

実験的手法による海生生物への発電所温排水影響研究の現況

The present state of study of influence on aquatic life by thermal effluent from power plant.

濱田 稔・土田 修二

Minoru HAMADA¹⁾, Shuji TSUCHIDA²⁾

はじめに

清流の中で竿を出す友釣り師の姿は夏の矢作川の風物詩であるが、この友釣りの対象種であるアユ *Plecoglossus altivelis* が海と川を行き来する“通し回遊 (Diadromous migration)”を行うことは、釣りに興味がない方でも一度は耳にしたことがあると思う。通し回遊を行う魚は他にもウナギ *Anguilla japonica* やサケ・マス類、ヨシノボリ *Rhinogobius brunneus*, カジカ *Cottus polux*, カマキリ (アユカケ) *Cottus kazika*, ヤマノカミ *Trachidermus fasciatus* などが知られているが、これらの魚は魚類の中に占める種としての割合こそ小さいものの、水産重要種とされるものを多く含む (後藤ほか, 1994)。したがって、こうした魚の海洋生活期における資源量の変動要因を明らかにすることは、水産資源の保護をはかる上でも重要な意味を持つといえる。

魚類の資源量を変動させる要因には、気象・海象による影響などの自然減耗の他、他の生物からの捕食、漁業や遊漁による漁獲など様々なパラメータがある。変温動物である魚類にとって、水温も考慮すべき変動要因の一つであろう。海水温を変化させる原因には、気候変動や黒潮など海流の変化といった自然現象による部分が極めて大きい。発電所の温排水も局地的な変動をもたらす要因の一つであり、近年は海洋生態系や漁業に及ぼす影響が懸念されている。そこで発電所ではこの温排水の影響をできる限り少なくするために、取水温度と温排水との温度差を7°C以下に抑え、また水温の低い底層から取水し、表層との温度差を縮める等の対策を講じている。さらに発電所の環境影響評価 (アセスメント) においても、海生生物に対する温排水影響の評価は重要項目として重点的に調査を行っており、影響の有無や程度についてできるかぎり正確に予測するよう努めている。

上記の温排水影響評価を行う際、水温に対する魚類の行動や温度耐性に関する知見は欠くべからざる判断材料であるが、こうした知見が過去、どのように調べられてきたのかを知ることは、これからアユをはじめとする通し回遊魚に対する温排水影響を検討する際に大いに参考

になると思われる。今後の矢作川におけるアユに関する研究の発展に寄与することを期待して、海生生物への温排水影響の研究手法について、現況を以下に紹介することとしたい。

実験的手法の有効性

温排水が魚類に与える影響を解明するためには、漁獲調査や潜水観察等のフィールド調査ももちろん有効な方法ではあるが、実際の海域における魚類等の行動は多くの複雑に絡み合った要因によって左右され、水温のみの影響を把握することは困難な場合が多い。一方、実験では環境条件の単純化が容易であり、例えば条件を温度に絞って解析することが可能である。特に、温排水影響を予測する上で極めて根幹的な知見、すなわち魚類が温度変化に接した場合どのような挙動を示すかという「温度選好性」、またどの程度の温度変化まで耐性を有するかという「温度耐性」の二つの知見を得る上で実験は非常に有用なアプローチである。このことは、アユに対する温排水影響を解明する場合においても当然、同様であると考えられる。そこで、これらの実験に関する具体的な方法を概説する。

選好温度試験の方法

魚類の選好・忌避温度を知ることは、その分布や回遊に温排水が与える影響を予測する上で重要な手がかりとなる。例えば、温排水がある種の魚の選好温度より高い場合、その魚は温排水域からいなくなるであろうし、逆に選好温度より低い場合は温排水域に蟠集すると考えられる。こうした魚類の選好・忌避温度を実験的に観察する方法としては、水槽内に任意の温度勾配を作り、供試魚に至適温度を選択させる「至適環境選抜法」が一般的にとられる。供試魚に温度勾配を与える方法には温度勾配の配置方法によりいくつかの種類があるが、ここでは温排水に関する国内の代表的研究機関である財団法人海洋生物環境研究所の土田らが設計・製作した垂直温度勾

配装置および水平温度勾配装置の2種類の装置による例を示す(Kita et al., 1996; Tsuchida, 1995; 土田, 1997; 土田・深滝, 1991).

実験装置

まず, 図1に垂直温度勾配装置の外観を, 図2にその海水循環回路図を示す. これは, プリ *Seriola quinqueradiata* やマアジ *Trachurus japonicus* など主に表・中層を遊泳する魚を対象とするもので, その名のとおりの水深165 cm×幅150 cm×奥行き60 cmの水槽内部に垂直方向に温度勾配を形成することができる. 図2に示すように, 本装置は供試魚の行動を観察するための水槽と, 11基の熱交換器および循環ポンプにて構成され, それらは配管により接続されて各々独立した11系統の循環回路となっている. 図1の水槽左側に見える11本の配管が水槽への給水管であり, 水槽後方で各々11基の熱交換器と

循環ポンプに接続されている. 海水はこれら熱交換器にて個別に水温調整され, 各給水管から水槽内へ入り, 水槽右側に各給水管と対となるように配置された排水管により水槽外へ排出される. 海水はその後, 先述の熱交換器に戻され, 水温調整後, 再び水槽へと循環するが, このとき水槽内には左から右方向への緩やかな水流が生ずるとともに, 11層からなる帯状の温度勾配が垂直方向に形成される仕組みになっている.

