

礫床河川における近年の洪水攪乱と 植生破壊規模に関する考察

STUDY ON THE FLOOD DISTURBANCE AND THE DESTRUCTION OF VEGETATION IN A DEGRADATED GRAVEL-BED RIVER

清水義彦¹・長田健吾²・金文姫³

Yoshihiko SHIMIZU, Kengo OSADA and Kim Mun Hee

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学生会員 群馬大学大学院工学研究科 博士後期課程 (〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

³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, the river-bed degradation has been generated in many gravel-bed rivers. As a result, flooding areas exist only around the low-water channel. On the other hand, non-submerged areas or submerged areas affected by the weak flood disturbance appear over flood plain and gravel-bars. Such situation brings about not only the degeneration of the dynamic river system but also the decrement of inherent habitat environment in gravel-bed rivers.

In this paper, How degree of the flood disturbance and the destruction of the vegetation caused under the degeneration of gravel river characteristics was examined through the field investigation in the segment-1 reach of Watarase River. Based on the field study and numerical calculations with 2D-flow model, the maximum size of movable gravels and the local bed-degradation that are key indices of the scale of flood disturbance and the destruction of the vegetation, were evaluated.

Key Words : Degradation, gravel-bed river, flood disturbance, destruction of vegetation, *Robinia pseudo-acacia*, maximum size of movable gravels, 2D-numerical flow model

1. はじめに

近年, 多くの礫床河川で河床低下が顕著化し, 出水時での冠水領域が低水路周辺に集中した状況が生まれている^{1), 2)}. 一方, 冠水頻度とともに冠水規模の低下した高水敷・砂州上では植生が繁茂し, 低水路満杯流量をやや超える比較的大きな出水においても, 植生の形状抵抗から土砂堆積(細粒分)が促進され, 低水路の河床低下と合わさって横断面内比高差の拡大が進む(流路の複断面化). その結果, 比高を増した砂州では恒常的に安定な陸地となり, 単一的な木本の優先種から河道内樹林化が生まれている³⁾. なかでも外来種であるハリエンジュ(*Robinia pseudo-acacia*)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, 安定な陸地はもとより, 洪水にさらされる領域においても倒木や樹木の傾斜等のストレスを受けることによって幹からの多数の萌芽が生まれ, よりいっそう密生度を増す動的樹林化が清水らによって報告されている⁴⁾.

複断面化の進む河道においては, 低水路固定によって

洪水による流路変動や河岸州・中州の更新, 新たな礫河原の形成と言った河道の動的システムがくずれ, カワラノギク(*Aster kantoensis Kitamura*)等みる礫床河川固有の攪乱依存種が激減している. こうした中で, 多摩川の礫河原再生など礫床河川固有の河相・生息環境復元のための試みが始められている⁵⁾.

本研究では, 河床低下, 比高差拡大, 低水路固定と言った河道特性をもつ最近の礫床河川において, こうした河道特性の変質が特徴づける最近の洪水による攪乱状況を把握する. すなわち, 横断面内比高差が拡大し, ハリエンジュによる河道内樹林化が顕著な利根川水系渡良瀬川礫床区間を調査対象とし, 比高差拡大以前の河道断面との比較を行い, 冠水頻度・規模の変化を調べる. 次に, 最近の洪水攪乱によって河道内植生の破壊がどの程度生じているかを河川水辺の国勢調査による植生情報から考察する. ここで, 植生の破壊は植生が存在する物理基盤の攪乱・破壊として認識すれば, 破壊規模は基盤構成材料(河床材料)のどの粒径クラスまでが洪水で動き得るか, 基盤のそのものの攪乱(存在基盤の河床変動)から評価できる. そこで, 一般化座標系平面流解析

を行って洪水攪乱を再現し、植生の破壊状況を移動限界礫分布から関連づける。また、植生の破壊の有無を基盤の攪乱（州の河床低下・堆積と言った河床変動）から関連づける。これらの知見をもとに、河床低下・複断面化と言った変質をうけた礫床河川での現況での植生破壊について考察する。

