

生物環境の観点から見た水圏環境問題

河 邊 克 己

1. 水圏の構造とその生態学的意義

海洋についてみる。陸水の世界がおびただしい数の孤立した水塊から成るのに対して、海洋は一連のしかも全地球の 71% を占める巨大な単一水塊を作っている。この水塊は巨視的によく混交されており、塩分濃度の差はあっても、溶存塩類の組成はほとんど変わらない。その一様性は陸水の比でなく、空気に次ぐものとされている。かつ 30%以上の塩分は、海水の高い緩衝能を支え、生物の生存に対して、安定した好適環境をつくっている。この故に海は生物の母となり、長く種の保存がなされている。たしかに海はこのような本質をもっているが、これを生物環境としてみた場合、多くの変動要素を含んでいる。とくに人間社会とオーバーラップする沿岸域において、環境性状が複雑となり、それが生物の生活に密接に関係している。

1) 海洋の生態区分

海域は水界あるいは漂界 pelagic division とこれらを支える海底 benthic division より成る。その垂直区分は図 1 のように表わされる。各区分のうち、500 m～1,500 m の漸深底帯を含めた深海域が

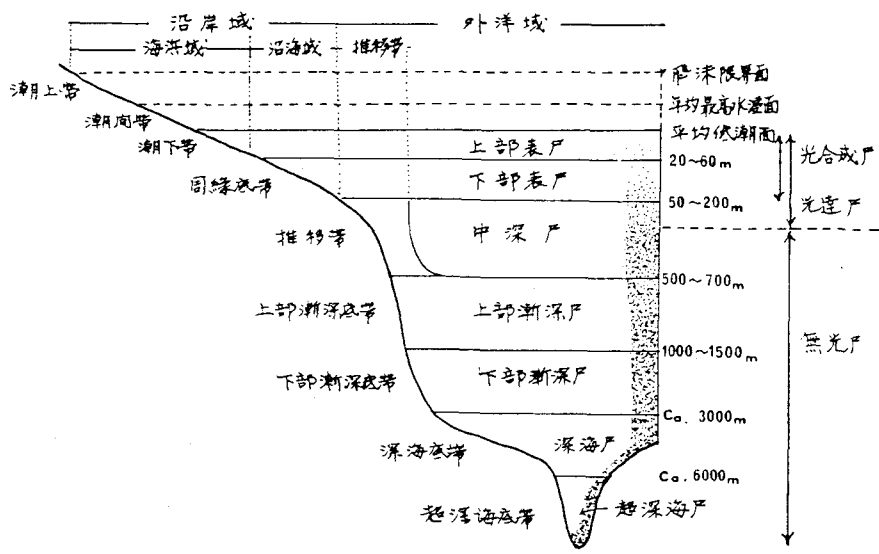


図-1 海洋環境の生態区分

(海の生態学一時図ら、を一部改変)

89%を占める。しかし生物生産からみれば、200 m 以浅の大陸棚——沿岸域が重要性をもつ。これは水中生物が深い海を自由に動き廻っているのではなく、多分に海底と密接な関係をもって生活していることの意味を含んでいる。この生態区分の分け方は、海の深さが基になっており、深さによって多くの環境要素に変化がある。光もその中の重要要素のひとつである。

2) 光の生態的な意味

海面から 400 m ぐらいまでが光達層 photic zone と言われ、このうち 0 ~ 200 m 層が一次生産がおこなわれる光合成層 euphotic zone とされている。つまり葉緑素をもつ生物が生産活動できるのはこの水深帯だけであり、浮遊物の密度が高くなれば、この深度はさらに制限される。深海はいわゆる無光層 aphotic zone で、水温変化も小さい。1000 m 付近を境界として深層性魚類の特徴が顕著となる。すなわち鰭が収縮し、眼が退化し、昼夜の垂直移動をしない。遊泳力が小さく、捕食能力も低下し、発光器の発達も悪い。水中、海底を通じてバクテリアさえ非常に少なくなり、全体に生物活動が極めて小さい。

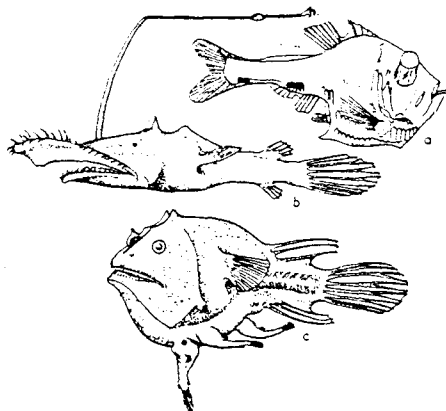
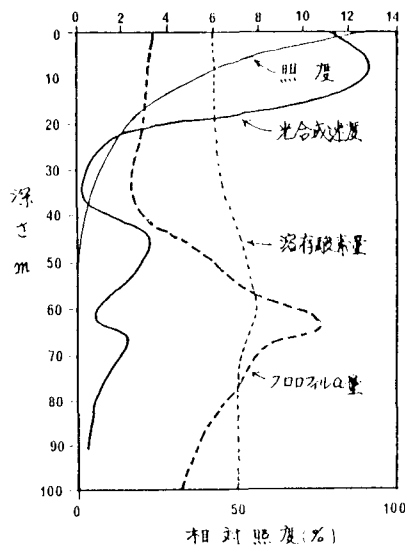


図-2 深海魚の数例

(体長は a. 3.5cm, b. 7.5cm, c. 7cm)
(H. U. Sverdrup, 1961)

図3のクロロフィル a 量の極大値は 60~70 m 層にあるが、光合成速度はごく表層付近で著しく大きい。このように水温躍層上部に、よくクロロフィル a 量の極大値がみられるが、この層の葉緑素はすでに光合成能を失っている(藤岡, 1965)。プランクトン自身の活力が問題となる。

