

水没・倒伏した柔軟植生近傍で発達する乱流構造の PIV 計測 PIV Measurement of Turbulent Flow Structure around a Submerged Deflected Flexible Vegetation Patch

○小川 峻司・松本 知将・岡本 隆明・山上 路生

○Ryoji OGAWA, Kazumasa MATSUMOTO, Taka-aki OKAMOTO, Michio SANJOU

This study investigates the three-dimensional flow structure around a submerged vegetation patch by velocity measurements using PIV. The results of PIV show that the flexible vegetation patch and the inclined rigid one create upward flows within the vegetation patch and a clockwise vortex around the lateral patch edge. On the other hand, the streamwise vorticity around the flexible vegetation patch is smaller than that around the rigid vegetation patch at a similar tilting angle. These findings suggest that the deflection and oscillation of vegetation elements cause the different secondary flow structure around the flexible vegetation patch from the upright rigid one. (101 words)

1. はじめに

河道の樹林化は環境面・治水面でさまざまな問題を招いている。適切な対策方法を検討するうえで、植生群落近傍の流速低減過程や土砂堆積メカニズムを解明する必要がある。

河道内に植生群落が偏在するとき、群落近傍で発達する混合層が運動量・浮遊砂輸送を支配することが知られている。一方、柔軟植生群落近傍で発達する三次元的な乱流・二次流構造については未解明点が多い。本研究では、水路実験において植生要素の剛性の異なる複数の植生群落流れに対して流速計測を実施する。また、剛体植生の傾斜角を系統的に変化させ、水流による植生要素の変形が二次流構造に及ぼす影響について考察する。

2. 実験方法・水理条件

本実験では、全長 10 m、幅 $B = 0.4$ m および高さ 0.5 m の可変勾配型水路(勾配 1/400)を用いた。 x, y および z はそれぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向座標であり、原点は植生群落上流端 ($x = 0$) 水路底面 ($y = 0$) および水路中央 ($z = 0$) とした。各方向の瞬間流速 (\tilde{u}, \tilde{v} および \tilde{w}) は時間平均流速 (U, V および W) と瞬間変動流速 (u, v および w) に分解される。

植生群落として水路中央底部に、植生要素を正方格子状に配置した。植生要素の直立高さ $h = 0.10$ m、幅 $b_v = 8$ mm は一定とし、厚さ t_v を系統的に変化させた PET 製柔軟植生 (Case F1–F4) と、傾斜角を系統的に変化させたアクリル製剛体植生 (Case R0–R3) を対象とした。 $x \cdot z$ 方向の植生配

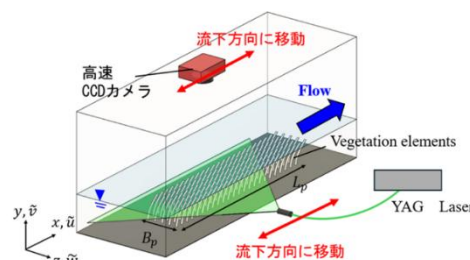


図-1 水平面 PIV 実験装置図

表-1 実験条件

	Q [m ³ /s]	U_m [m/s]	H [m]	Re	Fr	t_v [mm]	h_p [m]	$\bar{\theta}$ [deg]	Ca	植生形態
Case F1	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	0.342	0.095	15.6	2.4	柔軟 (F)
Case F2	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	0.188	0.095	15.1	14.5	柔軟 (F)
Case F3	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	0.100	0.060	49.5	96.2	柔軟 (F)
Case F4	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	0.050	0.025	74.9	769	柔軟 (F)
Case R0	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	2.0	0.100	0	1.4×10^{-2}	剛体 (R)
Case R1	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	2.0	0.097	15.0	1.4×10^{-2}	剛体 (R)
Case R2	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	2.0	0.087	30.0	1.4×10^{-2}	剛体 (R)
Case R3	0.015	0.25	0.15	3.8×10^4	0.21	2.0	0.071	45.0	1.4×10^{-2}	剛体 (R)

置間隔 $L_v \cdot B_v$ はいずれも 32 mm で、群落長さ L_p および群落幅 B_p はそれぞれ 0.74 m、0.14 m とした。

流速計測として鉛直面 PIV・水平面 PIV を実施した (図-1)。流れの発達過程について検討するため、植生群落の上流側から群落背後に至るまで、計測位置を流下方向にシフトさせながら繰り返し計測を行った。さらに、横断面内の流速分布を計測するため、計測断面を細かく設定して鉛直面 PIV および水平面 PIV を実施した。

表-1 に実験条件を示す。 H は水深、 U_m は断面平均流速である。 h_p は植生群落高さであり、群落中央 ($z = 0$) の最も下流にある植生要素 5 本の時間平均倒伏高さ \bar{h}_d の平均値を表す。また、 $\bar{\theta}$ は植生要素の時間平均傾斜角 ($\bar{\theta} = \sin^{-1} h_p/h$) である。

