

京都大学	博士（ 工学 ）	氏名	松本 知将
論文題目	植生開水路の乱流・二次流構造と浮遊砂輸送メカニズムに関する研究		
（論文内容の要旨） 近年国内の多くの河川で河道の樹林化が進行し、礫河床上に植生が過度に繁茂する事例が報告されている。河道の樹林化は植生抵抗の増加や河道の二極化を引き起こし、洪水時の流下能力の低下による治水上のリスクの増大を招くほか、河床形状および河道内植生の変化に伴う生態系の変容など河川環境の悪化にもつながる。このような背景から、河道内における植生動態を事前に予測し、計画的かつ適切な河川管理を実施する必要性が高まっている。河道内植生の発生要因の一つとして、礫砂州上の裸地への細粒土砂や種子の輸送による、植物の発芽および生育に適した環境の形成が挙げられる。また、河道内に遍在する植生群落周辺にウォッシュロードをはじめとする細粒土砂や有機物が輸送されることで、植生領域の拡大につながることも指摘されている。このように、河道内植生は流れ場・土砂輸送および河床形状と相互に作用しあっており、これまでも植生流れにおける物質輸送過程の解明に関する研究が数多く行われている。また、洪水の発生頻度や河床形状に基づいて河道内植生動態を予測する数値モデルも提案されている。その一方で、礫河床や植生群落の近傍で発達する複雑かつ三次元的な乱流構造とその物質輸送については未解明点が多く残されている。 そこで、本研究では植生あるいは礫河床を模擬した粗度を有する開水路流れを対象に、室内水路実験を通じて運動量・物質輸送メカニズムの解明を試みる。まず、実験水路において PIV（Particle image velocimetry）による流速計測を実施し、植生群落あるいは礫河床近傍の乱流・二次流構造を明らかにする。また、流速計測によって明らかにした乱流現象に基づき、植生流れにおける浮遊砂の輸送メカニズムについて考察する。 第 1 章は序論であり、本論文の研究背景、研究の目的、および本論文の構成を述べている。 第 2 章では、河道内植生の発生要因である礫河床への細粒土砂・種子の輸送過程を解明するために、礫河床近傍における乱流の組織構造および浮遊粒子の輸送機構について考察した。実験水路の床面上に半球状粗度要素を千鳥格子状に配置することで礫床河川を模擬した粗面流れを再現し、PIV によって粗度層近傍および内部の乱流構造の計測を試みた。ここで、計測部のレーザー照射面とカメラとの間の粗度要素の材質に透明な低屈折率ハイドロゲルを用いる RIM（屈折率整合）法を導入し、従来の PIV では可視化が困難であった粗度層内部の乱流構造の可視化計測に成功した。レイノルズ応力の四象限区分解析および瞬間流解析の結果から、粗面上において Sweep（高運動量流体の下方への輸送）や Ejection（低運動量流体の上方への輸送）のような組織的乱流運動が周期的に発生することが示された。このうち、粗面近傍で発生する Sweep は粗度要素に衝突することで水路床近傍における間欠的な上昇流の発生を誘発し、水路床上の粒子の浮上を引き起こすことが明らかになった。その一方で、粗度高さ付近および上部では、粒子近傍で発生する Ejection が粒子の上昇運動を引き起こすことが示唆された。 第 3 章では、河道内に偏在する植生群落近傍の乱流構造と浮遊砂輸送メカニズムを明らかにするために、PIV による乱流計測と浮遊砂堆積状況の観察を行った。本研究で			

は剛体植生を扱い、植生流れの乱流特性を決定するパラメータの一つとして植生高さに注目し、植生高さの異なる 3 通りの水没植生流れと 1 通りの非水没植生流れの計 4 ケースを実験条件に設定した。各ケースの流速計測結果の比較から、植生高さの大きいケースほど群落内部や背後における主流速の遷移が緩やかになる傾向が確認された。植生先端近傍の乱流混合による鉛直方向の運動量輸送は、植生高さが全水深の 0.5 ～0.7 倍程度のケースで最も活発になる一方で、植生高さが小さいケースでは植生先端付近で生成された乱れが水路床近傍にまで波及することが確認された。また、平均流・乱流構造と浮遊砂堆積状況との比較から、植生高さによる乱流構造の変化が群落周辺の浮遊砂堆積状況に影響を及ぼすことが示唆された。