光は海の一次生産を規制する上で重要な役割をもつが、水中生物の色、構造的順応、生物発光、深浅移動などと密接な関係をもつ。例えば、タイは赤いと言われるが、深い海では黒く見える。これは水が短波長光を吸収しやすいからで、実際の海の中では周囲の薄暗さとむしろ同調した体色を保つものと言える。養殖タイは赤味を失うが、これは強い光に応じて作られたメラニン色素が、赤い色素を被うからである。水中生物の体色には、常時の生活環境に応じた色素の蓄積による所謂地色と、瞬時の光の強さの変化、餌や害敵にあった時の刺激による体色や模様の変化とがある。この短い時間の変化は、数秒以内の反応で、魚の皮膚のある種の不定形細胞の中の色素の分散や濃縮によって、ひき



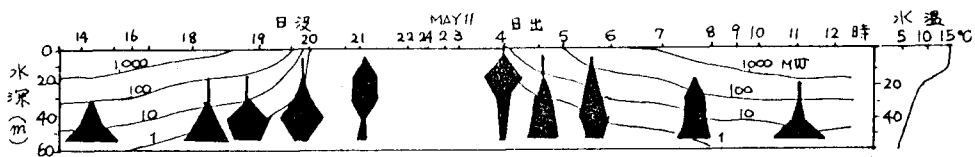
図－３ 光合成速度などの垂直分布
(1968年7月オレゴン州沖, Anderson, 1969)

おこされる。この際の刺激と色調などの変化は、Weber-Fechner の法則と一致することが知られている。

$$E = k \log_e W$$

E : 感覚の強さ, W : 刺激の強さ (変化の大きさ)

植物性プランクトンを含む大部分のプランクトンが、深淺移動をする。図4に一例を示す。この動物プランクトン、昼間強い光を避けて沈降し、夜は海面近くに浮上する。また渦鞭毛藻の一種 *Heterosigma* sp. は赤潮形成種であるが、昼間表層でバッチを形成し、夜は沈降する。これも光反応と思われるが、この深淺移動が栄養摂取と赤潮の持続に寄与していると推定される。



図－４ プランクトンの昼夜垂直移動
(コペポータ *Metridia lucens*; Clarke による)

3) 沿岸域の特性

この海域はつぎの特徴をもつ。①全層が生産層である。②生物の種類が多い。③生物量が多い。④上下の循環が盛んで栄養塩等の物質輸送が盛んである。⑤水深や塩分の変動が大きい。⑥陸水の影響がある。またこの海域は無機有機の資源に対する開発が容易で、生態的变化が起りやすい水域である。一方生物資源や養殖などの技術導入が可能な水域という意味でも重要性をもつ。

表 1 には海底の生物量の尺度として、底棲動物の分布データの一例を示す。浅くなるにつれて、種類と個体数のいずれも増加している。

表 2 は漁獲量からみた生産比較である。大陸棚の生産性は高く、とくに貝類の養殖によって、著しく大きな生産力のひき出しが可能なことを示している。近年の瀬戸内海の魚類生産量は 100～370 kg/ha で、牧場の家畜生産を上廻っている。

藤岡（1969）は瀬戸内海で求めた $Y = a' \log S - b'$ （ Y は生物生産量、 S は水中懸濁物質質量）と、Rawson（1952）がカナダの湖水で求めた $Y = aD^{-b}$ （ D は平均深度）とから、 $\log S = \alpha + \beta D^{-\gamma}$ の式を提示している。

表 1 Challenger 号探検時の観察に基づく底棲動物の垂直分布 (Murray による)

深 度 帯	採集地点数	各地点における平均出現種数	各地点における平均動物個体数
180 m	70	62.8	
180～900	40	51.2	150
900～1800	23	30.9	87
1800～2700	25	24.0	80
2700～3600	32	15.6	39
3600～4500	32	10.6	25.6
4500	25	9.4	24

表 2 陸地および高生産域における年間収獲量の推算 (Ryther & Matthiessen, 1969)

牧場（家畜の生産で）	6～308 kg/ヘクタール
大陸棚水域（底魚の漁獲量で）	25～75 kg/ヘクタール
フンボルト海流域	
（近年カタクチイワシを対象として、世界で最大の漁獲量を記録している）	375 kg/ヘクタール
日本沿岸カキ養殖場（むきみで）	57,500 kg/ヘクタール
Vigo（スペイン西北部、イガいのむき身で）	300,000 kg/ヘクタール

4) 潮間帯から潮下帯の特性

いわゆる海浜域の性状は大変多様である。その中でも岩礁域は、とくに複雑な微細地形 microtopography を形成している。それは気候、潮汐などと相まって、磯浜の生物群集にとって千差万別のすみ場環境をつくり出している。例えば、少しの凹みはアワビや巻貝の格好の隠れ場となり、干出時も日光を避け、乾燥を防いでいる。この好陰性 sciaphilous かつ好湿性 hygrophilous の生物群集と、岩礁上面で生活する好光性 photophilous の生物群集とは、組成や生態面で全く異なっている。

また、それぞれの微細地形には、その環境を好む動植物が寄り集って生活共同体 biocoensis を形

づくり，岩礁そのものだけでなく，他の生物体の上に共生して生活を営むものがある。

一方，動物は縄張りをもって生活圏を主張する。アワビやウニを獲りあげると，いつの間にかそのあとに新しいアワビやウニがでてくる。これを「浸み出し」と呼ぶが，先住者の好適環境に，それまで悪い場所に追いやられていた弱者が移り棲み現象とみられる。

潮間帯から潮下帯にかけての生物種は大変多彩である。これらの生物は前述の生活共同体をつくる一方で，喰う喰われるの関係をもっている。とくに潮下帯は潮上帯や潮間帯より捕食圧の強い構造をもっている。

