稚魚用の小型試験装置について報告した。これらの装置もまたすべて試験水槽内に熱交換用コイルを設置したものであった。

本研究で新たに設計・製作した装置は箱型の試験水槽の大きさでは最大であり、円筒型のものを含めても最大である。また、今回の装置の構造と機能上の著しい特徴は、温度勾配形成のための温度制御方式が既往の装置とは全く異なっている点である。既往装置の大部分では、試験水槽の底層部から冷水を注入して表層部から排出するか、あるいは表層部から温水を注入して底層部から排出するかの、いずれかの方式が採用されている。したがって、試験水槽内では常に垂直方向に弱い流れが存在していた。また、試験水槽の内壁面近くには、螺旋状もしくは階段状に熱交換用コイルが配管されていた。このコイルには単式の場合と複式の場合とがあり、単式の装置ではコイルの管内を温水、もしくは冷水あるいは冷却剤が、前述の水槽内の微弱な流れと対向する方向に貫流していた。複式の装置では、表層部から底層(もしくは中層)部までのコイル内を温水が貫流するとともに、それとは別に、底層部のコイル内を冷水あるいは冷却剤が循環するか、底層部から表層(もしくは中層)部までのコイル内を冷水あるいは冷却剤が貫流するという方式が採用されていた。試験水槽内への注水についての記述が全く見当たらない一部の装置では、止水条件下で複式の熱交換コイルを機能させていたものと推測される。

いずれにしても、既往の装置では全く例外なしに、試験水槽の内部に管型の隔壁式熱交換器が設置され、その管内を貫流する媒体、ならびに試験水槽内へ直接注入される淡水もしくは海水の温度と流量を制御することによって、垂直的な温度勾配が形成されていた。そのため試験水槽内の構造が複雑化し、さらに加熱・冷却用コイルと供試魚との接触防止とか、試験水槽内に設置する機器が供試魚の行動観察の障害とならないようにするための措置が必要となり、そのことがまた試験水槽内の構造を一層複雑にしていた。

一方、本研究で設計・製作した装置は、前述のとおり、安定した温度勾配条件を確保する目的で、それぞれ独立した11系統の温度自動制御用循環回

路を採用し、これらの回路は全て試験水槽の外部に設置された。その結果、試験区内の構造は極めて単純化し、供試魚の遊泳行動に対して複雑な影響を与えるおそれが解消された。また、供試魚観察の障害となるものがほとんどなくなったため、水槽前面に設置したテレビカメラによる遠隔観察も容易であった。さらにまた、多くの既往装置のように、垂直方向に流れが発生することも回避され、水平方向にのみ微弱な準層流が継続して流れるという、表・中層性の供試魚類にとって、より望ましいと考えられる試験条件を確保することができた。

2) 水平温度勾配反応試験装置

水平温度勾配反応試験装置（以下、水平温度勾配装置）は、初め5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に注入して、再び各熱交換器によってそれぞれ温度制御した後水槽内に戻す循環方式とした（旧型）。その後、さらに水平的な温度勾配の精度を上げるために、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注入する方式に改良した（新型）。

水平温度勾配装置の構成を第3図に示す。新旧両試験装置の主要部分は、試験水槽部、温度自動制御部、観察記録部からなる。各部の概要は、次

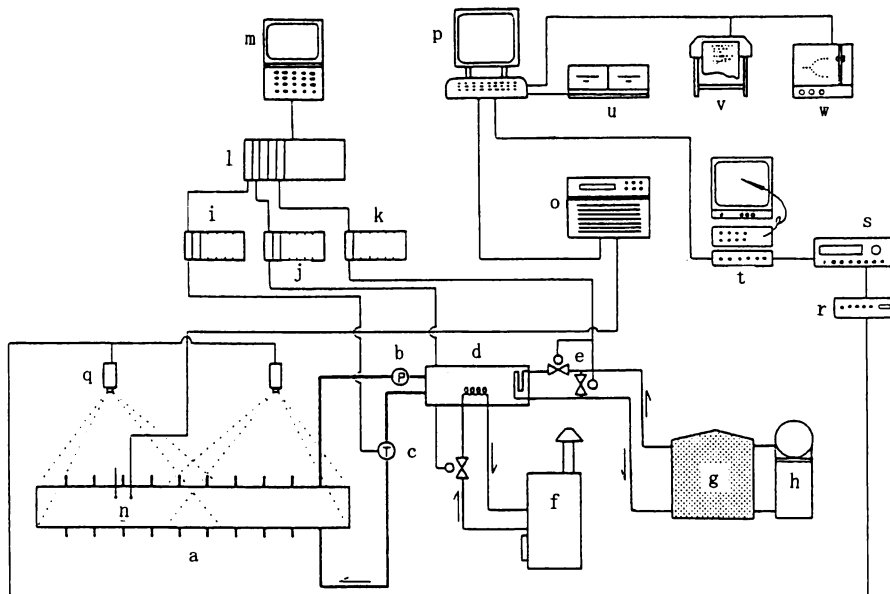
のとおりである。

(1) 試験水槽部

旧型水平温度勾配装置の試験水槽の内寸は長さ4,000mm×幅220mm×深さ100mmであり、また新型水平温度勾配装置の試験水槽の内寸は長さ4,400mm×幅200~300mm、深さ100~150mmである（付図5）。新型水平温度勾配装置の試験水槽の幅および水深は供試材料の大きさに合わせて変えることができる。試験水槽は厚さ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。試験水槽の長辺に添った両側壁に、それぞれ5あるいは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試験水路の間は、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。こうした仕組みは、垂直温度勾配装置の温度調節された海水循環回路を、水平方向に5あるいは11系統配置したことに相当する。

試験水槽内から排出された海水は、各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、再び試験水槽内に注入される。各系統における最大流量は16L/分である（第4図）。

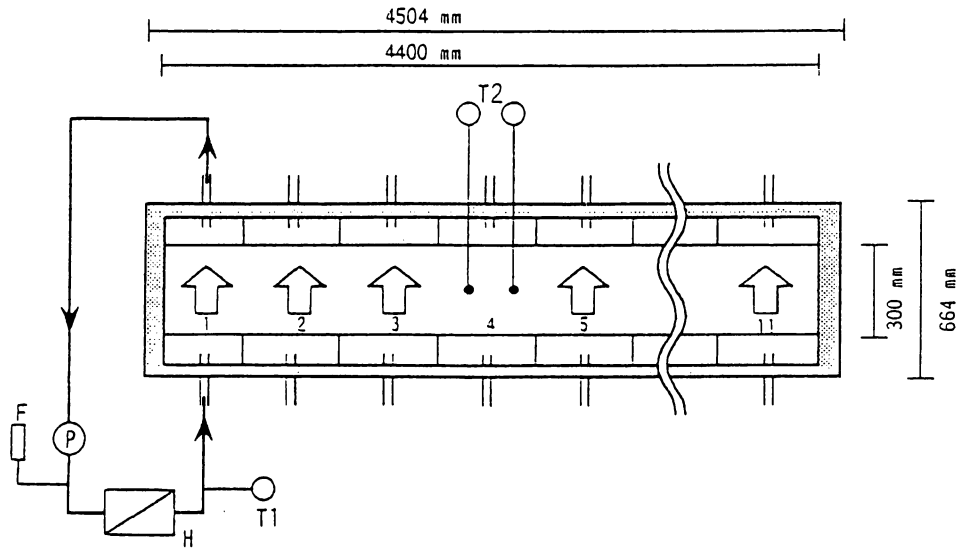
試験水槽の上（水面から2.0m上方）には5対の白色蛍光灯（40W）計10本が吊り下げられており、



第3図 水平温度勾配反応試験装置の構成模式図

a; 試験水槽, b; 循環ポンプ*, c; 制御用温度センサー*, d; 熱交換機*, e; 電磁弁*, f; ボイラー, g; プライントラック, h; チャーユニット, i; 温度変換器, j; リレーボックス, k; リレーボックス, l; フィールドコントロールユニット, m; オペレーターコンソール, n; 記録用温度センサー, o; 温度記録計, p; パーソナルコンピュータ, q; ビデオカメラ, r; ビデオタイマー, s; ビデオレコーダー, t; ビデオデジタイザーシステム, u; ディスクドライブ, v; プリンタ, w; プロッタ

[*をつけた機器は×11台を示す]



第4図 水平温度勾配反応試験装置の海水循環回路（平面図）
T1：制御用温度センサー，T2：記録用温度センサー，
H：熱交換機，P：循環ポンプ，F：流量計

散光板を通過した後の光の照度は、水面上で約300luxである。

(2) 温度自動制御部

温度制御用の機器を設置した機械室は、試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試験水槽と接続している（付図6）。

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制御用の温度センサー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（付図3）。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。なお、旧型水平温度勾配装置では隣り合う注入区の仕切りに多孔板を用いて海水を混合して、隣り合う注入区の温度差を小さくした。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水温センサー（白金抵抗体温度計）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ことで行った。

(3) 観察記録部

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。試験水槽の直上には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。これらは、垂直温度勾配装置と同様である。また、旧型水平温度勾配装置では試験水路内を30エリアに分割して、各エリア境の水槽底面に供試魚の行動観察用白色マーカーを付けるとともに、各エリア中央に熱電対温度計を設置した。新型水平温度勾配装置では試験水路内を11エリアに分割して、各エリア2箇所（合計22箇所）にシース型白金抵抗体温度計を設置した。

(4) 試験装置の性能

試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試験を行った。この性能試験では、試験装置の水温自動制御システムを運転しながら、試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。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°C以下であった。

(5) 既往試験装置との比較

既往の水平的な温度勾配水槽には、基本的に水槽内部に設置された加熱あるいは冷却源によって淡水あるいは海水の温度調節を行う方式と、外部に設置された熱源によって水槽を段階的に加熱して、その熱伝導によって水槽内に温度勾配を形成する方式とがある。Javaid and Anderson (1967a) が製作した装置は、冷水を試験水槽の一端から注入して緩やかな流れを作り、金属製の水槽底部を加熱することによって温度を徐々に上げて水平的温度勾配を形成した。試験水槽の大きさは長さ1,524mm、幅76mm、深さ40mm (水深約2cm) であった。水槽壁面は厚さ6mm のプラスチック板、底は厚さ12mmの銅板で500Wヒーター6個が均等に設置されている。水槽底面と直上の温度差を最小限にするため、底面に幅5×高さ4mmの銅製細棒10本を5mm間隔に設置している。水槽端から注入された冷水は約0.5mm/secの速さで流れる。このように、試験水槽一端から冷水を注入し、試験水槽底部を加熱することで水平温度勾配を形成する方式は、多くの研究者によって採用されており、主に、加熱源に赤外線ランプを使用する装置 (Vlaming, 1971; Peterson and Schutsky, 1976; Hall *et al.*, 1978) と、電気ヒーターを使用する装置 (Sullivan and Fisher, 1953; McCauley and Pond, 1971; Barans and Tubb, 1973; Richards and Ibara, 1978; Kilambi and Galloway, 1985; Heath *et al.*, 1993)、および試験水槽底部から温水を注入する装置 (Hesthagen, 1979) とに分けられる。逆に、試験水槽一端から温水を注入して、その温水を試験水槽底部に設置した冷却プレートによって徐々に冷却して水平的温度勾配を形成する装置もある (Kellogg and Gift, 1983)。また、Ehrlich *et al.* (1979a) は、水槽両端に冷却と加熱槽を作り、そこに設置された加熱用ヒーターと冷却コイルによって温度制御を行うとともに、水槽両端から中央までの2つの熱交換器を底面に設置して水平的温度勾配を形成した。垂直的成層を防ぐために通気を行うとともに、表層と底層に12対の干渉板を取り付け、11温度区画に分けた。試験水槽の大きさは長さ3,600mm、幅60mm、深さ60mm (水深約2cm) であった。さらに、Doudoroff (1938) およびWallace (1977) は、試験水槽を魚が通過可能な8

～10室に区分して、各室に冷水あるいは温水を注入・排水することによって水平的温度勾配を形成する方式の装置を製作した。

今回の装置の構造と機能上の特徴は、温度勾配形成のための温度制御方式が既往の装置とは全く異なっている点である。既往装置の大部分では、試験水槽内に注入した試水を長辺方向に流し、底層部から加熱する方式が採用されていた。また、水平的な温度勾配を形成するため4～23区画に分け、各区画を供試魚が通過できるような仕切り板を取り付け、隣り合う区画間での対流を防ぐとともに、試験水槽内に曝気を行い垂直方向の温度成層を防いでいる。また、水槽底部あるいは下方に加熱あるいは冷却源を設置しており、これら熱源に直接供試魚が触れないようにするため、ナイロンスクリーンの設置や砂を敷きつめている。この為、試験水槽内は複雑化すると共に、供試魚の行動に影響を与える可能性も考えられる。

一方、本研究で新たに設計・製作した装置においては、前述のとおり、安定した温度勾配条件を確保するために、それぞれ独立した5あるいは11系統の循環回路方式を採用し、これらの各回路の温度自動制御設備は全て試験水槽の外部に設置した。その結果、試験水槽内は常に温度調節された海水が注入され、直ちに排出されたのち再び温度調節されることから、安定した水平温度勾配を形成することができた。また、試験区内の構造が極めて単純化され、曝気や仕切り板による供試魚の遊泳行動に及ぼす複雑な影響を解消することができた。

2. 供試魚

実験に用いた魚種の履歴と使用した試験装置を第1表に示す。供試魚は日本沿岸に生息する産業的に重要な魚類、計38種である。供試魚は、海洋生物環境研究所中央研究所 (千葉県御宿町) で産卵孵化しその後養成飼育したもの、卵あるいは幼稚魚で入手してから数週間から数ヶ月間養成飼育したもの、および千葉県内の漁港で幼稚魚を採集した後数週間から数ヶ月間養成飼育したものである。養成期間中は原則として温度調節を行わなかった。実験に先立ち、供試魚は温度馴致用水槽 (500 L) に移して、当該種の生息水温範囲を考慮した固定温度条件下で少なくとも2週間以上にわたり温度馴致を行った。

温度馴致期間中の飼育水は、当研究所の濾過海

第1表 供試魚の履歴と使用装置

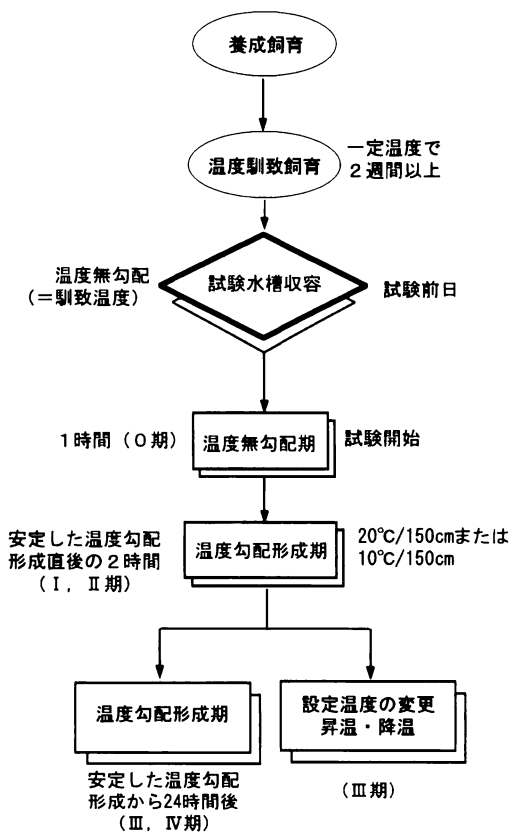
魚種名	供試魚の入手先	平均体長 (cm)	馴致温度 (°C)	使用装置
ニ シ ン <i>Clupea pallasii</i> Valenciennes	岩手県栽培漁業センターより発眼卵入手	7.0	10, 14, 17, 20	V
マ イ ワ シ <i>Sardinops melanostictus</i> (Temminck et Schlegel)	茨城県大洗沖で漁獲、活魚蓄養業者より入手	14.6	12, 15, 20, 26, 28	V
カ タ ク チ イ ワ シ <i>Engraulis japonicus</i> (Houttuyn)	千葉県館山沖で漁獲、活魚蓄養業者より入手	9.8	15, 20, 25, 28	V
ア ユ <i>Plecoglossus altivelis altivelis</i> Temminck et Schlegel	栃木県漁業協同組合種苗センターより発眼卵入手	5.7	10, 14, 18, 20	V
サ ケ <i>Oncorhynchus keta</i> (Walbaum)	北海道より発眼卵入手	10.3	10, 15, 18, 20	V
マ ダ ラ <i>Gadus macrocephalus</i> Tilesius	青森県脇野沢漁協より人工受精卵入手	7.7	10, 14, 18	V
マ ア ジ <i>Trachurus japonicus</i> (Temminck et Schlegel)	静岡県内の養殖業者より入手	7.2	25	V
シ マ ア ジ <i>Pseudocaranx dentex</i> (Bloch et Schneider)	日本栽培協会古瀬目事業場より仔魚入手	16.8	14, 17, 20, 23, 25, 26, 28	V
ブ リ <i>Seriola quinqueradiata</i> Temminck et Schlegel	三重県沖で漁獲、活魚蓄養業者より入手	10.2	15, 20, 23, 26, 29	V
コ ト ヒ キ <i>Terapon jarbua</i> (Forsskal)	千葉県夷隅川河口域にて稚魚採捕	19.0	15, 20, 23, 25, 28	V
イ サ キ <i>Parapristipoma trilineatum</i> (Thunberg)	神奈川県内の活魚蓄養業者より入手	5.8	20, 24, 28	V
ス ズ キ <i>Lateolabrax japonicus</i> (Cuvier)	当研究所で人工受精	10.3	15, 20, 23, 26, 29	V
ク ロ ダ イ <i>Acanthopagrus schlegeli</i> (Bleeker)	東京大学農学部付属水産実験所より発眼卵入手	5.3	15, 20, 23, 26, 29	V
ミ ナ ミ ク ロ ダ イ <i>Acanthopagrus sivoicolus</i> Akazaki	沖縄県平良市栽培漁業センターより受精卵入手	5.6	15, 20, 25	V
キ チ ヌ <i>Acanthopagrus latus</i> (Houttuyn)	当研究所で自然産卵	11.5	15, 20, 23, 26, 29	V
ヘ ダ イ <i>Sparus sarba</i> (Forsskal)	当研究所で自然産卵	5.9	20, 24, 28, 32	V, H2
マ ダ イ <i>Pagrus major</i> (Temminck et Schlegel)	静岡県沼津市沖で漁獲、活魚蓄養業者より入手	4.5	20, 24, 28	V, H2
チ ダ イ <i>Eynnys japonica</i> Tanaka	大分県内の蓄養養殖業者より入手	6.2	20, 24, 28	V
ク ロ メ ジ ナ <i>Girella melanichthys</i> (Richardson)	千葉県勝浦市川津漁港にて稚魚採捕	11.7	14, 20, 23, 25, 28	V
イ シ ダ イ <i>Oplegnathus fasciatus</i> (Temminck et Schlegel)	千葉県水産試験場より卵入手、当研究所で自然産卵	6.3	20, 24, 28	V
シ ロ ギ ス <i>Sillago japonica</i> Temminck et Schlegel	当研究所で自然産卵	6.7	15, 20, 25, 28	V, H
ホ シ ギ ス <i>Sillago maculata</i> Quoy et Gaimard	当研究所で自然産卵	14.0	15, 20, 25, 28	V
ア オ ギ ス <i>Sillago parvisquamis</i> Gill	当研究所で自然産卵	12.1	15, 20, 25, 28	V, H
ボ ラ <i>Mugil cephalus cephalus</i> Linnaeus	千葉県勝浦市川津漁港にて稚魚採捕	3.6	15, 20, 25	V
ハマフエフキ <i>Lethrinus nebulosus</i> (Forsskal)	沖縄県平良市栽培漁業センターより受精卵入手	5.2	20, 24, 28	H2
ニ ベ <i>Nibea mitsukurii</i> (Jordan et Snyder)	当研究所で自然産卵	9.3	20, 24, 28	V, H2
マ ハ セ <i>Acanthogobius flavimanus</i> (Temminck et Schlegel)	千葉県大原町大原漁港にて幼魚採捕	7.9	20, 25, 28	H2
マ ゴ チ <i>Platycephalus</i> sp.	当研究所で人工受精	21.2	15	H
ア イ ナ メ <i>Hexagrammos otakii</i> Jordan et Starks	石川県で漁獲、活魚蓄養業者より入手	22.0	15, 20, 25	H2
ク ロ ソ イ <i>Sebastes schlegeli</i> Hilgendorf	秋田県水産振興センターより稚魚入手	5.2	15, 20, 25, 28	V, H
カ サ ゴ <i>Sebastiscus marmoratus</i> (Cuvier)	静岡県栽培漁業センターより稚魚入手	6.0	15, 20, 25	H2
メ バ ル <i>Sebastes inermis</i> Cuvier	当研究所で自然産卵、千葉県岩和田漁港にて稚魚採捕	5.0	10, 15, 20, 25, 28	H
ム ラ ソ イ <i>Sebastes pachycephalus</i> Temminck et Schlegel	当研究所で自然産卵	14.0	15, 20, 25	H
オ ニ オ コ セ <i>Inimicus japonicus</i> (Cuvier)	愛知県内の養殖業者より稚魚入手	19.2	15, 20, 25	H
ヒ ラ メ <i>Paralichthys olivaceus</i> (Temminck et Schlegel)	当研究所で自然産卵	8.0	15, 20, 25, 28	H
マ コ ガ レ イ <i>Pleuronectes yokohamae</i> (Gunther)	当研究所で人工受精	5.4	15, 20, 25, 28	H
カ ワ ハ ギ <i>Stephanolepis cirrhifer</i> (Temminck et Schlegel)	千葉県外房域漁港にて幼魚採捕	6.0	20, 24, 28	V
ト ラ フ グ <i>Takifugu rubripes</i> (Temminck et Schlegel)	香川県内の養殖業者より受精卵入手	6.9	20, 24, 28	V

V；垂直温度勾配反応試験装置，H；水平温度勾配反応試験装置，H2；新型水平温度勾配反応試験装置

水温度調節設備から供給される温海水（35℃）と冷海水（10℃）を混合したものを、毎時 500 L 注入した。養成飼育期間中の水温から馴致温度へ移行する際には、1～5日間をかけて緩やかに昇温あるいは降温させ、急激な温度変化を避けた。温度馴致期間中に測定した温度の標準偏差は、0.3℃以内であった。養成飼育および温度馴致期間中には、配合飼料と解凍鮮魚を混合したもの、あるいは解凍したツノナシオキアミを1日2～3回飽食するまで与えた。

3. 実験手順

温度選好実験の基本的手順を第5図に示す。実験前日に、試験水槽全体の温度を馴致温度と等しく設定し、温度無勾配状態の試験水槽内に1回の実験当たり5尾1組を移し、1晩放置した。試験水槽へ移した後は供試魚に餌を与えなかった。



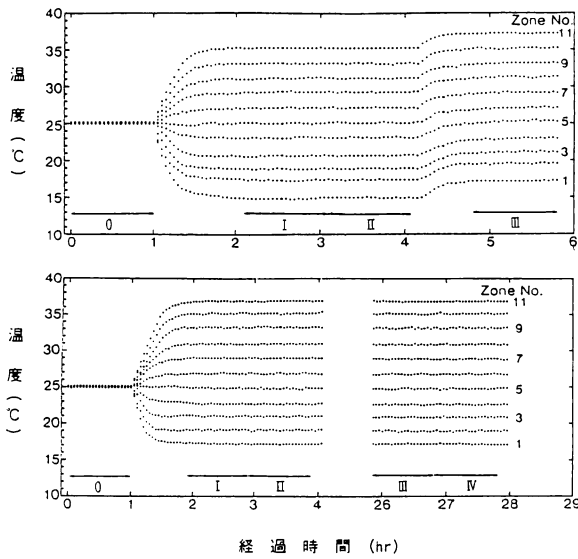
第5図 温度選好実験の基本的手順

垂直温度勾配装置を用いての実験の場合、各供試魚の遊泳位置および1～11層の各水深帯の温度を1又は3分毎にコンピュータに入力した。第6図には実験期間中の試験水槽内の温度推移とデータ取りまとめの時間区分を示す。コンピュータへの入力は原則として、実験第1日目の温度無勾配状態での1時間と、その後所定の温度勾配の形成を開始して安定した温度勾配が得られた直後の2時間、および最初の温度勾配完成から約1昼夜経過後の実験第2日目の2時間について実施し、後日これを解析した。以後、温度無勾配状態の1時間を温度無勾配期（0期）、温度勾配完成直後の2時間をさらに1時間毎に区分してI期とII期、勾配完成から約24時間経過後の2時間を同様に区分してIII期とIV期と表すことにした。ただし、魚種によっては、供試魚が特定的水深でなく、特定的水温を選好することを確かめる目的で、I、II期に続いて設定温度を変更し、新しい温度勾配下での分布状態を1時間集録して、これをIII期とした（第6図では15～35℃範囲の温度勾配を17～37℃範囲の温度勾配に変更）。例外的には、同じ目的のデータ集録を実験開始から24時間経過後に行い、これをV期あるいはVI期とした。なお、水平温度勾配装置を用いる場合も共通の手順で実験を行った。

上述したI～VIの各期において1分毎又は3分毎に入力される5尾の供試魚の分布位置（水深帯あるいはエリア）³の実測温度の数は、それぞれ合計300または100となる。所定の温度勾配が完成された後の各期における、供試魚の分布位置に相当する温度の平均値を『選好温度』とした。また、Reynolds and Casterlin (1980), Giattina and Garton (1982), 土田・深滝(1991)およびTsuchida (1995)は、温度勾配完成直後の2時間以内の選好温度を『短期選好温度 (acute or short-term preferred temperature)』、温度勾配完成から24時間以上経過後の選好温度を『長期選好温度 (long-term preferred temperature)』と呼んでいる。これらの報告に準じ、本論文においても温度勾配完成直後の2時間以内の選好温度を『短期選好温度』、温度勾配完成から24時間以上経過後の選好温度を『長期選好温度』とした。

垂直温度勾配装置を用いての実験は、マイワシ、

*3 試験水槽内で供試魚の各個体が見いだされる位置は、垂直温度勾配下では該当の『水深帯』で、また水平温度勾配下では当該の『エリア』で表した。



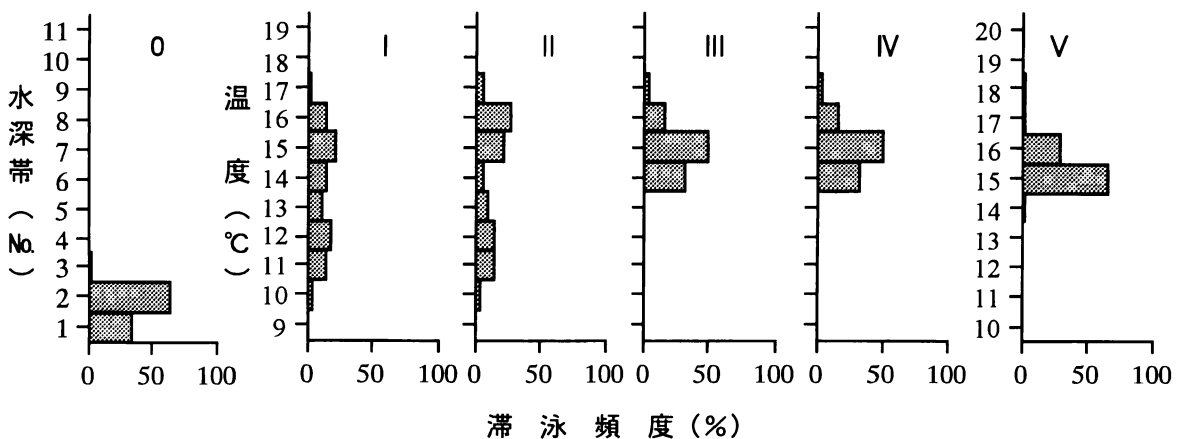
第6図 温度選好実験期間中における垂直温度勾配の温度推移と供試魚の遊泳位置データ収録の時間区分(0~IV期)

