

# 礫床河川における河道内樹林地の 洪水破壊について

## STUDY ON THE DESTRUCTION MECHANISM OF RIPARIAN TREES IN A GRAVEL-BED RIVER CAUSED BY FLOOD DISTURBANCE

清水義彦<sup>1</sup>・長田健吾<sup>2</sup>

Yoshihiko SHIMIZU and Kengo OSADA

<sup>1</sup>正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

<sup>2</sup>学生会員 群馬大学大学院工学研究科 博士前期課程 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

Recently riparian trees in the course of gravel bed-river have extremely increased and enlarged their covered-area over bars and flood plain. Such a situation brings about problems of river management for the environmental aspects as well as the safety of rivers against flood.

In this paper, the fall down process and the destruction mechanism of the riparian trees caused by the 1999, 2001 floods were examined in the segment-1 reach of Watarase River. Especially, from the field surveys after floods, it was clear that the damage of the trees could be classified by the scale of the flood external force. Based on the field study and numerical calculation with 2D-flow model, the critical tractive force to be a key index of the scale of flood disturbance was evaluated and results showed that the destruction mechanism of the riparian trees is caused by the disturbance of movable bed.

**Key Words :** *Riparian trees expansion, Robinia pseudo-acacia, gravel-bed river, the fall down process of riparian trees, flood disturbance, 2D-numerical flow model*

### 1. はじめに

近年、礫床河川での樹林化が進み、多摩川<sup>1)</sup>、千曲川<sup>2)</sup>、手取川<sup>3)</sup>、渡良瀬川<sup>4)</sup>等でのフィールドを対象とした調査研究が進められている。なかでもハリエンジュは根茎による発達から速やかな樹林地形成をなす樹種として注目され、この樹林地が河道管理上の問題となることがしばしば指摘されている。樹林化が進行するプロセスにおいて、冠木頻度低下による州の陸地化が重要なファクター<sup>1)</sup>であるが、清水ら<sup>5)</sup>は、洪水を受ける攪乱環境によっても樹林化が促進されることを見出している。すなわち、ハリエンジュが洪水によって適度の攪乱を受けると、その後、倒木・傾斜木から、また周囲の地下茎から萌芽が生じ、急激な密生度増加となることを評価して、これを動的樹林化とよんだ。

洪水規模によっては樹林地破壊が生じフラッシュされることで、礫床河川固有の玉石河原(裸地河原)の復元からセグメント固有の生息環境が再生される。一方、過度の樹林地破壊は河道内流木生産源となり、流木の集積から局所的な洪水疎通能力障害を引き起こしかねない恐れもある。このように、樹林化の進行プロセスとともに、洪水規模との関係で樹林地破壊形式や破壊規模を評価す

ることが治水的にも環境的にも重要で、今後の樹林地管理・河道管理にとって有効な情報を与える。

出水による樹林地の破壊については、北川ら<sup>6)</sup>、服部ら<sup>7)</sup>が洪水痕跡調査をもとに報告している。とくに、服部ら<sup>7)</sup>は、千曲川における平成10年洪水でのハリエンジュを調べ、倒伏限界モーメントによる倒伏判定を行っている。その際、上流からの流下物の、樹木へのひっかかりが樹木の遮蔽面積を増加させ、これによって倒伏する事例を抽出し、樹林地破壊の1つの素過程を説明している。また、既往の樹木管理の手引き<sup>8)</sup>にも倒伏限界モーメントにもとづく指標が強調されている。さらに、砂田ら<sup>9)</sup>も倒伏限界モーメントによる倒伏と抜根判定をベースとした樹木の破壊規模予測を検討している。

本研究では、セグメント1の河相特性をもつ礫床河川でハリエンジュによる樹林化の進んだ中州や高水敷が豊富に存在する利根川水系渡良瀬川を対象とし、平成13年洪水に生じたハリエンジュ樹林の攪乱について、痕跡調査と平面流数値解析をもとに、樹林地の攪乱・破壊形式とその規模を推定した。その結果、樹林の破壊規模(流失・倒木・傾斜木)は、河床材料の移動を伴う基盤の攪乱が第一の要因であり、移動限界礫径が破壊規模指標として適切であるとの結論に至った。

