

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

LONG TERM PREDICTION OF EXPANSION AND DESTRUCTION OF
RIPARIAN VEGETATION AND SEDIMENT DEPOSITION AT THE
DOWNSTREAM REACH OF THE TENRYU RIVER

戸田祐嗣¹・花井駿介²・辻本哲郎³

Yuji TODA, Shunsuke HANAI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博士(工) 名古屋大学大学院准教授 社会基盤工学専攻 (〒464-8603名古屋市千種区不老町)

²学生会員 修士(工) 名古屋大学大学院 社会基盤工学専攻 (〒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 社会基盤工学専攻 (〒464-8603名古屋市千種区不老町)

A numerical simulation model was presented to predict the long term change of vegetated area and the resulting deposition of fine sediment at the down stream reach of the Tenryu river. In constructing the model, the river cross-section was divided into three areas, main flow area, bare bar area and vegetated area, in which the flow velocity at three areas and the deposition of fine sediment at vegetated area were calculated by using mass and momentum balances of each area and the cross-sectional transport of suspended sediment. It was found that the present simulation model can roughly estimated the transition of vegetated area and total amount of sediment deposition. The long-term change of vegetated area and sediment deposition was investigated by using the model.

Key Words : Tenryu river, riparian vegetation, deposition of fine sediment, long term prediction

1. はじめに

天竜川は中央構造線を流下し、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こりやすく、本来、土砂生産が多い河川である。しかし天竜川本川中には多くの発電用ダムが存在し(図-1)、それらが上流域からの土砂の連続性を遮断するため、ダム湖においては堆砂による有効容積の減少が、海岸においては供給土砂の減少による海岸侵食が問題となっている。これに対する対策として、天竜川では中流域におけるダム再編事業が進められ、ダムに堆積した土砂を下流へ排砂する計画が検討されている^{1), 2), 3)}。

ダム再編事業による排砂の影響は、下流域河道を通じて海岸へ達するため、ダムから排砂した土砂が下流域河道環境へ与える影響を検討する必要がある。また、このような排砂事業は河道植生の変化や海岸線の変化といった長期的な地形・植物動態に影響を与えることが予測されるため、その影響評価に際しては50~100年スケール

以上での長期的な視点から予測を行う必要がある。特に天竜川下流域河道では、近年、河道内植生の繁茂域が増加しており、植生域内には細砂の堆積が観測されている⁴⁾。植生域への細砂の堆積は、更なる植生繁茂を引き起

