

2.2. 生態系モデルの構造

汚濁負荷物質の流入過程や、COD内部生産過程、分解、沈降過程及び底泥からの溶出過程等を基本とする閉鎖性水域の物質循環過程をモデル化し、閉鎖性水域のCOD、窒素、磷に係わる水質を再現するために必要な基本モデルの開発を行った。

2.2.1. 生態系モデルの物質保存方程式

生態系モデルの基本構造は、すべての物質について流入・流出、物理的輸送・拡散、及び生物・化学過程による変化等の諸過程に対して物質保存則が成立することである。物質保存則にもとづく基礎方程式は次式のように与えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[E_x \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[E_y \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[E_z \frac{\partial c}{\partial z} \right]}_{\text{Dispersive transport}} - \underbrace{U_x \frac{\partial c}{\partial x} - U_y \frac{\partial c}{\partial y} - U_z \frac{\partial c}{\partial z}}_{\text{Advective transport}} \quad (1)$$

$$\pm \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial S(x,y,z,t)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial W(x,y,z,t)}{\partial z}$$

Sources or Sinks External inputs

(1)式に差分法を適用することにより、任意の*i*番目のボックス(容積*V*)に対して次のような現存量についての保存式が導かれる(Thomann, 1972)。

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = \sum_j R_{ij}(c_j - c_i) + \sum_k Q_{ki} c_k - \sum_m Q_{im} c_i \pm S_i + W_i \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

ここで

V_i = セグメント *i* の容積

$c_{i,j,k}$ = (*i, j, k*) 番目の水質濃度

R_{ij} = 拡散によるセグメント *i* と *j* の間の交換量

Q_{ki} = 移流によりセグメント *k* からセグメント *i* に流入する net の流量

Q_{im} = 移流によりセグメント *i* からセグメント *m* に流出する net の流量

S_i = 反応によりセグメント *i* に発生する sink or source

W_i = セグメント *i* での外部からの放出

拡散による交換量と移流量は次式で与えられる。

$$R_{ij} = \frac{E_{ij} A_{ij}}{L_{ij}} \quad (3)$$

$$Q_{ij} = A_{ij} U_{ij} \quad (4)$$

ここで、 E_{ij} は拡散係数、 A_{ij} は *i* - *j* 面の断面積、 L_{ij} は代表長さ、 U_{ij} はセグメント *i* からセグメント *j* への移流である。

2.2.2. 独立変数

生態系を構成している独立変数として、次のものを考える。

- S_1 : ①植物プランクトンcarbon (mgC/L)
- S_2 : ②溶存性有機態磷 (DOP) (mgP/L)
- S_3 : ③粒子状有機態磷 (POP) (mgP/L)
- S_4 : ④溶存性無機態磷 (DIP) (mgP/L)
- S_5 : ⑤溶存性有機態窒素 (DON) (mgN/L)
- S_6 : ⑥粒子状有機態窒素 (PON) (mgN/L)
- S_7 : ⑦アンモニア態窒素 (NH_4) (mgN/L)
- S_8 : ⑧亜硝酸及び硝酸態窒素 ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) (mgN/L)
- S_9 : ⑨生物化学的酸素要求量 (CBOD) (mgO₂/L)
- S_{10} : ⑩溶存酸素 (DO) (mgO₂/L)

注) CBOD ; Carbonaceous 5-day Biochemical Oxygen Demand

2.2.3. 生態系モデルの動力学

1) 窒素・リンの循環と溶存酸素の動的相互関係

図1 a、b、cは、窒素・リンの循環と溶存酸素の動的相互関係を示す。この物質循環を駆動しているものは植物プランクトンによる光合成であり、窒素・リンの摂取と分解・回帰により循環している。