マアジ、マダイなど常に遊泳している魚種(以下、遊泳性魚類と呼ぶ)を、また水平温度勾配装置では、シロギス、カサゴ、ヒラメなど主に底生性魚類をそれぞれ対象とした。

4. 結果および考察

1) 温度変化に伴う行動と選好温度

垂直温度勾配装置を用いて行った平均体長7.0cmのニシンに関する実験結果の1例を第7図に示し



第7図 ニシンの10°C範囲の鉛直温度勾配下における温度選好実験結果の1例
14°C温度無勾配期(0期)、9-19°C温度勾配形成直後(I, II期)、9-19°C温度勾配形成から24時間後(III, IV期)および10-20°C温度勾配形成(V期)について測定

た。この実験では10°Cの範囲の温度勾配を形成した。14°Cの温度無勾配期(0期)における供試魚の遊泳位置は底層部に偏在していたが、9~19°Cの温度勾配が完成された後、供試魚は水深帯No. 2~9(温度10~17°C)の広い範囲にわたって遊泳した(I, II期)。しかし、同じ温度勾配下で24時間以上経過すると、供試魚は水深帯No. 6, 7の15°C付近の温度帯域で集中的に遊泳した(III, IV期)。さらに、設定温度を1°C上昇(10~20°C)させた場合、供試魚は1°Cの温度変化に対し変更前とほぼ同じ温度域へ移動した(V期)。

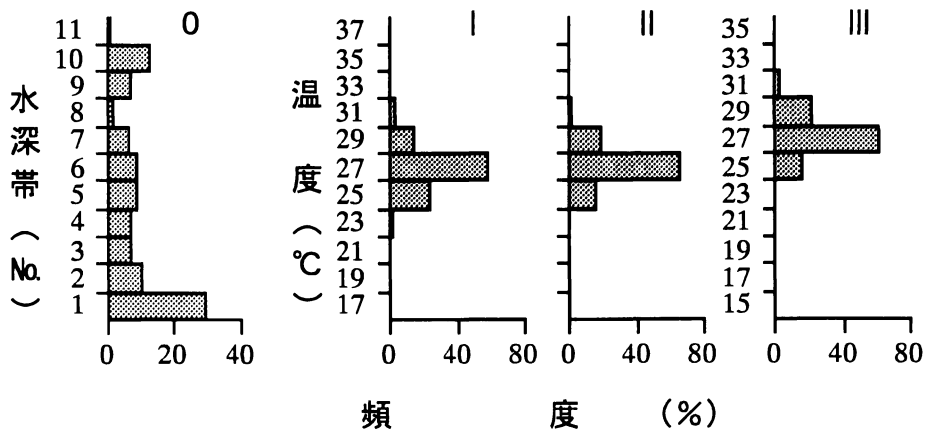
第8図には平均体長6.7cmのイシダイに関する実験結果の1例を示した。イシダイは25°Cの温度無勾配期(0期)に、試験水槽の下層~上層部の全域にわたって遊泳していた。17~37°Cの温度勾配が完成した後は27°C付近の温度域で集中的に遊泳した(I, II期)。さらに15~35°Cの温度勾配が完成した後は表層方向に移動し、やはり27°C付近の温度域を遊泳した(III期)。

第9図には新型水平温度勾配装置を用いての平均体長6.0cmのカサゴに関する実験結果の1例を示した。20°Cの温度無勾配期において供試魚は水槽の端に偏っていた。温度勾配形成に伴う温度変化に対して広い範囲にわたってあわただしく移動した。10~30°Cの温度勾配が完成されると、時間の経過とともに20°C付近の温度域に次第に集まるようになり、III期になるとこの傾向が顕著に現れ始めた。温度勾配が形成されてから24時間経過

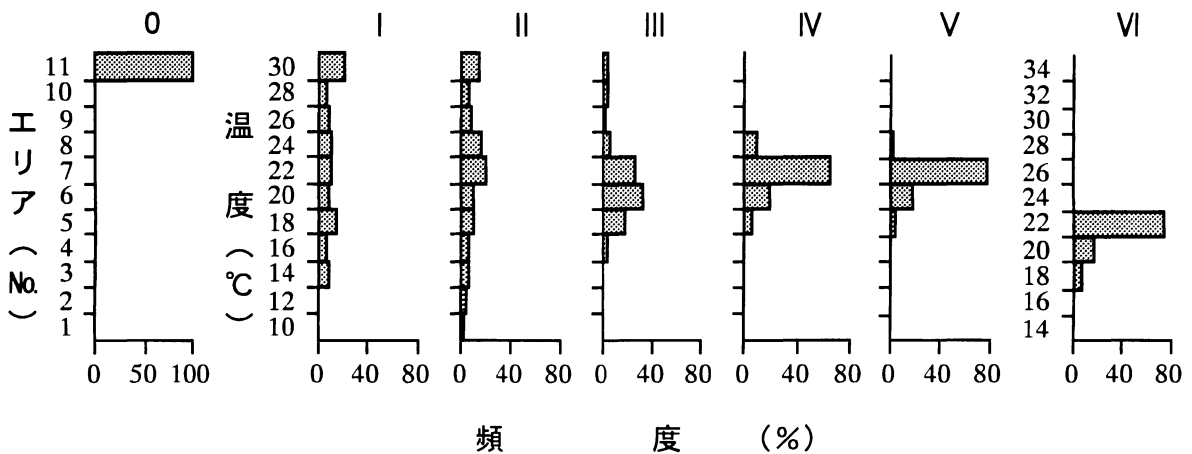
後のIV, V期になると供試魚は20~22℃付近の温度域に集中し, その位置を変化させることはほとんどなかった。当初の10~30℃の温度勾配を14~34℃の温度勾配に変化させると, IV, V期に集中していたエリアと同じ温度のエリア (20~22℃付近) へ移動した (VI期)。

第10図には平均体長5.4のマコガレイに関する実験結果の1例を示した。本種の実験には旧型水平温度勾配装置を用いた。25℃の温度無勾配期 (0期) における供試魚は, 広い範囲にわたって移

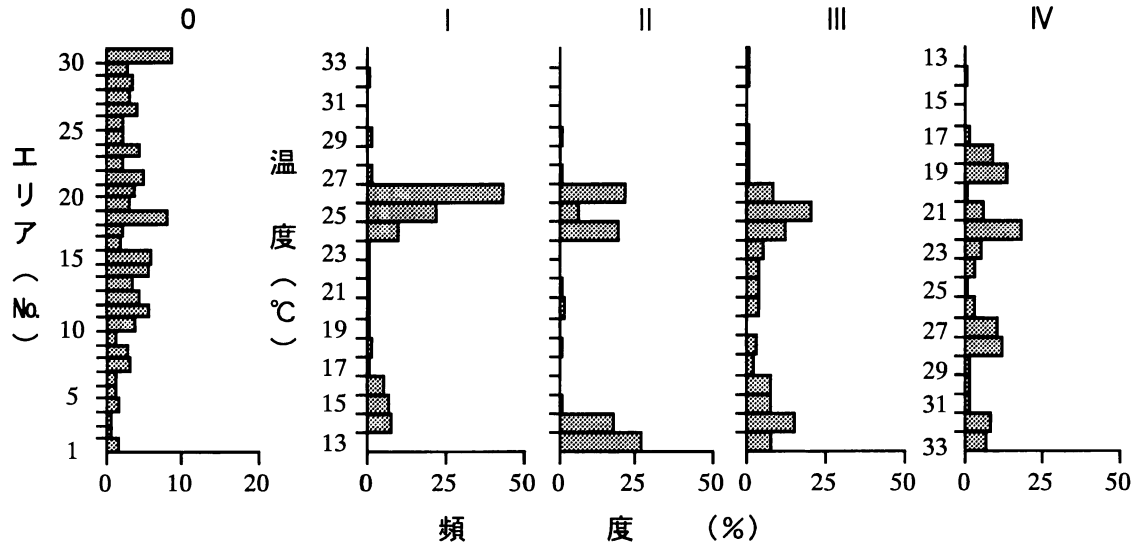
動する個体およびほとんど移動しない個体など様々であった。13~33℃の範囲の温度勾配の形成過程において, 供試魚は向きを頻繁に変える行動や潜砂的行動を示すなどの変化が認められ, 温度変化を感知しているものと推察された。しかし, 温度勾配が形成された直後 (I, II期) は, 特定の温度範囲に留まることがなかった。こうした行動は各実験で認められた。また, 勾配が形成されてから約24時間後のIII期においても特定の温度域に移動する傾向は認められなかった。さらに, III期後,



第8図 イシダイ0年魚の鉛直温度勾配下における温度選好実験結果の1例
25℃温度無勾配期 (0期), 17~37℃温度勾配形成直後 (I, II期), 15~35℃温度勾配形成期 (III期) について測定



第9図 カサゴの水平温度勾配下における温度選好実験結果の1例
20℃温度無勾配期 (0期), 10~20℃温度勾配形成直後 (I, II, III期), 10~30℃温度勾配形成から24時間後 (IV, V期) および14~34℃温度勾配形成 (VI期) について測定



第10図 マコガレイの水平温度勾配下における温度選好実験結果の1例
 25℃温度無勾配期（0期）、13-33℃温度勾配形成直後（I、II期）、13-33℃温度勾配形成から24
 時間後（III期）および33-13℃温度勾配形成（IV期）について測定

実験水槽内の高・低温側を逆転させて温度勾配を形成したところ（IV期）、低温側に滞留していた個体は温度上昇に伴って低温側に移動した。しかし、特定の温度域に移動するといった温度選好は認められなかった。また、高温側エリアで死亡する個体も確認された。この様な高温側エリアでの死亡は、試験水槽内の設定温度の上限値がマコガレイの平衡喪失温度以上であったことから、平衡喪失するような危険温度域に長時間留まったことによって起こった結果と考えられる。しかし、多くの実験では、こういった致死レベルの高温域エリアでの滞留はみられないか、あるいは進入しても直ちに低温側エリアに引き返すといった忌避的行動を示した。

垂直あるいは水平温度勾配の形成によって、特定の温度域に移動するという温度選好を示した魚種は38魚種中31種で、マハゼ（各馴致群1回の実験のため）を除く30種について精粗の差はあれ、選好温度を特定することができた（第2表）。温度選好が認められた魚種の多くは、ニシン、イサキ、マダイなどの様に常に遊泳し移動する生態的特徴を示すものであった。また、供試魚が流れ藻に付いて生活する時期から着底直後に相当する大きさであったカサゴやクロソイ、および砂泥底の上部を常に遊泳する習性を示すシロギス、アオギスは、温度勾配完成直後に比較的広い範囲を遊泳したが、時間の経過に伴って遊泳温度範囲が狭まる傾向を

示した。

一方、アイナメ、ニベ、マゴチ、ムラソイ、オニオコゼ、ヒラメ、マコガレイの7種では温度勾配形成に伴う温度変化に対して、位置の移動や魚体の向きの反転などの忌避的応答を示したが、その後潜砂的行動や試験水槽の端に隠れるように集まるなどの行動が現れ、特定の温度域に対する選好行動は認められなかった。さらに、与えられた温度勾配の下で滞留したエリアが恐らく高温側の生存限界に達したことによって、狂奔的行動を示し死亡する個体も観察された。なお、これら魚種の供試魚は、その成長段階がいずれも岩礁域あるいは砂泥域での底生生活期に相当するものであった。

このような結果は、常に遊泳し移動している魚種と常には活発な遊泳を行わない底生魚種とで、温度勾配下における行動が大きく異なることを示唆している。本調査の中で見られた底生魚種の反応は、温度変化に対して特定の温度域に移動する行動というよりも、特定の場所での潜砂や狭い場所への逃避など、おそらく走触性に基づく行動特性が優先的に発現したものと解されよう。また、同じ底生魚種の中でも着底前後の成長段階の個体（クロソイ、カサゴ）と着底後の底生生活期の個体（ヒラメ、アイナメ等）ではその行動が大きく異なり、それぞれの成長段階における生態的特性と深く関わっている可能性も考えられる。なお、

第2表 魚類31種の短期選好温度 (SPT) と長期選好温度 (LPT)

魚種名	平均体長 cm	装置	馴致温度 ℃	SPT (n) ℃	LPT (n) ℃
ニシン	7.0	V	10	14.5 ± 1.00 (6)	13.8 ± 0.14 (4)
			14	15.9 ± 0.91 (6)	14.9 ± 0.05 (4)
			17	16.0 ± 1.06 (6)	14.6 ± 0.22 (4)
			20	15.6 ± 0.82 (6)	14.3 ± 0.40 (4)
マイワシ	14.6	V	12	19.7 ± 0.49 (6)	22.7 ± 1.13 (4)
			15	20.0 ± 0.50 (6)	20.9 ± 0.98 (4)
			20	20.0 ± 1.17 (6)	19.5 ± 0.90 (4)
			26	21.1 ± 1.75 (6)	20.4 ± 0.57 (4)
			28	20.5 ± 0.99 (6)	20.5 ± 1.06 (4)
カタクチイワシ	9.8	V	15	16.9 ± 2.09 (6)	15.5 ± 0.07 (2)
			20	19.8 ± 2.91 (6)	18.6 ± 0.28 (2)
			25	18.1 ± 1.17 (6)	19.2 ± 0.14 (2)
			28	22.0 ± 2.57 (6)	20.5 ± 0.57 (2)
アユ	5.7	V	10	16.2 ± 1.83 (6)	-
			14	18.7 ± 1.40 (12)	-
			17	17.9 ± 2.16 (12)	-
			20	18.7 ± 1.38 (12)	-
サケ	10.3	V	10	13.9 ± 0.83 (6)	14.4 ± 0.67 (6)
			15	14.1 ± 0.84 (4)	12.9 ± 0.69 (4)
			18	13.2 ± 1.17 (6)	12.7 ± 1.02 (4)
			20	13.0 ± 0.70 (6)	13.9 ± 0.76 (6)
マダラ	7.7	V	10	7.2 ± 0.82 (3)	-
			14	8.0 ± 0.78 (3)	-
			18	8.4 ± 0.59 (3)	-
マアジ	7.2	V	25	25.3 ± 1.01 (8)	-
			16.8	V	14
	17	21.2 ± 0.43 (6)	22.0 ± 0.39 (6)		
	20	23.5 ± 0.59 (6)	-		
	23	23.7 ± 0.56 (6)	-		
	25	25.5 ± 0.36 (6)	24.5 ± 0.39 (4)		
	26	24.8 ± 0.07 (2)	-		
28	25.1 ± 0.71 (6)	24.6 ± 0.83 (4)			
シマアジ	10.2	V	15	17.7 ± 0.81 (6)	-
			20	22.7 ± 0.61 (6)	-
			23	22.6 ± 0.70 (6)	-
			26	22.0 ± 0.63 (6)	-
			29	22.5 ± 0.42 (6)	-
ブリ	19.0	V	15	20.8 ± 1.28 (6)	-
			20	24.3 ± 0.74 (6)	-
			23	27.2 ± 0.33 (6)	-
			25	26.8 ± 0.29 (6)	-
			28	26.8 ± 0.47 (6)	-
コトヒキ	5.8	V	20	32.7 ± 0.28 (2)	30.7 ± 1.27 (2)
			24	34.1 ± 0.28 (2)	32.2 ± 0.57 (2)
			28	34.2 ± 0.71 (2)	31.5 ± 0.42 (2)
イサキ	10.3	V	15	18.6 ± 2.13 (8)	25.2 ± 0.42 (4)
			20	22.8 ± 1.03 (8)	24.5 ± 0.49 (4)
			23	25.9 ± 0.32 (6)	-
			26	26.2 ± 0.61 (6)	-
			29	27.2 ± 0.68 (6)	-

n: 実験数, V; 垂直温度勾配反応試験装置, H; 水平温度勾配反応試験装置,
H2; 新型水平温度勾配反応試験装置

第2表 (つづき) 魚類31種の短期選好温度 (SPT) と長期選好温度 (LPT)

魚種名	平均体長 cm	馴致温度 ℃	SPT ℃	(n)	LPT ℃	(n)
スズキ	5.3	V	15	24.3 ± 0.77	(4)	-
			20	25.6 ± 0.87	(4)	-
			26	30.2 ± 0.82	(4)	-
			29	29.1 ± 0.71	(4)	-
	11.4	V	15	26.6 ± 0.84	(6)	-
			20	28.2 ± 0.76	(6)	-
			23	29.0 ± 0.45	(6)	-
			26	29.2 ± 0.67	(6)	-
クロダイ	5.6	V	15	27.3 ± 1.92	(6)	-
			20	29.7 ± 0.53	(6)	-
			25	29.9 ± 0.80	(6)	-
			29	29.5 ± 0.56	(8)	-
	11.5	V	15	16.7 ± 1.14	(6)	-
			20	23.1 ± 3.27	(6)	-
			23	26.0 ± 1.51	(6)	-
			26	28.2 ± 0.99	(6)	-
ミナミクロダイ	5.9	V	20	28.1 ± 0.60	(3)	-
			24	29.8 ± 0.96	(3)	-
			28	29.1 ± 0.30	(3)	-
			32	30.6 ± 0.32	(3)	-
	H2	V	20	27.6 ± 2.67	(12)	-
			24	31.4 ± 1.52	(9)	-
			28	32.3 ± 1.35	(9)	-
			32	31.1 ± 1.56	(9)	-
キチヌ	4.5	V	20	26.9 ± 0.50	(3)	27.3 ± 1.36 (9)
			24	26.5 ± 4.67	(2)	27.0 ± 1.56 (6)
			28	28.8 ± 1.24	(3)	29.4 ± 1.03 (9)
	H2	V	20	-	-	26.2 ± 0.23 (3)
			24	29.5 ± 1.50	(5)	28.0 ± 2.22 (15)
			28	29.0 ± 0.55	(3)	29.9 ± 2.34 (9)
ヘダイ	6.2	V	20	26.2 ± 2.43	(6)	-
			24	25.5 ± 0.82	(6)	-
			28	27.5 ± 0.51	(6)	-
マダイ	11.7	V	14	18.4 ± 2.21	(6)	-
			20	23.4 ± 1.00	(6)	-
			23	24.6 ± 1.17	(6)	-
			25	25.3 ± 1.14	(6)	-
			28	25.4 ± 1.36	(6)	-
チダイ	10.0	V	20	22.1 ± 0.97	(6)	22.6 ± 0.87 (6)
			24	24.4 ± 0.47	(6)	24.2 ± 0.23 (6)
			28	24.4 ± 0.49	(6)	23.7 ± 1.09 (6)
クロメジナ	6.3	V	20	28.3 ± 0.37	(6)	28.0 ± 0.40 (3)
			24	26.1 ± 0.33	(6)	26.4 ± 0.26 (3)
			28	25.1 ± 1.21	(6)	25.4 ± 2.08 (3)
イシダイ	6.7	V	15	23.9 ± 1.01	(6)	27.3 ± 0.28 (6)
			20	26.9 ± 0.35	(8)	26.7 ± 0.38 (4)
			25	26.8 ± 0.26	(8)	28.3 ± 0.56 (4)
			28	27.3 ± 0.66	(8)	27.4 ± 0.47 (4)

n: 実験数, V; 垂直温度勾配反応試験装置, H; 水平温度勾配反応試験装置,
H2; 新型水平温度勾配反応試験装置

土田：沿岸性魚類の温度選好

第2表 (つづき) 魚類31種の短期選好温度 (SPT) と長期選好温度 (LPT)

魚種名	平均体長 cm		馴致温度 ℃	SPT ℃	(n)	LPT ℃	(n)	
イシダイ	6.7	H	15	26.0 ± 1.09	(6)	27.3 ± 0.42	(6)	
			20	27.4 ± 0.51	(6)	27.6 ± 0.28	(2)	
			25	27.9 ± 0.44	(6)	26.6 ± 0.28	(2)	
			28	27.3 ± 0.33	(6)	27.4 ± 0.21	(2)	
	14.6	V	15	21.2 ± 0.43	(4)	24.6 ± 0.81	(4)	
			20	24.2 ± 1.74	(4)	26.0 ± 1.48	(4)	
			25	25.9 ± 1.97	(4)	27.3 ± 0.61	(4)	
			28	26.6 ± 0.91	(4)	26.4 ± 0.38	(4)	
シロギス	12.1	H	15	20.9 ± 2.55	(6)	23.7 ± 1.81	(4)	
			20	25.8 ± 0.87	(6)	25.7 ± 0.71	(4)	
			25	26.9 ± 0.96	(6)	25.0 ± 1.23	(4)	
			28	26.4 ± 0.77	(6)	25.1 ± 0.66	(4)	
		V	25	26.6 ± 1.19	(8)	26.5 ± 0.73	(4)	
ホシギス	5.2	H2	20	29.4 ± 1.03	(6)	-		
			24	29.0 ± 0.29	(6)	-		
			28	29.7 ± 1.13	(9)	-		
アオギス	9.7	H2	20	26.5 ± 1.63	(6)	-		
			24	28.6 ± 0.56	(6)	-		
			28	29.0 ± 1.13	(9)	-		
		V	20	26.2 ± 1.33	(6)	-		
			24	28.8 ± 1.22	(6)	-		
			28	28.4 ± 1.41	(9)	-		
ボラ	3.6	V	15	28.8 ± 0.32	(6)	-		
			20	27.0 ± 2.10	(6)	-		
			25	26.6 ± 1.95	(6)	-		
ハマフエフキ	5.2	H2	20	25.2 ± 0.69	(6)	-		
			24	27.7 ± 0.58	(6)	-		
			28	28.0 ± 0.64	(6)	-		
			32	30.4 ± 0.48	(6)	-		
クロソイ	5.2	H	15	20.3 ± 2.11	(6)	20.3 ± 1.09	(6)	
			20	21.3 ± 1.17	(6)	20.0 ± 0.39	(6)	
			25	21.4 ± 0.92	(6)	19.9 ± 1.93	(6)	
			28	22.1 ± 0.48	(6)	21.1 ± 1.47	(6)	
		V	20	20.0 ± 0.62	(4)	-		
カサゴ	6.0	H2	15	19.6 ± 3.45	(9)	21.8 ± 1.73	(9)	
			20	18.5 ± 1.91	(9)	20.3 ± 1.26	(9)	
			25	21.1 ± 1.31	(8)	19.8 ± 1.41	(9)	
メバル	5.0	H	15	21.5 ± 0.91	(4)	20.5 ± 0.71	(4)	
			20	22.6 ± 2.50	(6)	20.7 ± 3.38	(6)	
			25	24.6 ± 2.48	(6)	23.8 ± 2.24	(6)	
			28	26.5 ± 0.92	(4)	24.6 ± 0.72	(4)	
	14.0	H	15	20.1 ± 0.49	(6)	-		
			20	20.3 ± 2.04	(6)	-		
			25	22.3 ± 1.13	(6)	-		
カワハギ	6.0	V	20	21.4 ± 0.34	(4)	-		
			24	26.1 ± 0.22	(4)	-		
			28	28.4 ± 0.40	(6)	27.6 ± 0.31	(3)	
トラフグ	6.9	V	20	27.6 ± 1.04	(4)	-		
			24	27.4 ± 0.51	(4)	-		
			28	26.7 ± 0.41	(4)	-		

n: 実験数, V; 垂直温度勾配反応試験装置, H; 水平温度勾配反応試験装置,
H2; 新型水平温度勾配反応試験装置

ニベはシロギスと同様に砂泥底の上部を常に遊泳する生態的特性を有しているが、垂直および水平的温度勾配下において特定の温度域を選好する行動を示さなかった。この両種の温度に対する行動の相違がいかなる理由によるかは現時点で明らかでなく、今後、生理・生態学的知見を集積し検討する必要がある。

2) 垂直温度勾配下と水平温度勾配下における選好温度の比較

温度選好実験は、温度以外の要因をできる限り少なくする必要がある。垂直温度勾配水槽を用いた魚の温度選好実験の場合、水平温度勾配下との外的条件の違いとして水深に伴う水圧や照度勾配の存在があり、選好温度への影響の可能性が指摘されている (Brett, 1952; McCauley, 1977)。そこで、本研究では同一魚種について垂直温度勾配と水平温度勾配の両条件下における温度選好実験をミナミクロダイ、キチヌ、イシダイ、シロギス、アオギス、クロソイの6魚種について行い、比較検討した (第2表)。

15~28℃に馴致されたイシダイの実験では、15、25℃馴致群の短期選好温度で垂直温度勾配下と水平温度勾配下の間には差が認められたが ($P < 0.01$)、20、28℃馴致群の短期選好温度および15~28℃馴致群の長期選好温度では垂直温度勾配下と水平温度勾配下の間には有意差が認められなかった ($P > 0.05$)。キチヌは短期選好温度の実験数がやや少ないものの垂直温度勾配下と水平温度勾配下の間には有意差が認められなかった ($P > 0.05$)。長期選好温度では20℃馴致群のみで両者の間に差が認められたが、24、28℃馴致群では差が認められなかった。ミナミクロダイおよびアオギスの実験ではいずれの馴致温度群においても、選好温度は異なる温度勾配水槽の間に差が認められなかった ($P > 0.05$)。シロギスは25℃馴致群、クロソイは20℃馴致群について垂直および水平温度勾配下での実験を行ったが、いずれの魚種とも両勾配下で求められた選好温度の間には有意差は認められなかった ($P > 0.05$)。

Kwain and McCauley (1978)は、垂直温度勾配水槽上部の照度によってニジマスの選好温度が影響され、明条件 (2,000lux) に比べ暗条件 (0 lux) の方が高い温度を選好する結果を報告している。本実験では垂直温度勾配水槽および水平温度勾配水槽の水面上の照度はそれぞれ約800~1,000lux, 300luxと異なるが、選好温度に明瞭な

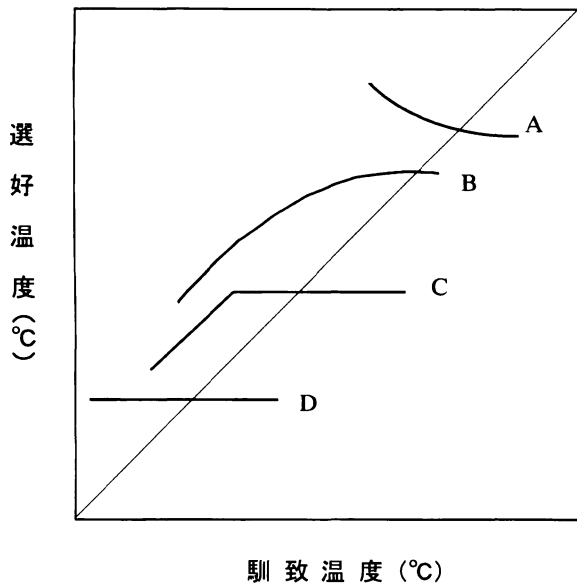
差は認められないことから、この程度の光条件の差は無視できるものと考えられる。また、垂直および水平温度勾配下での温度選好は、試験水槽内の設定温度の変更 (例えば10~30℃から12~32℃への変更) に対して、特定の場所を選ぶことなく特定の選好温度域を求めて移動した。同様の結果はニジマスにおいても認められている (McCauley and Pond, 1971)。これらの結果は、垂直温度勾配下における温度選好に及ぼす水圧勾配、および水槽の縦横の大きさの違いによる温度勾配の大きさ等の影響が、上記3種では無視しうる程度であることを示唆している。