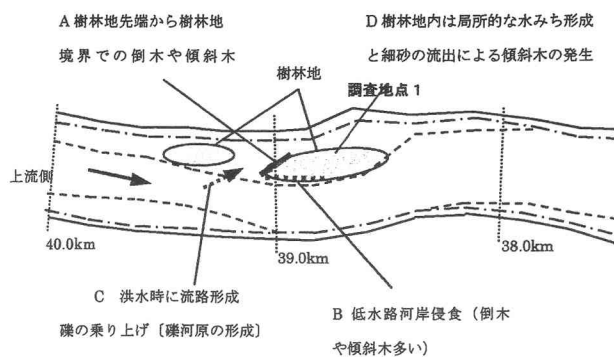


図-1 河道平面形と調査地点 1

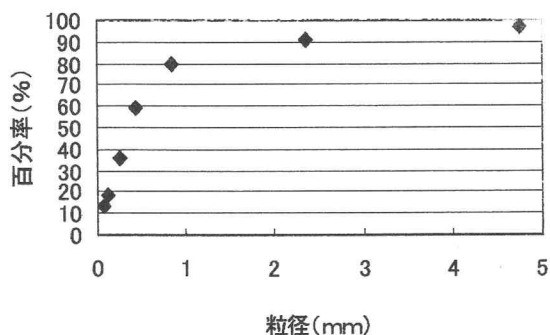


図-2 樹林地内細粒砂層の粒度構成

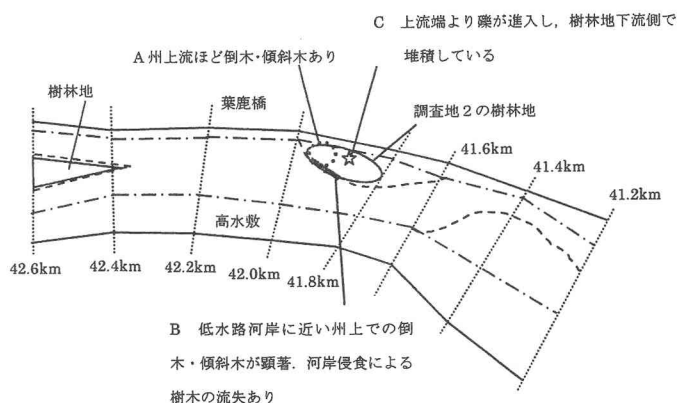


図-3 河道平面形と調査地点 2

## 2. 樹林地攪乱痕跡調査の概要

調査対象とした利根川水系渡良瀬川の河道区間は、平均河床勾配1/140-1/270、代表粒径7.2cm-13.5cmのセグメント1に代表される粗い礫床河川で、近年の河道特性としては河道平面形の変化が顕著ではなく低水路固定と複断面化が進んでいる<sup>10)</sup>。また、この区間では中州・高水敷がハリエンジュの樹林によって占有される傾向にある<sup>10)</sup>。平成13年9月洪水後の痕跡調査を行い、調査地点1（足利39km付近）、調査地点2（葉鹿42km付近）の樹林地及び周辺の高水敷、州の攪乱状況を調査した。



写真-1 樹木の破壊（図-3A 地点）



写真-2 樹林地内の礫移動（図-3C 地点上流側）



写真-3 樹林地内での礫堆積（図-3C 地点下流側）

洪水規模は、調査地点1や下流のピーク流量で1790m<sup>3</sup>/sである。この区間での計画流量4000m<sup>3</sup>/s、低水路満杯流量は平面流数値解析の結果、約1200m<sup>3</sup>/s程度となった。すなわち、中州、高水敷が冠水し、その結果樹林地の攪乱・破壊が生じた。調査地点1,2における樹木はハリエンジュで、樹高12m以上のものが占めている。

