

砂州移動の活発な礫河川における 植生域長期変化解析手法の構築 ～天竜川下流域を対象として～

LONG TERM PREDICTION OF VEGETATION EXPANSION ON
GRAVEL RIVERS WITH ACTIVE BAR MIGRATION
～CASE OF THE DOWNSTREAM REACH OF THE TENRYU RIVER～

戸田祐嗣¹・土屋允人²・辻本哲郎³
Yuji TODA, Masato TSUCHIYA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 修(工) 名古屋市緑政土木局北土木事務所(〒462-0844 名古屋市北区清水五丁目6-2)

³フェロー会員 工博 名古屋大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Recently, the expansions of vegetated area on flood plain have been reported in many Japanese rivers. In this study, a numerical simulation model was proposed to predict the long term variations of the riparian vegetation area and the sediment deposition in the vegetated area in gravel river, in which the bar height was estimated by using an empirical relation obtained from the field data at the downstream reach of the Tenryu river, and the vegetation destruction during floods was taken into account through the bar migration. The numerical simulation was performed under the discharge and the topographical conditions of the Tenryu river. The results of the computation show that the present simulation model can roughly estimate the transition process of vegetated area and total amount of sediment deposition.

Key Words : Dynamics of riparian vegetation, gravel river, bar migration, long term simulation, Tenryu river

1. はじめに

我が国の多くの河川において、砂州や高水敷上での植生繁茂域の拡大が問題¹⁾となっている。河道内植生の繁茂は、河川の治水、環境の両面に影響を与えるため、河道内植生の動態予測や管理手法に関する河川技術の開発が急務である。

このような背景から、河道内の植生繁茂動態に関する研究が数多く行われてきている。水工学・土砂水理学的視点からは、植生が流れや地形形成に与える影響^{2), 3)}の解明が進んでおり、また、水工学と河川生態学との学際的アプローチとしては、微細土砂堆積が植生繁茂に与える影響⁴⁾、植生繁茂が高水敷土壤栄養塩環境形成に与える影響⁵⁾、砂州上での植生生理・生態特性の把握とそれに基づく群落拡大予測手法の構築⁶⁾などが行われている。さらに、植生解析と洪水時の流れ・河床変動解析とを融合させた河道内植生繁茂解析手法^{7), 8)}が提案されるなど、

河道内植生動態のメカニズムに関する研究はここ10年程の間に目覚ましく進展している状況である。

これら既往の取り組みの特徴は、河道内での植生動態の素過程の解明と、その組み合わせによる植生動態の総合的把握にあるため、数値解析を行う場合には、砂州や高水敷上の各地点で素過程を再現出来るような解像度が必要とされ、自ずと、現実的な洪水ハイドログラフに基づく流れ場の平面2次元解析が必要となってくる。このような解析手法は、実際の植生繁茂プロセスや河床地形の変化を流れ場との因果関係に基づいて合理的に説明できる点に最大の強みを発揮する一方で、以下に述べるような不利な点も多い。

実河川での植生管理の視点からは将来に渡る長期的な植生動態を把握する必要性があろう。しかし、将来予測に用いる洪水ハイドログラフは、かなり大胆な仮定を置いて設定されるのが現状であり、実測ハイドログラフのような精度を有していないため、モデル自体が高精度化されても入力条件の精度との整合性を取るのが難しい。

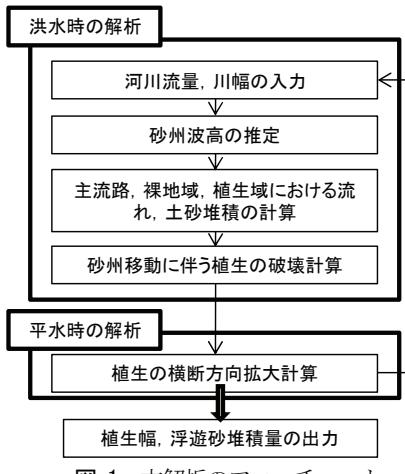


図-1 本解析のフローチャート

また、長期予測を念頭におくと、詳細なハイドログラフに対して平面2次元解析を行うのは、計算機負荷の観点からも不利な要素である。河道内の植生動態把握において、素過程に関する研究の重要性は全くゆるぎないものではあるが、実用性の観点からは、粗い入力洪水データに対して、簡便に植生動態を予測するような手法の開発も必要であると言えよう。