2. 礫床河川の近年の河道特性

(1) 調査対象河道の特性

調査対象とした利根川水系渡良瀬川の河道区間（41km-51km）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、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⁴⁾。はじめに、調査対象区間上流端に位置する渡良瀬川高津戸地点（56km）における近年の年最大流量の時系列を図-1に示す（ただし、平成13年には8,9月に2度の大きな出水があったので両方示した）。調査区間での出水規模を知る目安の値として1200m³/s程度が低水路満杯流量で、計画高水流量は3500m³/sである。

(2) 河床低下と出水攪乱頻度・規模の低下

図-2に調査区間内における代表的な横断面の経年変化を示す。ここでは、過去の横断面形を示すものとして昭和41年の横断面と、後に考察の対象とする最近の出水を前後にはさむ平成11年、14年の横断面を示した。現況横断面は昭和40年代に比べかなりの低水路河床低下によって特徴づけられるが、最近ではその傾向は微弱になっている。低水路河床低下によって、みお筋は鮮明化し、また、低水路満杯流量の増加をもたらす。図-3は、それぞれの断面に対し水位-流量曲線と横断面を並べたもので、例えば昭和41年では約700m³/s程度でほぼ全断面が冠水するのに対し、平成14年ではその程度の流量は低水路内におさまってしまう。図-3の水位-流量曲線から流量（Q）と冠水幅（B）の関係を求め、その経年変化を見たものが図-4である。同じ出水規模に対し過去においては横断面内で広く冠水領域が生まれるのに対し、現況では低水路内の分担流量が多く冠水幅は広がらない。図-5は約700m³/s程度の流量が与えられたとき、河床材料（平均粒径10cm）の動き易さを示す攪乱指標として、無次元掃流力を無次元限界掃流力で除した値（ τ_{sm}/τ_{sc} ）を攪乱強度として定義し、これを横断地形とともに示したものである。移動限界を超える地点の横断的広がり昭和41年においては認められるが、現況断面はきわめて狭い。また、現況断面では低水路での攪乱が極めておきくなってきている（ただし、低水路では粗粒化が顕著で移動限界を超えるものの実際にはこれほど大きくならない）。

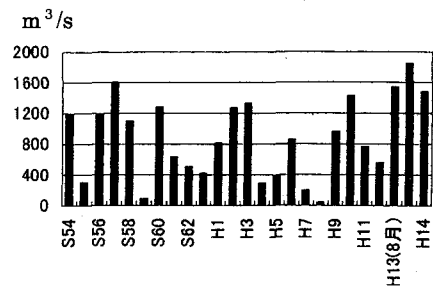


図-1 年最大流量の時系列

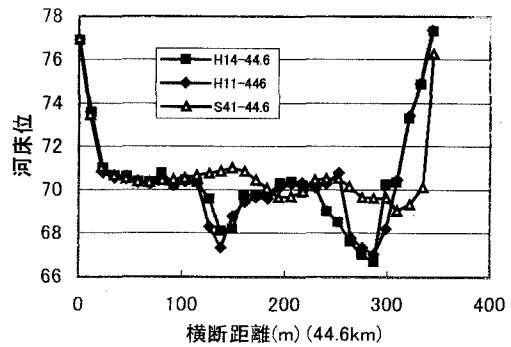
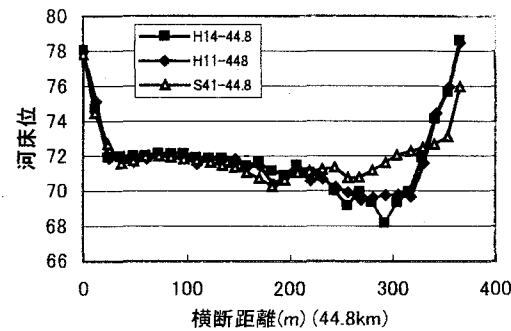


