

洪水攪乱頻度が礫河原の草本占有面積と樹林化速度に与える 影響予測手法の開発

1. はじめに
 - 1.1 序論
 - 1.2 既往研究
 - 1.3 研究目的
2. 洪水攪乱頻度・強度が草本の洪水時流失限界に与える影響
 - 2.1 シナダレスズメガヤの洪水時流失条件
 - 2.2 洪水攪乱頻度がツルヨシの繁茂領域に与える影響
3. 樹木の破壊限界モーメントおよびせん断力に関する検討
 - 3.1 木本の破壊を考慮した樹林化しづらい砂州の判定手法
 - 3.2 数値解析による砂州上植物の流失条件の把握
4. 草本・木本領域の拡大および洪水による流失・破壊・再生を考慮した植生動態モデルの開発
5. 結論および今後の課題

参考文献

埼玉大学大学院理工学研究科 教授 田中規夫

要 旨

河道内樹林化の動向把握や礫河原再生を考える上で、河道内植生の流失条件や、洪水攪乱規模・頻度による植生動態影響を把握することが重要である。本研究では、1)草本の繁茂状態による流失限界条件を把握すること、2)樹木の生長段階による破壊限界メカニズムと破壊限界値の変化を解明すること、さらに、1)、2)の影響を受けて、3)植生遷移がどのように変化するかということを検討した。すなわち、洪水攪乱影響下における草本・木本の自然流失可能性を洪水攪乱強度・頻度と関連付けることにより、河道内樹林化の進行速度を評価した。礫河原で繁茂が想定される草本類や木本類は河川や地域の違いによって多数存在するが、抗力特性や土砂捕捉特性に特徴を有する植物種を選定するため、草本類としてツルヨシ（高茎草本の代表）、シナダレスズメガヤ（株状植物の代表）を、木本類としてタチヤナギ（攪乱を受けても再生する樹木の代表）、ハリエンジュ（侵略的外来樹木）を検討対象植物とし、荒川中流部の礫河原と多摩川で調査を行った。幹の破断・なぎ倒しだけではなく転倒破壊など様々な破壊形態を調査し、4種植物の流失に必要な限界モーメントや、限界せん断力を求めた。シナダレスズメガヤの流失限界評価法を提案し、荒川・吉野川・野洲川などで検証した。異なる洪水攪乱影響下におけるツルヨシの繁茂状態を評価し、洪水確率規模が3から5年でランナーが抜けることがツルヨシ群落を大きくしない条件であることを示唆した。さらに、樹木の破断限界線は樹種ごとにある程度決定されるが、抜根限界線は樹木の生育基盤や根の張り方によって上下することを示した。最後に、植物の流失条件に関する知見、洪水攪乱後の再生長特性に関する知見を用いて、植生動態モデルの構築を試みた。木本の定着条件、草本・木本の流失条件、木本の再生機構を考慮した植生動態解析結果は、実際の植生分布を概ね表現することが可能となった。

1. はじめに

1.1 序論

ダム建設や上流域の土地利用変化は下流河道の洪水ピーク流量や土砂供給量を変化させ、河道内樹林化等の形で河川環境・治水へインパクトを与えている。ある地点の草本群落・木本の管理はその地点・その時点（とそれまでの履歴）を考慮して、限界掃流力、河床変動傾向や植生帯の環境へのインパクトをもとに議論される場合が多い。従来の研究では洪水攪乱頻度に対応した今後の生物多様性・植生遷移の方向性とは直接的に関連付けられておらず、外力（洪水）によって草本、木本それぞれから裸地に戻るというループに着目している場合が多い。草本に着目した研究の多くは、繁茂状態（密度、草丈等の変化）に関係なく、どの程度の底面せん断力あるいは無次元掃流力が作用したかで流失を判断する場合が多い。しかし、実際には草本の繁茂状態による底面せん断力の変化を把握することで、植物が流失するか（裸地に戻るか）ということを検討する必要があると考えられる。また、樹木の流失を、ある地点・ある時点での樹木の繁茂状態（直径・樹高）で検討している事例が多い。しかし、生長段階による破壊メカニズムの変化を考慮する必要がある。従って、草本・木本そのものの繁茂状態による抗力・せん断力の変化と、繁茂状態の影響を受けてのダメージに基づく植生遷移の変化、すなわち相互作用を検討する必要があると考えられる。

1.2 既往研究

1.2.1 草本・木本の洪水時における自然流失

河原に繁茂している一年生草本・多年生草本は、洪水などの大規模出水に伴い度々流失することで多様な生態系を保持している。しかし、河原の攪乱頻度・冠水頻度が減少したことにより礫面を覆いつくし、大洪水時にはすべて流失する場合もあるが、中小洪水時には群落の一部（主に上流側・河岸側）のみが流失する場合も多い。その場合には、残存した箇所等に大量の土砂を堆積させ、木本類の進入基盤を創出することもある。樹林帯の将来動向を把握し管理する上で草本・木本の自然流失条件を解明することは非常に重要である。

草本の流失限界評価手法を大別すると、①流失限界流速値を指標としたもの(USDA¹⁾)、②草本がどの程度の粒径と同等となるかを指標としたもの(Parsons²⁾)、③流失限界せん断力値を指標としたもの(Temple³⁾)、④植物の相対水深、許容変形量を指標とするもの (Samani & Kouwen⁴⁾) がある。日本においては、無次元掃流力あるいはせん断力によるものが多い。末次ら⁵⁾は多摩川、千曲川において草本類の洪水時流失条件を50%粒径を用いた無次元掃流力を指標として評価し、流失に対する抵抗力が弱い(目安として無次元掃流力が0.06~0.09程度で流失する)草本類と、抵抗力が強い(目安として無次元掃流力が0.08~0.14程度で流失する)草本類の分類を行なっている。小川ら⁶⁾は、砂礫州上に繁茂するツルヨシ

のランナー上に形成される株が流失する流速とツルヨシ繁茂地点周辺の最大粒径の土砂の移動が発生する限界摩擦速度を比較している。その結果、観測した砂州においては株が流失するよりも遙かに早く土砂移動が発生するとしている。また、田中ら⁷⁾、八木澤・田中⁸⁾は従来の草本流失条件の評価では、繁茂密度、草丈や直径が変化することによる底面せん断力の変化を考慮していないことを問題点に挙げている。

建設省河川局治水課⁹⁾、リバーフロント整備センター¹⁰⁾は、実際の樹木を用いた引き倒し試験により樹木の倒伏限界モーメント M_c を求めている。しかし、これは高水敷や公園などの安定した場所での試験である。末次ら¹¹⁾は、1999年8月の千曲川での洪水による植生域の変化を観測し、洪水が植生群落に与える破壊の実態とその発生機構を調査している。この調査から、ハリエンジュの倒伏・流失の特徴として、樹木の倒伏は流れによる抗力が原因であること、倒伏・流失は流速・水深などの水理量だけではなく、流木などの洪水による流下物が樹木に絡まることが本質的であること、樹木が倒伏するまでは礫移動がないことを示している。砂田ら¹²⁾は富士川の本川釜無川、支川笛吹川の樹齢4歳のカワヤナギを対象として、河道内における樹木の破壊を6種類に分類・定義し、倒伏、抜根に限定した破壊条件式を用いて、洪水攪乱影響下の河道内植生の動態を考察している。また、油川ら¹³⁾は、沙流川・鶴川での洪水におけるヤナギ類の倒伏状況に着目し、上記2河川における倒伏限界モーメント値と、建設省河川局治水課による樹木の引き倒し試験から求めた値がほぼ一致しているとしている。

一方、清水ら¹⁴⁾は渡良瀬川を対象とし、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の推定を行っている。その結果、樹林の破壊（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している。河床材料の移動を伴う基盤攪乱が第一の要因であり、移動限界礫径を指標とした樹木の破壊形式の仕分けが重要な視点となるとしている。

樹木破壊のメカニズムとして、油川ら¹³⁾は樹木引き倒し試験から求めた倒伏限界モーメントで表現できるとする一方で、清水ら¹⁴⁾は物理基盤の攪乱が主要因であると異なる結論を導いている。従来用いられている倒伏限界モーメント式は生育基盤となる土砂が細かい高水敷で行なわれた実験であり、洪水時の洗掘等を考慮していないことから、実際の洪水時における樹木の流失限界とは若干異なる可能性があると考えられる。そのため、生育基盤と樹木破壊の関係を明確にする必要があると考えられる。

1.2.2 河道内の植生動態に関する研究

李ら¹⁵⁾は河道内樹林化の形成過程を以下のように説明している。まず、河道内における砂利採取やダム建設、砂防ダムの建設による下流河道への供給土砂量の減少、洪水ピーク流量の減少などが原因で横断面内に高低差が出現する。比高差が大きくなると洪水時に比高の高い箇所に細粒土砂が堆積する。この細粒砂層（表層細粒土層）の堆積が植生の繁茂において非常に重要な要素であり、細粒土砂が堆積することにより、草本類繁茂の物理基盤が整うこととなる。堆積した細粒土砂へヨシ等の草本類（この草本類のことを特にパイオニア的植生と呼ぶ）が侵入する。パイオニア的植生が抵抗となり、細粒土砂

を捕捉して細粒土砂堆積が促進する。パイオニア的植生により表層細粒土層が厚くなると木本類が根を張ることができ侵入する。比高差の拡大がさらに進み、比高と細粒土砂層厚が木本類の植生の繁茂に適した環境となる。大規模な出水は抑制されるため、非攪乱場と攪乱場の二極化により、冠水頻度の低下した安定した樹林帯が形成される。藤田ら¹⁶⁾は上記の考えに基づき、洪水による草本類・木本類の流失過程、草本空間への微細砂の堆積、微細砂の堆積による植生の遷移過程等、現地観測による植生動態の知見を用いて樹林化進行のプロセスをモデル化している。生育基盤である表層の礫径および無次元限界掃流力の設定が大きく結果を左右するとしている。

一方、清水ら¹⁷⁾は李ら¹⁵⁾の説明したプロセス（礫河原において草本の進入が比高差の拡大を引き起こし、冠水頻度の低下から樹林化へと進行する「静的樹林化」）ではなく、洪水攪乱を受けることで樹林化が進行する「動的樹林化」という点に注目している。動的樹林化が生まれる条件として、攪乱を受けた際に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ほかの樹木がないことで日射条件が良好であることと報告している。

動的樹林化と同様に、洪水攪乱を受け残存した草本が翌年にどの程度再生長を行なうかを把握することも、植生動態を表現する上で重要であると考えられる。青木ら¹⁸⁾は洪水攪乱により堆砂を受けたツルヨシの再生長量の観測や人為的な堆砂実験による再成長量の観測を行ない、洪水攪乱を受ける前に比べて葉茎高さや密度が減少することを示している。田中ら⁷⁾は洪水攪乱がシナダレスズメガヤの翌年の生長に及ぼす影響を現地調査し、洪水攪乱がシナダレスズメガヤの翌年の生長に与える影響は、小さいサイズ(株直径が0~20 cm)に関しては少ないが、大きいサイズ(直径が20 cm以上)に関しては、葉茎密度とバイオマスを減少させるとしている。一方で現地観測より得られた洪水攪乱影響の知見を活かし、植物の繁茂量(粗度の変化)を解析する試みもなされている。八木澤ら¹⁹⁾はツルヨシの堆砂影響を含めた生長解析を行い、堆砂による翌年のツルヨシの生長を概ね再現している。さらに Yagisawa and Tanaka²⁰⁾、Tanaka et al.²¹⁾はツルヨシ群落の繁茂領域の拡大解析を行い、葉茎高さ、密度の平面的な変化を考慮して摩擦速度の変化を解析し、対象とした砂州・洪水において、ツルヨシが裸地に入植してから4、5年目になると、繁茂領域、密度が急激に増加し、土砂の移動が生じない領域を急激に広げる可能性を指摘している。

従来の植生動態解析では、洪水時の外力による植物の流失を軸に考察される場合が多い。しかし、洪水攪乱を受けたあとの残存した植物の回復過程などの植物の特性、流失に関係する次の攪乱までの年数と植生の生長との関係を把握することが重要な課題であると考えられる。

1.3 研究目的

1.1 および 1.2 において、河道内植生の流失条件の把握の重要性、洪水攪乱規模・頻度を関連付けて

今後の植生動態を把握することの重要性について述べた。そのことを考慮したうえで、植生遷移そのものが当該地点の将来的な流下能力、土砂堆積や河川空間の多様性に与えている影響の度合いとその変化を評価することが必要である。こうした総合的なアプローチを行なうためには、河川工学的、応用生態工学的知見を集積した評価手法の構築が必要不可欠である。図1・1に本研究で取り扱うプロセスの模式図を示す。ここで、本研究では「樹林化が起りやすい」ということを外力（洪水）によって stage A～C を繰り返すことなく、極相へと進む一方であるということと解釈する。まず、①のループに着目し、草本の繁茂状態（密度、直径、草丈等の変化）によって、草本空間の底面せん断力がどのように変化するかを把握することで、植物が流失するか（stage A に戻るか）ということを検討する。また、②、③のループに着目し、樹木の生長段階によって、破壊限界がどのように変化するか、さらに、①、②、③の影響を受けて植生遷移がどのように変化するかということを検討する。本研究の特色として、洪水攪乱を受けても流失されずに残存した植生の回復過程がその後の樹林化に及ぼす影響を考慮する(①'、②'、③'のループ)。さらに、李ら¹⁵⁾の樹林化プロセス(stage A から stage D まで順番通りに遷移が進行する)とは異なり、stage A から stage B を介さずに stage C に遷移する(④のループ)というプロセスも考慮する。

なお、stage B、C、D で繁茂が想定される草本類や木本類は河川や地域の違いによって多数存在する。しかし本研究では、観測を行なった砂州の代表種であるということ、さらに、抗力特性や土砂捕捉特性に特徴を有する植物種を選定するため、草本類としてツルヨシ（ランナーや地下茎を有する高茎草本の代表）、シナダレスズメガヤ（株状植物の代表）を、木本類としてタチヤナギ（攪乱を受けても再生する樹木の代表）、ハリエンジュ（攪乱を受けても再生する侵略的外来樹木）のみを検討対象植物とした。

本研究においては、特に、1)洪水攪乱影響下における草本・木本の自然流失可能性を洪水攪乱強度・頻度と関連付けること、2)洪水攪乱影響下における草本・木本の動態解析を行うことにより、河道内樹林化の進行速度を評価する手法を開発する。また、植生除去に必要な洪水攪乱強度・頻度に関する知見を明らかにすることを目的とする。

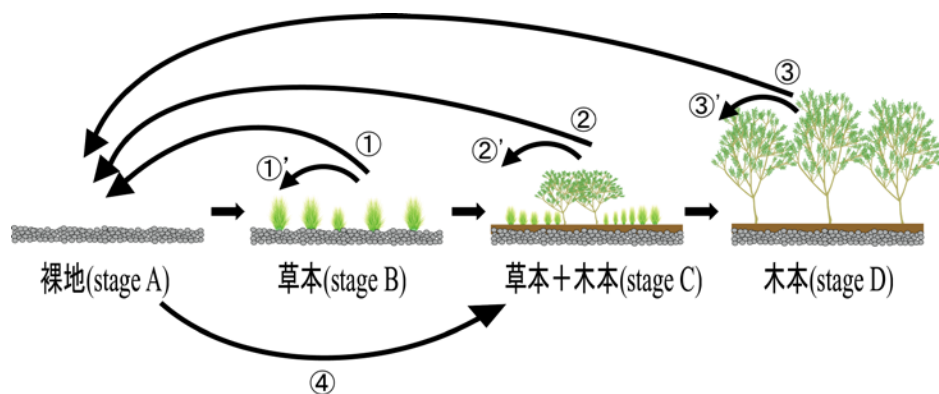


図1・1 本研究で取り扱う内容の概念図（①、②、③は現地観測、水理模型実験、数値解析で評価し、①'、②'、③'は現地観測より評価し、④を含む遷移プロセスは植生動態モデルで評価する）

