

## 温度と魚の生理

板沢靖男<sup>\*1</sup>

### まえがき

只今は過分のご紹介を頂き、恐縮に存じます。待鳥所長さんから、「水温と魚の生理生態について、何か話をして欲しい」とのご依頼を頂きました。温度について、私はほとんど何もしておりませんので、お受けしたものがどうか迷ったのですが、名誉なことですので有り難くお引き受けさせて頂きました。温度について私が直接関係した仕事を強いて思い出してみますと、四つか五つほどかと思えます。

最初のは、魚の脊椎骨数の水温による変異の研究でした。昭和20年代でしたが、待鳥所長さんの恩師に当たられる相川広秋先生がヘッドになられて、カタクチイワシの資源生物学的研究が全国的に行われました。そのころ私は名古屋大学で雨宮育作先生の助手をしておりまして、雨宮先生が東海地方の調査を分担なさいましたので、私もそのお手伝いで、シラスから成魚までのいろいろな成長段階のカタクチイワシについて、背骨の数をずいぶん数えました。そんなことで、魚の脊椎骨数に関心を持つようになりました。魚の脊椎骨数は、発生初期の水温が低いほど多くなり、高いほど少なくなるという逆相関の関係がフィールド研究によって知られ、Jordan's rule (脊椎骨数は赤道から両極に向かって増加する) とか北高南低の法則 (北半球に属するわが国では、脊椎骨数の平均値は北方水域ほど高く南方水域ほど低い) とか呼ばれています。野外の集団に見られるこの現象が、同じ一対の親魚から同時に産まれた卵をいろいろな温度で発生させた実験的集団でも見られるだろうかと考えて、カムルチー (俗に雷魚) を材料にして確かめてみました。その結果は、ある温度以下では確かに水温が高いほど脊椎骨数は少なくなりましたが、それ以上温度が高くなると脊椎骨数

は逆に多くなって、全体としてはV字型になるという結果になりました。何年か繰り返して同じ結果を得ましたので英国のNature誌に投稿したら、掲載してくれました (Itazawa, 1959)。野外観察と室内実験のこの違いについて、私は天然では昼夜をつうじて見ればあまり高い温度で発生することはないので、V字の左半分だけが現れて逆相関の関係になるのではないかと考えています。水温がなぜ脊椎骨数に影響するのかということについても、水温や酸素濃度を均一に保ったまま代謝抑制剤によって発生初期に代謝速度の差を生じさせ、それが脊椎骨数に反映することを実験的に示し、一方脊椎骨の化骨過程を観察して、私なりのスペキュレーションに基づいて両者を結びつけた推論を試みましたが、論文として発表しないままになってしまいましたので、ここでは省略します。

二つ目は、英国留学中に現生シーラカンスの血液の酸素解離曲線を15℃と28℃で比較した研究です。シーラカンスが生息しているコモロ諸島海域の150mから300mぐらいの深さの水温はおよそ15℃で、この温度では血液の酸素親和性はどの魚よりも強いくらいなのに、同海域の表面温度にほぼ等しい28℃では、酸素親和性が著しく低下することを見いだして、Hughes教授と共著でExperientia誌に発表しました (Hughes and Itazawa, 1972)。その後江ノ島水族館の末広恭雄先生が、シーラカンスを生かして持ち帰って水族館で見せようという壮大な計画を立てられ、コモロ島に調査隊が派遣されました。シーラカンスを釣り上げて表層の生け簀で生かしておこうとする試みはそれ以前にもありましたが、日本の調査隊を含め長く生かすことに成功した例はありません。東京大学におけるシーラカンスのシンポジウムに講演を頼まれた時、この酸素解離曲線の研究を紹介して、15℃で

(2000年1月5日受付, 2001年4月3日受理)

\*1 九州大学 名誉教授

\*2 この総説は当研究所中央研究所の研究集会において平成6年3月に講演いただいた内容である。

なくても例えば20℃ぐらいに冷やすことが出来ればかなり効果があるのではないかと話したところ、朝日新聞に「シーラカンスの延命策」として紹介されました。

三つ目は、現在石川県におられる辻さんの卒論研究としてやって貰ったもので、活魚輸送に関連して、5℃水温を下げるだけでマダイの収容可能密度を2倍に増やすことが出来ることを実験的に示し、日本水産学会誌に発表しました（竹田ら、1989）。この水温低下の効果に関連しては、遠洋水産研究所の東さんが大学院生として私の研究室におられた頃、マダイの呼吸や血液循環が水温を下げるるとどのようになるかということの研究して貰い（Azuma *et al.*, 未発表）、また同じく大学院生だった山光さんにはコイの心電図が水温によってどのように変わるかということの研究して貰いました（山光・板沢、1988）。

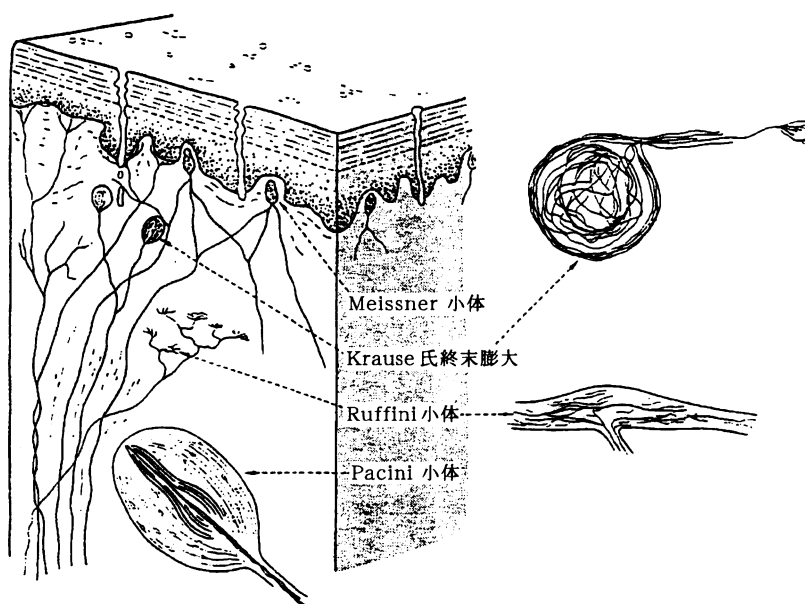
そのほか、日本水産資源保護協会の「水産用水基準・専門委員会」の委員をしておりました時に、委員長の新田忠雄先生から頼まれて、現在宮崎大学の助教授をしておられる神田さんの協力を得ながら、「水産生物適水温図」というものを纏めたことがありました（日本水産資源保護協会、1988）。水温について私が直接関係したことはこのぐらいしか思い浮かびませんので、この研究集会では温度と魚の生理について、文献で勉強したことを紹介させて頂こうと思います。それも個体レベル

の生理生態については皆様大変にお詳しいと存じますので、個体以下のレベルの少々細かい話をさせて頂こうと思います。具体的には、魚はどのようにして水温を感じるかという温度感覚の問題と、温度が魚の生理生化学にどのように影響するのか、ということについてお話ししたいと思います。こちらでは低温の影響より高温の影響にご関心が深いと思いますので、なるべく高温の影響に主眼を置きながらこの二つの問題に絞ってご紹介させて頂こうと思います。

### 体表における温度受容

暑いとか 寒いとか 感じるのを 感覚と言いますが、感覚は体の一部で刺激を受け取り、その情報が末梢から中枢へ向かう求心神経によって中枢に伝えられ、そこに刺激に応じた対応が生じて認識される過程の全体を申しますので、刺激を受け取る部分については受容receptionという言葉を使っています。そして刺激を受容するための特別な構造を受容器receptorと言います。

人間の場合は、温度受容だけのための特別な受容器が、それも暖かいと感じる温受容器と冷たいと感じる冷受容器が別々に存在しています。第1図にその模式図を示しましたが、温受容器のルフィニ小体は皮膚のやや深いところ真皮の下層部や皮下組織内にあって、温繊維と呼ばれる神経繊維が

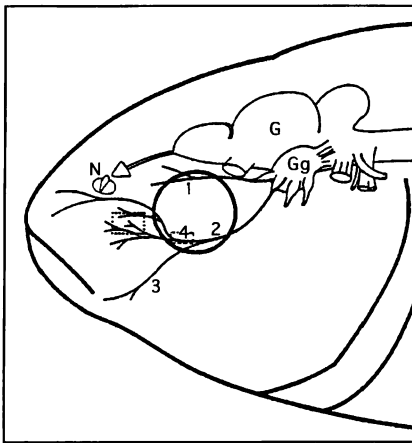


第1図 ヒトの皮膚の温度感覚受容器（末長、1967より）

出ており、冷受容器のクラウゼ氏終末膨大は皮膚のやや浅いところの真皮の最上層部にあつて、冷繊維と呼ばれる神経繊維が出ています（末長，1967）。

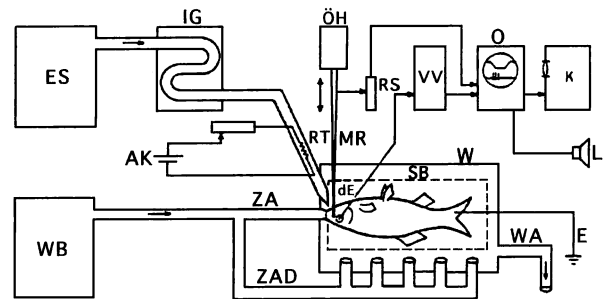
刺激が受容器で受け取られ、その刺激に応じてインパルス impulse と呼ばれる電位変化が生じて、これが神経繊維を伝導して中枢に伝えられ中枢で認識されて感覚が成立するわけですから、温度受容についても、温度刺激に応じたインパルスを導き出して記録するという方法で研究されます。ところが魚の場合は、温度受容だけのための特別な受容器というものはありませんで、圧力を感じる機械刺激の受容器の反応が温度によって敏感に変わることを利用して温度を感知しているのだろうと考えられています。真骨魚について、それを最初に明らかにしたドイツのシュベートウの研究（Spaeth, 1967）をご紹介します。

