

出水によるハリエンジュ樹林地の 破壊とその規模推定に関する考察

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

清水義彦¹・小葉竹重機²・吉川武志³

Yoshihiko SHIMIZU, Shigeki KOBATAKE and Takeshi YOSHIKAWA

¹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)

²正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

³群馬大学大学院工学研究科 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

Recently riparian trees (*Robinia pseudo-acacia*) 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 damage conditions 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, which the floods gave to 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 fall down process of riparian trees is based on the degradation of movable river-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¹⁾、千曲川²⁾、手取川³⁾、渡良瀬川⁴⁾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、冠水頻度低下による州の陸地化が重要なファクターであるが、清水ら⁵⁾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。一方、礫床河川の玉石河原(裸地河原)がセグメント固有の、潜在自然的な生息環境とすれば、その回復にとって、樹林地の破壊、更新を引き起こす出水も必要である。こうした生態学的な

フラッシュ流量や樹林化が持続する、すなわち、動的樹林化につながる流量規模を把握することは、将来の礫床河川の河相予測にとって不可欠であり、その知見の集積は今後の樹林地管理・河道管理にとって有効な情報となる。出水による樹林地の破壊については、北川ら⁶⁾、服部ら⁷⁾が洪水痕跡調査をもとに報告している。とくに、服部ら⁷⁾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⁸⁾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。

本研究では、セグメント1の河相特性⁹⁾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10年洪水、13年洪水に生じた渡良瀬川ハリエンジュ樹林の攪乱痕跡調査と平面流数値解析をもとに、樹木が受ける破壊規模とその要因を推定するための検討を行った。そ

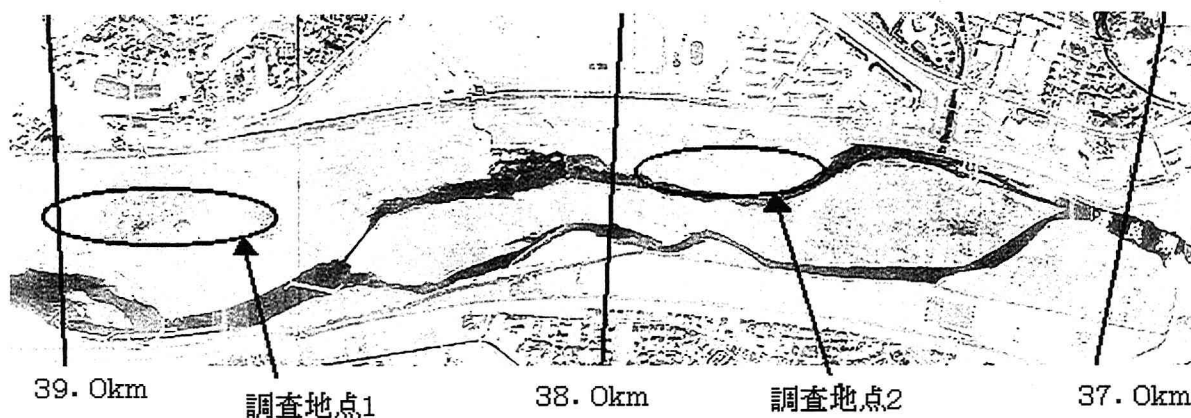
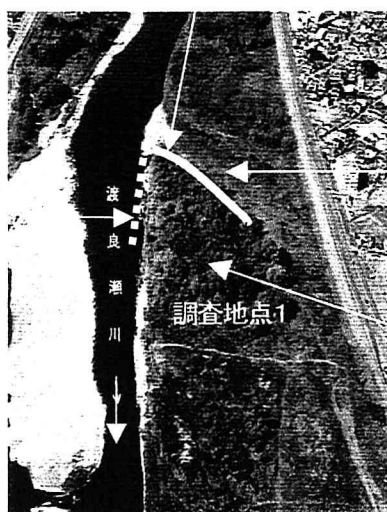


写真-1 調査区間を含む渡良瀬川の河道平面形状

A 樹林地先端から樹林地境界での倒木や傾斜木

B 低水路河岸侵食
による倒木と流失



C 草本類の剥がれ
と礫河原の形成

D 細砂の流出・
水みちの形成に
伴う樹木の破壊
(倒木・傾斜木)