以上のことから、本研究では、実河川において比較的粗い入力洪水データを用い簡便に植生動態を予測する数値解析モデルの開発を目指す。このようなモデルの開発に際しては、実河川の特性に応じてプロセスを簡略化・単純化するために対象河川を選定する必要がある。本研究においては、近年、植生域の拡大が報告されながらも、未だ砂州移動が活発に生じている天竜川下流域を対象としてモデル開発を行う。

2. 天竜川の概況

天竜川は、諏訪湖を源流とする流域面積5,090km²、長さ213kmの一級河川である。天竜川は中央構造線上を流下し、流域に何本もの断層地域を抱えているため、脆い地質構造を持っている。また、本川の縦断河床勾配は1/300～1/500と急峻であるため山腹崩壊が起りやすく、土砂生産が多い河川である。本研究では、扇状地頂部の河口より25km地点より下流域の礫床河道区間を研究の対象とする。対象域ではここ50年程の間に植生域が増加していること、また、砂州の移動が活発で、地形や植生分布のかく乱が激しい河道区間であることが知られている。対象域の詳細は戸田ら⁹⁾を参照されたい。

3. 砂州移動を考慮した植生動態解析モデル

(1) モデルの概要

本研究で開発するモデルは、実河川での長期計算に用

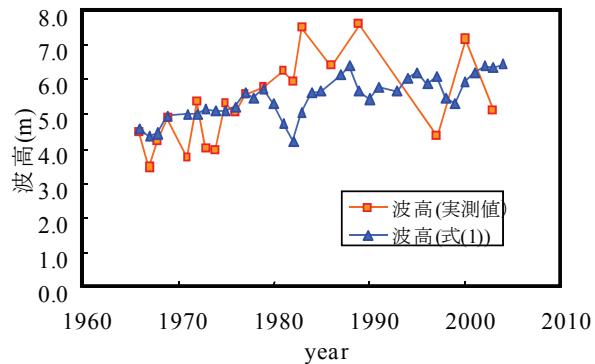


図-2 波高推定式と実測波高の比較（単列砂州区間）

いることを目的にしているため、それに適した計算条件となる洪水流量について検討する必要がある。これまでの実河川での砂州の発生領域区分や波高推定には経験的に平均年最大流量が用いられることが多い¹⁰⁾、このことから、実河川での砂州動態の特性を支配する代表流量として年最大流量が適当であるものとして、これを用いた解析モデルを構築することとする。

本解析のフローチャートを図-1に示す。入力条件として年最大流量と川幅を与える。まず河道を矩形断面と仮定し、年最大流量時の等流計算を行い、洪水時水深を算出する。算出された水深と、河床材料粒径、川幅を用いて、天竜川下流域を対象に構築された経験式より砂州波高を推定する。推定された砂州波高と、代表断面における砂州横断面形状を用いて、河道を平水時の流路となっている「主流路」とそれ以外の「砂州域」に分割する。さらに「砂州域」は植生繁茂計算より予測される「植生域」とそれ以外の「裸地域」に分割される。このように分割された「主流路」、「裸地域」、「植生域」の各区間について、断面平均した運動量方程式、浮遊砂堆積式より、洪水時流量、掃流砂量、植生域での浮遊砂堆積量を計算する。計算された掃流砂量から1出水あたりの砂州の移動量を推定する。砂州移動量による計算される植生破壊量と洪水後一年間での植生の拡大量を差し引きすることにより、次年度の洪水計算前段階における植生域幅を予測する。以上の計算もって1年分の計算とし、これを繰り返すことによって長期計算を実施する。

