

1. はじめに

近年、水質環境基準を著す海に回復させる行政的政策をはじめ、海とのふれあいを求める市民の入浴運動に至るまで、海域環境の保全を図ろうとする動きが幅広く展開されてきた。しかし、海域には物資流通の機能をもつ港湾域、工場の林立する埋立地、都市近郊の防波堤に続く海域、砂浜や岩礁をもつ自然海域などの性格の違った水域があり、それぞれ利用目的も異なる。広範囲の人々が利用することから、海洋の環境保全に対する価値観も多様である。このことが海域環境の一つの大きな特徴であり、海を客体とした保全ではなくて、まさに人間と環境の調和をそのものの定式化が課題なのである。遠洋漁業や、外洋航路としての自然海域や海洋開発計画が構想されている場合の水域についても環境保全の検討が必要である。そして今や社会問題にまでなっているのが、湖や閉鎖水域で発生する赤潮である。赤潮の発生機構は、依然として解明されていない部分が多い。

本研究では、赤潮の発生要因と思われるリンなどの循環がどのように行なわれているかを調べた。海域の水質を予測するため、海水の運動方程式と連続方程式を数値計算により解き、これにより、得た流動特性を前提として、物質移動を解析し低次生態系の試算を試みた。対象水域には、閉鎖度が高く赤潮が頻発している揚子江を選定した。

2. 赤潮について

赤潮とは、一般に海水中で浮遊生活している微小な生物（主に植物プランクトン）が突然異常に繁殖して、このため海水の色が変わる現象であるといわれている。赤潮といっても、海水の色がかならずしも赤くなるというわけではなく、赤潮を構成する生物の種類、固有な体内色素や生理状態などにより、赤褐色、褐色、黄緑色などさまざまな色である。赤潮については、科学的観察、調査が行なわれるようになり、赤潮の性状や発生時の条件、および随伴現象など次第に明らかにされてきている。しかし、発生原因については、まだ十分に解明されていない。赤潮は、場合でも見られるが一般には大陸や島の沿岸、内湾などに多く発生している。我国では、東北地方の三陸沿岸、東京湾、茨城県、伊勢湾、紀伊水道、大阪湾、瀬戸内海、九州の有明海、大村湾、小笠原の中環などではしばしば発生している。

赤潮として出現するプランクトンは、珪藻、渦鞭毛藻、その他の鞭毛藻類、藍藻類および原生動物に大別することができる。このうち渦鞭毛藻による赤潮が圧倒的に多い。赤潮をつくる藻類の光合成の特性については多少明らかにされている。これらの藻類では、強光下でも光合成の阻害が見られず、光飽和に達する照度はかなり高いところにあり光合成の絶対値も大きい。これらの藻類は、赤潮としての最盛期を過ぎたり、赤潮をつくらない時期には、植物プランクトンと全く同じように強光によりむしろ阻害される傾向がある。

内湾における赤潮の発生は、気象条件によって大きく影響を受ける。一般に夏を中心として、強い照度の下で表層付近での極めて急激な増殖が可能であり、海水の成層状態が発達したのち多く発生するといわれ、水理的には水の交換が悪く海水が停滞するような場所によく発生している。次に赤潮の発生の生態的要因について述べる。

1) 水温 一般に年間で最も暖かい季節によく発生している。瀬戸内海、大村湾、三重県の名内湾では、大部分の赤潮は水温が $20^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$ の時期に発生しており、特に $24^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$ で発生の頻度が高い。

2) 塩分濃度 内湾や沿岸における赤潮は、かなりの降雨があり、その後日照りが続くような場合に多く発生

する。

3) PH 環境水の PH に対する赤潮鞭毛藻の反応をみると、海水より高い PH を好む種類と低い PH を好む種類があるが、海水より高い PH を好む種類の方が多い。

4) 栄養塩類 一般に海洋では、海水中の窒素・リン・鉄などが植物プランクトンの繁殖の限定要因になりやすいと考えられている。しかし、赤潮を起すような鞭毛藻の繁殖には、高濃度の窒素やリンは必要でないとの考え方も有力である。”

