

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

2024年

松 本 知 将

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 本研究の構成	2
1.4 PIVによる乱流計測手法	4
参考文献	
第2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明	7
2.1 概説	7
2.2 屈折率整合法による粗度層内部の可視化手法	9
2.2.1 屈折率整合法の概要	9
2.2.2 SAPハイドロゲルを用いた屈折率整合法	10
2.3 計測システム・実験手法	11
2.3.1 計測システム	11
2.3.2 水理条件	13
2.3.3 PIVによる流速計測実験	13
2.3.4 粒子投入実験	16
2.4 粗度層近傍および内部の平均流構造	17
2.4.1 SAPハイドロゲルによる流れ場への影響の検証	17
2.4.2 時間平均主流速	18
2.4.3 時間平均鉛直流速	20
2.5 粗度層近傍および内部における乱流の組織構造	21
2.5.1 レイノルズ応力分布	21
2.5.2 四象限区分解析	23
2.5.3 粗面上における乱流の組織構造	24
2.5.4 粗度層内部における乱流の組織構造	26
2.6 粗度層近傍および内部における粒子輸送メカニズム	29
2.6.1 粒子挙動の観察結果	29
2.6.2 底層近傍の粒子浮上メカニズム	30
2.6.3 粒子速度と平均流速の比較	35
2.6.4 乱流の組織構造と粒子輸送メカニズムの現象モデル	36
2.7 結語	37
参考文献	

第3章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積	42
3.1 概説	42
3.2 理論的検討	43
3.2.1 非水没植生群落内部の平均流・乱流遷移過程.....	43
3.2.2 水没植生群落内部の平均流・乱流遷移過程.....	46
3.2.3 植生群落背後の後流域の予測式.....	46
3.3 計測システム・実験手法	48
3.3.1 計測システム	48
3.3.2 鉛直面PIV計測	50
3.3.3 浮遊砂堆積実験.....	50
3.4 植生高さによる底層平均流構造の変化	51
3.4.1 主流速分布	51
3.4.2 植生群落上流端におけるDiverging flow	52
3.5 植生高さによる乱流構造の遷移過程の変化	53
3.5.1 レイノルズ応力分布	53
3.5.2 四象限区分解析.....	55
3.5.3 底層の乱れエネルギー分布.....	56
3.6 植生高さによる浮遊砂堆積領域の変化	57
3.6.1 植生群落内部の浮遊砂堆積.....	57
3.6.2 植生群落後流域の浮遊砂堆積.....	59
3.6.3 乱流構造と浮遊砂堆積領域の比較.....	59
3.7 結語	62
参考文献	
第4章 群落幅による剛体植生流れの乱流・二次流構造の変化	65
4.1 概説	65
4.2 計測システム・実験方法	66
4.2.1 計測システム	66
4.2.2 鉛直面PIV計測	68
4.2.3 水平面PIV計測	69
4.2.4 PIVによる二次流計測	69
4.3 植生群落幅による縦断面内流速分布の変化	70
4.3.1 平均流構造	70
4.3.2 鉛直レイノルズ応力分布	72
4.3.3 鉛直渦の流下方向長さスケール.....	74

4.4	植生群落幅による水平面内流速分布の変化	74
4.4.1	平均流構造	74
4.4.2	水平レイノルズ応力分布	76
4.4.3	水平渦の流下方向長さスケール	78
4.5	片側植生群落近傍の二次流構造	79
4.5.1	時間平均主流速・二次流ベクトルの横断面分布	79
4.5.2	鉛直・水平レイノルズ応力の横断面分布	80
4.5.3	片側植生群落近傍の乱流・二次流構造	81
4.6	結語	82
	参考文献	

第5章	柔軟植生流れの乱流構造および植生揺動	85
5.1	概説	85
5.2	計測システム・実験手法	86
5.2.1	計測システム	86
5.2.2	水理条件	87
5.2.3	PIVによる流速計測	88
5.2.4	PTVによる植生変位計測	88
5.3	かぶり水深比による柔軟植生上の乱流構造の変化	89
5.3.1	時間平均主流速	89
5.3.2	レイノルズ応力分布	90
5.3.3	四象限区分解析	91
5.3.4	積分長さスケール	92
5.4	かぶり水深比による植生揺動形態の変化	93
5.4.1	植生先端位置の縦断面内軌跡	93
5.4.2	植生変位の流速変動への応答	93
5.4.3	植生要素の組織的揺動	95
5.5	結語	97
	参考文献	

第6章	植生剛性による柔軟植生群落近傍の乱流構造および 浮遊砂堆積の変化	100
6.1	概説	100
6.2	計測システム・実験手法	101
6.2.1	計測システム	101
6.2.2	実験条件	102

6.2.3	鉛直面PIV計測	103
6.2.4	水平面PIV計測	104
6.2.5	浮遊砂堆積実験	104
6.3	植生の柔軟性による平均流遷移過程の変化	104
6.3.1	植生要素の倒伏高さ	104
6.3.2	時間平均主流速	106
6.3.3	時間平均鉛直流速	107
6.4	植生の柔軟性による群落周辺の渦構造の変化	108
6.4.1	植生群落近傍の鉛直混合層の発達過程	108
6.4.2	植生群落背後における平均流の水平面内構造	109
6.4.3	植生群落背後の水平混合層の発達過程	111
6.5	後流域の渦構造が浮遊砂堆積領域に及ぼす影響	113
6.5.1	植生群落背後の浮遊砂堆積領域	113
6.5.2	主流速・乱れエネルギー分布と堆積領域の比較	115
6.5.3	柔軟植生群落近傍の渦構造と浮遊砂輸送の現象モデル	116
6.6	結語	117
	参考文献	

第7章 結論 119

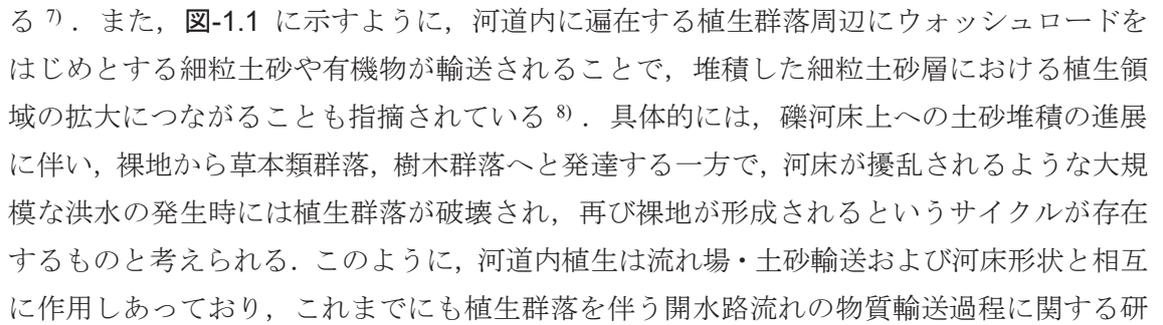
付録 本論文に関連する論文リスト
謝辞

第 1 章

序論

1.1 研究背景

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^{1,2)}。このような河道内樹林の拡大は流れの抵抗を増加させるだけではなく、土砂堆積の促進による河積阻害および河道の二極化を招き、その結果、流下能力の低下や河岸浸食といった治水上のさまざまな問題を引き起こすことが指摘されている^{3,4)}。また、河床形状や植生分布の変化は河道内の生態系にも影響を及ぼし、河川環境の悪化につながる可能性も指摘されている⁵⁾。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⁶⁾。

河道内植生の発生要因の一つとして、洪水時に礫砂州上の裸地へ細粒土砂や植物の種子が堆積・捕捉されることで、植物の発芽および生育に適した環境が形成されること挙げられる⁷⁾。また、図-1.1 に示すように、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、堆積した細粒土砂層における植生領域の拡大につながることも指摘されている⁸⁾。具体的には、礫河床上への土砂堆積の進展に伴い、裸地から草本類群落、樹木群落へと発達する一方で、河床が擾乱されるような大規模な洪水の発生時には植生群落が破壊され、再び裸地が形成されるというサイクルが存在するものと考えられる。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、これまでも植生群落を伴う開水路流れの物質輸送過程に関する研究が数多く行われてきた⁹⁾。また、洪水の発生頻度や土砂輸送・河床形状に基づき、実河川における河道内植生動態を予測する数値モデルについても提案されている¹⁰⁾。その一方で、このような河床変動・植生動態予測手法には精度上の課題があるほか、植生を有する河道内の物質輸送メカニズムについても未解明点が残されている。

礫河床や植生群落の近傍では複雑かつ三次元的な乱流構造が発達すると考えられるが、三次元的な流れ場の構造が物質輸送に及ぼす影響については未解明点が多い。特に、開水路流れをはじめとする境界層流れでは、粒子が壁面近傍で発達する乱流の組織構造に巻き込まれて浮上すること (Particle entrainment) が指摘されているが¹¹⁻¹³⁾、乱流と粒子挙動の相互作用に着目して河川における移動粒子 (土砂、種子等) の輸送機構を明らかにした研究は少ない。このような浮遊粒子過程の物理的機構に基づいた新しい水工学手法を確立するためには、水路実験を通じた基礎的な水理現象の更なる解明が不可欠である。

1 章 序論

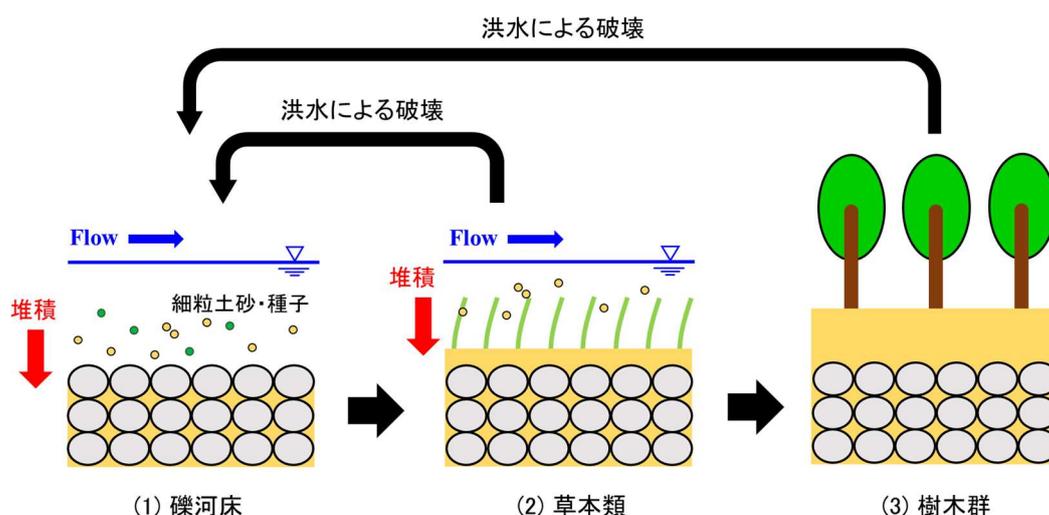


図-1.1 河道内の植生消長過程の模式図（藤田ら(2003)⁸⁾を基に作成）

1.2 研究目的

本研究では植生群落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, 粒子画像流速測定法）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、乱流中の組織構造（Coherent structure）と粒子挙動の相互作用および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。

1.3 本研究の構成

図-1.2 に本研究の構成を模式的に表すフローチャートを示す。本研究では植生群落を有する礫床河川を想定した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。研究内容は対象とする流れ場から2つに大別され、植生群落が発生する前の礫床河川を想定した粗度乱流（2章）および植生群落を有する河道を想定した植生乱流（3-6章）についてそれぞれ考察する。

まず、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・種子の輸送過程を想定し、植生群落が存在しない粗面上の平均流・乱流構造および浮遊粒子の輸送メカニズムを明らかにする。ここでは、屈折率整合法（Refractive-index matching, RIM）と呼ばれる可視化手法をPIVに応用することで粗度要素背後の乱流構造を可視化計測し、粗面近傍における乱流の組織構造と浮遊粒子挙動の相互作用について考察する。

次に、3-4章では河道内植生を剛体植生素群としてモデル化し、剛体植生群落近傍における乱流構造と浮遊砂輸送メカニズムについて考察する。まず、植生高さの異なる水没およ

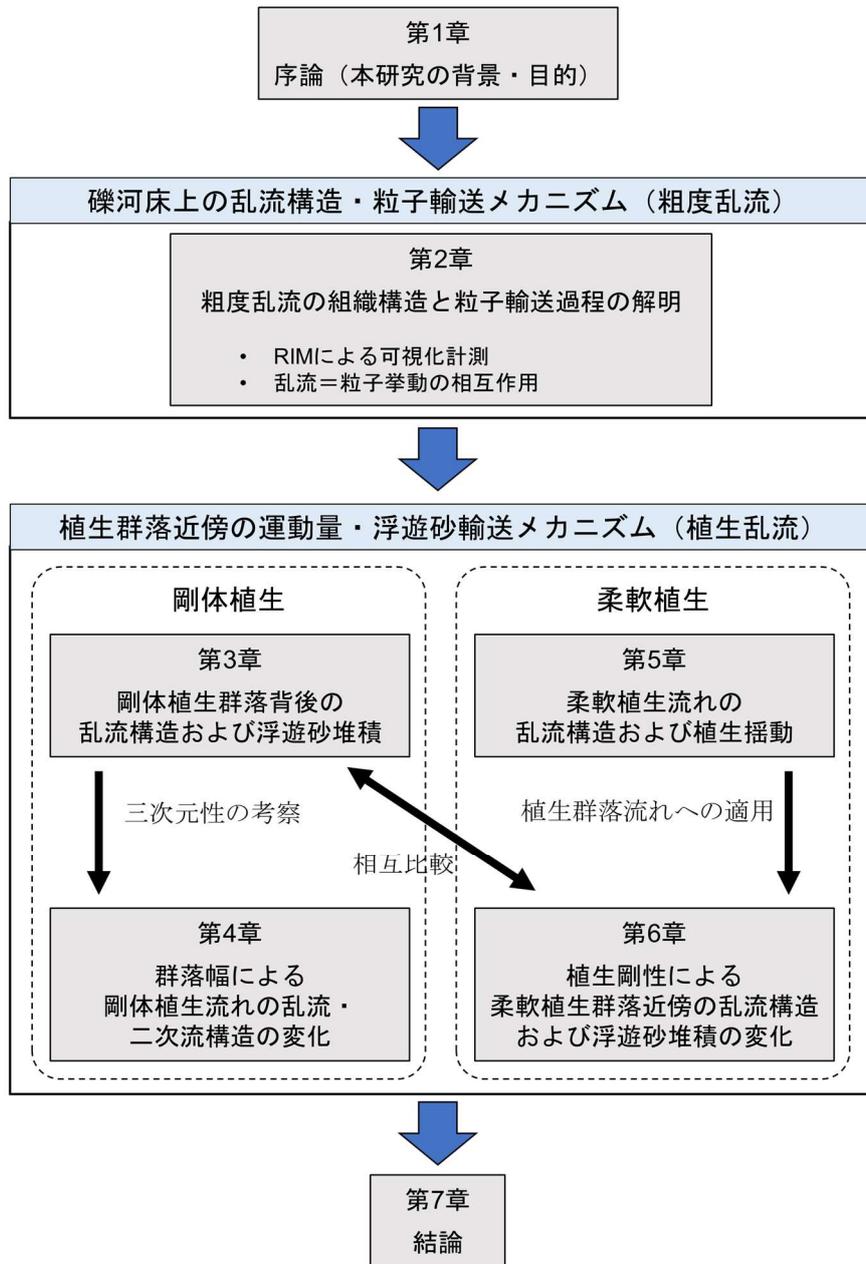


図-1.2 本研究の構成のフローチャート

び非水没植生群落流れについて PIV 流速計測と浮遊砂投入実験を行い、群落近傍の乱流構造が浮遊砂堆積領域に及ぼす影響を明らかにする (3 章)。また、植生群落の横断方向幅を変化させた幅広い実験条件の下で鉛直面 PIV・水平面 PIV を実施することで、植生群落近傍の三次元的な乱流・二次流構造の解明を試みる (4 章)。

5-6 章では実際の植物のように植生要素が柔軟性を有する場合を想定し、柔軟植生群落近傍の乱流構造と浮遊砂輸送メカニズムについて考察する。まず、予備的な考察として、柔軟植生要素が流下方向・横断方向に一様に分布する十分に発達した柔軟植生流れを対象に、柔

1 章 序論

軟植生要素の揺動が乱流構造に及ぼす影響について検討する (5 章). また, 植生要素の柔軟性 (曲げ剛性) を変化させた複数ケースの柔軟植生群落流れを対象に PIV および浮遊砂堆積実験を実施し, 3 章の結果との比較から植生要素の柔軟性が乱流構造および浮遊砂堆積に及ぼす影響を明らかにする (6 章).

1.4 PIV による乱流計測手法

開水路流れの乱流構造については, LES (Large-eddy simulation) や DNS (Direct numerical simulation) といった数値解析手法が発展してきた一方で, 水路実験における基礎的検討についても広く行われてきた. 水路実験における代表的な流速計測手法としては, 最も古典的な手法であるピトー管を用いたものや ADV (Acoustic Doppler velocimetry, 超音波流速計) が挙げられる. これらの手法は比較的安価かつ簡便に 1 地点の流速を計測することが可能であり, 流速計測手法として広く利用されてきた. しかしながら, これらはプローブを流水中に挿入する接触型の計測手法であり, 計測によって計測対象の流れ場を乱すおそれがある. このような課題を解消するために, 近年ではレーザー光を用いた流れ場の可視化による非接触での流速計測手法が確立されている. 代表的なものとしては LDV (Laser Doppler velocimetry, レーザードップラー流速計) が挙げられ, 本手法では 2 本のプローブから照射されるレーザー光の干渉縞から 1 地点における流速の時系列データを時間的・空間的に高分解能で計測できる. また, シート状レーザー光内のトレーサー粒子の挙動から流速データを算出する PIV は, 一度に平面内の瞬間流速分布を計測できるため, 主に乱流構造の解明を目的とした水路実験において近年広く利用されている^{14,15)}.

以下に, PIV の代表的な計測原理の一つである画像相関法¹⁶⁾の概要について述べる. 画像相関法の代表的なアルゴリズムとして, 直接相互相関法 (Direct cross-correlation method) が挙げられる. 本手法では時間的に連続する 2 時刻の画像を抽出し, 第 1 時刻 t_1 の画像上の検査領域 (Interrogation window) における輝度値の空間分布と近い領域を第 2 時刻 $t_2 (= t_1 + \Delta t)$ の画像上の探査領域 (Search region) 内で検出することで, 2 画像間におけるトレーサー粒子の移動量を算出する.

直接相互相関法の基本アルゴリズムは次の通りである. まず, 各流速算出点近傍において, 時刻 t_1 の画像上に検査領域 ($N \times N$ ピクセル) を, 時刻 $t_2 = t_1 + \Delta t$ の画像上に探査領域 ($N_s \times N_s$ ピクセル) をそれぞれ設定する. また, 検査領域と同サイズの候補領域 (Candidate region, $N \times N$ ピクセル) を時刻 t_2 の探査領域内で移動させながら設定する. 以上のように設定した検査領域における輝度値分布 $f(X_i, Y_j)$ と各候補領域における輝度値分布 $g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y)$ の相互相関関数 $C(\Delta X, \Delta Y)$ を次式により計算する.

$$C(\Delta X, \Delta Y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(X_i, Y_j) g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) \quad (1.1)$$

また、相互相関関数 $C(\Delta X, \Delta Y)$ を各輝度値分布の自己相関関数によって正規化した相互相関係数 $R(\Delta X, \Delta Y)$ によって相関値の評価を行う場合も多い。

$$R(\Delta X, \Delta Y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\} \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}^2}} \quad (1.2)$$

このように算出された相互相関係数あるいは相互相関関数の空間分布から、相関値がピーク値をとる移動量 $(\Delta X_{\text{peak}}, \Delta Y_{\text{peak}})$ をトレーサー粒子の移動量として決定する。

一方で、デジタル画像を用いて相関分布を評価する場合、算出されるトレーサーの移動量は画素単位となる。そこで、相関値のピーク位置 $(\Delta X_{\text{peak}}, \Delta Y_{\text{peak}})$ 近傍の相関分布を対象に、相関値のピーク位置を再計算することで、より高精度（0.1 ピクセル単位）に移動量 $(\Delta X_{\text{sub}}, \Delta Y_{\text{sub}})$ を算出することができる。このような解析はサブピクセル解析と呼ばれ、相関分布として正規分布を仮定すると移動量は以下のように算出できる。

$$\Delta X_{\text{sub}} = \Delta X_{\text{peak}} - \frac{1}{2} \frac{\ln R(\Delta X_{\text{max}} + 1) - \ln R(\Delta X_{\text{max}} - 1)}{\ln R(\Delta X_{\text{max}} + 1) - 2 \ln R(\Delta X_{\text{max}}) + \ln R(\Delta X_{\text{max}} - 1)} \quad (1.3)$$

$$\Delta Y_{\text{sub}} = \Delta Y_{\text{peak}} - \frac{1}{2} \frac{\ln R(\Delta Y_{\text{max}} + 1) - \ln R(\Delta Y_{\text{max}} - 1)}{\ln R(\Delta Y_{\text{max}} + 1) - 2 \ln R(\Delta Y_{\text{max}}) + \ln R(\Delta Y_{\text{max}} - 1)} \quad (1.4)$$

以上のように算出された移動量ベクトル $(\Delta X_{\text{sub}}, \Delta Y_{\text{sub}})$ および2画像間の時間間隔 Δt から、各計測点における瞬間流速ベクトル (\tilde{u}, \tilde{v}) を算出する。

$$(\tilde{u}, \tilde{v}) = \alpha \left(\frac{\Delta X_{\text{sub}}}{\Delta t}, \frac{\Delta Y_{\text{sub}}}{\Delta t} \right) \quad (1.5)$$

ここで、 α は画像上のピクセル座標値と実スケールのキャリブレーション値である。

画像相関法のアルゴリズムとして、上記のように式(1.1)の相互相関関数を直接評価する直接相互相関法のほかに、2時刻の輝度分布のクロススペクトルを逆フーリエ変換することでより高速に相互相関関数を求めるFFT相互相関法（FFT-based cross-correlation method）も広く用いられている。本研究では、このうちより単純なアルゴリズムである直接相互相関法に基づいて流速データの解析を行い、PIV計測を通じて粗度流れおよび植生流れにおける乱流構造の解明を試みる。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次: 側岸部植生群落周辺の掃流過程と分級, 土木学会論文集, No.503(II-29), pp.99–108, 1994.
- 2) Larsen, L. G.: Multiscale flow-vegetation-sediment feedbacks in low-gradient landscapes,

1章 序論

Geomorphology, Vol.334, pp.165–193, 2019.

- 3) 原田守啓, 永山滋也, 大石哲也, 萱場祐一: 揖斐川高水敷掘削後の微地形形成過程, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71(4), I_1171–I_1176, 2015.
- 4) 傳甫潤也, 井上卓也, 橋本慎一, 千葉学, 戸村翔, 川上北斗, 佐々木博文: 河道の二極化の形状指標と河岸侵食リスクの関係, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77(2), I_373–I_378, 2021.
- 5) Rowiński, P. M., Västilä, K., Aberle, J., Järvelä, J., Kalinowska, M. B.: How vegetation can aid in coping with river management challenges: A brief review, *Ecohydrology & Hydrobiology*, Vol.18(4), pp.345–354, 2018.
- 6) 佐貫方城, 大石哲也, 三輪準二: 全国一級河川における河道内樹林化と樹木管理の現状に関する考察, 河川技術論文集, Vol.16, pp.241–246, 2010.
- 7) 大石哲也: 洪水に伴う砂礫内での種子供給と土砂移動特性との関係性の解明, 河川整備基金成果報告書, 2016.
- 8) 藤田光一, 李参熙, 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.
- 9) 赤堀良介, 原田守啓, 角谷太一, 桂知代, 柴本陸: 土砂捕捉パネルによる浮遊砂堆積状況の観測と簡易なモデルを用いた堆積速度の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77(2), I_1027–I_1032, 2021.
- 10) 宮本仁志, 盛岡淳二, 神田佳一, 道奥康治, 魚谷拓矢, 大地洋平, 阿河一穂: 流量変動のインパクトを考慮した河道内樹林動態の確率モデル, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67(4), I_1405–I_1410, 2011.
- 11) 牛島達夫: 乱流中での微小な粒子・液滴・気泡の混合・拡散について, *ながれ*, Vol.23, pp.191–201, 2004.
- 12) Sumer, B. M., and Oğuz, B.: Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel, *J Fluid Mech*, Vol. 86: 109–127, 1978.
- 13) 芦田和男, 藤田正治: 河床粒子の浮遊機構とそのモデル化, 土木学会論文集, No.375(II-6), pp.79–88, 1986.
- 14) Adrian, R. J., Christensen, K. T., and Liu, Z.-C.: Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields, *Exp Fluids*, Vol.29, pp.275–290, 2000.
- 15) Campbell, L., McEwan, I., Nikora, V., Pokrajac, D., Gallagher, M., and Manes, C.: Bed-load effects on hydrodynamics of rough-bed open-channel flows, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.131(7), pp.576–585, 2005.
- 16) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版, 2002.

第 2 章

粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

2.1 概説

乱流中における浮遊粒子の輸送現象は、実河川の生態系を特徴付けるうえで重要な役割を担うことが知られている。礫河床内部への細粒土砂の堆積は河床形状の変化を引き起こすほか、水生生物の生息環境の変容にもつながる^{1,2)}。また、洪水時に細粒土砂とともに上流から輸送された植物の種子が減水時に礫間へ捕捉されることで、河道内の裸地における植生群落の発生および既存の植生領域の拡大の要因となることも指摘されている³⁾。このような背景から、これまでに数多くの既往研究において、水路床に粗度を有する開水路乱流中の粒子輸送メカニズム、特に乱流の組織構造とその粒子挙動への影響についての解明が進められてきた。

まず、河床の境界条件に伴う複雑な平均流・乱流構造の解明に焦点を当てた研究が多くみられる。Nikora ら(2007)⁴⁾は時間平均統計量をさらに空間平均する二重平均法 (Double-averaging method, DAM) を提案しており、粗度近傍における流れ場の非一様性を評価し、運動量輸送を考える手法として有効であるとしている。また、PIV や LDV などの流速計測手法を用いた水路実験、あるいは LES や DNS 等による数値シミュレーションを通じ、各粗度要素 (あるいは河床礫) 近傍における比較的小スケールの運動量輸送メカニズムについても詳細な検討が重ねられている⁵⁻⁸⁾。その結果、粗度要素の近傍ではヘアピン渦や馬蹄渦などのさまざまな種類の渦構造が発達することが明らかにされており、またそれらが物質・運動量輸送過程において重要となることが示唆されている。さらに、Cameron ら(2017)⁹⁾は長時間の PIV 流速計測結果から、粗度上の開水路流れでは水深スケールの Large-scale motion (LSM) および水深の 10 倍程度の Very large-scale motion (VLSM) といった大規模な乱流

本章は以下の論文に掲載された内容を中心に、さらに検討を加えたものである。

<英文>

- 1) Matsumoto, K., Okamoto, T., and Sanjou, M.: Particle entrainment by bursting phenomena in open-channel flow over rough bed, *Environmental Fluid Mechanics*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10652-024-09986-w>
- 2) Matsumoto, K., Okamoto, T., and Sanjou, M.: PIV measurement of turbulent flow and particle motion over a rough wall, *Proc. of 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Osaka (online), paper 327 (6 pages), July, 2022.

<和文>

- 3) 岡本隆明, 松本知将, 大石哲也, 山上路生, 岡崎拓海: 半球粗度まわりの乱流構造が種子捕捉過程に与える影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 76, No. 1, pp. 118–128, 2020.

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

構造が発達することを示唆している。しかしながら、以上のように粗度上の大規模な乱流構造、あるいは粗度要素近傍の小規模な乱流構造の発達についてはそれぞれ既往研究において報告されている一方で、これらの異なるスケールを有する乱流構造間の相互作用は十分に明らかにされていない。

境界層流れにおける乱流の組織構造が粒子挙動に及ぼす影響、特に乱流による壁面上粒子の浮上メカニズムについても数多くの研究で議論されてきた。一般に、河川の流砂量は流量や底面せん断応力といった平均流に基づく統計量によって評価されることが多い。一方で、礫床流れのように複雑な境界条件の場合、流れ場および河床形状の非一様性を十分に考慮できないため、その精度には課題が残されている¹⁰⁻¹²⁾。このような河川における土砂輸送量の評価式を改善するためには、乱れと粒子挙動の関連についてより詳細に現象を解明する必要がある。

乱流と粒子挙動の相互作用に関する先駆的な研究として、Sumer & Oğuz (1978)¹³⁾の研究が挙げられる。彼らは水路実験において滑面近傍の粒子挙動を詳細に観察し、Ejection (低運動量流体の上方への輸送) および Sweep (高運動量流体の下方への輸送) からなる Bursting 現象が壁面近傍からの粒子の浮上と密接に関連していることを指摘している。他の既往研究¹⁴⁻¹⁶⁾においても滑面近傍の粒子挙動に関する観察が行われており、同様の乱流=粒子相互作用の存在が示唆されている。また、近年では PIV をはじめとする流速計測手法の発達に伴い、乱流の組織構造が粒子を巻き込んで輸送する過程 (Particle entrainment) を直接計測した例も報告されている (van Hout (2013)¹⁷⁾, Baker & Coletti (2021)¹⁸⁾)。以上より、流砂量を評価し、河床形状の変化を予測するうえでも、河床近傍の乱流構造を理解することが不可欠であると考えられる^{19, 20)}。実際に、Drake ら(1988)²¹⁾は実河川においても河床近傍の土砂粒子が Sweep によって集団的に浮上し、輸送されることを指摘している。これらの研究成果は乱流の組織構造と粒子輸送の相互作用の一端を明らかにしたが、その多くが滑面流れを対象としており、自然の礫床河川のように複雑かつランダムな河床形状を有する粗面流れの粒子輸送メカニズムについては未解明点が多く残されている。

粗度流れにおける粒子輸送過程に関する研究のほとんどは、河床を構成する粗度要素と同程度の粒径を有する粒子の挙動を対象としている²²⁻²⁶⁾。Radice ら(2013)²⁷⁾は移動床流れにおいて Bursting による Sweep や Ejection の発生が土砂粒子の輸送と強く関連していることを示唆した。また、Cameron ら(2020)²⁸⁾は均一粒径の球状粗度からなる粗面流れを対象に PIV 計測を行い、粗面からの球状粒子の流出は VLISM による大規模な高速流体の通過によって引き起こされることを指摘している。このような乱流現象に起因する粒子の間欠的な挙動を定量的に評価するために、粒子の移動距離や流出率を確率的に評価するモデルも提案されている^{29, 30)}。しかしながら、実河川のように河床材料の粒度分布にばらつきがある場合の土砂輸送メカニズムを理解するためには、大粒径の礫間における細粒砂粒子の輸送メカニズムを明らかにすることが必要である。Papanicolaou ら(2001)³¹⁾は河床の粗度要素の粒径や配置が粗面上の乱流構造および粒子の浮上機構に影響を及ぼすことを指摘している。

この点に関連して、Ali & Dey (2016)³²⁾ は移動粒子に作用する抗力および揚力に着目し、粒子の移動限界に関する新しいモデルを提案している。一方で、大礫間で発達する乱流の組織構造の時空間スケールには未解明点が多く、乱流構造に基づいた粗面上の粒子輸送メカニズムについては十分な現象解明が進んでいない。

本研究は粗面流れの粗度要素近傍および粗面内部における乱流の組織構造と浮遊粒子の浮上機構の解明を目的とする。実河川において河床で静止する大粒径の礫間における細粒土砂粒子の輸送過程について検討するために、半球状粗度からなる粗面上の開水路流れを対象に2種類の水路実験を実施する。まず、PIVによる流速計測を実施し、粒子の輸送メカニズムに影響を及ぼすと考えられる粗面近傍および内部の複雑な乱流構造の解明を試みる。ここで、粗度層内部の流速計測には屈折率整合法と呼ばれる手法を導入し、計測例の少ない粗度要素背後の流れ場の可視化計測を行う。次に、水路床の粗度要素よりも十分に粒径の小さい粒子を水路内に投入し、浮遊粒子の挙動を観察する粒子投入実験を行う。PIVによる流速計測と浮遊粒子の軌跡のトラッキング追跡を同時に行うことで、乱流の組織構造と粒子浮上機構との関連について考察する。

2.2 屈折率整合法による粗度層内部の可視化手法

(1) 屈折率整合法の概要

上述の通り、粗面上の乱流構造についてはこれまでに多くの既往研究で検討されてきた。その一方で、粗面内部の流れ場については計測部手前の粗度要素の背後となるため、PIVやLDVといった流速計測手法では可視化が困難であるとされてきた。また、アクリルやガラスの屈折率は水よりも大きいため、このような透明材質を流水中の障害物の材質として採用しただけではPIVにおいてレーザー一面内のトレーサーの像を撮影することができない。したがって、障害物背後の流れ場を可視化する新たな計測技術の開発および確立が求められている。

このような流速計測における制約を解消するための手法として、障害物を透明材質で作製し、透明材質と流体の屈折率を等しくすることで障害物背後あるいは内部の流れ場の計測を可能にする屈折率整合法 (Refractive index matching, RIM) が提案されている³³⁻³⁵⁾。この屈折率整合法を利用したPIVやPTVなどの画像計測では、これまでに低屈折率透明材質と高屈折率流体を用いて行われる手法が一般的に利用されている。特に、透明な障害物模型をシリコンゴムやガラスで作製し、流体にヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液を用いた実験例が複数報告されている。NaI水溶液の特性については江藤ら(1996)³⁶⁾が文献調査および計測を通じて検討を加えており、飽和状態で他の物質の水溶液と比較しても高い屈折率を示すことに加え、粘性が純水とほぼ等しく高レイノルズ数の乱流場の再現が可能であることから、屈折率整合法に用いる溶液の溶質として適するとしている。

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

表-2.1 既往研究における屈折率整合法 (RIM) を用いた流速計測例

	対象とする流れ場	物体の透明材質	流体の種類
Kim ら(2018) ³⁷⁾	球状粗度流れ	アクリル樹脂	NaI 水溶液 (63%)
Houseago ら(2022) ³⁸⁾	柔軟植生流れ	ポリプロピレン	NaI 水溶液 (63%)
Gundersen ら(2022) ³⁹⁾	柔軟植生流れ	ポリウレタン	NaI 水溶液 (63%)
Weitzman ら(2014) ⁴¹⁾	円柱群周辺の流れ	ハイドロゲル (SAP)	水

表-2.1 に既往研究における屈折率整合法を用いた PIV の計測例を示す。Kim ら(2018)³⁷⁾ は水路内にアクリル樹脂製の球状粗度を規則的に配置し、透水性河床を模擬した開水路流れを対象に PIV 流速計測を実施した。ここでは流体として、アクリル球と屈折率が等しくなるように調節された NaI 水溶液が用いられており、河床近傍および河床内部の浸透流の可視化計測に成功している。Houseago ら(2022)³⁸⁾ は透明なポリプロピレン製の柔軟植生要素と NaI 水溶液を使用して柔軟植生流れを再現し、柔軟植生キャノピー内外の運動量輸送メカニズムについて考察している。Gundersen ら(2022)³⁹⁾ はポリウレタン製の透明な柔軟植生要素と NaI 水溶液で屈折率整合を行い、柔軟植生要素近傍で発達する小スケールの乱流構造の計測に成功している。

(2) SAP ハイドロゲルを用いた屈折率整合法

NaI 水溶液のような高屈折率流体として利用する屈折率整合法は、従来計測が困難とされてきた流れ場の計測を可能にし、障害物近傍の流れ場を明らかにする有効な手法であると考えられる。その一方で、NaI 水溶液は金属に対する腐食性や人体への毒性が強いため、計測機器や実験装置の管理および排水時の処理に注意を要する。また、電気的な性質の変化により、センサーや計測器具の設定を調整する必要性についても指摘されている³⁶⁾。加えて、NaI 水溶液とシリコンゴム等の透明材質の屈折率を整合させるためには質量パーセント濃度を 60%程度にする必要があり、費用の観点から比較的小規模な水路実験での利用に限られる。既存の実験設備や計測器具を利用しつつ、また比較的大規模な水路実験において屈折率整合法を応用するためには、水と屈折率がほぼ等しい低屈折率透明材質を用いた屈折率整合技術の開発が必要である。

このような背景を踏まえ、水を流体として使用する水路実験において容易に屈折率整合を実現する透明材質として、高吸水性高分子化合物 (Super-absorbent polymer, SAP) が注目されている⁴⁰⁻⁴³⁾。SAP は網目状の分子構造を有する高分子化合物であり、非常に優れた吸水・保水能力を持つことが知られている。SAP の多くは網目構造内においてナトリウムイオンや水素イオンなどの陽イオンを有しており、これらのイオンが電離することでゲル内外にイオン濃度差が発生する。その結果、網目構造内外の浸透圧に起因して平衡状態に至るまで大量の水を吸収し、透明なゲル (ハイドロゲル) を形成する。

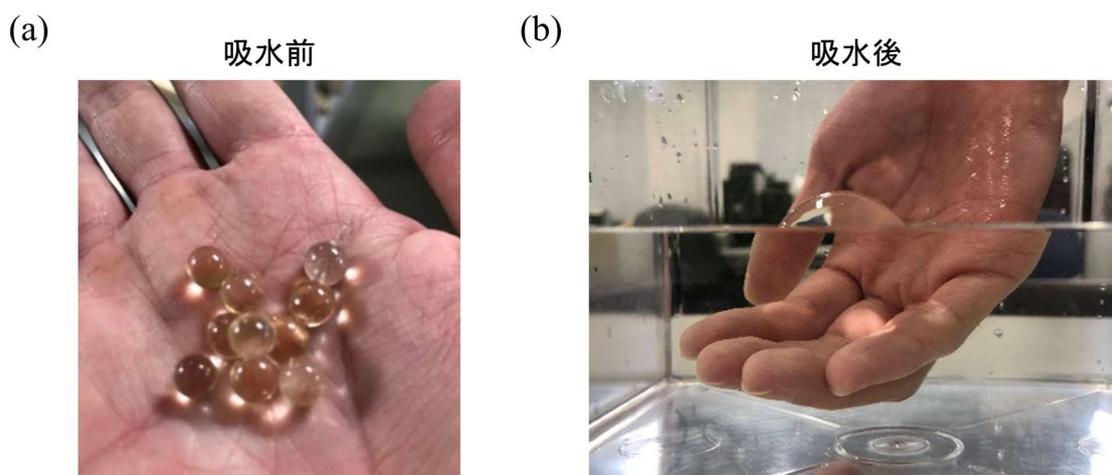


図-2.1 SAP ハイドロゲルの吸水過程 ((a)吸水前, (b)吸水後)

SAP のうち、工学上最も一般的に利用されている化合物としてポリアクリル酸ナトリウムが挙げられる。図-2.1 に(a)乾燥状態および(b)吸水後のポリアクリル酸ナトリウム顆粒の写真をそれぞれ示す。(a)の乾燥状態では粒径が約 5–7 mm であるが、(b)の膨潤状態では粒径が約 40–50 mm にまで増加しており、このことからハイドロゲルが乾燥状態の体積の 10^3 倍程度の水を吸収して膨潤したことが確認できる。このように、ポリアクリル酸ナトリウムをはじめとする SAP は大量の水を吸収することで、体積の 99%以上が水で構成され、屈折率が水とほぼ等しい低屈折率かつ透明なハイドロゲルを形成する。実際に、膨潤状態のゲルは水中において輪郭を目視で確認することが困難であり、水路実験に使用した場合、ハイドロゲル背後の現象の観測に影響を及ぼさないと考えられる (図-2.1(b))。

しかしながら、これらのハイドロゲルを実際の水路実験に適用した例は未だに少なく、特に本手法を通じて粗度層内部の乱流構造を明らかにした研究例は極めて少ない。本研究では礫河床近傍および内部における乱流の組織構造とその粒子輸送への影響について考察するために、SAP ハイドロゲルを半球状粗度の素材として使用することで粗度層内部の可視化計測を行う。ここで、SAP ハイドロゲルは弾力性のある素材であるため、流速の大きな条件では流水中で変形あるいは振動するおそれがある。そこで、本計測に先立ち、透明粗度の使用による流れ場への影響の有無について検証し、SAP ハイドロゲルを利用した屈折率整合 PIV 計測の有効性についても考察を加える。

2.3 計測システム・実験手法

(1) 計測システム

図-2.2 に本研究の計測システムおよび実験装置の概要図を示す。本研究では長さ 10 m, 幅 $B = 0.40$ m, 高さ 0.50 m のガラス製可変勾配水路を使用した。ここで、 x , y および z はそ

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

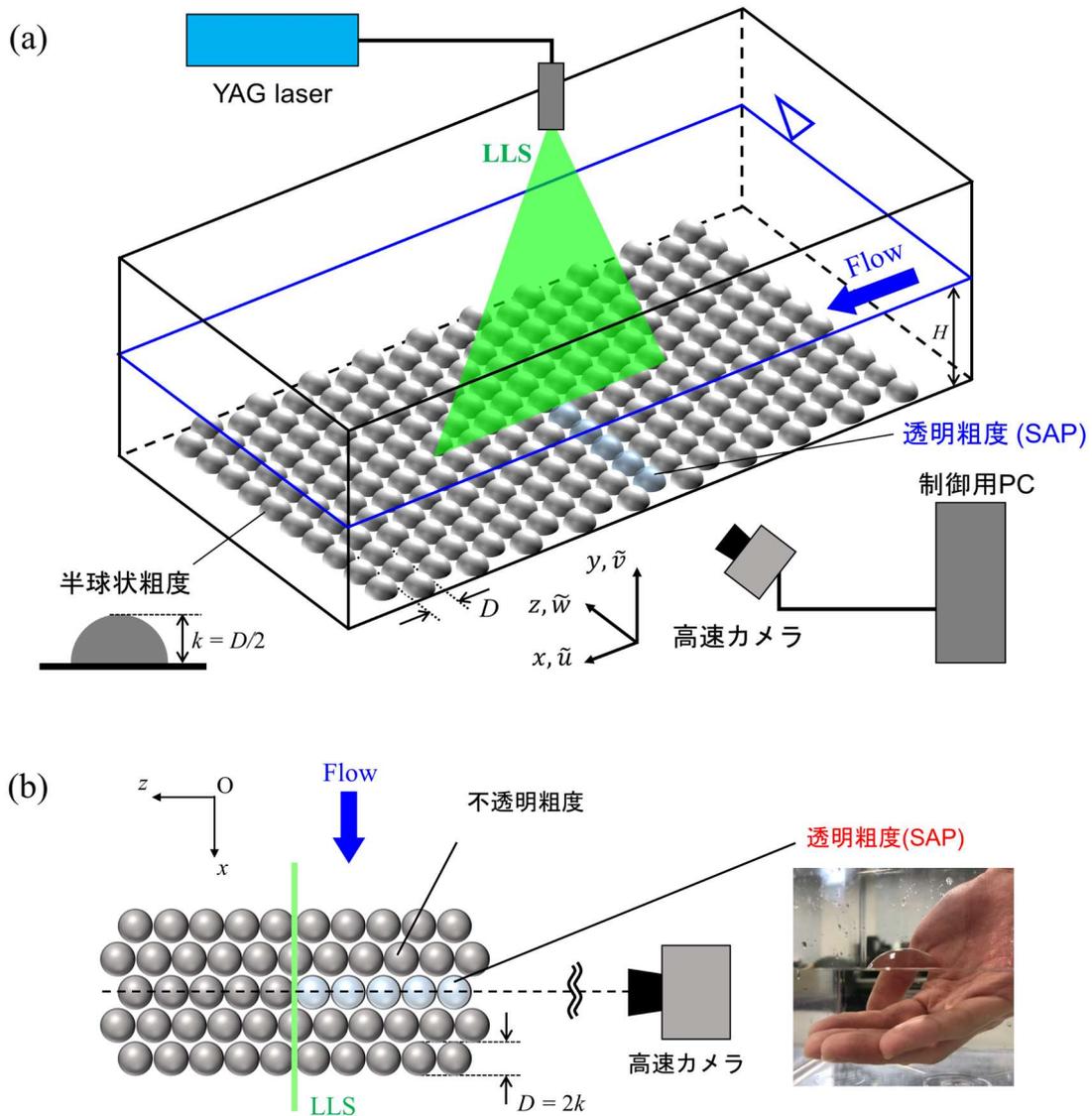


図-2.2 計測システム ((a)PIV 流速計測, (b)粗度要素配置)

それぞれ流下方向, 鉛直方向および横断方向座標であり, 座標系の原点 O は水路底面 ($y = 0$) および中央ライン ($z = 0$) とした. また, 瞬間流速の各方向成分を \tilde{u} , \tilde{v} および \tilde{w} とし, それぞれ時間平均成分 (U , V および W) と乱れ変動成分 (u , v および w) に分解される ($\tilde{u} = U + u$, $\tilde{v} = V + v$ および $\tilde{w} = W + w$). また, 水深 H は水路下流端に設置された可動式堰によって調節でき, $H = 12.0 \text{ cm}$ で等流条件となるように調節した.

本研究では水路床上に再現した粗面上および内部の流れ場を対象に実験を行った. 図-2.2(b)に本実験の粗度要素配置の概略図を示す. 実河川において粒径の大きい礫が砂面から半分ほど露出した河床形状を想定し, 直径 $D = 3.6 \text{ cm}$ の半球状粗度要素を千鳥格子状に配置した. 半球状粗度あるいは球状粗度を有する開水路流れを対象とする研究では, 粗度要素を正方格子状に配置した例が多くみられる^{6,8)}. 一方で, このような粗度配置の場合, 粗度

表-2.2 水理条件

H	k	H/k	U_m	u_*	k^+	Re	Fr	実験内容
[cm]	[cm]		[cm/s]	[cm]		$\equiv U_m H / \nu$	$\equiv U_m / \sqrt{gH}$	
12.0	1.8	6.7	30	3.6	650	36,000	0.28	PIV 流速計測 粒子投入実験

要素の頂部と谷間がそれぞれ流下方向に並んで分布するため、横断方向に非一様かつ周期的な平均流・乱流構造が発達する。本研究では実河川における河床形状のランダム性を考慮するために、粗度の頂部と谷間が交互に並ぶ千鳥格子状配置を採用した。粗面内部 ($y < D/2$) の空隙率は 47.6% であり、既往の水路実験^{6,37)} および数値解析^{7,8)} における条件、さらには実河川における野外計測の結果⁴⁴⁾ とも概ね一致している。粗度高さ k は半球状粗度の半径 ($k = D/2 = 1.8 \text{ cm}$) に対応し、かぶり水深比 (粗度高さに対する水深の比, $H/k = 6.7$) が比較的大きい流れ (High relative submergence) に分類される⁴⁵⁾。粗度領域は水路の上流端から流下方向に約 7 m に及ぶ領域とした。

(2) 水理条件

表-2.2 に本研究の水理条件を示す。 U_m は断面平均流速であり、流量 Q を断面積 (BH) で除した値として定義される ($U_m \equiv Q/(BH)$)。 Re および Fr はそれぞれレイノルズ数およびフルード数であり、断面平均流速および水深を用いて定義した ($Re \equiv U_m H / \nu$, $Fr \equiv U_m / \sqrt{gH}$)。ここで、 g は重力加速度、 ν は水の動粘性係数である。本水理条件におけるフルード数は 1 より十分に小さいため、大きな水面変動が生じないものと予想される。水面変動については、予備実験において超音波式波高計を用いて 10 Hz のサンプリングレートで 60 s 間計測を行った。その結果、水面変動の標準偏差は時間平均水深の 0.14% と極めて小さく、本水理条件では水面変動の影響は無視できるものと考えられる。

後述の通り、本研究では PIV によって計測された流速分布と対数則とのフィッティングから摩擦速度 u_* を評価した ($u_* = 3.6 \text{ cm/s}$)。また、 $k^+ \equiv u_* k / \nu$ は粗度レイノルズ数であり、壁面の粗度を定量的に評価するうえで重要な無次元量である。Raupach ら(1991)⁴⁷⁾ は $k^+ > 70$ を満たす流れ場を完全粗面流れと定義しており、本研究で対象とした流れ場についても完全粗面に分類される。

(3) PIV による流速計測実験

粗度層近傍および内部における乱流構造を明らかにするために、鉛直面 PIV による流速計測⁴⁸⁻⁵⁰⁾ を行った (図-2.2(a))。3.0 W の YAG レーザーを光源とするレーザー光線をシリンドリカルレンズによって厚さ 2 mm のレーザーライトシート (LLS) に変換し、水路上方から連続的に照射した。LLS の横断方向照射位置は水路中央近傍の粗度要素間の谷部ライ

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

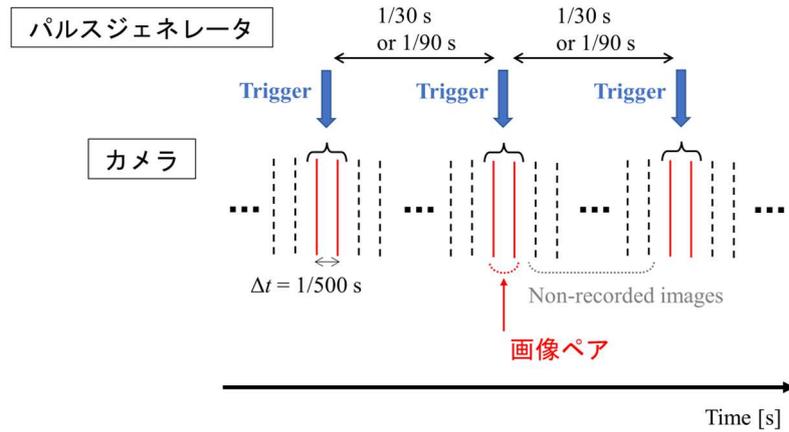


図-2.3 パルスジェネレータによる画像ペアの取得パターン

ン ($z/k = 0$) とした (図-2.2(b)). 水路側方に高速カメラ (Ditect 製 HAS-EF) を設置し, LLS 内のトレーサー粒子の挙動をデジタル撮影した. カメラの撮影領域は 1280×1024 ピクセルで, 実スケールでは全水深を含む約 $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 領域に相当する. また, カメラのフレームレートは 500 Hz とした.

取得された計測画像から, 直接相互相関法によって各時刻における 2 成分の流速分布データ (\tilde{u}, \tilde{v}) を算出した. 検査領域のサイズは 27×27 ピクセルであり, 実スケールに換算すると $3.7 \text{ mm} \times 3.7 \text{ mm}$ 程度となる. また, カメラのフレームレート (500 Hz) より, 連続する 2 枚の画像間の粒子の移動量は最大で 5 ピクセル程度である. 一方で, 500 Hz のフレームレートは本研究で対象とする大規模な乱流構造 ($H/U_m \approx 0.4 \text{ s}$) の計測に必要な時間分解能と比べて非常に高く, またカメラの内蔵メモリの制約から計測時間が短くなる. そこで, カメラにパルスジェネレータを接続して 30 Hz の外部トリガーを与えることで, 図-2.3 に示すように連続画像のペア (時間間隔 $1/500 \text{ s}$) を 30 Hz のサンプリングレートで計測した.

トレーサー粒子には, 粒径 $d_p = 80 \mu\text{m}$, 比重 $\sigma/\rho = 1.02$ (σ : 粒子の密度, ρ : 水の密度) のポリスチレン粒子を用いた. 流れの可視化計測を行うためには, トレーサー粒子の挙動が対象とする時間スケールの流速変動に対して十分鋭敏に応答することが求められる. 流体中の浮遊粒子の流れへの追随性を評価する無次元量として, 次式で定義されるストークス数 St が知られている (Hjermfelt & Mockros (1966)⁵¹, Mollicone ら(2019)⁵²).

