一次元河川生態系モデルの開発と 佐波川への適用

MODELLING AND APPLICATION OF ONE-DIMENSIONAL RIVER ECOLOGICAL MODEL IN SABA RIVER

赤松良久¹・上鶴翔悟²・高村紀彰³・永野博之⁴

Yoshihisa AKAMATSU, Shogo KAMITSURU, Yoshiaki TAKAMURA and Hiroyuki NAGANO

¹正会員 博(工) 山口大学大学院准教授 理工学研究科社会建設工学専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²学生会員 修(工) 山口大学大学院生 理工学研究科社会建設工学専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³非会員 修(工) (株) 中電技術コンサルタント (〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3番30号)

⁴正会員 博(工) (株) 八千代エンジニアリング 名古屋支店 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦3-10-33)

In the river assessment, it is necessary to discuss the mass balance in the river ecosystem using river ecological model. A new model of river ecosystem consists of one-dimensional unsteady flow, one-dimensional calculation of bed variation, heat balance, water quality and biological model. This model was applied to Saba River, where water quality and biological environments have been observed at four points in the river basin in two month intervals. The temporal variations of water level, water temperature, dissolved oxygen and amount of attached algae obtained from this model show a good agreement with the observed results, indicating that this model is valid for simulating the mass balance in the river ecosystem.

Key Words : ecological model, river ecosystem, assessment method, Saba River

1. はじめに

水環境に関する現象理解のための物質収支に着目した研究は1914年頃から始まった。その後、コンピューターの性能の向上とともに生物や各種物質を考慮した物質収支モデルが開発され、閉鎖性の湖沼や内湾を対象として物質収支モデルをベースとした様々な生態系モデルが開発されてきた¹⁾。しかし、開放性が強く、地形が大きく変化する河川においての物質収支モデルの開発は十分に進んでいない。

近年では、河川の各区間の特徴的な物質循環を考慮したモデルが開発されている。例えば、戸田ら²⁾は礫床河川において生物の一次生産に着目した物質循環を明らかにしている。また、赤松ら³⁾は河川感潮域のマングローブ水域において地下浸透流も考慮した物質循環モデルによって、溶存態栄養塩の輸送特性を明らかにしている。しかし、これらのモデルは対象域の物質循環の特徴を詳細に評価可能であるというメリットはあるものの、開放性が高く上下流との連続性が重要となる河川においては境界域での詳細な現地調査が必要不可欠である。溝口ら

⁴⁾は粗粒状有機物のサイズ変化・分解・輸送過程を考慮した水系一貫物質循環モデルを構築し、流量・川幅が単純に増加するモデル河川に適用している。また、そのモデルを実河川流域に適用しているものの、実測データとの比較は十分に行われていない⁵⁾。さらに、河川の物質循環と同時に、河床変動を考慮可能な生態系モデルの構築は行われていない。

そこで、本研究では物質循環・河床変動を考慮し、河川水系について上流域から下流域まで一貫して取り扱うことができる一次元河川生態系モデルの開発を行うと共に、実河川への適用として山口県の一級河川である佐波川を対象に、数値解析を行うことを目的とする。

2. 河川生態系モデル

(1) モデルの概要

本研究で使用する一次元河川生態系モデルは、(a)河川の流れ場を解析する一次元不定流モデル、(b)水温を解析する熱収支モデル、(c)水質を解析する物質輸送モデル、

図-1 河川生態系モデルの概要図

図-2 河川生態系における物質循環

(d)生物バイオマスを解析する生物成長モデル、(e)河床形状を解析する河床変動モデル、の5つのサブモデルにより構成されている（図-1）。なお、断面形状は一般断面で計算を行い、各生物・物質量は流水断面平均値である。物質輸送モデルで扱う物質として、粒子態有機炭素POC、溶存態有機炭素DOC、アンモニア態窒素濃度 NH_4-N 、亜硝酸態窒素濃度 NO_2-N 、硝酸態窒素濃度 NO_3-N 、リン酸態リン濃度 PO_4-P 、溶存酸素濃度DOを扱い、堆積物として粒子態有機物堆積量 Se_A を扱う。生物成長モデルでは、付着藻類、植物プランクトン、動物プランクトン、底生動物、魚類を扱う。これらの生物と物質を考慮した河川生態系における物質循環を図-2に示す。