第2図は、実験に用いたコイ科の淡水魚 *Leuciscus rutilus* の頭部における三叉神経の走行を示したものです。Gは脳で、その下にGgとあるのはガッサー-Gasser 神経節と呼ばれるものです。ここから2の眼窩下神経が出ており、それが3の下顎神経と4の上顎神経に分かれます。Nは鼻孔です。点線で囲んだ部分に機械的的刺激（具体的には圧刺激）と温度刺激を加えながら、そこの神経に電極をあててインパルスを導出記録しています。



第2図 コイ科の淡水魚 *Leuciscus rutilus* の頭部における三叉神経の走行概観（Spaeth, 1967より）

G：脳，Gg：ガッサー神経節，N：鼻孔，1：表在性眼神経，2：眼窩下神経，3：下顎神経，4：上顎神経，点線の矩形で囲った部分は機械的的刺激及び温度刺激を加えた部位ならびにインパルスを導出した部位



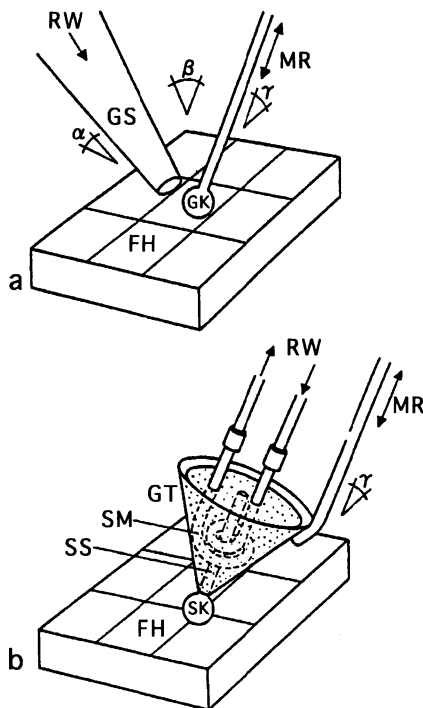
第3図 実験配置図（Spaeth, 1967より）

AK：温度刺激に使う水を加温するための蓄電池，dE：関電極（タングステン鉤），E：アース（不関電極），ES：氷容器，IG：恒温槽，K：カメラ，L：拡声器と受話器，ÖH：油圧式加圧器，O：オシログラフ，MR：機械的的刺激（ガラス球あるいは銀球による刺激を与える装置），RS：刺激を記録するための電位差計コネクター，RT：温度刺激を与える装置，SB：締め金式網板容器，VV：アンプ，W：水槽，WA：排水管，WB：断熱水槽，ZA：呼吸用水流入管，ZAD：魚の温度を一定に保つための順応水の流入管

第3図は、実験装置の配置図で、魚はクラレーで神経・筋接合部の伝導を遮断して不動化し、仰向けにして鰓を灌流しながら、加圧装置MRで圧刺激を与え、温度刺激装置RTで温度刺激を与えます。MRは先端に直径1mmのガラスあるいは銀の球が付いていて、これを魚の皮膚に当てて圧刺激を与えるのですが、油圧式の加圧装置ÖHによって圧力を調節できるようになっています。銀球式加圧装置は一定温度のもとでの実験に用い、ガラス球式加圧装置は途中で温度を変化させる実験に用いました。ÖHの左下に上下両方向の矢印があるのは、圧力を強めたり弱めたり調節できることを示しています。加圧の程度は、球を進める速さにして700-800  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 、加圧時間は400msecとし、反復加圧するときは1秒間に1回としています。ÖHの右下から右の方へ矢印が出ていますが、電位差計コネクターRSを経てブラウン管オシログラフOに導かれ、ブラウン管の上に圧力が記録されます。RTは温度刺激装置で、氷を入れた水槽ESから恒温水槽IGを通った水が、先を細く尖らせたガラス管の中に入れてきて、蓄電池AKからの電流で発熱したニクロム線によっていろいろな温度に加温されて、先端から注ぎ出ようになっています。温度は6°Cから36°Cの範囲で、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度で任意の温度が得られます。

眼の近くからdEという線が出ていますが、これはタングステン電極からのコードで、正確には第2図の点線で囲った部分の神経に電極を当てて、インパルスを導き出しています。増幅器VVを経てオシロスコープOのブラウン管にインパルスを記録します。ブラウン管に写し出された圧力とインパルスの記録は、Kのカメラで撮影されます。魚の尾部から出ている線は、不関電極からのアース線です。

第4図は、機械的的刺激と温度刺激の与え方の模式図です。上は、圧刺激部がガラス球GKで出来ており、それを魚の皮膚FHに当て、そこにガラス細管GSからいろいろな温度の水が注がれます。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は角度ですが、水流は皮膚に対し30度



第4図 機械的的刺激及び温度刺激の与え方 (Spaeth, 1967より)

a. ガラス球による刺激

FH：魚の皮膚，GK：ガラス球，GS：ガラス管，MR：機械的刺激の方向，RW：温度刺激用水の流向， $\alpha$ ：ガラス管と魚の皮膚の間の角度（30°）， $\beta$ ：ガラス管と機械的刺激の方向の間の角度（45°）， $\gamma$ ：機械的刺激の方向と魚の皮膚の間の角度（60°）

b：水銀による刺激

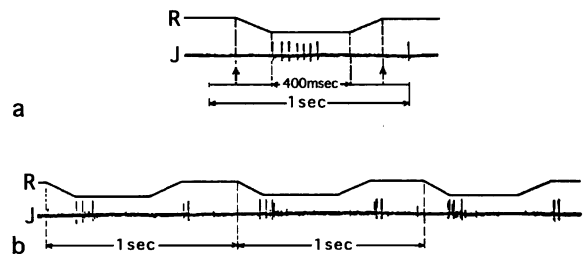
GT：水銀（細かい点で示す）を満たしたガラス漏斗，SK：銀球，SM：真鍮製らせん管，SS：銀製の柄，その他の記号はaと同じ

の角度で注がれ、水流と圧刺激の方向は45度の角度をなしており、圧刺激の方向は皮膚に対し60度の角度になっています。下は、圧刺激部として銀製の球SKを使っています。GTは水銀を満たしたガラス漏斗で、銀球の柄をいろいろな温度の水が流れる細管に取りまいて、銀球の温度をいろいろに調節します。

このような装置を使ってインパルスを記録しますが、圧を加えずに温度刺激だけ与えても反応は全く起こりません。一方温度なしに圧刺激だけを与えるということは勿論出来ませんが、一定温度のもとで圧刺激を与えたときのインパルスの例を第5図に示します。上は、0.4秒間の圧刺激を1回だけ与えたときの記録で、Rは圧刺激の記録、Jは発生したインパルスの記録です。インパルスは、刺激の強さに関わらず一定の大きさで現れ、刺激の強さはインパルスの頻度によって伝えられる、ということが感覚一般に見られる現象です。下は、毎秒1回ずつ0.4秒間の圧刺激を反復して与えたときの記録です。圧刺激を加えた直後と圧刺激を除いた直後にインパルスが発生していますが、以後この刺激を加えた直後のインパルス頻度によって見てゆきます。

第6図は、5°Cに馴致した魚に8°C、14°C、22°C、あるいは30°Cの銀球で一定の圧刺激を与えたときのインパルスです。0.4秒間当たりのインパルスの数は、8°Cで8回、14°Cで7回、22°Cで6回、30°Cで4回というように、温度が低いほど多く、温度が高いほど少なくなっています。