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_{\min}} \quad (2.1)$$

ここで, τ_p は次式で定義される粒子応答時間であり, 粒子の移流速度と周囲の流速変動との流速差が十分に減衰するのに要する時間である ($\tau_p = 3.6 \times 10^{-4} \text{ s}$).

$$\tau_p = \frac{\sigma d_p^2}{\rho 18\nu} \quad (2.2)$$

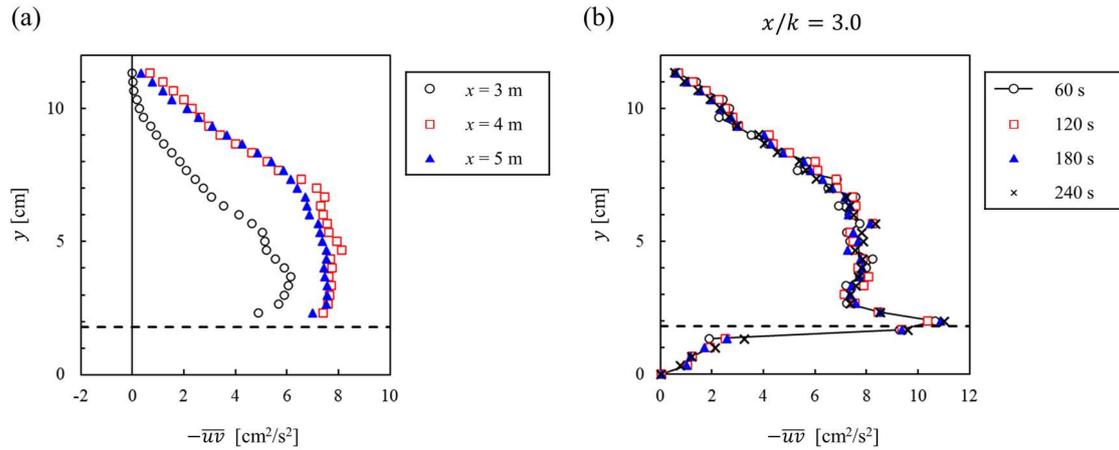


図-2.4 (a)流下方向位置および(b)計測時間によるレイノルズ応力分布の変化

また、 τ_{\min} は対象とする流速変動の最小時間スケールであり、PIVにおける画像ペアのサンプリングレートより、本研究において計測可能な流速変動の最小時間スケールは $\tau_{\min} \approx 1/30 \text{ s}$ 程度と推定される。以上より、トレーサー粒子のストークス数は $St \approx 10^{-2}$ と1よりも十分小さく、流速計測において十分な流れへの追従性を有していると考えられる。

本研究では十分に発達した半球粗度上の乱流場を対象としている。流れの発達について検証するために、予備計測として流下方向位置を変化させて流速計測を実施した。図-2.4(a)に粗度領域上流端から3 m, 4 m および5 m 下流の流下方向位置 ($x = 3 \text{ m}$, 4 m および5 m)におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の鉛直分布を示す。上流側の2流下方向位置 ($x = 3 \text{ m}$ および4 m)を比較すると、レイノルズ応力の値が全水深にわたって流下方向に増加する様子が確認できる。一方で、下流側の2点 ($x = 4 \text{ m}$ および5 m)のレイノルズ応力分布には大きな差が見られない。以上より、 $x \geq 4 \text{ m}$ の領域では乱れが十分に発達し、流下方向に一律な乱流構造が形成されているものと考えられる。本実験では、流れが発達する粗度領域の上流端から4 m 下流の地点 ($x = 4 \text{ m}$)を流速計測の対象領域とした。

流速計測における計測時間は60 sとし、1回の計測で1800対の画像ペアの記録を行った。

図-2.4(b)に計測時間を4通り (60 s, 120 s, 180 s および240 s)に設定した際のレイノルズ応力分布の変化を示す。計測時間によるレイノルズ応力分布の計測結果の変化はほとんど確認されず、このことから60 sの計測時間でも十分に信頼できる乱流統計量の計測が可能であると考えられる。

粗度内部の流れ場を可視化するために、計測部手前の一列の粗度として図-2.2(b)のようにSAP製の半球状透明粗度を用いた (Byron & Variano (2013)⁴⁰, Weitzman ら(2014)⁴¹)。本実験では市販の球状SAPゲル (吸水前粒径0.5 cm)を使用し、内径3.6 cmの球状の型の中で2日間吸水させることで直径3.6 cmの球状ハイドロゲルとした。この透明球を二等分することで、不透明粗度と同じ形状の半球状透明粗度を作製した。なお、SAPハイドロゲルは水中に長時間放置することで吸水が進んで膨張するため、計測中に透明粗度が所定の寸法

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

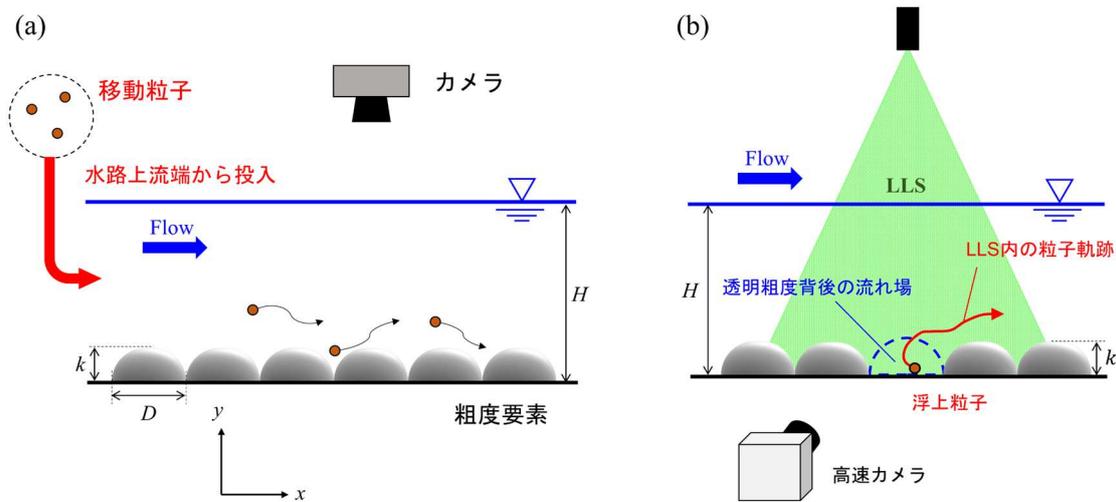


図-2.5 粒子投入実験の概要図

表-2.3 投入粒子のパラメータ

d	d_p^+	d/k	σ/ρ	V_t	V_t/u_*	St	Sh
[cm]	$\equiv du_*/\nu$			[cm/s]			
0.19	69	0.11	1.21	5.2	1.4	55	0.33

および形状から変化することが考えられる。しかし、一回の実験に要した時間は最大2時間程度に限られたため、本実験において計測中にハイドロゲルの寸法や形状に目立った変化は観察されなかった。

(4) 粒子投入実験

粗面近傍における浮遊粒子と乱流の組織構造との関連を明らかにするために、2種類の粒子投入実験を実施した。図-2.5に粒子投入実験の概要図を示す。まず、流水中に粒子を投入し、粗面近傍における水平面内粒子挙動を観察した(図-2.5(a))。次に、粗度層内部に粒子を置き、粒子流出時の軌跡と周囲の乱流構造の同時計測を行った(図-2.5(b))。

本実験では樹林化の要因となる植物の種子が礫河床内部に輸送される過程を想定し、投入粒子として植物の種子である球状のブロッコリーの種子を使用した。表-2.3に本粒子の物性値の概要を示す。粒径および比重はそれぞれ $d_p = 0.19 \text{ cm}$ および $\sigma/\rho = 1.21$ である。ここで、粒子の物性値を安定させるために、実験に使用する粒子については計測前に水中で約24時間吸水させた。 $d_p^+ \equiv du_*/\nu$ および $Sh^+ \equiv u_*^2/\{(\sigma/\rho - 1)gd_p\}$ はそれぞれ粒子レイノルズ数およびシールズ数(無次元掃流力)であり、いずれも粒子の移動特性を特徴付ける無次元数である。静水中で計測された沈降速度は $V_t = 5.2 \text{ cm/s}$ ($V_t/u_* = 1.4$)であり、境界層における粒子輸送メカニズムについて検討した既往研究^{17, 18, 53, 54)}の値と同オーダーである。

また、水よりも比重の大きい粒子 ($\sigma/\rho > 1$) の浮上メカニズムについて考察する際には、粒子応答時間 τ_p は重力の影響を考慮して以下のように定義されることが多い。

$$\tau_p \equiv \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \frac{d_p^2}{18\nu} \quad (2.3)$$

この定義と式(2.1)から本粒子のストークス数は $St = 55$ と算出され、こちらについても既往研究^{17,18)}で使用された粒子と同程度である。

粗度近傍の粒子挙動の観察実験 (図-2.5(a)) では、粒子を水路上流端から投入し、粒子の挙動を水路上方に設置したカメラで撮影した。ここで、一度に投入する粒子の個数は5個程度としたため、粒子が乱流構造に及ぼす影響は無視できるほど小さいものと考えられる。カメラのフレームレートは10 Hzで、撮影領域サイズは1920×1080ピクセル(63 cm×35 cm)とした。また、計測時間は20分程度とし、投入した粒子が計測領域内に流入してから流出するまでの挙動を記録した。粒子挙動のトラッキング追跡には画像解析ソフトウェアである MtrackJ⁵⁵⁾を使用し、撮影された連続画像中で粒子中心位置の水平面内座標 ($x_p(t)$ および $z_p(t)$)の時系列データを取得した。

流速と粒子軌跡の同時計測実験 (図-2.5(b)) では、図-2.2と同様のPIV計測システムにおいて粒子を水路上流端から投入し、LLS内を通過した粒子挙動を対象に縦断面内における粒子軌跡と周辺の乱流構造を計測した。流速変動および粒子挙動をより詳細に計測するために、高速カメラに与える外部トリガーのサンプリングレートは90 Hzに設定した。LLSの照射位置や粗度要素の配置など、PIVに関するその他の設定は流速のみの計測の際と同様である。計測時間は20秒で、画像の撮影枚数は3600枚(画像ペア数は1800)とした。また、計測画像内で確認された粒子挙動について、MtrackJを用いて粒子中心位置の縦断面内座標 ($x_p(t)$ および $y_p(t)$)のデータを取得した。本実験では粗度要素の間の水路床近傍から浮上した粒子挙動例として184個のサンプルを同定し、そのそれぞれについて上記の粒子挙動・流速の同時解析を実施した。

2.4 粗度層近傍および内部の平均流構造

(1) SAP ハイドロゲルによる流れ場への影響の検証

最初に、本節ではSAPハイドロゲル製の透明粗度が流れ場に及ぼす影響の有無について検証する。本計測に先立ち、透明粗度頂部ライン($z/k = -1$)と不透明粗度頂部ライン($z/k = 1$)の2断面に対してPIV計測を実施し、透明粗度近傍(U_T, V_T)・不透明粗度近傍(U_N, V_N)における平均流の計測結果を比較した。図-2.6に2断面における時間平均主流速の(a, b)鉛直面コンターと(c)それらの比較プロット図(U_N, U_T)を示す。ここで、図中の灰色の領域は粗度要素を表しており、白色の領域は計測ラインの手前の粗度要素の背後であったため

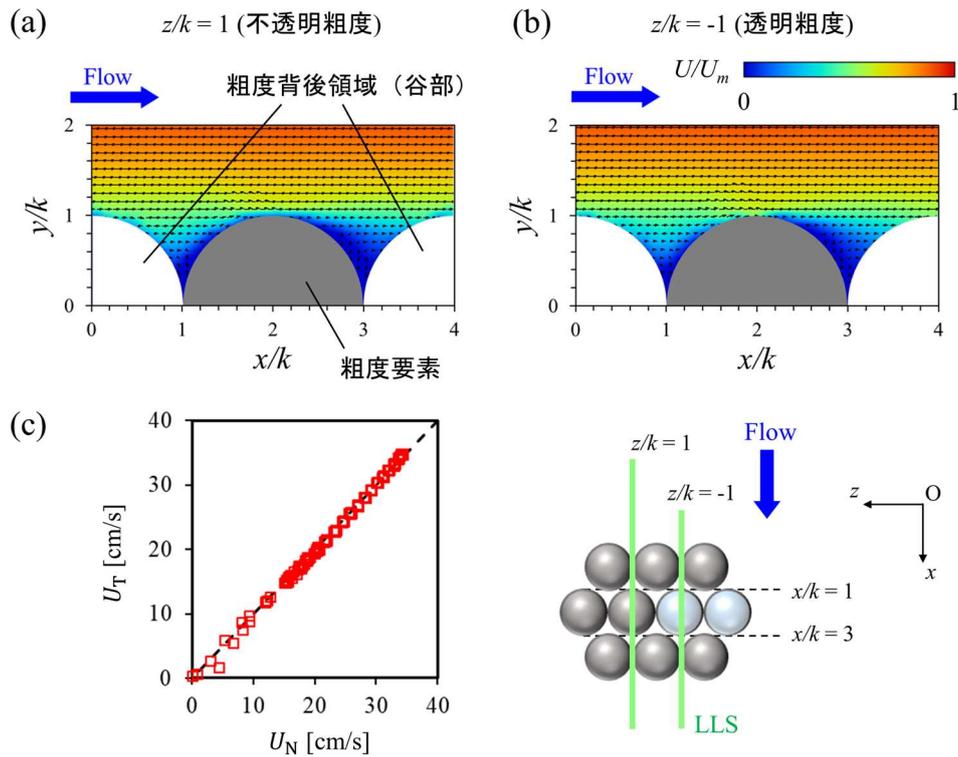


図-2.6 透明粗度・不透明粗度近傍の時間平均主流速の比較

流速が計測できなかった領域である．2断面におけるコンター図からは主流速の分布に大きな違いは確認できず，非常によく似た平均流構造が形成されている．また，2断面の比較プロット図（図-2.6(c)）からも不透明粗度（ $z/k = 1$, U_N ）および透明粗度（ $z/k = -1$, U_T ）頂部ラインにおける流速計測結果はほぼ同じであり，大きな差異がないことが確認される．同様に，図-2.7に時間平均鉛直流速（ V_N , V_T ）の計測結果を示す．鉛直流速についても，上昇流と下降流の空間パターンは類似しており，比較プロット図でも2断面で概ね同じ計測結果となっていることが確認できる．以上より，本研究で粗度要素の一部にSAPハイドロゲル製の透明粗度を使用したことによる流れ場への影響は小さく，透明粗度が振動や変形によって流れ場に干渉しないものと考えられる．

(2) 時間平均主流速

図-2.8(a)に時間平均主流速 U の縦断面コンター図を示す．ここで，図中のベクトル図は時間平均流速ベクトル (U, V) の縦断面内分布を表している．また，白破線で囲まれた領域は透明粗度背後の領域であり，水とSAPハイドロゲルとの屈折率整合によって可視化に成功した領域に対応している．粗度高さより上の $y/k > 1.2$ の領域では主流速の等値線が水路床と概ね平行であり，流下方向に一樣な流れ場が発達している．対照的に，粗面の近傍および内部（ $y/k < 1.2$ ）では粗面の形状に伴って空間的に非一樣な流速分布が見られ，粗度要素ス

2.4 粗度層近傍および内部の平均流構造

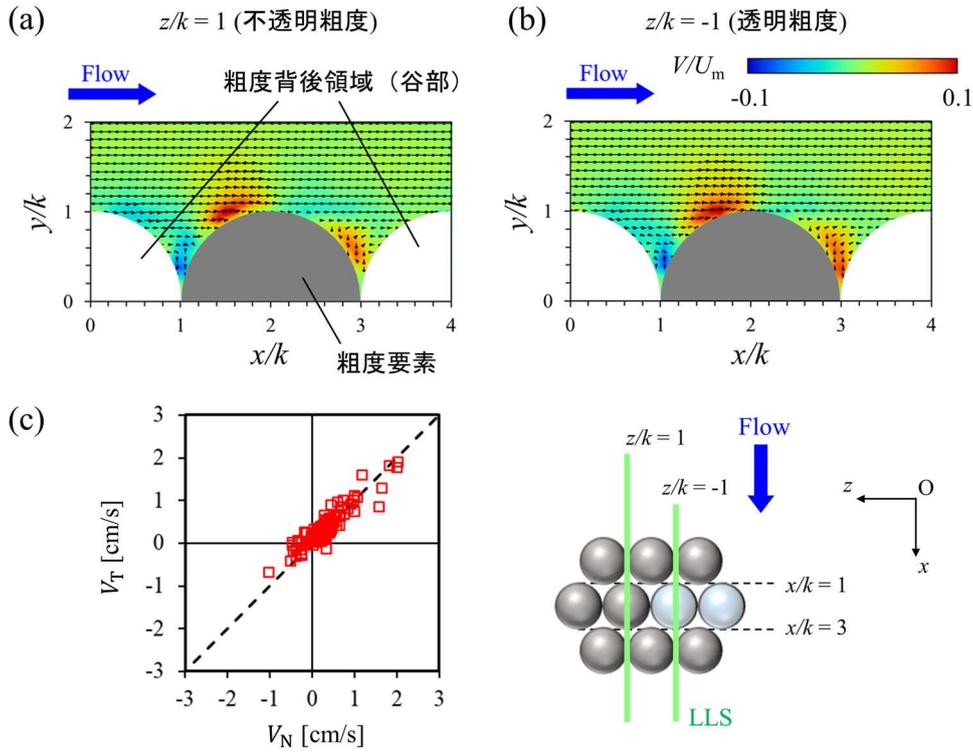


図-2.7 透明粗度・不透明粗度近傍の時間平均鉛直流速の比較

ケールで空間変化する様子が確認される。特に、粗度要素背後の粗度高さ付近 ($1.5 < x/k < 2.5$, $y/k \approx 1$) では流れの剥離によって鉛直方向の流速勾配 ($\partial U/\partial y$) が大きくなっており、局所的な鉛直せん断領域が形成されている。

主流速の計測結果から、本水理条件における摩擦速度 u_* の評価を行った。縦断面コンターでの考察より、粗面近傍では河床形状の影響で空間的に非一様な流速分布となる。そこで、本研究では二重平均法⁴⁵⁾によって時間平均主流速の値を流下方向平均 ($1.0 \leq x/k \leq 5.0$) し、次式で定義される二重平均主流速の鉛直方向分布 $\langle U \rangle(y)$ を求めた。

$$\langle U \rangle(y) \equiv \frac{1}{4k} \frac{1}{\phi(y)} \int_k^{5k} U(x, y) dx \quad (2.4)$$

ここで、 $\phi(y)$ は各鉛直位置における粗面の空隙率であり、半球状粗度要素の幾何学的形状から次のように定式化できる。

$$\phi(y) = \begin{cases} 1 & (y \geq k) \\ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{y}{k}\right)^2} & (0 < y < k) \end{cases} \quad (2.5)$$

十分に発達した粗面流れでは、次の粗面对数則が成立することが知られている^{8,47)}。

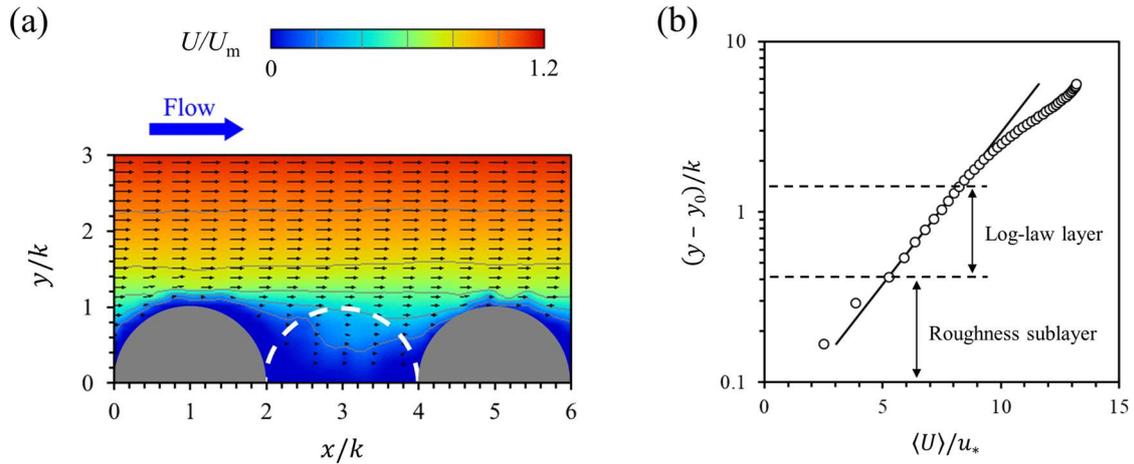


図-2.8 時間平均主流速 U の計測結果 ((a)縦断面コンター, (b)対数則分布との比較)

$$\frac{\langle U \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y - y_0}{k} \right) + B \quad (2.6)$$

ここで、 y_0 は対数則における仮想原点高さで、 B は定数である。また、 κ はカルマン定数であり、一般に開水路流れでは $\kappa = 0.41$ とされている。式(2.4)で算出した二重平均主流速の鉛直方向分布と式(2.6)の対数則のフィッティングから、摩擦速度、仮想原点高さおよび式中の定数はそれぞれ $u_* = 3.6 \text{ cm/s}$ 、 $y_0/k = 0.83$ および $B = 7.4$ と求められた。

図-2.8(b)に二重平均主流速 $\langle U \rangle$ の鉛直方向プロット図を示す。ここで、図中の黒実線は式(2.6)の対数則分布を表している。粗度上の $1.2 \leq y/k \leq 2.4$ ($0.18 \leq y/H \leq 0.35$)の範囲では計測された流速分布が対数則に従う対数則領域 (Log-law layer) が存在している。一方で、粗度高さ近傍および粗度層内部 ($y/k < 1.2$) では、コンター図 (図-2.8(a)) から確認されたように各粗度要素の影響で非一様な流れ場が発達しているため、流速分布が対数則から乖離している。Nikora ら(2001)⁴⁵⁾はこのような対数則の成立しない粗面近傍および内部の領域を Roughness sublayer (粗度層) と名付けている。

(3) 時間平均鉛直流速

図-2.9に時間平均鉛直流速 V の縦断面コンター図を示す。ここで、粗度層内部 ($1 \leq x/k \leq 5$, $0 \leq y/k \leq 1$) のコンターと平均流速ベクトル分布 (U, V) の拡大図についても併せて示している。粗度要素の頂部近傍 ($x/k \approx 1$ および 5 , $y/k \approx 1$) では、粗度表面の形状に沿って上昇流 ($V > 0$) と下降流 ($V < 0$) が対となって形成されている。また、粗度谷部 ($y/k < 1$) では上流側 ($2 \leq x/k \leq 3$) と下流側 ($3 \leq x/k \leq 5$) にそれぞれ上昇流と下降流が存在しており、ベクトル図から粗度要素の直上流に渦状流れの形成が確認できる。これは粗度要素の前面にぶつかった流れが水路床に潜り込むことで、馬蹄渦 (Horseshoe vortex) が形成さ

2.4 粗度層近傍および内部の平均流構造

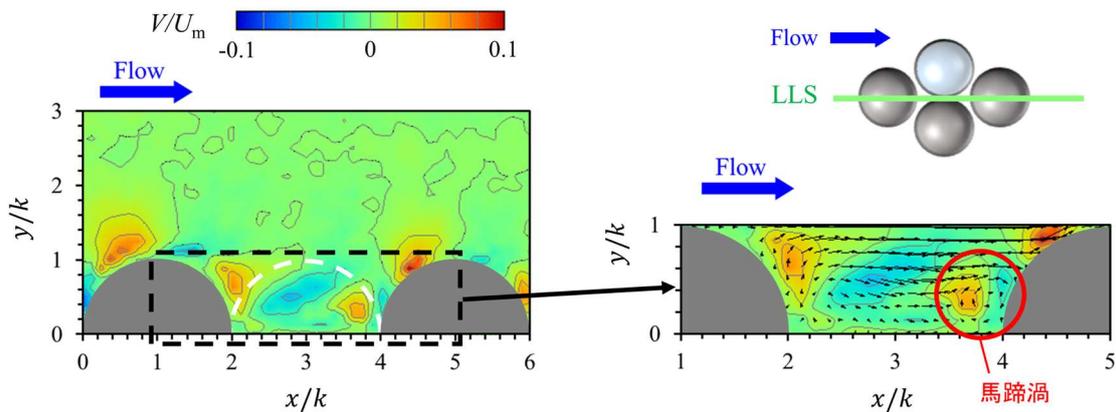


図-2.9 時間平均鉛直流速 V の縦断面コンター

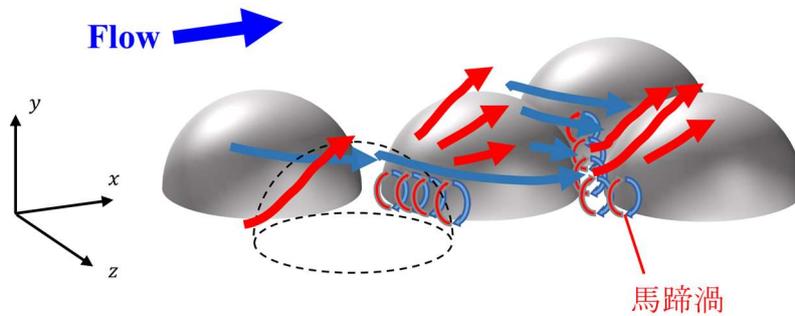


図-2.10 粗度層内部における平均流構造

れているものと考えられる。このように，SAP ハイドロゲルを用いた粗度要素背後の流れ場の可視化計測によって，粗度層 ($y/k < 1.2$) では図-2.10 に示すような粗度形状に沿った空間的に非一様な平均流構造が発達することが示された。

2.5 粗度層近傍および内部における乱流の組織構造

(1) レイノルズ応力分布

本節では PIV によって得られた乱流統計量の計測結果から，粗度層内部および粗面上で発達する乱流の組織構造について考察する。図-2.11 にレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の縦断面コンター図を示す。平均流構造と同様に，粗度層内部 ($y/k < 1.2$) では粗度要素の形状に応じて流下方向に非一様なレイノルズ応力分布が確認される。粗度頂部の背後 ($1.5 < x/k < 3.0$, $y/k \approx 1$) ではレイノルズ応力が極大となっており，局所的な鉛直混合層が発達している。この領域は流れの剥離に伴う鉛直せん断領域と一致しており，ケルビン=ヘルムホルツ不安定性によって乱れが活発に生成されているものと考えられる。また，粗度要素背後で生成される鉛直混合層は流下方向に発達し，谷部下流側 ($3 < x/k < 4$) では底層近傍にまで浸

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

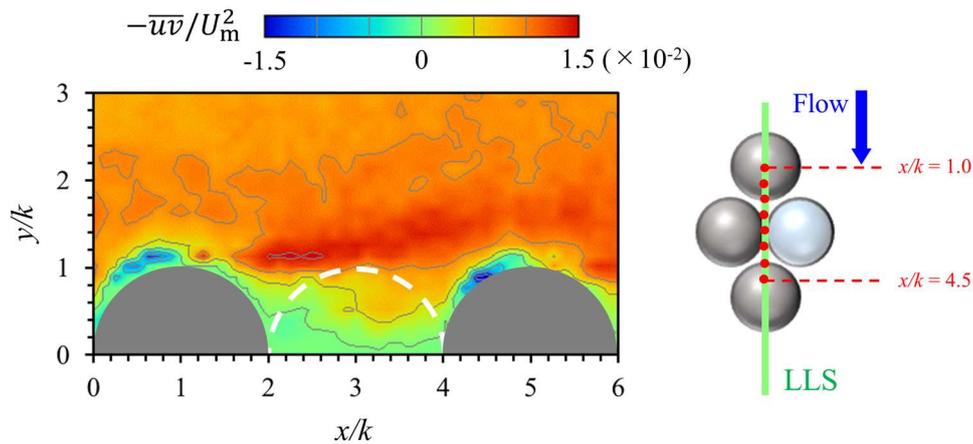


図-2.11 レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の縦断面コンター

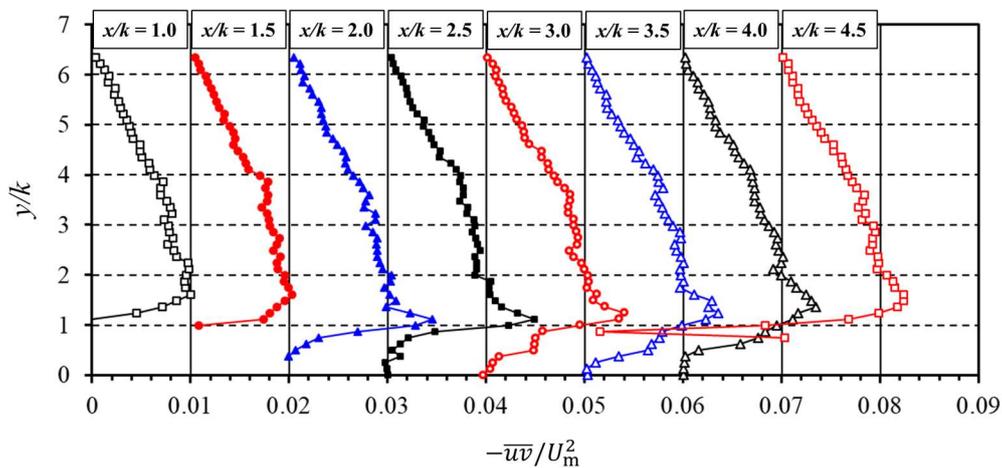


図-2.12 レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直方向プロット

透する様子が確認される．一方，粗度要素前面 ($4 < x/k < 5$) ではレイノルズ応力が負となっている．これは粗度要素から流れに抗力が作用し，その結果，粗度の表面に垂直な方向の乱れが抑制されて流れの向きが変化するためと考えられる．

図-2.12 に計測断面内の 8 流下方向位置 ($x/k = 1.0-4.5$) におけるレイノルズ応力の鉛直方向プロット $-\overline{uv}(y)$ を示す．ここで，図中の横軸の値はプロット毎に 0.01 ずつシフトさせて示している．いずれの流下方向位置においても粗度層外部の $y/k > 1.5$ ではレイノルズ応力分布が水深方向に線形に減衰しており，流下方向にほぼ一樣な乱流構造が発達している．また，粗度高さ付近におけるレイノルズ応力のピーク値は $x/k = 2.0-2.5$ において最大となり，逆にそれより下流 ($x/k > 2.5$) ではピーク値が減衰している．このように，粗度層内部では周期的に変化する粗度形状および平均流構造に対応して乱れの生成と減衰が繰り返されることで，非一樣な乱流構造が発達する．

2.5 粗度層近傍および内部における乱流の組織構造

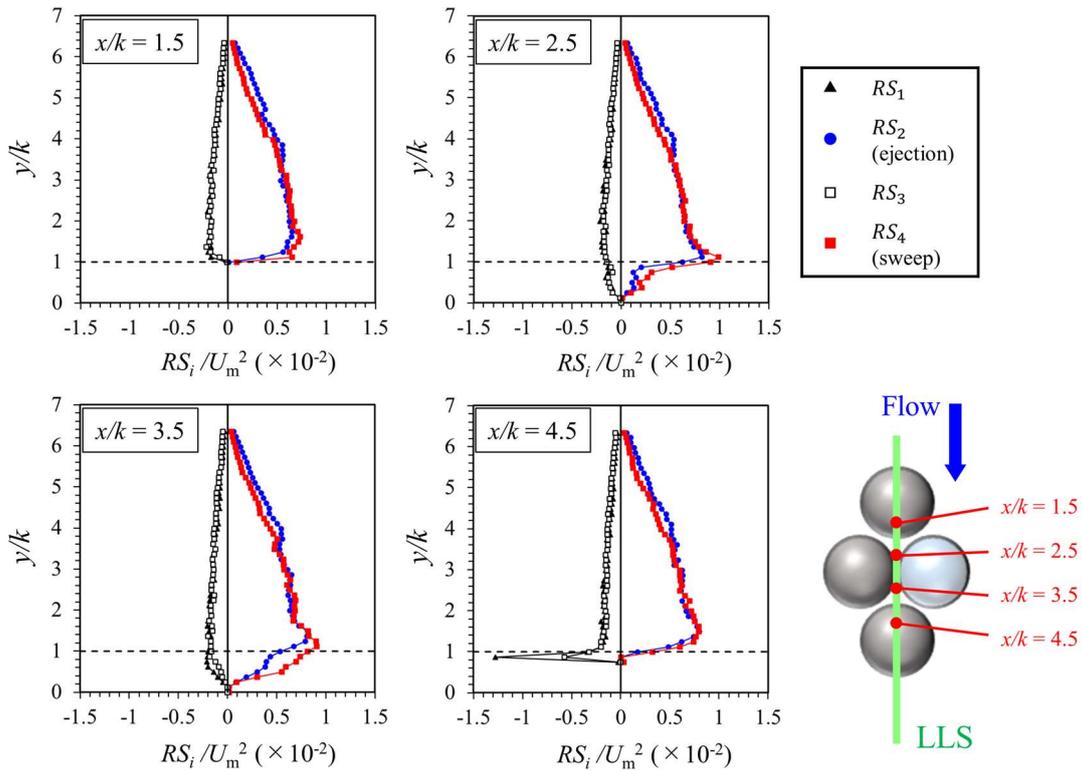


図-2.13 四象限区分解析結果

(2) 四象限区分解析

粗面上および内部における乱流の組織構造とその運動量輸送への寄与について調べるために、レイノルズ応力の四象限区分解析^{7,47,49)}を実施した。本解析ではまず、流速変動(u, v)の正負に基づいて乱流イベントを以下の4象限に分類した。

第1象限 $Q_1 : u > 0, v > 0$ (Outward interaction)

第2象限 $Q_2 : u < 0, v > 0$ (Ejection)

第3象限 $Q_3 : u < 0, v < 0$ (Inward interaction)

第4象限 $Q_4 : u > 0, v < 0$ (Sweep)

このうち、正のレイノルズ応力に寄与する第2象限 (Q_2) および第4象限 (Q_4) に分類される乱流現象 ($-uv > 0$) はそれぞれ Ejection および Sweep と呼ばれ、開水路乱流の運動量輸送メカニズムにおいて重要な役割を果たす組織構造である。次に、各象限に分類される乱流運動発生時の条件付きレイノルズ応力 RS_i ($i = 1, \dots, 4$) を次式によって評価した。

$$RS_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{-u(t)v(t)\} \cdot I_i(t) dt \quad (2.7)$$

ここで、 $I_i(t)$ は各時刻の流速変動(u, v)の正負をもとに第*i*象限の乱流運動の発生を判別する

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

関数であり，次式のように定義した．

$$I_i(t) \equiv \begin{cases} 1, & \text{if } (u, v) \in Q_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.8)$$

図-2.13 に計測断面内の4流下方向位置 ($x/k = 1.5, 2.5, 3.5$ および 4.5) における条件付きレイノルズ応力 RS_i ($i = 1, \dots, 4$) の鉛直方向プロット図を示す．いずれの流下方向位置についても，粗度要素近傍および底層を除いて Ejection および Sweep による寄与 (RS_2 および RS_4) が他の乱流運動による寄与よりもはるかに大きくなっており，粗面上および粗度高さ近傍において乱流の組織構造が発達している．水面近傍 ($y/k > 3$) では Ejection の寄与が Sweep よりも卓越しているのに対し，粗度層内部 ($y/k < 1.2-1.5$) では Sweep の寄与が Ejection よりも卓越している．このような傾向は十分に発達した植生キャノピー上の乱流場についても報告されており⁴⁹⁾，Sweep による粗面上からの高運動量流体の輸送が粗度層内部における質量・運動量輸送過程において重要な働きを担うことを示唆している．

(3) 粗面上における乱流の組織構造

粗面近傍における浮遊粒子の輸送メカニズムを解明するためには，粗面近傍で発生する乱流の組織構造とそれに伴う瞬間的な上昇流の空間スケールを明らかにすることが不可欠である．そこで，線形統計的推定 (Linear stochastic estimation, LSE)^{5,56)} を用いて粗面近傍で上昇流が発生する際の条件付き平均流れ場の推定を行う．本研究では時刻 t の基準点 (x_0, y_0) における鉛直方向瞬間流速の変動成分 $v(x_0, y_0, t)$ を説明変数，時刻 $t + \Delta\tau$ の各点における瞬間流速の変動成分 $u_i(x, y, t + \Delta\tau)$ を目的変数とし，式(2.9)で表される線形回帰式の推定を行った．

$$\hat{u}_i(x, y, t + \Delta\tau) = A_{u_i v}(x, y, \Delta\tau) v(x_0, y_0, t) \quad (2.9)$$

ここで， $A_{u_i v}(x, y, \Delta\tau)$ は線形回帰式の係数であり，次式(2.10)によって算出される．

$$A_{u_i v}(x, y, \Delta\tau) = \frac{\overline{\{u_i(x, y, t + \Delta\tau)v(x_0, y_0, t)\}}}{\overline{\{v(x_0, y_0, t)\}^2}} \quad (2.10)$$

まず，粗度高さ近傍位置 ($3.5k, 1.0k$) を基準点 (x_0, y_0) とし，時刻 t に基準点で上昇流 ($v > 0$) が発生する場合の時刻 t (時間差 $\Delta\tau = 0$) における条件付き流れ場を推定した．図-2.14 に条件付き平均主流速 $\hat{u}(x, y, t)$ の縦断面コンター図および条件付き平均流速ベクトル分布 (\hat{u}, \hat{v}) を示す．ここで，コンター図中の値は基準点における条件付き平均鉛直流速値 $\hat{v}_0 = \hat{v}(x_0, y_0, t)$ で無次元化している．上昇流の発生する基準点の近傍では，広範囲で上昇流 ($v > 0$) を伴う低流速領域 ($u < 0$) が分布している．これより，粗度高さ近傍で発生する瞬間的な上昇流は Ejection ($u < 0, v > 0$) によって引き起こされるものと考えられる．

2.5 粗度層近傍および内部における乱流の組織構造

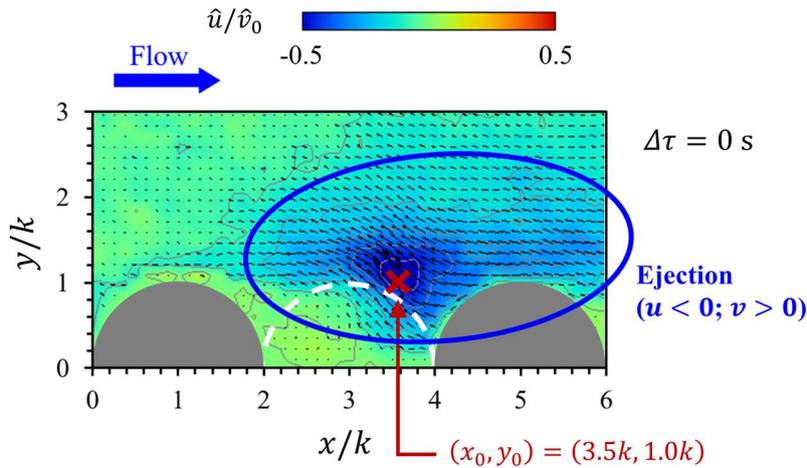


図-2.14 LSEによって推定された $(x_0, y_0) = (3.5k, 1.0k)$ における上昇流 ($v > 0$) 発生時の条件付き平均主流速分布 \hat{u}

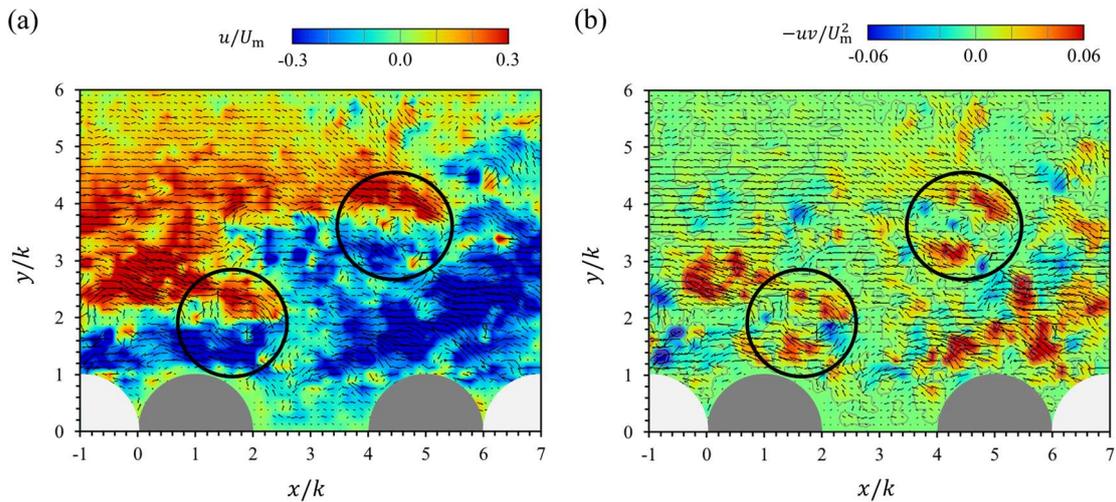


図-2.15 瞬間流速計測結果 (a)主流速変動 u および(b)瞬間レイノルズ応力 $-uv$)

図-2.15 に瞬間流速場の一例として、(a)瞬間主流速の変動成分 u および(b)瞬間レイノルズ応力 $-uv$ の縦断面コンター図を示す。いずれのコンターにおいても瞬間流速の変動成分ベクトル分布 (u, v) を併せて示している。計測領域全体にわたって水面近傍に高流速領域 ($u > 0$)、粗面近傍において低流速領域 ($u < 0$) がそれぞれ分布しており、水深スケールの大規模な乱流構造の発達が示唆される。特に、高流速領域と低流速領域の境界付近 (コンター中の黒丸囲み領域) において渦状のベクトル分布が確認でき、Ejection と Sweep を伴う組織的な渦構造が形成されている。また、 $4 < x/k < 7$ および $1 < y/k < 3$ の低流速領域では全体的に瞬間レイノルズ応力が正となっており ($-uv > 0$)、図-2.14 で示唆されたような Ejection の発生が確認できる。

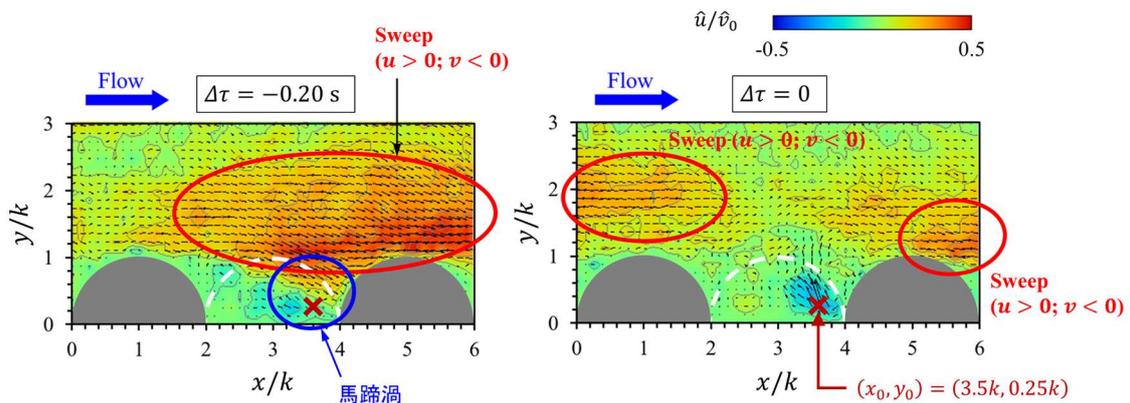


図-2.16 $(x_0, y_0) = (3.5k, 0.25k)$ における上昇流発生時の条件付き平均主流速分布 \hat{u}

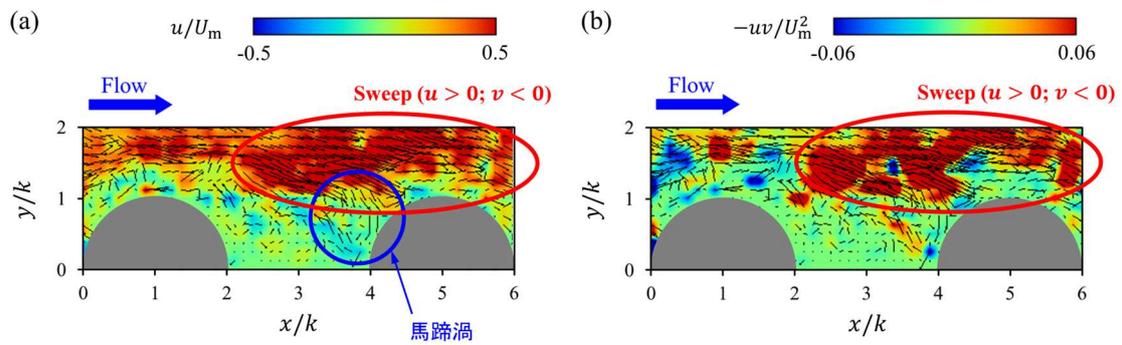


図-2.17 粗度層内部の瞬間流速場 ((a)主流速変動 u および(b)瞬間レイノルズ応力 $-uv$)

(4) 粗度層内部における乱流の組織構造

本節では底層における上昇流の発生と組織的な乱流構造の関連について考察する。まず、時刻 t に底層近傍位置 $(x_0, y_0) = (3.5k, 0.25k)$ で上昇流 ($v > 0$) が発生する場合の時刻 $t + \Delta\tau$ における条件付き流れ場を LSE によって推定した。ここで、底層における上昇流の発生と同時に (時間差 $\Delta\tau = 0$) およびその直前 ($\Delta\tau = -0.20$ s) の2時刻を対象に流れ場の推定を行った。図-2.16 に条件付き平均主流速 $\hat{u}(x, y, t)$ の縦断面コンター図および条件付き平均流速ベクトル分布 (\hat{u}, \hat{v}) を示す。底層において上昇流が発生する直前 ($\Delta\tau = -0.20$ s) では下降流 ($v < 0$) を伴う高流速領域 ($u > 0$) が存在しており、大規模な Sweep ($u > 0, v < 0$) が発生している。これは粗度高さ近傍での Ejection による上昇流の発生 (図-2.14) とは対照的であり、粗度層内部では鉛直方向位置によって全く異なる上昇流の発生メカニズムが存在することが示唆される。Sweep の通過時には粗度要素の前面付近 ($3 < x/k < 4, 0 < y/k < 1$) で渦状の流れが形成されているが、これは高運動量流体が粗度要素の前面にぶつかることで馬蹄渦が瞬間的に強められているものと考えられる。一方で、上昇流の発生時 ($\Delta\tau = 0$) には粗面上の Sweep が下流側に移動し、底層における上昇流の発生領域が大きくなっている。したがって、高速の下降流である Sweep が粗度要素近傍を通過した後、少し遅れて底層の上昇流が最大となるものと考えられる。

2.5 粗度層近傍および内部における乱流の組織構造

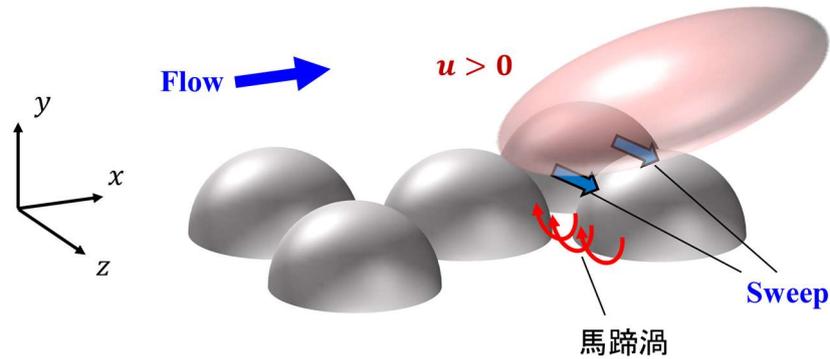


図-2.18 粗度層内部における上昇流の発生メカニズム

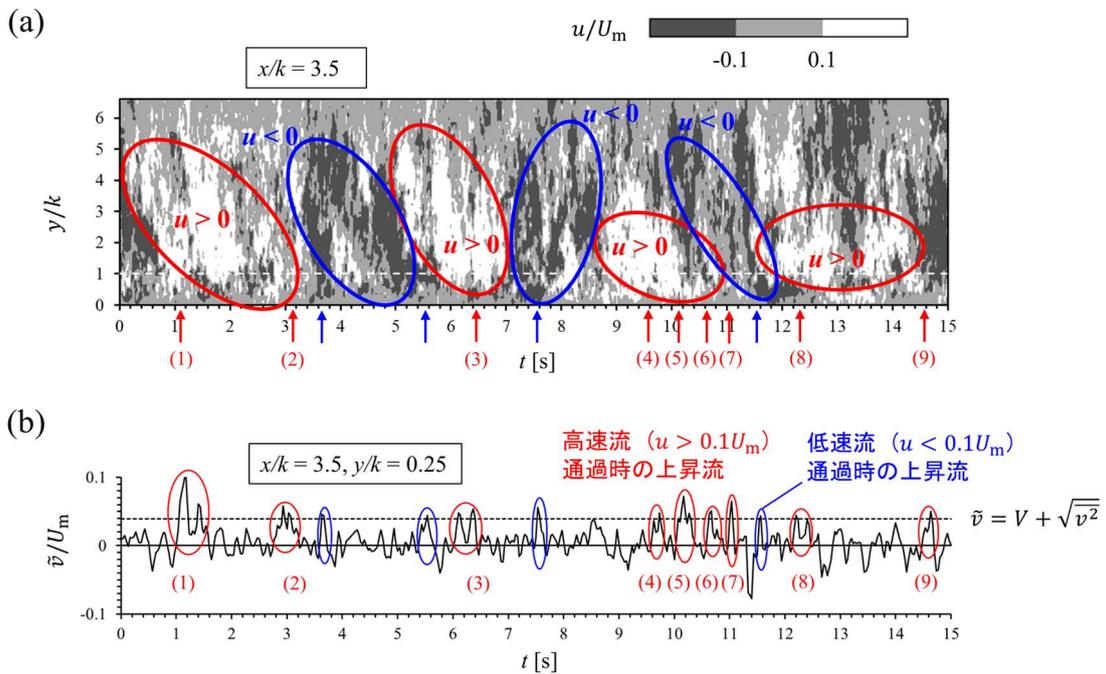


図-2.19 粗度層内外の流速変動 ((a)主流速変動 u の時系列コンター, (b)底層における瞬間鉛直流速の時系列変化 $v(t)$)

図-2.17 に粗度層近傍および内部 ($0 < x/k < 6$, $0 < y/k < 2$) における(a)瞬間主流速の変動成分 u および(b)瞬間レイノルズ応力 $-uv$ の縦断面コンター図の一例を示す. LSE の結果から示された通り, 高速流 ($u > 0$) の通過時に Sweep ($u > 0$, $v < 0$) が発生して粗度層内部に侵入し, 粗度層内部において瞬間的な上昇流が発生する様子が確認できる. このような粗度層内部における上昇流の発生メカニズムの模式図を図-2.18 に示す. 粗度層上の Sweep が粗度要素に衝突することで粗度要素の前面における馬蹄渦が強められ, 瞬間的に大きな上昇流が形成されるものと考えられる.

