

河道景観の変遷に着目した 河道通過フラックス算定モデル構築の試み

FLUX ESTIMATING MODEL FOR RIVER CONSIDERING TRANSITION OF RIVER LANDSCAPE

椿 涼太¹・佐藤圭輔¹・戸田祐嗣²・辻本哲郎³
Ryota TSUBAKI, Keisuke SATO, Yuji TODA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹ 正会員 博（工）名古屋大学大学院 工学研究科（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）
² 正会員 博（工）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）
³ フェロー会員 工博 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）

A model estimating fluxes pass through river channel is developed. The transition of the river landscape is taken into account in this model to represent the mechanism of material transport (fluxes such as water flow and sediment transport) influenced by the change of the river landscape. The developed model is designed to estimate the material transport in the macro scale (river basin for spatial scale and several decades for temporal span). The landscape transition estimated by the developed model is validated by comparison with the observed data.

Key Words: Flux, sediment transport, vegetation, river landscape, ecosystem services

1. はじめに

持続的社會を実現するためには、化石燃料等を消費するいわゆる高エネルギー投入型サービスにより駆動している現在の社會を、循環型エネルギーに基づき持続的な、生態系サービスに支えられた社會へと変化させていく必要がある¹⁾。生態系サービスは、物質循環システムに沿って発揮されるため、人間活動により改変された物質循環システムは、自然本来の状態へと近づけていくよう修復していくことが、生態系サービスの向上につながると考えられる。よって、持続的社會を実現するためには、まず、自然状態や人為影響を受けた物質循環システムを評価する必要がある。次に、物質循環に沿った生態系サービスの発揮のメカニズムを理解し、そのサービスを見積もる必要がある。以上の二点が可能となることで、物質循環や生態系サービスを適切に管理することができ、高度に生態系サービスを活用する持続的社會の実現が可能となるのである。

自然の物質循環の中で、社会的な活動に関連が強い地表付近での動態においては、土壌および植生が大きな役割を果たし²⁾、主に重力により駆動されるため、その空間スケールは主に流域に規定され、また流れが集中する河道が基幹的経路となる。本研究では、陸域での物質循環（図-1）や、これに沿って発揮される生態系サービスを評価し、環境修復技術による効果を算定することを最終的な目標とし、その為に必要かつ重要である河道での物質フラックスの評価モデルを開発することとした。モデル化においては、河道内で発揮され

る生態系サービスを評価するために重要となるリーチスケールでの河道内地形（標高分布）、河床材料や植生の被覆状況、変動性といった河道景観の変化を考慮する機構を組み入れた。河道景観の変遷の評価を行うことにより、そこで発揮される生態系サービスを適切に評価することができるだけでなく、生態系サービスによる物質循環への効果というフィードバック効果も取り入れることができる。取り扱う時間スケールについては、出水プロセスを評価するため時間（Hour）レベルでフラックス変化を取り扱うとした。このような時空間スケールでの現象を評価するとともに、社會の持続性評価を行うことを念頭に、流域レベル・数十年レベルの時空間スケール（マクロスケール）での変遷を、現実的なリソースの範囲で評価することも配慮しつつ、モデル化を行った。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

河道内を通過する土砂フラックスの評価や、土砂フラックスとの強い相互作用があり河道の景観形成にも強く関連する、河道植生の消長に関しては様々な基礎的・応用的研究がなされている。

河道内の植生の破壊（流失）機構については、植生への直接的な流体力の作用による破壊^{たとえば3),4)}と、植生の基盤となっている河床面の洗掘による流失^{たとえば5)}という二つの機構が存在する⁶⁾。

