

砂礫州上の樹林地動態を踏まえた 適切な樹木管理手法の提案

STUDY ON VEGETATION MANAGEMENT CONSIDERING THE DYNAMICS EVALUATION OF RIVERINE TREES ON GRAVEL-BED BARS

小澤宏二¹・由井修二²・清水義彦³・町井悟⁴・松田明浩¹

Koji OZAWA, Shuji YUI, Yoshihiko SHIMIZU, Satoshi MACHII and Akihiro MATUDA

¹正会員 いであ(株)建設統括本部 水圏事業部 河川部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

²正会員 国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所 調査課長 (〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

³正会員 工博 群馬大学理工学研究院 教授 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

⁴国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所 調査課調査係長 (〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

Gravel-bed rivers in Japan are now facing a multitude of problems relating to fluvial environment and flood control. These problems include the expansion of riverbeds with less disturbance by flooding and the growth of the riverine trees and the decrease of high-quality gravel-bed bars and the immobilization of low-flow channel. In particular, the gravel bed river that dominated by vigorous growth of *Robinia pseudo-acacia*, sometimes increase the riverine trees by vegetative propagation under the flood disturbance. The suppression of riverine trees overgrowth, be properly evaluated the effects of the dynamics of riverine trees on gravel-bed bars by flood disturbance, and an effective application of measures of riverine tree felling and gravel-bed bar excavation is important. In this study, to target the gravel bed of Watarase river that *Robinia pseudo-acacia* grows in the river channel, we evaluated the dynamics of riverine trees on gravel-bed bars with the aid of the method of Tanaka et al, and proposed the effective vegetation management in the river channel, through the increase of trees in the area of flood disturbance and the increase of trees in the stable area with less disturbance by flooding.

Key Words : *Vegetation management, gravel-bed river, flood disturbance, breakage or overturning index, wash-out index*

1. はじめに

近年、わが国の礫床河川の多くでは、低水路河床と植生化した砂礫州との比高拡大により、洪水の非冠水や洪水攪乱の微弱な安定域の拡大、河道内樹木の過剰な繁茂や低水路の固定化、砂礫河原の減少等、治水上、河川環境上の課題が生じている。とくに栄養繁殖が活発なハリエンジュが優占する礫床では、洪水攪乱が逆に樹林化の進行を促すことが知られている¹⁾。幹の強度が弱く根張りが比較的浅いハリエンジュは、洪水時の流水の勢いによりしばしば倒伏・倒壊し、その後、水平根からの根萌芽によって高密度に樹林化するのが特徴であり、中小洪水程度では河床材料の活発な移動を起こすことが容易でない礫床河川は、比高差の拡大や冠水頻度の低下から生じる樹林化に加え、ハリエンジュにみられる洪水攪乱後の速やかな繁殖密度の拡大(栄養繁殖)による樹林化が生じやすい環境にある。

こうした河川環境の劣化を改善するため、全国的にも砂礫州の切り下げや河道掘削を行い、冠水頻度の増加と

掃流力の増大を通じた樹林化抑制の取り組みが実施されている。また、利根川水系渡良瀬川では上流からの低水路の流れを引き込む形で砂礫州上に掘削水路を設置し、洪水営力を活用した樹林化砂礫州と低水路の一体的管理の取り組みが行われているところである²⁾。

樹林化抑制の取り組みを効果的に実施するためには、礫床河川でのハリエンジュの樹林化特性に応じた適切な対策を実施すること、すなわち、洪水攪乱が樹林地動態に与える影響を適正に評価して樹木伐採や砂礫州掘削等の対策を効果的に適用することが必要である。

本検討では、ハリエンジュの樹林化が著しい渡良瀬川礫床区間で、田中らの提案した手法³⁾を援用して砂礫州上樹林地の動態評価を行い、洪水攪乱領域での樹林化(動的樹林化¹⁾)と冠水頻度の小さい安定域での樹林化(静的樹林化)に対する効果的な樹木管理の提案を行う。

2. 砂礫州上樹林地の動態評価モデルの構築

(1) 砂礫州上の樹林地特性調査

表-1 ハリエンジュ樹林地における平均的な繁茂状況

密生度	樹高(m)	胸高直径(m)	枝下高(m)	樹冠幅(m)
疎	8.5	0.2	1.5	5.6
密	9.7	0.2	1.7	4.9

密生度：平均的な繁茂密度で、疎：約60本/1000m²、密：約200本/1000m²

渡良瀬川のセグメント1の礫床区間において、樹林化が顕著な砂礫州を対象に、砂礫州上の樹林地動態の評価に必要な樹木特性量に関する調査を行った。

河川環境基図（平成23年2月）等を基に面的に広がる一連の樹木群域を85箇所抽出し、群域内の主要樹木を対象に、樹高、胸高直径、枝下高、樹冠幅、繁茂密度を現地計測した。表-1には、調査結果より得られたハリエンジュ樹林地における平均的な樹木の性状諸量を示す。