(2) 砂州波高の推定

本解析ではまず砂州波高H（砂州地形の最低河床位と最高河床位の差と定義）を経験的に推定する必要がある。砂州波高推定に関する既往の研究¹¹⁾から、波高Hが水深・粒径比 (h/D) と川幅・水深比 (B/h) で表現されることが知られている。本研究では、波高Hが h/D と B/h のべき関数で表わされるものとし、天竜川での実測波高をもっとも良く近似するように、次式の定数を決定した。

$$\frac{H}{h} = c_1 \left(\frac{B}{h} \right)^{\gamma_1} \left(\frac{h}{D} \right)^{\gamma_2} + c_2 \quad (1)$$

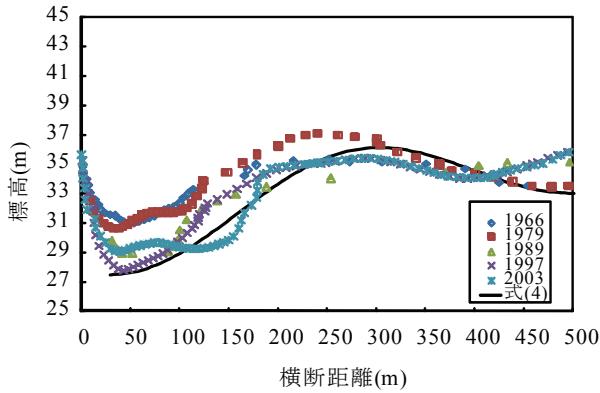


図-3 河床横断形状の近似式と実測断面の比較

ここに、 c_1 , c_2 , η_1 , η_2 : パラメタで、実測波高との比較により、 $c_1=2.95$, $c_2=9.03 \times 10^{-1}$, $\eta_1=9.34 \times 10^2$, $\eta_2=-2.72 \times 10^{-1}$ と同定した。上式より計算された砂州波高と実測波高を比較したものを図-2に示す。式(1)により砂州波高の変化を概ね再現出来ているものと判断される。

(3) 砂州横断面形状の近似

本解析では「主流路」と「砂州域（＝裸地域+植生域）」を分割する平水時の水際位置を決定する必要があるが、それには平水時流量と河川横断面地形に関する情報が必要となってくる。ここでは、本解析における砂州横断面の近似形状の求め方を示す。

砂州が形成された直線河道における河床形状は、長谷川・山岡¹²⁾により、以下の式で与えられる。

$$\eta = -\sum_i \sum_j \alpha_{ij} \sin\left[i \frac{2\pi}{2B} y - \frac{\pi}{2} \delta_{ie}\right] \cos\left[j \frac{2\pi}{L} (x - \delta_{ij})\right] \quad (2)$$

ここで、 x : 流路中心線に沿った流下方向距離、 y : 横断距離、 η : 河床高、 α_{ij} : 河床形態の波数の*i*, *j*成分の振幅、 i , j : x 方向、 y 方向の波数、 L : 砂州波長、 δ_{ij} : 波数*i*, *j*の位相であり、 δ_{ie} は*i*が奇数のとき0、偶数のとき1となる関数である。長谷川・山岡¹²⁾、渡邊ら¹³⁾は砂州波形に関する実験データを分析し、上式の波数(*i*, *j*)のうち波数(1, 1)と波数(2, 0)が卓越することを報告している。したがって、本研究では砂州横断面を波数(1, 1)と(2, 0)を重ね合わせた次式で近似することとする。

$$\eta = -\alpha_{11} \sin\left[\frac{2\pi}{2B} y\right] \cos\left[\frac{2\pi}{L} x\right] - \alpha_{20} \sin\left[\frac{2\pi}{B} y - \frac{\pi}{2}\right] \quad (3)$$

また、長谷川・山岡¹²⁾、渡邊ら¹³⁾の分析結果では、この2つの波数成分の振幅はほぼ等しいので、 $\alpha_{11}=\alpha_{20}$ と近似する。このように近似された縦横断形状のうち最低河床位と最高河床位を含む横断面($x=0$)を平水時の水際を決定する際の代表断面に選定する。この代表断面における最低河床と最高河床の差を波高 H とし、 H を用いて河床位 η を表すと次式となる。