河道地形に及ぼす植生の影響に関する検討に関し

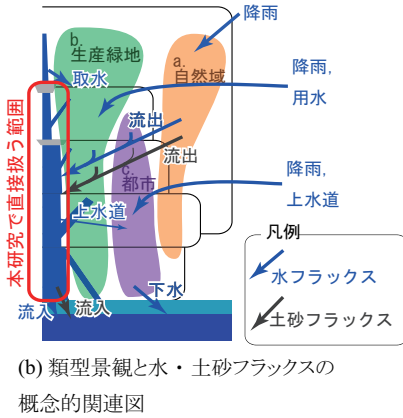
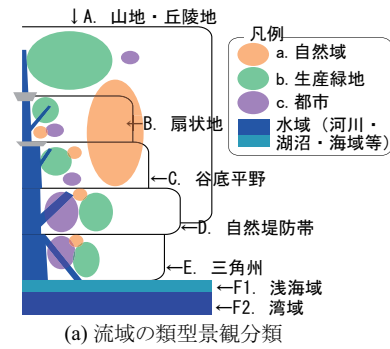


図-1 流域の類型景観区分と物質移動経路

ては、水路実験⁷⁾や現地観測^{8),9),10)}および数値計算^{6),11),12),13),14),15)}など様々なアプローチで取り組まれているが、これらは主にリーチ～セグメントスケールでの植生域拡大や河道地形の変化といった河道景観の変遷に着目した研究といえる。

河川管理・計画での利用を念頭におき、流入土砂や流況の変化といったセグメントをまたがる連続性を意識しつつ河道内植生および土砂動態の相互作用の評価を行ったものには、藤田¹⁶⁾によるレビューや、井上ら¹⁷⁾、戸田ら¹⁸⁾による複断面による河道モデルを用いた検討がなされている。それぞれの検討では対象河道の特性に合わせて、藤田、井上らは植生域河床上面の摩擦速度が臨界値を超えることにより植生が一気に剥離するモデル化を行い、戸田らについては植生域河床側面に作用するせん断力により植生域が側岸侵食を受けるというモデル化を行っている。これらは、代表的な横断形状の変遷を評価するというモデル化を行っており、リーチスケールの縦断的な地形の効果は考慮されていない。しかし、砂州の発達・移動が見られる砂床河道区間での植生域消長および土砂動態の評価を行うためには、リーチスケールの地形変化や植生域の消長が深く関連する^{たとえば19)}。また、河道内での生態系サービスを評価する上では砂州形成による地形変化（比高分布）が重要な指標となることから、本研究では砂州の発達・移動をモデルに組み入れるとともに、植生域消長との関連付けを行うこととした。

本研究の位置づけを再確認すると、本研究では、複

数のセグメントにまたがるマクロスケールでの河道内での物質動態評価および生態系サービス算定の基盤となる河川モデルを新たに構築する。水・土砂フラックスの評価には、リーチスケールの地形効果を取り込むことで河道景観（砂州形状、表層河床材料、植生被覆状況およびこれらの変動性）の変遷も評価する。本モデルは図-1に示した流域スケールでの物質循環の、過去から将来に渡る数十年レベルでの変遷を評価する中での基幹的経路である河道での物質フラックスおよび河道景観の変遷の評価モデルとして利用できるモデルの開発を行うものである。

3. 河道モデルの構成

(1) 流れの評価

準二次元不等流計算を行い縦断水面形、横断流速分布および縦横断の河床変動を評価する。横断面の分割では1断面を濬筋、もう1つの断面を砂州干出域（植生域）とする。砂州は左右両岸や濬筋の間に形成されるが、各断面での植生域や濬筋はそれぞれ1つにまとめて、2つの断面により代表して評価し、断面幅および代表高さを流況に合わせて逐次調整していく。高水敷が設置されている場合については、高水敷分として1断面追加して計3つの横断面分割により河道を評価する。

各分割断面での速度 u は、以下の運動方程式により評価し、ニュートン・ラプソン法を用いて収束計算により求める²⁰⁾。

$$\begin{aligned} \frac{u^2 s_n^2}{R^{4/3}} + f \frac{(u - u_{left})|u - u_{left}| \min(h_s, h_{s,left})}{gA} \\ + f \frac{(u - u_{right})|u - u_{right}| \min(h_s, h_{s,right})}{gA} \\ + C_d \frac{\lambda \min(h_s, h_{veg}) u^2}{2gR} = i_e \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 u : 流速 (m/s), R : 径深 (m), f : 境界混合係数, s : 潤辺 (m), g : 重力加速度 (m^2/s^2), A : 通水面積 (m^2), C_d : 植生の抗力係数, λ : 植生の密生度 ($1/\text{m}$), h_s : 断面平均水深 (m), h_{veg} : 植生高さ (m), i_e : エネルギー勾配である。