(2) 河川流動モデル

流れ場の解析には以下の2式を用いた。

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{g}{2} Ah \right) - gA I_e \quad (2)$$

ここに、 A ：流水断面積[m²]、 Q ：流量[m³/s]、 z ：河床高[m²]、 g ：重力加速度[m/s²]、 h ：水深[m]、 I_e ：エネルギー勾配である。

(3) 熱収支モデル

水温 T_{ws} [°C]は、式(3)に示す一次元移流拡散方程式により求めた。

$$\frac{\partial B h T_w}{\partial t} + \frac{\partial B h u T_w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (B h D_x \frac{\partial T_w}{\partial x}) + B \frac{TE}{c_w \rho_w} + q_s (T_{ws} - T_w) \quad (3)$$

$$D_x = (0.01B)^{\frac{4}{3}} \quad (4)$$

$$TE = R_{net} - I_e - H_T - G \quad (5)$$

ここで、 B ：川幅[m]、 h ：水深[m]、 T_{ws} ：横流入水の水温[°C]、 D_x ：分散係数[m²/s]、 $c_w \rho_w$ ：水の熱容量[J/K/m³]と

する。 TE は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[W/m²]であり、大気と接触する水面において水柱へと供給される正味のエネルギーである正味放射量 R_{net} [W/m²]、水表面からの蒸散の際に奪われる潜熱量 I_e [W/m²]、大気を加熱する際に使われる顕熱量 H_T [W/m²]、河床面において河川水から河床へ伝わる河床伝熱量 G [W/m²]の合計である⁶⁾。

(4) 物質輸送モデル

各物質（POC、DOC、 NH_4-N 、 NO_2-N 、 NO_3-N 、 PO_4-P 、DO）および動植物プランクトンに関しては以下の移流拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial C}{\partial x} \right) + C * \quad (6)$$

ここに、 C ：水深平均物質濃度、 Dis ：物質拡散係数である。また、右辺第二項は移流、拡散を除く生成・消滅項を表す。各物質に関する生成・消滅項の詳細^{3), 5)}は割愛する。

(5) 生物成長モデル

a) 付着性藻類

付着性藻類の現存量 A [g/m²]は次式で表される。

$$\frac{dA}{dt} = G_A - PA - k_{ae} A - G_{SR} \quad (7)$$

ここに、 P ：藻類の剥離による減少率[s⁻¹]、 k_{ae} ：代謝速度[s⁻¹]、 G_{SR} ：底生動物の成長による増加量[g/m²/s]である。右辺第1項は光合成による増殖、第2項は剥離による減少、第3項は代謝・分解に伴う減少、第4項は底生動物の摂食による減少を表している。なお、藻類の剥離による減少率 P は赤松ら⁷⁾を参考に算出する。ここで、減少率 P は河床変動モデルで計算される掃流砂量の関数である。

b) 底生動物

底生動物のモデル化については、今村ら⁸⁾を参考として行った。底生動物の現存量 B_{SR} [g/m²]は次式で表される。

$$\frac{\partial (B_{SR})}{\partial t} = G_{SR} + (1 - e_{SR}) G_{SR} - (e_{SR} - g_{SR}) G_{SR} - D_{SR} B_{SR} - E_{SR} B_{SR} \quad (8)$$

ここで、 e_{SR} ：底生動物の同化効率[-]、 g_{SR} ：底生動物の総成長率[-]、 D_{SR} ：自然死亡速度[s⁻¹]、 E_{SR} ：羽化速度[s⁻¹]である。右辺第1項 G_{SR} は摂食による増殖、第2項は排糞、第3項は排泄による減少、第4項は自然死亡による減少、第5項は羽化による減少である。