次に, 図3に水平温度勾配装置の外観を, 図4にその海水循環回路図を示す. これはシロギス *Sillago japonica* やクロソイ *Sebastes schlegeli* など主に底生性の魚を対象とするためのもので, 水深10 cm, 長さ440 cm, 幅

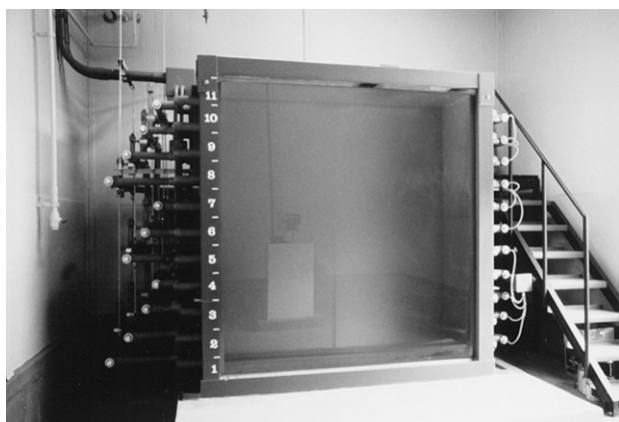


図1 垂直温度勾配装置 (土田・深滝, 1991)

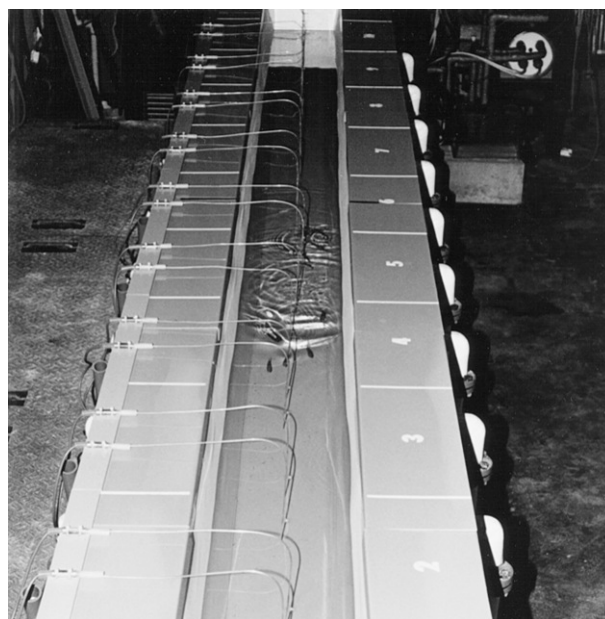


図3 水平温度勾配装置 (土田, 1998a)

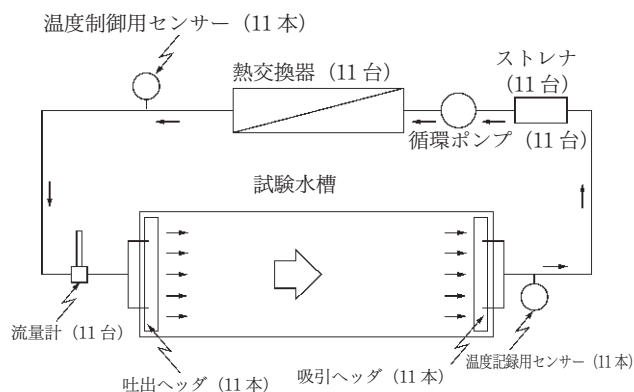


図2 垂直温度勾配装置の海水循環回路図 (土田・深滝, 1991)

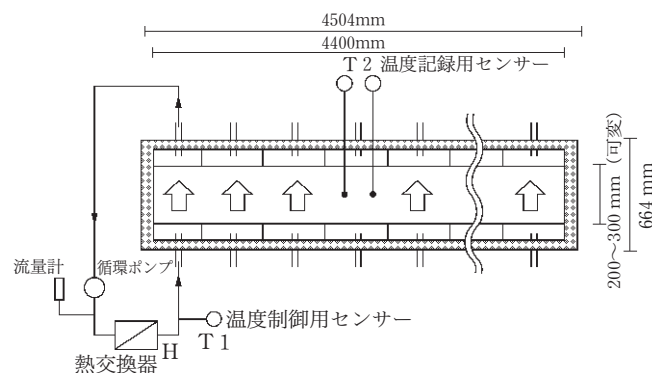


図4 水平温度勾配装置 海水循環回路図 (土田, 1997)

20~30 cm (可変) の水路状の水槽内部に水平方向に温度勾配を形成することができる。温度調節の方法は垂直温度勾配装置と同様であるが、水槽の短辺方向に水槽右から左へ(図3), 異なる温度の海水を平行に走らせることによって、温度勾配を水平に形成する。すなわち、水槽を上方から見た場合、水槽の内部は水温の異なる11のエリアに分けられることになる。

垂直・水平両温度勾配装置ともに、水槽内の供試魚の行動や位置の観察は、周囲の諸条件によって魚が錯乱することを避けるため、水槽前面に設置したビデオカメラで遠隔的に行う。垂直温度勾配装置については水槽の横面から、また水平温度勾配装置は真上から撮影し、この画像を別室のモニタ画面に送り、所定時間ごとに各供試魚の遊泳位置をビデオデジタイザの画面上にてライトペンにより X, Y 軸上の数値に置き換え、リアルタイムに記録用コンピュータに記録される。

実験手順

実験の手順について、概略を図5に示す。なお、実験手順は垂直、水平両温度勾配装置とも共通である。供試魚には、人工的に種苗生産されたもの、あるいは自然海域から採捕し、数週間から数ヶ月養成飼育したものをを用いるが、まず温度勾配水槽に収容する少なくとも2週間前から一定温度下での温度馴致を行っておく。この中から無作為に選んだ5尾の供試魚を、前日から馴致温度に合わせておいた温度勾配装置に収容した後、今度は温度勾配装置への馴致のため、温度勾配の無い状態にて一昼

