数値河川生態系の構築と流域河道網への適用

戸田 祐嗣¹・山下 貴正²・宮本 仁志³・辻本 哲郎⁴

¹正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: ytoda@cc.nagoya-u.ac.jp

²正会員 鹿島建設株式会社 (〒231-0011 横浜市中区太田町4-51)

³正会員 神戸大学大学院准教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: miyamo@kobe-u.ac.jp

⁴フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: tsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

流域スケールでの環境管理が必要な今、流域における物質循環特性と河川生態系の因果関係を定量的に表現・理解することが出来る技術の開発は重要である。そこで本研究では、分解者、一次生産者、水生昆虫等の食物連鎖低次の生物群集を考慮した数値河川生態系モデルを構築し、実河川流域の河道網構造に適用し、流域スケールでの物質循環と河川生態系の関係を定量評価した。兵庫県の手保川流域を対象として解析を行った結果、付着性藻類の生産・剥離が河川生態系に与える影響は大きく、特に流量変動に伴う藻類剥離は下流に位置する氾濫原の有機物収支に大きな影響を与えた。また、流域全域における生物生産・代謝構造、有機物のダウンサイジングの特徴と河道位数、流域形状等との関係を定量的に示した。

Key Words : river ecosystem, material transport, numerical modeling, channel network structure, river basin

1. はじめに

河川を流下する水・物質は、河道網での合流を繰り返しながら様々な河川景観を通過し、各々の景観に固有な河川生態系を築きながら、河口域へと至る。流域スケールでの環境保全がさげられる今日、河川での水・物質動態と河川生態系の相互の関係を、流域スケールで定量的に明らかにすることは重要な課題と言えよう。

一方、流域スケールで水・物質輸送や生態系の特徴を定量把握しようとした場合、広域で長期にわたって定量化に耐えうるような現地調査を実施するには技術的、労力的に多くの困難があるのが現状であり、数値解析技術を用いたアプローチへの期待が相対的に高くなってきているものと思われる。

河川の物質輸送と生態系の相互関係については、古くから生態学分野で研究が行われており、流下方向の物質・エネルギーのつながりを記述した河川連続体仮説¹⁾、河川の物質輸送・生態系における洪水の役割を記述する洪水パルス仮説²⁾など、河川を一本の線として理想化するなどして捉えた場合の、水・物質の流れと生態系の特徴を定性的に説明する概念が広く知られている。しかしながら、河道網によって構成されている流域全域を考え

ると、河道網の繋がり方(河道網構造)の違いにより、流量変動特性などが変化し、それが物質循環・河川生態系にも影響を与えていることが予想される。河川を一本の線として理想化して扱うのには限界があり、小流域の集合体である河道網構造を捉えていく必要がある³⁾。

近年、適切な流域環境管理に向けて、流域全域での河川流量の推定⁴⁾および水温の観測・解析⁵⁾が行われている。また、陸域～河川～海域での栄養塩動態の把握⁷⁾、流域(圏)における水・物質の流出解析⁸⁾が行われており、物質の流出を自然系だけでなく生活排水などの人工系も考慮した解析が行われている。河川の物質循環・生態系モデルに関しては、個別の河川景観におけるモデルの開発⁹⁾¹⁰⁾や、河川連続体仮説と洪水パルス仮説の条件の下で、上流域での外来有機物の供給と底生動物を考慮し、河川水系を一貫して解析が行える物質循環モデル¹²⁾¹³⁾が提案されている。しかし、上述のような河道網によって構成される流域全域における物質循環・生態系の構造解明には至っていない。流域形状といった流域の特徴と河川環境との関係や、流域全域にわたる環境診断を行うことを考えれば、流域河道網の特徴を計算条件として反映できるような数値解析モデルを開発していく必要がある。

そこで、本研究では既往の河道物質循環モデル^{12), 13)}を基礎として流域河道網を一環して取り扱えるような数値河川生態系モデルを構築し、実際の流域に適用し、実河川での物質循環と生態系に関する現象理解を深めると共に、流域スケールでの河川環境の特徴を示すことを目的とする。

2. 解析方法

(1) 解析の概要

本解析では、流域を支川の合流点間を繋ぐ河道区間(最上流については源流地点から最初の合流点までの河道区間)から構成される河道網ネットワークとして捉え、各区間について「Shreveのリンクマグニチュード¹⁴⁾」と「合流してくる河道(各河道の始点・終点)」の情報を与えることで、最上流から最下流まで順次解析していく。開発する数値計算モデルは、次の4つのサブモデルで構成されている。流れ場を解析する「流体輸送モデル」、水温を解析する「熱収支モデル」、生物バイオマスを解析する「生物モデル」、水質を解析する「物質循環モデル」である。図-1に「生物モデル」、「物質循環モデル」で考慮した生物、物質およびそれらの間の物理・生物・化学的反応の関連図を示す。図中の太線で囲まれた

ボックスで示された物質、生物項目について支配方程式を構築し、ボックス間を結ぶ矢印が各支配方程式中の右辺に物理・生物・化学反応項として現れてくる。

(2) 流体輸送モデル

流れ場について、次式(1)~(4)の連続式と運動方程式より水深と流速を算出した。解析では、図-2に示すような河川横断面を主流路・裸地域・植生域に分割し、洪水時には主流路・裸地域・植生域を含む複断面で解析を行い、平水時には主流路のみで解析を行った。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q_M^2}{A_M} \right) = -g A_M \frac{\partial(H+Z)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{0M} B_M + \tau_{MB}(H-Z_B)) + (U_B - U_M) q_{MB} \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_B}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q_B^2}{A_B} \right) = -g A_B \frac{\partial(H+Z-Z_B)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{0B} B_B - (\tau_{MB} + \tau_{BV})(H-Z_B)) + (U_B - U_M) q_{MB} - (U_V - U_B) q_{BV} \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q_V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q_V^2}{A_V} \right) = -g A_V \frac{\partial(H+Z-Z_B)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{0V} B_V - \tau_{BV}(H-Z_B) + F_V B_V) + (U_V - U_B) q_{BV} \quad (4)$$

ここに、 Q : 流量(= $Q_M + Q_B + Q_V$)、 A : 流路断面積、 B : 河幅、 U : 流速、 τ : せん断応力、 H : 水深、 g : 重力加速度、 Z : 河床高、 Z_B : 氾濫原の河床高、 Q , A , B , U , τ ,

図-1 河川生態系の物質循環(低次生態系のみを考慮)

q における記号の添え字は、 M :主流路、 B :裸地域、 V :植生域を示している。底面せん断応力及び各流路間の境界せん断応力、植生による形状抵抗(F_f)は戸田ら¹⁵⁾と同様の値を用いた。

