



# 植生水理モデルによる河道内樹林動態モデルの改良

宮本, 仁志 ; 道奥, 康治 ; 神田, 佳一 ; 盛岡, 淳二 ; 阿河, 一穂 ; 木村, 諒 ; 魚谷, 拓矢 ; 大地, 洋平

---

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 15:213-225

(Issue Date)

2011-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011359>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011359>



# 植生水理モデルによる 河道内樹林動態モデルの改良

## IMPROVEMENT OF THE VEGETATION DYNAMICS MODEL IN RIVER CHANNELS BY VEGETATION HYDRAULICS

宮本 仁志 <sup>1)</sup>

Hitoshi Miyamoto

道奥 康治 <sup>2)</sup>

Kohji Michioku

神田 佳一 <sup>3)</sup>

Keiichi Kanda

盛岡 淳二 <sup>4)</sup>

Junji Morioka

阿河 一穂 <sup>5)</sup>

Kazuho Aga

木村 諒 <sup>6)</sup>

Ryo Kimura

魚谷 拓矢 <sup>7)</sup>

Takuya Uotani

大地 洋平 <sup>8)</sup>

Youhei Ohchi

概要：近年，日本の多くの河川では河道の経年的な樹林化が指摘される．本研究では，全体的な研究フレームとして①河川流量，②河川流動，③河床形状，④植生動態の4つの水文・水理・生態過程の相互関連を考え，流量の不確実性を考慮した植生動態の確率モデルの構築を目指す．本報では，②河川流動に焦点をあて，植生動態モデルに樹木抵抗を考慮した流れの一次元等流解析モデルを組み込むことでモデルの精緻化を図った．改良された植生動態モデルを用いて，一級河川加古川で樹木が繁茂する現地観測区間を対象にして河道内樹林の動態評価を行った．本モデルにより，流量規模や河道横断形状の違いによる樹林の経年的な消長特性がよく表現できることを確認した．

キーワード：河川環境管理，河道樹林化，植生動態予測，確率評価，数理生態モデル，植生水理モデル

### 1. はじめに

近年，日本の多くの河川では河道の経年的な樹林化が指摘される．この河道の樹林化は，大規模出水時に洪水の流下阻害となるため，河川管理において解決すべき治水上の課題となる．また，この河道の樹林化は，日本の河川が本来的にもつ沿川生態環境や生物多様性を大きく変質させたため，河川環境保全の観点からも解決すべき課題である．この河道樹林化の機構についてはこれまで，おもに個々の河道区間における河川水理特性に焦点があてられ考察されてきた．ダムによる出水インパクトの機会減少 <sup>1)</sup>

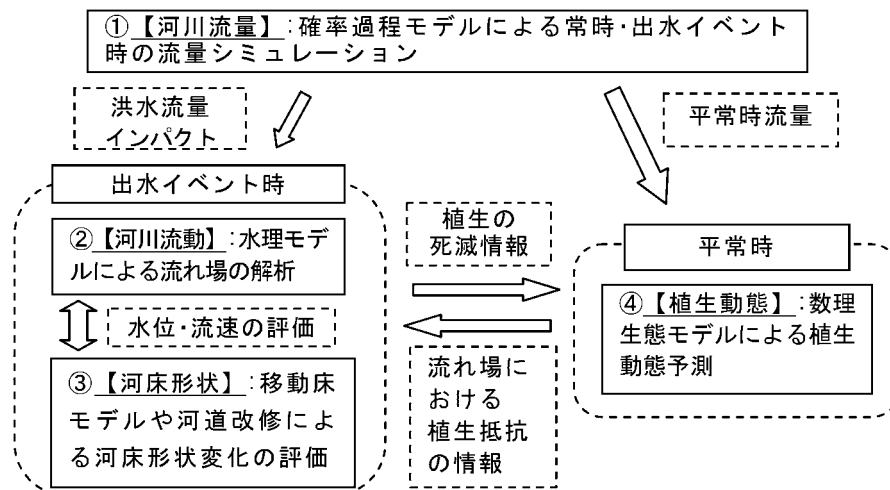


図-1 河道内植生動態に関連する水文・水理・生態過程

や土砂移動と植生動態との関係<sup>2,3)</sup>、河道内樹木を考慮した河川流解析<sup>4,5)</sup>、洪水流と河床変動解析をあわせた樹林消長予測<sup>6)</sup>などが検討され、一部では知見が相当に集積されている。しかしながらその一方で、最近のグローバルな気候変動予測<sup>7)</sup>から予想されるような、将来の大規模出水頻度の不確実性を考慮した河道内樹木の動態特性や樹林河道の治水評価に関しては未だ不明な部分が多い。

本研究では、全体的な研究フレームとして図-1に示す①河川流量、②河川流動、③河床形状、④植生動態の4つの水文・水理・生態過程の相互関連を考え、流量の不確実性を考慮した植生動態の確率モデルの構築を目指す。前報<sup>8)</sup>では、①河川流量と④植生動態に焦点をあててモデルの全体的な枠組みの構築を行った。加古川の樹木繁茂区間を対象にモデルパラメータを同定し、提案する植生動態モデルが流量規模や河道断面の経年変化傾向をよく表現できることを確認した。

本報では、図-1に示す②河川流動に焦点をあてて、前報で構築した植生動態モデル<sup>8)</sup>の改良を試みる。具体的には、植生動態モデルに樹木抵抗を考慮した流れの次元等流解析モデル<sup>9,10)</sup>を組み込むことでモデルの精緻化を図る。また、④植生動態のモデル化に関して、稚樹の新規参入について新たに栄養繁殖<sup>11)</sup>を考慮したモデルを提案する。本報で改良された植生動態モデルを用いて、一級河川加古川で樹林が繁茂する現地観測区間を対象に消長解析を行い、モンテカルロシミュレーションによって流量規模や河道横断形状の違いによる樹林動態特性を確率評価する。得られた結果より、提案する植生動態モデルの予測性能を検討するとともに今後の課題を明らかにする。なお、ショットノイズモデル<sup>12)</sup>を用いた①河川流量の確率過程モデルに関しては前報<sup>8)</sup>に詳しい。さらに、④植生動態のモデル化の大部分は前報<sup>8)</sup>で検討されたが、全体的な研究フレームにおける今後の課題をまとめる意図で本報告でも再掲する。

## 2. 加古川における現地観測の概要

本研究では、一級水系加古川(流域面積: 1,730km<sup>2</sup>、幹川延長: 96km)の河口距離 23.2~23.8km において、2008 年より継続的に河道内樹木の現地観測を実施している。図-2 に、加古川流域の河道網と現地観測地点、本報で関連する流量観測所の位置を、図-3 に、砂州下流部(23.2~23.6km)におけるヤナギ類の樹木分布と砂州地盤の平均水面からの比高分布を、それぞれ示す。樹木の観測調査では砂州上を踏査して個々のヤナギの位置を GPS で測定し、胸高樹径、樹高、倒伏履歴の有無、さらに河床材料などを調べている。この砂州では、図-3 に示すヤナギ類のほかに、真竹などタケ類が優先樹木となっている。また、植生の侵入状況と出水のインパクトを調査するために、観測開始当初に砂州上流部(23.6~23.8km)を横断方向に三段階に切下げ施工し、出水時に H-ADCP により流速分布を計測するとともに河川流解析を別途実施している<sup>4)</sup>。