一方、水平温度勾配を段階的に形成した場合と、急激に形成した場合とを比較実験をカサゴについて行った。カサゴは温度勾配を段階的に形成した場合、明確な温度選好を示したが、勾配を急激に形成した場合には温度選好を明瞭に示さず、急激な温度の上昇に行動的対応ができずに死亡する個体や、衰弱する個体が認められた。このように、温度変化の速度はカサゴのように底着性の強い魚の温度選好に大きな影響を与えるものと考えられる。

3) 馴致温度と選好温度

魚類の選好温度が前歴の温度である馴致温度の影響を受けることは、これまでに報告された多くの実験結果で明らかにされており、その関係も様々である (Coutant, 1970; Reynolds, 1977; Reynolds and Casterlin, 1980など)。本研究において温度勾配完成直後に選好温度を特定することができた30種の馴致温度と短期選好温度との関係は、4パターンに区分された (第11図)。

短期選好温度が馴致温度の影響を受け、馴致温度が高くなるにしたがって短期選好温度も高くなる傾向を明確に示した魚種は、カタクチイワシ、マダラ、マアジ、ブリ、スズキ、イサキ、クロダイ、キチヌ、ヘダイ、マダイ、イシダイ、ハマフエフキ、メバル、カワハギの合計14種であった (Bパターン)。逆に、馴致温度が高くなるにしたがって短期選好温度が低くなる傾向を示した魚種は、クロメジナ、ボラの2種であった (Aパターン)。また、3~5段階の馴致温度のうち、最も低温馴致群のみが低い温度を選好し、その他の馴致温度における短期選好温度がほぼ等しい値を示す6魚種は、アユ、シマアジ、コトヒキ、ミナミクロダイ、チダイ、シロギスであった (Cパターン)。この様に、多くの魚種の短期選好温度は馴致温度



第11図 選好温度と馴致温度の関係パターン

の影響を受けていた。しかし、ニシン、マイワシ、サケ、ホシギス、カサゴ、クロソイ、ヘダイ、トラフグの8種は馴致温度に対して選好温度が依存せず、ほぼ同じ温度を選好した（Dパターン）。

McCaughey and Tait (1970) は lake trout (*Salvelinus namaycush*) の選好温度が馴致温度に依存せずにはほぼ一定で、狭い温度域を選好することを明らかにした。さらに、馴致温度と選好温度が等しい等値線と選好温度と馴致温度の関係を表す直線（あるいは曲線）とが交わる角度が大きいことから、本種が狭温性魚種に属する可能性を指摘している。本研究において馴致温度と選好温度との関係は魚種によって異なる結果が得られたが、選好温度が馴致温度に強く依存するBパターンは、選好温度が馴致温度に依存しないDパターンに比べてより広い範囲の温度を選好することが可能な行動特性を持っており、広温性魚種に属する可能性が考えられる。これらの違いが生じる理由は明らかでないが、魚種によって温度に対する生理学的な適温範囲の違いが考えられる。これについては今後さらに詳細な検討が必要である。

4) 時間経過に伴う選好温度の変化

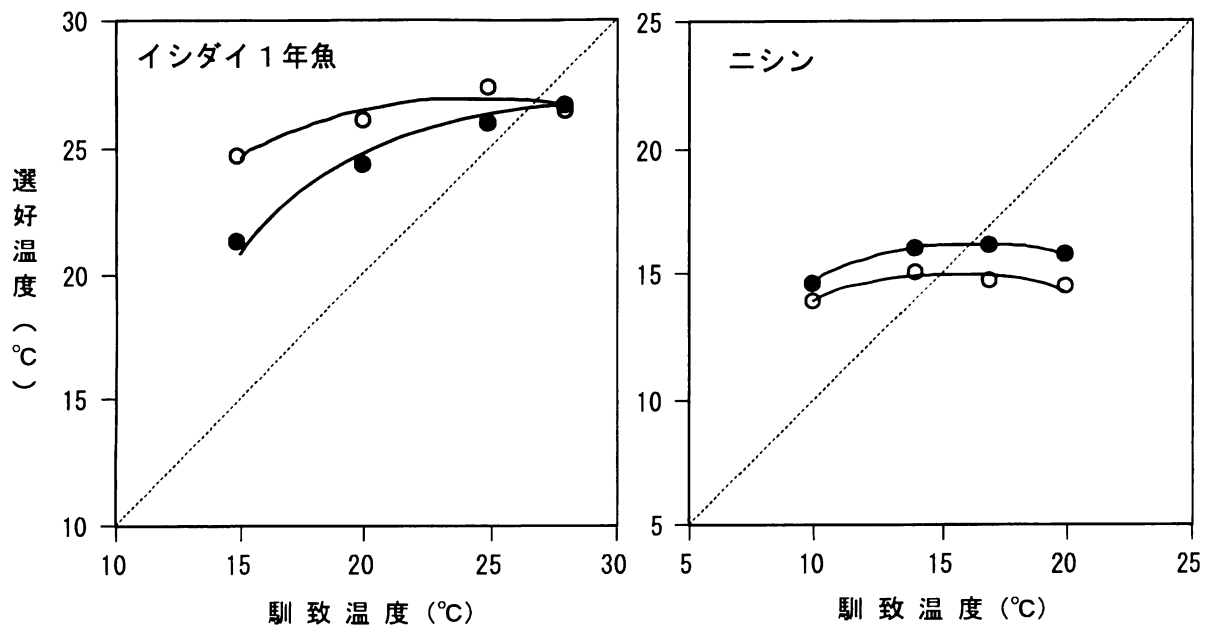
温度勾配下において多くの魚種はそれぞれ特定の温度を選好するが、その選好温度は時間の経過に伴ってずれを生じ、かつ異なる馴致温度群でも、同じ温度域に徐々に収斂することが知られている (Fry, 1947; Coutant, 1970; Reynolds and Casterlin, 1980)。この収斂した温度は final

preferendum (以下、最終選好温度と呼ぶ) と呼ばれており、魚種に固有の値と考えられている (Fry, 1947)。そこで、温度勾配下における時間経過に伴う選好温度の変化について検討した。

本研究において温度勾配下で24時間以上継続した温度選好実験を、ニシン、マイワシ、カタクチイワシ、サケ、マアジ、コトヒキ、イサキ、キチヌ、チダイ、クロメジナ、インダイ、シロギス、クロソイ、カサゴ、メバル、カワハギで行った。インダイの場合、短期選好温度と長期選好温度を比較すると、比較的高い温度馴致群では短期選好温度と長期選好温度との差が小さいが、低い温度馴致群では温度勾配完成直後に比べて24時間経過後に約5°C高い温度を選好した（第12図）。また、イサキの15、20°C馴致群は、時間の経過に伴って徐々に高い温度を選好し、48時間で温度勾配完成直後より約5~10°C高い25°C付近に達した。同様に、温度勾配下において選好温度が時間の経過に伴って高くなる傾向は、イサキやインダイの他マアジ、ブリでも認められた。また Crawshaw (1975) によると、7、15°Cに馴致された brown bullhead (*Ictalurus nebulosus*) の水平温度勾配下における選好温度が10時間後に25°Cに、1日以内で29~30°Cに達し、さらに24、32°Cで馴致された群は短時間で29°C付近を選好している。逆にニシン、サケ、コトヒキでは、時間の経過に伴って選好温度が僅かに低くなった（第12図）。他方、マイワシでは温度勾配完成直後から選好温度が馴致温度に依存せずにはほぼ一定レベルを維持し、シロギス、クロソイ、カサゴの遊泳温度範囲は、温度勾配完成直後に比べて時間の経過に伴って限られた選好温度域に集中する傾向を示すとともに、24時間経過後の長期選好温度は馴致温度に依存せずにはほぼ特定の温度域を選好した。また、カタクチイワシ、チダイ、クロメジナでは時間の経過に伴って選好温度が移動する傾向は認められず、短期選好温度と長期選好温度がほぼ同じであった。

この様に、温度勾配下において魚の分布の中心は馴致温度より高い温度域、あるいは逆に低い温度域へ徐々に移動して最終選好温度に到達するが、最終選好温度に達するまでの時間は、馴致温度と最終選好温度との差の大きい場合ほど延長すると同時に、その長さは魚種によっても異なると考えられる。

選好温度が代謝や成長等の生理的過程に対する至適温度とほぼ一致することは、これまでにしば



第12図 馴致温度と短期選好温度 (●) および長期選好温度 (○) の関係

しば報告されており (Brett, 1971; Beitinger and Magnuson, 1979; Kellogg and Gift, 1983; Kelsch and Neill, 1990など), また後述の本調査結果からも明らかである。温度勾配下での最終

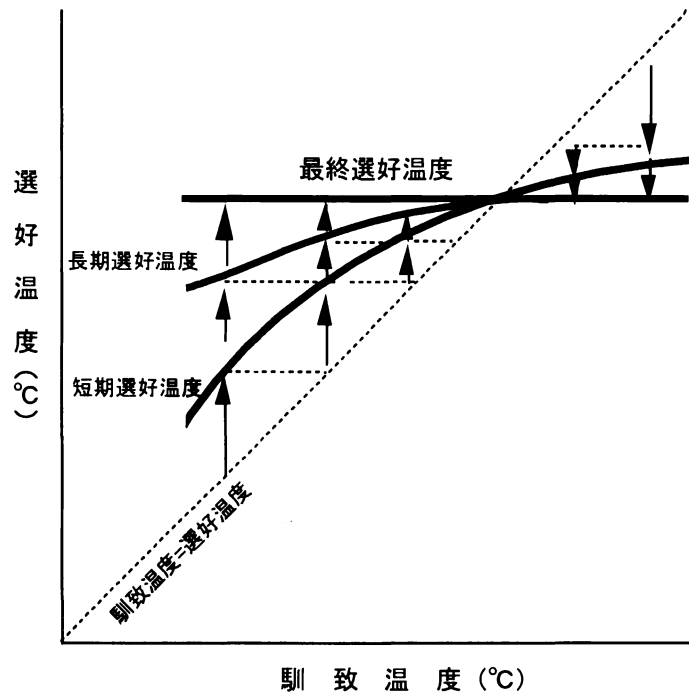
選好温度への移動時間の相違も, 環境温度に対するそれぞれの魚種の生理・生化学的な適応と深い係わりがあると推測される。

第3表 魚類30種の最終選好温度

魚種名	体長 (cm)	最終選好温度 (°C)	魚種名	体長 (cm)	最終選好温度 (°C)
マダラ	7.7	7.6	クロメジナ	6.3	26.1
サケ	10.3	13.5	ヘダイ	6.2	26.4
ニシン	7.0	14.4	イサキ	10.3	26.7
アユ	5.7	18.6	ブリ	19.0	26.9
カタクチイワシ	9.8	18.8	ボラ	3.6	27.0
マイワシ	14.6	20.0	トラフグ	6.9	27.2
クロソイ	5.2	20.5	カワハギ	6.0	27.6
カサゴ	6.0	20.7	ハマフエフキ	5.2	28.0
メバル	5.0	21.2	アオギス	9.7	28.5
	14.0	22.6	クロダイ	5.6	29.8
シマアジ	10.2	22.5		11.5	28.8
マアジ	16.8	24.0	ホシギス	5.2	29.4
チダイ	10.0	24.2	スズキ	5.3	29.7
マダイ	11.7	25.3		11.4	30.0
シロギス	12.1	25.5	キチヌ	4.5	30.2
イシダイ	6.7	27.5	コトヒキ	5.8	31.5
	14.0	26.0	ミナミクロダイ	5.9	31.6

最終選好温度推定には第2表のデータを使用した。

最終選好温度は選好温度の平均値あるいは回帰式より推定した。



第13図 馴致温度と選好温度の関係モデル

5) 最終選好温度の推定

第3表に温度選好が認められた30種（マハゼを除く）の最終選好温度を示す。最終選好温度の推定にあたり、短期および長期選好温度を求めた供試魚の場合は、馴致温度と長期選好温度との関係を直線回帰式あるいは2次曲線回帰式で表し、その回帰式の馴致温度と選好温度が等しくなる値を算出した（45°線との交点、第12図参照）。また馴致温度と短期選好温度および長期選好温度との関係を比較した結果、それぞれの回帰式の馴致温度と選好温度が等しくなる値は近似していた。そこで、短期選好温度のみを求めた供試魚の場合では、短期選好温度と馴致温度の関係から同様の方法を用いて算出した値を最終選好温度とみなした。例外的に、選好温度が馴致温度に依存せずにはほぼ一定である場合には、短期あるいは長期選好温度の平均値から推定した。第3表に示すように、最終選好温度は当然魚種によって異なる。冷水域に生息するサケ、ニシンの最終選好温度は14～15℃付近であった。マイワシ、クロソイ、カサゴは20℃付近に、マアジ、マダイでは24～25℃付近に最終選好温度があると推定された。さらに、スズキ、クロダイの最終選好温度は29～30℃、ミナミクロダイは30種のうち最も高い31.6℃を示した。

馴致温度と選好温度との関係をモデル化して第

13図に示す。前記した様に、多くの魚は温度勾配完成直後に特定の温度域に移動する温度選好を示し、さらに長時間温度勾配下に放置されると、やがてこの選好した温度で再馴致されると考えられる。こうして、初期の馴致の効果が次第に薄れ、いわば再馴致が繰り返されるなかで、魚の動きは最終選好温度に収斂する傾向を示すものと考えられる。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規定することができる（Fry, 1947; Coutant, 1970; Reynolds and Casterlin, 1980）。従って、長時間のうちには魚が当初の温度より低い温度域に、あるいは高い温度域に徐々に移動して、最終選好温度に向かって行くことから、最終選好温度は馴致温度よりも高い温度を好む行動を示すのか、あるいは逆に低い温度を好む行動を示すのかという、温度に対する行動の方向を決める内的基準として用いることが可能と考えられる。

生理学的反応と選好温度の関係

一般に、魚体内における生理学的および生化学的過程は環境温度の影響を強く受ける（板沢, 1977）。このことから、温度に対する行動である

温度選好も生理・生化学的反応と密接な関係があることが推察される。この章では、選好温度と生理学的反応に依存するとみられる温度耐性、成長適温および代謝速度との関係について検討した (Tsuchida, 1995; Kita *et al.*, 1996; 土田・瀬戸熊, 1997)。

1. 温度耐性と選好温度

1) 供試魚

温度耐性実験の対象とした魚種は、温度選好実験の場合と共通の沿岸性魚種36種である。実験に先立ち、供試魚を温度馴致用水槽 (500 L) に移し、10~29°Cの範囲の3~5段階で温度馴致飼育を14日間以上行った。この間、温度調節された濾過海水を1水槽当たり毎時500 L かけ流した。各馴致温度区の平均温度の標準偏差は±0.3°C以下に保った。供試魚を養成飼育水槽の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、急激な温度変化をさけた。温度馴致期間中には、配合飼料と解凍鮮魚を混合したもの、あるいは解凍したツノナシオキアミを1日2~3回飽食するまで与えた。

2) 試験装置概要

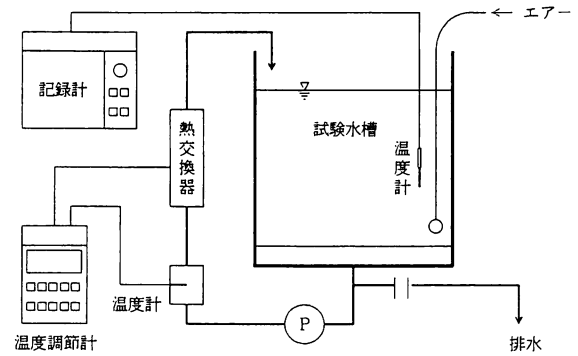
本実験に用いた装置は、容積が38 Lの塩化ビニル製試験水槽と熱交換器から構成されており、水槽内の海水を所定の速度で昇温あるいは降温させること、および任意の温度で一定に維持することが可能である。第14図に本試験装置の模式図を示す。

試験水槽内の海水温度は、熱交換器内に設置された電気ヒーターの加熱率と冷却コイル内のブライン流量とを、温度調節計によって制御することによって調節される。温度制御範囲は5~40°Cである。

3) 実験方法

魚の温度耐性を把握する実験では臨界最高 (または最低) 温度 (critical thermal maximum or minimum) を求める実験を参考とした (Cox, 1974; Becker and Genoway, 1979)。実験に先立ち、供試魚の馴致温度と等しく設定した実験水槽内に、1回の実験当たり供試魚5尾を収容して約1時間放置した。次いで供試魚の行動に異常の無いことを確認した後、1時間当たり5°Cの速度で昇温または降温させた。

温度変化に伴う供試魚の行動状態について観察を続け、供試魚が横転など体の平衡を失った時点



第14図 温度耐性実験に用いた装置の模式図

の温度を臨界最高・最低温度 (CTMax, CTMin) とし、さらに鰓蓋運動を停止した時点の温度を死亡温度 (DT: death temperature) とした。供試魚の大きさは、各実験終了時に測定した。実験は各馴致温度群で1~2回行った。

4) 結果および考察

(1) 馴致温度と温度耐性

供試魚群を昇温あるいは降温して得られた臨界最高・最低温度 (CTMax, CTMin) および高・低温側の死亡温度 (UDT, LDT) を第4表に示す。馴致温度10~32°Cにおける36魚種のCTMaxとCTMinはそれぞれ23.6~42.0°C, <0~17.0°Cの範囲に、またUDTとLDTはそれぞれ23.9~42.3°C, <0~12.2°Cの範囲にあった。

CTMax, CTMin, UDT およびLDT はいずれの魚種でも馴致温度に強く依存し、これらの反応温度はすべて馴致温度の上昇に伴って高くなる直線関係が認められた (第5表)。相関係数は0.92~1.00で、いずれも高い相関を示した。各魚種の回帰直線の傾きは高温側では0.11~0.60, 低温側では0.19~0.71の範囲にあった。

CTMaxと馴致温度との差は5.5~21.2°Cの範囲にあり、馴致温度が高くなる程その差は減少した。CTMinと馴致温度との差は7.0~23.1°Cの範囲にあり、CTMaxと馴致温度との差はCTMaxとは逆に馴致温度が高くなる程その差は増大した。

高温側の各反応温度 (UDT, CTMax) の標準偏差はそれぞれ0.00~0.78°C, 0.00~0.86°Cと小さかった。また、UDTとCTMaxとの差は0.1~2.9°Cと小さく、馴致温度が高いほど小さくなる傾向を示した。逆に、低温側の各反応温度 (CTMin, LDT) の標準偏差は最大で1.50°Cを示しており、高温側のそれに比べてばらつきが大きく、さらにCTMinとL

第4表 魚類36種の臨界最高（最低）温度（CTMax, CTMin）と高・低温側の死亡温度（UDT, LDT）

魚種名 (平均体長)	馴致温度 (°C)	UDT ¹⁾		CTMax ¹⁾		CTMin ¹⁾		LDT ¹⁾	
		(°C)	(n) ²⁾	(°C)	(n) ²⁾	(°C)	(n) ²⁾	(°C)	(n) ²⁾
ニシン (BL=7.1cm)	10	26.8 ± 0.21	(5)	25.7 ± 0.44	(5)	-		-	
	14	27.1 ± 0.21	(5)	26.6 ± 0.33	(5)	-		-	
	17	28.1 ± 0.12	(5)	27.7 ± 0.09	(5)	-		-	
	20	29.4 ± 0.14	(5)	29.0 ± 0.05	(5)	<0	(5)	<0	(5)
マイワシ (BL=14.7cm)	12	29.0 ± 0.53	(5)	28.9 ± 0.50	(5)	3.5 ± 0.11	(5)	<1	(5)
	15	29.3 ± 0.43	(5)	29.0 ± 0.42	(5)	4.6 ± 0.36	(5)	<1	(5)
	20	31.1 ± 0.28	(5)	30.9 ± 0.32	(5)	5.8 ± 0.33	(5)	3.4 ± 0.45	(5)
	26	33.8 ± 0.18	(5)	33.6 ± 0.24	(5)	9.0 ± 0.22	(5)	4.9 ± 0.21	(5)
	28	33.9 ± 0.18	(5)	33.7 ± 0.21	(5)	9.6 ± 0.36	(5)	6.7 ± 0.46	(5)
カタクチイワシ (BL=9.7cm)	15	31.8 ± 0.68	(5)	31.7 ± 0.75	(5)	2.9 ± 0.22	(5)	<1	(5)
	20	32.7 ± 0.32	(5)	32.6 ± 0.25	(5)	3.9 ± 0.40	(5)	<1	(5)
	25	34.0 ± 0.27	(5)	33.9 ± 0.25	(5)	5.6 ± 0.49	(5)	1.6 ± 0.71	(5)
	28	34.9 ± 0.28	(5)	34.7 ± 0.29	(5)	6.8 ± 0.45	(5)	3.7 ± 1.09	(5)
アユ (BL=5.4cm)	10	27.9 ± 0.34	(10)	27.7 ± 0.36	(10)	0.5 ± 0.24	(10)	<0	(10)
	14	30.0 ± 0.24	(10)	29.8 ± 0.23	(10)	1.5 ± 0.14	(10)	<0	(10)
	17	31.4 ± 0.26	(10)	31.1 ± 0.40	(10)	2.5 ± 0.25	(10)	1.2 ± 0.33	(10)
	20	32.9 ± 0.30	(10)	32.7 ± 0.25	(10)	4.0 ± 0.14	(10)	2.2 ± 0.13	(10)
サケ (BL=10.2cm)	10	27.4 ± 0.30	(10)	27.1 ± 0.28	(10)	-		-	
	15	28.5 ± 0.14	(10)	28.2 ± 0.21	(10)	-		-	
	18	29.4 ± 0.13	(10)	29.1 ± 0.17	(10)	-		-	
	20	29.9 ± 0.27	(10)	29.6 ± 0.26	(10)	-		-	
マダラ (BL=5.4cm)	10	23.9 ± 0.43	(10)	23.6 ± 0.31	(10)	-		-	
	14	25.4 ± 0.31	(10)	25.2 ± 0.23	(10)	-		-	
	18	26.4 ± 0.38	(10)	26.1 ± 0.40	(10)	-		-	
マアジ (BL=16.7cm)	17	32.1 ± 0.06	(5)	32.0 ± 0.61	(5)	6.6 ± 0.04	(5)	<1	(5)
	20	34.0 ± 0.22	(5)	33.8 ± 0.23	(5)	8.0 ± 0.51	(5)	7.1 ± 0.32	(5)
	25	35.0 ± 0.15	(5)	34.6 ± 0.30	(5)	9.4 ± 0.26	(5)	8.6 ± 0.53	(5)
	28	35.4 ± 0.22	(5)	35.2 ± 0.16	(5)	10.9 ± 0.39	(5)	<1	(5)
シマアジ (BL=10.3cm)	15	31.0 ± 0.36	(5)	30.8 ± 0.36	(5)	7.0 ± 0.52	(5)	6.0 ± 0.51	(5)
	20	33.0 ± 0.37	(5)	32.6 ± 0.57	(5)	8.7 ± 0.43	(5)	6.2 ± 0.33	(5)
	23	34.3 ± 0.23	(5)	33.9 ± 0.31	(5)	10.0 ± 0.45	(5)	7.2 ± 0.38	(5)
	26	35.5 ± 0.19	(5)	35.2 ± 0.18	(5)	11.3 ± 0.36	(5)	8.7 ± 0.36	(5)
	29	36.3 ± 0.08	(5)	36.1 ± 0.11	(5)	12.8 ± 0.32	(5)	9.8 ± 0.31	(5)
ブリ (BL=18.9cm)	15	33.8 ± 0.19	(5)	32.0 ± 0.41	(5)	-		-	
	20	34.1 ± 0.60	(5)	33.6 ± 0.70	(5)	-		-	
	23	35.2 ± 0.13	(5)	34.6 ± 0.08	(5)	-		-	
	25	36.0 ± 0.21	(5)	35.8 ± 0.09	(5)	-		-	
	28	36.9 ± 0.08	(5)	36.6 ± 0.13	(5)	-		-	
コトヒキ (BL=5.8cm)	20	40.4 ± 0.18	(10)	39.8 ± 0.27	(10)	8.3 ± 0.38	(10)	6.7 ± 0.36	(10)
	24	41.6 ± 0.31	(10)	40.1 ± 0.36	(10)	9.9 ± 0.51	(10)	7.7 ± 0.2	(10)
	28	42.3 ± 0.22	(10)	42.0 ± 0.23	(10)	11.8 ± 0.5	(10)	9.0 ± 0.59	(10)
イサキ (BL=5.9cm)	16	32.3 ± 0.21	(10)	31.3 ± 0.47	(10)	7.9 ± 0.30	(10)	0.57 ± 0.43	(10)
	20	34.5 ± 0.32	(10)	33.6 ± 0.36	(10)	9.3 ± 0.25	(10)	0.72 ± 0.27	(10)
	24	35.6 ± 0.29	(10)	34.9 ± 0.22	(10)	10.8 ± 0.17	(10)	0.79 ± 0.31	(10)

¹⁾ 平均値±S.D., ²⁾ n; 供試魚尾数, 以下同様

土田：沿岸性魚類の温度選好

第4表 (つづき) 魚類36種の臨界最高(最低)温度 (CTMax, CTMin) と高・低温側の死亡温度 (UDT, LDT)