写真-2 調査地点1の樹林地周辺の樹木破壊状況

の結果、樹林の破壊（流失・倒木・傾斜木）は、河床材料の移動を伴う基盤攪乱が第一の要因であり、移動限界礫径が攪乱規模指標として適切であるとの結論に至った。

m^3/s である（ただし、平成13年に関しては速報値）。すなわち、両洪水とも規模としてほぼ同じである。

写真-1に、調査区間周辺の河道平面形の航空写真を示す。調査地点1, 2はいずれもハリエンジュ樹林地で、低水路沿いあるいはその近傍に位置している

2. 調査区間の概要

対象とした河道区間は、利根川水系渡良瀬川の利根川合流点からの38km付近で、平均河床勾配1/268、代表粒径13.5cmのセグメント1に代表される粗い礫床河川である。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。また、この周辺のみならず、渡良瀬川礫床区間で、近年、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。対象区間での計画流量 $4000\text{m}^3/\text{s}$ であり、低水路満杯流量は後述する平面流数值解析の結果、現況河道形状で約 $1200\text{m}^3/\text{s}$ 程度である。樹林地の破壊をもたらした平成10年の洪水は約3km下流の足利流量観測所で、 $1841\text{m}^3/\text{s}$ 、平成13年8月22日で $1541\text{m}^3/\text{s}$ 、同年9月11日で、1790

3. 樹林地破壊の状況

調査地点1に関する樹木の破壊状況を写真-2に示す。同写真に書き入れた洪水攪乱の状況は、平成10年洪水、平成13年8月22日、同年9月11日の洪水で共通した状況で、樹林地先端から樹林地境界で生じた樹木の攪乱（写真-2のA）では、とくに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（写真-3）。ここで洪水後の表層の礫の粒度分布を調べると図-1のようになる。ただし、この領域では樹木に引っかかる流下物（主に枯草）が他の箇所比べて多く、遮蔽面積の増加に伴うモーメント増加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。

Bは河岸侵食による樹木の破壊（流出を伴う）で、基盤を完全に失うため破壊規模は大きく、河道内流木生産源となり得る箇所である。Cは写真-4aに示すように、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（表層の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ともいえる。ただし、Cに示す水みちでは一方的に堆積傾向にあるわけではなく、写真-4bに示すよう、高水敷上の比高差（縦断勾配）に応じて掃流力が変化し、局所的な河床低下が生じて、浅い根のハリエンジュの根茎が露出するものも多く見られる。その中には、単木のハリエンジュが倒伏、傾斜するものも存在する。そのほとんどの樹木根茎の一部が河床に残存すること、周囲に競争相手となる他の樹木がないことで日射条件が良好で、こうした状況では洪水後、清水らが言う動的樹林化が生まれる⁵⁾。Dは樹林地内で河床の凹凸が局所的に生じ（水みち形成）、その周辺で樹木の傾斜が目立っている。李ら¹⁾、清水ら⁴⁾の報告にもあるように、樹林地内の表層は細粒砂層（図-2の粒度分布に対応）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（図-2）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（写真-5）。