図-3 に示す部分の砂州面積は約 37,000m<sup>2</sup>であり、2010 年春までの現地調査結果からはそこに 215 本のヤナギが繁茂していた。ヤナギは土壌水分条件のよい水際を主にして砂州全般に広範に分布している。胸高樹径や樹高など樹木サイズは水衝部の低水路側から冠水頻度の低い堤防側に向けて徐々に大きくなる傾向がみられる。本報では、このように砂州全般に繁茂するヤナギ類を対象として植生動態モデルを

構築する．もう一方の優先樹木であるタケ類は，比高の大きい堤防近くの砂州に竹林として偏在して繁茂し，ヤナギ類との住みわけが明確であることと中小規模出水による攪乱の影響が小さいことにより本報では解析対象としていない．なお，①河川流量に関する確率過程モデルのパラメータを同定するために，図-2 に示す大島および万願寺観測所で記録された日平均流量が用いられる<sup>8)</sup>．

### 3. 河道内樹林動態モデルの概要

図-3 に示すような樹木が全般的に繁茂する砂州を考え，経年的な植生変化を表現する数理モデルを定式化した<sup>8)</sup>(図-1 の④に対応)．このモデルは，植生サイズに関する数理生態モデル<sup>13,14)</sup>をベースにしており，河道内環境の著しい特徴である流量変動を確率過程モデル<sup>12)</sup>で表現することにより(図-1 の①に対応)，出水事象のインパクトによる樹木の倒伏の影響をモデルに組み込んでいる．

#### (1) 基礎方程式

この植生動態モデルでは，図-4 に示すように，砂州単位面積あたりの樹木サイズに関する分布密度  $n(x,t)$  の経時変化を考える．ここで，分布密度  $n(x,t)$  は，例えば単位面積( $\text{m}^2$ )・樹木サイズ( $\text{cm}$ )とすると本/ $\text{m}^2/\text{cm}$  がその単位となる． $n(x,t)$  は，確率事象としてモデル化する流量変動(出水イベント)により消長を繰り返すので確率変数となる．なお，砂州内での樹木位置の違いによる洪水インパクトや土壌環境の変化の影響は，後述の分布密度関数を用いた死亡率のモデル化に代表されるように確率的にそれらの影響を取り扱うこととする．

図-4 に斜線で示す範囲  $(x, x + \Delta x)$  の時刻  $t$  における樹木本数は，

$$\int_x^{x+\Delta x} n(y,t) dy \quad (1)$$

で与えられる．この樹木本数は，1)成長によるサイズ変化：成長フラックス  $J(x,t)$  と，2)出水イベントによる倒伏：死亡率  $D(x,t)$  とに影響を受けて，時刻  $t + \Delta t$  で新たな分布密度  $n(x, t + \Delta t)$  へ推移する．これより，樹木本数の時間変化は次式で表される．

$$\frac{d}{dt} \int_x^{x+\Delta x} n(y,t) dy = J(x,t) - J(x + \Delta x, t) - \int_x^{x+\Delta x} D(y,t) n(y,t) dy \quad (2)$$

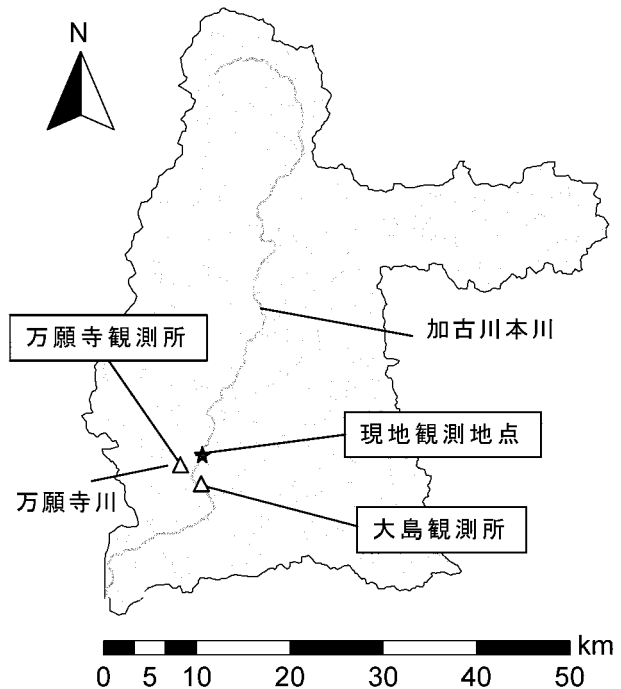


図-2 加古川の河道網と現地観測地点，流量観測所

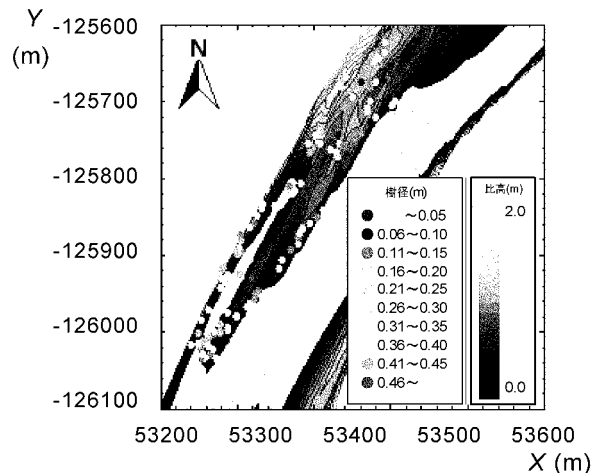


図-3 右岸砂州下流部のヤナギの樹木分布と砂州比高(加古川河口距離:23.2~23.6km)

上式の両辺を  $\Delta x$  で除して  $\Delta x \rightarrow 0$  の極限をとると、 $n(x, t)$ に関する以下の偏微分方程式が得られる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} - D \cdot n \quad (3)$$

さらに、サイズ  $x$  の樹木一個体の平均的な成長速度を  $g(x, t)$  とすると、成長フラックス  $J(x, t)$  は、

$$J(x, t) = g(x, t) \cdot n(x, t) \quad (4)$$

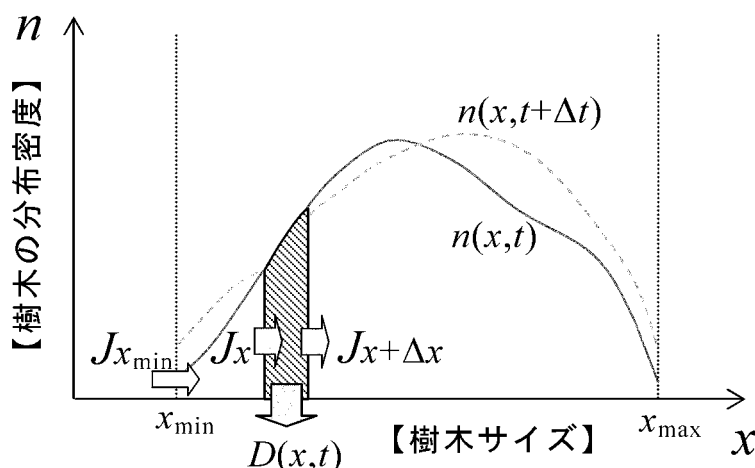


図-4 樹木分布密度の経時変化の概念図

と表され、式(3)は以下のように書き直される。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial (g \cdot n)}{\partial x} - D \cdot n \quad (5)$$