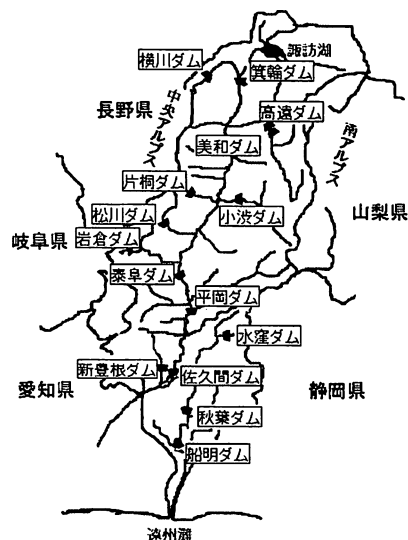


図-1 天竜川流域

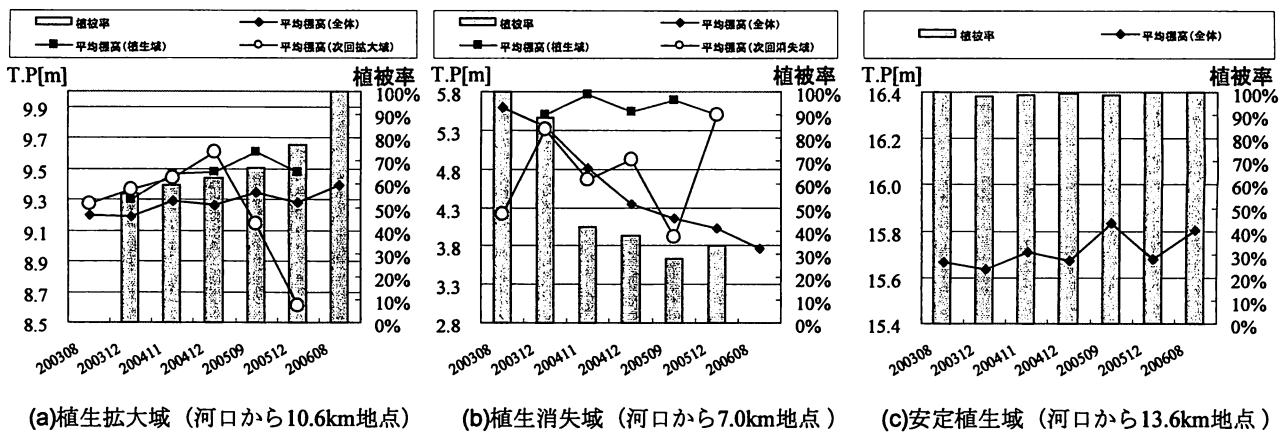


図-2 植生拡大域、植生消失域、安定植生域における平均標高と植被率の変化

こす原因となりうる³⁾とともに、海岸への細砂供給に影響を与えるものであり、長期的な視点からその特性を解明する必要がある。

以上の背景から、本研究では天竜川下流域河道（河口から船明ダム（河口から28km地点、図-1）まで）を対象に、河道地形と植生域変化の特徴を明らかにした上で、河道内植生および植生域への細砂捕捉効果を長期的に予測することが出来る数値解析モデルの開発を行うこととする。

2. 天竜川下流域河道における植生・土砂動態

天竜川下流域河道における植生・土砂捕捉の長期予測を行うためには、対象地域における既往の検討事例や調査結果を整理し、変化の特徴を把握する必要がある。そのため本章では、数値解析モデルの開発に先立ち、天竜川下流域河道における地形変遷と植生域変化の関係について、検討を行うこととする。

(1) 長期的な地形および植生変遷の概要^{1), 2), 4)}

天竜川下流域河道の長期的な変遷について、天竜川ダム再編事業環境検討委員会^{1), 2)}、や戸田ら⁴⁾によると、1970～1980年頃に行われた高水敷の造成や1960～1975に最盛期であった砂利採取の影響により、（複列砂州からの）砂州の単列化（中規模河床形態の発生領域の変化）、洗掘深の増加、滞筋の固定化が進行していることが報告されている。これらの変化は概ね1980年月中旬ごろには安定化し、現時点においては、砂州形状は変化するものの、平均河床高、最深河床高に系統的な変化は見られない。

一方、縦断河床変化が安定し始める1980年代頃から低水路内の植生繁茂域の緩やかな増加が始まっているが、依然として洪水による砂州植生の破壊や裸地域への新たな植生の侵入が活発に生じている状況にある⁴⁾。

(2) 植生域の変化と地形変化との関係

前節での長期的な河道変遷に加えて、近年では、LaserProfilerと航空写真による地形・植生域の調査が行われている。本節では2003年～2006年にかけて行われたLaserProfilerによる調査データの中から2mメッシュの地形データと航空写真データを使用し、植生域の空間的な変化とそれに伴う地形変化の特徴について分析を行った。分析に用いたLaserProfilerの調査日は、2003/8/30、同年12/28、2004/11/17、同年12/23、2005/9/30、同年12/20、2006/8/15の計7回分である。

初回調査日（2003/8/30）と最終調査日（2006/8/15）の航空写真の比較から、期間中に新たに形成された植生域、消失した植生域、植生域であり続けた領域を抽出し、それぞれ植生拡大域、植生消失域、安定植生域と定義した。拡大、消失、安定植生域のそれぞれにおいて、7回の各調査時点における植生域面積率、領域全体および領域内の植生域の平均標高を算出した。また、植生拡大域においては、次回調査日に新たに確認された植生域を次回拡大域とし、植生消失域においては、逆に、次回調査日に植生が消失する領域を次回消失域として、それぞれの平均標高を算出した。