以上より, 粗度層上で発達する大規模な乱流構造が粗度層内部における瞬間的な流速

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

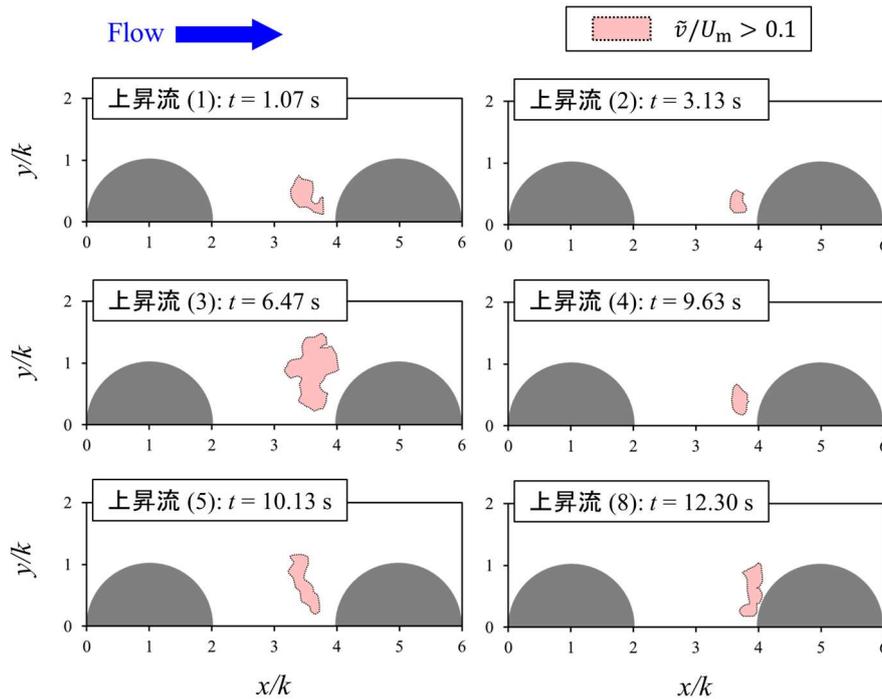


図-2.20 Sweep 通過後の粗度層における上昇流の発生領域

変動に影響を及ぼすことが示唆された。図-2.19(a)に流下方向位置 $x/k = 3.5$ における瞬間主流速変動成分の時系列コンター $u(t, y)$ を示す。粗度高さから水面付近 ($1 < y/k < 5$) にかけて高速流 ($u > 0.1U_m$) と低速流 ($u < 0.1U_m$) が交互に発生している。発生周期はおよそ $T \approx 4 \text{ s}$ ($U_m T/H \approx 10$) であり、粗面上において水深スケールの大規模な乱流の組織構造が発達していると考えられる。図-2.19(a)で示した 15 s 間について、図-2.19(b)に同流下方向位置 ($x/k = 3.5$) の底層 ($y/k = 0.25$) における瞬間鉛直流速の時系列変化 $\tilde{v}(t)$ を示す。時系列データより、乱れの変動成分が乱れ強度 ($\sqrt{v^2}$) を超える顕著な上昇流 ($\tilde{v} > V + \sqrt{v^2}$) が間欠的に発生する様子が確認できる。このうち、高速流の通過時に発生する上昇流 (図中赤丸囲み, (1-9)) は低速流の通過時に発生する上昇流 (図中青丸囲み) よりも発生頻度が高く、このことから底層における上昇流の発生メカニズムと Sweep の粗度要素への衝突との関連が示唆される。

このような底層における上昇流の発生は、水路床上の粒子の浮上過程と密接に関連していると考えられる。したがって、粗度層内部における粒子の輸送メカニズムについて考察するためには、上昇流の発生領域について明らかにする必要がある。図-2.19 中で示した Sweep による上昇流イベントの一部 ((1-5)および(8)) について、図-2.20 に各イベントにおける上昇流 ($\tilde{v} > 0.1U_m$) の最大発達領域を示す。時間平均鉛直流速 V のコンター図 (図-2.9) における上昇流領域と概ね一致しており、馬蹄渦の形成に伴って発生した上昇流であると考えられる。その一方で、上昇流領域にはイベントごとにばらつきが見られ、上昇流領域の上端位置は $0.5 < y/k < 1.5$ の範囲で変化している。

2.6 粗度層近傍および内部における粒子輸送メカニズム

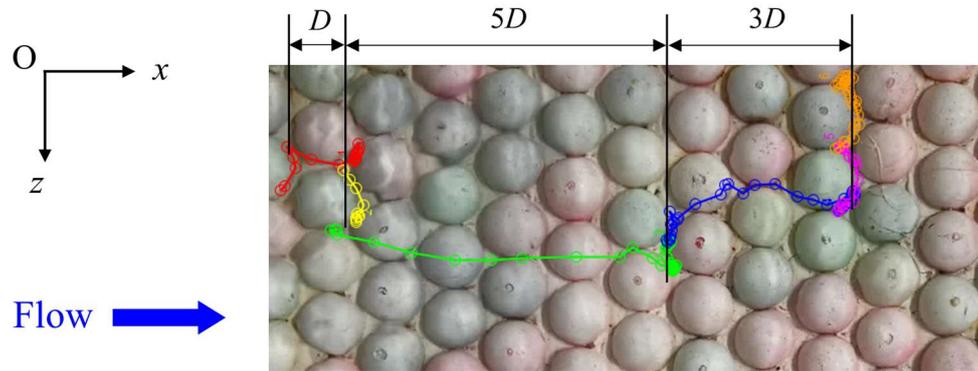


図-2.21 粗度層内部における粒子の水平面内軌跡

2.6 粗度層近傍および内部における粒子輸送メカニズム

(1) 粒子挙動の観察結果

本節では粒子の水平面内挙動の観察結果から、粗度層近傍における粒子挙動パターンについて考察する。図-2.21に粗面近傍および内部を輸送される粒子の水平面内における軌跡の一例を示す。ここで、図中の丸印は10 Hzのフレームレートで撮影された連続画像中における、各時刻の粒子の中心位置 (x_p, z_p) を表している。本研究では、粗度要素間で静止している粒子が流下方向あるいは横断方向に移動を開始してから、再度粗度要素間に捕捉されて停止するまでの一連の運動を1ステップと定義した。図-2.21中に示した単一粒子の軌跡は計6個のステップに分割でき、ここではステップごとに色分けを施して示している。

観察された6ステップは、移動形態の違いから大きく2種類に分類することができる。一つ目は粗度層内部をすり抜けるように比較的短い距離を流下方向あるいは横断方向に輸送される挙動で、図中のステップ1(赤色)、2(黄色)、5(赤紫色)および6(橙色)の4ステップが該当する。中心位置のプロットより、これらのステップでは粒子の移流速度は比較的小さく、流速の小さい粗度層内部を低速で輸送されているものと考えられる。これに対し、ステップ3(緑色)および4(青色)のように比較的長距離にわたって輸送されている粒子の軌跡も観察される。特に、ステップ3では粒子の移流速度が他のステップよりも大きく、粒子が粗度要素の間から主流速の大きい粗度高さの上部($y/k > 1$)にまで浮上していることが推測される。

このような粗度層内部における粒子の移動距離および流出頻度のばらつきを調べるために、観察された粒子軌跡からステップ長さ(Step-length)および待機時間(Waiting timeあるいはRest period)を算出した。ここで、ステップ長さは粒子が1ステップで流下方向に移動する距離、待機時間は粒子が粗度要素間に捕捉されてから再流出するまでに要する時間とそれぞれ定義した²⁹⁾。図-2.22(a)にステップ長さ L の確率分布(総サンプル数 $N = 165$)を

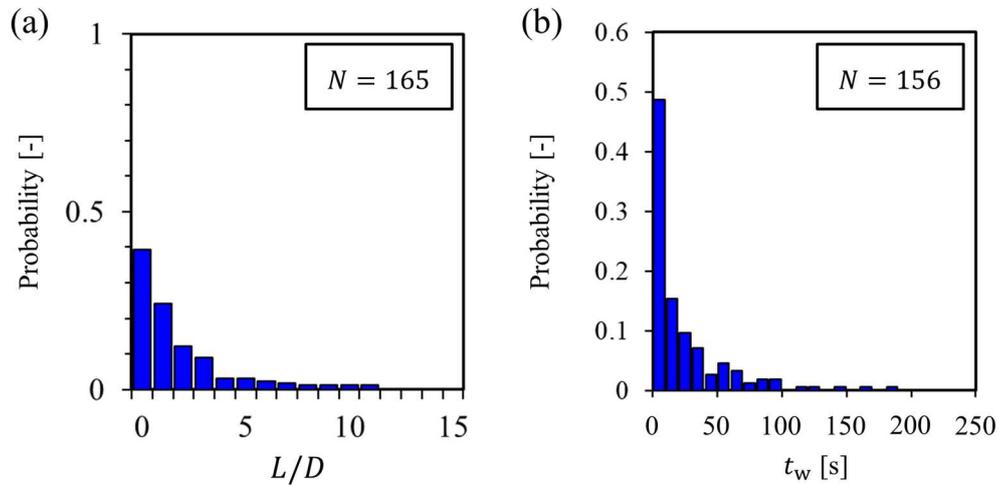


図-2.22 (a)ステップ長さ L および(b)待機時間 t_w の確率分布

示す。ステップ長については、 $L/D = 0$ （横断方向のみの移動）あるいは1の短距離の挙動が全ステップの60%以上を占めており、底層から浮上した粒子の大部分は粗度層外部まで流出せずに粗度要素間をすり抜けるように移動するものと考えられる。一方で、ステップ長さが粗度要素直径の5倍を超える長距離のステップ ($L/D > 5$) も観察されている。このようなステップ長さのばらつきは、粒子近傍で発生する流体の乱流運動に起因するものと推測される。

図-2.22(b)に待機時間 t_w の確率分布 ($N = 156$) を示す。全サンプルの約50%が10 s以下の短い待機時間 ($t_w \leq 10$ s) であり、粗度要素間に捕捉された粒子の約半数が短時間のうちに再度流出することが示された。同時に、50 s以上の長時間にわたって粗度要素間に留まり続ける粒子挙動例も観察されており、ステップ長さと同様に待機時間の確率分布にも幅広いばらつきが見られる。このように、粗度層内部では粒子が間欠的かつランダムな挙動を示しており、このことから粒子の底層からの浮上メカニズムの解明には粒子挙動と乱流の組織構造の関連についてさらなる考察が必要であると考えられる。

(2) 底層近傍の粒子浮上メカニズム

本節では縦断面内における粒子挙動と流速の同時計測結果から、粗度層内部における粒子の浮上メカニズムについて考察する。図-2.23(a)に底層から浮上する粒子の鉛直方向位置の時系列変化 $y_p(t)$ の一例を示す。本挙動は2回の粒子の底層からの浮上過程で構成されており、まず粒子が底層から浮上した後、下降して水路床上で停止し (1st lift-up, $t = -2.2$ s), その後再度浮上して粗面外部へと流出している (2nd lift-up, $t = 0$)。図-2.23(b)に(a)と同時刻の粒子近傍位置 ($x/k = 3.5$) における瞬間主流速・鉛直流速の乱れ変動成分 ($y/k = 1.0$) および瞬間鉛直流速 ($y/k = 0.25, 0.50$) の時系列変化を示す。粒子の浮上開始時刻から開始直後にかけて (-2.2 s $< t < -2.0$ s, -0.1 s $< t < 0.4$ s), 底層 ($y/k = 0.25, 0.50$) において瞬

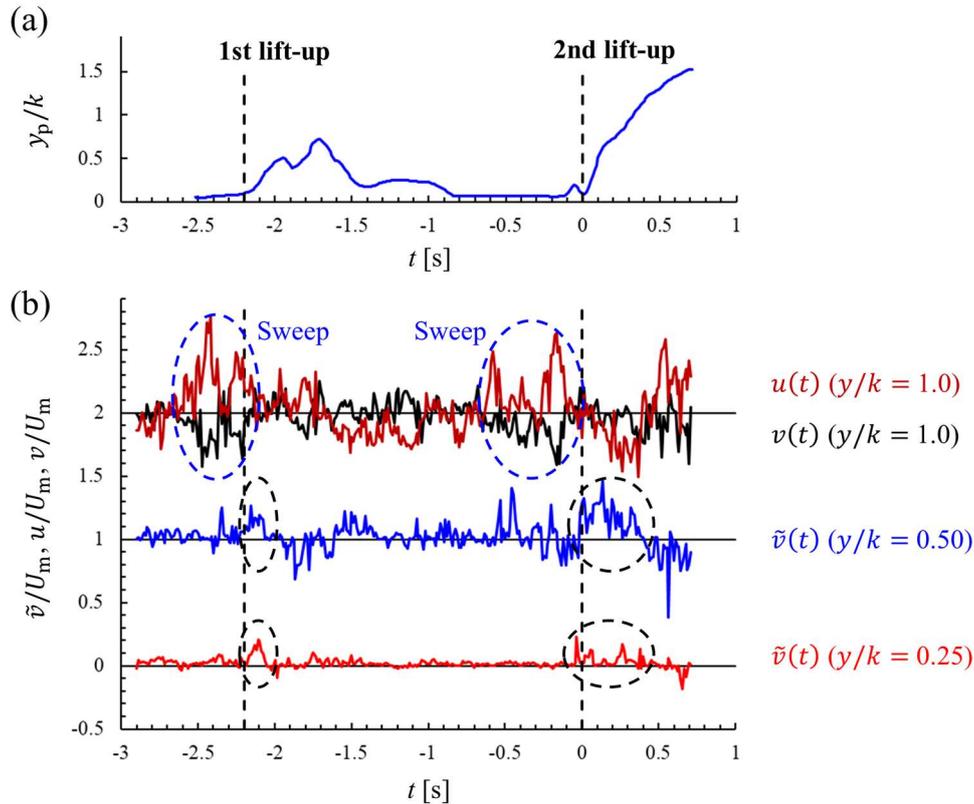


図-2.23 粒子の底層からの浮上例 ((a)粒子鉛直位置の時系列変化 $y_p(t)$, (b)粒子近傍位置における瞬間流速の時系列変化)

間的に顕著な上昇流 ($\tilde{v} > 0$) が発生している。また、粒子浮上開始時刻の直前 ($-2.5 \text{ s} < t < -2.2 \text{ s}$, $-0.6 \text{ s} < t < -0.1 \text{ s}$) では粗度高さ付近で瞬間的な高速流 ($u > 0$) と下降流 ($v < 0$) が発生しており、Sweep によって粗度層外部から粗面内部へ高運動量流体が輸送されているものと考えられる。

図-2.24 に 1 回目の粒子浮上時 (1st lift-up) における(a)瞬間主流速の変動成分 u および(b)瞬間鉛直流速 \tilde{v} の時系列変化 ($-2.20 \text{ s} \leq t \leq -1.60 \text{ s}$) を示す。ここで、コンター図中には各時刻における粒子の位置(x_p, y_p)および浮上時から各時刻までの軌跡についても併せて示している。粒子の浮上時 ($t = -2.20 \text{ s}$, -2.10 s) には高速流 ($u > 0$) が下流側の粗度要素に衝突しながら粗面直上を通過しており、粒子近傍において上昇流が発生している。この上昇流は図-2.18 で示した Sweep の粗度要素への衝突によって強められる馬蹄渦によるものと考えられ、粗面内部への Sweep の侵入が底層粒子の浮上および粗度層外への流出を引き起こすことを示唆している。その後 ($t = -1.60 \text{ s}$)、粒子の近傍から顕著な上昇流が消滅しており、粒子は再度水路床へ向かって下降し始めている。このように、底層から浮上した粒子の浮上高さは粗度層内部で発生する瞬間的な上昇流の発生領域および継続時間に依存するものと考えられ、図-2.20 で示したような上昇流領域のばらつきによって底層近傍の粒子もランダムな挙動を示すものと推測される。

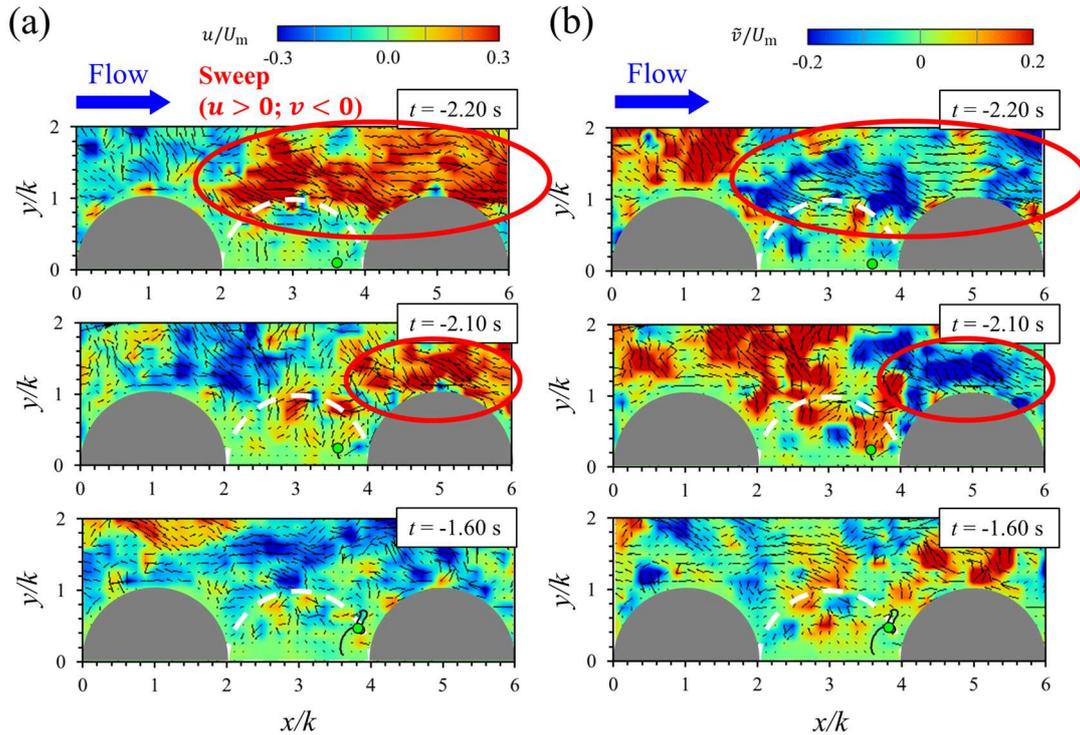


図-2.24 1回目の粒子浮上時（1st lift-up）における瞬間流速場の時系列変化

図-2.25 に2回目の粒子浮上時（2nd lift-up）における瞬間流速場の時系列変化（ $-0.09 \text{ s} \leq t \leq 0.20 \text{ s}$ ）を示す。1回目の浮上時と同様に、浮上直前から浮上時にかけて粗度直上を Sweep が流下しており（ $-0.09 \text{ s} \leq t \leq 0 \text{ s}$ ）、浮上時（ $t = 0 \text{ s}$ ）には粒子近傍で瞬間的な上昇流が発生している。一方で、本粒子挙動では浮上開始後（ $t > 0 \text{ s}$ ）も粒子近傍で上昇流が発生し続けており、特に、 $t = 0.20 \text{ s}$ では粗度高さ付近（ $y/k \approx 1$ ）にまで浮上した粒子の近傍で低速の上昇流、すなわち Ejection（ $u < 0, v > 0$ ）が発生している。図-2.14 で示したように、粗度高さ付近で発生する上昇流は Ejection によって発生するものが支配的であり、このことから粗度高さ近傍における粒子の上昇運動は Sweep による馬蹄渦ではなく Ejection によって引き起こされるものと示唆される。このように、粒子の底層からの浮上メカニズムと粗度高さ近傍からの浮上メカニズムは全く異なる乱流の組織構造によって引き起こされると考えられる。

図-2.16 より、粒子が Sweep による馬蹄渦によって浮上する場合、底層粒子が浮上を開始する約-0.20 s 前に粗度高さ付近を Sweep が流下するものと考えられる。そこで、底層粒子の浮上開始時刻（ $t = t_E$ ）の0.1–0.3 s 前（ $t_E - 0.3 \text{ s} \leq t \leq t_E - 0.1 \text{ s}$ ）に粗度高さ付近（ $x/k = 3.5, y/k = 1.0$ ）で発生する乱流イベントに基づいて、本実験において追跡された粒子の全浮上イベントを分類した。ここでは、追跡された全浮上イベント（184 イベント）のうち、粒子浮上前の流速データが計測されていた167 イベントを対象とした。まず、粒子浮上直前（ $t_E - 0.3 \text{ s} \leq t \leq t_E - 0.1 \text{ s}$ ）の0.2 s 間平均主流速 \bar{u}_{BE} を次式のように算出し、高速流（ $\bar{u}_{BE} >$

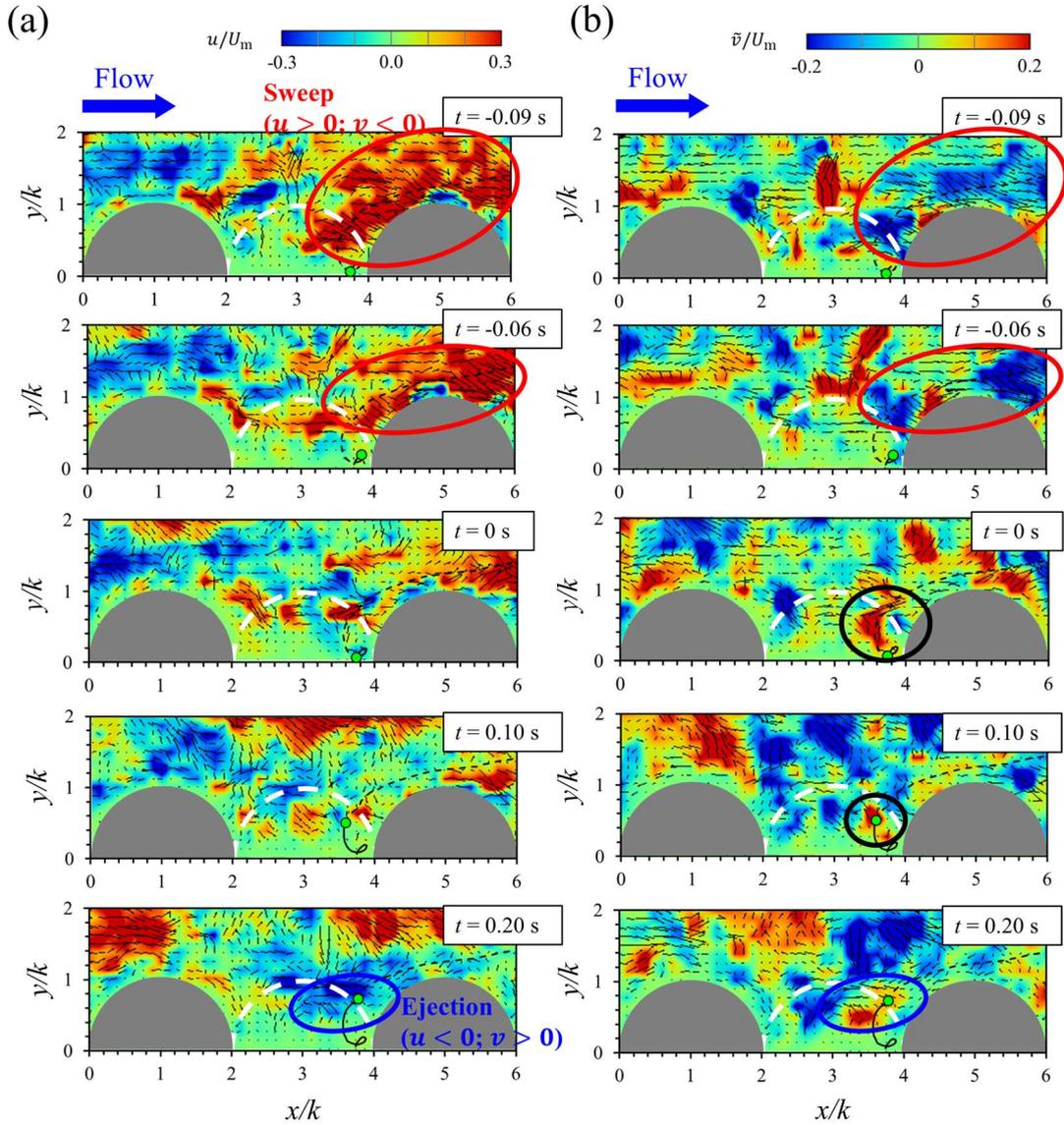


図-2.25 2回目の粒子浮上時 (2nd lift-up) における瞬間流速場の時系列変化

0) あるいは低速流 ($\bar{u}_{BE} < 0$) の通過を判定した.

$$\bar{u}_{BE} = \frac{1}{\Delta\tau_2 - \Delta\tau_1} \int_{t_E + \Delta\tau_1}^{t_E + \Delta\tau_2} \tilde{u}(t) dt \quad (2.11)$$

ここで, $\Delta\tau_1 = -0.30$ s および $\Delta\tau_2 = -0.10$ s である. 次に, 高速流通過後のイベント ($\bar{u}_{BE} > 0$) については Sweep ($u > 0, v < 0$), 低速流通過後のイベント ($\bar{u}_{BE} < 0$) については Ejection ($u < 0, v > 0$) の有無をそれぞれ判定した. Sweep および Ejection の判定には次式のように瞬間レイノルズ応力 $-uv$ の閾値を設定し, 微弱な組織構造の発生を除外した.

$$-uv > H|\bar{u}\bar{v}| \quad (2.12)$$

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

表-2.4 乱流の組織構造に基づく底層から浮上する粒子挙動の分類

浮上開始直前の乱流イベント	サンプル数 (比率)
$\bar{u}_{BE} > U$, Sweep ($u > 0; v < 0; -uv > \bar{u}\bar{v} $) あり	118 (70.7%)
$\bar{u}_{BE} < U$, Ejection ($u < 0; v > 0; -uv > \bar{u}\bar{v} $) あり	39 (23.4%)
その他	10 (6.0%)

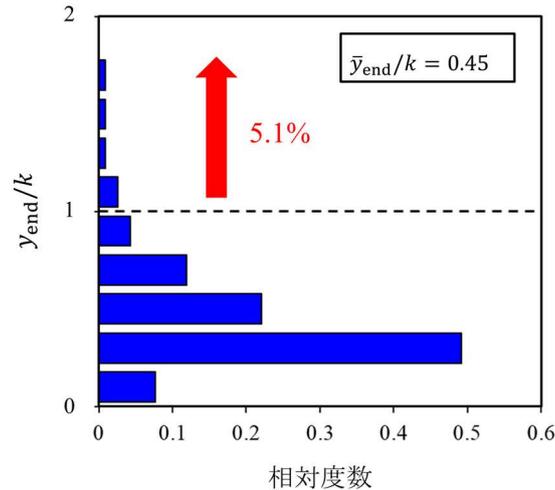


図-2.26 底層から浮上する粒子の浮上終了高さ y_{end} の確率分布

ここで、 H は Hole 値⁵⁷⁾と呼ばれる係数であり、本研究では $H = 1$ とした。表-2.4 に本解析による全浮上イベントの分類結果を示す。本実験で観察された浮上イベントの70%以上が Sweep を伴う高速流の通過後に発生しており、Ejection を含むそれ以外の乱流運動によって引き起こされる浮上挙動は全体の30%未満にとどまることが示された。したがって、図-2.24 や図-2.25 で示されたような浮上粒子の挙動は、粗度層内部の粒子輸送メカニズムにおいて典型的な粒子移動の開始過程を捉えているものと考えられる。

図-2.26 に Sweep によって底層から浮上した粒子 (サンプル数 $N = 118$) について、粒子の浮上終了高さ y_{end} のヒストグラムを示す。確率分布の最頻値は $y_{\text{end}}/k = 0.3$ 、平均浮上高さは $\bar{y}_{\text{end}}/k = 0.45$ であり、底層から浮上を開始した粒子の大部分(94.9%)が粗度高さよりも下の領域 ($y/k < 1$) で上昇運動を終えていることが示唆される。一方で、全体の5.1%の浮上粒子は粗度高さを超えて上昇を続けており、底層から粗面外部 ($y/k > 1$) へ直接輸送されている。特に、底層から粗度高さの2倍近くまで浮上する粒子も少数ながら存在しており、図-2.20 に示した Sweep による上昇流の発生領域の上端高さよりも高い鉛直方向位置にまで浮上する例も観察された。これは底層から浮上した粒子が粗度高さ付近および粗面上で発生する Ejection に取り込まれることでさらに浮上したものと考えられ、図-2.25 での観察結果とも一致する。

2.6 粗度層近傍および内部における粒子輸送メカニズム

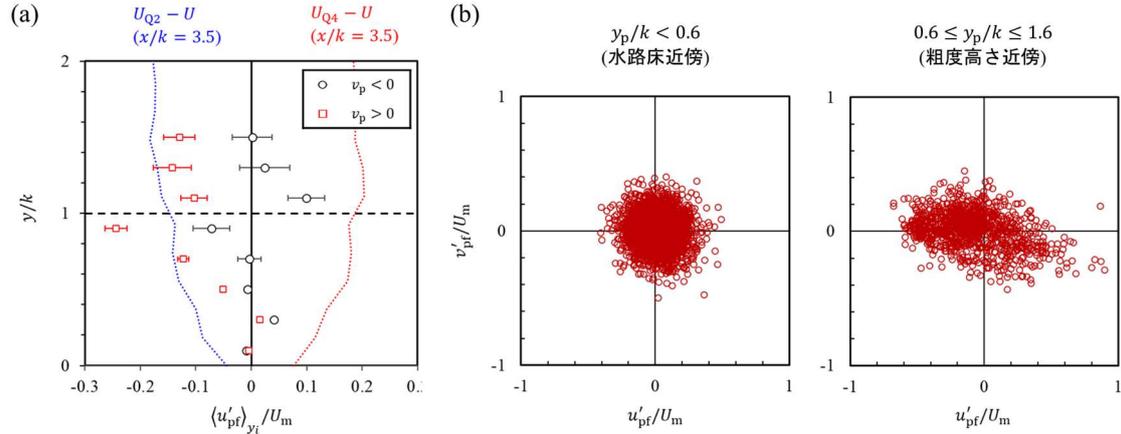


図-2.27 粒子速度と時間平均流速の比較

(3) 粒子速度と平均流速の比較

前節までの考察から、粗度層内部における粒子挙動は乱流の組織構造と強い関連があることが示唆された。本節ではこのような Ejection および Sweep と粒子の浮上・下降運動との関連について考察するために、粒子の移流速度(u_p, v_p)と平均流速(U, V)の比較を行う。連続画像中における粒子のトラッキングから得られた粒子中心位置の時系列データ(x_p, y_p)(t)をもとに、各粒子軌跡における粒子速度の時系列データ(u_p, v_p)(t)を算出した。各時刻の粒子速度データから、次式のように粒子の移流速度と粒子中心位置における時間平均流速の差(u'_{pf}, v'_{pf})を算出した。

$$u'_{pf}(t) = u_p(t) - U(x_p(t), y_p(t)) \quad (2.13)$$

$$v'_{pf}(t) = v_p(t) - V(x_p(t), y_p(t)) \quad (2.14)$$

図-2.27(a)に粒子浮上時 ($v_p > 0$) および下降時 ($v_p < 0$) のそれぞれについて粒子速度と時間平均流速の差(u'_{pf})の鉛直方向プロット図を示す。ここで、粗度層近傍および内部の領域 ($0 \leq y/k \leq 1.6$) を高さ $\Delta y = 0.2k$ の領域に分割し、各領域内における速度差の平均値(u'_{pf})を算出することでその鉛直方向変化を調べた。また、図中には次式のように定義される Ejection (Q_2) および Sweep (Q_4) 発生時の条件付き平均主流速 (それぞれ U_{Q2} および U_{Q4}) の計測結果 ($x/k = 3.5$) についても併せて示している。

$$U_{Qi} = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u}(t) I_i(t) dt}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_i(t) dt} \quad (2.15)$$

上昇時の粒子 ($v_p > 0$) については、粗度高さ近傍 ($y/k \geq 0.6$) において時間平均主流速

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

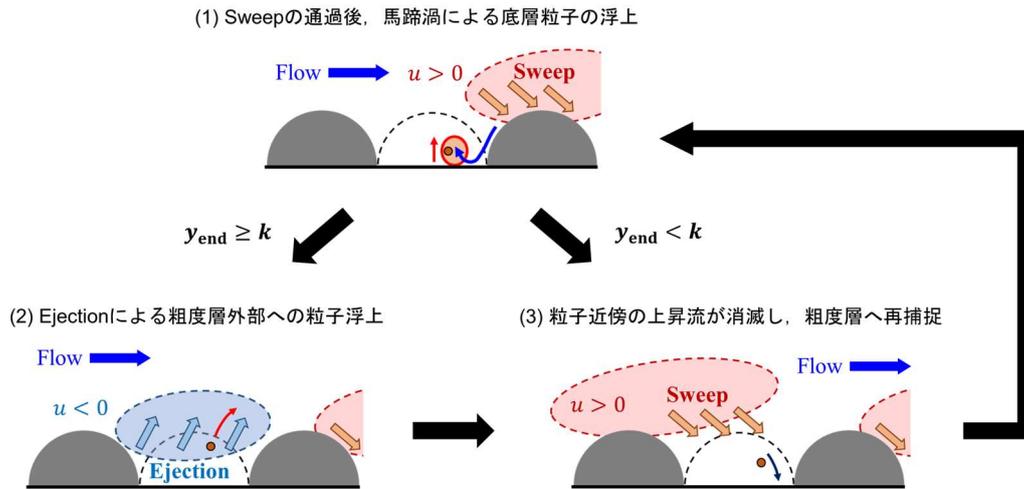


図-2.28 粗度層内部における粒子輸送過程の現象モデル

よりも低速で流下方向に輸送されており ($u'_{pf} < 0$)、低運動量流体の上方への輸送，すなわち Ejection によって粒子が上方へ輸送されているものと考えられる．特に，上昇粒子の平均移流速度は Ejection 発生時の条件付き平均主流速 U_{Q2} と同程度であり，このことから粒子の上昇運動と Ejection との関連が示唆される．一方で，底層近傍 ($y/k < 0.6$) では上昇粒子の移流速度と時間平均主流速の差はほぼゼロとなっており，このことから底層近傍における粒子の浮上は Ejection ではない他の乱流運動によって引き起こされると考えられる．下降時の粒子 ($v_p < 0$) については，上昇時の粒子速度と比較すると全体的に速度差 (u'_{pf}) の絶対値は小さく，粒子速度と平均流速の関係について明確な傾向は確認できない．これは，本実験で使用した粒子の比重が 1 より大きく，粒子の近傍に顕著な上昇流が存在しない限り重力の影響で下降するためと考えられる．

図-2.27(b)に水路床近傍 ($y/k < 0.6$) および粗度高さ近傍 ($0.6 \leq y/k \leq 1.6$) のそれぞれの領域について，粒子移流速度と時間平均流速との差 (u'_{pf}, v'_{pf}) のプロット図を示す．水路床近傍についてのプロット図では，データ点が原点近傍に密集して分布しており，流下方向と鉛直方向の速度差の間に相関は確認されなかった．これは，底層の粒子が Ejection の影響よりも Sweep の粗度要素への衝突によって発生するランダム性の強い瞬間的な上昇流によって移動を開始するためと考えられる．これに対し，粗度高さ近傍ではデータ点が右肩下がりの楕円状に分布しており， u'_{pf} と v'_{pf} の間に負の相関が存在するものと考えられる．これは粗度高さ近傍における浮遊粒子の挙動は Ejection ($u < 0, v > 0$) や Sweep ($u > 0, v < 0$) といった組織構造の影響を受けることを示唆している．

(4) 乱流の組織構造と粒子輸送メカニズムの現象モデル

最後に，本研究を通じて明らかにした粗度層内部における乱流の組織構造と浮遊粒子の輸送メカニズムに関する現象モデルを図-2.28 に示す．粗度高さより上の領域では大規模な

2.6 粗度層近傍および内部における粒子輸送メカニズム

高運動量領域 ($u > 0$) と低運動量領域 ($u < 0$) が周期的に形成され, Sweep ($u > 0, v < 0$) や Ejection ($u < 0, v > 0$) のような組織的な乱流運動が間欠的に発生する. このうち, Sweep は粗度層内部に高運動量流体を輸送し, 粗度要素への衝突によって粗度要素前面に瞬間的な馬蹄渦を発生させる. Sweep の通過後, 馬蹄渦の発生に伴って底層近傍で瞬間的な上昇流が発生し, 底層で停止する粒子の浮上を引き起こす(過程(1)). 浮上した粒子の大部分 (94.9%) は上昇流の消滅に伴って粗面外部 ($y > k$) へ流出する前に上昇運動を止め, そのまま再度底層へ下降するか, あるいは粗度要素の間をすり抜けるように流下方向・横断方向に短い距離を輸送される ($y_{\text{end}} < k$, 過程(3)). その一方で, 底層から粗度高さ近傍まで浮上した粒子の近傍で Ejection が発生する場合, 粒子は Ejection に捕捉されることで粗面外部にまで上昇運動を続ける ($y_{\text{end}} \geq k$, 過程(2)). 粗面外部への粒子の流出例は底層からの浮上挙動全体の 5.1%に過ぎなかったが, このような浮上粒子近傍における Ejection の発生の有無が図-2.22(a)で示唆されたような粒子のステップ長 L のばらつきの要因であると考えられる.

2.7 結語

本研究では半球状粗度を有する開水路流れを対象に PIV 流速計測および粒子挙動追跡を実施し, 粗面近傍および内部における乱流の組織構造とその浮遊粒子機構への影響について考察した. PIV 計測では屈折率整合法と呼ばれる可視化手法を導入し, 空間変化に富んだ粗度層内部の平均流・乱流構造を明らかにした. また, 流速計測と粒子追跡の結果から, 乱流現象に基づいた粗面流れにおける粒子輸送の現象モデルを提案した. 以下に本研究を通じて得られた主な知見を列挙する.

- 1) 粗度要素模型として水と屈折率が等しい透明材質 (SAP ハイドロゲル) を用いることで, PIV において粗度要素背後の流れ場の可視化計測に成功した. 粗度層内部 ($y/k < 1.2$) では粗面の形状に伴って流下方向および横断方向に非一様な平均流・乱流構造が形成される. 各粗度要素の前面では流れが潜り込むことで馬蹄渦が形成され, 粗度層内外の粒子輸送に影響を及ぼすと推測される.
- 2) 粗面外部 ($y/k > 1$) では高速流 ($u > 0$) および低速流 ($u < 0$) からなる大規模かつ周期的な乱流構造が存在し, Sweep や Ejection のような組織的な乱流運動が間欠的に発生する. 線形統計的推定による条件付き平均流速分布の解析結果から, 粗度高さ付近で発生する Sweep が粗度要素に衝突することで粗度要素前面の馬蹄渦が強められ, 底層 ($y/k \approx 0$) で顕著な上昇流が発生することが示唆された. 一方で, 粗度高さ近傍および粗面外部における上昇流の発生機構では Ejection の影響が支配的であり, これらから粗面内部と外部で異なる上昇流の発生メカニズムが存在するものと考えられる.

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

- 3) 粒子挙動とその近傍の瞬間流速場の同時計測により、乱流の組織構造と底層粒子の浮上メカニズムとの間に強い関連があることが示唆された。観察された底層からの粒子浮上例のうち、大部分（約70%）が Sweep の粗度要素への衝突によって発生した瞬間的な上昇流によって引き起こされることが示された。
- 4) Sweep によって底層から浮上した粒子は、ほとんどの場合粗面内部で上昇運動を終了し（94.9%, $y_{\text{end}} < k$ ）、粗度要素間をすり抜けるように流下方向あるいは横断方向に短い距離を輸送された後に再度捕捉される。その一方で、底層から粗面外部まで浮上し、粗面上を長距離にわたって輸送される粒子もわずかながら存在する（5.1%, $y_{\text{end}} \geq k$ ）。このような粒子の浮上高さの違いは、粗度高さ近傍における Ejection の発生の有無によって生じるものと考えられる。

参考文献

- 1) Harper, S. E., Foster, I. D. L., Lawler, D. M., Mathers, K. L., McKenzie, M., and Petts, G. E.: The complexities of measuring fine sediment accumulation within gravel-bed rivers, *River Res Applic*, 33: 1575–1584, 2017.
- 2) Casas-Mulet, R., Alfredsen, K. T., McCluskey, A. H., and Stewardson, M. J.: Key hydraulic drivers and patterns of fine sediment accumulation in gravel streambeds: A conceptual framework illustrated with a case study from the Kiewa River, Australia, *Geomorphology*, 299: 152–164, 2017.
- 3) Gage, E., and Cooper, D. J.: Patterns of willow seed dispersal, seed entrapment, and seedling establishment in a heavily browsed montane riparian ecosystem, *Canadian Journal of Botany*, 83(6): 678–687, 2005.
- 4) Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., and Walters, R.: Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133: 873–883, 2007.
- 5) Coceal, O., Dobre, A., Thomas, T. G., and Belcher, S. E.: Structure of turbulent flow over regular arrays of cubical roughness, *J Fluid Mech*, 589: 375–409, 2007.
- 6) Pokrajac, D., and Manes, C.: Velocity measurements of a free-surface turbulent flow penetrating a porous medium composed of uniform-size spheres, *Transp Porous Med*, 78: 367–383, 2009.
- 7) Bomminayun, S., and Stoesser, T.: Turbulence statistics in an open-channel flow over a rough bed, *J Hydraul Eng*, 137(11): 1347–1358, 2011.
- 8) Fang, H., Han, X., He, G., and Dey, S.: Influence of permeable beds on hydraulically macro-rough flow, *J Fluid Mech*, 847: 552–590, 2018.
- 9) Cameron, S. M., Nikora, V. I., and Stewart, M. T.: Very-large-scale motions in rough-bed open-

- channel flow, *J Fluid Mech*, 814: 416–429, 2017.
- 10) Dey, S., and Ali, S. Z.: Review article: advances in modelling of bed particle entrainment sheared by turbulent flow, *Phys. Fluids*, 30(6): 061301, 2018.
 - 11) Pätz, T., Clark, A. H., Valyrakis, M., and Durán, O.: The physics of sediment transport initiation, cessation, and entrainment across aeolian and fluvial environments, *Reviews of Geophysics*, 58: e2019RG000679, 2020.
 - 12) Ancey, C.: Bedload transport: a walk between randomness and determinism. Part 1. The state of the art, *J Hydraul Res*, 58(1): 1–28, 2020.
 - 13) Sumer, B. M., and Oğuz, B.: Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel, *J Fluid Mech*, 86: 109–127, 1978.
 - 14) Rashidi, M., Hestroni, G., and Banerjee, S.: Particle-turbulence interaction in a boundary layer, *Int J Multiphase Flow*, 16: 935–949, 1990.
 - 15) Niño, Y., and García, M. H.: Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: implications for sediment transport, *J Fluid Mech*, 326: 285–319, 1996.
 - 16) Sechet, P., and Le Guennec, B.: Bursting phenomenon and incipient motion of solid particles in bed-load transport, *J Hydraul Res*, 37: 683–696, 1999.
 - 17) van Hout, R.: Spatially and temporally resolved measurements of bead resuspension and saltation in a turbulent water channel flow, *J Fluid Mech*, 715: 389–423, 2013.
 - 18) Baker, L. J., and Coletti, F.: Particle-fluid-wall interaction of inertial spherical particles in a turbulent boundary layer, *J Fluid Mech*, 908: A39, 2021.
 - 19) Nelson, J. M., Shreve, R. L., McLean, S. R., and Drake, T. G.: Role of near-bed turbulence in bed load transport and bed form mechanics, *Water Resour Res*, 136: 2071–2086, 1995.
 - 20) Dey, S., Sarker, S., and Solari, L.: Near-bed turbulence characteristics at the entrainment threshold of sediment beds, *J Hydraul Eng*, 137: 945–958, 2011.
 - 21) Drake, T. G., Shreve, R. L., Dietrich, W. E., Whiting, P. J., and Leopold, L. B.: Bedload transport of fine gravel observed by motion-picture photography, *J Fluid Mech*, 192: 193–217, 1988.
 - 22) Dwivedi, A., Melville, B., and Shamseldin, A. Y.: Hydrodynamic forces generated on a spherical sediment during entrainment, *J Hydraul Eng*, 136: 756–769, 2010.
 - 23) Vowinckel, B., Jain, R., Kempe, T., and Fröhlich, L.: Entrainment of single particles in a turbulent open-channel flow: a numerical study, *J Hydraul Res*, 54(2): 158–171, 2016.
 - 24) Ali, S. Z., and Dey, S.: Origin of the scaling laws of sediment transport, *Proc. A of the Royal Society*, London, UK, 473: 20160785, 2017.
 - 25) Yousefi, A., Costa, P., and Brandt, L.: Single sediment dynamics in turbulent flow over a porous bed – insights from interface-resolved simulations, *J Fluid Mech*, 893: A24, 2020.
 - 26) Yücesan, S., Schobesberger, J., Sindelar, C., Hauer, C., Habersack, H., and Tritthart, M.: Large

2章 粗度乱流の組織構造と粒子輸送過程の解明

- eddy simulation of a sediment particle under entrainment conditions, *J Hydraul Res*, 60(4): 568–587, 2022.
- 27) Radice, A., Nikora, V., Campagnol, J., and Ballio, F.: Active interactions between turbulence and bed load: Conceptual picture and experimental evidence, *Water Resour Res*, 49: 90–99, 2013.
 - 28) Cameron, S. M., Nikora, V. I., and Witz, M. J.: Entrainment of sediment particles by very large-scale motions, *J Fluid Mech*, 888: A7, 2020.
 - 29) Liu, M. X., Pelosi, A., and Guala, M.: A statistical description of particle motion and rest regimes in open-channel flows under low bedload transport, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124: 2666–2688, 2019.
 - 30) Pierce, J. K., Hassan, M. A., and Ferreira, R. M. L.: Stochastic description of the bedload sediment flux, *Earth Surface Dynamics Discussions*, 2022: 1–23, 2022.
 - 31) Papanicolaou, A. N., Diplas, P., Dancy, C. L., and Balakrishnan, M.: Surface roughness effects in near-bed turbulence: Implications to sediment entrainment, *J Eng Mech*, 127: 211–218, 2001.
 - 32) Ali, S. Z., and Dey, S.: Hydrodynamics of sediment threshold, *Phys. Fluids*, 28(7): 075103, 2016.
 - 33) 高野保英, 田中健司, 重松孝昌, 江藤剛治, 竹原幸生: 屈折率整合法による多孔媒体中のPTV, 可視化情報学会誌, 22(1), Suppl., 197–200, 2002.
 - 34) Wiederseiner, S., Andreini, N., Epely-Chauvin, G., and Ancey, C.: Refractive-index and density matching in concentrated particle suspensions: a review, *Exp Fluids*, 50: 1183–1206, 2011.
 - 35) Larsson, I. A. S., Lundström, T. S., and Lycksam, H.: Tomographic PIV of flow through ordered thin porous media, *Exp Fluids*, 59: 96, 2018.
 - 36) 江藤剛治, 竹原幸生, 横山雄一, 井田康夫: 水流の可視化に必要な関連技術の開発 比重整合・屈折率整合・多波長計測, 土木学会論文集, 533(II-34): 87–106, 1996.
 - 37) Kim, T., Blois, G., Best, J. L., and Christensen, K. T.: Experimental study of turbulent flow over and within cubically packed walls of spheres: Effects of topography, permeability and wall thickness, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 73: 16–29, 2018.
 - 38) Houseago, R. C., Hong, L., Cheng, S., Best, J. L., Parsons, D. R., and Chamorro, L. P.: On the turbulence dynamics induced by a surrogate seagrass canopy, *J. Fluid Mech.*, 934: A17, 2022.
 - 39) Gundersen, D. G., Christensen, K. T., and Blois, G.: A methodology for studying the hydroelastic response of submerged flexible vegetation, *Water Resour Res*, 58: e2021WR031744, 2022.
 - 40) Byron, M. L., and Variano, E. A.: Refractive-index-matched hydrogel materials for measuring flow-structure interactions, *Exp Fluids*, 54: 1456, 2013.
 - 41) Weitzman, J. S., Samuel, L. C., Craig, A. E., Zeller, R. B., Monismith, S. G., and Koseff, J. R.: On the use of refractive-index-matched hydrogel for fluid velocity measurement within and around geometrically complex solid obstructions, *Exp Fluids*, 55: 1862, 2014.
 - 42) Harshani, H. M. D., Galindo-Torres, S. A., Scheuermann, A., and Muhlhaus, H. B.: Experimental study of porous media flow using hydro-gel beads and LED based PIV, *Measurement Science*

- and Technology*, 28(1): 015902, 2016.
- 43) Thaker, A. H., Karthik, G. M., and Buwa, V. V.: PIV measurements and CFD simulations of the particle-scale flow distribution in a packed bed, *Chemical Engineering Journal*, 374: 189–200, 2019.
 - 44) Darby, S. E.: Refined hydraulic geometry data for British gravel-bed rivers, *J Hydraul Eng*, 131: 60–64, 2005.
 - 45) Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., and Griffiths, G.: Spatially averaged open-channel flow over rough bed, *J Hydraul Eng*, 127(2): 123–133, 2001.
 - 46) Okamoto, T., Nezu, I., and Sanjou, M.: Flow-vegetation interactions: length-scale of the “monami” phenomenon, *J Hydraul Res*, 54(3): 251–262, 2016.
 - 47) Raupach, M. R., Antonia, R. A., and Rajagopalan, S.: Rough-wall turbulent boundary layers, *Appl Mech Rev*, 44(1): 1–25, 1991.
 - 48) Nezu, I., and Sanjou, M.: PIV and PTV measurements in hydro-sciences with focus on turbulent open-channel flows, *J. Hydro-environment Research*, 5: 215–230, 2011.
 - 49) Okamoto, T., and Nezu, I.: Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow, *Environ Fluid Mech*, 13(5): 417–434, 2013.
 - 50) Okamoto, T., Tanaka, K., Matsumoto, K., and Someya, T.: Influence of velocity field on driftwood accumulation at a bridge with a single pier, *Environ Fluid Mech*, 21: 693–711, 2021.
 - 51) Hjermfelt, A. T., and Mockros, L. F.: Motion of discrete particles in a turbulent fluid, *Appl. Sci. Res.*, 16: 149–161, 1966.
 - 52) Mollicone, J. P., Sharifi, M., Battista, F., Gualtieri, P., and Casciola, C. M.: Particles in turbulent separated flow over a bump: Effect of the Stokes number and lift force, *Phys. Fluids*, 31: 103305, 2019.
 - 53) Sumer, B. M., and Deigaard, R.: Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel. Part 2, *J Fluid Mech*, 109: 311–337, 1981.
 - 54) Tee, Y. H., Barros, D. C., and Longmire, E. K.: Motion of finite-size spheres released in a turbulent boundary layer, *International Journal of Multiphase Flow*, 133: 103462, 2020.
 - 55) Meijering, E., Dzyubachyk, O., and Smal, I.: Methods for cell and particle tracking, *Methods in Enzymology*, 504: 183–200, 2012.
 - 56) Tomkins, C. D., and Adrian, R. J.: Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers, *J Fluid Mech*, 490: 37–74, 2003.
 - 57) Nezu, I., and Nakagawa, H.: Turbulence in open channel flow, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1993.

第3章

剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

3.1 概説

実河川において植生は多様な水生生物の生息場を提供しており、自然豊かな河川空間の景観を創出するうえで必要不可欠である。一方、河道の樹林化の進展によって、治水上のリスクの増大や河川環境の変容につながるものが指摘されている¹⁻⁴⁾。このような背景から、河川における植生と流れ場および土砂輸送の相互作用を解明し、河道内植生動態の予測および水域環境変化の評価を行うことの重要性が高まっている。

植生が流れ場に及ぼす直接的な影響の例として、植生抗力による主流速の低減、およびそれに伴う植生領域内部への土砂堆積の促進が挙げられる。加えて、植生群落近傍では植生領域内外の流速差に起因するせん断領域 (Shear layer) が形成され、乱れが活発に生成される。特に、植生先端が水面より下に完全に水没する水没植生 (Submerged vegetation, $H/h > 1$) 流れでは、植生先端付近においてせん断領域が形成され、乱流混合による鉛直方向の運動量輸送が活発に行われる鉛直混合層 (Vertical mixing layer) が発達する⁵⁻⁹⁾。また、河道内においてパッチ状に偏在する植生群落 (Vegetation patch) 流れでは、植生域・非植生域の境界付近でせん断領域が形成され、大規模な渦構造を伴う水平混合層 (Horizontal mixing layer) が形成される^{10,11)}。このように、植生群落を有する開水路流れの運動量・物質輸送メカニズムは植生抵抗による平均流構造の変化だけではなく、群落近傍で発達する三次元的な乱流構造の発達によっても特徴付けられる。

植生群落が土砂堆積に及ぼす影響についても水路実験や数値解析を通じて数多くの既往研究^{12,13)}において検討されてきた。Zong & Nepf(2010)¹⁴⁾はADVによる流速計測と浮遊砂堆積実験の比較から、滑面から植生群落内部にかけての平均流・乱流構造の遷移過程が浮遊砂の輸送フラックスおよび堆積領域に強く影響することを示唆した。Kim ら(2015)¹⁵⁾は一方の側岸のみに植生群落を有する開水路流れを対象に移動床実験を実施し、主流速が十分

本章は以下の論文に掲載された内容を中心に、さらに検討を加えたものである。

<英文>

1. Matsumoto, K., Okamoto, T., and Sanjou, M.: Influence of vegetation height on turbulence structure and sediment deposition, *Proc. of the 40th IAHR World Congress*, Vienna, pp. 625–630, August, 2023.

<和文>

2. 松本知将, 岡本隆明, 赤堀良介, 山上路生: 植生高さによる乱流構造の遷移過程の変化およびその浮遊砂堆積への影響について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, I_715-I_720, 2021.

に低減されない群落上流端の遷移領域では土砂の堆積が促進されず、逆に河床が洗掘されることを明らかにした。一般に、開水路上の一様流における流れ場と土砂輸送量の関係は、水路勾配あるいは流速分布と対数則との比較から算出される底面せん断応力によって評価される。一方で、植生群落内部および近傍では各植生要素周辺で局所的かつ三次元的な流れの構造が発達するため、一様流と同様の手法で底面せん断応力を評価することは困難であると考えられる。Yang & Nepf (2018)¹⁶⁾ は植生域内部の流れ場を対象に底面近傍の乱れエネルギー (Turbulent kinetic energy, TKE) に基づく流砂量の評価モデルを提案しており、レイノルズ応力に基づく手法よりも高精度で評価が可能であるとしている。

実河川において繁茂する植物の種類および生育状況は多種多様であることから、植生要素の物理的特性や群落形状などの諸条件が植生と流れ場・土砂輸送との相互作用に及ぼす影響を解明することが重要である。特に、植生要素の高さ (以下植生高さ) は平均流構造やせん断層における乱れの生成過程を変化させ、植生流れにおける運動量輸送メカニズムを決定するパラメータの一つであると考えられる¹⁷⁾。赤堀ら(2018)¹⁸⁾ は植生高さの異なる植生群落内の流速および浮遊砂濃度分布の比較を行い、浮遊砂堆積量が最大となる植生高さが存在することを示した。植生群落流れについては、群落背後の渦構造と浮遊砂堆積領域の関連について複数の既往研究を通じて検討されてきた。Liu ら(2018)¹⁹⁾ は植生高さの異なる複数ケースの円柱状植生群落流れを対象に後流領域 (Wake region) 長さや浮遊砂堆積領域の比較を行い、群落背後の鉛直・水平混合層で発達する乱れが浮遊砂の堆積を妨げる可能性があることを指摘している。これらの検討から、植生高さによる乱流構造の変化が植生群落周辺の浮遊砂輸送および堆積領域と密接に関連していることが示唆される。しかし、既往研究で対象とされている植生群落流れの多くは群落の流下方向長さが短い一方で、より流下方向に長い植生群落の周辺ではせん断領域における乱れの発達がさらに活発になると考えられる。また、植生群落近傍の詳細な乱流構造とその浮遊砂輸送メカニズムへの影響については十分に解明されておらず、更なる検討が必要である。

本研究では全水深が一定で植生高さのみを変化させた 4 通りの剛体植生群落流れを対象に水路実験を実施し、平坦河床から群落への流れの遷移過程に対する植生高さの影響について明らかにする。まず、鉛直面 PIV 計測を実施し、群落中央ラインの縦断面内における乱流構造の解明を試みる。さらに、浮遊砂堆積実験では浮遊砂を水路に投入してその堆積状況を観察し、植生群落近傍の乱流構造が浮遊砂輸送に及ぼす影響について考察する。

3.2 理論的検討

(1) 非水没植生群落内部の平均流・乱流遷移過程

植生高さ h が水深 H よりも大きく ($H/h \leq 1$)、植生要素の先端が水面より上に突出するような植生は非水没植生 (Emergent vegetation) と呼ばれる。水路内に非水没植生要素が一樣

3章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

に分布する植生流れでは、重力、水路床による摩擦抵抗および植生要素による抗力抵抗とのつりあいから、植生領域内部（Resistance layer）における流下方向の運動量保存則は次式のように表せる（Huthoffら(2007)²⁰）。

$$\rho g H I_0 = \rho f U_{r0}^2 + \frac{1}{2} \rho C_D m D H U_{r0}^2 \quad (3.1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 I_0 は水路床勾配、 f は摩擦係数、 U_{r0} は水深平均主流速、 C_D は抗力係数、 m は単位面積当たりの植生要素本数、 D は植生要素の直径である。この式は十分に発達した等流条件の成立を仮定しており、流下方向および横断方向に一樣な二次元の流れ場を想定している。

一方で、実河川の河道内では植生領域が必ずしも一樣に分布しているとは限らず、河道内に偏在する植生群落近傍では二次元あるいは三次元的な流れ場が発達することが予想される。水深方向積分された連続式および流下方向（ x 方向）・横断方向（ z 方向）運動量式はそれぞれ以下のように表される（Rominger & Nepf(2011)¹⁰）。

$$\frac{\partial h \langle U \rangle}{\partial x} + \frac{\partial h \langle W \rangle}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial h \langle U \rangle \langle U \rangle}{\partial x} + \frac{\partial h \langle U \rangle \langle W \rangle}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial h \langle P \rangle}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial h \langle \bar{\tau}_{xx} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial h \langle \bar{\tau}_{xz} \rangle}{\partial z} \right] - h F_x \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial h \langle U \rangle \langle W \rangle}{\partial x} + \frac{\partial h \langle W \rangle \langle W \rangle}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial h \langle P \rangle}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial h \langle \bar{\tau}_{zx} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial h \langle \bar{\tau}_{zz} \rangle}{\partial z} \right] - h F_z \quad (3.4)$$

ここで、 P は時間平均水圧、 τ はせん断応力であり、記号 $\langle \rangle$ は水深平均操作を表す。また、 F_i は x_i 方向に作用する植生要素群による抗力（Drag force）で、次式のように表される。

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1 - \phi)} \langle U \rangle (\langle U \rangle^2 + \langle W \rangle^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

$$F_z = \frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1 - \phi)} \langle W \rangle (\langle U \rangle^2 + \langle W \rangle^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

ここで、 ϕ は植生領域の体積に対する植生要素の総体積であり、また植生密度 a は植生領域の単位体積あたりの前面遮蔽面積（= mD ）として定義される。

図-3.1(a)および(b)に非植生域の滑面上から植生群落内部における平均流・乱流構造の遷移過程の概略図を示す。植生群落上流端近傍では植生抗力によって主流速が低減され（ $\partial U / \partial x < 0$ ）、それに伴って横断方向に流体が押し出される。Rominger & Nepf(2011)¹⁰はこの平均流の遷移領域を Upstream adjustment region（ $-L_0 < x < 0$ ）および Interior adjustment region（ $0 < x < L$ ）と名付け、式(3.2)–(3.4)の各項のオーダーの比較と流速計測結果から、

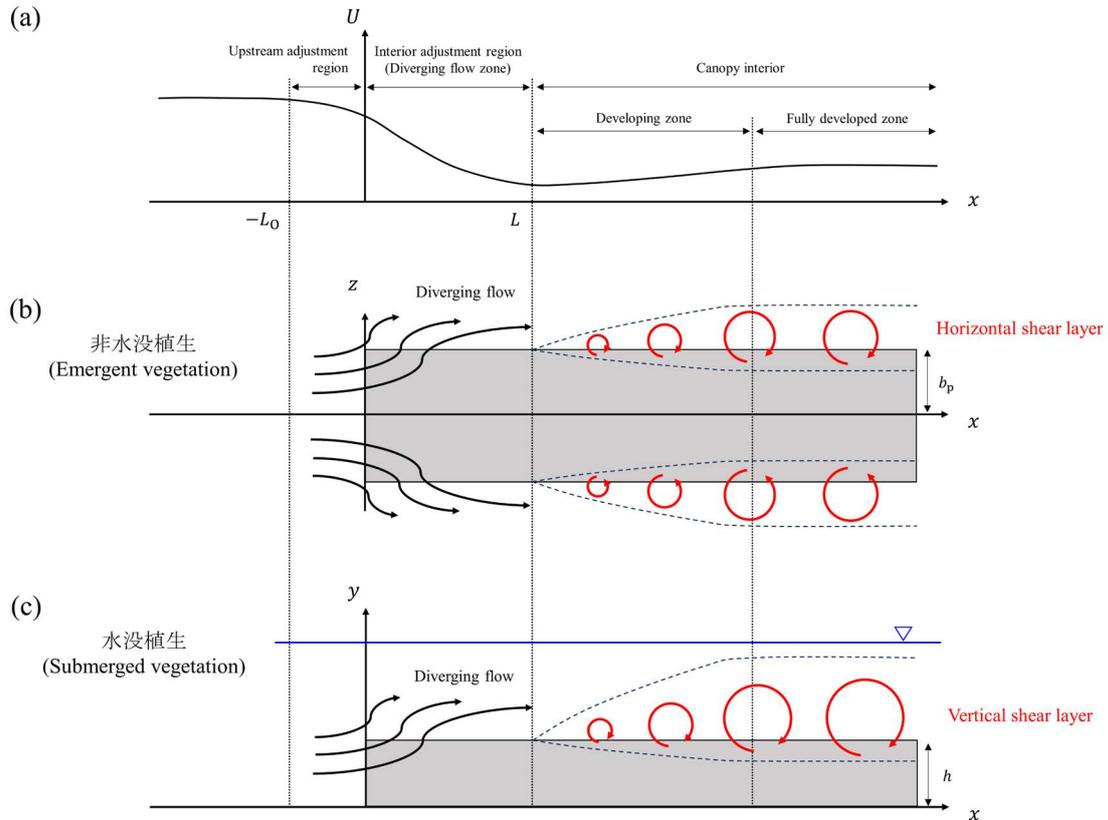


図-3.1 滑面上から植生域内部にかけての平均流・乱流構造の遷移過程 (Rominger & Nepf (2011)¹⁰⁾ および Okamoto & Nezu (2013)⁹⁾ を基に作成)

次のような遷移領域長さ L の評価式(3.7)を提案している.

$$L = \begin{cases} (3.0 \pm 0.3) \left[\frac{2}{C_D a} \{ 1 + (C_D a b_p)^2 \} \right] & (C_D a b_p \ll 2) \\ (7.0 \pm 0.4) b_p & (C_D a b_p \gg 2) \end{cases} \quad (3.7)$$

ここで、 b_p は植生群落幅の半分であり、植生群落の中央ライン ($z = 0$) に関して対称な流れの構造が発達することを仮定している. また、これらの遷移領域では主流速の低減 ($\partial \langle U \rangle / \partial x < 0$) に伴い、連続式(3.2)を満足するように横断方向に押し出される流れが発生する ($\partial \langle W \rangle / \partial z > 0$). このような主流方向に垂直な方向の流れは **Diverging flow** と呼ばれ¹⁴⁾、平均流の遷移過程において顕著に発達する.

