



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

木村, 謙
宮本, 仁志
利守, 伸彦
織田澤, 利守

(Citation)

土木学会論文集B1（水工学）, 70(4):I_1387-I_1392

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2014 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003016>

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

AN ATTEMPT FOR INTEGRATED STOCHASTIC EVALUATION OF
VEGETATION OVERGROWTH TENDENCY AND FLOOD PROTECTION
SAFETY IN RIVER CHANNELS

木村 諒¹・宮本仁志²・利守伸彦³・織田澤利守²

Ryo KIMURA, Hitoshi MIYAMOTO, Nobuhiko TOSHIMORI and Toshimori OTAZAWA

¹正会員 修(工) 前 神戸大学大学院 (現 神戸市水道局) (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 博(工) 神戸大学大学院准教授 工学研究科市民工学専攻(同上)

³学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士課程前期課程(同上)

Vegetation overgrowth on sand bars and floodplains has been a serious engineering problem for both flood protection and ecological conservation in many river basins in Japan. This paper tries to evaluate both vegetation overgrowth tendency and flood protection safety in an integrated manner for several vegetated channels in Kako river basin. The evaluation employs a stochastic process model, which has been developed for statistically evaluating flow and vegetation status on a floodplain through the Monte Carlo simulation. The result shows that the river channels with high flood protection priority are extracted from the several channel sections with the corresponding vegetation status.

Key Words: river management, channel design, river discharge, vegetation dynamics, flood water level, stochastic process

1. 序 論

日本の多くの河川で経年的に進行する河道の樹林化は、河川管理の上でさまざまな問題を引き起こす。洪水流下能力の低下や河川生態系の変質はその代表例といえる。

この樹林化のような河川環境の形成には、河川流域での水文循環にのって上流から伝達される種々のインパクトが大きな影響を与えると考えられる。そのため、問題解決のひとつのアプローチとして、河川ネットワークの繋がりを意識することは非常に重要である。筆者らは、そのような流域一貫の観点から、河川水系の複数河道における経年的な樹林化・裸地化傾向が解析できるモデルを検討してきた¹⁻⁴⁾。

この河川水系の植生動態モデル¹⁻⁴⁾は、河川地先の河道断面を対象にしたサブモデル群と、河川水系の河道ネットワークモデルからなる。前者のサブモデル群では樹林化に至る機構を、河川流量・河川流動・河床形状・植生生態が相互に作用する確率過程と考え、砂州上の長期間にわたる樹林動態が評価される。後者のネットワークモデルは、河川流域の流量集積特性を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。このモデルを用いてこれまで、加古川の複数河道

断面を対象として植生動態モデルの予測性能が確認され²⁾、流量規模と砂州・高水敷の比高をパラメータにして樹林化傾向の応答特性と樹木繁茂状態の安定性が評価された³⁾。

この樹林化現象に関する既往研究は非常に多い。水理学的・河川工学的アプローチをベースにして、植生動態や栄養塩循環、さらには河川管理技術など多様な観点から研究が展開されている⁵⁾。本研究¹⁻⁴⁾と同様に、樹林化現象を広域的・長期的に捉えたものとして、植生消長の長期シミュレーション⁶⁾や航空写真解析⁷⁾が挙げられる。また、植生動態を確率論的に捉えたものとして、アルプスの網状河道における解析⁸⁾がある。しかしながら、それらの検討は、現状ではおもに植生動態といった生態系の側面に焦点があてられた議論にとどまるようである。

本論文では、植生動態モデル¹⁻⁴⁾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を試みる。具体的には、筆者らの前報³⁾では樹林地/裸地傾向といった生態環境面の評価のみに止まっていた検討をさらに発展させ、モデル解析からの水位情報もあわせて評価することで生態環境と治水安全の両面を考慮した統合評価手法を提案する。砂州・高水敷の比高