5) 海域環境と食物ピラミッド

上野（1973）は海域の性状による生産者並びに一次二次消費者の比率の相違を，図7のように表わした。数科書的な沿岸タイプが深海型に移行する過程では，水深に対する光合成層の割合の低下が作用し，内湾型への移行には，富栄養化の進行が主因となっている。

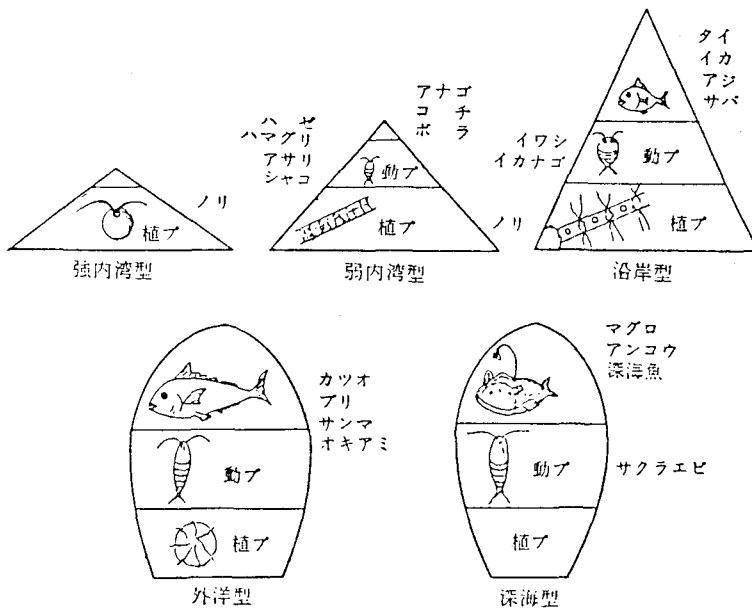


図-7 内湾から深海に至る食物ピラミッド形の変化
(上野, 1973)

6) 環境と生物との関係について

環境と生物との対応は，非常に多くの要素を仲介としてなされている。それは個々の生物とそのすぐ周辺の特定環境との関係だけでなく，生物相互の関係，生物活動が生み出す二次的環境要素が相互に影響し合っておくる環境変動など，大変複雑である。また環境の現状だけでなく，その変動巾とスピードが生物への意味を変える。同一種でも生活史的な位置で，影響のうけ方が違う。このようにあげてゆけば，問題は限りなく広がり，生物と環境との関係について定量的な解を得ることは，まことに容易でない。

生物とそれを取りまく環境との関係を取り扱う科学として生態学があるが、これは自然の構造と機能の学問でもある。この地球上の諸現象の中で、人間とはほとんどかわりなく動いている自然もあるが、少なくとも人間活動の範囲においては、自然と人間とは深い関係にある。とくに人間だけがもつ科学的手法の開発は、人間社会そのものだけでなく、その周辺の自然に大きな変化をもたらし、それが再び人間の生活にはね返ってくる。つまり人間は自然生態系の一員なのである。

2. 生物学的環境指標

環境の変化によって生物がどのように変動するかについての学問は、淡水域において污水生物体系論などの名の下で発達してきた。津田は人為的な水質汚濁に関して、環境の対生物作用として、①種類が変る、②個体数が変る、③生態系の構造が変るという3点をあげている。そして、これらの相互関係を明らかにしてゆけば、逆に生物の実体から環境の汚濁程度を表示できるわけで、これを生物学的水質判定といっている。

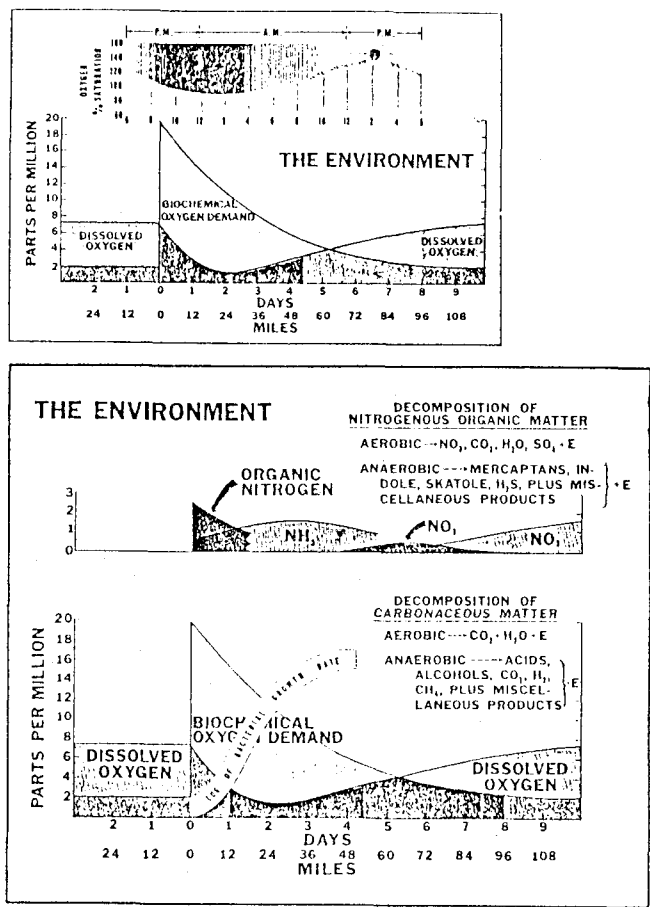


図-8 下水流入による環境の変化
(Alfred F.Bartsch et al, 1959)

1) Alfred F. Bartsch and W. M. Ingram の模式

図8は100 ft³/secの川に4万人分の下水水が流入、水温25℃の時、下流域でBODとDOがどのように変化するかを示したBartschとIngramの模式である。BODは下水流入地点から下流に向って、対数曲線を描いて降下するが、DOは流入2、3日後の分解旺盛区を底として次第に回復する。このDOカーブをたるみ曲線 sag curveと言う。この回復には空中からの溶入と、光合成時の藻類からの放出酸素が寄与している。