縦断水面形は次式により順次下流から上流に向かって算出していく。

$$\begin{aligned} \left[h + \frac{1}{A'} \sum_{\text{横断分割}} \left\{ \frac{u^2 A}{2g} + \Delta x \frac{1}{2} \left(\frac{s_n^2 u^2 S}{R^{1/3}} + C_d \frac{\lambda \min(h_s, h_{veg}) u^2}{gR} \right) \right\} \right]_{\text{下流側}} = \\ \left[h + \frac{1}{A'} \sum_{\text{横断分割}} \left\{ \frac{u^2 A}{2g} - \Delta x \frac{1}{2} \left(\frac{s_n^2 u^2 S}{R^{1/3}} - C_d \frac{\lambda \min(h_s, h_{veg}) u^2}{gR} \right) \right\} \right]_{\text{上流側}} \end{aligned} \quad (2)$$

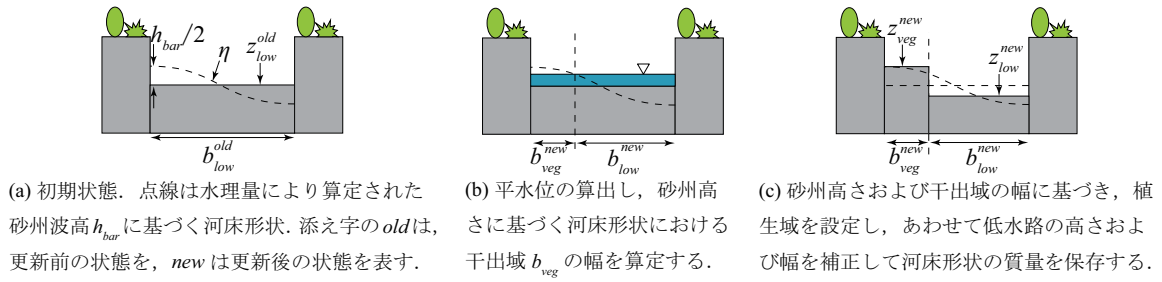


図-2 干出域（植生域）の形成の評価

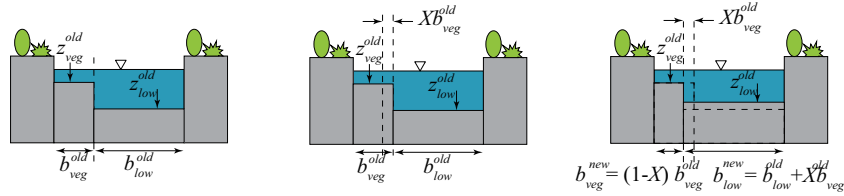


図-3 干出域（植生域）の侵食の評価

ここに、 Δx : 上流側と下流側の分割断面の距離 (m) である.

(2) 土砂移動の評価

土砂移動および河床の洗掘・堆積については混合粒径の浮遊砂および掃流砂を対象とした一次元河床変動モデル（水理公式集例題プログラム集（平成13年版）²⁰⁾）をベースとし、準二次元河道のそれぞれの分割断面での通過土砂および河床変動を評価した. また、土砂の下流側の断面への流下に際しては、縦横断の分割断面の間での流量の配分関係に合わせて流下土砂の配分を行った.

(3) 植生域（干出域）の消長のモデル化

植生は平水時の干出域に進入・成長するものとし、平水時の干出域は、出水時の水理条件により算定される砂州高さ h_{bar} に基づき、この砂州高さと平水位の関係から低水路における干出域の幅 b_{veg} を算定し、この干出域を準二次元モデルにおける低水路断面から植生域（干出域）断面へ移行させる（図-2）. 干出域は出水時に形成された砂州の凸部分に相当するものである. ただし、平水時に干出する部分に、全面的に植生が繁茂することは現実的ではないため植生域の年あたりの最大拡大率を v_{max} とし、それ以上の拡大は単年度では起きないものとした.