いろいろな一定温度のもとで、ガラス球式加圧装置で一定の圧刺激を加えたときのインパルス頻

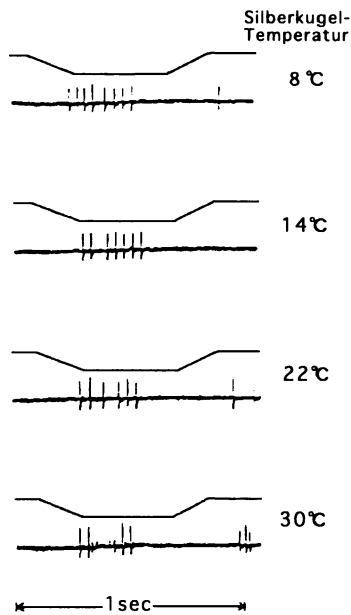


第5図 恒温における機械的的刺激 (Spaeth, 1967より)

a：単一機械刺激を与えたときの記録

b：反復刺激を与えたときの記録

R：刺激の記録，J：インパルスの列，垂直矢印は刺激の始めと終わりを示す



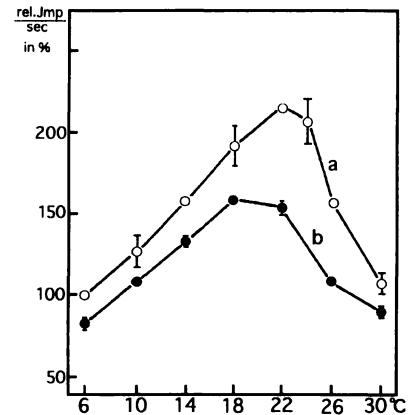
第6図 5°Cに馴致した魚に一定温度で銀球による単一機械刺激を与えた時の記録原図 (Spaeth, 1967より)  
右側の数字は銀球の温度

度の、温度による相違をしらべた実験結果の一例を第7図に示します。上の白丸は単一刺激、下の黒丸は反復刺激を与えたときのものです。実験例数は、単一刺激の場合が10例、反復刺激の場合が11例でした。6°Cで単一刺激を与えたときのインパルス頻度を100として、それに対する相対的な値を、平均値と標準偏差で示しています。第7図は、15°Cに4週間馴致した魚についての結果で、22°Cあるいは18°Cのときに、インパルスの頻度が一番高くなっていますが、著者スペートウはこれを反応に最適な温度Reaktionsoptimumと呼んでいます。

図は省略しますが、同様な実験を5°Cに馴致した魚と25°Cに馴致した魚についても行いました。5°Cに馴致した魚では、最適温度は18°Cになりましたが、25°Cに馴致した魚では、インパルス頻度は温度が高いほど高くなって、最適と言える温度は得られませんでした。

次に、温度を急に変えたときのインパルス頻度の変化をしらべています。

第8図は、15°Cに馴致した魚にガラス球式加圧装置で一定の反復圧刺激を与えながら、加圧部に注ぐ水流の温度を急に高くした場合の反応です。温度を急に変える直前のインパルス頻度を100として、相対的な頻度で示しています。一番上の黒

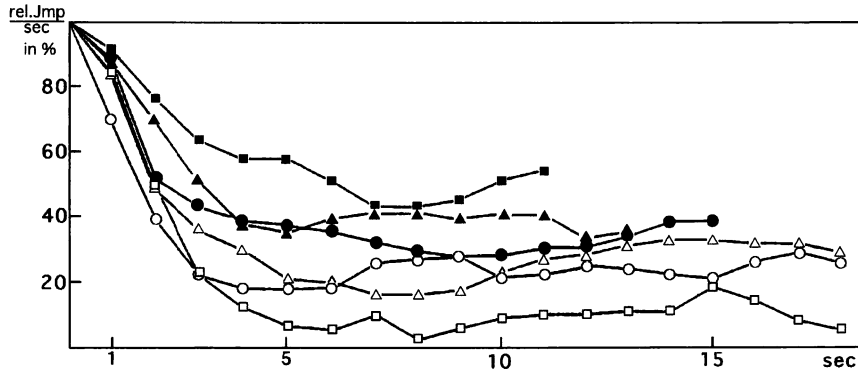


第7図 15°Cに馴致した魚に一定温度でガラス球による機械的刺激を与えた時の反応 (Spaeth, 1967より)  
曲線 a : 単一刺激を与えたときの反応, 曲線 b : 反復機械刺激を与えたときの反応, 横軸: 温度 (°C), 縦軸: 6°Cのときの1秒間あたりインパルス数を100とした相対的インパルス頻度, 実験例数: aは10, bは11

四角は6°Cから10°Cに、次の黒三角は6°Cから14°Cに、三番目の黒丸は6°Cから18°Cに、四番目の白三角は6°Cから22°Cに、下から二番目の白丸は6°Cから26°Cに、そして一番下の白四角は6°Cから30°Cに、急に温度を上げた場合です。図は省略しましたが、温度を変化させなくても、圧刺激を反復するとインパルス頻度が低下することが予備実験で判っていますので、温度を変化させたときの反応は、温度を変化させた後の短時間内の反応で見ますが、温度を上げるとインパルスの頻度が低下し、その程度は温度の上げ幅の大きいほど著しくなっています。

今のは温度を急に上げたときの反応ですが、次に温度を急に下げたときの反応を見たのが、第9図です。一番上の白四角は30°Cから6°Cに、次の白丸は26°Cから6°Cに、三番目の白三角は22°Cから6°Cに、後は上下がジグザグになっていますが、黒丸は18°Cから6°Cに、黒三角は14°Cから6°Cに、黒四角は10°Cから6°Cに、温度を急に下げた場合のインパルス頻度を、温度を変化させる直前の値を100として相対値で示しています。この場合も温度を変化させた直後の反応で見ますが、温度を下げるとインパルスの頻度は概ね高くなっており、その程度は温度の下げ幅の大きいほど著しくなっています。

それにしても、魚の温度感覚は敏感な種では0.03°C、それほど敏感でない種でも0.1°Cの温度上

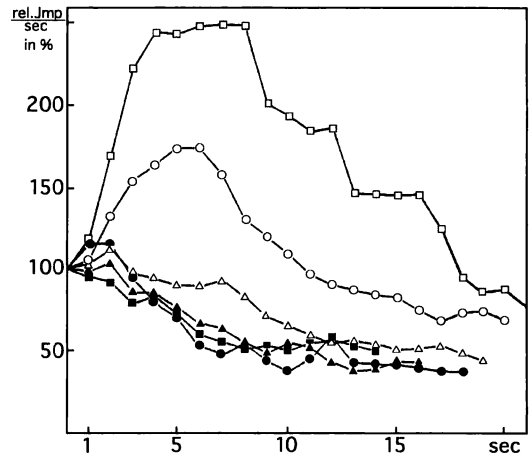


第8図 15°Cに馴致した魚にガラス球による反復刺激を与え、同時に加温刺激を与えた時の反応 (Spaeth, 1967より)  
 横軸：時間 (秒)，縦軸：加温刺激を与える直前のインパルスをもととしたインパルスの相対頻度，加温刺激は■が6°C→10°C，▲が6°C→14°C，●が6°C→18°C，△が6°C→22°C，○が6°C→26°C，□が6°C→30°C，実験例数：7

昇を感知し得ることが、イギリスのブル(Bull, 1936)などの条件づけ実験で知られています。

それに対してシュペートゥが実験した温度変化は、上げ幅の一番小さい場合でも4°Cですから、魚の鋭敏な温度感覚をこれで説明できるかという疑問が持たれると思います。しかしアメリカのバルダック (Bardach, 1956) がキンギョを使って実験したところによると、温度上昇刺激が1点だけに与えられたときには、感知し得る限界すなわち閾値が10°Cであったものが、温度上昇刺激が2mm<sup>2</sup>とやや広い範囲に与えられると閾値は2°Cと敏感になり、温度上昇刺激が体表全体に加えられると閾値は0.1°C以下と著しく敏感になるという面積積算の原理the principle of areal summationが働くのだと解釈されています。シュペートゥの実験で使ったガラスあるいは銀の球は、直径が1mmで、皮膚と接触面積は0.8ないし1.0mm<sup>2</sup>ということですから、面積積算の原理が働くとすれば、個体全体としては条件づけ実験で知られているような高い感度が得られるのではないかと考えられています。

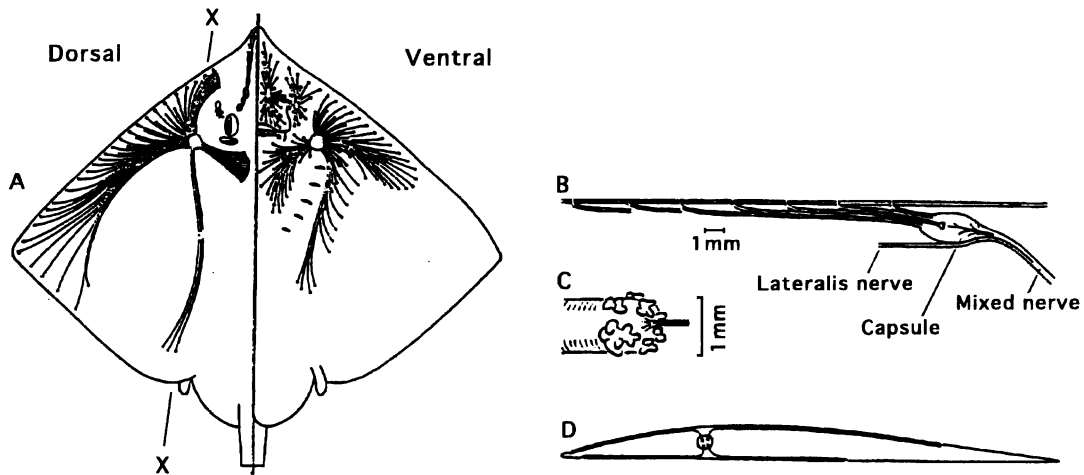
以上は真骨魚類の温度受容についての話でしたが、板鰓魚類ではロレンツィーニ器官Lorenzini's organ, あるいはロレンツィーニ瓶 ampulla of Lorenziniと呼ばれるものが、温度受容の場となっていると考えられています。第10図にイギリスのマレイ (Murray, 1962) がガンギエイ属のエイについて報告した図を掲げましたが、ロレンツィーニ器官は、サメやエイの特に頭部の背面と腹面に



