

水域、水質とその生物相

特集
5

金子光美

生命は地球の進化の過程で生じた産物であり、その歴史の中でいろいろな生物が生まれ時代とともに生物の種の栄枯盛衰があった。その間、環境と生物は互いに作用し合って長い年月の進化を通じて今日の生態系へと変化してきた。現存する生物の種類や量は長い時間における環境との相互作用の結果であり、生物とそれを取りまく環境の間には複雑な相互関係が成り立っているが、その複雑さの中に環境のある条件と生物の種類、量との間に一定の関係が見出されるようになる。生物の生活の場としての水をみると、もともと生命は水を母として生じたものであり、環境条件としての水とそこに棲む生物とは相互に作用し合った生態系を構成し、水環境に対応した生物相がみられるようになる。

生物相を指標としてそれと対応関係にある水質を判定しようとする試みはすでに今世紀初め Kolkwitz, Marsson の研究以来行なわれている。水中には細菌、真菌類、藍藻、珪藻、緑藻、水草、原生動物、海綿動物、貝類、昆虫類、魚類などいろいろな生物が生活している。そしてその水質に応じた生物が棲みついてある生物相が形成される。そこであらかじめ種々の水質の水域で水質と生物相との関係を明らかにしておくと、適時に水中の生物を調べることによってその水質を推定できるようになる。これは生物学的水質判定と言われるもので、この原理はそのまま水質汚濁の程度を生物によって判定するのに利用できる。汚染の程度に応じて水質を生物に関連づけて分類したものを生物学的水質階級とよび、強腐水性<polysaprobic>、 α -中腐水性< α -mesosaprobic>、 β -中腐水性< β -mesosaprobic>、貧腐水性<oligosaprobic>の4階級にわけるのが原型となっている。各階級の特徴をごく簡単にまとめると表のように

表1——生物学的水質階級の特徴

	強腐水性水域	α -中腐水性水域	β -中腐水性水域	貧腐水性水域
化学的過程	還元および分解による腐敗現象がいちじるしく起る	水中および底泥に酸化過程があらわれる	酸化過程がさらに進行する	酸化ないし無機化の完成した段階
溶存酸素	1 ppm前後	6 ~ 1 ppm	6 ~ 9 ppm	8 ~ 9 ppm以上
BOD	常にすこぶる高い	高い	かなり低くなる	低い
H ₂ Sの形成	たいていめられる；強い硫化水素臭がある	強い硫化水素臭はなくなる	ない	ない
水中の有機物	炭酸および高分子窒素化合物ことに蛋白質、ポリペプチド、およびその高次分解産物が豊富に存在	高分子化合物の分解によるアミノ酸が豊富に存在	脂肪酸のアモンニア化合物が多い	有機物は分解されてしまっている
底泥	黒色の硫化鉄がしばしば存在；底泥は黒色	硫化鉄が酸化されて水酸化鉄になるために底泥はもはや黒色を呈しない		底泥がほとんど酸化されている
水中のバクテリア	大量存在；ときには1 ccにつき100万以上もある	バクテリアの数はまだ多い；通常1 ccあたり10万以下	バクテリア数減少1 ccあたり10万以下	少ない；1 ccあたり100以下
大腸菌群	<20,000	<1,000	<100	<10
生息生物の生態学的特徴	動物はほとんど例外なくバクテリア摂食者；pHの変化に強く、少量の酸素でも耐ええる嫌気性の生物；すべて腐敗毒、とくにH ₂ SおよびNH ₃ に対し強い抵抗性をもつ	動物ではバクテリア摂食者がまだ優占的であるがそのほかに肉食動物もふえてくる；すべてpHおよび酸素の変化に対し高い適応性を示す；NH ₃ に対してはたいていのものが抵抗性をもつが、H ₂ Sに対しあはかなり弱いものがある	pHの変動および酸素の変動にすこぶる弱い；また腐敗毒に長時間耐えることができない	腐敗性汚濁に対し弱く、pHの変動、溶存酸素の変化に弱い；腐敗産物殊にH ₂ Sに耐えることができない