(3) 熱収支モデル

熱収支については、非定常項、移流項に加え、河川水面での短波と長波放射量の差である正味放射量、顕熱、潜熱、河床伝熱量を考慮した。正味放射量は樹木による遮りを考慮し、日射遮蔽係数は、樹木による河道横断方向の被覆率と日射が林冠を通過する際の減衰率の積で表し、これらは溝口ら¹²⁾と同様に与えた。水温(T_w)は次式に示す1次元輸送方程式より求めた。

$$BH \frac{\partial T_w}{\partial t} + BH U_s \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(BHD_x \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + B \frac{TE}{c_w \rho_w} \quad (5)$$

ここに、 U_s :流速、 D_x :拡散係数、 C_{pw} :水の熱容量、 TE :単位面積当たりの水面及び河床でのエネルギーフラックスである。

(4) 生物モデル

生物モデルでは、河床に付着する付着性藻類 A 、付着性他栄養生物 Het 、植物プランクトン P 、動物プランクトン Z 、底生動物 B_{FFG} を扱う。底生動物は4種類の摂食機能群別に、破碎食者 B_{SR} 、刈取食者 B_{SC} 、濾過食者 B_{FC} 、堆積物食者 B_{GC} を考慮した。なお、以降の式に現れる変数 G_A 、 μ_P 、 e_z 等の表記法について、最初の文字は G :河床生息生物の増殖速度、 μ :水中浮遊型生物の比増殖速度、 e :同化効率を表わし、下付き添え字は A :付着藻類、 H :他栄養生物、 P :植物プランクトン、 Z :動物プランクトン、 SR :破碎食者、 SC :刈取食者、 FC :濾過食者、 GC :堆積物食者の別を表わしている。

付着性藻類の現存量 A は次式より計算される。

$$\frac{dA}{dt} = G_A - (h_A + k_{Af})A - k_{ae}A - G_{SC} \quad (6)$$

ここに、 h_A :藻類の生理的剥離速度、 k_{Af} :流量変動に伴う剥離速度、 k_{ae} :代謝速度である。右辺第1~4項は、光合成による増殖、剥離、代謝・分解、刈取食者による摂食を表している。

光合成による増殖は生産層が藻類の成長に寄与するものとし、増殖速度は河床日射量、栄養塩濃度による制約と水温による活性変化を考慮した¹⁶⁾。栄養塩濃度については、今村ら¹⁷⁾を参考にリンと窒素でLiebigの最小律を用いてモデル化している。河床日射量は、懸濁態物質による散乱・吸光を考慮して川島・鈴木¹⁸⁾と同様に求めた。流量変動に伴う剥離は、付着性藻類が増殖が活発な期間(春季・夏季)における平均流速からの流速変化値の関数としてモデル化した¹⁸⁾。付着性藻類の洪水に伴う剥離は、流れのせん断力や砂礫の衝突が影響するとされている

図-2 モデルで想定した横断面(上)、平面図(下)

(例えば、皆川ら¹⁹⁾、北村ら²⁰⁾)が、今回のモデルではこれらのメカニズムを直接的に取り込んでおらず、今後の課題である。代謝速度(k_{ae})は溶存酸素を制約因子としMonod型に従うとした¹⁶⁾。以下、他の生物についても、代謝・分解速度は同じ関数で与えた。

植物プランクトン濃度 P は次式より計算する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + U_s \frac{\partial P}{\partial x} = & (1 - \alpha_{ES})\mu_P P - k_{pe}P - k_{pm}P \\ & - \frac{P}{P + FPOM} \mu_Z Z - \frac{w_p}{H} P - \frac{1}{H} \alpha_{FCP} G_{FC} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial P}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 α_{ES} :細胞外分泌割合、 k_{pe} :呼吸速度、 k_{pm} :枯死速度、 $FPOM$:微粒状有機物濃度、 α_{FCP} :濾過食者による摂食割合、 w_p :植物プランクトン沈降速度(=0.0)、 Dis :分散係数である。右辺第1~7項は、光合成による増殖及び細胞外分泌、呼吸、枯死、動物プランクトンによる摂食、沈降、濾過食者の摂食、分散を示す。

植物プランクトンの比増殖速度は付着性藻類と同様に与え、水中日射量は赤松・池田²¹⁾、呼吸速度は中田²²⁾、枯死速度は中谷ら²³⁾と同様に求めた。

動物プランクトン濃度 Z は次式より計算する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial t} + U_s \frac{\partial Z}{\partial x} = & \frac{P}{P + FPOM} \mu_Z Z + \frac{FPOM}{P + FPOM} \mu_Z Z \\ & - (1 - e_z)\mu_Z Z - k_{ze}Z - k_{zm}Z - \frac{1}{H} \alpha_{FCZ} G_{FC} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial Z}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 k_{ze} :呼吸速度、 k_{zm} :枯死速度、 α_{FCZ} :濾過食者による摂食割合である。右辺第1~7項は、植物プランクトンの摂食、微粒状有機物の摂食、排糞、呼吸、自然死亡、濾過食者による摂食、分散を示す。

動物プランクトンの摂食速度・全呼吸速度は中田²²⁾、自然死亡速度は中谷ら²³⁾と同様に求めた。

付着性他栄養生物の現存量 Het は次式で表す。

$$\frac{d(Het)}{dt} = G_H - (h_H + k_{Hf})Het - k_{ae}Het - k_{em}(Het - Het_A) \quad (9)$$

ここに、 h_H :付着性他栄養生物の剥離速度、 k_{Hf} :流量変動に伴う剥離、 Het_A :好気層他栄養生物限界量、 k_{em} :嫌気分解速度である。右辺第1~4項は成長、剥離、好気

分解、嫌気分解を示す。成長による増加については、付着性藻類と同様の形で与えている。

底生動物について、摂食機能群別に分類された現存量 B_{FFG} は次式より算出される。

$$\frac{d(B_{FFG})}{dt} = G_{FFG} - (1 - e_{FFG})G_{FFG} - (e_{FFG} - g_{FFG})G_{FFG} - D_{FFG}(B_{FFG}) - E_{FFG}(B_{FFG}) \quad (10)$$

ここに、下付き添え字 FFG は摂食機能群の別を表わす指標 ($FFG=SR, SC, FC, GC$) であり、 g_{FFG} : 総成長率、 D_{FFG} : 死滅速度、 E_{FFG} : 羽化速度である。右辺第 1～5 項は、摂食による増殖、排糞、排泄、自然死亡、羽化による減少である。死滅、羽化、流出後は、系外に移出するものとした。羽化時期は、戸田ら¹³⁾と同様に、各種共通して 6 月と仮定した。摂食による増殖、比増殖速度 (μ_{FFG})、環境容量 (C_{FFG}) は戸田ら¹³⁾と同様に求めた。

