

砂礫州上樹木の破壊形態の相違を考慮した 樹林化判定手法に関する研究

METHOD FOR CLASSIFYING THE POSSIBILITY OF FORESTATION IN A RIVER CONSIDERING
THE DIFFERENCE OF BREAKING PATTERN OF TREES ON A GRAVEL-BED BAR

八木澤順治¹・田中規夫²・福岡捷二³

Junji YAGISAWA, Norio TANAKA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 Ph.D 埼玉大学大学院助教 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³フェロー会員 Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

For evaluating the difference of tree breaking phenomena due to floods, i.e. trunk breakage or overturning, and wash-out of trees, Breakage or Overturning Index (BOI) and Wash-Out Index (WOI) were derived respectively in this study. Based on these indices, the method for classifying the dynamics of forestation in rivers was proposed. This method was applied to the middle stream reach of the Arakawa River. The situation of 'breaking' or 'washing out' on a gravel-bed bar after 2007 flood can be evaluated by using BOI and WOI. In addition, in three locations where relative height from ordinary water level is different, the relationships between flood return period and breaking mode of trees due to floods were demonstrated. At the location where relative height is the smallest, possibility of forestation should be low because wash-out of trees occurs by 5 to 10 years return period of floods. In contrast, possibility of forestation should be high at the location where relative height is the biggest, because wash-out of trees doesn't occur by 40 years return period of floods. This method is available to judge the area where artificial management of trees is required.

Key Words : *threshold moment and shear stress for tree-breaking, Salix subfragilis, Robinia pseudoacacia, artificial management, vegetation dynamics*

1. はじめに

2007年9月の台風9号による洪水は、関東地方では近年稀にみる大洪水であり、荒川扇状地区間の砂礫州上の樹木の破壊が顕著に生じた。樹木の流木化は下流河川における構造物の破損、河川管理施設周辺への堆積によるゲートの閉塞等を引き起こし、治水上悪影響を及ぼす可能性がある。一方、河川環境保全の観点からも、樹林化防止対策としての高水敷の切り下げ、あるいは洪水による砂礫の移動・堆積の誘発による礫河原の維持・再生を目的とした砂礫州の掘削が行なわれている¹⁾。それらの樹林化抑制効果を適切に把握するためには、対策に対するレスポンスを含めた樹林化予測手法の開発が必要である²⁾。

樹林化を予測する上で、洪水による樹木の破壊形態を分類し、それぞれの破壊形態に対する破壊限界を把握する必要がある³⁾。そのような観点から、筆者らは2007年9月の台風9号による洪水後、多摩川、荒川における複数砂礫州の調査から、樹木の破壊形態として、幹の破断・倒伏、根鉢の転倒といったその場に留まる破壊形態と、

流失といったその場から無くなる破壊形態が支配的であることを把握した。さらに、破断・倒伏は抗力モーメントで評価可能であり³⁾、流失は底面せん断力等、河床の移動を表すパラメータで評価できること⁴⁾を明らかにした。

様々な破壊形態が報告されているにもかかわらず、既往研究における樹林化予測手法の多くは、洪水による植物の流失による裸地化のみで評価されている場合が多い^{2,5,6)}。しかし、清水ら⁷⁾、田中ら⁸⁾が報告しているように、洪水によって破断・倒伏された樹木(既往研究⁷⁾, ⁸⁾の対象樹種はハリエンジュとタチヤナギ)は、破壊されながらも再生することで、破壊前に比べて繁茂域や繁茂密度を拡大させ、治水的に負の効果となる場合もある。そのため、河道内植生分布の将来動向に影響を与える破壊形態も含めて樹林化の可能性を評価する必要がある。

そこで、本研究では破断・倒伏、流失という異なる破壊形態を評価するための指標を導出するとともに、新たな樹林化評価手法の提案を行なう。さらに、それらを用いて荒川中流域における砂礫州の樹林化の可能性を評価することを目的とする。