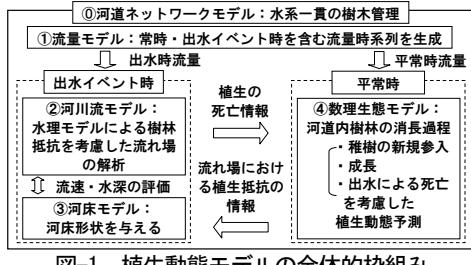


図-1 植生動態モデルの全体的枠組み

と流量規模の変化に着目して、河川水系における複数河道に対して相対的な樹林化危険度を評価する。

2. 解析の概要

(1) 河川水系の植生動態モデル

図-1に河川水系の植生動態モデル^{1,4)}の構成を示す。本モデルは、河川地先の河道断面を対象にしたサブモデル群：①河川流量、②河川流動、③河床形状、④植生生態と、⑤河川水系の河道ネットワークモデルからなる。モデルの詳細は、①河川流量と④植生生態の数理モデルの精緻化^{1,4)}、⑤河道ネットワークモデルによる拡張²⁾、を参照頂きたい。以下にモデルの概要を記す。

このモデルでは、①河川流量の確率過程モデルが⑤河道ネットワークの位数化指標のひとつであるリンクマグニチュードで表現され、任意河道の流量時系列がその統計特性を保持した形で生成される。樹木の動態は、この①河川流量の確率過程モデルが疑似生成した流量インパクトに支配される。すなわち、与えられた流量が平常時には④の数理生態モデルにおいて稚樹の新規参入や樹木成長が評価され、一方、出水イベント時には②の河川流モデルによる流速・水深の評価とともに植生死亡率が算定される。ここでの樹木繁茂や植生死亡の状況は、確率過程モデルによる時系列上において各サブモデル間相互に関係づけられる。

本研究で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ものである。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た^{2,3)}。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た⁴⁾。以上より、現段階の筆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③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り、③河床モデルに関しては現行の確率過

程モデルへの導入の考え方やその定式化方法を含めて今後の課題である。本論文では、土砂供給の増減に伴う河床の低下・上昇や高水敷切下げに関しては、それに対応した断面形状を与えることで静的に表現している。

(2) 統合的確率評価の方法

本論文では、この植生動態モデルを用いて、樹林化河道に関する生態環境・治水安全の統合評価を試みる。前報³⁾と同じく、河川水系の複数河道断面に対して長期間にわたる樹木消長解析を多数回試行する所謂モンテカルロシミュレーションを実施し、その結果を利用する。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回とした。

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え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_V は、消長解析の結果を用いて次式によって算出される。

$$R_V = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} n(y,t) \cdot s_v(y) dy \quad (1)$$

ここに、 x_{\min}, x_{\max} : それぞれ、最小・最大樹径サイズ、 $s_v(y)$: 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¹⁾。例えば、単位面積(m²)、樹木サイズ(cm)とすると本/ m²/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¹⁾。

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。

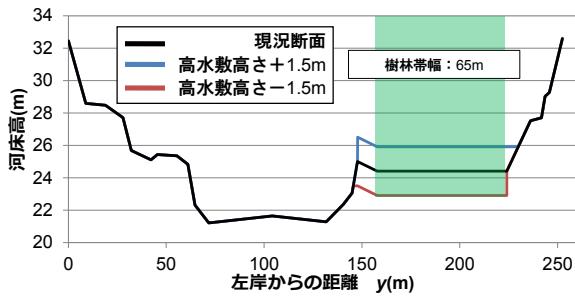


図-2 解析に用いる河道横断面形状の例(断面④)

