

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。

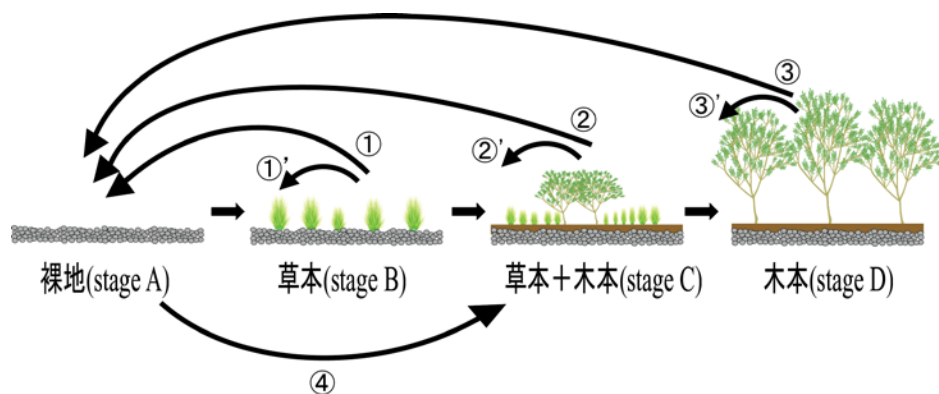


図1・1 本研究で取り扱う内容の概念図（①、②、③は現地観測、水理模型実験、数値解析で評価し、①'、②'、③'は現地観測より評価し、④を含む遷移プロセスは植生動態モデルで評価する）