2. 洪水攪乱頻度・強度が草本の洪水時流失限界に与える影響

2.1 シナダレスズメガヤの洪水時流失条件

2.1.1 はじめに

本章で対象とする帰化植物シナダレスズメガヤ(*Eragrostis curvula*)は高水敷や中州にも繁茂する草本類であり、旺盛な繁殖力で河川空間を占有し生物多様性を減じるだけでなく、洪水時には株背後に多量の土砂を堆積させる(中坪²²⁾)ことが知られている。そのため、2005年6月に施行された外来生物法によって生態系に悪影響を及ぼしうる植物としてリストアップされており、人為的な駆除の検討がなされているが、洪水攪乱によって自然流失される条件を検討することも必要である。すなわち、どのような繁茂状態になった場合に、シナダレスズメガヤが洪水によって自然流失され得るのかを判断することが重要であると同時に、河道管理という観点から、人為的な除去が必要な繁茂状態を把握することも重要(鎌田ら²³⁾、八木澤・田中⁸⁾)と考えられる。

本章では、シナダレスズメガヤの繁茂量の違いを考慮し、植生繁茂領域における土砂移動限界の変化および洪水時流失条件を簡易に算定する方法を提案することを目的とする。

2.1.2 観測方法および解析方法

(1) 観測地および観測方法

観測は埼玉県熊谷市の荒川大橋上流の砂礫河原において行った(図2・1)。荒川大橋上流地点では、周辺より比高が高い場所において、流下方向に200m程度、横断方向に40m程度のシナダレスズメガヤ群落が形成されており、この場所において植物特性の測定を行った。シナダレスズメガヤの洪水時の粗度特性に着目し、株の代表直径 D_c (m)、体積空隙率 λ 、葉茎高さ h_v (m)、曲げ剛性 EI_M (E はヤング率(N/m^2)), I_M は断面二次モーメント (m^4)), 平面密度 M (個/ m^2)を測定した。ここに、 λ はシナダレスズメガヤ株の外周直径と空隙を無くした状態での直径を計測することによって算出した体積空隙率であり、 D_c はシナダレスズメガヤ株を円柱形と仮定した場合と体積的に等価な株直径とした(八木澤・田中⁸⁾)。

(2) 植物抵抗を考慮した無次元掃流力の算出

a) 植物抵抗を考慮した摩擦速度の算出

植生繁茂状態の影響を考慮した摩擦速度 u_* は以下の力のつり合い式より算出した。

$$\rho u_*^2 A' + \frac{1}{2} \rho u_*^2 C_d A M = \rho g H I - \rho g h_v I \pi M (1 - \lambda) (D_c / 2)^2 \quad (2 \cdot 1)$$

ここに、 ρ : 水の密度 (kg/m^3)、 A' : 1 m^2 から植生占有面積を除いた面積 (m^2)、 u : 接近流速 (m/s)、 C_d : 抗力係数、 A : 流れ方向に垂直な投影面積 (葉茎高さ h_v と代表直径 D_c の積) (m^2)、 g : 重力加速度 (m/s^2) である。ただし、式(2・1)は沈水状態の式であり、抽水状態の場合は $h_v=H$ とした。株周辺の局所流により株周辺土砂のみが移動限界を超えて洗掘が進行する静的洗掘では、洗掘深が根の深さまで達することは難しい。そのため、その場の平均的な土砂全体が移動する動的洗掘を考える必要があると判断し、式(2・1)のように、単位面積で平均化された掃流力で土砂の移動限界を算出した。また、現場において植物の流失を簡易に判断する手法の提案ということに重点を置いたこと、洪水ピーク時のエネルギー勾配は擬似的に水面勾配に等しいとみなせることを確認したことから、式(2・1)で摩擦速度を算出する際にエネルギー勾配ではなく河床勾配を用いた。

表2・1に示した条件の他に式(2・1)から u_* を求めるためには C_d が必要である。 C_d に影響を及ぼすパラメータのひとつとして倒伏角 θ が挙げられていることから(武村・田中²⁴)、流れによる倒伏角の影響を含んだ実験式(伊藤ら²⁵)より C_d を算出する際に、株が受ける F と現地観測より把握した曲げ剛性 EI_M を用いて、 θ (本研究では植物が直立状態の時の倒伏角 $\theta=0^\circ$ と定義した)を算出した。また、 F の算出に必要な u は、福岡・藤田²⁶)による植生の影響を考慮した粗度係数 n_w を用いてマンシングの平均流速公式から算出した。

$$n_w = (n_b^2 + \frac{C_d}{2g} a_v H^{\frac{4}{3}})^{\frac{1}{2}} \quad (2 \cdot 2)$$

ここに、 n_b : 河床のマンシングの粗度係数 ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$)、 a_v : 単位体積中の植生の投影面積(m^2)である。河床のマンシングの粗度係数 n_b は、Stricklerが行った実験データを元にして作られた式(Andersen et al.²⁷)をfeet単位からm単位に修正して用いた。(中央粒径 d_s はm単位)

$$n_b = 0.0617 d_s^{1/6} \quad (2 \cdot 3)$$

b) 無次元掃流力の算出

式(2・1)より算出される植物抵抗を考慮した摩擦速度を用いて、シナダレスズメガヤの株周辺の無次元掃流力を算出した。これと砂粒直径を比較し、株の直径と掃流砂粒径の関係を求めた。その際、無次元掃流力はShieldsによって定義された以下の式を用いた。

$$\tau_* \equiv \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_s} \quad ; \quad R_{e*} = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (2 \cdot 4)$$

ここに、 τ_* : 無次元掃流力、 σ : 土粒子密度(kg/m^3)、 R_{e*} : 砂粒レイノルズ数、 ν : 水の動粘性係数(m^2/s)である。シナダレスズメガヤ周辺の土砂移動限界の指標として50%粒径を用い、植物自身の流失条件を算定する際の指標として84%粒径を用いた。なお、84%粒径の無次元限界掃流力の算定には、

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \frac{\log 19}{\log(19 d_i/d_m)} \quad (d_i/d_m \geq 0.4) \quad (2 \cdot 5)$$

を用いた(土木学会²⁸⁾)。ここに、 τ_{*ci} ：混合粒径を複数クラスに分類した場合の第*i*クラスの無次元限界掃流力、 τ_{*cm} ：平均粒径 d_m (本研究では中央粒径 d_s とする)の無次元限界掃流力、 d_i ：混合粒径を複数クラスに分類した場合の第*i*クラスの砂礫の粒径である。

以上の方法を用いて、シナダレスズメガヤの繁茂状態により、50%粒径、84%粒径の無次元掃流力が無次元限界掃流力を下回る(土砂が移動しなくなる)限界値を算定した。

2. 1. 3 解析結果及び考察

(1) 現地観測結果

図2・2はシナダレスズメガヤ株の特性を示したものである。葉茎高さはおよそ株直径の0.5乗で大きくなり(図2・2(a))、代表直径が0.1m程度と小さい場合は高い密度で繁茂するが、株が大きくなると、周辺のシナダレスズメガヤとの生存競争によって淘汰され密度が小さくなる(図2・2(b))ことが原因であると考えられる。シナダレスズメガヤは生長段階(本研究では株の代表直径で表現)によって抗力特性が変化するため、植物の影響を含めた土砂の移動限界を推定する際には、生長段階を考慮する必要がある。

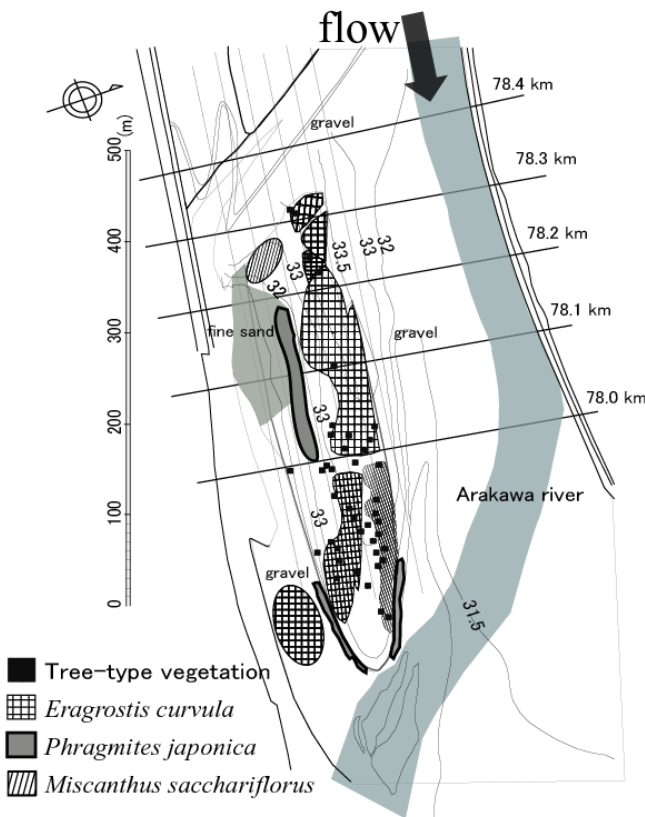


図2・1 荒川大橋上流地点における植生分布

表2・1 摩擦速度算出条件

	Notation	Value	Unit
Water depth	H	0.3 ~ 2.5	m
Bed slope	I	1/1000 ~ 1/100	-
Average particle diameter	d_s	1.0 ~ 3.0	cm
Reference diameter of colony	D_c	0.1 ~ 0.5	m
Density of colony	M	*	Number of colonies / m ²

* M is changed depending on other parameter.

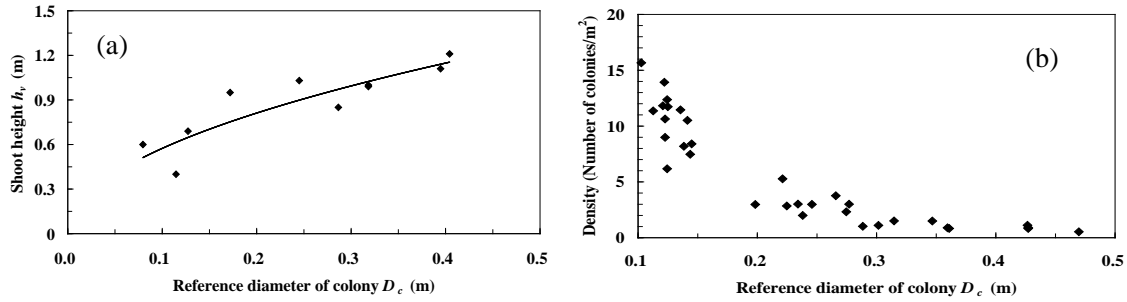


図 2・2 シナダレスズメガヤの株特性の把握、(a)株の代表直径 D_c と葉茎高さ h_v との関係、(b)株の代表直径 D_c と植物密度の関係

(2)土砂移動限界と植物流失条件判定の一般化

観測地点においてシナダレスズメガヤが周辺の中央粒径土砂の移動限界に与える影響を解析したが、ここでは他の観測地点にも適用可能な一般化手法を検討する。表 2・1 に示す水理条件を変化させ、土砂の移動が困難となる繁茂状態を把握した。図 2・3 は、洪水時の底面せん断力を代表するパラメータ gHI と株の抗力を代表するパラメータ $MD_c^{1.5}$ で評価したシナダレスズメガヤ周辺の土砂移動限界と流失限界を表している。縦軸は、礫河原の水分・栄養分・日射量環境の下で繁茂可能なシナダレスズメガヤの繁茂量最大値を、抗力に関連した指標 (= 繁茂限界線 = 株の個数 × 流れ方向投影面積 ($h_v D_c = D_c^{1.5}$): 現地観測結果より植物高が $D_c^{0.5}$ に比例するため) で評価したものである。図中の移動限界線は 50% 粒径、流失限界線は 84% 粒径の土砂の移動が困難となる繁茂状態ということで定義している。移動限界線の上側 ($MD_c^{1.5}$ が大) の領域では、その領域まで植物が繁茂していれば、それぞれの粒径の土砂が移動しないということ、下側の領域 ($MD_c^{1.5}$ が小) の繁茂状態であれば植物繁茂により底面せん断力は減少するものの土砂が移動するということを表している。図中の 50% 粒径、84% 粒径の移動限界線と繁茂限界線の交点を A 点、B 点と定義する。A、B 各点より右側 (gHI が大) の領域では移動限界線が繁茂限界線を超えているため、植物の繁茂状態によらず、土砂が移動する状態にあると判断できる。一方、A、B 各点の左側 (gHI が小) では繁茂状態に応じて植物の生育基盤である周辺の土砂がせん断力によって移動するかを判断できる。図中には、荒川の現地観測地点における 5 年確率洪水、10 年確率洪水、20 年確率洪水の gHI をあわせて示した。ここで、荒川の現地観測地点における各確率洪水時の水深は、当該地点より約 10 km 上流に位置する寄居水位・流量観測所での各確率洪水時の流量をもとに、等流計算を行うことによって求めた。各確率洪水が示す gHI と A、B 各点との位置関係に注目すると、移動限界点を表す A 点は 5 年確率洪水と 10 年確率洪水との間、流失限界点を表す B 点は 10 年確率洪水と 20 年確率洪水の間に位置している。このことから、現地観測地点のシナダレスズメガヤ周辺の土砂移動限界、流失限界を超える確率洪水規模は、それぞれ概ね 5~10 年に 1 回、10~20 年に 1 回程度であることがわかる。

(3) 既往洪水によるシナダレスズメガヤ流失限界の検証

本研究で用いたシナダレスズメガヤの流失限界を解析する手法の検証を行うため、荒川、吉野川、多摩川、野洲川、旭川の既往洪水における同植物の流失の有無（実績）と解析で求めた流失限界の比較を行った。解析結果を表 2・2 に示す。

荒川での検証として、2004 年、2007 年の洪水を対象とした。表より、2004 年、2007 年洪水時の gHI と B 点の大小を比較すると、2004 年では gHI が B 点を下回っており、2007 年では上回っている。この解析結果と流失の有無(実績)を比較すると実際の現象を表現できていることがわかる。また、他河川での適応性を確認するため吉野川でも同様の検討を行なった。吉野川では 2004 年 6 月、8 月に洪水(概ね 5 年に 1 回規模)があり、6 月の洪水時には砂州上に繁茂したシナダレスズメガヤは流失されなかったが、8 月の洪水時には、ほぼ流失したことが確認されている(国土交通省²⁹⁾)。B 点と各洪水の gHI の大小関係に注目すると、6 月洪水時には B 点を越えていないが、8 月洪水時では B 点を越えている。これは、観測事実を満足している。また、多摩川、野洲川、旭川に関しても同様に、洪水時の gHI と B 点との大小を比較すると、流失の有無(実績)を表現できた。従って、本解析手法は簡易な流失判定手法として有効である可能性がある。

一方、荒川の荒川大橋地点では、2007 年の洪水時には B 点を上回る gHI であったため、シナダレスズメガヤ群落は流失してもおかしくない条件であるが、洪水後の調査では一部残存している箇所もあった。当該手法は小群落および群落の周辺部においては概ね適用可能であるが、シナダレスズメガヤ群落が大きく、かつ流下方向に長く繁茂している場合には、群落流下方向の内部境界層およびせん断力の変化を評価する必要があると考えられる。

