

九州大学工学部建設都市工学科 Fatos Kerciku

同 上 ○中村 由行

同 上 井上 徹教

地質調査所海洋地質部 山室 真澄

島根県衛生公害研究所 石飛 裕

1. 序論

閉鎖性水域の浄化対策として、最近、自然の浄化力に着目して、これらを維持或いは増進させる対策が提案されはじめている。著者らの研究グループは、二枚貝の一種であるヤマトシジミに着目し、宍道湖を調査対象湖沼として、その浄化機構の解明と浄化力の推進に関する研究を進めてきている¹⁾。

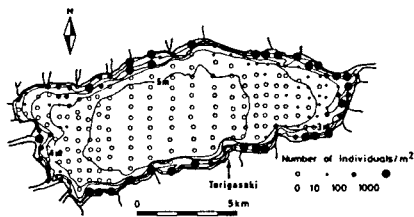
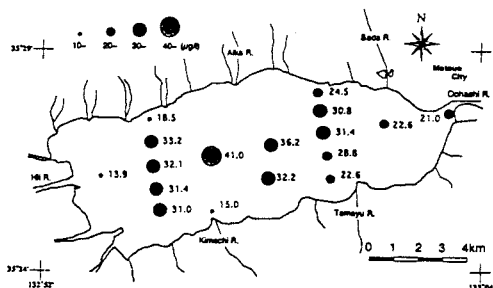
シジミの浄化力を維持・増進させるためには、まず現実の浄化能力を測定し、浄化の機構を理解する事が必要である。シジミは高いろ過能力を持ち、植物プランクトンを含む水中懸濁物をろ過しながら捕食する²⁾。最もろ過速度の高い夏期においては、4～5日で宍道湖の水全部をろ過できるほどのろ過速度を持つといわれている。そのため、植物プランクトンの現存量はシジミの捕食によって、いわゆるtop down的に決まっており、空間的・時間的な変動についても際だった特徴が現れる。まず、宍道湖において、空間的には沿岸部のChl. a 濃度は湖心部のそれに比較して常に低い事が知られている³⁾⁴⁾。これはシジミが沿岸部にのみ集中して生息しており、その捕食圧を反映しているためである(図1, 2参照)。次に、沿岸部のChl. a 濃度はしばしば明瞭に日周期変動し、夜間から早朝には濃度が低く、日中から夕刻にかけて高い事が知られている。この現象には夜間の冷却に伴う自然対流による鉛直混合が関係しており、鉛直混合が高まればシジミの捕食が効率よく行えるためであると考えられる⁵⁾。

湖沼の水質は、上述のように日周期のような短期的な変動から季節変動、さらには経年変動をとる。ところで、宍道湖における水質の経年変動を調べると、渇水や冷夏等の異常気象時を除き、Chl. a濃度やCOD濃度等から判断する限り、ここ10年以上にわたってほぼ定常な状態にあるといえる。また、シジミの漁獲もコントロール下にある事から、資源量・漁獲量共にほぼ一定の状態にあると考えられている。

本研究では以上の水質・生態学的特徴を踏まえ、植物プランクトンやシジミの分布を定量的に説明するための簡単なモデルを作成し、定常状態にあると考えられる系における生物量の平衡関係を調べた。

2. 数理モデル

宍道湖は島根県東部に位置し、湖面積80 km²、平均水深4.5 mの浅い汽水湖沼である。東西16 km、南北6.2 kmのほぼ矩形の形状をとり、湖盆は比較的単純な盆状である。宍道湖の東部から大橋川が中海に通じてお

図1. 宍道湖におけるシジミの生息密度分布²⁾図2. Chl. aの水平分布の一例³⁾

り、間欠的に日本海からの海水が中海・大橋川を通して宍道湖に流入する事で汽水条件が維持されている。シジミは水深が3m以浅の沿岸部に集中して生息しており²⁾、水質もシジミの捕食圧を反映して沿岸部と湖心部で異なる。以上の点を考慮し、湖を沿岸部と湖心部に分割した2ボックスモデルを考えた(図3参照)。モデルの変数は植物プランクトン及び二枚貝(シジミ)の二変数であり、沿岸部及び湖心部の植物プランクトンと、沿岸部底質にのみ存在する二枚貝(シジミ)の相互作用を考える。

簡単化のため、河川流入量は、沿岸部及び湖心部の体積比に応じてそれぞれに分配されるものとする。流入するChl. a 濃度は無視する。流出水の濃度も沿岸部及び湖心部の体積割合で混合されたものとする。物質変換過程としては、植物プランクトンの一次生産、シジミによる植物プランクトンの捕食、シジミの死亡(漁獲による除去を含む)を考える。また、沿岸部及び湖心部の水の交換は交換流量の形で与える。

