

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

MECHANISM AND SIMULATION OF THE DESTRUCTION OF RIPARIAN TREES IN A GRAVEL-BED RIVER BY FLOODS

服部 敦¹・瀬崎智之²・吉田昌樹³

Atsushi HATTORI, Tomoyuki SEZAKI and Masaki YOSHIDA

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室 研究官 (同上)

³正会員 (株)ウエスコ 兵庫支社 技術部 (元 国土交通省 土木研究所 交流研究員) (〒651-0092 兵庫県神戸市中央区生田2-2-2)

Significant destruction of riparian trees (*Robinia pseudo-acacia*) caused by the 1999 flood has been observed in the gravel-bed reach (Nezumi-bashi district) of the Chikuma River. Precise comparison among the collected data, such as the river bed deformation, accumulation of floating vegetation around a trunk and damage conditions of a trunk and roots, resulted in a process and mechanism of destruction (fall-down and wash-away) of riparian trees. A simulation model based on the fall-down process and mechanism was developed and applied to Nezumi-bashi district for examining general characteristics of destruction. Through the calculation, fluvial and geomorphic conditions of causing fall-down to riparian trees was identified.

Key Words : *riparian tree, gravel bar, destruction by floods, simulation, Robinia pseudo-acacia, the Chikuma river*

1. はじめに

礫床河川に特徴的な生物生息場である礫河原が減少していることが近年指摘されている^{1),2),3),4),5)}。その代表的なパターンには、高い繁茂密度の群落(例えば、オギやハリエンジュ)が、ある一時期を境にして礫河原に侵入～拡大し、その後出水時にも群落面積を大きく減じることなく維持するという特徴が見られる。高密度群落が形成されるようになった主原因の一つとして、高流速や河床礫移動の発生頻度の減少といった水理環境の変化が挙げられる^{2),3),4),6)}。例えば礫河原が高水敷化した場合、群落が破壊されにくくなるとともに、植物の生育に適した土壌(表層細粒土層)が礫面上に形成されることで高密度群落の形成～拡大が促進される^{2),3),6)}。このような場合、礫河原が維持できる水理環境(システム)を回復できる河道に修復(例えば、高水敷の掘削)する必要がある。その際の検討課題の一つとして、高密度群落が破壊できる水理環境の回復が挙げられる(もう一つは、高密度群落の形成を促進する要因の除去、例えば表層細粒土層の形成を妨げる水理環境の回復である)。しかし、植生の破壊について現地調査が行われている^{7),8),9)}ものの、上記した課題の検討に直接生かせる知見は少なく、更なる調査・研究が必要である。

礫河原が維持できる水理環境(システム)の回復手法の開発のための第一段階として、本研究では千曲川鼠橋地区において全局的に既往最高水位に近づいた(一部で更新

した)1999年出水によるハリエンジュ群落の破壊状況について、現地調査と倒伏機構解明のためのシミュレーションを行った。現地調査結果に基づいて、倒伏の形態・機構と倒伏～流失に至るプロセスの推定を行った。さらにハリエンジュの引き倒し試験を実施して倒伏耐力の評価式を得たとともに、それとピーク流量時の平面流計算結果を組み合わせ、倒伏発生の判定法を提案した。この方法を用いて、1)流下物の集積が倒伏発生の必要条件であること、2)ピーク流量時の水理量で破壊範囲が概ね決定していることを明らかにした。最後に上記の知見に基づいて、高水敷化した礫河原の水理環境回復に対する高水敷掘削の有効性と治水的課題を提示する。

2. ハリエンジュ群落とその出水による破壊の概況

(1) 調査範囲とハリエンジュ群落の概況

調査対象範囲は、図-1に示す千曲川95.5～98.5km区間(鼠橋地区)であり、河床勾配1/215、河床材料の平均粒径10cm、平均年最大流量1,100m³/sの礫床河道区間である。植生図より得た出水前の裸地、水面、植物群落の占有率(各面積の鼠橋地区全面積に対する割合)を表-1に示す。植物群落の全面積のうち約1/3がハリエンジュ群落であり、他の群落に比較して飛び抜けて大きい。図-1に併記したハリエンジュ群落(出水前)の分布状況に着目すると、中州(比高大)および高水敷ではひとかたまりの大きい群落であるのに対し、中州(比高小)および中水敷で