夜放置する。翌日、温度無勾配下での魚の遊泳位置を記録(1時間)した後、温度勾配を形成するが、供試魚は温度勾配に曝露された状態でさらに24時間以上保持される。温度勾配形成後における遊泳位置(魚が選んだ温度帯)の記録は、温度勾配が安定となった直後の2時間(1時間の観察を2セット)、勾配形成から24時間経過時の2時間(同2セット)の計2回、行う。各観察中、遊泳位置は1分ないし3分間隔でコンピュータに入力、最終的には各温度帯での1時間毎の出現頻度分布(ヒストグラム)として集計する。このとき、温度勾配形成直後に魚が選んだ温度を短期選好温度(short-term preferred temperature), 24時間経過後に選んだ温度を長期選好温度(long-term preferred temperature)と呼ぶ(Reynolds and Casterlin, 1980; Giattina and Garton, 1982; 土田・深滝, 1991; Tsuchida, 1995)。以上が1回の実験となるが、実際には再現性を確認するために同様の実験を3~4回繰り返し行う。またこれとは別に、4段階程度の馴致温度群を設けて各々実験を行うため、1魚種につき12~16回程度の実験が行われることになる。

温度変化に対する行動

選好温度試験の典型的な例として、垂直温度勾配装置にて行われたイシダイ *Oplegnathus fasciatus* (15°C馴致群)の実験結果を図6に示す。図6Aには実験中における1~11の水深帯の温度推移を、図6Bには各水深別の出現頻度分布を、また図6CにはBの結果を各温度帯別に置き換えたものを示している(土田ほか, 1991)。図6Bの各水深帯での出現頻度を見ると、温度無勾配時(15°C)において水槽下層部に分布していたものが、10~30°Cの温度範囲の勾配が形成された直後に遊泳位置を変え、20°C付近の温度帯に集中、すなわち同温度帯を選好していることがわかる。このように、特定の温度帯を選好する行動を示す魚種は多く、土田(1997)は実験を行った27種の海産魚中、21種でこのような行動が認められたと報告している。特に、上~中層を遊泳する魚類にその傾向が強く、垂直温度勾配装置にて実験を行った魚種ではほとんどの種で特定温度帯への集中が見られたという。

選好温度

さて、上記の実験からイシダイの選好温度は20°Cであると考えてよいかという、そう単純ではない。例えば、図6Cにおいて各温度帯でのイシダイの出現頻度分布を見ると、温度勾配完成直後には20°C付近にあったピーク

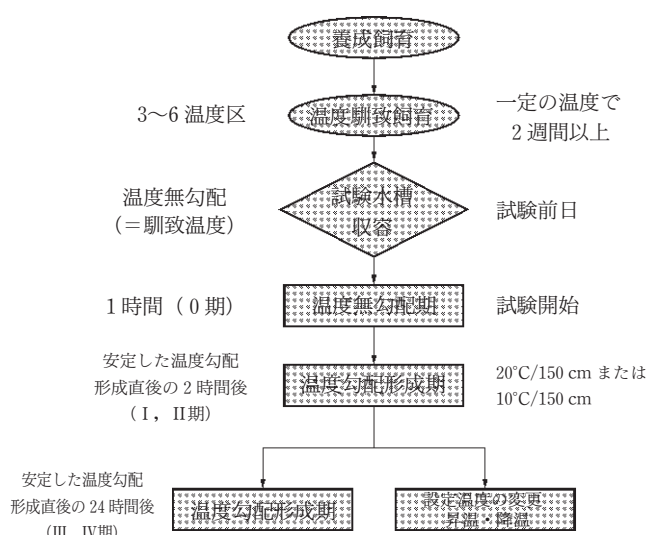


図5 温度選好試験の基本的手順(土田, 1997)