写真-3 洪水後の状況（調査地点1内のA）



写真-4a 洪水後の状況（調査地点1内のC）

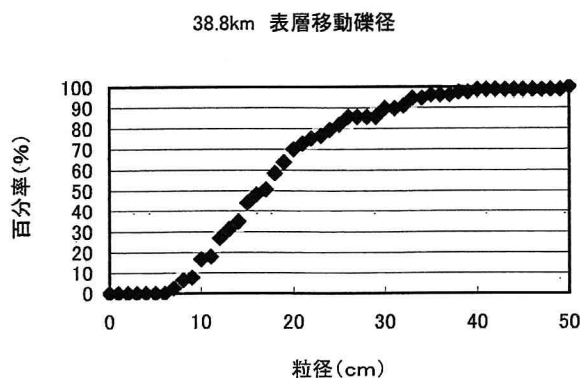


図-1 河床の攪乱が大きい箇所（調査地点1内のA）での洪水後の表層粒度構成

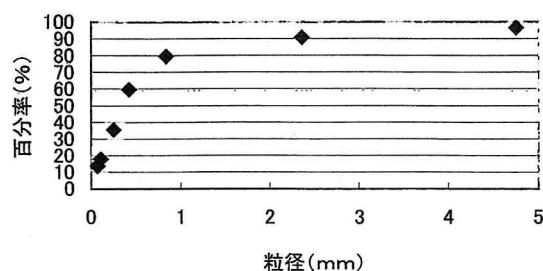


図-2 樹林地内表層の細粒砂層の粒度構成



写真-4b 洪水後の状況（調査地点1内のC）



写真-5 ハリエンジュ樹林地内での樹木の傾斜

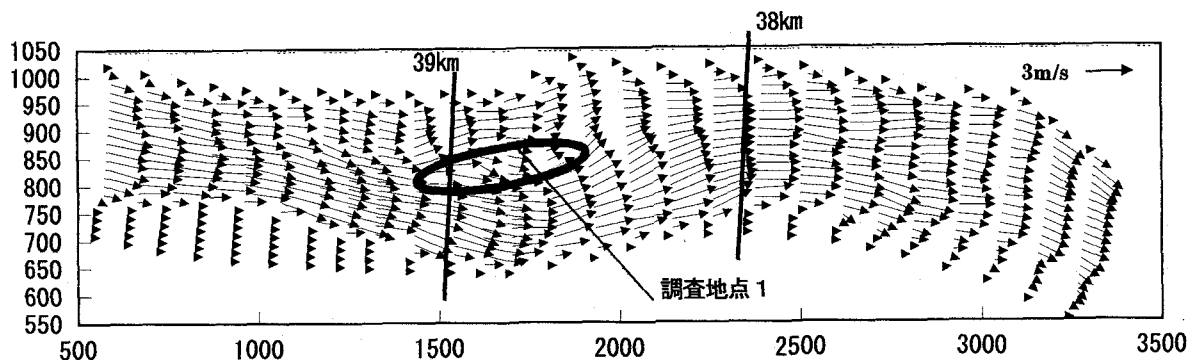


図-3 平均流速の平面分布（洪水流況の再現計算）

4. 平成10年洪水の再現計算

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10年、13年洪水を想定し、 $1800\text{m}^3/\text{s}$ 洪水流量のもとで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。ここで、平面流数值計算では、植生の形状抵抗による流れ生成を考慮したk方程式モデルを適用し¹⁰⁾、樹林地の平均的な密生度(λ)は、

$$\lambda = \frac{nD_m}{s^2} \quad (1)$$

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 $\lambda = 0.015\text{m}^{-1}$ を採用し，樹木群粗度を配置して計算に反映させた（ $C_p=1.0$ ；植生の形状抵抗係数）。粗度係数は $n=0.032$ とし，下流端では水位・流量曲線を設定して水位を与え，また，現地のハリエンジュの背丈を考へて樹木群は非水没粗度とした。図-3に計算流速ベクトルを示す。これより，設定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ている。これは洪水中に観測された状況と一致する。図-4は調査地点1にある樹林地の上流端付近（39km地点）で，写真-2のA付近（上流端）に相当する横断面での横断地形，水面，流速分布を示したものである。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，写真-2に示すCの水みち（高水敷上）で 2m/s 程度，樹林地の上流端A（かつ樹林地の右方で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。図-5は岩垣の式と計算流速値から算出された移動限界礫径で，C点高水敷上で，径 5cm 程度，樹林地の先頭A付近では 18cm 径の礫が動く計算結果となった。これは，図-1に示す粒度分布のほぼ50%粒径に相当している。

39.0km断面（植生0.015、流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ 、水位 41.0m ）

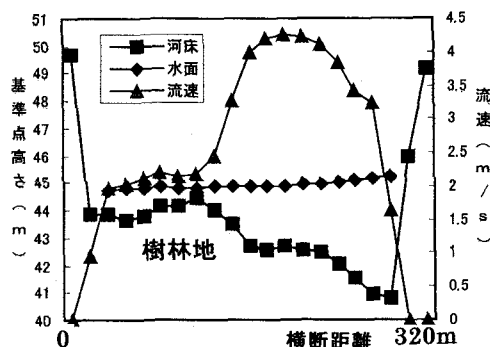


図-4 調査地点1-A付近における流速・水深の横断面分布

39.0km断面（植生0.015、流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ 、水位 41.0m ）