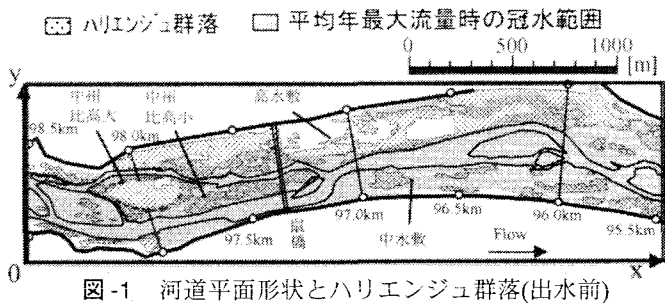


図-1 河道平面形状とハリエングジュ群落(出水前)

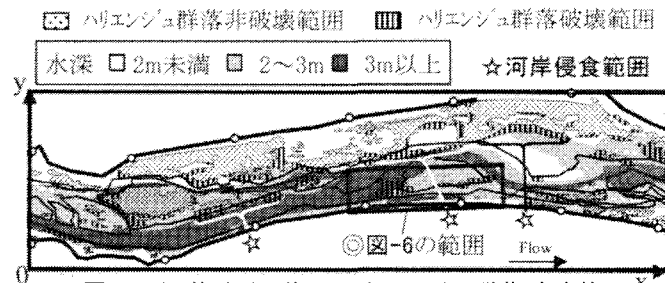


図-2 河道平面形状とハリエングジュ群落(出水後)

表-5 各倒伏形態の調査数と割合

倒伏形態	倒伏角度の大きさ		調査数 (本)	割合 (%)
	B	C		
1	7	10	17	31.5
2	0	1	1	1.8
3	0	3	3	5.6
4	0	26	26	48.1
5	0	7	7	13.0
合計	7	47	54	100.0

は分散した小さなパッチ状群落であるという特徴が見られる。また、平均年最大流量時の冠水域に着目すると、前者は一部冠水する程度であるが、後者は全面冠水する。つまり、ハリエングジュ群落は比高の大きい中州(比高大)や高水敷に集中した(全面積の約90%)分布をしている。

(2) ハリエングジュ群落の破壊状況

出水後の占有率を表-1に併記した。各群落とも破壊によって占有率が減少しており、その代わりに裸地(河原)が増加している。表-1は出水前面積に対する破壊された面積の割合(破壊率)を併記した。ハリエングジュ群落が最小の13%であり、他の群落に比較して約半分以下の値となっている。ハリエングジュ群落は最大の群落でありながら、既往最大規模の出水によってもごく一部分しか破壊されなかったことが分かる。その原因の一つとして、比高の大きい場所に集中して繁茂していることが挙げられる(他の原因については4.(3)参照)。出水後の河道平面形状とハリエングジュ群落の範囲およびピーク流量時の水深分布を図-2に示す。水深2m程度の高水敷と中州(比高大)では平時の水際線に沿った部分が破壊された程度で大部分が破壊されていない。それに対して水深2~3mの中水敷と中州(比高小)では大部分が破壊されている。

3. ハリエングジュの倒伏～流失のプロセス・機構

破壊タイプとして1)幹に作用する流体力によって根茎が破損して、または2)河岸侵食の進行に伴って根茎が洗い出されて倒伏～流失するものが確認された。タイプ1

表-1 自然裸地、水面、植物群落の占有率と破壊率

地被の名称	占有率(%)		破壊率 (%)
	出水前	出水後	
ハリエングジュ群落	22.8	19.8	13.0
カワヤナギ群落	5.3	2.2	57.5
オギ群落	3.4	2.4	28.3
ヨシ群落	4.4	3.5	21.6
上記以外の群落	30.6	10.1	66.8
自然裸地	0.4	22.5	-----
水面	22.6	28.7	-----
利用地など	10.5	10.8	-----
合計	100.0	100.0	-----

表-2 倒伏角度の大きさの分類

記号	A	B	C
倒伏状況			

表-3 倒伏形態の分類

記号	1	2	3	4	5
倒伏状況					
備考	幹が真っ直ぐなまま、根元で傾く	根元近くで幹が曲がる	幹が折れて折れ曲がる	地面上に根元周辺の根茎が露出する	根茎が下流方向に伸びている

表-4 流下物の集積形態の分類

記号	I	II	III	IV	V
集積状況					
備考	草本植物が幹に巻き付き付く	流木が幹に引っかかり、さらに草本植物が巻き付き付く	倒れ合う幹にまたがって流木が引っ掛かった形態II	露出した根茎に草本植物が集積する	樹冠部に草本植物が集積する

は主として比高の小さい場所(タイプ2が生じた図-2の☆印部分を除く)で生じており、破壊後には礫河原となった場所が多い。本章ではタイプ1の倒伏～流失のプロセス・機構について現地調査結果に基づいて推定を試みる。