この時のN化合物様態の変化とバクテリアの増殖が下段によって示される。N化合物は酸化が進むにつれて、水中藻類の栄養源として利用され、DO補給量が増える。バクテリアはBODの低下に伴って減衰する。食物連鎖によってバクテリアは繊毛虫に、繊毛虫は輪虫や甲殻類へと優占する微生物の種類が移ってゆく(図9の上)。

比較的高等な肉眼的動物について、出現種と種数と個体数の変化が下段に示されている。清水域では多種多様な生物が現われるが個体数は少ない。汚濁域では清水域とは別の汚濁に強い種類が出現し、それらは比較的型が小さく、種類数は少ないが、個体数は非常に多い。

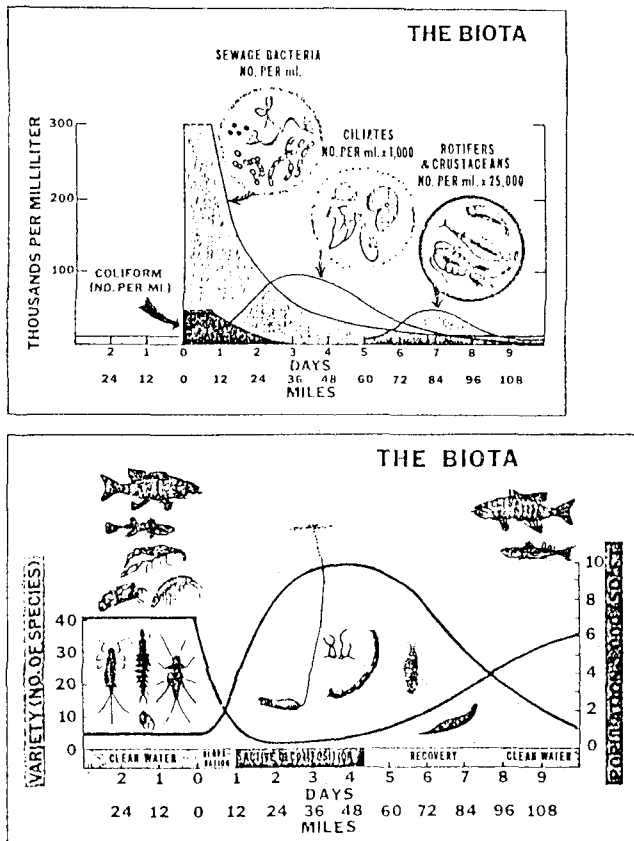


図-9 下水流入による生物相変化
(Alfred F. Bartsch et al, 1959)

以上から、環境の汚濁の程度に応じて棲む生物の種類がある程度決まり、きれいな環境下では種類が多彩であるが個体数はそれほど多くなく、汚濁程度の上昇と共に生物種数は少なくなるが、個体数は非常に増えてくることが判る。

2) 生物学的な水質階級

Kolkwitz u. Marsson (1903, '08, '09) は汚濁の階級を 4 段階 (polysaprobe zone 強腐水性域, α mesosaprobe zone α 中腐水性域, β mesosaprobe zone β 中腐水性域, oligosaprobe zone 貧腐水性域) に分け、それぞれにその環境を代表する指標種を配した。以下各階級に ps, α m, β m, os の略号をあてる。Liebmann はこれを少し細分して 7 階級に区分したが、基本線は変わらない。

Thomas (1944), Šramek-Hušek (1950) らは、従来の階級をさらに分割し、極腐水性 Hypersaprobilität, 超腐水性 Ultrasaprobilität といった濃厚有機排水そのものに階級づけし、さらに毒腐水性 Antisaprobilität, 放射腐水性 Radiosaprobilität といった特殊な汚濁要因までつけ加えた。いままチェコを中心に研究が進められている。分割拡張派と呼ばれる。

デンマークの Fjerdingstad (1963) は 9 階級に分け、特殊な生物群を除いた範囲で、出現頻度の高いものから 2 つの優占種だけを抜き出し、その所属階級により水質判定をおこなった。優占種派と呼ばれるが、まだ実用的ではない。

Knöpp (1955), Pantle u. Buck (1955), Zelinka u. Maruan (1961) らは、水質階級別にふり分けた各生物種について、所属階級に対する評点と、出現頻度に応じた評点との相乗値の総和を求め、これを総出現個体数 (評点) で割った値で汚濁程度を評価する方法を打ち出した。

os, β m, α m, p_s の各所属種に, $s = 1, 2, 3, 4$ を与え、出現頻度の大小に応じて、偶在、多い、すこぶる多いの 3 段階に対し, $h = 1, 2, 3$ を与える。これを基に汚濁指標数値 pollution index S ($S = \Sigma(sh) / \Sigma h$) を求める。 S 値に基づく汚濁程度の判断はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} S = 1.0 \sim 1.5 &\rightarrow os, & S = 1.5 \sim 2.5 &\rightarrow \beta m \\ S = 2.5 \sim 3.5 &\rightarrow \alpha m, & S = 3.5 \sim 4.0 &\rightarrow p_s \end{aligned}$$

3) 指標生物と河川性状との対比

指標生物のうち、ごく判りやすい生物種だけをとり出し、その所属水質階級と、環境基準並びに利水面での対応を示したのが表 3 である。この表は信州大学の桜井教授が、千曲川を綺麗にするために、判りやすく作られた小冊子からとったものである。

4) 物質代謝からみた汚濁階級の評価

Caspers らは水域の物質循環が、有機物生産過程と有機物分解過程から成り、それぞれの強度の違いが、汚水生物体系 Saprobiensystem における類型分けに、最も重要な尺度となると考えた。これが物質代謝派の基本的立場である。水域の物質循環の過程を示す図 10 の左側には、生産者 (消費者は生産者の変型として同一機能者とみる) が、右側に分解者が配されている。下段は無生物の貯蔵庫である。