第9図 15°Cに馴致した魚に、ガラス球による反復刺激を与え、同時に冷却刺激を与えた時の反応 (Spaeth, 1967より)  
 横軸：時間 (秒)，縦軸：冷却刺激を与える直前のインパルスをもととしたインパルスの相対頻度，冷却刺激は■が10°C→6°C，▲が14°C→6°C，●が18°C→6°C，△が22°C→6°C，○が26°C→6°C，□が30°C→6°C，実験例数：6

存在します。

第10図左側のAは全体図で、その左半分は背中側を示し、右半分は腹側を示しています。右側上のBは、体表に開いた開口部からそれぞれ細長い管が出て、その末端は膨大部になっており、この膨大部が幾つか集まって、膨らんだ鞘状のものに包まれることを示しています。この細長い管とその末端の膨大部を併せてロレンツィーニ器官と呼



第10図 ガンギエイ *Raja* のロレンツィーニ瓶 (Murray, 1962より)  
 (A) 背面(左)および腹面(右)におけるロレンツィーニ器官の管の分布  
 (B) 下顎の皮膚断面模式図, 瓶集合体を包む球状鞘と瓶を示す  
 (C) 舌骨下顎骨部の球状鞘内の1個の瓶  
 (D) A図のX-X面での魚全体の縦断面

びます。Cは1個の膨大部で、この膨大部の内腔に面して感覚細胞が並び、顔面神経および迷走神経からの分枝の混合神経と接続しています。いろいろな刺激を与えたときのインパルス反応から、電気受容、圧受容、塩分濃度受容などとともに、温度受容の機能も有することが判っています。しかし詳細については省略します。

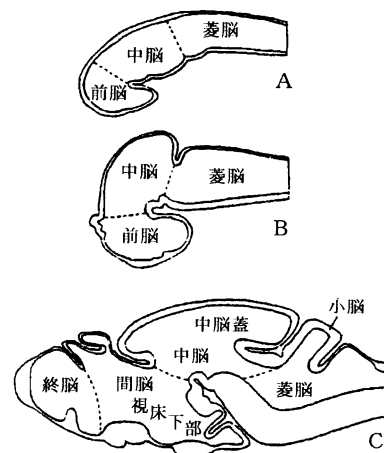
温度受容と体温の行動的調節における  
 視索前野の重要性

以上は魚の体表面近くに存在する温度受容器についての話でしたが、このほかに視床下部と密接に関連する視索前野 Preoptic region あるいは Preoptic anterior hypothalamus と呼ばれる部分が、温度受容の機能を持つということが知られています。第11図はブラウントラウトの脳発生の図で、Cは仔魚期の脳(左が前方、右が後方)ですが、脳の中で前後真ん中辺りの背側に視覚の中核である中脳蓋があり、その前方に間脳、その下に視床下部と書いてあります(本間, 1987)。

視床下部は間脳の一部域で、食物の摂取、消化、水分代謝、脂質代謝、循環など多くの機能の調節中枢であるとともに、神経系、神経分泌系を介して、脳下垂体からの甲状腺刺激ホルモン、生殖腺刺激ホルモン、副腎皮質刺激ホルモンなどの出方を調節する上位支配器官でもあり、きわめて重要な働きをしています。人間の場合には構造的にも

大脳に取り囲まれて脳の中心に位置するということもあり、「中心脳」と呼んでいる人もいるぐらい生命に重要な中枢です。

この間脳視床下部の視神経交叉 optic chiasma の前方から上方にかけて存在する神経分泌細胞の細胞体の集まりを視索前核 preoptic nucleus と言い、その辺りの部域を視索前野と言います。この視索前野が、温度を感知する機能を持ち、また行動的に体温を調節するのに重要な役割を果たすことが判ってきました。アメリカのネルソンとプロッサー (Nelson and Prosser, 1979) は、グリーンサンフィッシュ、レボミス キアネルス *Lepomis cyanellus* とキンギョを、5°C、15°C および 25°C に約4週間馴致

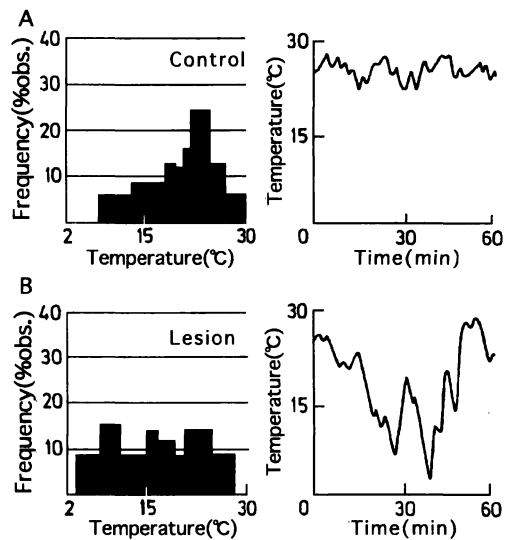


第11図 ブラウントラウトの脳の発生と仔魚(c)の視床下部(本間, 1987より)

した後、2℃から30℃までの水平的な温度勾配を作れる水槽に入れました。水槽は11の区画に分けられています。魚はどの区画へも自由に泳いでゆくことができます。一つ一つの区画は幅12cm、長さ8cm、水深は12cmでした。実験は1個体ずつ行い、最初はその魚が馴致されていた温度の区画に入れます。その後30秒ごとに1ないし2時間魚がどの区画にいるかを観察し、その位置を記録しました。キンギョについての結果の一例が第12図の上半分のAです。この場合は、水槽の温度は3℃から30℃の範囲でした。この図は25℃に馴致したキンギョのうちのある個体の場合ですが、左の黒いヒストグラムが魚の選択した温度を示しています。横軸は温度で、縦軸はそれぞれの温度の区画にいた頻度を、全観察回数130回中のパーセントで示しています。馴致されていた温度である25℃を中心に分布しており、平均値と標準誤差は $24.7 \pm 2.3$ ℃でした。供試魚のうち13個体については、熱電堆温度計を総排泄口から2cmほど挿入して装着し、体温（腸内温）も同時に記録しました。右側の波形のグラフは、左の黒いヒストグラムを記録したのと同じ個体の体温です。横軸は時間で、縦軸が体温です。これを見ますと、体温は1時間にわたっておおよそ25℃で、変動の幅は3ないし5℃程度で比較的小さく、ほぼ一定しています。

その後、魚を取り出し、麻酔して鰓を灌流しながら、頭蓋骨の脳の真上に当たる部分に直径5ないし8mmの穴をあけ、蜘蛛膜の脂肪を吸引除去した後、細い針状電極を挿入し、マイクロマニピュレーターで目的とする視索前野に電極を当て、0.1ないし0.5mAの電流を1ないし15秒間通じて、視索前野を破壊しました。その後、頭蓋腔内に医療用高分子物質を充填し、エポキシ樹脂で封じました。手術後の魚は、この魚が馴致されていた温度である25℃で4日間回復させた後、再び前と同じような温度選択実験に供し、30秒ずつ1ないし2時間魚の位置を記録しました。実験終了後、30μmの脳切片を作り、顕微鏡観察によって破壊された部位を確認しました。コントロールとして疑似手術sham operationを行います。それには別の個体を使い、電極を挿入して視索前野に電極を当てるところまでは同じように行い、ただ電流を通じることはありませんでした。

第12図の下半分のBは、上のAと同じ個体の視索前野破壊後の、選択温度と体温です。全観察回数は上と同じく130回です。魚は、馴致されてい



第12図 25℃に馴致したキンギョの温度選択結果と体温 (Nelson and Prosser, 1979より)  
A：視索前野破壊前、B：視索前野破壊後、左：横軸は温度(℃)、縦軸は各温度区画に魚が存在した頻度(全観察例130例中のパーセント)、右：横軸は経過時間(分)、縦軸は体温(腸内温度、℃)

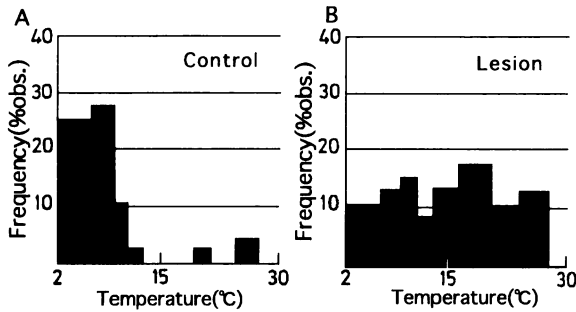
た25℃とは全く関係なく、どの温度の区画にもほぼ同じぐらいの時間過ごし、それに伴ってその体温も1時間の間に20℃も変動しました。なお視索前野を破壊された魚は、摂餌行動が減退したほか、遊泳行動も視覚反応も正常でした。