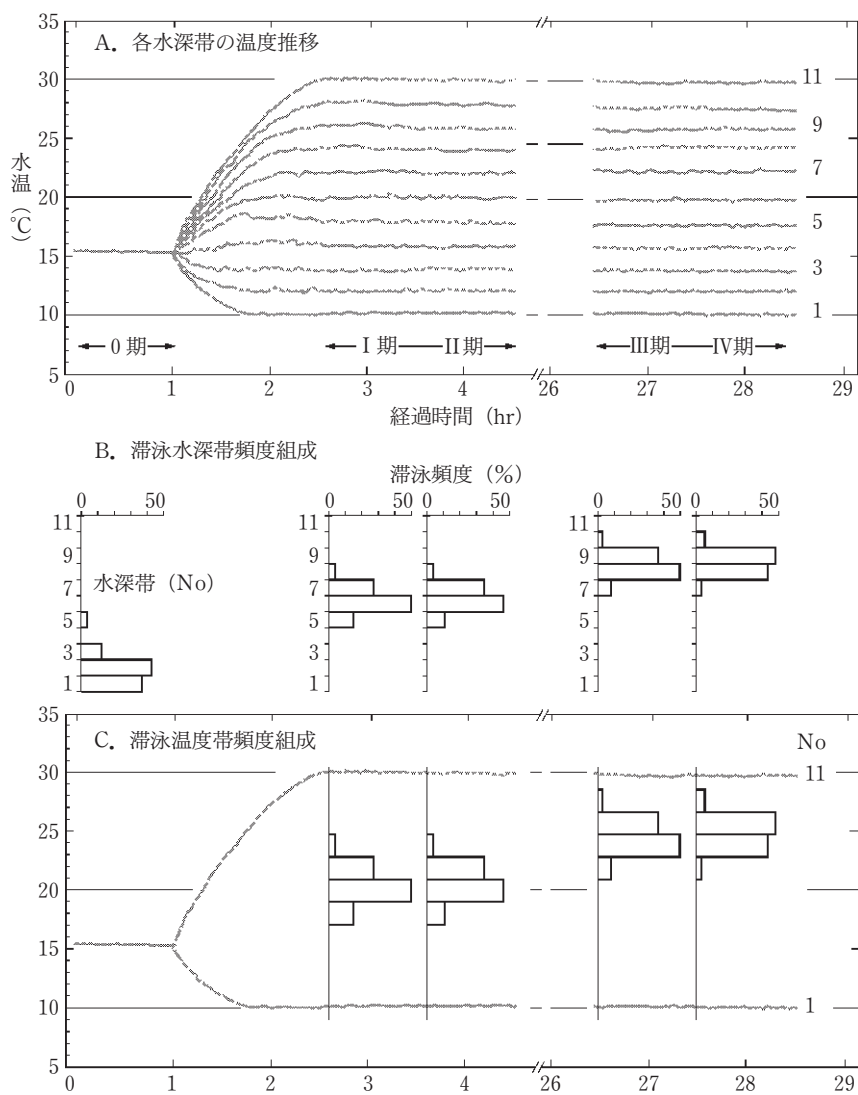


図6 イシガイでの選好温度試験の例 (土田ほか, 1991)

(短期選好温度)が、24 時間後には 25°C 付近に移動していることがわかる(長期選好温度)。これは、選好温度が経時的に変化することを示している。さらに、今度は馴致温度を変えて実験を行った場合について、図 7 に他の馴致温度 (15, 20, 25, 28°C) にて測定された短期選好温度および長期選好温度をまとめて示す。この図から、短期選好温度および長期選好温度ともに馴致温度が高くなるにつれ選好温度も高くなる傾向にある。すなわち両選好温度とも馴致温度によって結果が異なることがわかる。しかし、各馴致温度間における短期選好温度の幅 (21.2°C~26.6°C) が 5.4°C であるのに対し、長期選好温度では 2.7°C (24.6~27.3°C) と小さくなっている。この二つの現象をまとめると、選好温度は馴致温度により影

響を受けるが、その影響は経時変化とともに徐々に消え、最終的にある温度へ収斂する傾向にあることを示している。このような現象は既に古くから知られており、何人かの研究者によって報告されている (Fry, 1947; Coutant, 1970; Reynold and Casterlin, 1980; Tsuchida, 1995)。このように、時間の経過とともに選好温度が変化する理由については現在、図 8 のように考えられている (土田, 1997; 1998a)。すなわち、長時間温度勾配下に放置された魚は、最初は馴致温度 (実験開始前に経験した温度条件) の影響を受けながら特定の温度を選好するが、時間経過とともに「選好した温度による再馴致—新しい温度帯への移動(選好)」が繰り返されるため、最終的には馴致温度に関わりなく特定の温度へ収斂して

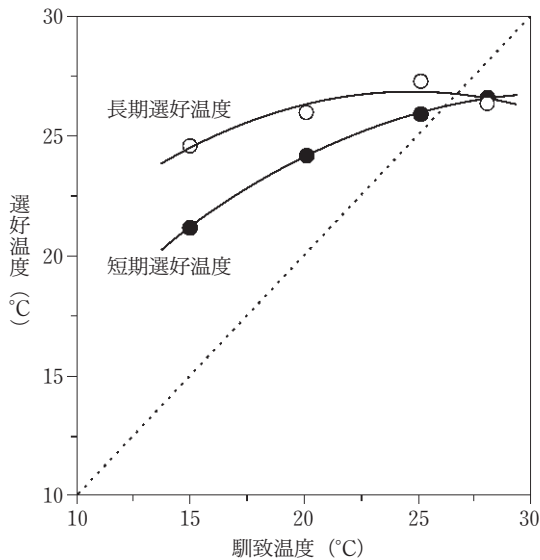


図7 イシダイの馴致温度と選好温度の関係(土田ほか, 1991)

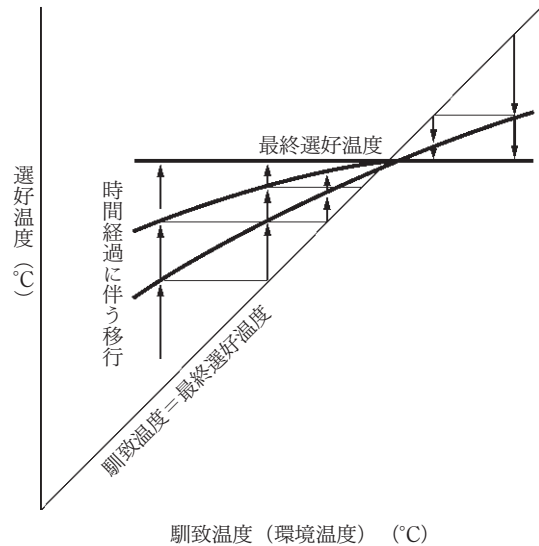


図8 馴致温度と選好温度の関係モデル(土田, 1997)

いく。一般に、この収斂した温度は最終選好温度 (Final thermal preferendum) と呼ばれ、魚種固有の値であると考えられている (Fry, 1947)。