(2) 砂礫州上樹林地の動態評価手法

評価は田中らの提案した手法³⁾を援用して、平面二次元流況解析による樹木に作用する抗力モーメントの評価から樹木の倒伏・破断・転倒指標（BOI：Breakage or Overturning Index）の判定を行い、併せて砂礫州上の河床材料（50%粒径、90%粒径）の無次元掃流力の評価から樹木の流失指標（WOI：Wash-Out Index）の判定を行うことで、砂礫州上の樹林地動態を評価した。

a) BOI指標

樹木に作用する抗力モーメント M は式(1)で表す。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} (u^2 + v^2) \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad (1)$$

ここに、 C_{d-ref} ：主幹を円柱と仮定した場合の抗力係数（本検討では1.0）、 d_{BH} ：胸高直径、 $\alpha(z)$ ：樹形（幹枝）の相違（幹・枝幅の総和を胸高直径 d_{BH} で基準化した比）を表す付加係数、 $\beta(z)$ は葉相における付加係数で、福岡・藤田⁴⁾の研究等を参考に1.25とした。

$\alpha(z)$ は現地における樹木の画像解析結果より設定した。

主幹の破断・倒伏破壊の限界モーメントは、胸高直径 d_{BH} の3乗に比例し、転倒破壊の限界モーメントは d_{BH} の2乗に比例するとされる、Tanaka and Yagisawa⁵⁾の研究結果より、流況解析の水理量から得られた胸高直径 d_{BH} の主幹の抗力モーメントに対する破断・倒伏・転倒可能な最大胸高直径 $d_{BH,max}$ を算出し、得られた $d_{BH,max}$ を d_{BH} で除することでBOIを判定する。

b) WOI指標

樹木の流失条件は、対象砂礫州の50%粒径、90%粒径の無次元掃流力を式(2)で算出し、それぞれの粒径の移動を判断するため、50%粒径の無次元限界掃流力 τ_{*c50} を0.06とし、 τ_{*c90} を式(3)の芦田・道上式⁶⁾より算出する。

$$\tau_{*i} = \frac{H_{max} I_e}{S d_i} \quad (2)$$

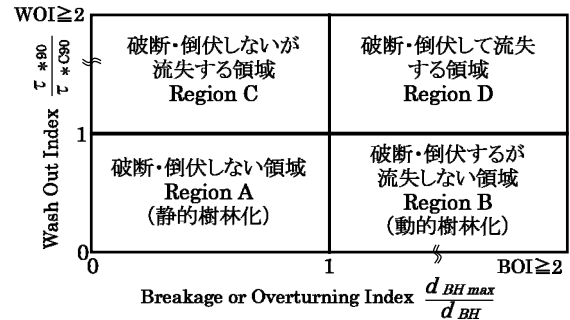


図-1 BOI, WOI指標による樹林地判定図

$$\frac{\tau_{*c90}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19 (d_{90}/d_{50})} \right]^2 \quad (3)$$

ここに、 H_{max} 、 I_e 、 d_i はそれぞれ、樹木の繁茂していた地点の最大水深(m)、エネルギー勾配、粒径(m)、 S ：土粒子の水中比重である。

対象砂礫州の d_{50} 、 d_{90} より式(2)、式(3)を用いて、90%粒径の無次元掃流力 τ_{*c90} および無次元移動限界掃流力 τ_{*c50} を算出し、両者の比よりWOIを判定する。

c) BOI-WOI判定

流況解析による水理量をもとに評価されたBOI指標、WOI指標を用いて、図-1に示す樹林地判定図を用いて砂礫州上の樹林地動態を評価する。ここで、Region A, Bが樹林地領域であり、とくに礫床河川での樹林地の進行を促す動的樹林地はRegion Bの領域に該当する。