図-2 横断面の経年変化

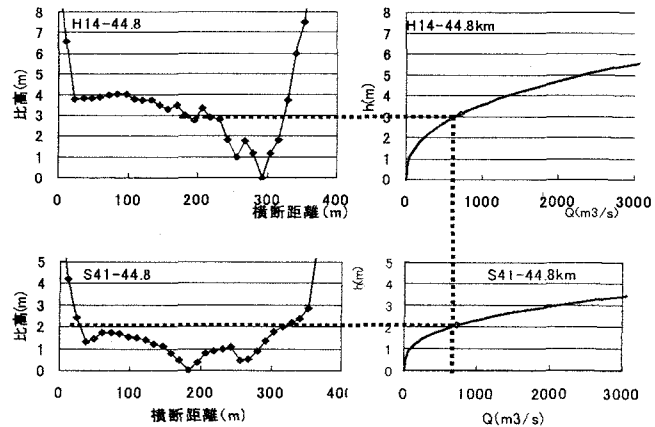


図-3 河床低下に伴う水位-流量関係の変化

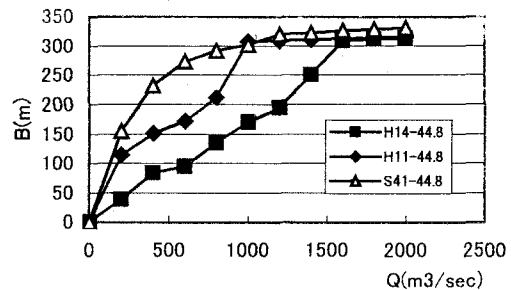


図-4 流量と冠水幅の関係

3. 洪水攪乱と植生破壊に関する考察

前節から、最近の礫床河川では洪水による攪乱が低水路周辺のみ集中し、高水敷、中州といった領域での攪乱がかなり限定され小さくなってきたことが整理された。こうした河道特性のもとに、河道内植生が最近の洪水によってどの程度破壊・攪乱されるかを調べることは、河道の動的システム復元や礫床河川固有の生物生息環境の再生を考える上で重要である。そこで、調査対象区間内の44.4km-41.2kmにおいて、平成11年度に行われた河川水辺の国勢調査（植物調査編）⁶⁾による植生情報をベースとして、植生繁茂領域がその後の洪水（平成13年，8月，9月洪水）によって河床変動を受けた否かを調べ、植生の破壊・攪乱を検討した。すなわち，ここでは，植生の破壊をその植生が存在する物理基盤の攪乱・破壊として認識した。図-6は調査区間内の代表的な横断面形で、平成11年地形の上に存在する主要な植生の基盤（存在域の範囲を▲で挟んで示し，その間に番号で植物種類を示した。また，平成11年地形での水面位置を▽で示している）が平成13年洪水を受けて変化した様子（平成14年地形）を示している。例えば，42.8kmの横断面図で右岸低水路河岸には平成11年時点でハリエンジュ（番号①）が繁茂していたが，平成13年洪水を受けて河岸侵食し（平成14年地形からの読み取り），ハリエンジュ林のすべてが破壊（流失）している（③は自然裸地）。

こうした河床変化を受けた植生を木本類と草本類に分けて平成13年洪水による植生破壊を評価した。ここで，推定された植生の破壊については，洪水後に国土交通省によって撮られた航空写真からもその妥当性を確認している。また，草本類については，河床低下・上昇のいずれもが植生の破壊につながるとしたが，木本類のほとんどハリエンジュであり，河床上昇を受けた領域では破壊されず，むしろ攪乱を受けたものの動的樹林化によって樹林地が維持されている場合も現地調査から見られ，木本類の破壊は河床低下を受けた場合のみに限定した。図-7には各断面における木本の破壊率を示した。一方，図-8には草本の破壊率（洗掘と堆積によるものを合計した）を示した。木本（①ハリエンジュ）の高い破壊率を生んだ42.8km断面では低水路河岸侵食，42.4km断面では河岸砂州のフラッシュ（洗掘）。42.0kmでは，中州の形成に伴って生じた分岐流路による樹林地の破壊（流路形成に伴う河床低下）である。一方，草本類で高い破壊率を示した44.2kmのツルヨシ群落（④），43.6kmのヒメムカシヨモギ・オオアレチノギク群落（②）や42.6kmでのヨモギ・メドハギ群落が中州形成に伴う流路形成によって破壊されている（洗掘破壊）。42.2kmでは，ヤナギダデ・オオイヌタデ群落が州のフラッシュ（洗掘）によって破壊され，42.0kmでは，中州形成による河床変動から