最終選好温度の推定法

実際の海域を想定した場合、温排水域へ侵入した魚の経験する温度変化は、選好温度試験よりも長い時間でおこると考えられる。魚の選好温度は時間経過とともに最終選好温度に収斂するとすれば、実海域における温排水への蝟集あるいは忌避を予測する場合、この最終選好温度を基準として考えることが望ましい。しかし、最終選好温度を実測するためには実験が非常に長期間におよぶこととなり、非現実的であるので、実際には短期あるいは長期選好温度から計算により推定値として求めることになる。図7において、短期選好温度および長期選好温度の各回帰曲線は、馴致温度が高くなるにつれ互いに近づき、最終的にはほぼ馴致温度=選好温度の直線上(図中の角度45°の点線、26°C付近)で交わることがわかる。一般には、最終選好温度は馴致温度と選好温度が等しくなる温度と定義される (Fry, 1947; Coutant, 1970; Reynolds and Casterlin, 1980; Tsuchida, 1995)。したがって最終選好温度の推定値は、馴致温度と選好温度との関係を直線回帰式あるいは2次回帰式で表し、その回帰式と馴致温度=選好温度の直線との交点として算出する。

国内でこれまでに上記の方法によって明らかにされた

21種の海産魚の最終選好温度を表1に示す(土田, 1997; 1998a)。このうち、最も高い温度を選好したものはズキ *Lateolabrax japonicus* であり、その温度は30°Cに達した。また、最も低いものはシロサケ *Oncorhynchus keta* で13.5°Cであった。これらの結果は、漁獲適水温あるいは生息適水温等のフィールドでの観測値と、マダイ *Pagrus major*、ニシン *Clupea pallasii*、シロサケ、マイワシ *Sardinops melanostictus*、カタクチイワシ *Engraulis japonicus*、マアジ等多くの魚種についてよく一致することが確認されており、温度への魚類の反応予測方法としての有効性を証明するものであるといえる。なお、複数の魚種にて最終選好温度と成長適温など生理機能上の最適温度が一致することが報告されており (Kita et al., 1996; 土田, 1997; 土田・瀬戸熊, 1998)、水産増殖学的にも有用な知見である。

アユの選好温度試験における課題

表1にはアユも最終選好温度が推定された魚種の一つとしてあげられている。その温度は18.6°C(体長5.7cm)と、同種の遡上期における生息適水温とされる11~22°Cの範囲内であった。ただし、実験は海水条件下で行われており、遡上期におこる塩分濃度の変化は考慮されていない。これは、温度勾配と塩分濃度勾配を同時に形成することは技術的に困難で、また結果の解析についても格段に複雑化するためであり、残念ながらいまだ解決するに至っていない。遡上期における塩分濃度変化

表1 海産魚 21 種の最終選好温度 (土田, 1997)

魚種名	最終選好温度	魚種名	最終選好温度
シロサケ <i>Oncorhynchus keta</i>	13.5°C	シロギス <i>Sillago japonica</i>	25.5°C
ニシン <i>Clupea pallasii</i>	14.4°C	イシダイ-1年魚 <i>Oplegnathus fasciatus</i>	26.0°C
アユ <i>Plecoglossus altivelis</i>	18.6°C	ヘダイ <i>Sparus sarba</i>	26.4°C
カタクチイワシ <i>Engraulis japonicus</i>	18.8°C	クロメジナ <i>Girella melanichthys</i>	26.1°C
マイワシ <i>Sardinops melanostictus</i>	20.0°C	イサキ <i>Parapristipoma trilineatum</i>	26.7°C
クロソイ <i>Sebastes schlegeli</i>	20.5°C	ブリ <i>Seriola quinqueradiata</i>	26.9°C
カサゴ <i>Sebastes marmoratus</i>	20.7°C	トラフグ <i>Takifugu rubripes</i>	27.2°C
シマアジ <i>Pseudocaranx dentex</i>	22.5°C	イシダイ-0年魚 <i>Oplegnathus fasciatus</i>	27.2°C
マアジ <i>Trachurus japonicus</i>	24.0°C	カワハギ <i>Stephanolepis cirrhifer</i>	27.6°C
チダイ <i>Erynnis japonica</i>	24.2°C	クロダイ <i>Acanthopagrus schlegeli</i>	28.8°C
マダイ <i>Pagrus major</i>	25.3°C	スズキ <i>Lateolabrax japonicus</i>	30.0°C

を伴った場合の選好温度の測定技術の確立は、アユの温排水影響を予測する上での今後の大きな課題であろう。

温度耐性試験の方法

魚類が何度で死亡するかという温度耐性に関する知見は、温排水の影響評価だけでなく水産増養殖上も重要なものであるため、これまでにも非常に多くの報告がなされてきた。しかし、温度耐性もまた実験方法や実験条件により得られる数値が変動することが知られており、それぞれの実験方法あるいは魚類の温度耐性自体の持つ性質を知っておかねば混乱を招くことになる。ここでは、一般的に用いられる方法として、実験中一定の温度を維持した条件下で求める「温度接触試験」と、温度を一定速度で上昇（下降）させて求める「臨界最高（最低）温度試験」の2種について概説し、それらによって得られる温度耐性の性質および先述の選好温度との関係について述べる。

温度接触試験

この実験は、温度馴致を行った供試魚を一定の実験温

度（接触温度；exposure temperature）に調整された水槽中に速やかに移して直ちに実験を開始し、死亡率50%となる時間（温度抵抗時間）を求めるか、もしくは所定の接触時間内で死亡率が50%となる温度（半数致死温度；LT₅₀）を求めるもので、基本的には薬物等の毒性実験と同じ方法と考えてよい。この実験方法は一定温度下で行われるため、生理・生化学的反応との結びつきを解析することが容易である他、接触時間に対する自由度が比較的に高いため、卵や幼生期など短期間に発育段階が変わっていく時期の観察に向いている。ただし、この長所は本法の短所でもあり、急激に接触温度へ移行させるためハンドリングの影響を受けやすいといわれ、また接触時間の長短によっても大きく影響を受けることが知られている。