(3) 流況解析モデルの概要

砂礫州上樹木の性状諸量（樹高、胸高直径、枝下高、樹冠幅、繁茂密度等）、砂礫州表層の河床材料設定をもとに平面二次元流況解析を実施した。対象区間を渡良瀬川足利上流の礫床区間（32.0k～56.0k）とし、一般座標系を用いた二次元浅水流モデルを用いた。最小メッシュ幅は横断方向で5m程度、縦断方向で10m程度である。河床地形は、平成23年11月に測量されたレーザプロファイラデータ（高水敷部）、平成21年度定期横断測量データ（低水路部）を用いた。粗度係数は既往洪水で再現検証された条件値を用い、また樹木群内部の流水抵抗は、樹木群の樹高、幹の胸高直径や単位面積当たりの樹木本数から算出される透過係数 k (m/s)⁷⁾ を与えた。また、砂礫州上の河床材料については、低水路および砂礫州を対象に実施された既往の調査結果をもとに、次項(4)に示す平成23年9月洪水での砂礫州上の植生流失状況の再現検証に基づき推定した。

(4) 平成23年9月洪水における砂礫州上樹林地の植生流失状況の検証

砂礫州上樹林地の動態評価モデルの構築では、樹林地の樹木性状と樹林地内の粒径設定を必要とする。樹木性状については、樹林地の現地調査に基づき与えるが、樹

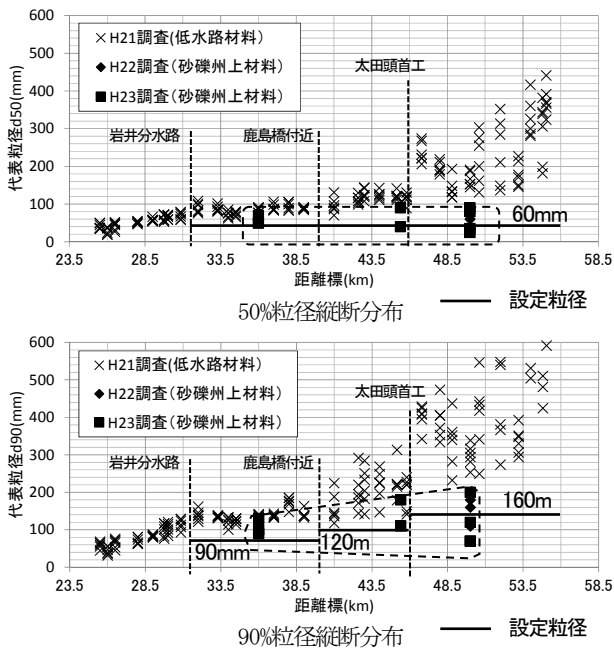


図-2 既往調査の河床材料粒径および推定河床材料粒径

林地内の河床材料の設定については、河床材料調査資料から砂礫州を対象に実施された調査結果を踏まえ、既往洪水での植生流失状況を再現できるように河床材料（砂礫州上の90%粒径）を推定した。ここでは、出水前後の砂礫州の植生流失を写真判読可能な平成23年9月洪水（高津戸流量930m³/s相当）を対象として判定した。

砂礫州を対象に同一調査手法で実施された既往の河床材料調査結果（平成22年調査、平成23年調査）の50%粒径 d_{50} 、90%粒径 d_{90} を縦断的にプロットすると（図-2参照）、50%粒径は縦断的なばらつきが小さく40mm～90mm程度であるのに対し、90%粒径は上流側ほどばらつきが大きくなる。この要因は砂礫州上の河床材料採取地点の相違によるものと思われるが、本検討では調査結果を踏襲し、ほぼ縦断的に均一と判断された50%粒径（60mm）を既知として、縦断的なばらつきが大きい90%粒径を砂礫州の植生流失状況の再現検証に基づき推定した。写真-1、2は松原橋付近（45.4km付近）の平成23年9月出水前後の空中写真を示し、出水後の砂礫州の植生流失箇所を囲み線で示した。図-3には出水前の樹木群域を初期状態とし、50%粒径を60mmと設定し、90%粒径を100mm～140mmの間で変化させたWOI指標判定（高津戸流量930m³/sの定常流計算）より、90%粒径を120mmとしたケースでの植生流失箇所（写真中の着色部）を示した。両者の砂礫州の植生流失箇所は概ね合致するものと判断し、松原橋付近の砂礫州上の90%粒径を120mmとして推定した。

同様な手法を用いて、50%粒径を60mmとした場合の90%粒径の縦断的な分布を推定することとした。その縦断区分は低水路河床材料特性を踏まえた3区分（32.0k～41.5k、41.5k～46.2k、46.2k～56.0k）で設定し、それぞれの区間で砂礫州の植生流失状況の再現検証を実施した。表-2