5) 窒素源 多くの鞭毛藻の好適濃度範囲は狭く、高濃度になると繁殖は阻害される。多くの種類は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が $100 (\mu\text{g/l})$ の低濃度でも、天然の赤潮海水の密度程度には繁殖している。”

6) リン 一般に、鞭毛藻類は有機態と無機態のリン酸を利用するが、どちらかと言えば無機態リン酸でよく繁殖する。環境水中のリン酸濃度が高くなるとともに鞭毛藻の繁殖量は、増大する傾向がみられる。近年、日本の内湾はけなり富栄養化されており、伊勢湾その他では無機態のリンが鞭毛藻繁殖の限定要因にはならないといわれている。植物プランクトンの繁殖に関する要因として、海水中の窒素・リン濃度の他に、N:P 比があげられており環境水中の N:P 比が 5:1 のとき増殖速度は速くなると言われている。”

瀬戸内海の赤潮は、その数年間に急激に大型化、長期化すると同時に悪性化した。赤潮の長期化・悪性化に伴い漁業被害をひき起こす割合が増えている。悪性化した理由として、赤潮が長期化、広域化したことの他に赤潮プランクトンの種類が、毒性の強い汚水性のものに変わりつつあることが挙げられる。

3. 生態系モデル

流体運動の静止した箱庭を想定し、単位面積の任意の水柱を考え、その内部での生態系の変化を考える。生態系の構成員は植物プランクトン (P)、動物プランクトン (Z)、デトリタス (D)、栄養塩 (N) とし、水柱内でのこれらの構成員の濃度 P, Z, D, N はいずれも一様とする。なお栄養塩はリンとし、他の構成員はすべてリンに換算して与えることにした。図 1 はこの場合の生態系モデルを表わす。図中の番号は構成員間のフローを表わす。次にこの番号にしたがって説明する。

(1) 栄養塩の摂取量 (Q)

$$Q = v_1(N) \cdot v_2(I(t)) \cdot P \quad (1)$$

$$\text{ここで } v_1(N) = V_{\max} \cdot N / (K_s + N), \quad v_2(I(t)) = Q \cdot I(t) \cdot \exp(1 - Q \cdot I(t))$$

$$I(t) = \begin{cases} -\frac{1}{RH} \cdot I_{\max} \cdot \sin^2(\pi DL) \cdot t \cdot [\exp(-RH) - 1] & t; \text{daytime} \\ 0 & t; \text{night time} \end{cases}$$

$V_{\max}$; ここでは Kishi ら (1975) が東京湾の数値実験で用いた $V_{\max} = 2.328 (\text{day}^{-1})$ の値を採用した。

K_s ; $16.3 \mu\text{g/l}$ を用いる。 $I_{\max}$; 夏季 8 月の平均日射量は、 $300 \sim 500 (\text{ly/day})$ ($1 \text{ ly} = 1 \text{ g-cal/cm}^2$) であるが、これには雨天や曇天時の日射量が含まれるから晴天時の海面では、更に高い値が予想される。ここでは $700 (\text{ly/day})$ あたりを基準と考える。DL; 午前 6 時から午後 6 時までの 12 時間を 1 日の日長とする。

R; モデルでは Rillley の実験式で与える。 $R = 0.04 + 0.00722 P + 0.0473 P^{2/3}$ R; 光の強さがこれ以上大きくになると光合成が阻害されるという程度を表わす指標で Ryther (1956) の測定結果によるとおおよそ