また、その下流側の **Canopy interior region** ($x > L$) では主流速の低減が完了し、主流速がほぼ一定となる. その結果、植生領域外縁において水平混合層 ($\partial U / \partial z$) が発達し、平均流の遷移に遅れて乱れの生成が始まる. 乱流構造が十分に発達する植生群落の下流側付近では、植生による抗力抵抗と乱流混合による群落内部への運動量輸送 ($-\overline{uw}$) がつりあうことで (式(3.8))、流下方向に一樣な平均流・乱流構造が形成される.

$$-\frac{1}{2} \frac{C_D a}{(1-\phi)} \langle U \rangle^2 + \frac{\partial}{\partial y} (-\langle \bar{u} \bar{w} \rangle) = 0 \quad (3.8)$$

(2) 水没植生群落内部の平均流・乱流遷移過程

非水没植生流れでは水平面二次元的な流れ場が発達したのに対し、水没植生流れ ($H/h > 1$) では平均流・乱流構造の遷移過程において鉛直方向の質量・運動量輸送の影響が卓越する。横断方向に一樣な水没植生流れにおいて、植生領域内部 ($0 \leq y \leq h$) における運動量式は以下のように表される (Poggi ら(2004)²¹⁾, Huthoff ら(2007)²⁰⁾).

$$\tau_{xy} \Big|_{y=h} + \rho g h I_0 = \rho f U_r^2 + \frac{1}{2} \rho C_D m D h U_r^2 \quad (3.9)$$

ここで、 U_r は植生領域内部の水深方向平均主流速である。左辺第1項はせん断応力による鉛直方向の運動量輸送を示しており、水没植生流れでは重力や抵抗に加えて植生先端付近の鉛直混合層における乱流混合による運動量輸送 ($-\rho \bar{u} \bar{v}$) が重要な役割を果たす。

滑面領域から水没植生領域への遷移領域では、平均流・乱流構造が非水没植生群落流れと類似した流下方向変化を示す。Okamoto & Nezu (2013)⁹⁾ はこのような遷移過程に着目し、水没植生流れを図-3.1(c)のように次の3つの領域に区分した。

- 1) Diverging flow zone ($\partial U / \partial x < 0$, $\partial(-\bar{u} \bar{v}) / \partial x \approx 0$)
- 2) Developing zone ($\partial U / \partial x > 0$, $\partial(-\bar{u} \bar{v}) / \partial x > 0$)
- 3) Fully developed zone ($\partial U / \partial x \approx 0$, $\partial(-\bar{u} \bar{v}) / \partial x \approx 0$)

群落上流端付近の Diverging flow zone において主流速の低減が完了した後、その下流側の Developing zone において鉛直混合層における乱れの生成が活発化する。植生領域の上流端から十分下流側の Fully developed zone では、鉛直方向の運動量輸送 ($-\bar{u} \bar{v}$) と植生抗力の影響がつりあうことで、流下方向に一樣な平均流・乱流構造が形成される。

(3) 植生群落背後の後流域の予測式

植生群落背後の後流域 (Patch-wake region) における質量・運動量輸送メカニズムの解明は、植生群落内部の流れ場と同様に極めて重要である。植生群落の直下流では主流速が一定あるいは漸減する Steady wake region が存在し、その下流において乱流混合による運動量輸送の影響で主流速の回復 ($\partial U / \partial x > 0$) が開始する。Zong & Nepf (2012)²²⁾ は円柱状の非水没植生群落を対象に、後流域内外の流速差が増大するほど流れが不安定になることで混合層が急激に発達するとの仮定に基づき、群落背後における水平混合層厚さ $\delta(x)$ の予測式を

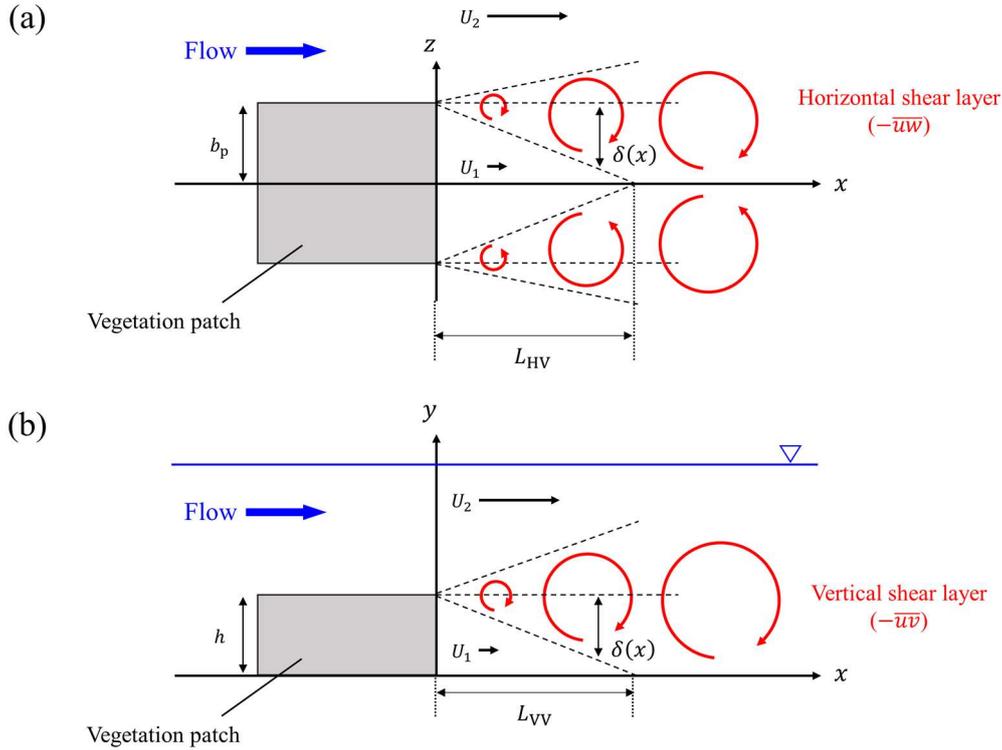


図-3.2 植生群落背後におけるせん断領域の発達過程 (Zong & Nepf (2012)⁹) を基に作成). (a) 水平混合層; (b) 鉛直混合層

提案した.

$$\frac{d\delta}{dx} = S_\delta \frac{\Delta U}{\bar{U}} = 2S_\delta \frac{U_2 - U_1}{U_2 + U_1} \quad (3.10)$$

ここで, U_1 および U_2 はそれぞれ後流域内部および外部の主流速であり, $\Delta U = U_2 - U_1$ は後流域内外の流速差, $\bar{U} = (U_2 + U_1)/2$ は後流域内外の平均流速をそれぞれ表している. また, S_δ は混合層の発達率であり, 実験的に $S_\delta = 0.10 \pm 0.02$ と求められている.

水平混合層における乱流混合 (Horizontal vortices) による流速の回復を仮定する場合, 植生群落背後の後流長さ L_{HV} は式(3.10)を用いて以下のように評価できる (図-3.2(a)).

$$L_{HV} = b_p \times \left(\frac{d\delta}{dx} \right)^{-1} = \frac{b_p \bar{U}}{S_\delta \Delta U} \quad (3.11)$$

また, 水没植生群落背後では水平混合層だけでなく, 鉛直混合層の発達も顕著であると考えられる. この鉛直混合層における乱れ (Vertical vortices) の発達に基づいた後流長さ L_{VV} については, 以下のように評価できる (図-3.2(b)).

3章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

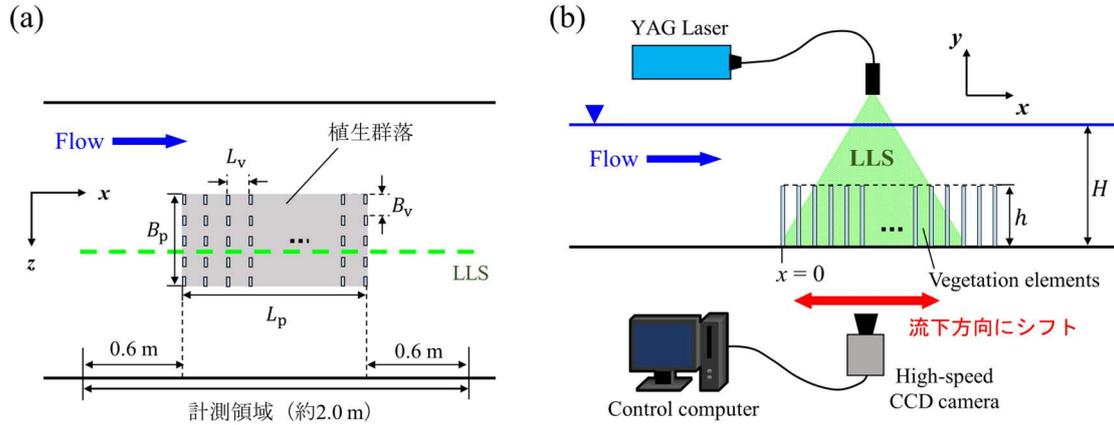


図-3.3 (a)PIV 計測システム, (b)植生素配置

$$L_{VV} = h \times \left(\frac{d\delta}{dx} \right)^{-1} = \frac{h \bar{U}}{S_\delta \Delta U} \quad (3.12)$$

したがって、水平・鉛直混合層の両方が発達する水没植生群落背後の後流長さ L_{wake} は、式(3.11)および(3.12)から求められた後流長さ (L_{HV} , L_{VV}) のうち、より小さいほうを採用することで評価できる (Liu ら(2018)¹⁹⁾).

$$L_{wake} = \min\{L_{HV}, L_{VV}\} \quad (3.13)$$

以上のように、植生群落背後の平均流構造と乱流構造は密接に関連しており、既往研究において混合層の発達から後流長さを評価するモデル式についても提案されている。その一方で、式(3.10)の予測式は流下方向長さが極めて短い植生群落流れを対象とした実験データから提案されたものであり、群落長さが長く、平均流速の低減や乱れの発達がより進行するケースの流れの構造についてはさらなる検討が必要である。

3.3 計測システム・実験手法

(1) 計測システム

本実験では長さ 10 m、幅 $B = 0.40$ m および高さ 0.50 m の可変勾配型水路を用いた。図-3.3 に本研究で用いた実験装置の概略図 ((a)水平面図および(b)鉛直面図) を示す。ここで、 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、植生群落上流端を $x = 0$ 、水路床を $y = 0$ 、水路中央を $z = 0$ とする。本研究では、時間平均流速の各方向成分をそれぞれ U , V および W とし、瞬間流速 (\tilde{u} , \tilde{v} および \tilde{w}) の乱れ変動成分をそれぞれ u , v および w とする。すなわち、 $\tilde{u} \equiv U + u$, $\tilde{v} \equiv V + v$ および $\tilde{w} \equiv W + w$ である。また、 H は全水深であり、水路下流端の可動式堰によって等流となるように調節した。

表-3.1 実験条件

	U_m	H	Re	Fr	u_*	a	L_p	B_p	h	h/H
	[m/s]	[m]	$\equiv U_m H / \nu$	$\equiv U_m / \sqrt{gH}$	[m/s]	[m ⁻¹]	[m]	[m]	[m]	
Case 1	0.25	0.15	37,500	0.21	0.016	7.8	0.738	0.136	0.050	0.33
Case 2									0.070	0.47
Case 3									0.100	0.67
Case 4									0.150	1.0

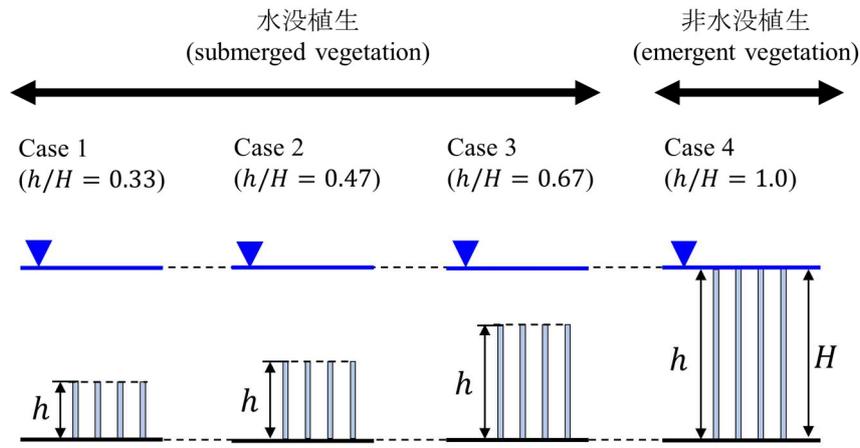


図-3.4 ケース間の植生高さの変化

本研究では水路上流端から約 4–5 m 下流の水路中央付近に剛体植生要素を正格子状に配置し、植生群落モデルを作製した (図-3.3(a))。植生要素モデルは幅 $b_v = 8$ mm、厚さ 2 mm の直方体状の亚克力板であり⁹⁾、ケースごとに植生高さ h を変化させた。また、本実験の水理条件下では植生要素が流れの抵抗によって変形しないことを確認している。流下方向および横断方向の植生配置間隔 L_v 、 B_v はいずれも 3.2 cm とし、植生群落の流下方向長さ L_p および横断方向幅 B_p はそれぞれ 0.738 m、0.136 m とした。また、植生群落の密生度 a [m⁻¹] は次式のように単位体積の植生領域を占める植生要素の前面遮蔽面積として定義される。

$$a \equiv \frac{A}{V_0} = \frac{nhb_v}{hB_pL_p} = \frac{b_v}{B_vL_v} \quad (3.14)$$

ここで、 A は植生領域内部の植生要素の合計前面遮蔽面積、 V_0 は植生領域の体積、 n は植生要素の総本数をそれぞれ表している。本実験の植生要素の配置から密生度は $a = 7.8$ m⁻¹ と算出され、実河川での実測範囲 (0.2–9.0 m⁻¹) に含まれている^{8,18)}。

表-3.1 に本実験の水理条件を示す。本研究では植生高さ H (かぶり水深比 H/h) が植生群落近傍の乱流構造および浮遊砂輸送に及ぼす影響を明らかにするために、図-3.4 に示すように植生高さ h を変化させて水没植生 (submerged, $h/H < 1$) の 3 ケースと非水没植生

3章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

(emergent, $h/H = 1$) の 1 ケースの計 4 ケースを実験条件として設定した。一方で、断面平均流速 U_m および全水深 H については全ケースを通じて一定とし、レイノルズ数 ($Re \equiv U_m H / \nu$) およびフルード数 ($Fr \equiv U_m / \sqrt{gH}$) はそれぞれ $Re = 37,500$ および $Fr = 0.21$ とした。ここで、 ν は水の動粘性係数であり、水温 20°C のとき $\nu = 0.010 \text{ cm}^2/\text{s}$ である。

(2) 鉛直面 PIV 計測

植生群落近傍で発達する平均流・乱流構造を明らかにするために、鉛直面 PIV による流速計測^{9, 23)}を行った。図-3.3(b)に PIV による流速計測システムの概略図を示す。3.0 W の YAG レーザーを光源とする厚さ 2 mm のレーザーライトシート (LLS) を水路上方から鉛直に照射した。図-3.3(a)に示すように、LLS の横断方向照射位置は植生群落中央付近の Non-wake region (植生要素間の領域) η とした。トレーサー粒子には、粒径 $80 \mu\text{m}$ 、比重 1.02 のポリスチレン粒子を用いた。水路側方に高速カメラ (Ditect 製 HAS-EF) を設置し、LLS 内のトレーサーの挙動をデジタル撮影した。ここで、カメラに 30 Hz の外部トリガーを与え、500 Hz のフレームレートで連続画像のペアを 60 秒間計測した。1 回の撮影領域は全水深を含む $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 領域とした。本研究では LLS およびカメラの設置位置を 15 cm 間隔で流下方向にシフトさせて複数回計測を行い、植生群落上流の滑面上から群落内部および群落下流の後流域にかけての約 2 m の領域 ($-4 < x/H < 9$, 図-3.3(a)) における 2 成分流速 (\bar{u}, \bar{v}) の縦断面分布を計測した。

(3) 浮遊砂堆積実験

植生群落内部および背後における浮遊砂の堆積領域と乱流構造の比較を行うために、前節の PIV 計測実験と同じ流れ場を対象に浮遊砂堆積実験を行った。本実験では浮遊粒子として珪砂 8 号 (平均粒径 $d_p = 105 \mu\text{m}$, 水中密度 $s = 1.65$) を用いた。沈降速度 V_t は次式の Rubey 式²⁴⁾ から $V_t = 0.92 \text{ cm/s}$ と算出された。

$$\frac{V_t}{\sqrt{sgd_p}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd_p^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd_p^3}} \quad (3.15)$$

また、限界摩擦速度 u_{*c} は岩垣式²⁵⁾ から $u_{*c} = 1.32 \text{ cm/s}$ と求められた。水路下流端の貯水槽に一定量の浮遊砂を投入し (浮遊砂濃度 $c = 9.4 \times 10^{-4}$ [-]), 水路内で 2 時間循環させた。ここで、通水中の浮遊砂濃度の低下を防ぐために、貯水槽内にポンプ (鶴見製作所製 LSC-1.4S) を設置して絶えず攪拌した。通水後、堆積した浮遊砂が乱れないように静かに水路から水を抜き、浮遊砂の堆積状況を水路上方からカメラで撮影した。本研究では、各ケースについて 3 回ずつ上記の堆積実験を繰り返し、堆積状況の結果の再現性について確認した。

3.4 植生高さによる底層平均流構造の変化

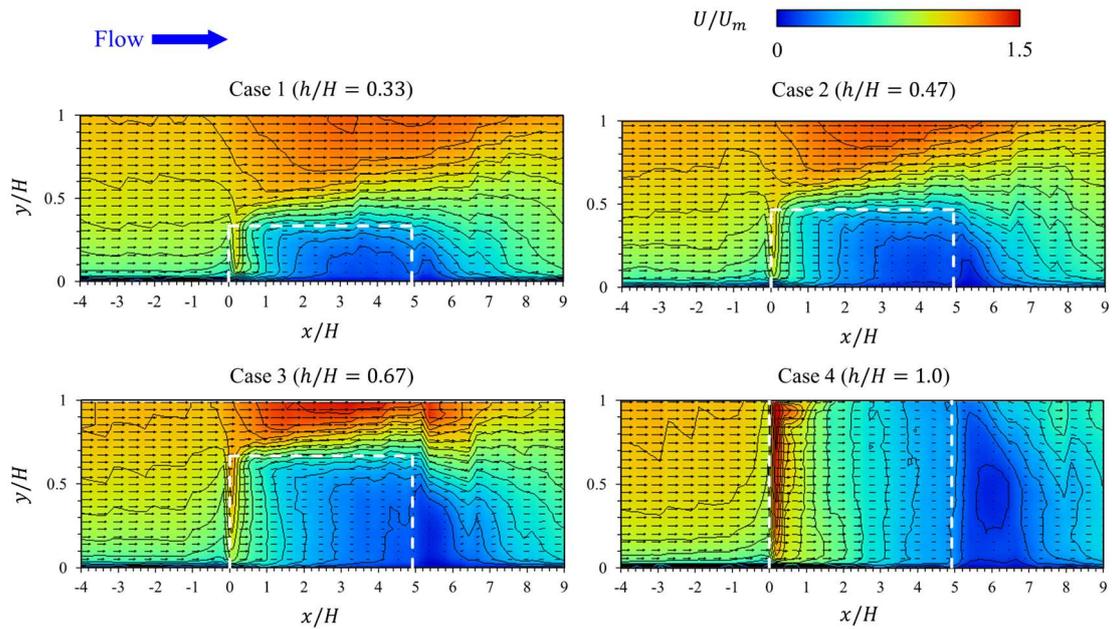


図-3.5 時間平均主流速 U の縦断面コンター図（白破線は植生群落を示す）

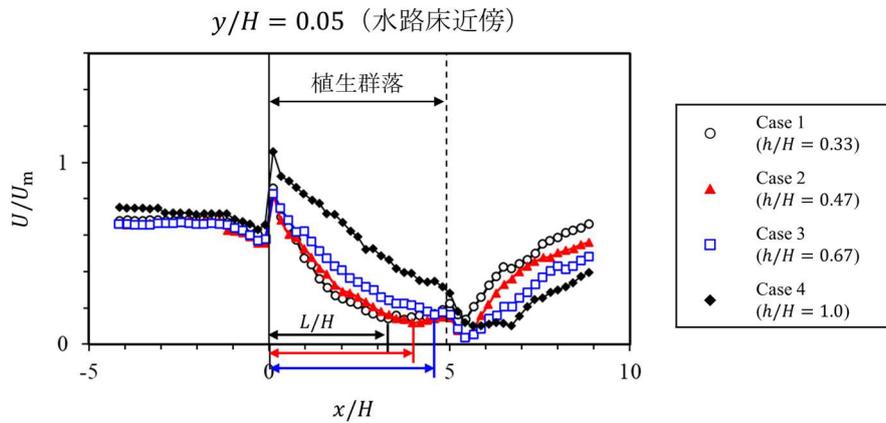


図-3.6 底層 ($y/H = 0.05$) における時間平均主流速 U の流下方向分布

3.4 植生高さによる底層平均流構造の変化

(1) 主流速分布

植生群落周辺では、植生抗力による流速の低減・再加速といった急激な平均流構造の変化が生じると考えられる。本節では植生高さ h が群落内部および後流域の平均流構造の遷移に及ぼす影響に注目し、4 ケース ($h/H = 0.33, 0.47, 0.67$ および 1) における時間平均流速場の計測結果について比較を行う。

図-3.5 に植生群落周辺 ($-4 \leq x/H \leq 9$) における時間平均主流速 U の縦断面コンター図を

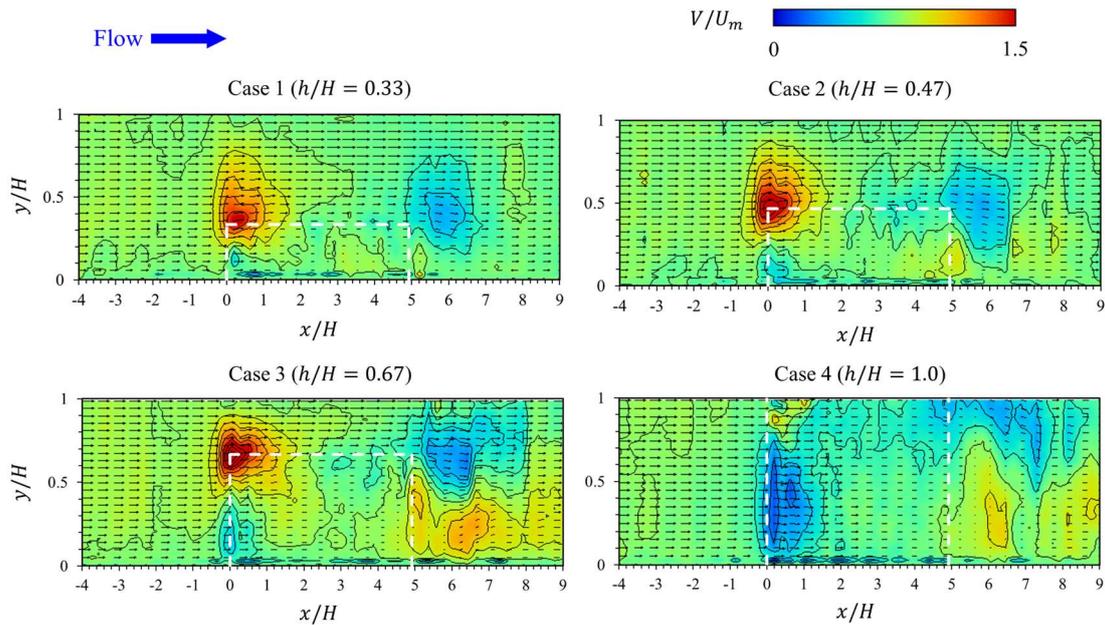


図-3.7 時間平均鉛直流速 V の縦断面コンター図

示す（全4ケース）．いずれのケースでも，群落上流端（ $x = 0$ ）では流れが植生要素にぶつかり，Non-wake region に押し出されることで主流速が急増している．その下流側の植生群落内部（ $0 < x/H \leq 4.9$ ）では，主流速が植生抗力によって減少しているが，逆に後流域（ $x/H > 4.9$ ）では植生抗力の影響がなくなることで，主流速が徐々に再加速される様子が確認された．水没植生では植生内外の流速差が大きいのに対し，非水没の場合は鉛直方向に一樣な流速分布が見られた．植生高さによる主流速の遷移過程の変化を調べるために，図-3.6に4ケースの底層（ $y/H = 0.05$ ）における主流速の流下方向分布 $U(x)$ を示す．群落内部（ $0 \leq x/H \leq 4.9$ ）では植生高さが大きいケースほど主流速の低減が緩やかになり，主流速が流下方向に減少（ $\partial U/\partial x < 0$ ）する遷移領域（Interior adjustment region）の長さ L が増加する傾向（ $L/H = 3.3, 4.0, 4.6, > 4.9$ ）が確認される．その結果，植生高さの大きいケースほど，群落内部における主流速が全体的に大きくなっている．式(3.7)で表されるように，非水没植生群落流れのInterior adjustment region 長さ L は植生高さ h （＝水深 H ）に依存しないことが既往研究において指摘されている¹⁰⁾．本研究で示された植生高さによる主流速の遷移過程の変化は，Diverging flow が横断方向だけではなく鉛直方向にも発達する水没植生群落流れに特有の傾向であると考えられる．また，群落背後の後流域（ $x/H > 4.9$ ）では非水没のケースで主流速が最小となり，植生高さが減少すると主流速は増加している．

(2) 植生群落上流端における Diverging flow

図-3.7に全4ケースにおける時間平均鉛直流速 V の縦断面コンター図を示す．水没植生のケース（Case 1-3）では，群落上流端（ $x \approx 0$ ）の植生先端付近（ $y \approx h$ ）において鉛直流

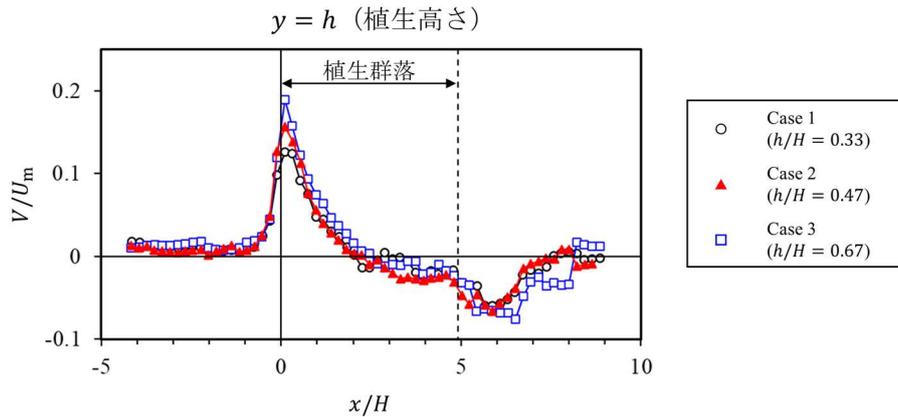


図-3.8 植生高さ ($y = h$) における時間平均鉛直流速 V の流下方向分布 (水没植生)

速が正の値を示す領域 ($V > 0$, Diverging flow region) が見られ, 鉛直方向の Diverging flow (上昇流) が発生している. この水没植生の 3 ケースについて, 図-3.8 に植生高さ ($y = h$) における時間平均鉛直流速 V の流下方向分布を示す. いずれのケースでも $-1 \leq x/H \leq 2$ の領域において顕著な上昇流が発達しており, 群落上流端 ($x = 0$) においてピーク値をとっている. このピーク値は植生高さが大きいケースほど大きな値となっているが, これは植生領域の体積が大きいほど植生領域外に押し出される流体の体積が増加するためと考えられる. 一方, 非水没のケース (Case 4) では群落上流端において顕著な上昇流は確認できず, 逆に水路床近傍において下降流 ($V < 0$) が発生している. これは流れが河床近傍へ潜り込んだ後に横断方向に押し出され, 群落内部から外部へと流れ出る横断方向の Diverging flow ($W > 0$) の発達を示唆している.

3.5 植生高さによる乱流構造の遷移過程の変化

(1) レイノルズ応力分布

図-3.9 に全 4 ケースにおけるレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の縦断面コンター図を示す. 鉛直混合層の発達・減衰過程を明らかにするために, 水没植生流れのケースについてはコンター中に次式で定義される浸透高さ h_p ($h_p < h$) も併せて示している⁹⁾.

$$-\overline{uv}|_{y=h_p} = 0.1(-\overline{uv}_{\text{peak}}) \quad (3.16)$$

ここで, $-\overline{uv}_{\text{peak}}$ は各流下方向位置におけるレイノルズ応力のピーク値である. 水没植生群落近傍 (Case 1-3) では, 植生先端 ($y = h$) 付近でレイノルズ応力が大きく, この領域において鉛直混合層が発達する様子が確認できる. また, 群落内部の下流側から後流領域にかけてピークレイノルズ応力が減衰し, 鉛直混合層の下端が水路床近傍にまで接近する様子が確認できる. 一方で, 非水没植生流れ (Case 4) では植生先端付近において鉛直せん断領域

3章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

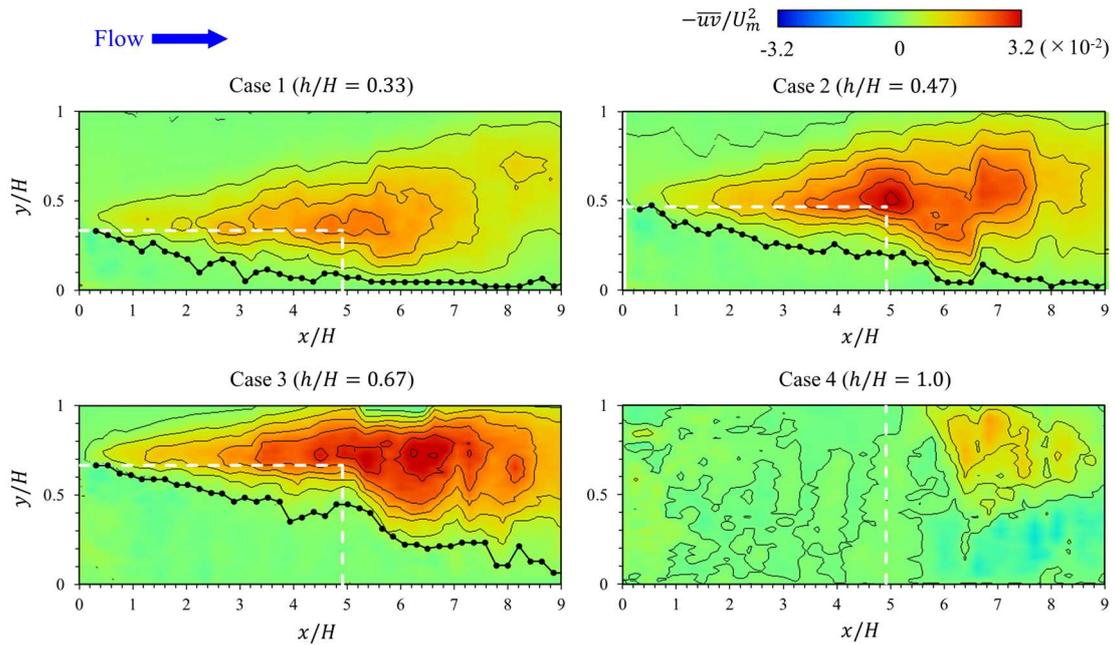


図-3.9 鉛直レイノルズ応力 $-\bar{u}\bar{v}$ の縦断面コンター図

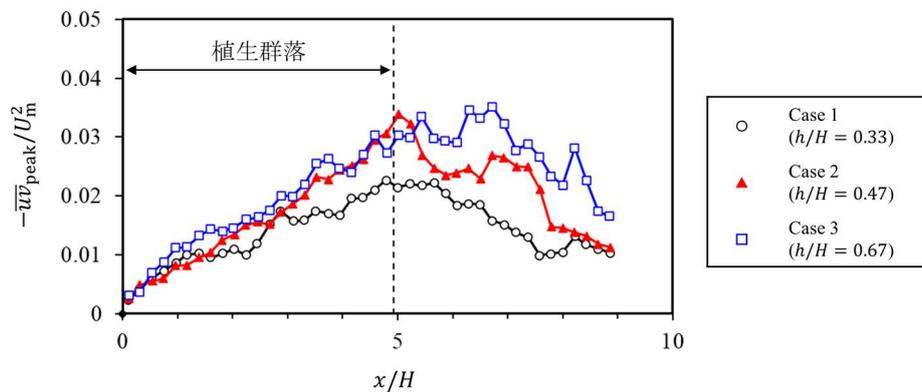


図-3.10 ピークレイノルズ応力 $-\bar{u}\bar{v}_{peak}$ の流下方向分布（水没植生）

が存在しないため ($\partial U/\partial y \approx 0$)、群落域においてレイノルズ応力の大きい領域は形成されていない。

図-3.10 に水没植生流れの 3 ケースについてピークレイノルズ応力 $-\bar{u}\bar{v}_{peak}$ の流下方向変化を示す。いずれのケースにおいても、群落域 ($0 \leq x/H \leq 4.9$) で乱れが発達し、後流域 ($x/H > 4.9$) で減衰している。また、 $h/H = 0.47$ あるいは 0.67 のとき (Case 2, 3) ピークレイノルズ応力が最大であり、乱流混合による鉛直方向の運動量輸送が最も活発になっている。これは、植生高さが小さく滑面流れに近い条件の場合、あるいは植生高さが大きく非水没植生流れに近い条件の場合と比べ、植生高さが中程度のときに植生群落内外の流速差が最大なるためと考えられる。その一方で、植生高さが小さいケース (Case 1) の植生群落背

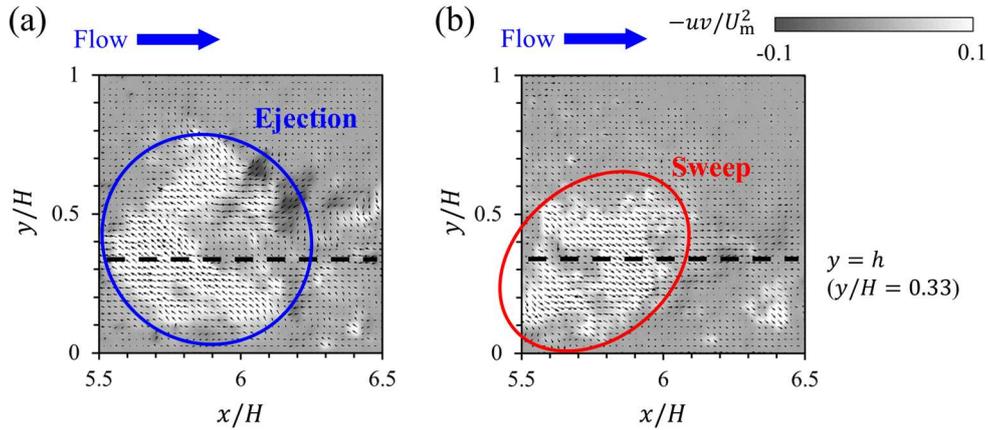


図-3.11 瞬間レイノルズ応力分布 (Case 1, (a)Ejection および(b)Sweep 発生時)

後 ($x/H > 4.9$) では鉛直混合層が水路床近傍 ($y \approx 0$) にまで発達する様子が確認され (図-3.9), 鉛直混合層において生成された乱れによって底層の流れ場が不安定になることが示唆される. また, 植生群落近傍および内部における平均流の遷移過程は植生抗力の大きさにも左右されるため, 乱流混合による運動量輸送が最大となるかぶり水深比 (H/h) は植生群落の密生度によって変化すると推測される.

(2) 四象限区分解析

植生群落近傍, 特に群落下流側から後流域では乱流混合による鉛直方向の運動量輸送が活発にみられ, 横断方向軸の渦構造を伴う乱流の組織構造が発達すると考えられる. 図-3.11 に Case 1 ($x/H = 0.33$) の植生群落背後 ($5.5 \leq x/H \leq 6.5$) における瞬間レイノルズ応力 $-uv$ の縦断面コンター図を示す. ここで, 図中の黒矢印は各瞬間における瞬間流速の時間平均値からの変動ベクトル (u, v) を表している. 1 時刻目のコンター図 (図-3.11(a)) では, 瞬間レイノルズ応力が正である上昇流領域が発生しており ($-uv > 0, v > 0$), 植生高さより下部から上部へ向かって Ejection ($u < 0, v > 0$) と呼ばれる低運動量流体の上方への輸送が確認できる. 一方, 2 時刻目のコンター図 (図-3.11(b)) では瞬間レイノルズ応力が正である下降流領域が発生しており ($-uv > 0, v < 0$), 植生高さの上部から水路床近傍に向かって Sweep ($u > 0, v < 0$) と呼ばれる高運動量流体の下方への輸送が確認できる. このような Sweep が水路床近傍に達することで, 植生高さを通じた質量・運動量輸送に寄与するのみならず, 底層の浮遊砂堆積にも影響を及ぼすものと考えられる.

水没植生後流域における運動量輸送についてより詳細に調べるために, $x/H = 6.0$ の地点についてレイノルズ応力の四象限区分解析を行い, 次式で定義されるレイノルズ応力の各象限成分 RS_i ($i = 1-4$) を求めた^{6,9)}.

$$RS_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{-u(t)v(t)\} I(t) dt \quad (3.17)$$

3章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

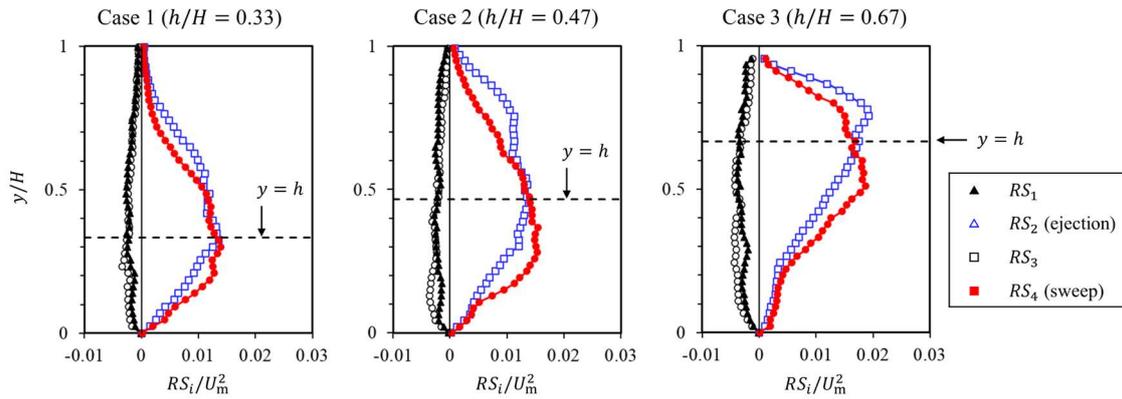


図-3.12 レイノルズ応力の四象限区分解析結果

ここで、 $I_i(t)$ は (u, v) が第 i 象限にあるとき 1、それ以外ときは 0 となる判別関数である。図-3.12 に非水没植生のケース (Case 1-3) における RS_i ($i = 1-4$) の鉛直方向プロット図を示す。いずれのケースでも植生内部 ($y \leq h$) では Sweep (RS_4) が Ejection (RS_2) を上回っており、群落内部あるいは水路床近傍への運動量および浮遊砂の輸送に寄与すると考えられる。植生高さの小さいケースほど、鉛直混合層において発生した Sweep が底面近傍にまで達している。したがって、植生高さが小さいケースでは、水路床近傍まで輸送される高運動量流体が群落内部あるいは後流域への浮遊砂輸送や底層に堆積する浮遊砂の巻き上げを引き起こす可能性がある。

(3) 底層の乱れエネルギー分布

植生群落内部および後流域の乱流構造を調べるために、図-3.13 に各ケースの底層 ($y/H = 0.05$) における乱れエネルギー k の流下方向分布を示す。ここで、主流方向に垂直な 2 方向の乱れが等方的であると仮定し ($\overline{v^2} \approx \overline{w^2}$)、鉛直面 PIV を通じて得られた 2 成分の流速データから次式のように乱れエネルギーを算出した。

$$k \equiv \frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \approx \frac{1}{2}\overline{u^2} + \overline{v^2} \quad (3.18)$$

群落内部 ($0 \leq x/H \leq 4.9$) では、各ケースとも主流速が十分に低減されていない群落上流側で乱れエネルギーの値が大きく、流下方向に主流速が減少するにつれて乱れエネルギーも減衰している。ケース毎の比較から、群落内の主流速が最大となる非水没植生のケース (Case 4) で群落内部の乱れエネルギーも最大であることが確認できる。このような植生群落内部における乱れの発達、各植生要素の周りで剥離渦が発生し、小スケールの乱れが発達することを示していると考えられる²¹⁾。群落内部の下流側領域 ($3 < x/H < 4.9$) では、Case 2 および Case 3 において乱れエネルギーが最小となっており、主流速が最小の Case 1 の方がこれらのケースよりも乱れエネルギーが大きくなっている。これは、Case 1 では植生

3.5 植生高さによる乱流構造の遷移過程の変化

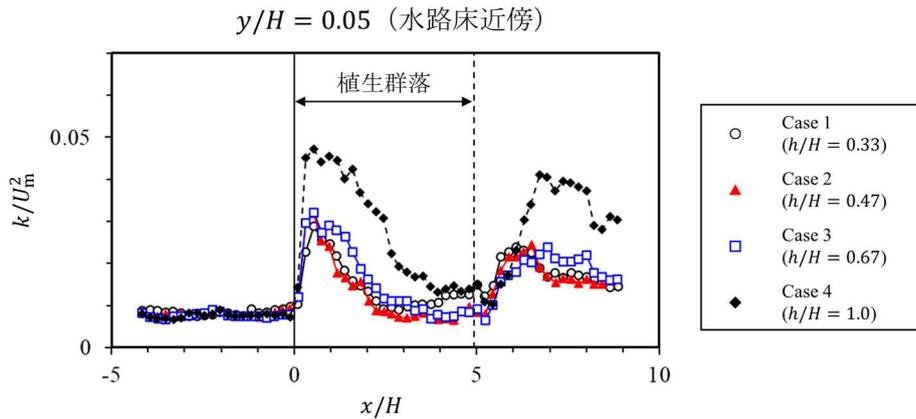


図-3.13 底層における乱れエネルギー (TKE) k の流下方向分布

高さが他のケースよりも小さいため、植生先端付近の鉛直混合層で生成された乱れが河床近傍にまで浸透するためと考えられる。

植生群落の背後 ($x/H > 4.9$) では乱れエネルギーが急増しているが、これは群落背後における鉛直・水平混合層の発達過程と関連していると考えられる。このうち非水没植生のケース (Case 4) では、鉛直レイノルズ応力 ($-\overline{uv}$) の値が他のケースと比較して小さいのに対し (図-3.9)、乱れエネルギーは最大となっている。これは、非水没植生群落の近傍では鉛直せん断領域 ($\partial U/\partial y$) が存在しないのに対し、群落外縁近傍の横断方向せん断領域 ($\partial U/\partial z$) における横断方向の運動量輸送 ($-\overline{uw}$) が卓越するためと推測される。このような植生群落周辺の横断方向の運動量輸送については、今後水平面 PIV 等を通じて水平面内の流れの構造を明らかにし、さらに検討する必要がある。

3.6 植生高さによる浮遊砂堆積領域の変化

(1) 植生群落内部の浮遊砂堆積

本節では浮遊砂堆積実験の結果と流速計測結果の比較を行い、植生群落近傍における平均流・乱流構造の遷移過程と浮遊砂堆積領域に及ぼす影響、および植生高さによるそれらの変化について考察する。図-3.14 に植生群落の上流端付近 ($x \approx 0$) および群落内部における浮遊砂堆積状況の撮影画像を示す。本研究では水路床上の堆積状況を目視で観察し、黒色の水路床が露出した領域を「非堆積領域」、浮遊砂が堆積している淡褐色の領域を「堆積領域」とそれぞれ定義した。各ケースとも群落上流端に非堆積領域が存在し、またその下流側で堆積領域が分布している。また、浮遊砂の非堆積領域長さ L_{ND} は、先述した主流速の遷移領域長さ L (図-3.6) と同様に、植生高さ h とともに増加する傾向が確認された。これは、群落上流端近傍の主流速が大きい領域において浮遊砂の堆積が抑制され、河床が浸食されることを示唆しており、既往研究 (Zong & Nepf(2011)¹⁴⁾、Kim ら(2015)¹⁵⁾) においても同様の傾

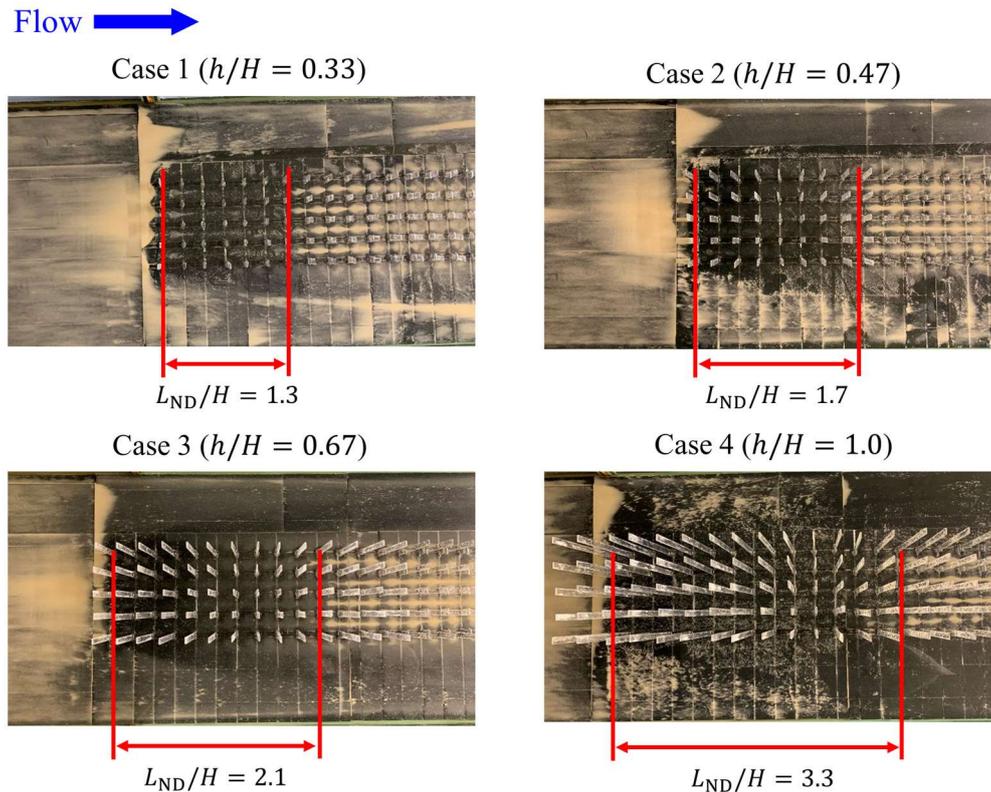


図-3.14 植生群落内部における浮遊砂の堆積状況

向が確認されている。

植生要素の近傍では三次元的な流れ場が発達するため、植生領域内部における土砂輸送の評価には摩擦速度 u_* よりも乱れエネルギー k の方が適していることが指摘されている (Yang & Nepf (2018)¹⁶⁾). Pope ら(2006)²⁶⁾ は乱れエネルギーから底面せん断応力 τ を評価する手法として以下のモデル式を提案した。

$$\tau = C_0 \rho k \quad (3.19)$$

ここで、 C_0 は無次元の定数であり、経験的に $C_0 = 0.19-0.20$ とされている。本研究ではPope ら(2006)²⁶⁾と同様に乱れエネルギーから底面せん断応力を評価し ($C_0 = 0.19$)、植生群落内部 ($0 \leq x \leq L_p$)において底面せん断応力が浮遊砂粒子の限界掃流力を上回る領域 ($\tau > \rho u_{*c}^2$)の流下方向長さ L_k を算出した。図-3.15(a)に植生高さ (h/H) による L_{ND} (非堆積領域長さ)、 L_k (乱れエネルギーに基づく遷移領域長さ) および L (主流速に基づく遷移領域長さ) の変化を示す。いずれの領域長さも植生高さの増加に伴って増加しており、植生群落上流端近傍における平均流・乱流構造の遷移過程が浮遊砂の堆積領域に影響を及ぼすことを示唆している。一方で、主流速の遷移領域長さ L は非堆積領域長さ L_{ND} の2-3倍程度となっているのに対し、 L_k はいずれのケースについても L_{ND} と比較的近い値となっている。図-3.15(b)に主流速および乱れエネルギーの遷移領域長さに対する非堆積領域長さの比 (L_{ND}/L および L_{ND}/L_k)