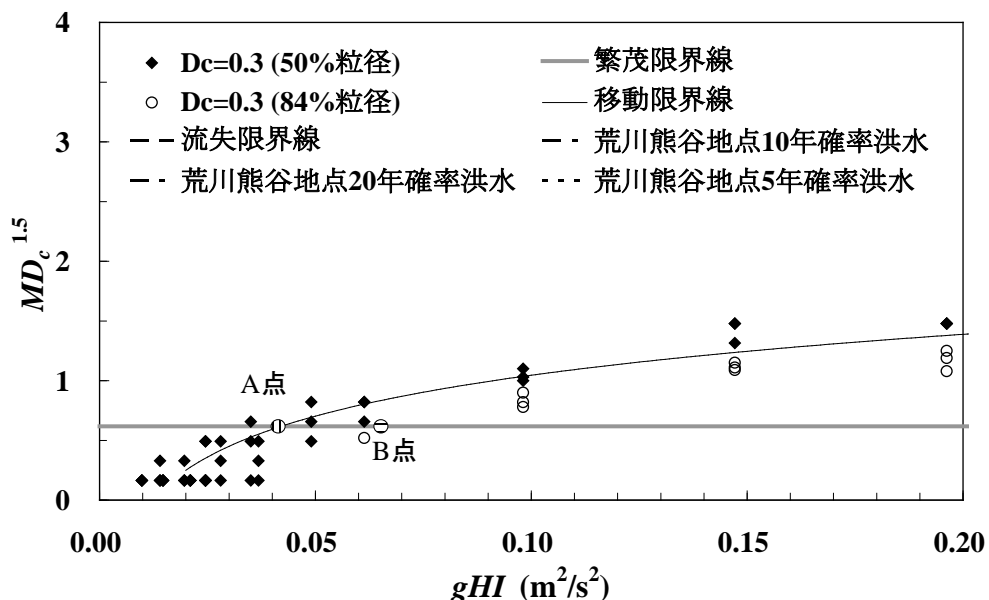


図 2・3 シナダレスズメガヤ周辺の土砂移動限界(A 点)・流失限界(B 点)と荒川熊谷地点における確率洪水との関係

(g : 重力加速度、 H : 水深、 I : 河床勾配、 M : 株の平面密度、 D_c : 株の代表直径)

表 2・2 5 河川における既往洪水時のシナダレスズメガヤの流失の有無(実績)と土砂移動
限界(A点)、流失限界(B点)との比較

対象河川	対象地点	対象洪水	洪水ピーク時の $gHI(m^2/s^2)$	A点・B点の $gHI(m^2/s^2)**$		流失の有無 (実績)	判定*	群落の流失状況
				A点	B点			
荒川	荒川大橋	2004.10	0.026	0.042	0.066	無	◎	群落全体が残存
	荒川大橋	2007.9	0.084	0.042	0.066	有	○	群落の端では流失
	熊谷大橋	2007.9	0.091	0.042	0.066	有	◎	群落全体が流失
多摩川	稲城地点	2007.9	0.057	0.042	0.066	無	○	群落残存 (側岸侵食による流失はあり)
吉野川	西条大橋地点	2004.6	0.029	0.042	0.066	無	○	群落全体の流失状況の詳細は不明
	西条大橋地点	2004.8	0.069	0.042	0.066	有	○	群落全体の流失状況の詳細は不明
野洲川	近江富士大橋地点	2005.8	0.041	0.042	0.066	無	○	群落全体の流失状況の詳細は不明
旭川	祇園試験地区	1998	0.079	0.063	-***	有	△	群落全体の流失状況の詳細は不明

* ◎ 洪水ピーク時の gHI とA点・B点の gHI との大小関係と流失の有無が一致し、かつ群落全体の流失・残存の状況が一致した場合
○ 洪水ピーク時の gHI とA点・B点の gHI との大小関係と流失の有無は一致するが、群落全体の流失・残存の状況が一致しない場合
△ 洪水ピーク時の gHI とA点・B点の gHI との大小関係と流失の有無が一致しない場合、あるいは不明な場合

** 吉野川・野洲川・旭川は国土交通省およびリバーフロント整備センターの資料より算出

*** 84%粒径の値がなかったためB点の算出不可

2. 1. 4 まとめ

本章で得られた結果を以下に示す。

- 1) 抗力を代表するパラメータ($MD_c^{1.5}$)と洪水時の底面せん断力を代表するパラメータ(gHI)を導出し、シナダレスズメガヤ周辺の土砂移動限界・洪水時の流失限界を把握した。
- 2) 荒川大橋上流地点の砂州に繁茂するシナダレスズメガヤに関して、移動限界、流失限界を超える洪水規模は、それぞれ概ね5~10年に1回、10~20年に1回程度必要である。
- 3) 荒川、吉野川、多摩川、野洲川、旭川での既往洪水によるシナダレスズメガヤの流失の有無と流失限界を比較した結果、概ね表現できていたことから、本研究で用いた解析手法は有効と判断された。

本研究で用いた解析方法では、現場において植物の流失を簡易に判断する手法の提案ということに重点をおいた。群落上を通過する流れと群落内の流れの流速差の相違や、それによる運動量交換は考慮していない。しかし、実現象としては底面せん断力に影響を与えている可能性があるため、更なる検討が必要と考える。

2.2 洪水攪乱頻度がツルヨシの繁茂領域に与える影響

2.2.1 はじめに

攪乱を受けたツルヨシの生長に関してはある程度知見が得られているものの、洪水規模の違いがツルヨシの生長と拡大に与える影響を把握した研究は少ない。植生に与える洪水攪乱影響は、河道特性等の違いによって場所毎に変化する。そのため、洪水規模の違いがツルヨシの生長量に与える影響を評価することは、ツルヨシの入植が関連する樹林化等の将来動向を把握するという面で重要である。

本章では、荒川扇状地区間において水理的に特徴のある3地点に注目し、各地点の洪水攪乱規模の違いと、ツルヨシの繁茂・形態特性に与える影響を把握することで、両者を関連づけることを目的とする。

2.2.2 観測方法および解析方法

(1) 対象地点概要

荒川扇状地区間（河床勾配：1/375）を対象とし、航空写真と現地調査から解析地点としてA断面：熊谷大橋地点、B断面：荒川大橋地点、C断面：久下橋下流地点を選定した。ツルヨシは低水路に繁茂し、研究対象区間は5～10年確率洪水で高水敷に乗り上げるような区間である。図2・4は対象地点の概要（各地点の河口からの距離、低水路幅、低水路水深を示す）を示す。図中の白色は高水敷を、青色は低水路を示す。A断面、B断面、C断面は河口からそれぞれ、80km、78km、72km地点に位置する。図2・5は対象地点の横断図で、丸印はツルヨシ観測を行いかつ粒度分布を採取した地点を示す（A、B、C断面における観測地点をそれぞれ、A、B、C地点とする）。B断面に関しては粒度分布を低水路付近（ツルヨシ繁茂域下岸）とツルヨシランナー域で区別し、それぞれB1地点、B2地点とする。

(2) 各対象地点における粒度分布調査

各地点においてツルヨシの繁茂していた低水路沿いにツルヨシ群落横を基準としてそれぞれ、A断面付近（群落横、200m上流の2点）、B断面付近（群落横、200m上流、200m下流の3点）、C断面付近（群落横、200m下流の2点）で河床材料を採取し、各重量を測定して粒径加積曲線をもとめた。また、B2地点では河道横断方向の分級が進んでおり、河道沿いよりも細砂分が溜まっていたため、ランナー域においても粒度分布を測定した。

(3) 対象地点におけるツルヨシの観測

図2・6にランナーの分類を、図2・7にツルヨシの繁茂状況を示す。各地点で繁茂状況やランナーの連結状況に違いが見られた。（図2・5(a)のB2地点では洪水後もランナーが流失せず、ランナー上

の子株からもランナーを出し繁茂域を拡大している。図 2・5 (b) の C 地点では洪水でランナーが剥がれランナー上の子株がなくなっていた。) そこで、親株から出た 1 年目のランナーを R3-1、2 年目のランナー (昨年親株から出たと思われる、枯れているランナー) を R3-2、R3-2 上の定着した子株から出ている 1 年目のランナーを R2-1 と分類した。各地点の拡大の特徴を把握するため、定着から 3 年以上経過したツルヨシ群落を対象として、全体に占める各ランナーの割合と R3-2 上の子株の数を計測した。以上の観測結果から洪水攪乱影響を受けやすい地点を推定した。

(4) 流れの計算(一次元不定流計算)

境界条件として上流端で植松橋水位・流量観測所 (85.6km) での出水時の実績流量時系列データを、下流端では大芦橋水位・流量観測所 (68.4km) での実績水位時系列データを与え、一次元不定流計算を行った。水位の初期条件は、植松橋水位・流量観測所、熊谷水位観測所 (76.4km)、大芦橋水位・流量観測所に対応する断面に、初期設定水位 (境界条件で設定した開始時刻における各断面の実績水位) を与え、他の断面には 3 地点の初期設定水位から線形補間で与えた。セグメント 1 (扇状地) における粗度係数 $n=0.035$ を全断面に与えた。各断面は上流端から下流端までを 400m ピッチで与えた。

解析対象洪水は 3 年未満確率、3~5 年確率、5~10 年確率に相当する洪水を選定した。計算上流端である植松橋水位・流量観測所地点での確率洪水流量は、寄居地点での確率洪水流量 (表 2・3) と同等であるとした (寄居観測所と植松橋観測所の流域面積にあまり違いがないことより)。その上で、図 2・8 に示すように、流量ハイドログラフの特徴 (洪水継続期間、洪水ピーク流量) が異なる 3 洪水 (2001 年 8 月 21~23 日洪水、2002 年 7 月 10~13 日洪水、2004 年 10 月 8~12 日洪水) を解析対象洪水として選定した。計算精度は熊谷水位観測所における上記 3 洪水の実績水位と比較することで検証した。

(5) 水理計算による洪水攪乱影響の推定

対象地点の最大摩擦速度が中央粒径の限界摩擦速度 u_{*c} を上回る場合、土砂が移動するとした。ツルヨシの植生基盤の土砂が移動したとき、ツルヨシが攪乱を受けると考えた。中央粒径土砂が移動する洪水が何年確率洪水かにより、洪水攪乱頻度を推定した。移動限界を推定する際には摩擦速度 u_* を

$$u_* = \sqrt{ghi_e} \quad (2 \cdot 6)$$

で与えた。ここに、 i_e : エネルギー勾配である。限界摩擦速度 u_{*c} は、岩垣の式(土木学会²⁸⁾)における粒径 d が 0.303 cm 以上の場合の以下に示す式より求めた。

$$u_{*c}^2 = 80.9d \quad (2 \cdot 7)$$

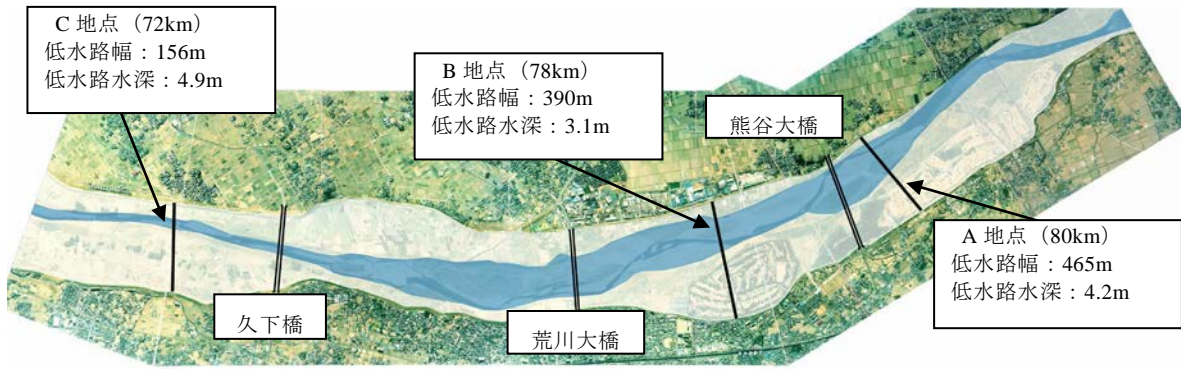


図 2・4 対象地点の概要（各地点の河口からの距離、低水路幅、低水路水深を示す）

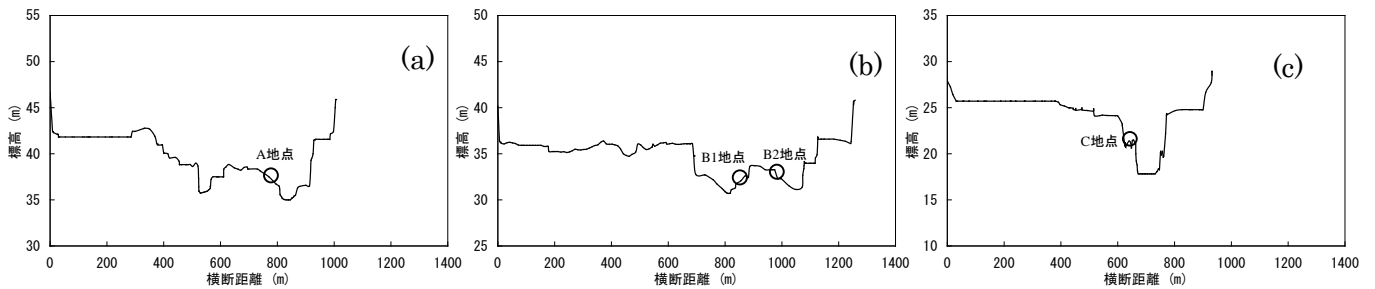
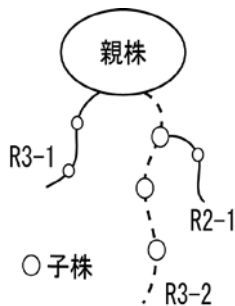


図 2・5 対象地点の横断面図

(a) A 断面、(b) B 断面、(c) C 断面



R3-1	親株から出ている1年目のランナー
R3-2	親株から出ている2年目のランナー (昨年親株から出たと思われる, 枯れているランナー)
R2-1	R3-2上の定着した子株から出ている 1年目のランナー

図 2・6 ランナーの分類

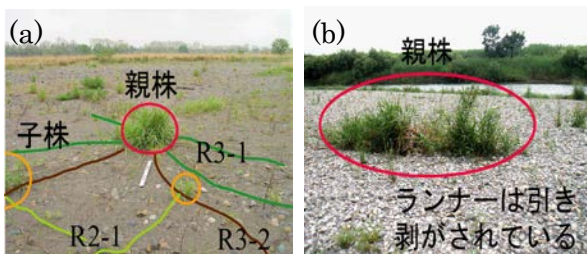


図 2・7 ツルヨシの繁茂状況

((a) B2 地点、(b) C 地点)

表 2・3 寄居水位・流量観測所における
各確率洪水年の流量

3年確率洪水	1150 (m ³ /s)
5年確率洪水	1900 (m ³ /s)
10年確率洪水	3000 (m ³ /s)
20年確率洪水	5000 (m ³ /s)
50年確率洪水	9000 (m ³ /s)

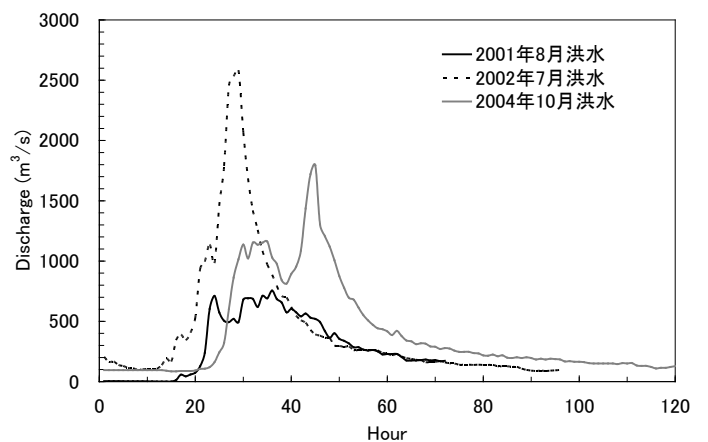


図 2・8 洪水時流量観測値（植松橋観測所）

2. 2. 3 解析結果

(1) 各対象地点における粒度分布調査

図 2・9 に対象 3 地点の粒度加積曲線を示す (B2 地点のツルヨシ繁茂域でのデータも参考として示す)。A 地点は主に 1.5~9cm の礫で構成されている。中央粒径は 6cm と他の地点に比べて大きい。A 地点は溪谷部から扇状地区間へと移行する扇頂部分に位置する地点で、流速が速く、上流部から流れてきた粒径の大きい土砂が溜まりやすい地点に位置する。B1 地点は主に 1.5~7cm の礫で構成されている。しかし、ツルヨシが繁茂している付近(B2 地点)は河道横断方向の分級が進んでおり、細砂分が堆積していた。中央粒径はそれぞれ、4.9cm、0.8cm である。この B2 地点は、洪水時に流速が遅いことと、ツルヨシの繁茂域に水が乗り上げて水位・摩擦速度が低いため植物が流失するには至らず、減衰期にツルヨシが細砂分を補足しやすい地点と考えられる。また、B 断面は A 断面と同様に蛇行流路に分類される区間の河道断面である。一方、C 地点は主に 1~6cm の礫で構成されている。中央粒径は対象地点の中で最も小さく 3.6cm である。これは縦断方向の分級により、粒径の大きいものは上流に堆積したためと考えられる。C 断面は川幅が狭窄している箇所、ツルヨシが繁茂する C 地点は洪水時の水深、流速の速い地点でもある。

