

2015 年度（第 51 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 15-A-4

河川水系における樹林化傾向・治水安全性の 統合的確率評価

芝浦工業大学 教授

宮本仁志

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015 年 8 月

河川水系における樹林化傾向・治水安全性の統合的確率評価

An Integrated Stochastic Evaluation of Vegetation Overgrowth Tendency and Flood Protection Safety in a River System

宮 本 仁 志

Hitoshi MIYAMOTO

1. はじめに

日本の多くの河川で経年的に進行する河道の樹林化は、河川を管理する上でさまざまな問題を引き起こす^{1,2)}。洪水の流下能力の低下、河川生態系の変質などはその代表例であろう。前者を防災、後者を環境の代表課題とすると、将来にわたる持続可能な河川管理といった観点からは、両者のバランスを的確に評価した河川植生の管理技術が非常に重要となる。

図-1に例示するような、過剰な樹木繁茂へ至る河道の樹林化は、土砂動態の観点からは礫床への細砂堆積、草本の侵入、木本への変化といった植生遷移プロセスが提示されている³⁾。しかしながら、その原因は対象とする流域や河川地先によって諸説さまざまである。上流のダムによる洪水規模や土砂量の減少、河川改修・砂利採取による滞筋の固定化と砂州比高の拡大、河道の富栄養化の進行などが例示されるが、樹林化の統一的な現象理解は未だなされず、抜本的な問題解決には至っていない¹⁾。

この原因が判然としない河川の樹林化に関して、著者らはこれまで樹林化現象を確率論的に捉え、さらに、流域一貫管理の重要性から河川流域の水系システム上で対象とする河道を位置づけることによって、樹木動態の経年変化が確率評価できる解析モデルを構築してきた⁴⁻⁸⁾。

この植生動態モデルは図-2に示す枠組みで構成される。河川地先の河道断面を対象にしたサブモデル群(①～④)と、河川水系の河道ネットワークモデル(⑩)からなる。前者のモデル群では、樹林化に至る機構を①河川流量、②河川流動、③河床形状、④植生生態の相互作用がおりなす確率過程と考え、砂州上の長期間に渡る樹木消長が評価される。一方、後者のネットワークモデル(⑩)は流域の流量集積特性を①～④の各サブモデルに反映させる役割をもち、植生動態モデルが水系全体に展開される。具体的には、①河川流量の確率過程モデル^{9,10)}が位相化指標のひとつであるリンクマグニチュード¹¹⁻¹³⁾で表現され、任意河道の流量時系列がその



(a) 1947年10月(米軍撮影空中写真(国土地理院))



(b) 2007年11月(国土交通省姫路河川国道事務所提供)

図-1 樹林化の例(加古川: 河口23-24km付近)²⁾

統計特性を保持した形で生成される。

本講義では、この植生動態モデル⁴⁻⁸⁾により樹木繁茂状況に応じた洪水水位が評価できるため、河川生態系の側面だけでなく、治水安全面も含めた樹林化河道の統合的確率評価手法を講述する。これより、河川水系において治水安全面から樹木管理が優先的に必要とされる河道を抽出する技術を示し、さらに、河道ごとの好適な生態環境・治水安全のバランスに関する議論を展開するための今後の研究・技術開発の方向性に言及する。

なお、本講義は河川樹林化に関する著者らの一連の研究成果を取りまとめたものであり、詳細の内容については個々の論文⁴⁻⁸⁾をご参照いただきたい。

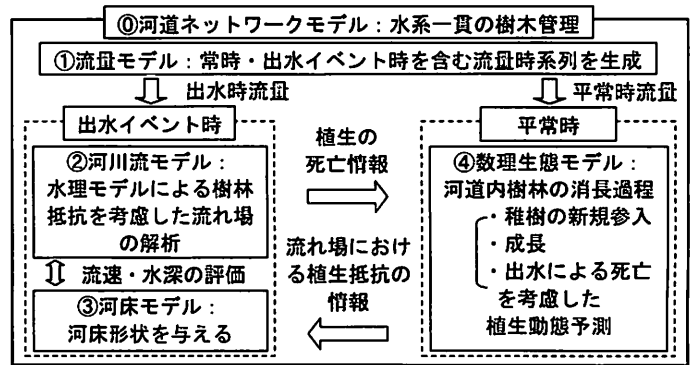


図-2 植生動態モデルの全体的枠組み

2. 河川水系における植生動態モデル

1) 植生動態モデルの全体概要

本講義の植生動態モデルは、出水インパクトの規模やタイミングと樹木消長の兼ね合により顕在化する樹林化/裸地化の程度を確率的に定量評価し、検討対象の河道特性を明らかにするために用いられる。その確率評価は、後述のとおりであるが、植生動態モデルにより生成された数多くの時系列群を用いて、モンテカルロシミュレーションによって数値的に実施される。著者らの検討⁴⁾では、2000パターンの日平均流量を所定の年限(100年間)にわたって疑似生成し、得られる出水水位と樹木繁茂に関する2000パターンの解析結果から対象河道断面における治水・環境両面の統合的確率評価を行った。本講義では、この解析結果⁴⁾を中心に議論を進める。

この植生動態モデルについては、これまで、流量規模や砂州・高水敷の比高など河道特性の異なる加古川の複数地点を対象にして、この植生動態モデルによる解析を行い、砂州上の樹林地/裸地の傾向がよく表現できるモデルであることを検証してきた^{6,7)}。さらに、現地観測で計測された樹木データを用いて植生動態モデルの精緻化を行い、期待値と標準偏差を用いた確率評価を介して現地の樹木分布密度がよく表現されるモデルであることを確認している⁵⁾。

図-2に示す植生動態モデルの全体構成は、上述の1パターンの解析スキームを示したものである。この植生動態モデルは、河川流域全体に対して対象河道のもつ流量の集積特性を数理表現し得る①河道ネットワークモデルによって、対象河道における植生動態に関連する①～④の水文・水理・生態過程サブモデルが内包される構成となっている。

具体的な植生動態モデルの実行手順は以下のようである。

- ①河道ネットワークモデルにより、河道の位数化手法のひとつであるリンクマグニチュードを用いて対象河道の流量規模が与えられる。
- その流量規模を用いて、確率過程モデルをもとにした①流量モデルによって河川流量の時系列が疑似生成される。
- 生成された流量時系列の時間進行に従って、与えられた河道断面において砂州や高水敷が冠水する出水イベント時には、②河川流モデルにより流速・水位や植生の流亡・死滅情報が算出される。
- その一方で、低水路での流れとなる平常流量時には、④数理生態モデルにより樹木成長や稚樹の新

