

水理特性を考慮した礫床河川の物質循環シミュレーションモデルの構築

Numerical Modelling on Cycling of Substances in Gravel Rivers

戸田祐嗣* 池田駿介*

Yuji TODA* and Syunsuke IKEDA*

ABSTRACT: A numerical simulation model is presented to describe cycling of substances in gravel rivers. The chemical formulas describing the physiological action of attached algae and other microbes are employed in the model in order to correctly estimate the distribution of the substances. The hydraulic characteristics of gravel rivers are specifically taken into account in this model. The computational result of temporally fluctuation of dissolved oxygen shows good agreement with the measurement in Tama-river. It was found that the deposition of suspended organic matter and the erosion of organic sediment play important roles in determining the carbon cycling in gravel rivers.

KEY WORDS: gravel rivers, cycling of substances, hydraulic characteristics, numerical simulation

1. はじめに

我が国の河川はその地形的特徴から急勾配河川が多く、河川中・上流部には礫床河川部が数多く見られる。礫床河川中には、瀬と淵に代表されるように、魚類や昆虫類の貴重な生息空間を提供していることが知られている。今後、河川の生物環境を適切に保全・管理していくためには、このような場の持つ生物環境特性を解明することが急務となっている。

以上のような背景から、礫床河川における昆虫類や魚類の生息環境に関する研究¹⁾が盛んに行われるようになり、食物連鎖上位の生物のハビタットの特性が明らかになりつつある。しかし、食物連鎖上位の生物が生息していくためには、生活に適した水質の確保やその餌となる食物連鎖下位の生物の生息が必要となってくる。これらを明らかにするためには、礫床河川特有の水理特性や食物連鎖下位の生物の生理活動を考慮して河川内で生じる物質循環を明らかにする必要がある。しかし、物質循環という観点から礫床河川の環境を捉えた例は著者の知る限り少ない。

以上より、本研究では礫床河川の水理特性や食物連鎖下位の生物の生理活動を考慮した物質循環モデルを構築し、それを用いて河川地形や生物活性の変化が礫床河道内の物質循環に与える影響に明らかにすることを目的とする。