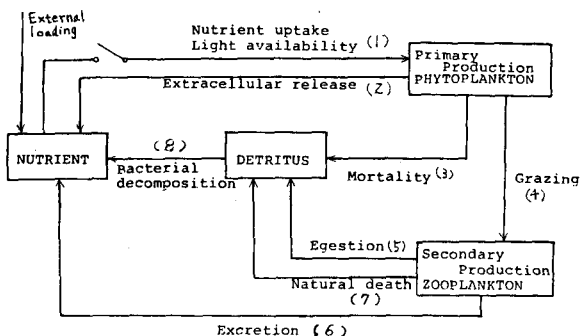


図-1 1 層生態系モデルの物質循環模式図

$\alpha \approx 4.8 \times 10^{-3} (\text{Lg/day})^{-1}$ である。

(2) 植物フランクつの細胞分岐量 (b)

分岐量は、通常同化量に対する百分比 β で表わされる。ここでは Watt の実験式 $\beta = 0.135 \times 10^{-1.6482 \times 10^{-3} P}$ を用いた。 $b = \beta(P) \cdot v_1(N) \cdot v_2(I(t)) \cdot P$ (2)

(3) 植物フランクつの枯死量 (c)

自然死亡による消失量を植物フランクつに現存量 P に比例するとし次式で与えた。

$$c = \alpha \cdot P \quad (3)$$

(4) 捕食量 (d)

$$d = g(P) \cdot Z \quad (4)$$

ここに、 $g(P) = R_{\max} [1 - \exp(-\lambda(P^* - P))]$ は動物フランクつの摂取量、 $R_{\max}$ は最大摂取量、 $P^* = 2.5$ は閾値を表わす。

(5) 動物フランクつの排泄、排泄による消失量 (e)

$$e = (1 - \mu) \cdot g(P) \cdot Z \quad (5)$$

(6) 動物フランクつの排泄による損失量 (f)

$$f = (\mu - \nu) \cdot g(P) \cdot Z \quad (6)$$

ここに μ : 消化効率、 ν : 成長率

(7) 動物フランクつの死亡量 (l)

O'Brien (1973) は、動物フランクつに総リソ現存量 Z に比例するとし

$$l = \delta \cdot Z \quad (7)$$

(8) バクテリアによる分解量 (m)

リソの回復量は、分解速度 ϕ と懸濁総リソ D により

$$m = \phi \cdot D \quad (8)$$

構成員ごとの物質収支の式をつぎのように設定する。

$$\frac{dP}{dt} = [1 - \beta(P)] \cdot v_1(N) \cdot v_2(I(t)) \cdot P - \alpha \cdot P - g(P) \cdot Z \quad (9)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \nu \cdot g(P) \cdot Z - \delta \cdot Z \quad (10)$$

$$\frac{dD}{dt} = \alpha \cdot P + (1 - \mu) \cdot g(P) \cdot Z + \delta \cdot Z - \phi \cdot D \quad (11)$$

$$\frac{dN}{dt} = [-1 + \beta(P)] \cdot v_1(N) \cdot v_2(I(t)) \cdot P + (\mu - \nu) \cdot g(P) \cdot Z + \phi \cdot D + \theta \quad (12)$$

ただし、 θ は外部負荷量とする。

4. 生態系モデルの定常解

各構成員の日周定常な状態をなすなら、日変化を日平均した値が一定に保たれる状態を定常状態とよぶことにする。このときの平均値を P_0 、 Z_0 、 D_0 、 N_0 とし、これら五式 (9)、(10)、(11)、(12) の左辺に代入すると次式をうる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= [1 - \beta(P_0)] \cdot v_1(N_0) \cdot \tilde{v}_2 \cdot P_0 - \alpha \cdot P_0 - g(P_0) \cdot Z_0 = 0 \\ \frac{dZ}{dt} &= \nu \cdot g(P_0) \cdot Z_0 - \delta \cdot Z_0 = 0 \\ \frac{dD}{dt} &= \alpha \cdot P_0 + (1 - \mu) \cdot g(P_0) \cdot Z_0 + \delta \cdot Z_0 - \phi \cdot D_0 = 0 \\ \frac{dN}{dt} &= [-1 + \beta(P_0)] \cdot v_1(N_0) \cdot \tilde{v}_2 \cdot P_0 + (\mu - \nu) \cdot g(P_0) \cdot Z_0 + \phi \cdot D_0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