2. 研究方法

(1) 平面流況解析方法および条件

本研究では、計算対象である2007年9月洪水時の流況を再現するため、細田ら⁹⁾による一般化座標系を用いた平面流況計算法に、Takemura and Tanaka¹⁰⁾と同様に抗力項を加えた微分方程式を用いた。詳細は田中ら⁴⁾を参照されたい。計算対象河川は、荒川の扇状地区間に位置する距離標76kmから82kmの区間である(図-1(a))。境界条件は2007年9月に生じた台風9号(6日16時から7日2時までの10時間)のデータを与え、上流端には植松橋水位・流量観測所(距離標86km)の実測流量、下流端には熊谷水位観測所(距離標76km)の実測水位を与えた。ここで実際に流況解析を行なう際には、上流端を距離標82km地点と設定した。その理由として、①距離標84km地点に落差の大きい箇所があり計算が不安定になること、②植松橋水位・流量観測所と今回上流端に設定した82km地点との間に支川がないことから、距離標82km地点に植松橋水位・流量観測所の実測流量データを用いても差し支えないと判断したためである。また、解析対象砂州の標高は、横断方向に約8m、流下方向に約50mのグリッドを作成し、2007年9月の洪水前に得られた地表面の標高データ(航空測量成果)を各グリッド内において平均化することによって設定した。また、河床材料に関しては、砂礫州上の30地点で表層の粒度分布を把握(細砂が薄く堆積している場合は細砂を除去)し、各グリッドに設定した。植生に関しては、対象洪水(2007年9月)前に、国土交通省荒川上流河川事務所が行なった毎木調査の結果を用いた。対象樹木として、タチヤナギ・ハリエンジュの2種を対象とした。各計算グリッドの範囲内にある樹木の本数より密度を定め、樹高、胸高直径に関しては平均的な値を算出し洪水解析モデルに反映させた。

(2) 抗力モーメント、無次元限界掃流力の算出

2007年9月洪水時に、解析対象である熊谷大橋上流の砂礫州上の樹木に作用した抗力モーメント M は田中・佐々木¹¹⁾と同様の方法で、樹木の投影面積、葉による付加的な抗力係数の鉛直分布(それぞれ $\alpha(z)$, $\beta(z)$)を考慮して、式(1)より算出した。

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

ここに、 ρ は流体の密度(kg/m^3)、 C_{d-ref} は主幹を円柱と仮定した場合の抗力係数(本研究では1とした)、 d_{BH} は河床からの高さ1.2mにおける主幹幅(m)、 z は河床からの鉛直方向高さ(m)、 h は水深(m)、 u , v はそれぞれ流下方向、横断方向の水深平均流速(m/s)である。式(1)は沈水状態の式であり、抽水状態では $h=h_v$ (h_v は樹木高さ(m))とした。一方、樹木の流失を繁茂場所の河床材料の移動によって表現可能であることから⁴⁾、樹木繁茂地点の河床材料の無次

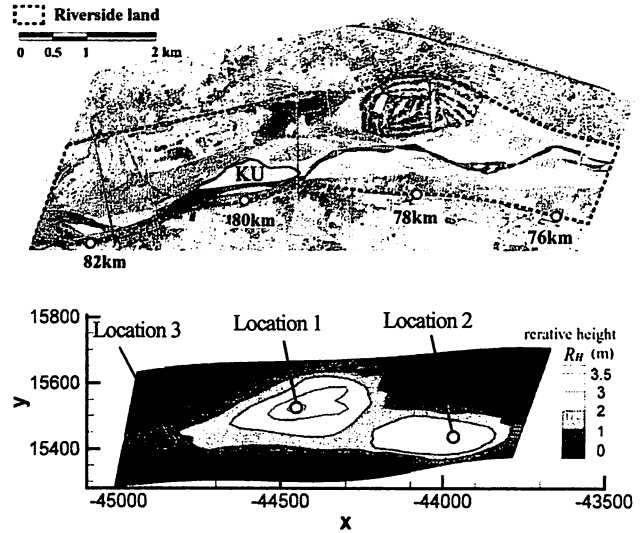


図-1 解析対象区間概要

(a) 解析対象区間全景(航空写真: 2005年撮影, KUは樹林化判定の対象とした砂礫州), (b) KUの平水位からの比高差コンタ一図(平水位は1975年から2007年の平均値を用いた)

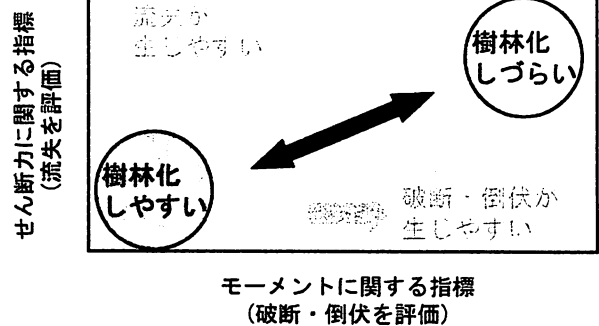


図-2 本研究における樹林化可能性を表す模式図

元掃流力および無次元限界掃流力を算出した。本研究では、アーミング現象を含めた、橋脚周辺の局所洗掘深が d_{84} や d_{50} に密接に関係しており¹²⁾、樹木周辺で見られる局所洗掘現象も同様のメカニズムで生じると考えられることから、50%粒径(d_{50})と84%粒径(d_{84})を流失評価に用いた。 d_{50} , d_{84} に対するそれぞれの無次元限界掃流力 τ_{*50} , τ_{*84} を式(2)より算出した。また、50%粒径の無次元限界掃流力 τ_{*50} を0.06とし、 τ_{*84} を式(3)¹³⁾より算出した。