(2) 洪水攪乱影響を受けやすい地点の推定

a) ツルヨシの形態的特長による推定

表 2・4 に各対象地点のツルヨシの形態的特長 (親株の葉茎密度・高さ、R3-1 の本数・長さ、3 種類のランナーの本数割合、洪水攪乱影響の大小) を示す。A 地点では群落を形成しているツルヨシは少なく、主に株単位で低水路沿いにライン状に繁茂していた。また、各ランナーの割合に着目すると、B 地点に比べて、R2-1 (ランナー上に定着した株から出る 1 年目のランナー) の割合が低かった。親株の葉茎高さは低く、密度は高い。以上のことから、この A 地点は洪水攪乱影響を受けやすい地点であると考えられる。また、B 地点のツルヨシは砂質分が堆積した地点に繁茂していた。これは、洪水時に若干水に浸かるものの、土砂移動攪乱は受けずに細砂分が堆積したためと考えられる。B 地点は群落で繁茂しているものが多く、A 地点に比べ R2-1 の割合が高く、親株の葉茎高さ、密度も大きい。群落を拡大させる傾向が強いことから、洪水攪乱影響を受けにくい地点であると考えられる。一方、C 地点はツルヨシ含め植生があまり繁茂しておらず、ツルヨシの繁茂が見られたのは群落を形成しているものだけであった。ランナーの割合のうち R3-2 が 0% であった。これは、洪水攪乱影響が大きいことが考えられる。現地観測において、群落内のランナーはすべて流下方向に剥がされていた。そのため、枯れているランナーである R3-2 は流失してしまったためだと考えられる。R2-1 は R3-2 上の子株から出るランナーのため、R2-1 も 0% である。

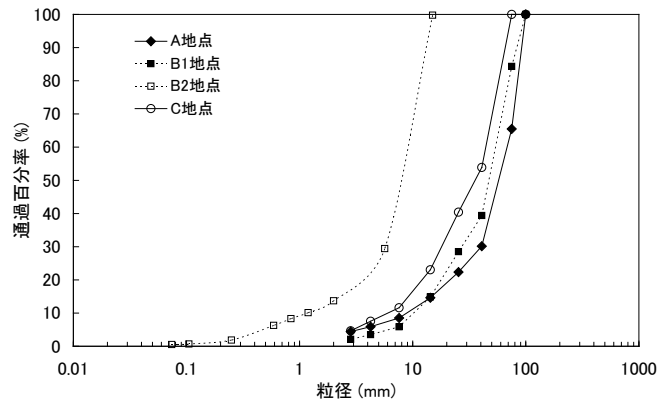


図 2・9 対象 3 地点の粒径加積曲線

表 2・4 各対象地点のツルヨシの形態的特長

		A地点	B2地点	C地点
親株の葉茎	密度(本/株)	66.0±21.7	53.3±17.1	22.3±7.2
	高さ(m)	0.65±0.12	0.98±0.02	0.72±0.15
ランナー (R3-1)	本数(本)	2.5±1.7	1.7±2.1	1.6±0.8
	長さ(m)	5.9±2.9	4.7±3.7	5.5±1.8
3種類のランナー の本数割合	R3-1	53%	50%	100%
	R3-2	42%	30%	0%
	R2-1	5%	20%	0%

b) 水理計算による推定

表 2・5 に各対象地点における中央粒径の限界摩擦速度と各対象洪水の最大摩擦速度の比較を示す(色付のものは最大摩擦速度が限界摩擦速度を上回っているものである)。3 年未満確率洪水に対しては 3 地点すべて、ツルヨシの植生基盤の土砂は移動しなかった。B2 地点および C 地点は 3～5 年確率洪水のときに攪乱を受けることから、洪水攪乱頻度は 3～5 年確率とし、同様に A 地点の洪水攪乱頻度は 5～10 年確率とした。

c) 判定結果のまとめ

表 2・6 に 3 地点の洪水攪乱影響の推定結果(まとめ)を示す。表 2・6 より、ツルヨシの形態的特長測定による推定と水理計算による推定が符合する結果となった。この様に、洪水攪乱を頻繁に受ける地点では、洪水によりランナーが剥がれ、子株が定着できないため、ツルヨシのランナーの割合に影響を与えることが分かった。また、B2 地点のように洪水時に基盤となる土砂が流失しにくいところでは、ツルヨシの繁茂域に細砂が溜まりやすく、比高差の拡大や、砂州の樹林化における次のステップの植生が侵入しやすい基盤を造ることを示している。

表 2・5 洪水攪乱・土砂移動攪乱影響の推定（3地点）

	A地点	B2地点	C地点
ツルヨシの形態的特長からの推定	中	小	大
洪水攪乱	中	小	大
土砂移動攪乱	小	中	中

表 2・6 各地点における中央粒径の限界摩擦速度と各対象洪水の最大摩擦速度

（塗りつぶしは各地点の最大摩擦速度が限界摩擦速度を超えていることを意味する）

	A地点	B2地点	C地点
平均粒径 (m)	0.060	0.008	0.036
限界摩擦速度 (m/s)	0.22	0.08	0.17
2001年8月洪水 (3年未満確率流量)	0.140	-	0.161
2004年10月洪水 (3~5年確率流量)	0.215	0.164	0.336
2002年7月洪水 (5~10年確率流量)	0.242	0.191	0.358

2.2.4 まとめ

本章で得られた結果を以下に示す。

- (1) 異なる洪水攪乱を受ける地点において、ツルヨシの全体に占める各ランナーの割合や親株の生長量に違いがあることが確認された。
- (2) 各対象洪水の計算により得られた最大摩擦速度と限界摩擦速度の比較による洪水攪乱頻度と、ツルヨシの形態的特長から推定した攪乱影響の関係は同じ傾向を示した。
- (3) 洪水確率規模が3から5年の出水でランナーが抜けることがツルヨシ群落を大きくしない条件であると考えられる。

本章により、水理計算により得られた摩擦速度からツルヨシに与える洪水攪乱頻度とツルヨシの形態的特長、繁茂量・拡大幅とを関連付けられることが判明した。今後、ツルヨシが土砂堆積傾向に与える影響や土砂移動限界に与える影響だけではなく、洪水攪乱頻度・強度がツルヨシの生長に与える影響も加味した相互解析が可能となると考えられる。

3 樹木の破壊限界モーメントおよびせん断力に関する検討

3.1 木本の破壊を考慮した樹林化しづらい砂州の判定手法

3.1.1 はじめに

樹木の破壊に関しては、破壊形態として転倒破壊を評価する機会が多い。転倒破壊を評価する際には、樹木の引き倒し試験結果(リバーフロント整備センター¹⁰⁾)から得られた転倒限界モーメント(原典では倒伏と定義しているが破壊形態をより明確に表現するため、ここでは転倒と定義した)が用いられている。樹木の破壊には主幹に働く曲げ応力、根鉢に働く転倒モーメント、根と地盤との間に働くせん断力等を考慮する必要があると考えられる。また、洪水外力による樹木破壊を検討する場合、特定の樹齢、水理条件下で検討していることが多い。しかし、樹木は経年的に胸高直径、樹高、繁茂状態が変化するため、洪水攪乱を受ける時点での繁茂状態を評価する必要がある。

本章では樹木の破壊条件を明らかにする第一段階として、①樹木の破断実験により両種の破断限界を明らかにすること、②洪水攪乱規模と樹齢による樹木破壊限界の変化を把握することを目的とする。

3.1.2 樹木の破断限界に関する調査および実験方法

(1) 洪水による破断樹木の痕跡調査

出水によって破壊された樹木の痕跡調査は、2006年10月出水の後に、荒川の沖積河道区間に位置し、樹木の繁茂状態が異なる3地点(熊谷大橋地点(80 km)、荒川大橋地点(78 km)、久下橋地点(72 km))の砂州で行なった。対象とした樹木は上記3地点において優占的に繁茂がみられたタチヤナギおよびハリエンジュである。本調査においては、樹木の破壊形態として主幹に加わった曲げ引張り応力が樹木素材の曲げ引張り破壊限界応力を超えたために折れる「破断」と、主幹に加わった曲げ引張り・圧縮応力が弾性限界値を超え塑性変形域まで達し残留ひずみが残ったと考えられる「倒伏」が確認された。それぞれの破壊形態の樹木に対して、痕跡水深 H_t (m)、胸高直径 d_{BH} (m)、樹高 h_v (m)を測定した。なお、 H_t は流下物(枝やゴミ)の痕跡を、 d_{BH} は河床から1.2 m高さにおける主幹直径を計測した。

(2) 樹木の破断実験

樹木の破断実験はアムスラー型万能材料試験機(東京衡機製造所AU-50 最大荷重500 kN)を用いて行った。対象樹種についてそれぞれ6本ずつ、載荷点の直径が2.7~10.7 cm、2.6~12.0 cmの範囲の幹を試験体として用いた。支点間距離 L (m)を定め、 L の中央に集中荷重を加える三点曲げ試験を実施した。試験体に載荷を開始してから一定時間間隔で荷重、載荷点断面における鉛直方向変位を計測し、樹木が破

断（本研究においては表皮破壊）した時の荷重 P (kN)、載荷点断面における鉛直方向変位 l (mm)を把握した（実験の詳細は田中ら³⁰⁾参照）。また、樹木が破断した時の曲げモーメントを破断限界モーメント M_{bc} (kN・m)と定義した。 M_{bc} は破断断面の半径 R (m)、直径 d (m)、限界曲げ応力 σ_{max} (N/m²)、断面2次モーメント I (m⁴)とし断面を円形とすると、

$$M_{bc} = \frac{PL}{4} = \frac{\sigma_{max} I}{R} = \frac{\sigma_{max} \frac{\pi R^4}{4}}{R} = \frac{\pi}{4} \sigma_{max} R^3 = \frac{\pi}{32} \sigma_{max} d^3 = kd^3 \quad (3 \cdot 1)$$

と表され、 d の3乗に比例することがわかる。ここに、 k は樹種により異なる定数である。

3. 1. 3 樹木の破壊限界に関する解析方法

(1) 樹木の抵抗特性の評価

樹木に作用する抗力 F (N)は田中・佐々木³¹⁾と同様に、水深方向に微少面積 $dA=d(z)dz$ ($d(z)$:河床からの鉛直方向高さ z における主幹と枝の幅の和、 dz :鉛直方向の分割幅)を考慮して積分し、

$$F = \int_0^h \frac{1}{2} C_d(z) \rho u(z)^2 d(z) dz = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz \quad (3 \cdot 2)$$

とした。ここに、 $C_d(z)$ 、 $u(z)$:それぞれ、高さ z における抗力係数と流速(m/s)、 C_{d-ref} :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} :河床からの高さ1.2mの位置における主幹幅(m)、 H :水深(m)、 ρ :水の密度(kg/m³)である。本研究では、 $u(z)$ の鉛直方向変化は考慮せずに、断面平均流速 U (m/s)を用いた。さらに、葉の付加投影面積・付加抗力影響を含む合成抗力係数 C_{d-all} を次式で定義した。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_{d-all} U^2 d_{BH} h \quad (3 \cdot 3)$$

$$C_{d-all} = C_{d-ref} \frac{1}{h} \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz = C_{d-ref} \frac{1}{h} \int_0^h \alpha(z) \beta(z) dz \quad (3 \cdot 4)$$

$$\alpha(z) = \frac{d(z)}{d_{BH}}, \quad \beta(z) = \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} \quad (3 \cdot 5)$$

ここに、 $\alpha(z)$:樹形(幹・枝)の相違(幹・枝の高さ z における幹・枝幅の総和を胸高における幅 d_{BH} で基準化した比)を表す付加係数、 $\beta(z)$:葉層による付加抗力を表す付加係数である。現地砂州に繁茂するタチヤナギは地際から株状に幹を多く生長させることから、地際から枝下高さ h_b (本研究では地際から葉層までの高さ)までの $\beta(z)$ は、武村・田中²⁴⁾より1.5と設定した。ハリエンジュに関しては、株状での繁茂が見られなかったため、地際から枝下高さ h_b までの $\beta(z)$ は1.0として与えた。葉層($h_b > z > h_v$)については、両種とも福岡・藤田²⁶⁾を参考に1.25とした。(図3・1)

樹木特性調査では、式(3・2)~(3・5)で定義される d_{BH} を直接計測し、 $\alpha(z)$ に関しては樹木の画像解

析によって鉛直分布を算出した。画像解析にはタチヤナギ・ハリエンジュともに樹齢 1~10 年の範囲で、それぞれ 12 本、14 本に対して実施した。実際に積分を行う際は、図 3・1 の dA_i を 0.5 m 刻みの水平方向投影面積とし合成抗力係数 C_{d-all} に反映させた。

(2) 樹木に作用する抗力モーメント M の算出方法

出水時の一次元不定流計算から、3 地点のヤナギ・ハリエンジュの繁茂地点における水深を算出し、両種に作用する抗力モーメント M (Nm) を以下の式より算出した。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad (3 \cdot 6)$$

式(3・6)から得られる抗力モーメント M と破断限界モーメント M_{bc} とを比較することによって破断判定を行った。また、抗力モーメント M を算出する際に、樹齢ごとに胸高直径 d_{BH} 、樹高 h_v が変化するため、胸高直径および樹高を樹齢の関数として与えた (田中ら³⁰⁾)。また、繁茂地点の水深を算出する際に用いた出水の一覧を表 3・1 に示す。なお、表 3・1 において生起年が明記されていないデータに関しては、観測地点より上流に位置する寄居水位・流量観測所(94.7km)の 1955~2005 年の年最大流量をもとに Weibul 法を用いて確率洪水年に対応する流量を推定し、調査地点断面で等流計算を行うことによって樹木繁茂地点の水深を推定した。また、式(3・6)に示される断面平均流速 U は等流状態を仮定し、平均流速公式を用いて Manning の粗度係数を $0.035 \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$ 、河床勾配を $1/375$ として与えた。

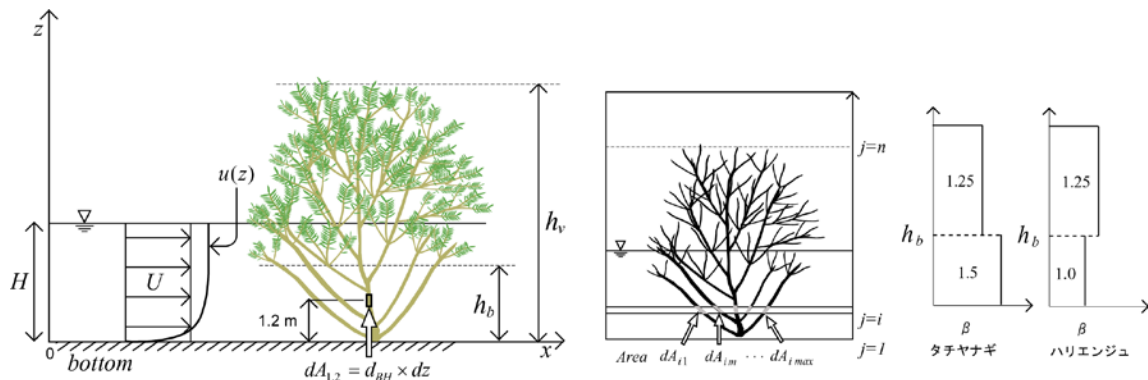


図 3・1 合成抗力係数 C_{d-all} の定義図 (上図の $dA_{1,2}$ は胸高における面積 $=d_{BH}dz$ を表す。下図左の各分割領域における面積 dA_{im} を足し合わせ、その層における面積とする。)