## 3. 樹林地の攪乱・破壊形式

### (1) 調査地点1（足利39km付近）の樹林地攪乱

図-1に調査地点1の樹林地の平面配置状況を示す（点線は低水路ラインを示す）。この樹林地は低水路左岸沿

いに存在し、低水路満杯流量以上になると、上流側樹林地と着目樹林地（調査地点1）間から水流が高水敷上に乗り、左岸堤防沿いに流路が形成される。この周辺での洪水攪乱の状況は次のようである。樹林地先端から樹林地境界で生じた樹木の攪乱（図-1のA）では、とくに先端では根茎が露出し切断されていることから、河床の洗掘が生じ樹木が倒木・傾斜したものと推定される。また、樹林地境界では樹木に引っかかる流下物（主に枯草や根茎類）が他の箇所比べて多く、遮蔽面積の増加に伴う樹木のモーメント破壊も無視し得ない可能性があるため、これについての考察は後述する。

図-1のBは河岸侵食による樹木の破壊で、支持基盤を完全に失うため破壊規模は大きく、また樹木の流失を伴う。図-1のCでは草本類に覆われた（単木あり）高水敷上を水流が走り、草本類上に礫床が形成されたもので（表層礫は河床細砂分の流出に伴って元河床から露出したものでない）、低水路側から供給されたものと言える。図-1のDは樹林地内で河床の凹凸が局所的に生じ（水みち形成と細砂の洗い流し）、その周辺で樹木の傾斜が目立っている。李ら<sup>1)</sup>、清水ら<sup>4)</sup>の報告にもあるように、樹林地内の表層は細粒砂層（図-2の粒度分布）で覆われるため、流速が小さくとも（樹林地内は比高が高く、植生による流れの抵抗の大きい）、細粒砂層の移動は容易に起こり、根茎の露出から樹木の傾斜が生まれる。とくに、ハリエンジュ樹木は根茎でつながっているものが多く、1本の傾斜が他の数本の樹木の傾斜につながる傾向が抽出された。ハリエンジュの傾斜は正の屈光性から主幹からの萌芽を促進させ、密生度増加傾向を産む（動的樹林化の1つのプロセス）<sup>5)</sup>。

## (2) 調査地点2（葉鹿42km付近）の樹林地攪乱

図-3に調査地点2の樹林地の平面配置状況を示す。図-3のAは州の上流端で、水流が直進して乗り上げるため倒木が目立つ箇所である（写真-1）。ここでは樹木の根茎が露出し（河床低下）、その上に礫が堆積している。図-3のBは州の低水路側で、とくに、州の河岸侵食によって倒木が生じた。州河岸部から切断された根茎が水流中に露出しているのが目立ち、図-1のBと同様、河岸侵食による樹木流失がここでも生じている。さらに、興味深いことは州上流端より礫が州に乗り上げ（写真-2）、樹林地内の図-3のCまで進入し堆積している（写真-3）。この状況は図-1のCと同様である。以上から、攪乱を受けた州では、①河床低下・河岸侵食による基盤の消失（図-1のB、図-3のB、図-1のD、図-1のAの先端）、②始めに河床低下を生じ、その後河床上昇（堆積過程）（図-3のA）、③一方的な河床上昇（堆積過程）（図-1のC、図-3のC）の3つの物理基盤の攪乱が抽出された。そして、樹林地の攪乱・破壊形式としては、次の3つが示唆された。