底生動物の出水に伴う流出に関して、清水ら²⁴⁾によると河床材料の移動が生じると顕著な水生昆虫の流出が報告されている。しかし、底生動物の流出量を水理量と関連付けて定量的に表現することは現段階では難しかったため、現時点では考慮しておらず、今後の課題である。

(5) 物質循環モデル

物質循環モデルでは、粗粒状有機物堆積量 Se_{CP} 、微粒状有機物堆積量 Se_{FP} 、粗粒状有機物濃度 $CPOM$ 、微粒状有機物濃度 $FPOM$ 、溶存有機態物質 DOC 、窒素三態(アンモニア態窒素 NH_4-N ・亜硝酸態窒素 NO_2-N ・硝酸態窒素 NO_3-N)、リン酸態リン PO_4-P 、溶存酸素 DO を扱った。

粗粒状有機物堆積量 Se_{CP} は次式より計算する。

$$\frac{d(Se_{CP})}{dt} = Dep_{CP} - Ero_{CP} - k_{mic}Se_{CP} - G_{SR} - \alpha_{SH}(1 - e_{SR})G_{SR} \quad (11)$$

ここに、 Dep_{CP} : 粗粒状有機物の沈降量、 Ero_{CP} : 粗粒状有機物の巻上げ量、 k_{mic} : 栄養塩の溶出と微生物による粗粒状有機物の分解速度、 α_{SH} : 破碎食者の破碎排糞比である。右辺第 1～5 項は、沈降、巻上げ、可溶性物質の溶脱と微生物分解、破碎食者による摂食、破碎食者の摂食に伴う粗粒状有機物の破碎を表す。

沈降・巻上げ量は、粗粒状有機物の水中での鉛直濃度分布を無視出来るものとし、河床の堆積量に応じて変化するように与えた¹²⁾。粗粒状有機物の変化に関するパラメータは溝口ら¹²⁾と同様に与えた。

微粒状有機物堆積量 Se_{FP} は次式によって表される。

$$\frac{d(Se_{FP})}{dt} = Dep_{FP} - Ero_{FP} - r_{dec} + \alpha_{SH}(1 - e_{SR})G_{SR} - G_{GC} + w_p P \quad (12)$$

ここに、 Dep_{FP} : 微粒状有機物の沈降量、 Ero_{FP} : 微粒状有機物の巻上げ量、 r_{dec} : 好気・嫌気分解量である。右辺第 1～6 項は沈降、巻上げ、好気・嫌気分解、破碎食者の摂食、堆積物食者の摂食、植物プランクトンの沈降である。

沈降・巻上げ量は、粗粒状有機物と同様の形で、沈降速度は Rubey の式²⁵⁾より求めた。好気・嫌気分解量は戸田・池田⁹⁾と同様に与えた。

粗粒有機物濃度 $CPOM$ は次式より算出する。

$$\frac{\partial(CPOM)}{\partial t} + U_s \frac{\partial(CPOM)}{\partial x} = -\frac{1}{H}(Dep_{CP} - Ero_{CP}) - k_{mic}CPOM + ALLOM + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial(CPOM)}{\partial x} \right\} \quad (13)$$

ここに、 $ALLOM$: 外来性有機物供給量である。右辺第 1～4 項は、沈降・巻上げ、可溶性物質の溶脱と微生物分解、外来性有機物の供給、分散を表す。

微粒状有機物濃度 $FPOM$ は次式によって表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(FPOM)}{\partial t} + U_s \frac{\partial(FPOM)}{\partial x} = & \frac{1}{H}(-Dep_{FP} + Ero_{FP}) + \frac{h_A}{H}A \\ & + \frac{h_H}{H}Het - (1 + \alpha_f)k_{ae}FPOM + \left((1 - e_z) - \frac{FPOM}{P + FPOM} \right) \mu_z Z \\ & + k_{am}Z + k_{pm}P - \frac{\alpha_{FCF}}{H}G_{FC} + \frac{(1 - e_{SR})}{H}G_{SR} + \frac{(1 - e_{SC})}{H}G_{SC} \\ & + \frac{(1 - e_{FC})}{H}G_{FC} + \frac{(1 - e_{GC})}{H}G_{GC} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial(FPOM)}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 α_f : 無機化に伴う余剰物生成割合、 α_{FCF} : 濾過食者の微粒状有機物摂食率である。右辺第 1～8 項は、沈降・巻上げ、付着性藻類の剥離、付着性他栄養生物の剥離、余剰物生成による分解、動物プランクトンによる排糞と摂食、動物プランクトン自然死亡、植物プランクトンの枯死、濾過食者の摂食であり、第 9～12 項は底生動物の排糞、第 13 項は分散を表す。

溶存態有機炭素 DOC は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(DOC)}{\partial t} + U_s \frac{\partial(DOC)}{\partial x} = & -\frac{1}{\sigma_{Het}} \frac{\alpha_C}{H}G_H + \frac{\alpha_C}{H}k_{am}(Het - Het_A) \\ & + \alpha_C k_{er}P + \alpha_f \alpha_C k_{ae}FPOM - k_{DOC}DOC + \frac{\alpha_C}{H}k_{am}(Se - Se_A) \\ & + \frac{\alpha_C \alpha_{CD}}{H}k_{mic}(CPOMH + Se_{CP}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial(DOC)}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 σ_{Het} : 収率、 α_C : バイオマス中炭素含有量、 k_{er} : 細胞外分泌速度、 α_f : 無機化に伴う余剰物生成速度、 k_{DOC} : 無機化速度、 α_{CD} : 溶存態有機炭素生成割合である。右辺第 1～8 項は、付着性他栄養生物の増殖、嫌気分解、植物プランクトンの細胞外分泌、微粒状有機物無機化に伴う余剰物生成、無機化、嫌気分解、粗粒状有機物分解、分散を表す。