2. 物質循環シミュレーションモデル

2. 1 物質循環モデルの概要

図-1に礫床河川の流れの概要図を示す。河床面から水面までを流水層と称す。礫床河川では河床が浸透性を有しており、河床面上方

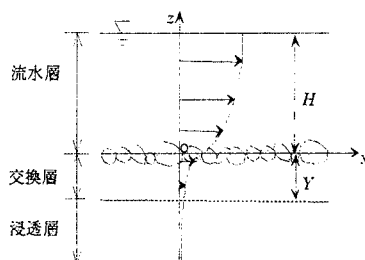


図-1 礫床河川の流れの概要図

*東京工業大学工学部土木工学科

*Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology

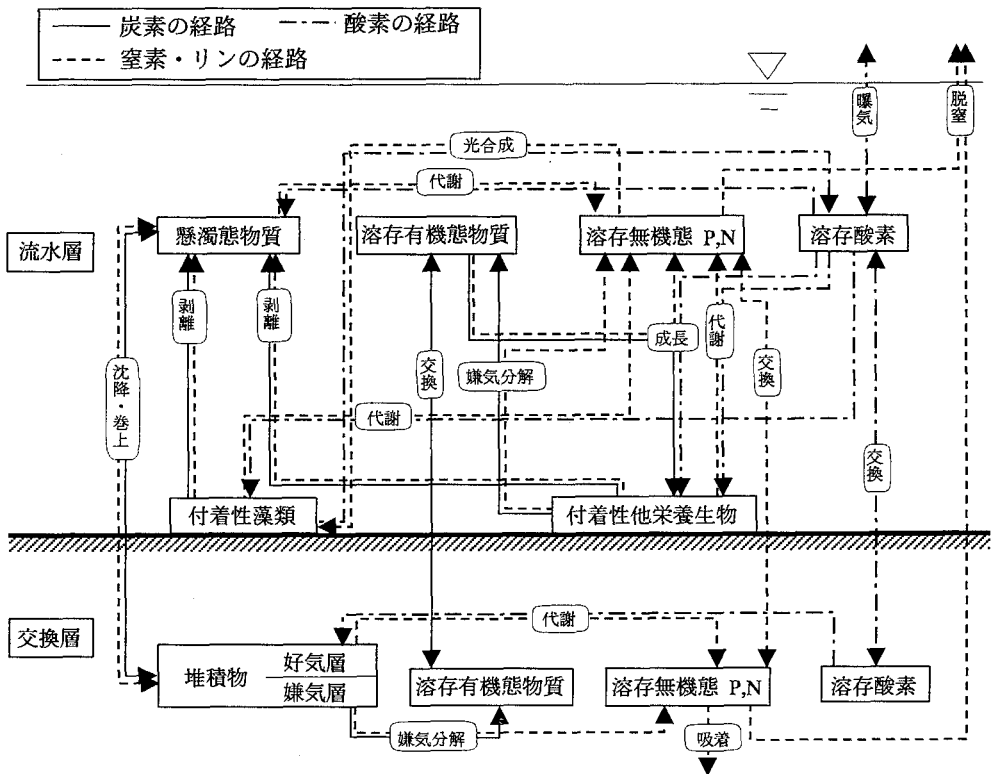


図-2 礫床河川の物質循環

表-1 生物の生理活動の化学反応式

・藻類の光合成
$106\text{CO}_2 + 80.5\text{H}_2\text{O} + 16\text{HNO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$
$\rightarrow \text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P} + 149.75\text{O}_2$
・付着性他栄養生物の成長
$\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P} + (1-\sigma)149.75\text{O}_2$
$\rightarrow \sigma\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$
$+ (1-\sigma)(106\text{CO}_2 + 80.5\text{H}_2\text{O} + 16\text{HNO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4)$
・生物の代謝・分解
$\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P} + 149.75\text{O}_2$
$\rightarrow 106\text{CO}_2 + 80.5\text{H}_2\text{O} + 16\text{HNO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$

(σ : 収率)

表-2 生物中の元素構成率と生理活動に伴う元素使用率

バイオマス中 C含有量	$\alpha_C = \frac{106\text{C}}{\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}} = 0.524$
バイオマス中 N含有量	$\alpha_N = \frac{16\text{N}}{\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}} = 0.092$
バイオマス中 P含有量	$\alpha_P = \frac{\text{P}}{\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}} = 0.013$
光合成による 酸素放出率	$\alpha_{OA} = \frac{149.75\text{O}_2}{\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}} = 1.975$
代謝分解による 酸素消費率	$\alpha_{OR} = \frac{149.75\text{O}_2}{\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}} = 1.975$
他栄養生物の 成長による酸 素消費率	$\alpha_{OG} = \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{149.75\text{O}_2}{\text{C}_{106}\text{H}_{180}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}} = \frac{1-\sigma}{\sigma} \alpha_{OR}$

れており、本研究ではこれを交換層と称する。交換層以深の浸透層は流水層や交換層との物質交換量が少なく²⁾、そこに生息する微生物はその生理活性が低いことが報告³⁾されているため、礫床河川の物質循環においては流水層・交換層における物理・化学・生物的作用が支配的であるものと考えられる。従って、ここでは流水層・交換層の2層を対象とした物質循環モデルを構築することとする。

図-2 にこれら層における炭素、栄養塩（窒素・リン）、酸素の循環模式図を示す。ここで河川の生物活動に関して、礫床河川の一次生産の大部分が河床面に付着する藻類によって行われていることから⁴⁾、一次生

表-3 物質循環の数値モデル

(1) 河床付着生物・有機態堆積物

・河床付着性藻類量 $A(\text{g/m}^2)$

$$\frac{dA}{dt} = G_A - h_A A - k_{ae} A$$

$$G_A = \begin{cases} \mu_A \cdot A & : A \leq A_S \\ \mu_A \cdot A_S & : A > A_S \end{cases}$$

$$\mu_A = \frac{L_b}{L_S + L_b} \cdot \frac{N}{N_S + N} \cdot \frac{P}{P_S + P} \cdot \mu_{A\max} \cdot 1.047^{(T-293)}$$

$$L_b = L \cdot \exp\{-(0.68 \cdot SS + 0.28) \cdot H\}$$

$$k_{ae} = \frac{DO}{DO_S + DO} \cdot k_{ae\max} \cdot 1.047^{(T-293)}$$

h_A : 剥離速度(s^{-1}), k_{ae} : 代謝速度(s^{-1}), μ_A : 比増殖速度(s^{-1}), A_S : 有光層内藻類量(g/m^2), L_b : 河床日射量(W/m^2), N : 流水層水中硝酸態窒素濃度(g/m^3), P : 流水層水中リン酸態リン濃度(g/m^3), L_S : 飽和日射量(W/m^2), N_S : 飽和硝酸態窒素濃度(g/m^3), P_S : 飽和リン酸態リン濃度(g/m^3), $\mu_{A\max}$: 最大比増殖速度(s^{-1}), T : 水温(K), $k_{ae\max}$: 最大代謝速度, DO : 流水層水中溶存酸素濃度, DO_S : 代謝に関する飽和溶存酸素濃度

・河床付着性他栄養生物量 $Het(\text{g/m}^2)$

$$\frac{d(Het)}{dt} = G_H - h_H Het - k_{ae} Het_A - k_{an}(Het - Het_A)$$

$$G_H = \begin{cases} \mu_H \cdot Het & : Het \leq Het_S \\ \mu_H \cdot Het_S & : Het > Het_S \end{cases}$$

$$\mu_H = \frac{DOC}{DOC_S + DOC} \cdot \mu_{H\max} \cdot 1.047^{(T-293)}$$

μ_H : 比増殖速度(s^{-1}), Het_S : 有栄養層内他栄養生物量(g/m^2), DOC : 流水層内溶存有機炭素濃度(g/m^3), DOC_S : 飽和溶存有機炭素濃度(g/m^3), $\mu_{H\max}$: 最大比増殖速度(s^{-1})