(c) 魚類

魚類については、李⁹⁾を参考に浮魚、底魚を分類し、モデル化を行った。それぞれの現存量 $W[g/m^2]$ は以下のように表される。

$$\frac{\partial W}{\partial t} = E - F - U - R - D \quad (9)$$

ここで、 E ：摂餌量[g/m²/s]、 F ：排糞量[g/m²/s]、 U ：分泌量[g/m²/s]、 R ：呼吸量[g/m²/s]、 D ：死亡率[g/m²/s]を表している。

(6) 河床変動モデル

全流砂の連続式は全ての粒径の流砂の交換を考慮し次式で表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \times \frac{\partial \sum (q_{bi} B)}{\partial x} + \sum_i (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) \right] = 0 \quad (10)$$

ここに、 λ ：河床材料の空隙率、 η ：平均河床高[m]、 w_{fi} ：粒径別浮遊砂の沈降速度[m/s]、 c_{bi} ：河床付近の粒径別浮遊砂濃度[g/m³]とする。また、 q_{bi} ：粒径別単位幅掃流砂量[g/m²]、 q_{sui} ：粒径別浮遊砂の単位面積当たりの河床からの浮上量[g/m²]についてはそれぞれ粒径別の芦田・道上の式¹⁰⁾、Itakura and Kishiの式¹¹⁾を用いた。

3. 佐波川への適用

(1) 対象河川の概要と現地調査

佐波川は山口県のほぼ中央に位置する幹川流路延長56km、流域面積460km²の一級河川である。佐波川流域図と計算対象とする区間を図-3に示す。対象とする区域は4k400～23k200とし、さらに堰による影響を考慮するため、区間1～3と分割する。区間1は島地川合流後の漆尾観測所を上流端とし、下流端を上右田堰直上とする。区間2は、上右田堰の直下から、防府総合堰直上間とする。また、区間3は、防府総合堰直下から佐野堰直上間とし計算区間を設定した。

また、数値解析に先立ち、対象区間内において現地調査を行った。図-4に示す計算区間において、区間1の上流端にあたる漆尾地点と新橋地点に水温計を2013/1/1～2013/10/22にわたり設置した。さらに、区間3の新橋地点において、日射計による計測を2013/5/13～2014/1/9、DO計による計測を2013/10/4～2014/1/9に行った。また、各

図-3 佐波川流域の概要

図-4 佐波川流域の観測地点

計算区間の下流端に当たる堰の直上に水位計を設置し2013/9/15～2014/1/9にわたり計測した。また、2013/8/22、8/23において計算区間内から堰の直上直下を中心に45地点にわたり、水サンプルの採取を行い、栄養塩濃度の分析を行った。さらに、2013/3/11、6/16、8/19、10/23、12/27に図-4に示す4地点において、水質（DO、T-N、NO₃-N、NH₄-N、NO₂-N、T-P、PO₄-P）、魚類、底生動物、付着藻類のサンプリングを行った。魚類に関しては単位面積当たりの湿潤重量を、底生動物および付着藻類に関しては乾燥重量を計測した。

(2) モデルの再現性の検証

本モデルの検証計算は、まず流れ場の再現性の検討として計算水位と実測水位の比較・検討を行った後、水温、付着藻類量、溶存酸素濃度の再現性についての検討を行った。

a) 流れ場の再現性の検討

流れ場の再現性の検討は、1400[m³/s]を超える出水を記録した2009/7/19 10:00～7/22 9:00を計算対象期間とし（図-5）、区間3において、計算より得た水位と国土交通省より提供されている新橋観測所の実測水位との比較を行った。上流端流量は、新橋観測所の実測値を与え、下流端は等流水深とした。また、マンニングの粗度係数については、0.035を与えた。