アンモニア態窒素濃度 NH_4-N は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(NH_4)}{\partial t} + U_s \frac{\partial(NH_4)}{\partial x} = & -\frac{\alpha_N}{H}\phi_A G_A + \frac{1 - \sigma_{Het}}{\sigma_{Het}} \frac{\alpha_N}{H}G_H \\ & + \frac{\alpha_N}{H}k_{ae}(A + Het + FPOMH) + \frac{\alpha_N}{H}k_{am}(Het - Het_A) + \frac{\alpha_N}{H}r_{dec} \\ & + \frac{\alpha_N \alpha_{DNP}}{H}k_{mic}(CPOMH + Se_{CP}) + \alpha_N(k_{pe} - \phi_P \mu_P)P + \alpha_N k_{ze}Z \\ & + \frac{\alpha_N}{H}(e_{SR} - g_{SR})G_{SR} + \frac{\alpha_N}{H}(e_{SC} - g_{SC})G_{SC} + \frac{\alpha_N}{H}(e_{FC} - g_{FC})G_{FC} \\ & + \frac{\alpha_N}{H}(e_{GC} - g_{GC})G_{GC} + \alpha_{NC}k_{DOC}DOC - k_{NH_4}NH_4 + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial(NH_4)}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

ここに、 α_N : バイオマス中窒素含有率、 ϕ_A : 付着性藻類

の無機窒素分割係数(=0.0), ϕ : 植物プランクトンの無機窒素分割係数(=0.0), α_{DNP} : 粗粒状有機物の溶脱・微生物分解における栄養塩生成割合, α_{NC} : 窒素炭素比, k_{NH_4} : アンモニア態窒素の硝化速度である。右辺第1~8項は, 付着性藻類の増殖, 付着性他栄養生物の増殖, 代謝・分解, 付着性他栄養生物嫌気層・堆積物嫌気層における嫌気分解, 粗粒状有機物の微生物分解, 植物プランクトンの呼吸に伴う負荷と増殖に伴う取り込み, 動物プランクトンの呼吸に伴う負荷であり, 第9~12項は底生動物の成長に伴う負荷, 第13~15項は溶存有機態炭素の無機化, アンモニア態窒素の硝化, 分散を表している。

亜硝酸態窒素濃度 NO_2-N は次式で表される。

$$\frac{\partial NO_2}{\partial t} + U_s \frac{\partial NO_2}{\partial x} = k_{NH_4} NH_4 - k_{NO_2} NO_2 + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial NO_2}{\partial x} \right\} \quad (17)$$

ここに, k_{NO_2} : 亜硝酸態窒素の硝化速度である。右辺第1~3項は, アンモニア態窒素の硝化, 亜硝酸態窒素の硝化, 分散を表している。

硝酸態窒素濃度 NO_3-N は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial NO_3}{\partial t} + U_s \frac{\partial NO_3}{\partial x} = & k_{NO_2} NO_2 - \frac{\alpha_{ND}}{H} k_{dt} (Het - Het_A) \\ & - \frac{\alpha_N}{H} (1 - \phi_A) G_A - \alpha_N (1 - \phi_p) \mu_p P + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial NO_3}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

ここに, α_{ND} : 脱窒に伴う窒素消費率, k_{dt} : 脱窒速度である。右辺第1~5項は, 硝化, 脱窒, 付着性藻類の増殖, 植物プランクトンの増殖, 分散を表している。

リン酸態リン濃度 PO_4-P は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial PO_4}{\partial t} + U_s \frac{\partial PO_4}{\partial x} = & - \frac{\alpha_p}{H} G_A + \frac{1 - \sigma_{Het}}{\sigma_{Het}} \frac{\alpha_p}{H} G_H \\ & + \frac{\alpha_p}{H} k_{ac} (A + Het + FPOMH) + \frac{\alpha_p}{H} k_{am} (Het - Het_A) + \frac{\alpha_p}{H} r_{dec} \\ & + \frac{\alpha_p \alpha_{DNP}}{H} k_{mic} (CPOMH + Se_{cp}) + \alpha_p (k_{pe} - \mu_p) P + \alpha_p k_{ze} Z \quad (19) \\ & + \frac{\alpha_p}{H} (e_{SR} - g_{SR}) G_{SR} + \frac{\alpha_p}{H} (e_{SC} - g_{SC}) G_{SC} + \frac{\alpha_p}{H} (e_{FC} - g_{FC}) G_{FC} \\ & + \frac{\alpha_p}{H} (e_{GC} - g_{GC}) G_{GC} + \alpha_{PC} k_{DOC} DOC + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial P}{\partial x} \right\} \end{aligned}$$

図-3 洪水時に考慮する現象

ここに, α_p : バイオマス中リン含有量である。右辺第1~8項は, 付着性藻類の増殖, 他栄養生物の増殖, 代謝・分解, 付着性他栄養生物嫌気層による嫌気分解, 堆積物嫌気層における嫌気分解, 粗粒状有機物の微生物分解, 植物プランクトンの呼吸に伴う負荷と増殖に伴う取り込み, 動物プランクトンの呼吸, 第9~12項は底生動物の成長に伴う負荷, 第13項は溶存有機態炭素の無機化, 第14項は分散を表している。

溶存酸素濃度 DO は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial (DO)}{\partial t} + U_s \frac{\partial (DO)}{\partial x} = & \frac{K_L}{H} (DO^* - DO) + \frac{\alpha_{OA}}{H} G_A + \alpha_{OA} \mu_p P \\ & - \frac{\alpha_{OG}}{H} G_H - \alpha_{OR} k_{pe} P - \alpha_{OR} k_{ze} Z - \frac{\alpha_{OR}}{H} G_{SR} - \frac{\alpha_{OR}}{H} G_{SC} - \frac{\alpha_{OR}}{H} G_{FC} \\ & - \frac{\alpha_{OR}}{H} G_{GC} - \frac{\alpha_{OR}}{H} k_{ac} (A + Het_A + FPOMH) - \frac{\alpha_{OR}}{H} k_{ac} Se_A \quad (20) \\ & - \frac{\alpha_{OR} \alpha_{DNP}}{H} k_{mic} (CPOMH + Se_{cp}) - \alpha_{OD} k_{DOC} DOC \\ & - \alpha_{ONH} k_{NH_4} NH_4 - \alpha_{ONO} k_{NO_2} NO_2 + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial (DO)}{\partial x} \right\} \end{aligned}$$

ここに, K_L : 再曝気係数, DO^* : 飽和溶存酸素量, α_{OA} , α_{OG} , α_{OR} , α_{OD} , α_{ONH} , α_{ONO} : 光合成, 他栄養生物の成長, 代謝・分解, 無機化, アンモニア態窒素硝化, 亜硝酸態窒素硝化による酸素放出・消費率である。右辺第1~6項は再曝気, 付着性藻類の光合成, 植物プランクトンの光合成, 付着性他栄養生物の成長, 植物プランクトンの呼吸, 動物プランクトンの呼吸, 第7~10項は底生動物の成長, 第11, 12項は代謝・分解, 第13項は粗粒状有機物の分解, 第14項は溶存有機態炭素の無機化, 第15, 16項はアンモニア態窒素と亜硝酸態窒素の硝化, 第17項は分散を表している。