式(5)が、出水事象のインパクトによる樹木倒伏の影響を組み込んだ樹木分布密度  $n(x, t)$  の経時変化を支配する基礎方程式となる。なお、ここまでの記述では一般的な樹木サイズ  $x$  を用いて式を誘導したが、以下の具体的な解析では樹木サイズとして胸高樹径  $d$  を採用する。



図-5 漂着したヤナギの枝からの栄養繁殖  
(加古川現地観測地点)

## (2) 栄養繁殖による稚樹新規参入のモデル化

式(5)の境界条件については、図-4 に示すように最小サイズ  $x_{\min}$  における稚樹の新規参入フラックス  $Jx_{\min}$  を与える。前報<sup>8)</sup>では、稚樹は出水により空きスペースになった砂州部分に種子散布の形態で新規参入するものと仮定し、条件付きのポアソン過程でモデル化した。しかしながら、図-5 に示すように加古川における現地観測では、倒木や出水後の漂着物から再生する栄養繁殖<sup>11)</sup>の方が新規参入において支配的であった。そこで本報では、このヤナギ類の典型的な繁殖方法である栄養繁殖を新たにモデル化し、 $Jx_{\min}$  を次式で与えた。

$$Jx_{\min} = \alpha N_f + \beta \frac{F_s}{Ds_{\min}} \quad (6)$$

ここで、 $Jx_{\min}$ ：新規参入量、 $N_f$ ：倒木本数、 $F_s$ ：樹林帯の空きスペース( $m^2$ )、 $Ds_{\min}$ ：最小樹木サイズにおける樹冠投影面積( $m^2$ )、 $\alpha$ ：倒伏再生パラメータ( $=1.0$ )、 $\beta$ ：漂着パラメータ( $=2.5 \times 10^{-5}$ )、である。 $\alpha$ の値は倒伏樹木1本から稚樹が1本再生することを意味し、 $\beta$ については値を変えながら後述の植生動態シミュレーションを実施し、植生分布密度が適当な分布となる値を設定した。

## (3) 成長速度

成長速度  $g(x, t)$  は、高木による低木への成長阻害を考慮に入れて<sup>14)</sup>、実測データ<sup>15)</sup>を用いて次式のような二次曲線として定式化した<sup>8)</sup>。

$$g(x,t) = ax \left( 1 - \frac{x}{K(N(t))} \right) \quad (7)$$

$$K(N_L) = \frac{x_{\max}}{(1 + b N_L)} \quad (8)$$

$$N_L = \int_x^{x_{\max}} n(y,t) dy \quad (9)$$

ここに、 $a, b$ :モデルパラメータ、 $K(N_L)$ :成長阻害関数、 $N_L$ :サイズ( $x \sim x_{\max}$ )となる高木の樹木本数である。モデルパラメータ  $a, b$  の値については後述する。

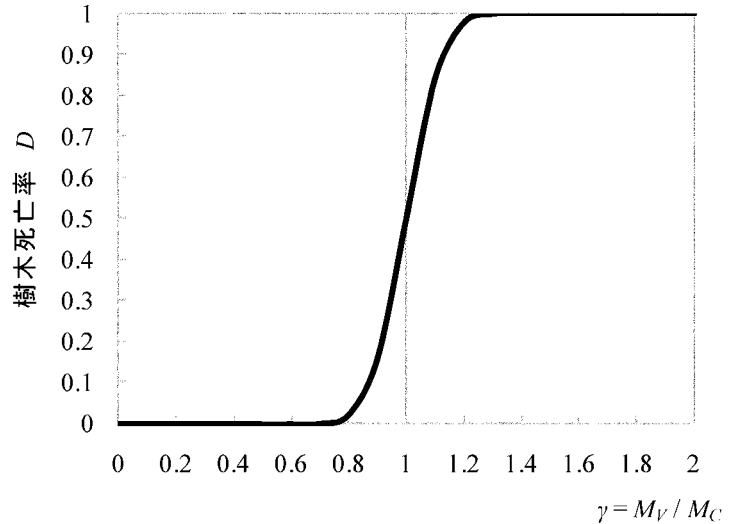


図-6 樹木死亡率の分布

#### (4) 樹木死亡率

河道内の流水環境における樹木死亡の要因としては、①出水イベントによる樹木倒伏、②樹木自体の寿命による立ち枯れ、などが考えられる。ここでは、②寿命による死亡は①出水による死亡に対して相対的にまれな事象であると仮定し、樹木の死亡は出水イベントによる倒伏によるものとした<sup>8)</sup>。具体的には、死亡率  $D(x,t)$  は出水時に樹木にかかる倒伏モーメント  $M_V$  と限界倒伏モーメント  $M_C$ <sup>15)</sup> の比  $\gamma = M_V/M_C$  の関数として、正規分布の累積密度関数を用いて次式のように与えられる。

$$D = \int_{-\infty}^{\gamma} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left[ -\frac{(y - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dy \quad (10)$$

ここに、 $\mu$ :  $\gamma$  の期待値であり、ここでは  $\mu=1.0$  とした。又、 $\sigma$ : 砂州各部において比高や河床材料などの違いによって生じる  $M_C$  のバラツキを表す標準偏差であり、本報では  $\sigma=0.1$  を用いた。図-6 に式(10)で与えられる樹木死亡率  $D$  の分布を示す。この  $\sigma$  に関しては現在検証するためのデータがないため今後の検討課題となる。ここでは実際に  $\sigma$  の値を変えて感度分析を行い、 $\gamma=1.0$  のまわりで極端な倒伏現象が生じないような状況を仮定して、有効数字1桁をとり  $\sigma=0.1$  とした。なお、 $\sigma \rightarrow 0$  において丁度  $M_V = M_C$  を閾値として倒伏・非倒伏が判定されることになる。