・有機態堆積物量 $Se(\text{g/m}^2)$

$$\frac{d(Se)}{dt} = Dep - Ero - r_{dec}$$

$$Dep = v_s \cdot SS \quad Ero = \theta_{se} \cdot \rho_w \cdot \frac{0.001 \cdot \tau_{se}^2}{v_s^2} \cdot v_s$$

Dep : 沈降量($\text{g/m}^2/\text{s}$), Ero : 巻き上げ量($\text{g/m}^2/\text{s}$), v_s : 懸濁物質の沈降速度(m/s), θ_{se} : 礫による巻き上げの速減率, ρ_w : 河川水の密度(g/m^3), v_{s*} : 無次元沈降速度で $v_{s*} = v_s / (R_s g d_{ss})^{1/2}$, $R_s = \rho_{ss} / \rho_w - 1$, d_{ss} : 巻き上げられる有機物の代表径(m), ρ_{ss} : 有機物の密度(g/m^3)

(2) 流水層中の物質

・懸濁態有機物濃度 $SS(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial(SS)}{\partial t} + U_S \frac{\partial(SS)}{\partial x} = \frac{1}{H} (-Dep + Ero) - k_{ae} SS$$

$$+ \frac{h_A A}{H} + \frac{h_H Het}{H} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial(SS)}{\partial x} \right\}$$

U_S : 流水層断面平均流速(m/s), Dis : 流水層縦分散係数(m^2/s), H : 水深(m)

・溶存有機態炭素濃度 $DOC(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial(DOC)}{\partial t} + U_S \frac{\partial(DOC)}{\partial x} = -\frac{1}{\sigma} \frac{\alpha_G}{H} G_H + \frac{\alpha_G}{H} k_{an}(Het - Het_A)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial(DOC)}{\partial x} \right\} + \frac{\lambda_A}{H} J_{DOC}$$

λ_A : 河床有効交換面積率, J_{DOC} : 流水層と交換層間の溶存有機態炭素交換量($\text{g/m}^2/\text{s}$)

・硝酸態窒素濃度 $N(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + U_S \frac{\partial N}{\partial x} = -\frac{\alpha_N}{H} G_A + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{\alpha_N}{H} G_H$$

$$+ \frac{\alpha_N}{H} k_{ae}(A + Het_A + SS H) + \frac{\alpha_N}{H} k_{an}(Het - Het_A)$$

$$- \frac{\alpha_{ND}}{H} k_{dn}(Het - Het_A) + \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\lambda_A}{H} J_N$$

k_{dn} : 脱窒速度(s^{-1}), α_{ND} : 単位重量の有機物中から脱窒される窒素の含有率, Het_A : 付着性他栄養生物好気層(g/m^2), J_N : 硝酸態窒素の河床との交換量($\text{g/m}^2/\text{s}$)

・リン酸態リン濃度 $P(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + U_S \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\alpha_P}{H} G_A + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{\alpha_P}{H} G_H$$

$$+ \frac{\alpha_P}{H} k_{ae}(A + Het_A + SS H) + \frac{\alpha_P}{H} k_{an}(Het - Het_A)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\lambda_A}{H} J_P$$

J_P : 流水層と交換層間のリン酸態リン交換量($\text{g/m}^2/\text{s}$)

・溶存酸素濃度 $DO(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial(DO)}{\partial t} + U_S \frac{\partial(DO)}{\partial x} = \frac{K_L}{H} (DO^* - DO) + \frac{\alpha_{OA}}{H} G_A$$

$$- \frac{\alpha_{OG}}{H} G_H - \frac{\alpha_{OR}}{H} k_{ae}(A + Het_A + SS H)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial(DO)}{\partial x} \right) + \frac{\lambda_A}{H} J_{DO}$$

K_L : 再曝気係数(m/s), DO^* : 飽和溶存酸素量(g/m^3), J_{DO} : 溶存酸素の河床との交換量($\text{g/m}^2/\text{s}$)

(3) 交換層中の物質

・溶存有機態炭素濃度 $DOC_G(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial(DOC_G)}{\partial t} + U_G \frac{\partial(DOC_G)}{\partial x} = \frac{\alpha_G}{\lambda Y} k_{an}(Se - Se_A)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis_G \frac{\partial(DOC_G)}{\partial x} \right\} - \frac{\lambda_A}{\lambda Y} J_{DOC}$$