規参入など砂州・高水敷上の植生動態が算出される。

- (v) (iii)および(iv)で得られた植生の流亡・死滅や流れ場での植生抵抗の情報は、流量時系列の時間軸上で出水イベントをトリガーにしてサブモデル間相互に関係づけられる。

なお、③河床モデルに関しては、現行のモデルでは、土砂供給の増減に伴う河床の低下・上昇や高水敷の切下げに関して、それに対応した断面形状を境界条件として静的に与えることで表現している。

2) 植生動態の数理解生態モデル(図-2の④)

図-1(b)に示すような樹木が繁茂する砂州全体を考え、経年的な植生変化を表現する数理解生態モデル^{14,15)}をベースにして、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^{9,10)}(図-2の①)で表現することにより、出水事象のインパクトによる樹木の流亡・死滅の影響をモデルに組み込む。

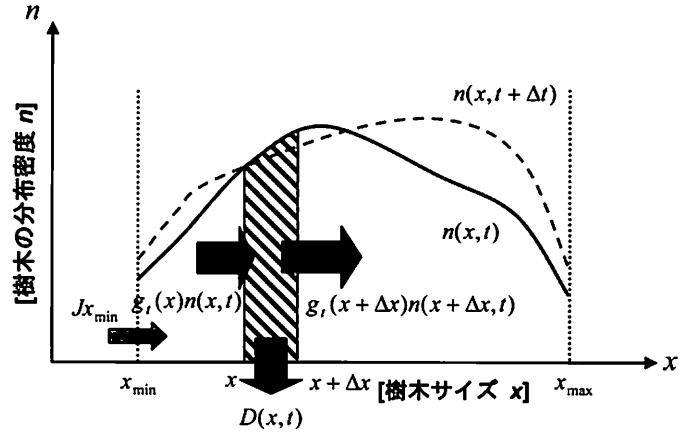


図-3 数理解生態モデルの概念図

a) 基礎方程式

図-3に数理解生態モデル(図-2の④)の概念図を

示す。砂州の単位面積あたりの樹木サイズ x に関する分布密度 $n(x, t)$ の経時変化を考える。分布密度 $n(x, t)$ に関して、例えば、単位面積(m^2)・樹木サイズ(cm)とすると本/ m^2/cm が単位となる。 $n(x, t)$ は確率事象としてモデル化する流量変動により消長を繰り返すので確率変数である。また、砂州内での各樹木個体の場所の違いによる洪水インパクトや土壌水分の変化の影響も、後述する樹木死亡率に関するモデル化に代表されるように分布密度関数などを用いて確率的に平面分布の影響を取り扱う。

図-3に斜線で示す樹木サイズの範囲 $(x, x + \Delta x)$ 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)樹木の成長によるサイズ変化：成長フラックス $J(x, t)$ と、2)洪水イベントによる流亡・死滅：死亡率 $D(x, t)$ の影響を受けて、時刻 $t + \Delta t$ で新たな分布密度 $n(x, t + \Delta t)$ へ変化する。これより、樹木本数の時間変化は次式で表される。

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

上式の両辺を Δx 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、

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

と表され、式(3)は以下のように書き直される。

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

本研究では、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して式(5)を用いる。なお、ここまでの記述では一般的な樹木サイズを用いて式を誘導したが、本講義における具体的な解析では樹木サイズとして胸高樹径 d が採用される。

b) 樹木の成長速度

樹木の平均的な成長速度 $g(x, t)$ は、Richardsの成長曲線モデル¹⁶⁾を基にして、それに高木による低木への成長阻害の影響を陽に導入することで得られた新しい数理モデルを用いる。これは、検討初期のLogistic型のモデルでは、サイズ x の小さい部分で成長速度が過小評価され、その部分で現地観測データの再現性が低かったためである。

式の誘導を行った結果、高木による成長阻害の影響を陽に導入した新しい樹木成長速度の数理モデルは以下の式(6)のように導出された⁵⁾。

$$g(x, t) = \frac{k}{C(1-m)} x^{1-C(1-m)} \{K(N_L)^{C(1-m)} - x^{C(1-m)}\} \quad (6)$$

$$K(N_L) = \frac{x_{\max}}{1 + bN_L} \quad (7)$$

$$N_L = \int_x^{x_{\max}} n(y, t) dy \quad (8)$$

ここに、 k ：成長速度に関するモデルパラメータ、 C ：サイズに関するモデルパラメータ、 m ：成長曲線形に関するモデルパラメータ、 b ：成長阻害に関するモデルパラメータ、 $K(N_L)$ ：成長阻害関数、 N_L ：あるサイズ x よりも大きい個体数、 $x_{\max}$ ：個体サイズの最大値である。成長阻害を考慮しない場合、 $m=0$ のときvon Bertalanffy型、 $m \rightarrow 1$ のときGompertz型、 $m=2$ のときLogistic型の成長曲線に帰着する¹⁷⁾。式(6)～(8)の各モデルパラメータは最小自乗法を用いて現地観測データを適切に表現する最適値を同定した⁵⁾。

c) 樹木の流亡・死滅

河道内の樹木は、洪水によりダメージをうける機会が非常に頻繁であり、その死亡は主に倒伏による割合がほとんどで、枯死までは至らないと仮定した。樹木死亡率 $D(x, t)$ は、以下の式(9)のように、正規分布の累積密度関数を用いてモデル化される⁵⁾。

$$D = \int_{-\infty}^{\gamma_M} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_D} \exp\left[-\frac{(y - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] dy \quad (9)$$

ここに、 μ_D ：樹木死亡率の期待値($\mu_D = 1.0$)、 σ_D ：樹木死亡率の標準偏差、 $\gamma_M = M_v/M_c$ ：サイズ x 毎の倒伏モーメント M_v と限界倒伏モーメント M_c^{**} の比である。 $\mu_D = 1.0$ は、死亡率 D が5割となる状態に対応する。 σ_D は、砂州や高水敷上での位置や根の張り方など樹木の個体差に起因する M_c のバラツキを表す標準偏差である。 $\sigma_D \rightarrow 0$ とすると、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後述の河川流量モデル(図-2の①)の確率流量 Q が与えられた時、それを用いて河川流動モデル(図-2の③)により砂州上の平均流速 u と平均水深 H が求められ、それらを用いて以下の式(10)から算出する。

$$M_v = \frac{1}{4} \rho C_D d H^2 u^2 \quad (10)$$

ここに、 ρ ：流体密度、 C_D ：樹木の抗力係数¹⁸⁾である。

d) 稚樹の新規参入

砂州・高水敷への稚樹の新規参入は、種子の飛散による砂州への定着から生じる種子繁殖と、倒伏樹木からの再生や漂着樹木による再生を表わす栄養繁殖の双方を考慮し、式(5)の最小サイズ $x_{\min}$ における境界条件として、次式により与えられる。

$$J(x_{\min}, t) = \underbrace{\alpha s_f(t)/s_v(x_{\min})}_{\text{種子繁殖項}} + \underbrace{\beta N_F(t)}_{\text{倒伏再生項}} + \underbrace{\gamma s_f^{1/2}(t)/s_v^{1/2}(x_{\min})}_{\text{漂着再生項}} \quad (11)$$

$$N_F(t^+) = \int_{x_{re}}^{x_{\max}} D(x, t) n(x, t^-) dx \quad (12)$$

$$s_f(t^+) = 1 - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} s_v(x) n(x, t^+) dx \quad (13)$$