図-2(a), (b), (c)に植生拡大域、植生消失域、安定植生域における平均標高（全体、植生域、次回拡大域、次回消失域）と植被率の変化を示す。

図-2(a)より、植生拡大域では初回および最終回での調査期間の間に、全体の平均標高が10cmほど上昇している。また各調査時点での時間的な変化について、領域内の植生域の平均標高は、常に全体の平均標高より高い値を示している。一方、次回拡大域の平均標高はその他の標高と比べてばらつきが大きく一貫した特徴は見られない。以上のことから植生域の拡大について、植生は比高とは無関係に拡大し、その後土砂を捕捉することで植生域の比高が高くなるものと考えられる。

図-2(b)より、植生消失域では植被率の減少と同時に全体の平均標高が1m以上低下している。また残存している植生の平均標高は領域全体の平均標高を常に上回っている。次回消失域の平均標高はその他の平均標高と比

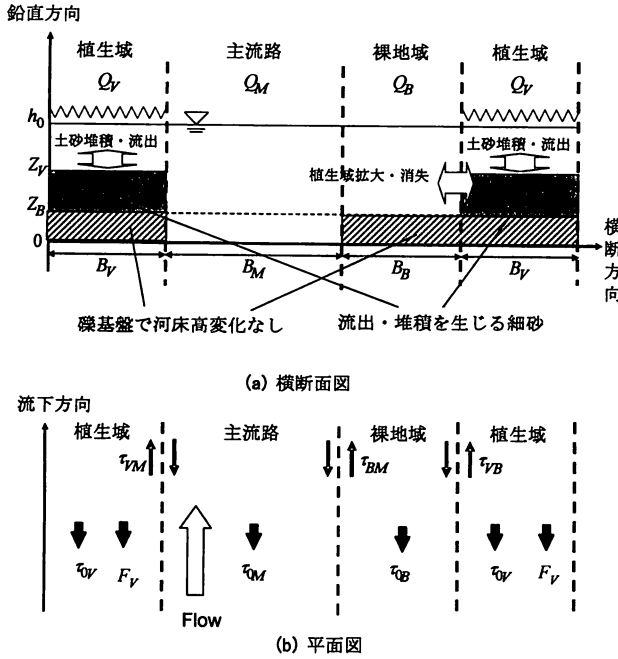


図-3 モデルで想定した横断面、平面図

べて大小関係にばらつきがあり、系統的な特徴が見られない。以上のことから植生の消失について、土砂を捕捉し比高が高くなっている植生域が比高とは無関係に地面と共に削られ消失しているものと考えられる。また植生拡大時には比高の増加は緩やかに進むが、消失に伴う比高の低下は急激に進むことが分かる。

図-2(c)から、安定植生域では平均標高が上昇と低下を交互に起こしながら、全体的には徐々に上昇していることが分かる。このことから出水時に流出しない植生域が土砂の捕捉と流出を繰り返しながらも全体的には土砂を捕捉する傾向にあったことが分かる。

3. 数値計算モデルの開発

(1) モデルの概要

前章で記した天竜川下流域河道の変遷から、河道骨格となる河床高等の変化は現時点では小さく、低水路砂州上の植生の繁茂が徐々に進行していること、植生拡大域や安定植生域では土砂堆積が徐々に進行するが、植生消失域では植生の破壊と同時に土砂が削られていることが明らかになった。今後の天竜川下流域河道の長期的変化を予測するために、本研究では以下の仮定・取扱いに基づいた数値解析モデルを構築する。①計算機負荷の観点から、長期予測を行えるよう、河道断面を主流路、裸地域、植生域の3つの領域に分割して取扱い、各領域で等流状態と仮定する。②天竜川下流域河道では現時点においても砂州の移動・変形は生じているが、最深河床高や砂州波高といった大局的な特性の変化については安定傾向にあることから⁴⁾、主流路と裸地域の河床高は変化しないものと仮定する。③上流から供給される細砂は植生域で