具体的な実験例として、クロアワビ *Nordotis discus discus* の浮遊幼生にて温度接触試験を行った事例を紹介する(岡村, 1990)。実験には、卵稚仔温度反応試験装置(柏木ほか, 1980)を用いているが、同装置はアルミニウム製ブロック上に11段階の温度勾配を形成し、同様の温度勾配を同時に8組、計88試験区を設定することができるものである。この場合は、8つの接触時間(7.5,

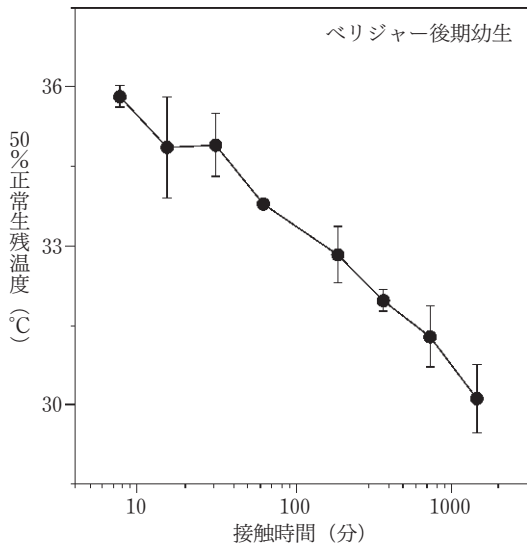


図9 クロアワビ（ベリジャー後期幼生）での温度接触試験の例（岡村，1990）

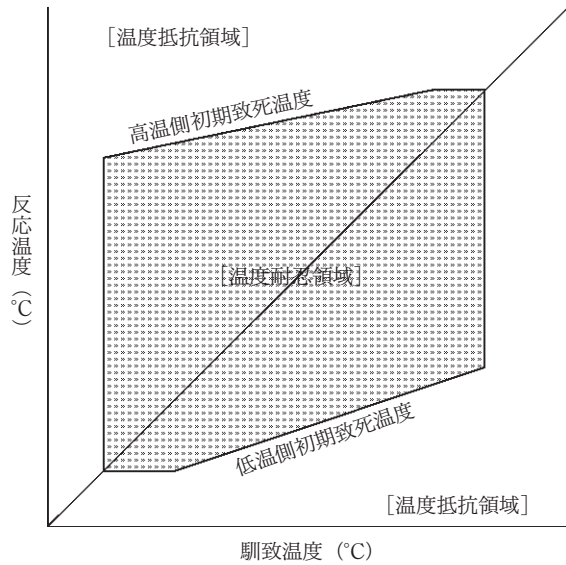


図10 魚類の温度耐性の一般的モデル（土田，1990）

15, 30, 60, 180, 360, 720, 1440分)を設定し、各試験管には20~80個体の幼生を收容して行われた。図9に、ベリジャー後期幼生（孵化後5日）における各接触時間別のLT₅₀を示す。この図から、最も接触時間の短い7.5分区分では35.8°CであったLT₅₀は、接触時間の増加とともに徐々に低下し、1440分区分において30.2°Cとなっていることがわかる。

ちなみにFry et al. (1946)は、接触時間をさらに長くしていき、最終的には無限大となったときになお50%の個体が生き残る温度を「初期致死温度 (incipient lethal temperature)」と呼び、理論上の生死を分ける境界線と定義した。上記の例では高温に対する温度耐性のみを紹介したが、実際には、生物の死亡は温度が低すぎてもおこるため、初期致死温度は高温側と低温側の二つあることになる。温度接触試験にて得られる温度耐性と馴致温度との関係について模式的に示すと、生物が生存できる温度領域は図10のような平行四辺形に似た多角形で囲まれた形になるとされる(土田, 1990)。ここで、生物の生存が可能な温度領域のことを、生物が環境要因に対して耐えて生きるという意味で「温度耐性領域 (zone of thermal tolerance)」, 生存が不可能な温度のことを、接触時間などの実験条件によって結果が異なる(抵抗する)という意味で「温度抵抗領域 (zone of thermal resistance)」と呼ぶ。

臨界最高（最低）温度試験

この実験は、馴致温度から一定の割合で昇温あるいは降温して、供試魚が体の平衡を喪失して致命的温度環境から逃れる能力を失った時点の「臨界最高（最低）温度 (critical thermal maximum or minimum)」および死亡した時点の「致死温度 (lethal temperature)」の二つを測定する方法である (Cox, 1974; Becker and Genoway, 1979)。この実験方法もまた、馴致温度によって影響を受ける他、温度の変化速度によっても異なり、昇温の場合その変化速度が大きいほど増大する傾向にあることが知られている。この温度変化速度は研究者により異なり、1~60°C/時とかなりのばらつきがあるため、各報告例を比較する場合は注意を要する。

具体例として、クロソイで行われた実験例を示す(土田, 1990; 土田・瀬戸熊, 1997)。この実験では、馴致温度が15, 20, 25, 28°Cの4群の供試魚が用意され、各馴致群から5尾ずつを馴致温度と同じ温度の実験水槽に移し、その温度から5°C/時の割合で昇温あるいは降温する方法で行われた。この間、供試魚の観察は連続して行われ、臨界最高（最低）温度および臨界致死温度（鰓蓋活動の停止）を計測した。図11に各反応温度の結果と馴致温度の関係を表したものを示すが、各々の馴致温度群の臨界最高温度は31.2~34.6°C、臨界最低温度は1.3~4.9°C、高温側臨界致死温度は32.3~35.1°Cの範囲にあり、馴致温度が高いほど、各反応温度が上昇する直線的な関係が認められた。なお、低温側については、1°Cま