表-2 砂礫州上樹林地の河床材料粒径の推定値

対象区間	検証地点	50%粒径	90%粒径
32.0k～41.5k	緑橋付近	60mm	90mm
41.5k～46.2k	松原橋付近	60mm	120mm
46.2k～56.0k	桐生大橋付近	60mm	160mm



写真-1 平成23年9月出水前の空中写真（松原橋付近）

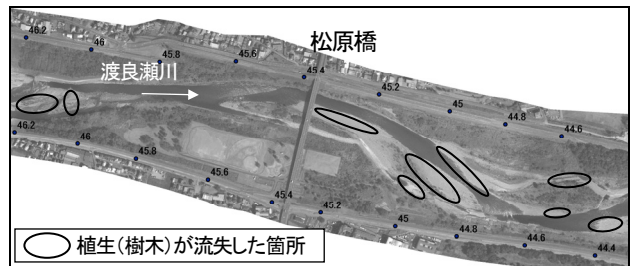


写真-2 平成23年9月出水後の空中写真（松原橋付近）

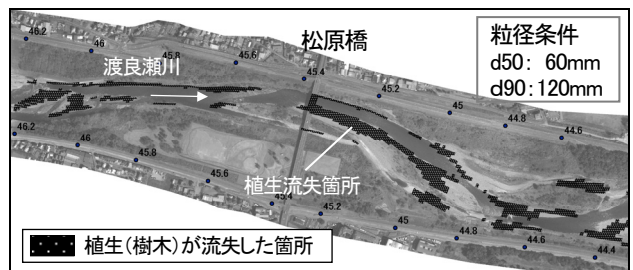


図-3 WOI指標による植生流失箇所の推定（松原橋付近）

には推定した砂礫州上樹林地の50%粒径と90%粒径を示す。推定された90%粒径は既往の河床材料粒径（砂礫州上材料）の下限もしくは平均的な値となった（図-2参照）。

2. 松原橋付近を対象とした砂礫州上の樹林地動態の感度分析

(1) 樹齢2年相当の樹木生長時の動態評価

近年、安定したハリエンジュ林が形成されている渡良瀬川では、中小洪水程度で樹木は破断・倒壊することは稀であるが、伐採後の樹木生長を想定した場合、幹や樹高が小さい樹木では破断・倒壊が生じやすく、動的樹林化が進行する可能性がある。ここでは、樹齢2年相当（伐採後2年）の樹木生長を想定した場合の樹林地動態を評価する。

ハリエンジュの生長量は、渡良瀬川の砂礫州上のハリエンジュ林の繁茂状況調査結果⁸⁾による樹齢と樹高、胸高直径、樹冠幅、枝下高等のアロメトリー関係係数より推定するものとし、樹齢2年のハリエンジュを樹高1.6m、

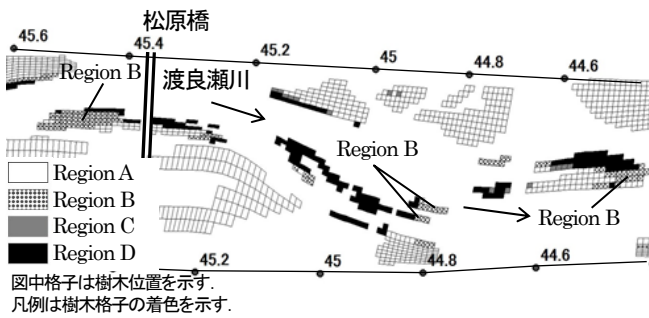
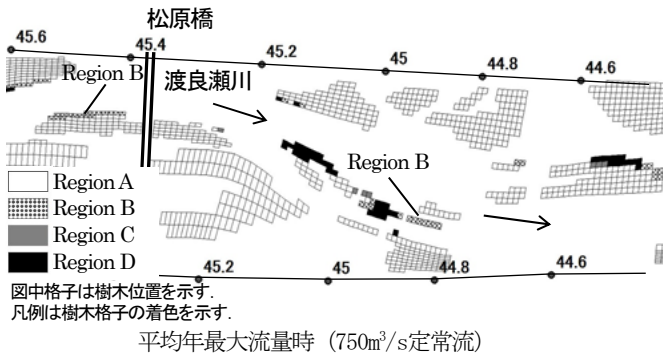


図-4 伐採後2年経過時の砂礫州上の樹林地動態結果 (松原橋)