出水時に樹木にかかる倒伏モーメント  $M_V$  は、具体的な河道横断面形状およびショットノイズモデルによる確率流量のシミュレーション値<sup>8)</sup>が与えられた時、次章で導入する流れの一次元解析モデル(図-1の②に対応)から砂州上の平均流速  $v$  と平均水深  $h$  を算出し、それらを用いて以下の式(11)から算出する。

$$M_V = \frac{1}{4} \rho C_D d h^2 v^2 \quad (11)$$

ここに、 $\rho$ : 流体密度、 $C_D$ : 樹木の抗力係数(=1.2)、である。

図-7 に、本報で用いた加古川観測地点(河口距離 23.6km)における単純化された疑似河道横断面形状を示す。樹林化された砂州は左岸天端からの距離 150~170m に位置する。河床勾配は 1/800 である。なお、 $C_D$  は冠水/非冠水により樹冠部分の値が異なる<sup>15)</sup>。本報では、導入する流れの一次元解析モデルが非冠水の流れ場のみを対象としているため、樹冠を考慮せず幹部分の値(=1.2)を用いた。これにより、樹冠を考慮する時に比べて若干樹木抗力を過大評価することになる。この冠水/非冠水による抗力係数の変化についての考慮は次の段階での研究課題となる。

#### 4. 樹林抵抗を考慮した流れの一次元解析モデルの導入

前報<sup>8)</sup>では、流量の確率過程モデルから得られる日平均流量時系列よりマニング式を用いて流速を算定したが、樹木抵抗が考慮されておらず樹林部の流速が大きく見積もられた。そのため、対応する倒伏モーメントおよび樹木死亡率も過大評価されてしまう傾向にあった。そこで本報では、樹木抵抗を陽にモデル化した一次元河川流解析モデル<sup>10)</sup>を導入することで樹林部における水深と流速を算出する。これにより、実際の河道状況に即した樹林の消長評価が可能となる。以下に、一次元解析の概要を述べる。

本報では、流れの一次元解析モデルの定式化に際して Rameshwaran と Shiono<sup>9)</sup>の解析モデルを参照した。彼らは台形複断面水路を対象として流れの運動量保存式を解き、流速の横断方向分布の解析解を導出している。その際、解析的取り扱いを容易に展開するため、河床せん断力は摩擦損失係数表示が用いられていた。本報では、工学的実用面に重点をおくために摩擦損失係数をマニングの粗度係数におきかえ、さらに運動量のバランスを考える際に樹木抵抗を陽に考慮することで運動量方程式を新たに構成した<sup>10)</sup>。導出した運動方程式は次式のようなものである。

$$\rho g S_0 H - \rho \frac{g n^2}{H^{1/3}} u^2 \sqrt{\frac{1}{s^2} + 1} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \lambda H^2 \left( \frac{g n^2}{H^{1/3}} \right)^{1/2} u \frac{\partial u}{\partial y} \right\} = \frac{\rho C_D \lambda_{veg}}{2} u^2 H \quad (12)$$

ここで、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力加速度、 $S_0$ ：河床勾配、 $H$ ：水深、 $n$ ：マニングの粗度係数、 $u$ ：流速の流下方向成分、 $1/s$ ：横断方向の河床勾配(図-7を参照)、 $\lambda$ ：渦動粘性係数に関する定数(=0.3)、 $\lambda_{veg}$ ：樹木密度、 $y$ ：横断方向座標軸、である。

#### 5. 解析結果と考察

##### (1) 成長速度のモデルパラメータ同定<sup>8)</sup>

ヤナギの樹齢・樹径・成長速度の関係を図-8に示す。式(7)~(9)における成長速度のパラメータ同定に際しては、成長速度自体や成長阻害に関する観測データが入手困難であった。そのため、ひとまず成長阻害がないと仮定し、図-8(a)に示すように樹齢と樹径の観測値<sup>15)</sup>を用いて両者の関係を三次曲線で近似した。次に、得られた曲線を時間微分して成長速度の次元に変換し、これより個々の観測値に対応する成長速度の推定値を求めた(図-8(b)のプロット)。これに基づいて式(7)のモデル定数 $a$ を最小自乗法により同定した。 $a$ の同定値は $5.0 \times 10^{-4}$ である。図-8(b)に得られた成長速度曲線(成長阻害なし)を示す。一方、式(8)の成長阻害関数中のパラメータ $b$ に関しては、出水のインパクトがない場合のシミュレーションによって感度分析を行い、極相林の樹木サイズが最大値 $d_{max}$ に集中しすぎないような適正值( $5.0 \times 10^{-4}$ )を与えた。なお、図-8(a)に示す観測値はすでに砂州・樹林の環境特性が含まれているため、成長阻害なしの仮定は多少無理がある。さらに、本報では樹木成長速度の平均値を対象として定式化を行ったが、図-8(a)に示すように同じ樹齢でも樹木サイズに大きなバラツキがあることがわかる。この樹木成長速度の分散は、全体としての砂州の樹林化進行に影響することが予想される<sup>13)</sup>。以上に挙げられた成長速度に関する系統的な観測知見の蓄積と成長速度の分散のモデル化は今後の研究課題となる。