表 3 主な指標生物とそれが示す水質等級と用途

指 標 生 物	生 物 質 学 階 級 的 級	水 域 類 型 (河 川)	水 利 用 目 的 に よ る 許 容 限 度
1. ヨ コ エ ビ	os	AA	水道1級↑ イヤマメ↑
2. サ ワ ガ ニ			
3. カ ワ ゲ ラ 類			
4. ト ビ ケ ラ 類			
5. カ ゲ ロ ウ 類	β^{ms}	A, B	2級↑ アユ↑
6. ヒ ラ タ ド ロ ム シ			
7. ミ ズ ム シ	α^{ms}	C, D	3級↑ フナ↑
8. シ マ イ シ ビ ル			
9. ヒ メ モ ノ ア ラ ガ イ	β^{ps}	E, E 以下	↓全不適
10. サ カ マ キ ガ イ			
11. ミ ズ ワ タ			
12. ユ ス リ カ (赤 虫)			
13. イ ト ミ ミ ズ 類	α^{ps}	E 以下	
14. ベ ギ ア ト ア			
15. シ マ ハ ナ ア ゴ			

* 桜井による, 1975

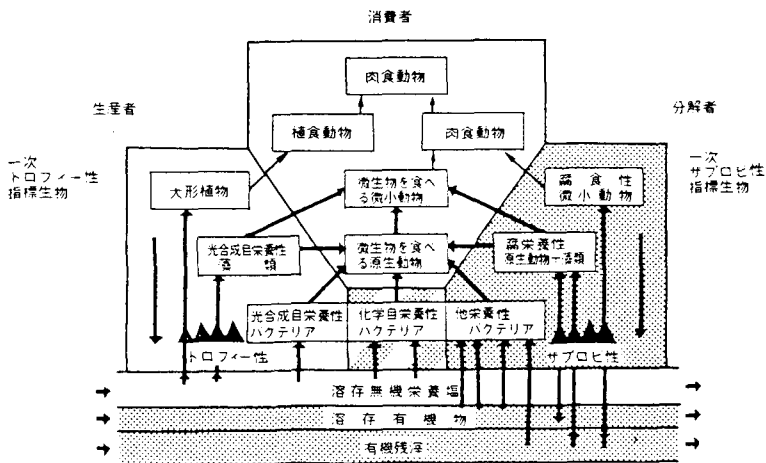


図-10 トロフィー性, ザプロビ性をめぐる生産者分解者の関係
(Caspers u. Karie, 1966)

これをモデルとして示すと図 11 のようになる。大きい輪は一次生産，二次生産，有機残滓，分解，栄養塩の五つからなる。これは自生性の物質代謝過程を示している。下方の二次生産で結ぶ小さな輪は，ザプロビ生物群（分解者）からなる循環過程を示す。エネルギーの流れは矢印で示されている。

図 12 は，以上のモデルを使って，他生栄養塩と他生有機物（例えば NP 負荷と BOD 負荷）がある水域に加わった時，全体のバランスがどのように変化するかを示す。それは同時に汚濁階級の推移を示すものである。

この図の各輪の上方部分にあたる一次生産と，下部の分解すなわち呼吸の 2 部を，P (production) と R (respiration) とし，汚濁階級 I ～ VI（図 12）に対応する P と R の組み合わせを示すと図 13 のようになる。

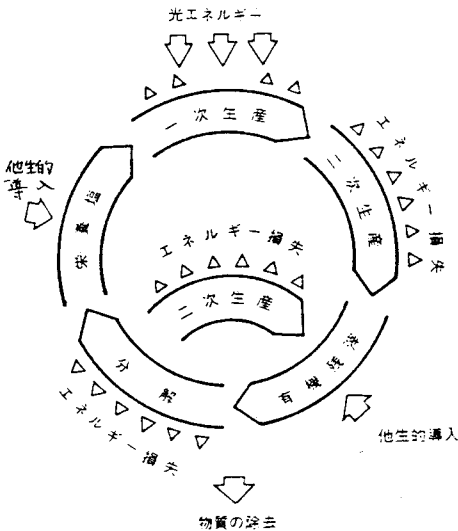


図-11 生態系における物質とエネルギーの流れ
(Caspers u. Karbe, 1966)

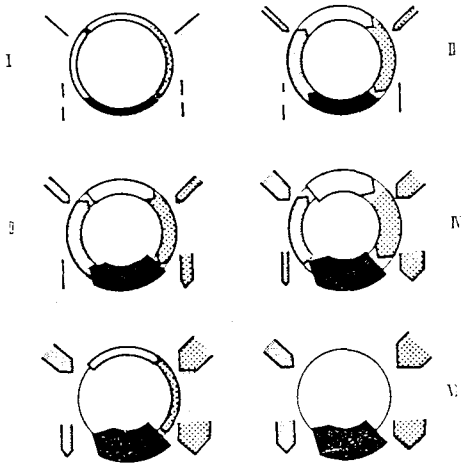


図-12 汚濁階級の変化に伴うトロフィー，ザプロビ両部分の組合せ変化模式
環は自生性物質循環，矢印は他生性物質の導入と余剰物質を示す。I ～ VI は， β_0 α_0 β_m α_m β_p α_p の各汚濁階級を示す。
Caspers u. Karbe, 1966

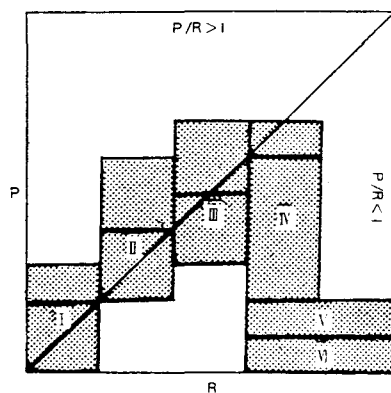


図-13 一次生産強度と呼吸強度による
ザプロビ階級の位置づけ
(Caspers u. Karbe, 1967)

3. 群集の多様性を示す指数

すでに述べたように、よい環境は多くの生物にとって棲みやすい。すなわち種類が多く、多彩となる。これらを環境の状況を示す指数にしようと考えた。

1) 出現種類

ある適正な単位サンプル中に出現した生物種類による。有機汚濁の場合には、無生物の重汚染域の周辺で、却って種、個体数の多い富栄養域がみられることが多いが、無機汚染では汚染度が低いほど種類は増加する。

2) Biotic Index (B. I.)