播磨灘の各構成員の現存量の資料がないので、仮りに三河湾での現存量 $P=15.86$, $Z=3.97$, $D=19.83$, $N=39.65$ ($\mu\text{g/l}$) をそれぞれ定常平均値 P_0, Z_0, D_0, N_0 とみなして、式に代入し、これが成立するように生物パラメーター α, δ, ϕ を求めると

$$\alpha = 0.325, \delta = 0.150, \phi = 0.320 \quad (14)$$

図-2 は定常平均値を初期とした場合の定常解である。 $\Delta t=1$ 時間とし、積分は Runge-Kutta 法を用いた。
5. 生物拡散シミュレーション

(1) 基礎方程式

三次元の汚濁拡散方程式を自由水面から水底まで積分すると次式をうる。

$$H \frac{\partial C_i}{\partial t} + H U \frac{\partial C_i}{\partial x} + H V \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ H D_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ H D_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right\} + H B_i \quad (15)$$

ここに B_i は生態系の寄与を表わす。すなわち、 C_1, C_2, C_3, C_4 をそれぞれ P, Z, D, N とすると、 B_1, B_2, B_3, B_4 はそれぞれ式(9), (10), (11), (12)の右辺で与えられる。

(2) 計算手法

播磨灘の潮流と生物拡散をガラキン有限要素法を用いて数値解析した。ラウランジ二次要素(節点数244要素数51)を用いた。空間積分は Simpson の $1/3$ 公式、時間積分は2段階 Lax-Wendroff 法($\Delta t=60$ 秒)を用いた。潮流計算の境界条件は、固定境界で $U=V=0$ 、開境界(明石海峡、鳥羽海峡、宇野・高松間)は直線境界とし、外洋潮汐を与えた。なお本研究に用いた潮流資料は播磨灘全域を一定水深とした場合のものである。拡散計算のスタート時点は午前6時とし、潮汐(12.5時間周期)を同時にスタートさせて72時間(3日間)のシミュレーションを実施した。 $D_x=D_y=1.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 拡散計算の境界条件は全境界にわたって法線方向の拡散流速を零とし、表-1に示すように加古川、布川、揖保川、千種川、旭川、吉井川からのリニア荷を系外点源として与えた。

表-1 河川からの栄養塩負荷

River	discharge	リン	Load
Kako	2052	0.12	2.46
Ichi	4.81	0.103	0.494
Ibo	15.12	0.06	0.91
Chigusa	13.15	0.18	2.37
Asahi	63.49	0.108	6.86
Yoshii	58.26	0.133	7.75
	m^3/sec	g/m^3	g/sec

6. 計算結果

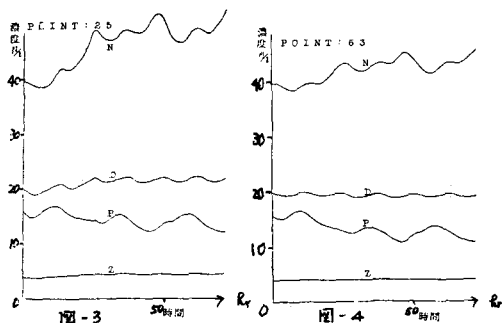
図-3、図-4 はそれぞれ節点25 および 63 における構成員の時間変化を示す。図-5、図-6、図-7、図-8 はそれぞれ構成員 P, Z, D, N について、計算開始5分、60分、66分、72時間後の値と等濃度曲線分布によって示した。

(1) 植物プランクトン

図-3、4によると、生物過程の昼夜の変動により翌朝の6時ごろに最低となる。また基礎生産によつて午後6時ごろにかけて最も多くなる。図-5によると、河口の栄養塩負荷領域で高く、湾口側に低い。また時間経過とともに減少している。