図-6に新橋観測所における水位の実測値と計算値の比較を示す。水位の時間的な変動については実測値と計算値は概ね一致していることが分かる。流量のピーク時である2009/7/21 14:00において新橋観測所の実測値は7.06[m]であるのに対して、同時刻の計算値は7.15[m]であることから、流れ場については十分な再現性があると言える。

b) 水温・付着藻類量の再現性の検討

熱収支・付着藻類モデルの再現性の検討については、2013/6/1 1:00～7/1 0:00の一ヶ月間を対象期間として行った。選定理由としては、2013/5/29に150[m³/s]程度の出水があり、6/20に再び300[m³/s]を超える出水が存在するため、付着藻類の出水後からの成長の過程を評価しやすいためである。境界条件として、各区間の上流端へ観測所の実測流量を与え、下流端は等流水深とした。各観測所における流量を図-7に示す。また、熱収支モデルの解析に用いる気象条件として、日射量については新橋地点に設置した日射計のデータを用い、気圧・気温データについては気象庁より提供された山口観測所の値を一樣に与えている。上流端の水温データについては設置した水温計の実測値を与えることとする。付着藻類量の初期値については出水による剥離後と考え、一樣に0.001[g/m²]を与えて解析を行った。

新橋地点に設置した水温計の観測値と計算値の比較を図-8に示す。また、赤の実線で上流端へ与えた観測値の水温を表している。水温は流下に伴い日射の影響等により上昇する傾向にあり、観測値、計算値ともに上流端値より上昇していることが分かる。また、水温の日変化の傾向について観測値と計算値を比較すると、計算値の方が若干過大評価になる時期が存在するが比較的良好に一致している。このことから、本モデルで用いた熱収支モデルの再現性は高いと考えられる。

図-9に新橋地点における付着藻類量の計算結果と、2013/6/16 11:00時点における観測による実測値を示す。計算値は、計算開始から徐々に増加を始め、6/18 16:00において最大値9.4[g/m²]をとり、飽和状態になることがわかる。しかし、流量の増加した6/19 12:00において掃流力

図-5 流れ場の検討に用いた新橋観測所流量

図-6 新橋観測所における水位の実測値と計算値の比較

図-7 水温・付着藻類量の再現性の検討に用いた各観測所流量

の増大から藻類の剥離が起こり、急激にゼロへと漸近する。その後、増加を始めるものの、再び250[m³/s]を超える出水によりゼロへ近づくという動向を示している。また、観測による実測値と計算値をみると、付着藻類量に関しては少し過大評価となることが分かる。

c) 溶存酸素濃度の再現性の検討

溶存酸素濃度の再現性の検討は、2013/10/12 0:00～10/13 0:00における日変動を対象として行った。ここでは、区間3に位置する新橋地点に設置したDO計の実測値と解析値の比較を行うこととし、流量は新橋観測所の実測流量を与え、下流端は等流水深とした。

図-10に新橋地点における溶存酸素濃度の計算結果とDO計による実測値を示す。溶存酸素濃度の日変動は日

中に付着藻類の光合成による影響を受けて上昇し、日射がなくなる夜間には生物項の呼吸による消費や、有機物の分解等の作用により値が小さくなることが知られている。観測値、計算値共に、日射量がピークになる午後12:00前後で溶存酸素量は、最大値をとっており、その後減少していくという変化を見ることができる。このように、本モデルの溶存酸素濃度の解析は実河川においても適用可能な再現性を持つことが分かった。

(3) 物質・生物量の長期時系列変化および縦断変化

本生態系モデルの長期間における時系列及び縦断変化を見るため、2013/9/16 1:00～2013/10/24 0:00の期間において数値解析を行った。流量は真尾観測所を除く、各観測所の実測流量を与えた。計算に用いた流量を図-11に示す。その他気象データ等の境界条件については、実測データを与えることとする。