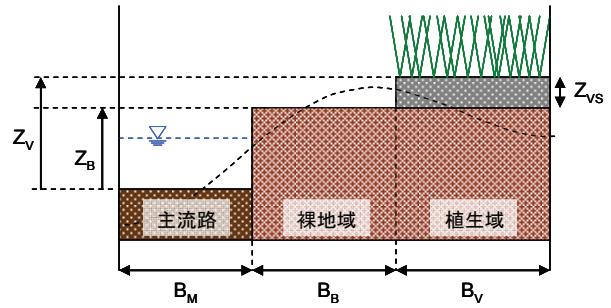


図-4 河床横断面の主流路・裸地域・植生域への分割

$$\eta = \frac{8}{25} H \left(-\cos\left[\frac{2\pi}{2B} x\right] - \cos\left[\frac{2\pi}{B} x\right] \right) \quad (4)$$

式(4)による代表断面の河床位の横断分布と、解析対象とする天竜川下流域河口より24.0km地点付近の最深河床・最高河床を含む横断測量データを比較したものを図-3に示す。図より式(4)によって天竜川下流域における砂州横断形状の特徴を概ね表現しうるものと考えられる。

このようにして決定された河川横断面地形に対して、平水時の河川流量を与えた等流計算を実施し、平水時の水際の位置を決定する。この際、Manningの粗度係数は、横断方向に一様に $n=0.025$ を与えた。決定された水際位置を用いて、主流路、砂州域の境界を設定し、各区間での河床高を平均したものを各区間での河床高とする(図-4)ように区間分割を行った。

(4) ボックス型モデルによる流れの解析

上記3.(2), (3)の手続きを踏まえて、「主流路」と「裸地域」+「植生域」の境界が決定される。このように決定された各区間(図-4)において断面平均された流れの解析を実施する。ボックス分割後、連続式および各区間での運動量式を解析し、各区間の水深、流速を決定する。計算に用いた基礎式は、戸田ら¹⁴⁾と同じであり、ここでは紙面の都合上割愛する。

(5) 砂州の移動と植生の破壊

本研究では、植生破壊は砂州の移動に伴って生じるものとし、洪水時の砂州の移動量から植生の破壊率を算出する。式(4)で近似された砂州河床形状を川幅、砂州波長にわたり積分することによって、最深河床 η_{min} 以上の砂州の堆積 V を次式により算出する。

$$V = \int_0^B \int_0^L (\eta - \eta_{min}) dx dy \quad (5)$$

洪水時の掃流砂量 Q_{SB} については、主流路と裸地域上で掃流砂が生じるものとして、以下の式より計算する。

$$Q_{SB} = q_{BM} B_M + q_{BB} B_B \quad (6)$$

ここに、 q_{BM} , q_{BB} : 主流路、裸地域での単位幅掃流砂量である。各区間の掃流砂量については芦田・道上式より

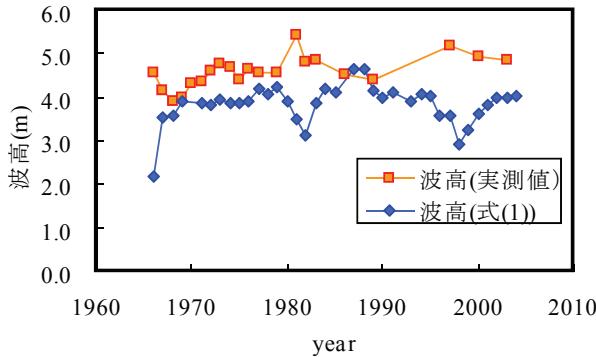


図-5 波高推定式と実測波高の比較（複列砂州区間）

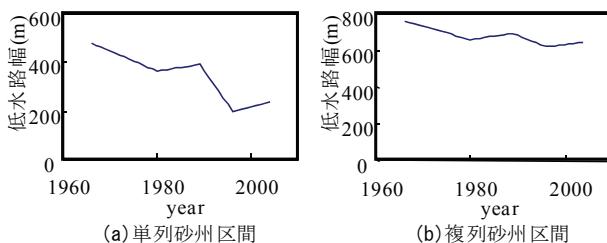


図-7 計算に用いた低水路幅

計算している。掃流砂量を洪水期間中積分し、それに相当する体積だけ砂州が移動するものとする。

$$\Delta V = \frac{1}{1-\lambda} \int_0^{T_{flood}} Q_{SB} dt \quad (7)$$

ここに ΔV : 一洪水あたりの砂州移動量, T_{flood} : 洪水継続期間である。この洪水による砂州移動量より砂州移動率 $r=\Delta V/V$ を算出し、砂州の移動に伴い移動率 r と同率で植生が流出するものとし、次年度計算時の植生幅を以下の式より求める。