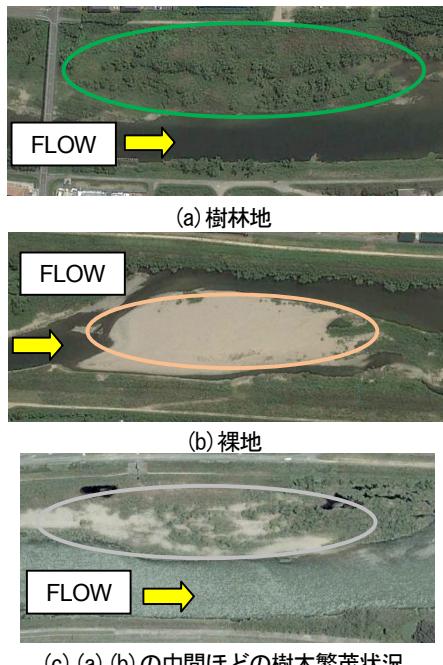


図-3 航空写真より判読される現地の樹木繁茂状況の例示

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: $H\bigcirc$ もしくは $H\times$ 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, $H\bigcirc$), (樹林地, $H\bigcirc$), (裸地, $H\times$), (樹林地, $H\times$)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 $P(\text{裸}, H\bigcirc)$, $P(\text{樹}, H\bigcirc)$, $P(\text{裸}, H\times)$, $P(\text{樹}, H\times)$ が近似的に算出されることになる。なお、(裸地, $H\times$)が成立する場合は、基本的に流量規模が大きくなつて河積が不足する場合が想定される。

本論文では、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。

本論文では、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のかを考察することで、樹林化河道の統合評価を実施する。

3. 対象とする河川流域・河道断面

対象流域は兵庫県を流れる一級水系加古川（幹線流路延長: 96km、流域面積: 1,730km²）である。加古川本川の河口より23.2~24.0kmの河道区間では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¹⁴⁾。本論文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断面を解析対象とする。本研究での現地観測区間にあたるのは断面④としている。

図-2に、解析対象とした横断面形状の一例として、断面④の河道横断面形状を樹林帯とともに例示した。図では、現況の横断面に加えて、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-3に加古川本川における航空写真を例示する。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、本論文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、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。

4. 結果と考察

図-4に、解析結果を解釈するための一例として、図-2に示した断面④における各生起確率を示す。図は、2.(2)で述べたそれぞれの生起確率を各流量規模・比高条件について示したコンター図であり、同断面の結果を横に並べて記載している。また、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-4より、現況条件において $P(\text{樹}, H\bigcirc)$ 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、治水安全は確保されている状態が顕在化しやすいといえる。なお、断面④の樹林地傾向は、現地観測調査および航空写真の判断と合致する結果である。さらに、流量規模が増大した場合には、比

