次に、反応槽容積2.4ℓ，円板直径20cm，円板数6枚，回転速度15rpmの回転円板装置を用い，付着生物膜による第1鉄酸化を調べた。第1鉄酸化速度と流出水第1鉄濃度の関係は，図4に示すとおりであった。何れも直線関係を満足し，第1鉄酸化が1次反応であることがわかる。また，回転円板法（RBC法）によって，この種廃水中の第1鉄が第2鉄に酸化できること

がわかる。第2鉄にまで酸化できると，安価な炭酸カルシウムで中和・沈殿処理を効果的に行うことができることが判明した。

このようにして，河川の自浄作用で河床付着生物膜が重要な役割を果たすことが明らかになった。水処理における生物膜法の研究手法と研究成果を用いた，河床付着生物膜の特性の一層の解明が期待される。

特別講演

魚類の化学受容と水質汚染*

原 俊 昭

致死量下の水質汚染物質が摂餌，方位・回遊，あるいは生殖といった多様な動物の行動に影響を及ぼす。水生動物は視覚や聴覚に著しい制約を受けており，従って行動の発現に化学的感覚が主導的な役割を演じる場合が多い。化学受容器は直接外界に接し，また特別の保護装置や解毒機能を備えておらず，汚濁物質の格好の標的となり得る。本講演では，魚類の化学受容，及びそれを介して発現される行動に対する水質汚濁物質の影響について概説する。

1. 魚類の化学受容

化学的感覚は構造や機能の違いから通常3つに分類される：1)嗅覚，2)味覚，3)共通化学感覚。しかし，化学受容が常に水を媒体として起こる水生動物の場合，これらの区別が必ずしも明白ではない。例えば，動植物界に汎く分布しているアミノ酸は魚類の嗅・味覚の両者を刺激し，また胆汁酸の中にも嗅・味覚器に対し強力な刺激効果を有するものがあることが，特に

サケ科魚類で知られている。鼻孔の嗅粘膜(上皮)に分布する嗅受容細胞は表面(外界)に向かって細い突起を出し，同時に中枢に向かって長い軸索が伸びている(両極性ニューロン)。刺激物質分子が受容膜に衝突すると，膜のイオン透過性が変化し電氣的インパルスに転換されて脳に送られ嗅感覚が成立する。一方，口腔や体表に分布する味蕾が味覚器の基礎を構成しており，上皮性味細胞で受容された味感覚情報は味覚神経によって脳へ伝えられる。両感覚系に共通してみられる特徴は，外界に接している受容細胞の先端に絨毛が分布していることであり，この表面に刺激物質分子と結合する受容器が存在すると考えられる。

2. 化学受容に対する汚濁物質の作用

直接外界に接している化学受容器は，汚染物質の影響を受けやすく，その結果動物間のコミュニケーションに支障をきたす。汚染物質による化学受容の障害は主として次のような経過をたどる。

a) 逃避・選択行動。有害汚染物質からの逃避は，勿論，動物の生存にとって有利に作用するが，逆にそれらに対する誘引行動は却って危険の度を加えることになる。勿論，動物が汚染物質を検知できなかったり，あるいは閾値以下である場合には行動による反応も生じない。逃避・選択行動は通常，化学受容器，特に嗅覚や味覚を介して発現される。

b) 化学刺激物質の遮蔽・妨害。汚染物質が化学的信号と競合したり，あるいは化学刺激物質が目的の受容器に到達する前に互いに結合したりして，受容器の閾値を高めたり，化学刺激特性に変化をきたしたりする。

Toshiaki Hara

昭和35年 東京大学大学院卒業
38～ コロンビア大学及びワシントン大学研究員
41年 熊本大学医学部助手
44年
現在 カナダ水産海洋省淡水研究所主任研究員 理学博士
〔趣味〕 読書 ゴルフ

* Toxicology of Fishes Concerning with Water Pollution, 昭和60年5月21日受理

c) 受容細胞の損傷。汚染物質が直接受容細胞に不可逆的な損傷を与え、究極的に細胞の死を招く。

3. 行動学的研究

a) 逃避・選択反応。2通りの試験法がある。即ち、緩い濃度勾配を用いる場合と、Y-mazeや逆流水槽のように急濃度勾配を用いる場合である。以下は重金属に対する反応を逆流水槽を用いて調べたデータをまとめたものである(図1)。

i) 銅：銅に対しては顕著な反応を示す。一般に、低濃度域では逃避反応を示し、濃度の上昇と共に反応は増大するが、更に濃度を上げると反応は逆転し、選択反応へと変わる。シロマスで得られたデータによると、逃避反応の閾値は $0.05\mu\text{M}$ で、反応の逆転は $50\mu\text{M}$ の付近で起こる。銅に対する逃避反応はフミン酸の存在下で消失するが、これは銅とフミン酸との間の相互作用(遮蔽、競合)によるものである。致死量下の銅の存在下でサケの溯河行動が妨害される。銅に対する行動反応は嗅覚を通して起こる。

ii) 亜鉛：シロマス、ニジマス、大西洋サケは亜鉛に対し逃避反応を起こす。閾値は $0.1\mu\text{M}$ の付近にある。

iii) カドミウム：低濃度($10\mu\text{M}$)のカドミウムに対して弱い逃避反応を示すが、全体としては有意の反応がみられない。魚種間に差はあるが、一般に致死量以