$$B_V^{n+1} = B_V^n - r B_V^n + k_V \quad (8)$$

ここに、 k_V : 1年間の植生群落の横断方向拡大速度であり、植生域幅 B_V の上付き添え字は計算の年次を表わす。

(6) 植生域での浮遊砂堆積

一般に植生域では、植生の抵抗によって洪水時の流速が低下し、細砂の堆積が生じることが知られている¹⁵⁾。本研究の対象とする天竜川下流部においても、主流路や裸地域の河床は礫で形成されているものの、植生域には顕著な細砂堆積が生じている⁹⁾。このような植生域での土砂堆積を再現するために、植生域では次式で示される浮遊砂の堆積と巻上を計算する。

$$(1-\lambda) \frac{d}{dt} [B_V Z_{VS}] = C_V \omega_s B_V - E_S \omega_s B_V \quad (9)$$

ここに、 Z_{VS} : 植生域上での浮遊砂堆積厚、 C_V : 植生域での浮遊砂濃度、 ω_s : 浮遊砂の沈降速度、 E_S : 浮遊砂の無次元巻上速度である。浮遊砂の沈降速度にはRubeyの式¹⁶⁾を用い、無次元巻上速度には泉らの式¹⁷⁾を用いることとする。上式を計算するには植生域での浮遊砂濃度 C_V

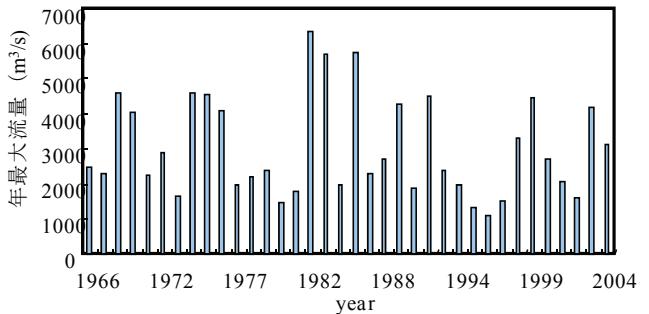


図-6 計算に用いた河川流量（年最大流量（日平均値））

表-1 計算に用いたパラメータ

パラメータ	内容	値	参考
$c_1, c_2, \gamma_1, \gamma_2$	砂州波高予測に関するパラメータ	$2.95, 9.03 \times 10^{-1}, 9.34 \times 10^{-2}, -2.72 \times 10^{-1}$	実測波高との比較により同定
k'	浮遊砂の横断混合係数	0.001 (m/s)	文献 ⁹⁾
k_V	植生の横断拡大速度	5.0 (m/year)	文献 ¹⁹⁾
T_{flood}	洪水継続期間	1 (day)	洪水流量に日平均値を用いていることより
λ	空隙率	0.45	

が必要となり、以下のように計算した。

植生域の浮遊砂濃度について、1)植生域以外（主流路、裸地域）では、浮遊砂の混合が十分に進み一定の濃度 C_0 で流下する、2)植生域と植生域以外の区間の境界で濃度差に比例した浮遊砂の横断混合が生じ、植生域内では浮遊砂の巻上と沈降が生じる、3)植生域内では、浮遊砂の横断混合と巻上・沈降がつり合い状態にある、との3つの仮定をおき、植生区間内での浮遊砂のつり合い式を求める以下式となる。

$$0 = k'(h_M - Z_V)(C_0 - C_V) - B_V \omega_s C_V + B_V \omega_s E_S \quad (10)$$