ここに、 $J(x_{\min}, t)$ ：稚樹参入率、 α ：種子生残率、 $s_f(t)$ ：砂州に占める空きスペースの割合、 $s_v(x)$ ：サイズ x の樹木一本が占めるスペースの割合、 N_F ：倒木本数、 β ：倒伏樹木1本からの平均再生率($\beta=1.0$)、 γ ：漂着樹木の定着率、 x_{re} ：倒伏再生可能な樹木サイズの下限值、 t^- , t^+ ：それぞれ、出水イベント直前、直後の時刻である。

種子繁殖と漂着樹木からの再生はそれぞれ空きスペースの関数によって表わされている。種子繁殖は砂州の面全体へ定着すると仮定し、空きスペースの1乗の関数としている。一方、漂着再生は砂州の水際にしか定着しないと仮定し、1/2乗の関数として与えている。モデルパラメータ α , γ は、最小自乗法を用いて現地観測データを適切に表現する最適値が同定される⁹⁾。

式(11)における種子繁殖と栄養繁殖では稚樹の参入タイミングが異なる。前者は、種子の散布時期²⁰⁾に関する条件付きのポアソン過程から与えられ、一方、後者は、後述の河川流量モデルより生成される出水イベントのタイミングで与えられる。また、栄養繁殖における倒伏再生では、出水前の分布密度 $n(x, t^-)$ と樹木死亡率 $D(x, t)$ を用いて、式(12)より倒木本数 $N_F(t^+)$ が算出される。一方、種子繁殖と漂着再生では、出水後の分布密度 $n(x, t^+)$ を用いて、式(13)より空きスペースの割合 $s_f(t^+)$ が評価される。

なお、分布密度に関する式(5)の初期条件は、砂州が礫河原であることを想定して裸地($n(x, 0) = 0$)とした。

3) 河川流量のショットノイズモデル(図-2の①)

河川流量のシミュレーションにはショットノイズモデル^{9,10)}を用いる。このモデルは、ポアソン過程をベースとした確率過程モデルである。過去の長期間にわたる日平均流量データから出水の規模、頻度、および減衰率を統計評価し、流量時系列を疑似生成する。このモデルの詳細については、理論から具体的な実行手順までWeiss⁹⁾により議論されている。

流量のショットノイズ過程は次式で定義される。

$$Q(t) = \sum_{m=N(-\infty)}^{N(t)} y_m \exp[-b(t - \tau_m)] \quad (14)$$

ここに、 $N(t)$ ：単位時間あたりの出水事象の生起率が ν であるポアソン過程、 y_m ：降水により時刻 τ_m で起こり始める出水の規模であり、平均が θ の指数分布 $f(y) = 1/\theta \exp(-y/\theta)$ に従う確率変数、 b ：出水事象の平均減衰率である。

この過程に現れる三つのモデルパラメーター(ν , θ , b)は、確率流量が $(1/\theta, \nu/b)$ のガンマ分布(ピアソンⅡ型)に従うことから、日平均流量 Q_j などの離散値の場合、そのモーメントを用いて以下の式で与えられる。

$$E(Q_j) = \nu\theta/b \quad (15)$$

$$Var(Q_j) = \frac{\nu\theta^2}{b} \frac{2[b - (1 - e^{-b})]}{b^2} \quad (16)$$

$$\rho(Q_j, Q_{j+s}) = \frac{(1 - e^{-b})^2}{2[b - (1 - e^{-b})]} e^{-b(s-1)}, \quad s > 1 \quad (17)$$

ここに、 $E(Q_j)$, $Var(Q_j)$, $\rho(Q_j, Q_{j+s})$ ：それぞれ、 Q_j の期待値、分散、自己相関関数である。式(15)～(17)より求まる ν , θ と疑似乱数を用いて式(14)の y_m , τ_m は決定される。本講義の一連の研究⁴⁻⁸⁾では、梅雨や台風時の出水事象をより正確に再現するため、月毎にモデルパラメータを同定している。

4) 樹木抵抗を考慮した河川流動の解析モデル(図-2の②)

河川流の解析には、樹木抵抗を陽にモデル化した河川横断方向の一次元河川流解析モデル^{21,22)}を導入する。これより樹林部における水深 H と流速 u が算出され、式(9)(10)から出水時の樹木死亡率が評価される。モデルの基礎式は次式により与えられる²²⁾。

$$\rho g S_0 H - \rho \frac{g n^2}{H^{1/3}} u^2 \sqrt{\frac{1}{s^2} + 1} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{g n^2}{H^{1/3}} \right)^{1/2} u \frac{\partial u}{\partial y} \right\} = \frac{\rho C_D \lambda_{veg}}{2} u^2 H \quad (18)$$

$$\lambda_{veg} = d / \Delta S^2 = N d \quad (19)$$

ここに、 ρ ：流体密度、 g ：重力加速度、 S_0 ：流下方向の河床勾配、 H ：水深、 n ：マンニングの粗度係数、 u ：流速の流下方向成分、 $1/s$ ：横断方向の河床勾配、 λ ：渦動粘性係数に関する定数(=0.3)、 λ_{veg} ：樹木密生度、 C_D ：樹木の抵抗係数¹⁸⁾(樹径と密生度の関数)、 y ：横断方向座標軸、 d ：樹径、 ΔS ：樹木間隔、 N ：単位面積当たりの樹木数である。ただし、樹林帯においては見かけ流速 u_s が算出されるため、間隙率 p (単位面積当たりの樹木の投影面積 A から $p=1-A$)を考慮して、 $u=u_s/p$ と換算しなおす。式(18)は、運動量の流下方向成分に関する河道横断方向の保存式で、左辺第1～3項および右辺の項はそれぞれ、重力項、底面せん断力項、内部せん断力項、および流体力項を表す。

5) リンクマグニチュードを用いた河川ネットワークモデル(図-2の⑨)