U_G : 交換層平均(真の)流速, Dis_G : 交換層内縦分散係数(m^2/s), Y : 交換層厚さ(m), λ : 間隙率

・硝酸態窒素濃度 $N_G(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial(N_G)}{\partial t} + U_G \frac{\partial(N_G)}{\partial x} = \frac{\alpha_N}{\lambda Y} r_{dec} - \frac{\alpha_{ND}}{\lambda Y} k_{dn}(Se - Se_A)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis_G \frac{\partial(N_G)}{\partial x} \right\} - \frac{\lambda_A}{\lambda Y} J_N$$

・リン酸態リン濃度 $P_G(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial(P_G)}{\partial t} + U_G \frac{\partial(P_G)}{\partial x} = \frac{\alpha_P}{\lambda Y} r_{dec} - k_{ae} (P_G)^{0.345}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis_G \frac{\partial(P_G)}{\partial x} \right\} - \frac{\lambda_A}{\lambda Y} J_P$$

k_{ae} : 吸着速度(s^{-1})

・溶存酸素濃度 $DO_G(\text{g/m}^3)$

$$\frac{\partial(DO_G)}{\partial t} + U_G \frac{\partial(DO_G)}{\partial x} = -\frac{\alpha_{OR}}{\lambda Y} k_{ae} Se_A$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis_G \frac{\partial(DO_G)}{\partial x} \right\} - \frac{\lambda_A}{\lambda Y} J_{DO}$$

表-4 水理特性

・流水層断面平均流速 U_s
$U_s = \frac{U_*}{\kappa} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{l_0}{\kappa \cdot H} \right) \cdot \ln \frac{l_0 + \kappa \cdot H}{l_0} - 1 \right\} + \frac{U_*}{l_0 \cdot b}$
U_* : 摩擦速度, κ : Karman 定数, $b = \{f / (4Bl_0^2)\}^{1/2}$, B : 空隙の代表スケール ⁷⁾ , $l_0 = \kappa B$
・交換層断面平均流速 U_G
$U_G = \frac{U_*}{\lambda \cdot Y \cdot l_0 \cdot b^2} \{1 - \exp(-b \cdot Y)\}$
・流水層縦分散係数 Dis
$\frac{Dis}{U_* \cdot H} = 2.0 \cdot \left(\frac{W}{H} \right)^{1.5}$
W : 川幅
・交換層縦分散係数 Dis_G
$\frac{Dis_G}{U_* \cdot H} = 6.8$
・交換速度 J
$J = -\beta \cdot U_* \cdot (C_s - C_G)$
C_s : 流水層の物質濃度, C_G : 交換層の物質濃度
・交換層厚さ Y
$Y = 2.35 \cdot d_G + 0.0053$
d_G : 河床礫の代表径

表-5 計算に用いたパラメータ

係数	値	文献
A_s	6.0 (g/m ²)	22)
DO_s	5.0×10^{-1} (g/m ³)	14)
DOC_s	5.0 (g/m ³)	14)
d_{ss}	5.0×10^{-5} (m)	観測値
g	1.3×10^8 (m/hr ²)	
Het_{As}	6.0 (g/m ²)	仮定
Het_s	6.0 (g/m ²)	14)
h_A	2.4×10^{-2} (hr ⁻¹)	23)
h_H	2.4×10^{-2} (hr ⁻¹)	23)
k_{ad}	2.7×10^{-1} (hr ⁻¹)	20)
k_{aemax}	6.1×10^{-3} (hr ⁻¹)	14)
k_{an}	2.0×10^{-3} (hr ⁻¹)	14)
k_{dn}	6.9×10^{-4} (hr ⁻¹)	16)
L_{max}	8.1×10^2 (W/m ²)	24)
L_s	4.0×10^2 (W/m ²)	25)
N_s	2.5×10^{-2} (g/m ³)	25)
P_s	5.0×10^{-3} (g/m ³)	25)
Se_{As}	1.0×10^1 (g/m ²)	14)
α_{ND}	0.875	26)
β	2.4	7)
γ	0.05	観測値
κ	4.1×10^{-1}	
λ	4.3×10^{-1}	仮定
λ_A	9.0×10^{-1}	7)
μ_{Amax}	2.5×10^{-1} (hr ⁻¹)	14)
μ_{Hmax}	6.1×10^{-2} (hr ⁻¹)	14)
ρ_{Se}	1.3×10^6 (g/m ³)	仮定
ρ_{SS}	1.5×10^6 (g/m ³)	仮定
ρ_w	1.0×10^6 (g/m ³)	
σ	0.5	16)

に関して、礫床河川の一次生産の大部分が河床面に付着する藻類によって行われていることから⁴⁾、一次生産者として付着性藻類のみを取り扱い、浮遊性藻類は考慮していない。また、河床礫表面に付着する藻類および従属栄養性生物は生産活性が高いためその増殖過程を取り扱うこととするが、有機性の懸濁物質および堆積物は分解・代謝をその生理活動の中心としているものと考え、増殖は考慮していない。