ここに、 h_M : 主流路の水深、 Z_V : 植生域の河床位、 k' : 浮遊砂の横断混合係数である。河川上流域からの流入浮遊砂濃度を C とすると、浮遊砂フラックス QC は以下の式で表わされる。

$$QC = Q_M C_0 + Q_B C_0 + Q_V C_V \quad (11)$$

上式を式(10)に代入して C_0 を消去することにより、流入浮遊砂濃度 C を与えれば、植生域の浮遊砂濃度 C_V が算出でき、その結果を用いて、植生域での浮遊砂堆積（式(9)）を計算する。浮遊砂堆積（式(9)）の計算期間として、年最大流量の日平均値を解析で用いることより、1日間の計算とした。

(7) 複列砂州区間の取り扱い

本解析対象とする天竜川下流域では単列砂州形成区間と複列砂州形成区間が見られる。解析を複列砂州区間でも実行できるように、複列砂州区間では河川流量と川幅を砂州のモード数で割り、単列砂州で構築した計算手法をそのまま適用することとする。つまり、複列砂州は単列砂州の足し合わせとしてモデル化する。複列砂州区間

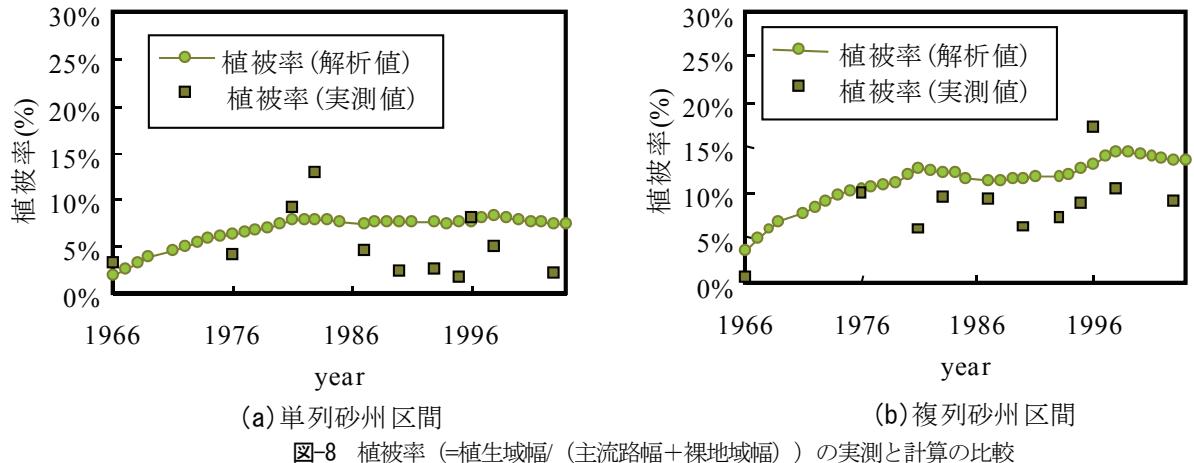


図-8 植被率 (=植生域幅/ (主流路幅+裸地域幅)) の実測と計算の比較

においても、砂州波高の推定には単列砂州と同じく式(1)を用いており、それより推定された波高と実測波高を比較したものを図-5に示す。単列砂州での推定式を単純に複列砂州区間に援用することは大きな仮定であり、推定値は実測を過少している。このように複列砂州区間への適用については問題を残すものの、複雑な移動床解析を行わない簡便な推定法として本手法を採用する。

4. 計算条件

本解析モデルの適用に当たり天竜川下流域で単列砂州領域（河口23.0～25.0km）と複列砂州領域（河口より6.0～15.0km）を対象として計算を実施した。洪水流量については鹿島観測所での1966年から2004年までの年最大流量（日平均値）を用いた（図-6）。川幅については、計算対象とする各区間での過去40年間の低水路幅を用いた（図-7）。各洪水時の流入浮遊砂濃度について、天竜川ダム再編事業環境検討委員会¹⁸⁾で用いられている鹿島水位観測所（河口より25km地点）でのL-Q式より求めた。その他、本解析で用いたパラメータの一覧を表-1に示す。植生の拡大速度 α_v について、天竜川砂州上にはヤナギやツルヨシ群落がみられるが、高い密生度で生育しているツルヨシを対象とすることとし、ツルヨシのランナーによる拡大に関する文献値¹⁹⁾を用いた。