出水時には砂州が移動することにより、平衡状態となって砂州の凸部分の形状が保たれたとしても凸部分自体が移動する. また滞筋の変遷による水当りの変化により植生域が侵食され、侵食域の河床材料が低水路部分と交換する. このような機構を取り入れるため、出水時に植生域は図-3 に示すような手順により幅が Xb_{veg} だけ縮小し、その縮小した部分の河床材料を低水路へ移行させる. ここで X は時間ステップあたりの砂州の

移動距離を砂州の流下方向の長さスケールで除したものであり詳細は後述する.

砂州高さ h_{bar} については、半経験的に得られた Ikeda による交互砂州波高の評価式²¹⁾により評価する.

$$h_{bar} = 9.34 \exp [2.53 \operatorname{erf} \{-2.05 + 0.73 \log(b/h_s)\}] h_s / (b/d_m)^{0.45} \quad (3)$$

ここに、 $b = b_{low}$: 低水路の河幅 (m), d_m : 河床材料の平均粒径 (mm) である. $b/h > 100$ では複列砂州の発生領域と考えられる²²⁾ ことから低水路幅 b を半分として式 (3) を計算する. また、 $\tau_* > 0.5$ および $b/h > 200$ においては網状砂州や平坦河床が卓越する²²⁾ と考えられるが、その際の河床形状を適切に評価することは困難であるため便宜的に $h_{bar} = 0$ とした. 式 (3) は、定常状態を評価するものであるが、本研究では出水ごとに洪水波形を与えるため、以下に述べる砂州の更新割合 X による重み付けにより $h_{bar}^{new} = Xh_{bar}^{present} + (1-X)h_{bar}^{old}$ により時々刻々と更新することで、砂州形状の変遷を評価することとした. このような取り扱いにより、洪水波形の中でも土砂移動が活発な水理条件での砂州波高 h_{bar} が評価されるとともに、大規模な出水により砂州スケールが一気に変化するようなプロセスを評価することが可能となる.

砂州の移動速度については、河床地形（砂州）の形状が保たれつつ一定速度 C (m/s) で流下すると考え、着目区間での単位幅流砂量 q_b との関連により算定する^{23),22)}. 本研究では、砂州の縦横断形状については福岡ら²³⁾ にない以下のサインカーブにより表現する.

$$\eta = \hat{\eta}_y + a \cos \frac{\pi y}{b} \cos \left(\frac{2\pi x}{L} - \Phi \right) \quad (4)$$

ここに、 a : 振幅 (m), b : 水路幅 (m), L : 砂州波長 (m), Φ : 位相遅れ, $\hat{\eta}_y$: 流下方向に一波長平均した河床横断形

状 (m) である。本研究では $\hat{\eta}_y = 0$ とし、 $a = h_{bar}/2$ と評価した。砂州が一波長進むときに輸送される土砂堆積 V (m³) は、縦断方向の最大洗掘深 $\eta_{min} = -\left|a \cos\left(\frac{\pi y}{B}\right)\right|$ より上の体積に等しく、

$$V = \frac{2aBL}{\pi} \quad (5)$$

となる²³⁾。砂州が、波高、波長および波速を一定に保ち、流砂が前縁斜面上にすべて堆積するものとするれば、1 波長進むために要する時間は $T_{bar} = L/C$ であるから、単位時間、単位幅あたりの流砂量 $q_b = \frac{(1-\lambda)V}{BL/C}$ は、 $a = h_{bar}/2$ として式 (5) より、

$$q_b = \frac{1}{\pi} Ch_{bar}(1-\lambda) \quad (6)$$

となる。1 波長進むために要する時間 T_{bar} に関して整理すると、

$$T_{bar} = \frac{(1-\lambda)h_{bar}L}{\pi q_b} \quad (7)$$

となる。単位時間 Δt において砂州は、その波長 L のうち、

$$X = \Delta t/T_{bar} = \frac{q_b \Delta t \pi}{(1-\lambda)h_{bar}L} \quad (8)$$