なる。

その後この体系はLiebmannが指標種の生理生態まで加えて強固なものになり他の多くの人々によっても知識が積重ねられているが基本的には4階級分類の内容と変わるものではない。これらはおもに河川の水質分類に対応した生物指標の例であるが、このほか利用目的にしたがって限られた生態系の生物相の変化に応じて生物指標を用いる例がある。たとえば生物学的水処理において指標生物によって処理の状況を判断したり、上水道における生物監視による状況判断などがある。前者の例として、現在もっとも広く生物学的水処理として採用されている活性汚泥法における生物試験がある。活性汚泥法は微生物によって汚水を浄化する方法であり、処理装置そのものは小さいけれども一つの生態系とみることができる。処理操作条件や流入水の水質が活性汚泥を構成している微生物

に対する環境条件であり、処理操作が悪くて処理がうまく行かないときはそれに応じた生物が優占してくる。また処理が良いときにはそれに応じた生物が現われるので、逆に顕微鏡によって生物相を調べることによって処理状況の適否の判断がたくわけである。

2——水環境の質と生物指標

このように水環境と生物を一体に把えて生態系の水圏代謝から生物を指標として環境評価をすることは生態系そのものを研究することに通ずるもので、今後ますます重要な課題となってくる。この場合、指標の対象となる環境の質が問題となる。応用科学的目的で生物指標を用いる場合は目的となる環境がはっきりして生態系の評価が簡単

となる。たとえばさきに述べた活性汚泥法の場合は処理がうまく行くような、処理水質が良好になるような環境を良い環境として設定すればよい。処理が悪い場合でも質の評価は比較的具体性をもって表示できる。

現在社会的問題となっている環境問題を考える時水圏においては水質汚濁が環境の質としてどのように把握したらよいか問題となる。この水環境の質の取扱いが明確になってはじめて生物指標の概念が生きてくる。このような公共水域の環境変化という観点から環境の評価をすることは活性汚泥法のときと異なって感覚的にわかっているにもかかわらず、現在までは納得するような提案がなされていない。

自然水域における水質汚濁の1つのパターンとしていまきれいな川のある地点に大量の汚水が流れ込んだ場合をみる。この汚水が毒性の高いものならば川の生物の生息は不可能となり生物の種類数と個体数の減少となって表われる。汚水が下水のような有機性のものであれば細菌類がその中の豊富な有機物を利用しすみやかに増殖し、それにしただがって溶存酸素が減少する。水が流下するにつれて繊毛虫が細菌を食って増殖してくるとともに細菌はだんだん減少する。水中の有機物が細菌によって利用、分解されるにしたがって有機物量はしだいに少なくなってくるとともに藻類が増加してくるので溶存酸素が再曝気と光合成によってだんだんと増えてくる。さらに流下すると繊毛虫類は輪虫類や甲殻類に食われてこれらが優占してくる。このころは水の濁度が減り、有機物が分解した結果生じる無機塩類が藻類の多量発生に好都合になってくる。

比較的高等な肉眼的動物はきれいな水のところでは多種多様にみられるが各生物種の個体数は少ない。ハヤ、モロコ、イワナ、ヤマメなどの魚類、トビケラ、カゲロウ、カワゲラ、ヘビトンボなど

の幼虫、巻貝など出現する。汚濁の強い水域ではオナガウジ、イトミミズ、ユスリカ幼虫などその種類は少ないが個体数は非常に多くなる。

川が流れるにしたがって水質が再びきれいになってくると汚濁に強い種類は姿を消し清水性のものが再び出現する。このような汚濁による生物相の変動パターンは流況によって多種多様な様相を呈するが汚濁強度と生物相との間には一定の関係があり、これは湖沼のような止水域においても基本的には同じである。