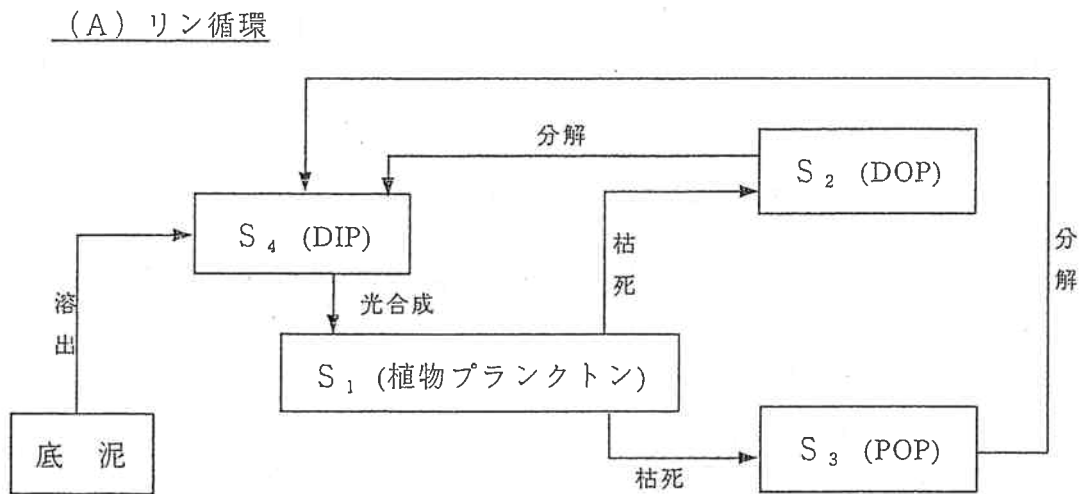


図1 a リン循環の動的相互関係

(B) 窒素循環

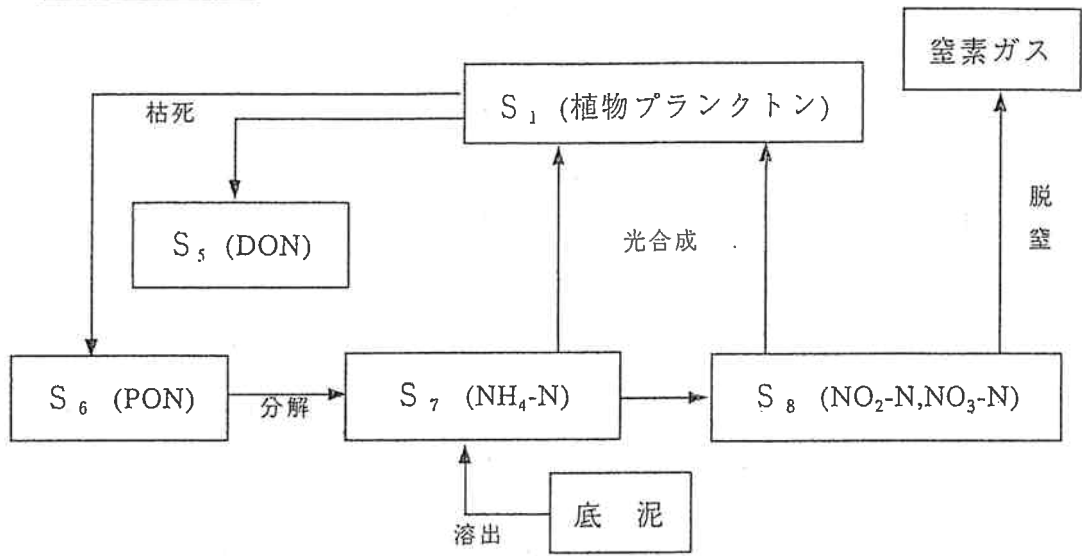


図 1 b 窒素循環の動的相互関係

(C) 溶存酸素循環

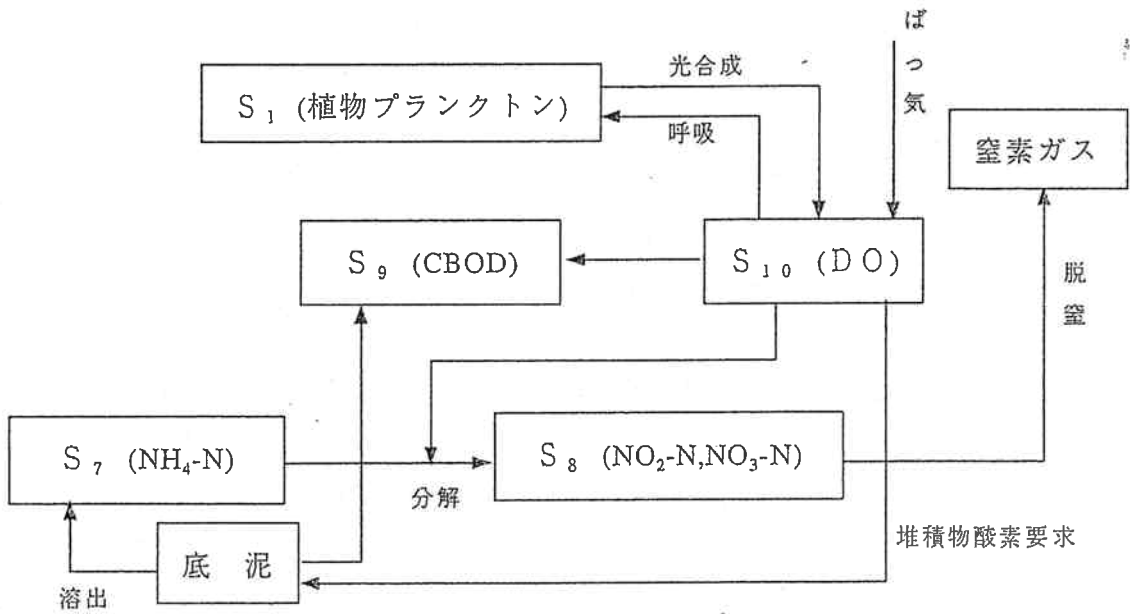


図 1 c 溶存酸素の動的相互関係

2) 植物プランクトン増殖

植物プランクトン現存量の net の変動は、光合成による増殖と死滅、呼吸、沈降の関数として与えられる。

$$S_1 = \left(\underset{\text{増殖}}{G_{1\max}(T)} \cdot \underset{\text{呼吸}}{G(I)} \cdot \underset{\text{沈降}}{G(N)} - k_{IR} \theta_{IR}^{T-20} - \frac{V_{sl}}{H} - k_{ID} \right) [P_c] \quad (5)$$

植物プランクトンの増殖 G_{1j} は、最適照度・温度・栄養塩での最大増殖速度 $G_{1\max}$ により次式で示される。

$$G_1 = G_{1\max}(T) \cdot G(I) \cdot G(N) \quad (6)$$

温度 日照 栄養塩

・ Temperature Correction

$$G_{1\max}(t) = G_{1\max} \cdot \theta_1^{T-20} \quad (7)$$

・ Light Reduction

$$G(I) = \frac{ef}{k_e z} (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0})$$

$$\alpha_1 = \frac{I_0}{I_s} e^{-k_e z_m} \quad \alpha_0 = \frac{I_0}{I_s} \quad (8)$$

$$k_e = k'_e + k_e a_{cchl} P_c$$

・ Nutrient

植物プランクトンの増殖に伴う栄養塩の摂取過程については、従来多くの関数形が用いられている。ここでは *C. antiqua* 増殖の硝酸塩、リン酸塩濃度依存性に関する実験結果から Michaelis-Menten タイプの式の掛け合わせで表されるとした。

$$G(N) = \frac{[DIN]}{k_{mN} + [DIN]} \cdot \frac{[DIP]}{k_{mP} + [DIP]} \quad (9)$$

$$[DIN] = \text{dissolved inorganic nitrogen} = [NH_3 - N] + [NO_2 - N]$$

$$[DIP] = \text{dissolved inorganic phosphorus}$$

栄養塩循環システムの物質保存式において、基本的な式は植物プランクトンの増殖にともなう栄養塩摂取過程であるが、この場合、生物生産量当りの窒素・リン摂取量を設定する必要がある。植物プランクトン種組成の違いにより、この値は大きく変動することが知られているが、本モデルにおいては constant stoichiometry を前提とした。すなわち窒素/炭素比 (mgN/mgC) = 0.18 及びリン/炭素比 (mgP/mgC) = 0.02 とする一定値を与えた。