河川地先の砂州・高水敷を対象とした植生動態モデルを河川水系の任意の河道断面に適用するために、流量時系列を擬似生成するショットノイズモデル(図-2の①)のモデルパラメータをリンクマグニチュード¹¹⁾で表現する。

河道のリンクマグニチュードは、当該河道の集水域にある一次河道数を表し、集水域面積もしくは流量の代替変数として使用可能である¹²⁾。したがって、ショットノイズモデルの3つのモデルパラメータ(ν , θ , b)のうち、出水の規模を表す θ を、以下に示すようにリンクマグニチュード i のべき乗関数として表現する。

$$\theta = a_1 i^{a_2} \quad (20)$$

ここに、 a_1, a_2 ：観測流量から同定されるモデルパラメータである。一方、出水事象の生起率 ν と減衰率 b については対象流域の規模に依存すると考えられるが、著者らの一連の研究で解析対象とした加古川では、水系全体の平均値を使用可能なことを確認している⁷⁾。

3. 統合的確率評価の方法

第2章で導入した植生動態モデルを利用して、河川水系の樹林化傾向・治水安全性の確率的統合評価を行う。河川水系の複数河道断面のそれぞれに対して、出水インパクトの規模やタイミングと樹木消長の兼ね合いにより顕在化する樹林化/裸地化の程度を確率的に定量評価するために、長期間にわたる樹木消長解析を多数回試行するモンテカルロシミュレーションを実施し、その結果を統合評価に利用する。著者らの一連の研究⁴⁻⁸⁾では、モンテカルロシミュレーションの試行回数は、結果が十分に収束する2000回としている。

一方、樹木消長解析の一試行の期間は100年間とした。植生動態モデルでは、時間経過とともに樹木の新規参入や成長、出水による死亡を要因として消長を繰り返し、初期条件として与えた裸地状態が種々の樹林状態へと遷移する。その過程で樹林状態は対象地点の河道断面・流量特性を反映してある動的な平衡状態に達する。100年間は、砂州上の樹木繁茂状態が初期条件で与えた裸地からある動的平衡状態に達するまでの期間を想定したものである。

樹木消長解析の一試行で得られる結果は、確率過程モデルから生成されたひとつの疑似流量時系列に対応する一事象である。したがって、2000回のモンテカルロシミュレーションでは、流量インパクトの規模とその時の樹木繁茂状態の兼ね合いにより、得られる樹林化の程度や対応する洪水水位はある期待値まわりにバラツキをもつ確率変数になる。この2000試行のモンテカルロシミュレーションによって得られた結果を生態環境と治水安全の両面から整理して、当該河道の樹林化危険度を確率的に評価する。

一回の樹木消長解析における生態環境面の評価指標には、100年目の砂州・高水敷にしめる樹木占有面積割

合 R_{V100} を用いる。砂州に占める樹木占有面積割合 R_{Vt} は、消長解析の結果を用いて次式によって算出される。

$$R_V = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} n(y,t) \cdot s_y(y) dy \quad (21)$$

ここに、 $x_{\min}$, $x_{\max}$: それぞれ、最小・最大樹径サイズ、 $s_y(y)$: サイズ y の樹木一本が砂州に占めるスペース割合である。 $n(y,t)$ は、時刻 t における砂州単位面積あたりの樹木サイズ y に関する樹木分布の密度関数である。例えば、単位面積(m^2)、樹木サイズ(cm)とすると本/ m^2/cm がその単位となり、 $n(y,t)$ を $y = x \sim x + \Delta x$ のあいだで積分するとその樹木サイズ間に含まれる砂州単位面積あたりの樹木本数が算出される。

一方、治水安全の評価指標には100年間の最高水位 H_{100} を用いる。これは、②河川流動のサブモデルを介して得られる水位情報である。100年間の消長解析において生じる最大の水位なので、100年確率水位に相当する水位といえる。

統合的確率評価では、これら生態環境・治水安全に関する指標 R_{V100} , H_{100} の2000セットについて、それぞれ基準となる閾値 R_{Vc} , H_c を設け、それら基準達成の可否によって生態環境: 樹林地もしくは裸地、治水安全: H_O もしくは H_X を判定していく。これにより、生態環境・治水安全についての基準達成可否の組み合わせから、樹木消長解析の結果が4通りの事象: (裸地, H_O), (樹林地, H_O), (裸地, H_X), (樹林地, H_X) に判別される。したがって、2000回のモンテカルロシミュレーション結果をそれぞれに判別することにより、頻度確率 $P(\text{裸}, H_O)$, $P(\text{樹}, H_O)$, $P(\text{裸}, H_X)$, $P(\text{樹}, H_X)$ が近似的に算出されることになる。

著者らの研究⁴⁾では、閾値はそれぞれ、生態環境面 R_{Vc} : 50(%)、治水安全面 H_c : 対象断面における堤防高より1m低い水位、と設定した。なお、この閾値の設定は現時点では仮のものであり、今後別途に議論する必要がある。

各対象河道の流量規模・河道断面に関して、現況に対して流量規模: 0.8~1.2倍、比高: -1.5m~+1.5mと変化させた条件について樹木消長解析のモンテカルロシミュレーションを実施した。流量規模および比高が変化することで、上述の生態環境・治水安全の頻度確率がどのように変化するかを考察し、河川水系における樹林化傾向・治水安全性の統合的確率評価を実施した。

4. 結果と考察

1) 対象とする河川流域と河道内樹木の現地観測

対象とする河川流域は、図-4に示す一級水系加古川(幹線流路延長:96km、流域面積:1,730 km^2)である。加古川本



図-4 加古川流域の河道網と現地観測区間

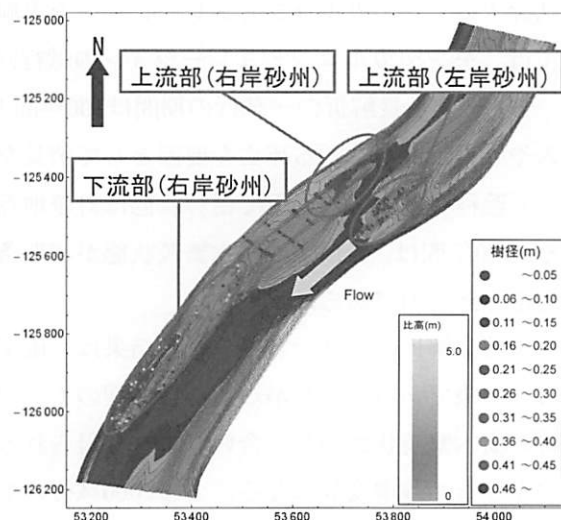


図-5 現地観測区間の比高とヤナギの分布



図-6 現地観測区間の樹木繁茂の様子

川の河口より23.2～23.8kmの河道区間では2008年より継続的に植生調査が実施されており、これまでモデル構築に必要となるデータを収集してきた⁴⁻⁸⁾。本講義では、加古川本川上において、篠山川と美嚢川の両支川が合流する間の約30kmにわたる広範な区間上の断面①～⑩の10断面を解析対象とした。本研究での現地観測区間にあたるのは断面④(23.4km)である。