(1) 現地調査の概要

鼠橋地区では1999年出水後に、また鼠橋地区より上流の2箇所(104kmと107.5km地点の左岸)では1998年出水後(ピーク流量2,170m³/s)にハリエングジュの破壊状況を調査した。調査総数は66本、そのうち46本が鼠橋地区である。調査対象とするハリエングジュの選定においては、各調査地点で見られる典型的な倒伏形態のものとするように配慮した。主要な調査項目は倒伏状態(倒伏の大きさ:表-2、倒伏形態:表-3)、流下物の集積形態(表-4)、集積幅(=[流れ方向の遮蔽面積]/[集積物の最大高さ])である。

(2) 倒伏の形態と機構

a) 倒伏形態(表-2,3 参照)

形態1,4には、根茎露出の有無という差異があるが、根元で幹が曲がらずに根茎が切断または変形(引き抜きも含む)しているという共通した特徴が見られる。形態2,3については、形態1のように倒伏してさらに根元付近で幹が曲がったり割れるという、形態1の亜種と位置づけられるもののみが見られた。形態5は流失する直前の状態であり、(3)において別途検討を加える。各倒伏形態の出現割合を求めた結果を表-5に示す。倒伏形態1,4を合わ

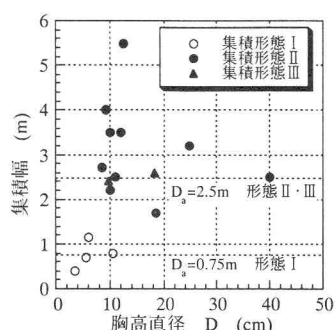


図-3 集積幅と胸高直径の関係

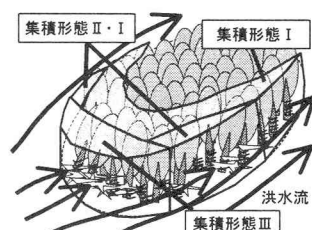
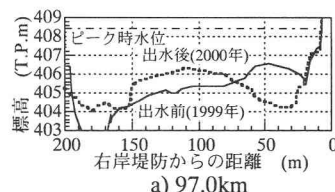


図-5 集積形態 I ~ III と流況



a) 97.0km

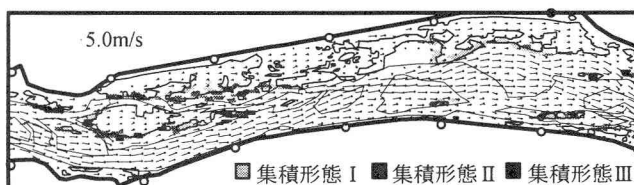


図-4 集積形態 I ~ III の形成場所と流況(出水後)

破壊状況	完全流失	倒伏形態5	倒伏形態1,4	非破壊
破壊範囲				
調査対象樹木		△	○	□

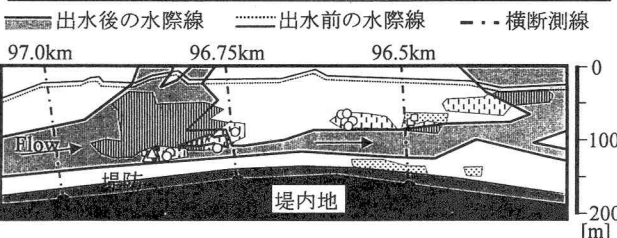
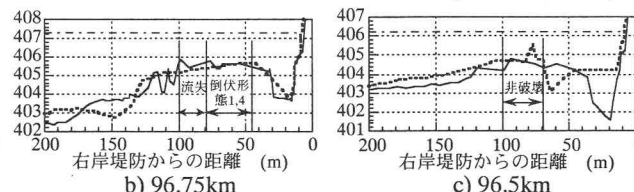


図-6 中水敷での破壊状況とその分布(96.5 ~ 97.5km)



b) 96.75km

c) 96.5km

図-7 出水前後の河道横断形状

せると約80%となり最も多い。以上からハリエンジュは、上流側の根茎に切断または変形が生じて形態1,4で倒伏すると推察される。

b) 集積形態、集積幅および流況との関係

幹に流下物が集積する形態I~III(表-4参照)は、直立したハリエンジュだけでなく、やや傾いたもの(倒伏の大きさB)にも見られた。また、倒伏したハリエンジュでは形態IV,Vが見られた。集積物の主構成材は、ツルヨシのような細長い茎を有する草本植物と流木である。草本植物は、幾層にも重なって幹または流木に強く巻き付いていた。さらに隙間を埋めるように砂・シルトを主構成材とする土砂が詰まっていた(形態Vを除く)。したがって、集積物はほぼ不透過であり、流れの遮蔽面積を大きくして樹木が受ける流体力を増加させると考えられる。