全く同じ実験を、グリーンサンフィッシュについても行いました。第13図は5℃に馴致した魚のうちのある個体の例です。水槽の温度範囲は2℃から28℃でしたが、左のAは手術前の魚で、200回の観察中大部分を10℃以下の範囲で過ごしています。右のBは同じ個体の視索前野を破壊した後で、どの温度区画にもほぼ同じ程度の回数分布しています。

第14図は、15℃に馴致したグリーンサンフィッシュで、この場合の選択し得る温度範囲は4℃から28℃でした。上のAは正常魚の場合で、温度選択については左のヒストグラムのように馴致されていた15℃を中心に分布し、その体温も右のグラフのように同じく15℃を中心としてあまり大きな変動はしていません。ところが同じ個体が視索前野を破壊されると、下の図のように温度選択ができなくなり、それに伴って体温も大きく変動しています。

キンギョもグリーンサンフィッシュも、5℃、

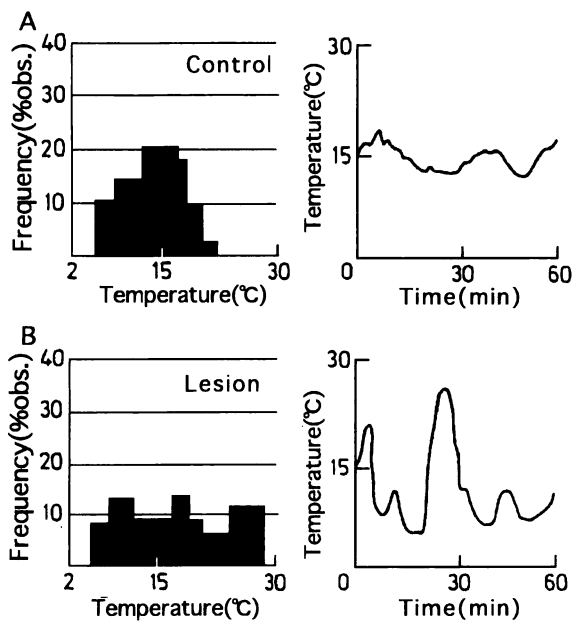




第13図 5°Cに馴致したグリーンサンフィッシュ *Lepomis cyanellus*の温度選択結果 (Nelson and Prosser, 1979より)

横軸は温度 (°C), 縦軸は各温度区画に魚が存在した頻度 (全観察例200例中のパーセント),

A: 視索前野破壊前, B: 視索前野破壊後



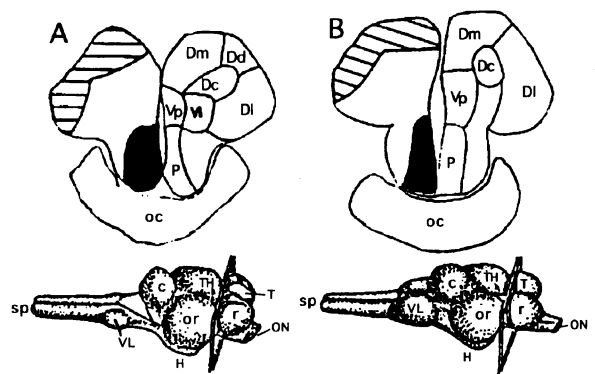
第14図 15°Cに馴致したグリーンサンフィッシュ *Lepomis cyanellus*の温度選択結果 (Nelson and Prosser, 1979より)

A: 視索前野破壊前, B: 視索前野破壊後, 左: 横軸は温度 (°C), 縦軸は各温度区画に魚が存在した頻度 (全観察例150例中のパーセント), 右: 横軸は経過時間 (分), 縦軸は体温 (腸内温度, °C)

15°C, 25°Cと, 3通りの温度に馴致した魚について同様な実験を行いました。いずれも, 正常魚は馴致された温度ないしそれに近い温度を選択し, それに伴って体温も馴致された温度を中心にあまり変動しませんでした。これに対し視索前野を破

壊された後は, 温度選択能力が失われ, それに伴って体温も大きく変動するという, 同じような結果を得ました。なお疑似手術をした個体はすべて, 正常な個体と同様な温度選択能力を示しました。ネルソンとプロッサーは, さらに, 視床下部以外の部位を破壊した場合の温度選択実験も行っています。第15図の左Aはグリーンサンフィッシュ, 右側Bはキンギョの脳です。どちらも, 下は脳を右上の方から見た図で, 図の右側が前の方, 左側が後ろの方になります。矩形の枠のところで切った横断面が上の図です。左右相称なので, 右半分は脳の各部位を説明する記号を示し, 左半分に破壊された部位を示しています。下の図には示されていませんが, 上の図で黒く塗りつぶしてある部分が視索前野です。ここを破壊されると, 今までお話ししましたような温度選択行動の喪失が起こります。下の図で枠のすぐ右つまり脳の中で一番前にあるのがTで示してある端脳です。上の図の右半分にDm, Dd, DIとあるのはその端脳をさらに細かく部位分けしたのですが, 左半分の斜線部はこの辺りを破壊したことを示しています。この辺りを破壊しても, 温度選択には何の影響も見られませんでした。

生物の生理現象の多くは酵素反応によって規定され, 酵素反応は温度によって規定されますから,



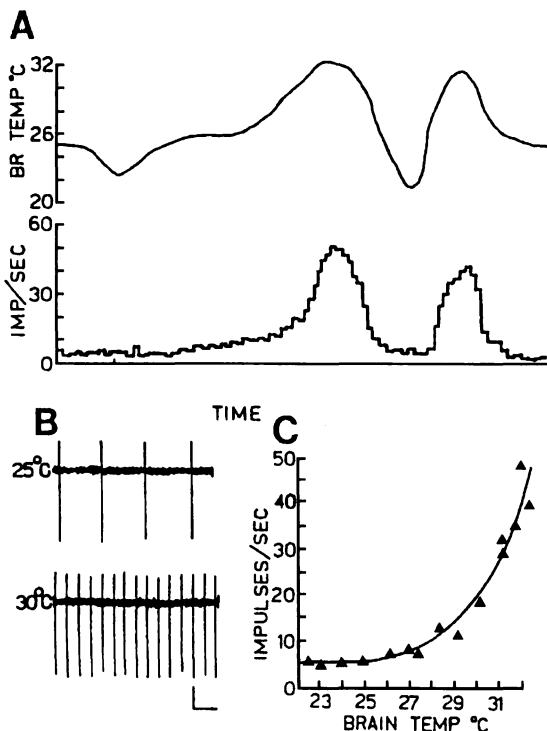
第15図 グリーンサンフィッシュ及びキンギョの脳と破壊部位 (Nelson and Prosser, 1979より)

A: グリーンサンフィッシュ, B: キンギョ, 下は脳の全体像で, 右側が前 (吻の方向), 左側が後 (尾の方向), 上は下の図の矩形の枠の面で切った断面図, 黒く塗りつぶした部分とそれに対応するPの部分に破壊された視索前野, 斜線部とそれに対応するDm, Dd, DIの部分は端脳の一部で, ここを破壊しても温度選択に影響は見られなかった

生物の体温はその生物にとって適当な温度に調節されていることが必要です。ところが魚は、高速遊泳性の大型のサメやカツオ・マグロ類を除けば、その体温がもっぱら外部環境の温度によって規定される外温性動物 ectothermal animal ですから、体温を適温に保つためには、適温の水の中にいなければなりません。つまり適温の水域を選択して生息するという行動的体温調節 behavioral thermoregulationによって適当な体温を維持するわけです。この行動的体温調節のために視索前野が重要な役割を果たしていることがお判り頂けたと思います。

ネルソンとプロッサーはさらに、視索前野から出るニューロンのインパルスを誘導記録し、それぞれのニューロンが脳温度の変化にどのように反応するかを調べました (Nelson and Prosser, 1981)。

第16図は、25°Cに4週間馴致したグリーンサンフィッシュの頭蓋骨に小さな穴をあけ、視索前野



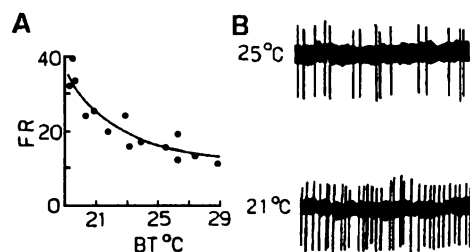
第16図 25°Cに馴致したグリーンサンフィッシュの視索前野の温繊維から導出したインパルスの頻度と脳温度との関係 (Nelson and Prosser, 1981より)

A：上の曲線は脳内（視床下部）の温度（°C），下の曲線は1秒間のインパルスの数，B：25°Cと30°Cにおけるインパルス頻度の比較，C：脳温度とインパルス頻度の関係，横軸は脳温度（°C），縦軸は1秒間のインパルスの数