ア) 樹木支持基盤の攪乱によって生じる樹木の破壊

- イ) 低水路自然河岸の侵食とそれに伴う樹木破壊・流失
- ウ) 樹林地上流端および樹林地境界での流下物捕捉による樹木の破壊

## 4. 洪水再現計算による基盤攪乱の評価

さて、前述した樹林地の攪乱を生んだ洪水規模を評価するため、平成13年洪水の流況再現を以下に示す一般化座標系平面流数值計算から行った<sup>11), 12)</sup>。ここで、樹木群による運動量混合（渦動粘性係数）は樹木の形状抵抗による乱れ生成を考慮した乱れエネルギー(k)方程式から求めている。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{K}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{UK}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{VK}{J} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\Gamma_k}{J} (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{\Gamma_k}{J} (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial k}{\partial \eta} \right) \quad (1) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\Gamma_k}{J} (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{\Gamma_k}{J} (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial k}{\partial \eta} \right) \\ &+ (P_k + P_{kf} - \varepsilon) / J \end{aligned}$$

$\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$  ; 座標変換のメトリックス（添え字に

関する微分を表す）、J ; 座標変換のヤコビアン、U, V : 流速ベクトルの反変成分、K: kh (h:水深) である。乱れエネルギー生成項はレイノルズ応力にもとづく $P_k$ の他に、植生の形状抵抗( $F_x, F_y$ )による乱れ生成 $P_{kf}$ を次式のように与える。

$$P_{kf} = F_x u + F_y v \quad (2)$$

である。 $\varepsilon$ を乱れエネルギーの逸散率として、上式を解くことより渦動粘性係数を与える。

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = C_\varepsilon \frac{k^{3/2}}{L}, \quad \Gamma_k = h v_t / \sigma_k \quad (3)$$

と与える（Lは乱れの長さスケールであり、清水ら<sup>12)</sup>により、 $\alpha=0.4$ 、乱流モデルのパラメタは標準値を採用）。樹林地の平均的な密生度( $\lambda$ )は、

$$\lambda = \frac{n D_m}{s^2} \quad (4)$$

ら求められ（n ; 本数、 $D_m$  ; 平均幹径、s : サンプリング格子幅）、樹林地の密生度は樹林化区間での現況密生度調査から調査地点1で $\lambda=0.015m^{-1}$ を採用し、調査地点2で $\lambda=0.0065m^{-1}$ を採用し樹木群粗度を配置して計算に反映させた（ $C_0=1.0$  ; 植生の形状抵抗係数）。また、現地のハリエンジュの背丈を考えて樹木群は非水没粗度とした。河床変動の解析では流砂量式としてMeyer-Peter・Muller式、横断方向流砂量式には長谷川式<sup>13)</sup>を用い、次式の一般化座標系の流砂連続式から評価した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{q_B^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{q_B^\eta}{J} \right) \right) = 0 \quad (5)$$

ただし、 $(q_B^\xi, q_B^\eta)$  : 流砂量の反変成分である。

#### (1) 調査地点 1 (足利39km付近) の樹林地攪乱

図-4に計算流速ベクトルを示す。図-4より、対象流量規模では左岸高水敷にも流れがのり、調査地点1の樹林地を囲むように水流が形成され、また、樹林地先端付近には大きな流速値も生じている。樹林地破壊規模の大きな先端付近(39km地点、図-1のA、B)の水深、流速の横断分布を図-5に示す。横断地形に示される断面内比高の一番高い箇所が樹林地であり、高水敷上の流れで2m/s程度、樹林地右側の河岸侵食による樹木の流出が認められた所)では4m/sに近い流速値となる。流れの計算から求めた摩擦速度と岩垣式を併用すれば移動限界礫径が求められる。図-6に39km地点の移動限界礫径の横断分布を示した。高水敷上で、径5cm程度、樹林地の先頭A付近では12-16cm径の礫が動く計算結果となった。これは洪水後の表層粒度分布のほぼ80%粒径に相当している。図-7には設定洪水流量を3時間継続した後の河床変動(平均粒径10cmの様な礫とした)を示した(39km地点)。左岸高水敷上の河床変動はほとんどないものの、樹林地の低水路際では河床低下〔河岸侵食〕の傾向が求められ、これは痕跡調査結果と一致する(図-1のB)。