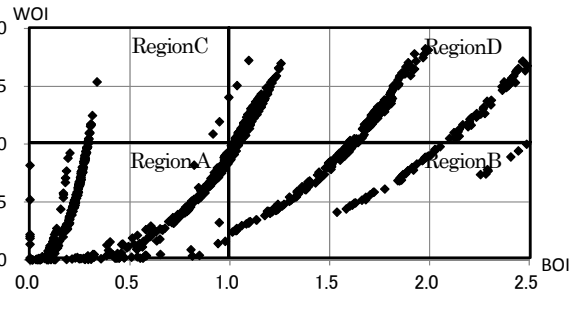
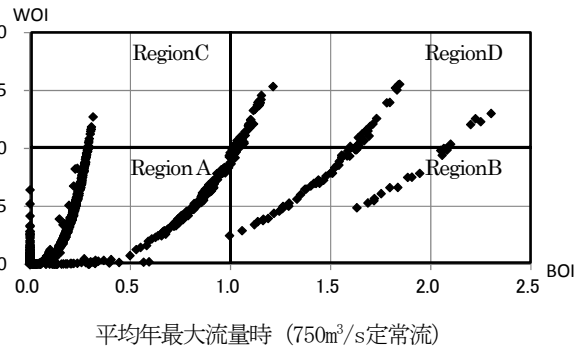


図-5 伐採後2年経過時の樹林地判定結果 (松原橋)

胸高直径0.01m, 樹冠幅0.9m, 枝下高1.2mの中低木として設定した。伐採後は現況樹木の繁茂域で再繁茂するものとし、洪水外力は、概ね2~3年で1回程度発生する外力である平均年最大流量相当 (高津戸流量750m³/s), および近年の大規模出水である平成19年9月洪水流量相当 (高津戸流量1, 200m³/s) の2ケースとし、対象流量の定常流計算より、砂礫州上の樹林地動態を評価した。

図-4および図-5には松原橋付近を対象に実施したBOI, WOI指標による樹林地の動態評価、樹林地判定結果を示す。平均年最大流量時では、静的樹林地化を示すRegion Aが多いものの、一部で樹林地化の進行を促す動的樹林地化を示すRegion B, 砂礫州が流失するRegion Dが確認できる。平成19年9月洪水流量相当では、洪水による攪乱が大きくなることから、Region Aに加え、Region BおよびRegion Dの割合が増大する傾向を示す。

(2) 樹齢5年相当の樹木生長時の動態評価

伐採後の樹木生長が高木相当に達した場合の樹林地動態を評価する。この場合のハリエンジュの生長量は、河川水辺の国勢調査で高木林と位置づけられる樹高4.0mとし、樹齢5年, 胸高直径0.04m, 樹冠幅2.0m, 枝下高1.7mと設定した。対象とする洪水外力は、(1)と同様に平均年最大流量および平成19年9月洪水流量の定常流とした。

図-6および図-7には、平成19年9月洪水流量時でのBOI, WOI指標による樹林地判定結果を示す。伐採後2年程度の樹木生長時の動態評価と比較しWOI指標に変化は少ないが、樹木が大きく生長したことで破断・倒壊しづらくなり、動的樹林地化を示すRegion Bがほとんど確認されない結果となった。紙面の都合上、平成19年9月洪水に対し

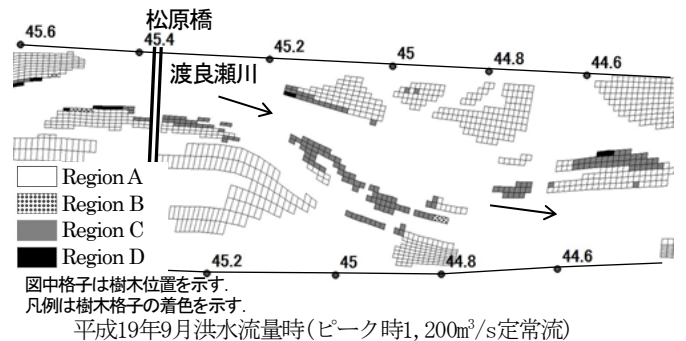


図-6 伐採後5年経過時の砂礫州上の樹林地動態結果 (松原橋)