図-5に、現地観測区間における比高とヤナギの観測樹径の空間分布を示す。また、図-6に、現地観測区間の砂州上3か所における樹木繁茂状況を例示する。当該区間前後の河道では交互砂州が形成されるが、その中でも現地観測対象区間の右岸砂州は、加古川の中でも特に樹林化が顕著な箇所となっている。上流部(右岸砂州)(23.6～23.8km)は2008年3月に横断方向に3段階切り下げの試験施工が実施された箇所である。そこでは、種子繁殖による稚樹の新規参入が非常に多くみられ、2013年には5年程度の樹齢をもつヤナギを最高齢として若い樹木が砂州平面を密に繁茂しているのが確認された。一方、下流部(右岸砂州) (23.2～23.6km)では、サイズの大きい樹木が、水際を中心に上流側と比べて疎に繁茂する。さらに、上流部(左岸砂州) (23.6～23.8km)は右岸砂州に比べて観測対象面積が小さく、水衝部にあたるためか樹径0.2mぐらいまでの比較的小さい樹木が密に繁茂している。

図-7に、解析対象とした横断面形状の一例として、現地観測区間の断面④(23.4km)における河道横断形状を樹林帯とともに例示する。図では、現況の横断

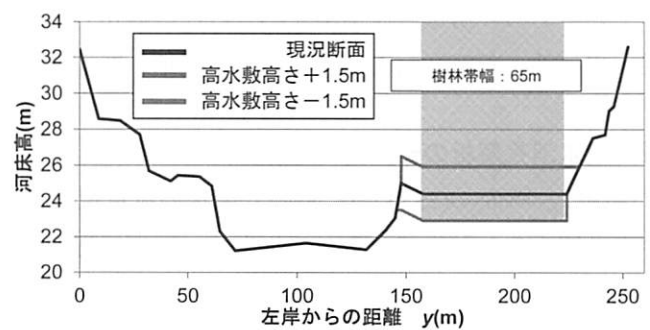


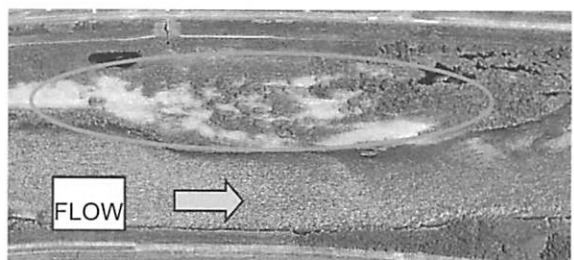
図-7 解析に用いる河道横断面形状の例(断面④)



(a) 樹林地



(b) 裸地



(c) (a)(b)の間ほどの樹木繁茂状況

図-8 航空写真より判読される現地の樹木繁茂状況

面に加えて、樹林帯の存在する高水敷高さを±1.5m変化させたものを示している。これは、上述したように、解析において変化させる条件の一つである比高の増減に対応する。

図-8は、加古川本川における航空写真の例示である。これら航空写真より現地の樹木繁茂状況が判読可能なため、ここでは現地踏査とあわせて解析対象断面①～⑩の樹木繁茂状況を次の3つ

に分類した：樹林地；樹木繁茂の著しい砂州，裸地；樹木繁茂が全く見られない砂州，中間地；樹木が定着しているものの樹木繁茂が優先的ではない砂州。その結果，対象とする10断面はそれぞれ，裸地：断面①，⑥，樹林地：断面③～⑤，⑦～⑩，中間地：断面②，と判断された。

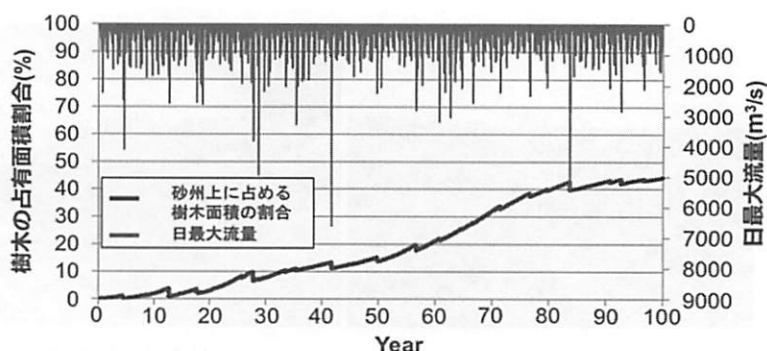


図-9 植生動態モデルによる樹木消長解析の例

2) 樹木消長解析の一試行

図-9は、断面④(23.4km)において現状の流量規模と河道断面形状を与えたときの植生動態モデルによる樹木消長解析の一試行である。これより、時間経過に伴って稚樹の新規参入や樹木成長による占有面積割合の増加が確認できる。また、流量時系列における洪水時には、樹木の死亡により占有面積割合が減少していることがわかる。このような樹木消長解析を第3章の統合的確率評価の方法にそって繰り返しおこない、その結果を利用して樹林化傾向・治水安全性の統合的確率評価を実施する。

3) 樹林化傾向・治水安全性の統合的確率評価

a) 現地観測区間の断面④(23.4km)の評価

図-10に、統合的確率評価の分析結果を解釈するための一例として、断面④(23.4km)における各生起確率を示す。図は、第3章で述べたそれぞれの頻度確率 $P(\text{裸}, H\bigcirc)$, $P(\text{樹}, H\bigcirc)$, $P(\text{裸}, H\times)$, $P(\text{樹}, H\times)$ を各流量規模・比高条件について示したコンター図であり、断面④の結果を四象限に十字配置して可視化している。第一象限： $P(\text{樹}, H\bigcirc)$ ，第二象限：頻度確率 $P(\text{裸}, H\bigcirc)$ ，第三象限： $P(\text{裸}, H\times)$ ，第四象限： $P(\text{裸}, H\times)$ であり、図の左右が樹林地・裸地の違いを、上下が治水安全性の高・低を示している。これより、どの象限での生起確率が高いのかを判別することで、対象河道の樹林化傾向・治水安全性が統合的に判断される。