分だけ前進することになる。砂州の波長 L は交互砂洲を想定し河幅 b の 12 倍とした。

以上のような砂州前進にともなう植生域の侵食域の発生に加え、植生域の河床表面での無次元せん断力 τ_* が 0.05 より大きい場合には、植生を保持している河床基盤自体が交換されるため植生域が一気に流失し^{6),24)}、低水路の河床と一体化するものとして評価した。

4. 木津川下流部を対象とした再現性の検証

本研究で構築した河道モデルを用いて木津川下流部を対象とした河道景観の変遷の評価を行い、再現性を検証する。

(1) 対象河道の概要

木津川流域には風化花崗岩が広く分布しており砂の供給が多く、河道一杯に砂州が形成される砂河川の特徴を持つ河川である。下流河道の掘削、河道内での砂利採取、上流域での砂防事業などにより土砂動態が変化したこともあり、砂州スケールの大規模化、河道内への植生進入や滞筋の流れの集中、固定化の傾向が見られたが、近年ではこれらの河道景観や河床の変動は安定しつつある状況にある¹⁹⁾。

(2) 河道モデル

合流部から 0 km ~ 20 km 区間での河道景観の変遷の評価を行うこととし、助走区間として 40 km までを含めた河道を評価した。河床形状は 1965 年の横断測量に

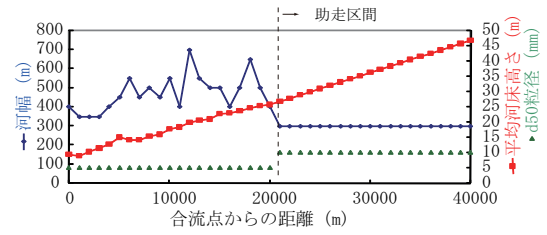


図-4 木津川下流部の景観変遷評価に用いた河道データ

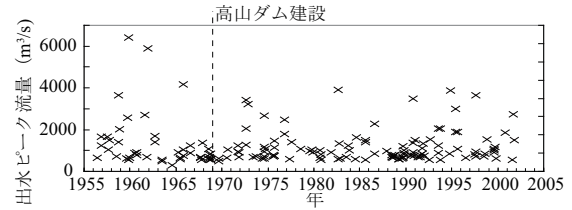


図-5 景観変遷評価に用いた流況データ

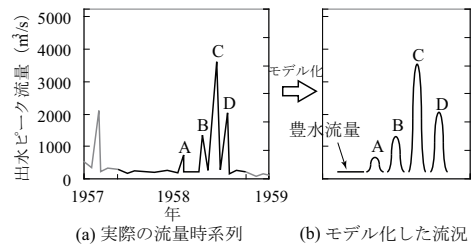


図-6 流況データのモデル化

に基づき、河道幅および平均河床高さを 1 km 毎に設定した (図-4)。1965 年時点では河道一杯に砂州が形成されている状況であるため、明示的な高水敷の設定は行わず、低水路と植生域の二つの断面により横断形状を評価し、低水路の兩岸に植生域が存在するとして、境界混合係数は $f = 0.2$ とした。植生の抗力係数は $C_d = 1.0$ 、密度度は $\lambda = 0.05(1/m)$ 、底面粗度係数は $s_n = 0.03$ を一律に与えた。年あたりの最大植生域拡大幅は実際の植被率の拡大率¹⁹⁾を参考に $v_{max} = 30(m/year)$ と設定した。

(3) 流況データ

1956 年から 2002 年までの流況の観測値を用い、図-5 の×印で示すピーク流量が 300 m³/s を超える出水イベントを評価するとともに、各年での豊水流量を用いて植生の拡大域を評価した。流量時系列が不明な期間については日流量ピークの 1.8 倍をピーク流量とし、時間流量ピークが把握できた出水に関してはその値をピークとした 24 時間周期のサインカーブにより出水を評価した。図-6(a) のような流況であった年を例にとると、まず、図-6(b) に示すように、その年の豊水流量を与えて植生拡大幅を算定し、続いて同年中に発生した出水 (A ~ D) を順次サインカーブ型の流量波形により与えて、出水イベントでの土砂フラックスや砂州波高の変遷を