##### (2) 樹木抵抗を考慮した一次元等流解析

図-9に、流れの一次元解析モデルによって得られる横断方向の水深・流速分布を示す。この解析では

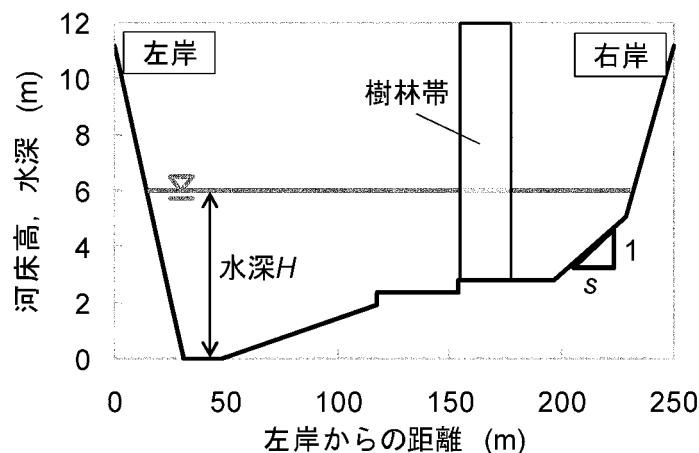


図-7 加古川河口距離 23.6km 地点における単純化された河道横断形状

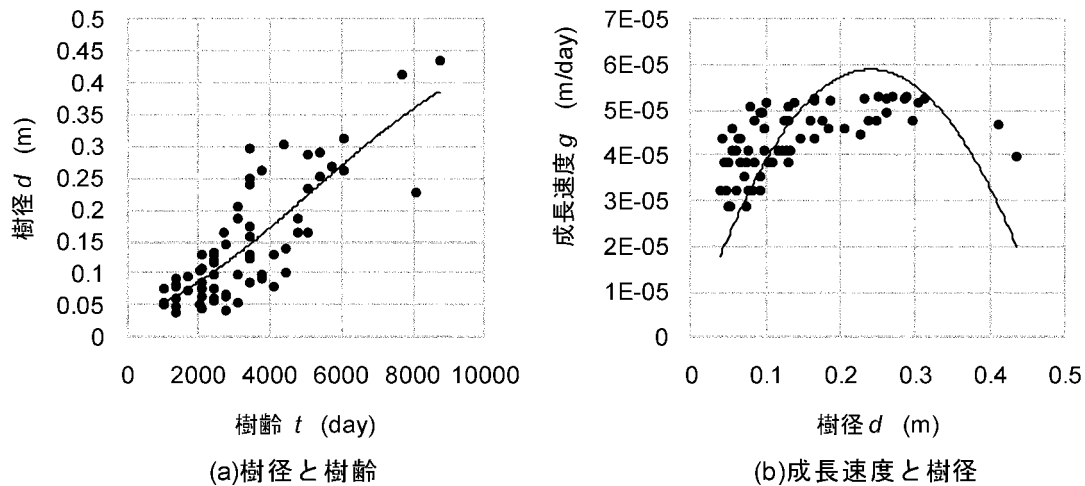


図-8 ヤナギの樹齢・樹径・成長速度の関係（成長阻害なしを仮定）

水深  $h$  と樹木密生度  $\lambda_{veg}$  を入力値として与え、式(12)を解くことによって横断方向の流速分布  $u$ ・流量  $Q$  を算出する。解析の入力条件としては、加古川の現地観測地点の状況より、粗度係数  $n$ : 0.055(高水敷), 0.031(樹林帯), 0.028(低水路), 縦断方向の河床勾配  $S_0$ : 1/800, 横断方向の河床勾配  $1/s$ : 0.028~0.36 を与えた。また、左岸距離 150~170m の高水敷上に樹林帯が存在すると設定した。図-9 に示す解析結果はすべてのケースで流量が約 4050 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup> であり、樹木密生度  $\lambda_{veg}$  は 0, 0.02, 0.05 と異なる。図-9 より、樹林帯が存在する高水敷上において、樹木による流水阻害の影響で流速が大きく低減していることが確認できる。さらに、樹木密生度  $\lambda_{veg}$  が大きくなるほど樹林帯による流速低減効果が顕著になり、その一方で、低水路の流速は大きくなっている。対応する水深変化に関しては、樹木密生度  $\lambda_{veg}$  が大きくなるに従って水深  $h$  が 7.8, 8.0, 8.1 と大きくなっており、解析結果は樹林帯による堰上効果をよく表現できていることがわかる。なお前述のように、本報で定式化されたモデルは樹木が非冠水の場合のみを解析対象にしており、冠水の場合に対応するモデルの拡張は今後の課題となる。

植生動態モデルにおける死亡率の算定に際しては、あらかじめ与えた水位・樹木密生度の組み合わせに対する流速・流量の数値表を作成しておく。そして、図-1 の①にしめす河川流量が確率過程モデル<sup>8)</sup> から得られれば、その時の樹木密生度に対する流速・水深が数値表から内挿計算され、式(11)を介して式(10)によって樹木死亡率  $D$  が算定される。

### (3) 樹林動態の消長解析

本報で改良した動態予測モデルを用いて、樹木分布密度  $n(d,t)$  の経時変化を 1 日のきざみ幅で 100 年間解析した。図-10 は解析結果を 10 年毎に示したものである。 $Q_{0.8}$ ,  $Q_{1.0}$ ,  $Q_{1.2}$  は現状の流量規模をそれぞれ 0.8, 1.0, 1.2 倍した流量時系列を用いたことを示す。 $Q_{0.8}$  は堰やダムによる流量制御による流量規模の減少を、一方、 $Q_{1.2}$  は気候変動による洪水規模の増大を、それぞれ想定したものである。樹木分布密度の初期値  $n(d,0)$  は裸地を設定した。なお、ここで示した個々の解析結果は、次節に示すモンテカルロシミュレーションでの試行回数の中の 1 回を例示するものである。

図-10(a) に示す流量規模  $Q_{0.8}$  のケースでは、樹径の小さい幼木は出水インパクトによる死滅と新規参入による増加を繰り返している。その一方で、樹径  $d$  が 40cm をこえる大きい樹木は出水によって死滅することなく、時間の経過とともにその分布密度を増加させて極相状態へと漸近していく。図-10(b) の現状流量規模  $Q_{1.0}$  のケースでは、樹木分布密度  $n(d,t)$  の経時変化特性は  $Q_{0.8}$  のケースのものとはほぼ同一である。しかし、流量規模による出水インパクトが大きくなるため、樹径の小さい幼木および樹径の大きい成木の双方において樹木分布密度  $n(d,t)$  は相対的に小さくなっている。図-10(c) の流量規模  $Q_{1.2}$  のケースではさらに出水インパクトが大きくなるため、全体的に樹木分布密度  $n(d,t)$  の値が小さくなる。これは、流量規模  $Q_{1.2}$  の河道は樹木植生の生育環境としては非常に厳しく、砂州上で樹木が成長しにくい裸地河道として平衡状態になることを示している。なお、出水インパクトの大きい流量規模  $Q_{1.2}$  のケースにおいても、樹径  $d$  が非常に大きい樹木は死滅せずに存在し続けている。このように大きな樹木の存在は、さらに大きな流量規模に気候状態が遷移した場合に流木被害を発生させる怖れがある。本報で

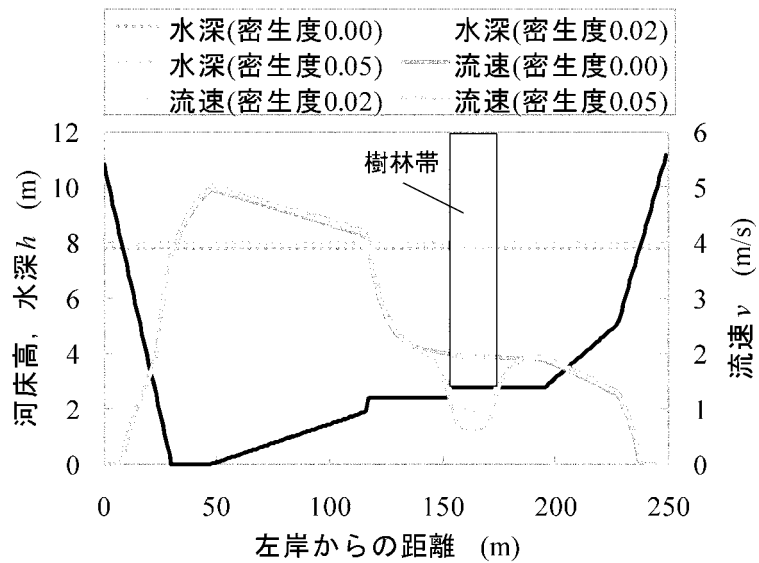
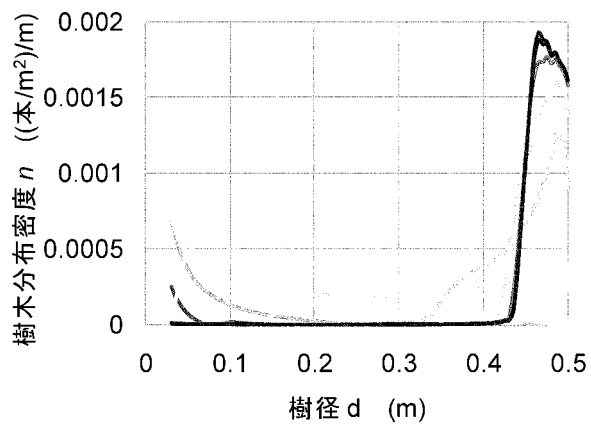
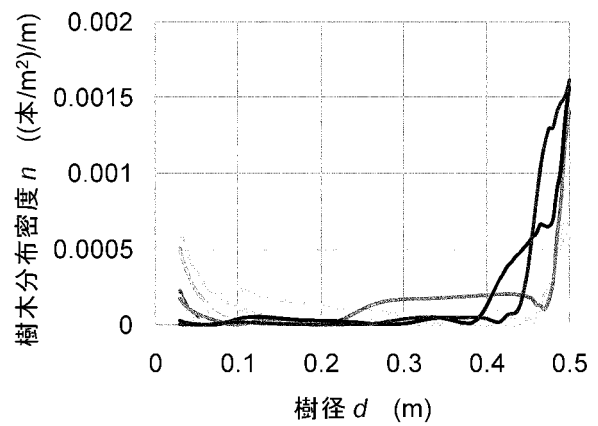