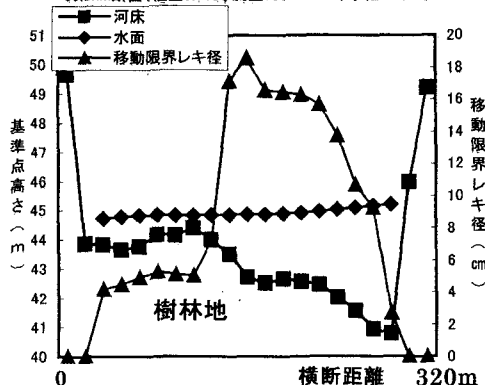


図-5 調査地点1-A付近における移動限界礫径・水深の横断面分布

5. 樹林地攪乱に関する要因分析

はじめに、攪乱されたハリエンジュ樹林の調査結果を述べ、樹木の破壊過程に関する考察を行う。

攪乱されたハリエンジュ樹林（写真-2のA付近）は、傾斜木が目立ち、中には倒木が数本見つけられた。その中には、円弧状の根が露出し、流れに対して直立する形であったため、砂礫やシルト、草本などの流下物が絡まっているという破壊形式が1例見つけた（写真-6）。これは、出水によるモーメント破壊を示唆する。



写真-6 根が露出したハリエンジュ



写真-7 ハリエンジュの倒木の状況

調査地点1 倒木

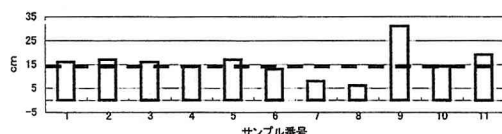


図-6a 倒木（傾斜木を含む）した

ハリエンジュの胸高直径



図-6b 倒木（傾斜木を含む）した

ハリエンジュの胸高直径

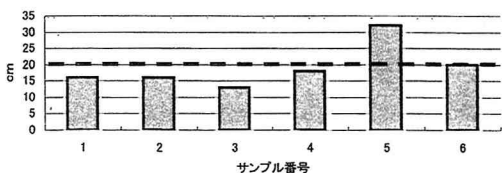


図-7 倒木していない（直立）

ハリエンジュの胸高直径

調査地点1および2で、倒木（傾斜木を含む）しているものとそうでないもの（直立状態）の胸高直径（地表から約1.2m）を示すと図-6,7 となる。多少データにばらつきはあるが、これらの図の比較から大きな差は認められなかった。すなわち、木の大きさによる耐力の差によって倒木や傾斜木が生じた訳ではない。

次に、倒木が流体力によるモーメント破壊で生じるかどうか調べてみる。河川における樹木管理の手引き⁸⁾によると、樹木引き倒し試験の結果から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が得られている。そこで、これらのデータ⁸⁾を図-8にまとめ（近似式(2)）、手引き⁸⁾に準じて倒伏限界モーメントを求めてみた。破壊が生じた樹林地周辺（写真-2示す高水敷上樹林地境界A）での洪水再現計算から、冠水深、流速が算出される（図-4）。樹木1本の遮蔽面積をDh（幹径と冠水深の積）で与えると、再現洪水での外力モーメント（式(3)）は、近似式(2)から求めた倒伏限界モーメントに比べきわめて小さく倒木しない結果となった。

$$M_c = 3.8 \times 10^4 D^{1.69} \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho C_D S u^2 L \quad (3)$$

$$S = \frac{2M_c}{\rho C_D u^2 L} \quad (4)$$

M_c : 倒伏限界モーメント (kgf・m)

M : 流体力による外力モーメント (kgf・m)

ρ : 水の密度 (102kgf・s²/m⁴)

C_D : 樹木の抗力係数

S : 遮蔽面積 (m²)

u : 流速 = 2.0 (m/s) (数値シミュレーションより算出)

L : 流水の作用点中心の地表面からの高さ = h/2 (m)

D : 胸高直径 (m)

h : 冠水深 (m), (洪水痕跡調査より1m)

Dh : 樹木のみの遮蔽面積 (m²)