形態I~IIIの集積幅と胸高直径の関係を図-3に示す。なお、形態IIIの集積幅は、[集積物全幅]/[集積物が引っ掛かっている樹木の本数]として求めた。調査数は十分ではないが、集積幅の概略値は形態Iで0.75m、形態II・IIIで2.5m程度と判断される。

斜め空中写真(出水から24日後に撮影)の判読と現地踏査によって明らかにした形態I~IIIの形成場所を図-4に示す。群落外縁に沿って多くの集積物が確認されたが、群落内部にはほとんど見られなかった。図-4に併記した深さ方向平均の流速ベクトル(平面流計算による:詳細は4.(2)参照)に着目すると、流れが群落に進入する範囲に当たる群落外縁に集積する傾向が見られる。より詳細に見ると、図-5に示すように流れが群落外縁にほぼ垂直に進入する範囲では形態III、斜めに進入するまたは外

縁に沿う範囲では形態I,IIで集積する場合が多いという傾向が見られる。

c) 倒伏機構

倒伏形態1,4の発生機構は、出水時に冠水した高さ程度まで幹に流下物が集積し、それに作用する流体力の反力として上流側の根茎に引っ張り力が作用するが、その力に根茎が耐えきれず切断または変形が生じるためと考えられる¹⁰⁾。上記した力の作用状況を模擬できる引き倒し試験(詳細は4.(1)参照)を実施したところ、写真-1,2に示すように形態1,4に相当する倒伏が生じた。

なお、幹の周りが局所洗掘されて根茎が洗い出されて形態4のように倒伏する可能性がある。形態4の倒伏が生じていた場所の近辺で、倒伏の大きさA,Bのハリエンジュ(集積物あり)について調査したところ(全19本)、幹上流側に深さ10~40cm程度の洗掘(2本)、および幹側方に80cm程度の洗掘(2本)が確認できた。しかし、洗掘部には根茎がまったく露出していなかった。以上より局所洗掘が倒伏の主たる原因であるとは考えにくい。

(3) 流失に至るプロセスと機構

倒伏形態5の一例を写真-3に示す。形態4と比較すると根元からより離れた位置まで根茎が露出している。露出した根茎は幹が押し流されるのをくい止めるように、下流方向に延びている。その根茎の先端は、根元から上下流方向に尾根が伸びる微高地(写真-3で水面上に礫が見える部分)に貫入していた。以上より、河床低下に伴って根茎が洗い出されて流失に至る直前の状況が倒伏形態5であると推察される。

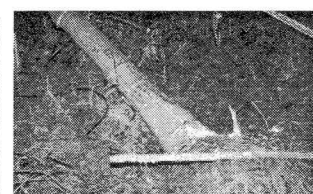


写真-1 引き倒し試験後の倒伏状況(形態1)



写真-2 引き倒し試験後の倒伏状況(形態4)

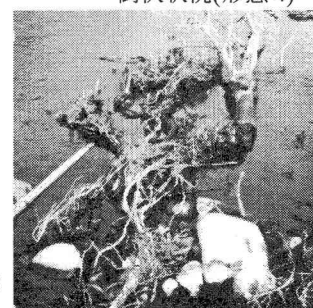


写真-3 出水後の倒伏状況(形態5)

上記についてさらに検討を加えるために、図-2で◎印を付けた地点に着目する。この地点の出水前後の群落範囲と調査対象としたハリエンジュの位置、それらの破壊状況と倒伏形態を図-6に示す。この地点では根茎ごと完全流失、倒伏形態5、倒伏形態1,4、非破壊の順に流れ方向に分布していることが分かる。完全流失、形態1,4、非倒伏の地点周辺を横切る96.5,96.75,97.0km測線の河道横断形状を図-7に示す。完全流失した地点周辺(97.0km)では約2mに達する河床低下が生じているが、非倒伏の地点(96.5km)では河床が上昇している。また、形態1,4と隣接する完全流失した地点(96.75km)では約0.5m低下している。形態5が96.75kmと97.0km測線の間位置していることを考慮すると、0.5～2.0m程度河床低下する範囲では形態5の倒伏または完全流失が生じると推察される。ハリエンジュの幹近傍を掘削して根茎を観察したところ、直径1cm以上の根茎の大部分が地表から深さ0.3～0.5m(表層細粒土層)までに留まり、その下の礫層または礫と砂の互層には主に直径5mm程度の細い根茎が深さ1m程度まで伸長していることが分かった。上記の河床低下量は根茎が伸長している深さと概ね一致する。