堆積・流出する。④植生域はその生理的活動によって横断方向に拡大し、年最大流量の出水時に破壊され消失する。図-3に本モデルで想定する横断面、平面図を示す。ここに、 Q_M ：主流路を流れる流量、 Q_B ：裸地域を流れる流量、 Q_V ：植生域を流れる流量、 h_0 ：等流水深、 Z_B ：主流路の河床に対する裸地域の比高、 Z_V ：主流路の河床に対する植生域の比高、 B_M ：主流路幅、 B_B ：裸地域幅、 B_V ：植生域幅、 τ_{0M} ：主流路の底面せん断応力、 τ_{0B} ：裸地域の底面せん断応力、 τ_{0V} ：植生域の底面せん断応力、 τ_{MB} ：主流路と裸地域の境界せん断応力、 τ_{MV} ：主流路と植生域の境界せん断応力、 τ_{BV} ：裸地域と植生域の境界せん断応力である。

(2) 流れ場の解析

流れの解析は等流状態で行っているため基礎方程式は連続式

$$Q = Q_M + Q_B + Q_V \quad (1)$$

および主流路、裸地域、植生域における力の釣り合い式

$$\rho g B_M h_0 I_b = \tau_{0M} B_M + \tau_{MB} (h_0 - Z_B) + \tau_{MV} (h_0 - Z_V) \quad (2)$$

$$\rho g B_B (h_0 - Z_B) I_b = \tau_{0B} B_B - \tau_{MB} (h_0 - Z_B) + \tau_{BV} (h_0 - Z_V) \quad (3)$$

$$\rho g B_V (h_0 - Z_V) I_b = \tau_{0V} B_V - \tau_{MV} (h_0 - Z_V) - \tau_{BV} (h_0 - Z_V) + F_V B_V \quad (4)$$

を使用している。ここに、 Q ：全断面を流れる流量、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 I_b ：河床勾配、 F_V ：植生による形状抵抗である。

底面せん断応力はManningの式で与え、Manningの粗度係数は本解析においては全ての流路にて0.02としている。各流路間の境界せん断応力は以下の式で与える。

$$\tau_{MB} = \rho f_{MB} (U_M - U_B)^2 \quad (5)$$

$$\tau_{MV} = \rho f_{MV} (U_M - U_V)^2 \quad (6)$$

$$\tau_{BV} = \rho f_{BV} (U_B - U_V)^2 \quad (7)$$

ここに、 U_M ：主流路の断面平均流速、 U_B ：裸地域の断面平均流速、 U_V ：植生域の断面平均流速、 f_{MB} ：主流路と裸地域の境界混合係数、 f_{MV} ：主流路と植生域の境界混合係数、 f_{BV} ：裸地域と主流路の境界混合係数である。境界混合係数 f については福岡・藤田⁹⁾が水路実験で行った既往の研究から一律に0.1を与えている。

植生による形状抵抗 F_V は以下の式で与えている。

$$F_V = \frac{1}{2} \rho C_D \chi (h_0 - Z_V) U_V^2 \quad (8)$$

ここに、 C_D ：植生の抗力係数、 χ ：植生密生度パラメー

タである。これらは洪水時の河岸に繁茂する植物に関する調査においてToda et al.⁷⁾が使用しているものと同じ値 ($C_D=1.0$, $\lambda=0.1$) を使用した。

(3) 植生域幅の変化

植生域は拡大速度 α で拡大していく一方、主流路の流速 U_M が破壊限界流速 U_{MC} を超えたときに植生が破壊されると想定し、以下の式によって植生域が変化する。

$$\frac{dB_V}{dt} = \alpha - \beta(U_M - U_{MC})^2 \quad (9)$$

全川幅 ($=B_M+B_B+B_V$) および主流路幅 ($=B_M$) は変化しないものとし、式(9)から用いて B_V , B_B を求める。

植生破壊限界流速 U_{MC} は植生破壊限界流量 Q_C を断面に流した時の主流路の断面平均流速 U_M を U_{MC} に適用する。植生拡大速度 α について、小川ら⁸⁾の研究によればツルヨシなどの草本類の拡大速度は1年あたり5 (m/year) 程度であるのでその値を使用した。植生破壊定数 β については、過去の植生域幅のデータとのフィッティングを行って値を同定した。