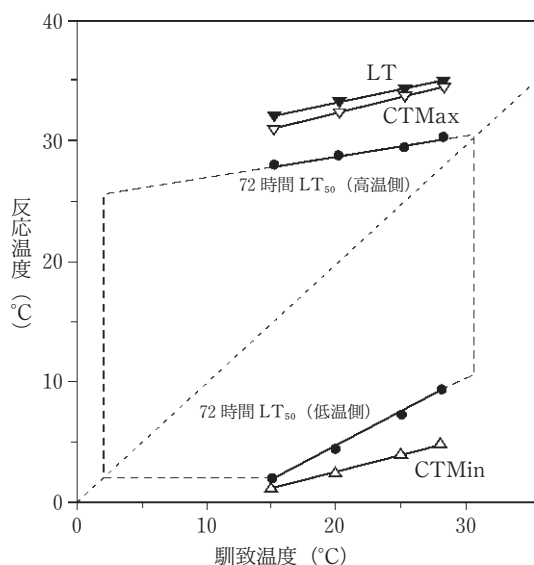


図 11 クロソイでの馴致温度と各反応温度との関係 (土田・瀬戸熊, 1997)

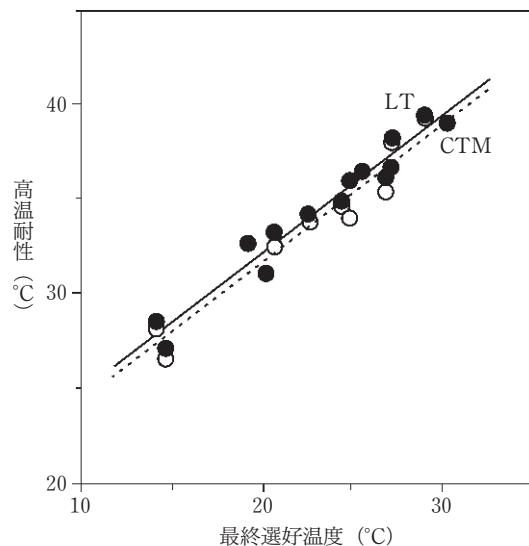


図 12 海産魚 21 種における選好温度と高温耐性との関係 (土田, 1997)

で温度を下げたものの死亡が認められなかった。

両温度耐性試験の比較

図 11 には臨界最高(最低)温度試験の結果の他に、比較のため同じクロソイで行われた温度接触試験(72時間 LT_{50})の結果も併せて示した。この場合、いずれの実験結果も馴致温度に依存しているが、 $5^{\circ}\text{C}/\text{時}$ の臨界最高温度は高温側の72時間 LT_{50} より $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 高い値を、逆に $-5^{\circ}\text{C}/\text{時}$ の臨界最低温度は低温側の72時間 LT_{50} より $1\sim 4^{\circ}\text{C}$ 低い値となっていることがわかる。この差はあくまで実験条件によって異なるものであり、決して絶対的なものではないが、温度耐性といっても、方法により結果が異なる場合があることがおわかりいただけるものと思う。このため、温排水の影響が予想される発育段階、あるいは対象種の生活様式や産卵生態等からどちらの値を用いるのが適当であるかを判断し、使い分けねばならない。

選好温度と致死温度の関係

土田(1997)によると、最終選好温度が測定された21種の魚類について、最終選好温度と同じ温度で馴致した場合の臨界最高温度および臨界致死温度を測定した結果、両者の間には相関係数0.981と非常に高い直線的な相関($P < 0.01$)が認められたという。すなわち、21種の魚類の最終選好温度と臨界最高温度および臨界致死温度

は図12に示すように、ある直線上に並ぶことが明らかになった。同様の現象は、Jobling(1981)によって最終選好温度と致死温度間で相関係数0.88であったと報告されている。さらに、最終選好温度と臨界最高温度および臨界致死温度との差に注目すると、最終選好温度の高い魚種になるにつれやや縮小するものの、少なくとも最も最終選好温度の高いスズキでも 8°C の差が存在した。この温度差は魚類が感知するに十分大きな値といえ、魚類は自らの生命に危険を及ぼす温度を事前に感知し反応することが可能であることが示唆される。

温排水影響の解明に関する研究の今後

以上紹介した実験をはじめ、様々な実験やフィールド調査等により温排水影響の一端が解明され、現在の温排水影響予測はその正確さにおいて格段の進歩を遂げた。しかし先述したように、アユを初めとする通し回遊魚への影響など、今後さらに調査研究が必要な面があることも事実である。また、1999年に新しく施行された「環境影響評価法」では、生態系に関する概念が新しく取り入れられ、温排水影響の予測についてもシステムとして生物をとらえた場合の影響評価がより強く求められるようになっていくと思われる。著者を含め、温排水影響の解明に取り組む研究者はこれらの点について真摯に受け止め、鋭意努力をしなければならないが、そのためには豊田市矢作川研究所をはじめとする河川生態の調査研究に

高い実績を有する研究機関との連携も積極的に進めていくことも重要であると考え。

一方、温排水には適切に用いられれば魚類の成長促進や、成熟のコントロール等、有益な面もあることが知られている。現在、国内では25ヶ所に温排水を利用して有用な魚介類の種苗生産等、栽培漁業に関する事業を行っている施設があり、中部電力管内でも、静岡県が管理運営する静岡県温水利用研究センターが浜岡原子力発電所から温排水の供給を受け、マダイやヒラメ *Paralichthys olivaceus*、クルマエビ *Penaeus japonicus* 等の種苗を生産し、周辺海域への放流事業を行っている。これは、漁獲量の安定に寄与するばかりでなく、漁業者の方々の資源保護に対する意識の向上にも貢献していると聞く。近年、国のレベルでも温排水を含め発電所の様々なプラス効果を明らかにするための研究がはじまっており、将来的にはより環境との調和が図られた発電所の設計に活かされることとなろう。