(2) 動物プランクトン

図-3、4によると、現存量の時間変化は殆んどかわらず、図-6によると河口付近でやや高い。



(3) デトリタス

図-3,4によると、潮流によって比較的安定した振動を繰り返している。また図-7によると河口付近に高く、湾口側にわずかに低い。

ゆ柴炭塩

図3,4によると、流入負荷により時間が経つにつれて徐々に高濃度になっており、河口付近ではこの傾向が顕著である。図-8も同様の傾向を示す。

7. まとめと考察

植物プランクトンの時間変化をみると、柴炭塩の河川からの流入にかかわらず、経時的に漸減している。これは、基礎生産のない夜に動物プランクトンによる捕食によるところが大きいのかもしれない。

潮流計算、拡散計算いずれも蓄層完全減にわたって一定水深を用いたこと。および蓄層員の現存量について三河湾のデータを借用したこと。

いずれも早急に改良していなければならない。前者に関連して、このような解析では、全層を有光層として取り扱うことになるが、本来有光層は5mぐらいであり、また垂直方向の濃度は、完全混合して

いると仮定したが、層夜を通しての垂直移動も考えられ2層もしくは、多層のモデルを使用した方がより正確と思われる。また生物パラメーターについても、天候・気温などの諸条件により時々刻々変化しているものであるから検討の余地があるだろう。