(4) 植生域における土砂堆積・流出

植生域における土砂堆積・流出による河床高の変化は以下の式より計算する。

$$(1-\lambda)\frac{d}{dt}[B_V(Z_V-Z_B)] = C_V\omega_s B_V - E_S\omega_s B_V \quad (10)$$

ここに、 λ : 間隙率, C_V : 植生域上の体積土砂濃度, E_S : 無次元巻き上げ速度, ω_s : 沈降速度である。

沈降速度 ω_s についてはRubeyの式より求め、植生域で堆積・巻き上げを生じる土砂粒径については、現地での植生域での堆積土砂粒径より $D=1.0$ (mm) とした。

無次元巻き上げ速度 E_S について、泉・池田⁹⁾による砂堆の存在を考慮した

$$E_S = 0.001\tau_{0V}^{*2} \omega_s^{*-2} \quad (11)$$

を用いる。ここに、 τ_{0V}^* : 植生域上の無次元掃流力, ω_s^* : 無次元沈降速度である。

植生域上の体積土砂濃度 C_V の計算方法について以下に述べる。主流路、裸地域、植生域における流下方向の土砂濃度変化は以下の式で表される。

$$\frac{d}{dx}[U_M h_0 B_M C_M] = -k_{MV}(h_0 - Z_V)(C_M - C_V) - k_{MB}(h_0 - Z_B)(C_M - C_B) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dx}[U_B(h_0 - Z_B)B_B C_B] = k_{MB}(h_0 - Z_B)(C_M - C_B) - k_{BV}(h_0 - Z_V)(C_B - C_V) \quad (13)$$

$$\frac{d}{dx}[U_V(h_0 - Z_V)B_V C_V] = k_{MV}(h_0 - Z_V)(C_M - C_V) + k_{BV}(h_0 - Z_V)(C_B - C_V) - B_V\omega_s C_V + B_V\omega_s E_S \quad (14)$$

ここに、 C_M , C_B , C_V : 主流路、裸地域、植生域の断面平均微細土砂濃度, k_{MB} : 主流路と裸地域での微細土砂交換係数, k_{MV} : 主流路と植生域の微細土砂交換係数, k_{BV} : 裸地域と植生域の微細土砂交換係数とする。

天竜川下流河道の砂州比高は植生の繁茂域を除き比較的小さいため、洪水時には主流路と裸地域の間では浮遊砂の混合が進み土砂濃度は等しくなっているものと仮定し $C_M=C_B=C_0$ と仮定する。また、流下方向の濃度変化は横断方向の濃度変化に比べて十分に小さいことを考慮すると式(14)は

$$0 = k'(h_0 - Z_V)(C_0 - C_V) - B_V\omega_s C_V + B_V\omega_s E_S \quad (15)$$

となる。ここに、 k' : k_{MV} と k_{BV} を合わせた交換係数であり、 $k'=0.001$ (m/s) と仮定した。全断面での流砂量保存 ($QC=Q_M C_M+Q_B C_B+Q_V C_V$) と式(15)から算出された C_V を用い式(10)から、植生域の河床高変化を計算する。

縦断河床勾配については測量データより $I_b=1/700$ とし、堆積土砂の間隙率は $\lambda=0.45$ とした。

4. 植生動態・土砂捕捉の長期予測

(1) 計算条件

計算は植生幅および植生域での土砂堆積量の推定値⁴⁾が存在する1963年から2213年までの250年間に対して実施した。入力する年最大流量 Q については、まず1963年～2006年までの実測された年最大日流量を入力し、その後は1979年～2004年の25年間の年最大日流量を8回弱繰り返すことで今後約200年間の流況とした。