さらに、各象限において、図中央の十字線の交点は現況断面における条件に対応する。各生起確率はモンテカルロシミュレーションにおける頻度の内訳に相当するため、同一の流量規模・比高変化における全ての生起確率を足し合わせると100%となる。そのため、これら4つの図の生起確率を見比べることにより、流量規模・比高の変化に対していずれの事象が顕在化していくか、その河道断面の応答特性が考察できる。

図-10より、現況条件において第一象限の $P(\text{樹}, H\bigcirc)$ が最も大きな値を示すことがわかる。このため、断面④では現況条件において樹林地傾向であるが、治水安全性は確保されている状態が顕在化しやすいといえる。この断面④の樹林地傾向の結果は、現地観測調査および航空写真の判断と合致するものである。さらに、洪水の流量規模が増大した場合には、比高の高低によって評価が大きく異なる。当該河道の土砂収支が変化して比高が増大すると第四象限の $P(\text{樹}, H\times)$ が大きな値を示すようになり、過剰な樹木繁茂や河積の減少による治水安全性の低下が推察される。一方、河道の切下げの実施や土砂収支がマイナスになるなどして比高が減少すると、第二象限の $P(\text{裸}, H\bigcirc)$ が大きくなり、裸地・砂礫河原の形成とともに治水安全性が相対的に高くなることが予想される。

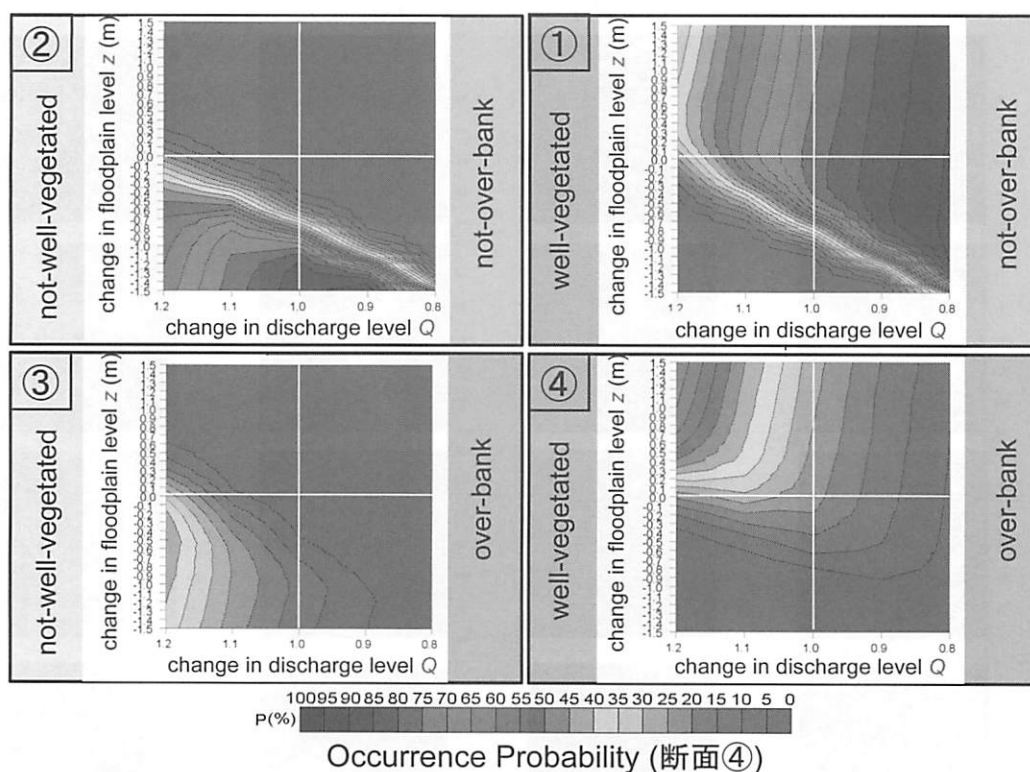


図-10 断面④(23.4km)における樹林化傾向・治水安全性の各生起確率のコンター図

b) 河川水系の複数断面に対する評価⁴⁾

図-11は、検討した全ての断面における各生起確率のコンター一覧である⁴⁾。ここでは断面間の特徴比較に焦点をあてるため、図-10の四象限の十字配置ではなく、各断面の分析結果を横に並べた。これより、樹林化傾向・治水安全性の双方に関する各河道断面の応答特性の違いが明確に可視化されるのが確認される。

図-11での現況条件における解析結果は、樹林地：断面③、⑤、⑦～⑩、裸地：断面①、⑥と判断される。これは航空写真からの判断と合致する結果である。航空写真では中間地と判断された断面②に関しては、図-11からは、若干裸地化の傾向が強いが、極端に裸地/樹林地を示すような河道断面特性ではなく、中間値が顕在化する素地があることがわかる。また、断面②は流量規模や比高の変化によって4つの事象のどれにでも状態が遷移する可能性があり、樹林化傾向・治水安全性の双方に対して不安定な河道断面であることが解析より判断される。

次に、断面間の比較の一例として、図-11に示す断面③と⑦を考察する。これらはいずれの断面も $P(\text{裸}, H)$ と $P(\text{裸}, H \times)$ があらゆる条件下において非常に小さく、樹林地傾向が顕著であることがわかる。しかし、治水安全性の観点からは、両者は全く様相の異なる河道であることがわかる。断面③に関しては、 $P(\text{樹}, H \circ)$ が比較的大きな値をとり、流量規模が大きくなならない限り治水安全性は高い。これより、断面③は生起する出水流量に対して十分な河積が確保されていることが推察される。従って、治水安全性を優先する場合には、樹林化を抑制するための対策を講じる優先度はさほど高くはないといえる。一方、断面⑦はあらゆる流量規模・比高条件について $P(\text{樹}, H \times)$ が非常に高く、樹林化に伴う治水安全度の低下が示唆される。特に、大幅な砂州・高水敷の切下げを実施したとしても $P(\text{樹}, H \times)$ は依然として高い値を示し、樹林化抑制・治水安全度の向上が期待できない。このことから、断面⑦における治水安全度に関しては、樹林化によって洪水疎通能が低減しているか、十分な河積も確保されていないことが推察される。治水安全度が低くなる要因が樹林化にある場合には切り下げに加えて、定期的な伐採といった樹木管理までを含めた施策によって対応する必要があるといえる。