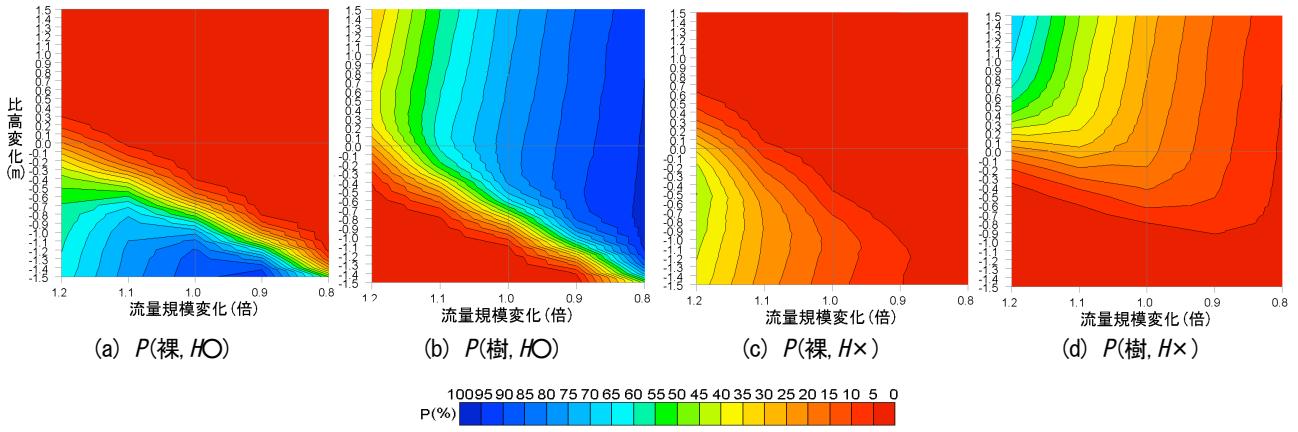


図-4 各生起確率のコンター図：断面④

高の高低によって評価が大きく異なる。比高が増大すると $P(\text{樹}, H\times)$ 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の低下が推察される。一方、比高が減少すると $P(\text{裸}, H\circ)$ が大きくなり、裸地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-5は、本論文で検討した全ての断面における各生起確率のコンターライア（図-4での断面④を除く）。これより、生態環境・治水安全の双方に関する各河道断面の応答特性の違いが明確に表現される。

図-5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、3.で示した航空写真からの判断と合致する。さらに、航空写真では中間地と判断された断面②に関して、図-5のコンターライアにおける頻度確率 $P(\text{裸}, H\circ)$ 、 $P(\text{樹}, H\circ)$ 、 $P(\text{裸}, H\times)$ 、 $P(\text{樹}, H\times)$ はそれぞれ37.6、19.8、33.5、9.1%であった。これより、断面②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確認できる。また、図-5から、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、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-5にしめす断面③と⑦を考察する。これらはいずれの断面も $P(\text{裸}, H\circ)$ 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、これらの断面を治水安全の観点から考察すると、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っており、流量規模が大きくならない限り治水安全度は高い。このことから、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

表-1 各河道断面の統合評価結果

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		

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、十分な河積が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。

以上のような検討結果から、樹林化に対する各河道の統合評価を表-1にまとめる。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、生態環境面の評価は現況条件での状態を樹林地・裸地、中間地と表記した。以下の考察では、図-4、5も適宜参照いただきたい。

表-1より、断面①、⑤は、生態環境面での評価は分かれしており、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、相対的に治水安全度の高い河道といえる。換言すれば、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