年最大流量 Q に対応する体積土砂濃度 C について、第5回天竜川ダム再編事業環境検討委員会資料³⁾を参考とし流量 Q (m³/s) の関数として算出した以下の式で示される土砂濃度 C を入力している。

$$C = 1.86 \times 10^{-6} Q^{1.23} \quad (16)$$

また、天竜川ダム再編事業で検討されているダム排砂により上流からの供給土砂量が増加した場合の計算として、式(16)を3.6倍³⁾した流入土砂量を与えた計算も実施した。

主流路の河床高に対する裸地域の比高 Z_B の初期値としては、河床低下等の安定した2003年の地形測量結果に基づいて0.53mとした。植生域の比高 Z_V の初期値については、1963年における植生域幅 B_V の少なから植生域における土砂の堆積はまだ少ないとして裸地域の比高 Z_B と同じ値とした。その他、初期地形に関して、2003年の地形測量データに基づき、全川幅 $B=571.1$ m, 主流路幅 $B_M=279.9$ m, $B_V=9.1$ m, $B_B=282.1$ mを使用した。

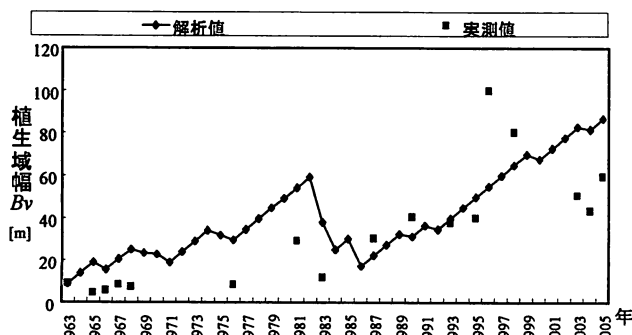


図-4 植生域幅に関する計算と実測の比較

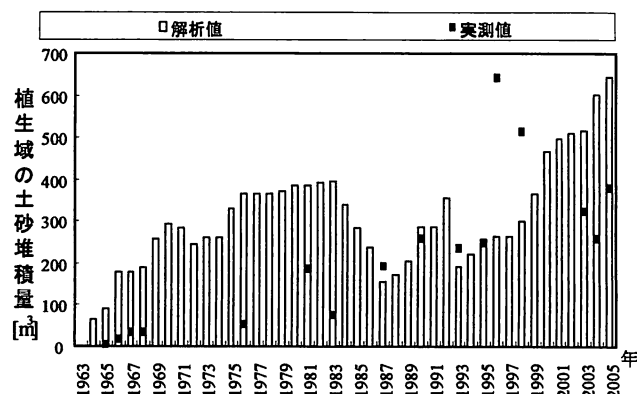
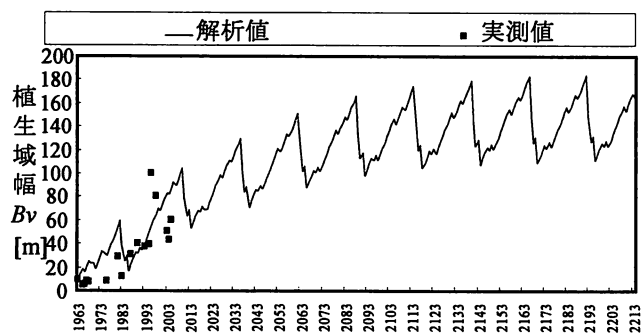
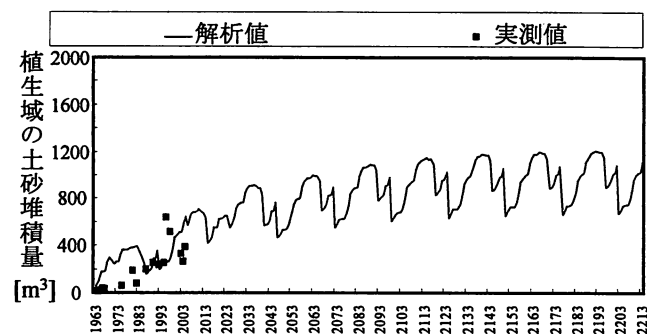