魚種名	馴致温度	UDT	(n)	CTMax	(n)	CTMin	(n)	LDT	(n)
イサキ (BL=10.2cm)	15	31.7 ± 0.12	(5)	30.3 ± 0.36	(5)	6.4 ± 0.51	(5)	4.8 ± 0.44	(5)
	20	33.4 ± 0.53	(5)	32.7 ± 0.41	(5)	8.3 ± 0.40	(5)	5.8 ± 0.50	(5)
	23	34.5 ± 0.11	(5)	33.5 ± 0.30	(5)	10.2 ± 0.46	(5)	7.3 ± 0.38	(5)
	26	36.3 ± 0.09	(5)	35.5 ± 0.13	(5)	10.9 ± 0.35	(5)	9.0 ± 0.35	(5)
	29	37.3 ± 0.05	(5)	37.2 ± 0.10	(5)	13.0 ± 0.35	(5)	9.9 ± 0.32	(5)
スズキ (BL=6.2cm)	12	31.8	0.30 (8)	31.0 ± 0.20	(8)	1.9 ± 0.26	(8)	<0	(8)
	16	34.3	0.30 (10)	33.8 ± 0.40	(10)	3.1 ± 0.12	(10)	<0	(10)
	20	36.6	0.20 (10)	35.4 ± 0.30	(10)	4.9 ± 0.36	(10)	3.0 ± 0.71	(10)
	24	38.0	0.20 (10)	37.7 ± 0.20	(10)	6.7 ± 0.30	(10)	3.7 ± 0.70	(10)
スズキ (BL=11.3cm)	15	32.3 ± 0.42	(5)	32.1 ± 0.43	(5)	-	-	-	-
	20	36.0 ± 0.14	(5)	35.6 ± 0.23	(5)	4.5 ± 0.50	(5)	-	-
	23	37.2 ± 0.29	(5)	36.7 ± 0.19	(5)	4.1 ± 0.45	(5)	-	-
	26	38.2 ± 0.18	(5)	38.0 ± 0.27	(5)	6.6 ± 0.41	(5)	-	-
	29	39.3 ± 0.17	(5)	39.1 ± 0.13	(5)	10.8 ± 0.43	(5)	-	-
クロダイ (BL=4.1cm)	12	31.8 ± 0.30	(10)	31.4 ± 0.30	(10)	3.2 ± 0.44	(10)	<0	(10)
	16	34.4 ± 0.40	(10)	33.0 ± 0.30	(10)	4.4 ± 0.37	(10)	1.5 ± 0.37	(10)
	20	36.9 ± 0.30	(10)	35.8 ± 0.30	(10)	6.0 ± 0.31	(10)	3.1 ± 0.28	(10)
	24	38.9 ± 0.20	(10)	37.6 ± 0.30	(10)	8.1 ± 0.55	(10)	4.5 ± 0.35	(10)
クロダイ (BL=11.4cm)	15	34.5 ± 0.39	(5)	33.9 ± 0.50	(5)	-	-	-	-
	20	35.2 ± 0.38	(5)	34.7 ± 0.16	(5)	-	-	-	-
	23	36.7 ± 0.35	(5)	36.1 ± 0.13	(5)	-	-	-	-
	26	38.9 ± 0.21	(5)	38.2 ± 0.09	(5)	-	-	-	-
	29	39.5 ± 0.04	(5)	39.3 ± 0.00	(5)	-	-	-	-
ミナミクロダイ (BL=5.5cm)	20	37.3 ± 0.43	(10)	35.7 ± 0.27	(10)	6.0 ± 0.51	(10)	2.1 ± 0.22	(10)
	24	39.0 ± 0.32	(10)	37.4 ± 0.16	(10)	8.2 ± 0.29	(10)	3.6 ± 0.41	(10)
	28	40.2 ± 0.08	(10)	39.3 ± 0.12	(10)	10.5 ± 0.30	(10)	5.4 ± 0.70	(10)
	32	41.0 ± 0.14	(10)	40.4 ± 0.19	(10)	13.1 ± 0.39	(10)	7.5 ± 0.53	(10)
キチヌ (BL=4.3cm)	20	36.3 ± 0.27	(10)	35.5 ± 0.21	(10)	5.8 ± 0.50	(10)	2.7 ± 0.49	(10)
	24	38.7 ± 0.21	(10)	37.5 ± 0.13	(10)	8.6 ± 0.30	(10)	4.0 ± 0.43	(10)
	28	39.9 ± 0.18	(10)	39.2 ± 0.11	(10)	10.9 ± 0.19	(10)	5.5 ± 0.46	(10)
ヘダイ (BL=5.8cm)	20	37.4 ± 0.40	(7)	35.3 ± 0.50	(7)	8.5 ± 0.20	(5)	5.7 ± 0.30	(5)
	24	38.6 ± 0.10	(7)	36.9 ± 0.20	(7)	10.3 ± 0.10	(5)	6.6 ± 0.20	(5)
	28	39.6 ± 0.10	(7)	38.7 ± 0.10	(7)	12.3 ± 0.30	(5)	8.3 ± 0.10	(5)
マダイ (BL=11.6cm)	14	31.3 ± 0.13	(10)	28.5 ± 0.13	(10)	-	-	-	-
	20	33.7 ± 0.25	(10)	31.0 ± 0.16	(10)	-	-	-	-
	23	34.8 ± 0.20	(10)	33.2 ± 0.20	(10)	-	-	-	-
	25	36.1 ± 0.14	(10)	34.2 ± 0.20	(10)	-	-	-	-
	28	37.2 ± 0.13	(10)	35.7 ± 0.28	(10)	-	-	-	-
チダイ (BL=9.9cm)	20	33.0 ± 0.30	(10)	32.7 ± 0.40	(10)	8.9 ± 0.40	(5)	7.0 ± 0.8	(5)
	24	34.6 ± 0.20	(10)	34.5 ± 0.20	(10)	11.8 ± 0.80	(5)	8.3 ± 0.3	(5)
	28	35.9 ± 0.10	(10)	35.7 ± 0.10	(10)	13.9 ± 0.70	(5)	9.8 ± 0.3	(5)
クロメジナ (BL=6.1cm)	20	37.5 ± 0.25	(10)	36.2 ± 0.34	(10)	8.0 ± 0.23	(5)	-	-
	24	38.6 ± 0.21	(10)	37.2 ± 0.21	(10)	9.7 ± 0.13	(5)	-	-
	28	39.1 ± 0.05	(10)	38.3 ± 0.14	(10)	11.8 ± 0.05	(5)	-	-
イシダイ-0年魚 (BL=6.5cm)	15	34.8 ± 0.45	(5)	33.3 ± 0.29	(5)	7.1 ± 0.30	(5)	4.9 ± 0.09	(5)
	20	36.3 ± 0.29	(5)	34.9 ± 0.24	(5)	9.0 ± 0.15	(5)	6.4 ± 0.32	(5)
	25	37.7 ± 0.19	(5)	37.1 ± 0.13	(5)	11.1 ± 0.18	(5)	6.3 ± 0.34	(5)
	28	38.3 ± 0.00	(5)	38.1 ± 0.13	(5)	12.3 ± 0.11	(5)	8.1 ± 0.10	(5)

1) 平均値±S.D., 2) n; 供試魚尾数, 以下同様

土田：沿岸性魚類の温度選好

第4表 (つづき) 魚類36種の臨界最高(最低)温度 (CTMax, CTMin) と高・低温側の死亡温度 (UDT, LDT)

魚種名	馴致温度	UDT	(n)	CTMax	(n)	CTMin	(n)	LDT	(n)
イシダイ-1年魚 (BL=14.3cm)	15	33.7 ± 0.42	(5)	32.8 ± 0.24	(5)	-		-	
	20	35.4 ± 0.30	(5)	34.2 ± 0.48	(5)	-		-	
	25	36.9 ± 0.58	(5)	36.7 ± 0.34	(5)	-		-	
	28	37.5 ± 0.09	(5)	37.3 ± 0.12	(5)	-		-	
シロギス (BL=5.8cm)	12	30.5 ± 0.34	(10)	29.2 ± 0.86	(10)	5.5 ± 0.22	(10)	1.5 ± 0.74	(10)
	16	33.4 ± 0.78	(10)	33.2 ± 0.74	(10)	7.4 ± 0.35	(10)	2.2 ± 0.37	(10)
	20	34.6 ± 0.39	(10)	34.3 ± 0.42	(10)	9.1 ± 0.11	(10)	4.6 ± 0.50	(10)
	24	36.8 ± 0.23	(10)	36.5 ± 0.28	(10)	11.4 ± 0.73	(10)	5.7 ± 0.44	(10)
	28	38.0 ± 0.47	(10)	37.8 ± 0.39	(10)	13.0 ± 0.16	(10)	7.4 ± 0.32	(10)
シロギス (BL=12.1cm)	15	32.9 ± 0.13	(5)	31.4 ± 0.37	(5)	6.6 ± 0.36	(5)	4.2 ± 0.61	(5)
	20	34.7 ± 0.16	(5)	34.4 ± 0.20	(5)	8.7 ± 0.08	(5)	1.8 ± 0.44	(5)
	25	36.6 ± 0.12	(5)	36.5 ± 0.19	(5)	10.6 ± 0.46	(5)	5.7 ± 0.48	(5)
	28	37.7 ± 0.25	(5)	37.5 ± 0.30	(5)	12.2 ± 0.57	(5)	6.6 ± 0.42	(5)
ホシギス (BL=5.3cm)	20	37.5 ± 0.21	(10)	37.2 ± 0.39	(10)	9.6 ± 0.73	(10)	5.4 ± 0.47	(10)
	24	39.1 ± 0.24	(10)	39.1 ± 0.25	(10)	10.8 ± 0.43	(10)	6.3 ± 0.39	(10)
	28	40.2 ± 0.12	(10)	40.1 ± 0.15	(10)	13.2 ± 0.55	(10)	7.9 ± 0.35	(10)
アオギス (BL=9.6cm)	20	37.7 ± 0.17	(10)	37.2 ± 0.24	(10)	6.1 ± 0.32	(10)	2.9 ± 0.36	(10)
	24	39.3 ± 0.21	(10)	38.7 ± 0.33	(10)	8.1 ± 0.74	(10)	4.4 ± 0.60	(10)
	28	40.5 ± 0.17	(10)	40.2 ± 0.17	(10)	10.9 ± 0.32	(10)	6.1 ± 0.77	(10)
ボラ (BL=3.8cm)	15	36.5 ± 0.59	(5)	36.1 ± 0.59	(5)	1.2 ± 0.24	(5)	<1	(5)
	20	38.7 ± 0.47	(5)	37.3 ± 0.37	(5)	2.7 ± 0.27	(5)	<1	(5)
	25	40.5 ± 0.16	(5)	40.2 ± 0.21	(5)	5.2 ± 0.09	(5)	2.8 ± 0.05	(5)
ハマフエフキ (BL=5.2cm)	20	35.6 ± 0.27	(10)	34.5 ± 0.32	(10)	12.2 ± 0.47	(10)	8.5 ± 0.56	(10)
	24	36.9 ± 0.21	(10)	36.5 ± 0.30	(10)	14.1 ± 0.55	(10)	9.1 ± 0.38	(10)
	28	38.4 ± 0.55	(10)	37.6 ± 0.58	(10)	14.9 ± 0.34	(10)	10.1 ± 0.40	(10)
	32	39.5 ± 0.36	(10)	39.0 ± 0.46	(10)	17.0 ± 0.49	(10)	12.2 ± 0.38	(10)
ニベ (BL=8.6cm)	20	35.1 ± 0.29	(10)	32.2 ± 0.53	(10)	8.9 ± 0.20	(5)	4.5 ± 0.20	(5)
	24	36.6 ± 0.30	(10)	34.2 ± 0.33	(10)	11.3 ± 0.10	(5)	7.6 ± 0.70	(5)
	28	38.1 ± 0.10	(10)	36.1 ± 0.54	(10)	13.3 ± 0.50	(5)	9.1 ± 0.50	(5)
マハゼ (BL=7.0cm)	20	40.0 ± 0.20	(6)	38.8 ± 0.30	(6)	2.2 ± 0.20	(5)	-	
	24	40.9 ± 0.20	(7)	40.3 ± 0.30	(7)	4.2 ± 0.10	(5)	-	
	28	41.2 ± 0.60	(7)	41.0 ± 0.60	(7)	6.9 ± 0.30	(4)	-	
アイナメ (BL=20.8cm)	15	30.6 ± 0.30	(7)	29.7 ± 0.20	(7)	-		-	
	20	31.8 ± 0.20	(7)	30.7 ± 0.30	(7)	-		-	
	25	32.6 ± 0.00	(7)	32.5 ± 0.10	(7)	-		-	
クロソイ (BL=5.5cm)	15	32.3 ± 0.32	(5)	31.2 ± 0.20	(5)	1.3 ± 0.11	(5)	-	
	20	33.3 ± 0.26	(5)	32.6 ± 0.04	(5)	2.5 ± 0.05	(5)	-	
	25	34.4 ± 0.11	(5)	34.0 ± 0.11	(5)	4.0 ± 0.11	(5)	-	
	28	35.1 ± 0.00	(5)	34.6 ± 0.12	(5)	4.9 ± 0.04	(5)	-	
カサゴ (BL=6.2cm)	15	30.7 ± 0.36	(10)	29.7 ± 0.60	(10)	4.9 ± 0.25	(10)	-	
	20	32.2 ± 0.25	(10)	31.6 ± 0.30	(10)	6.2 ± 0.05	(10)	-	
	25	33.2 ± 0.42	(10)	32.8 ± 0.34	(10)	8.0 ± 0.11	(10)	-	
メバル (BL=5.7cm)	10	27.4 ± 0.40	(5)	26.6 ± 0.04	(5)	3.00 ± 0.00	(5)	-	
	15	29.9 ± 0.36	(5)	28.6 ± 0.15	(5)	3.30 ± 0.05	(5)	-	
	20	31.2 ± 0.24	(5)	30.6 ± 0.13	(5)	5.00 ± 0.13	(5)	-	
	25	32.8 ± 0.21	(5)	32.5 ± 0.16	(5)	8.30 ± 0.64	(5)	-	
	28	33.8 ± 0.25	(5)	33.5 ± 0.10	(5)	10.10 ± 0.58	(5)	-	

1) 平均値±S.D., 2) n; 供試魚尾数, 以下同様

土田：沿岸性魚類の温度選好

第4表 (つづき) 魚類36種の臨界最高(最低)温度 (CTMax, CTMin) と高・低温側の死亡温度 (UDT, LDT)

魚種名	馴致温度	UDT	(n)	CTMax	(n)	CTMin	(n)	LDT	(n)
オニオコゼ (BL=4.8cm)	20	37.2 ± 0.10	(7)	35.3 ± 0.30	(7)	7.4 ± 0.10	(5)	-	
	24	37.7 ± 0.00	(7)	35.8 ± 0.70	(7)	9.3 ± 1.50	(5)	-	
	28	38.1 ± 0.20	(7)	37.3 ± 0.00	(7)	11.3 ± 0.60	(5)	-	
ヒラメ (BL=6.8cm)	12	31.1 ± 0.30	(10)	29.5 ± 0.56	(10)	1.9 ± 0.27	(10)	<0	(10)
	16	33.7 ± 0.32	(10)	32.6 ± 0.44	(10)	3.2 ± 0.21	(10)	<0	(10)
	20	35.2 ± 0.20	(10)	33.9 ± 0.23	(10)	4.3 ± 0.23	(10)	<0	(10)
	24	36.1 ± 0.16	(10)	34.9 ± 0.16	(10)	5.2 ± 0.22	(10)	<0	(10)
ヒラメ (BL=12.5cm)	10	31.5 ± 0.10	(5)	31.2 ± 0.16	(5)	3.0 ± 0.12	(5)	-	
	15	32.9 ± 0.05	(5)	31.8 ± 0.43	(5)	2.4 ± 0.51	(5)	-	
	20	35.5 ± 0.05	(5)	34.6 ± 0.09	(5)	4.7 ± 0.08	(5)	-	
	25	36.4 ± 0.12	(5)	35.3 ± 0.25	(5)	7.8 ± 0.57	(5)	-	
	28	36.6 ± 0.23	(5)	36.2 ± 0.00	(5)	8.9 ± 0.22	(5)	-	
マコガレイ (BL=4.9cm)	15	32.3 ± 0.27	(5)	30.7 ± 0.21	(5)	2.6 ± 0.13	(5)	<1	(5)
	20	32.8 ± 0.11	(5)	31.6 ± 0.08	(5)	3.4 ± 0.54	(5)	<1	(5)
	25	33.8 ± 0.08	(5)	33.1 ± 0.13	(5)	6.1 ± 0.08	(5)	<1	(5)
	28	34.3 ± 0.19	(5)	33.6 ± 0.11	(5)	7.8 ± 0.18	(5)	<1	(5)
カワハギ (BL=5.4cm)	20	35.2 ± 0.30	(7)	32.4 ± 0.80	(7)	-		-	
	24	36.0 ± 0.20	(7)	34.7 ± 0.40	(7)	-		-	
	28	36.9 ± 0.10	(7)	36.3 ± 0.20	(7)	-		-	
トラフグ (BL=7.3cm)	20	36.9 ± 0.30	(10)	35.4 ± 0.40	(10)	7.2 ± 0.50	(5)	-	
	24	38.3 ± 0.20	(10)	36.9 ± 0.30	(10)	9.3 ± 1.10	(5)	-	
	28	39.1 ± 0.10	(10)	38.1 ± 0.40	(10)	11.5 ± 0.70	(5)	-	

1) 平均値±S.D., 2) n; 供試魚尾数, 以下同様

第5表 魚類36種の馴致温度と温度耐性との関係

魚種名	体長(cm)	回帰直線式		相関係数
ニシン	7.1	UDT = 0.264	AT + 23.81	r = 0.952
		CTMax = 0.323	AT + 22.30	r = 0.987
マイワシ	14.7	UDT = 0.340	AT + 24.59	r = 0.969
		CTMax = 0.341	AT + 24.34	r = 0.985
		CTMin = 0.387	AT - 1.30	r = 0.991
		LDT = 0.312	AT - 2.95	r = 0.980
カタクチイワシ	9.7	UDT = 0.237	AT + 28.17	r = 0.995
		CTMax = 0.235	AT + 28.06	r = 0.996
		CTMin = 0.277	AT - 1.37	r = 0.995
		LDT = 0.700	AT - 15.90	r = 1.000
アユ	5.4	UDT = 0.498	AT + 22.96	r = 1.000
		CTMax = 0.495	AT + 22.78	r = 0.999
		CTMin = 0.345	AT - 3.13	r = 0.986
		LDT = 0.333	AT - 4.47	r = 1.000
サケ	10.2	UDT = 0.250	AT + 24.86	r = 0.996
		CTMax = 0.248	AT + 24.60	r = 0.997
マダラ	5.4	UDT = 0.312	AT + 20.86	r = 0.993
		CTMax = 0.313	AT + 20.59	r = 0.987
マアジ	16.7	UDT = 0.281	AT + 27.80	r = 0.946
		CTMax = 0.261	AT + 28.01	r = 0.944
		CTMin = 0.376	AT + 0.28	r = 0.995

UDT, 高温側死亡温度; LDT, 低温側死亡温度; CTMax, 臨界最高温度;
CTMin, 臨界最低温度; AT, 馴致温度.

第5表（つづき） 魚類36種の馴致温度と温度耐性との関係

魚種名	体長 (cm)	回帰直線式	相関係数
シマアジ	10.3	UDT = 0.384 AT + 25.33	r = 0.998
		CTMax = 0.399 AT + 24.86	r = 0.992
		CTMin = 0.414 AT + 0.60	r = 0.944
		LDT = 0.285 AT + 1.13	r = 0.997
ブリ	18.9	UDT = 0.251 AT + 29.61	r = 0.954
		CTMax = 0.362 AT + 26.48	r = 0.995
コトヒキ	5.8	UDT = 0.238 AT + 35.73	r = 0.988
		CTMax = 0.275 AT + 34.03	r = 0.922
		CTMin = 0.438 AT - 0.50	r = 0.999
		LDT = 0.287 AT - 0.90	r = 0.997
イサキ	5.9	UDT = 0.412 AT + 25.88	r = 0.982
		CTMax = 0.450 AT + 24.27	r = 0.987
		CTMin = 0.463 AT - 0.18	r = 0.994
		LDT = 0.275 AT + 1.43	r = 0.979
	10.2	UDT = 0.415 AT + 25.27	r = 0.993
		CTMax = 0.481 AT + 22.98	r = 0.993
		CTMin = 0.462 AT - 0.68	r = 0.992
		LDT = 0.387 AT - 1.38	r = 0.983
スズキ	6.2	UDT = 0.523 AT + 25.77	r = 0.990
		CTMax = 0.542 AT + 24.71	r = 0.990
		CTMin = 0.409 AT - 3.20	r = 0.991
	11.3	UDT = 0.485 AT + 25.62	r = 0.980
クロダイ	4.1	UDT = 0.595 AT + 24.79	r = 0.997
		CTMax = 0.517 AT + 25.31	r = 0.997
		CTMin = 0.408 AT - 1.91	r = 0.985
		LDT = 0.375 AT - 4.47	r = 0.999
11.4	UDT = 0.392 AT + 28.15	r = 0.964	
	CTMax = 0.408 AT + 27.21	r = 0.972	
ミナミクロダイ	5.5	UDT = 0.308 AT + 31.38	r = 0.987
		CTMax = 0.400 AT + 27.80	r = 0.994
		CTMin = 0.590 AT - 5.89	r = 0.999
		LDT = 0.450 AT - 0.71	r = 0.997
キチヌ	4.3	UDT = 0.450 AT + 27.50	r = 0.982
		CTMax = 0.463 AT + 26.30	r = 0.999
		CTMin = 0.513 AT - 3.53	r = 0.997
		LDT = 0.350 AT + 0.43	r = 0.999
ヘダイ	5.8	UDT = 0.275 AT + 31.93	r = 0.999
		CTMax = 0.425 AT + 26.77	r = 0.999
		CTMin = 0.475 AT - 1.03	r = 1.000
		LDT = 0.325 AT - 0.93	r = 0.985
マダイ	11.6	UDT = 0.432 AT + 25.09	r = 0.998
		CTMax = 0.526 AT + 20.94	r = 0.995
チダイ	9.9	UDT = 0.362 AT + 25.80	r = 0.998
		CTMax = 0.375 AT + 25.30	r = 0.993
		CTMin = 0.625 AT - 3.47	r = 0.999
		LDT = 0.350 AT - 0.03	r = 0.996

UDT, 高温側死亡温度; LDT, 低温側死亡温度; CTMax, 臨界最高温度;
CTMin, 臨界最低温度; AT, 馴致温度.

第5表 (つづき) 魚類36種の馴致温度と温度耐性との関係

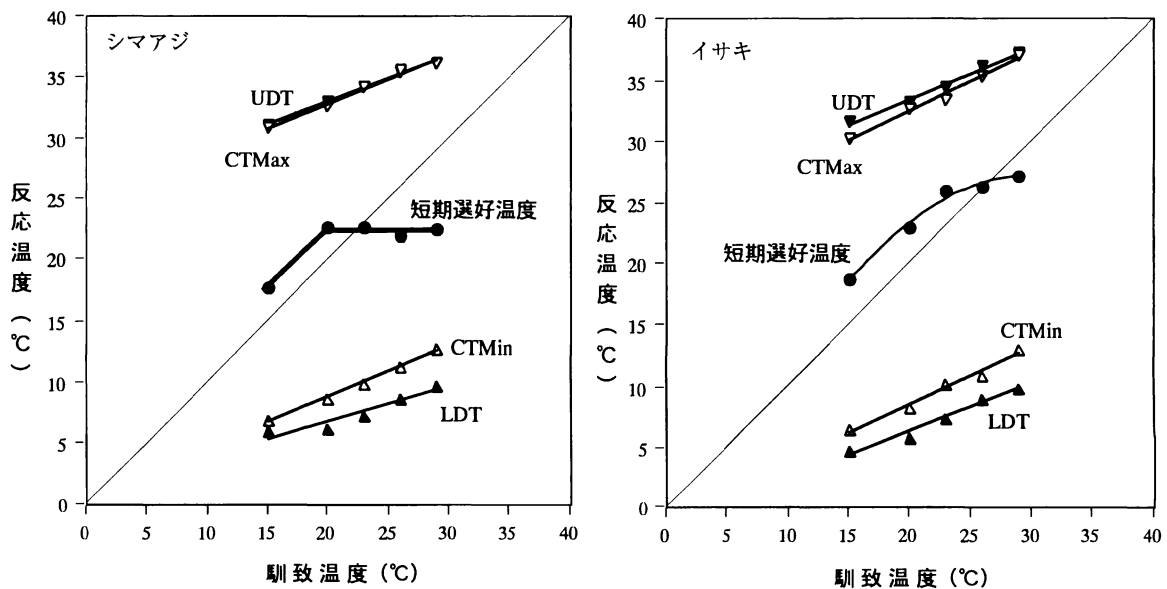
魚種名	体長(cm)	回帰直線式		相関係数
クロメジナ	6.1	UDT = 0.200	AT + 33.60	r = 0.977
		CTMax = 0.262	AT + 30.93	r = 1.000
		CTMin = 0.475	AT - 1.57	r = 0.998
イシダイ	6.5	UDT = 0.269	AT + 30.84	r = 0.999
		CTMax = 0.372	AT + 27.68	r = 0.998
		CTMin = 0.398	AT + 1.12	r = 1.000
		LDT = 0.194	AT + 2.71	r = 0.999
	14.3	UDT = 0.281	AT + 29.65	r = 0.993
		CTMax = 0.364	AT + 27.24	r = 0.991
シロギス	5.8	UDT = 0.460	AT + 25.46	r = 0.989
		CTMax = 0.512	AT + 23.95	r = 0.995
		CTMin = 0.490	AT - 0.46	r = 0.998
		LDT = 0.382	AT - 3.37	r = 0.989
	12.1	UDT = 0.380	AT + 27.13	r = 1.000
		CTMax = 0.465	AT + 24.70	r = 0.991
		CTMin = 0.423	AT + 0.20	r = 0.998
		LDT = 0.366	AT - 3.47	r = 0.993
ホシギス	5.3	UDT = 0.337	AT + 30.83	r = 0.994
		CTMax = 0.375	AT + 29.83	r = 0.988
		CTMin = 0.380	AT + 4.67	r = 0.987
		LDT = 0.303	AT + 2.11	r = 0.962
アオギス	9.6	UDT = 0.350	AT + 29.70	r = 0.996
		CTMax = 0.375	AT + 30.77	r = 1.000
		CTMin = 0.380	AT - 5.13	r = 0.995
		LDT = 0.303	AT - 6.03	r = 0.999
ボラ	3.8	UDT = 0.400	AT + 30.40	r = 0.996
		CTMax = 0.600	AT + 29.67	r = 0.973
ハマフエフキ	5.2	UDT = 0.330	AT + 29.02	r = 0.998
		CTMax = 0.365	AT + 27.41	r = 0.992
		CTMin = 0.380	AT + 4.67	r = 0.987
		LDT = 0.303	AT + 2.11	r = 0.962
ニベ	8.6	UDT = 0.375	AT + 27.60	r = 1.000
		CTMax = 0.488	AT + 22.47	r = 1.000
		CTMin = 0.550	AT - 2.03	r = 0.999
		LDT = 0.575	AT - 6.73	r = 0.980
マハゼ	7.0	UDT = 0.150	AT + 37.10	r = 0.961
		CTMax = 0.275	AT + 33.43	r = 0.979
		CTMin = 0.587	AT - 9.67	r = 0.996
アイナメ	20.8	UDT = 0.200	AT + 27.67	r = 0.993
		CTMax = 0.280	AT + 25.37	r = 0.987
クロソイ	5.5	UDT = 0.214	AT + 29.09	r = 1.000
		CTMax = 0.264	AT + 27.29	r = 0.999
		CTMin = 0.281	AT - 3.03	r = 0.998
カサゴ	6.2	UDT = 0.250	AT + 27.03	r = 0.993
		CTMax = 0.310	AT + 25.17	r = 0.992
		CTMin = 0.310	AT - 0.17	r = 0.984

UDT, 高温側死亡温度; LDT, 低温側死亡温度; CTMax, 臨界最高温度;
CTMin, 臨界最低温度; AT, 馴致温度.

第5表 (つづき) 魚類36種の馴致温度と温度耐性との関係

魚種名	体長 (cm)	回帰直線式	相関係数
メバル	5.7	UDT = 0.342 AT + 24.31	r = 0.993
		CTMax = 0.386 AT + 22.80	r = 1.000
		CTMin = 0.411 AT - 2.12	r = 0.957
オニオコゼ	4.8	UDT = 0.113 AT + 34.97	r = 0.998
		CTMax = 0.250 AT + 30.13	r = 0.961
		CTMin = 0.488 AT - 2.37	r = 1.000
ヒラメ	6.8	UDT = 0.416 AT + 26.53	r = 0.947
		CTMax = 0.440 AT + 24.80	r = 0.963
		CTMin = 0.275 AT - 1.30	r = 0.998
	12.5	UDT = 0.302 AT + 28.65	r = 0.974
		CTMax = 0.294 AT + 28.06	r = 0.974
		CTMin = 0.372 AT - 1.96	r = 0.934
マコガレイ	4.9	UDT = 0.159 AT + 29.81	r = 0.990
		CTMax = 0.233 AT + 27.13	r = 0.994
		CTMin = 0.407 AT - 4.00	r = 0.972
カワハギ	5.4	UDT = 0.213 AT + 30.93	r = 0.999
		CTMax = 0.488 AT + 22.77	r = 0.995
トラフグ	7.3	UDT = 0.275 AT + 31.50	r = 0.988
		CTMax = 0.337 AT + 28.70	r = 0.998
		CTMin = 0.538 AT - 3.57	r = 1.000

UDT, 高温側死亡温度; LDT, 低温側死亡温度; CTMax, 臨界最高温度;
CTMin, 臨界最低温度; AT, 馴致温度.