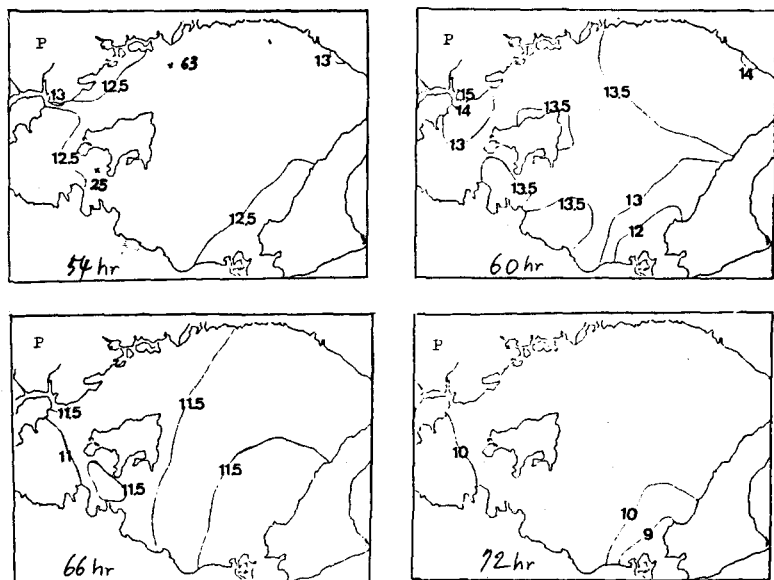


図-5

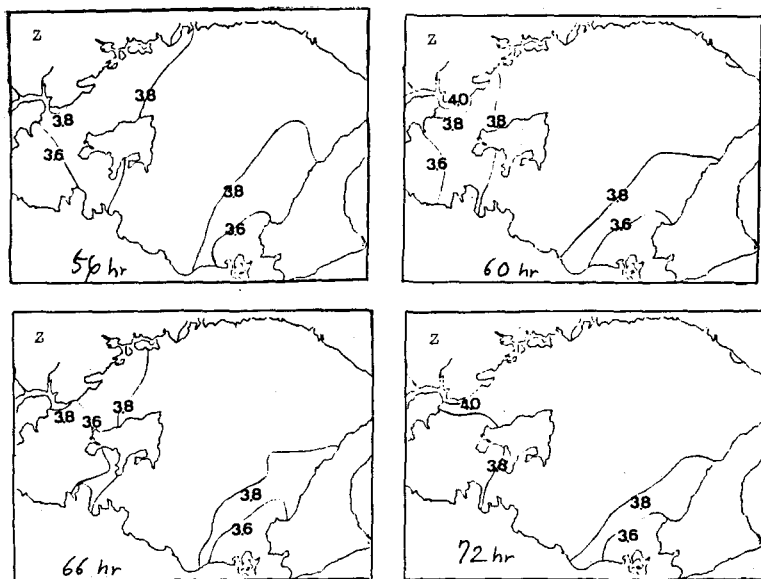


図-6

参考文献

- 1) O.C. ツィエンキーウィッツ著,
吉誠雅夫, 山田嘉昭監訳:
“基礎工学におけるマトリックス有限要素法”, 培風館(1975)
- 2) 兵庫県生活部環境局: “公共用水域の水質測定結果報告書 昭和52年度”
- 3) 岡山県: “公共用水域の水質測定結果 昭和52年度”
- 4) 松原順三郎, 中井茂喜, 著
試治: “大阪湾の汚濁解析”,
第24回海岸工学講演会論文集(1977)
- 5) 空月欣二: “海の生態”, 共立出版(1975)
- 6) 公害資源研究所第1部第二課:
“沿岸海洋性生態系の研究報告書”(1978)
- 7) 柳田友道: “示潮”, 講談社(1977)

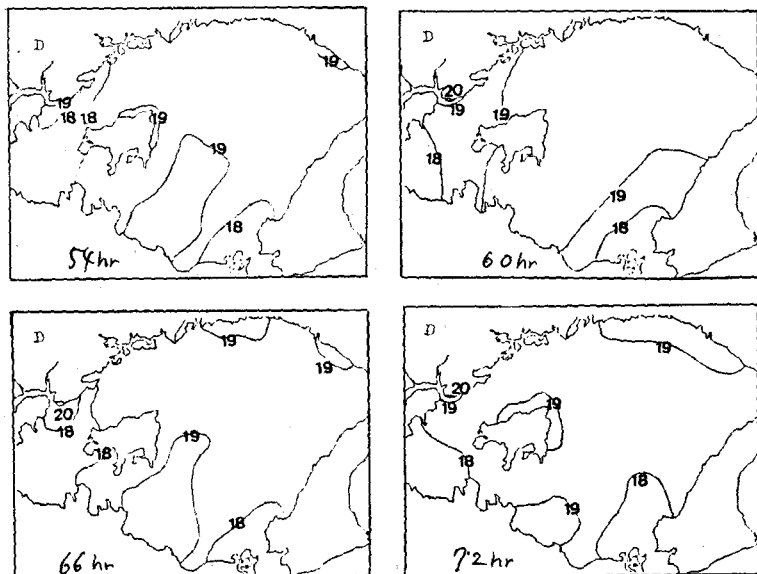


図 - 7

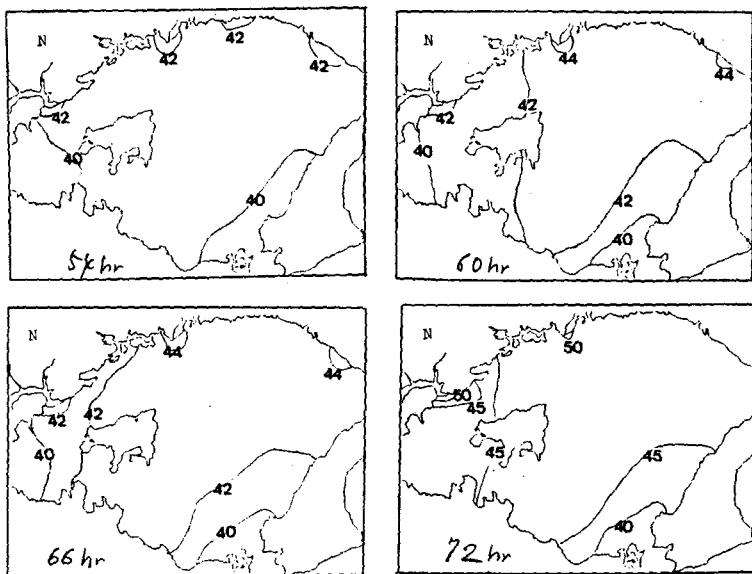


図 - 8