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

$$\frac{\tau_{*c84}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_{84}/d_{50})} \right]^2 \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} \right) \quad (3)$$

ここに、 d_i は繁茂地点における i %粒径(m)、 S :土粒子の水中比重、 H_{max} は最大水深、 I_e はエネルギー勾配、である。

(3) 樹林化評価指標の導出

砂礫州上の長期的な繁茂状況の把握には、従来のよう

に流失の可否の議論のみならず、破壊形態を考慮する必要がある⁹⁾。そこで、図-2に示すように、1) 樹木の破断・倒伏を判定する抗力モーメントに関する指標と、2) 流失を判定するせん断力に関する指標を用い、ある場に繁茂した樹木の破壊・流失の可否を同時に判断することで樹林化判定が可能であると考えた。図-3に本研究で提案する樹林化判定図を示す。破断・倒伏を評価する指標(BOI; Breakage or Overturning Index)として T_2/T_1 を、流失を評価する指標(WOI: Wash-Out Index)として τ_{*84}/τ_{*c84} を用いた。ここに、 T_1 はある時点における樹木の樹齢(Year)、 T_2 はある洪水で樹木に作用するモーメントによって破壊できる最大の樹齢(Year)であり、破壊最大樹齢と定義する。一方、 τ_{*84}/τ_{*c84} は、樹木生育基盤の84%粒径(d_{84})の無次元掃流力(τ_{*84})と無次元限界掃流力(τ_{*c84})の比である。

上記を踏まえると、図-3のRegion A~Dの各領域は表-1に示すように定義できる。Region Aは樹林化が進行する可能性の高い場であり管理上は注意が必要である。Region Bは樹木が破断・倒伏するものの再生長するため裸地には戻らない状況であり、場合によっては再生長によって樹林化が進行するため管理が必要である。Region C、Dは樹林化が進行しづらく、管理の必要は少ないと考えられる。Region Cのように、流失は生じるが破断・倒伏は生じない状況とは、Tanaka and Yagisawa⁹⁾が報告しているように、細粒層に根を張った場合に起こりうる状況と考えられる。以下に、BOIおよびWOIの算定方法を示す。

a) 破断・倒伏評価指標 BOI(Breakage or Overturning Index)(T_2/T_1)の算定

破壊最大樹齢 T_2 の算定方法を図-4に示す。なお、ここでは例として、胸高直径 $d_{BH}=2$ cmの樹木が500Nmの抗力モーメントを受けた場合を示す。図-4(a)には破断限界線(図中の赤線)、倒伏限界線(図中の黒線)を示している。まず、数値計算から得られた抗力モーメント M の値より、生じる破壊形態を判断し、破断限界式あるいは倒伏限界式より、あるモーメントで破壊可能な胸高直径 $d_{BH,max}$ を算定する。得られた $d_{BH,max}$ を用いて胸高直径 d_{BH} と樹齢の関係(図-4(b))より、破壊最大樹齢 T_2 を算定する。

b) 流失評価指標 WOI(Wash-Out Index)(τ_{*84}/τ_{*c84})の算出

WOIは、対象砂礫州の d_{50} , d_{84} より式(2)、式(3)を用いて、84%粒径の無次元掃流力 τ_{*84} および無次元限界掃流力 τ_{*c84} をもとに算定した。

(4) 対象砂礫州の樹林化可能性の検討

(3)で示した樹林化判定指標 BOI, WOIを用いて、対象砂礫州の樹林化可能性の検討を行なう。同一の砂礫州内においても場所によって平水位からの比高差が異なる。そのため、どの程度の洪水規模でRegion CやRegion Dといった樹林化進行の可能性が低い領域となるかを把握することは樹木管理上重要である。そこで、図-1(b)に示すように、平水位からの比高差 R_H の異なる3地点(Location