総個体数 N を種数 S で割った値。北森以来海域の底棲生物による環境評価指数として用いられている。重汚染域では低いが、過栄養域では高く、正常域に近くなる程低くなる。なお図 14 に甲殻類や多毛類が全生物中に占める割合——編組比率、個体数、種数についても変動モードが示されている。

3) Margaref の d 指数 (1958)

$$d = S - 1/\log_e N$$

d : 多様度指数, S : 出現種数, N : サンプル総数

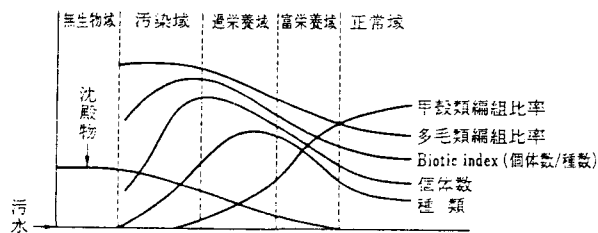


図-14 底棲動物群集構造の変化と汚染度区分の模式
(北森, 1975)

Index of species richness という意味で使われたが、個体数の大小にかかわらず計算され、同一母集団でもとり出されたサンプルの量によって差が大きくなる (Menhink, 1964) などの指摘があり、いまはあまり使われない。

4) Simpson の指数 (1949)

$$SI = \sum [n_i(n_i-1)/N(N-1)]$$

N は総個体数, n は i 番目の種の出現個体数

群集の中から任意の 2 個体を取り出した場合, その 2 個体が同時にとり出される確率。

5) Hurlbert の指数 (1971)

$$\Delta_1 = \frac{N}{N-1} \left[1 - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2 \right]$$

N, n_i は前項と同じ。群集から任意の 2 個体を選んだ時, 別種である確率で, Simpson の指数とほぼ同じ意味をもつ。

6) Brillouin の情報式 (1962)

$$H = \frac{1}{N} \log_2 \frac{N!}{n_1! n_2! \cdots n_s!}$$

$n_1, n_2, \dots, n_s$ 個からなる s 種類のグループの群集があり, 総個体数が N である時, この群集がもつ平均情報量として式が与えられる。生物群集の多様度を情報の多さとする。

7) Shannon-Weaver の式 (1963)

$$H' = - \sum p_i \log p_i$$

p_i は母集団中の i 番目の種の出現確率で, Brillouin の情報式から導かれた。 N が充分大きい場合には, p_i が n_i/N と近似するとみられるので, Pielou (1966) は次式を提唱し, Lloyd (1968) は前式との間の補正表をつくった。

$$H'' = - \sum \frac{n_i}{N} \log \frac{n_i}{N}$$

8) Pielou の種平担度 (1969)

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}} \quad J' = \frac{H''}{H''_{\max}} = \frac{H}{\log S}$$

9) McIntosh の指数 (1967)

$$M = (N - \sqrt{\sum n_i^2}) / (N - \sqrt{N})$$

10) 相対優占度

$$D.I. = (n_1 + n_2) / N$$

N は総個体数, n_1 と n_2 は第1, 第2優占種の個体数

以上のような多様度指数を用いて, 海域においても魚類, 底生生物, プランクトン, 海藻群落などについて, 環境と生物との関係調査がなされている。つぎにその数例を示す。今後発展する方向性をもった研究分野である。なお, ここで言う環境とは, 必ずしも汚染という意味ではなく, 淡水と海水との混合率や地盤の高さ, あるいは自然にできた底土の粒子組成など, 生物の環境条件を左右する各種の要因と関係するものである。

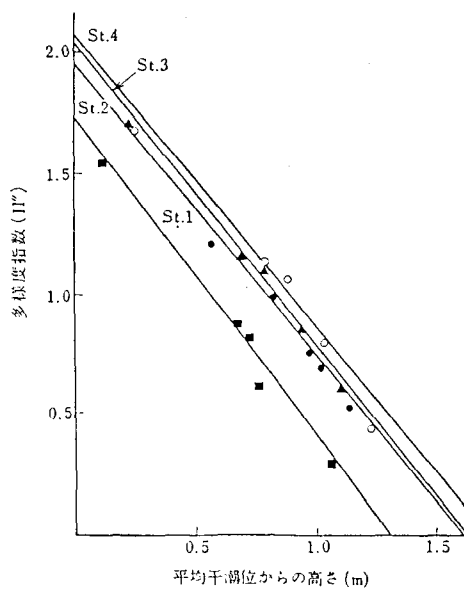


図-15 三原における海藻群落の種多様度と高さの回帰線
(野沢, 1977)