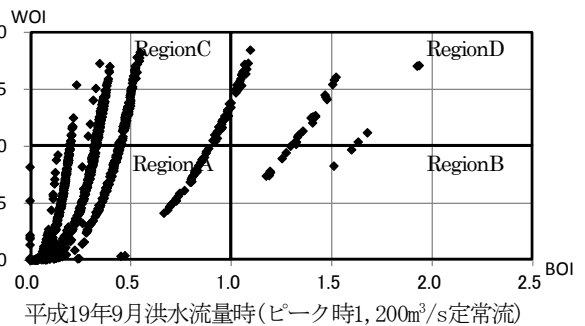


図-7 伐採後5年経過時の樹林地判定結果 (松原橋)

外力が小さく、洪水攪乱の少ない平均年最大流量時の結果を割愛するが、両者の結果は同様な傾向にある。

3. 渡良瀬川の礫床区間を対象とした樹林地動態評価と樹林地対策の設定

(1) 樹林地化領域と対策の考え方

砂礫州上の樹林地動態の感度分析によれば、樹林地化の進行を促す動的樹林地化は、伐採後の樹木生長が比較的小

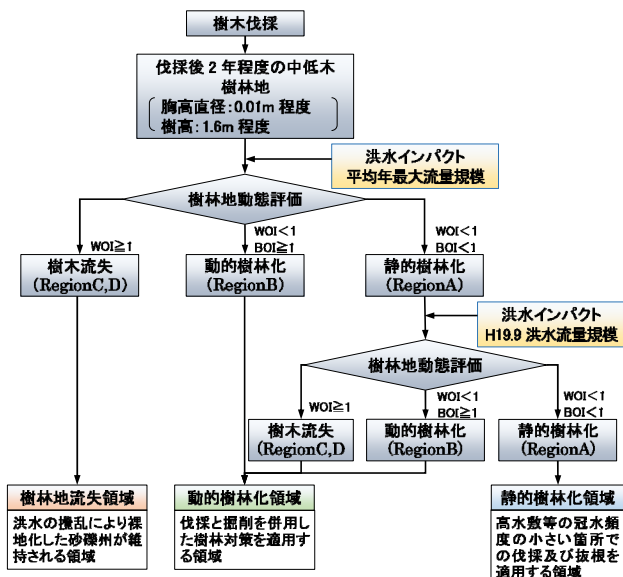


図-8 砂礫州上の樹林地動態を踏まえた樹林化領域設定フロー

さい状態（伐採後2年程度）で発生する可能性が高く、樹林化が進行した安定した高木林が形成される状態（伐採後5年程度）では、動的樹林化が生じない傾向にあることがわかる。安定した樹林地を形成する過程の一つに動的樹林化があるとすれば、渡良瀬川の樹木管理としては、伐採後2年程度の中低木の樹林地で洪水の攪乱による動的樹林化を生じさせないことが重要である。

渡良瀬川の樹林対策では、伐採後2年程度の中低木における樹木生長を想定し、平均年最大流量規模および近年の大規模出水である平成19年9月洪水規模を外力（定常流）とした樹林地動態評価より、樹林化領域と対策の考え方を以下のとおり整理する（図-8参照）。

a) 静的樹林化領域

両者の洪水規模において静的樹林化（Region A）と評価された樹林地は、陸域化した高水敷相当の高さを有する、あるいは洪水流の水裏に相当する砂礫州に該当し、基本的に破断・倒伏も生じない樹林地と判断し、従来より高水敷等の冠水頻度の小さい箇所での伐採および抜根による処理を適用する。

b) 動的樹林化領域

両者いずれかの洪水規模において動的樹林地（Region B）と評価された樹林地は、伐採後の洪水の攪乱により樹林化の進行が加速することが予想されることから、伐採と掘削を併用した樹林対策を適用する。