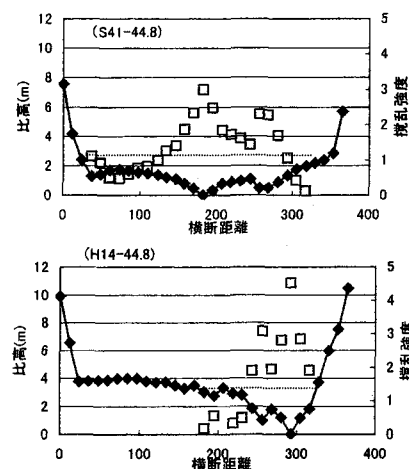


図-5 同一流量時における攪乱強度のちがいを

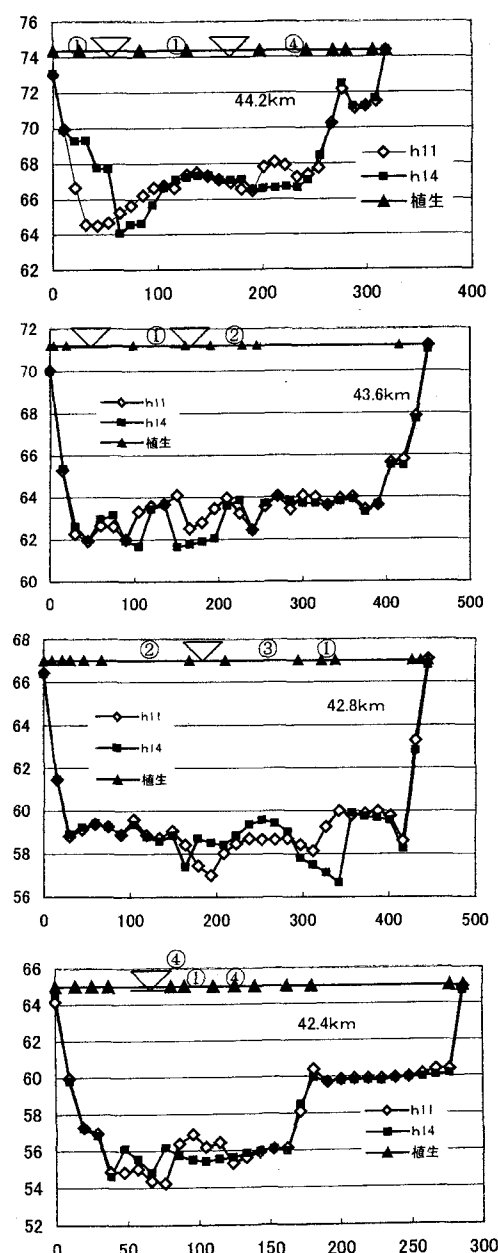


図-6 H11 地形に繁茂する植生と
H13 洪水による地形 (H14) 変化

ヨモギ・メドハギ群落（洗掘破壊）と、ヤナギダデ・オオイヌタデ群落（州の比高拡大に伴う堆積破壊）が破壊されている。41.2kmでもツルヨシ群落の堆積破壊となっている。

以上から、平成13年洪水は木本類の大きな破壊も局所的に見られたが、草本類に対しては河床変化によってかなり広い範囲での破壊を生んだ洪水規模であったことが理解された。すなわち、礫床の河原再生に寄与する規模の洪水であることが認められた。そこで、次に、洪水再現計算から、破壊を生んだ断面での洪水攪乱の規模を推定する。