図-5 土砂堆積量に関する計算と実測の比較



(a) 植生域幅



(b) 土砂堆積量

図-6 植生域幅および土砂堆積量に関する長期予測

植生破壊限界流速 U_{MC} については、過去40年の植生幅の遷移より、概ね $4000\text{m}^3/\text{s}$ を超える年最大流量が生じた時に植生幅の減少が生じていることより、計算開始初期の1963年時の断面に $4000\text{m}^3/\text{s}$ の流量を流した場合の主流路流速を U_{MC} とし、それを計算全期間に渡って適用することとした。

(2) 植生域・堆積土砂推移に関する計算と実測の比較

図-4に1963～2005年における植生域幅に関する計算値と実測値の比較を示す。計算初期の20年程度の期間においては、実測値と比べ解析値が大きな値を示している。このことは、1963年から1980年頃の期間は高水敷造成や砂利採取等の影響により、中規模河床形態の発生領域の変化が生じており⁴⁾、本モデルで変化しないものと仮定した主流路、裸地河床高の変化が大きい時期に相当し、このことが解析と実測の違いを引き起こしているものと考えられる。1980年以降の植生域の変化については、実測値自体に大きな変動が含まれているが、全体的な植生繁茂域の増加傾向を再現できている。

1963～2005年における植生域上の土砂堆積量の解析値と実測値⁴⁾を図-5に示す。実測値が河口から8km～16kmの範囲の土砂堆積量であるため、単位流下距離当りである解析結果に8kmの区間長を乗じた値を解析値として比較している。図より、解析値、実測値の双方とも植生域幅の増加に伴って徐々に土砂が堆積していく傾向は一致している。しかし、植生域幅の変化傾向と同様に、解析開

始初期の20年程度については、解析結果が実測値より大きい傾向にある。本解析では長期的な植生域・土砂動態の計算を行うため、実測データがある期間について出来るだけ長く計算を行うこととして、1963年からの解析を試みたが、数値解析モデルで主流路、裸地域での河床高が変化しないものと仮定しているため、中規模河床形態の発生領域変化を伴うような1980年代中旬頃までの変化は十分に再現出来ていない。したがって、本解析モデルの適応性について、最深河床高や砂州波高といった砂州骨格構造の変化が小さい期間に限られることに留意する必要がある。縦断河床地形が安定した1980年代中旬以降に関しては、比較的簡便なモデルでありながら、植生幅、土砂堆積量の大局的な変化を再現可能であることが分かる。

(3) 植生域・堆積土砂量に関する長期予測計算

図-6に1963～2213における植生域幅および土砂堆積量の時系列変化を示す。図より1986年から現在まで増加を続けた植生域幅 B_v は、今後、振動しながらもその平均的な値は2070～2090年頃まで緩やかに増加していくことが分かる。植生域幅 B_v の1周期の中の最大値が180mに達した2130年以降は周期的に100m～180mの間を振動する平衡状態となる。この植生域幅の変化に対応して土砂堆積量も変動し、2130年以降の平衡状態では60万 m^3 ～120万 m^3 の堆積量の間を振動する平衡状態となる。