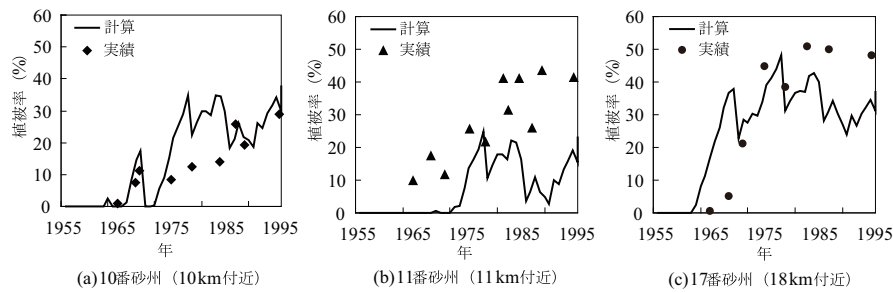


図-7 木津川下流部の植被率の時系列変化

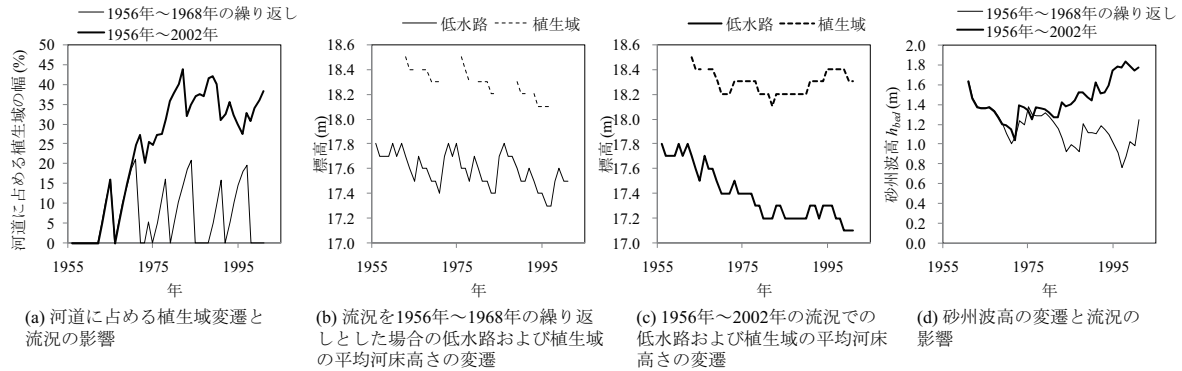


図-8 木津川下流部の河道景観の変遷と流況変化の影響

評価するとともに、植生域の流失（図-3）を評価した。このような簡略化を行ったのは、過去の十分な実測データがない状況や将来の気候変動等での流況変化などを考慮する場合に、正確な洪水波形を与えることが根本的に困難である中で、年レベルでの流況変化によるフラックスや河道景観の変化をとらえることを狙ったためである。1956年から2002年までの46年間の変遷を本モデルでは通常のパソコンを用いて4分程度で評価することができた。

(4) 植生消長の実績との比較

図-7に示したのは、1956年から2002年までの流況データを用いて河道モデルにより算定した植生域幅の変遷と、航空写真の分析により算定された低水路での植被率¹⁹⁾の実績値と比較したものである。比較のために、河道モデルの植生域幅から高水敷相当の長さを引いて植被率を算定し、また実績値の植比率は砂州単位で算出されているため、河道モデルでは、砂州の近傍の断面での値を用いて比較を行った。河道モデルによる植比率の評価は、10番砂州ではやや過大評価傾向が、逆に11番砂州では過小評価傾向がみられるなどの相違は見られるものの、全体的な実績値の傾向は概ね再現されており、本モデルにより河道植生の変遷を評価できることが確認できる。