(6) 平水時と洪水時の解析手法

平水時の主流路内では図-1 および式(6)~(20)に示された全ての項を考慮して解析を行った。平水時の氾濫原では分解による有機物(CPOM, FPOM 堆積物)の減少のみを考慮した。

洪水時には生物的・化学的なプロセスの影響は小さく, 沈降・巻き上げ, 付着性生物の剥離などの物理プロセスが支配的であると考えられるため, 図-3 に示す物理プロセスのみを考慮して解析を行った。

3. 解析条件

対象流域を選定するにあたり, 河道網構造や水温について, 宮本・道奥⁹⁾による観測データが充実している兵庫県揖保川流域を対象とした。以下, 河道網解析, 流域地形・流量を表現するモデルは, 宮本・道奥⁹⁾の提案する手法に準じた。

図-4 対象河道網と流量²⁶⁾・水温観測地点⁵⁾

(1) 対象流域の概要

図-4 に、本研究で対象とする揖保川流域(流域面積：810km²，幹川流路延長：70km)の河道網と国土交通省が行う流量観測地点²⁶⁾，宮本・道奥⁵⁾が実施した水温観測地点を示す。ここでは、一次流域面積の最小値を1.0km²と設定しており、363の小流域・河道区間に分けられ、一次河道の数は183である。

(2) 流域地形・流量

各河道における標高・河床勾配は、河道網解析より得られた値を用いた。河床材料の代表粒径については、山本²⁷⁾によるセグメントの分類を参考に、各河道の勾配から判断されるセグメントでの代表粒径を表-1のように与た。

各河道における流量ハイドロは、流域内に設置されている9箇所の観測結果から、リンクマグニチュードのべき乗で各河道の流量規模が表現されること⁴⁾を用い、次式より推定した。

$$Q_i = \bar{Q}_i b^{(ln R_a / ln R_b)} \quad (21)$$

ここに Q_i ：リンクマグニチュード i における流量， $\bar{Q}_i$ ：リンクマグニチュード $i=1$ (一次河道)における流量， R_a ：流域面積比， R_b ：分岐比， b ：流量指数である。各パラメータは、宮本・道奥⁵⁾と同様の値を用いた。図-5に示す、山崎第二観測所(図-4中の③)における観測流量と推

表-1 セグメントの分類

セグメント	M	1	2	3
勾配の目安	~1/60	1/60	1/400	1/5000
代表粒径(cm)	25.0	5.0	0.5	0.05

図-5 流量ハイドロの比較(③山崎第二)

図-6 洪水時における川幅(揖保川本川)

定流量の時間変化からも、流量規模や時間変化が観測値と近い値に推定されていることがわかる。

流路幅は平水時には流量変動に応じて増減し、高水敷が冠水するほどの洪水時は、堤防幅によって制限されるものと考えられる。よって、川幅(流路幅)は平水時と洪水時に分けて設定し、平水時の各河道における流路幅は次式に示すレジーム則より推定を行った。

$$B_i = \alpha Q_i^{1/2} \quad (22)$$

ここに、 B_i ：リンクマグニチュード i における流路幅， α ：係数(=7.0)である。

洪水時の川幅は、航空写真・国土地理院地図(1/25000)を用いて堤防幅を調べ、河道面積に対する主流路・裸地域・植生域の面積割合から各流路幅を推定した。図-6に揖保川本川的主流路・裸地域・植生域幅を示す。主流路からの氾濫原(植生域、裸地域)の比高については、年間3回程度²⁸⁾冠水する高さに設定した。

(3) 気象条件と外来性有機物の季節変化

解析に必要な気象条件について、気温・風速は気象庁一宮観測所，日射量は大阪観測所，相対湿度は姫路観測所の2006年10月から2007年9月までの測定データを用いた(図-7)²⁹⁾。気温は、流域内の気象観測所のアメダスデータに標高補正を施して与え、風速は年平均値(1.2m/s)を与えた。外来性有機物の季節変化は、溝口ら¹²⁾

と同様とし、勾配から判断されたセグメント M と中下流域の植生を伴う氾濫原(林冠のみ)において与えた。

(4) パラメータ、初期条件・境界条件

数値シミュレーションで用いた各種パラメータを表-2 に示す。氾濫原上での落葉(CPOM)の重量減少過程に関しては、河川水中と同様の値を平水時の氾濫原植生にも用いた³⁰⁾。

下流端境界条件の水深については、下流端断面で Manning 則を用いて与えている。合流後河道における上流端水温は、合流前の河道の水温と流量の積(熱フラックス)を合流後流量で除すことにより熱フラックスが保存されるよう決定した。源流水温は推定は、宮本ら³⁰⁾と同様の方法で与えた。河道を流下する物質・生物については、上流側の河道からの流入量(フラックス)を上流端境界条件として与えた。また、源流である 1 次河道の上流端での境界条件は既往の研究(例えば広瀬ら³²⁾)を参考に、表-3 に示す濃度を各源流に与えた。粒状有機物堆積物(主流路、氾濫原)、付着性生物、底生動物の初期条件は表-4 に示す値を与えた。本研究では、図-5 で示した 1 年間の流量ハイドログラフを毎年繰り返し与えた解析を実施したが、計算開始から 5 年経過すると物質濃度、生物量などが、流量変動に対応して変動しながらも、大局的には平衡状態に達したものと判断されたため、以降の検討では全て計算開始より 5 年目における結果に基づいて考察を進める。

4. 解析結果

(1) モデルの検証

本数値解析には、数多くの生物・化学反応モデルや、計算上のパラメータが含まれているため、モデルの検証が必要である。しかし、現時点では、モデルで取り扱う多くの変数について、比較可能な実測データが存在しておらず、おそらく、検証材料となる実測データを収集すること自体が、相当な技術的、労力的課題を克服しなくてはならない状況である。従って、本節では、限定的ではあるもののデータが現存する水温、硝酸態窒素濃度および溶存酸素濃度について実測と計算の比較を行う。

図-8 に冬季(1 月)と夏季(8 月)の揖保川本川、引原川、林田川、栗栖川における流程変化の解析水温と観測水温の比較を示す。観測、解析とともに上流から下流に向かう昇温構造が見られ、一部に観測値との差はみられるが、流域全域を通しては、水温の流程変化を夏季、冬季ともに大局的に再現できているものと思われる。

水質項目について、国土交通省が行う月に 1 回程度の採水調査、水質自動監視装置による観測を用いて本解析結

図-7 気象条件(気温(上)、相対湿度(中)、日射量(下))