5. 解析結果と考察

(1) 解析結果と実測データの比較

本数値解析で実測と比較しうる出力は植生幅と植生域での浮遊砂堆積量である。ここでは、浜松河川国道事務所によって計測された横断地形、航空写真から判読した植生域幅について、単列砂州区間、複列砂州区間で比較を行う。また、植生域での浮遊砂堆積量については、複列砂州区間における推定値⁹⁾が報告されており、これと比較する。

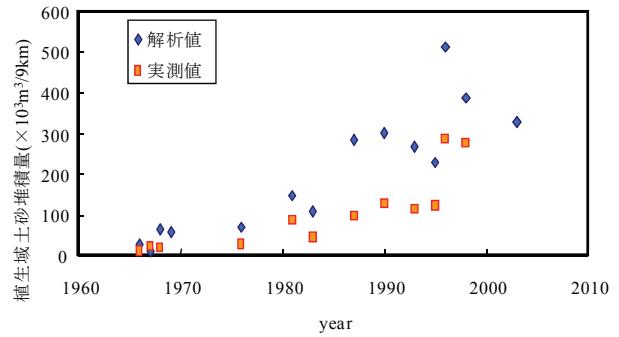


図-9 植生域浮遊砂堆積量に関する実測と計算の比較

図-8に単列砂州区間および複列砂州区間における植被率の実測と計算の比較を示す。単列砂州領域においては、実測で見られるような10年以下程度の時間スケールでの植生域の短期的な増減を再現出来ていないが、解析値は実測値の変動の範囲内にとどまっており、全体的には実測の平均的な傾向を再現出来ているものと判断される。複列砂州領域の結果においては、単列砂州領域と同様に10年スケール以下程度の植生幅の増減は再現出来ていないが、全体的には、若干過大評価であるが植生域が増加していく傾向が再現されている。

図-9に複列砂州領域における浮遊砂堆積量の実測値と計算値の比較を示す。実測に比べて解析値は過大評価であるが、堆積土砂量が増加する傾向は再現されている。計算が過大評価する理由としては、そもそも浮遊砂の堆積領域となる植生幅が過大評価であることに起因するものと思われる。

(2) モデルの特性と適用限界の考察

本モデルの特性について、植生幅の時間変動の再現性の観点から検討を行う。今回の数値解析で、10年以下程度の時間スケールの変動が現れなかった原因として、入力条件に対するモデルの感度特性が考えられる。本解析で植生幅の時間変化を引き起こす原因是、年最大流量と低水路幅の経年変化のどちらかとなるが、解析結果からは、低水路幅の長期的変化に伴う砂州波高変化に対する応答は見られるが、年最大流量の変化に対する応答が敏感でないものと判断される。このことは、1)解析には年

最大流量の日平均値を用いたが、実際の砂州の移動や植生破壊には時間平均流量等といったより短時間平均でのピーク流量に近い大きな流量に支配されている可能性があること、2)砂州移動や植生破壊の傾向を年最大流量の洪水時ののみの解析によって再現しようと試みているが、年最大流量で無くても一定規模以上の洪水であれば砂州移動、植生破壊が生じるであろうこと、などが原因として考えられる。このように、長期解析を行う際に入力洪水条件をどのように与えるかには大きな検討課題が残されており、他の河川で同種のモデルを適用するなどして、統計的にどの流量が砂州・植生動態に支配的であるかを検討していく必要があろう。

また、上記2つの要因はいずれも植生の破壊を増加させる方向に作用するため、これらの要因を考慮した場合には、それとともに植生域の拡大速度に関する更なる検討を行わねばならない。本解析では植生域幅の拡大速度に既往の文献値を用いたが、対象河川での植生拡大速度に関する実測が必要と思われ、今後の課題である。