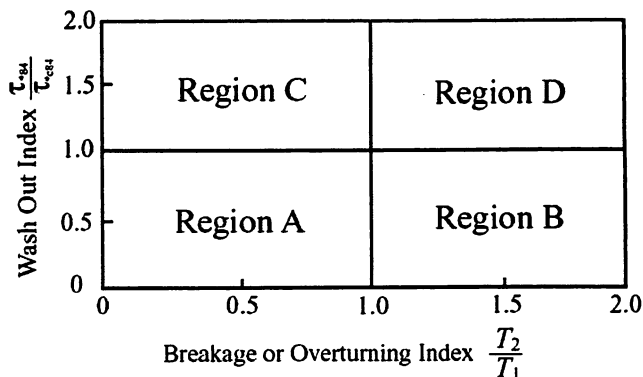


図-3 本研究で提案する樹林化判定図

T_1 , T_2 はそれぞれ、ある時点における樹木の樹齢(Year)、破断最大樹齢(Year)、Region A~Dの定義は表-1を参照

表-1 樹林化判定図の各領域の定義

BOI は破断判定指標($=T_2/T_1$)、WOI は流失評価指標($=\tau_{*84}/\tau_{*c84}$)を示す

Region	BOI	WOI	Definition
A	< 1	< 1	破断・倒伏も生じない領域
B	≥ 1	< 1	破断・倒伏は生じるが、流失は生じない領域
C	< 1	≥ 1	流失は生じるが破断・倒伏は生じない領域
D	≥ 1	≥ 1	破断・倒伏も流失も生じる領域

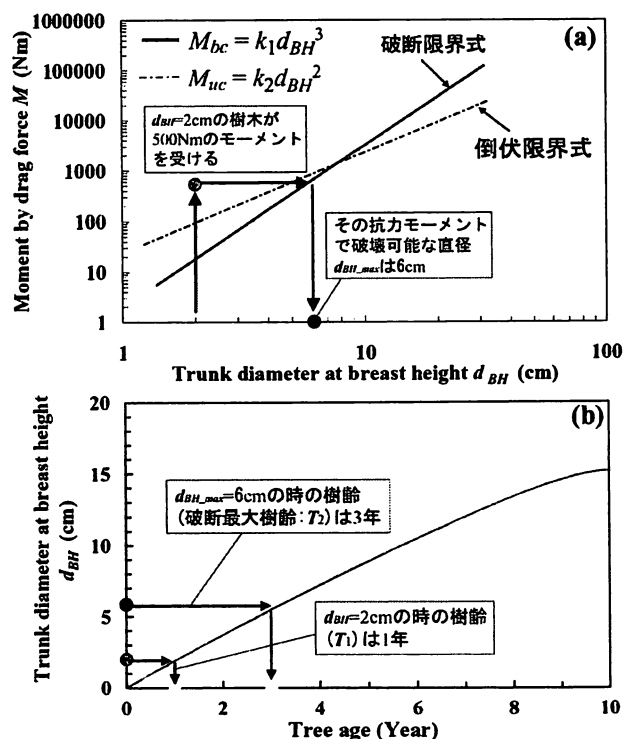


図-4 樹木の樹齢 T_1 と破壊最大樹齢 T_2 の算出方法

- (a) ある洪水で破壊可能な胸高直径 $d_{BH,max}$ の把握
- (b) 洪水攪乱時の樹齢 T_1 と破壊最大樹齢 T_2 の把握

1; 比高差が最も大きい地点, Location 3; 比高差が最も小さい地点, Location 2; 比高差が Location 1, 3 の間)を選定した. 選定した3地点において, 洪水確率年の変化に応じたBOI,WOIの変化を把握するとともに, 図-3の樹林化判定図においてどのRegionに該当するかを把握した. 解析対象とした洪水確率年は3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40年とした. 各洪水確率年に対する流量は, 寄居水位・流量観測所(距離標94km)における1950~2000年までの年最大流量データからワイブル法¹⁴⁾を用いて定めた.