表-2 計算に用いたパラメータ

	係数	値	単位	内容	文献
付着性生物	μ_{Amaz}	2.5×10^{-1}	hr^{-1}	藻類の最大比増殖速度	(16)
	Het_A	6.0	g/m^2	好機層他栄養生物限界量	(9)
	h_A	2.4×10^{-2}	hr^{-1}	藻類の生理的剥離速度	(9)
	k_{aomax}	6.1×10^{-3}	hr^{-1}	最大代謝速度	(16)
	k_{ga}	2.0×10^{-3}	hr^{-1}	嫌気分解速度	(16)
プランクトン	a_{ES}	0.1		細胞外分泌割合	(33)
	e_z	0.7		同化効率	(34)
底生動物	μ_{FFGmax}	1.09×10^{-2}	hr^{-1}	最大摂食速度	(17)
	D_{FFG}	4.17×10^{-5}	hr^{-1}	死滅速度	(17)
	e_{FFG}	0.6		同化効率	(17)
	E_{FFG}	1.63×10^{-3}	hr^{-1}	羽化速度	(13)
	g_{FFG}	0.4		総成長率	(17)
	C_{Bent}	4.0×10^1	g/m^2	底生動物に関する環境容量	(13)
水中物質	a_{CD}	0.15		溶存有機炭素生成割合	(13)
	a_f	0.25		無機化に伴う余剰物生成割合	(22)
	a_{SH}	0.7		破砕食者の破砕排糞比	(13)
	k_{mic}	6.25×10^{-5}	hr^{-1}	粗粒状有機物の分解速度	(12)
	a_{NPP}	0.85		溶脱・分解における栄養塩生成割合	(13)

表-3 1次河道上流端境界条件

物質・生物	記号	単位	値
粗粒状有機物	CPOM	g/m^3	0.010
微粒状有機物	FPOM	g/m^3	0.200
溶存有機態炭素	DOC	$g-C/m^3$	0.500
アンモニア態窒素	NH_4-N	$g-N/m^3$	0.005
亜硝酸態窒素	NO_2-N	$g-N/m^3$	0.005
硝酸態窒素	NO_3-N	$g-N/m^3$	0.450
リン酸態リン	PO_4-P	$g-P/m^3$	0.035
溶存酸素	DO	$g-O_2/m^3$	8.000
植物プランクトン	P	g/m^3	0.100
動物プランクトン	Z	g/m^3	0.010

表-4 初期条件

物質・生物	記号	単位	値
粗粒状有機物堆積物	Se_{CP}	g/m^2	0.20
微粒状有機物堆積物	Se_{FP}	g/m^2	0.20
付着性藻類	A	g/m^2	1.00
付着性他栄養生物	Het	g/m^2	1.00
底生動物	B _{FFG}	g/m^2	0.50

果との比較を行う。図-9 に各観測所(図-4 中の①～⑤)における観測値と解析値における硝酸態窒素の年間平均を示す。また、図-10 に、上川原観測所(図-4 中の①)において 1 時間毎に自動観測されている溶存酸素濃度の観測値(10 日平均値)と解析値を示す。図-9 より硝酸態窒素濃

図-8 水温流程変化の比較(観測, 解析)

図-9 年間平均硝酸態窒素の比較(各観測所)

図-10 溶存酸素経年変化の比較(上川原観測所)

度については、全体的に解析値は観測値を下回っており、定量再現のレベルには達していない。一方、溶存酸素濃度については、濃度の絶対値および年間変化の傾向を概ね再現出来ている。硝酸態窒素などの栄養塩濃度は、流域からの負荷特性の影響を強く受けるが、溶存酸素濃度は曝気、溶出、光合成など河川内のプロセスがその濃度の決定に支配的であることが知られている。従って、本モデルでは、河川内のプロセスが支配的な要因となる水質項目については、ある程度の再現性を有するものの、流域負荷の影響を強く受ける溶存態栄養塩などの再現性を向上させるためには、流域流出負荷推定モデルなどとの結合が必要と思われる。

(2) 感度分析

前節で述べた通り、実測との比較によるモデル検証は、未だ限定的にしか行えない状況である。従って、モデルの適用可能性やモデル自体が持っている特性を把握するには、計算で用いたパラメータの感度分析を行うことが有用と思われる。一方、モデル中のパラメータの数は多

く、全てのパラメータの感度分析結果を掲載するのは困難であるため、ここではパラメータの中でも計算結果に影響の大きかった、藻類の最大比増殖速度(一次生産)、剥離速度(平水時の剥離)、外来有機物の供給量(落葉供給量)、最大代謝速度(生態系代謝能)、底生動物の最大摂食速度(二次生産)と環境容量についてそれぞれ $\pm 20\%$ 変動させた場合の、計算結果の応答について記述する。図-11 に中流域(本川中流域の下流端)における、粒状有機物のサイズの割合を示す粗粒状有機物と微粒状有機物の比(CPOM/FPOM)を横軸、生態系の生産代謝構造を表す一次生産と群集代謝量の比(P/R)を縦軸にとった場合の、感度分析結果を示す。ここで、P/R 値は光合成に伴う酸素供給量と、生物代謝・微生物分解に伴う酸素消費量より定量化している。図-11 より、底生動物の最大摂食速度、環境容量の変化は、他のパラメータと比較すると生産・代謝構造や有機物サイズと言った河川生態系に対する影響度は小さい。最大代謝速度は、生産代謝構造や有機物の無機化に直接影響するが、付着性藻類生産速度と比較

するとその影響は小さい。以上より、河川物質循環プロセスの中で、藻類一次生産の影響が強いことがわかる。

境界条件、初期条件が計算結果に及ぼす影響を把握するため、境界条件について全ての物質を±50%変動させた場合と、初期条件を-50%とした場合の計算結果について検討する。図-12 に、上流域・中流域・下流域において、CPOM/FPOM を横軸、P/R を縦軸にとって示した、初期条件、境界条件の感度分析結果を示す。図-12 中には、図-11 で示した付着藻類の一次生産速度に関する関数分析結果も併せて示している。付着藻類の生産速度に関する感度分析と境界条件、初期条件の変化に対する応答を比較すると、藻類生産速度、初期条件、境界条件の順で、グラフの縦方向の変化(立ったグラフ)から横方向の変化(寝たグラフ)が大きい傾向へと変化している。グラフの縦方向の変化は河川生態系内の生産・代謝構造(有機-無機の交換構造)への影響を示し、横方向の変化は有機物のダウンサイジングへの影響を示していることを考えると、藻類生産速度は、河川内の有機-無機間の回転効率への影響が大きく、境界条件の変化は有機物のサイズ変化への影響、初期条件は両者へ強い影響を与えている。