第 4 章では、植生高さと同様に流れ場を特徴付ける植生パラメータとして植生群落の横断方向幅に注目し、群落幅が鉛直・水平混合層の発達過程および二次流構造に及ぼす影響について考察した。本研究では群落幅を変化させて水没する剛体植生の流れ場を対象に鉛直面 PIV・水平面 PIV を実施し、流速の縦断面および水平面内分布を計測した。鉛直レイノルズ応力分布から、植生先端付近の鉛直混合層は群落幅の広いケースほど顕著に発達することが示された。一方で、群落幅が広いケースでは対岸の影響を強く受けるため、群落外縁近傍の水平混合層において発達する大規模水平渦の空間スケールは群落・水路幅比が 0.63 のときに最大となった。また、このような乱流構造が発達する群落下流端付近では、植生域・非植生域境界近傍において 2 種類の渦状二次流の形成が確認された。鉛直・水平レイノルズ応力の横断面分布から、二次流の発達は横断面内における乱流構造の非等方性に起因することが示唆された。

第 5 章では、草本類のように植生要素が柔軟性を有する場合を想定し、柔軟植生要素による乱流構造の変化について考察した。柔軟植生要素を水路床上に一様に配置した開水路流れを対象に水路実験を行い、植生要素の柔軟性による乱流構造および植生揺動メカニズムの変化について考察した。PIV による乱流計測と同時に PTV (Particle tracking velocimetry) による植生要素変位の計測を行うことで、柔軟植生上の乱流の組織構造と植生揺動形態との相互作用の解明を試みた。レイノルズ応力分布の計測結果から、柔軟植生流れでは剛体植生流れと比較して植生先端高さ近傍の乱流混合による植生領域内外の運動量輸送が低減される一方で、鉛直混合層における鉛直方向の運動量輸送は河床近傍にまで波及することが示された。また、本研究の水理条件下では、Monami と呼ばれる植生揺動の組織的な揺動形態が観察され、柔軟植生上で流下方向に伸びた大規模かつ組織的な乱流構造が発達することが示唆された。

第 6 章では、水路中央に遍在する柔軟植生群落流れを対象に、植生要素の曲げ剛性による乱流構造および浮遊砂堆積領域の変化について考察した。鉛直面 PIV・水平面 PIV の結果から、柔軟植生群落近傍では剛体植生の場合と比較して乱れの生成が抑制されることが確認された。一方で、植生剛性が比較的大きく植生要素があまり倒伏しないケースでは、群落近傍において二次流を伴う三次元的な平均流構造が形成され、群落背後の河床近傍に横断方向混合層が形成される。その結果、河床近傍において水平渦による横断方向の運動量輸送が活発になり、後流域の河床近傍では植生先端付近よりも先に主流速が回復することで主流速の逆勾配領域が形成される。また、浮遊砂投入実験の結果から、群落下流域の浮遊砂堆積領域は乱れエネルギーの小さい領域と概ね対応しており、群落近傍の渦構造・乱流構造と密接に関連していることが示された。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、土砂・河道内植生動態の予測や河道内樹林の適切な管理に必要な、植生乱流と物質輸送の基礎知見を得ることを主目的としている。植生あるいは礫河床を模擬した粗度を有する開水路流れを対象に、高精度の水路実験を通じて運動量・物質輸送メカニズム、植生群落及び礫河床近傍の乱流・二次流構造を明らかにした。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 低屈折率ハイドロゲルを用いる RIM (屈折率整合) 法を導入し、従来の PIV (可視化流速計測) では困難であった粗度層内部の乱流構造の可視化計測を行い、河道内植生の発生要因である礫河床への細粒土砂・種子の輸送過程を解明した。

2. PIV による乱流計測と浮遊砂堆積状況の観察を行い、植生群落近傍の乱流構造と浮遊砂輸送メカニズムを明らかにした。

3. 植生群落の横断方向幅に注目し、群落幅が鉛直・水平混合層の発達過程および二次流構造に及ぼす影響を定量評価した。特に植生域・非植生域境界近傍において 2 種類の渦状二次流の形成を明らかにするとともに、乱流構造の非等方性との関連を説明した。

4. 植生要素の柔軟性による乱流構造および植生揺動メカニズムの変化を詳細に考察し、Monami と呼ばれる植生揺動の組織形態と、流下方向に伸びた大規模かつ組織的な乱流構造の関連性を明らかにした。

5. 植生要素の曲げ剛性による乱流構造および浮遊砂堆積領域の変化について考察し、柔軟植生群落近傍では剛体植生の場合と比較して乱れの生成が抑制されることを示した。

本論文は、植生河川の土砂や種子輸送の輸送機構や二次流形成を高度な乱流計測によって明らかにしており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 7 月 30 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。