図-7には、ダム再編事業を意識して上流から供給土砂

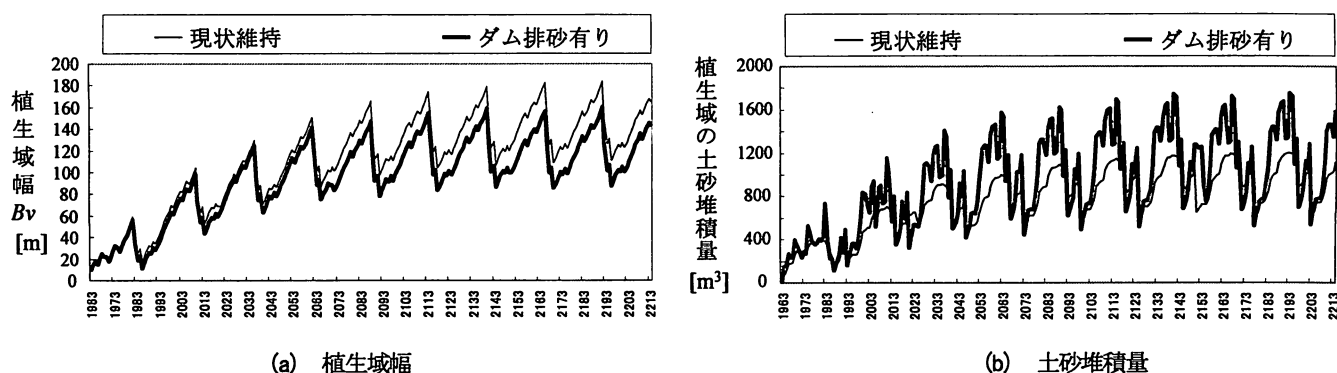


図-7 ダム堆砂対策として排砂を行った場合の植生域幅、土砂堆積量に関する長期予測

量を増加させた場合（以下、ダム排砂有り、と記す）について、1963～2213における植生幅および土砂堆積量の解析結果と示す。図には図-6で示した現状の上流域からの土砂供給量による計算結果（現状維持）も併せて示してある。図より2040年までは現状とダム排砂有りの場合はほとんど同じ挙動を示しているが、それ以降は現状に比べてダム排砂ありの方が、全体的な植生幅の増加率が小さくなる。2130年以降の平衡状態においては、排砂を行った場合は80m～160mの間を振動しており最大値、最小値ともに現状維持に比べて20m程小さい値となっている。これは排砂により上流からの土砂供給量が増加すると、植生域での土砂堆積が進み、それに伴って主流路への流れの集中化・主流路流速の増加が生じ、植生域が破壊される規模が大きくなったことが原因と考えられる。一方、植生域上の土砂堆積量については、全体的にダム排砂有りの場合の方が、現状維持よりも大きな土砂堆積量しめすが、植生域が消失した時の流出量も多く、現状に比べて大きい幅で振動している。このことから排砂を行った場合、植生域拡大時には現状と比べて土砂が急激に堆積し、植生域消失時に多量の土砂の流出を起こすことで植生域の土砂堆積量が激しく変動する事が予測される。

5. 結論

本研究では、天竜川下流域河道を対象として、植生域の拡大・縮小とそれによる土砂捕捉・流出を考慮した長期数値予測モデルを構築した。本研究より得られた主たる結論を以下に示す。

- 1) 天竜川下流域河道を対象として、植生の拡大・消失とそれに伴う細砂の捕捉・流出を考慮した、長期予測モデルを構築した。
- 2) 開発されたモデルによる数値解析の結果、植生域幅は消失と拡大を繰り返しながら全体的に増加を続け、約100年後に平衡状態となることが予測された。また、植生域上の土砂堆積量は植生域幅と連

動して徐々に堆積が進み約100年後平衡状態となる。

- 3) 今後ダムからの排砂を増加させた場合、植生域幅の増加が抑制されるが、植生域上の土砂堆積量の変動が激しくなることが予測される。

謝辞：本研究は土木学会水工学委員会河川懇談会（平成18年度開始課題、浜松河川国道事務所）の補助を受けたものである。地形データ、レーザープロファイラーデータ等は、浜松河川国道事務所から提供いただいたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省中部整備局浜松河川国道事務所（2006）：天竜川ダム再編事業環境検討委員会第1回委員会資料。
- 2) 国土交通省中部整備局浜松河川国道事務所（2006）：天竜川ダム再編事業環境検討委員会第2回委員会資料。
- 3) 国土交通省中部整備局浜松河川国道事務所（2007）：天竜川ダム再編事業環境検討委員会第5回委員会資料。
- 4) 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。
- 5) 李参照，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。
- 6) 福岡捷二，藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，No.411，II-12，pp.53-72，1989。
- 7) 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. Hydraul. Eng.*, Vol.131, No.11, pp.950-960, 2005。
- 8) 小川友浩，田中規夫，城野祐介，河川中州上に繁茂するソ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。
- 9) 泉典洋，池田駿介：直線砂床河川の安定横断形状，土木学会論文集，No.429，II-15，pp.57-66，1991。

（2008. 4. 3受付）