(3) 底生動物群集構造

底生動物について、空間的な変化を見るために春季(5/18)の本流における各底生動物の流程分布を示す(図-13)。これより、河畔林を伴う上流域においては破碎食者が優占し、中流になるにつれて付着藻類を摂食する刈取食者が生息し始め、下流域においては堆積物食者が優占していることが分かる。この傾向は河道網構造を考慮せず一本の線として解析を行った戸田ら¹³⁾も同様の傾向を得ている。今回の研究では、さらに実際の流域を意識した流域の河道網構造を考慮しても、河川連続体仮説で提唱されている底生動物の流程に沿う群集構造変化が現れることが示されている。

(4) 有機物の物質収支

本研究で開発したモデルの持つ強みとして、流域内の物質収支構造を小流域毎や時期別(季節別あるいは平水時・洪水時の別など)に切りだして比較できる点があげられる。その一例として、物質収支を揖保川流域における本川(上流域、中流域、下流域、下流端)、支川の引原川、栗栖川、林田川の7つの景観に分けて示す。図-14 に、粗粒状有機物・微粒状有機物・溶存態有機物・動植物プランクトンによって構成されている有機物について、流域下流端の流出量を100とした場合の年間の物質収支を示す。図-14 中のボックスは各景観の本流を表しており、実線の矢印が各景観上下流端での流入流出を示し、破線の矢印は各景観の本流に横流入として合流する量を

図-11 パラメータの感度分析(中流域)

図-12 初期条件・境界条件の影響

図-13 底生動物の本川における流程分布(5/18)

を示す。各ボックス中の数字は景観内での有機物の増減、棒グラフは各プロセスに伴う増減を示している。

図-14 をみると、全ての景観において付着性藻類の剥離による有機物の増加の影響が大きい。沈殿・巻上による河床に堆積する有機物の交換は、主流路においては上流域の景観を持つ本川上流域と引原川では平衡状態に近いが、その他の景観では蓄積する傾向にある。また、氾濫原においても、年間3回の冠水においても、剥離した

図-14 有機物の収支 (年間)

図-15 有機物の収支 (洪水時)

付着藻類が流下し、氾濫原に多く蓄積しており、年間の物質収支に大きな影響を及ぼしていることがわかる。図-15に、年間の下流端からの流出量を100とした場合の、洪水時の各景観での物質収支を示しているが、年間の36.3%もの有機物が洪水時に下流端から流出していることが分かる。これは、洪水期間中に下流端を流れる流量が年間合計流量の14.4%であることと比較すると、河川

内の物質循環において、出水・氾濫原の影響を考慮することの重要性がわかる。

(5) 河川連続体仮説との比較

流域全域における物質循環・生態系の特徴を表現するにあたり、生産・代謝構造を示す指標としてP/R、有機物のダウンサイジングを表わす指標としてCPOM/FPOM

を用い、それらが河道位数によってどのように変化する
か検討した(図-16)。ここで河道位数とは、最上流の河道
を1次河道とし、同じ位数の河道が合流した場合に次数
が1つずつ上がるよう定義される河道類型化の一手法で
ある。最上流に位置する1次河道では河畔林による日射
遮蔽効果より付着性藻類が繁茂しにくいいため、生産代謝
比は小さい値となっている。河道位数3では、河畔林に
よる日射遮蔽の影響も少なく、付着性藻類による光合成
が活発となり生産代謝比は高くなっている。河道位数4
では水深の増加により河床日射量が弱まることで、河道
位数3と比較すると生産が抑制されることに加えて、水
温が高いことから代謝が活発になり、生産代謝比が小さ
くなっている。季節による傾向の違いを見ると、日射量
や水温の影響で付着性藻類が繁茂しにくい冬季では、年
間や夏季でみられるような河道位数による変化が小さか
った。これは、水温が低く生物の活性が低いことによる。

CPOM/FPOM 比を見ると、河道位数が大きくなるにつ
れて、小さくなっていることわかる。これは、上流部で
陸域より供給された落葉・落枝等の外来有機物が、可溶
性物質への溶脱・微生物分解・底生動物による破碎作用
により分解されることによる。秋季で高い値を示すのは、
陸域より供給される落葉由来の外来有機物が多いこと
による。図-17 には、河川連続体仮説で提唱されている河
道位数と生産代謝比、河道位数と粒状有機物のダウンサ
イズニングの傾向を示すが、流域河道網を対象とした本数
値解析においても、河川連続体仮説で提案されている河
道内の物質輸送・生産・代謝構造と同様の生産・代謝構
造、有機物ダウンサイジングが生じていることが分かる。

5. 結論

本研究では、低次生態系を考慮した数値河川生態系モ
デルを構築し、揖保川流域河道網を対象として解析を行
った。その結果、以下の結論を得た。

- 1)流域河道網全域の水温構造や溶存酸素の時間変化を大
局的に再現できた。
- 2)本解析モデルを用いることで、河道位数と生産代謝比
の関係といった、流域全域における生物生産・代謝構造、
有機物のダウンサイジングの特徴、小流域ごとの物質収
支の特性を定量表現できる。

本研究で開発されたモデルは、現地調査の困難さから、
実測データとの比較が未だ十分には行えていない。また、
実際の流域に存在する堰などの横断構造物をどのように
扱うかなど、今後の課題として残されている。しかし、
本研究より、流域全域の物質・エネルギーフロー、低次
生態系の構造を定量評価するための枠組みを構築するこ
とができ、むしろ今後の展開として、モデルから予測さ

(a)一次生産量/群集代謝量

(b)粗粒状有機物/微粒状有機物

図-16 河道位数との関係

図-17 河川連続体仮説に基づいた流程分布¹⁾

れる結果を用いて、河川の物質循環を把握していくため
により重点的に実測を行っていくなくてはならないプロ
セス、箇所等を絞り込んでいくことなどに活用できるも
のと期待される。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費補助金(課題番号：
24560620)の補助を受け実施した。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. and Cushing C.E : The river continuum concept, *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sci.*, 37, pp.130-137, 1980.
- 2) Junk, W. J., Edwards, R. T. and Risley, R. : The flood pulse concept in river-floodplain systems, *Canadian J. Fisheries Aquatic Sci.*, 106, pp.110-127, 1989.
- 3) Gomi, T., Sidle, R. C. and Richardson, J.S. : Understanding processes and downstream linkages of headwater systems, *BioScience*, Vol.52, pp.905-916, 2002.
- 4) 石田和也, 宮本仁志 : 気候・地質・土地利用の影響を考慮したリンクマグニチュードによる河川水系の流況推定, 土木学会論文集 B1, Vol.68 (4), I_487- 492, 2012.
- 5) 宮本仁志, 道奥康治 : 流域地形則を用いた河川水温