4. 解析結果

(1) 2007年9月洪水の計算結果と痕跡水位の比較

図-5に痕跡水位と計算水位の比較を示す. 痕跡水位は国土交通省荒川上流河川事務所が洪水後の流下物の分布状況をもとに右岸, 左岸200m間隔で計測した結果を示している. 一方, 解析水位は解析時間内における各グリッドでの最大の水位とした. 同図に示すように, 解析水位は痕跡水位を概ね満足している. また, 植生抵抗の有無が解析水位に与える影響を検討したところ, 植生抵抗を考慮した場合, 考慮しない場合に比べ, 対象砂礫州(ARおよびKU)の上流側において若干の水位上昇(最大で15cm程度)がみられた. 今回の洪水では, 解析区間内において樹木繁茂量の多い高水敷にほとんど流れが乗り上げていない. そのため, 植生抵抗の有無がそれほど水位に影響を与えなかったと考えられる. また, AR区間では, 植生抵抗を考慮しない方が, 痕跡水位に近い値を示した. 今回の解析では河床変動(本事例では主に低下)を考慮していないため, 解析水位が痕跡水位よりもやや大きく(最大で40cm程度)なったと考えられる. このようにやや誤差はあるものの, 算定した水位と痕跡水位の誤差がKU地点の樹林帯における底面せん断力や樹木に与える抗力モーメントの計算値に与える影響は少ない. 従って, この計算で算出された底面せん断力や抗力モーメント値を以下の考察で使用するものとする.

(2) τ_{*50}/τ_{*c50} , τ_{*84}/τ_{*c84} を用いた破壊形態の分類

図-6にタチヤナギおよびハリエンジュ繁茂地点における τ_{*50}/τ_{*c50} と τ_{*84}/τ_{*c84} との関係を樹木の破壊形態で分類した結果を示す. Tanaka and Yagisawa⁴⁾は, 多摩川における洪水後の樹木破壊調査結果より, 樹木の破断・倒伏破壊はモーメントで評価可能であると同時に, τ_{*50}/τ_{*c50} , τ_{*84}/τ_{*c84} によっても樹木の破壊形態の分類が可能であることを示している. 荒川の対象砂礫州KUでも同様の傾向があり, タチヤナギ, ハリエンジュともに, $\tau_{*50}/\tau_{*c50} > 1$ かつ $\tau_{*84}/\tau_{*c84} > 1$ の領域に流失した樹木が, $\tau_{*50}/\tau_{*c50} < 1$ かつ $\tau_{*84}/\tau_{*c84} < 1$ の領域に破壊されなかった樹木がプロットされている. また, 破断・倒伏の破壊形態に関しては, その破壊形態が生じる領域に大きな幅はあるものの, 概ね流

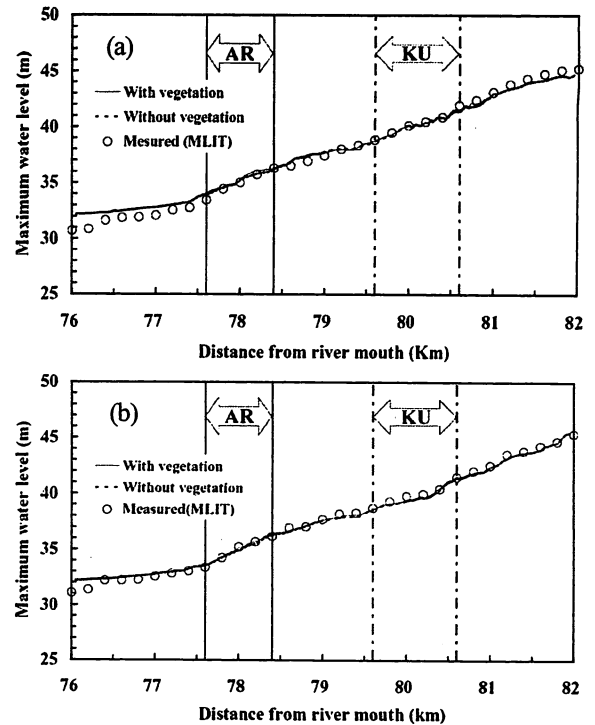


図-5 2007年9月洪水の解析区間における解析水位と痕跡水位(A.P.)との比較 (a) 左岸, (b) 右岸(AR; 荒川大橋地点の砂礫州範囲, KU; 熊谷大橋地点の砂礫州範囲)