以上から流失のプロセスとして、河床低下の進行に伴って形態1,4から形態5に達した後、1)さらに河床低下が進行して根茎先端まで完全に洗い出されて、または2)礫の衝突や引っ張り力の作用によって根茎の切断または引き抜きが生じて流失に至ると推定される。

(4) ハリエンジュの倒伏～流失プロセス

幹に作用する流体力によって根茎が破損して倒伏～流失に至るプロセスは、以下のように推定できる。

- ①群落外縁に位置するハリエンジュに流下物が形態Ⅰ～Ⅲ(表-4参照)で集積する。
- ②集積物と幹に作用する流体力によって、根茎が切断または変形して倒伏する(形態1,4:表-2参照)。倒伏後に幹への集積物が流失する、またはその一部が樹冠下端に引っ掛かるようにして幹に留まる。
- ③流下物が根茎や樹冠に集積する(形態Ⅳ,Ⅴ:表-4参照)。また、幹や枝の樹皮の剥離や枝の切断が生じる。河床が低下する場所では根茎が露出する。
- ④河床低下がさらに進む場合、根茎がさらに洗い出されて幹が下流方向に押し流される。そのため、根茎は下流方向に引き延ばされた状態となる(形態5:表-2参照)。そして根茎の切断または引き抜きが生じると流失する。

以上、①～④(または③)を繰り返して群落外縁から破壊が進行していく。なお、集積物なしでも流速・水深が大きい河道区間であれば倒伏する場合もあると思われる。

4. 倒伏機構の解明のためのシミュレーション

3.(4)に提示した破壊プロセスの特徴として、1)流下物の集積が倒伏発生の必要条件であること、2)倒伏した場所が河床低下(0.5～2.0m程度)すると根茎ごと流失して裸地化することが挙げられる。本章では1)に関する以下の課題について検討を加える。

①流下物が集積しないと倒伏しないか？

現地調査のみから推定した特徴1の妥当性とそれから導かれる破壊されやすい群落の条件を明らかにする。

②ピーク流量によって破壊発生範囲が決まるか？

流下物がゆっくり集積するという想定に基づく、ピーク流量時には集積幅が不十分で倒伏しなかった樹木が、その後の集積幅の増加によって倒伏する場合が考えられる。その逆に速やかに集積するという想定では、ピーク流量時の水理量で倒伏範囲が概ね決まると考えられる。実現象はどちらに近かったのか明らかにする。

上記について検討するにあたっては、ピーク流量時の平面流計算の結果と引き倒し試験を実施して得た倒伏耐力の評価法を組み合わせることで倒伏発生予測を行って、その結果を実際の破壊状況と比較することを糸口とした。

(1) ハリエンジュの倒伏限界モーメント(引き倒し試験)

a) 試験の概要

鼠橋地区において既往の試験法^{9,10)}に改良を加えた引き倒し試験を実施した。アンカーとして引っ張り方向の調節が容易なバックホウを、また引っ張り力と倒伏角度の測定をより正確かつ簡易にするためにロードセルと光波測距儀を用いたことが主な改良点である。表層細粒土層の厚さ、胸高直径が異なるハリエンジュを試験対象とした。表層細粒土層の厚さは、根元から約1.5m離れた4箇所検土杖により測定し、それらの平均値として求めた。

b) 倒伏限界モーメントの評価法

ハリエンジュを引き倒していくと、根元に作用するモーメントが最大値 M_c を示した(以下、 M_c を倒伏限界モーメントと呼ぶ)。 M_c と胸高直径 D の関係を図-8に示す。同図にはハリエンジュに対する既往の試験結果⁹⁾(土壌は砂質～砂礫質)も併記した。 M_c と D^2 に比例関係が認められる⁹⁾ので、その関係を式(1)で近似する。

$$M_c = 0.0674 \cdot D^2 \quad (1)$$

ここで、 M_c (KN・m)、 D (cm)である。 M_c と表層細粒土層の厚さの関係を図-9に示す。表層細粒土層の厚さは10～30cmの範囲に主に分布しているが、胸高直径のような明確な相関が見いだせない。さらに今回の試験結果が既往の試験結果とも河川(信濃川、吉田川など)が異なるにも係わらずほぼ一致したことも考慮すると、表層細粒土層の厚さなどの影響を無視した式(1)によって M_c を評価することが第一近似として妥当と判断される。