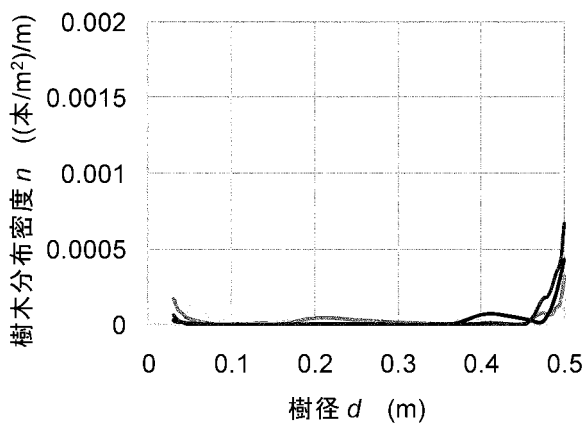
図-9 一次元等流解析による横断面内の流速分布と水深・河床高および樹林帯の位置



(a) 現状流量規模の0.8倍 ( $Q_{0.8}$ )



(b) 現状流量規模 ( $Q_{1.0}$ )



(c) 現状流量規模の1.2倍 ( $Q_{1.2}$ )

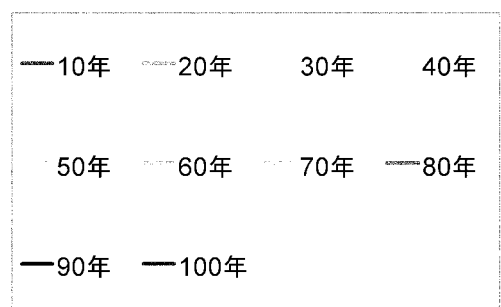


図-10 植生動態シミュレーションによる樹木分布密度の経時変化(流量規模の影響解析)