#### (2) 調査地点 2 (葉鹿42km付近) の樹林地攪乱

図-8に計算流速ベクトルを示す。ここでは、調査地点2の代表横断面として、41.9km断面に着目して説明する。図-9に水深、流速の横断分布を、また、図-10に移動限界礫径の横断分布を示した。図-9、10から、樹林地内でも2m/s以上の流速が生じ、2cm-8cm以上の礫の移動が可能である。また、低水路際では14cm径の礫が動いている。

図-11には設定洪水流量を3時間継続した後の河床変動を示した。樹林地の低水路際では河床低下〔河岸侵食〕の傾向が求められ(図-3のB)、一方、樹林地内では微弱ながら堆積傾向が得られた(図-3のC)。

以上の移動限界礫径や河床変動傾向はピーク流量時の評価に過ぎないが、得られた計算結果が洪水痕跡調査による攪乱状況とよく対応しており、こうした解析が攪乱規模評価にとって有効であることを示している。ピーク流量時に注目した樹木破壊予測の有効性は服部らの千曲川での研究成果<sup>7)</sup>からも支持されている。

### 5. 樹木降伏モーメント破壊形式に関する考察

流下物捕捉による樹木の破壊は、遮蔽面積の増加に

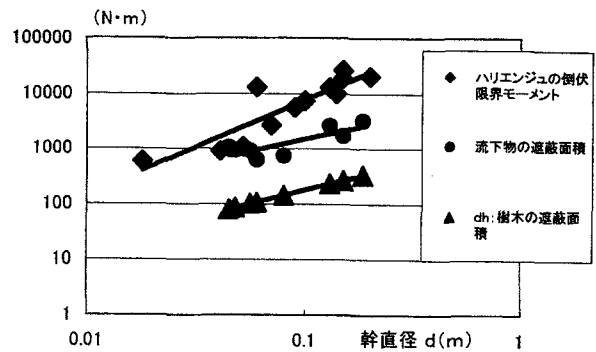


図-12 倒伏モーメントと外力モーメントとの比較

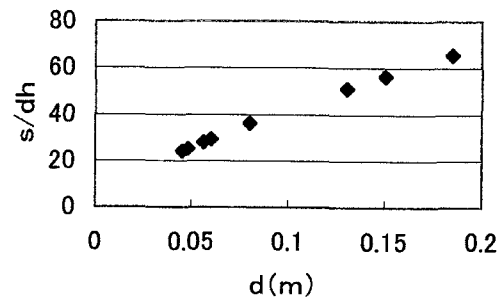


図-13 倒伏モーメントに達するための遮蔽面積

伴って樹木に作用する流体力モーメントが増し、これが樹木の倒伏限界モーメント以上になったときに生ずる。従って、平成13年洪水の再現計算から、樹木に作用した流体モーメントを評価し、これと倒伏限界モーメントを比較することにより、この破壊形式が起こり得た可能性を議論できる。

先述したように、調査地点1(図-1のA)での樹林地境界(高水敷側)では流下物の集積とともに倒木、傾斜木しているものが目立つ。そこで、39km地点の流速、水深値を使い(図-5)、樹木にかかる流体力モーメントを次式から求めた。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_D S u^2 L \quad (6)$$

ここで、 $M$ : 外力モーメント ( $N \cdot m$ )、 $\rho$ : 水の密度、 $C_D$ : 樹木の抗力係数=1.2、 $S$ : 遮蔽面積 ( $m^2$ )、 $L$ : 流水の作用点中心の地表面からの高さ ( $m$ ) =  $h/2$ 、 $u$ : 流速 ( $m/s$ )、 $h$ : 冠水深 ( $m$ )である(図-5より  $u=2m/s$ 、 $h=1.5m$ )。