(2) 平面流計算を用いた倒伏発生の判定法

a) 平面流計算の概要

95～99kmを計算対象区間として、図-1に示したx,y軸方向に6m×3mの矩形メッシュを設定して、浅水流方程式の解をleap-frog法によって求めた。計算に用いた河道地形は、出水前後とも250mピッチの河道横断測量と空中写真測量の結果に基づいて設定した。また、植物群落の分布は、出水前後に作成した植生図に基づいて設定した。境界条件として下流端では痕跡水位、上流端では1999年出水のピーク流量3,600m³/sを与えた。

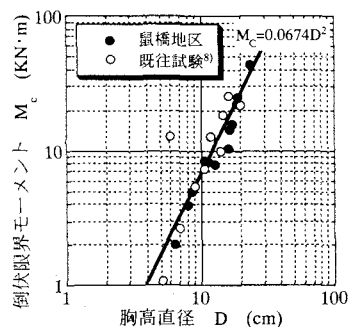


図-8 倒伏限界モーメントと胸高直径の関係

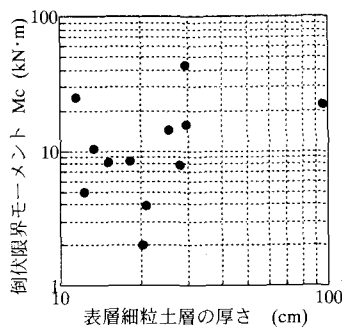


図-9 倒伏限界モーメントと表層細粒土層の厚さの関係

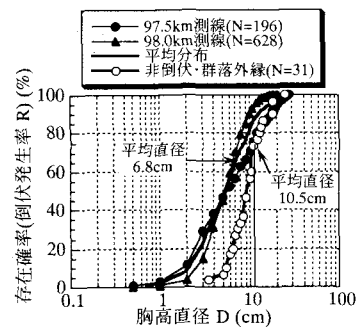


図-10 胸高直径の存在確率(破壊発生率R)

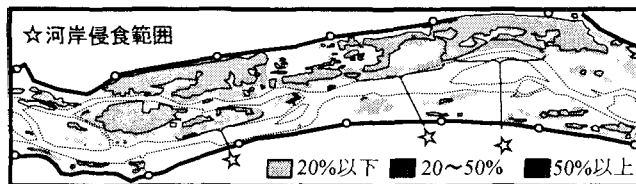


図-11 破壊発生率Rの計算結果(出水前, 集積なし)

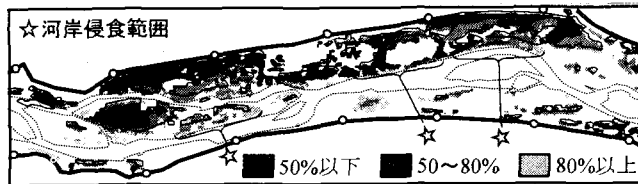


図-12 破壊発生率Rの計算結果(出水前, 形態I)

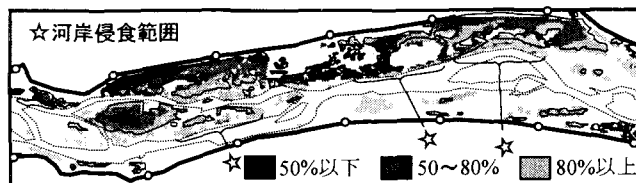


図-13 破壊発生率Rの計算結果(出水前, 形態II・III)

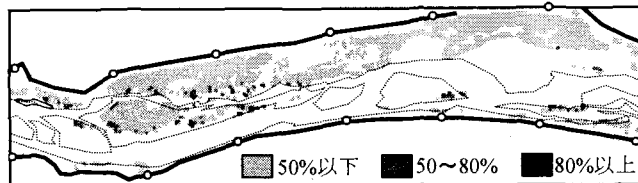


図-14 破壊発生率Rの計算結果(出水後, 実際の集積状況)

礫面および植物群落(ハリエンジュ群落を除く)のマニングの粗度係数は、実河道の粗度推定に頻用されている方法¹⁰⁾に準じて設定した。ハリエンジュ群落では、透過係数 $K(=V/i^{0.5})$ (V は流速, i はエネルギー勾配)を以下のように与えた。幹の長さ(地表面から樹冠部下端までの距離)は幼木(樹齢5年未満)を除くと2~4mであり、ピーク流量時のハリエンジュ群落の冠水深約3m(図-2 参照)とほぼ同程度であることより、流体力が主に幹のみに作用すると仮定する。この場合、胸高直径と単位面積あたりの繁茂本数の測定結果から K を求めることができる¹⁰⁾。以上より中州(比高大)では $K=32(\text{m/s})$ 、それ以外の場所では $47(\text{m/s})$ の一定値として与えた。