表 3・1 解析に用いた出水一覧

生起年	地点名	樹木繁茂地点の水深 h (m)	確率洪水年
2001	熊谷大橋	1.0	1.5
	荒川大橋	0.3	
	久下橋	1.1	
2004	熊谷大橋	1.7	2.5
	荒川大橋	0.9	
	久下橋	4.1	
2002	熊谷大橋	2.2	4.0
	荒川大橋	1.3	
	久下橋	4.5	
-	熊谷大橋	2.6	8.8
		2.9	14.2
-	荒川大橋	3.1	6.8
		3.3	10.7

3. 1. 4 調査および解析結果

(1) 樹木の破壊限界の推定

タチヤナギ・ハリエンジュの破断実験より、それぞれの破断限界モーメントを求めた結果を図3・2に示す。この図より、今回破断実験を行った直径の範囲では、両種とも胸高直径の3乗に比例することが確認できる。また、樹種による破断限界モーメントの違いに注目すると、ハリエンジュの方が破断しやすい。これはハリエンジュの方が曲げ剛性 EI (Nm^2)が小さいためであると考えられる。図3・2には、樹木の転倒に着目した引き倒し試験によって得られた転倒限界式 $M_{uc}=24.5d_{BH}^2$ (Nm) (d_{BH} はcm単位で代入)も合わせて示した。これと破断実験より得られた破断限界式を比較すると、転倒より破断が先に生じるのは、タチヤナギ・ハリエンジュに関してそれぞれ、直径 $d=9\text{cm}$ 程度、 $d=12\text{cm}$ 程度であることがわかる。ここで、現地調査で破断が確認されたタチヤナギに作用した抗力モーメントも合わせて示した。これらのプロットは破断実験より得られた破断限界モーメントよりも大きな値となっている。その理由として、現地調査で確認された破断は完全に幹が折れているのに対し、破断実験では実験装置の制約から表皮破壊を対象としているためであると考えられる。さらに、現地に繁茂するタチヤナギに関しては、A点で転倒よりも先に破断が生じているという事実から、転倒限界式は従来用いられている転倒限界式よりも上側にシフトすると考えられる。そのことから、タチヤナギに関しては転倒限界式を $M_{uc}=80.0d_{BH}^2$ とする(係数は起こりうる一番小さな値として設定)と、破断限界式との交点が右側に移動し、胸高直径 d_{BH} が25cm程度までは破断が先に生じることがわかる。

以上より、破断限界線は樹種ごとに異なる物性値によってある程度決定されるが、転倒限界線は樹木の生育基盤や根の張り方によって上下することがわかる。そのため、樹木の破壊を破断と転倒に区別して検討する際には、破断限界式・転倒限界式を正確に見積もり、2つの線の交点を把握することが重要であると考えられる。なお、ハリエンジュに関しては今回の出水による破断が確認されなかったためタチヤナギと同様な交点を求めることはできなかった。そのため今後出水による破断が確認された後に追加調査を行う必要がある。

(2) 樹木に作用する抗力モーメントと破壊最大樹齢との関係

図3・3に洪水による破断樹木の痕跡調査から得られた胸高直径 d_{BH} と痕跡水深 H_t の関係をプロットした。また、図中に示した実線は、各水深時の破断最大樹齢より胸高直径 d_{BH} を推定し、破断最大樹齢に対応する水深より得たものである。この実線より上側の領域では樹木が破断されることを意味しており、解析より得られた破断限界(実線)は現地の破断痕跡の状況を概ね満足している。一方点線は、転倒限界式に関して破断限界式と同様の手順で得られるものである。これら2つの式から得られる曲線を比較すると、転倒限界式では、胸高直径 d_{BH} が小さい領域($d_{BH}=2\text{ cm}$ 程度)、大きい領域($d_{BH}=7\text{ cm}$ 程度)において現地の状況と異なる結果を示していることから、従来の転倒限界式では破断を表現できない。

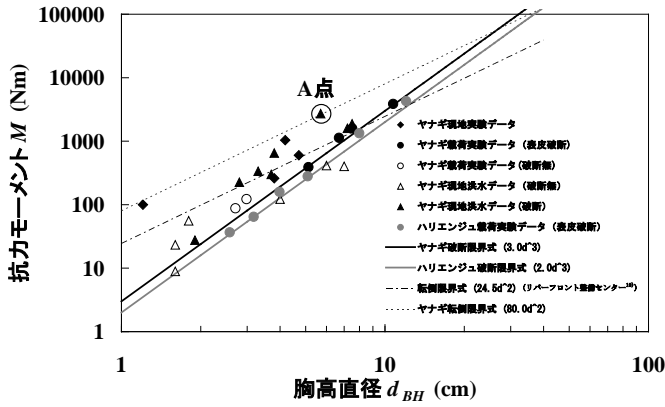


図3・2 タチヤナギ及びハリエンジュの胸高直径 d_{BH} と抗力モーメント M の関係: 破断限界モーメント M_{bc} と転倒限界モーメント M_{uc} との比較

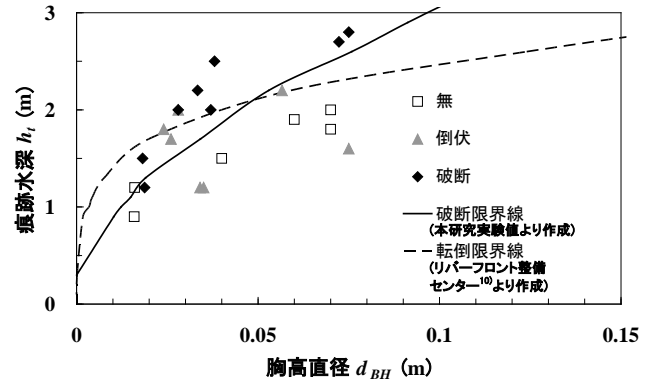


図3・3 タチヤナギの胸高直径と痕跡水深の比較(図中には、破断限界式、転倒限界式より推定した水深を示す)

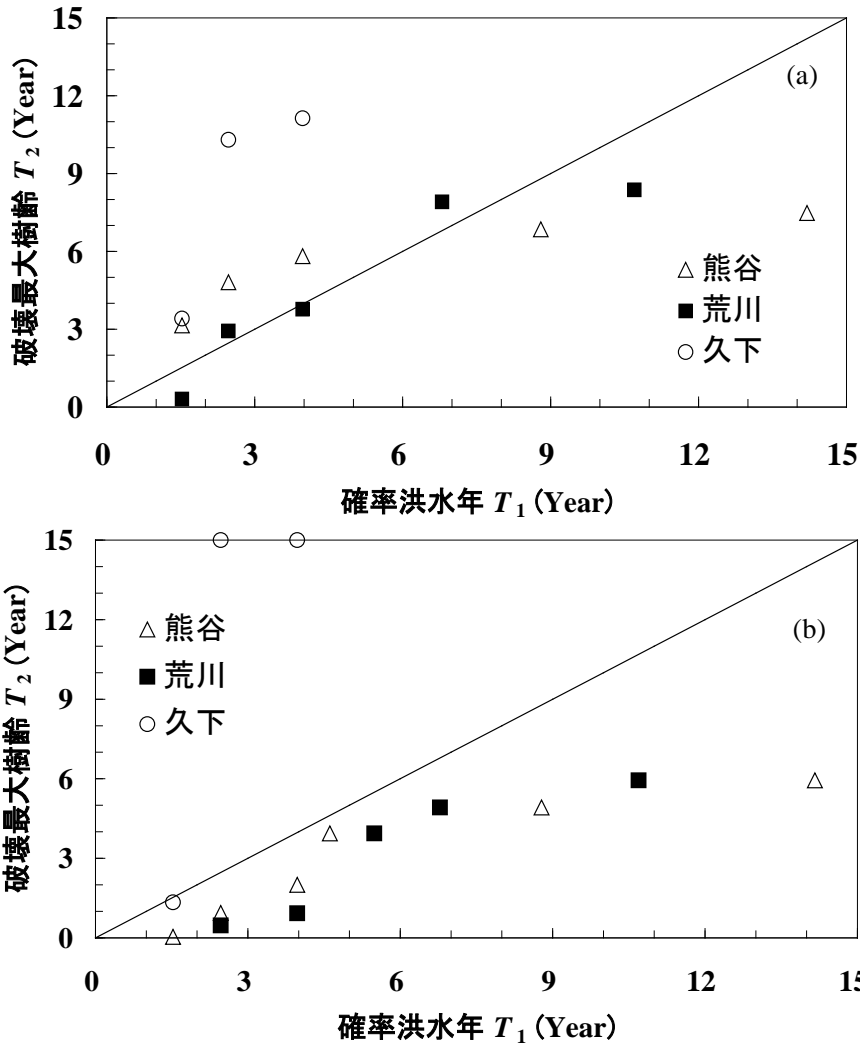


図3・4 洪水確率年(T_1)と破壊最大樹齢(T_2)の関係(破壊: 破断と転倒の先に生じたほうをさす)
(a) タチヤナギ、(b) ハリエンジュ

(3) 破壊最大樹齢と確率洪水年との関係に関する検討

上記解析より得られるヤナギおよびハリエンジュの破壊最大樹齢 (T_2) を縦軸に、洪水確率年 (T_1) を横軸にとり、3 地点における樹木の破壊特性をプロットした (図 3・4)。 $T_1 > T_2$ の場合、樹林化しやすい、 $T_1 < T_2$ の場合、樹林化しづらいと定義したところ、タチヤナギに関しては、荒川大橋地点では確率洪水年が 7 年程度までは $T_1 = T_2$ 付近にプロットされ樹林化傾向を判断しづらいが、確率洪水年が 7 年以降は樹林化しやすい傾向となる。熊谷大橋地点では確率洪水年が 4 年程度までは樹林化しづらい傾向であるが、荒川大橋地点同様、それ以降になると樹林化しやすい傾向となることがわかる。久下橋地点においては樹林化しづらい傾向であった。また、ハリエンジュに関しては、繁茂が確認された荒川大橋地点・熊谷大橋地点において樹林化しやすい傾向であった。また、久下橋地点においてもタチヤナギの繁茂地点と同じ位置にハリエンジュが繁茂していたと仮定した場合、確率洪水年が 4、5 年でも破壊最大樹齢が 15 年以上であったことから、ハリエンジュが繁茂することが困難であることが推測できる。これらは、現地観測における破壊状況や樹木の存在状況から概ね妥当と判断されることから、 T_1 と T_2 をもとにした分類は樹林化しやすさを判定するのに有効な指標となる可能性があることが示された。

3. 1. 5 結論

本章によって得られた結果を以下に示す。

- ① タチヤナギ・ハリエンジュの破断実験より、両種の破断限界モーメントは直径の 3 乗で概ね表現できること、同じ胸高直径の場合はハリエンジュの破断限界値のほうが低いことが明らかとなった。
- ② タチヤナギに関して、異なる樹齢 (胸高直径、樹高)、水深を考慮して算出した抗力モーメントと破断限界モーメントとの比較から得られた破断条件は、出水後の調査地点で確認された破断状況を概ね満足していたことから、本研究で用いた抗力モーメントの算出手法は妥当であると考えられる。
- ③ 樹林化しやすい砂州の判定法として、確率洪水年 T_1 と破壊最大樹齢 T_2 をもとにした手法が有効である可能性が示唆された。

3.2 数値解析による砂州上植物の流失条件の把握

3.2.1 はじめに

3.1章では、木本の破壊を樹齢と洪水攪乱頻度に注目して解析を行った。しかし、この解析手法には基盤そのものが洗掘などの影響をうけて、破壊限界値が変化するプロセスが含まれていない。そのため礫層に繁茂した樹木の流失限界についてより多くの実績が必要である。そこで、本章では、継続的な観測によって植生の繁茂状況等データの蓄積がなされている荒川の熊谷大橋上流の砂礫州を対象として、洪水前後の植物の繁茂状況より確認される流失実績をもとに、植物の流失条件をより詳細に把握することを目的とする。

3.2.2 数値解析方法

細田ら³²⁾によって開発された一般化座標系を用いた平面流計算法に、Takemura and Tanaka³³⁾と同様に抗力項を加えた微分方程式を使用した。粗度係数 n は2.1章の式(2・3)と同様に、粒径の関数として0.035とした。また、境界条件として、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・流量観測所の実測流量、下流端には熊谷水位観測所の実測水位を与えた。以下に連続式、運動方程式を示す。

$$\theta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (3 \cdot 7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ_x}{J} \right) = & -gh \left(\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_x}{\rho J} - \frac{f_x}{\rho J} + \\ & \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h) \end{aligned} \quad (3 \cdot 8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ_y}{J} \right) = & -gh \left(\frac{\xi_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_y}{\rho J} - \frac{f_y}{\rho J} + \\ & \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v'^2}h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v'^2}h) \end{aligned} \quad (3 \cdot 9)$$

ここに、 θ ：空隙率、 t ：時間、 J ：ヤコビアン、 (U, V) ：流速ベクトルの反変成分、

(u, v) ：水深平均流速、 (Q_x, Q_y) ：流量フラックス、 g ：重力加速度、 h ：水深、 ρ ：水の密度、 Z_s ：水位、 (τ_x, τ_y) ： x - y 座標系の底面せん断応力の成分、 $-\overline{u'^2}$ 、 $-\overline{u'v}$ 、 $-\overline{v'^2}$ ： x - y 座標系の水深平均レイノルズ応力、 (f_x, f_y) ：単位面積あたりの植生抵抗である。ここで植生抵抗は、3.1章と同様の方法で評価した。

3. 2. 3 水位の検証

最大流量時の対象砂州における流速コンターおよび流速ベクトル、水深コンターを図3・5(a)、(b)に示す。こうした計算結果がどの程度洪水を再現しているのかを二次元分布のまま検証することは難し