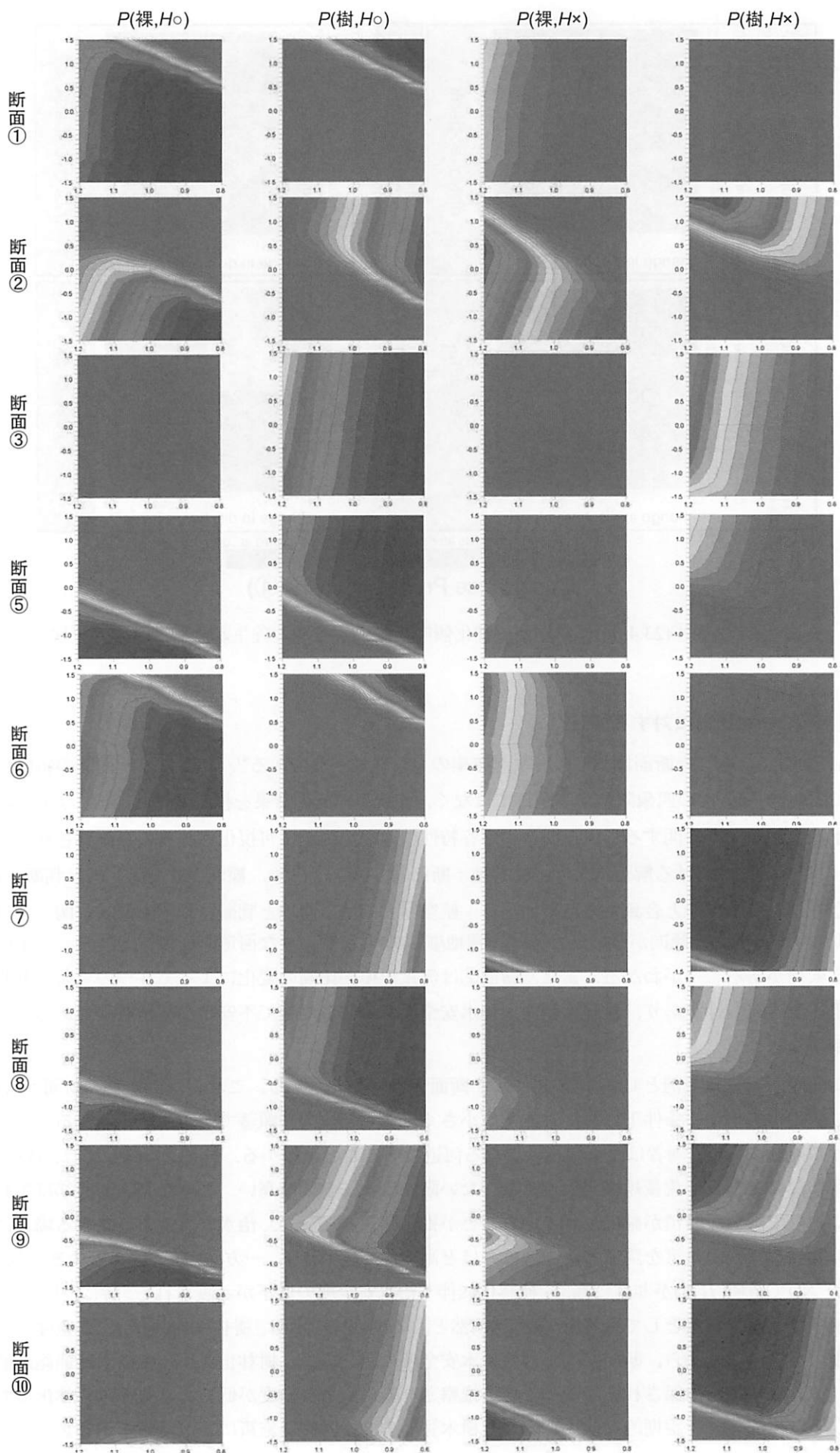


図-11 各生起確率のコンター図⁴⁾: 断面①～③, ⑤～⑩, 縦軸・横軸, コンターの判例は図-10と同じ.

樹林化に対する各河道の統合評価を表-1にまとめ⁴⁾。表では、治水安全面での相対的な評価を◎、○、△、×の4段階で分類し、治水安全度の高い河道の順に整理した。また、生態環境の評価は現状条件での状態を樹林地・裸地、中間地と表現した。

表-1より、断面①、⑤は、生態環境の評価は分かれており、断面①は裸地傾向、断面⑤は樹林地傾向がそれぞれ顕著な結果となった。しかしながら、このふたつの断面は流量規模・比高条件に関わらず治水安全度が十分に確保され、相対的に治水安全性の高い河道といえる。換言すれば、この2つの断面は、樹林地・裸地に拘らず治水安全性の観点から河川整備を実施する優先度は低い断面といえる。

次いで治水安全度の高い河道は断面⑧、④、⑥、③である。これらの断面は、いずれも治水安全評価の分類において○と判断しているが、おもに地球温暖化などで想定されている洪水流量規模の増大によって、治水安全度の低下が示唆される。ただし、断面⑧については、流量規模の増大に加えて比高が上昇しない限り比較的安全と判断される。断面④に関しては、流量規模が増大しても相当量の砂州・高水敷の切下げによって治水安全度が確保される。

一方で、断面⑥、③については流量規模が増大してしまうと比高条件に関わらず治水安全度の低下が示唆される。生態環境面での評価に関しては、断面⑥は裸地傾向、断面③は樹林地傾向である。したがって、両断面は、樹林地・裸地といった生態環境の観点からは河川整備の対応が異なってくると考えられる。上述のように断面③は流量規模増大時にも樹木繁茂が著しい。従って、樹木繁茂の抑制によって治水安全度を保つことができる可能性が残される。その際、断面③では切下げによる樹木繁茂の抑制が困難なことが想定されているため、間伐等が望ましいと推察される。一方、断面⑥は流量規模の増大時には裸地であるため、河積を大きくする方法で治水安全性を向上させることになる。

治水安全面の評価分類が△となる断面⑨、②は、流量規模だけでなく、比高が増大するだけでも治水安全度の低下が示唆される。ただし、断面⑨に関しては、流量規模に拘らず、相当量の切下げにより樹林化が抑制されて治水安全性が確保される。

相対的に治水安全面が低い評価分類×の河道としては、断面⑦、⑩が挙げられた。これらの河道はあらゆる流量規模・比高変化の条件下で治水安全度が相対的に低い評価となった。これらはいずれも樹林地傾向が顕著な河道断面と評価された。なお、これらは河川水系の上流域に位置する断面であり、本講義で治水安全性の判断に用いた閾値 H_{100} が当該河道の計画高水に対して過大に設定されている可能性があることに注意する必要がある。

以上のように、本講義では樹林化傾向と治水安全性の双方を考慮した、加古川本川の広い範囲における複数河道の統合的確率評価を実施した。これにより、複数断面における樹林化傾向・治水安全性に関する河道特性が明らかにされ、流量規模・比高の変化を考慮した形で樹林化河道の危険度が評価された。