第15図 馴致温度と選好温度および高・低温側のCTMとDTとの関係

DTとの差は0.8~10.0°Cで、CTMaxとUDTとの差よりも大きかった。この差は、温度降下が魚の代謝活動を低下させること、および鰓蓋運動や行動の不活発化が生じること、さらには寒冷麻酔状態に陥ることなど、平衡喪失状態および生死の判定が困難な場合が多いことなども関係していると考えられる。

(2) 温度耐性と選好温度との関係

第15図にはイサキとシマアジの馴致温度と高・低温側の温度耐性を表す各反応温度および短期選好温度との関係を示す。イサキおよびシマアジのCTMaxと短期選好温度の差はそれぞれ 7.6~11.7°C, 8.0~10.8°Cであったのに対して、CTMinと短期選好温度との差はそれぞれ12.2~15.7°C, 15.0~17.9°Cであり、CTMaxと短期選好温度との差の方がCTMinと短期選好温度との差よりも小さかった。この傾向は本研究に用いたすべての海産魚類で認められた。同様の傾向は、bluegill (*Lepomis macrochirus*), brown bullhead (*Ictalurus nebulosus*), yellow perch (*Perca flavescens*) などの魚種でも報告されている (Reynolds *et al.*, 1976; Reynolds and Casterlin, 1980; Giattina and Garton, 1982)。すなわち、魚は高・低温側の耐性温度 (CTMax, CTMin) の中間値より、やや高い温度を選好する特性を有していると考え

られる。

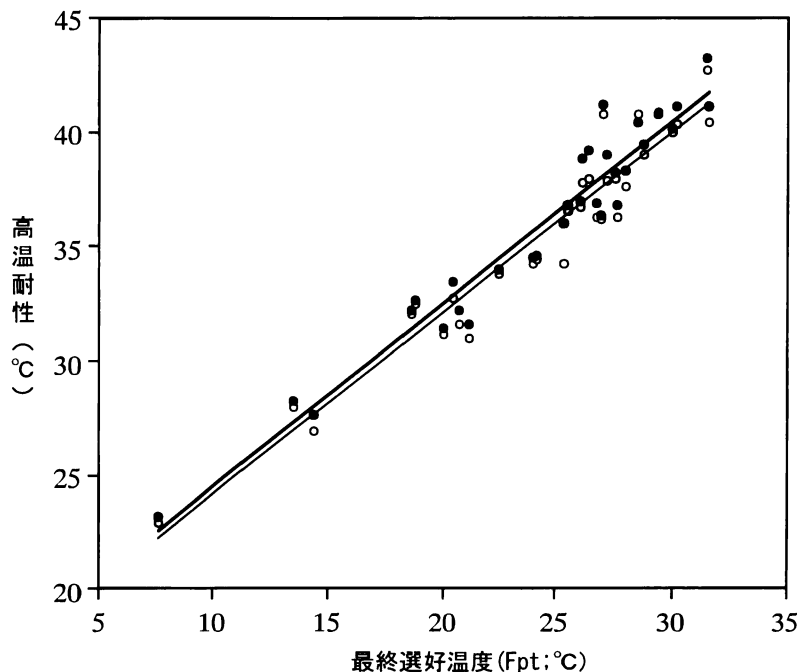
一方、温度耐性と短期選好温度との関係は、これまでに述べた様に、魚の高・低温側の温度耐性を表すCTMaxおよびCTMinは、馴致温度に依存して馴致温度が高いほどCTMaxも高い値を示す直線関係が認められているのに対して、短期選好温度が馴致温度に依存する魚種 (イサキ, イシダイなど; 第11, 12図) やほとんど依存しない魚種 (ニシン, カサゴなど) など、種によって異なることから、温度耐性と短期選好温度との関係は一定の傾向を示さなかった。そこで、前記した魚種固有の最終選好温度と最終選好温度を馴致温度とした場合の高温側の温度耐性 (CTMaxおよびUDT) との関係について検討した。

最終選好温度を推定し得た30魚種の最終選好温度と、最終選好温度を馴致温度とした場合のCTMaxおよびUDT (第5表の直線式より推定した値) との関係を第16図に示す。最終選好温度 (Fpt) が高い魚種ほどCTMaxおよびUDTは高く、次式で表される直線関係が認められた (いずれも $P < 0.001$)。

$$CTMax = 0.791 \text{ Fpt} + 16.231 \quad [r^2 = 0.930]$$

$$UDT = 0.799 \text{ Fpt} + 16.517 \quad [r^2 = 0.937]$$

先に, Jobling (1981) は最終選好温度と高温側の温度耐性との関係について調べ、両者の間に



第16図 最終選好温度で温度馴致した場合の高温耐性 [●; 高温側死亡温度 (UDT), ○; 平衡喪失温 (CTMax)] と最終選好温 (FP) との関係

高い相関 ($r=0.88$) のあることを報告している。彼が用いた温度耐性に関する知見は、多くの研究者が行った50%致死温度およびCTMaxで、実験条件もさまざまである。今回得られた相関係数はJoblingの値よりも高く、温度耐性に関する実験条件の均一化によるものと考えられる(Tsuchida, 1995)。CTMaxは温度上昇速度によって異なり、上昇速度が速いほどCTMaxが高い値を示すことが知られている(Cox, 1974; Becker and Genoway, 1979; 渡辺・土田, 1984)。しかし、いずれの場合とも高い相関関係が認められ、温度に対する行動から推定される最終選好温度と生理学的反応である高温耐性との間に、密接な係わりの存在することがあらためて示唆された。

2. 成長適温と選好温度

1) 材料および方法

成長適温の把握を目的とした飼育実験には、秋田県水産振興センターから種苗放流用稚魚を入手し、水温22~24℃で約2か月間養成飼育したクロソイ幼魚を用いた。

飼育実験には容積500 Lの円形水槽を用いて、12, 15, 20, 22, 25, 28, 30℃の7温度区を設け、各水槽に50尾の供試魚を収容した。養成飼育温度(平均温度23.2℃)から各実験温度への移行には、5日をかけて緩やかに昇温もしくは降温し、さらに2日間の予備飼育を行った。実験飼育期間は21日間とした。餌には給餌前に解凍してから計量したツノナシオキアミを用い、供試魚の摂餌状況を確認しながら、午前10時と午後3時の1日2回、1時間内に飽食する量を与えた。摂餌量は、給餌終了後に残餌を回収して決定した。ただし、実験飼育開始日と終了日には無給餌とした。実験開始時と終了時には、MS222で麻酔処理(60ppm)を行い、各個体の体長、体重を測定した。温度と成長との関係を解析するため、各温度区で日間摂餌率、日間成長率、餌料転換効率を次式によって算出した。

$$\text{日間摂餌率(\%)} = (\sum t / (Fw + Iw) / 2) / t \times 100$$

$$\text{日間成長率(\%)} = ((Fw - Iw) / (Fw + Iw) / 2) / t \times 100$$

$$\text{餌料転換効率(\%)} = (\text{日間成長率} / \text{日間摂餌率}) \times 100$$

なお、 $\sum t$ は総摂餌量(湿重量)、 Iw は開始時平均体重、 Fw は終了時平均体重、 t は飼育日数である。

10分ごとに測定した実験期間中の各飼育温度の標準偏差は ± 0.2 ℃以下であった。また、塩分は33.1~34.3、pHは8.13~8.25、溶存酸素飽和度は

92~105%の範囲にあった。

2) 結果および考察

(1) 温度条件と成長に関する指標

第6表に12~30℃の各温度区における飼育結果を示す。実験開始時における供試魚の平均体重は、温度区間で有意差がなかった($P>0.05$)。21日間の飼育実験期間中、12~22℃の各温度区では全個体が生存したが、25, 28℃の両区ではそれぞれ1尾の死亡が、また、30℃区では22尾(44%)の死亡が発生した。

日間摂餌率は、12~25℃では温度の上昇に伴って増加し、25℃区で最大となり、28℃以上の温度区で低下した。給餌に際して、20~28℃の各区で終始活発な摂餌行動が観察されたのに対して、12℃区においては他の温度区に比較して摂餌行動が緩慢であった。日間成長率はこの摂餌状況に準じて20~25℃間で明らかに上昇し、中央の22℃区で最高値を示した。供試魚の約半数の死亡が認められた30℃区の日間成長率は、28℃区に比べより低い値であった。以上の結果から餌料転換効率は20~22℃で最大となり、日間摂餌率および日間成長率のピークを示す温度より幾分低温側にずれることが明らかになった。

(2) 成長適温と選好温度

第17図には温度選好実験結果の1例を示す。温度無勾配期(0期)において供試魚はたえず動きまわるということはなく、実験水槽の一端に偏在し時々移動する程度であった。温度勾配形成に伴う温度変化に対して、供試魚はしきりに位置を変える行動を示した。温度勾配完成直後のI, II期におけるクロソイの滞留温度の上・下限値は10~31℃の広い範囲にあったが、温度勾配完成から24時間経過したIII, IV期の滞留温度範囲は14~25℃とはるかに狭まり、かつ最終選好温度は20.5℃と推定された(第3表)。

第18図には温度選好実験結果と成長に関する各指標を合わせて示した。今回の実験で日間摂餌率は25℃で最高を示したが、選好温度実験水槽内の25℃以上の温度域には殆ど滞留しなかった。また、28℃から30℃の間で日間摂餌率、日間成長率および餌料転換効率が激減した(第18図)。さらに、30℃で半数近くが死亡したことから、30℃以上の高温では生理的変調を生じている可能性が考えられる。一方、日間成長率は22℃で、餌料転換効率は20℃でそれぞれ最大を示し、クロソイ幼魚の成長最適温度域は20~22℃付近にあると考えられる。

第6表 クロソイの飼育実験結果

温度 平均値 ± S.D. (°C)	実験期間 (日)	尾数	開始時体重 平均値 ± S.D. (g)	終了時体重 平均値 ± S.D. (g)	死亡率 (%)	日間* 成長率 (%)	日間** 摂餌率 (%)	餌料*** 転換効率 (%)
12.1 ± 0.34	21	50	1.79 ± 0.27	2.88 ± 0.81	0	2.22	17.5	12.7
15.0 ± 0.06	21	50	1.83 ± 0.30	4.52 ± 0.72	0	4.03	25.7	15.7
20.0 ± 0.07	21	50	1.70 ± 0.29	6.22 ± 1.58	0	5.44	29.7	18.3
22.0 ± 0.13	21	50	1.82 ± 0.28	7.53 ± 1.72	0	5.82	32.5	17.9
25.1 ± 0.09	21	50	1.70 ± 0.24	6.49 ± 1.45	2	5.57	34.3	16.2
28.0 ± 0.07	21	50	1.75 ± 0.26	4.57 ± 0.99	2	4.25	30.1	14.1
30.1 ± 0.08	21	50	1.76 ± 0.25	2.28 ± 0.28	44	1.23	17.3	7.1

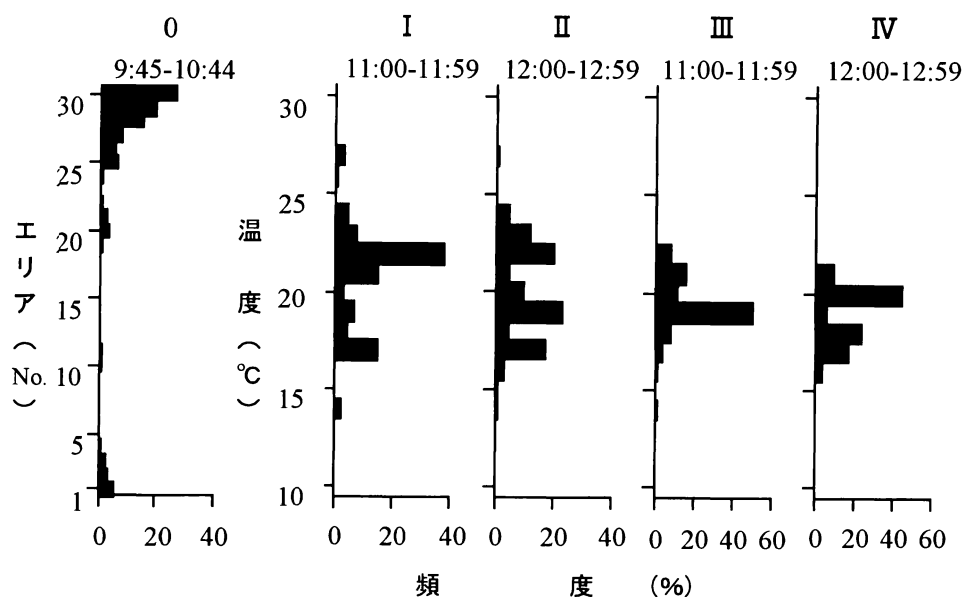
* 日間成長率 (%) = $(F_w - I_w) \times 100 / (t \times (F_w + I_w) / 2)$

** 日間摂餌率 (%) = $\sum f t \times 100 / (t \times (F_w + I_w) / 2)$

*** 餌料転換効率 (%) = (日間成長率) × 100 / (日間摂餌率)

I_w: 開始時体重 (g), F_w: 終了時体重 (g), t: 実験期間 (日),

f t: 実験期間中に供試魚が摂餌したツノナシオキアミの湿重量 (g).



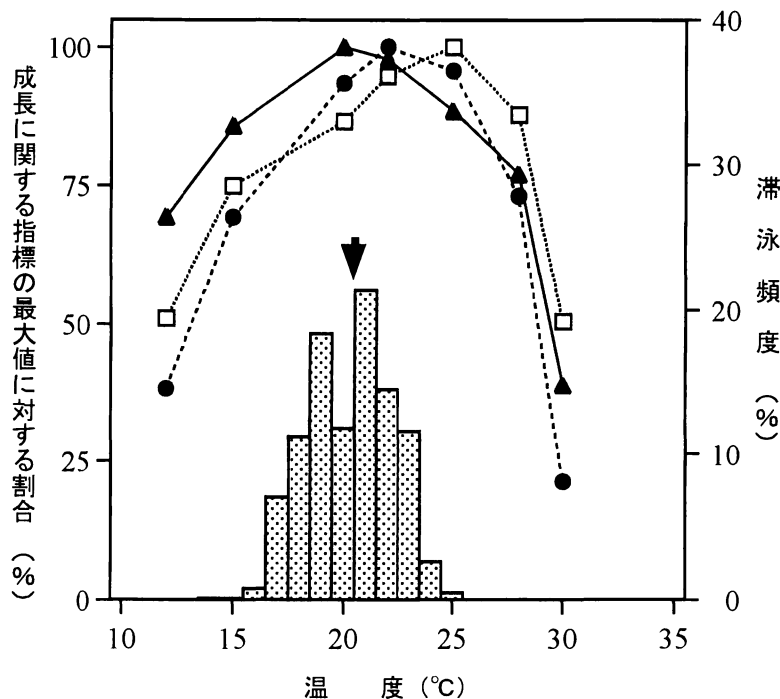
第17図 クロソイの水平温度勾配下における温度選好実験結果の1例

20°Cの温度無勾配期 (0期), 10-30°Cの温度勾配完成直後 (I, II期) および10-30°Cの温度勾配完成から24時間後 (III, IV期) について測定

この成長最適温度域は滞留頻度の高い温度域および選好温度(17.8~22.8°C)の範囲内にあると共に、餌料転換効率および成長率が最大となる温度と最終選好温度(20.5°C)とはほぼ一致していた。

これまでに餌料転換効率あるいは日間成長率が最大となる温度と最終選好温度がほぼ一致するという結果は、ベニザケ (*Oncorhynchus nerka*),

bluegill (*Lepomis macrochirus*) などで報告されている (Brett, 1971; Beitinger and Magnuson, 1979; Kellogg and Gift, 1983)。また、20~29°C区で飼育したシロギス幼魚の日間成長率および餌料転換効率が最大となる温度が26°C区にあり (城戸・木下, 1985), 本実験から推定された最終選好温度 (25.5°C) と近似している。さ



第18図 クロソイの成長に関する各指標の最大値に対する割合と滞留温度の頻度分布および最終選好温度 ◆：日間摂餌率，○：日間成長率，▲：餌料転換効率，矢印：最終選好温度

らに，Jobling (1981) は魚類の成長適温と行動実験から推定した最終選好温度に関するこれまでの知見を整理し，成長適温と最終選好温度とがほぼ等しい関係にあるという結果を得ている。これらの結果から，温度に対する行動から得られた最終選好温度と成長適温とは深い係わりがあることが示唆される。

3. 酸素消費量と選好温度

1) 材料および方法

温度と酸素消費量との関係を把握する実験には，カサゴ（平均体重±S.D.；13.0±2.4g）を用いた。供試魚は10°Cで2日間温度馴致した後，2日間をかけて15°Cに昇温し，さらに2日間の温度馴致を行った。同様に，20，23，26°Cで順次温度馴致した。供試魚の酸素消費量は10～26°Cの各温度馴致終了に続いて測定した。酸素消費量の測定は，密閉止水方式としたが，測定と測定の間は流水状態とした。呼吸室は500mLの亚克力パイプ製で，呼吸室内の海水を回転子で静かにかき混ぜた。回転子は供試魚との接触を避けるため亚克力製の多孔板で仕切った。一回の測定には4～5尾の供試魚を使用し，曝気した海水を毎分300mL呼吸室に注入した。測定開始時に止水状態とし，呼吸室内の

溶存酸素量が測定開始直前の溶存酸素量の70%に達した時点で，次の測定のため流水状態とした。2グループの供試魚群について，各温度馴致で3～5回の測定を行った。溶存酸素量の計測は電極型溶存酸素計を用い，ウィンクラー法によって更正した。

酸素消費量は \dot{V}_{O_2} は次式より求めた。

$$\dot{V}_{O_2} = V \cdot (\Delta DO / \Delta t) / W$$

ここに，Vは呼吸室の容積から供試魚の体積を減じた値，Wは供試魚の体重， $(\Delta DO / \Delta t)$ は一定時間間隔で測定した酸素濃度から算出した1時間当たりの酸素減少速度である。

2) 結果および考察

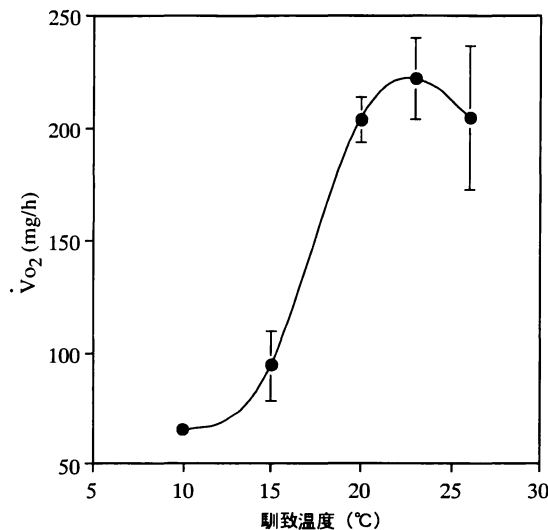
馴致温度とカサゴの酸素消費量との関係を第19図に示す。馴致温度10～23°Cの酸素消費量は馴致温度の上昇に伴って増大する傾向が認められ，23°Cでピークに達した。馴致温度26°Cでは，酸素消費量の明らかな低下が認められた。また，代謝速度を表す温度係数 (Q_{10}) は15～20°Cの間で4.69とピークに達したが，20～23°Cの間で1.33と減少し，20°Cを越えた温度で変曲点となり，その後減少する傾向を示した（第7表）。

変温動物である魚の代謝活性は，環境温度によって大きく影響される。一般に，生活し得る範囲内

での標準代謝量は温度と共に上昇するが、適温以上になると活動代謝量は降下したり頭うちになったりする。活動代謝量と標準代謝量の差は活動のために利用される分の酸素量で、scope for activity (活動余地) という (Fry, 1947)。Kelsch and Neill (1990) や Holmes and Lin (1994) は、活動代謝量と標準代謝量の差が最大となる最大活動余地と選好温度の関係を論じている。

多くの場合、活動代謝量は最大運動時の代謝量で表されている。しかし、あまり活動しない底生性魚類に属するカサゴの活動代謝量の測定は困難である。今回、酸素消費量の測定に用いた装置の呼吸室は、外部からの刺激を最小限にすると共に、供試魚が十分に行動できる空間を持つよう配慮した。このため、本実験で得られた酸素消費量は、Fry (1967) がいう routine metabolism (平常時

の代謝量) であると考えられる。さらに、異なる温度馴致条件下における酸素消費量は、温度勾配中での代謝状態を表しているものと考えられる。カサゴの温度に伴う酸素消費量の増加率は、20℃を越えると低下に転じた。この温度は最終選好温度 (20.7±1.5℃; 第3表) とほぼ一致している。この両者の一致は、魚がある適温を持った酵素系を有していることに起因していると考えられる。酵素反応はアレニウスの式に従って温度に依存し、各酵素はそれぞれ固有の適温を持っている。その適温を越えるような温度が与えられた場合、反応速度は低下すると共に、代謝量の増加率の低下を引き起こすことになろう。このように、カサゴの代謝量の全体としての適温は、代謝量の増加率が最大となる20℃付近であると考えられる。カサゴは温度勾配下において、適温レベルのこれら生理学的作用を保つために20.7±1.5℃を選好したものと考えられる。



第19図 カサゴの馴致温度と酸素消費量 (V_{O₂}) との関係

温度選好に関わる二・三の要因

先に述べたように、温度選好行動は馴致温度、各魚種の生態的特徴などの要因によって異なることが明らかとなった。この章では温度以外の環境要因として溶存酸素量、生物学的要因として飢餓状態および成長段階が選好温度に及ぼす影響について検討した (土田・石塚, 1997; 土田・田端, 1997)。

1. 溶存酸素量と選好温度

1) 供試魚

実験に用いたスズキは、1985年1月に千葉県富津市天羽漁業協同組合の市場へ水揚げされたスズキ親魚から採卵し、人工受精によって得られた卵

第7表 カサゴの酸素消費量とQ₁₀に及ぼす馴致温度の影響

馴致温度 (°C)	実験日数	供試魚尾数	酸素消費量 (mg k ⁻¹ h ⁻¹)	温度間隔	Q ¹⁰
10	2	8	65.4 ± 3.7		
15	2	8	94.2 ± 15.5	10-15	2.07
20	2	7	203.9 ± 10.4	15-20	4.69
23	2	6	222.1 ± 17.9	20-23	1.33
26	2	6	204.5 ± 32.2	23-26	0.76

を孵化させたのち約5～8ヵ月間飼育したものである。供試魚の大きさは平均体長で16.5cm, 平均体重33.6gであった。

実験開始前に供試魚を500L円形水槽に収容し、29℃の温度で少なくとも2週間以上にわたって温度馴致飼育を行った。温度馴致前の温度から馴致温度への移行は、2～5日を要し緩やかに昇温もしくは降温して、急激な温度変化を避けた。馴致期間中は、1日2回ツノナシオキアミを飽食するまで与えた。

2) 実験方法

溶存酸素量が及ぼす温度選好への影響を把握する実験には、垂直温度勾配装置を用いた。実験前日に、馴致温度と等しい温度無勾配条件の試験水槽内に供試魚5尾を収容し、実験開始の少なくとも約3時間前から、窒素ガスもしくは酸素ガスを通気して試験水槽内の海水の溶存酸素量を所定のレベルに調整した。通気は溶存酸素量が所定のレベルに到達した時点で終了し、供試魚に異常な行動がないことを確認したのち実験を開始した。記述した温度選好の実験手順(第5図)にならって、供試魚の遊泳位置および遊泳温度に関する3分ごとの記録を馴致温度と等しい温度無勾配状態で1時間(0期)、次いで水槽内に15～35℃の範囲の温度勾配が形成された直後2時間(I, II期)に行った。選好温度はI, II期それぞれの供試魚が遊泳した温度の平均値とした。

各実験開始直前および終了時には、各水深帯の海水注入側の配管に取り付けられた採水管を通じて塩分、pH、溶存酸素量をそれぞれ測定した。なお、溶存酸素量は電極型溶存酸素計を用いて計測すると共に、No. 3, 6, 9の水深帯から採水した海水ではウィンクラー滴定法も併せて実施し、電極型溶存酸素計の計測値を更正した。

3) 結果および考察

第20図に29℃に温度馴致したスズキの異なる溶存酸素量における温度選好実験結果を例示する。29℃の温度無勾配期(0期)における溶存酸素量と飽和度は、鉛直的にはほぼ同様であった。15～35℃の温度勾配I, II期の溶存酸素量も全層にわたりほぼ等しかったが、それ故に飽和度は上層から下層に向かって8%以上の明確な低下が示された。

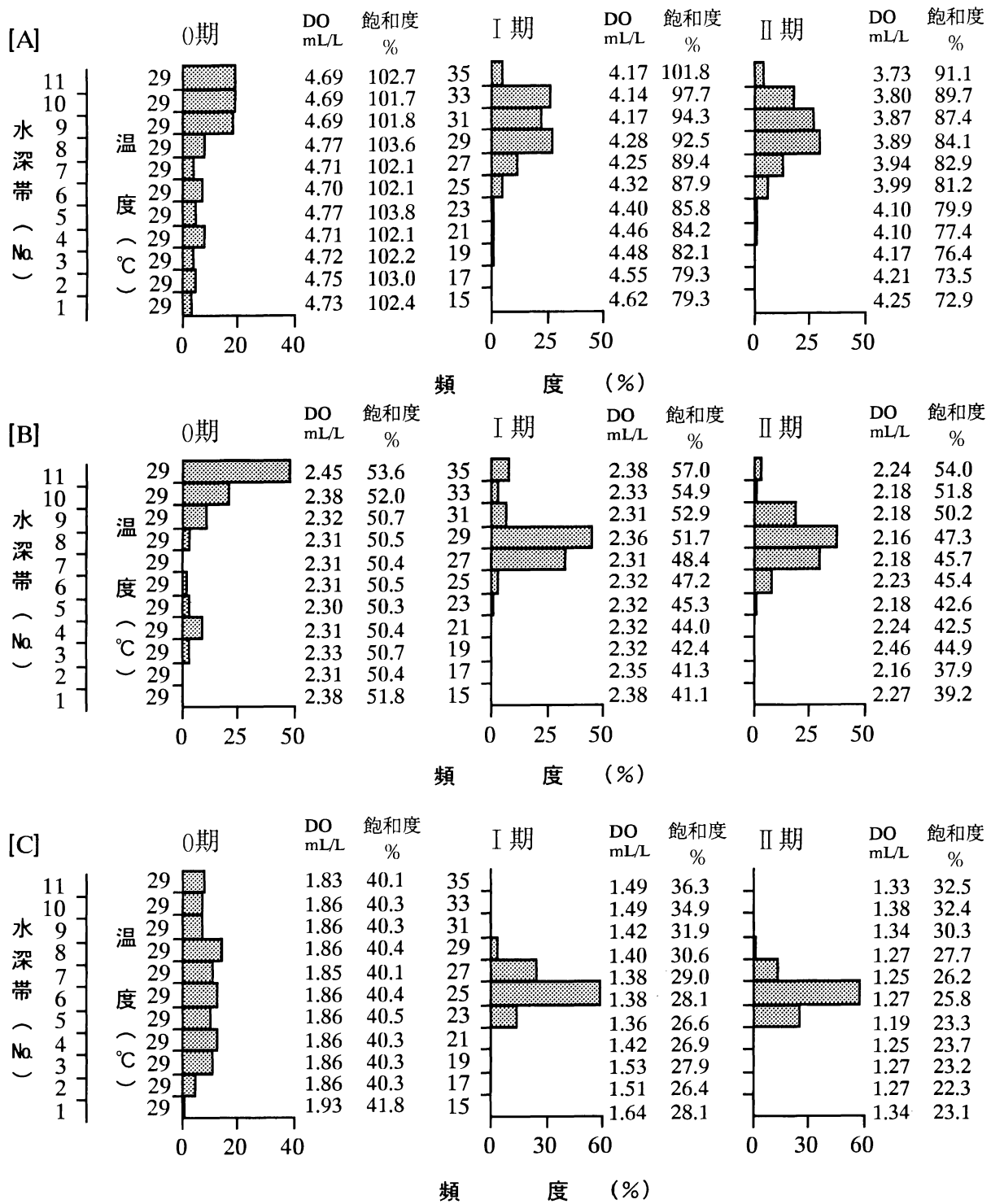
0期に供試魚の遊泳した水深帯は、平均溶存酸素量が4mL/L以上の高溶存酸素量(第20図A)および約2mL/Lの中溶存酸素量(第20図B)では上層部を、平均溶存酸素量が2mL/L未満の低