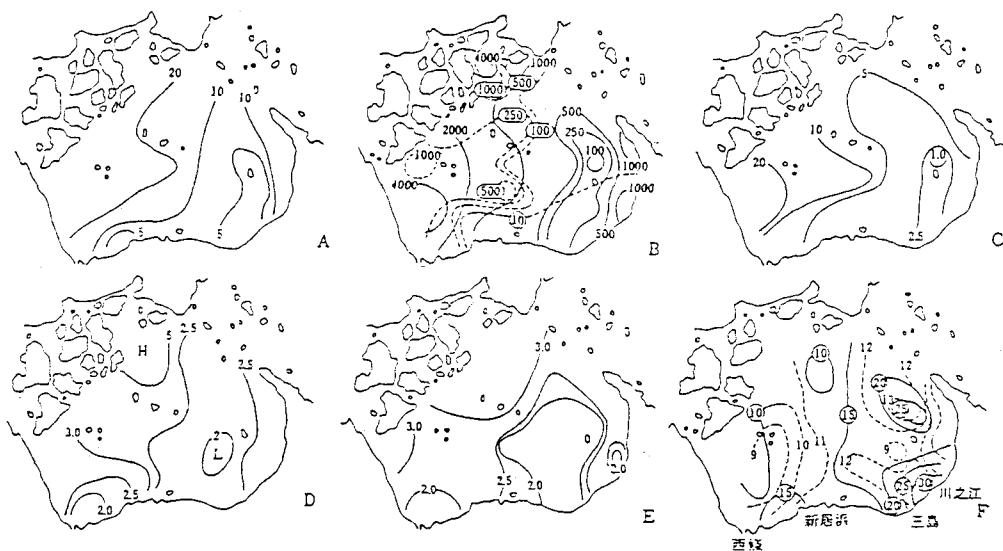


図-16 表示法の違いに基づく底棲動物分布の比較

- A. 出現種数 S B. 実線は総個体数, 破線は甲殻類個体数
 C. Biotic Index N/S D. 多様度指数 $d = s - 1/\log_e N$
 E. 多様度指数 $H(s) = -\sum (n_i/N) \log_2 (n_i/N)$ F. 汚染度を
 示す底泥の理化学的要因, 実線 COD, 破線 IL (菊池1970)

4. 生物と環境とのかかわり合いの具体例

われわれのすぐ近くの川や海には多くの生物がいる。生物にとっての環境の意味は、個々の生物によって著しく異なる。福岡県は玄海灘, 有明海, 周防灘の三つの海に面している。これらの海の代表的生物について、その生態と環境との関連性並びに問題点を見てみよう。

1) タイ (玄海灘)

福岡市地先を中心とする筑前海沿岸域には、5月初め10 mm以下の稚魚が数千万尾現われ、夏を過し、9月には10 cm近くになって沖合の越冬場に移る。その後も毎年深淺移動をくり返し、4才以上になれば、ほとんど沖合で生活する。稚魚の輸送経路と海流、沿岸の生活と環境などについて述べる。

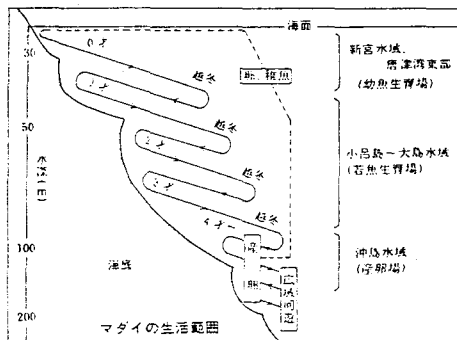


図-17 マダイの生活生態

2) アワビ, サザエ, ウニ (玄海灘)

磯物と言われるこれらの生物の生活環境は比較的似ている。人為的な増殖技術が導入されているが、資源の維持には磯整備、餌料、害敵あるいは水質などの問題があり、同時に漁業管理などが重要ポイントとなる。

3) 漁獲物からみた環境の違い (響灘と周防灘)

北九州市は関門海峡を挟んで、西は響灘、東は周防灘に面する。響灘は埋立などの開発が進み、玄海灘と隣接し、岩礁地帯も多く、砂や礫の底質域が多い。周防灘は瀬戸内海の西端で、遠浅で干潟が発達し、泥質海域である。漁獲統計にはこのような環境の違いがはっきりみられる。

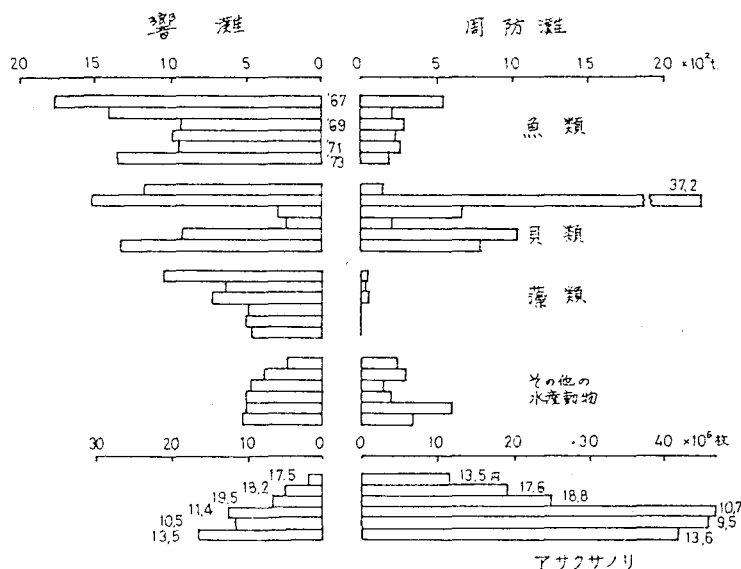


図-18 北九州市のふたつの海の漁獲物組成の比較

3) 内湾の事例 (博多湾)

この湾では埋立工事が進み、湾奥域の漁業権は放棄された。それ以前から都市排水などによる富栄養化が進み、1973年からは *Gymnodinium* 65 年型種赤潮が大規模に発生するようになった。環境の経年的変化と、底棲生物並びに漁獲物の変化との関連について述べる。

4) ハゼ類 (博多湾河口域)