一方、河川における樹木管理の手引き<sup>8)</sup>より、ハリエンジュの伏限界モーメント( $M_c$ )を求め、ハリエンジュの倒伏限界モーメントと胸高直径のデータの関係を次式で近似した。

$$M_c = 394 d^{1.7} \quad (7)$$

ただし、 $M_c$ : 倒伏限界モーメント ( $KN \cdot m$ )、 $d$ : 幹直径 ( $m$ )である。

倒木・傾斜木した樹木の幹径( $d$ )に対する倒伏限界モ

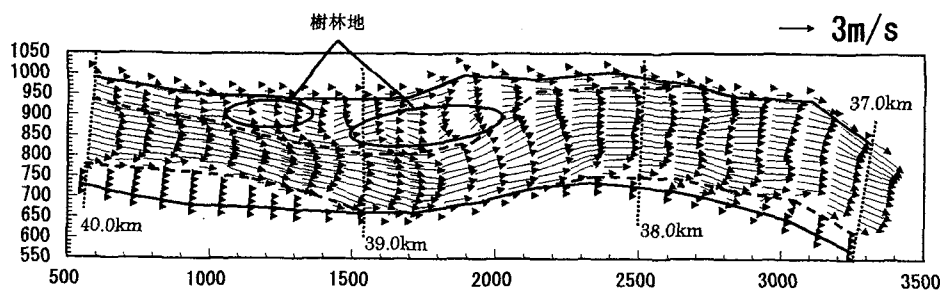


図-4 計算流速ベクトル (調査地点1)

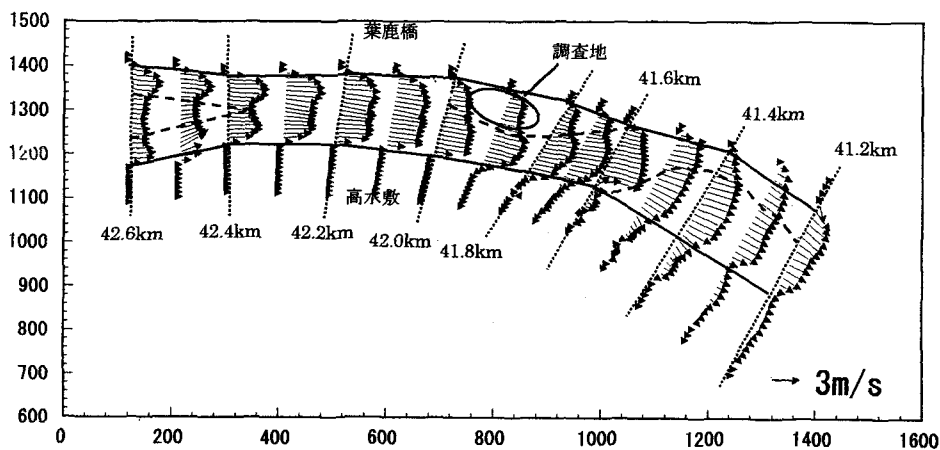


図-8 計算流速ベクトル (調査地点2)

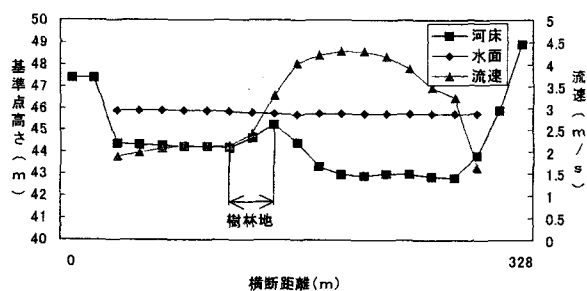


図-5 水深・流速横断分布 (39km)

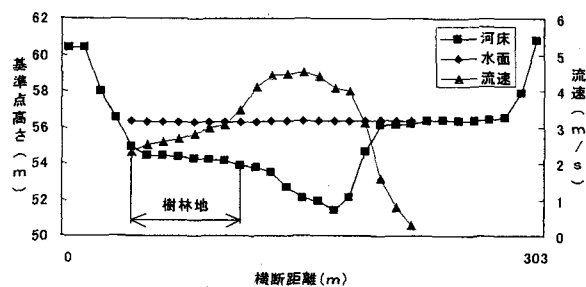


図-9 水深・流速横断分布 (41.9km)