溶存酸素量(第20図C)では中層部を中心とする広い範囲にわたっていた。15～35℃範囲の温度勾配完成直後のI, II期における供試魚は、高溶存酸素量では29～33℃を中心とした温度域を遊泳した。主な遊泳温度域の飽和度は、I期が93～98%, II期が84～90%であった。中溶存酸素量の場合は、泳温度域が27～29℃, 飽和度が46～52%の水深帯を中心に遊泳し、高溶存酸素量の場合と比較して31℃で飽和度50～53%以上の水深帯での遊泳頻度が減少した。低溶存酸素量の場合では、さらに29℃以上の温度域の遊泳がほとんど認められなくなり、飽和度が23～29%の25～27℃の温度域を中心に遊泳した。この様に、供試魚は飽和度が高い温度域があるにも係わらず、溶存酸素量の低下に伴ってより低い温度域を選好する傾向を示した。

供試魚が遊泳した水深帯の平均溶存酸素量および酸素飽和度と短期選好温度との関係を第21図に示す。平均溶存酸素量が4mL/L以上では、短期選好温度が29.1～30.7℃の範囲内にあった。しかし、平均溶存酸素量が4mL/L未満では、溶存酸素量の減少に従って急激に短期選好温度が低下する傾向が認められた。また、明らかに短期選好温度が低下し始める酸素飽和度は、約75%であった。

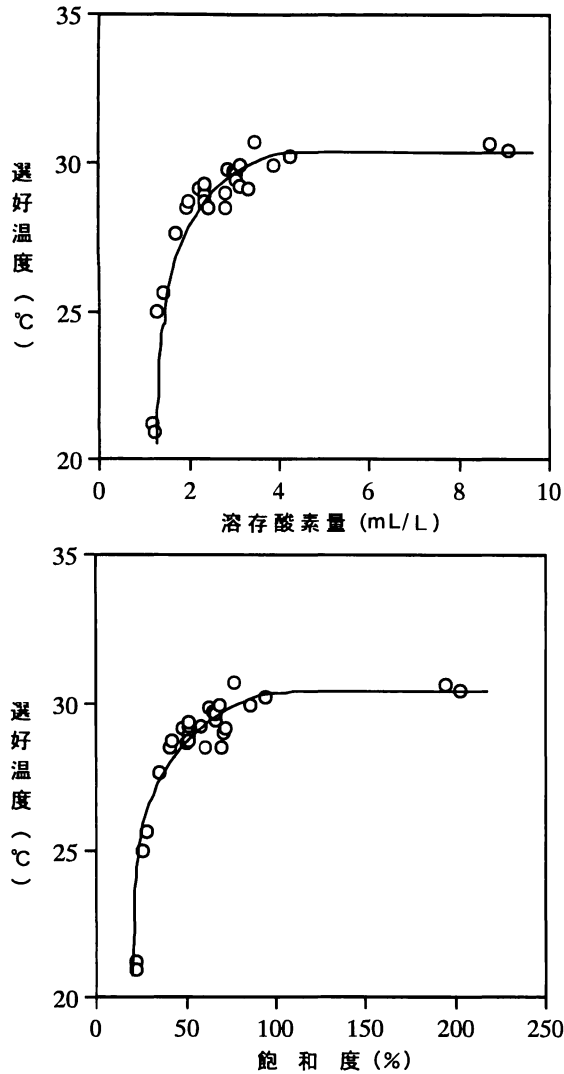
同様の結果は、コイ科の一種であるplains minnow (*Hybognathus placitus*) やニジマス (*Oncorhynchus mykiss*) で認められている(Bryan et al., 1984; Schurmann et al., 1991)。plains minnow の場合、21℃で馴致された供試魚は溶存酸素量が5mL/L以上では30℃を選好したのに対し、溶存酸素がこれより低下するに従ってより低い温度を選好するようになり、約2mL/Lでは17℃を選好した。また、ニジマスにおいても溶存酸素量の減少に伴って、最終選好温度および高・低温側の忌避温度が低下した。この様に、魚類の選好温度は低酸素の影響を強く受けると考えられる。

一般に、魚では低酸素条件下に対する調整として呼吸機能や循環機能に変化がおこる。これらの変化は、まず呼吸振幅の増大と呼吸頻度の増大、さらに酸素低下によって動脈血の酸素含量や代謝量の低下が始まり、摂餌や成長など正常で健全な生活ができなくなる(板沢, 1977)。山元(1991)は、酸素飽和度が75.3%より低下すると、マアジは正常状態での酸素消費量に相当する酸素量の摂取を維持するために鰓換水量を著しく増加させることを明らかにした。この値は、スズキの選好温



第20図 スズキの異なる溶存酸素条件における温度選好実験結果

A：平均溶存酸素量4.15mL/Lの実験結果， B：平均溶存酸素量2.25mL/Lの実験結果， C：平均溶存酸素量1.40mL/Lの実験結果



第21図 スズキの選好温度と溶存酸素量および飽和度との関係

度が低下し始める酸素飽和度（約75%）に近似している。また、コイ (*Cyprinus carpio*), ウナギ (*Anguilla japonica*), ヘダイ, マダイなどでは、いずれも酸素飽和度が40~55%以下で急激な摂餌率と成長率の低下がおきると報告されている（千葉, 1965; Chiba, 1983; 山形ら, 1983; 千葉, 1988）。

一般に、多くの生体现象の Q_{10} は2~3であることが知られている。仮に、スズキの代謝量の Q_{10} が2.5とすると、2°Cあるいは4°Cの温度低下によって代謝量の Q_{10} は17%あるいは31%減少することになる。すなわち、十分な酸素条件下と比較して、低酸素条件下においてより低い温度域を選好する魚の行動は、十分な酸素条件下と同じ温

度域を選好した場合に呼吸ストレスを生ずることから、少しでも低い温度を選好して代謝率を減少させ、呼吸ストレスから逃れる適応反応の可能性が考えられる。

2. 飢餓状態と選好温度

1) 供試魚

実験に用いたマアジは、宮崎県沿岸の定置網で漁獲され静岡県沼津市内浦漁業協同組合管内の養殖生け簀で約1ヶ月間蓄養されていたものを、活魚業者を通して入手した。実験開始に先立ち、供試魚約100尾（平均体長7.2cm）を温度馴致用の飼育水槽（500 L）に移し、濾過海水温度調節設備から供給される海水を毎時500 L注水して、15週間にわたり25°Cで温度馴致飼育を行った。馴致期間中の平均温度とその標準偏差は 25.1 ± 0.2 °Cであった。供試魚を自然水温（平均値18.7°C）から馴致温度へ移行する際には、3日間をかけて緩やかに昇温し、急激な温度変化をさけた。養成飼育および温度馴致飼育期間中には、解凍したツノナシオキアミを午前と午後の1日2回飽食するまで与えた。馴致飼育6週間目に、対照としての非絶食魚5群各5尾につき温度選好実験を合計5回行った。その後、馴致温度条件下で供試魚への給餌を止め、7, 14, 21, 28, 42, 56日間経過後に、それぞれ2群各5尾につき1回ずつ、合計12回の実験を行った。なお、対照群の供試魚は実験前日の午後の給餌前に実験水槽内に収容したため、正確には約1日の絶食状態である。

2) 実験方法

対照群および上記の各絶食期間における選好温度の測定には垂直温度勾配装置を用いた。実験の基本的手順は前述した温度選好実験と同様である。すなわち、実験前日に水槽全体の温度を馴致温度と等しい25°Cとした温度無勾配状態の中に供試魚を収容し、一晩放置した。供試魚の遊泳行動に特に異常が認められないことを確認した後、実験を開始した。供試魚を実験水槽に収容した後は無給餌とした。

実験はまず、温度無勾配状態の1時間を0期とした。その後最下層部 (No. 1) と最上層部 (No. 11) との間に、15~35°Cの範囲の温度勾配が形成された直後の2時間を前後1時間ごとに分けI期とII期とし、合計3期を供試魚の遊泳位置および遊泳温度に関するデータを集録する時間区分とした。各データ集録期には11水深帯の温度と供試魚の遊泳

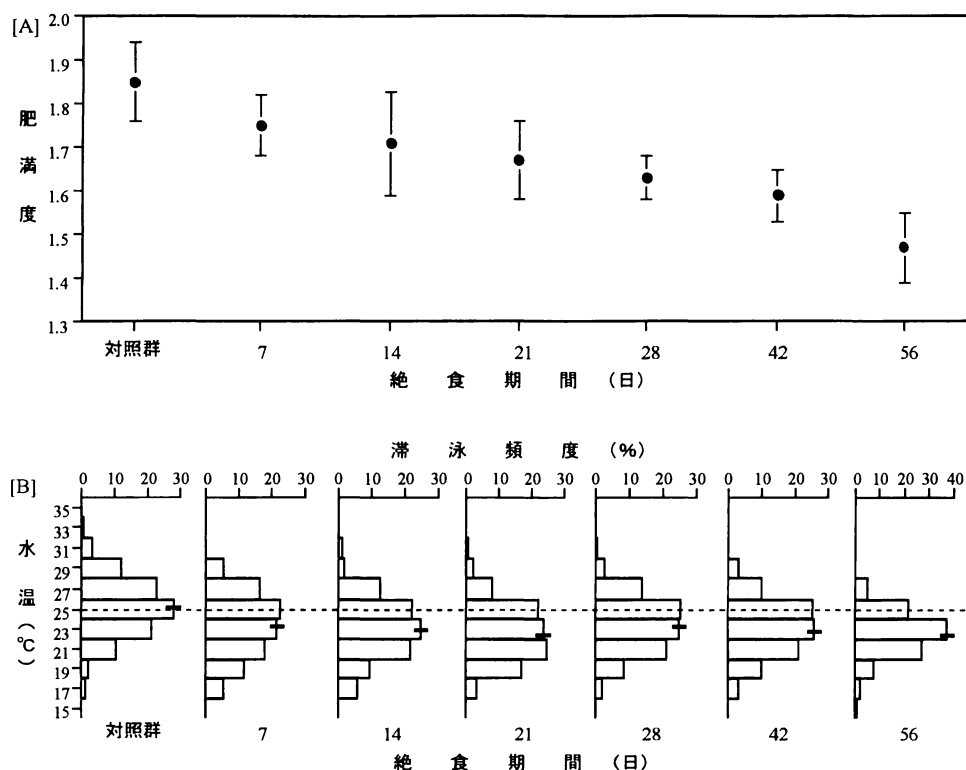
位置を3分ごとに同時計測した。各実験における供試魚の選好温度は、I, II期それぞれにおける遊泳温度の平均値とした。

3) 結果および考察

対照群および各絶食期間における平均肥満度の変化を第22図 [A] に示す。絶食に伴う肥満度の変化は、絶食開始前から絶食期間約8週間までほぼ直線的な減少を示した。温度無勾配期 (0期) における遊泳水深帯は、表層付近に多く集まる場合、底層付近に多く集まる場合、全体に広がる場合と実験によって異なり、飢餓状態との関係は認められなかった。第22図 [B] には対照群および各絶食期間の遊泳頻度分布と選好温度を示す。21℃以下の温度域の遊泳頻度を合計すると、対照群では15%以下であったのに対し、各絶食群でおおむね30%以上であった。また、25℃以上の温度域での遊泳頻度は、対照群では約60%以上であったのに対し、各絶食群ではすべて45%以下の値であり、対照群の方が高い温度域を遊泳した。さらに、遊泳温度範囲は、対照群の平均が18~32℃、各絶食群の平均が16~30℃で、いずれもかなり広いが、絶食群の方がわずかに狭かった。対照群の選好温度は23.8~27.4℃ (Mean±S. D. ; 25.3±1.00℃)

であった。7~56日間の各絶食群の選好温度は21.8~24.4℃ (23.0±0.64℃) であり、絶食期間を通じての経時的変化は認められなかった。対照群と絶食群 (全期間) の選好温度を比較すると、絶食群の方が2℃程度低く、有意差が認められた ($P<0.001$)。

本実験において、対照群と比較して絶食群の選好温度は約2℃低く、選好温度が絶食の影響を受けることが示された。しかし、7~56日間の絶食期間内では選好温度の経時的変化は認められなかった。Javaid and Anderson (1967b) は20℃で馴致飼育したサケ・マス類の選好温度に対する絶食の影響について実験を行い、大西洋サケ (*Salmo salar*) では餌止めした後24~28時間以内に高温側へ、カワマス (*Salvelinus fontinalis*) およびニジマス (*Oncorhynchus mykiss*) では餌止めした後24時間以内に低温側へ、それぞれ選好温度が移行し、給餌後には以前の選好温度に戻ることを確かめている。Stuntz and Magnuson (1976) は給餌量 (1日当たり体重の 0, 2, 4, 6%) の異なる bluegill について温度選好実験を行った結果、給餌量と選好温度との間に有意差が認められなかったと報告した。しかし、体重が減少する2%給餌



第22図 マアジの異なる期間の絶食に伴う肥満度 [A] および遊泳温度の頻度分布 [B] の変化 [A] 中の●は平均値、縦棒は標準偏差、[B] 中の横棒は選好温度を表している

の選好温度は、体重が増加する4%給餌と6%給餌の選好温度よりも低い値であり、体重の減少が生じるまでは低い温度を好む反応を示さないであろうと指摘している。また、Mac (1985) は、10°Cで馴致飼育した (*Salvelinus namaycush*) の0年魚の選好温度が、給餌量が低い群ほど低下することを明らかにしている。このように、魚種によって多少異なるが、選好温度は絶食や制限された給餌量の影響を受けるものと考えられる。

絶食に伴う魚の体成分の変化として、脂肪やタンパク質の減少が知られている (山口, 1991)。この現象は絶食中に、体内の脂肪やタンパク質そしてグリコーゲンがエネルギー源として利用されることによるものである。また、魚類の代謝量は温度に依存し、適温範囲内では高い温度ほど代謝量が増大することから、絶食による体内エネルギー源の減少は高い温度ほど大きくなると推察される。

一般に魚類の代謝量の Q_{10} は2~3であることが知られている。そこでマアジの Q_{10} を2.5 とすると、2°Cの温度低下は約17%の代謝量の減少となる。対照群より低温を選好する絶食群では、その行動によって代謝量が低下し、これが体内エネルギー源の保持に有利になると考えられる。Brett (1971) はベニザケの温度に対する種々の生理学的研究を行い、給餌量が制限されるのに従って成長のための最適温度が低下するとともに、エネルギーを保存するために代謝量のバランスをうまく保持するような行動上の温度調節機構を備えていると結論づけている。しかしながら、飢餓状態あるいは制限給餌下における温度選好行動は、上述のように魚種によって大きく異なっている。従って全く別の生理・生化学的な調節機構が働いている可能性も考えられる (Mac, 1985)。今後、さらに代謝生理や生化学的側面からの温度選好に関する解明が望まれる。

3. 成長に伴う選好温度の変化

1) 供試魚

1987年7月25日に当研究所中央研究所の親魚用水槽 (7t) で自然産卵されたインダイ卵を、孵化後引き続き自然水温下で養成飼育し、約2, 3, 6, 11, 14カ月後に、それぞれ平均体長3.3cm, 7.6cm, 11.2cm, 12.5cm, 14.9cmに達したものを供試魚とした。実験開始に先立ち、供試魚を温度馴致用の飼育水槽 (500 L) に移し、濾過海水温度調節設備から供給される $25.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ の海水を

毎時500 L注水して18日以上にわたり温度馴致飼育を行った。供試魚を自然水温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升温し、急激な温度変化をさけた。養成飼育および温度馴致飼育期間中には、解凍したアミを1日3回飽食するまで与えた。

2) 実験方法

上記の各成長段階における選好温度の測定には、垂直温度勾配装置を用いた。実験の基本的手順は温度選好実験と同様である。実験前日に、水槽全体の温度を馴致温度と等しい25°Cとした温度無勾配状態の中に供試魚5尾を収容し、一晩放置した。供試魚の遊泳行動に、特に異常が認められないことを確認した後、実験を開始した。供試魚を実験水槽に収容した後は、無給餌とした。

温度無勾配状態の1時間 (0期) と、その後最下層部 (No. 1) と最上層部 (No. 11) との間に、20°Cの範囲の安定した温度勾配が形成された直後の2時間を前後に分けた I 期と II 期を、供試魚の遊泳位置および遊泳温度に関するデータを集録する時間区分とした。さらに、設定温度を2°C上昇または降下させ、新しい温度勾配が形成された後の1時間 (III期)、あるいは初めの安定した温度勾配が形成されてから24時間後に前後1時間ずつの2期 (IV期とV期) を設けた。各データ集録期には11水深帯の各温度および供試魚の遊泳位置を3分ごとに同時計測した。以上の選好温度実験は、インダイの各成長段階において2~4回実施した。ただし、2カ月齢の遊泳位置の記録は、供試魚の平均体長が3.3cmと小型であるため、ビデオデジタイザーを用いての観察および計測ができなかった。このため水槽前方部に暗幕を垂らし、暗幕中央のぞき窓から目視で供試魚の遊泳する水深帯を確認した。また、各集録期における遊泳位置の記録は30秒おきに、11水深帯の各温度記録は1分おきに、いずれも1時間のうちの30分間行った。

3) 結果および考察

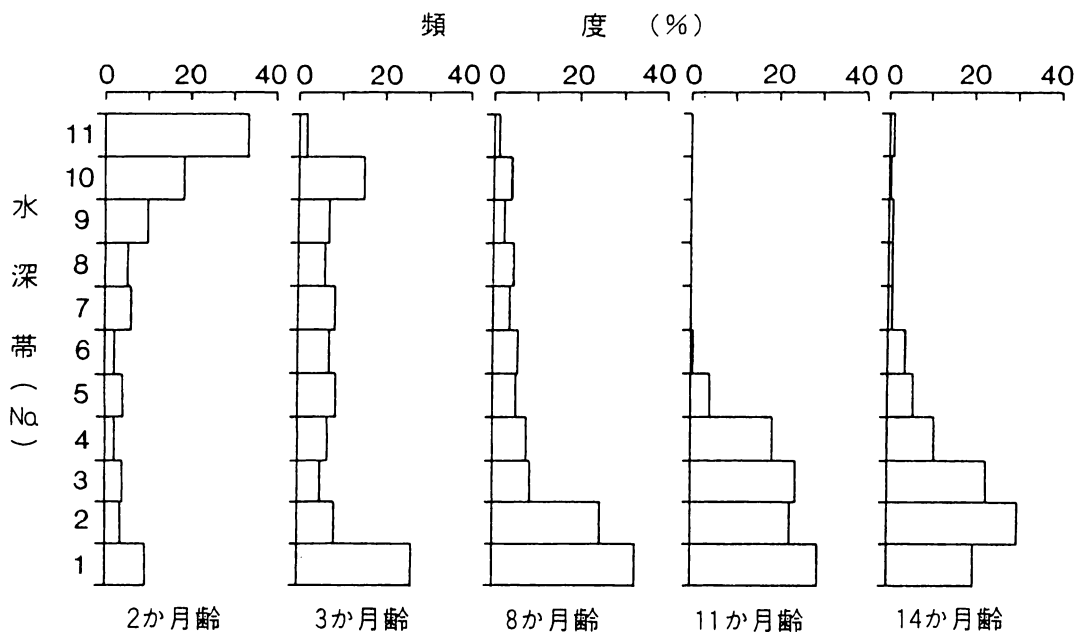
各実験の終了時に測定した海水の塩分は32.3~34.2, pHは8.12~8.23, 溶存酸素飽和度は87~98%であった。各成長段階について25°Cの温度無勾配期 (0期) に得られた供試魚の水深帯別の頻度分布を集計し第23図に示す。2カ月齢の場合、供試魚は全水深帯にわたって遊泳したが、特に表層部に偏在する傾向が認められた。3カ月齢では、2カ月齢に比べ表層部の遊泳頻度が減少し、底層部の頻度が増加した。8カ月齢以降では、さらに

表層部の頻度が減少し、底層部の頻度が増す傾向が強まった。この様に、温度無勾配期の遊泳位置は、成長に伴って底層部に移行することが明らかとなった。

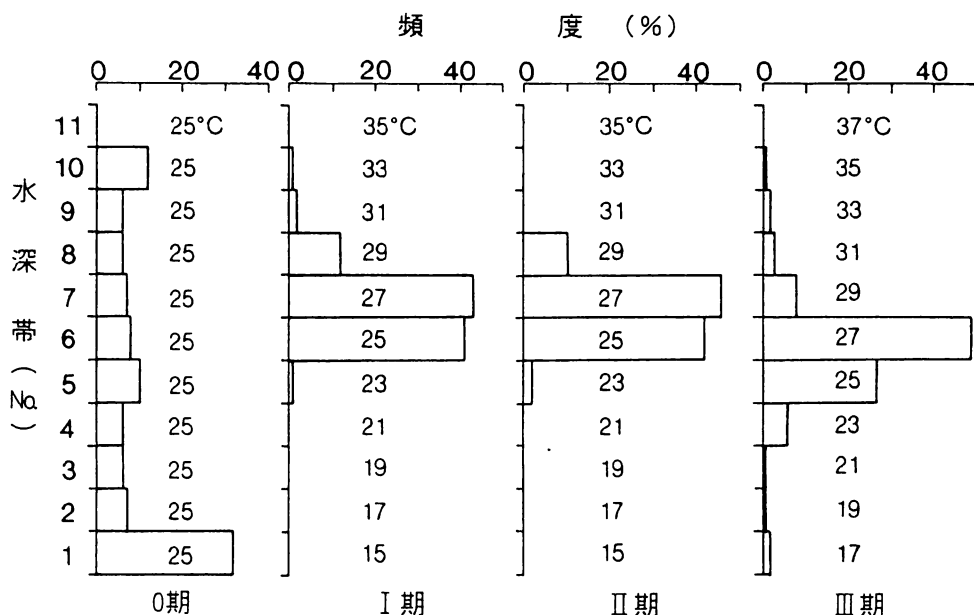
第24図には、3カ月齢の供試魚について0期から温度勾配を形成し、さらに設定温度範囲を2℃上げた実験例を示す。供試魚は、0期には底層部にやや高い頻度を示したものの、ほぼ水槽全体に遊泳していた。15～35℃の範囲の温度勾配が形成された後には、供試魚の遊泳位置は中層部に移動し、特にNo. 6, 7の水深帯（25～27℃）にほぼ集中した。その際、多くの個体が鉛直方向および水平方向の移動を繰り返し、主に2～4℃程度の温度範囲を遊泳していた。また、ある時間のみ鉛直方向の移動が少なくなり、主に水平方向の移動を繰り返し、再び鉛直方向および水平方向の移動を繰り返す個体も観察された。次いで設定温度を2℃上げて17～37℃の範囲の温度勾配を形成したところ（Ⅲ期）、遊泳した水深帯の最頻値はNo. 5, 6と下層方向に移動した。しかし、供試魚の遊泳温度は、やはり25～27℃を中心としていた。また、設定温度を2℃下げた実験例では、供試魚の遊泳位置が上記の例とは逆に上層方向に移動したが、遊泳した温度域は設定温度変更前とほぼ同じであった。0期から温度勾配の形成に伴う温度変化、および水槽内に設定した温度範囲の昇降に際し、特定の

温度域を求めて移動するという結果は、前章の温度選好実験で多くの魚種において認められている。今回のイシダイの場合いずれの成長段階においても、水槽内の特定の水深を選ぶことなく、それぞれ特定の温度域を選好することが認められ、本種の行動に対する温度環境の強い影響が認められた。

一方、多くの魚類で測定される選好温度は、測定に先立つ馴致温度の影響を受けることが知られ、また、それぞれの種に固有の最終選好温度が有り、温度勾配下に放置された場合、実験魚は徐々にか、もしくは段階的にこの最終選好温度に近づいていくともされている（McCauley, 1977; Coutant, 1970）。15～28℃で馴致したイシダイ1年魚（体長12cm）の結果では、最終選好温度（26℃前後）より低温の15, 20℃馴致群の選好温度は、温度勾配下での時間経過（24時間以上）に伴って最終選好温度に近づく傾向を示したのに対し、最終選好温度に近似した25℃馴致群および高温の28℃馴致群は、温度勾配完成直後に最終選好温度付近を選好し、時間経過による変化が認められなかった（土田ら, 1991）。本実験において、いずれの成長段階とも温度無勾配期から温度勾配を形成された直後と、引き続き24時間以上保持した後では、遊泳した温度域の変化はほとんど認められなかった（第8表, 第25図）。従って、25℃で馴致飼育した各成長段階のイシダイは、温度勾配が形成された



第23図 イシダイの25℃温度無勾配期における成長段階別の水深帯頻度分布



第24図 イシダイ（3ヶ月齢）の各温度勾配期における水深帯頻度分布
 25°C温度無勾配期（0期）、15-35°C温度勾配形成直後（I、II期）および17-37°C温度勾配形成期（III期）について計測

直後に、最終選好温度域付近に移動していることが明らかである。

温度勾配完成直後の2時間における供試魚の遊泳温度の平均値を選好温度とみなし、各成長段階の供試魚が遊泳した頻度と選好温度を第26図に示す。各成長段階の選好温度は、2カ月齢では28.6°C、3カ月齢では26.8°C、8カ月齢では24.7°C、11カ月齢では25.6°C、14カ月齢では25.7°Cであった。

2~8カ月齢の間では、選好温度が成長に伴って低下する傾向が認められたのに対し、8~14カ月齢の間では選好温度が25~26°Cの範囲にあってほぼ一定していた。

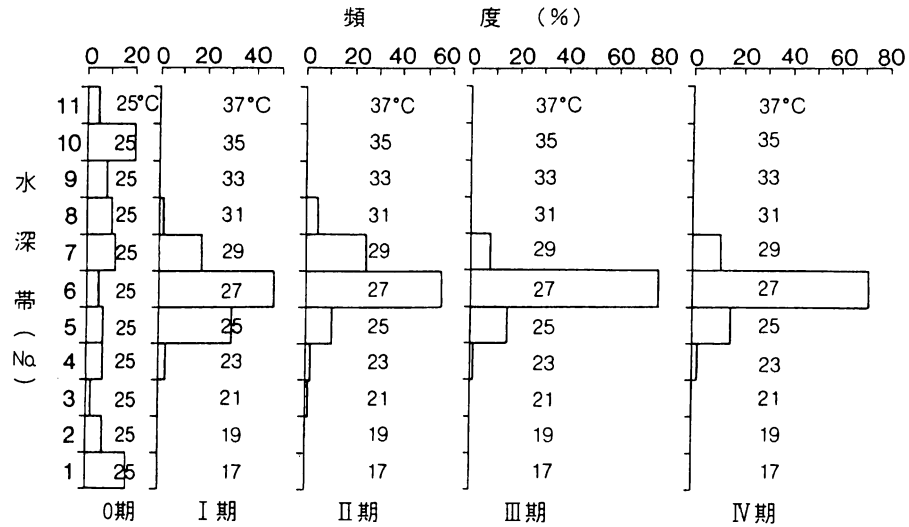
既往の研究によるとalewife, yellow perch, yellow bullhead, ニジマス, striped bassでは、選好温度が年齢や成長段階によって異なり、いずれの魚種でも加齢や成長に伴って、選好温度が低下すると報告されている (Otto *et al.*, 1976; McCauley and Read, 1973; Reynolds and Casterlin, 1978; Kwain and McCauley, 1978; Coutant, 1987)。同様の結果は上記のイシダイの他、クロダイ、メバルでも認められた (第2表)。このような選好温度の変化については、実験水槽上部の光条件あるいは食性や捕食関係などの生態的变化および成長に伴う生理的变化との係わりが指摘されている (McCauley and Read, 1973;