4. 洪水の再現計算と植生破壊規模の考察

さて、前述した植生域の攪乱を生んだ洪水規模を評価するため、平成13年洪水の再現を以下に示す一般化座標系平面流数値計算から行った^{7),8)}。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。 ε 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。

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

と与える (L は乱れの長さスケールであり、清水ら⁸⁾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(λ)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 : サンプル格子幅)、樹林地の密生度は樹林化区間での現況密生度調査から $\lambda=0.015m^{-1}$ を採用した ($C_0=1.0$; 植生の形状

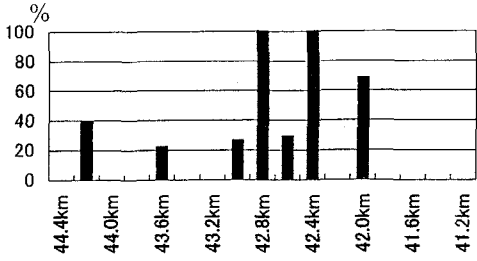


図-7 各横断面における木本類の破壊率

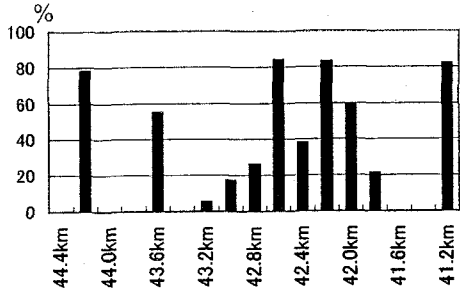


図-8 各横断面における草本類の破壊率

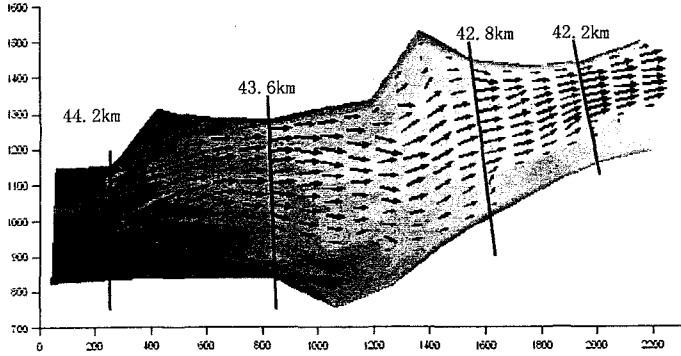


図-9 計算流速ベクトルの平面図（地形コンターも併示）

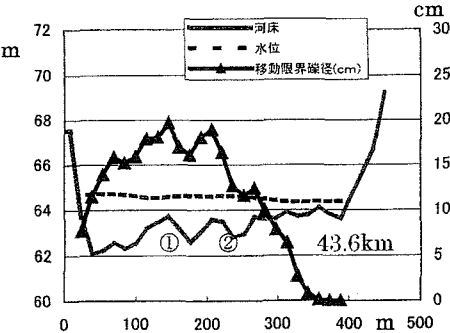
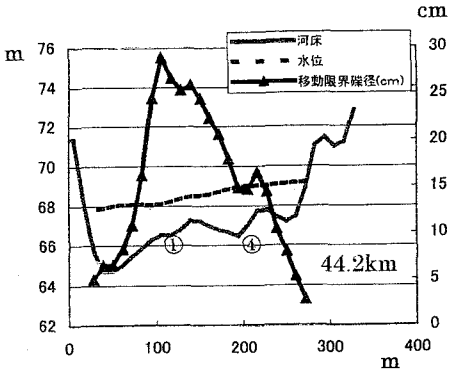


図-10a 横断面における移動限界礫径の分布

抵抗係数)。また、現地のハリエンジュの背丈を考慮し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¹⁰⁾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^ξ, q_B^η) ：流砂量の反変成分である。