の3mm上加温あるいは冷却用の細い針を置いて、視索前野の温度を上昇あるいは低下させたときの結果です。上のAのグラフは、上のカーブが脳の温度、下のカーブが1秒間当たりのインパルスの数で、脳温度が25°Cより上のときは脳温度の変化とほぼ平行にインパルス頻度が増加し、脳温度が25°C以下になるとインパルス頻度は平らなままになっています。下左のBはインパルスの記録例で、馴致されていた25°Cに比べ30°Cではインパルス頻度が顕著に高くなっています。下右のCのグラフは横軸に脳の温度、縦軸に1秒間当たりのインパルスの数を示しています。馴致されていた25°Cより温度が下がってもインパルス頻度は殆ど変わりませんが、25°Cより温度が上がるとインパルス頻度は顕著に高くなっています。このような記録の得られたとき、このニューロンは温度上昇に敏感な温繊維 warm sensitive neuronと判断されます。

第17図は、右側のBはインパルスの頻度が馴致されていた25°Cに比べ21°Cでは顕著に高くなることを示しており、左側のグラフAは、横軸に脳の温度、縦軸にインパルス頻度をとっており、馴致されていた25°Cより低温側では温度が低いほどインパルス頻度が顕著に高くなることを示しています。このような記録が得られたとき、このニューロンは温度低下に敏感な冷繊維 cold sensitive neuronと判断されます。

ネルソンとプロッサーが検査したグリーンサンフィッシュの276のニューロンのうち、81%は温度変化に反応しませんでした、17%は温度上昇



第17図 25°Cに馴致したグリーンサンフィッシュの視索前野の冷繊維から導出したインパルスの頻度と脳温度との関係 (Nelson and Prosser, 1981より)

A：脳温度とインパルス頻度の関係，横軸は脳温度（°C），縦軸は1秒間のインパルスの数，B：25°Cと21°Cにおけるインパルス頻度の比較

に敏感に反応して温繊維であることが判り、2%は温度低下に敏感に反応して冷繊維であることが判りました。

### 高温あるいは低温暴露時の行動と小脳の役割

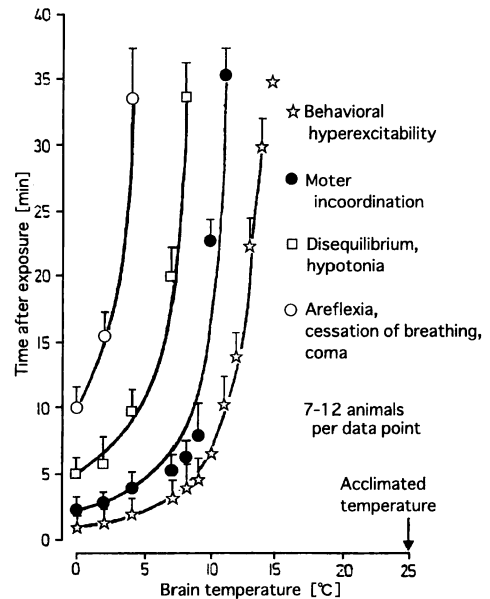
魚を致死的な高温あるいは低温に曝したときの行動的な反応と小脳の機能について、アメリカのフリードランダーらがキンギョを材料にして行った研究 (Friedlander *et al.*, 1976) をご紹介します。

体長15cmないし20cmのキンギョを、5、15、あるいは25°Cの恒温室内の水槽で4週間馴致してから、実験に供しました。実験は、低温あるいは高温の水に移して魚体全体を冷却あるいは加温する全身冷却あるいは全身加温と、魚は20°C前後の水中に保ったまま小脳だけを冷却あるいは加温する小脳冷却あるいは小脳加温の2通りの実験を行って、いずれも魚の行動あるいは反応を観察しました。どちらの場合も細い針金状の熱電対を小脳内に挿入して小脳の温度を測定しながら、小脳温度と行動あるいは反応との関係をしらべています。実験方法の詳細は省略して、その結果をご紹介します。

第18図は、25°Cに馴致した魚の水槽温度を急に下げた時の魚の反応あるいは行動です。横軸は小脳の温度、縦軸は特徴的な反応が現れるまでの経過時間を示しています。最初に現れる反応は、星印で示していますが、行動上の興奮性の異常亢進 behavioral hyperexcitability です。具体的には、まず鰭の動きが増し、次いで鰭と体をリズムカルに動かし続け、自発的な遊泳が増します。

その次に黒丸で示しています運動の協調失調 motor incoordination が起こります。具体的には、鰭に触れたときの反射が弱くなり、体をローリングつまり横揺れさせ遊泳が不規則になり、個体によっては体や尾をふるわせ、時折すばやい動き、ballistic movementと書いてありますから弾丸の弾道のように突進するようなすばやい遊泳運動かと思いますが、そんな行動を示す個体もあるようです。

その次の段階は白四角で示しています平衡失調 disequilibriumと、弛緩と言いますかぐったりする現象 hypotonia です。体の平衡を保つことができなくなって横倒しあるいは仰向けになり、さらには水槽の底に沈んでぐったりとなります。



第18図 25°Cに馴致したキンギョを低水温に移したときの一連の行動的反應 (Friedlander *et al.*, 1976より)

横軸は小脳に挿入した温度計による脳内温度 (°C)、縦軸は各段階の行動反應が現れるまでの経過時間 (分)

最後は白丸で示します状態で、図中の説明では3つの症状を挙げています。まず無反射 areflexia の状態になります。反射というのは刺激に対して、それを受容して情報が求心性の神経を伝わって感覚性の脊髄後根から脊髄にはいり、脳に行くことなしに運動性の脊髄前根から遠心性の神経を伝わって運動器官に行く、つまり意識の共同作用なしに特定の応答をすることです。これがなくなった、ここではガラス棒で体側を軽くつつくという刺激に対して、反応しなくなりました。次は呼吸停止 cessation of breathing、最後は昏睡 coma です。昏睡というのも刺激に対する反応が喪失した状態ですが、areflexiaよりさらに進んだ、死に近い最後の段階です。

第1表は、全身を冷却するのではなく、小脳だけを冷却したときの反応です。25°Cに馴致したキンギョを、21°Cに保ちながらthermodeで小脳だけを冷却しました。ここでthermodeと言っているのは、22ゲージの細いステンレススチール管を輪のようにしたもので、ポリエチレン細管を通してその中に冷却あるいは加温した水を送り、これで極く局部的に冷却あるいは加温することができるようにした道具です。表は、一番左に脳の温度、具

第1表 25℃に馴致し21℃に保ったキンギョの小脳を冷却したときの反応  
(Friedlander *et al.*,1976より)

Deep brain (2 mm) Temperature (°C)	Time (min)	Behavior
19	0	Normal reflexes Habituation after 7 strokes on flank
14	10	Habituation after 11 strokes on flank
10.5-12	11-20	Very hyperresponsive to flank prodding Habituation to stroking Some spontaneous quivers
8-9	21-28	Bumping into tank walls Spontaneous circling, righting still normal
6.5-7	29-35	Listing to side, righting weak, rolling
6.0-6.5	36-42	No righting, almost totally areflexic to flank prodding no Mauthner response Breathing still normal
9-10	43-45	Righting recovers, swimming in bursts Responsive to prodding
14-16	46-47	Good swimming Response to prodding appears normal Habituates to prodding after 5 strokes

体的には小脳の表面から2mmの深さの温度です。

次は、冷却を初めてからの時間です。一番右はそれぞれの時の魚の行動あるいは反応です。最初は脳内温度が19℃で、このときは反射は正常です。Habituationというのは「慣れ」で、この場合は体側を7回撫でたら、その刺激になれてしまって、反射反応を示さなくなったということです。極く軽い刺激に対しては、それが反復して与えられると、慣れてしまって反応しなくなるのがふつうで、要するにこの段階では全く正常でした。

次に脳内温度が14℃に下がりますと、体側を11回撫でたら慣れの現象が起きた、つまり19℃のときに比べると慣れの現象が起きにくくなりましたが、そのほかには特別なことはありませんでした。