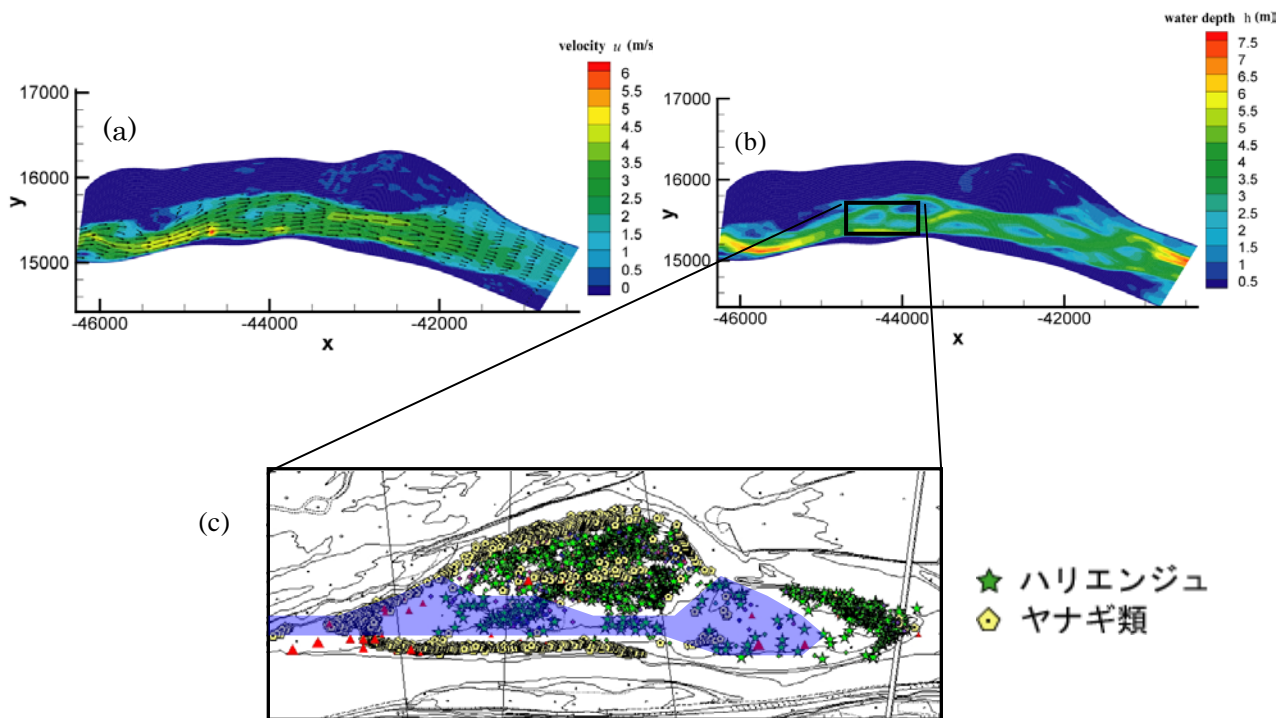


図3・5 解析区間の最大流量時における流況および対象砂州の樹木繁茂状況

(a) 流速のコンター図およびベクトル図、(b) 水深のコンター図、(c) 対象砂州の洪水前の植生分布(青色部分は洪水によって流失した樹木群の概略位置)((a)、(b)とも横軸 X 、縦軸 Y は平面直角座標系の座標値を示し単位は m であり、(c)の植生分布図は荒川上流河川事務所の調査結果を用いた)

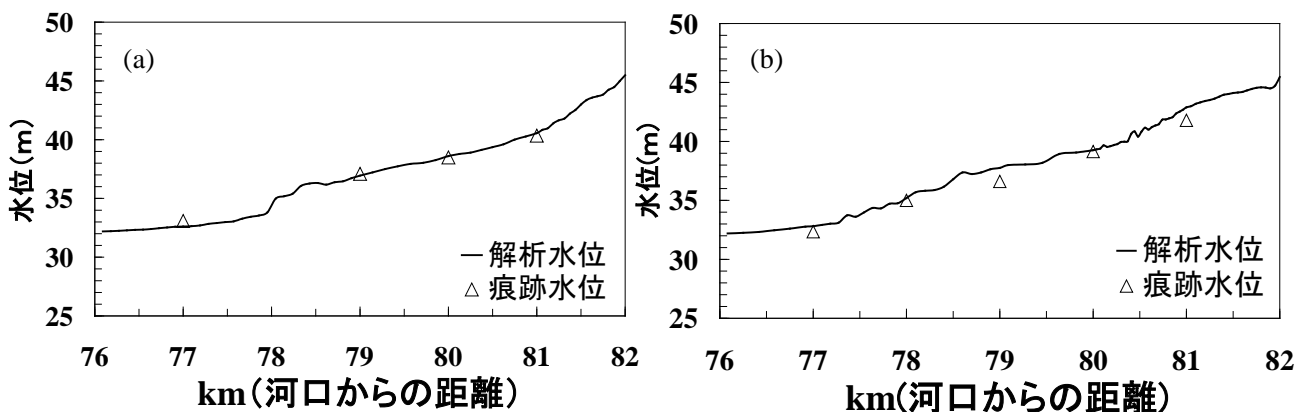


図3・6 2007年9月洪水の解析区間における解析水位と痕跡水位(A.P.)との比較

(a) 左岸、(b) 右岸

いため、解析の最大水位と実際の洪水時の痕跡水位とを比較し計算の検証を行った結果を図3・6に示す。痕跡水位は洪水後の流下物の分布状況をもとに右岸、左岸1km間隔で計測し、解析水位は解析時間内における各グリットでの最大の水位とした。その結果、解析水位は痕跡水位を概ね満足していることがわかる。しかし、左岸で痕跡水位よりも解析水位が小さい区間があるが、今回の解析では河床変動を考慮していないため、痕跡水位よりも大きくなったと考えられる。

3.2.4 対象樹木・草本の流失限界

(1) 樹木の流出限界モーメント

2007年9月の出水より、図3・5(c)に示すように、流失・未流失の樹木を把握し、その樹木の抗力モーメントを解析により算出した。熊谷砂州上のハリエンジュとタチヤナギの流失限界を把握した(図3・7(a)、(b))。この図から従来の流失限界値よりも高い値で未流失の場合が存在することがわかる。そのため、今回対象としたような砂礫州上の樹木の流失限界線は図中の点線で示したように、従来の流失限界値よりも大きくなると考えられる。

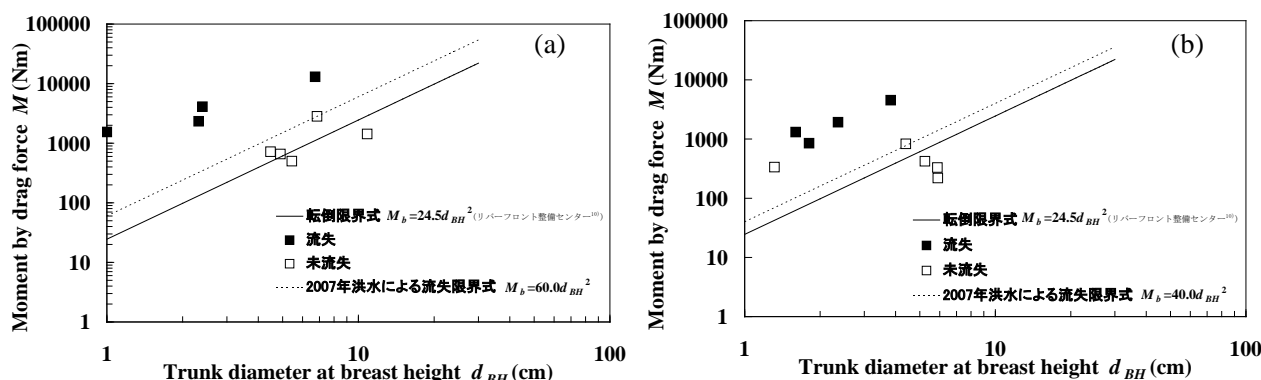


図3・7 樹木の胸高直径と数値計算より算出した抗力モーメントの関係

(a) タチヤナギ、(b) ハリエンジュ

(2) 各種植物の流失限界せん断力

2006年10月、2007年9月の出水より、熊谷砂州上の樹木、草本の流失限界となるせん断力を把握した。対象植物として、熊谷砂州に繁茂する代表的な樹木(タチヤナギ、ハリエンジュ)、草本(シナダレスズメガヤ、ツルヨシ)の四種類を選定した。各植物の流失実績と解析により得られたせん断力をもとに各植物の流失に必要なせん断力を把握した。2006、2007年の2出水時に各植物の繁茂地点に作用したせん断力を図3・8(a)~(d)に示す。未流失のせん断力のうち、最大値を流失限界せん断力と定義すると、シナダレスズメガヤでは $55(\text{N}/\text{m}^2)$ 、ツルヨシでは $120(\text{N}/\text{m}^2)$ 、ハリエンジュでは $75(\text{N}/\text{m}^2)$ 、タチヤナギでは $67(\text{N}/\text{m}^2)$ のせん断力が必要であることがわかる。また、シナダレスズメガヤは、未流失(荒川大橋・

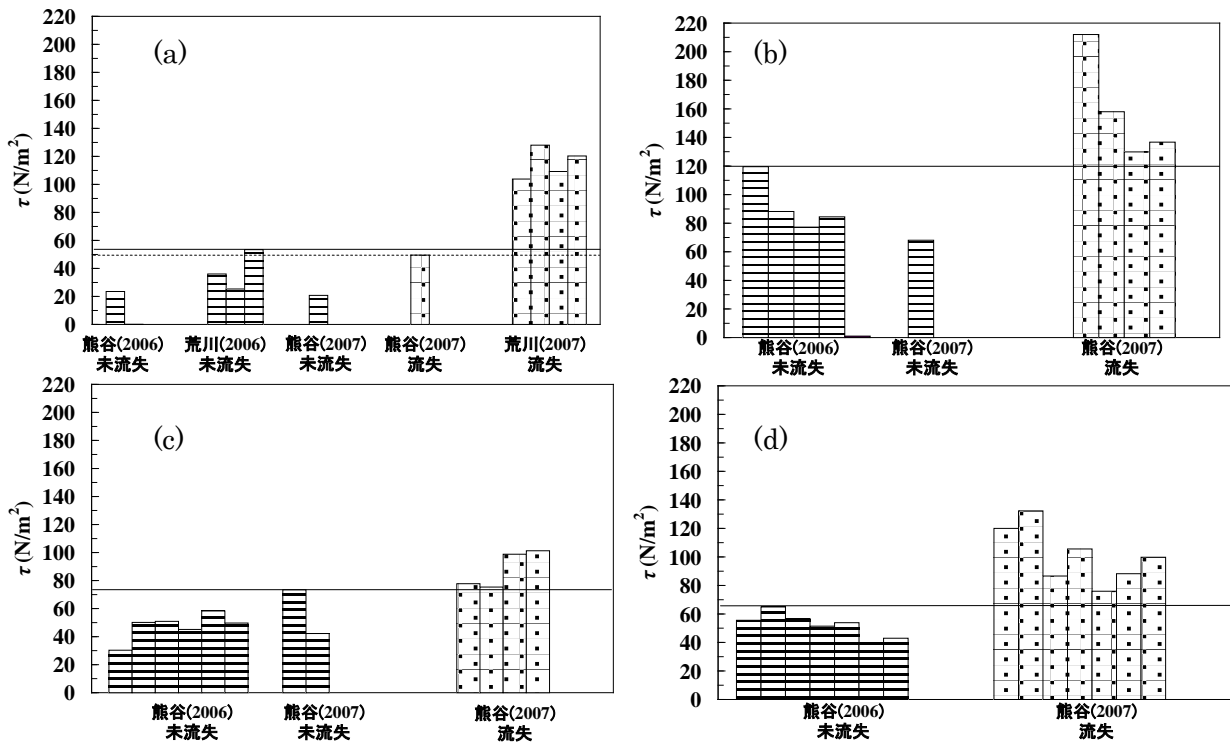


図 3・8 2006、2007 年の洪水解析より得られた各植物繁茂位置における底面せん断力 τ と流失実績との比較から得られる流失限界せん断応力 τ_c

(a) シナダレスズメガヤ、(b) ツルヨシ、(c) ハリエンジュ、(d) タチヤナギ

2006 年洪水時 $\tau=55\text{N/m}^2$ の場合のせん断力が、流失(熊谷大橋・2007 年洪水時 $\tau=50\text{N/m}^2$) の場合のせん断力を上回るという矛盾が生じた(図 3・8 (a) の実線と点線)が、熊谷大橋地点は荒川大橋地点に比べシナダレスズメガヤ生育基盤の粒度が細かく流失しやすかったことが考えられる。

また、得られた各植物種の流失限界せん断力 τ_c より、50% 粒径 (d_{50})、84% 粒径 (d_{84}) の無次元掃流力 τ_{*50} 、 τ_{*84} を以下の式(3・10)より算出し、それぞれの無次元限界掃流力 τ_{*c50} を 0.06、 τ_{*c84} を式(3・11) (河村³⁴⁾)より算出した。84% 粒径の無次元限界掃流力は Egiazaroff の式を用いた。

$$\tau_{*i} = \frac{H_{\max} I_e}{S d_i} \quad (3 \cdot 10)$$

$$\frac{\tau_{*c84}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10}(d_{84}/d_{50})} \right]^2 \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} \right) \quad (3 \cdot 11)$$

ここに、 H_{\max} 、 I_e 、 d_i はそれぞれ、各植物種が繁茂していた地点の最大水深(m)、エネルギー勾配、粒径(m)、 S ：土粒子の水中比重である。粒径および無次元掃流力の下付文字 i は 50% 粒径、84% 粒径の場合それぞれ、50、84 である。

表 3・2 に荒川と旭川(眞田ら³⁵⁾)における、 τ_{*50} 、 τ_{*84} と、それぞれの無次元限界掃流力 τ_{*c50} 、 τ_{*c84} との比較結果を示す。植物繁茂地点の 50% 粒径が移動すれば植物も流失すると定義した場合、どのケースに

においても τ_{*50} が τ_{*c50} 程度以上であり、実際に流失したという事実と合致している。しかし、84%粒径が移動すれば植物も流失すると定義した場合、荒川の草本類(シナダレスズメガヤ・ツルヨシ)に関しては流失実績と合致しているものの、木本類の場合は τ_{*84} が τ_{*c84} よりも小さい値となり流失実績と矛盾する。この理由として、①砂礫州上において30箇所程度粒度分布を洪水前に把握しておいたが、今回流失が確認された植物の繁茂地点そのものの粒度ではないこと(そのため荒川の3つの植物種は参考値扱いとした)、②樹木周辺は局所流が生じるため、数値計算で算出されたせん断力よりも大きなせん断力が作用していた可能性があること、③樹木周辺の局所流で洗掘を受けることによって、樹木根茎の一部が支持力を失い流失しやすくなっていた可能性があること、④側岸侵食で生育基盤が流失することによって支持力を失い流失したこと、等が考えられる。

表3・2 無次元掃流力 τ_{*50} 、 τ_{*84} とそれぞれの無次元限界掃流力 τ_{*c50} 、 τ_{*c84} との比較

対象河川	対象地点	植物種	τ_c (N/m ²)	τ_{*50}	τ_{*c50}	τ_{*84}	τ_{*c84}	I_b ***
荒川	荒川大橋地点	シナダレスズメガヤ	55	0.243*		0.113*	0.081	1/375
	熊谷大橋地点	シナダレスズメガヤ	50	0.157		0.120	0.066	
	熊谷大橋地点	ツルヨシ	120	0.093		0.071	0.066	
	熊谷大橋地点	ヤナギ	67	0.052*	0.060	0.039*	0.066	
	熊谷大橋地点	ハリエンジュ	75	0.057*		0.047*	0.064	
旭川**	祇園試験区	-	40	0.035~0.062		0.024~0.034	0.069~0.075	1/670

* 参考値, ** 眞田ら³⁵⁾をもとに算出, *** 式(3・10)の計算では I_e を用いた

3.2.5 まとめ

本章では、河川における洪水の様子を再現し、観測砂州における、せん断応力を算出し、樹木特性を考慮した抗力モーメントの把握を試みた。また、2007年9月の台風9号により流失されなかった樹木は、どのくらいの流量規模で流失されるかを検討した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) 本章で調査した河道内の砂州は、旧建設省による樹木引張試験⁹⁾が行われた高水敷よりも粒径は大きい。そのため、砂州での限界せん断力は、高水敷よりも大きくなり樹木は抜けにくくなる。今回の解析結果では砂州内のタチヤナギ、ハリエンジュ共に既往研究の限界式¹⁰⁾よりも大きな値で樹木が流失すると考えられた。
- 2) 当該河道内砂州に繁茂するシナダレスズメガヤの流失限界せん断力は約 55(N/m²)と考えられる。また、ツルヨシでは 120(N/m²)、ハリエンジュでは 75(N/m²)、タチヤナギでは 67(N/m²)と考えられる。どの場合においても、 τ_{*50} が τ_{*c50} 程度以上であり、実際に流失したという事実と合致していた。しかし、84%粒径が移動すれば植物も流失すると定義した場合、荒川の草本類(シナダレスズメガヤ・ツルヨシ)に関しては流失実績と合致しているものの、木本類の場合は τ_{*84} が τ_{*c84} よりも若干小さい値となった。樹木の場合、局所流・側岸侵食も含めた検討が必要な可能性が示唆された。