植生の破壊は植生が存在する物理基盤の攪乱・破壊として認識すれば、破壊規模は基盤構成材料（河床材料）のどの粒径クラスまでが洪水で動き得るかが、洪水攪乱の規模指標になる。平成13年洪水での対象区間における計算流速ベクトルの平面分布を図-9に示す。また、流速場から求められた摩擦速度を用いて移動限界礫径の横断分布を、植生の破壊が認められた断面について図-10に示した（地形と水位も併示）。図-10において44.2kmでは、ツルヨシ群落の破壊が生じた箇所では12cm-17cm粒径の平均粒径以上のものが移動可能である。また、ハリエンジュの存在する低水路水際には30cm粒径までの礫が動き得たことが分かる。43.6km断面においては、中州にあるハリエンジュ群落で最大20cm程度、ヒメムカシヨモギ・オオアレチノギク群落でも最大16cm程度の礫が移動可能な掃流力が作用した。42.8km断面においても破壊されたヒメムカシヨモギ・オオアレチノギク群落では、最大15cm程度のものが動いている。これらの粒径は、図-11に示す表層の河床材料粒度構成から見ると、15cm程度で表層の80%、20cm程度で90%を超える表層材料が移動可能である状態を示しており、このような洪水攪乱規模を生む礫床では植生の破壊から礫河原が再生されることが分かる。

以上は破壊された植生のみ取り上げたが、洪水後残存した植生の移動限界礫径を求めておくことも必要である。ここでは、図-12に洪水後残存した草本であるシナダレスズメガヤの繁茂域における移動限界礫径を示す。シナダレスズメガヤは砂防緑化等のために導入された外来種で礫床にも定着し、根の張り方が強く地上部の形状抵抗から出水時の細砂捕捉を促進させる（写真1）。そのため、群落周辺には礫床から砂床への変化が生じ、その過度な繁茂によって河原消失が懸念されている⁹⁾。図-12により、移動限界礫径は10cm程度であり、50-60%程度粒径に対応した。この程度の掃流力を受ける基盤では、洪水後周囲に礫河原が形成されてもシナダレスズメガヤはほとんど攪乱されず現存し、周囲に細砂域を形成されていることが最近の洪水痕跡調査においても確認されている。ここまでは、移動限界礫径から植生に及ぼす洪水攪乱を考察したが、物理基盤そのものの攪乱規模評価として、局所的な河床変動の評価が重要となる。植生の破壊を論じた断面の一例として、図-13に44.2km、43.6kmの