物質循環の健全なモデルを構築するためには、生物の生理活動に伴う化学反応を定式化する必要がある。そこで本研究ではすべての生物および有機物の組成式を Gloyna⁹⁾によって提案された組成式(C₁₀₆H₁₈₀O₄₅N₁₆P)で表すこととし、それを用いて生物活動の化学反応式を表-1のように定めた。一般に礫床河川水中の溶存酸素量は豊富であることから栄養塩類は最も酸化の進んだ形態のイオンで存在するものと考え、硝酸態窒素とリン酸態リンのみを取り扱っている。以上の化学反応式を用いて表-2の様に、生物中の元素構成比や生物活動に伴う物質の取込率を決定した。

図-2の物質循環図に従って、各生物量の増減、流水層および交換層における各物質の収支を定式化した物質循環の数値モデルを表-3に示す。ここで、河川の流れに関しては、矩形断面の等流状態を仮定しており、生物活動に関しては川島・鈴木⁹⁾の研究に基づいてモデル化を行っている。既往の研究を参考にして取り入れた生物・化学反応を表すモデルでは、多くの係数に次元量を用いられているので、本研究では全ての変数に単位を付けて記してある。

上記の物質循環モデル中に現れる河川の水理特性に関して、以下の様に定式化して取り扱っている(表-4)。流水層および交換層における平均流速は、山田・川端⁷⁾と同様にそれぞれの層において混合距離を仮定し、力の釣り合い式より鉛直方向流速分布を求め、それを各層で平均して求めている。分散係数に関して、流水

表-6 計算条件

	d_G (cm)	I	U_S (cm/s)	U_G (cm/s)	U_r (cm/s)	H (cm)	Y (cm)
Case1	5.0	1/500	80.6	1.8	8.9	41.1	12.3
Case2	5.0	1/200	104.8	2.5	12.3	31.5	12.3
Case3	5.0	1/100	127.7	3.2	15.8	25.8	12.3

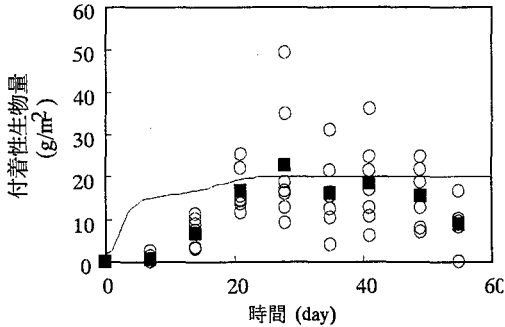


図-3 河床附着生物量（実線：計算値（Case2），
○：観測値⁹⁾（■は平均値）

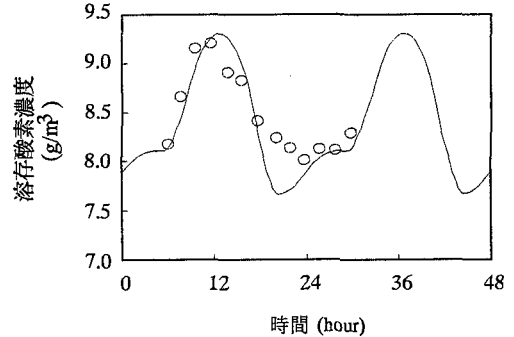


図-4 溶存酸素濃度の日変化（実線：計算値，○：
観測値⁹⁾）

層については Iwasa and Aya⁸⁾によって提案されたものを用い、交換層のそれに関しては岩佐ら⁹⁾の実験の平均値を用いている。流水層、交換層における物質の交換速度に関しても表-4 中の様に定式化し、定数 β に関しては岩佐ら⁹⁾の実験値より求めている。交換層の厚さに関しては岩佐ら⁹⁾の提案する実験式を用いている。

2. 2 計算条件

計算は流下方向に 2km の区間を 100 メッシュに区切り実施した。計算期間は 60 日間とし、時間刻みは 1 時間間隔とした。全ケースを通じて河川流量は $10\text{m}^3/\text{s}$ 、川幅は 30m とした。上流端からの流入条件は、多摩川河口より 59km 地点の礫床河川部で池田ら⁹⁾によって実測された値の日平均値を全時刻において与えた。下流端における流出条件は、濃度の空間勾配が零となるようにした。移流項には三次精度の風上差分を用い、分散項には二次精度の中央差分を用いた。各時刻における収束計算には SOR 法を用いている。