図-12に長期計算における新橋地点での溶存酸素濃度、水温、付着藻類量の計算結果を示す。溶存酸素濃度の実測値については計測開始日の2013/10/5以下のデータを示している。また、水温は同条件における計算値を表している。付着藻類量については本条件下において計算開始から1週間程度で飽和状態となりそれ以降頭打ちの状態推移していくことが分かる。溶存酸素濃度は河川水の水温の影響を受け、水温が高いとベースラインは下がり、水温が低くなるとベースラインは高くなるという傾向が計算値、実測値共に現れている。

図-13に $\text{PO}_4\text{-P}$ の縦断変化の観測値と計算値の比較を示す。計算値については区間1の上流端へ観測値を与えている。流下にとまなう縦断変化はほぼ見られず、 $0.03[\text{g}/\text{m}^3]$ 程度の値で流下していることが分かる。一方、観測値は赤丸で示すような支流等の影響を受け、計算値のように値の推移が単調ではないということが分かる。この原因は本計算においては栄養塩等の横流入を適切に考慮できていないためであると考えられる。

図-9 新橋地点における付着藻類量の観測値と計算値の比較

図-10 新橋地点における溶存酸素量の観測値と計算値の比較

図-11 長期計算に用いた各観測所流量

図-8 新橋地点における水温の観測値と計算値の比較

図-12 新橋地点における溶存酸素量・水温・付着藻類量の時系列変化

4. 結論

本研究は、河川の上流から下流まで一貫して取り扱うことができる一次元生態系モデルの開発を行い、山口県佐波川において本モデルを適用し、モデルの有用性を検証した。その結果、流れ場に関しては高い再現性を有することがわかった。また、水温や溶存酸素濃度に関しても実測で得られた流下による水温の変化や溶存酸素濃度の日変動をよく再現することが明らかとなった。付着藻類量については過大評価になることが分かった。さらに、対象とした区間のリン酸態リン濃度の縦断分布については再現性が低いことが分かった。これは、支流からの栄養塩負荷を適切に考慮できていないためであると考えられる。このような横流入を含めた流域からの負荷を適切に取り入れることが今後の課題である。

謝辞：本研究は国土交通省受託研究「佐波川の河床掘削・堰撤去が河川環境に与える影響の研究」（研究代表者：赤松良久）の一環として行われている。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 楠田哲也, 巖佐庸/編:生態系とシミュレーション, 朝倉書店, 2002.
- 2) 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, 2002.
- 3) 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/II-68, pp.193-208, 2004.
- 4) 溝口裕太, 戸田祐嗣: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, 第55巻, pp.1333-1338, 2011.
- 5) 戸田祐嗣, 山下貴正, 宮本仁志, 辻本哲郎: 数値河川生態

図-13 $PO_4\text{-P}$ の縦断変化の観測値と計算値の比較

系の構築と流域河道網への適用, 土木学会論文集G (環境), Vol.69, No. 6, II-127-II-138, 2013.

- 6) 近藤純正:河川水温の日変化(1)計算モデル-異常昇温と魚の大量死事件-, 水文・水資源学会誌, vol.8, No.2, pp.184-196, 1995.
- 7) 赤松良久, 池田駿介, 浅野誠一郎, 大澤和敏: ダム下流における糸状藻類の強制剥離に関する研究, 土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp.285-295, 2009.
- 8) 今村正裕, 本多正樹: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, No.2, pp.229-245, 2006.
- 9) 李寅鉄, 関根雅彦, 浮田正夫, 中西弘: 沿岸生態系モデルによる瀬戸内海の水産資源量解析に関する研究, 土木学会論文集, No.566/VII-3, pp.81-93, 1997.
- 10) 芦田和男, 道上正規: 移動床ながれの抵抗と掃流砂に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, Vol.206, pp.59-69, 1972.
- 11) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, *Proc.ASCE*, Vol.106, No.HY8, pp.1325-1343, 1980.

(2014. 9. 30受付)