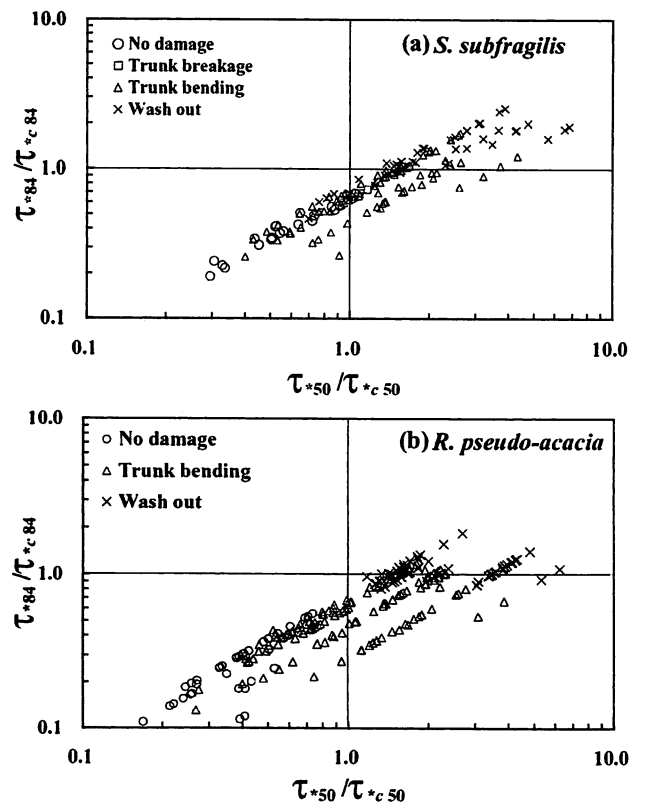


図-6 流失限界無次元掃流力による破壊形態の分類 (a) タチヤナギ, (b) ハリエンジュ

失樹木と破壊されなかった樹木との中間領域にプロットされている。しかし、両種の一部のデータに関して、流失破壊となる領域($\tau_{50}/\tau_{c50} > 1$ かつ $\tau_{84}/\tau_{c84} > 1$)においても、実際には倒伏破壊が生じており、 τ_{50}/τ_{c50} および τ_{84}/τ_{c84} によって破壊形態が分類可能かどうかに関しては更なる検討が必要である。そのため、以下では樹木の破断・倒伏破壊はモーメントに関する指標 BOI を用いて評価する。

(3) 対象砂礫州 KU における 2007 年 9 月洪水時の破断・倒伏評価指標 BOI、流失評価指標 WOI と実績の比較

2007 年 9 月洪水を対象として、熊谷大橋上流の砂礫州の樹木の破壊・流失状況と破壊評価指標(BOI: T_2/T_1)、流失評価指標(WOI: τ_{84}/τ_{c84})の値を比較した。図-7(a)に2007年9月洪水後の航空写真に破断・倒伏箇所および流失箇所をマーキングした図を、図-7(b), (c)にそれぞれ BOI, WOI のコンター図を示す。

図-7(a)と(b)を比較すると、図-7(a)中の a 地点や c 地点における樹木の倒伏、b 地点における樹木の未破壊などが実際の洪水後の状況と一致している。また、図-7(a)と(c)を比較すると、図-7(a)中の d 地点や f 地点における樹木の流失、e 地点における樹木の未流失などが実際の洪水後の状況を表現できていると考えられる。しかし一方では、図-7(a)中の g 地点や h 地点の破断・倒伏指標 BOI は 1 を超えており、実際には破断・倒伏が生じていないにもかかわらず、解析上は破断・倒伏すると判断されている箇所もある。g 地点や h 地点のように、流下方向に長い群落を形成した場合、上流側に繁茂した樹木の遮蔽効果によって下流側の樹木に作用する抗力が減少すると考えられる。しかしながら本研究では樹木の抗力を評価する際に樹木単体を基本としており、隣接する樹木との相互干渉を考慮していない。そのため、解析上は破断・倒伏されるという過大評価がなされたものと考えられる。

(4) 対象砂礫州上の比高差が異なる 3 箇所における樹林化可能性

洪水外力の受け方が異なる 3 地点を選定し(図-1(b)), 砂礫州上の樹木管理の際に重要な指標となる洪水確率年との関連について検討を行なった結果を図-8 に示す。

最も比高差が小さく、洪水外力を受けやすい Location 3 では、3 年規模の洪水でも Region B にプロットされており、破断・倒伏が生じることがわかる。2006 年 10 月洪水(洪水確率年 3 年)後の現地観測において、実際に破断・倒伏が生じていることを確認している。また、2007 年 9 月洪水(洪水確率年 25 年)では、Region D にプロットされており、実際に B 地点のタチヤナギは流失されていたことを確認している。これらのことは解析結果の妥当性を示している。最も洪水外力を受けづらい Location 1 では、洪水確率年が今回対象としたように 40 年以下であると、Region B には位置づけられるものの、Region C や Region D