Reynolds and Casterlin, 1978; Kwain and McCauley, 1978; Coutant, 1987)。

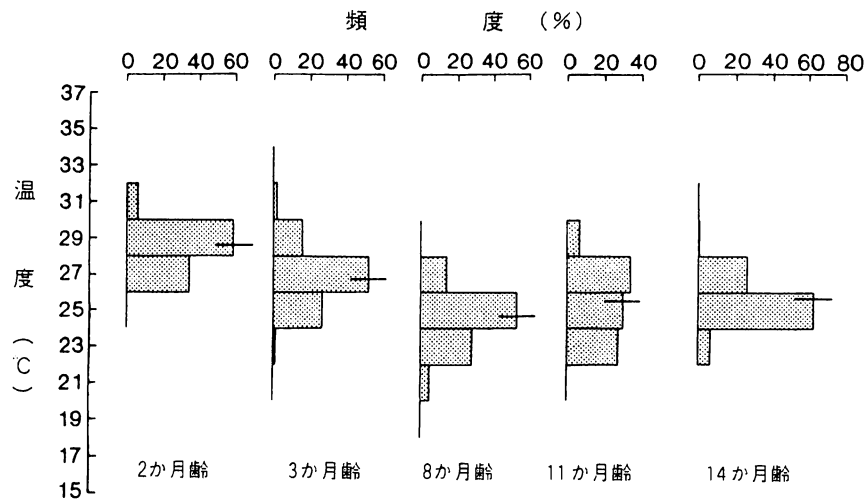
一方, bluegill (*Lepomis macrochirus*) や common shiner (*Notropis cornutus*) では、年齢による選好温度の差は認められていない (Crawshaw, 1975; Beitinger and Magnuson, 1975)。また、本研究においても、スズキでは20°C以下の低温度馴致区では体長5.3cm群が体長11.4cm群より低い温度を選好したが、26°C以上の高温度馴致区では両成長段階による差は殆ど認められなかった (第2表)。平均体長7.2cmと16.8cmのマアジの選好温度は、それぞれ25.3±1.01°C、25.5±0.36°Cとほぼ同じ値を示しており、体長7~17cmの範囲内では、マアジの選好温度は成長に伴う影響を殆ど受けないと考えられる (第2表)。しかし、遊泳温度について見ると、本実験の小型群 (18~32°C) が大型群 (21~28°C) より広い範囲であったことから、異なる成長段階によって遊泳温度範囲への影響が考えられる。このように、選好温度と成長段階との関係は、それぞれの種によって異なるものと考えられる。

幼稚魚期 (全長8~60mm前後) のイシダイは、6~9月の高水温期に流れ藻に付くなど表層部を主な生活の場としているが、その後流れ藻を離れて底層部に移行する。また、その食性は、幼稚魚期

土田：沿岸性魚類の温度選好



第25図 イシダイ（3ヶ月齢）の各温度勾配期における水深帯頻度分布
 25°C温度無勾配期（0期）、17-37°C温度勾配形成直後（I、II期）および17-37°C温度勾配形成期
 から24時間後（III、IV期）について計測



第26図 イシダイの成長段階別の遊泳頻度分布と平均選好温度（-）

第8表 イシダイの成長段階別の短期選好温度（SPT）と長期選好温度（LPT）

月齢	平均体長	平均体重	SPT	LPT
2	3.3 cm	1.1 g	28.6 ± 1.3 °C	28.7 ± 1.7 °C
3	7.4	14.9	26.9 ± 1.7	26.7 ± 1.1
8	11.4	59.5	24.6 ± 1.2	24.6 ± 1.3
11	12.9	88.2	26.0 ± 1.2	25.7 ± 1.6
14	15.1	153.5	25.7 ± 1.2	25.5 ± 1.3

に甲殻類を主食とするが、全長10cmぐらいから雑食性が強まり、15cm以上のものはウニ類やフジツボ類のような殻の堅い底生動物または付着動物を捕食することが知られている(落合・田中, 1986)。こうした生態的变化は、成長に伴う温度無勾配期の遊泳水深の変化および温度勾配期の選好温度の変化と良く一致している。その他、仔稚魚期のイシダイやマダイでは、成長段階によって照度に対する選択性が変化することが知られている(林ら, 1992; 矢野・小川, 1982)。以上のように、自然海域におけるイシダイでは、底層部への移行期に食性や照度の選択性が変化するばかりか、選好温度も変化することが明らかとなった。このことは、このような生態的变化が温度特性の変化を引き起こす要因となりうる例を示すものと考えられる。

総合考察

前述したように、本研究では新型の温度勾配装置を製作して、日本沿岸に生息する魚類38種の温度に対する行動を明らかにするとともに、温度勾配や温度変化に対する魚類の行動と生理学的反応との関係、さらには温度選好に関わる他の要因について検討した。ここでは、温度に対する魚類の行動予測、選好温度と野外調査データとの比較を行い、最終選好温度と温度耐性との関係から最終選好温度の簡易的な推定とその応用面について考察する。

1. 魚類の対温度行動の予測

前述したとおり、ブリやスズキなど常に泳いで生活している遊泳性魚類では、特定の選好温度域に移動する行動が認められ、この温度選好に際しては、馴致温度の影響を受ける魚種が多いことが明らかとなった。しかし、その場合でも温度選好は、時間経過に伴い当初の温度馴致の影響から脱し、特定の温度域すなわち最終選好温度に収斂する傾向を示した。また、最終選好温度は魚種あるいはその成長段階に固有の値と推定された。これらの知見に基づいて、既に馴致温度と選好温度の関係がモデル化(第13図)されているが、以下、このモデルの馴致温度を環境温度と置き換えて、遊泳性魚類の温度に対する行動を考察してみたい(第27図)。

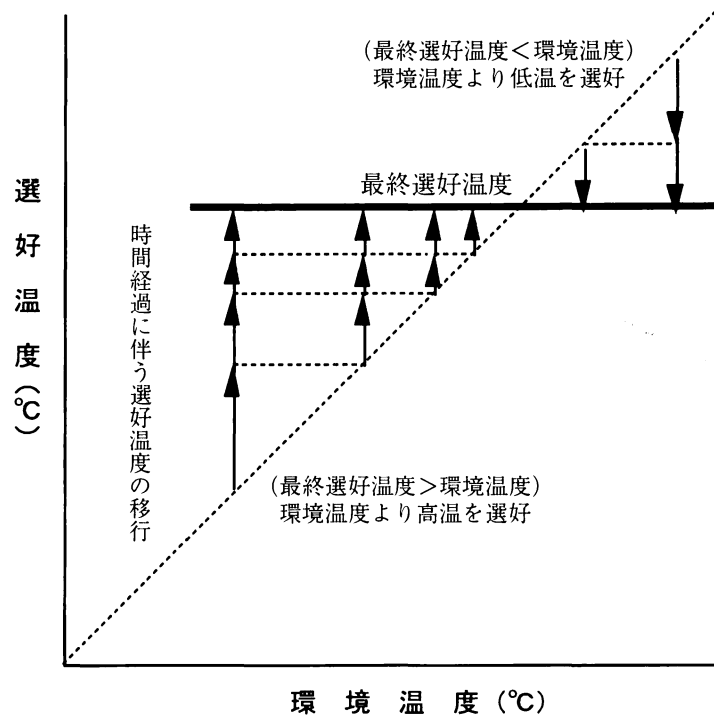
この図から、環境温度が最終選好温度よりも低

い場合には、魚類は現在の環境温度より高い温度を選択する行動を示し、逆に環境温度がこの値よりも高い場合にはより低い温度域に移動する反応を示すものと予測される。すなわち、魚類の最終選好温度は、任意の時点、場所において環境温度より高い温度または低い温度のいずれに向かう選択的行動を決める内的基準として働くものと推定される。しかも、この内的温度基準は環境温度に左右されず、それから独立した一定レベルに固定されていることが明らかである。従って、産業排水としての温排水や冷排水などによる環境水温の変化が、魚の行動に与える影響を検討する場合、当該魚種の最終選好温度に関する知見が温度耐性に関する知見と並んで極めて重要になると考えられる。他方、自然水温およびその変動は漁場環境の重要な因子として、古くから多くの研究者によって取り上げられてきたが、この場合でも、当該魚種それぞれの温度選好が漁場形成機構に深く係わるはずであり、形成機構の解析には内的基準に従う対温度行動特性の十分な理解が不可欠の条件となるものと判断される。

2. 野外調査データとの比較

室内実験によって知られた各魚種の温度選好が、野外での行動をどの程度再現できるのか、ということを検討することは重要である。

Cairns *et al.* (1981) は、火力発電所から放出される、塩素処理後の温排水に対する魚類5種の選好・忌避行動について室内実験と野外調査を行い、いずれの魚種でも実験室と野外で得られた選好温度、忌避温度がともに良く一致することを報じた。室内と野外の最終選好温度の差の最も大きい種は *Campostoma anomalum* で、実験室での値が約5°C高く、*Notropis rubellus* の場合は、逆に野外の値の方が若干(約2°C)高かった。Shrode *et al.* (1982) は、カリフォルニア沿岸に生息する6魚種のうち、2魚種は野外の生息水温より室内実験で測定した選好温度が低かったが、他の4魚種は両者の値が一致することを報告している。さらに、Magnuson *et al.* (1979) は、文献から得られる実験および野外調査結果を比較検討した。その結果、野外における魚の分布適温は、実験室において得られた選好温度の±2°C内に25%、±5°C内に68%が含まれたが、実験室での選好温度より野外における分布適温の方がわずかに低い値を示す傾向を認めた。



第27図 環境水温と選好温度との関係モデル

我が国の水産上重要な魚類の漁獲適水温あるいは生息適水温に関する知見は数多く存在する（日本水産資源保護協会, 1983）。例えば、田中ら（1978a, 1978b）の調査によると、館山湾におけるマダイの発育段階別漁場の水温・塩分環境は、それぞれ親魚で13.8～20.3℃, 33.50～34.79‰, 未成魚で18.9～24.8℃, 32.94～34.16‰, 幼魚で17.2～26.7℃, 31.33～33.54‰であり、幼魚では高温低鹹、成魚では低温高鹹、未成魚では両者の中間型となるとされている。一方、本研究（第2表）で求められたマダイ幼魚の選好温度は18.3～25.3℃で、田中らの野外調査で得られた漁場水温の範囲内に相当し、さらに最終選好温度（24.7℃）は野外における生息水温の上限値に近い値を示している。

宮城県万石浦におけるニシンの生息水温は、仔魚が3～11℃, 稚魚が12.6～19.0℃, 幼魚が13.7～18.8℃で、水温が19℃以上になると深場へ移動することが知られている（児玉, 1987）。また、オホーツク海北部の夏季ニシンの2～3才の若令魚主体群は、表層が温暖（12～14℃）で水温・塩分の傾斜が小さい安定した海洋環境の中に分布するとされる（高橋, 1976；高橋ほか, 1973）。このように、ニシン幼魚の生息水温は12～19℃の範囲

にあり、本研究（第2表）で得た選好温度（13.6～16.0℃）および最終選好温度（14.5℃）とほぼ一致している。

この外、サケ、マイワシ、カタクチイワシ、マアジなどでも、最終選好温度は文献上の生息適水温や漁獲適水温の範囲内にあった。そこで、温度選好実験に用いた供試魚に近似する成長段階での両適水温のデータと、魚の対温度行動の内的基準としての最終選好温度との関係を整理し、第9表にまとめた。また、最終選好温度と生息適水温の上限値との関係を第28図に示す。図に示すように、多くの魚種において最終選好温度と生息適水温の上限値は良く似ており、2～3℃以内の差に留まった。

発電所の放水口近傍は温排水によって、周辺の環境水温より1～7℃昇温されている。この昇温された放水口近傍にスズキやクロダイなどの魚が集まっている事実は、釣人などに良く知られている現象である。そうした現象が起こっている理由の一つとして、水温が大きく関係しているものと思われる。また、海洋生物環境研究所（1990）は、発電所放水口前面海域における魚群集合実証調査結果から、放水口近傍に魚群が集合する条件として、水流による餌料摂取効率の増大、構造物の存

在、取放水に伴う局所的な水質改善などのほか、温度が大きく関与している可能性を想定している。

これら諸結果から、すべての魚種や地域についていえるか否かは、未だ関連する知見が乏しく直ちに決定し得ないが、大方の傾向として実験的に求めた値は野外にも適用できるものと思われる。しかし、温度以外の環境要因によって選好温度が上下することが認められるように、自然水域における魚の行動は、捕食者、餌料などの生物的要因や光、流れ、構造物、その他水質などの物理化学的要因などによる多種多様な影響を受けている。このため、自然環境下の魚類の行動を検討する場合、対象魚類の生態的特性を理解するとともに、温度環境以外の環境要因を含めた複合的効果に対する行動の解明が必要と考えられる。

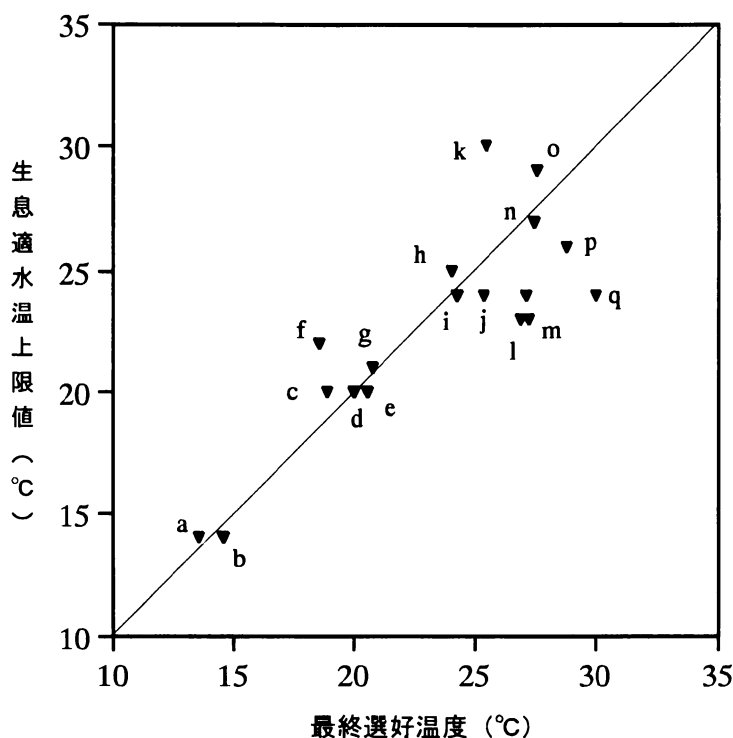
3. 最終選好温度の推定とその応用

本研究では、クロソイを対象として最終選好温度と成長適温との関係について検討し、魚類の温度に対する行動の終点とも言える最終選好温度が成長適温とほぼ一致するという従来の考え方

(Brett, 1971; Beitinger and Magnuson, 1979; Kellogg and Gift, 1983) を確かめることができた。このことは、おそらく多くの魚種に当てはまり、予め求めた最終選好温度を成長適温とみなして利用することも可能と考えられる。しかし、最終選好温度の測定には特殊な装置の使用や、かなり長い所要時間などの問題があり手軽に実施し得ない不便さがある。

これと関連して、本研究で30魚種について最終選好温度と、これを馴致温度とした場合の高温耐性（臨界最高温度：CTMax, 高温側死亡温度：UDT）との間には直線の関係が見いだされている（第16図）。温度耐性実験は、温度勾配水槽と比べて比較的簡単な装置で測定可能であり、かつ短時間で済ますことができる。従って、先ず温度耐性を明らかにすることで、上記の関係に基づいて最終選好温度を比較的簡単に推定することが可能となる。

さらにこの簡便法は、温度選好が不明確なために最終選好温度を推定することができなかった魚種について適用しうる利点をもつ。上記の方法で温度耐性実験値から推定した6種の最終選好温度



第28図 最終選好温度と生息適水温上限値との関係

a, サケ幼稚魚；b, ニシン幼稚魚；c, アユ（遡上期）；d, カタクチイワシ幼稚魚；e, マイワシ幼稚魚；f, クロソイ幼稚魚；g, カサゴ幼稚魚；h, マアジ幼稚魚；i, チダイ幼稚魚；j, マダイ幼稚魚；k, シロギ幼稚魚；l, ブリ幼稚魚；m, トラフグ幼稚魚；n, イシダイ稚魚；o, カワハギ幼稚魚；p, クロダイ幼稚魚；q, スズキ幼稚魚。

土田：沿岸性魚類の温度選好

第9表 選好温度と生息水温および成長適温

魚種名	体長(cm)	選好温度 (馴致温度) (℃)	最終選好温度 (℃)	生息適水温 ¹⁾ (℃) (成長段階)	成長適温
マダラ	7.7	7.2 ~ 8.4 (10 ~ 18)	7.6	7 ~ 8 (稚仔魚期) -0.5 ~ 9 (成魚期)	
サケ	10.3	13.0 ~ 14.1 (10 ~ 20)	13.5	13 ~ 17 (稚仔魚期)	
ニシン	7.0	14.5 ~ 16.0 (10 ~ 20)	14.4	12 ~ 14 (未成魚期)	
アユ	5.7	15.6 ~ 18.7 (10 ~ 20)	18.6	11 ~ 22 (遡上期)	
カタクチイワシ	9.8	16.9 ~ 22.0 (15 ~ 28)	18.8	18 ~ 20 (未成魚期)	
マイワシ	14.6	19.7 ~ 21.1 (12 ~ 28)	20.0	9 ~ 20 (未成魚期)	
クロソイ	5.2	20.3 ~ 22.1 (15 ~ 28)	20.5	16 ~ 20 (稚仔魚期) 8 ~ 12 (未成魚・成魚期)	20-23 ²⁾
カサゴ	6.0	18.5 ~ 21.1 (15 ~ 25)	20.7	15 ~ 21 (稚仔魚期) 13 ~ 17 (成魚期)	
メバル	5.0	20.5 ~ 24.6 (15 ~ 28)	21.2	- -	
	14.0	20.1 ~ 22.3 (15 ~ 25)	22.6	- -	
シマアジ	10.2	17.7 ~ 22.7 (15 ~ 29)	22.5	- -	
マアジ	16.8	20.8 ~ 25.5 (14 ~ 28)	24.0	19 ~ 25 (未成魚期)	
チダイ	10.0	22.1 ~ 24.4 (20 ~ 28)	24.2	12 ~ 24 (未成魚期)	
マダイ	11.7	18.4 ~ 25.4 (14 ~ 28)	25.3	10 ~ 24 (未成魚期)	
シロギス	12.1	20.9 ~ 26.9 (15 ~ 28)	25.5	15 ~ 28 (成魚期)	26 ³⁾
クロメジナ	6.3	25.1 ~ 28.3 (20 ~ 28)	26.1	- -	
ヘダイ	6.2	25.5 ~ 27.5 (20 ~ 28)	26.4	- -	
イサキ	10.3	16.2 ~ 28.0 (15 ~ 29)	26.7	- -	
ブリ	19.0	20.8 ~ 27.2 (15 ~ 28)	26.9	12 ~ 28 (未成魚期)	
ボラ	3.6	26.6 ~ 28.8 (15 ~ 25)	27.0	21 ~ 24 (稚仔魚期)	
トラフグ	6.9	26.7 ~ 27.6 (20 ~ 28)	27.2	16 ~ 23 (成魚期)	
イシダイ	6.7	23.9 ~ 27.3 (15 ~ 28)	27.5	25 ~ 27 (稚仔魚期)	25-28 ⁴⁾
	14.0	21.2 ~ 26.6 (15 ~ 28)	26.0	- -	
カワハギ	6.0	21.4 ~ 28.4 (20 ~ 28)	27.6	24 ~ 29 (稚仔魚期)	
ハマフエフキ	5.2	25.2 ~ 30.4 (20 ~ 32)	28.0	- -	
アオギス	9.7	14.7 ~ 36.7 (20 ~ 28)	28.5	- -	
クロダイ	5.6	27.3 ~ 30.2 (15 ~ 25)	29.8	23 ~ 26 (稚仔魚期)	
	11.5	16.7 ~ 28.5 (15 ~ 29)	28.8	7 ~ 30 (成魚期)	
ホシギス	5.2	29.0 ~ 29.7 (20 ~ 28)	29.4	- -	
スズキ	5.3	24.3 ~ 30.2 (15 ~ 29)	29.7	16 ~ 24 (稚仔魚期)	
	11.4	26.6 ~ 29.3 (15 ~ 29)	30.0	5 ~ 24 (未成魚期) 7 ~ 30 (成魚期)	
キチヌ	4.5	26.5 ~ 29.5 (20 ~ 28)	30.2	8.5 ~ 17 (成魚期)	
コトヒキ	5.8	30.7 ~ 34.2 (20 ~ 28)	31.5	- -	
ミナミクロダイ	5.9	27.6 ~ 32.3 (20 ~ 30)	31.6	- -	
アイナメ	22.0	-	(18.5) ⁶⁾	9 ~ 11 (稚仔魚期)	
マコガレイ	5.4	-	(20.5) ⁶⁾	14 ~ 18 (稚仔魚期)	
				10.5 ~ 21 (未成魚期)	
ヒラメ	8.0	-	(25) ⁶⁾	15 ~ 25 (稚仔魚期) 9.5 ~ 22 (未成魚期)	20-24 ⁵⁾
ニベ	9.3	-	(23.5) ⁶⁾	- -	
オニオコゼ	5.5	-	(26.5) ⁶⁾	- -	
マハゼ	7.9	-	(33) ⁶⁾	- -	

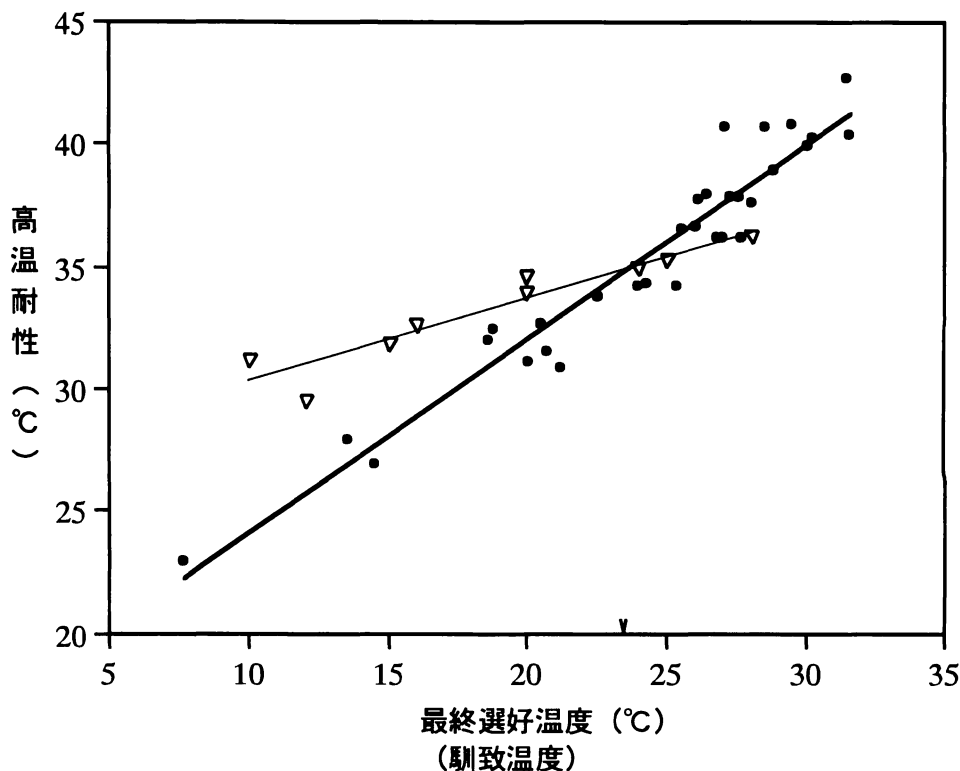
1): 日本水産資源保護協会(1983), 2): 土田・瀬戸熊(1997), 3): 城戸・木下(1985),

4): 熊井(1984), 5): Iwata et al.(1994), 6): カッコ内は高温耐性より推定した値 (第18図参照)

を第9表に追加した。また、第29図にはヒラメ幼魚の馴致温度とCTMaxとの関係、および21魚種の最終選好温度と最終選好温度を馴致温度とした場合の高温側のCTMaxとの関係を合わせて示す。図中の両回帰直線が交わる点からCTMaxに相当する最終選好温度を求めると24.4℃であった。同様に、ヒラメ幼魚のUDT から求めると25.0℃であり、ヒラメ幼魚の最終選好温度が24~25℃付近にあると推定される。ヒラメ幼魚の最終選好温度は明らかでないが、Iwata *et al.* (1994) はヒラメの成長適温が20~25℃付近にあると報告しており、今回、推定された最終選好温度に近似している。その他、温度耐性実験値から推定した最終選好温度と成長適温あるいは生息適水温上限値とを比較検討すると、おおよそ両者の値が一致している（第9表）。このことから、比較的簡易な実験装置で、かつ短時間で測定可能な温度耐性を明らかにすることで、魚の温度に対する行動の方向を決める内的基準として用いることが可能な最終選好温度を推定することができると共に、その魚の成長適温あるいは

生息適水温の上限値を推定することも可能と考えられる。

国際的な200カイリ経済水域体制への移行とともに、日本における漁業生産の維持増大は一層の重要性が叫ばれるようになり、その基盤ともいえる増養殖技術の発展は著しいものがある。海産魚については、その養殖対象種を拡げ、かつ生産量を増大させるまでに至っている。その中で発電所から放出される温排水を用いて、飼育水を加温することによって親魚育成、成長促進に大いなる効果があるとされ、温排水を積極的に利用した栽培漁業も行われている。このように、温度に関する知見は増養殖技術においても極めて重要な要素の一つとなりつつある。しかし、増養殖対象種の成長最適温度や温度耐性などの温度に関する基礎的知見は意外に少ない。本研究で得られた各魚種の温度特性あるいはその推定は、こうした親魚育成や加温飼育による成長促進などに際して、重要な技術的要素である温度管理面において、基礎知見として役立てば幸いである。



第29図 ヒラメ幼魚における馴致温度と臨界最高温度 (CTMax) との関係 (▽—▽) および21魚種における最終選好温度とCTMaxとの関係 (●—●)
ヒラメ幼魚の最終選好温度は両直線の交点によって求められる

謝 辞

本報告は東海大学大学院平成8年度博士論文をベースに、その後実施した11魚種の実験結果を加えとりまとめた。本論文作成にあたっては東京大学名誉教授羽生功博士に終始ご指導ご鞭撻を賜り、さらにご校閲をいただいた。謹んで御礼申し上げます。本論文の査読をしていただいた東京大学名誉教授平野禮次郎博士、東京大学名誉教授清水 誠博士、海洋生物環境研究所待鳥精治顧問、当研究所会沢安志理事に深く感謝申し上げます。また、東海大学海洋学部永井 彰教授、沼知健一教授、久保田 正教授、鈴木克美教授、田中 彰教授、東京大学名誉教授千葉健治博士には有益なご教示をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