4. 草本・木本の繁茂領域拡大および洪水による流失・破壊・再生を考慮した植生動態モデルの開発

4.1 はじめに

河道内の植生動態解析に関連し、流失限界の把握は重要である。大別すると、植生の生育基盤の流失によって植生の流失が生じるという考え方と、植生に作用するモーメントが流失限界モーメントを超えた場合に植生の流失が生じるという考え方がある。しかし、植生が流失しないと判断された場合でも、3.1章で示したように破断などの被害を受ける。3.1章で対象とした荒川の熊谷大橋上流の砂州で2006年洪水時に倒伏・破断した樹木の翌年(2007年9月)の再生長を調査した結果(田中ら³⁰⁾)を図4・1に示す。倒伏・破断を受け再生長した樹木の樹齢は、倒伏・破断を受けずに生長した樹木よりも1~2年程度若いものに相当する(図4・1(a))。樹高に着目すると、再生長はするものの倒伏・破断前の7~8割程度となる(図4・1(b))。このように、河道内植生遷移における破断・再生長は重要であり、流失による裸地化のみ考慮すると、洪水時における樹木抵抗を正しく評価していないことになる。長期的に河道内の植生動態を把握する際には、転倒・流失以外の破壊形態も考慮する必要があると考えられる。

そこで本章では、大規模な地形変化(砂礫州自体の移動)を伴わない洪水を対象とし、砂礫州上の植生の流失、破壊、回復および繁茂領域拡大機構を考慮した植生動態モデルを構築することを目的とした。

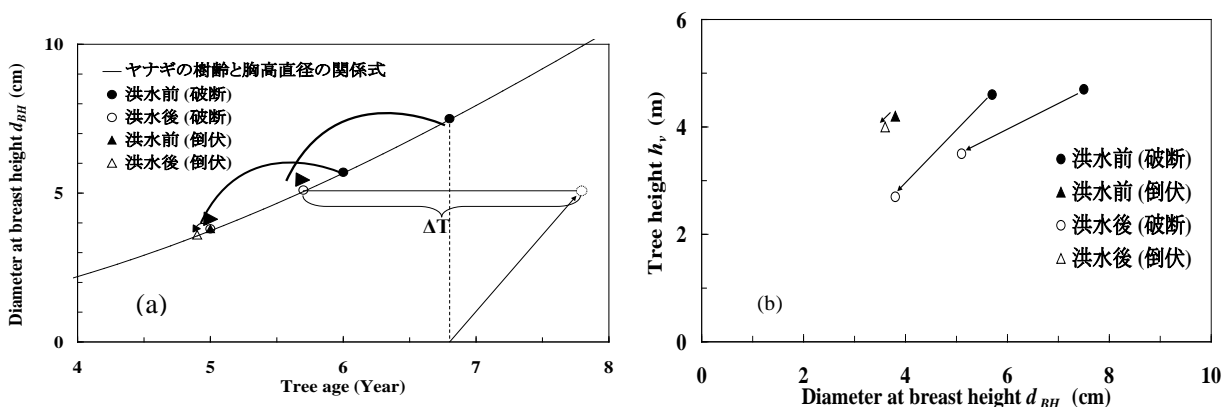


図4・1 タチヤナギの再生特性

(a)樹齢と胸高直径 d_{BH} の関係、(b)胸高直径 d_{BH} と樹高 h_v の関係

4.2 植生動態モデル概要

植生動態モデルは、①洪水による植生の破壊、②洪水時の洗掘・植生空間への土砂堆積、③植生の遷移、④植生の拡大、という4つの現象を統合した形でモデル化している。以下では、モデルの骨格となる上記4つの現象のモデル化について説明する。

(1) 洪水による裸地の維持および植生の破壊(草本・木本の流失と木本の破断)

洪水によって砂州上が攪乱されると、植生動態に関連して生じる現象として、①裸地を形成する基盤の移動(裸地の維持)、②草本・木本の流失(裸地への更新)、③木本の破断・倒伏(翌年の再生長による樹齢の巻き戻し効果)、がある(図4・1)。ある洪水によって上記3項目が生じるかどうかは以下のように判断する。①に関しては、砂州グリッドの摩擦速度 u_* (m/s)が、砂州グリッド毎に設定されている d_{84} の限界摩擦速度 u_{*c84} (m/s)を上回るかで判断する。 u_* 、 u_{*c84} はそれぞれ式(2・6)、式(2・7)より把握した。②草本・木本の流失に関しては、植物種毎に流失限界となる底面せん断力 τ_c を設定することで流失を判断した(流失限界せん断力 τ_c は3.2章の図参照)。③木本の破断・なぎ倒しに関しては、3.1と同様の方法で樹木に作用する抗力モーメント M を求め、ヤナギ・ハリエンジュそれぞれの破断限界モーメント M_{bc} と比較することによって判定した。ヤナギ・ハリエンジュの破断限界モーメント M_{bc} (Nm)は、3.1章の載荷試験結果を参考に式(3・1)より求めた。上記判定方法で破断・倒伏したと判断された樹木は、図4・1に示すように、翌年には破断・倒伏した時とほぼ同等の胸高直径、樹高となるため、樹齢が1年巻き戻される効果があるとして植生の遷移・拡大過程に考慮した。

(2) 洗掘と堆積

河床洗掘量は2007年9月の洪水後の現地調査より把握した。把握した洗掘深と当該地点における最大水深 H_{max} とを関連付けることによって、任意の水深に対する洗掘深の推定式を作成した(図4・2)。一方、対象砂州における土砂堆積は、①洪水時(特に洪水減水期)に土砂を堆積させるのは草本植生のみ、②当該砂州において、2006年の洪水時には草本空間内に細砂成分が堆積していたが、2007年の洪水時には細砂成分が堆積していなかった。細砂成分の輸送には、洪水波形や継続時間、上流域の崩壊の多寡など様々な要因があると考えられる。ここでは、流量規模が細砂成分の輸送を決定付けていると考え、ある流量規模を閾値として草本空間に細砂成分が堆積するかないかを判定することとした。すなわち、上述の2007年の洪水(最大流量 $3800\text{m}^3/\text{s}$)では堆積せず、2006年の洪水(最大流量 $1400\text{m}^3/\text{s}$)では堆積したことから、 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 以下の流量規模の洪水では草本空間内に細砂が堆積(10cmの堆積厚)すると仮定した。

(3) 植生の遷移

砂州のあるグリッドにおける植生の生長に伴う遷移は、①裸地領域に草本が入植、②草本領域に木本が入植(ハリエンジュ)、③裸地領域に木本が入植(ヤナギ)、の3種類を考慮した。

上記3項目で遷移の方向を仮定したが、どのような条件が整えば遷移が進行するかを仮定する必要がある。藤田ら¹⁶⁾は、本研究と同様に長期間にわたって植生動態予測が可能なシミュレーションモデルを開発している。その中で細砂成分の堆積厚が植生遷移に重要であるとしている。しかし、堆積厚を決定する細砂成分の輸送量に不確定性が強いこと、また、砂州において対象とした植物種を観測すると、しっかりと根付くために必要な細砂成分の堆積厚がそれほど必要無いと考えられることから、堆積厚ではなく単に何年同じ状態でその場所が維持されたかを遷移の条件とした。すなわち、①裸地から草本にな

るためには、裸地が更新されずに 2 年経過することが必要、②草本から木本(ハリエンジュ)になるためには、草本が流失されずに 2 年経過することが必要、とした。また、ヤナギに関しては観測対象砂州の状況から裸地にも入植可能であると判断し、③ヤナギが種子散布を行なう春先の平均水位と後述する対象砂州の平均平水位との間において裸地に木本(ヤナギ)が入植する、と仮定した。

遷移する際に、その場所が植生繁茂に適さない条件の場合もある。これに関して本研究では、植生の繁茂には平水位からの比高差が影響を及ぼすとした。実際にツルヨシ、ヤナギは比較的比高の低い低水路際に繁茂するのに対し、シナダレスズメガヤやハリエンジュは比高の高い場所に繁茂していた。従って、対象とした 4 種の繁茂限界となる比高差を知ることが必要である。この知見に関しては、末次ら⁴⁾の結果を参考にした。ここでは、①シナダレスズメガヤとツルヨシの繁茂限界比高差はおよそ 2m 程度、②ヤナギとハリエンジュの繁茂限界比高差はおよそ 2m 程度、とした。なお、計算対象とした砂州の平水位は熊谷水位観測所(距離標 76km)における 1972 年から 2001 年までの欠測を除く 22 年分のデータをもとに求めた。

(4) 植生繁茂領域の拡大

植生の繁茂領域の拡大を表現するために、植物種ごとに異なる拡大率 $K(\text{m/year})$ を用いた。その拡大率を決める際に、多摩川・千曲川で様々な植物種の拡大率を観測結果より推定している末次ら⁴⁾を参考にした。その結果から、本研究ではツルヨシは 4.5、シナダレは 4.0、ヤナギは 4.0、ハリエンジュは 1.0 として設定した。また、拡大の条件は、①草本は裸地にのみ入植可能、②木本は裸地・草本類に入植可能、③ ①、②の条件に該当しても、拡大する植物種の生育不可能な比高差の場合は入植不可、の三項目を仮定した。

4.3 計算条件

熊谷大橋上流に位置する砂州(距離標 80km)を対象とし、平成 12 年(2000)から平成 19 年(2007)の 8 年間に対し、植生動態モデルを適用した。平成 11 年(1999)の洪水で砂州上の概ね全ての植生が流失しているため、それ以前の正確な植生分布の把握が困難であるという観点から、2000 年を計算開始年として選定した。本モデルでは側岸侵食や大規模な河床変動に伴う砂州の平面形状の変化を含めるまでには至っていない。そこで、平成 11 年以降の砂州の形状がそれほど大きく変わっていないということを過去の航空写真により確認した(図 4・3)。対象洪水としては、上記計算期間の年最大流量を対象として計算を行なった。1 年に複数の洪水がある場合もあるが、その年で最も砂州上の植生に影響のあったものとして、年最大流量の洪水のみを対象とした。また、解析対象砂州の標高は、横断方向に 8m、流下方向に 50m 程度のグリッドを作成し、2007 年に得られた地表面の標高データを平均化することによって設定した。また、植生の初期条件は、計算開始年である 2000 年の航空写真をもとに設定した(砂州の比高の高い場所に樹木(ヤナギ属と判断した)が繁茂していたと判断した)。解析で対象とした植物種を表

4・1に示す I_V で表現する。

砂州の各グリッドにおける表層河床材料の粒径は、2006年に行なった砂州上の粒度分布調査結果より定めた。3.2で得られたツルヨシの流失限界せん断力 τ_c は 120 N/m^2 であり、この値から得られる移動限界粒径 d_{cri} を算出すると12cm程度であった。この値は当該砂礫州にツルヨシが繁茂していた地点の84%粒径とほぼ同等の値であった。そのため、植物の流失を表現する際に用いる粒径として84%粒径を用いた。瀬崎ら³⁶⁾も本研究と同様に河床材料の平均粒径ではなく90%粒径で評価を行なっている。また、計算開始年(2000年)の粒度分布の情報が無いこと、砂州の平面形状の大きな変化がないことから、砂州の粒度分布も大幅に変化していないと考え、解析期間中に砂州の表層粒度分布は変化しないという仮定を設けている。

砂州グリッドの水深は、対象とする洪水の継続時間をすべて含めて流況解析を計算することで得られるが、本研究で目的とするような長期解析を行なう場合、計算時間が膨大になってしまうため実用的では無い。そこで、一般座標系を用いた流況解析で流量規模の異なる複数洪水の流況計算を別途行ない、その結果から得られた流量 Q と最大水深 H_{max} の関係(H - Q 曲線)を個々の砂州グリッドにおいて求めた。本解析モデルでは砂州の移動が生じるような大規模な河床変動を伴う洪水を対象としていないため、この関係より任意の洪水流量に対して、砂州グリッドの水深を得る方法が有効であると考えた。

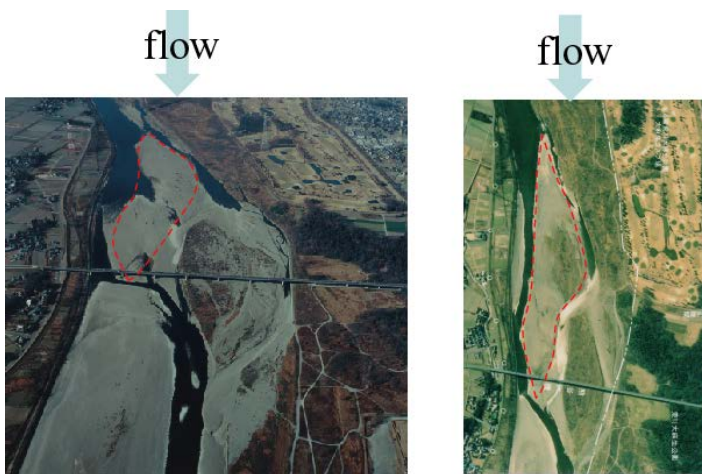


図4・3 1999年(平成11年)(左)と2005年(平成17年)(右)における計算対象砂州の平面形状の変化を示す航空写真

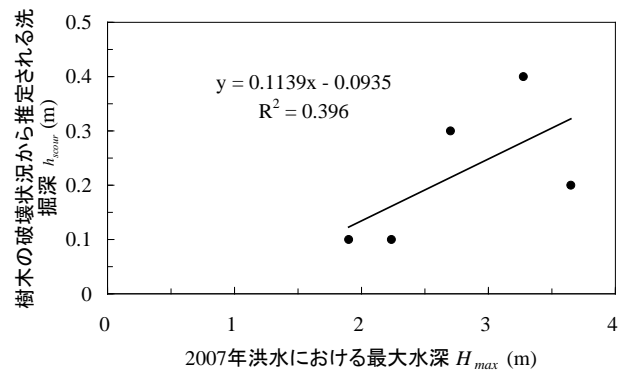


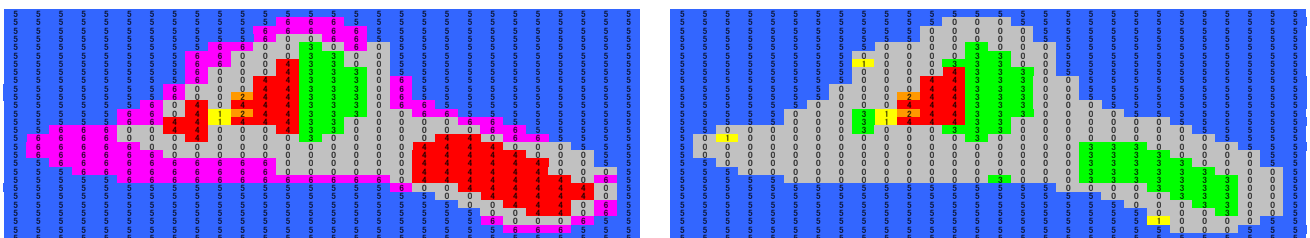
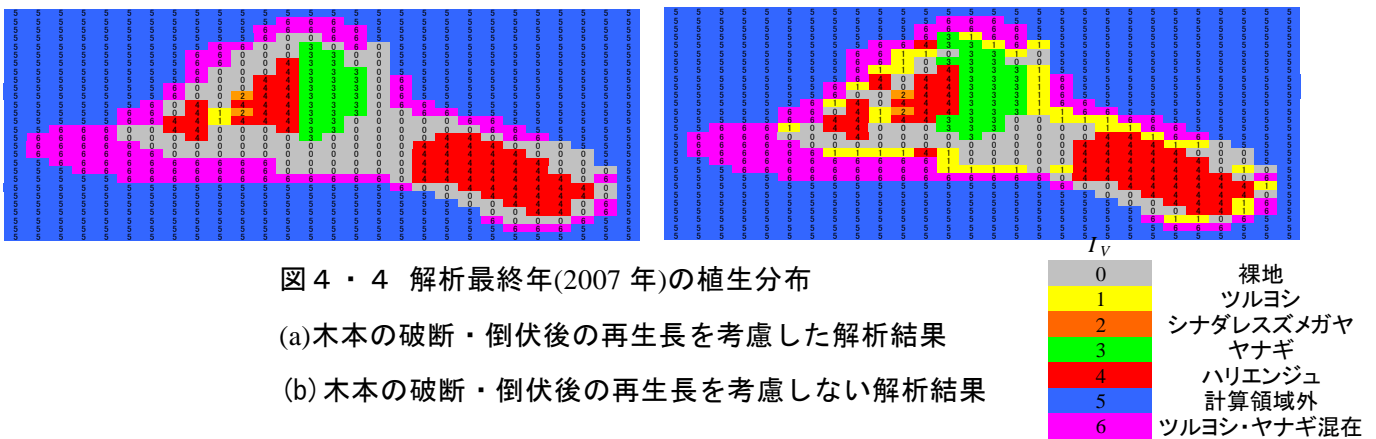
図4・2 2007年洪水における樹木破壊の見た地点における最大水深 H_{max} と樹木の破壊状況から推定される洗掘深 h_{scour} の関係