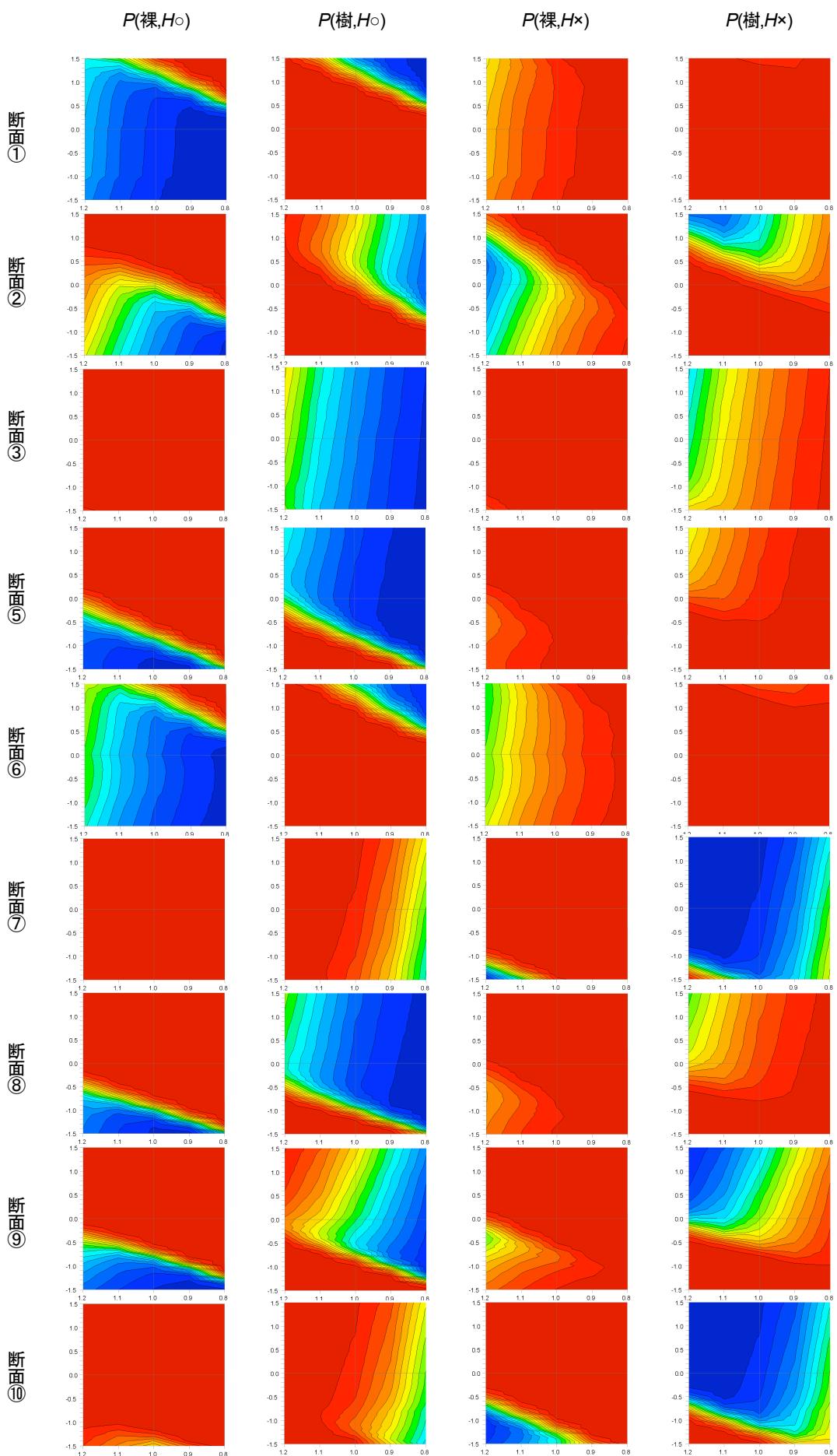


図-5 各生起確率のコンター図：断面①～③, ⑤～⑩, 縦軸・横軸, コンターの判例は図-4に同じ.

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。

以上のように、本論文では生態環境・治水安全の双方を考慮した、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。

一方、本論文での議論は、現状では試論の域をでないことも明らかである。例えば、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。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、本研究のような水系一貫の観点からの確率モデルに組込み可能な、河床変動モデルの検討は今後の重要な課題といえる。また、本論文では生態環境・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り、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も重要と考えられる。

5. 結 論

本論文では、植生動態モデルを用いて、加古川流域の複数河道を対象にして生態環境・治水安全の双方を考慮した樹林化に関する統合評価を実施した。統合評価では、生態環境と治水安全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でてくる4つの事象が樹木消長解析のモンテカルロシミュレーションの中で生起する頻度確率を算定することで行った。その結果、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。今後は、河床変動モデルおよび河道のもつ環境・治水評価の重み付け方法の検討を行う予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、費用の一部を科学研究費助成事業(基盤研究(C), No.23510026)および河川整備基金助成事業(助成番号: 25-1115-002)から補助いただきました。本研究の一部は、加古川の河道樹林化に関する研究会(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)の調査研究の一環として実施されました。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 道奥康治教授ならびに明石工専 神田佳一教授には有益な御助言を頂きました。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, 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.I_1405-I_1410, 2011.
- 2) 木村, 宮本, 盛岡: 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.
- 3) 木村, 宮本, 利守: 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.
- 4) 利守, 宮本, 木村, 阿河, 道奥: 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.
- 5) 宮本, 赤松, 戸田: 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.
- 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) 戸田, 古川, 辻本: 広域・長期的な河道内植生動態把握に向けた航空写真の更なる活用方法に関する研究～天竜川下流域を対象として～, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I_739-I_744, 2012.
- 8) Perona, P., Molnar, P., Savina, M. and Burlando, P.: An observation-based stochastic model for sediment and vegetation dynamics in the floodplain on an Alpine braided river, *Water Resour. Res.*, 45, W09418, doi:10.1029/2008WR007550, 2009.

(2013. 9. 30受付)