研究を行う機会を与えていただくとともに、数々のご指導と有益なご教示をいただいた当研究所古川 厚元常務理事、深滝 弘元中央研究所長、並びにとりまとめに数々のご指導とご鞭撻を頂いた能勢健嗣元常務理事、故小金澤昭光元常務理事に深謝の意を表す。さらに、供試魚の飼育管理を担当していただいた中央研究所瀬戸熊卓見総括技術員、箕輪 康主任技術員、磯貝嘉孝技術員、実験並びにデータ解析に協力していただいた渡辺幸彦主任研究員、喜田 潤主査研究員、鈴木繁美研究員（現在、三洋テクノマリン(株)）、吉田澄夫研究員（現在、養殖業）、田端重夫研究員（現在、国土環境(株)）、石塚博一研究員（現在、大洋エンジニアリング(株)）、三輪竜一研究員（現在、芙蓉海洋開発(株)）、小林 創研究員（現在、芙蓉海洋開発(株)）、相内雄大研究員（現在、(株)エコニクス）、およびデータ入力や図の作成をお願いした高梨仁美さんに心より御礼申し上げます。論文作成においてご理解と多大のご協力並びにご助言をいただいた当研究所中央研究所城戸勝利所長、木下秀明前海洋生物部長（現在研究企画グループマネージャー）、太田雅隆海洋生物グループマネージャー並びに当研究所役職員の方々に心より感謝申し上げます。

なお、本研究は通商産業省資源エネルギー庁（当時）の委託業務「温排水生物影響調査」の一環として行われたことを記して、関係各位に御礼申し上げます。

引用文献

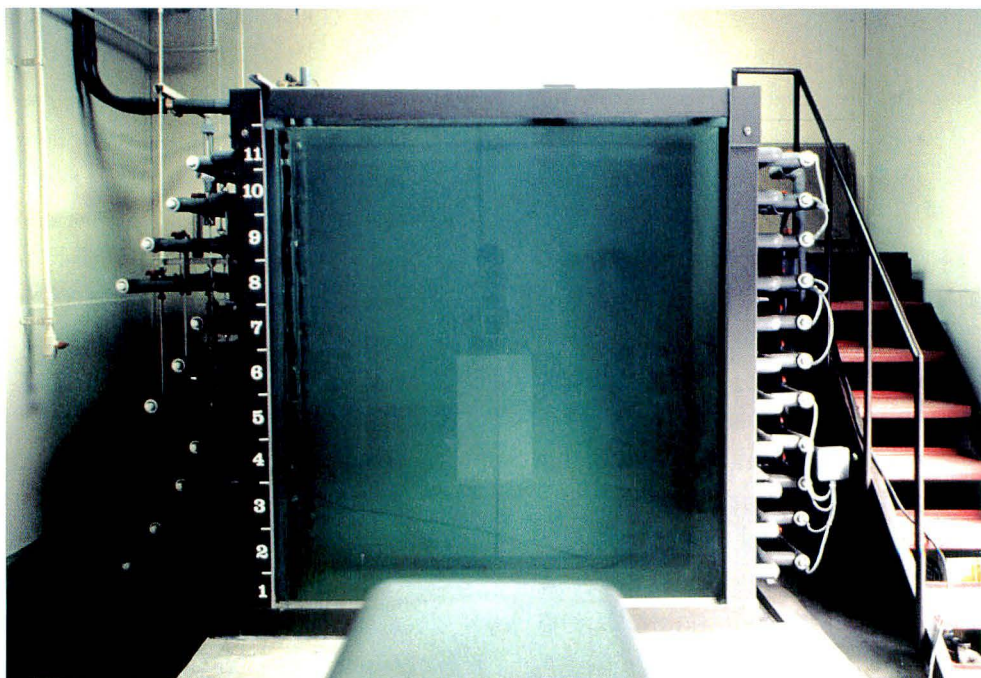
- 有賀祐勝・川崎 健・渡辺 競 (1975). 温排水と環境問題. 恒星社厚生閣, 東京, 225pp.
- 有元貴文・井上 実 (1985). TV画像信号による魚群行動計測装置. *La Mer.*, **23**, 6-13.
- Barans, C. A. and R. A. Tubb (1973). Temperatures selected seasonally by four fishes from western Lake Erie. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **30**, 1697-1703.
- Becker, C. D. and R. G. Genoway (1979). Evaluation of the critical thermal maximum for determining thermal tolerance of freshwater fish. *Env. Biol. Fish.*, **4**, 245-256.
- Beitinger, T. L. and J. J. Magnuson (1975). Influence of social rank and size on thermoselection behavior of bluegill (*Lepomis macrochirus*). *J. fish. Res. Bd. Can.*, **32**, 2133-2136.
- Beitinger, T. L. and J. J. Magnuson (1979). Growth rates and temperature selection of bluegill, *Lepomis macrochirus*. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **108**, 378-382.
- Birtwell, I. K. and G. M. Kruzynski (1987). Laboratory apparatus for studying the behaviour of organisms in vertically stratified waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **44**, 1343-1350.
- Bligh, J. and K. G. Johnson (1973). Glossary of terms for thermal physiology. *J. Appl. Physiol.*, **35**, 941-961.
- Brett, J. R. (1952). Temperature tolerance in young Pacific salmon genus *Oncorhynchus*. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **9**, 265-323.
- Brett, J. R. (1971). Energetic responses of salmon to temperature. A study of some thermal relations in the physiology and freshwater ecology of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Am. Zool.*, **11**, 99-113.
- Bryan, J. D., L. G. Hill and W. H. Neill (1984). Interdependence of acute temperature preference and respiration in the Plains minnow. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **113**, 557-562.
- Cairns, J. Jr., D. S. Cherry and J. D. Giattina (1981). Correspondence between behavioral responses of fish in laboratory and field

- heated chlorinated effluents. pp.207-215. In: W. J. Mitsch, R. W. Bosserman and J. M. Klopatek (ed.), Energy and Ecological Modelling, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- 千葉健治(1965). コイ稚魚の成長に及ぼす溶存酸素量の影響について. 淡水研報, **15**, 35-47.
- Chiba, K. (1983). The effect of dissolved oxygen on the growth of young silver bream. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **49**, 601-610.
- 千葉健治 (1988). アユの成長に及ぼす溶存酸素の影響について. 日水誌, **54**, 175-181.
- Coutant, C. C. (1970). Biological aspects of thermal pollution. I. Entrainment and discharge canal effects. *CRC. Crit. Rev. Envir. Cont.*, **1**, 341-381.
- Coutant, C. C. (1975). Temperature selection by fish - A factor in power-plant impact assessments. pp.575-590. In: Environmental effects of cooling systems at nuclear power plants, Oslo, 26-30 August 1974. IAEA, Vienna, 829pp. (IAEA-SM-187/11).
- Coutant, C. C. (1987). Thermal preference: when does an asset become a liability? *Env. Biol. Fish.*, **18**, 161-172.
- Cox, D. K. (1974). Effects of three heating rates on the critical thermal maximum of bluegill. pp.158-163. In: J. W. Gibbons and R. R. Sharitz (ed.), Thermal ecology II, CONF-730505, Nat. Tech. Inf. Serv., Springfield, VA.
- Crawshaw, L. I. (1975). Attainment of the final thermal preferendum in brown bullheads acclimated to different temperatures. *Comp. Biochem. Physiol.*, **52A**, 171-173.
- Doudoroff, P. (1938). Reactions of marine fishes to temperature gradients. *Biol. Bull.*, **75**, 494-509.
- Ehrlich, K. F., J. M. Hood, G. Muszynski and G. E. McGowen (1979a). Thermal behavioral responses of selected California littoral fishes. *Fish. Bull.*, **76**, 837-849.
- Ehrlich, K. F., J. S. Stephens, G. Muszynski and J. M. Hood (1979b). Thermal behavioral responses of the speckled sanddab, *Citharichthys stigmaeus*: laboratory and field investigations. *Fish. Bull.*, **76**, 867-872.
- Esch, G. W. and R. W. McFarlane (1976). Thermal ecology II, CONF-750425, Nat. Tech. Inf. Serv., Springfield, VA. 407pp.
- Ferguson, R. G. (1958). The preferred temperature of fish and their midsummer distribution in temperate lakes and streams. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **15**, 607-624.
- Fry, F. E. J. (1947). Effects of the environment on animal activity. Univ. Toronto Stud. Biol. Ser., 55, Publ. Ont. Fish. Res. Lab. 62pp.
- Fry, F. E. J. (1967). Responses of vertebrate poikilotherms to temperature. pp.375-409. In: Rose, A. H. (ed.), Thermobiology. Academic Press, New York.
- Garside, E. T. and J. S. Tait (1958). Preferred temperature of rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) and its unusual relationship to acclimation temperature. *Can. J. Zool.*, **36**, 563-567.
- Garside, E. T., D. G. Heinze and S. E. Barbour (1977). Thermal preference in relation to salinity in the threespine stickleback, *Gasterosteus aculeatus* L., with an interpretation of its significance. *Can. J. Zool.*, **55**, 590-594.
- Garside, E. T. and G. C. Morrison (1977). Thermal preferences of mummichog, *Fundulus heteroclitus* L., and banded killifish, *F. diaphanus* (LeSueur), (Cyprinodontidae) in relation to thermal acclimation and salinity. *Can. J. Zool.*, **55**, 1190-1194.
- Giattina, J. D. and R. R. Garton (1982). Graphical model of thermoregulatory behavior by fishes with a new measure of eurythermality. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **39**, 524-528.
- Gibbons, J. W. and R. R. Sharitz (1974). Thermal ecology. CONF-730505, AEC Symposium Series, August, GA. 670pp.
- Hall, Jr. L. W., D. A. Cincotta, J. R. Stauffer, Jr. and C. H. Hocutt (1978). Temperature preference of the Crayfish *Orconectes obscurus*. *Arch. Env. Contam. Tox.*, **7**, 379-383
- 林多恵子・山川 紘・松生 洽(1992). イシダイの仔稚魚の成長に伴う走光行動の変化. 日水誌, **58**, 1043-1047.

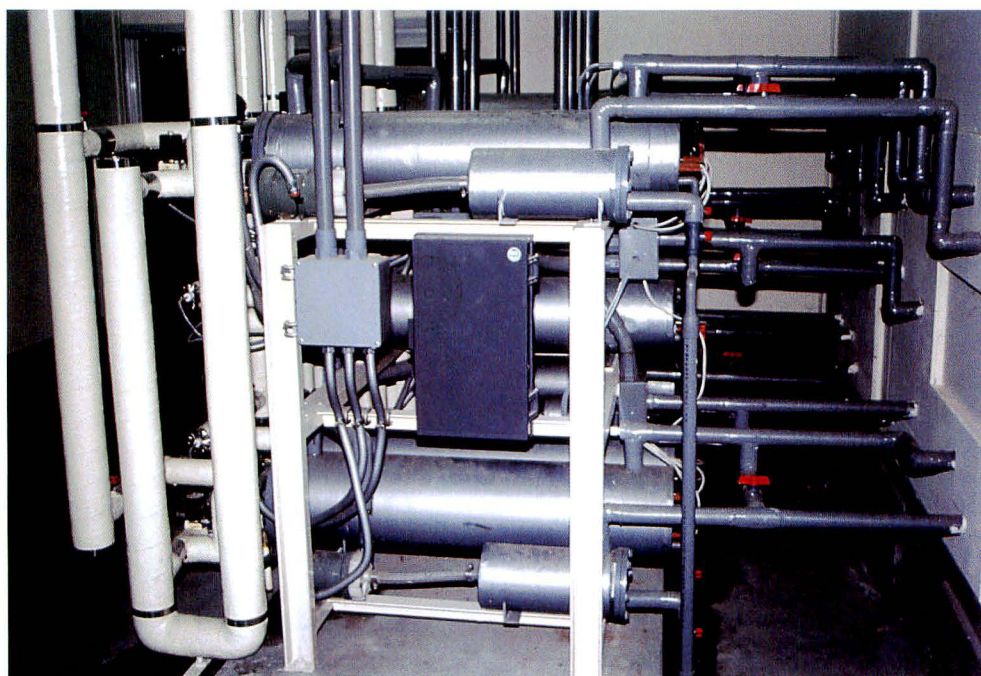
- Heath, A. G., B. J. Turner and W. P. Davis (1993). Temperature preferences and tolerances of three fish species inhabiting hyperthermal ponds on mangrove islands. *Hydrobiologia*, **259**, 47-55.
- Hesthagen, I. H. (1979). Temperature selection and avoidance in the sand goby, *Pomatoschistus minutus* (Pallas), collected at different seasons. *Env. Biol. Fish.*, **4**, 369-377.
- Holmes, J. A. and P. Lin (1994). Thermal niche of larval sea lamprey, *Petromyzon marinus*. *Can. J. Fish. Aquat.*, **51**, 253-262.
- 石塚吉生・中村義治(1979). サケの行動追跡調査関係. 福島県水産試験場報告, 125-164.
- 板沢靖男(1977). 呼吸. 魚類生理学概論 (田村 保編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.1-33.
- Iwata, N., K. Kikuchi, H. Honda, M. Kiyono and H. Kurokura (1994). Effects of temperature on the growth of Japanese flounder. *Fish. Sci.*, **60**, 527-531.
- Javaid, M. Y. and J. M. Anderson (1967a). Thermal acclimation and temperature selection in Atlantic salmon, *Salmon salar* and rainbow trout, *S. gairdneri*. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **24**, 1507-1514.
- Javaid, M. Y. and J. M. Anderson (1967b). Influence of starvation on selected temperature of some salmonids. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **24**, 1515-1519.
- Jobling, M. (1981). Temperature tolerance and the final preferendum-rapid methods for the assessment of optimum growth temperatures. *J. Fish. Biol.*, **19**, 439-455.
- 海洋生物環境研究所(1990). 放水口に集まる魚群を調べて. 海生研リーフレット, **No.4**, 1-16.
- 兼広春之・鈴木 誠・松田 皎(1985). タイリクバラタナゴの群れサイズによる行動特性. 日水誌, **51**, 1977-1982.
- Kellogg, R. L. and J. J. Gift (1983). Relationship between optimum temperatures for growth and preferred temperatures for the young of four fish species. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **112**, 424-430.
- Kelsch, S. W. and W. H. Neill (1990). Temperature preference versus acclimation in fishes: selection for changing metabolic optima. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **119**, 601-610.
- Kelso, J. R. M. (1976). Movement of yellow perch (*Perca flavescens*) and white sucker (*Catostomus commersoni*) in a nearshore Great Lakes habitat subject to a thermal discharge. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **33**, 42-53.
- 城戸勝利・木下秀明(1985). シロギス幼魚の成長と酸素消費量に及ぼす水温の影響. 海生研報告., **No.85202**, 1-20.
- Kilambi, R. V. and M. L. Galloway (1985). Temperature preference and tolerance of hybrid carp (female grass carp, *Ctenopharyngodon idella* × male bighead, *Aristichthys nobilis*). *Env. Biol. Fish.*, **12**, 309-314.
- Kita, J., S. Tsuchida and T. Setoguma (1996). Temperature preference and tolerance, and oxygen consumption of the marbled rockfish, *Sebastes marmoratus*. *Mar. Biol.*, **125**, 467-471.
- 児玉純一(1987). 万石浦ニシンの生活史と資源変動— I. 栽培技研, **16**, 111-125.
- 熊井英水(1984). イシダイの養殖生物学研究. 近大水研報, **No. 2**, 1-128.
- Kwain, W. and R. W. McCauley (1978). Effects of age and overhead illumination on temperatures preferred by underyearling rainbow trout, *Salmo gairdneri* in a vertical temperature gradient. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **35**, 1430-1433.
- Mac, M. J. (1985). Effects of ration size on preferred temperature of lake charr *Salvelinus namaycush*. *Env. Biol. Fish.*, **14**, 227-231.
- Magnuson, J. J., L. B. Crowder and P. A. Medvick (1979). Temperature as an ecological resource. *Am. Zool.*, **19**, 331-343.
- Major, P. F. (1978). Aspects of estuarine intertidal ecology of juvenile striped mullet, *Mugil cephalus*, in Hawaii. *Fish. Bull.*, **76**, 299-314.
- 松田 皎・鈴木 誠・兼広春之(1984). 定置網の網模型に対する魚群行動の水槽実験. 日水誌, **50**, 1109-1114.
- McCauley, R. W. (1977). Laboratory methods for

- determining temperature preference. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **34**, 749-752.
- McCauley, R. W. and W. L. Pond (1971). Temperature selection of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) fingerlings in vertical and horizontal gradients. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **28**, 1801-1804.
- McCauley, R. W. and L. A. A. Read (1973). Temperature selection by juvenile and adult yellow perch (*Perca flavescens*) acclimated to 24 C. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **30**, 1253-1255.
- McCauley, R. W. and J. S. Tait (1970). Preferred temperature of yearling lake trout, *Salvelinus namaycush*. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **27**, 1729-1733.
- 中山昭雄(1981). 温熱生理学. 理工学社, 東京, 638pp.
- 日本水産資源保護協会(1983). 環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理. 漁場環境調査検討事業, 449pp.
- 落合 明・田中 克(1986). 魚類学(下). 恒星社厚生閣, 東京, 1140pp.
- Otto, R. G., M. A. Kitchel and J. O. Rice (1976). Lethal and preferred temperature of the alewife (*Alosa pseudoharengus*) in Lake Michigan. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **105**, 96-106.
- Peterson, R. H. (1973). Temperature selection of Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) as influenced by various chlorinated hydrocarbons. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **30**, 1091-1097.
- Peterson, S. E. and R. M. Schutsky (1976). Some relationships of upper thermal tolerances to preference and avoidance responses of the bluegill. pp.148-153. In: Esch, G. W. and McFarlane, R. W. (eds.), Thermal ecology II, CONF-750425, Nat. Tech. Inf. Serv., Springfield, VA.
- Purcell, L. J. and J. B. Shrode (1983). Vertical temperature preference tank for larval and juvenile fish. *Prog. Fish-Cult.*, **45**, 27-29.
- Reynolds, W. W. (1977). Temperature as a proximate factor in orientation behavior. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **34**, 734-739.
- Reynolds, W. W. and M. E. Casterlin (1976). Thermal preferenda and behavioral thermoregulation in three centrarchid fishes. pp.185-190. In: Esch G.W. and McFarlane R.W. (eds.) Thermal ecology II, CONF-750425, Nat.Tech. Inf.Serv., Springfield, VA.
- Reynolds, W. W. and M. E. Casterlin (1978). Ontogenetic change in preferred temperature and diel activity of the yellow bullhead, *Ictalurus natalis*. *Comp. Biochem. Physiol.*, **59A**, 409-411.
- Reynolds, W. W. and M. E. Casterlin (1979). Behavioral thermoregulation and the "final preferendum" paradigm. *Am. Zool.*, **19**, 211-224.
- Reynolds, W. W. and M. E. Casterlin (1980). The role of temperature in the environmental physiology of fishes. pp.497-518. In: Ali, M.A. (ed.), Environmental physiology of fishes. Plenum Press, New York and London.
- Reynolds, W. W., R. W. McCauley, M. E. Casterlin and L. I. Crawshaw (1976). Body temperatures of behaviorally thermoregulating largemouth blackbas (*Micropterus salmoides*). *Comp. Biochem. Physiol.*, **54A**, 461-463.
- Richards, F. P. and R. M. Ibara (1978). The preferred temperatures of the brown bullhead, *Ictalurus nebulosus* with reference to its orientation to the discharge canal of a nuclear power plant. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **107**, 288-294.
- Richards, F. P., W. W. Reynolds and R. W. McCauley (1977). Temperature preference studies in environmental impact assessments: an overview with procedural recommendations. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **34**, 728-761.
- Schurmann, H., J. F. Steffensen and J. P. Lomholt (1991). The influence of hypoxia on the preferred temperature of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *J. exp. Biol.*, **157**, 75-86.
- Shrode, J. B., K. E. Zerba and J. S. Stephens, Jr. (1982). Ecological significance of temperature tolerance and preference of some inshore California fishes. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **111**, 45-51.
- Stuntz, W. E. and J. J. Magnuson (1976). Daily ration, temperature selection, and activity

- of bluegill. pp.180-184. In: Esch, G. W. and McFarlane, R. W. (eds.), Thermal ecology II, CONF-750425, Nat. Tech. Inf. Serv., Springfield, VA.
- Sullivan, C. M. and K. C. Fisher (1953). Seasonal fluctuations in the selected temperature of speckled trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill). *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **10**, 187-195.
- 高橋豊美 (1976). オホーツク海北部における夏季のニシンの研究-II. 日水誌, **42**, 427-436.
- 高橋豊美・上野元一・島崎健二 (1973). オホーツク海北部における夏季のニシンの分布および生物学的特徴について. 日水誌, **39**, 759-764.
- 田中邦三・石田 修・須田恭光 (1978a). 東京湾におけるマダイについて-IV, 館山湾奥部アマモ場における幼稚魚期. 千葉水試研報, **No.37**, 37-42.
- 田中邦三・石田 修・須田恭光・庄司泰雅 (1978b). 東京湾におけるマダイについて-I, 館山湾内の漁場形成. 千葉水試研報, **No.37**, 43-48.
- Tsuchida, S. (1995). The relationship between upper temperature tolerance and final preferendum of Japanese marine fish. *J. Therm. Biol.*, **20**, 35-41.
- 土田修二・石塚博一 (1997). マアジ幼魚の選好温度に及ぼす絶食の影響. 水産増殖, **45**, 97-101.
- 土田修二・深滝 弘 (1991). 新型垂直温度勾配反応試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.
- 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 (1997). イシダイ幼稚魚の成長に伴う選好温度の変化. 日水誌, **63**, 64-69.
- 宇田道隆 (1963). 海洋漁場学. 恒星社厚生閣, 東京, 347pp.
- Vlaming, V. L. (1971). Thermal selection behaviour in the estuarine goby *Gillichthys mirabilis* Cooper. *J. Fish. Biol.*, **3**, 277-286.
- Wallace, R. K. Jr. (1977). Thermal acclimation, upper temperature tolerance, and preferred temperature of juvenile yellowtail snappers, *Ocyurus chrysurus* (Bloch) (Pisces: Lutjanidae). *Bull. Mar. Sci.*, **27**, 292-298.
- 渡辺幸彦・土田修二 (1984). マコガレイ稚魚の臨界致死温度 (CTM) について. 日本水産学会秋季大会講演要旨集, p. 47.
- Wyllie, M. C., E. R. Holmstrom and R. K. Wallace (1976). Temperature preference, avoidance, shock, and swim speed studies with marine and estuarine organisms from New Jersey. *Ichthyol. Associ.*, (15), 1-76.
- 山形陽一・大中澄美子・原田増造・丹羽 誠 (1983). ニホンウナギの成長に及ぼす溶存酸素量の影響について. 日水誌, **49**, 1335-1339.
- 山口勝己 (1991). 魚介類の絶食の生化学. 水産生物化学 (山口勝己編), 東京大学出版会, 東京, 136-142pp.
- 山元憲一 (1991). マアジの酸素消費に及ぼす低酸素の影響. 水産増殖, **39**, 399-402.
- 矢野 勲・小川良徳 (1982). マダイ稚仔魚の鉛直移動に与える水中照度の影響. 養殖研報, **No.3**, 45-49.



付図1 垂直温度勾配反応試験装置の試験水槽部



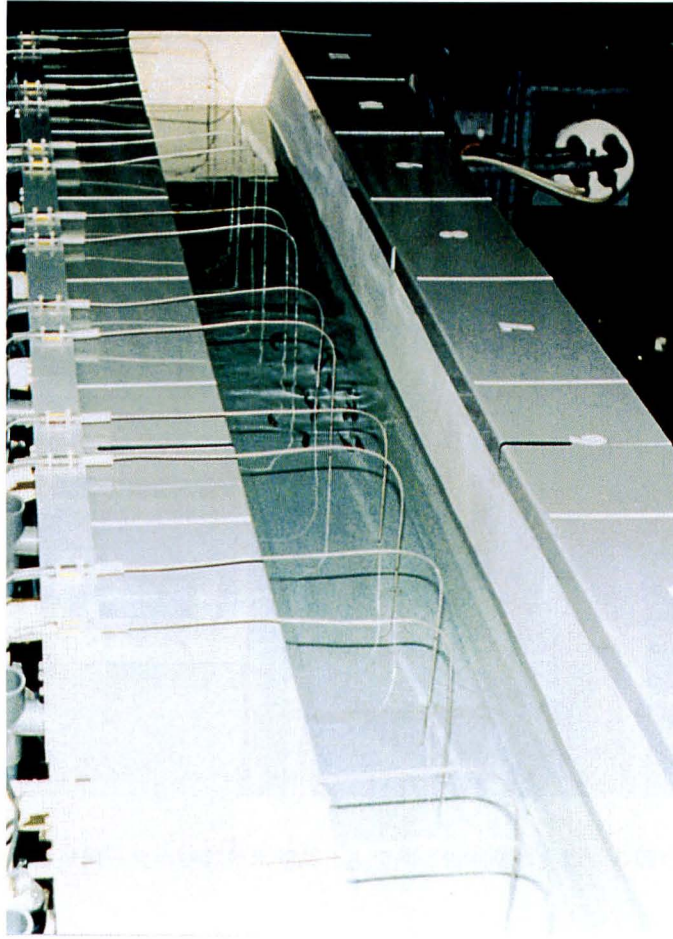
付図2 垂直温度勾配反応試験装置の温度制御用機器



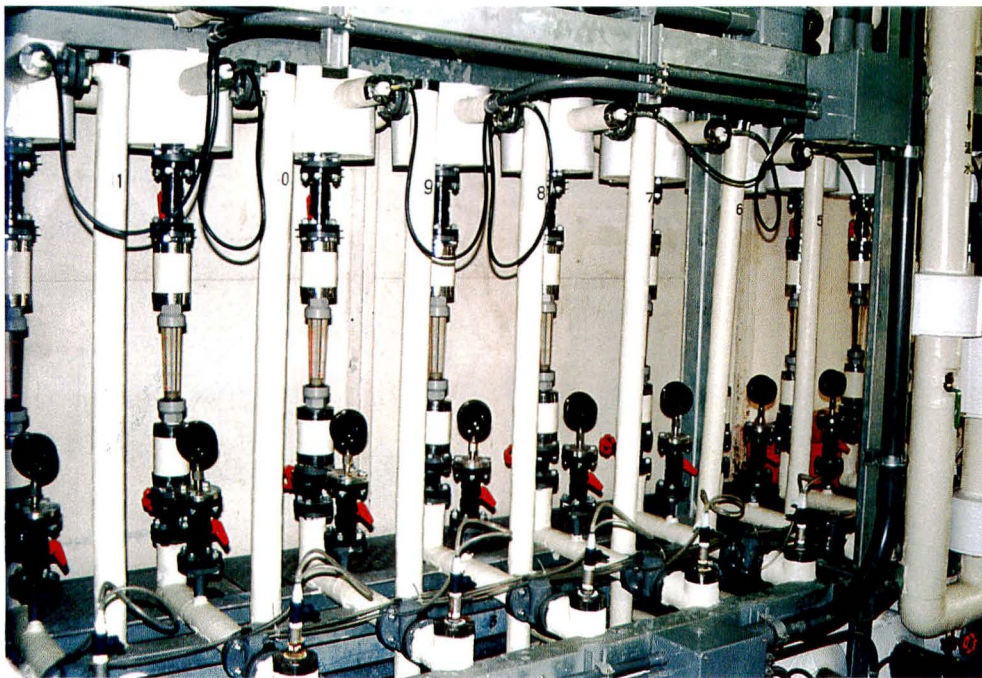
付図3 温度自動制御システムと試験水槽部モニター用テレビ



付図4 ビデオデジタイザーによる供試魚の遊泳位置入力



付図5 新型水平温度勾配反応試験装置の試験水槽部



付図6 新型水平温度勾配反応試験装置の温度制御用機器