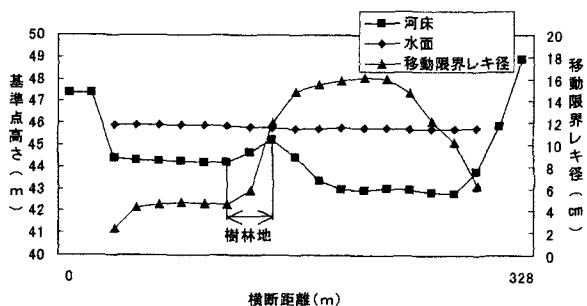


図-6 移動限界粒径の横断分布 (39km)

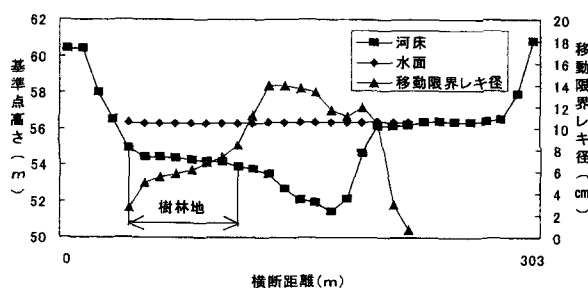


図-10 移動限界粒径の横断分布 (41.9km)

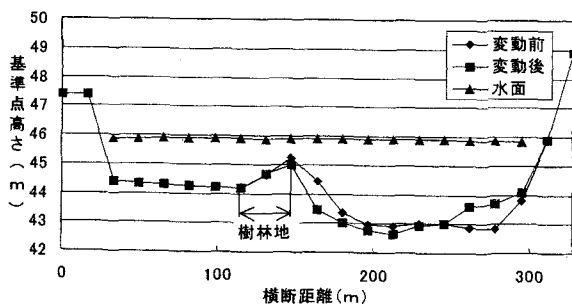


図-7 河床変動 (39km)

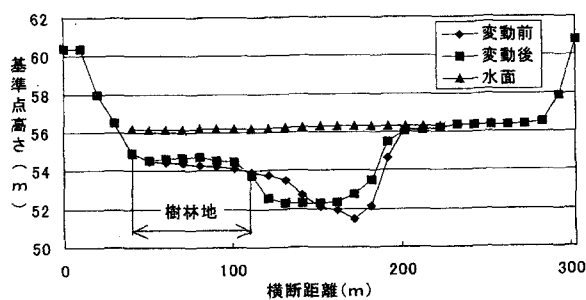


図-11 河床変動 (41.9km)

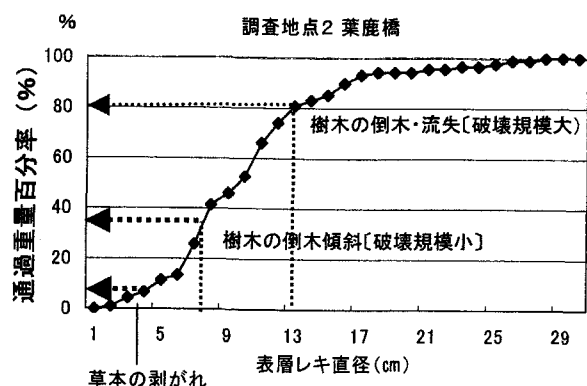


図-14 移動礫径と攪乱・破壊規模

ーメント（◆印）と外力モーメントの関係を図-12に示す。▲印は樹木のみの遮蔽面積から求めた外力モーメント、●印は洪水後に残存した流下物遮蔽面積を用いた場合の外力モーメントの値である。これより、樹木のみの遮蔽面積による外力モーメントでは、全く倒伏限界に達せず、倒伏破壊を起こすためには相当な流下物捕捉が必要である。また、洪水痕跡後に計測された流下物面積を考慮しても倒伏限界を達するものは見られない。図-13は倒伏限界モーメントに達するために必要な遮蔽面積増分（樹木面積との相対値表示）を示したもので、10cmの幹幅に対し、40倍相当の面積増加が必要であることが分かる。