上のカドミウムに対しても逃避反応を示すことはない。

iv) 水銀：シロマスは高濃度(0.1mM)でかろうじて有意の逃避反応を示す。この傾向は他の魚種でも同様で、ニジマスでは低濃度でむしろ選択反応を示す。

v) その他：表面滑性剤に対する反応は魚種による差異が大きい。滑性剤の種類や水質などが反応特性を決定する重要な要因である。塩素に対する行動反応も魚種による差異が著しい。例えば、ニジマスは $0.01\sim 1.0\text{mg/l}$ の濃度域では逃避反応、それ以外では選択反応を示す。また魚種によっては、全濃度域で逃避反応を、また他の魚種では選択反応を示す。水温・光・塩度などの環境要因が塩素に対する反応を大きく左右する。二酸化炭素に対しては逃避反応を示す。魚は鰓に分布する味蕾によって二酸化炭素を検知し、この反応は外界の水素イオン濃度とは無関係である。この他、パルプ排液、殺虫剤、フェノール、石油等広範な汚染物質も種々の魚種に対し行動反応を起こす。以上のように、逃避・選択テスト自体は動物が汚染物質を検知し、どのように反応するかを検査するものであり、逃避の程度と汚染物質の毒性との間には必ずしも直線的な関係はなく、事実、致死量以上の濃度に対しても逃避行動を起こさない汚染物質が少なくない。

b) 行動に及ぼす汚染物質の影響。定量化に困難な点があったり、個体差が大きい等の理由から、この分野の研究は極めて限られている。致死量下の表面滑

図1 硫化銅、硫化錫、塩化カドミウム、塩化水銀に対するシロマスの逃避・選択反応

性剤 LBS や LAS, 殺虫剤のパラチオンはナマズやキンギョの摂餌行動を阻害する。シロマスの餌物質に対する選択行動は、水銀処理によって(例えば, $0.18\mu\text{M}$ で 1~2 週間)消失する。この際、一般的な行動には変化がない。サケの母川水に対する選択反応が、火山灰を加えることによって著しく阻害される。

4. 組織学的研究

硫酸銅処理によって(例えば, $2.4\mu\text{M}$ で 2 週間), シロマスやニジマスの嗅・味細胞は選択的に消失する。カドミウムや水銀も同様の作用を有するが、銅に比べ弱い。表面滑性剤 ABS や LAS, 原油の水溶区分などにも同様の作用がみられる。これらの物質で処理した魚を正常に戻すと、嗅・味細胞は正常状態に回復する。

5. 電気生理学的研究

嗅・味覚系の機能は、標準刺激物質(例えば、アミノ酸)で刺激する際に種々の部位から記録される電気応答によって測定できる。致死量下の汚染物質で感覚器を短時間処理したり(急性の)、あるいは魚を汚染物質を含む水で長時間飼育することによって(慢性的)、それらの影響を調べることができる。重金属の中でも銀、水銀、銅はもっとも強力な抑制剤で、15分間処理の閾値は $0.03\sim 0.4\mu\text{M}$ の間にある (IC_{50} は $0.13\sim 2.2\mu\text{M}$)。カドミウム、錫、鉛、コバルト、ニッケルの順でこれに続くが、抑制作用は弱く、閾値は致死量以上である(図2)。また、ニジマス等を重金属を含む水で飼育すると、嗅房に素早く蓄積され、2週間後には $120\sim 160\text{mmol/g}$ に達する。嗅機能は全く阻害され、餌物質等に対する嗅上皮電位は記録されない。ABS, SLS, Triton-X100等の表面滑性剤と嗅・味覚応答を抑

図2 ニジマスの嗅器官の重金属処理(30分間)による嗅応答(標準刺激物質, $10\mu\text{M}$ L-セリン)の抑制効果を示す。横軸は重金属の濃度

制する。

6. 生化学的研究

化学受容の初期過程は、刺激物質分子と受容膜との結合であるが、放射性同位元素でラベルした刺激物質の導入によってこれを直接調べることができるようになった。嗅房から調製した膜分画のアミノ酸に対する結合は重金属によって抑制される。水銀、銀、銅でその作用はもっとも強く、 IC_{50} は $1.0\sim 9.5\mu\text{M}$ の付近である。カドミウム、錫、鉛、ニッケル、コバルトがこれにつぐ。長時間処理のデータとも併せ、これら重金属の結合抑制作用は電気生理学的データとよく一致する(図3)。

7. 結 語

一生を水圏で過ごす動物にとっては、化学的情報が行動発現に重要な役割を果たしている。動物は進化の過程で自然条件の変化に対処して生活を営むに必要な行動反応をする能力を獲得して来たが、これは人為的な環境変化に対しては、必ずしも有効であるとは限らない。これが結局は種の分布に変化をもたらし、生態系のバランスをくずすことになる。このような化学受容の重要性にもかかわらず、この系に対する水質汚染物質の作用様式・部位などに関する研究は十分とはいえない。また、行動学的・組織学的・電気生理学的・生化学的研究のいずれも単独では汚染物質の毒性用機構を理解するには十分ではなく、それぞれの方法によって得られたデータの総合によって初めて汚染物質と化学受容との相互作用の全容をとらえることができる。

図3 嗅房から調製した膜分画のアミノ酸 L-セリンに対する結合の銅(0.15mg/l)による抑制。丸, 対象; 四角, 1 週間処理; 三角, 2 週間処理