表-1 各河道断面の統合評価⁴⁾

断面	生態環境	治水安全	備考
①	裸地	◎	条件に拘らず治水安全度は十分に確保される。
⑤	樹林地		
⑧	樹林地	○	流量規模・比高がともに増大しない限り安全である。
④	樹林地		流量規模の増大に注意が必要である。
⑥	裸地		
③	樹林地		
⑨	樹林地	△	流量規模・比高の両条件が治水安全度を低下させうる。
②	中間地		
⑦	樹林地	×	現況の条件において治水安全度が相対的に低い。
⑩	樹林地		

5. まとめと今後の研究・技術開発の方向性

本講義では、植生動態モデルを用いて、河川流域の複数河道を対象にした樹林化傾向・治水安全性の双方を考慮した樹林化に関する統合的確率評価を講述した。この統合的確率評価は、生態環境と治水安全性の評価指標を設定することで、樹林地・裸地および治水安全の高低を判定し、これらの組み合わせから出てくる4つの事象が生起する頻度確率を算定することで行われた。その結果、複数断面間における相対的な樹林化傾向・治水安全性に関する河道特性が抽出され、流量規模・比高の変化を考慮した形で樹林化河道の危険度が評価された。

最後に、本講義での議論をとおして考えられる今後の研究・技術開発の方向性を2点列挙する。

- (i) 本講義では、生態環境・治水安全の評価において一定の閾値を採用した。しかしながら、生態環境・治水安全の両面を統合評価するのに際しては、当該河道がもっている環境・治水の重みづけについて議論する必要がある。本論文のような絶対的な閾値基準を設けて議論を続けることは困難と考えられる。このため今後は、河川生態系のもつ環境価値を適切に内部化させてモデルや評価方法に反映させるための検討が重要と考えられる。
- (ii) 本モデルでは河道断面形状を固定床として与え、その変化は砂州・高水敷の比高を静的に変化させることで表現している。動的な土砂動態が考慮されないため、特に出水に伴う比高増減が表現されない。現段階の著者らの見解としては、当該砂州の標準的な河道断面を与えることで、現行の河床形状の動力学モデルを導入することなしでも、樹林化傾向をある程度の精度で評価できると判断している。ただし、土砂移動の影響評価はその効果を導入してきっちりと検討する必要がある。このことがモデルの予測性能に与える影響は現段階では不明である。そのため、本研究のような河川流域一貫の観点からの確率モデルに組み込み可能な、植生動態を含めた河床変動モデルの検討は今後の重要な課題といえる。

謝 辞：本原稿は、河川樹林化の課題に関する著者のこれまでの研究成果に基づくものです。研究の実施にあたり、科学研究費助成事業、河川整備基金助成事業、近畿建設協会、神戸大学都市安全研究センターから、その時々研究費を助成いただきました。成果の一部は、土木学会水工学委員会環境水理部会の樹林化ワーキンググループ、および、加古川の河道樹林化に関する研究会(神戸大学、明石工業高等専門学校、国土交通省姫路河川国道事務所)における議論を背景にもちます。道奥康治教授、神田佳一教授、戸田祐嗣教授、赤松良久准教授には折にふれ有益なご助言を頂きました。国土交通省姫路河川国道事務所および兵庫県県土整備部には河川の関連データを提供して頂きました。神戸大学および明石高専の学生諸氏には現地観測をはじめ研究遂行にご協力いただきました。以上、記して関係各位に謝意を表します。

参考文献：

- 1) 宮本仁志, 赤松良久, 戸田祐嗣: 河川の樹林化課題に対する研究の現状と将来展望, 河川技術論文集, 第19巻, pp.441-446, 2013.
- 2) 土木学会水工学委員会環境水理部会編: 環境水理学, 6.3 河川の樹林化, pp.223-230, 丸善(株), 2015.
- 3) 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, No.747, II-65, pp.41-60, 2003.
- 4) 木村 諒, 宮本仁志, 利守伸彦, 織田澤利守: 河川水系の複数河道における樹林化傾向・治水安全性の統合

- 的確率評価の試み, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, I_1387-I_1392, 2014.
- 5) 利守伸彦, 宮本仁志, 木村 諒, 阿河一穂, 道奥康治: 河道内の植生動態モデルにおける樹木の成長・死亡・新規参入, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1363-I_1368, 2013.
 - 6) 木村 諒, 宮本仁志, 利守伸彦: 河川水系の複数河道における樹林化傾向の感度分析, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1369-I_1374, 2013.
 - 7) 木村 諒, 宮本仁志, 盛岡淳二: 植生動態モデルとリンクマグニチュードによる河川水系複数河道での樹林化傾向の確率評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_727-I_732, 2012.
 - 8) 宮本仁志, 盛岡淳二, 神田佳一, 道奥康治, 魚谷拓矢, 大地洋平, 阿河一穂: 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.I_1405-I_1410, 2011.
 - 9) Weiss, G.: Shot noise models for the generation of synthetic streamflow data, *Water Resour. Res.*, 13(1), pp.101-108, 1977.
 - 10) Claps, P., Giordano, A., and Laio F.: Advances in shot noise modeling of daily streamflows, *Advances in Water Resources*, 28, pp.992-1000, 2005.
 - 11) 石田和也, 宮本仁志: 気候・地質・土地利用の影響を考慮したリンクマグニチュードによる河川水系の流況推定, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_487-I_492, 2012.
 - 12) Rodriguez-Iturbe, I. and Rinaldo, A: *Fractal river basins, chance and self-organization*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 547p., 1997.
 - 13) Shreve, R.L.: Infinite topologically random channel network, *Journal of Geology*, Vol.74, 1967.
 - 14) 巖佐 庸: 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.
 - 15) Takada, T. and Iwasa, Y.: Size distribution dynamics of plants with interaction by shading, *Ecological Modeling*, No.33, pp.173-184, 1986.
 - 16) Richards, F. J.: A flexible growth function for empirical use, *Journal of Experimental Botany*, Vol.10, pp.290-300, 1959.
 - 17) 松石 隆, 斎藤和敬, 菅野泰次: アワビの成長曲線について, 北海道大学水産学部研究彙報, 46(3), pp.53-62, 1995.
 - 18) Nepf, H.: Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, *Water Resources Research*, Vol.35-2, pp.479-489, 1999.
 - 19) 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.
 - 20) 長坂 有: 河畔に生えるヤナギ類, 光珠内季報, No.101, pp12-17, 1996.
 - 21) 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.
 - 22) 阿河一穂, 大地洋平, 檜 達也, 盛岡淳二, 木村 諒, 道奥康治, 宮本仁志, 神田佳一, 魚谷拓矢: 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, 講演概要, 2011.