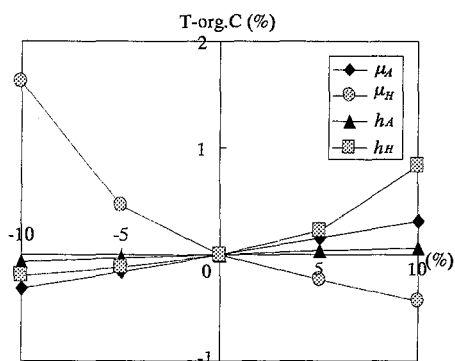
表-5 に計算に用いたパラメータの値を示す。本モデルでは、既往の研究を参考に数多くのパラメータを用いている。中でも、生物活動や化学反応に関わるパラメータは各河川における個性が強い上に実測値が少なく、その値に関する信頼性は現段階では保証されていない。従って、本計算モデルを用いて生物・化学反応のパラメータに関する感度分析を行い、河道内の物質循環において影響度の大きいパラメータを明確化することを試みた。河床勾配 1/200、河床礫の代表径 5cm のケースにおいて、生物活動・化学反応を表す 8 個のパラメータ (μ_{Amax} , μ_{Hmax} , h_A , h_H , k_{aemax} , k_{an} , k_{ad} , k_{dn}) に関して、表-5 の値から $\pm 5\%$ および $\pm 10\%$ 変化させた計算を実施した。

また、河川の地形的要因が物質循環に及ぼす影響を把握するため、河床勾配を表-6 のように変化させた計算を実施した。

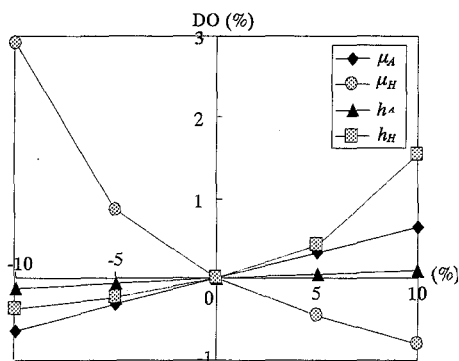
3. 計算結果

3. 1 実河川との比較

図-3 に河床附着性生物量（附着性藻類量＋附着性他栄養生物量）の計算値（Case2、計算開始地点より 1500m 下流地点）と池田ら⁹⁾により多摩川で観測された河床附着生物量の強熱減量の時系列変化の比較を示す。計算値は上流端より 1500m 下流地点の値である。計算開始より 20 日間程度の生物増殖の活発な期間では、計

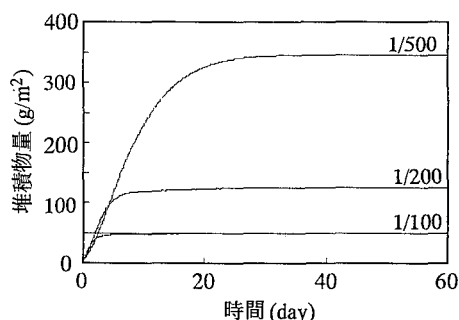


(a) 全有機態炭素濃度

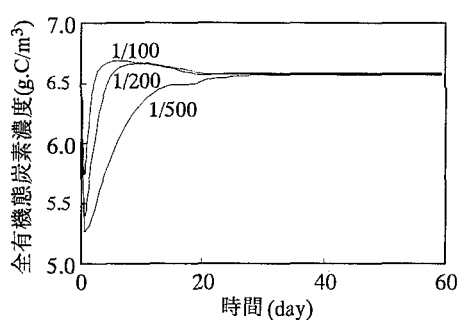


(b) 溶存酸素濃度

図-5 感度分析



(a) 有機態堆積物量



(b) 全有機態炭素濃度

図-6 有機物量の時間変化

算の初期値依存性が大きく影響し、現地河川と比較して計算結果が大きな値を示している。生物量がほぼ平衡状態に達した期間において、計算結果は実測値の平均値より 20%程度大きい値を示している。このことは、計算で食物連鎖上位の生物による補食を考慮していないことや、付着性生物の剥離速度が実河川と比較して小さかったことが原因であるものと思われる。今後の課題である。

図-4 に溶存酸素濃度の日変化の計算値と実測値⁹⁾の比較を示す。計算値は生物量がほぼ平行に達した計算開始後 50 日後における上流端より 1500m 下流地点における値である。計算結果は実河川でみられた溶存酸素量の変化をおおむね再現している。しかし、計算においては夜間の溶存酸素濃度の変化が大きく、このことは他栄養生物の成長や堆積物の好気分解に関する水温への依存性が過剰に見積もられたものと推測される。

その他の項目に関しては、現地観測値が周辺地域からの流入負荷の影響を著しく受けたり、定量的に計測することが困難であるために、現時点では比較しうるデータが無いものと思われる。

3. 2 パラメータの感度分析

図-5(a), (b) に生物活動・化学反応に関するパラメータの変化による、上流端より 1500m 下流地点における計算全期間平均全有機態炭素濃度 (SS 中 C+DOC) および溶存酸素濃度の変化を示す。横軸は生物活動・化学反応に関するパラメータの表-5 中の値からの変化率を示し、縦軸は物質濃度の変化率を示している。パラメータに関しては、物質濃度に及ぼす影響が大きいものから順に 4 つに絞り図示している。