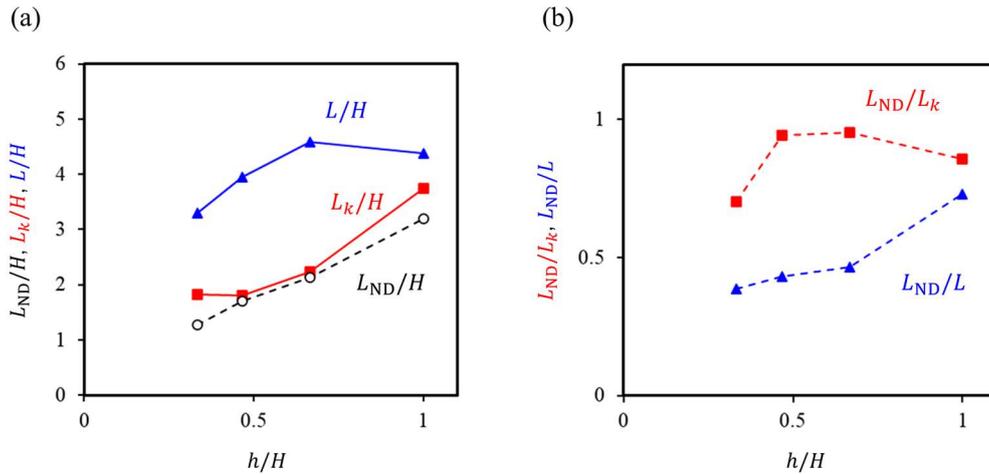


図-3.15 植生高さによる植生群落内部の非堆積領域長さ L_{ND} の変化

のプロット図を示す。プロット図の比較から、 L_{ND}/L は植生高さ (h/H) に伴って 0.4-0.7 の範囲で緩やかに増加するのに対し、 L_{ND}/L_k は概ね 0.9-1 の幅に収まっている。このように、植生群落内部の浮遊砂堆積・非堆積領域は乱れエネルギー分布と対応しており、上流側 ($0 \leq x \leq L_{ND}$) では植生要素近傍で生成される小スケールの乱れによって浮遊砂堆積が抑制されるものと考えられる。

(2) 植生群落後流域の浮遊砂堆積

次に、植生群落背後の後流域 ($x > L_p$) における堆積状況を図-3.16 に示す。いずれのケースでも群落内部 ($x < L_p$) からその背後の後流域にかけて浮遊砂の堆積領域が確認される。水没植生のケース (Case 1-3) では、植生高さが増加するにつれて群落下流端からの堆積領域長さ L_{dep} が増加している。これは植生高さが増加すると、後流域における主流速の回復が緩やかになる (図-3.6) ことに加え、図-3.9や図-3.12 で示したように植生先端 ($y = h$) で発達する鉛直混合層 ($-\overline{uv}$) がより下流側の地点で水路床近傍に達するようになるためと考えられる。一方、植生高さが比較的大きいケース (Case 3 および 4) では浮遊砂堆積領域の横断方向幅が狭くなっており、非水没植生 (Case 4) のケースでは堆積領域長さ L_{dep} が Case 3 よりも小さくなっている。図-3.13 で考察したように、非水没植生のケースでは鉛直混合層が形成されない代わりに群落外縁において水平混合層における乱れの生成が活発に行われると考えられる。したがって、植生高さが大きいケースで観察された堆積領域の特徴は、このような水平混合層で発達する乱れによって浮遊砂の巻き上げが生じることで引き起こされたものと推測される。

(3) 乱流構造と浮遊砂堆積領域の比較

PIV によって得られた底層の流速計測結果と浮遊砂堆積実験の観察結果をもとに、植生群

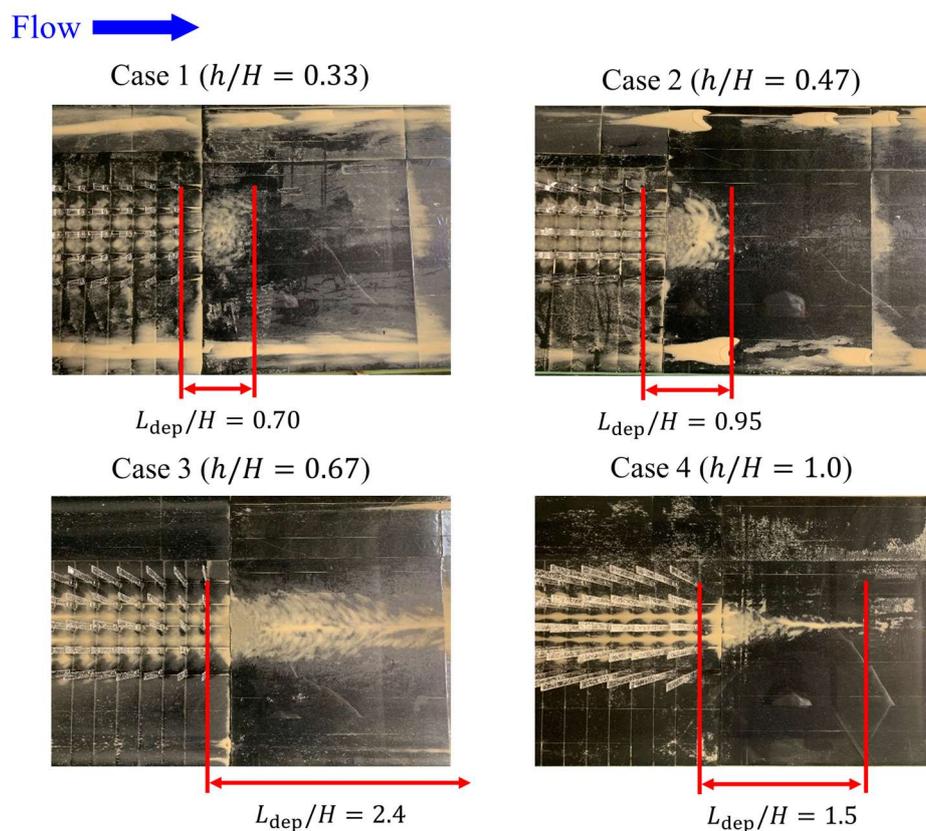


図-3.16 植生群落背後 ($x > L_p$) における浮遊砂の堆積状況

落近傍の平均流・乱流構造が浮遊砂堆積状況に及ぼす影響について考察する。Ortiz ら(2013)²⁷⁾ は時間平均流速および乱れエネルギーの計測結果と土砂堆積量の計測結果の比較を行っており、本研究では同様の手法で流速計測結果と堆積状況の比較を行う。

図-3.17 に全4ケースの水路床近傍 ($y/H = 0.05$) の群落中央ラインにおける時間平均流速 U と乱れエネルギー k のプロット図を示す。ここで、堆積領域における計測データのプロット点は塗りつぶしで、非堆積領域に対応するプロット点は白抜きでそれぞれ示している。堆積領域に対応するプロット点は概ね $U/U_m < 0.4$ の範囲に含まれており、主流速の小さい領域に浮遊砂が堆積することが確認される。その一方で、植生群落背後の後流域のように、主流速の値が比較的小さくても k の値が大きい地点 ($U/U_m < 0.4$ かつ $k/U_m^2 > 0.02$) では浮遊砂があまり堆積せず、非堆積領域となっている。このことから、植生群落やその後流域における平均流・乱流構造が浮遊砂の堆積領域および輸送過程に影響を及ぼすと考えられる。なお、図-3.17 中の $U/U_m < 0.4$ かつ $0.015 < k/U_m^2 < 0.025$ の領域では植生高さによって堆積する場合としない地点が混在しており、後流領域の底層における浮遊砂の体積メカニズムについては今後もより詳細に検討する必要がある。

最後に、本研究の結果をもとに作成した植生群落近傍の乱流構造と浮遊砂堆積領域に関する現象モデルを図-3.18 に示す。ここで、(a)は植生群落中央ラインの縦断面図を、(b)は水

3.6 植生高さによる浮遊砂堆積領域の変化

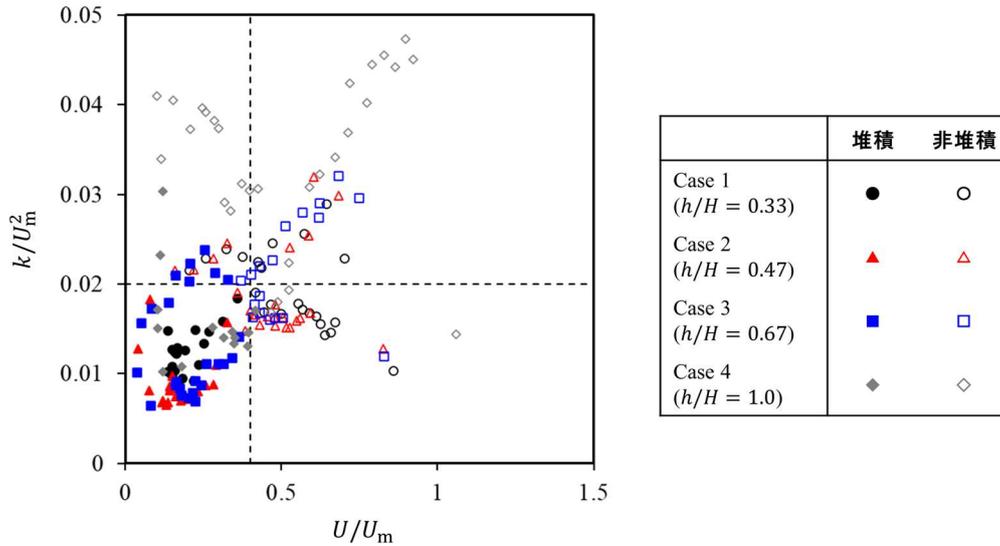


図-3.17 主流速・乱れエネルギーと堆積状況の比較

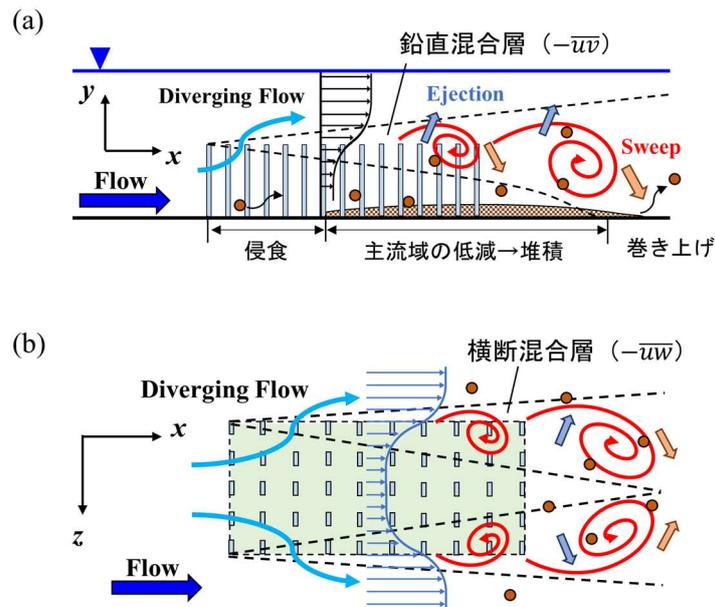


図-3.18 植生群落近傍における乱流構造と浮遊砂堆積領域

路床近傍における水平面図をそれぞれ表している。植生先端付近の鉛直せん断領域 ($\partial U/\partial y$) において流れが不安定になり、乱れが活発に生成される鉛直混合層 ($-\overline{uv}$) が形成される。群落背後の後流域ではこの鉛直混合層が発達して水路床近傍にまで到達し、底層に堆積する浮遊砂粒子を巻き上げて堆積を抑制する。同様に、群落外縁近傍の横断せん断領域 ($\partial U/\partial z$) においても水平混合層 ($-\overline{uw}$) が発達し、運動量や浮遊砂の横断方向輸送が促進される。このような鉛直混合層および水平混合層による質量・運動量輸送への寄与の割合は植生高さ と水深の比 (h/H) によって変化し、植生高さが比較的小さい水没植生流れでは鉛直混合層

3章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

が、植生高さが大きい水没植生流れあるいは非水没植生流れでは水平混合層がそれぞれ群落背後の堆積領域を特徴付けるものと考えられる。

3.7 結語

本研究では PIV 流速計測と浮遊砂堆積実験を行い、植生高さが群落周辺の平均流・乱流構造の遷移過程および浮遊砂堆積に及ぼす影響について考察した。以下に本研究を通じて得られた知見を列挙する。

- 1) 平均流速の計測結果より、植生高さが大きい場合、群落内部における主流速の低減および後流域における主流速の回復がいずれも緩やかになることが示された。また、群落上流端で発生する Diverging flow は植生高さの比較的小さいケースで鉛直方向に、非水没や植生高さの大きいケースで横断方向に卓越すると考えられる。
- 2) 植生先端の鉛直混合層における運動量輸送 ($-\overline{uv}$) は、本研究の植生密度の場合、植生高さが全水深の 50–70%程度の場合 ($h/H = 0.5-0.7$) で最も活発になる。一方、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 Sweep のような組織的な乱流運動が底層にまで達する。
- 3) 平均主流速の遷移に伴い、群落内部上流側で浮遊砂の侵食が、下流側から後流域にかけて堆積が確認された。また、植生高さによる乱流構造の変化が群落周辺における浮遊砂の輸送および堆積状況に影響を及ぼす可能性が示された。

参考文献

- 1) 原田守啓, 永山滋也, 大石哲也, 萱場祐一: 揖斐川高水敷掘削後の微地形形成過程, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, I_1171–I_1176, 2015.
- 2) 田中規夫, 八木澤順治, 大塚翔平: 洪水減水波形と砂礫州の形状特性による土砂堆積特性を考慮した砂礫州の樹林化評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.3, pp.60–70, 2014.
- 3) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 鏗敬介, 西川貴大, 定地憲人, 泉孝佑, 緒方亮: 橋脚周りの河床変動に伴う魚類の生息域変化に関する調査, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.645–650, 2017.
- 4) 辻本哲郎, 北村忠紀: 植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程, 水工学論文集, 第 40 巻, pp.1003–1008, 1996.
- 5) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次, 北村忠紀: 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 438 号, pp.31–40, 1991.

- 6) Raupach, M. R., Finnigan J., and Brunet, Y.: Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy, *Boundary-Layer Meteorology*, 78, pp.351–382, 1996.
- 7) Finnigan, J.: Turbulence in plant canopies, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 32, pp.519–571, 2000.
- 8) Nepf, H.M.: Flow and transport in regions with aquatic vegetation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 44, pp.123–142, 2012.
- 9) Okamoto, T., and Nezu, I.: Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow, *Environ Fluid Mech*, 13(5), pp.417–434, 2013.
- 10) Rominger, J. T., and Nepf, H. M.: Flow adjustment and interior flow associated with a rectangular porous obstruction, *J. Fluid Mech.*, 680, pp 636–659, 2011.
- 11) 横嶋哲, 河原能久: キャノピー内部の抗力係数分布を考慮した樹木群を過ぎる流れの LES, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_871–I_876, 2013.
- 12) 関根正人, 浦塚健史: 側岸部に交互に繁茂する植生群落によって生成される流れと河床形状について, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.813–818, 2000.
- 13) 田中貴幸, 大本照憲, 田中寿幸: 流下方向に不連続的植生群落を有する開水路流れの抵抗特性と運動量輸送, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.763–768, 2008.
- 14) Zong, L., and Nepf, H.: Flow and deposition in and around a finite patch of vegetation, *Geomorphology*, 116, pp.363–372, 2010.
- 15) Kim, H. S., Kimura, I., and Shimizu, Y.: Bed morphological changes around a finite patch of vegetation, *Earth Surf. Process. Landforms*, 40, pp.375–388, 2015.
- 16) Yang, J. Q., and Nepf, H. M.: A turbulence-based bed-load transport model for bare and vegetated channels: *Geophysical Research Letters*, 45(10), pp. 428–436, 2018.
- 17) Martino, R., Paterson, A., and Piva, M.: Double-average mean flow and local turbulence intensity profiles from PIV measurements for an open channel flow with rigid vegetation, *Environ Fluid Mech.*, 12, pp.45–62, 2012.
- 18) 赤堀良介, 山口里実, 佐藤大介: 冠水した植生域における浮遊砂の鉛直方向濃度分布の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, I_949–I_954, 2018.
- 19) Liu, C., Hu, Z., Lei, J., and Nepf, H. M.: Vortex structure and sediment deposition in the wake behind a finite patch of model submerged vegetation, *J. Hydraul. Eng.*, 144(2): 04017065, 2018.
- 20) Huthoff, F., Augustijn, D. C. M., and Hulscher S. J. M. H.: Analytical solution of the depth-averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation, *Water Resour. Res.*, 43, W06413, 2007.
- 21) Poggi, D., Porporato, A., Ridolfi, L., Albertson, J. D., and Katul, G. G.: The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, 111, pp.565–587, 2004.
- 22) Zong, L., and Nepf, H.: Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel, *J. Fluid Mech.*, 691, pp.368–391, 2012.
- 23) Okamoto, T., Nezu, I., and Sanjou, M.: Flow-vegetation interactions: length-scale of the “monami”

3 章 剛体植生群落背後の乱流構造および浮遊砂堆積

- phenomenon, *Journal of Hydraulic Research*, 54(3), pp.251–262, 2016.
- 24) Rubey, W. W.: Settling velocity of gravel, sand, and silt particles, *American Journal of Science*, 25(148), pp.325–338, 1933.
- 25) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 1956 卷, 41 号, pp.1–21, 1956.
- 26) Pope, N. D., Widdows, J., and Brinsley, M. D.: Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach—A comparison of annular flume and field data, *Continental Shelf Research*, 26, pp.959–970, 2006.
- 27) Ortiz, A. C., Ashton, A., and Nepf, H.: Mean and turbulent velocity fields near rigid and flexible plants and the implications for deposition, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, pp.2585–2599, 2013.

第4章

群落幅による剛体植生流れの乱流・ 二次流構造の変化

4.1 概説

河道内植生が河川の物質・運動量輸送において果たす役割は大きく、これまでも野外調査や実験・数値シミュレーションを通じた現象解明が行われてきた。特に、既往研究では単純化された条件下を対象に現象解明を行うことを目的として、植生領域の配置が流下方向あるいは横断方向に一樣な流れ場を対象としたものが多くみられる¹⁻³⁾。一方、植生領域は河道内に一樣に分布するとは限らず、多くの場合、植生群落のパッチ状に、あるいは河岸に沿うような形で偏在する。前章の結果から、水路中央に植生群落が偏在する植生群落流れでは群落後流域で発達する渦構造が浮遊砂堆積領域を決定することが示唆されている。このように、植生領域が偏在する開水路流れ (Partially vegetated open-channel flow) の物質輸送メカニズムを理解するためには、植生群落近傍における平均流・乱流構造を詳細に明らかにすることが不可欠である^{4,5)}。

水路内に植生群落が偏在する流れ場に関する研究として、まず最も単純なケースである非水没の片側植生群落流れにおける乱流構造の解明が行われてきた。White & Nepf (2007)⁶⁾ は片側植生群落内外の流速をLDVによって計測し、群落外縁近傍の水平せん断領域において発達する乱流の組織構造について考察した。岡本ら(2014)⁷⁾ は有限長の片側剛体植生群落近傍を対象にPIV計測を実施し、植生群落幅一定の条件下で群落背後の水平混合層の発達・減衰過程および横断方向の運動量輸送メカニズムについて考察した。加えて、植生群落近傍の水平混合層で発達する乱流構造が群落内部への浮遊砂輸送に影響を及ぼす可能性についても指摘されている^{8,9)}。

このように、非水没植生群落の近傍および内部で発達する乱流構造は、主に群落外縁の水平混合層で発達する大規模水平渦と各植生要素の近傍で発達する小規模な剥離渦のいずれかである。一方で、前章で考察したように、洪水時に水没する草本類や低木群落のように、

本章は以下の論文に掲載された内容を中心に、さらに検討を加えたものである。

<和文>

1. 松本知将, 岡本隆明, 山上路生, 高田真志: 片側水没植生群落近傍の乱流・二次流構造と群落幅の影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 16, 23-16080, 2024.

4章 群落幅による剛体植生流れの乱流・二次流構造の変化

植生高さが水深よりも低い水没植生群落流れでは、水平渦に加えて植生先端付近の鉛直せん断領域において鉛直混合層が発達する。さらに、このように水没植生群落の近傍では三次元的な乱流構造が形成されるため、横断面内において二次流 (Secondary flow) が発達するものと予想される^{10, 11)}。Nezu & Onitsuka (2001)¹²⁾ は片側に偏在する水没植生群落流れのLDV計測を行い、植生内外における二次流構造とその発達メカニズムを示した。Yanら(2016, 2022)^{13, 14)} はADVによって片側植生群落近傍の平均流・乱流統計量の横断面分布を計測し、鉛直渦 (Vertical vortices) ・水平渦 (Horizontal vortices) の発達に伴う乱れの非等方性が二次流の形成に影響することを示唆した。Unigarro Villotaら(2023)¹⁵⁾ はADVによる流速計測結果から、植生群落内外の運動量交換に対する二次流の寄与が乱流混合と同様に大きいことを明らかにした。

このような二次流構造は限られた水理条件を対象とした流速計測において観察されたものであり、現象の一般性についてはさらなる検討が必要である。特に、実際の河道では大小さまざまな横断方向幅の植生群落が存在していることから (Nikoraら(2008)¹⁶⁾, Marjoribanksら(2019)¹⁷⁾), 群落幅が流れ場に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。植生群落幅が異なるケースでは流れの遷移過程や植生先端付近・群落外縁における混合層の発達過程に変化が見られると予想されるが、その一方で群落幅を系統的に変化させてその影響を検討した研究は少ない。また、水没植生群落近の二次流構造については上記のような計測例が報告されているが、その生成メカニズムについては未解明点が多く残されている。幅広い実験条件を対象に計測を行い、水理条件による鉛直・水平混合層の発達過程および二次流構造の変化を調べることで、二次流の生成メカニズムの一端を解明し得ると考えられる。

本研究では植生群落幅が乱流および二次流構造に及ぼす影響を明らかにするために、水路右岸側に水没剛体植生群落が偏在する開水路流れを対象とする水路実験を行う。まず、植生群落幅の異なる4通りの流れ場に対して鉛直面PIV・水平面PIVによる流速計測実験を実施し、群落幅による平均流構造および鉛直・水平混合層の発達過程の変化を調べる。また、計測断面を細かく設定して流速計測を行い、植生群落近傍において発達する二次流構造と乱流構造の関連について考察する。

4.2 計測システム・実験方法

(1) 計測システム

本研究では全長10 m、幅 $B = 0.4$ m、高さ0.5 mの可変勾配型水路 (勾配1/400) を用いた。図-4.1に本実験で使用した実験水路の概略図を示す。 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、座標系の原点 O は群落上流端 ($x = 0$)、水路底面 ($y = 0$) および右岸側水路壁 ($z = 0$) とした。また、瞬間流速の各方向成分を \tilde{u} , \tilde{v} および \tilde{w} とし、それぞれ時間平均成分 (U , V および W) と乱れ変動成分 (u , v および w) に分解され

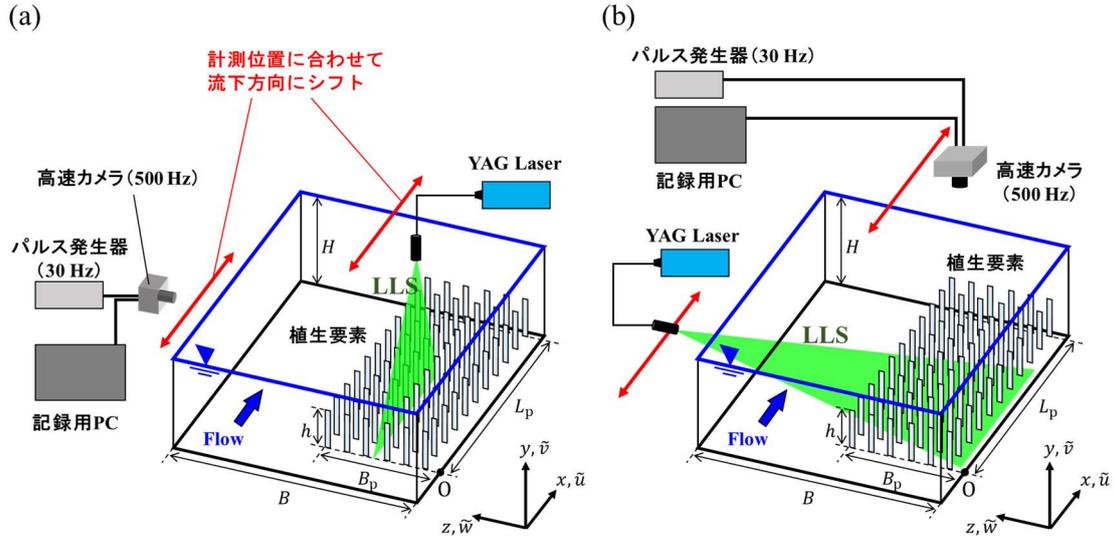


図-4.1 PIV 流速計測システム (a)鉛直面 PIV, (b)水平面 PIV)

る ($\tilde{u} = U + u$, $\tilde{v} = V + v$ および $\tilde{w} = W + w$).

本研究では単断面河川の河岸に低木や草本類の群落が存在する流れ場を想定し、植生群落モデルとして右岸側の水路床の上に剛体植生要素を正方格子状に配置した。なお、実際の河道では植生の柔軟性や樹冠の有無によって群落上部での運動量交換に変化が生じることが予想されるが、本研究では大規模渦構造や二次流の発達過程などの基礎現象の解明を目的とするため、単純な直方体状 (高さ $h = 7.0 \text{ cm}$, 幅 $b_v = 0.8 \text{ cm}$, 厚さ $t_v = 0.2 \text{ cm}$) のアクリル製植生モデル (Okamoto & Nezu (2013)²⁾) を使用した。横断方向、流下方向の植生要素の配置間隔は $B_v = L_v = 3.2 \text{ cm}$ で一定とした。 B_p および L_p はそれぞれ横断方向、流下方向の植生群落の長さであり、このうち流下方向長さは全ケースで一定 ($L_p = 1.15 \text{ m}$) とした。

表-4.1 に本研究の水理条件を示す。断面平均流速 U_m および全水深 H は全ケースで一定とし ($H/h = 2.1$), 水路下流端の堰を調整することで等流条件を実現した。 Re は流れのレイノルズ数 ($\equiv U_m H / \nu$), Fr はフルード数 ($\equiv U_m / \sqrt{gH}$) である。摩擦速度 u_* は植生群落を設置しない滑面条件について計測された流速分布 $U(y)$ と、次式で表される対数則分布との比較から算出した ($u_* = 1.6 \text{ cm/s}$)。

$$\frac{U(y)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} + A \quad (4.1)$$

ここで、 κ はカルマン定数であり、開水路流れについての文献値 $\kappa = 0.41$ を用いた¹⁸⁾。

また、植生密度 a は前章と同様に、植生領域体積 V_0 で除した植生要素の合計遮蔽面積 A とし、次式のように定義した²⁾。

$$a \equiv \frac{A}{V_0} = \frac{nhb_v}{hB_p L_p} = \frac{b_v}{B_v L_v} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (4.2)$$

4章 群落幅による剛体植生流れの乱流・二次流構造の変化

表-4.1 実験条件

	U_m	H	Re	Fr	u_*	h	H/h	a	L_p	B_p	B_p/B
	[m/s]	[m]	$\equiv U_m H / \nu$	$\equiv U_m / \sqrt{gH}$	[m/s]	[m]		[m ⁻¹]	[m]	[m]	
Case 1	0.25	0.15	37,500	0.21	0.016	0.070	2.1	7.8	1.15	0.092	0.23
Case 2										0.188	0.47
Case 3										0.252	0.63
Case 4										0.316	0.79

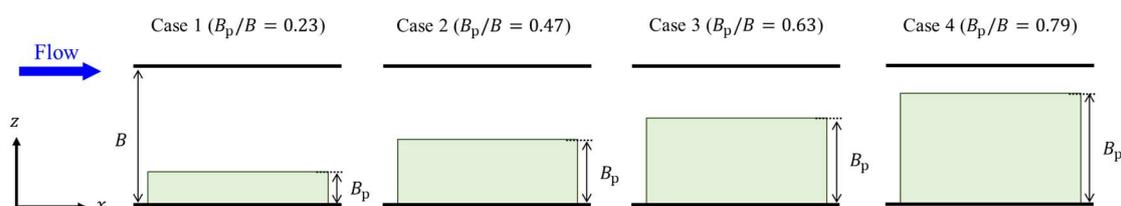


図-4.2 植生群落幅 B_p の変化

ここで、 n は植生群落内に含まれる植生要素の総本数である。本研究では植生群落幅による乱流および二次流構造の変化について考察するために、植生群落の横断方向幅 B_p を変化させた4ケースを実験条件として設定した(図-4.2)。なお、本研究で対象とした水路幅に対する植生群落幅の比の範囲($B_p/B = 0.23\text{--}0.79$)は、Nikoraら(2008)¹⁶⁾による現地計測のデータとも概ね一致している。

(2) 鉛直面 PIV 計測

本研究ではまず群落中央ラインにおける平均流・乱流統計量の縦断面分布を調べるために、鉛直面 PIV による流速計測実験を行った。図-4.1(a)に鉛直面 PIV 計測システムを示す。3.0 W の YAG レーザーを光源として水路上方から厚さ 2 mm のレーザーライトシート (LLS) を照射し、シート面内におけるトレーサー粒子の画像を水路側方に設置した高速カメラ (Ditect 製 HAS-EF) で撮影した。トレーサーには粒径 80 μm 、比重 1.02 のポリスチレン粒子を用いた。カメラにパルス発生器を接続して 30 Hz の外部トリガーを与え、500 Hz のフレームレートで連続画像のペアを 60 秒間計測した。撮影領域サイズは 1280 ピクセル (x 方向) \times 1024 ピクセル (y 方向) であり、実スケールでは約 20 cm \times 15 cm の領域に対応する。

本計測では流下方向および鉛直方向の2成分流速データ(\tilde{u}, \tilde{v})の縦断面(xy -平面)分布を計測した。図-4.1(a)に示すように、LLSの横断方向照射位置は植生群落の中心ライン($z/B_p = 0.5$)とした。また、植生群落の上流の滑面領域から群落背後の後流域まで($-2H \leq x \leq 12H$)の縦断面内流速分布を調べるために、カメラおよび LLS 照射位置を 20 cm ずつ流下方向にシフトさせながら繰り返し計測を行った。

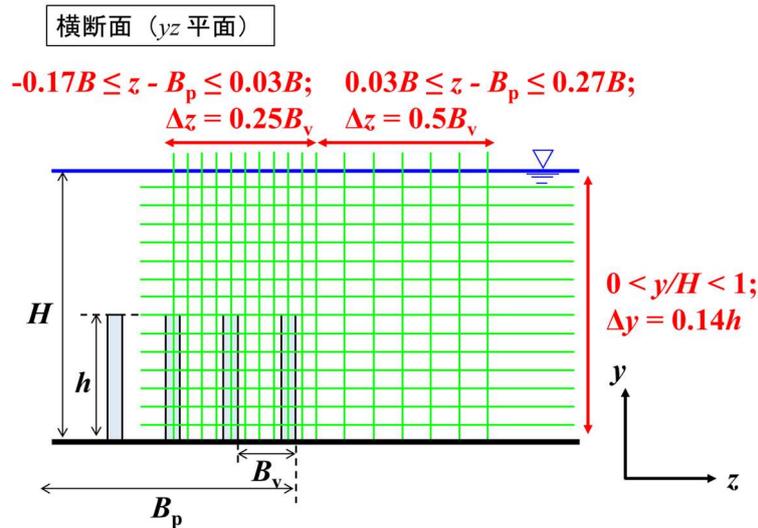


図-4.3 二次流計測における LLS 照射位置

(3) 水平面 PIV 計測

浮遊砂の輸送および堆積状況に直接的に影響を及ぼすと考えられる水路床近傍における平均流・乱流構造を調べるために、鉛直面 PIV に続いて水平面 PIV による流速計測実験を行った。図-4.1(b)に水平面 PIV 計測システムを示す。使用したトレーサー粒子、カメラのフレームレートおよびペア画像のサンプリングレートは鉛直面 PIV 計測と同様とした。水路側方から鉛直面 PIV と同様の LLS を照射し、トレーサー粒子の画像を水路上方に設置した高速カメラでデジタル撮影した。撮影領域のサイズは 1024 ピクセル (x 方向) \times 1280 ピクセル (z 方向) であり、実スケールでは約 20 cm \times 25 cm の領域に対応する。

本計測では流下方向および横断方向の 2 成分流速データ(\tilde{u}, \tilde{w})の水平面 (xz -平面) 分布を計測した。図-4.1(a)に示すように、LLS の鉛直方向照射位置は水路床近傍高さ ($y/h = 0.14$) とした。鉛直面 PIV と同様に、カメラおよび LLS 照射位置を群落上流側から後流域まで ($-2H \leq x \leq 12H$) 20 cm ずつ流下方向にシフトさせながら繰り返し計測を行った。また、各流下方向位置につき右岸側と左岸側の計 2 回計測を行うことで、全水路幅 ($0 \leq z \leq B$) の流速分布の計測を行った。

(4) PIV による二次流計測

一般に、PIV 流速計測で LLS の照射断面の正面にカメラを設置する必要があるため、横断面 (yz -平面) 内における二次流分布(V, W)を直接計測することは困難である。そこで、本研究では流れの発達する群落下流端付近 ($x = 7.2H$) の横断面内における二次流構造を計測するために、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。

図-4.3 に二次流計測における LLS の照射位置の概要図を示す。鉛直面 PIV の計測断面間隔は、植生域内部・近傍 ($-0.17B \leq z - B_p \leq 0.03B$) および非植生域 ($0.03B \leq z - B_p \leq 0.27B$)

4章 群落幅による剛体植生流れの乱流・二次流構造の変化

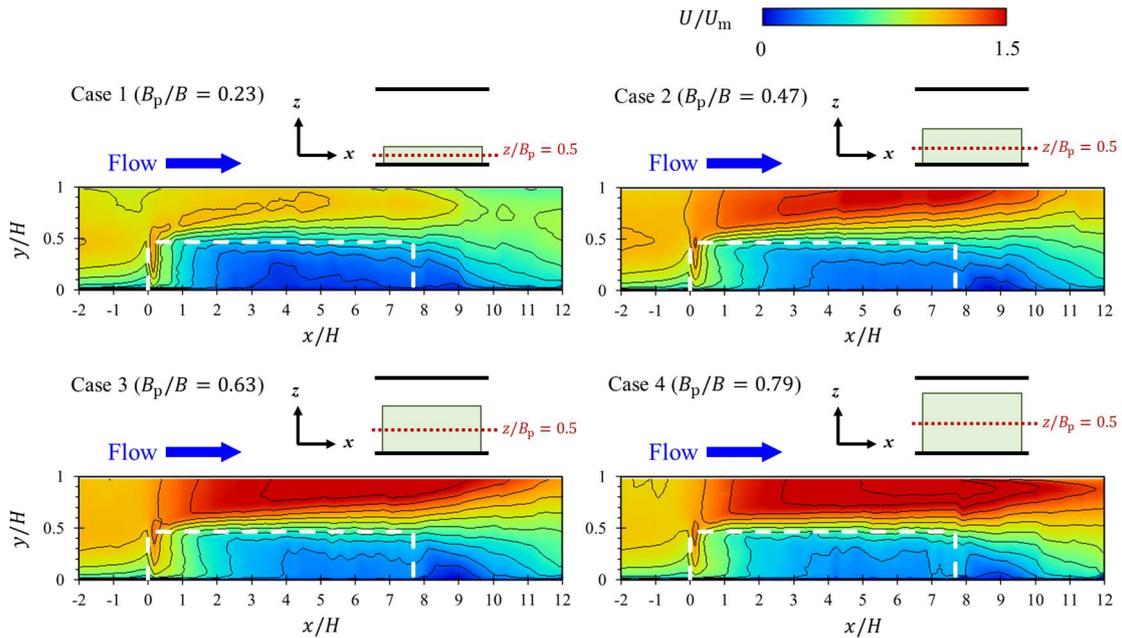


図-4.4 群落中央ライン ($z/B_p = 0.5$) における時間平均主流速 U の縦断面コンター図
(白破線は植生群落を示す)

においてそれぞれ $\Delta z = 0.25B_v$ および $\Delta z = 0.5B_v$ とした。また、水平面 PIV では計測断面間隔を 1 cm ($\Delta y = 0.14h$) とし、河床近傍 ($y = 1\text{ cm}$, $y/h = 0.14$) から水面近傍 ($y = 14\text{ cm}$, $y/h = 2.0$) までの全水深に及ぶ範囲を対象とした。鉛直面 PIV による縦断面内流速分布 (U, V) の計測結果と水平面 PIV による水平面内流速分布 (U, W) の計測結果を組み合わせることで、横断面内 ($x = 7.2H$) における二次流分布 (V, W) を明らかにした。

4.3 植生群落幅による縦断面内流速分布の変化

(1) 平均流構造

本節では植生群落中心ライン ($z = 0.5B_p$) における鉛直面 PIV の計測結果から、群落近傍における平均流・乱流の縦断面内構造について考察する。図-4.4 に全 4 ケース (Case 1-4) の時間平均主流速 U の縦断面コンターを示す。植生域 ($0 \leq x/H \leq 7.7$) では、植生抗力の影響によって植生群落の上部 ($y > h$) で主流速が増加し ($\partial U/\partial x > 0$)、群落内部 ($0 < y < h$) で主流速が減少する ($\partial U/\partial x < 0$)。その結果、植生群落内外の流速差が流下方向に増大し、植生先端付近において鉛直せん断領域 ($\partial U/\partial y$) が形成されている。同様の傾向は前章で考察した水路中央に遍在する水没植生群落流れにおいても観察されており、水没植生群落流れにおける典型的な流れの遷移過程を示していると考えられる。

植生群落幅が流れの遷移過程に与える影響を検討するために、図-4.5 に全 4 ケースの植

4.3 植生群落幅による縦断面内流速分布の変化

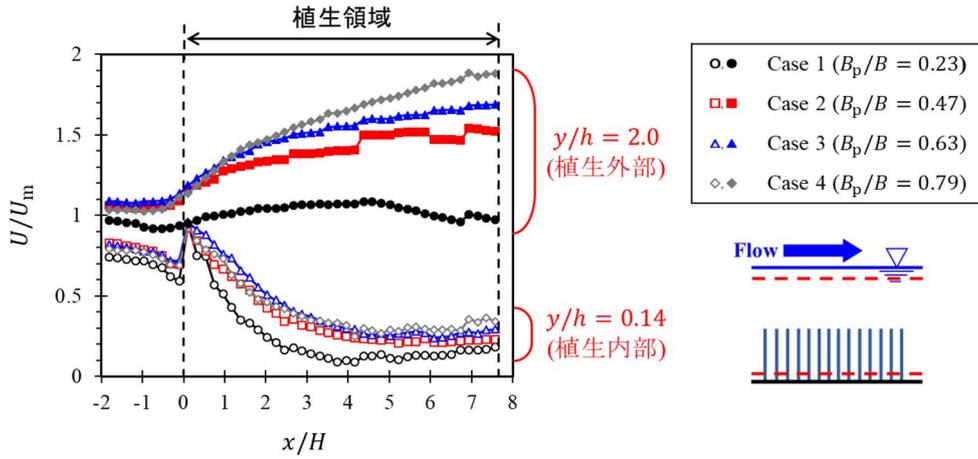


図-4.5 代表高さ ($y/h = 0.14, 2.0$) における時間平均主流速 U の流下方向変化

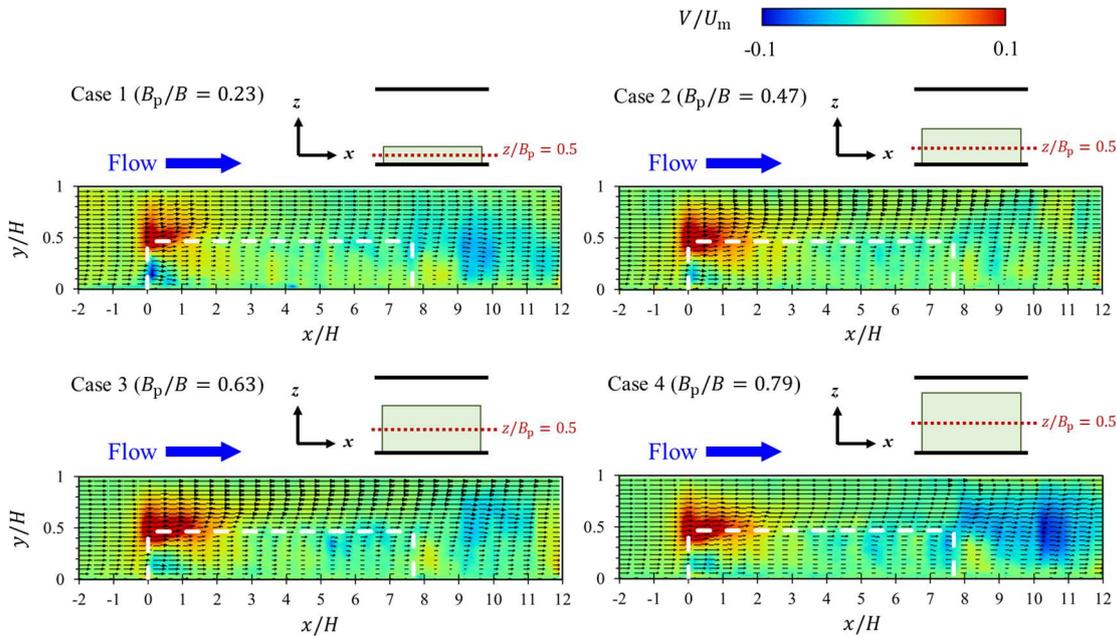


図-4.6 時間平均鉛直流速 V の縦断面コンター図 ($z/B_p = 0.5$)

生外部 ($y/h = 2.0$, 水面近傍) および内部 ($y/h = 0.14$, 河床近傍) の代表高さにおける時間平均主流速の流下方向変化 $U(x)$ を示す。植生外部 ($y/h = 2.0$) の主流速については、植生群落幅が大きいケースほど増加する傾向が確認できる。これは群落幅が大きいケースほど植生要素群の遮蔽面積が増加し、植生領域外部 ($y > h$) により多くの流体が押し出されるためと考えられる。また、植生群落内部 ($y/h = 0.14$) の流速は群落幅の小さいケースほど小さくなる傾向が確認できる。これは群落幅が小さいほど計測ライン ($z/B_p = 0.5$) が水路右岸側の側壁 ($z = 0$) に近く、側壁の影響が大きくなるためと考えられる。一方で、このような群落幅の影響は群落内部の流速よりも群落外部の流速においてより顕著であり、その結果、植生群落幅が大きいケースほど群落内外の流速差および植生高さ付近における

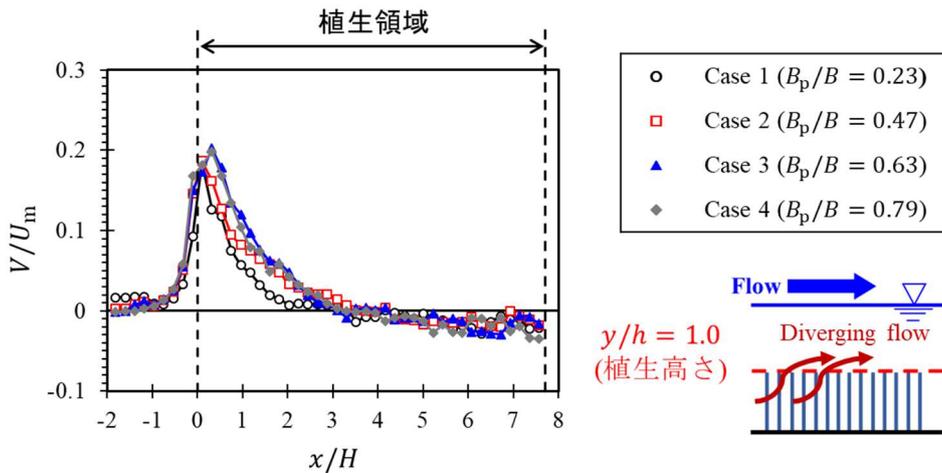


図-4.7 植生高さ ($y/h = 1.0$) における時間平均鉛直流速 V の流下方向変化

主流速の鉛直方向勾配 ($\partial U/\partial y$) が大きい。

図-4.6 に群落中央ライン ($z/B_p = 0.5$) における時間平均鉛直方向流速 V の縦断面コンター図を示す。群落上流端付近 ($x/H < 3$) において顕著な上昇流 ($V > 0$) が発生している。この上昇流領域は群落内部において主流速が急激に減少する領域と概ね一致しており、その下流側で主流速の流下方向変化が緩やかになっている。これより、群落上流端の上昇流領域は滑面から群落内部にかけての遷移領域である Diverging flow region であり、鉛直方向の Diverging flow が発生していると考えられる²⁾。

図-4.7 に全 4 ケースについて植生先端高さ ($y/h = 1.0$) における時間平均鉛直流速の流下方向変化 $V(x)$ を示す。ケース間の比較から、Diverging flow region ($V > 0$) の範囲は植生群落幅による目立った変化は見られない ($-1 \leq x/H \leq 2$)。一方、群落幅が大きいケースほど群落上流端近傍における正の鉛直流速 ($V > 0$) のピーク値が増大する傾向が確認できる。これは植生領域の体積 ($V_0 = hB_pL_p$) が大きいケースほどより多くの流体が植生上部に押し出されるためと考えられ、図-4.5 で示した植生上部の主流速が増加する傾向とも一致する。

(2) 鉛直レイノルズ応力分布

図-4.4 で示した通り、植生先端近傍では鉛直せん断領域が形成されており、乱れの生成とそれに伴う運動量輸送が活発に行われると考えられる。図-4.8 に全 4 ケースの鉛直レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の縦断面コンターを示す ($z/B_p = 0.5$)。ここで、レイノルズ応力の値は断面平均流速の二乗 U_m^2 で無次元化している。植生高さ付近で鉛直レイノルズ応力が極大値をとっており、群落内外の流速差に伴って形成されるせん断領域において鉛直渦 ($-\overline{uv}$) が発達する様子が確認できる。特に、Diverging flow 領域よりも下流側の領域 ($x/H > 3$) でも鉛直レイノルズ応力が増加し続けており、平均流の遷移から遅れて乱れの発達が始まっている。

図-4.9 に各流下方向位置における鉛直レイノルズ応力のピーク値 $-\overline{uv}_{\text{peak}}(x)$ を示す。植生

4.3 植生群落幅による縦断面内流速分布の変化

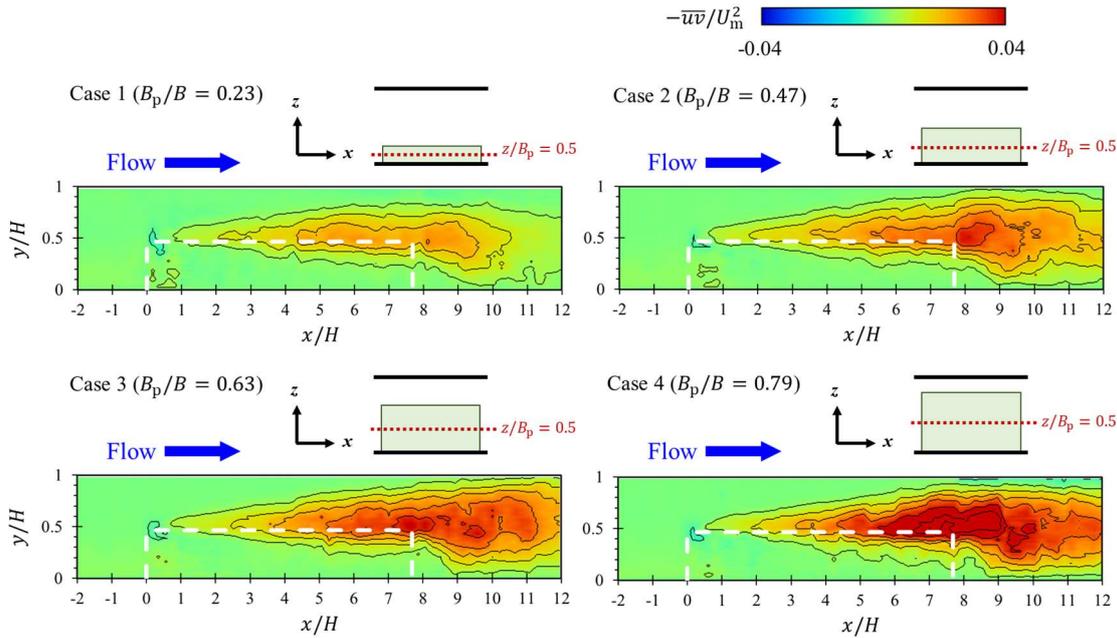


図-4.8 鉛直レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の縦断面コンター図 ($z/B_p = 0.5$)

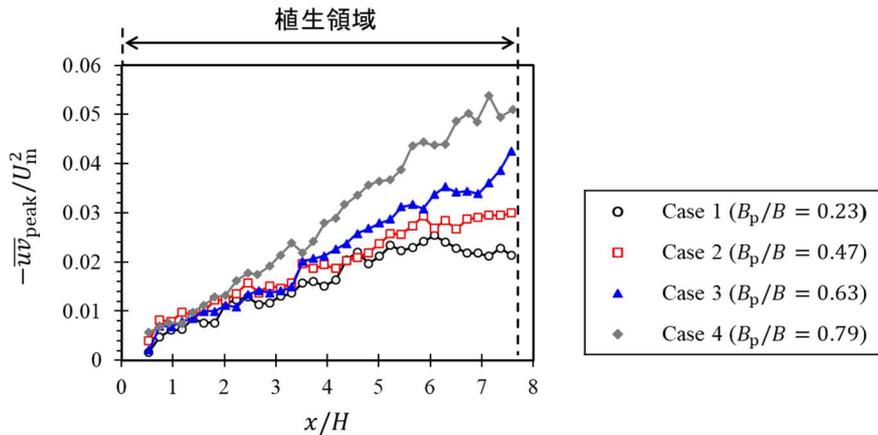


図-4.9 ピーク鉛直レイノルズ応力 $-\overline{uv}_{\text{peak}}$ の流下方向分布 ($0 \leq x/H \leq 7.7$)

群落が最も小さいケース (Case 1, $B_p/B = 0.23$) を除いて群落上流端から下流端にかけてレイノルズ応力が増加し続けており、植生群落上の鉛直混合層において乱れの発達が進んでいる。また、ケース間の比較から、群落幅の広いケースほどレイノルズ応力の値が大きくなっており、乱流混合による鉛直方向の運動量輸送が活発になる傾向が確認できる。これは、図-4.5 で考察したように植生群落幅が大きいケースほど植生群落内部と外部の流速差が増大することで、鉛直混合層における流れの不安定性が増大し、乱れの生成が活発になるためと考えられる。

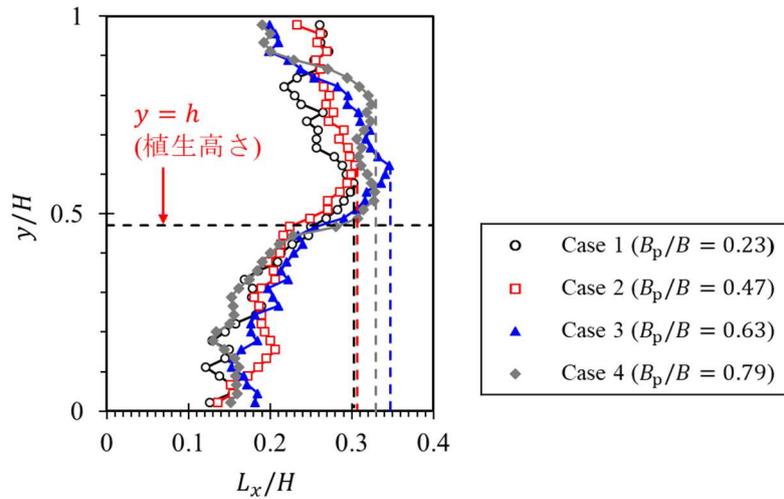


図-4.10 流下方向積分長さスケール L_x の鉛直方向分布 ($x/H = 7.0$)

(3) 鉛直渦の流下方向長さスケール

平均流の遷移が完了している群落下流端付近では、植生先端近傍の鉛直混合層において大規模な乱流構造（鉛直渦）が発達することが明らかになった。このような乱流構造の空間スケールを定量的に評価するために、次式で定義される積分長さスケール (Finnigan (2000)¹⁹⁾, Okamoto & Nezu (2013)²⁾) を算出した。

$$L_x(x, y, z) \equiv \int_0^{\infty} \frac{u(x, y, z, t)u(x+r, y, z, t)}{u'(x, y, z)u'(x+r, y, z)} dr \quad (4.3)$$

図-4.10 に群落下流端近傍 ($x/H = 7.0$) における流下方向積分長さスケールの鉛直方向分布 $L_x(y)$ を示す。全体的な傾向として、長さスケールの値は植生内部 ($y < h$) よりも外部 ($y > h$) の方が大きくなっている。植生先端付近の鉛直混合層および群落上部では鉛直混合層で発達する大規模な乱流構造が発達しているのに対し、群落内部ではこのような渦構造が浸透せず、各植生要素スケールの小規模な乱れが発達していると考えられる。また、 $B_p/B = 0.63, 0.79$ のケース (Case 3 および 4) で植生上部 ($y > h$) の長さスケールが最大となっており、群落幅の大きいケースほど鉛直渦が顕著に発達することを示唆している。

4.4 植生群落幅による水平面内流速分布の変化

(1) 平均流構造

本節では水平面 PIV 計測により得られた水路床近傍高さ ($y/h = 0.14$) における流速分布のデータから、群落近傍の流れの遷移過程および水平渦構造について考察する。図-4.11 に全 4 ケースについて時間平均主流速 U の水平面コンター図を示す。群落中央ラインの縦断面