生物の種類や数が汚濁によってどのように変化するかをまとめてみるとつぎのようになる。

1 > 種類の変化

一般に汚濁の程度が高くなるほど種類数は減る。汚濁に強い種類が残り、弱いものは消える。

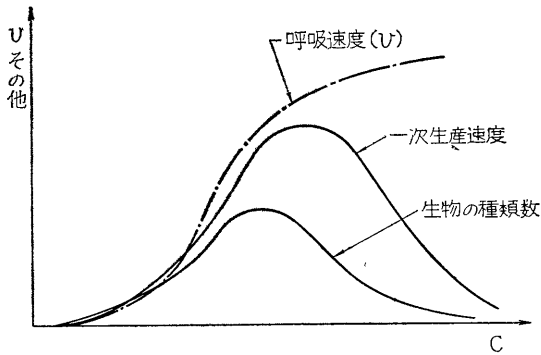
2 > 個体数の変化

有機物汚濁の場合は競争者が居なくなるため汚濁に強いものが大繁殖することが多い。すなわち汚濁とともに出現する種類数は少なくなり、そこに残る種類の個体数は多くなる。しかし種類数、個体数ともに適度に汚濁成分を含有しているときに数が最高になる点がある。〈図参照〉

3 > 生態系

生物の種類、数が変化すれば当然生物相が変化することになるが、生産者、消費者の割合が変わり、その物質循環やエネルギー循環の様相が変化する。生態系が変化するとその水域全体の代謝活動が変化するようになる。今迄に述べたように水質変動と生物相の変化との間には密接な関係がありそれぞれの立場からこの関係を生態学的に追求して、汚水生物学体系というものを成している。さきに述べた汚濁の程度の階級を設定し、その階級に属する指標種をたくさん調べあげて、この指標種によって水質判定をするのは汚水生物学体系の伝統的な行き方である。生態系の物質代謝から汚濁階級の設定を行なうことも試みられている。

図 水質変化と指標との関係



3 水質変化と指標の関係

ここで汚水生物体系を概観している余裕がないので他の文献を参考にさせていただくことにして、ここではいままでの汚水生物体系の批判的立場から一つの考察を試みたい。

これまでの汚水生物体系に関する研究は生態系における環境因子と生物の関係を調べることに貢献して、またこれなくして水環境の生物指標論は成り立たない。それで汚濁の階級と指標生物を体系づけてゆくことに発展している。しかしこれまでの行き方において問題となるのは汚濁の階級の設定そのものと汚濁因子の捉え方である。すなわち貧腐水性、強腐水性といっても単にきれい、きたないということにすぎない。きれい、きたないとは何か、それをどう表現するか、なぜきたなくなるのかということが定性的にも定量的にも表現されていない。それゆえ今迄の行き方からは水域の清濁は判っても、それがきれいかどうかと表現する程度で他の水質試験項目たとえばBODのようなもので代用できるし定量化できる。水域の価値評価、水質保全計画、国土の水資源の評価に有効な手段となり得ない。水に物質が混入するから汚濁であると簡単に割切るなら蒸発残留物などで汚濁度を測定すればよいがこれでは生態

系に及ぼす影響が加味されない。それではどのようなものがどのように生物相に影響を与え、その影響の大きさをどう表現するかをまず考えなくてはならない。

ここでまず清水に生物相に変化を与えるような汚濁物質が加わったとする。汚濁の程度にしたがって変化する項目のうち2~3を選んで図示すると左図のようになる。この図は傾向だけを示してあり、また曲線の形や曲線相互間の関係は各水域によって異なる。富栄養化は生物生産が上ってくることであり、これは生物生産を起こすような物質が混入したからでありくいま自然的遷移は問題としない>富栄養化が好ましくないならこの物質は汚濁物質となる。汚濁物質が増加するにしたがって水域の生物相は複雑となって種類数は増加する。 β -中腐水性といわれる点を境にして生物種は減ってくる。一次生産はそれより後にピークがある。潜在エネルギーの利用にかかわる呼吸速度は汚濁度とともに増加する。この図における横軸にとるべきものが水がきれいかきたないかを表わすもので今迄貧腐水性などと呼んでいるものに相当し、縦軸は生態系のある質の変化量を表わし、各曲線は水質変化の指標となるべきものである。そこでいま指標として図中の呼吸速度のような変化をするものを選ぶと次式が成り立つと仮定する。

$$v = \frac{V [C]^n}{K + [C]^n}$$

ここに v は呼吸速度のようなもの、 V は最大呼吸速度あるいは最大量、 C は図の横軸に相当する水質指標、 n と K は定数である。この式は経験的なものであり、式の性質についての考察は紙面の都合上はぶく。この式の C に何にを選ぶかは水質項目と生態系の変化の関係から求めるべきであるが現在のところ求められていない。いまわれわれのところ湖沼調査を広く行なっているがこれから適当なものを求める手掛りが得られればと願って