## 6. あとがき

以上の考察から、樹木の攪乱・破壊（流失・倒木・傾斜木）は河床、すなわち物理基盤の攪乱が主要因との結論を得た。洪水痕跡調査結果で述べたような基盤攪乱の規模は、ピーク流量にもとづく洪水再現計算から推定可能で、その指標として移動限界礫径が適切である。調査地点2の表層礫径で整理すれば、低水路河岸侵食や樹木の倒木・流出を引き起こすような破壊規模は80%粒径、傾斜木が顕著な箇所では40%粒径程度、草本類の剥がれ等の破壊規模は10%粒径程度となる（図-14）。ただし、洪水後堆積環境となる箇所では、樹木の埋没により動的樹林化が生まれる可能性があるなど、河床変動解析との組み合わせが樹林地の破壊・再生予測にとって重要である。また、倒伏限界モーメント値も基盤の攪乱（根茎の露出、切断）によって低下すると考えられ、こうした前提で破壊基準を検討する必要がある。

以上より、本研究で得られた礫床河川の樹林地洪水破壊は次の主要因によって生じる。

- ・ 物理基盤〔河床〕の攪乱、礫床とともに樹林地内では主根系のある表層細粒砂層の攪乱が主要因として考えられ、ついで、

- ・ 基盤攪乱にともなう樹木耐力モーメントの低下
  - ・ 基盤攪乱の結果生じた樹木の傾斜による流下物捕捉（遮蔽面積拡大による流体力の増加）
- を考える必要がある。とくに、高水敷樹木管理においては、設定流量規模にもとづく移動限界礫径が樹木破壊規模の重要な指標となる。

本研究では、国土交通省渡良瀬川工事事務所の協力を得た。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 李参熙・山本晃一・望月達也・藤田光一・塚原隆夫・渡辺敏：扇状地礫床河道における安定植生域の形成機構に関する研究，土木研究所資料第3266号，168p，1999。
- 2) 皆川朋子，島谷幸宏：多摩川永田地区及び千曲川鼠端地区における河原率にみる洪水による破壊・再生，第4回研究発表会講演集，応用生態工学研究会，pp.13-16,2000。
- 3) 辻本哲郎・村上陽子・安井辰弥：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，45巻，pp.1105-1110,2001。
- 4) 清水義彦・小葉竹重機・新船隆行・岡田理志：礫床河川の河道内樹林化に関する一考察，水工学論文集，43巻，pp.971-976,1999。
- 5) 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，45巻，pp.1099-1104,2001。
- 6) 北川明・島谷幸宏・小栗幸雄：洪水による樹木の倒伏，土木技術資料，vol.30-7,pp.349-354,1988。
- 7) 服部敦・瀬崎智之・吉田昌樹：礫床河道におけるハリエンジュ群落の出水による破壊機構と倒伏発生予測の試み，河川技術論文集，pp.321-326,2001。
- 8) (財)リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，p.154-171,1999。
- 9) 砂田憲吾・河野逸朗・田中総介：出水時における河道内樹木の破壊規模予測に関する基礎研究，水工学論文集，pp.947-952，2002。
- 10) (財)河川環境管理財団：河道変遷特性に関する研究，pp.124-142，1999。
- 11) 長田信寿：一般化座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会講義集，土木学会水理委員会基礎水理部会，61-76，1999。
- 12) 清水義彦・小葉竹重機・新船隆行：礫床河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算，水工学論文集，44巻，pp.819-824，2000。
- 13) 長谷川和義：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する水理学的研究，北海道大学博士，1984。

(2002.4.15 受付)