本感度分析の範囲内で最も影響が大きいパラメータは、他栄養生物の比増殖速度 μ_H と剥離速度 h_H であった。とくに、その比増殖速度が減少する場合と剥離速度が増加する場合には、他栄養生物の現存量の大きな減少が見られ計算結果に与える影響が大きい。このことより本計算条件が他栄養生物量の生育に関して厳し

い条件であったことが分かる。それについて、河床付着性藻類の比増殖速度および剥離速度の影響も大きく、他のパラメータの影響は0.5%以下であった。このことより礫床河川内の炭素循環、酸素循環を解明していくためには河床付着性生物の生産力や流れによる剥離特性を解明する必要があることが示唆される。

栄養塩濃度に関する感度分析も同様に行ったが、その変化は最も大きい場合でも0.2%程度であり、炭素循環や酸素循環に比べると生物活動・化学反応の影響が小さかった。

3. 3 河床勾配の変化が物質循環に与える影響

図-6(a), (b)に計算開始地点より1500m下流地点における有機態堆積物量と流水層中の全有機態炭素(SS中C+DOC)濃度を示す。堆積物量に関して、計算開始から徐々に増加し、おおむね30日前後には全てのケースでは平衡状態に達している。河床勾配の変化に関しては、勾配が小さく流水層の流速が小さいケースほど、堆積物の巻き上げが小さく、懸濁物質の沈降が活発なため堆積物量が多くなる。全有機態炭素濃度の変化に関しては以下のとおり説明される。計算開始初期においては、河床内の堆積物量が小さいためその巻き上げ量が小さく、懸濁有機物の沈降によって有機物の流下に伴う除去が生じる。その結果、図示した地点における全有機態炭素濃度は小さな値を示す。この効果は沈降が活発なケースほど強く生じるため、河床勾配の小さなケースほど流下に伴う除去率が大い。そのうち、堆積物量の増加によって、沈降・巻き上げの釣り合った平衡状態に移移していくとともに、嫌気分解による溶存有機物の二次負荷が生じ、有機態炭素濃度は上昇する。最終的な平衡値に関しては、河床勾配が小さいほど沈降作用は大きいものの、嫌気分解による二次負荷も大きいため、勾配の違いによる違いは大きく現れなかったものと思われる。

図-7に計算開始より50日後の正午における流下に伴う硝酸態窒素濃度の空間変化を示す。全ての計算条件において流下に伴って硝酸態窒素濃度が減少している。このことは付着性藻類による栄養塩の取込と脱窒の合計が生物の代謝・分解による二次的な負荷より多いためである。また、河床勾配が小さなケースほど流下に伴う窒素濃度の減少率が大きくなっている。河床勾配が小さい場合は流速が小さいため、一次生産や脱窒といった生物的作用を強く受ける。同時に生物の分解・代謝による二次的な負荷の影響も大きくなるが、脱窒や生産による

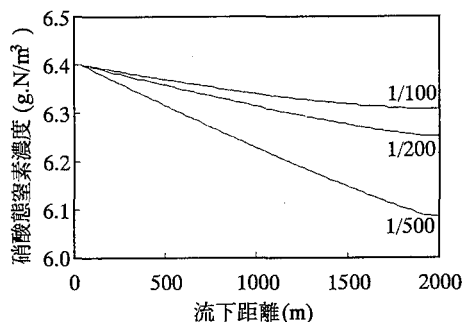


図-7 硝酸態窒素濃度の空間変化

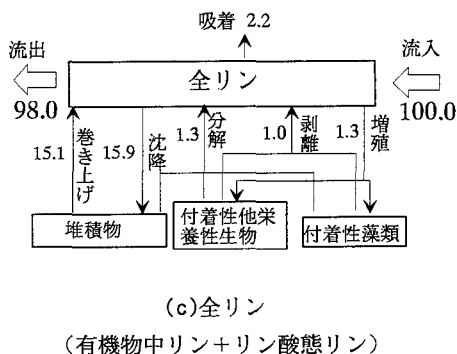
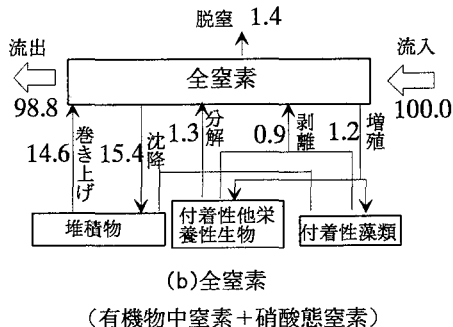
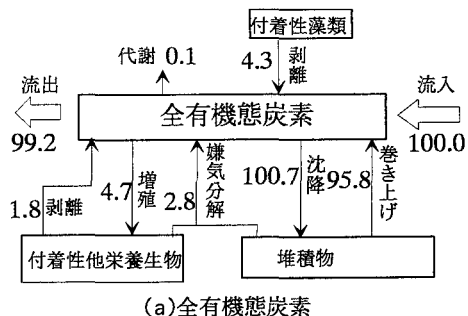