なお、上記のような計算によって求めた水位が痕跡水位と良好に一致することを確認している。

b) ハリエンジュの倒伏判定法

洪水流を受けたハリエンジュの根元に作用するモーメント M_h が、倒伏限界モーメント M_c 以上になった場合に倒伏する⁹⁾。幹のみに流体力が作用すると仮定すると、 M_h は倒伏角度によらず式(2)によって求められる。

$$M_h = 0.25 \rho \cdot C_D \cdot D_a \cdot (u \cdot h)^2 \quad (2)$$

ここで、 ρ は水の密度、 $C_D(=1.0)$ は抗力係数、 u, h は平面流計算から求めた流速(深さ方向平均)と水深、 D_a は流れの遮蔽幅である。 D_a は集積物なしの場合には胸高直径 D 、ありでは図-3に示した集積幅(概略値)とする。

式(1),(2)から、倒伏するハリエンジュの最大胸高直径 D_c が求められる。あるメッシュに着目するとその場の群落を構成するハリエンジュのうち、 $D < D_c$ であるものが倒伏すると判断できる。そこで、各メッシュでの胸高直

径の確率密度分布を与え、 $D < D_c$ となるハリエンジュが存在する確率、すなわち倒伏発生率 R を求めることとした。高水敷と中州上で横断測線に沿った幅10mの範囲において胸高直径 D を測定した結果から求めた存在確率(倒伏発生率 R)を図-10に示す。測線ごとに多少異なるが、 R の評価に当たっては全測線の平均分布を用いることとした。

群落外縁から破壊が進行していく過程で R がある値以下になると、群落外縁に倒伏しないで残った胸高直径の大きなハリエンジュ群が、破壊の進行をくい止めると考えられる。3.に示した現地調査時に測定した完全に倒伏しなかった(倒伏の大きさ A, B)ハリエンジュの胸高直径 D の確率分布を図-10に併記した。 R の評価に用いる平均分布(すなわち群落内部)に比較して、群落外縁に残ったもののほうが D が大きい。その平均直径は約10.5cmであり、 $R=80\%$ の胸高直径 D_{80} とほぼ一致する。以上の考察に基づいて、 $R > 80\%$ では「倒伏する」と判断する。

(3) 倒伏発生の判定結果に基づく課題①、②の検討結果

a) 課題①の検討結果

出水前の地形・群落分布のもとで、ハリエンジュ群落の全域において集積なし($D_a=D$)、形態I($D_a=0.75\text{m}$)と形態II・III($D_a=2.5\text{m}$)の集積ありとして倒伏発生率 R を求めた結果を図-11~13に示す。同図に実線で示した出水後の群落範囲の外にある部分(すなわち実際に破壊された部分:ただし、河岸侵食に起因する破壊を受けた部分[図中に☆印を付した]を除く)に着目すると、集積なしの場合では $R < 20\%$ となった。それに対して集積ありでは、 $R > 80\%$ となる場所がみられ、倒伏すると判断される。以

上の結果は、ハリエンジュに流下物が集積した後に倒伏するという推定に妥当性を与えるものである。

図-12,13に再度着目すると、実際には破壊されなかった実線内部まで $R>80\%$ となっている。この原因は実際には集積なしであった群落内部(図-4参照)も、集積ありとする計算条件としたためである。これらの結果の見方を変えれば、群落内部にも集積した場合には、倒伏範囲が大きくなることを示唆している。つまり集積形態と流向の関係(図-5参照)を考慮すると、同じ面積の群落であってもひとまとまりの群落より、分散したパッチ状群落の方が、集積が生じる範囲が大きいので、破壊されやすいと考えられる。このことは、高水敷と中州(比高大)に形成されているひとかたまりの大きな群落がほとんど破壊されなかったもう一つの原因(一つめは冠水深が小さいこと:2.(2)参照)であると考えられる。

b) 課題②の検討結果

出水後の地形・群落分布のもとで、図-4に示した実際の集積状況を与えて倒伏発生率 R を求めた結果を図-14に示す。集積が生じた群落外縁に着目すると、パッチ状の小群落を除けば、 $R<80\%$ (倒伏しない)部分が多い。また、集積形態と流向の関係(図-5参照)を参考にして出水前の群落に対する、すなわち群落が破壊される初期段階における集積状況を推定すると、図-4に示した出水後の集積状況とほぼ同一になると推察される。そのような場所では $R>80\%$ となっており(図-12,13参照)、初期段階で倒伏が発生すると判断される。以上の結果はピーク流量時の水量で倒伏範囲が「決まる」ことを示唆する結果となった。しかし、出水中の地形変化を考慮していないことを踏まえると、「概ね決まっている可能性が高い」ことを示唆する結果と捉えるべきである。