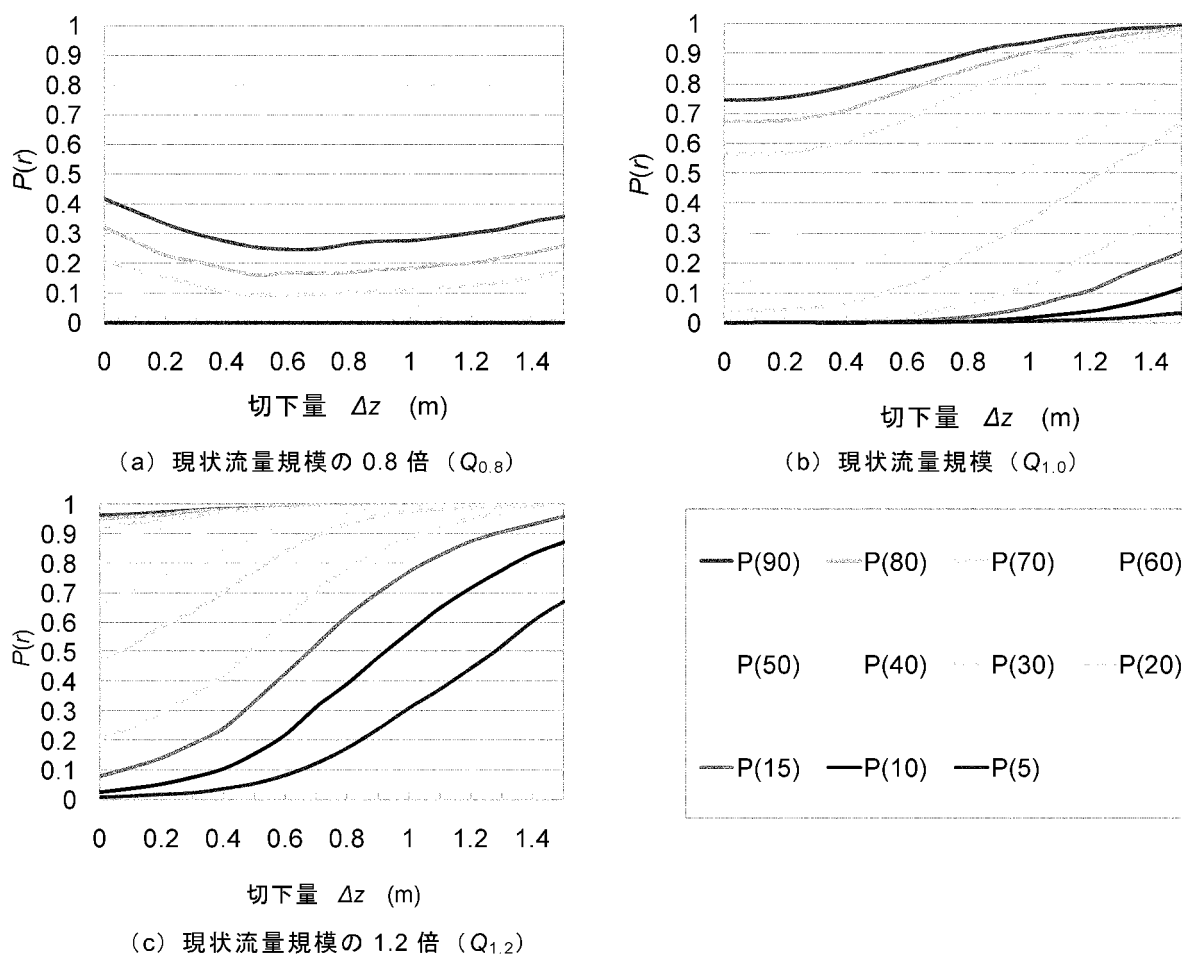


図-11 樹林面積の非超過確率と流量規模・切下げ量の関係

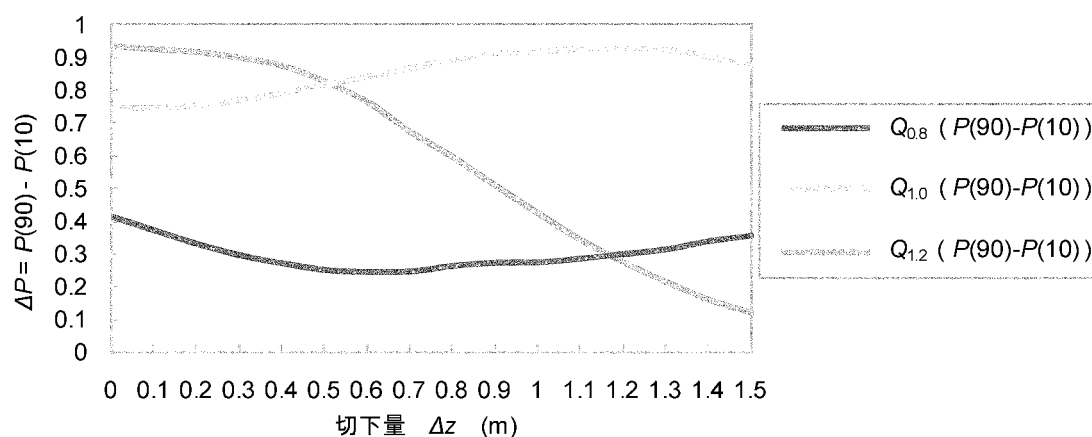


図-12 環境平衡確率  $\Delta P$  と流量規模・切下げ量の関係 ( $\Delta P = P(90) - P(10)$ )

は、樹木死亡は出水インパクトによる樹木倒伏のみにより生じるものと仮定しているが、ヤナギ類の寿命は 50～60 年程度<sup>16)</sup>という報告もあり、今後は寿命による自然死を考慮して植生動態モデルのさらなる精緻化を検討する必要があると思われる。

#### (4) 環境平衡解析

本節ではまず、図-1 の③に示した河床形状の変化に対応させて段階的に河床を切下げ、同時に、流量規模を変化させたモンテカルロシミュレーションの結果を考察する。切下げ量  $\Delta z$  の設定に関しては、樹

林帯の存在する現状の高水敷を 1.5(m)まで変化させた。図-10 に示すような樹林動態予測を 2000 回実施し、砂州上に占める樹林面積率が  $r\%$  以下になる非超過確率  $P(r)$  を算出することで樹林動態を評価する。

図-11 に切下げ量  $\Delta z$  と非超過確率  $P(r)$  の関係を示す。本報では、栄養繁殖による稚樹の新規参入モデルと樹林抵抗を考慮した流れの一次元解析モデルを導入して前報<sup>8)</sup>の動態解析モデルを精緻化したため、図-11 に示す  $\Delta z$  と  $P(r)$  の詳細な関係は前報<sup>8)</sup>の結果から変化している。しかしながら以下に考察するように、樹林動態に対する切下げ量や流量規模変化の影響はほぼ同一となっており、合理的な解析結果が得られたものと判断できる。

図-11(a)に示す流量規模  $Q_{0.8}$  のケースでは、切下げ量  $\Delta z$  の増加とともに非超過確率  $P(r)$  は減少している。  $\Delta z=0.6\text{m}$  を超えたあたりで増加傾向に転じる。  $P(r)$  が減少傾向を示す  $\Delta z$  の小さい場合は、高水敷の冠水頻度の増加に伴って漂着樹木が定着しやすくなり、その一方で流量規模  $Q_{0.8}$  が小さいため樹木が倒伏するほどの出水インパクトが発生しにくい。これより、  $\Delta z$  が大きくなるに伴ってその傾向が顕著になり、新規参入が優位に働いて樹林化傾向がすすむ。逆に、切下げ量がある程度大きくなり閾値  $\Delta z=0.6\text{m}$  をこえると、出水インパクトの影響が大きくなり樹木の新規参入圧力にまさるようになる。そのため  $P(r)$  が増加に転じ、それ以降は  $\Delta z$  が大きくなるに伴って裸地化が促進されることになる。図-11(b)に示す現状流量規模  $Q_{1.0}$  のケースでは、  $\Delta z$  の増加に伴って  $P(r)$  は大きくなっている。これは、図-11(a)のケースにおける閾値  $\Delta z=0.6\text{m}$  以降の植生動態状況と同様であり、出水によって死滅する樹木本数が栄養繁殖によって新規参入する樹木本数を上回る帰結である。図-11(c)に示す流量規模  $Q_{1.2}$  のケースでは、図-11(b)に示す  $Q_{1.0}$  のケースと比べていずれの  $P(r)$  も大きい値をとる。これは、出水インパクトがさらに大きくなるため、  $\Delta z$  の増加に伴って急激に砂州の裸地化が進むことに対応している。

最後に、砂州における適切な樹林面積を  $r_1 \sim r_2\%$  の範囲と仮定した時、  $\Delta P = P(r_1) - P(r_2)$  を樹林の環境平衡確率と定義して樹林河道の環境評価を行う。ここで、  $\Delta P$  が大きいほど適切な樹林環境が実現する確率が高くなると解釈する。この  $\Delta P$  に関しては対象とする河道セグメントごとに適切な樹林状態が異なると考えられる。本報では、砂州における樹林の面積割合が極端に高く 90%以上になる場合を「樹林化」、逆に 10%以下になる場合を「裸地化」と定義し、極端な樹林化・裸地化が発生しない状況を適切な樹林面積と仮定し、  $P(r_1)=P(90)$ 、  $P(r_2)=P(10)$  を採用した。図-12 に、流量規模・切下げ量の変化にともなう  $\Delta P$  の分布を示す。これより、現状の流量規模  $Q_{1.0}$  においては、切下げ量を  $\Delta z = 1.2\text{m}$  に設定することで  $\Delta P$  の値が極大値をとり、本報に定義した意味で最適樹林環境になることが判断される。  $Q_{0.8}$  では、出水による樹木倒伏よりも新規参入による樹林繁茂の効果が優位に働くため全体的に  $\Delta P$  が減少し、適切な樹林環境の実現確率が低下する。一方、  $Q_{1.2}$  の場合は、現状の断面で  $\Delta P$  の値が最大値を示し、切下げ量を大きくするほど出水インパクトによる樹木倒伏が顕著となるため裸地化傾向が顕著になる意味で環境平衡確率  $\Delta P$  が低減する。

## 6. まとめと今後の課題

本報では、植生水利モデルを導入することにより河道内樹林の動態解析モデルの改良を行った。以下に得られた成果を列挙する。

### ① 植生動態モデルの改良について

植生動態モデルに樹木抵抗を考慮した流れの一次元等流解析モデルを組み込むことでモデルの精緻化を行った。樹林部における流速低減と対応する樹木死亡率、さらに、水位の堰上げ効果の影響が合理的に評価できるようになった。また、稚樹の新規参入について栄養繁殖を考慮した新たなモデルを提案した。