脳内温度が10.5から12℃になりますと、体側をつついたときの反応が異常に亢進し、時折震えquiverが起きますが、撫でたときの慣れの現象はまだ見られます。

脳内温度が8から9℃になると、水槽の壁に向かって泳いで突き当たるようになり、時折円を描くように遊泳しますが、体を仰向けにさせたときの立ち直りはまだ正常です。

脳内温度が6.5から7℃になりますと、体を横に傾け、仰向けにさせたときの立ち直りが弱くなり、ローリングつまり体軸を中心に体を横に回転するようになりました。

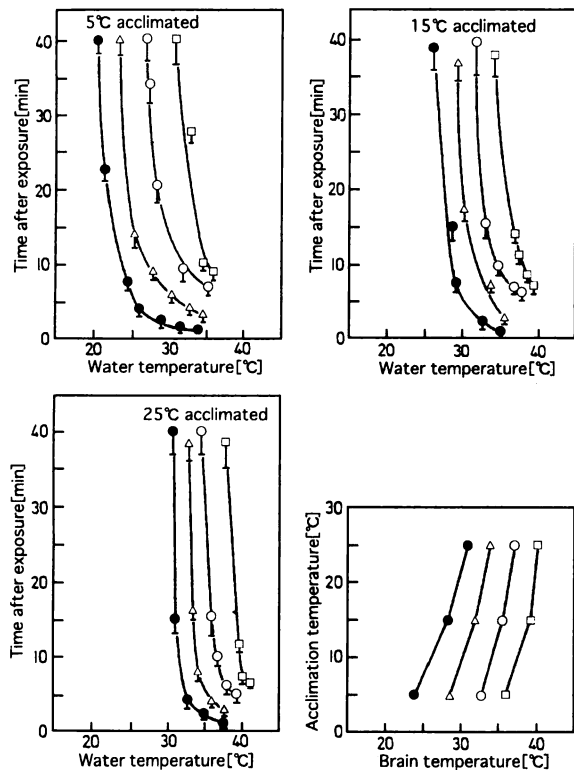
脳内温度が更に下がって6.0から6.5℃になりま

すと、仰向けにしたときに立ち直れなくなり、体側をつついても反射が殆ど全く見られなくなり、驚愕反応もなくなりました。Mauthner responseというのは説明がないのですが、硬骨魚の脳には発見者の名にちなんでMauthner cellsと名付けられた神経細胞があって、驚愕反応に関係すると言われていています。驚愕反応がなくなったというのは、本文中には「振動刺激に対して」とありますから、水槽を叩いたりして驚かしても反応しなくなった、ということかと思えます。この段階になっても、呼吸はまだ正常です。

この例では、冷却をここで止めて温度を少しづつ戻しています。Thermodeは、管の中に通す液体を冷水から温水に変えれば、そのまま加温する道具として使えますから、これを利用して温度を少しづつ上げたわけです。脳温度が9から10℃に上がると、仰向けにしても立ち直れるようになり、つつきに対しても反応するようになりました。全速遊泳も出来るようになりましたが、全速力で泳ぐというのは、まだ完全に普段通りにはなっていない、落ちつかない状態と言えるかと思えます。

今までは魚の全身あるいは脳を冷却した場合の反応でしたが、次に全身あるいは脳を加温した場合の反応について述べます。

第19図は、左上が5℃、右上が15℃、左下が25℃に馴致した魚の、水槽温度を急に上げた時の、魚の反応あるいは行動です。横軸は水温、縦軸は



第19図 5°C (左上), 15°C (右上), あるいは25°C (左下) に馴致したキンギョを高水温に移したときの一連の行動的反応 (Friedlander *et al.*, 1976より)  
右下の図を除き, 横軸は水温 (°C), 縦軸は各段階の行動的反応が現れるまでの経過時間 (分), 右下の図では, 横軸は脳内温度 (°C), 縦軸は馴致温度 (°C)

特徴的な反応が現れるまでの経過時間を示しています。先ず黒丸で示すように, 刺激に対する反応性が異常に亢進します。具体的には, ガラス棒で体側をつくと発作的な突進運動をします。

次いで, 白三角で示すように, 興奮性が異常に亢進し, 遊泳運動が増進します。さらに加温が続きますと, 白丸で示すように, 運動の協調が失われて, 水槽壁へ向かって泳いだりします。さらに甚だしくなると, 白四角で示すように, 立ち直り反応がなくなり, ついには昏睡状態に陥って, 呼吸が不規則になり, やがて呼吸が停止するに至ります。

第19図の右下は, これら4段階の反応異常あるいは行動異常が現れた時の脳内温度と馴致温度の関係を示したものです。5°Cに馴致された魚に比べ, 15°Cに馴致された魚では, 脳内温度がより高くなるまで, ある異常が現れない, つまり馴致の効果が見られます。しかしこの馴致の効果は, 15

°Cと25°Cの間ではあまり顕著ではありませんでした。

第2表は, 全身を加温するのではなく, 小脳だけを加温したときの反応です。20°Cに馴致したキンギョを, 19°Cに保ちながら, 小脳だけを加温しました。脳内温度が19°Cのときは, 反射が正常で, 体側を6回撫でたら「慣れ」の現象が見られました。脳内温度が23ないし24°Cになると, 3回の振動刺激で驚愕反応に「慣れ」の現象が現れました。この辺までは正常ですが, 24.5ないし26°Cになると, 11回撫でてでも鰭反射に「慣れ」の現象が見られなくなり, 驚愕反射も弱くなって, 僅かながら異常が認められ始めました。26.5ないし28°Cになると, 「慣れ」の現象は全く見られなくなり, 脊髓反射が僅かに亢進しました。29ないし30°Cになると, 反射が鋭敏になり, 自発的な遊泳が増進しました。32ないし33°Cでは, 反射が弱まり, 34ないし35°Cでは, 活動性が非常に亢進し, 接触に対して過敏になりますが, 立ち直り反応は正常でした。35°Cでは, 運動の協調性が失われ, 水槽壁に向かって突き当たるように泳ぐようになりました。36°Cになると, 立ち直りが弱くなり, 時折強直が見られるようになり, 震えが来て, 立ち直り能力も失われました。

以上を概観すると, 冷却においても加温においても, また全身の温度を変えたときも小脳温度だけを変えたときも, ほぼ同じ反応がほぼ同じ順序で現れています。

さらにデータは省略しますが, 小脳を除去すると, 冷却や加温を行わなくても, 異常に活発になったり, 立ち直りが困難になったり, 平衡が失われたり, 冷却や加温の場合と似た反応が見られました。また小脳を除去した魚では, 加温や冷却の程度が弱くても同じ症状を呈するということが見られました。例えば冷却に際して, 仰向けにしたときの立ち直り反応が失われる温度は, シヤム手術をただけの対照魚では2ないし3°Cなのに, 小脳を除去した魚では5°Cで同じ現象が現れました。また加温に際して, 35°Cで反射や自発的運動が増進するまでの時間は, シヤム手術をただけの魚では30ないし35分を要したのに, 小脳を除去した魚では15ないし22分で同じ状態になりました。

著者たちはさらに小脳からインパルスを導出して, 電気生理学的にも研究していますが, これについては省略します。

「運動神経が良いと言うことは小脳が良いとい

第2表 20°Cに馴致し19°Cに保ったキンギョの小脳を加温したときの反応  
(Friedlander *et al.*,1976より)

Deep brain (2 mm) Temperature (°C)	Time (min)	Behavior
19	0	Normal reflexes Habituation after 6 strokes on flank
23-24	10	Mauthner reflex habituates in 3 vibration stimuli
24.5-26	11-18	No habituation of fin reflexes in 11 strokes Mauthner reflex weak
26.5-28	19-31	Habituation gone Slight enhancement of spinal reflexes
29-30	32-37	Increased reflex sensitivity Increased spontaneous swimming
32-33	38-50	Reflexes decrease in strength
34-35	52-60	Very hyperactive, looping, hypersensitive to touch Righting normal
35	60-64	Uncoordinated, swims into side of tank
36	65-66	Righting capacity weak Occasional spasms of movement
36	67-68	Quivering movement Righting ability lost

うことだ」と極言する人もいるぐらい、小脳は筋肉運動を調節するセンターのような器官ですから、温度刺激に感じるのは体表や視索前野であっても、行動として現れる段階では小脳が重要な関与をしているのだと思います。

### 熱ショック蛋白質

生物が、死ぬほどではないいわゆるsublethalな高温に短い時間曝されたとき、その温度がある臨界温度を超えると、大部分の蛋白質の生合成はほとんど停止しますが、ある種の遺伝子群が関与する一群の蛋白質の合成だけは逆に著しく促進されます。このように高温に曝されたときに生ずる一群の蛋白質を熱ショック蛋白質heat-shock proteins (hsps) と呼び、その生合成に関与する遺伝子を熱ショック遺伝子 heat-shock genes と呼びます。これは最初ショウジョウバエで発見されたのですが、その後バクテリアから哺乳動物まで、原核生物（核膜がなく、従って核が見えない生物で、バクテリアと藍藻類がこれに当たります）にも、真核生物（核膜があり従って核が見える生物で、殆ど全ての動植物はこれに含まれます）にも、広く存在することが判ってきました。

熱ショック蛋白質は、最初高温暴露に際して見つけられたので、このように名付けられていますが、その後放射線、砒素のような毒物、LSD

(lysergic acidの略で、幻覚や意識障害を起こすアルカロイドの一種)のような薬物、ウイルス感染など、さまざまなストレスによっても生ずることが判ってきましたから、私はむしろストレスショック蛋白質と呼ぶ方が適切ではないかと思っていますが、そういう呼び方は聞いたことがありませんので、一般に言われているように熱ショック蛋白質と呼んでおきます。

熱ショック遺伝子は、大腸菌から哺乳動物まで、言い換えれば極めて古い時代から現代まで広く保存されてきたのですから、熱ショック蛋白質は、生物の細胞に極めて一般的かつ基礎的な機能を持つものと思われませんが、その機能や意味についてはほとんど判っていません。酵母で見つけられた分子量28,000の熱ショック蛋白質は酵素作用を持つようですが、それ以外の熱ショック蛋白質には、酵素作用は全く認められていません。