(5) 流況変化による応答の違いの検討

1969年の高山ダムをはじめとする4つのダムの建設による流況変化による景観変遷の違いを検討するため、

1956年から2002年までの通年のデータと1956年から1968年までの流況を46年分繰り返したものの二通りを用いて景観変遷の違いを調べることにした。図-8(a)に示したのは、下流から11km部分での河道幅に占める植生域の変遷の比較である。同図により1956年～1968年の流況を繰り返した場合、1959年および1961年に発生したピーク流量 $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の大規模な出水（図-5を参照）が繰り返えされ、一旦拡大した植生域もほぼ全面的に破壊されるため、植生域の拡大・固定化が抑制されている。一方1956年～2002年の流況を与えたものでは、ダム建設後の出水規模の変化もあり、植生域が全面的に破壊されることはなく、拡大と部分的な洗掘の繰り返しにより一定幅での変動を繰り返している。

図-8(b)および図-8(c)に示したのは、1956年から1968年の流況を繰り返した場合および1956年から2002年までの流況を与えた場合の、11km断面の低水路および植生域の平均標高の時系列変化である。1956年から1968年の流況を繰り返した場合には、低水路および植生域の標高の変動は見られるものの一定範囲で留まっている。一方、1956年から2002年の流況を与えた場合（図-8(c)）は、植生域の標高はそれほど変化しないものの、低水路の標高が次第に低下している。図-8(b)と図-8(c)の違いをもたらし要因は、植生域拡大による滞筋への流れの集中の程度の違いと考えられる。図-8(d)に示したのは、低水路の砂州波高の変化であり、1956年から2002年の流況を与えた場合は、次第に砂州波高が大きくなりつつあるのに対し、1956年から1968年の繰り返しではどちらかといえば減少傾向を示している。

以上の検討により、ダム建設等による流況変化により、河道内での植生域の発達と安定化や、砂州波高の拡大といった河道景観の変化が起きたものと示唆される。植生域の比高の違いは、発達する植生群落の種類の変化をもたらす、また河道の標高分布の変化は、伏流水挙動や土壌粒度、栄養塩・有機物の空間分布などに影響を与え、河道で発揮される生態系サービスの質や量を変化させると考えられる。本モデルは、これらの波及効果を評価する際の基礎情報を与えるものである。