c) 樹林地流失領域

両者の洪水規模において樹木が流失すると評価された樹林地（Region C, D）は、伐採後の洪水の攪乱により裸地化した砂礫州が維持されるものと判断する。

(2) 樹林化領域に応じた樹林対策の設定

渡良瀬川のセグメント1の礫床区間(32.0k~56.0k)を対象に、砂礫州上の樹林地動態を評価し、図-8に示

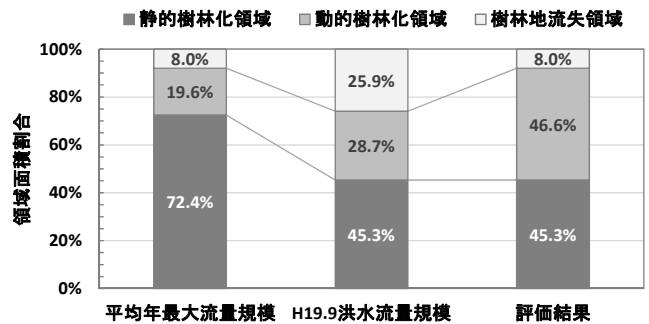


図-9 砂礫州樹林地に占める樹林化領域の割合

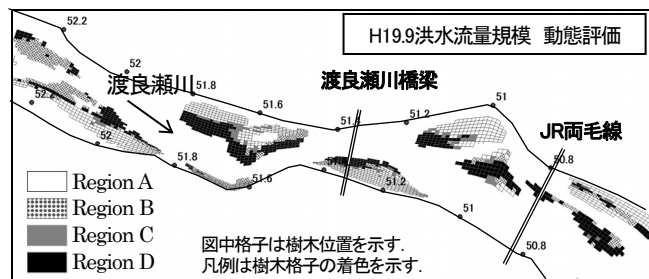
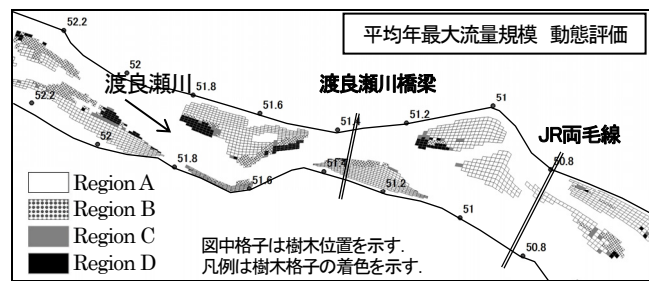
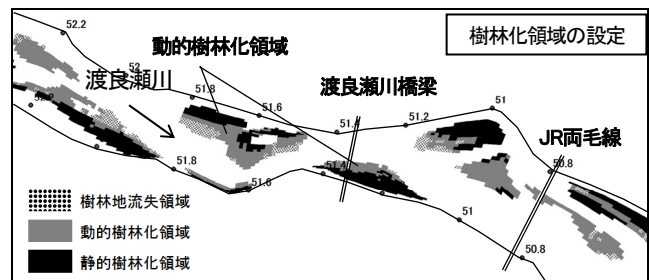


図-10 砂礫州上の樹林地動態評価および樹林化領域設定

すフローに準じて樹林化領域を設定した。図-9には砂礫州樹林地に占める樹林化領域の割合、図-10には渡良瀬川上流の渡良瀬川橋梁付近の樹林化領域設定結果を示す。

渡良瀬川の砂礫州樹林地に占める樹林化領域の割合は、静的樹林化領域が約45%、動的樹林化領域が約47%、樹林地流失領域が約8%となる。ただし、面的にまとまった一連の砂礫州でみた場合、静的樹林化と動的樹林化が混在する状況にあり、実務的には、樹木管理すべき一連の砂礫州を対象に、砂礫州内で優占する樹林化領域を代表させて設定する。この結果、動的樹林化領域は河道が狭く洪水時の流下断面面積が小さい渡良瀬川上流、桐生大橋（50.2km付近）上流で顕在化することが分かった。

動的樹林化領域で実施する樹林対策では、砂礫州上の樹木伐採と河床掘削を併用し、洪水時の掃流力を高める

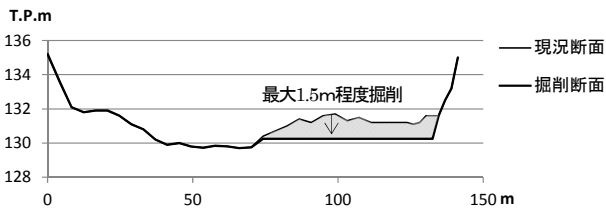


図-11 河床掘削後の河道横断面図 (53.5km付近)

ことで、砂礫州内の90%粒径の攪乱と樹木流失を促し、樹林化判定におけるRegion BをRegion C, Dに変化させる対策を実施することが重要である。

4. 河床掘削による樹林化抑制効果の評価

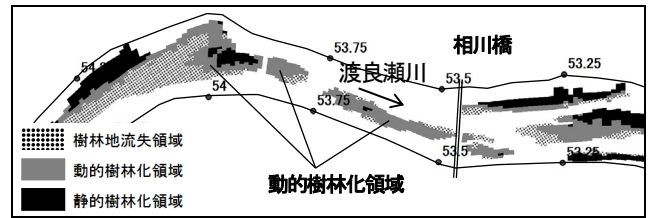
水衝部対策および治水上の流下断面確保対策として検討されている桐生大橋上流の河床掘削区間を対象に、樹林化抑制効果の評価する。掘削箇所は低水路河床との比高が拡大した砂礫州であり、掘削高は図-11に示す53.5km付近の河道横断面図に代表されるように、現況地盤高より最大で1.5m程度である。