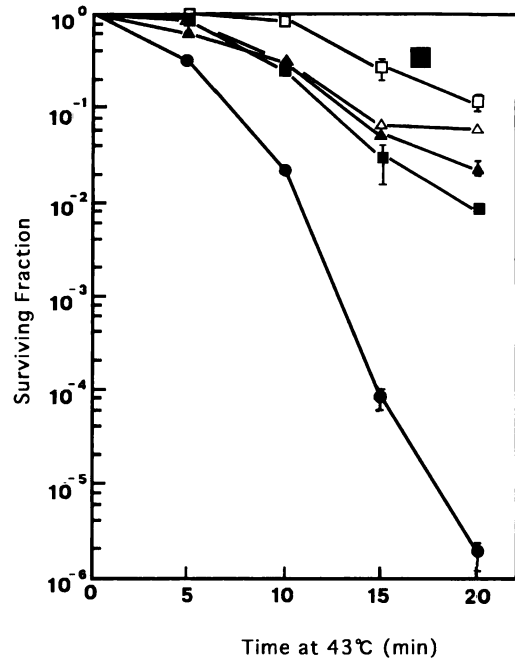
遺伝子DNAのヌクレオチドnucleotide配列を鋳型として、これを写し取ってメッセンジャーRNA (mRNA) が生合成され（これを転写transcription といいます）、そのメッセンジャーRNAの塩基配列を読み取って、その情報に対応するアミノ酸を選び出して（アミノ酸選択）ペプチド・チェーンpeptide chainを形成してゆきます（これを翻訳translation といいます）。高温その他のストレスに曝されると、転写されて生じたメッセンジャーRNAが急速に分解してしまい、翻訳

も行われなくなるのが普通なのですが、熱ショック遺伝子の場合、ある程度の加熱は速やかに転写と翻訳を促進し、熱ショック蛋白質が急速に生成されることが知られています。

熱ショック蛋白質がなければ死んでしまうような高温でも、熱ショック蛋白質が合成され集積しますと、細胞もその生物個体もその高温に耐えることができる、ということが知られていますから、熱ショック蛋白質は何らかの防衛機能を持ち、生物に耐熱性を付与するものではないかと思われまます。細胞がストレスに曝されますと、微小管や微小繊維や仁など特定の細胞小器官の周りに熱ショック蛋白質が集積することが知られていますので、何か構造的な防衛機能を持つのかも知れません。

ティラピア *Tilapia mossambica* と *Tilapia nilotica* のハイブリッド hybrid の卵巣から採取して 31°C で培養した TO-2cells と呼ばれる細胞を、いきなり 43°C に曝しますと、第20図の黒丸で示すように、細胞の生残率は20分以内に10万分の1以下に低下しほとんど死滅しますが、37°C に6時間予備暴露してから43°C に曝せば、黒四角で示すように、20分後の生残率は100分の1に向上し、48時間予備暴露した場合は、白四角で示すように、20分後の生残率は10分の1となり、生残率が1万倍も向上したと言える結果が得られています。

この研究をしたチェン・ユー・リ 3 氏は、分子量 27,000, 70,000, 87,000 の 3 種の蛋白質を主な熱ショック蛋白質として得ていますが、そのうち 27,000 の蛋白質は、34°C では生成せず、37, 40, あるいは 43°C では生成されることを示しています (Chen *et al.*, 1988)。これに対し、ニジマス の生殖腺組織から採取して 22°C で培養した RTG-2cells と呼ばれる細胞では、27ないし 28°C で熱ショック蛋白質が誘導生成されることが、コタリ・バージェス・カンディド 3 氏の研究によって知られていません (Kothary *et al.*, 1984)。このように、致死高温 upper lethal temperature が低くて比較的狭い温度範囲にしか耐えられない狭温性生物 stenothermal organisms は、致死高温が高くてかなり広い温度範囲に耐えられる広温性生物 eurythermal organisms に比べて、熱ショック蛋白質の合成される温度がずっと低いという現象が見られます。このことも、熱ショック蛋白質の意義を示唆するのも知れません。



第20図 31°C で培養した *Tilapia* の細胞を、37°C に 6 時間 (■)、13 時間 (△)、24 時間 (▲)、あるいは 48 時間 (□) 予備暴露してから、43°C に暴露した後の細胞の生残率。● は予備暴露を行わず 31°C に保った後 43°C に暴露した対照群 (Chen *et al.*, 1988 より)

## むすび

以上温度と魚の生理について、幾つかの事柄を申し上げましたが、文献の紹介ばかりで、申し訳ありませんでした。

私は今は一応、魚類生理学の専門家ということになっていますが、元々の出身といいますか卒論研究をしましてのは、生理学の講座ではなく、水産海洋学講座という環境関係の講座でした。指導教授の松江吉行先生から、「内湾における夏季の成層形成と底層の貧酸素化」というテーマを頂き、千葉県内湾水試の船を利用して、千葉市沖合いの地点で定期的に観測を致しました。そういうことから、環境の問題にはいつも関心を持って参りました。

名古屋大学に勤めるようになりまして、当時愛知県の養鰻業界では「水変わり」とそれによる「鼻上げ」が大きな問題でしたので、卒論でしたこととも関連がありますし、水中の酸素とウナギの鼻上げの関係を手がけました。そうしているうちに、外部環境である水の中の酸素だけでなく、

内部環境である血液の酸素も知りたくなって、だんだん生理的な問題にはいり込んで参りました。最初にお話ししました脊椎骨数の環境的変異にしましても、たまたま雨宮先生のお手伝いをして脊椎骨を随分数えましたので、そういうことに関心を持ったわけです。

まあそんなことで、四十年余りの私の研究を振り返ってみますと、初めから目標を定めて一つのテーマを追求して来たというわけではなく、その時どきに与えられた仕事をしながら、その中から新しいテーマを見つけるといった形でした。水産関係の分野では、そういう人が多いのではないかと思います。その時どきの自分の仕事を一生懸命やっていたら、その中から結構面白い問題が出てくるものだなあと思っております。とりとめもない話で恐縮でしたが、これで終わりにさせていただきます。ご清聴有難うございました。

#### 引用文献

- Azuma, T., Itazawa, Y. and Chikusi, Y. (in preparation). Effects of acute drop of temperature on respiration and blood circulation of porgy.
- Bardach, J. E. (1956). The sensitivity of the goldfish (*Carassius auratus* L.) to point heat stimulation. *The American Naturalist*, **90**, 309-317.
- Bull, H. O. (1936). Studies on conditioned responses in fishes.. Temperature perception in teleosts. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, **21**, 1-27.
- Chen, J. D., Yew, F. H. and Li, G. C. (1988). Thermal adaptation and heat shock response of *Tilapia* ovary cells. *J. Cell. Physiol.*, **134**, 189-199.
- Friedlander, M. J., Kotchabhakdi, N. and Prosser, C. L. (1976). Effects of cold and heat on behavior and cerebellar function in goldfish. *J. Comp. Physiol. A*, **112**, 19-45.
- 本間義治 (1987). 神経系. 魚類解剖学 (落合明編). 緑書房, 東京, pp.259-279.
- Hughes, G. M. and Itazawa, Y. (1972). The effect of temperature on the respiratory function of coelacanth blood. *Experientia*, **28**, 1247.
- Itazawa, Y. (1959). Influence of temperature on the number of vertebrae in fish. *Nature*, **183**, 1408-1409.
- Kothary R. K., Burgess, E. A. and Candido, E. P. M. (1984). The heat-shock phenomenon in cultured cells of rainbow trout hsp 70 mRNA synthesis and turnover. *Biochimica et Biophysica Acta*, **783**, 137-143.
- Murray, R. W. (1962). Temperature receptors. *Advanc. Comp. Physiol. Biochem.*, **1**, 117-175.
- Nelson, D. O. and Prosser, C. L. (1979). Effect of preoptic lesion on behavioral thermoregulation of green sunfish, *Lepomis cyanellus*, and of goldfish, *Carassius auratus*. *J. Comp. Physiol. A*, **129**, 193-197.
- Nelson, D.O. and Prosser, C.L. (1981). Temperature-sensitive neurons in the preoptic region of sunfish. *Am. J. Physiol.*, **241**, 259-263.
- 日本水産資源保護協会 (1980). 水産生物適水温図. 63p. (新田・板沢).
- Spaeth, M. (1967). Die Wirkung der Temperatur auf die Mechanoreceptoren des Knochenfisches *Leuciscus rutilus* L. Ein Beitrag zur Thermoreception. *Zeitschr. vergl. Physiol.* **56**, 431-462.
- 末長一男 (1967). 温度感覚. 生理学大系 感覚の生理学 (勝木保次編), 医学書院, 東京, pp. 562-572.
- 竹田達右・辻 俊宏・板沢靖男 (1989). 水温低下によるマダイ収容可能密度の上昇. 日水誌, **55**, 1011-1015.
- 山光俊一・板沢靖男 (1988). 急激な水温の低下がコイの心電図及び呼吸機能に及ぼす影響. 日水誌, **54**, 751-759.