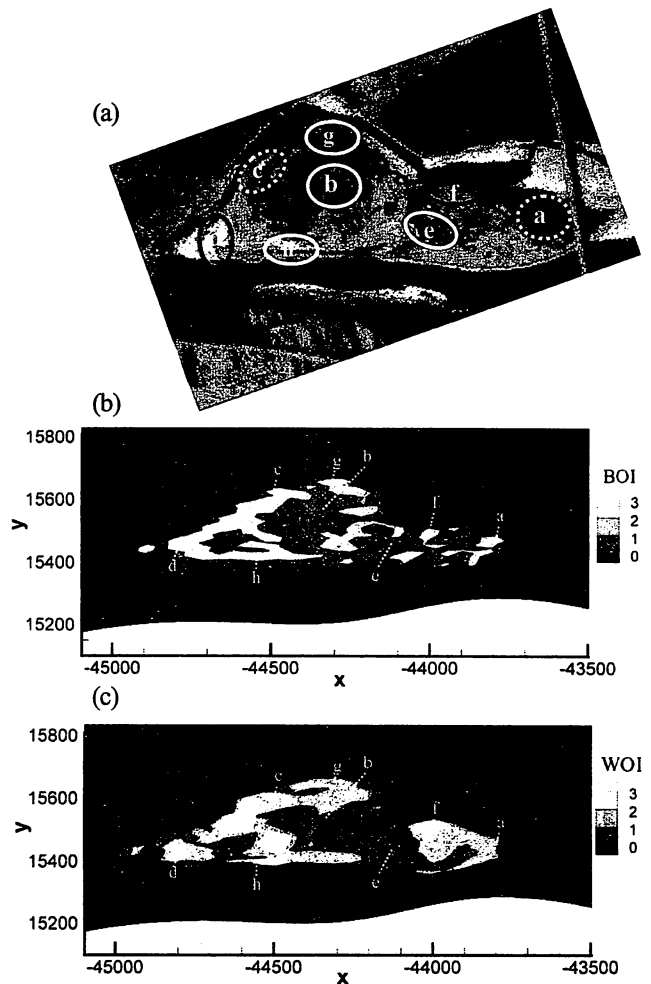


図-7 2007 年 9 月洪水による砂礫州上樹木の破壊状況と解析結果の比較

- (a) 洪水後の樹木の破壊状況 (a,c:樹木の倒伏(白点線), b,e,h,g:樹木の残存(白実線), d,f:樹木の流失(黒実線))
- (b) 破断・倒伏判定指標 BOI のコンター図
- (c) 流失判定指標 WOI のコンター図

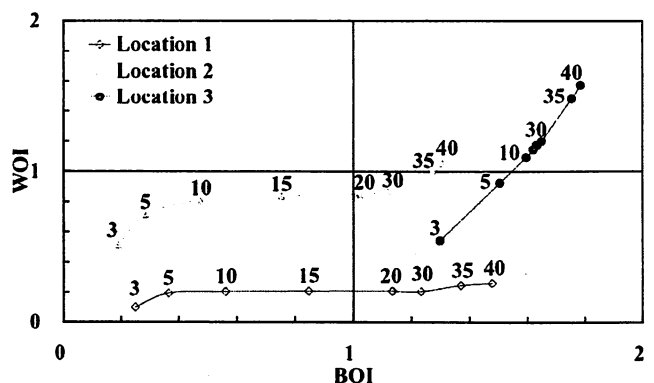


図-8 比高差の異なる 3 地点における樹林化の可能性と洪水確率年との関係 (Location 1: 平水位からの比高差が最も大きい地点, Location 3: 平水位からの比高差が最も小さい地点, Location 2: Location 1 と 3 の中間の比高差(図中の数値は洪水確率年を示す))

には至らないことがわかる。このことは、Location 2 や 3 に比べて、安定して樹林化が進行することを意味している。一方、比高としては Location 1 と Location 3 の間である Location 2 では、15 年以下の洪水規模では A 地点と同様、Region A に位置づけられ樹林化の危険性が大きい。しかし、35 年規模程度であれば Region D に位置づけられることがわかる。上記より、検討対象砂礫州では、Location 1 は管理の必要性が高い地点、Location 2 は 35 年規模の洪水による流失を待てない場合は管理の必要がある地点、Location 3 は 5～10 年規模で裸地に戻ることから管理の必要性の少ない地点であると考えられることができる。