最後に、漁業と発電所が互いに共生できる日が来るために、微力ながらその礎となることを切に願ってやまない。

謝 辞

本稿を寄稿するにあたり、三重大学柏木正章教授に、温排水影響に関する多くの研究資料を提供いただき、さらに本稿のご校閲をいただいた。ここに謹んで御礼申し上げます。

また、本稿作成において、ご理解と多大のご協力並びにご助言をいただいた中部電力株式会社エネルギー応用研究所岩尾憲三研究主幹、若杉栄一研究主査、大西隆研究副主査、清水浩視研究副主査、中西嘉人氏に心より感謝する。

なお、発表の機会を与えていただいた豊田市矢作川研究所山本敏哉氏、並びに関係諸氏に厚く御礼申し上げます。

Summary

This treatise discusses the testing and analytical methods for assessing the influence of thermal effluent from power plants on fish. In order to gain insight into how fish react to thermal effluent, it is essential to know their temperature preferences. The necessary measuring is normally done in a temperature gradient tank. In Japan, the final thermal preferen-

dum of 21 species of fish have so far been established using this measuring technique. The highest preference temperature (30°C) was for sea bass *Lateolabrax japonicus* and conversely the lowest (13.5°C) was for the Chum salmon *Oncorhynchus keta*.

In order to understand the direct effects of thermal effluent on the survival of the fish, it is important to know their thermal tolerance. The two commonly used tests to measure this are: the thermal exposure test and the critical thermal maximum. To date, extensive materials have been published on the thermal tolerance of fish. The criteria to be considered are the physiology of the individual fish types as well as how they react upon contact with different water temperatures.

The results for the 21 fish species in question showed a significant linear relationship between the two criteria: those fish with the highest temperature preference, also had the highest thermal tolerance. Furthermore, it became evident that there was a difference of at least 8°C between the preference and the lethal temperature. The findings also suggest that when the water temperature approaches the lethal level, fish sense this and react accordingly.

引用文献

- 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 (3) : 245-256.
- Coutant, C. C. (1970). Biological aspects of thermal pollution. I. Entrainment and discharge canal effects. *CRC. Crit. Rev. Envir. Cont.*, 1 (3) : 341-381.
- Cox, D. K. (1974). Effects of three heating rates on the critical thermal maximum of bluegill. In: J. W. Gibbons and R. R. Sharitz (ed.), *Thermal ecology I*, CONF-730505, Nat. Tech. Inf. Serv., Springfield, VA : 158-163.
- Fry, F. E. J., Hart, J. S., & Walker, K. F. (1946). Lethal temperature relations for a sample of young speckled trout, *salvelinus fontinalis*. *Univ. Toronto Stud. Biol. Ser.*, (54) : 1-35.
- Fry, F. E. J. (1947). Effects of the environment on

- animal activity. Univ. Toronto Stud. Biol. Ser., (55) : 62.
- 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 (3) : 524-528.
- 後藤 晃・塚本勝巳・前川光司 (1994). 川と海を回遊する淡水魚. 東海大学出版会, 279.
- Jobling, M. (1981). Temperature tolerance and the final preferendum-rapid method for the assessment of optimum growth temperatures. J. Fish. Biol., 19 (4) : 439-455.
- Kita, J., S. Tsuchida and T. Setoguma (1996). Temperature preference and tolerance, and oxygen consumption of the mabled rockfish, *Sebastes marmoratus*. Mar. Biol., 125 (3) : 467-471.
- 柏木正章・道津光生・深滝 弘・古川 厚・千葉強平 (1980). 水生生物の温度耐性－I. 卵・稚仔温度反応試験装置の制作. 昭和 55 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集 : 104.
- 岡村武志 (1990). クロアワビの卵および浮遊幼生の高温耐性. 海洋生物環境研究所研究報告, (90201) : 1-38.
- Reynolds, W. W. and M. E. Casterlin (1980). The role of temperature in the environmental physiology of fishes. In: Ali, M. A. (ed.), Environmental physiology of fishes. Plenum Press, New York and London : 497-518.
- 土田修二 (1990). 魚の温度耐性. 海生研ニュース, 28 : 4-5.
- 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. 海洋生物環境研究所研究報告, (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. 海洋生物環境研究所研究報告, (91202) : 1-24.
- Tsuchida, S. (1995). The relationship between upper temperature tolerance and final preferendum of Japanese marine fish. J. Therm. Biol., 20 (1/2) : 35-41.
- 土田修二 (1997). 沿岸性魚類の温度反応に関する実験的研究. 東海大学大学院平成 8 年度博士論文 : 1-143.
- 土田修二・瀬戸熊卓見 (1997). クロソイ幼魚の温度反応. 日本水産学会誌, 63 (3) : 317-325.
- 土田修二 (1998a). 魚の好む温度. 海生研ニュース, 58 : 4-7.
- 土田修二 (1998b). 魚の好む温度, 高温耐性及び成長適温との関わり. 海生研ニュース, 59 : 8-10.

- 1) 中部電力株式会社エネルギー応用研究所水域生物チーム : 〒 459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1
- 2) 財団法人海洋生物環境研究所中央研究所海洋生物グループ : 〒 299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田 300