動態評価は、現況の樹木繁茂域および掘削箇所に樹木生長2年程度の中低木が繁茂するものとし、平均年最大流量規模および近年の大規模出水である平成19年9月洪水規模を外力（定常流）として与えた。河床掘削前後の渡良瀬川上流の相川橋付近の樹林化領域設定結果を図-12に示す。河床掘削後の樹林地流失領域は河床掘削前と比較し増加し、河床掘削による樹林化抑制効果を確認することができた。

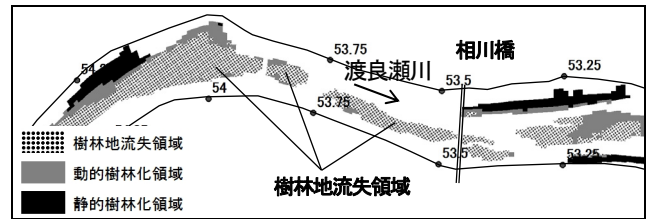
一方で、河床掘削による掃流力の増加は、掘削前の静的樹林化領域を動的樹林化領域へと変化させてしまう箇所が見受けられる。また、河床掘削に伴うエネルギー勾配の減少が流下断面全体の掃流力を低下させてしまう懸念もあり、樹林化抑制に対する効果的な河床掘削範囲、流下断面全体の掃流力を維持しつつ砂礫州上の流下水深を確保する河床掘削形状の設定等を検討する必要がある。

5. おわりに

本検討は、渡良瀬川の礫床区間を対象に、田中らの提案した手法を援用し、平成23年9月洪水の砂礫州の植生流失状況の再現検証に基づき、砂礫州の樹林地表面層の河床材料条件を設定し、現地調査に基づく樹木性状を反映した樹林地動態評価モデルを構築した。また、松原橋付近を対象に実施した樹林地動態評価では、樹木生長量および洪水外力の変化による樹林化判定の感度分析を行い、この結果、樹林化の進行を促す動的樹林化は、伐採後2年程度の中低木の樹林地で発生する可能性が高いことを示した。更に、渡良瀬川の樹林対策では、伐採後2年程度の樹木生長を想定した上で、平均年最大流量規模および近年の大規模出水である平成19年9月洪水規模の外力での樹林化判定より、静的樹林化 (Region A) , 動的樹



現況 (河床掘削前)



河床掘削後

図-12 河床掘削後の砂礫州上の樹林地動態評価 (樹林化領域)

林化 (Region B) , 樹林地流失 (Region C, D) の樹林化領域の設定を行い、領域に応じた効果的な樹林化抑制対策を提案した。この結果、動的樹林化は河道が狭く洪水時の流下断面積が小さい桐生大橋上流の砂礫州で生じる可能性が高いことを示し、今後、水衝部対策および治水上の流下断面確保対策と合わせて、砂礫州上の動的樹林化を抑制する効果的な掘削形状 (掘削に伴う掃流力の低下を改善する滞筋埋戻し等を含む) を検討することの重要性を示すことができた。

参考文献

- 1) 清水義彦, 小葉竹重機, 岡田理志: ハリエンジュによる動的河道内樹林化について, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.1099-1104, 2000.
- 2) 松田浩一・内堀寿美男・清水義彦・石原正義・藤堂正樹: 固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.235-240, 2010.6
- 3) 田中幹夫, 八木澤順治, 福岡捷二: 樹木の洪水破壊指標と流失指標を考慮した砂礫州上樹林地の動態評価手法の提案, 土木学会論文集B Vol.66 No.4, pp.359-370, 2010.11
- 4) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響, 土木研究所報告, 第 180 号, pp.137-139, 1990.
- 5) Tanaka, N and Yagisawa, j.: Effect of tree characteristics and substrate condition on critical breaking moment of trees due to heavy flooding, Landscape Ecol. Eng., Vol.5, pp.59-70, 2009
- 6) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎実験, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.55-69, 1972.
- 7) 財団法人国土技術研究センター編: 河道計画検討の手引き, 山海堂, 2002.2
- 8) 池田裕一, 亀田涼, 浅枝隆, 坂本健太郎: 渡良瀬川砂州上におけるハリエンジュの繁茂状況に関する基礎調査, 河川技術論文集, 2012.6

(2014. 4. 3受付)