4.4 植生群落幅による水平面内流速分布の変化

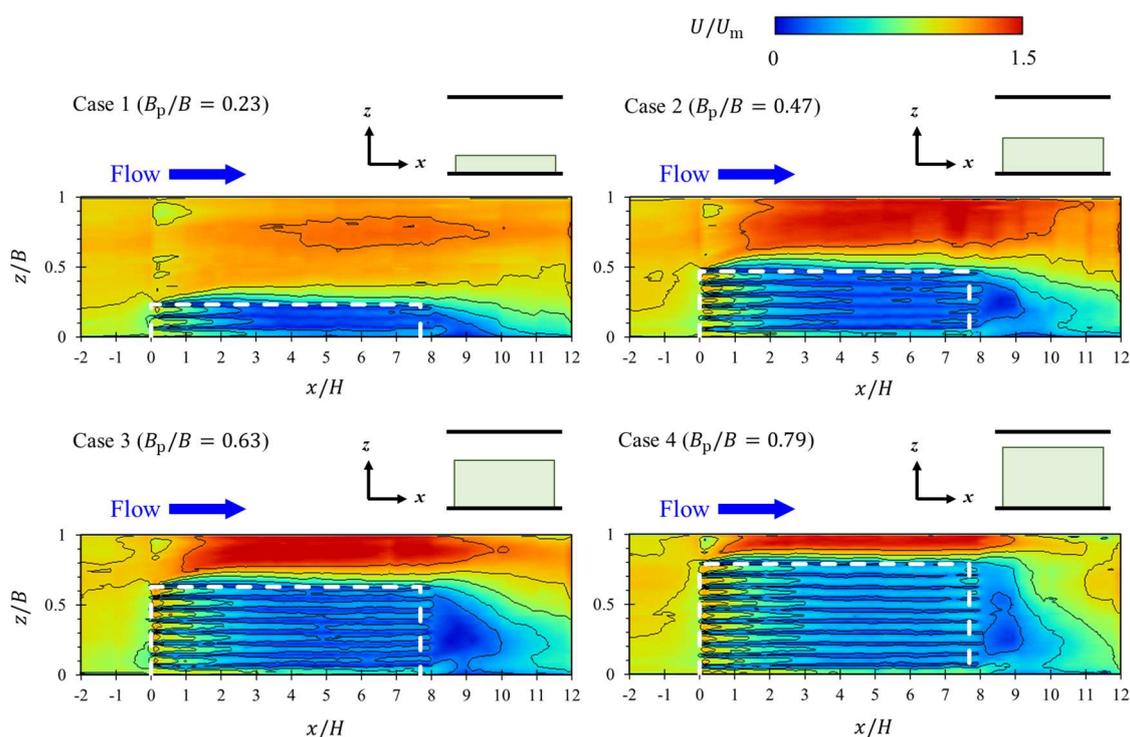


図-4.11 水路床近傍 ($y/h = 0.14$) における時間平均主流速 U の水平面コンター図
(白破線は植生群落を示す)

分布 (図-4.4) と同様に、主流速が植生群落内部 ($z < B_p$) では流下方向に減少し ($\partial U/\partial x < 0$)、逆に非植生域 ($z > B_p$) では増加している ($\partial U/\partial x > 0$)。また、植生群落内部 ($0 \leq x \leq L_p$, $z < B_p$) では流速が比較的小さい領域と大きい領域が横断方向に交互に並んでおり、縞状の流速分布となっている。これらはそれぞれ植生要素の背後の領域 (Wake region) と植生要素が存在しない領域 (Non-wake region) に対応しており²⁾、各植生要素の背後で局所的な横断方向せん断領域が形成されていることを示している。

図-4.12 に時間平均横断方向流速 W の水平面コンター図を示す ($y/h = 0.14$)。植生群落上流端の群落外縁近傍 ($1 \leq x/H \leq 2$, $z \approx B_p$) では、植生群落内部から非植生域に押し出される流れ ($W > 0$) が見られ、横断方向の Diverging flow が形成されている。一方、群落下流側 ($3 < x/H < 8$) では、逆に群落境界近傍で植生群落内部へ入り込む流れ ($W < 0$) が生じており、それと同時に、その左岸側で正の横断方向流速 ($W > 0$) の領域が分布している。図-4.5 より、この領域では時間平均主流速の遷移 ($\partial U/\partial x < 0$) が概ね完了していることから、正負の横断方向流速の対は群落外縁部から非植生域にかけて二次流が発達することを示唆しているものと考えられる。

このような二次流構造に対する群落幅の影響を調べるために、図-4.13 に各ケースの非植生域 ($B_p < z < B$) における正の時間平均横断流速ピーク値の流下方向変化 $W_{\text{peak}}(x)$ を示す。水平面コンターでも考察した通り、群落上流側 ($0 < x/H < 3$) では横断方向の Diverging flow、群落下流側 ($3 < x/H < 8$) では二次流の発達によって正の横断方向流速が発達している。

4章 群落幅による剛体植生流れの乱流・二次流構造の変化

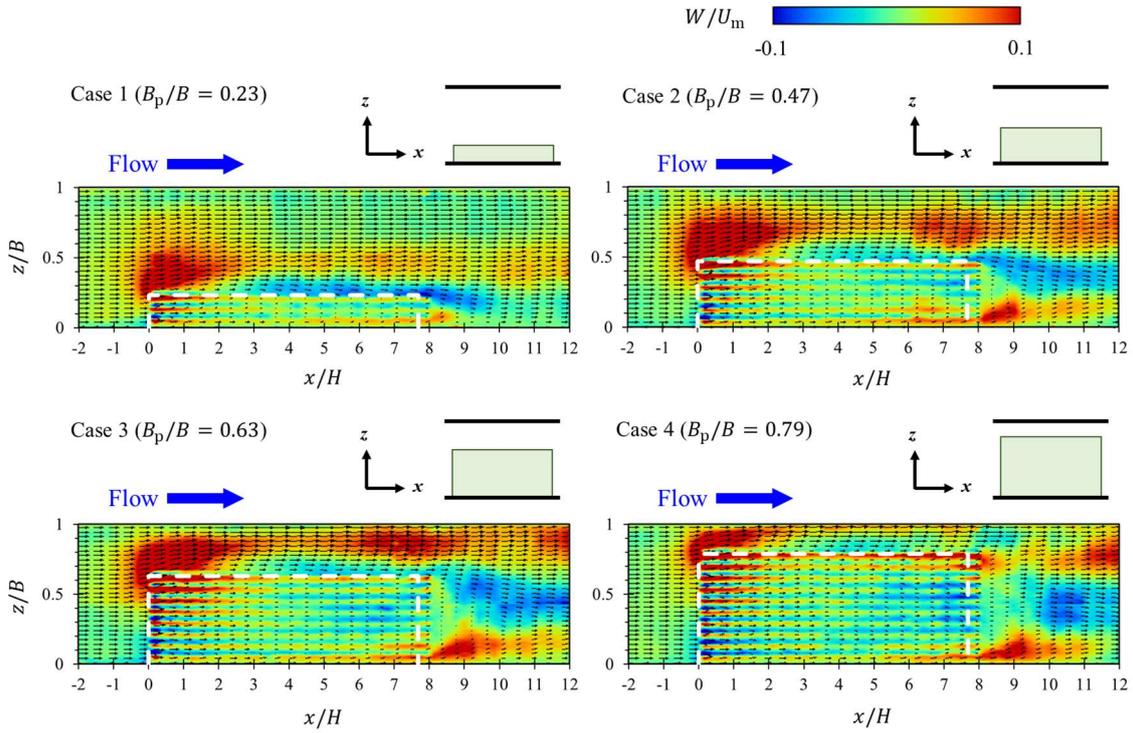


図-4.12 時間平均横断方向流速 W の水平面コンター図 ($y/h = 0.14$)

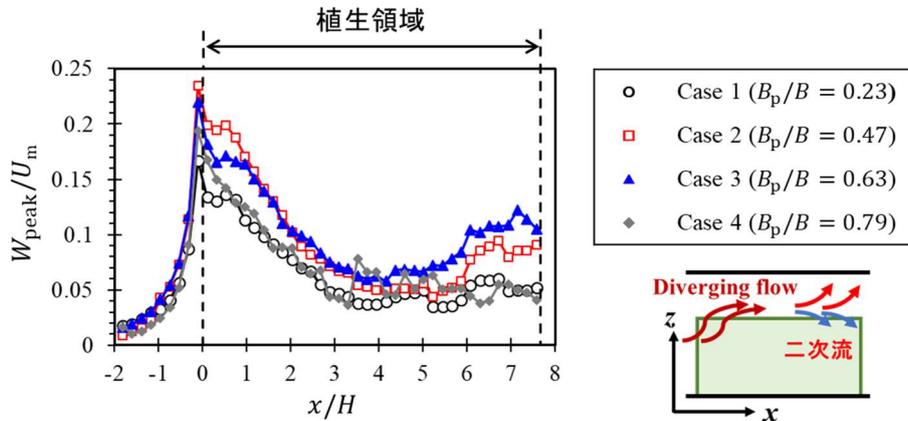


図-4.13 正の横断方向流速ピーク値 W_{peak} の流下方向分布 ($y/h = 0.14$)

このうち、下流側の W_{peak} についてはCase3 ($B_p/B = 0.63$)で値が最大となっており、このことから植生群落幅が中程度のケースにおいて群落外縁近傍における二次流の発達が最も顕著となることが示唆される。

(2) 水平レイノルズ応力分布

図-4.14 に水平レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の水平面コンターを示す ($y/h = 0.14$)。なお、鉛直レ

4.4 植生群落幅による水平面内流速分布の変化

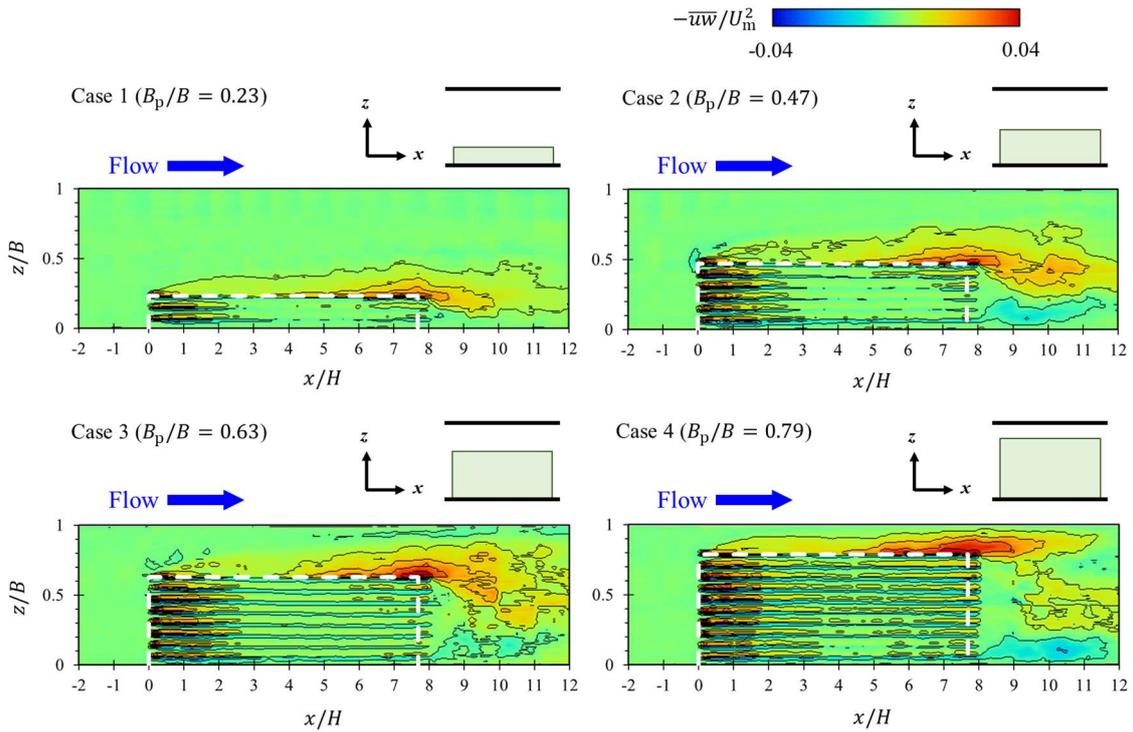


図-4.14 水平レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の水平面コンター図 ($y/h = 0.14$)

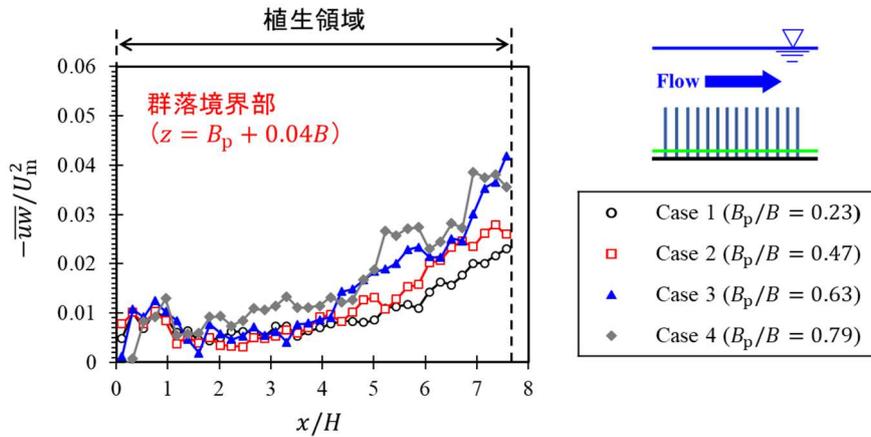


図-4.15 群落外縁 ($y/h = 0.14$) の水平レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向分布

レイノルズ応力 (図-4.8) と同様に、断面平均流速の二乗 U_m^2 で無次元化した値を示している。植生群落内部 ($0 < x/H < 7.7$) では植生要素の列ごとに正負のピークがみられるが、これは個々の植生要素の背後で発達する小スケールの剥離渦によるものであると考えられる。このような正負パターンは流速の大きい群落上流 ($0 < x/H < 3$) で最も顕著で、主流速が低減されるにつれて減衰する。主流速が十分に低減された群落下流側 ($x/H > 4$) では植生域と非植生域の境界部付近 ($z \approx B_p$) で水平レイノルズ応力がピーク値を示し、その値は流下方向に増加している。このように、植生群落外縁付近では群落内外の流速差に起因して水

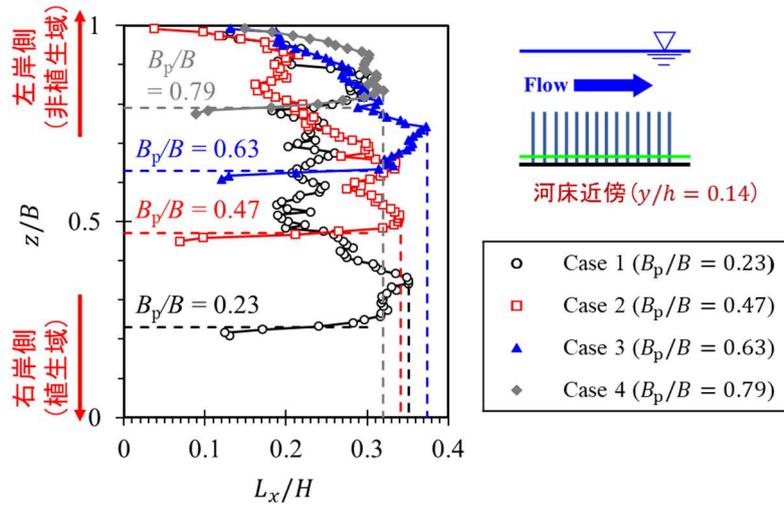


図-4.16 流下方向積分長さスケール L_x の横断方向分布 ($x/H = 7.0$, $y/h = 0.14$)

平混合層が形成され、その結果、大規模水平渦が発達するものと考えられる。

植生群落近傍における大規模水平渦の発達過程に群落幅が及ぼす影響について考察するために、図-4.15 に群落外縁近傍 ($z = B_p + 0.04B$) における水平レイノルズ応力の流下方向変化 $-\overline{uw}(x)$ を示す。鉛直渦 ($-\overline{uv}$) と同様に、平均流の遷移から遅れて乱れが発達している。一方で、水平レイノルズ応力の値は $x/H > 4$ の領域で急速に増加し始めているが、図-4.9 との比較から、水平混合層の発達は鉛直混合層よりもさらに遅れて進んでいる。鉛直レイノルズ応力 ($-\overline{uv}$) と同様に、水平レイノルズ応力の値 ($-\overline{uw}$) は植生群落幅 B_p が大きくなるほど増加するが、最も幅の広い2ケース ($B_p/B = 0.63, 0.79$) の差は鉛直レイノルズ応力の場合ほどは大きくなく、この程度の群落幅のケースにおいて大規模水平渦による運動量輸送が最も活発になると考えられる。

(3) 水平渦の流下方向長さスケール

図-4.16 に群落下流端付近の水路床近傍 ($x/H = 7.0$, $y/h = 0.14$) における流下方向積分長さスケールの横断方向分布 $L_x(z)$ を示す。ここでは非植生域で発達する大規模水平渦の影響に注目するため、乱流構造の空間スケールが比較的大きいと考えられる非植生域 ($z \geq B_p$) の値のみについて示している。 $B_p/B \leq 0.63$ の3ケース (Case 1-3) では群落幅が広いケースほど長さスケールも大きく、また図-4.10 で示した植生群落上 ($y > h$) の鉛直混合層の長さスケールよりも全体的にやや大きい。一方で、 $B_p/B = 0.79$ のケースでは水平レイノルズ応力ピーク値が最大となるにもかかわらず、長さスケールは最小である。これは群落幅が大きくなることで非植生域の断面積が減少し、対岸側側壁の影響によって渦構造の発達が抑制されるためであると考えられる。

図-4.17 に植生群落近傍で発達する乱流構造の模式図を示す。植生高さ付近 ($y \approx h$) では

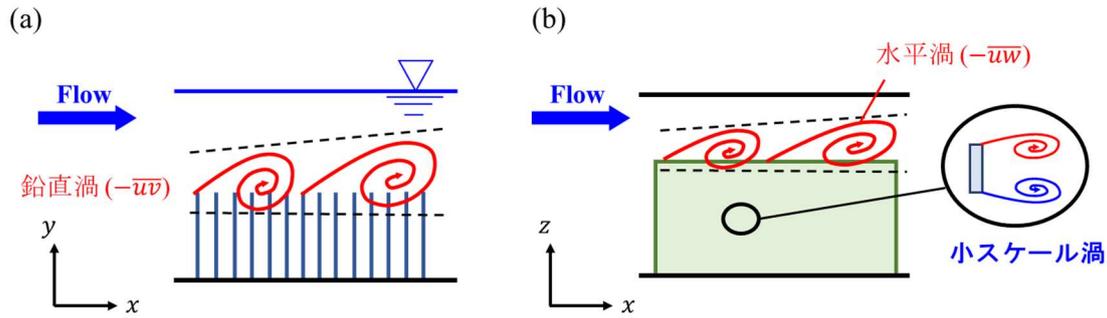


図-4.17 植生群落近傍の乱流構造の模式図

鉛直方向の流速シア ($\partial U/\partial y$) に起因する大規模な鉛直渦 ($-\overline{uv}$) が発達する一方で、植生群落外縁から非植生域 ($z \geq B_p$) においては横断方向の流速シア ($\partial U/\partial z$) に起因する大規模な水平渦 ($-\overline{uw}$) が発達する。また、群落内部 ($z < B_p$) では各植生素の近傍で流れの剥離が生じ、その結果、特に群落上流側において植生素スケールの小規模な乱れが生成される。このように、植生群落内部および近傍では三次元的な乱流構造が発達しており、群落内外の運動量輸送過程を特徴付けている。

4.5 片側植生群落近傍の二次流構造

(1) 時間平均主流速・二次流ベクトルの横断面分布

前節までの考察より、水没植生群落近傍では鉛直渦 ($-\overline{uv}$) と水平渦 ($-\overline{uw}$) の両方が発達し、質量・運動量輸送過程において重要な役割を担うことが示された。本節では二次流が最も顕著に発達すると考えられる Case 3 ($B_p/B = 0.63$) を対象に (図-4.13)、植生群落近傍における二次流構造および鉛直渦・水平渦の卓越領域について考察する。

図-4.18 に群落下流端近傍 ($x/H = 7.2$) における(a)時間平均主流速 U および(b)二次流ベクトルの絶対値 $\sqrt{V^2 + W^2}$ の横断面コンターを示す。ここで、図-4.18(b)中のベクトル図 (黒矢印) は二次流ベクトル分布 (V, W) を示している。ベクトル図より、群落外縁から非植生域にかけての領域 ($0 < y/H < 0.7, z/B > 0.5$) で反時計回りの渦状の二次流が形成されている。特に、植生先端付近 ($0.2 < y/H < 0.7, 0.5 < z/B < 0.6$) では群落上部および非植生域から内部へ流体が流入し ($V < 0, W < 0$)、その下方で横断方向に押し出される ($V < 0, W > 0$) 様子が確認できる。

非植生域に押し出された流れの一部は、底層近傍 ($y/H \approx 0.1, 0.6 < z/B < 0.7$) で逆に群落内部へ再流入している ($W < 0$)。その結果、左岸側から群落外縁近傍の河床近傍へ高運動量流体が輸送され、主流速の鉛直方向分布に逆勾配領域 ($\partial U/\partial y < 0$) が存在している。このような群落外縁の水路床近傍における流速の加速は Yan ら(2022)¹⁴⁾ の結果とも一致しており、二次流による運動量輸送への寄与を示している。

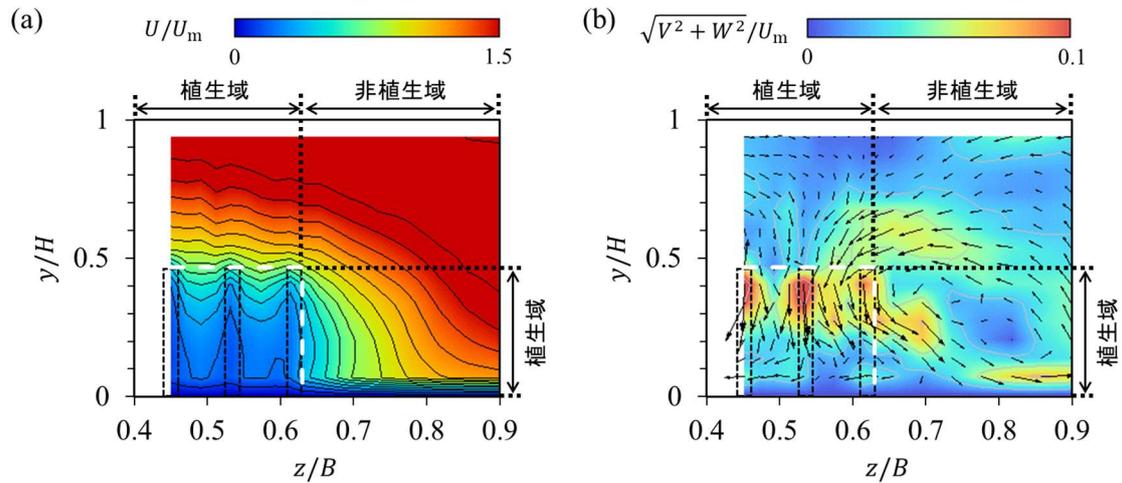


図-4.18 平均流速場の横断面分布 (Case 3, $x/H = 7.2$, (a)主流速 U および(b)二次流ベクトルの絶対値 $\sqrt{V^2 + W^2}$. 黒矢印は二次流ベクトル (V, W))

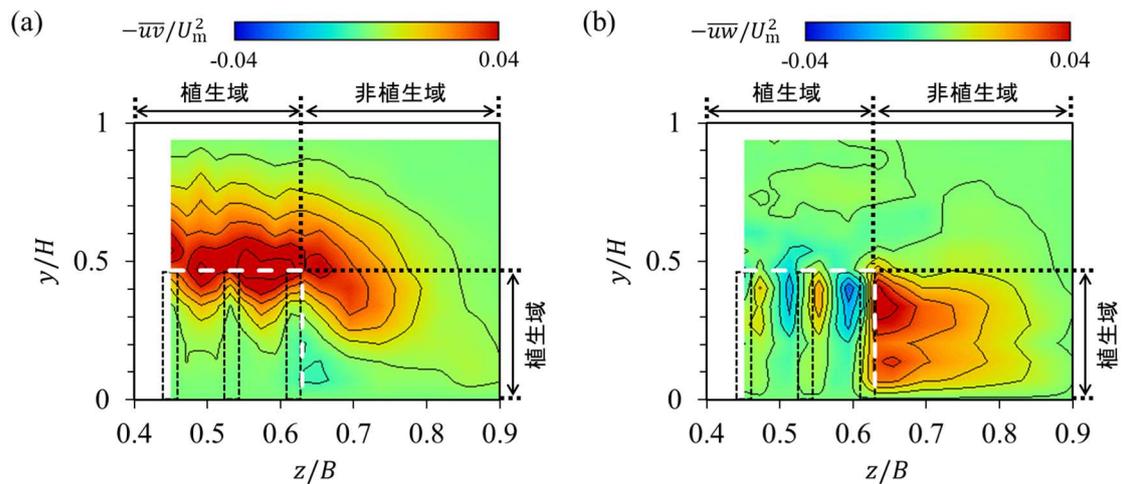


図-4.19 乱流統計量の横断面分布 (Case 3, $x/H = 7.2$, (a)鉛直レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ および(b)水平レイノルズ応力 $-\overline{uw}$)

(2) 鉛直・水平レイノルズ応力の横断面分布

次に、二次流計測によって得られた横断面内流速分布のデータから、群落近傍および内部における乱流の三次元的構造および二次流の生成メカニズムについて考察する。図-4.19(a)に鉛直レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の横断面コンター図 ($x/H = 7.2$) を示す。植生域 ($z \leq B_p$) では植生先端付近 ($y \approx h$) でレイノルズ応力がピーク値をとっており、群落内部から水面近傍にまで鉛直混合層 ($-\overline{uv}$) が発達している。このように、植生先端付近では乱流混合による鉛直方向の運動量輸送が活発であり、群落外部 ($y > h$) から内部 ($y < h$) に向かって高運動量流体が輸送される。

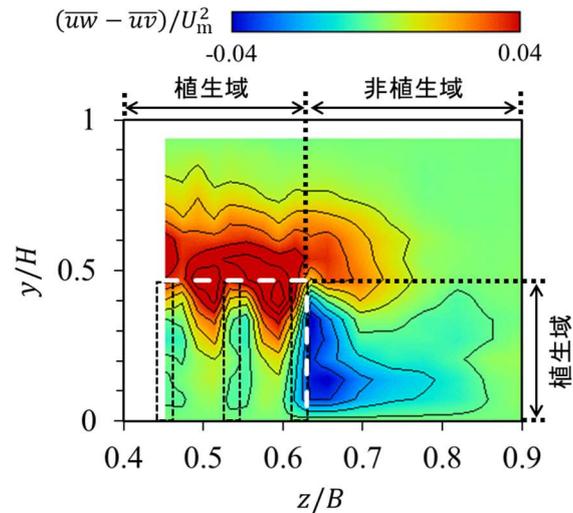


図-4.20 横断面内における鉛直渦・水平渦の卓越領域 (Case 3, $x/H = 7.2$)

図-4.19(b)に水平レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の横断面コンター図($x/H = 7.2$)を示す。植生高さより下方($y < h$, すなわち $y/H < 0.47$)の非植生域($z > B_p$)では全体的に水平レイノルズ応力の値が正であり、いずれの高さにおいても水平混合層の発達を確認できる。Nezu & Onitsuka (2001)¹²⁾は片側植生流れについて本研究結果と類似した反時計回りの渦状の二次流構造の発達を報告しており、植生高さ付近から水面近傍($y \geq h$)において発達する水平渦($-\overline{uw}$)が植生高さ付近における横断方向流れ($W < 0$)を引き起こすとしている。一方で、本研究の条件下では植生高さより上部の領域($y > h$)において水平レイノルズ応力の値はほぼゼロであり、水平渦の発達は確認されない。したがって、植生群落近傍の二次流構造については、水平渦以外の影響に基づく生成メカニズムが存在することが示唆される。

(3) 片側植生群落近傍の乱流・二次流構造

栈粗度を有する開水路流れや複断面流れの隅角部近傍では、乱れの非等方性に起因して二次流が発達することが指摘されている^{10,11)}。植生群落近傍における鉛直方向・横断方向の乱れの偏りについて考察するために、Yanら(2022, 2023)^{14,20)}は鉛直レイノルズ応力と水平レイノルズ応力の差 $\overline{uw} - \overline{uv}$ から鉛直渦および水平渦の卓越領域を評価した。

図-4.20に群落下流端近傍($x/H = 7.2$)における鉛直・水平レイノルズ応力差 $\overline{uw} - \overline{uv}$ の横断面コンター図を示す。鉛直渦の卓越領域($-\overline{uv} > -\overline{uw}$, すなわち $\overline{uw} - \overline{uv} > 0$)は植生群落内部($y \approx 0.5h$)に浸透しており、横断方向には植生域内部だけではなく非植生域にもはりだしている($z < 0.75B$)。また、図-4.18(b)に示すように、植生先端付近において下降流領域が分布しているが、これは鉛直渦の卓越領域と概ね一致しており、図-4.21に示すように鉛直渦による群落内部への運動量輸送が下降流および二次流の形成を引き起こすことが示唆される。したがって、図-4.18(b)に示されるような、反時計回りおよび時計回りの二次流の対が形成されるのは鉛直混合層が発達する群落下流側に限られると考えられ、図-

4章 群落幅による剛体植生流れの乱流・二次流構造の変化

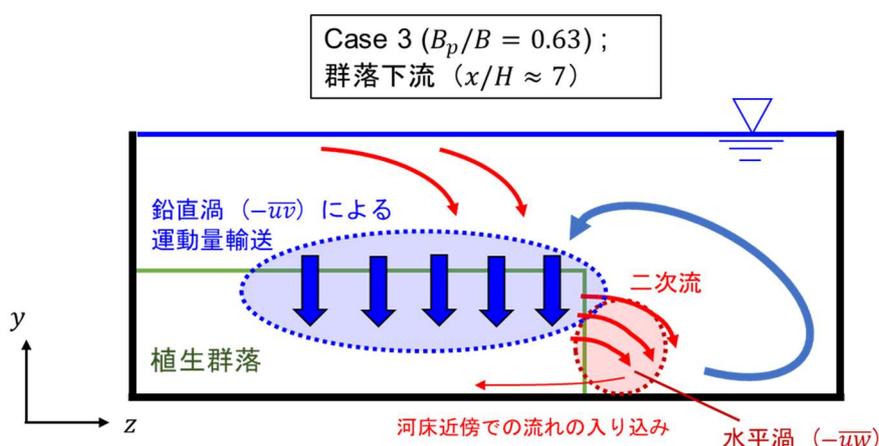


図-4.21 群落下流側における乱流・二次流構造の模式図

4.12 における負の横断流速領域 ($W < 0$, $x/H > 3$) とも概ね一致する。

図-4.13 より、群落幅が中程度 (Case 3, $B_p/B = 0.63$) のときに二次流が最大となることが示唆されたが、これは鉛直渦の発達が比較的顕著であり (図-4.9), かつ対岸の影響が比較的小さく、横断方向への流れの流出が抑制されないためと考えられる。一方、河床近傍において植生域に入り込む流れ ($W < 0$) は群落幅の狭いケース (Case 1, $B_p/B = 0.23$) で最も顕著に現れている (図-4.12)。このような群落幅による鉛直・水平渦の卓越領域や二次流の形成過程の変化、および乱流構造の発達に伴う二次流構造の流下方向変化については今後もさらなる検討が必要である。

4.6 結語

本研究では全水没状態の片側植生流れを対象に鉛直面 PIV および水平面 PIV を実施し、鉛直渦・水平渦による運動量輸送過程について考察した。また植生群落幅を系統的に変化させ、水平渦や二次流が最も発達する植生群落幅・水路幅比を明らかにした。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 平坦河床から植生流れに遷移する群落上流 ($x/H < 3$) において鉛直方向の Diverging flow が生じ、植生先端付近の鉛直せん断領域 ($\partial U/\partial y$) において鉛直渦 ($-uw$) が発達する。ケース間の比較から、このような乱流混合による鉛直方向の運動量輸送は群落幅の広いケースほど活発になることが示された。
- 2) 鉛直渦と同様に、非植生域の大規模水平渦による横断方向の運動量輸送 ($-uw$) は群落幅の広いケースほど活発になる。一方で、極端に群落幅が広いケースでは、対岸側壁の影響を受けるため、水平混合層における乱流構造の流下方向積分長さスケールは群落幅

が中程度のケース (Case 3, $B_p/B = 0.63$) で最大となる。

- 3) 群落外縁から非植生域にかけて反時計回りの渦状の二次流が形成される。その一方で、底層近傍では逆に時計回りの二次流もみられ、植生内部へ入り込む副次的な流れが発生する。このような二次流構造は鉛直渦が発達し、かつ側壁の影響が比較的小さい $B_p/B = 0.63$ のケースで最も顕著に表れた。
- 4) 鉛直・水平レイノルズ応力の差から、横断面内における水平渦と鉛直渦の卓越領域を評価した。本研究の水理条件下では、水平渦 ($-\overline{uv}$) は非植生域の河床近傍のみで発達する。これに対し、鉛直渦 ($-\overline{wv}$) は植生域から非植生域に及ぶ広範囲において卓越しており、運動量輸送および二次流の発達過程において重要な役割を担うこと示唆された。

参考文献

- 1) 長谷川史明, 河原能久, Jahra Fatima, 山本拓也: 高水敷上の樹木群が流れの抵抗や流速分布に及ぼす影響, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 68, No. 2, I_573-I_581, 2012.
- 2) Okamoto, T., and Nezu, I.: Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow, *Environ Fluid Mech*, 13(5), pp.417–434, 2013.
- 3) Ghisalberti, M., and Nepf, H. M.: Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows, *J. Geophys. Res.*, 107, 3-1–3-11, 2002.
- 4) 横嶋哲, 河原能久: 個々のキャノピー要素への接近流速を考慮した抗力係数分布に基づく樹木群流れの LES, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 71, No. 2, I_703-I_711, 2015.
- 5) 田中貴幸, 大本照憲, 斉藤俊貴: 流下方向に植生域を有する種々の植生配置条件が開水路の乱流構造に与える影響, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No. 4, I_565-I_570, 2016.
- 6) White, B. L., and Nepf, H. M.: Shear instability and coherent structures in shallow flow adjacent to a porous layer, *J. Fluid Mech.*, 593, pp.1–32, 2007.
- 7) 岡本隆明, 藤本雄大, 青木成太, 戸田圭一, 山上路生: 樹木群落背後の乱流構造の遷移・減衰過程と Steady Wake Region に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 70, No. 4, I_685-I_690, 2014.
- 8) Zong, L., and Nepf, H.: Flow and deposition in and around a finite patch of vegetation, *Geomorphology*, 116, pp.363–372, 2010.
- 9) 赤堀良介, 春日井勇輝: 植生内の流れの構造と浮遊砂堆積状況の関連について, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2, I_753–I_760, 2014.
- 10) Nezu, I., and Nakagawa, H.: Cellular secondary currents in straight conduit, *J. Hydraul. Eng.*, 110(2), pp.173–193, 1984.
- 11) 禰津家久, 鬼束幸樹, 相良幸輝, 池谷和哉: かぶり水深の変化が複断面開水路流れの組

4章 群落幅による剛体植生流れの乱流・二次流構造の変化

織渦に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集, No.649, pp.1–15, 2000.

- 12) Nezu, I., and Onitsuka, K.: Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements, *J. Hydraul. Res.*, 39:6, pp. 629-642, 2001.
- 13) Yan, X., Wai, W. O., and Li, C.: Characteristics of flow structure of free-surface flow in a partly obstructed open channel with vegetation patch, *Environ Fluid Mech*, 16, pp.807–832, 2016.
- 14) Yan, X., Duan, H., Wai, W. O., Li, C., and Wang, X.: Spatial flow pattern, multi-dimensional vortices, and junction momentum exchange in a partially covered submerged canopy flume, *Water Resources Research*, 58, e2020WR029494, 2022.
- 15) Unigarro Villota, S., Ghisalberti, M., Philip, J., and Branson, P.: Characterizing the three-dimensional flow in partially vegetated channels, *Water Resour. Res.*, 59, e2022WR032570, 2023.
- 16) Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G., and Reid, M.: Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: Field study, *J. Hydraul. Eng.*, 134(9), pp.1326–1332, 2008.
- 17) Marjoribanks, T. I., Lague, D., Hardy, R. J., Boothroyd, R. J., Leroux, J., Mony, C., and Puijalon, S.: Flexural rigidity and shoot reconfiguration determine wake length behind saltmarsh vegetation patches, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 124, pp.2176–2196, 2019.
- 18) Nezu, I., Kadota, A., and Nakagawa, H.: Turbulent structure in unsteady depth-varying open-channel flows, *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 123(9), pp.752–763, 1997.
- 19) Finnigan, J.: Turbulence in plant canopies, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 32, pp.519–571, 2000.
- 20) Yan, X., Duan, H., Zhang, Y., and Wang X.: Momentum fluxes across multiple mixing interfaces subject to partially distributed submerged canopy flows, *Journal of Hydrology*, 622, 129742, 2023.

第5章

柔軟植生流れの乱流構造および植生揺動

5.1 概説

前章までの考察では、剛体植生群落が多在する開水路流れを対象に、植生要素の直立高さや植生群落の横断方向幅などの諸条件が乱流および二次流の構造に及ぼす影響について考察した。一方で、実河川の河道内には樹木群のような剛体植生だけではなく、低木や草本類のように流水中で変形あるいは揺動するような柔軟性を有する植生群落も存在する。そこで、剛体植生流れと柔軟植生流れにおける物質・運動量輸送過程の相違点、特に植生要素の倒伏および揺動の有無が流れの抵抗則や平均流・乱流統計量に及ぼす影響を明らかにすることが重要であり、既往研究において説明が進められてきた¹⁻⁶⁾。

植生の柔軟性による乱流構造の違いについては、詳細な数値解析や水路実験を通じた研究が広く行われてきた。Marjoribanksら(2017)⁷⁾は十分に発達した剛体植生および柔軟植生上の開水路流れをLESによって数値的に再現し、植生領域内外で発達する組織的な渦構造の時間スケールを評価した。その結果、植生要素の揺動の影響により、柔軟植生の内部において剛体植生流れでは確認されない高周波数帯の流速変動が存在することを示唆している。また、Houseagoら(2022)⁸⁾は剛体植生および柔軟植生近傍の乱流構造をPIVによって計測しており、柔軟植生流れでは植生が倒伏することで、植生上で発達する大規模な組織構造の植生領域内部への浸透が阻害される可能性を示している。

柔軟性を有する植生上の乱流場では、流下方向あるいは横断方向に連続する複数の植生要素が連動して揺動する現象がしばしば確認される。このような柔軟植生の組織的な揺動形態は“Monami”（藻波、水生植生の場合）あるいは“Honami”（穂波、陸上植生の場合）と呼ばれており、柔軟植生上の乱流場の特徴的な現象として知られている⁹⁾。Monamiの発生メカニズムとして植生上で発達する乱流の組織構造との関連が指摘されており、植生高さ近傍で発生するSweepやEjectionなどの乱流運動がそれぞれ植生要素の倒伏および起立を引き起こすものと考えられる²⁾。したがって、柔軟植生の揺動形態は植生流れの乱流構造と密接に関連しており、植生要素の変形・揺動と乱流の組織構造の相互作用を明らかにすることは植生内外の運動量輸送メカニズムを理解するうえで極めて重要である。

乱流中の植生要素の変形を直接計測することで、植生乱流の組織構造に対する柔軟植生要素の応答特性を調べた研究も存在する¹⁰⁻¹²⁾。Sinicalchi & Nikora(2013)¹³⁾は流水中の植生要素が特定の周波数領域の流速変動にのみ応答することから、植生揺動に対して支配的な

5章 柔軟植生流れの乱流構造および植生揺動

影響を及ぼす時間スケールの乱流構造が存在することを示唆している。Okamoto ら(2016)¹⁴⁾ は PIV と PTV を組み合わせて植生先端位置の変位と周辺の瞬間流速の同時計測を行い、乱流の組織構造が植生揺動に及ぼす影響について考察した。その結果から、植生上で発達する大規模な乱流構造の流下方向スケールは、連動する植生要素の本数、すなわち Monami の発生の有無を決定することが示唆された。Tschisgale ら(2021)¹⁵⁾ は LES によって柔軟植生上の乱流および植生変位を再現し、植生先端付近で発達する低運動量あるいは高運動量領域の近傍でケルビン・ヘルムホルツ渦やヘアピン渦といった三次元的な渦構造が発達することを示した。Wang ら(2022)¹⁶⁾ は柔軟植生要素上を組織的な乱流運動が移流することで Monami が発生することを指摘している。以上の研究成果は、植生上で発達する組織的な乱流構造が植生揺動形態と密接に関連することを示唆している。しかしながら、以上の研究で対象とした水理条件は限定的であり、Monami の発生条件や乱流構造の空間スケールの解明には至っていない。特に、植生上で発達する乱流構造の空間スケールは水深や植生高さに依存するものと予想されるが、かぶり水深比が乱流構造および植生揺動形態に及ぼす影響については未解明点が多く残されている。

本研究では柔軟植生流れの基本的な特性を明らかにするために、柔軟植生要素が流下方向および横断方向に一様に分布する、十分に発達した柔軟植生流れの乱流構造を PIV によって計測する。次に、Okamoto ら(2016)¹⁴⁾ と同様の手法を用いて PIV・PTV による流速変動と植生変位の同時計測を実施し、乱流の組織構造と植生揺動の相互作用について考察する。また、本研究ではかぶり水深比の異なる 2 通りの水理条件を対象とすることで、かぶり水深比が植生揺動形態に及ぼす影響の解明を試みる。

5.2 計測システム・実験手法

(1) 計測システム

図-5.1 に本研究で使用した実験水路の概略図を示す。本実験では長さ 10 m、幅 0.40 m および高さ 0.50 m のガラス製水路を用いた。ここで、 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、水路上流端を $x = 0$ 、水路床を $y = 0$ および水路中央を $z = 0$ とする。また、時間平均流速の各方向成分をそれぞれ U 、 V および W とし、瞬間流速の乱れ変動成分をそれぞれ u 、 v および w とする。

本研究では、水路上流端から約 7 m の領域 ($0 \leq x \leq 7$ m) に、柔軟植生要素を水路幅全面にわたって正方格子状に配置することで、十分に発達した柔軟植生上の乱流場を再現した。本実験では柔軟植生要素として幅 $b_v = 0.8$ cm、直立高さ $h = 7.0$ cm および厚さ $t_v = 0.1$ mm の PET 製シートを使用した。3-4 章の剛体植生群落モデルの際と同様に、各植生要素の流下方向・横断方向間隔はいずれも $L_v = B_v = 3.2$ cm とし、植生密度 a ($\equiv b_v/(L_v B_v)$) は $a = 7.8$ m⁻¹ とした。また、本研究では流れが十分に発達する植生領域上流端から 6 m 下流の地

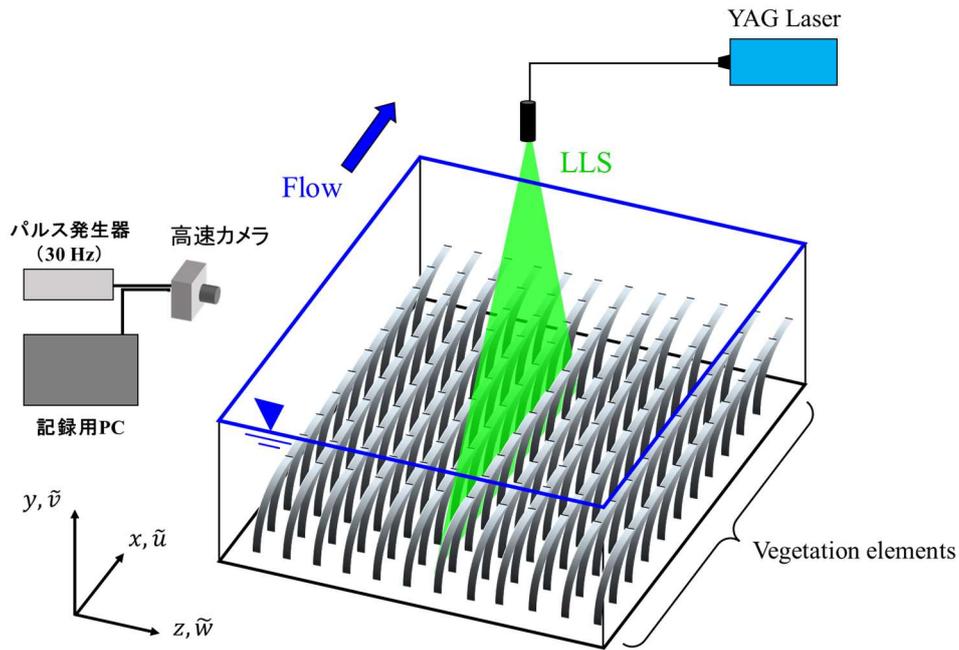


図-5.1 PIV 計測システム

表-5.1 水理条件

	a	U_m	H	Re	Fr	u_*	h	H/h	\bar{h}_d	揺動形態
	[m ⁻¹]	[m/s]	[m]			[cm/s]	[m]		[m]	
Case 1	7.8	0.20	0.084	16,800	0.22	3.6	0.070	1.2	0.051	Swaying
Case 2			0.210	42,000	0.14	4.6		3.0	0.062	Monami

点 ($x/h \approx 80$) を対象に全ての実験を実施した。

(2) 水理条件

表-5.1 に本実験の水理条件を示す。本実験ではかぶり水深比 H/h が植生上の乱流構造や植生揺動形態に及ぼす影響について考察するために、断面平均流速 U_m は一定とし、水深 H を 2 通りに変化させた。 Re および Fr はそれぞれレイノルズ数 ($Re \equiv U_m H / \nu$) およびフルード数 ($Fr \equiv U_m / \sqrt{gH}$) である。 u_* は摩擦速度であり、次式のようにレイノルズ応力の鉛直方向分布におけるピーク値 ($-\overline{uv}_{\text{peak}}$) から算出した^{14,17)}。

$$u_* = \sqrt{(-\overline{uv}_{\text{peak}})} \quad (5.1)$$

また、 \bar{h}_d は計測地点 ($x/h \approx 80$) における植生要素の倒伏高さ h_d の時間平均値であり、後述する PTV 計測の結果から算出した。

5章 柔軟植生流れの乱流構造および植生揺動

一般に、植生要素の揺れ方や連動して揺動する植生要素の本数などから、植生揺動形態は次の4種類に分類される^{9,14)}。

- 1) Erect : 剛体植生のようにほとんど倒伏せず、直立する。
- 2) Swaying : 個々の植生要素が連動することなく、別々に揺動する。
- 3) Monami : 複数の植生要素が連動しながら組織的に揺動する。
- 4) Prone : 植生要素が完全に倒伏し、小さく揺動する。

本研究ではかぶり水深比が小さい Case 1 で Swaying が、Case 2 では Monami がそれぞれ観察された。ここで、各ケースの植生揺動形態は目視による観察に基づいて判定した。この判定の妥当性については、PTVによる植生変位解析の結果とともに後述する。

(3) PIVによる流速計測

本研究では柔軟植生領域内部から水面近傍に及ぶ全水深領域を対象に、PIVによる流速計測実験を行った。図-5.1に示すように、3.0 WのYAGレーザーを光源とする厚さ2 mmのレーザーライトシート(LLS)を水路上方から照射し、水路側方に設置した高速カメラ(HAS)でデジタル撮影した。カメラに30 Hzの外部トリガーを与え、500 Hzのフレームレートで連続画像のペアを60秒間計測した。カメラの撮影領域サイズは1280ピクセル(x 方向)×1024ピクセル(y 方向)である。ここで、本研究では水路床から水面までの全水深を計測範囲とするために、実験ケースによってカメラとLLSの距離を調節した。計測範囲はCase 1 ($H = 8.4$ cm)で約20 cm×15 cm領域に、Case 2 ($H = 21.0$ cm)で約40 cm×30 cm領域に対応する。トレーサー粒子には粒径80 μm 、比重1.02のポリスチレン粒子を用いた。

鉛直面PIV流速計測では、水路中央のNon-wake region ($z = 0$)をLLSの横断方向照射位置とした(図-5.1)。ここで、本実験で使用した植生要素の横断方向変位は極めて小さいため、計測断面内に植生要素が入り込むことでLLSに干渉し、トレーサー粒子の撮影に影響を及ぼす様子は確認されなかった。

(4) PTVによる植生変位計測

流速計測に続き、乱流の組織構造と植生揺動の相互作用について考察するために、既往研究^{18,19)}で実施されているPIV・PTVによる瞬間流速場と植生変位の同時計測を実施した。図-5.2にPIV・PTVによる同時計測システムの概要を示す。植生要素先端の変位を計測するためのマーカーとして、表面に蛍光塗料を塗布した粒径1 mmのナイロン球(以下、蛍光マーカー)を使用した。この蛍光マーカーを植生要素先端の右岸側頂点に接着し、蛍光マーカーの存在する断面にLLSを照射することで、植生先端の挙動を可視化した。

本実験では計測位置近傍で流下方向に連続する5本の植生要素の先端にこの蛍光マーカーを取り付け、5本の植生要素の位置(x_d, h_d)と近傍の瞬間流速(\tilde{u}, \tilde{v})を同時に計測した。水

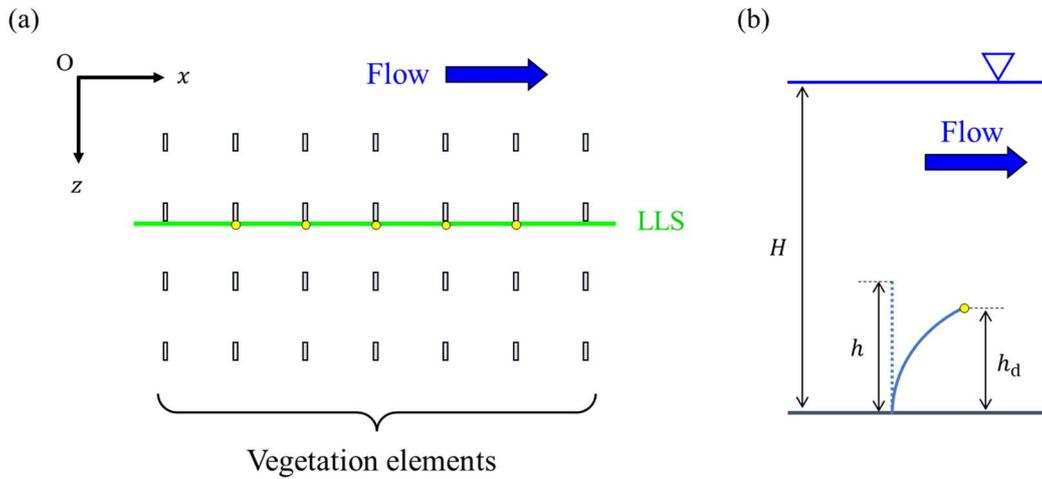


図-5.2 PIV・PTV 同時計測システム ((a)水平面図, (b)縦断面図)

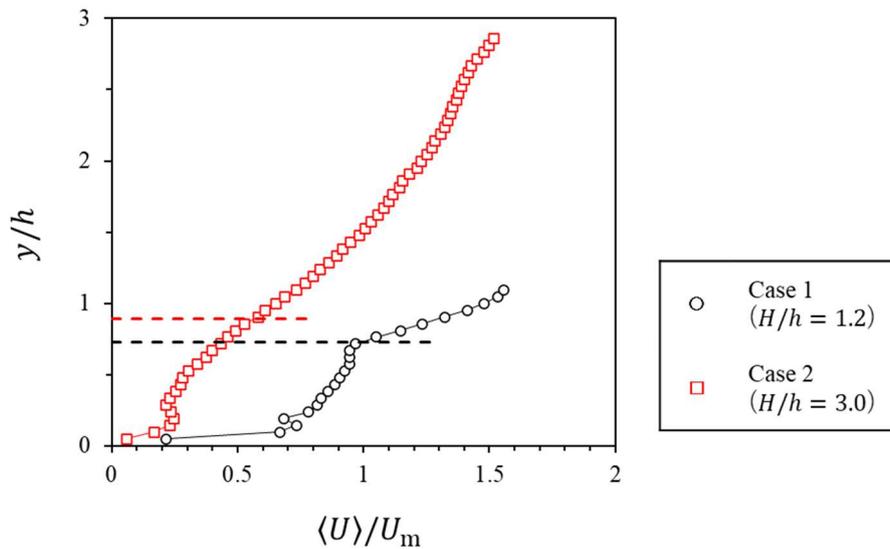
路側方に設置したカメラで LLS 内のトレーサー粒子および蛍光マーカーの挙動をデジタル撮影し、記録した。なお、カメラのフレームレートや画像ペアのサンプリングレート等の基本的な PIV の設定については、流速のみを計測した PIV 計測のものと同様とした。計測画像を基に、各時刻における植生要素の先端位置(x_d, h_d)を 4 時刻法に基づく PTV アルゴリズムによって算出し、植生変位の時系列変化を追跡した。

5.3 かぶり水深比による柔軟植生上の乱流構造の変化

(1) 時間平均主流速

本節では鉛直面 PIV による流速計測結果をもとに、かぶり水深比による平均流・乱流構造の変化について考察する。まず、図-5.3 にかぶり水深比の異なる 2 ケース ($H/h = 1.2, 3.0$) について時間平均主流速 U の鉛直方向分布を示す。ここで、図中の主流速は、各鉛直方向位置について、計測範囲 ($79 \leq x/h \leq 81$) において空間平均した値を示している。また、図中には各ケースにおける植生要素の時間平均倒伏高さ ($y = \bar{h}_d$) を点線で示している。いずれのケースにおいても、植生領域内部で主流速が低減され、植生の倒伏高さ近傍 ($y \approx \bar{h}_d$) で変曲点を持つ流速分布となっている。

かぶり水深比の大きいケース (Case 2) では、水路床近傍 ($0.1 \leq y/h \leq 0.3$) で主流速が概ね一定となる領域が存在し、その上部 ($y/h \geq 0.3$) において主流速が単調に増加している。これは植生先端位置近傍のせん断領域において乱れが生成され、乱流混合によって水路床近傍高さ ($y/h \approx 0.3$) にまで運動量が輸送されるためと考えられる。また、植生領域上 ($y > \bar{h}_d$) においても主流速が単調に増加しており、対数則が成立するような滑面開水路流れと類似した流れ場が発達しているものと考えられる。一方で、2 ケースを比較すると、植