5. おわりに

本研究で得た知見より、ハリエンジュ群落が出水時に破壊される水理環境を有する場の条件として、1)平水位からの比高が小さいこと、2)ひとかたまりの大きな(特に流下方向に長く伸びる)群落の形成を妨げられること、3)群落の形成に適した平水位より高い場所では"一時的な河床低下"が生じること(図-7参照)が挙げられる。ここで用いた"一時的な河床低下"とは、礫河原が高水敷化する原因となる河床高の一方向的かつ継続的な低下を意味するのではなく、長い時間スケールでみた場合に河床高がある一定の高さを保つまたは上昇するが、短い時間スケールでは上昇と低下を交互に繰り返している過程の中での一時的な河床低下を意味する。これらの条件を全て満たす場として砂礫堆が思い浮かぶ。隣り合う砂礫堆の陸地部は流れ(瀬や淵)で遮られているので、高水敷上のようなひとかたまりの群落形成が不可能である。また、出水時に砂礫堆が移動すると、ハリエンジュ群落が形成される砂礫堆の頂部付近では"一時的な河床低下"が生じる。つまり出水時に移動・変形する砂礫堆には、群落破壊の観点から礫河原が維持できる水理環境(システム)が備わっていると言える。以上より、高水敷化した礫

河原の水理環境回復の手段として、高水敷を掘削して砂礫堆を再形成させることが抜本的対策になることが分かる。しかし、高水敷には、砂礫堆が形成する深掘れや水衝部が堤防に及ぶのを防止する「緩衝帯」としての治水機能がある。治水安全性の確保のためには、ある程度の高水敷幅を確保する必要がある場合が考えられる。その必要性の判定と必要最小幅の設定技術を確立し、安全性を確保しつつ礫河原が回復できる適正な高水敷幅を見いだすのが、今後の重要課題の一つと思われる。

謝辞:国土交通省北陸地方整備局千曲川工事事務所には空中写真、河道横断測量、流量データなどの提供および引き倒し試験の実施に便宜を図っていただいた。また、河川研究室の二村貴幸氏、当時交流研究員であった近藤和仁氏、徳田 真氏には現地調査およびデータ整理の援助を受けた。さらに、当時河川研究室長であった中部地方整備局三重工事事務所長の藤田光一氏と水理環境(システム)に関して繰り返しディスカッションを行ったことで、本研究を行う上で必要な知識を蓄えることができた。ここに記して、深甚の謝意を表します。なお本研究は、河川生態学術研究会千曲川グループの調査研究の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 萱場祐一・島谷幸宏:扇状地河川における地被状態の長期変化とその要因に関する基礎的研究,河道の水理と河川環境シンポジウム論文集,土木学会水理委員会基礎水理部会・建設省土木研究所,pp.191-196,1995.
- 2) 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,第42巻,pp.433-438,1998.
- 3) 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,第43巻,pp.971-976,1999.
- 4) 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,第45巻,pp.1105-1110,2001.
- 5) 皆川朋子・島谷幸宏:多摩川永田地区及び千曲川鼠橋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.
- 6) 李 参熙・藤田光一・山本晃一:礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ-多摩川上流部を対象にした事例分析より-,水工学論文集,第43巻,pp.977-982,1999.
- 7) 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,30-7,pp.349-354,1988.
- 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,(株)山海堂,初版,pp.154-171,1999.
- 9) 瀬崎智之・服部 敦・近藤和仁・徳田 真・藤田光一・吉田昌樹:礫州上草本植生の流失機構に関する現地調査と考察,水工学論文集,第44巻,pp.825-830,2000.
- 10) 野々村稔郎・林 拙郎・川邊 洋・本多 潔・小藪一志:樹幹引き倒しによる根返りの発生機構,日林誌,78(4),pp.390-397,1996.
- 11) (財)国土開発技術研究センター編:護岸の力学設計法,(株)山海堂,初版,pp.37-40,1999.
- 12) 福岡捷二・藤田光一:洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響,土木研究所報告,第180号-3,pp.135-141,1990.

(2001. 4. 16 受付)