シロウオは春を告げる魚と言われる。毎年2月初め頃から室見川にシロウオが産卵場を求めて溯る。この川の川口付近に流入する鉋屑川々口の干潟は、チクゼンハゼとビリンゴの産卵場となっていた。しかし今はいない。これらハゼ科の魚の生態と環境上の問題点に触れる。

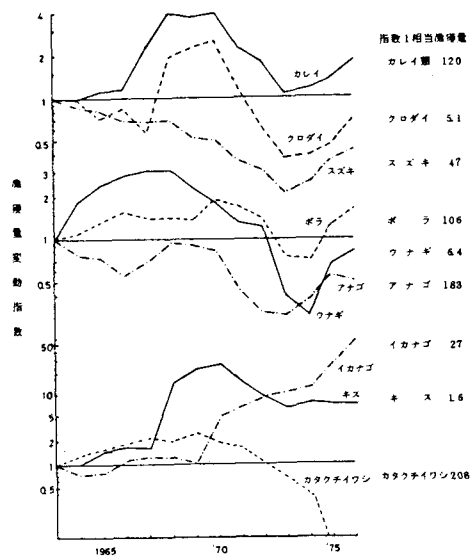


図-19 博多湾の魚種別漁獲量の推移

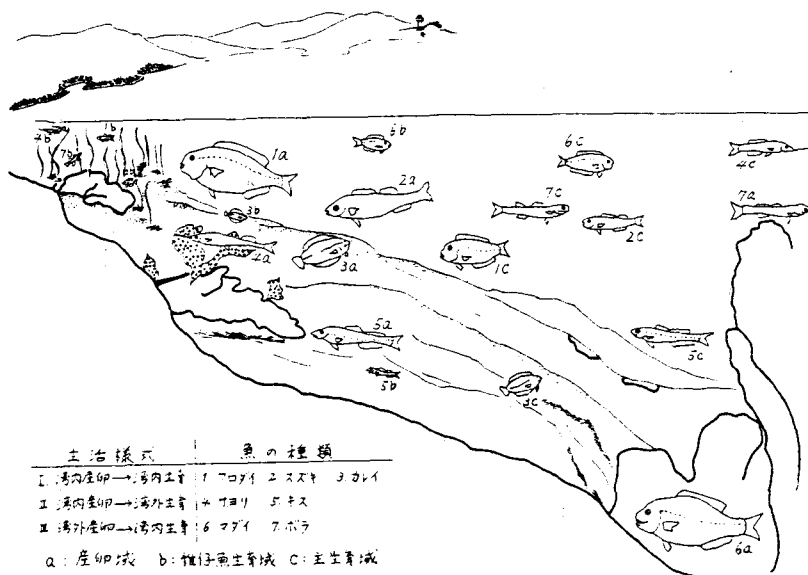


図-20 博多湾の主な魚の生活生態

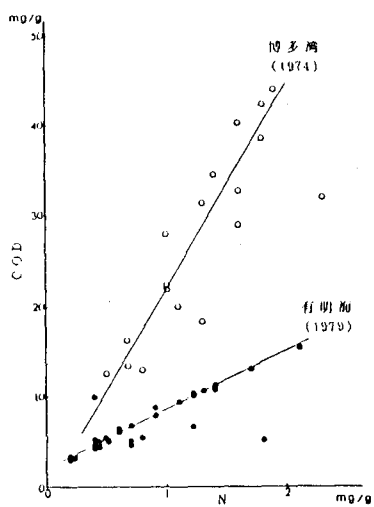


図-21 海底表土の COD と N の
比の海域による相違性

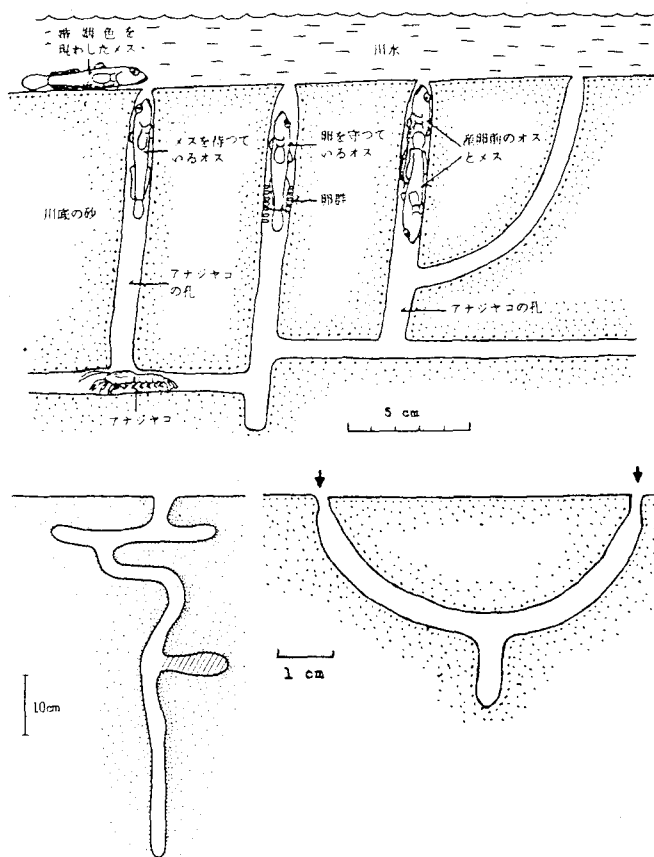


図-22 干潟泥中につくられたハゼ科の魚達の巣
(道津, 1957, '76, '78)

5) 干潟生物（有明海）

有明海の奥部一帯には干潟が多く、大潮時には数キロ沖合まで干出する。ここにはムツゴロウ、トビハゼ、シャミセンガイ、アゲマキ、タイラギなど珍しい魚貝類が多い。一方、アサクサノリの好漁場であり、水産物の生産性は著しく高い。これらの生物への環境の意味、生産性の由来並びに問題点について触れる。