5. おわりに

本研究では、自然環境が具える物質循環システムを評価する上での基幹的経路である、河道内での水・物質フラックスの評価を目標として、水・土砂の通過フラックスの算定および河道景観の変遷を評価する河道モデルの構築を試みた。モデル構成においては、流域圏全体での物質移動の、過去から将来に渡る数十年レベルでの変遷を評価する上での要素技術としての利用を念頭に置き、マクロ的な河道・流況データを用いて、短時間で計算が可能なモデルを構築することとした。構築したモデルを用いて木津川下流域での景観変遷を評価し、実績値との比較や、流況を変えた場合の応答の違いを検討し、概ね妥当な結果が得られた。本研究では、流域スケールでの河道物質動態評価モデルの大枠となる方法論確立を目指すこととしたが、砂州波高の算定や砂州の移動速度の算定など、精度や適用性については検討の余地があるものと考えており、今後は、様々な河川を対象に検証を行いつつより一般性のあるモデルの確立を目指す考えである。また河道景観に基づく生態系サービス評価モデルを組み入れて、有機物や栄養塩類の動態・フラックス評価を実施する予定である。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発（代表：辻本哲郎）」の一環として実施したものです。また、河川生態学術研究会（木津川研究グループ）の成果の一部を利用いたしました。建設環境研究所・片貝武史氏には多くの助言及び協力をいただきました。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 戸田祐嗣, 田代喬, 尾花まき子, 佐藤圭輔, 椿涼太：自然共生型流域圏環境アセスメント手法に関する基礎的研究。河川技術論文集, Vol. 14, pp. 367–372, 2008.
- 2) 伊藤昭彦：物質循環としての陸域・海域生態系との相互作用（陸域）。天気, Vol. 49, No. 1, pp. 29–35, 2002.
- 3) 砂田憲吾, 河野逸朗, 田中総介：出水時における河道内樹木の破壊規模の予測に関する基礎的研究。水工学論文集, Vol. 46, pp. 947–952, 2002.
- 4) 田中規夫, 八木澤順治, 青木信哉, 福岡捷二：河道内樹木の洪水攪乱規模と樹齢による破壊限界変化。河川技術論文集, Vol. 13, pp. 177–182, 2007.
- 5) 財団法人リバーフロント整備センター（編）：河川における樹木管理の手引き。山海堂, 1999.
- 6) 辻本哲郎, 村上陽子, 安井辰弥：出水による破壊機会の減少による河道内樹林化。水工学論文集, Vol. 45, pp. 1105–1110, 2001.
- 7) 辻本哲郎, 北村忠紀：側岸部に植生群落を有する開水路流れの横断混合機構に関する実験的研究。土木学会論文集, Vol. 491/II-27, pp. 61–70, 1994.
- 8) 竹林洋史, 江頭進治, 永田徹, 桑島信, 加藤陽平, 伊藤太祐：植生を有する河道における流砂の空間分布特性。水工学論文集, Vol. 49, pp. 925–930, 2005.
- 9) 寺本敦子, 辻本哲郎：植生域を伴う砂州の地形変化—木津川下流域を例として—。水工学論文集, Vol. 49, pp. 1021–1026, 2005.
- 10) 戸田祐嗣, 高松伶介, 辻本哲郎, 土屋允人：天竜川下流域における河道地形と植生繁茂の変遷について。河川技術論文集, Vol. 13, pp. 201–206, 2007.
- 11) 前野詩朗, 宮内洋介, 森卓也：植生が旭川の洪水流に及ぼす影響の検討。水工学論文集, Vol. 48, pp. 757–762, 2004.
- 12) 重枝末玲, 朝位孝二, 坂本洋, 長太茂樹, 秋山壽一郎, 樋口直樹, 重岡広美, 徳永智宏：樹木群を考慮した平面2次元数値モデルによる乙津川の洪水流解析。水工学論文集, Vol. 50, pp. 1171–1176, 2006.
- 13) 清水義彦, 小葉竹重機, 新船隆行：樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算。水工学論文集, Vol. 44, pp. 819–824, 2000.
- 14) 夏見祐介, 竹林洋史, 岡部健士：植生抗力特性の時空間分布が流れと河床変動に与える影響。河川技術論文集, Vol. 13, pp. 183–188, 2007.
- 15) 大沼克弘, 藤田光一, 佐藤泰夫, 西本直史, 松本洋忠, 井上優：セグメント2河道を対象とした河道掘削後の河道変化予測に基づく治水・環境機能の一体的評価に向けた試み。河川技術論文集, Vol. 13, pp. 375–380, 2007.
- 16) 藤田光一：河道セグメント2における河幅縮小のメカニズムと予測技術—掘削後の河道応答を「もっと読もうとする」河川技術のために—。土木学会, 2007.
- 17) 井上優, 大沼克弘, 藤田光一：流水と土砂の作用による立地条件変化に着目した植生消長の簡易計算手法の開発。河川技術論文集, Vol. 12, pp. 31–36, 2006.
- 18) 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.
- 19) 河川生態学術研究会木津川研究グループ：河川生態学術研究会木津川研究グループ第2フェーズ研究報告書。財団法人リバーフロント整備センター, (in press).
- 20) 土木学会水理委員会（編）：水理公式集例題プログラム集（平成13年版）。土木学会/丸善, 2002.
- 21) S. Ikeda: Prediction of alternate bar wavelength and height. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 4, pp. 371–386, 1984.
- 22) 山本晃一：沖積河川学 堆積環境の視点から。山海堂, 1994.
- 23) 福岡捷二, 内島邦英, 山坂昌成, 早川博：交互砂州上の流砂量分布。水理講演会論文集, Vol. 27, pp. 697–702, 1983.
- 24) 藤田光一, 李參熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション。土木学会論文集, Vol. 747/II-65, pp. 41–60, 2003.

(2008.9.30 受付)