図-5.3 時間平均主流速 U の鉛直方向プロット図

生領域内部 ($y < \bar{h}_d$) の主流速は Case 1 ($H/h = 1.2$) の方が大きくなっている。これは、かぶり水深比が低いケースでは流れの断面積に占める植生要素の前面遮蔽面積の割合が大きくなるため、かぶり水深比が大きいケースよりも多くの流体が植生要素間を流れるためと考えられる。また、Case 1 では植生領域内部の主流速が Case 2 よりも大きいため植生要素が受ける抗力も大きく、その結果、植生要素の平均倒伏高さがより小さくなっているものと考えられる。

(2) レイノルズ応力分布

図-5.4 に 2 ケース ($H/h = 1.2, 3.0$) におけるレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直方向分布を示す。両ケースとも主流速分布が変曲点を持つ植生先端近傍 ($y \approx \bar{h}_d$) でレイノルズ応力が最大となっており、鉛直混合層の発達を確認できる。両ケースのピーク値を比較すると、かぶり水深比の大きいケース (Case 2) の方が大きく、鉛直混合層における乱れの発達が活発であることがわかる。また、レイノルズ応力の値は植生高さ近傍のピーク位置から水面に向かって概ね線形に減衰しており ($\partial(-\overline{uv})/\partial y < 0$)、開水路流れにおけるせん断応力分布の理論式とも合致する。

植生内部 ($y < \bar{h}_d$) では、植生先端付近から水路床に近づくにつれてレイノルズ応力の値が減少している ($\partial(-\overline{uv})/\partial y > 0$)。Case 2 ($H/h = 3.0$) では $y/h = 0.3$ でレイノルズ応力の値がゼロとなっており、水路床近傍 ($y/h < 0.3$) では値がゼロでほぼ一定となっている。この鉛直方向位置は、主流速分布 $U(y)$ (図-5.3) で確認された鉛直せん断領域 ($\partial U/\partial y > 0$) の下端と概ね一致しており、鉛直混合層の浸透高さに対応すると考えられる。一方で、Case 1 ($H/h = 1.2$) ではレイノルズ応力のピーク値が Case 2 よりも小さいにもかかわらず、植生領域内部 ($y < \bar{h}_d$) のレイノルズ応力の値が Case 2 よりも大きくなっている。これは主

5.3 かぶり水深比による柔軟植生上の乱流構造の変化

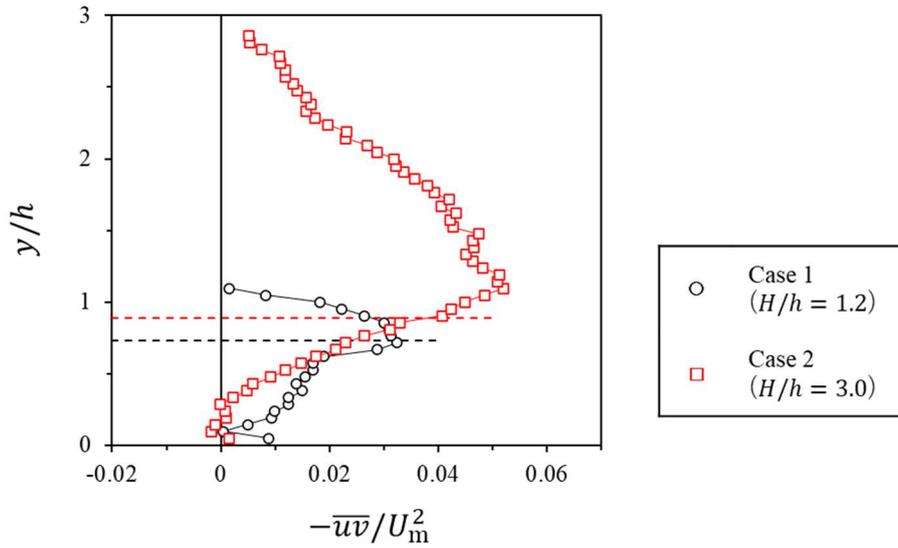


図-5.4 レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直方向プロット図

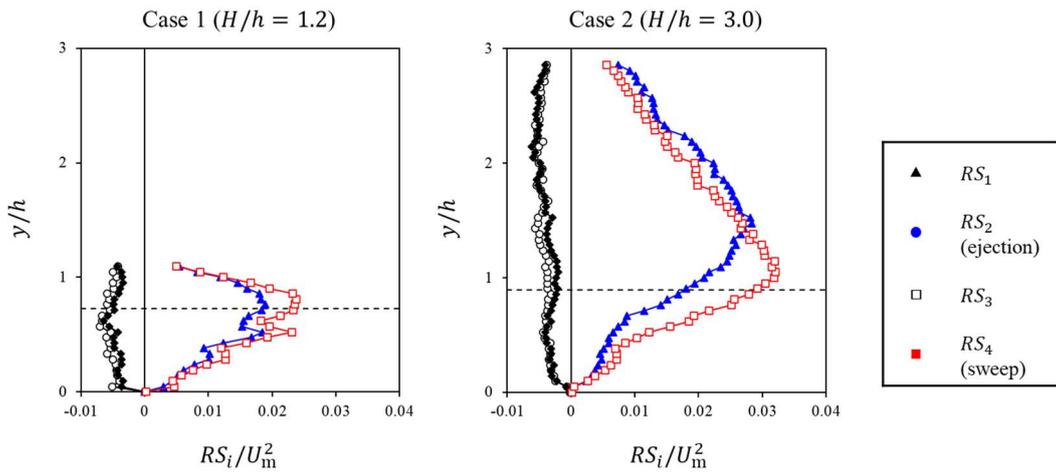


図-5.5 レイノルズ応力の四象限区分解析結果

流速分布 (図-5.3) でも考察したように、かぶり水深比が小さいケースの方が植生要素間における主流速が大きく、乱流混合によって水路床近傍にまで運動量が輸送されやすくなるためと考えられる。

(3) 四象限区分解析

柔軟植生流れにおける乱流の組織構造とその運動量への寄与についてより詳細に考察するために、2章で実施したレイノルズ応力の四象限区分解析 (式(2.7)) を実施した。図-5.5 に各象限の乱流運動に関する条件付きレイノルズ応力 RS_i ($i = 1-4$) の鉛直方向分布を示す。全体的に、Ejection ($u < 0, v > 0$) と Sweep ($u > 0, v < 0$) による寄与 (それぞれ RS_2 お

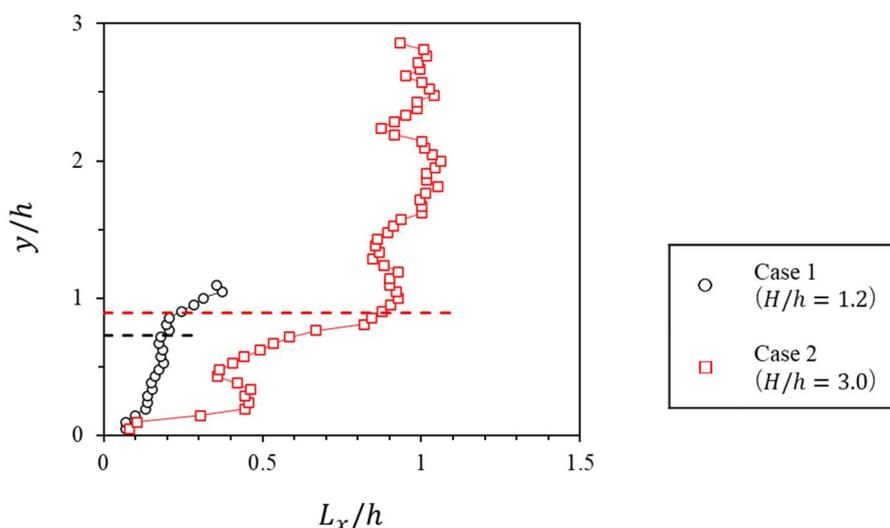


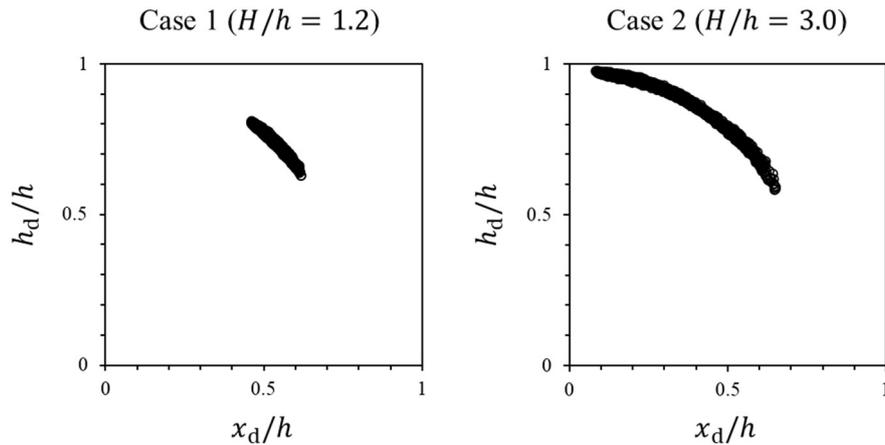
図-5.6 積分長さスケール L_x の鉛直方向プロット図

よび RS_4)が卓越しており、本研究で対象とした柔軟植生流れにおいて組織的な乱流運動が発達することが確認された。特に、Case 2 ($H/h = 3.0$)では植生高さ近傍および植生領域内部 ($y/h < 1.4$)においてSweepによる寄与が他の成分よりも卓越しており、植生領域内部への高運動量流体の輸送が柔軟植生の揺動形態にも影響を及ぼすものと推測される。同様の傾向はかぶり水深比が小さいCase 1 ($H/h = 1.2$)においても確認されたが、Case 2よりもレイノルズ応力の値が小さいため、 RS_2 と RS_4 の間にCase 2ほどの明確な差はみられなかった。

(4) 積分長さスケール

4章の式(4.3)で定義される積分長さスケールを算出し、かぶり水深比による乱流構造の流下方向スケールの変化について考察した。図-5.6に両ケース ($H/h = 1.2, 3.0$)における流下方向積分長さスケール L_x の鉛直方向分布を示す。いずれのケースでも植生領域内部 ($y < \bar{h}_d$)よりも外部 ($y > \bar{h}_d$)において L_x の値が大きく、植生上において流下方向スケールの大きい大規模な乱流構造が発達している。

かぶり水深比が大きいケース (Case 2, $H/h = 3.0$)ではかぶり水深比が小さいケース (Case 1, $H/h = 1.2$)よりも全体的に長さスケールの値が大きく、流下方向スケールがより大きな乱流構造が発達していることが確認できる。特に、植生領域の上部 ($y > \bar{h}_d$)ではCase 1で $L_x \approx 0.4h$ 、Case 2で $L_x \approx h$ と値に2-3倍程度の差がある。また、Case 2では植生上の長さスケールの値がほぼ一定となっており、水面近傍にまで及ぶ大規模な乱流構造の発達が示唆される。このように、かぶり水深比の大きいケースほど植生上で発達する乱流の組織構造の流下方向スケールが増加しており、このような違いが水理条件による植生揺動形態の変化 (Monamiの発生の有無)を引き起こすと考えられる。

図-5.7 植生先端位置(x_d, h_d)の軌跡

5.4 かぶり水深比による植生揺動形態の変化

(1) 植生先端位置の縦断面内軌跡

本節では PTV によって得られた植生変位データから、かぶり水深比 H/h による植生先端位置の軌跡と揺動特性の概要について考察する。図-5.7 に両ケース (Case 1, 2) における植生要素先端位置の縦断面内軌跡 (x_d, h_d) を示す。ここで、各植生要素の根元の位置を原点として表しており、倒伏前の植生要素の先端位置は $(x_d, h_d) = (0, h)$ である。いずれのケースにおいても、植生要素の先端が円弧状の軌跡を描きながら揺動する様子が確認できる。植生要素の倒伏幅 ($h - \bar{h}_d$) はかぶり水深比の小さい Case 1 ($H/h = 1.2$) の方が大きい一方で、植生変位の変動幅についてはかぶり水深比の大きい Case 2 ($H/h = 3.0$) の方が大きくなっている。このような違いは植生高さ近傍の鉛直混合層で発達する乱流構造の違いによるものと考えられ、実際に、植生先端付近におけるレイノルズ応力の値がより大きく、乱れが発達する Case 2 の方が植生変位の振幅が大きくなっている。

(2) 植生変位の流速変動への応答

次に、PIV・PTV による流速変動と植生変位の同時計測結果から、植生変位とその近傍における乱流の組織構造との関連について考察する。図-5.8 に Case 2 ($H/h = 3.0$) の植生要素の鉛直方向変位 $\Delta h_d (= h_d - \bar{h}_d)$ 、および植生要素近傍位置 ($x = \bar{x}_d, y = h$) における主流速の瞬間変動値 u の時系列変化を示す。主流速の時系列変化から、植生先端近傍付近を高速流 ($u > 0$) と低速流 ($u < 0$) が約 5 秒周期で交互に通過する様子が確認できる。また、植生先端近傍における高速流の通過 ($u > 0$) と植生要素の倒伏 ($\Delta h_d < 0$)、および低速流の通過 ($u < 0$) と植生要素の起立 ($\Delta h_d > 0$) がそれぞれ同時に発生する傾向が確認できる。このように、かぶり水深比が大きく Monami の発生が見られるケースでは、植生上で大規模

5章 柔軟植生流れの乱流構造および植生揺動

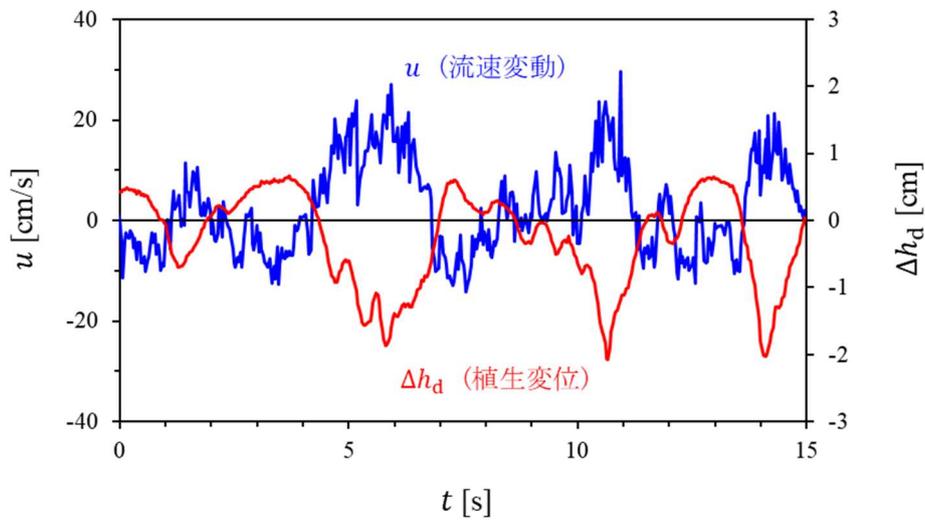


図-5.8 鉛直方向植生変位 Δh_d および瞬間主流速変動 u の時系列変化 (Case 2)

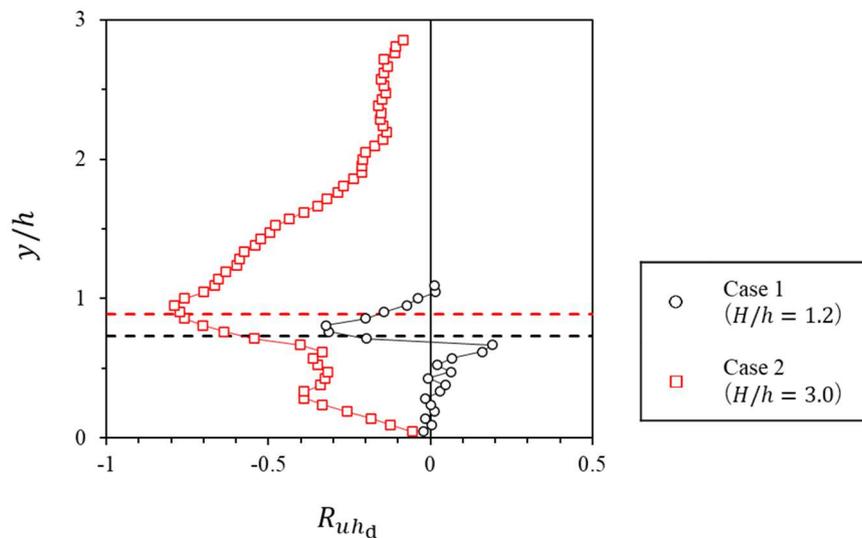


図-5.9 瞬間主流速と植生変位の相関係数 R_{uh_d}

かつ組織的な乱流運動が発生し、植生揺動を引き起こすことが示された。

このような植生要素近傍の流速変動と植生変位の相関関係についてより定量的に評価するために、植生変位 h_d と植生先端近傍流下方向位置 ($x = \bar{x}_d$) における主流速 u との相関係数 R_{uh_d} を次式によって算出した¹⁴⁾。

$$R_{uh_d}(y) = \frac{\overline{u(\bar{x}_d, y, t) \cdot \Delta h_d(t)}}{\sqrt{\{u^2(\bar{x}_d, y, t)\}} \sqrt{\{\Delta h_d^2\}}} \quad (5.2)$$

図-5.9 に両ケースの主流速・植生変位相関係数の鉛直方向分布 $R_{uh_d}(y)$ を示す。Monami が

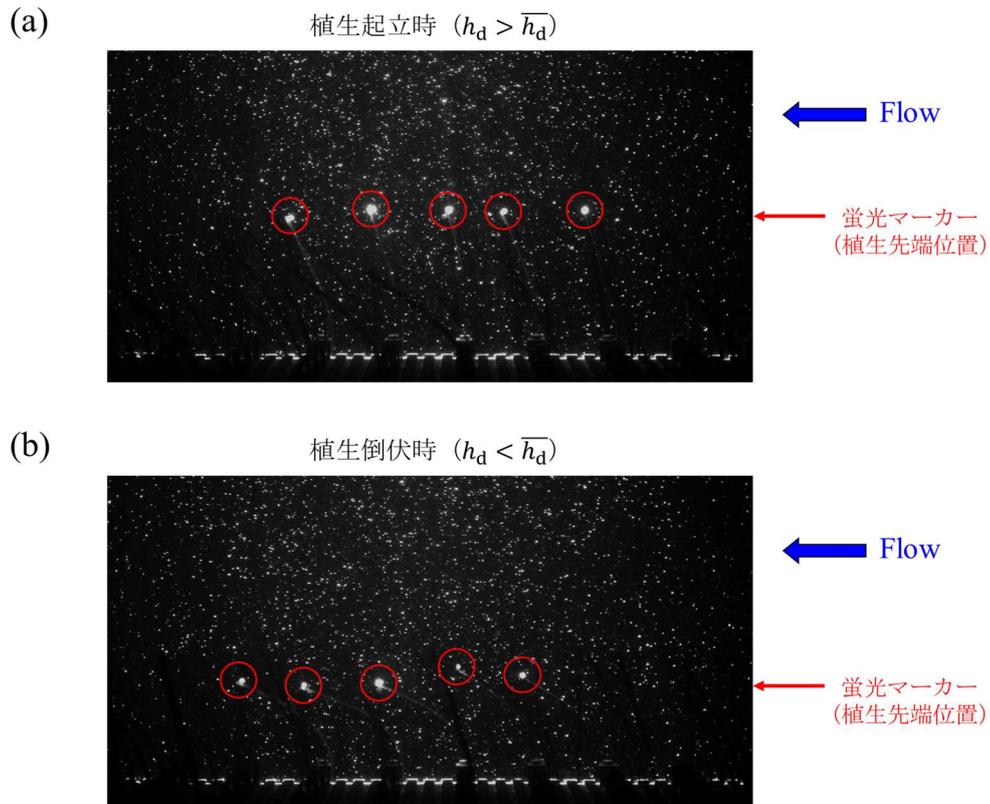


図-5.10 Monami による組織的な植生揺動 (Case 2)

発生する Case 2 では植生高さ ($y \approx \bar{h}_d$) を中心に広い範囲 ($0.7 \leq y/h \leq 1.6$) にわたって主流速と植生変位に一定の負の相関 ($R_{uh_d} < -0.4$) がみられる。これはかぶり水深比が大きい場合、植生先端付近で発生する大規模な Sweep および Ejection により、植生要素の倒伏 ($h_d < \bar{h}_d$) および起立 ($h_d > \bar{h}_d$) がそれぞれ発生することを示唆している。これに対し、かぶり水深比が小さく Monami が観察されないケース (Case 1) では、植生先端高さのごく近傍を除いて相関係数の絶対値が 0.4 を超える領域は存在しない。これはかぶり水深比が小さいケースでは大規模な乱流構造が発達せず、空間スケールの比較的小さい流速変動によって各植生要素が揺動することを示唆している。

(3) 植生要素の組織的揺動

ここまでの考察から、柔軟植生上で発達する乱流の組織構造の流下方向スケールがかぶり水深比 (H/h) によって変化し、また大規模な乱流構造が組織的な植生要素の揺動を引き起こすことが示唆された。最後に、流下方向に連続して並ぶ 5 本の植生要素を対象に植生変位の同時解析を行い、ケース間における挙動の比較から、Monami の発生と乱流の流下方向スケールの関連について考察する。

図-5.10 に Case 2 で観察された植生揺動の様子を捉えたスナップ写真を示す。一つ目の写

5章 柔軟植生流れの乱流構造および植生揺動

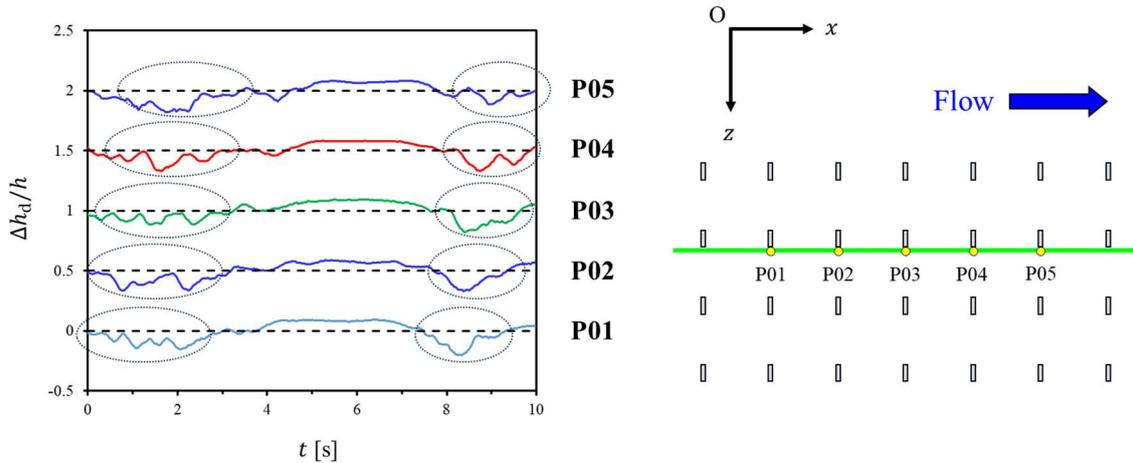


図-5.11 5 植生要素の植生変位の時系列変化 $\Delta h_d(t)$ (Case 2)

真 (図-5.10 (a)) では、蛍光マーカーによって先端位置が可視化された植生要素が 5 本それぞれ起立 ($h_d > \bar{h}_d$) しているのに対し、写真 (図-5.10 (b)) では逆に 5 本の植生要素がすべて倒伏 ($h_d < \bar{h}_d$) する様子が観察される. このように、かぶり水深比の大きい Case 2 では複数の植生要素が連動して起立あるいは倒伏を繰り返す挙動が確認されており、これは Monami の発生を示唆しているものと考えられる.

図-5.11 に Monami が発生する Case 2 について、5 植生要素 (P01–05) の鉛直方向変位の時系列変化 $\Delta h_d(t)$ (10 秒間) を示す. ここで、各流下方向位置について $\Delta h_d/h$ の値を 0.5 ずつシフトさせて表示している. 最上流端の植生要素 (P01) に注目すると、 $0\text{ s} < t < 2.4\text{ s}$ および $7.5\text{ s} < t < 9.2\text{ s}$ において植生要素が倒伏しており ($\Delta h_d < 0$)、 $4.0\text{ s} < t < 7.5\text{ s}$ において植生要素が起立している ($\Delta h_d > 0$). また、このような植生変位の時系列パターンと同様の時系列変化が、少し時間差を置いて下流側の各植生要素 (P02–05) でも確認できる. このような特徴は、柔軟植生上で発達する組織構造が流下方向に移流されることで、植生要素の組織的な揺動が発生することを示唆している.

このような 5 つの植生変位の時系列データを対象にスペクトル解析を行い、Monami 現象の流下方向スケールと、それに関連する乱流構造の時間スケールについて考察する. Okamoto ら(2016)¹⁴⁾ は 2 つの植生変位の時系列データ ($x(t)$ および $y(t)$) の関連について定量的に評価するために、次式で定義されるコヒーレンスを算出した.

$$Coh^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (5.3)$$

ここで、 $S_{xy}(f)$ は 2 変動量 $x(t)$ および $y(t)$ のクロススペクトルを表している. 本研究では最も下流側に位置する植生要素 (P05) とそれ以外の植生要素の計 4 組の植生変位に対してコヒーレンスを算出し、Monami 現象の流下方向スケールを評価した.

図-5.12 に 2 ケースにおけるコヒーレンスの解析結果を示す. かぶり水深比の小さい Case

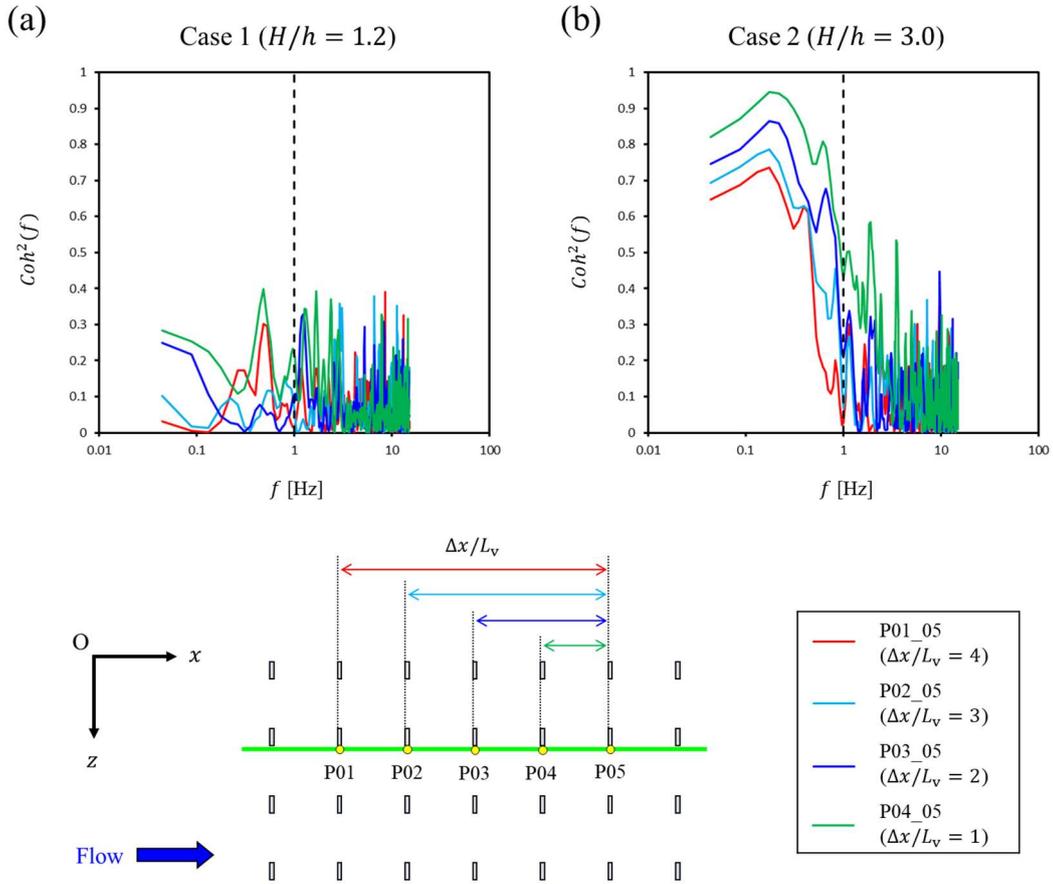


図-5.12 2 植生変位のコヒーレンス $Coh^2(f)$

1 ($H/h = 1.2$) では、植生要素間の流下方向間隔 ($\Delta x/L_v = 1-4$) にかかわらず、すべての周波数領域においてコヒーレンスが 0.5 を下回っている。このことから、かぶり水深比の小さいケースでは各植生要素が独立して揺動しており、揺動形態としては組織的な植生揺動が見られない *Swaying* であることが確認された。これに対し、かぶり水深比の大きい Case 2 ($H/h = 3.0$) では、いずれのプロットについても低周波数領域 ($f < 1$ Hz) においてコヒーレンスが 0.5 を上回っており、流下方向に並ぶ植生要素の揺動には強い関連があることが示唆された。コヒーレンスの周波数分布は $f \approx 0.2$ Hz でピーク値をとっており、図-5.8 で観察された流速変動の周期とも概ね一致している。このことから、柔軟植生上で発達する大規模かつ組織的な乱流構造が柔軟植生要素の先端近傍を通過することで、*Monami* が発生するものと考えられる。

5.5 結語

本研究では十分に発達した柔軟植生流れを対象に、室内水路実験において鉛直面 PIV に

5章 柔軟植生流れの乱流構造および植生揺動

よる流速計測を実施した。また、PIV・PTVによる流速変動と植生変位の同時計測を行い、柔軟植生上で発達する乱流の組織構造と Monami 現象の関連について考察した。本研究を通じて得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 断面平均流速が一定の条件下では、かぶり水深比 H/h が大きいケースの方が植生先端近傍の鉛直混合層における乱れの生成が活発になる。また、かぶり水深比の大きいケースでは、かぶり水深比の小さいケースよりも流下方向積分長さスケールが大きくなる傾向が確認された。これより、柔軟植生上で発達する乱流の組織構造はかぶり水深比によって増加することが示唆される。
- 2) 植生変位と植生要素近傍の流速変動との同時計測結果から、かぶり水深比が大きく Monami が発生するケース (Case 2) では植生高さ近傍の流速変動と植生変位の間に強い負の相関が存在することが示された。一方で、組織的な植生揺動が確認されない Swaying のケース (Case 1) では、流速と植生変位の相関係数の値が Monami の発生するケースよりも小さく、乱流の組織構造と植生変位の相互作用が弱い。
- 3) 流下方向に並ぶ 5 植生要素の変位の同時解析結果から、かぶり水深比の大きいケースでは組織的な植生要素の揺動 (Monami) が発達するのに対し、かぶり水深比の小さいケースでは個々の植生要素が独立して揺動することが示された。また、このような植生揺動形態の違いは、かぶり水深比による乱流構造の流下方向スケールの変化によって引き起こされることが示唆された。

参考文献

- 1) Ghisalberti, M., and Nepf, H. M.: The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies, *Environ. Fluid Mech.*, Vol.6, pp.277–301, 2006.
- 2) Albayrak, I., Nikora, V., Miler, O., and O'Hare, M.: Flow-plant interactions at a leaf scale: effects of leaf shape, serration, roughness and flexural rigidity, *Aquat Sci*, Vol.74, pp.267–286, 2012.
- 3) Nepf, H. M.: Flow and transport in regions with aquatic vegetation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.44, pp.123–142, 2012.
- 4) 渡辺勝利, 安部一輝, 蒲生諒: 柔軟植生モデルを有する開水路流れの乱流構造, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70(4), I_704-I_714, 2014.
- 5) Hu, Z., Lei, J., Liu, C., and Nepf, H.: Wake structure and sediment deposition behind models of submerged vegetation with and without flexible leaves, *Advances in Water Resources*, Vol.118, pp.28–38, 2018.
- 6) Sehat, H., Abdolapour, M., Jamali, M., and Ghisalberti, M.: The impact of plant oscillation on

- dispersion in emergent aquatic canopies, *Water Resour. Res.*, Vol.59, e2022WR032035, 2023.
- 7) Marjoribanks, T. I., Hargy, R. J., Lane, S. N., and Parsons, D. R.: Does the canopy mixing layer model apply to highly flexible aquatic vegetation? Insight from numerical modelling, *Environ Fluid Mech.*, Vol.17, pp.277–301, 2017.
 - 8) Houseago, R., Hong, L., Cheng, S., Best, J., Parsons, D., and Chamorro, L.: On the turbulence dynamics induced by a surrogate seagrass canopy, *J. Fluid Mech.*, Vol.934, A17, 2022.
 - 9) 池田駿介, 金沢稔, 太田賢一: 可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の三次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, No.515, pp.33–43, 1995.
 - 10) 中矢哲郎, 池田駿介, 戸田祐嗣, 古賀智之: 極めて柔軟な沈水植生層内外の流れと植生の運動に関する研究, 水工学論文集, Vol.48, pp.1627–1632, 2004.
 - 11) Boothroyd, R. J., Hardy, R. J., Warburton, J., and Marjoribanks, T. I.: Modeling complex flow structures and drag around a submerged plant of varied posture, *Water Resour. Res.*, Vol.53, pp.2877–2901, 2017.
 - 12) He, S., Liu, H., and Shen, L.: Simulation-based study of turbulent aquatic canopy flows with flexible stems, *J. Fluid Mech.*, Vol.947, A33, 2022.
 - 13) Siniscalchi, F., and Nikora, V.: Dynamic reconfiguration of aquatic plants and its interrelations with upstream turbulence and drag forces, *J. Hydraulic Res.*, Vol.51, pp.46–55, 2023.
 - 14) Okamoto, T., Nezu, I., and Sanjou, M.: Flow–vegetation interactions: length-scale of the “monami” phenomenon, *J. Hydraulic Res.*, Vol.54(3), pp.251–262, 2016.
 - 15) Tschisgale, S., Löhner, B., Meller, R., and Fröhlich, J.: Large eddy simulation of the fluid-structure interaction in an abstracted aquatic canopy consisting of flexible blades, *J. Fluid Mech.*, Vol.916, A43, 2021.
 - 16) Wang, J., He, G., Dey, S., and Fang, H.: Fluid-structure interaction in a flexible vegetation canopy in an open channel, *J. Fluid Mech.*, Vol.951, A41, 2022.
 - 17) Pokrajac, D., Finnigan, J. J., Manes, C., McEwan, I., and Nikora, V.: On the definition of the shear velocity in rough bed open channel flows, *Proc. of River Flow 2006*, pp.89–98, 2006.
 - 18) Okamoto, T., and Nezu, I.: Turbulence structure and “Monami” phenomena in flexible vegetated open-channel flows, *J. Hydraulic Res.*, Vol.47(6), pp.798–810, 2009.
 - 19) 岡本隆明, 禰津家久, 山上路生: 藻波発生時の柔軟植生の変形解析と流れ抵抗変化に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68(4), I_1309–I_1314, 2012.

第6章

植生剛性による柔軟植生群落近傍の乱流構造 および浮遊砂堆積の変化

6.1 概説

河道内における植生消長メカニズムの素過程として、特定の種の低木類や草本類が先駆的植物として裸地上に定着し、その結果、礫床への細粒土砂堆積が促進され、後続する他の植物の生育に適した環境が形成されることが挙げられる^{1,2)}。また、原田ら(2015)³⁾は河道内に草本類の群落が生息する場合には起伏に富んだ微地形が形成され、ワンドやたまりにおいて多様な生物の生息環境が創出されることを明らかにしている。このように、実河川では幅広い種の植物が生育しており、生育高さや植生密度をはじめとする植生要素の物理的特性が流れ場へ及ぼす影響を明らかにする必要がある。

既往研究では、剛体植生群落の流れ場や土砂輸送に及ぼす影響について考察した例が多くみられる⁴⁻⁸⁾。本論文3章および4章における考察から、剛体植生群落近傍の鉛直・水平混合層において発達する三次元的な乱流構造が群落内部および背後の浮遊砂堆積領域を決定することが示唆された。一方で、草本類と樹木群を比較すると、生育高さだけではなく植生要素の柔軟性の面でも大きな違いが存在すると考えられる。Caroppiら(2021)⁹⁾は柔軟植生流れと剛体植生流れを比較し、植生要素の柔軟性によって乱流構造および運動量輸送メカニズムが変化することを示唆している。以上より、植生群落近傍の土砂輸送や河床変動を適切に評価するためには、植生要素の曲げ剛性が乱流構造および物質輸送過程に及ぼす影響について解明することが不可欠である。

これまでにも、柔軟植生群落を有する開水路流れの平均流・乱流特性について考察した研究例は多数存在する。大本ら(1998)¹⁰⁾は水路実験において柔軟植生群落近傍の流速計測を実施し、群落近傍において二次流を伴う三次元的な流速分布が見られることを明らかにした。また、Marjoribanksら(2019)¹¹⁾は植生要素の曲げ剛性 (Flexural rigidity) を系統的に変化

本章は以下の論文に掲載された内容を中心に、さらに検討を加えたものである。

<和文>

1. 松本知将, 岡本隆明, 山上路生, 岡田啓頌, 赤堀良介: 植生群落近傍の渦構造・浮遊砂堆積に与える植生剛性の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 78, No. 2, I_595-I_600, 2022.

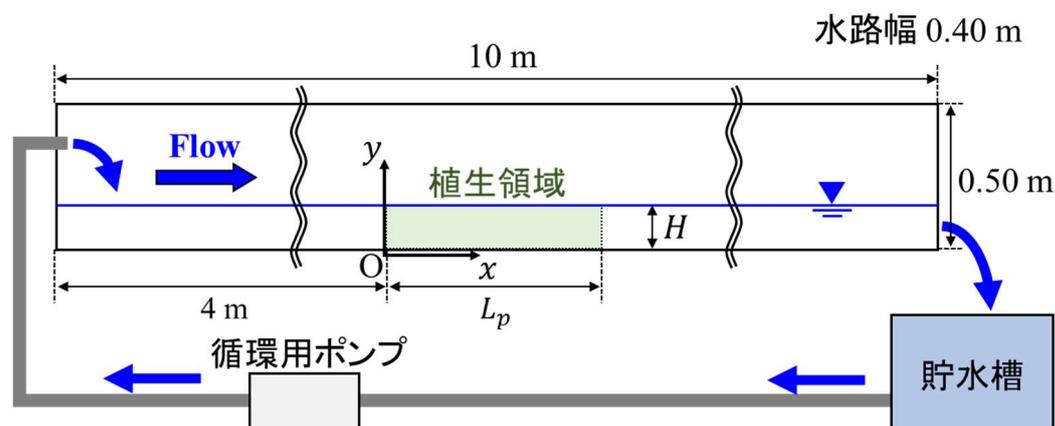


図-6.1 実験水路の概略図

させた複数ケースの柔軟植生流れを RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation) に基づく数値計算で再現し、同一の水力条件下では群落背後の後流長さが最大となる植生の曲げ剛性が存在することを指摘している。このような流れ場に関する考察と並行して、群落近傍の平均流・乱流構造が群落背後の浮遊砂輸送に及ぼす影響についての解明も進められている¹²⁾。Hu ら(2018)¹³⁾ は柔軟植生流れについて水路実験を行い、群落後流域において渦構造と堆積領域長さが強く関連することを示した。その一方で、柔軟植生群落近傍の浮遊砂の輸送・堆積過程を三次元的な乱流構造と関連付けて考察した研究は少なく、柔軟植生流れの浮遊砂輸送メカニズムについては未解明点が多く残されている。

本研究では剛性の異なる 4 通りの植生流れを対象とし、実験水路において群落内部や後流域における流速場と浮遊砂堆積領域の計測を行う。流速計測では鉛直面 PIV および水平面 PIV を実施し、植生群落近傍および内部における平均流・乱流構造を明らかにする。さらに、浮遊砂堆積状況の観察から、植生素の柔軟性の変化が群落周辺における渦構造や浮遊砂の輸送過程に及ぼす影響について考察する。

6.2 計測システム・実験手法

(1) 計測システム

図-6.1 に本研究で使用した実験水路の概略図を示す。本実験では長さ 10 m、幅 0.40 m および高さ 0.50 m のガラス製水路を用いた。水路下流端には貯水槽が存在し、電動ポンプによって水路内に水を循環させた。ここで、 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、植生群落上流端を $x = 0$ 、水路床を $y = 0$ および水路中央を $z = 0$ とする。また、時間平均流速の各方向成分をそれぞれ U 、 V および W とし、瞬間流速の乱れ変動成分をそれぞれ u 、 v および w とする。

6章 植生剛性による柔軟植生群落近傍の乱流構造および浮遊砂堆積の変化

表-6.1 実験条件

	U_m	H	Re	Fr	t_v	EI	Ca	a	h	$\langle \bar{h}_d \rangle$	$\langle \bar{h}_d \rangle / H$
	[m/s]	[m]			[mm]	[Nm ²]		[m ⁻¹]	[m]	[m]	
Case 1	0.25	0.15	37,500	0.21	0.2	2.9×10^{-6}	290	7.8	0.150	0.028	0.19
Case 2					0.3	9.9×10^{-6}	85			0.071	0.47
Case 3					0.4	2.3×10^{-5}	36			0.090	0.60
Case 4					0.5	4.6×10^{-5}	18			0.110	0.73

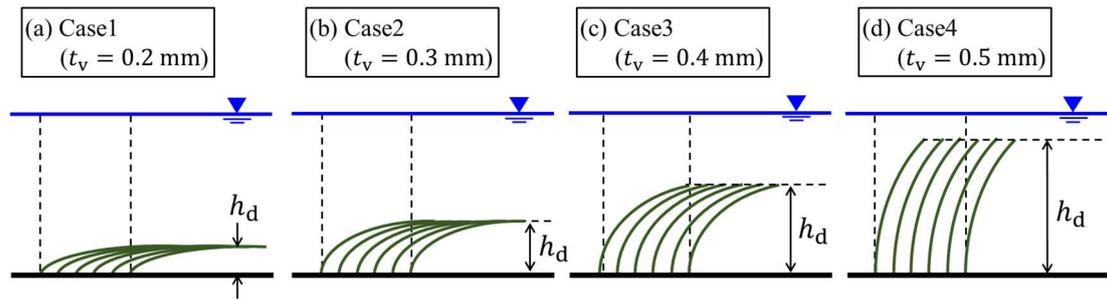


図-6.2 植生剛性による倒伏高さの変化

水路の上流端から約 4 m 下流の位置を群落上流端とし、水路中央 ($z = 0$) 周辺の水路床上に柔軟植生要素を正方格子状に配置することで柔軟植生群落モデルを作製した。本実験では柔軟植生要素として幅 $b_v = 0.8$ cm および直立高さ $h = 15.0$ cm、の PTFE 製シート (比重 2.2, 曲げ弾性率 $E = 5.5 \times 10^8$ Nm⁻²;) を使用した。3 章の剛体植生群落モデルと同様に、各植生要素の流下方向・横断方向間隔はいずれも $L_v = B_v = 3.2$ cm とし、植生群落領域の流下方向長さおよび横断方向幅はそれぞれ $L_p = 0.738$ m および $B_p = 0.136$ m とした。また、剛体植生群落の場合と同様に、植生密度 a は次式のように定義できる。

$$a \equiv \frac{n_v \bar{h}_d b_v}{\bar{h}_d L_p B_p} = \frac{b_v}{L_v B_v} \quad (6.1)$$

ここで、 n_v は植生群落に含まれる植生要素の総本数である ($n_v = 5 \times 24$)。本実験における植生要素の配置から、植生密度は $a = 7.8$ m⁻¹ と求められた。

(2) 実験条件

表-6.1 に実験条件を示す。本実験では断面平均流速 U_m および全水深 H といった水理条件は一定とし、植生要素の厚さ t_v を変化させることで曲げ剛性を 4 通りに変化させた。ここで、 Re および Fr はそれぞれレイノルズ数 ($Re \equiv U_m H / \nu$) およびフルード数 ($Fr \equiv U_m / \sqrt{gH}$) である。また、 $\langle \bar{h}_d \rangle$ は群落下流側 ($x > 0.5L_p$) の全植生要素の時間平均倒伏高さ \bar{h}_d の平均値であり、図-6.2 に示すように、植生要素の曲げ剛性に伴って植生の倒伏高さ h_d も変化すると

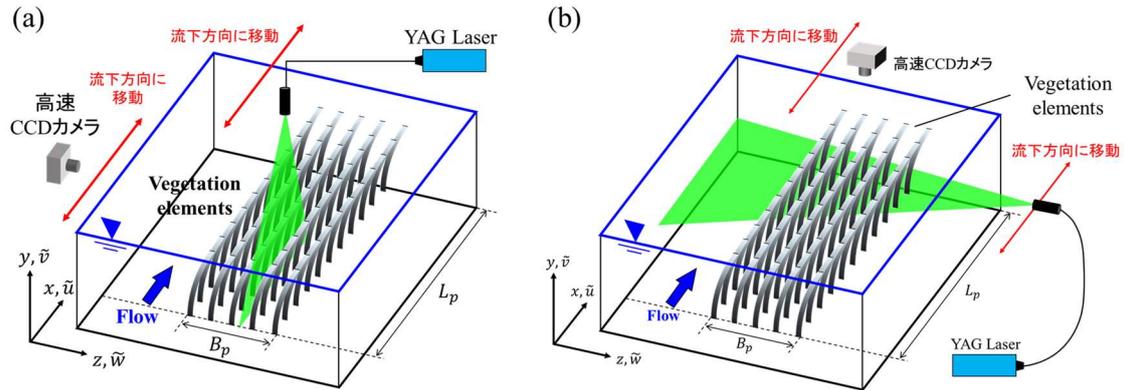


図-6.3 PIV 流速計測システム ((a)鉛直面 PIV, (b)水平面 PIV)

考えられる。

流水中の植生要素の柔軟性を評価する無次元量として、コーシー数 (Cauchy number) が提案されている^{11,14)}。コーシー数 Ca は植生要素の曲げ剛性に対する植生要素に作用する流体力 (抗力) の比として、次式のように定義される。

$$Ca \equiv \frac{0.5\rho b_v h U_m^2}{(EI/h^2)} = \frac{\rho b_v h^3 U_m^2}{2EI} \quad (6.2)$$

コーシー数が 1 より大きい場合 ($Ca \gg 1$)、植生要素の剛性と比較して大きな流体力が作用するため、植生の柔軟性を考慮する必要があると考えられる。逆に、コーシー数が 1 より十分小さい場合 ($Ca \ll 1$)、植生剛性に対して十分に小さい流体力しか作用しないため、剛体植生として扱えるもの考えられる。

(3) 鉛直面 PIV 計測

本研究では植生群落周辺および内部における流れの構造を明らかにするために、まず鉛直面 PIV による流速計測実験を行った。図-6.3(a)に鉛直面 PIV の計測システムを示す。3.0 W の YAG レーザーを光源とする厚さ 2 mm のレーザーライトシート (LLS) を水路上方から照射し、水路側方に設置した高速カメラ (Ditect 製, HAS-EF) でデジタル撮影した。カメラに 30 Hz の外部トリガーを与え、500 Hz のフレームレートで連続画像のペアを 60 秒間計測した。撮影領域のサイズは 1280 ピクセル (x 方向) × 1024 ピクセル (y 方向) であり、実スケールでは約 20 cm × 15 cm の領域に対応する。トレーサー粒子には粒径 80 μm 、比重 1.02 のポリスチレン粒子を用いた。

鉛直面 PIV では水路中央付近の Non-wake region (植生要素間, $z = 0.5B_v$) を LLS の横断方向照射位置とした。ここで、植生要素の変形は主流方向および鉛直方向のみに限られ、LLS 内に植生要素が入り込んで計測面を乱す様子は確認されなかった。LLS およびカメラの位置を約 15 cm 間隔で流下方向にシフトさせ、約 2 m の領域 ($-4H < x < 9H$) の縦断面

6章 植生剛性による柔軟植生群落近傍の乱流構造および浮遊砂堆積の変化

内における流速ベクトル分布 (\tilde{u}, \tilde{v}) を計測した。

(4) 水平面 PIV 計測

柔軟植生群落近傍で発達する三次元的な平均流・乱流構造を調べるために、鉛直面 PIV に続いて水平面 PIV による流速計測実験を行った。図-6.3(b)に水平面 PIV の計測システムを示す。基本的な PIV の設定（トレーサー粒子、カメラのフレームレートおよびペア画像のサンプリングレート等）は鉛直面 PIV 計測と同様に設定した。水路側方から LLS を照射し、LLS 内のトレーサー画像を水路上方に設置した高速カメラでデジタル撮影した。撮影領域のサイズは 1024 ピクセル（ x 方向）× 1280 ピクセル（ z 方向）であり、実スケールでは約 20 cm × 25 cm である。

本計測では流下方向および横断方向の 2 成分流速データ (\tilde{u}, \tilde{w}) の水平面分布を計測した。また、流速分布の鉛直方向変化についても考察するために、 $y = 0.07H$ (1.0 cm) および $y = 0.33H$ (5.0 cm) の 2 水平面を LLS の照射位置とした。鉛直面 PIV と同様に、カメラおよび LLS 照射位置を $4H \leq x \leq 9H$ の範囲で約 15 cm ずつ流下方向にシフトさせながら繰り返し計測を行い、群落下流端近傍から群落背後（後流域）にかけての領域の流速ベクトル (\tilde{u}, \tilde{w}) を計測した。

(5) 浮遊砂堆積実験

次に、PIV 計測を実施した各ケースの流れ場について、浮遊砂堆積実験を行った。本実験では浮遊粒子として 8 号珪砂を用いた。3 章で実施した浮遊砂堆積実験と同様に、水路下流端の貯水槽（図-6.1）に浮遊粒子を投入し、水とともに 2 時間循環させた。水路に投入した水と浮遊砂の体積から算出した平均浮遊砂濃度は $c = 9.4 \times 10^{-4}$ である。通水後、浮遊砂の堆積状況を水路上方からカメラで撮影し、堆積状況の観察を行った。なお、以上の実験は各ケースについて 3 回ずつ繰り返して実施されており、各ケースの堆積傾向に一定の再現性があることが確認されている。

6.3 植生の柔軟性による平均流遷移過程の変化

(1) 植生要素の倒伏高さ

流速計測結果の解析に先立ち、各ケースにおける植生要素の倒伏高さの変化について調べた。本研究では PIV の計測画像上で水路中央ライン（ $z = 0$ ）の各植生要素の先端位置 (x_d, h_d) をトラッキング追跡した。図-6.4 に各植生要素先端位置の時間平均値 (\bar{x}_d, \bar{h}_d) を示す。なお、図中には時間平均値と併せて、各流下方向位置における植生要素の倒伏高さ h_d の最大値および最小値についても示している。全体的な傾向として、植生要素の曲げ剛性が小

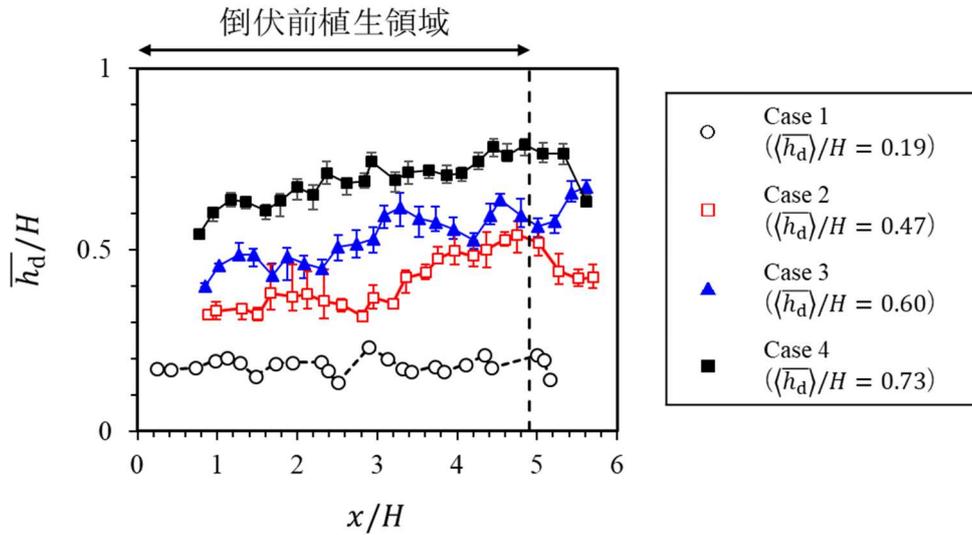


図-6.4 各植生要素の時間平均倒伏高さ $\overline{h_d}$

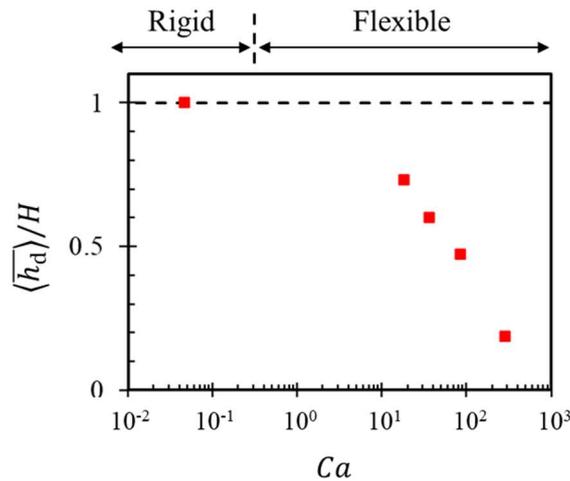


図-6.5 コーシー数による倒伏高さの変化

さい、すなわち柔軟性の高いケースほど大きく倒伏する様子が確認できる。また、最も剛性が小さい Case 1 では、植生要素の柔軟性が最も高いケースにもかかわらず、植生要素の振動がほとんど確認できない。これは、植生の剛性に対して植生要素に作用する流体力が十分に大きく ($Ca \gg 1$)、植生が完全に倒伏する (Prone) ことで、滑面流れと同様に大規模な乱流構造が発達していないためと考えられる。植生剛性が比較的大きい 3 ケースについては、植生の倒伏高さが流下方向に増加する傾向が確認できる。これは、後述するように、流れの遷移に伴って主流速が低減されるため、下流側に位置する植生要素ほど受ける流体力が減少するためと考えられる。本研究では特に群落下流側および後流域における乱流構造に注目するため、群落下流側における植生要素の倒伏高さの平均値を代表値 $\langle \overline{h_d} \rangle$ として用いる。

図-6.5 にコーシー数 Ca による平均倒伏高さ $\langle \overline{h_d} \rangle$ の変化を示す。比較のため、3 章の Case 4

6章 植生剛性による柔軟植生群落近傍の乱流構造および浮遊砂堆積の変化

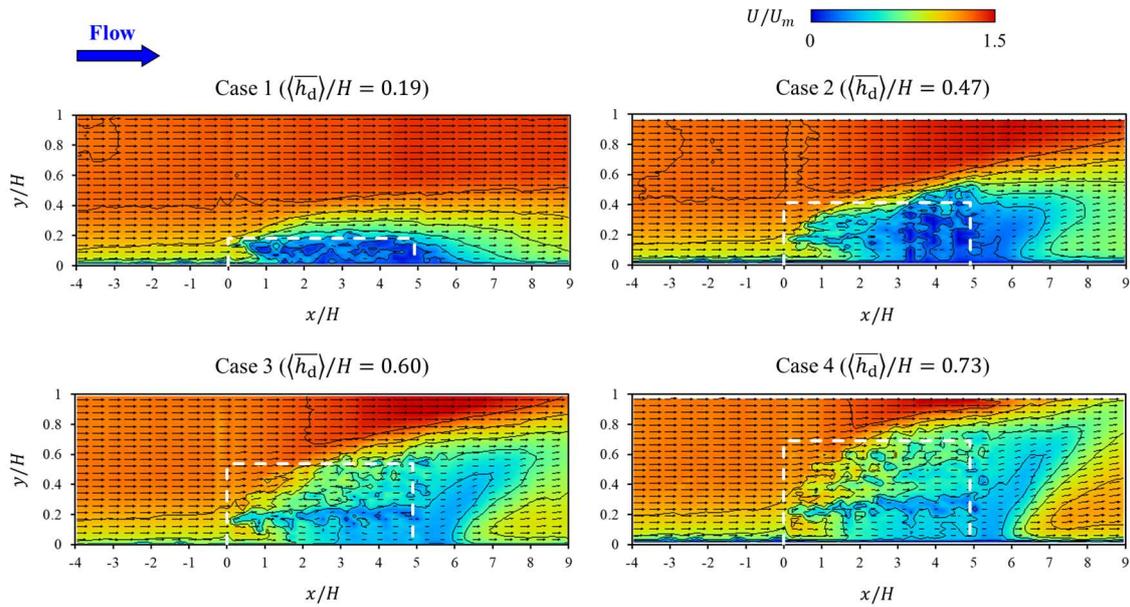


図-6.6 時間平均主流速 U の縦断面コンター

(剛体植生, $h/H = 1$, $Ca = 4.6 \times 10^{-2}$) の値についても併せて示している. コーシー数が大きいケースほど植生の倒伏幅が大きく, 植生の柔軟性が高くなることが確認できる. Luhar & Nepf (2016)¹⁴⁾ は柔軟植生要素の倒伏高さがコーシー数の関数で表され, またコーシー数の増加に伴って単調減少することを示しており, 本研究の結果とも概ね一致するものと考えられる.