6. 結論

本研究では、砂州移動性の高い礫床河川における植生繁茂動態の長期解析モデルを構築した。モデル構築に際しては、長期解析に耐えられるよう入力洪水条件を年最大流量で代表させ、砂州形状は既往の知見と現地での測量結果に基づく推定式を組み合わせて表現し、流れ場と土砂輸送の解析には断面平均型の簡略化したモデルを用いた。このように入力条件、解析手法ともに簡略化したモデルではあるが、天竜川下流域での植生域幅や植生域での浮遊砂堆積量の長期的な挙動をある程度再現できた。

本モデルは、その構築に際し対象河川の特徴に応じたモデルの単純化や経験式を用いているため、解析で使用した全ての数式をそのまま他河川に援用できるものではない。むしろ、プロセスベースで詳細に解析することが難しい植生の長期解析について、各河川に応じた簡便なモデルを構築する際の構築手法そのものの提案であり、現地データや既存の知見を生かしたモデル構築の方法論を主張するものである。

謝辞：本研究は土木学会水工学委員会河川懇談会の補助を受け、流量、地形データ等については、浜松河川国道事務所からの提供を受けている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、李參熙、藤田光一、山本晃一：礫床河川における安定植生域拡大のシナリオー多摩川上流部を対象にした事例分析よりー、水工学論文集、第43巻、pp.977-982、1999.
- 2) 例えば、Ikeda, S., Izumi, N. and Ito, R.: Effects of pile dikes on flow retardation and sediment transport, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp.1459-1478, 1991.
- 3) 例えば、泉典洋、池田駿介：側岸に樹木を有する直線礫床河川の安定横断河床形状、土木学会論文集、No.411, pp.151-160, 1989.
- 4) 李參熙、藤田光一、塚原隆夫、渡辺敏、山本晃一、望月達也：礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂輸送の役割、水工学論文集、第42巻、pp.433-438, 1998.
- 5) Toda, Y., Ikeda, S., Kumagai, K. and Asano, T.: Effects of flood flow on flood plain soil and riparian vegetation in a gravel river, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 131, No. 11, pp.950-960, 2005.
- 6) 青木信哉、田中規夫、八木澤順治：洪水攪乱影響の違いがツルヨシの形態的特徴と繁茂量・拡大幅に与える影響、水工学論文集、第51巻、pp.1255-1260, 2007.
- 7) 八木澤順治、田中規夫：シナダレスズメガヤの繁茂量の違いを考慮した土砂移動限界の変化および洪水時流失条件の評価、水工学論文集、第51巻、pp.1249-1254, 2007.
- 8) 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ミュレーション、土木学会論文集、No.747, pp.41-60, 2003.
- 9) 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、第13巻、pp.201-206, 2007.
- 10) 山本晃一：沖積河川学—堆積環境の視点からー、山海堂、pp.17-46, 1994.
- 11) 池田駿介：単列交互通砂州の波長と波高、土木学会第27回水理講演会論文集、pp.689-695, 1983.
- 12) 長谷川和義、山岡勲：発達した交互通砂州の性状に関する実験と解析、土木学会第26回水理講演会論文集、pp.31-38, 1982.
- 13) 渡邊康玄、安田浩保、島田友典：中規模河床波の低流量時における形状変化過程に関する水理実験、水工学論文集、第51巻、pp.1039-1044, 2007.
- 14) 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、第14巻、pp.151-156, 2008.
- 15) 例えば、藤田光一、Moody, J. A., 宇多高明、Meade, R. H. : ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小、土木学会論文集、No.511, pp.47-62, 1996.
- 16) Rubey, W. W.: Settling velocities of gravels, sand and silt particles, *Amer. J. Sci.*, Vol.25, pp.325-338, 1993.
- 17) 泉典洋、池田駿介：直線砂床河川の安定横断河床形状、土木学会論文集、No.429, pp.57-66, 1991.
- 18) 国土交通省中部整備局浜松河川国道事務所：天竜川ダム再編事業環境検討委員会第5回委員会資料、2007.
- 19) 小川友浩、田中規夫、城野祐介、河川中州上に繁茂するツルヨシのランナーによる拡大量と成長量の評価、水工学論文集、第49巻、pp.1441-1446, 2005.