これにより、以下に示すようにリン・窒素に対して物質保存則を適用することが可能となる。

3) リン循環

・ Dissolved Organic Phosphorus (DOP)

$$S_{3j} = a_{Pc} f_{DOP} (k_{IR} \theta_{IR}^{T-20} + k_{ID}) [P_c] - k_{35} \theta_{35}^{T-20} [DOP] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} \quad (10)$$

呼吸・死滅による回帰

DOPの無機化

・ Particulate Organic Phosphorus (POP)

$$S_{4j} = a_{Pc} f_{POP} (k_{IR} \theta_{IR}^{T-20} + k_{ID}) [P_c] - k_{45} \theta_{45}^{T-20} [POP] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} - \frac{V_{s4}}{H_j} [POP] \quad (11)$$

呼吸・死滅による回帰

POPの無機化

沈降

・ Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP)

$$S_{5j} = a_{Pc} f_{DIP} (k_{IR} \theta_{IR}^{T-20} + k_{ID}) [P_c] - \left(k_{35} \theta_{35}^{T-20} [DOP] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} + k_{45} \theta_{45}^{T-20} [POP] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} \right)$$

呼吸・死滅による回帰

DOPの無機化

POPの無機化

$$- a_{Pc} (G_{1j}) [P_c] + PO_4 \text{ FLX}/H$$

摂取

溶出

(12)

4) 窒素循環

・ Dissolved Organic Nitrogen (DON)

$$S_{6j} = a_{Nc} f_{DON} (k_{IR} \theta_{IR}^{T-20} + k_{ID}) [P_c] - k_{68} \theta_{68}^{T-20} [DON] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} \quad (13)$$

呼吸・死滅による回帰

DONの無機化

・ Particulate Organic Nitrogen (PON)

$$S_{7j} = a_{Nc} f_{PON} (k_{IR} \theta_{IR}^{T-20} + k_{ID}) [P_c] - k_{78} \theta_{78}^{T-20} [PON] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} - \frac{V_{s7}}{H_j} [PON] \quad (14)$$

呼吸・死滅による回帰

PONの無機化

沈降