図-8 河道内の各物質の収支

取込の影響が強く現れたため、このような違いが生じている。

3. 4 礫床河川の物質循環

図-8(a), (b), (c)に計算全区間、全期間(60日間)における河道内の全有機態炭素、全窒素、全リンの収支を示す。ここでは、上流端より流入した物質量を100とした場合の区間内で配分を示している。全ての項目ともに流入した物質の98%以上が流出しており、河川水の物質濃度は流入負荷に依存していることが分かる。それらが生物活動や化学反応に利用される割合に関して詳細に検討すると以下の特徴が見られる。炭素の収支に関しては、沈降・巻き上げといった物理的作用による輸送が大きく炭素循環には河道内の水理特性が直接的に大きな影響を与えていることが分かる。また、生物・化学的な活動の中では付着性生物の生産や剥離による影響が大きいことが再確認される。窒素およびリンの循環に関しても炭素循環と同様に沈降・巻き上げの影響が大きく、河川内の栄養塩循環に関して、有機態での輸送過程が重要であることが分かる。

4. 結論

本研究では、礫床河川の水理特性と食物連鎖下位の生物の生理活動を考慮した物質循環モデルを構築し、既往の研究で報告されている範囲でのパラメータを用いて、物質循環の特徴に関して検討した。本計算の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- 1)本モデルによって礫床河川内の溶存酸素の日変化をおおむね再現することが出来た。
- 2)感度分析の結果、炭素や酸素の循環に関して、生物活動・化学反応の中では河床付着性生物の生産特性、剥離特性の影響が大きい
- 3)礫床河道内の有機物濃度、栄養塩濃度はおおむね流入してくる物質濃度によって決定される。
- 4)礫床河道内の炭素循環は沈降・巻き上げといった水理特性の影響を強く受ける。

謝辞：本研究は文部省科学技術研究費補助金基盤研究(A)(2)（研究代表者：池田駿介、課題番号：11305035）および同奨励研究(A)（研究代表者：戸田祐嗣、課題番号：11750451）の補助を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献：

- 1)例えば、土屋十圀、佐藤一夫、岩永勉、金子義明、清水孝之、久保好明：いきものの生息環境を考慮した河川改修と生物相に関する調査、水工学論文集、第40巻、pp. 175-180, 1996。
- 2)岩佐義朗、綾史郎、中井俊雄：浸透性路床上の流れにおける物質輸送、京都大学防災研究所年報、B-2, pp. 551-527, 1986。
- 3)長岡裕、大垣真一郎：礫で構成された河床における生物学的自浄作用、水質汚濁研究、第9巻、第8号、pp. 520-527, 1986。
- 4)日本化学学会編：陸水の化学、3-10, 1992。
- 5)Gloyne, E. F.: Basis for waste stabilization pond designs, *Advances in water quality improvement*, Univ. of Texas, pp. 397-408, 1998。
- 6)川島博之、鈴木基之：浅い富栄養化河川水質シミュレーションモデル、化学工学論文集、第10巻、第4号、pp. 475-482, 1984。
- 7)山田正、川端規之：浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究、土木学会論文集、No. 325, pp. 69-80, 1982。
- 8)Iwasa, Y. and Aya, S.: Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows, *Proc. of Int. Symp. on environmental hydraulics*, pp. 505-510, 1991。
- 9)池田駿介、戸田祐嗣、赤松良久：瀬と淵の水質及び生物一次生産に関する現地観測、水工学論文集、第43巻、pp. 1037-1042, 1999。
- 10)川島博之、鈴木基之：河床付着性藻類の増殖と剥離、化学工学論文集、第9巻、第3号、pp. 324-329, 1983。
- 11)大橋晶良、原田秀樹、桃井清至：生物膜の成長過程と剥離に関する実験的研究、衛生工学論文集、第25巻、pp. 209-220, 1989。
- 12)Mansell, R. S., Selim, H. M., Kanchanasut, P., Davidson, J. M. and Fiskell, J. G.: Experimental and simulated transport of phosphorus through sandy soils, *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 189-194, 1977。
- 13)川島博之、鈴木基之：負荷解析のための河川水質シミュレーションモデル、水質汚濁研究、第9巻、第11号、pp. 707-715, 1986。
- 14)国立天文台編：理科年表、気象、pp. 260, 1996。
- 15)Thomas, V., Ditoro D. M. and O'Connor D. J.: Preliminary model of Potomac estuary phytoplankton, *Jour. of Environmental Engineering, ASCE*, EE3, pp. 699-715, 1974。
- 16)楠田哲也編著：自然の浄化機構の強化と制御、技報堂出版、pp. 7, 1994。