### ② 河道内樹林の消長特性の確率評価について

改良された植生動態モデルを用いて、一級河川加古川で樹林が繁茂する現地観測区間を対象にモンテカルロシミュレーションによる消長評価を行った。本モデルにより、流量規模や河道横断形状の違いによる樹林の経年的な動態特性変化がよく表現できることを確認した。

今後、近い将来に解決すべき研究課題を以下に列挙する。

### ① 植生動態モデルの精緻化に関して

樹木の成長速度、新規参入など植生動態モデルの各項におけるモデルパラメータの調整を行い、解析精度の向上を図る。また、樹木個体間の成長速度のバラツキを分散項として定式化し、基礎

方程式に導入する。樹木死亡率に関しては、寿命による自然死をモデル化する。

② 植生動態モデルの検証データに関して

植生動態モデルの有効性を検証するためには、複数の樹林河道における長期間にわたる植生動態の調査データが必要である。現在、河道内における過去からの樹林化進行状況を把握するために衛星画像を用いた画像解析手法<sup>17)</sup>を検討中であり、引続き手法の開発を進める予定である。

③ 一次元等流解析モデルの水位情報を用いた治水評価に関して

本報で新たに導入した流れの一次元解析モデルでは出水時の水位が解として得られる。本研究ではこれまで、砂州上に占める樹林の動態解析を介して樹林河道の植生環境面での評価を行ってきたが、今後は、一次元等流解析モデルで得られた水位情報を用いて河道の治水評価を行い、治水・環境のバランスを考慮した樹林河道の統合評価手法の確立をめざす。

④ 植生動態モデルの流域全体への拡張に関して

本研究ではこれまで、現地観測地点である加古川河口距離 23.6km 地点を対象として植生動態モデルの基本性能を検討してきた。しかしながら、適切な河道管理を行うためには流域一貫の視座が必要である。そこで、今後は植生動態モデルの精緻化と並行して、河道位数を用いた流量予測モデル<sup>18)</sup>を導入することにより植生動態モデルを流域全体に拡張する予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、神戸大学都市安全研究センター(H22 プロジェクト研究、代表：宮本仁志)から研究補助を頂きました。また、近畿建設協会(H22 研究助成、代表：宮本仁志)および河川整備基金(No.22-1212-011、代表：道奥康治)から研究助成を頂きました。本研究の一部は、加古川の河道樹林化に関する研究会(明石工業高等専門学校、神戸大学、国土交通省姫路河川国道事務所)の調査研究の一環として実施されました。以上、記して関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 辻本, 村上, 安井: 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, 第45巻, pp.1105-1110, 2001.
- 2) 清水, 小葉竹, 新船, 岡田: 礫床河川の河道内樹林化に関する一考察, 水工学論文集, 第43巻, pp.971-976, 1999.
- 3) 李, 藤田, 山本: 礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ - 多摩川上流部を対象にした事例分析より -, 水工学論文集, 第43巻, pp.977-982, 1999.
- 4) 道奥, 宮本, 神田, 大地, 阿河, 盛岡, 魚谷, 吉田, 吉村: 樹林化した河道の流況観測と樹林内外の流況・樹木抗力の解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.437-442, 2010.
- 5) 前野, 宮内, 森: 植生が旭川の洪水流に及ぼす影響の検討, 水工学論文集, 第48巻, pp.757-762, 2004.
- 6) 藤田, 李, 渡辺, 塚原, 山本, 望月: 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, No.747/II-65, pp.41-60, 2003.
- 7) Kundzewicz, Z.W., et.al: Freshwater resources and their management, Climate Change 2007: Impact, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the AR4 of the IPCC, Cambridge University Press, pp.173-210, 2007.
- 8) 宮本, 盛岡, 神田, 道奥, 魚谷, 大地, 阿河: 流量変動のインパクトを考慮した河道内樹林動態の確率モデル, 水工学論文集, 第55巻, pp.S1405-S1410, 2011.
- 9) Rameshwaran, P., and Shiono, K.: Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. 3, pp.302-315, 2007.
- 10) 阿河, 大地, 檜, 盛岡, 木村, 道奥, 宮本, 神田, 魚谷: 一次元流況解析に基づく河道内樹木の適正管理に関する検討, 平成23年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2011.
- 11) 渡辺, 前野, 渡辺, 志々田: 旭川におけるヤナギ林の拡大機構とその抑制管理のあり方に関する検討, 河川技術論文集, 第11巻, pp.77-82, 2005.
- 12) Weiss, G.: Shot noise models for the generation of synthetic stream-flow data, *Water Resources Research*, Vol.13, No.1, pp.101-108, 1977.
- 13) 巖佐: 数理生物学入門 - 生物社会のダイナミクスを探る, 改装版, 共立出版, 352p, 1998.

- 14) Takada, T. and Iwasa, Y.: Size distribution dynamics of plants with interaction by shading, *Ecological Modeling*, No.33, pp.173-184, 1986.
- 15) リバーフロント整備センター: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, 204p, 1999.
- 16) 崎尾, 山本: 水辺林の生態学, 東京大学出版会, 206p, 2002.
- 17) 辻本, 宮本: リモートセンシングに基づく河道内生態環境の定量分析, 平成23年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2011.
- 18) 宮本, 橋本, 道奥: 河道リンク/マグニチュードと流域面積・河川流量の関係, 水工学論文集, 第54巻, pp.1201-1206, 2010.

著者: 1) 宮本仁志, 工学研究科市民工学専攻, 准教授; 2) 道奥康治, 工学研究科市民工学専攻, 教授;  
3) 神田佳一, 舞鶴工業高等専門学校都市システム工学科, 教授; 4) 盛岡淳二, 工学研究科市民工学専攻,  
学生; 5) 阿河一穂, 工学研究科市民工学専攻, 学生; 6) 木村諒, 工学部市民工学科, 学生; 7) 魚谷拓矢,  
明石工業高等専門学校建築・都市システム工学専攻, 学生; 8) 大地洋平, 工学研究科市民工学専攻, 学生.

# **IMPROVEMENT OF THE VEGETATION DYNAMICS MODEL IN RIVER CHANNELS BY VEGETATION HYDRAULICS**

Hitoshi Miyamoto  
Kohji Michioku  
Keiichi Kanda  
Junji Morioka  
Kazuho Aga  
Ryo Kimura  
Takuya Uotani  
Youhei Ohchi

## **Abstract**

Vegetation overgrowth within river channels has become a serious engineering problem for river management in Japan. In order to properly manage the river channels for both flood protection and ecological conservation, it would be necessary to accurately predict the tree vegetation dynamics for long-term duration. In this study, we try to improve the stochastic model that was proposed in the previous research for predicting the vegetation dynamics with emphasis on the interaction with flood events. A river hydraulics model is introduced to the model for appropriately simulating a velocity distribution and the vegetation drag force, hence the vegetation loss by flood impact. Monte Carlo simulation of the improved model indicated that a suitable equilibrium state of tree vegetation density for ecological conservation is achieved by a certain flood level. The results obtained in this study strongly support the model applicability for predicting the tree vegetation dynamics in different channel forms and different river discharges.