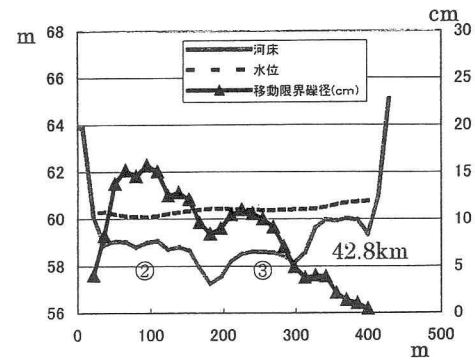


図-10b 横断面における移動限界礫径の分布

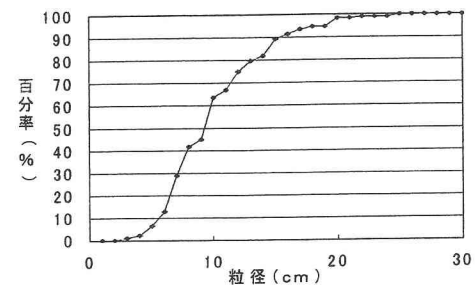


図-11 表層礫床の粒度構成

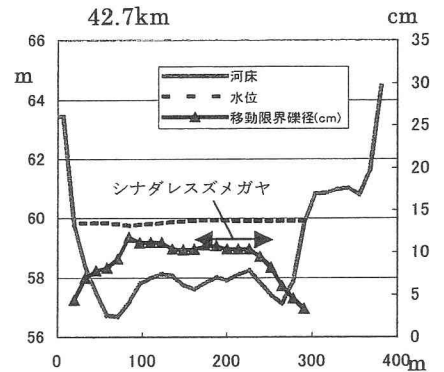


図-12 洪水後に残存したシナダレスズメガヤと移動限界礫径の分布



写真1 シナダレスズメガヤの繁茂状況

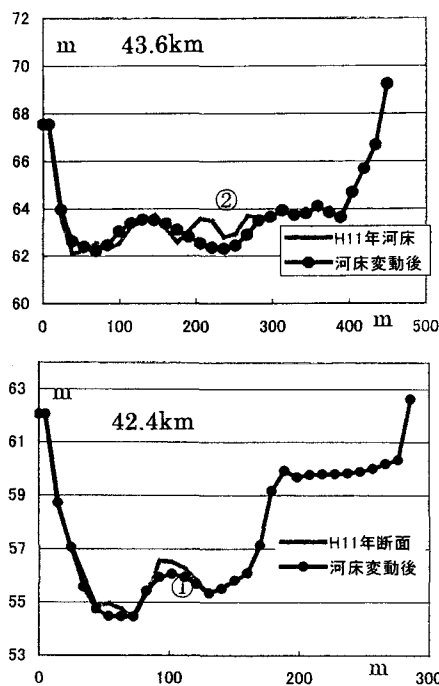


図-13 計算による河床変動の傾向

洪水前 (H11) の地形と、H13洪水後の河床変動解析結果を示す。前述したように43.6kmでの中州化に伴う流路形成 (ヒメムカシヨモギ・オオアレチノギク群落の破壊)、43.6kmでの低水路水際河岸のフラッシュ (ハリエンジュ樹林地の河床低下による破壊) の傾向が抽出されているが、必ずしも再現性は良好ではなく、精度のある河床変動計算と、解析のための条件整備が課題となっている。

5. あとがき

本研究は、河床低下、比高差拡大、低水路固定と言った河道特性をもつ最近の礫床河川において、こうした河道特性の変質が生む最近の洪水による攪乱状況と植生破壊との関係を把握する目的で行った。本研究で対象した区間では最近の洪水規模 (H10, H13洪水) によって図-14に示すよう植生破壊が20%生じ、それが礫河原の形成となっている。

現況河道特性と洪水規模との関係で、河道の動的システムを把握しておくことは、礫床固有の生息環境復元のみならず治水上の問題を把握する上でも重要で、そのためには洪水痕跡調査と照らしあわせ、精度のある洪水攪乱のインパクト評価が今後いっそう必要である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、平成14年度科学研究費 (基盤研究(C) (2)、代表・清水義彦) の助成を受けた。また、現地調査資料について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。

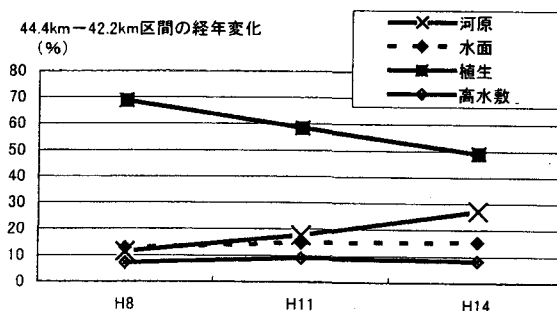


図-14 H10, H13 洪水による植生面積率と河原面積率の変化

参考文献

- 1) 河川生態学術研究会・多摩川研究グループ：多摩川の総合研究，第7章，pp. 133-156, 2000.
- 2) (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.
- 3) 李参熙・藤田光一・塚原隆夫・渡辺敏・山本晃一・望月達也：礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割，水工学論文集，42巻，pp. 433-438, 1998.
- 4) 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
- 5) 島谷幸宏：多摩川永田地区の河道修復，応用生態工学，Vol. 5, No. 2, pp. 233-240, 2003.
- 6) (財) リバーフロント整備センター：平成11年度・河川水辺の国勢調査年鑑，植物調査編，2001. 3.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 村中孝司・鷺谷いづみ：鬼怒川砂礫質河原における外来牧草シナダレスズメガヤの侵入と河原固有植物の急激な減少，保全生態学研究6，pp. 111-122, 2001.
- 10) 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

(2003. 4. 11受付)