しかし、本解析手法では樹木の破壊・流失状況を評価しきれない場合もあった。例えば、実際には洪水によって流失されなかった樹木が、解析では流失されると判断されていた。その原因として、河床材料の把握手法に改善の余地があると考えられる。本解析で設定した河床材料の 50% 粒径・84% 粒径は、表層(最大粒径程度の深さ)で採取されたサンプル、あるいは表層の画像解析を元に把握されたものである。鉛直方向に粒度分布形状が異なる場合は差し支えなく樹木の流失を評価可能であると考えられる。しかし、樹木の流失が可能ほどの河床低下が生じる前に、表層に比べて大粒径の河床材料となった場合や d_{84}/d_{50} が 1 をはるかに上回るなど、粒度構成比が河床低下を抑制する方向に変化した場合には、本解析手法は、樹木流失を正確に評価できない可能性がある。

一方、流失の評価のみならず、破断・倒伏に関しても実際と異なる解析結果が得られる場合があった。本研究では、樹木の破断・倒伏を評価する際に必要な抗力は、樹木単体を対象に算出されており、樹木同士の相互干渉や密度変化に伴う抗力係数の減少は考慮されていない。そのため、図-7(a)に示した h 地点や g 地点のように、高密度かつ流下方向に長い群落を形成した場合に、樹木に作用する抗力(モーメント)を過大評価したと考えられる。

4. 結論

本研究では、破断・倒伏、流失という異なる破壊形態とそれぞれの破壊を評価するため、破断・倒伏判定指標 BOI、流失判定指標 WOI を導出し、それらをもとにした砂礫州上の樹林化の可能性を判定する手法を提案した。その手法を荒川・熊谷大橋上流の砂礫州に適用した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 2007 年 9 月洪水時における対象砂礫州上の樹木の破断・倒伏、流失状況を、破断・倒伏判定指標 BOI、流失判定指標 WOI を用いて概ね再現することができた。
- ② 対象砂礫州上における平水位からの比高差が異なる 3 地点において、どの程度の洪水規模であれば砂礫州上の樹木管理が必要かを明らかにした。
- ③ 本研究で提案した砂礫州の樹林化判定手法は、樹木管

理を行なうべき範囲を判断する際に有効であることが示唆された。

本研究では、洪水による樹木破壊状況が詳細に把握されていたという理由から、検討対象地点を荒川・熊谷大橋の砂礫州に限定して実施した。今後、提案した樹林化判定手法が他河川にも適用可能か検証する必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省荒川上流河川事務所に多くの資料を提供頂いた。平成 20 年度河川整備基金・助成事業(代表：佐々木寧)の一部を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水義彦：礫床河川の植生化について - 河川地形・河床材料と洪水攪乱の視点から - ，第 44 回水工学に関する夏期研修会資料，2008。
- 2) 藤田光一，李參熙，渡辺敏，塚原隆夫，山本晃一，望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション，土木学会論文集，No.747/II-65，pp.41-60，2003。
- 3) Tanaka, N. and Yagisawa, J.: Effects of tree characteristics and substrate condition on critical breaking moment of trees due to heavy flooding, *Landscape Ecol. Eng.* 5, pp.59-70, 2009。
- 4) 田中規夫，八木澤順治，福岡捷二：砂礫州上における繁茂場所の相違が樹木の洪水時流失限界に及ぼす影響，水工学論文集，第 53 巻，pp.631-636，2009。
- 5) 辻本哲郎，村上陽子，安井辰弥：出水による破壊機会減少による河道内樹林化，水工学論文集，第 45 巻，pp.1105-1110，2001。
- 6) Egger, E., Benjankar, R., Davis, L. and Jorde, K. : Simulated effects of dam operation and water diversion on riparian vegetation of the lower bois river IDAHO, USA, *32nd LAHR congress*(CD-ROM), 2007。
- 7) 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。
- 8) 田中規夫，八木澤順治，佐々木寧，福岡捷二：河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違，水工学論文集，第 52 巻，pp.649-654，2008。
- 9) 細田尚，長田信寿，村本嘉雄：移動一般座標系による開水路非定常流の数値解析，土木学会論文集，No.533/II-34，pp.267-272，1996。
- 10) Takemura, T. and Tanaka, N.: Evaluation of expansion threshold for *Typha angustifolia* in river, XXXI-IAHR, pp.1884-1893, 2005。
- 11) 田中規夫・佐々木寧：2006 年ジャワ津波災害において海岸林が果たした役割とその破断・なぎ倒し限界，水工学論文集，第 51 巻，pp.1445-1450，2007。
- 12) Melville, B. W. and Sutherland, A. J. : Design method for local scour at bridge piers, *J. Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226, 1988。
- 13) 河村三郎：土砂水理学 1，森北出版，pp.65-69，2005。
- 14) 土木学会編：水理公式集 平成 11 年度版，p.4，1999。

(2009. 4. 9 受付)