以上の素過程を考慮する事で、沿岸部及び湖心部の植物プランクトン濃度 P_l 、 P_p 、シジミの生物量密度 B に対する保存式は以下のように書くことができる。

表1. モデルのパラメーター一覧

$$\frac{dP_l}{dt} = k_{pl} P_l - \tau_R^{-1} P_l - (\gamma F/h_l) B P_l + \tau_l^{-1} (P_p - P_l) \quad (1)$$

$$\frac{dP_p}{dt} = k_{pp} P_l - \tau_R^{-1} P_p + \tau_p^{-1} (P_p - P_l) \quad (2)$$

$$\frac{dB}{dt} = -k_b B + (\alpha \beta_1 \beta_2 \gamma F) B P_l \quad (3)$$

k_{pl} , k_{pp} : 沿岸部及び湖心部の一次純生産速度定数 = 0.2 day^{-1}
 V_p , V_l : 沿岸部及び湖心部体積 = 3.35×10^8 , $2.54 \times 10^7 \text{ m}^3$
 Q_R : 河川流量 = $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$
 Q_{ex} : 沿岸部・湖心部交換流量 = $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$
 $\tau_R (= (V_p + V_l)/Q_R)$: 河川水の滞留時間 = 110 day
 $\tau_p (= V_p/Q_{ex})$: 湖心部水塊の滞留時間 = 3.0 day
 $\tau_l (= V_l/Q_{ex})$: 沿岸部水塊の滞留時間 = 0.23 day
 γ : シジミ単位湿重量当り軟体部平均乾燥重量 = $0.0223 \text{ g dry flesh} \cdot \text{g total fresh weight}^{-1}$
 F : シジミ軟体部乾燥重量当りろ過速度 = $0.12 \text{ m}^3 \text{ g dry flesh}^{-1} \text{ day}^{-1}$
 k_b : シジミ死亡(+漁獲による除去)速度定数 = $5 \times 10^{-3} \text{ day}^{-1}$
 α : 植物プランクトン体成分窒素・Chl. a比 = $6.3 \text{ gN} \cdot \text{gChl. a}^{-1}$
 β_1 : シジミの窒素同化効率 = 0.125
 β_2 : シジミ窒素含有量/全湿重量換算係数 = $0.46 \times 10^3 \text{ gww} \cdot \text{gN}^{-1}$

これらは捕食・被食関係にある2種の生物種間の変動を表すLotka-Volterra方程式を拡張したものである。表1にパラメータの意味及びその値をまとめた。

さて、係数値が一定の場合には、上式の解は以下で与えられる平衡解(定常解)のまわりを振動する事が容易に見いだせる。

$$P_{l*} = k_b / (\alpha \beta_1 \beta_2 \gamma F) \quad (4)$$

$$P_{p*} = k_b / (\alpha \beta_1 \beta_2 \gamma F) / \{1 - \tau_p (k_{pp} - \tau_R^{-1})\} \quad (5)$$

$$B_* = (h_l / \gamma F) [k_{pl} - \tau_R^{-1} + (\tau_p / \tau_l) (k_{pp} - \tau_R^{-1}) / (1 - \tau_p (k_{pp} - \tau_R^{-1}))] \quad (6)$$

平衡解は、一方の生理活性が他方の生物量を支配している結果を示している。

さて、宍道湖で観測されているパラメータの代表的な値を上式に代入し、平衡濃度を求めると

$$P_{l*} = 5.1 \text{ } \mu\text{g/l}, \quad P_{p*} = 12 \text{ } \mu\text{g/l}, \quad B_* = 4.1 \times 10^3 \text{ gww/m}^2 \quad (7)$$

となる。平均的な実測値と比較すると植物プランクトン濃度は低めであり、ベントス(シジミ)の生物密度は高めである。モデルが長時間(例えば $k_b^{-1} = 200 \text{ day}$)経過後の平衡解を表しているのに対し、現実には平衡解に達するのに必要な時間スケールよりも短い時間スケールでパラメータが変化している。このため、パラメータの経年平均値を使ったとしても現象はその値に対応する定常解に達する事ができない可能性が高い