そこで、仮に、上流から流下物の樹木へのひっかかりがあったものとして、これによる遮蔽面積が樹木本来の遮蔽面積 (Dh) の何倍になれば倒伏限界モーメントに達するかを、胸高直径別に調べた（図-9）。これより、胸高直径10cmで、約60倍の遮蔽面積増加が必要となる。

一方、洪水痕跡調査から求められた流下物による樹木の遮蔽面積は図-10のように求められた。これより、倒伏限界モーメントに達するほどの遮蔽面積増加は認められない。踏査から見られた特徴的なことは、むしろ、倒木している木の周辺基盤は攪乱された痕跡があることで、これは草本類の剥がれ、礫層の露出、基盤の凹凸（とくに洗掘）といったものが代表的である（写真-7）。以上の検討から、樹木の破壊は遮蔽面積増加の結果、モーメント破壊を生じたものではなく、河床基盤の攪乱が主要

因と言える。これは、既往の耐力試験結果にもとづく式(2)の適用の問題も示唆しており、河床攪乱による主根茎の露出等の樹木耐力モーメントの低下も考慮する必要を示唆している。

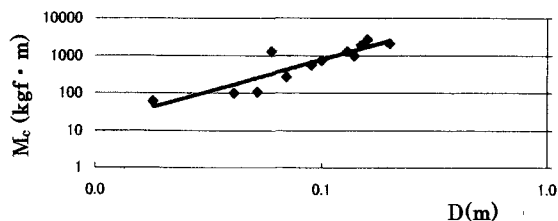


図-8 胸高直径と倒伏限界モーメントの関係

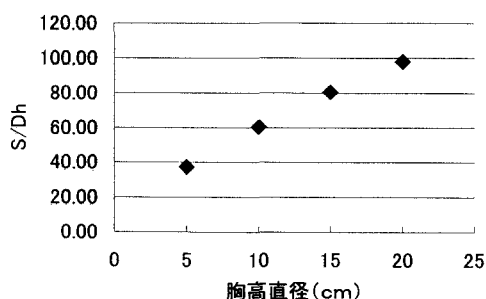


図-9 倒伏限界モーメントになるために必要な遮蔽面積の増分

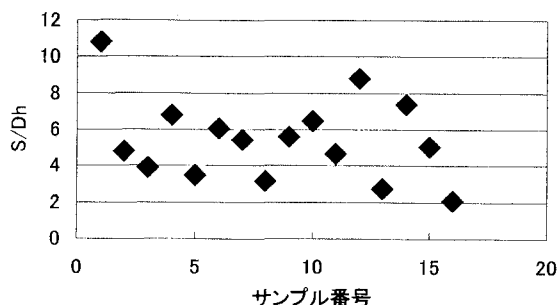


図-10 ハリエンジュに絡む流下物による遮蔽面積増分(洪水痕跡調査による)

6. あとがき

上記より、樹木の破壊(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、礫層の露出、基盤の凹凸(とくに洗掘)を生んだ攪乱過程(移動床過程)の規模は、洪水再現計算から求められた移動限界礫径に集約される(図-5)。これより、低水路河岸侵食と樹木の倒木と流出を引き起こすような破壊規模(写真-2, B)は、ほぼ20cm径クラスのもの(60-70%粒径)、草本類の剥がれ、単木の傾斜等の破壊規模は5cm-10cm径クラス(10-20%粒径)で、移動限界礫径から規模推定が可能となる。また、

図-2に示したように、樹林地内では、高水敷表層の粒径は5mm以下の砂で覆われているので、容易に主根の露出が生じる。モーメント破壊は、むしろ、こうした状況から考えるべきで(写真-5, 6)、今後検討されるべき課題である。以上より、礫床河川における倒木、傾斜木は、次の要因によって生じることが考えられる。

- ・ 河床(物理基盤)の攪乱、とくに、樹林地内では主根系のある表層細粒砂層の攪乱
- ・ 河床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、移動限界礫径を指標とした樹木破壊形式の仕分けが重要な視点となる。破壊形式とその生起指標が求められると、それを基準として実際の洪水時における進行性破壊についても検討可能である(例えば文献3))。

本研究では、科学研究費(基盤研究C, 代表: 清水義彦)の助成を受けた。また、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) 李參熙・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) 山本晃一: 沖積河川学, 山海堂, p.6, 1994.
- 10) 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.

(2001. 10. 1受付)