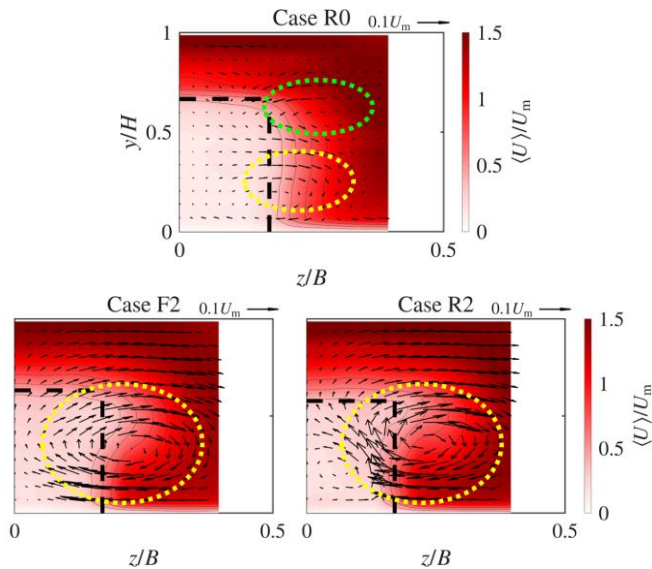


図-2 群落域 ($x/H = 4.6$) における主流速 U の横断面コンター

3. 実験結果および考察

植生剛性が流れ場に及ぼす影響を調べるため、直立剛体植生 (Case R0)・柔軟植生 (Case F2)・傾斜剛体植生 (Case R2) の3ケースについて比較した。図-2に群落域 ($x/H = 4.6$) における主流速 U の横断面コンター図および二次流ベクトル分布 ($\langle V \rangle, \langle W \rangle$) を示す。直立剛体植生 (Case R0) では、群落コーナー部を中心とする反時計回りの渦状二次流 (図中緑点線) が存在し、その下層には時計回りの渦状二次流 (図中黄点線) が形成されている。一方で、柔軟植生 (Case F2) および傾斜剛体植生のケース (Case R2) では反時計回りの渦状二次流が確認されず、時計回りの強い渦状二次流が発達している。これは、植生要素が傾斜することで植生要素から流体に対して鉛直上向きの力が作用し、植生群落内部で上昇流が発生するためと考えられる¹⁾。また、時計回りの渦状二次流が顕著に発達する2ケース (R2・F2) では植生外縁の水路床近傍で主流速 $\langle U \rangle$ が大きく、逆勾配 ($\partial \langle U \rangle / \partial y < 0$) となっている。これは、群落近傍で発達する二次流構造が非植生域から群落内部・背後への運動量輸送に寄与することを示唆している。

植生要素の剛性が二次流構造に与える影響を調べるため、図-3にコーシー数 $Ca \equiv \rho_f U_m^2 b_v h^3 / 2EI$ による流下方向渦度の最大値 $\Omega_{x, \text{peak}}$ の変化を示す (Case F1-F4)。中程度の剛性 ($10^1 < Ca < 10^2$) のケースで正の渦度が最大となっており、時計回りの二次流が最も顕著に発達する。

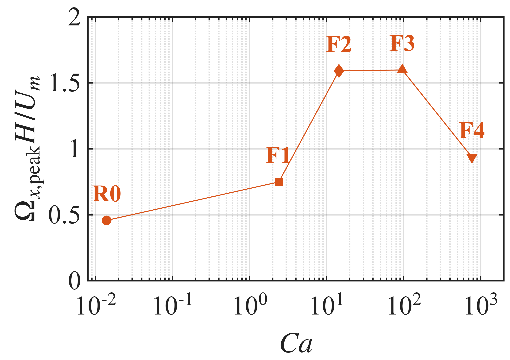


図-3 コーシー数 Ca による最大渦度 $\Omega_{x, \text{peak}}$ の変化

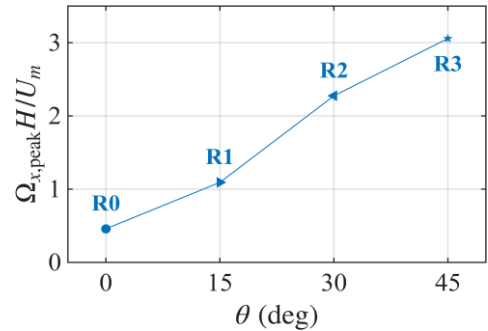


図-4 平均傾斜角 $\bar{\theta}$ による最大渦度 $\Omega_{x, \text{peak}}$ の変化

図-4に剛体植生 (Case R0-R3) の平均傾斜角 $\bar{\theta}$ による最大渦度 $\Omega_{x, \text{peak}}$ の変化を示す。本研究の傾斜角の範囲では、傾斜角の増大とともに渦度が増加し、Case R3で最大となった。一方で、図-3と図-4を比較すると、柔軟植生と剛体植生では倒伏高さによる渦度の傾向に違いが見られた。特にCase R3とCase F3を比較すると、傾斜角が同程度であるにもかかわらず、柔軟植生 (F3) の方が渦度は小さい。このことから、柔軟植生群落近傍で発達する時計回りの二次流構造は、植生要素の定常的な変形の影響だけではなく、非定常な揺動の影響によるものであることが示唆される。

4. おわりに

PIV計測結果から、柔軟植生群落流れでは植生要素が倒伏・揺動することで、特徴的な二次流構造が発達することが確認された。今後は静的な植生要素の傾斜角だけではなく、植生要素の揺動が周囲の平均流・乱流特性および浮遊砂輸送に及ぼす影響について検討したい。

参考文献

- 1) Matsumoto, K., Okamoto, T., Sanjou, M., Marjoribanks, T. I., and Takada, M.: Secondary flow structure and sediment deposition around flexible and rigid vegetation patches, *Phys. Fluids*, Vol. 37, 025204, 2025.