いる。K, n の値は各水域の特性を示すものでn 値が大きい水域ほど汚濁物質に対する反応がおそい所であり、K 値は最大値V の $\frac{1}{2}$ に対応するところのC に相当する。ゆえに汚濁物質の濃度をC / K で表わすとその水域がそれ自身もつ汚濁容量に対してどれくらい汚れているかが判断できる。ところでこのK, n をどのようにして求めるかが問題となる。この値は水域自身の特性を表わすものであるから各水域から求めなくてはならない。しかし実際の水域を段階的に汚濁物質を投入して実験してみることは不可能であることは論を待たない。そのためにまず考えられることは、とりあえず個々の水域の個有な正確な値を求めることをあきらめて水域を性質の似たものに部類分けして現在汚濁度の異なった水の ν を求めてみることである。たとえば海水と淡水、河川と湖沼、大きい湖と小さい湖あるいは沼、急流な川、緩流な川、深い湖と浅い湖などのように部類分けして、その部類に属する水域に対するK, n を求めてみることである。もう一つの方法は各水域から水を採取してこれにC の内容を含む物質を濃度を変えて投入し ν の変化を求めてみることである。この場合は各水域の地形的特性や流動特性は無視されてしまうが概略の値を得ることができるのではないかと考えられる。

つぎに ν について考える。いまこの ν は汚濁することによって変化する水域の呼吸速度として考えた。これは話を判り易くするために選んだ指標であって、実際はこれが測定可能かどうか問題となる。清水から下水のような汚水まで広く対象とするなら呼吸速度で可能と思われるが現在の環境汚染としての水質汚濁を真剣に考えるなら下水に近い汚水は論外としなくてはならない。自然水域においては諏訪湖のようにしては駄目で、霞ヶ浦でも人間環境として富栄養化し過ぎている。BODにして前者で10ppm、後者で5ppm以下の水

質である。ということは5日間で5ppmの酵素消費であり、このような水質のところを取扱うことができなければ水域保全の有効な手段となり得ない。

ゆえにそのまま呼吸を測定しても1日に2ppm以下のようなことでは数値的取扱いが測定技術のうえから不可能である。そこで ν は拡大できるような指標を選ばなければならない。その一つとして考えられるのは水域から水を採取してそれに呼吸率を拡大できるような物質を投入して呼吸速度を測定することである。この場合に投入物質による微生物生理上の効果のため正しく拡大できないと無意味なものになってしまうが適切に選ばれたものによって推定値が得られる可能性がある。もう一つの方法は呼吸速度でなくて、汚濁物質濃度との関係がさきの図の呼吸速度の曲線と同じ型の変化を示す物質を探すことである。これにも種々考えられるが筆者はその一つとして加水分解酵素活性を取上げて研究している。これは汚濁物質の増加に伴う微生物代謝活性の増加によって加水分解酵素活性も増加するという考えに基づいている。この生物がいるからこの水域はきれいであるとか生物生産が盛んでないと言うことは観念的に判りきったことを言葉を変えて表現するだけであって水質項目の価値評価、水質汚濁防止への具体的方法を求めることはできなくて、せつかくの指標も役立たない。それを乗り越えるためのアプローチとして水域、水質、生物的现象の指標化の試みの一つの考えを述べた。具体的な数字を掲げて例示すべきであるがデータの蓄積の段階であり、考え方の記述に終始したことを御了承願いたい。

生態系の指標化においては水域をもその中に含む広い生態系での富栄養化のもつ意義もその中に含むべきであるがそのためには一刻も早く内科診断的な思考の立脚点から脱皮しなくてはならない。

<国立公衆衛生院衛生工学部>