表4・1 解析における植生 index (I_V)の定義

I_V	植物種	凡例の色
0	植生無し(裸地)	灰色
1	ツルヨシ	黄色
2	シナダレスズメガヤ	オレンジ
3	ヤナギ	緑
4	ハリエンジュ	赤
5	計算領域外	青
6	ツルヨシ・ヤナギ混在	ピンク

4.4 植生動態解析結果

図4・4(a)(b)、図4・5(a)(b)にそれぞれ①破断・倒伏による樹齢の巻き戻し効果の有無、②裸地への木本侵入過程考慮の有無、の解析最終年(2007年)の植生動態解析結果を示す。また、図4・6に、解析結果に対応する対象植物の分布図(2007年の洪水後に観測)を示す。図4・4(a)と(b)を比較すると、砂州中央付近のハリエンジュの拡大域に差が見られるものの、全体的な植生分布はほとんど変わらない。この理由として、本解析は木本の生長あるいは拡大といった長い年月を要する時間スケールに対して8年間という限定された短期間であるため両者にほとんど差異が認められなかったと考えられる。また、3.1章でも述べたように、本解析で取り入れた破断・倒伏による樹齢の巻き戻し効果は比較的小規模な2006年の洪水に対して得られた知見であるため、2007年洪水のように大規模出水によって樹木が受けた破断・倒伏が翌年どのような再生長を行なうかについて更なる調査が必要である。また、図4・5(a)と(b)を比較すると、李ら¹⁵⁾のように裸地→草本→木本と順番通りに植生遷移が進行すると仮定した結果(図4・5(b))よりも、本解析のように裸地にも木本が入植するという植生遷移を取り入れた結果(図4・5(a))の方が、実際の植生分布(図4・6)をより再現できていることがわかる。また、2007年の解析結果(図4・4(a)、図4・5(a))と、それに対応する植生分布(図4・6)とを比較すると、A地点・E地点におけるハリエンジュの繁茂・拡大、B地点における裸地の維持、C地点におけるヤナギの残存(未流失)、D地点におけるヤナギの入植など、実際の植生分布を表現できていることが確認できる。しかし、E地点のハリエンジュ群落のように、実際にはより小規模な群落であるにもかかわらず、解析上は大規模



な群落となってしまうことから、個々の植物の繁茂面積までは表現できていない。

解析結果より、樹木の入植位置には一致する箇所が見られたが、まだ実際の植生分布を表現するまでには至っていない。そのため、砂礫州上に繁茂する植物のより詳細な生態的知見を集積し、植生動態解析モデルに反映することで精度向上を図っていく必要があると考えられる。

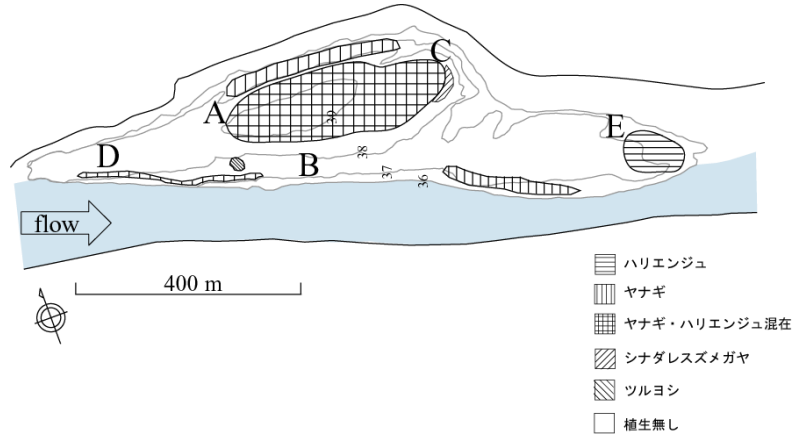


図4・6 2007年洪水後に観測により確認した対象砂礫州の植生分布図

4.5 結論

4章では、2章、3章で得られた植物の流失条件に関する知見、洪水攪乱後の再生長特性に関する知見を用いて、植生動態モデルの構築を試みた。2000年から2007年の8年間の植生動態解析を行いと実際の植生分布を比較したところ、以下の点が明らかとなった。

- 1) 樹木の入植位置、樹木群が流失されずに残存している点、裸地の維持等、実際の砂州の状況を表現できている部分があり、本解析モデルは洪水攪乱を考慮した上で、今後の植生動態を予測できる可能性がある。
- 2) 実際の植生分布を表現できている部分もあったものの、繁茂面積など表現できていない部分もあるため、砂礫州上に繁茂する植物の遷移に関するより詳細な生態的知見を集積し植生動態解析モデルに反映することで精度向上を図っていく必要があると考えられる。

5. 結論および今後の課題

本研究は‘河道内樹林化’、‘砂礫河原に侵入し駆除が検討されている外来種’をキーワードに、調査対象区域に繁茂する代表的草本として、ツルヨシ、シナダレスズメガヤ、代表的木本として、タチヤナギ、ハリエンジュに注目し、その破壊メカニズム、流失限界を様々な手法を駆使して求めたものである。調査対象地域は荒川中流部の礫河原であるが、2007年9月の台風9号出水（荒川当該区間での洪水確率規模 1/30 程度）後には調査地点として多摩川も追加した。2006年10月の荒川当該区間における出水（洪水確率規模 1/2 から 1/3 程度）では大きな樹木破壊が見られなかったものの、2007年9月では、なぎ倒しだけではなく転倒破壊など様々な破壊形態を調査することができた。そのため、3.2 に示したように4種植物の流失に必要な限界モーメントや、限界せん断力をそれぞれ求めることができた。しかし、この値は当該砂礫州における値であり、今後、多摩川の流れの解析も行うなどして河床勾配や河床材料の関数として、無次元パラメータで示せるようにしていく必要がある。

2.1 章で示したシナダレスズメガヤの流失限界は2007年2月に発表し、その後他河川でも概ね適合性がよいことを確認したものであるが、2007年9月の台風9号洪水で検証の場を与えられた。解析ではすべてのシナダレスズメガヤが流出しておかしくない条件であるが、洪水後の調査では一部残存している箇所もあった。当該手法は群落の周辺部においては概ね適用可能であるが、シナダレスズメガヤ群落が大きく、かつ流下方向に長く繁茂している場合には、群落流下方向の内部境界層およびせん断力の変化を評価する必要があると考えられ、今後の課題である。

2.2 章では異なる洪水攪乱影響下でのツルヨシ繁茂域の動態を調査した。3.2 章で示したように、対象砂礫州ではツルヨシ群落域の流失限界は樹木よりも大きかった。2007年9月の台風9号では、繁茂密度の低いツルヨシランナー域のランナー上の子株はほぼすべてが流失していた。2006年10月洪水の後では、荒川大橋上流のツルヨシは比高の低い箇所のランナー状の子株は抜けていたが、比高の高い箇所では流失しておらず、逆にリターをトラップしたり、群落域に薄く土砂を堆積させていた。ツルヨシランナー域が群落になるのは栄養状態がよければ3年程度と考えられ、その間に土砂堆積があり地下に地下茎をのばすスペースがあれば、非常に強固な根茎システムを構築する。管理面から言えば、洪水頻度が3から5年でランナーが抜けるような箇所では、ツルヨシは大きな群落にはなりえず、親株が残り再生を繰り返していくと考えられる。逆に5年頻度の洪水でランナーが抜けない比高に入り込んだ場合に、土砂や栄養供給などの条件が整えば大きな群落を形成してしまうため、裸地には戻りづらくなると考えられる。

3.1 章では、2006年10月洪水をもとに、破断限界線は樹種ごとに異なる物性値によってある程度決定されるが、転倒限界線は樹木の生育基盤や根の張り方によって上下することを示した。そして、樹木の破壊を破断と転倒に区別して検討する際には、破断限界式・転倒限界式を正確に見積もり、2つの線の交点を把握することが重要であることを示唆した。また、3.1 章の図3・4で示した方法は、樹林化

しやすいかどうかを簡易に判断するバルクな手法として活用できる可能性はある。

4章では、2章、3章で得られた植物の流失条件に関する知見、洪水攪乱後の再生長特性に関する知見を用いて、植生動態モデルの構築を試みた。2000年から2007年の8年間の植生動態解析結果と実際の植生分布を比較すると、実際の植生分布を表現できている部分もあったものの、繁茂面積など表現できていない部分もあった。そのため、砂礫州上に繁茂する植物の遷移に関する、より詳細な生態的知見を集積し、植生動態解析モデルに反映することで精度向上を図っていく必要があると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所から多数の資料を提供頂いた。財団法人リバーフロント整備センター、国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所に草本の流失条件検証に必要な貴重な資料を提供頂いた。また、資料整理・解析には、埼玉大学大学院・八木澤順治君、青木信哉君(現・㈱国際航業)のご協力を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) USDA(1947): Soil Conservation Service “Handbook of channel design for soil and water conservation.”SCS-TP-61, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C..
- 2) Parsons,D.A.(1963):Vegetation control of stream-bank erosion, *Proc., Federal Interagency Sedimentation Conference*, Miscellaneous Publ. No.970, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., pp.130-136.
- 3) Temple,D.M.(1980): Tractive force design for vegetated channels, *Trans. ASAE*, 23(4), pp.884-890.
- 4) Samani, J.M.V. and Kouwen, N. (2002): Stability and erosion in grassed channels, *J. Hydraulic Engineering*, pp.40-45.
- 5) 末次忠司・藤田光一・服部敦・瀬崎智之・伊藤政彦・榎本真二(2004) : 礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答, 遷移および群落拡大の特性 - 多摩川と千曲川の礫河原を対象として -, 国土技術政策総合研究所資料, 第 161 号, pp.1-6.
- 6) 小川友浩, 田中規夫, 城野裕介(2005) : 河川中州上に繁茂するツルヨシのランナーによる拡大長と生産量の評価, 水工学論文集, 第 49 卷(2), pp.1441-1446.
- 7) 田中規夫, 八木澤順治, 青木信哉(2006) : 砂礫河原に繁茂する株状草本シナダレスズメガヤの土砂捕捉特性と洪水攪乱による除去条件、河川技術論文集, 第 12 卷, pp.455-460.
- 8) 八木澤順治, 田中規夫(2007) : シナダレスズメガヤの繁茂量の違いを考慮した土砂移動限界の変化および洪水時流失条件の評価、水工学論文集, 第 51 卷,pp.1249-1254.
- 9) 建設省河川局治水課(1994) : 河道内樹木の伐採・植樹のためのガイドライン (案), 山海堂, pp.20-35.
- 10) (財)リバーフロント整備センター編(1999) : 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp.147-171.
- 11) 末次忠司, 服部敦, 瀬崎智之(2001) : 洪水攪乱に伴う植生変化 - 千曲川を例にとって -, 水利科学, 261, pp.33-47.
- 12) 砂田憲吾・河野逸朗・田中総介(2002) : 出水時における河道内樹木の破壊規模の予測に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.947-952.
- 13) 油川曜佑, 渡邊康玄, 安部修也(2005) : 沙流川 2003 年 8 月洪水における樹木の倒伏状況から算定される流速, 水工学論文集, 第 49 卷, pp.583-588.
- 14) 清水義彦, 小葉竹茂機, 吉川武志(2002) : 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, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.953-958.
- 15) 李参熙, 山本晃一, 望月達也, 藤田光一, 塚原隆夫, 渡辺敏(1999) : 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 3622 号, p.168.
- 16) 藤田光一, 李参熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也(2003) : 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.
- 17) 清水義彦, 小葉竹茂機, 岡田理志(2001) : 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 卷，pp.1099-1104.

- 18) 青木信哉，八木澤順治，田中規夫(2005)：洪水攪乱により土砂被りを受けたツルヨシの翌年の再生長特性，応用生態工学研究会第 9 回大会，pp.81-84.
- 19) 八木澤順治，田中規夫，青木信哉(2006)：ツルヨシのランナーによる群落拡大が土砂の移動限界に与える影響，水工学論文集，第 50 卷，pp.1189-1194.
- 20) Yagisawa, J. and Tanaka, N.(2006)：Effects of flood interval on the growth of *Phragmites japonica* and the Change of threshold velocity for gravel movement, *15th APD-IAHR Congress.*, pp.285-290.
- 21) Tanaka, N., Yagisawa, J. and Ogawa, T.(2007)：Change of threshold velocity for gravel movement by runner expansion and growth of *Phragmites japonica* on a gravel bar: Modeling approach, *J. of Hydroscience and Hydraulic Eng.*, Vol.25,No.1, pp.1-10.
- 22) 中坪孝之(1997)：河川氾濫原におけるイネ科帰化草本の定着とその影響，保全生態学研究，第 2 卷，pp.179-187.
- 23) 鎌田磨人，小島桃太郎，岡部健士(2004)：河川砂州上に侵入したシナダレスズメガヤを除去するに必要な洪水営力，応用生態工学会第 8 回研究発表会講演集，pp.97-98.
- 24) 武村武・田中規夫(2005)：株状粗度モデルに作用する流体力の評価に関する基礎実験，水工学論文集，第 49 卷，pp.871-876.
- 25) 伊藤志穂，八木澤順治，田中規夫(2006)：シナダレスズメガヤ周辺の土砂移動限界の変化と同植物の洪水時除去条件，応用生態工学会第 10 回研究発表会講演集，pp.165-168.
- 26) 福岡捷二，藤田光一(1990)：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，180 号-3，pp.136-139.
- 27) Andersen, A.G., A.S.Paintal and J.T.Davenport(2001): Tentative Design Procedure for Riprap Lined Channels, NCHRP REPORT 108, In : Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Science, pp129-130.
- 28) 土木学会(1999)，水理公式集 平成 11 年度版，pp.158-159.
- 29) 国土交通省 四国地方整備局：第 5 回吉野川シナダレスズメガヤ対策検討委員会資料.
- 30) 田中規夫，八木澤順治，青木信哉，福岡捷二(2007)：河道内樹木の洪水攪乱規模と樹齢による破壊限界変化，河川技術論文集，第 13 卷，pp.177-182.
- 31) 田中規夫，佐々木 寧(2007)：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 卷，pp.1445-1450.
- 32) 細田尚，長田信寿，村本嘉雄(1996)：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.
- 33) Takemura, T. and Tanaka, N.(2005): Evaluation of expansion threshold for *Typha angustifolia* in river, XXXI-IAHR, pp.1884-1893.
- 34) 河村三郎(2005)：土砂水理学 1，森北出版，pp.65-69.

- 35) 眞田淳二, 浦上将人, 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃(2006) : 旭川下流部における礫河原の自立的回復に向けた実証的研究, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.409~414.
- 36) 瀬崎智之, 服部敦, 近藤和仁, 徳田真, 藤田光一, 吉田昌樹(2001) : 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.