- 分布モデル, 水工学論文集, 52, pp.1069-1074, 2008.
- 6) 浦野仁志, 宮本仁志, 前羽洋, 戸田祐嗣: 河川流域の流水水温形成における基底流水水温の影響について, 土木学会論文集 B1, Vol.69 (4), I_1681-1686, 2013.
 - 7) Bouwman, A. F., Bierkens, M. F. P., Griffioen, J., Hefting, M. M., Middelburg, J. J., Middelkoop, H. and Slomp, C. P.: Nutrient dynamics, transfer and retention along the aquatic continuum from land to ocean: towards integration of ecological and biogeochemical models, *Biogeosciences*, 10, pp.1-23, 2013.
 - 8) 高岡広樹, 戸田祐嗣, 辻本哲郎: 伊勢湾流域圏を対象とした水・物質の流出解析に関する研究, 河川技術論文集, Vol.16, pp.305-310, 2010.
 - 9) 戸田祐嗣, 池田駿介: 礫床河川の物質循環シミュレーション, 土木学会論文集, No.635, pp.67-83, 1999.
 - 10) Yang, M. D. and Sykes, R. M.: Trophic dynamic modeling in a shallow eutrophic river ecosystem, *Ecological Modelling*, 105, pp.129-139, 1998.
 - 11) Bartell, S. M., Lefebvre, G., Kaminski, G., Carreau, M. and Campbell, K. R.: An ecosystem model for assessing ecological risks in Quebec rivers, lakes and reservoirs, *Ecological Modelling*, 124, pp.43-67, 1999.
 - 12) 溝口裕太, 戸田祐嗣, 辻本哲郎: 粗粒有機物の供給・分解・輸送過程を考慮した河川水系一貫物質循環解析, 水工学論文集, 55, pp.1333-1338, 2011.
 - 13) 戸田祐嗣, 溝口裕太, 野尻晃平, 山下貴正, 辻本哲郎: 河川連続体仮説と洪水パルス仮説を統合した河川水系一貫物質循環解析, 土木学会論文集 B1, Vol.69 (4), I_1687-1692, 2013.
 - 14) Shreve, R.L.: Infinite topologically random channel network, *J. Geology*, Vol.74, 1967.
 - 15) 戸田祐嗣, 花井駿介, 辻本哲郎: 天竜川下流河道における植生域の拡大・破壊と土砂捕捉に関する長期予測モデルの開発, 河川技術論文集, Vol. 14, pp.151-156, 2008.
 - 16) 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.
 - 17) 今村正裕, 本多正樹, 松梨史郎, 川崎保夫: アマモ場生態系モデルの開発とその適用, 土木学会論文集 G, Vol.62 (2), pp.229-245, 2006.
 - 18) Saravia, L.A., Momo, F.M., Boffi Lissin, L.D.: Modelling periphyton dynamics in running water, *Ecological Modelling*, 114(1), pp.35-47, 1998.
 - 19) 皆川朋子, 福嶋悟, 萱場祐一, 尾澤卓思: 出水が河床石面付着物に及ぼす影響に関する実験的検討, 河川技術論文集, Vol. 9, pp.475-480, 2003.
 - 20) 北村忠紀, 加藤万貴, 田代喬, 辻本哲郎: 砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究, 河川技術に関する論文集, Vol. 6, pp.125-130, 2000.
 - 21) 赤松良久, 池田駿介: マングローブ水域における物質循環, 土木学会論文集, No.768, pp.193-208, 2004.
 - 22) 中田喜三郎: 生態系モデルー定式化と未知のパラメータの推定法一, *J. Advanced Marine Technology Society*, Vol.8, pp.99-138, 1993.
 - 23) 中谷直樹, 大塚耕司, 奥野武俊: 生態系モデルを用いた環境修復技術の機能評価ーりんくう公園内海の事例一, 土木学会論文集, No.755, pp.13-28, 2004.
 - 24) 清水高男, 皆川朋子, 島谷幸宏: 底生動物の掃流に関する基礎研究, 第 2 回応用生態工学研究会, pp.65-68, 1998.
 - 25) Rubey, W. W. : Settling velocities of gravels, sand and silt particles, *American J. Science*, Vol.25, pp.325-338, 1933.
 - 26) 国土交通省水文水質 DB (<http://www1.river.go.jp/>).
 - 27) 山本晃一: 沖積河川学 堆積環境の視点から, 山海堂, pp.1-7, 1994.
 - 28) 尾花まき子: 流域圏環境管理における河川生態系の保全戦略策定のための基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 2011.
 - 29) 気象庁(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>).
 - 30) 佐々木昌子: 氾濫原河畔植生に由来する有機物の生産・分解・流出過程, 日本生態学会誌, 61, pp.53-61, 2011.
 - 31) 宮本仁志, 前羽洋, 中山和也, 道奥康治: 日射遮蔽と流入水温の影響を補正した河川水温ネットワークモデルの精緻化, 水工学論文集, 55, pp.1243-1248, 2011.
 - 32) 広瀬顕, 岩坪五郎, 堤利夫: 森林流出水の水質についての広域的考察(1), 京都大学農学部演習林報告 60, pp.162-173, 1988.
 - 33) 中海に係る湖沼水質保全計画: 水質モデルの再現計算, 鳥取県・島根県, 2005.
 - 34) 松梨史郎, 井野場誠治, 下垣久, 宮永洋一: 手賀沼における流動・水質・底質のシミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の湖内水質への影響, 電力中央研究所報告, 財団法人電力中央研究所・我孫子研究所, 2001.

(2013.7.30 受付)

NUMERICAL MODELING OF RIVER ECOSYSTEM AND APPLICATION TO CHANNEL NETWORK STRUCTURE IN A RIVER BASIN

Yuji TODA, Takamasa YAMASHITA, Hitoshi MIYAMOTO
and Tetsuro TSUJIMOTO

A numerical simulation model was proposed to describe the material cycling and the river ecosystem in river channel network, in which river continuum concept and flood pulse concept were modeled and the stream order and the link magnitude were employed to characterize the river channel network structures. The model was applied to the Ibogawa-river basin in Hyogo, Japan. The results of the numerical simulation show that the present simulation model can describe the longitudinal distribution of the production/respiration ratio and the decomposition of coarse particulate organic matter along stream.