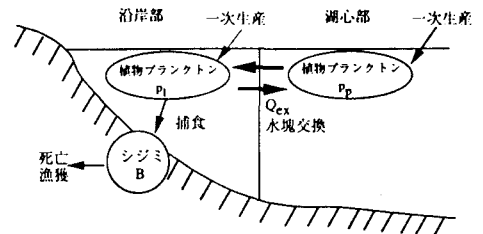


図3. モデルの構造と素過程

と考えられる。しかしながら、モデルの結果はほぼ観測値のオーダーを説明している。また、湖心部の植物プランクトン濃度が沿岸部の濃度の約2.3倍であるという結果は、作野³⁾、中村⁵⁾の観測結果にほぼ一致する。従って、植物プランクトン・ベントスが一次・二次生産を支配する場の特性は、このような簡略化したモデルでも十分表現されているものと考えられる。

3. 交換流量と浄化量・資源量の関連性

一般に、懸濁物食性のベントスは餌の供給速度によって資源量が決まるとされている。また、シジミによる懸濁物質のろ過量が増加すれば湖沼のSS濃度、ひいてはCOD濃度を下げる自浄効果が期待できる。

以上の点を考え、沿岸部と湖心部の交換流量を変化させたとき、生物量がどのように変化するかを確かめてみよう。ただし、植物プランクトンの生産速度定数など、モデルパラメータは交換流量の変化によっても値が変化しないと仮定する。平衡解を書き直すと、以下のように書ける。

$$P_{p*}/P_{p\infty} = \{1 + \tau_p(\tau_R^{-1} - k_{pp})\}^{-1} \quad (8)$$

$$B_*/B_\infty = [c + (\tau_p/\tau_l)\{1 + \tau_p(\tau_R^{-1} - k_{pp})\}^{-1}] / [c + (\tau_p/\tau_l)] \quad (9)$$

ただし、 $P_{p\infty}$ 、 B_∞ は水平交換がきわめて速やかに行われる極限 ($Q_{ex} \rightarrow \infty$, $\tau_p \rightarrow 0$) における解である。

$$P_{p\infty} = k_b / (\alpha \beta_1 \beta_2 \gamma F) = P_l, \quad B_\infty = (h_l / \gamma_F) [k_{pl} - \tau_R^{-1} + (\tau_p/\tau_l) \{(k_{pp} - \tau_R^{-1})\}] \quad (10)$$

$$c = (k_{pl} - \tau_R^{-1}) / (k_{pp} - \tau_R^{-1}) \quad (11)$$

図4に、生物量と交換流量（滞留時間）の関係を示す。植物プランクトン濃度は、交換流量を増加させた場合に沿岸部では濃度が変わらないが湖心部では減少する事が分かる。一方、ベントス生息密度は交換流量を増加させると減少する。つまり、交換能を高めた場合、湖沼の懸濁物濃度を下げ、浄化を促進させる効果が期待できるが、漁業資源を増加させる事にはつながらない。

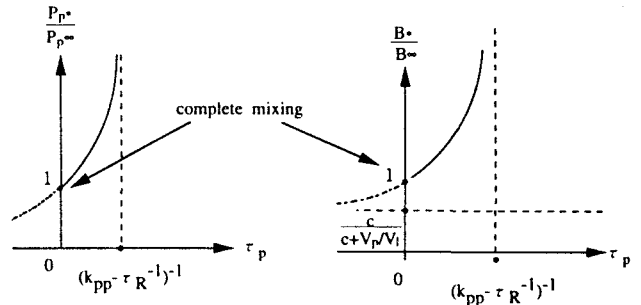


図4. 生物量と交換流量（滞留時間）との関係

4. 結論

本研究では、植物プランクトンとシジミを変数とする簡単なモデルを作成した。湖を沿岸部と沖合い部の2ボックスに分割し、物理過程としてはボックス間の水の交換及び河川からの流入・流出を、反応過程としては、植物プランクトンの純生産、シジミによる捕食、シジミの死亡（漁獲による除去を含む）を考慮した。定常解は、沿岸部の植物プランクトン濃度が湖心部の濃度よりも顕著に低いという観測事実をよく説明した。また、湖心部の植物プランクトン濃度は沿岸・沖合い間の水の交換速度に支配される事が見いだされた。この事は、交換量を推進させる事によってシジミによる自然浄化機能を促進できる可能性を強く示唆している。

<参考文献> 1)山室真澄, 1994: 化学工学, Vol.58, pp.217-220.

2)Nakamura, M. et al., 1988: Marine Biology, Vol.99, pp.369-374.

3)作野裕司ら, 1996: LAGUNA (汽水域研究), Vol.3, pp.57-72.

4)Yamamuro, M., 1991: Ph.D. Thesis, University of Tokyo. 182p.

5)中村由行ら, 1997: 水工学論文集, Vol.41, pp.469-474.