(2) 時間平均主流速

図-6.6に全4ケース(Case 1-4)における時間平均主流速 U の縦断面コンター図を示す. ここで, 図中の白破線は倒伏高さの代表値 $\langle \bar{h}_d \rangle$ を用いて示したおよその植生群落領域 ($0 \leq x \leq L_p = 4.9H$, $0 \leq y \leq \langle \bar{h}_d \rangle$) を表している. いずれのケースでも植生群落内部 ($0 < x/H < 4.9$) において植生抗力によって主流速が低減され, 後流域 ($x/H > 4.9$) において再加速されている. その一方で, 後流域における主流速の回復過程については, ケース間で明確な違いが見られた. 倒伏高さが最も小さいCase 1では, まず植生高さ付近 ($y \approx \langle \bar{h}_d \rangle$) で主流速が増加し始める. これは剛体水没植生群落 (3章 Case 1-3) の場合と同様であり, 植生先端のせん断領域 ($\partial U / \partial y$) で発達する鉛直混合層における鉛直方向の運動量輸送 ($-\overline{uv}$) によるものと考えられる. これに対し, 比較的植生剛性が大きく, 倒伏高さが大きい他の3ケース (Case 2-4) では, 植生高さ近傍ではなく水路床近傍から先に流速が増加し始めている. その結果, これらのケースでは群落背後に主流速が逆勾配 ($\partial U / \partial y < 0$) となる領域が存在している. このような群落背後の主流速分布から, 倒伏高さが比較的大きいケースでは, 乱流混合による鉛直方向の運動量輸送よりも横断方向の運動量輸送の方が後流域における主流速の回復 ($\partial U / \partial x > 0$) に大きく寄与することが示唆される.

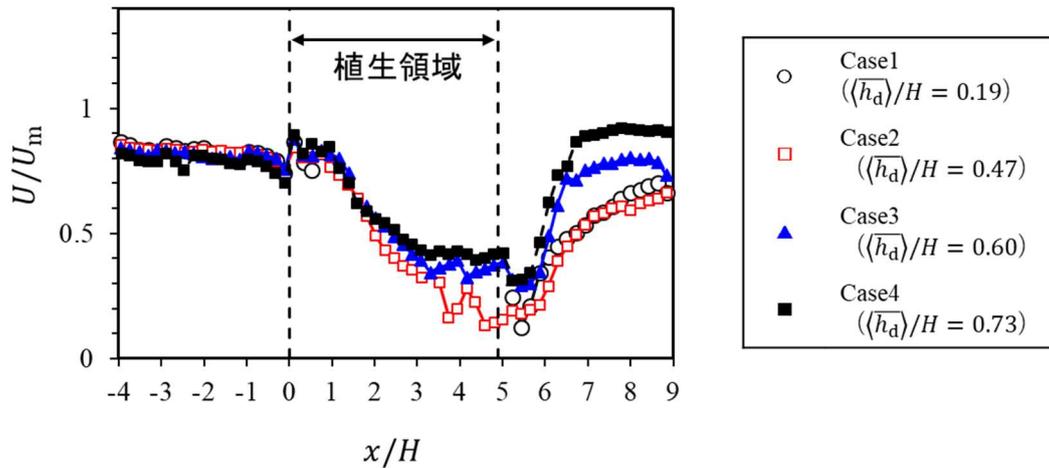


図-6.7 底層 ($y/H = 0.05$) における時間平均主流速 U の流下方向分布

図-6.7 に各ケースの底層 ($y/H = 0.05$) における時間平均主流速 U の流下方向分布を示す。いずれのケースでも後流域 ($x/H > 4.9$) において主流速が増加しているが、倒伏高さが大きいケース (Case 3, 4) では $x/H = 5.5$ 付近で急激に加速され始めるのに対し、より小さな倒伏高さのケース (Case 1, 2) では主流速の加速が比較的緩やかになる傾向が確認できる。このような違いは、図-6.6 で考察したような群落背後の河床近傍における逆勾配領域の有無を反映したものであり、群落周辺の水平混合層や二次流の発達に関連していると推測される。その一方で、同じ倒伏前植生高さ ($h/H = 1$) の3章 Case 4 では、比較的剛性の大きい柔軟植生流れである本章の Case 3 および 4 で見られたような主流速の急激な回復は確認されない。したがって、このような群落背後の河床近傍における急激な主流速の回復は、植生剛性が中程度のケースに特有の傾向であると考えられる。

(3) 時間平均鉛直流速

3章で考察した通り、植生群落上流端では主流速の減少に伴い、鉛直方向あるいは横断方向に流体が押し出される Diverging flow が発生する。図-6.8 に各ケースの(a)植生先端近傍 ($y = \langle \bar{h}_d \rangle$) および(b)底層 ($y/H = 0.05$) における時間平均鉛直流速 V の流下方向分布を示す。また、比較のため、水没剛体植生群落流れの実験結果 (3章 Case 3) についても併せて示している。柔軟植生群落上流端付近 ($x \approx 0$) の植生先端高さ ($y = \langle \bar{h}_d \rangle$) では上昇流 ($V > 0$) が発生しているが、剛体植生のケースと比較すると値が小さく、また上昇流の発達領域が広範囲に及んでいる。これは植生要素が倒伏および振動することで植生抗力が減少し、その結果植生群落内部における主流速の遷移が緩やかになるためと考えられる。

底層 ($y/H = 0.05$) では、各ケースとも群落内部 ($0 < x/H < 4.9$)、特に群落上流端付近において剛体植生のケースよりも強い下降流 ($V < 0$) が発生している。このような下降流は柔軟植生のケースに特有の傾向であることから、流れが倒伏した植生要素の背後に回り

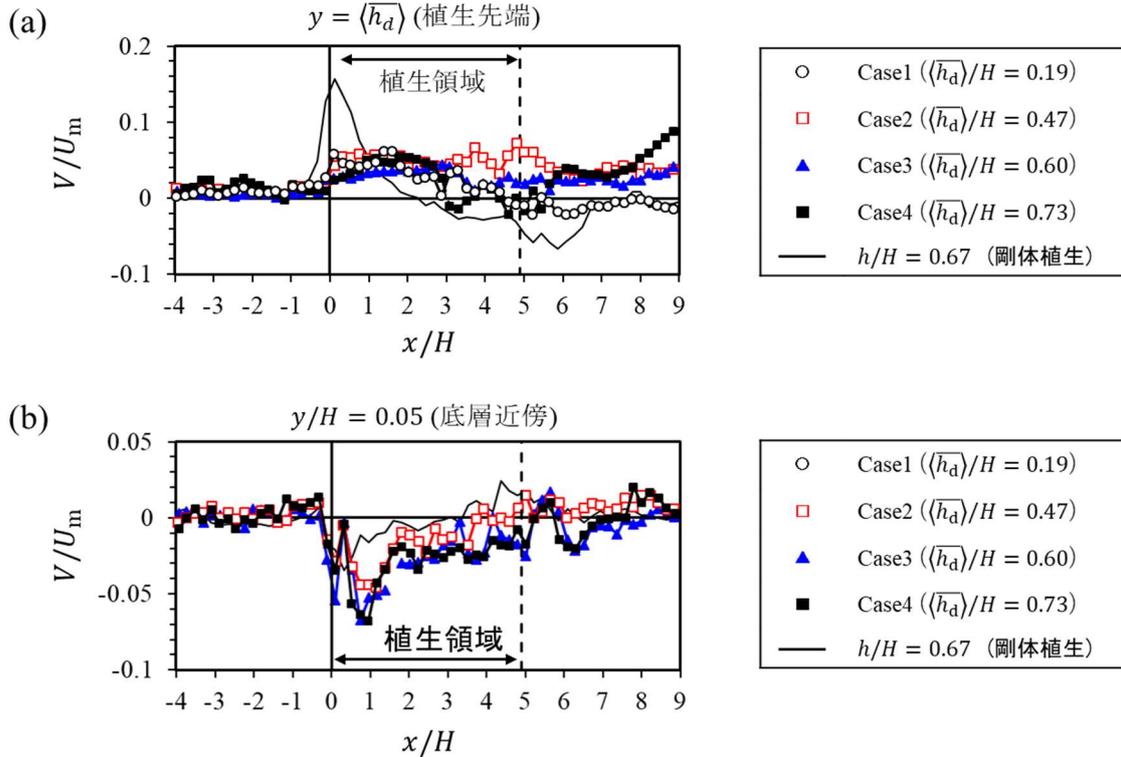


図-6.8 代表高さにおける時間平均鉛直流速 V の流下方向分布

込むことで発生するものと推測される。その結果、柔軟植生上流側では流れが植生の根元に潜り込み、さらに横断方向へと押し出されるものと考えられる。

6.4 植生の柔軟性による群落周辺の渦構造の変化

(1) 植生群落近傍の鉛直混合層の発達過程

本節では、植生剛性が植生群落近傍の三次元的な乱流構造に及ぼす影響について考察する。図-6.9に全4ケース (Case 1-4) における鉛直レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の縦断面コンター図を示す。なお、本研究では各流下方向位置においてレイノルズ応力がピーク値の10%以上 ($-\overline{uv} \geq 0.1(-\overline{uv}_{\text{peak}})$) となる領域を混合層と定義した。コンター図中には各流下方向位置における鉛直混合層の上端 (赤四角) および下端 (青三角) についても示している。両ケースとも植生先端付近 ($y \approx \langle \bar{h}_d \rangle$) で鉛直レイノルズ応力の値が大きく、せん断領域 ($\partial U/\partial y$) におけるケルビン・ヘルムホルツ不安定から、横断方向軸の渦構造を伴う鉛直混合層が形成されていることが確認される。

その一方で、倒伏高さが小さい Case 1 では後流域 ($x/H > 4.9$) で鉛直混合層が水路床近傍にまで達するのに対し、倒伏幅の小さい Case 2-4 では到達していない。さらに、これら

6.4 植生の柔軟性による群落周辺の渦構造の変化

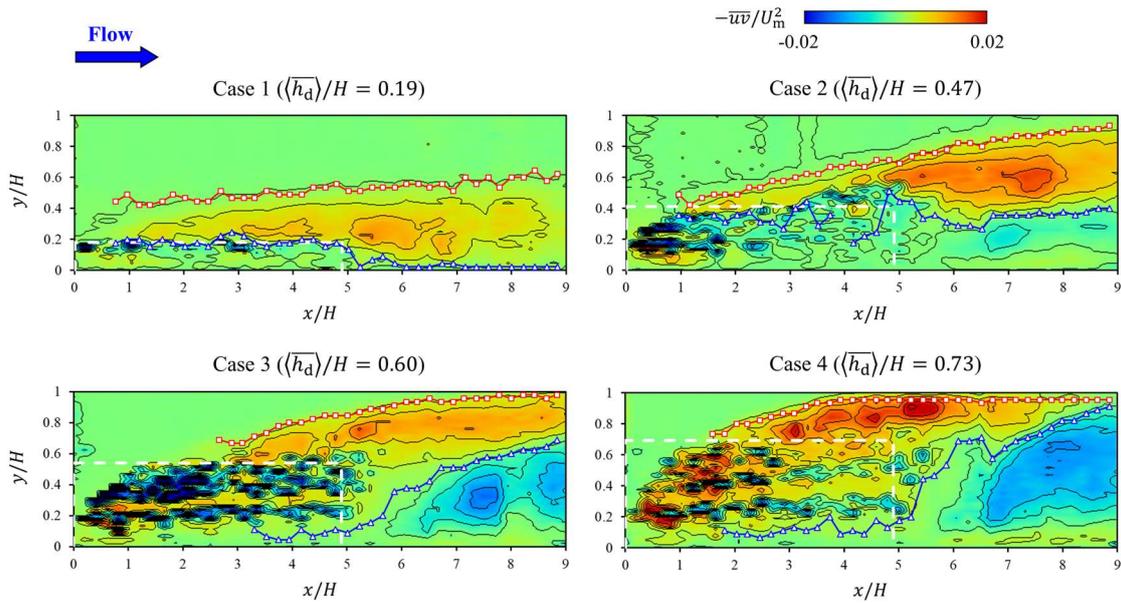


図-6.9 鉛直レイノルズ応力 $-\bar{u}\bar{v}$ の縦断面コンター

のケースでは後流域の水路床近傍にレイノルズ応力が負となる領域 ($-\bar{u}\bar{v} < 0$) が存在している。これは、図-6.6 で示したように、河床近傍で主流速が加速されることによる主流速の逆勾配領域 ($\partial U / \partial y < 0$) において乱れが生成されているためと考えられる。

(2) 植生群落背後における平均流の水平面内構造

ここまでの考察より、植生剛性が大きく、倒伏高さが比較的大きい柔軟植生群落の背後では、水路床近傍において水平渦や二次流による横断方向の運動量輸送が卓越することが予想される。そこで、水平面 PIV によって得られた水平面内における流速分布のデータから、植生群落背後における横断方向の運動量輸送メカニズムについて考察する。

図-6.10 に Case 3 ($\langle \bar{h}_d \rangle / H = 0.60$) の 2 鉛直位置 ($y / \langle \bar{h}_d \rangle = 0.11$ および 0.56) における時間平均主流速 U の水平面コンター図を示す。水路床近傍 ($y / \langle \bar{h}_d \rangle = 0.11$) では、非植生域 ($z/H < -0.5$) において主流速がほぼ一様に分布し ($\partial U / \partial z \approx 0$)、群落背後において等値線の間隔が狭い顕著な横断方向せん断領域 ($\partial U / \partial z$) が形成されている。これに対し、植生先端付近 ($y / \langle \bar{h}_d \rangle = 0.56$) では水路床近傍よりも等値線の間隔が広く、主流速の横断方向勾配 ($\partial U / \partial z$) が小さくなっている。その結果、群落外縁近傍 ($x/H \approx 4.9$, $z/H \approx -0.5$) では、水路床近傍 ($y / \langle \bar{h}_d \rangle = 0.11$) の方がその上部 ($y / \langle \bar{h}_d \rangle = 0.56$) よりも主流速 U が大きく、鉛直方向の主流速分布に逆勾配領域 ($\partial U / \partial y < 0$) が形成されている。これは、図-6.8 で示唆されたように、群落上流側で倒伏した植生要素の近傍で流れが潜り込み、水路床近傍で植生群落外縁に押し出されるためと考えられる。このように、柔軟植生群落近傍では鉛直方向および横断方向に非一様な流れ場が形成されており、三次元的な乱流構造および二次流構造

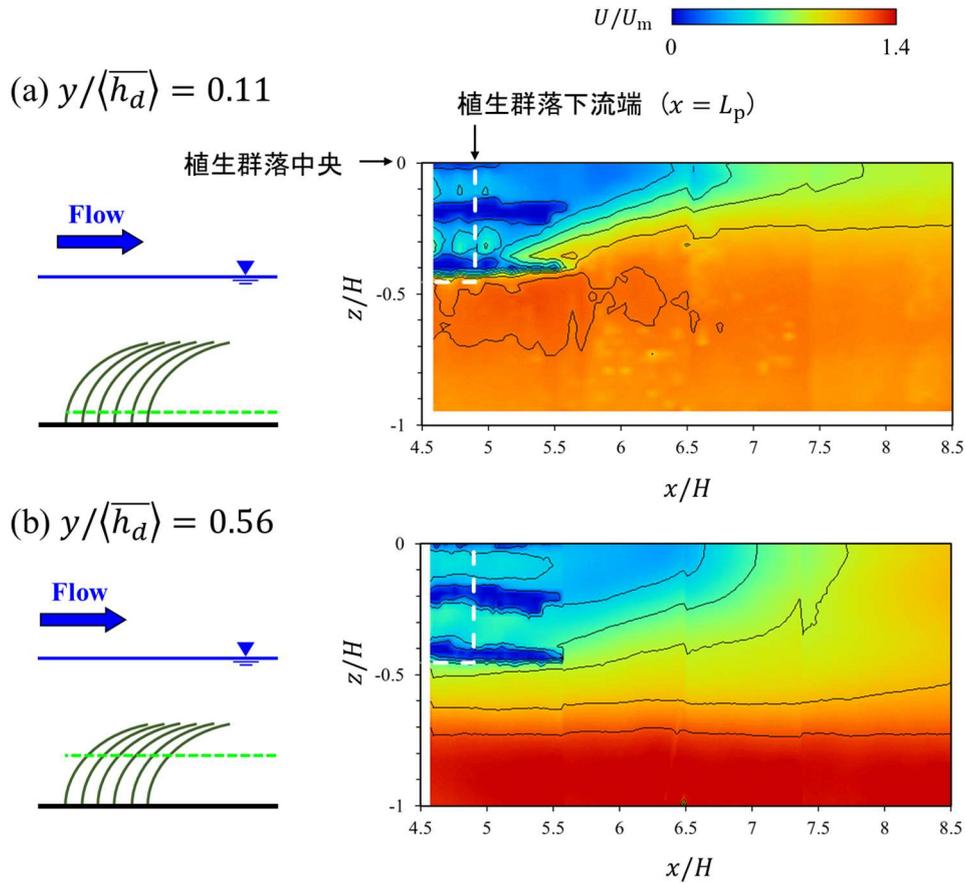


図-6.10 時間平均主流速 U の水平面コンター (Case 3, $\langle h_d \rangle / H = 0.60$)

が発達しているものと推測される。

図-6.11 に Case 3 ($\langle h_d \rangle / H = 0.60$) の水路床近傍 ($y / \langle h_d \rangle = 0.11$) における時間平均横断方向流速 W の水平面コンター図を示す。植生群落の外縁近傍 ($x / H \leq 4.9$, $z / H \approx -0.5$) および背後 ($x / H > 4.9$) において、非植生域から群落内部および後流域に流れ込むように水路中央方向へ向かう横断方向流れ ($W > 0$) が発達している。図-6.10(b)の主流速コンター図における等値線の形状より、このような横断方向流れは $y / \langle h_d \rangle = 0.56$ ではあまり発達しておらず、水路床近傍においてのみ発達するものと考えられる。

このような水路床近傍の横断方向流れに植生剛性が及ぼす影響について調べるために、図-6.12 に全4ケースの後流域中の各流下方向位置 ($x > L_p = 4.9H$) における正の横断方向流速 ($W > 0$) のピーク値 $|W|_{\text{peak}}(x)$ を示す。ここでは比較のため、3章 Case 4 の結果についても併せて示している。柔軟植生の4ケース (Case 1-4) については、植生剛性が大きく、倒伏高さの大きいケースほど横断方向流れが発達している。これは主流速の回復が剛性の大きいケースほど急激になる傾向 (図-6.7) と対応しており、柔軟植生群落流れでは群落近傍で発達する二次流が後流域における主流速の回復に寄与するものと考えられる。一方で、最も剛性の大きい剛体植生のケースでは柔軟植生で最も剛性の大きい Case 4 ほど横断方向

6.4 植生の柔軟性による群落周辺の渦構造の変化

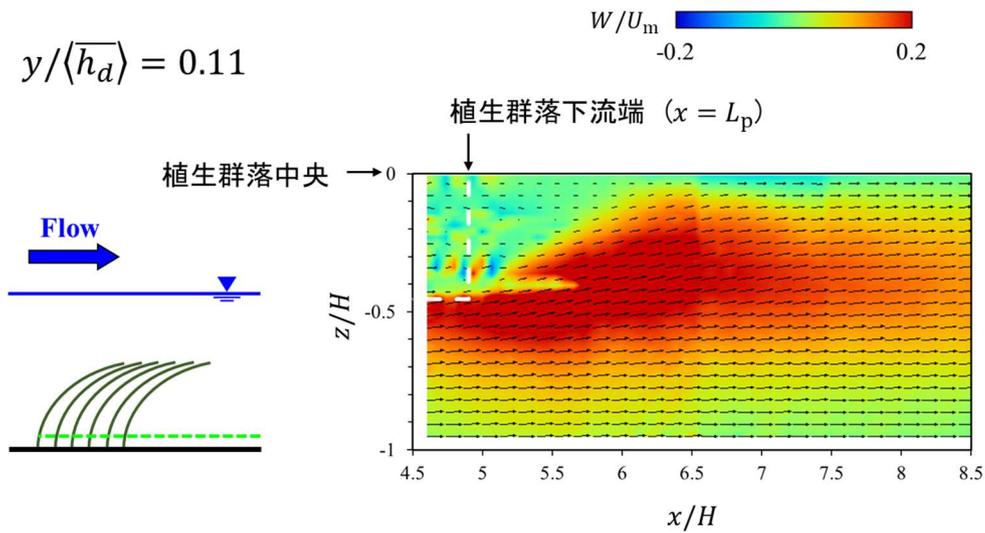


図-6.11 時間平均横断方向流速 W の水平面コンター (Case 3, $\langle h_d \rangle/H = 0.60$)

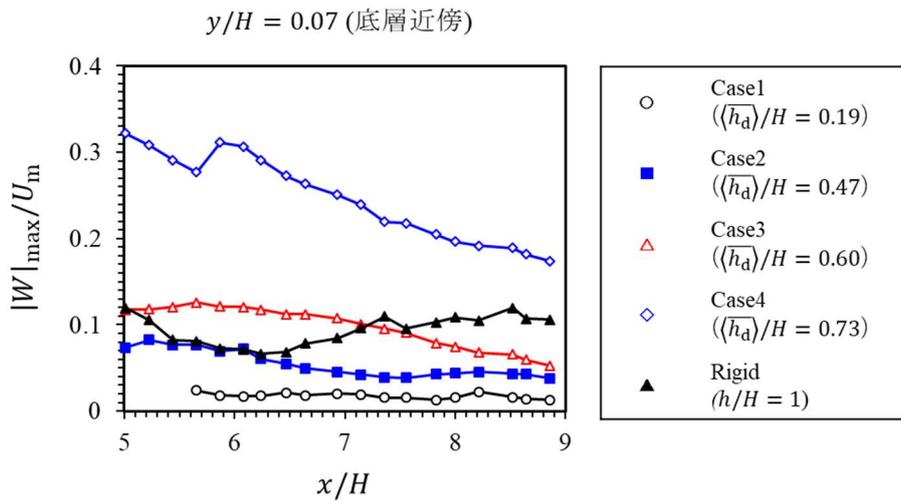


図-6.12 時間平均横断方向流速ピーク値 $|W|_{\text{peak}}$ の流下方向変化

流れが発達していない. このことから, 植生群落背後で発達する二次流は植生剛性が中程度のケース (Case 3 および 4) において最も顕著に発達するものと考えられる.

(3) 植生群落背後の水平混合層の発達過程

図-6.13 に Case 3 ($\langle h_d \rangle/H = 0.60$) の水路床近傍 ($y/\langle h_d \rangle = 0.11$) における水平レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の水平面コンター図を示す. 図-6.10(a)の主流速の水平面コンター図中で確認された横断方向せん断領域において顕著な負の水平レイノルズ応力 ($-\overline{uw} < 0$) が分布しており, 乱流混合による非植生域から群落背後への横断方向の運動量輸送が卓越する様子が確認できる. また, 群落形状の横断方向対称性から, 水路左岸側 ($z > 0$) においても同様の

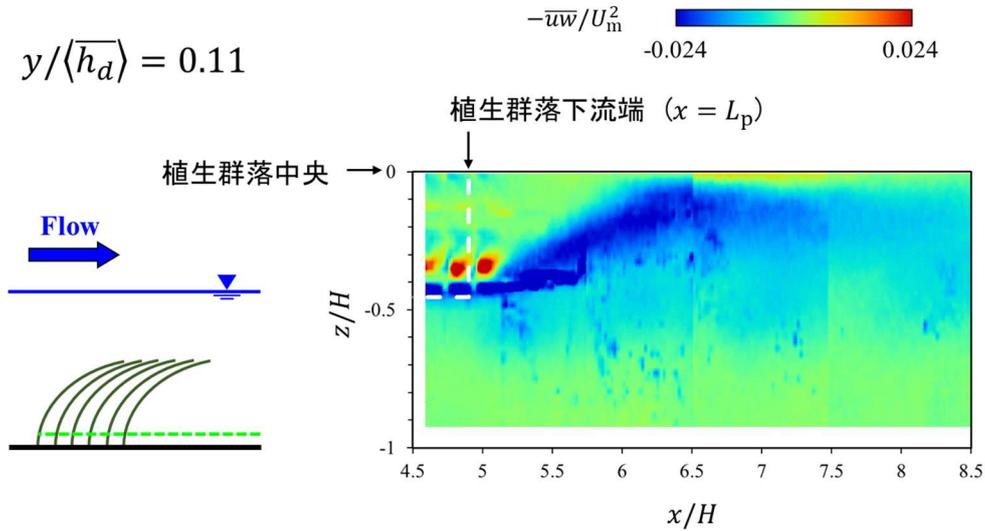


図-6.13 水平レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の水平面コンター (Case 3, $\langle h_d \rangle/H = 0.60$)

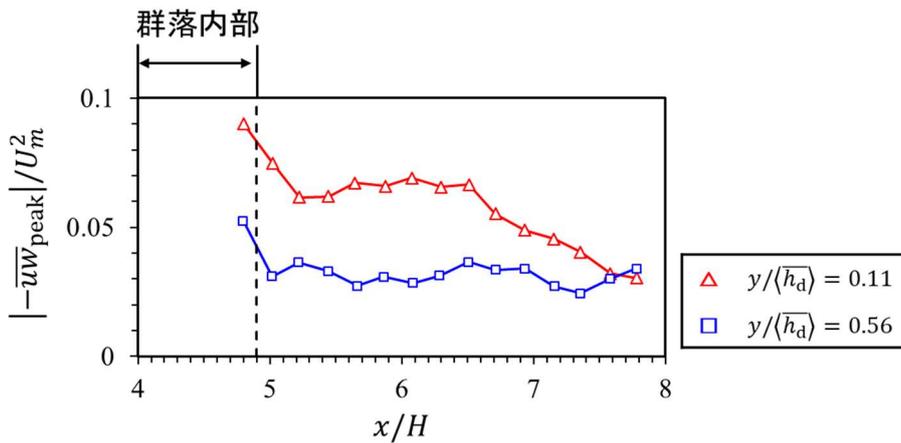


図-6.14 ピーク水平レイノルズ応力 $-\overline{uw}_{peak}$ の流下方向分布 (Case 3, $\langle h_d \rangle/H = 0.60$)

水平混合層 ($-\overline{uw} > 0$) が発達しており、右岸側と左岸側の混合層が合流することで水路中央付近における主流速の回復が引き起こされるものと考えられる。

図-6.14 に Case 3 ($\langle h_d \rangle/H = 0.60$) の後流域におけるピーク水平レイノルズ応力 $|\overline{uw}_{peak}|$ の流下方向変化を示す。全体的に、水路床近傍 ($y/\langle h_d \rangle = 0.11$) の方が植生先端付近 ($y/\langle h_d \rangle = 0.56$) よりもレイノルズ応力の値が大きくなっており、植生群落外縁近傍における横断方向の運動量輸送がより活発に行われていることが確認できる。これは、図-6.10 で考察したように、柔軟植生群落で発達する二次流の影響で、水路床近傍の方がその上部よりも主流速の横断方向勾配 ($\partial U/\partial z$) が大きくなり、乱れの生成が活発となるためと考えられる。

また、図-6.9 で示した鉛直方向せん断層と同様に、水平レイノルズ応力の絶対値 $|\overline{uw}|$ が各流下方向位置におけるピーク値の 10% 以上となる領域 ($|\overline{uw}| \geq |\overline{uw}_{peak}|$) を水平混合層として定義した。図-6.15 に Case 3 ($\langle h_d \rangle/H = 0.60$) における水平混合層の内縁・外縁位

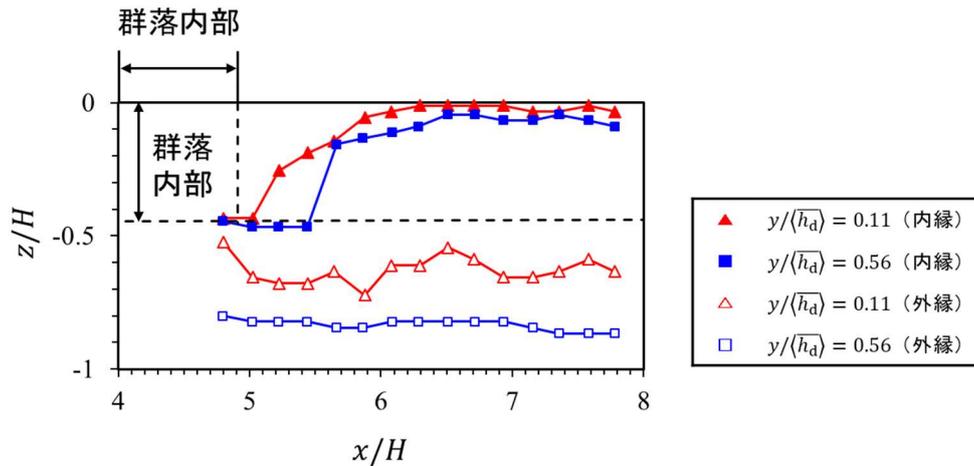


図-6.15 水平混合層の内縁・外縁位置 (Case 3, $\langle h_d \rangle / H = 0.60$)

置の流下方向変化を示す。いずれの鉛直位置でも、非植生域 ($z/H < -0.5$) の混合層外縁位置は流れの方向と概ね平行である一方、群落内部および後流域の内縁位置は流下方向に進むにつれて水路中央ライン ($z = 0$) に漸近する様子が確認できる。水路床近傍 ($y/\langle h_d \rangle = 0.11$) では横断方向流れ ($W > 0$) の影響で水平混合層の発達位置が水路中央寄りとなるため、植生先端近傍 ($y/\langle h_d \rangle = 0.56$) よりも先に混合層が水路中央近傍にまで浸透している。以上より、図-6.6 で見られた後流域の水路床近傍における急激な主流速の回復は、二次流および乱流混合による横断方向の運動量輸送によるものであると考えられる。

6.5 後流域の渦構造が浮遊砂堆積領域に及ぼす影響

(1) 植生群落背後の浮遊砂堆積領域

本節では、植生要素の剛性による平均流・乱流構造の変化が植生群落後流域の浮遊砂堆積状況に及ぼす影響について考察する。図-6.16 に各ケースの群落後流域における浮遊砂堆積状況を撮影した写真を示す。比較のため、3章 Case 4 における堆積状況についても示している。柔軟植生の4ケースでは、植生群落の下流に浮遊砂（淡褐色）が一様に堆積する領域が存在し、さらにその下流側には浮遊砂が鱗状に堆積する領域（非一様に堆積）が存在する。また、倒伏高さが比較的大きいケース（Case 3, 4）では、これらの堆積領域の間に浮遊砂が堆積せずに水路床（黒色）が剥き出しになる領域がみられる。

群落直下流の一様堆積領域の長さ L_{dep} は Case 1-4 においてそれぞれ $L_{\text{dep}}/H = 1.10, 1.84, 1.45$ および 1.08 となり、Case 3 において最大となった。図-6.7 より、後流 ($x/H > 4.9$) における主流速の回復についても Case 3 において最も緩やかであり、倒伏高さによる流れの遷移過程の変化がこのような堆積状況の変化を招いたと考えられる。また、剛体植生も含めて剛性の大きいケースほど堆積領域が細くかつ短くなっており、横断方向の運動量輸送の

6章 植生剛性による柔軟植生群落近傍の乱流構造および浮遊砂堆積の変化

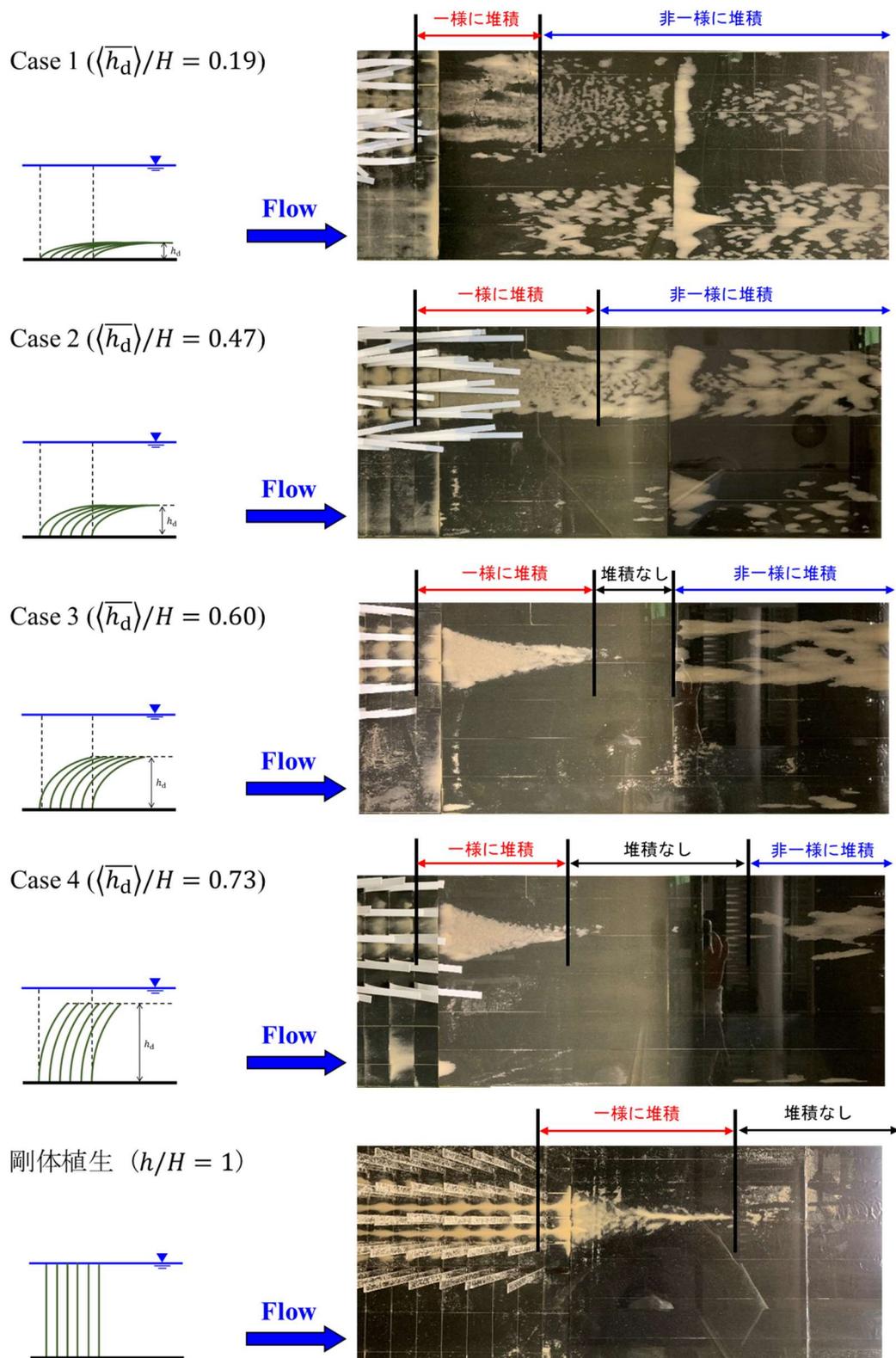


図-6.16 植生群落後流域における浮遊砂堆積状況

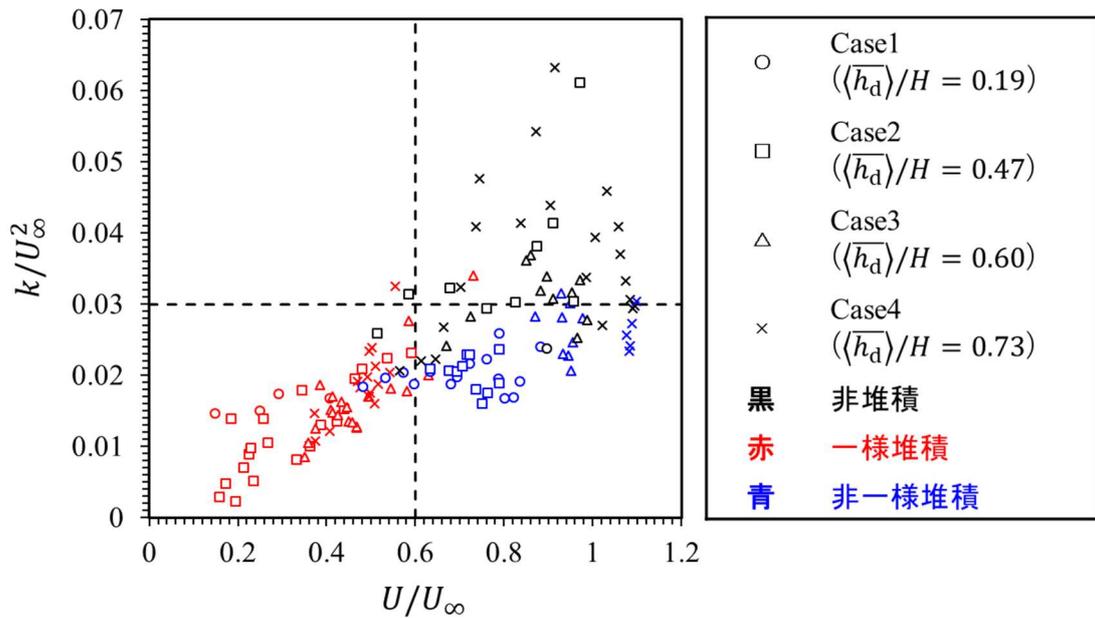


図-6.17 群落背後の堆積状況と主流速・乱れエネルギーとの比較

影響が大きいことが推測される。

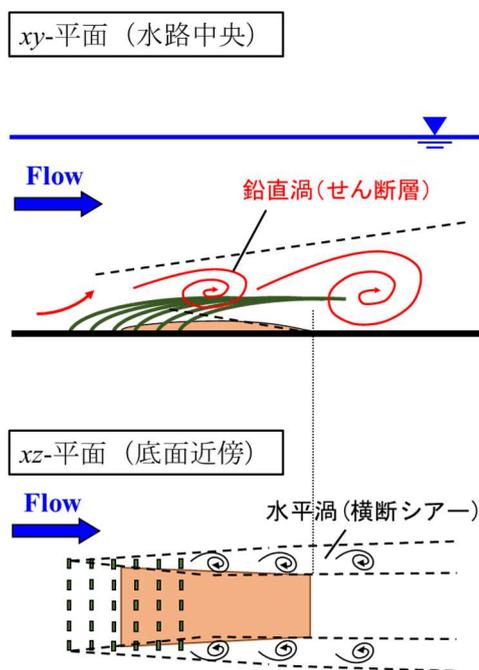
(2) 主流速・乱れエネルギー分布と堆積領域の比較

次に、流速計測結果と堆積状況の比較を行い、群落近傍の乱流構造と浮遊砂堆積領域の関連について考察する。3章で示した図-3.17と同様に、図-6.17に各計測位置 ($0 < x/H < 9$) における底層 ($y/H = 0.05, z = 0$) の平均主流速と乱れエネルギー (U, k) のプロット図を示す。ここで、乱れエネルギーは鉛直面 PIV によって計測された流速の2成分より算出した ($k \equiv \overline{(u^2 + v^2)}/2$)。また、図中の主流速および乱れエネルギーの値は、植生群落の十分上流の滑面上の底層 ($x/H = -4.0, y/H = 0.05$) における主流速 U_∞ を用いてで無次元化されている。また、図-6.16で示した一様堆積および非一様堆積領域における計測結果についてはそれぞれ赤色および青色で示し、浮遊砂堆積の見られなかった地点の計測データについては黒色で示している。

群落直下流では主流速および乱れエネルギーの両方が小さいため ($U < 0.6U_\infty, k < 0.03U_\infty^2$)、底層の浮遊砂は乱されることなく安定して堆積する。これに対し、その下流側の主流速が回復した領域 ($U > 0.6U_\infty, k < 0.03U_\infty^2$) では、砂漣のような非一様な堆積状況が発生している。また、乱れが活発な領域 ($U > 0.6U_\infty, k > 0.03U_\infty^2$) では浮遊砂の巻き上げ量が増加するため、水路床上に堆積する浮遊砂量が極端に減少する。このように、植生群落近傍の堆積領域は乱れエネルギーが比較的小さい領域と対応しており、植生群落近傍で発達する三次元的な乱流構造を反映するものと考えられる。

本研究で使用した浮遊砂粒子はウォッシュロードに相当するような粒径が小さい粒子

(a) 植生剛性の小さいケース
(Case 1)



(b) 植生剛性の大きいケース
(Case 2, 3 and 4)

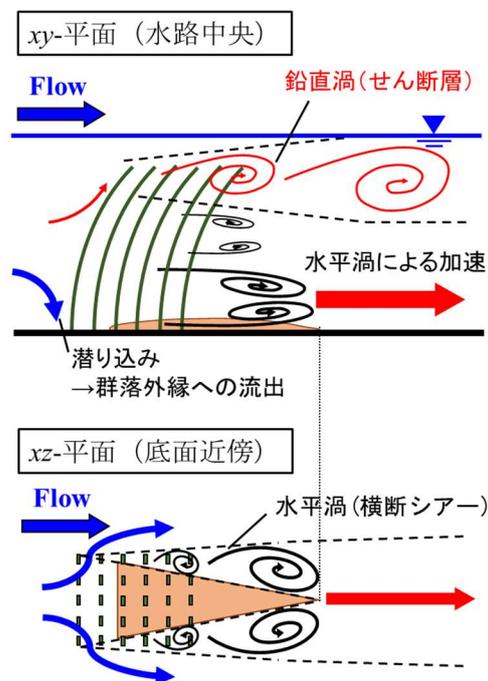


図-6.18 植生剛性による群落背後の乱流構造・浮遊砂堆積領域の変化

($d_p \leq 0.1-0.2 \text{ mm}$) であり、乱れへの追従性が比較的高いと考えられる。一方で、より粒径の大きい粒子の場合、浮遊砂ではなく掃流砂として輸送される粒子の割合が増加し、また乱れへの追従性も低下するため、粒子の輸送メカニズムが乱流構造よりも平均流構造の影響を強く受けることが予想される。このような粒径による粒子の乱流への追従性および堆積領域の変化については、今後も水理条件や粒子の粒径を幅広く変化させて考察する必要がある。

(3) 柔軟植生群落近傍の渦構造と浮遊砂輸送の現象モデル

最後に、柔軟植生群落背後の後流域における乱流構造と浮遊砂堆積の模式図を図-6.18に示す。植生剛性が小さく、植生要素の柔軟性が極めて高いケース (Case 1) では、倒伏高さが小さいため、植生先端付近の鉛直混合層で生成される乱れが底層にまで浸透する。その結果、鉛直方向の運動量輸送 ($-\overline{uv}$) によって主流速が再加速され、浮遊砂堆積が抑制される。これに対し、植生剛性が比較的大きい柔軟植生のケース (Case 2-4) では、倒伏高さが大きく、鉛直混合層で発達した乱れは底層にまで発達しない。その一方で、河床付近で主流速の横断方向勾配 ($\partial U/\partial x$) に起因する乱れの生成が活発となり、群落外縁近傍において水平混合層 ($-\overline{uw}$) が発達する。特に、植生剛性が中程度のケースでは、植生要素の倒伏によって

6.5 後流域の渦構造が浮遊砂堆積領域に及ぼす影響

群落近傍で二次流が発達し、群落背後における急激な主流速の回復を引き起こす。このように、植生剛性 (EI) による乱流・二次流構造の変化が流速の遷移過程および浮遊砂の堆積領域に影響を及ぼすことが明らかにされた。

6.6 結語

本研究では室内水路において PIV 流速計測と浮遊砂堆積実験を行い、柔軟植生要素の曲げ剛性、すなわち柔軟性が群落周辺における流れの遷移過程と乱流構造、および浮遊砂堆積に及ぼす影響について考察した。本研究を通じて得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 本研究で対象とした柔軟植生流れでは、剛体植生のケースと比較すると、鉛直方向の *Diverging flow* が弱まる一方、流れが植生要素の根元に潜り込んで横断方向に押し出される流れが強くなる。これにより、植生群落後流域の水路床近傍において横断方向せん断領域が形成される。
- 2) 鉛直面 PIV の結果より、剛体植生の場合と同様、植生先端付近の鉛直せん断層で鉛直レイノルズ応力が大きくなり、鉛直混合層が発達することが示された。また、水平面 PIV の結果より、植生剛性が大きく倒伏高さが比較的大きいケースでは水路床近傍において水平混合層が発達し、横断方向の運動量輸送が活発になることが明らかになった。その結果、後流域の水路床近傍では植生先端付近よりも先に主流速の回復が発生する。
- 3) 植生群落の直下流では時間平均流速および乱れの両方が小さく、浮遊砂が一様に堆積する。その下流側では、鉛直方向あるいは横断方向の乱流混合、あるいは群落近傍で発達する二次流による運動量輸送に伴って主流速や乱れが増加することで、浮遊砂が堆積しない領域や鱗状の非一様な堆積領域が分布する。

今後は浮遊砂堆積量の分布や横断面内における二次流構造の計測を行い、植生剛性が渦構造および浮遊砂輸送に及ぼす影響についてより詳細に検討していきたい。

参考文献

- 1) 藤田光一, 李参熙, 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.
- 2) Yamasaki, T. N., de Lima, P. H. S., Sliva, D. F., Preze, C. G. A., Janzen, J. G., and Nepf, H. M.: From patch to channel scale; The evolution of emergent vegetation in a channel, in *Water*

6章 植生剛性による柔軟植生群落近傍の乱流構造および浮遊砂堆積の変化

Resources, Vol.129, pp.131–145, 2019.

- 3) 原田守啓, 永山滋也, 大石哲也, 萱場祐一: 揖斐川高水敷掘削後の微地形形成過程, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, I_1171-I_1176, 2015.
- 4) 赤堀良介, 春日井勇輝: 植生内の流れの構造と浮遊砂堆積状況の関連について, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2, I_753-I_760, 2014.
- 5) 内田崇浩, 木村一郎, 川村里美, 清水康行: 植生の消長を考慮した河床地形に関する数値解析的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, I_1147-I_1152, 2015.
- 6) 田中貴幸, 大本照憲, 斉藤俊貴: 流下方向に非植生域を有する種々の植生配置条件が開水路の乱流構造に与える影響, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I_565-I_570, 2016.
- 7) 八木郁也, 内田龍彦, 河原能久: 大規模洪水時における河岸侵食箇所の三次元流況と乱れエネルギー分布の数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.1, I_404-I_413, 2020.
- 8) 横嶋哲, 河原能久, 山本拓也, 松原功馬: 樹木群を有する直線開水路流れにおける大規模水平渦の特性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_877—I_882, 2013.
- 9) Caroppi, G., Västilä, K., Gualtieri, P., Järvelä, J., Giugni, M., and Rowiński, P. M.: Comparison of flexible and rigid vegetation induced shear layers in partly vegetated channels, *Water Resour. Res.*, Vol.57, e2020WR028243, 2021.
- 10) 大本照憲, 福井洋幸, 林俊一郎: 水生植物を伴う流れの三次元構造について, 水工学論文集, Vol.42, pp.427–432, 1998.
- 11) Marjoribanks, T. I., Lague, D., Hardy, R. J., Boothroyd, R. J., Leroux, J., Mony, C., and Puijalon, S.: Flexural rigidity and shoot reconfiguration determine wake length behind saltmarsh vegetation patches, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, Vol.124, pp.2176–2196, 2019.
- 12) Ortiz, A. C., Ashton, A., and Nepf, H.: Mean and turbulent velocity fields near rigid and flexible plants and the implications for deposition, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, Vol.118, pp.2585–2599, 2013.
- 13) Hu, Z., Lei, J., Liu, C., and Nepf, H.: Wake structure and sediment deposition behind models of submerged vegetation with and without flexible leaves, *Advances in Water Resources*, vol.118, pp. 28-38, 2018.
- 14) Luhar, M., and Nepf, H. M.: Wave-induced dynamics of flexible blades, *J. Fluids and Structures*, Vol.61, pp.20–41, 2016.

第7章

結論

本研究は植生群落あるいは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たものである。まず、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・種子の輸送過程を想定し、粗面上および内部における乱流の組織構造および浮遊粒子の輸送過程について考察した。次に、第3-4章では河道内に剛体植生群落が多量に存在する流れ場を対象に植生高さおよび群落幅を変化させた幅広い実験条件下で PIV 流速計測を実施し、植生群落近傍の三次元的な乱流構造および物質輸送過程の解明を試みた。また、第5-6章では植生要素が柔軟性を有する場合の流れ場を対象に、柔軟植生要素の柔軟性、すなわち曲げ剛性による乱流構造および浮遊砂堆積の変化について考察した。以下に本論文の結論として各章の要約を示す。

第1章では本研究の背景や先行研究について踏まえたうえで、研究目的と本論文の構成の概要について説明した。まず、河川管理の現状や課題について概説し、土砂・河道内植生動態の予測や河道内樹林の適切な管理を実現するためには、基礎的な水理現象の解明が不十分である点を指摘した。また、河川水理学や流体力学に関する主要な先行研究を紹介し、開水路流れにおける運動量・物質輸送メカニズムの解明に乱流現象の理解が不可欠であることを述べた。

第2章では礫床河川を模擬した半球粗度上の開水路流れを対象に PIV 計測を行った。本研究では計測部のレーザー照射面とカメラとの間の粗度要素として低屈折率かつ透明な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礫床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）と Ejection（低運動量流体の上方への輸送）が周期的に発生する大規模な乱流の組織構造が存在することが示された。このうち、粗面近傍で発生する Sweep が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が引き起こされることが示唆された。また、粒子投入実験における浮遊粒子挙動の観察から、水路床上の粒子の浮上（Particle entrainment）は Sweep の粗度要素への衝突によって誘発される一方で、粗度高さよりも上部では粒子の上方への輸送が Ejection によって引き起こされることが示唆された。

第3章では水路中央に剛体植生群落が多量に存在する流れ場を対象に、PIV による乱流計測と浮遊砂堆積状況の観察を行った。本研究では植生群落近傍の乱流特性を決定するパラメータ

7章 結論

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 ケースを実験条件として設定した。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底層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 ($-\overline{uv}$) 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浸透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における浮遊砂の堆積状況に影響を及ぼす可能性が示された。

第 4 章では群落幅の異なる 4 通りの片側水没植生流れを対象に鉛直面 PIV および水平面 PIV を実施し、群落幅が鉛直・水平混合層の発達過程や二次流構造に及ぼす影響について考察した。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。その一方で、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 のケースで最大となる。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反時計回りおよび時計回りの渦状二次流が形成される。鉛直・水平レイノルズ応力の横断面分布から、本水理条件下では鉛直渦 ($-\overline{uv}$) の方が水平渦 ($-\overline{uw}$) よりも卓越領域が広く、運動量輸送および二次流の発達過程においてより重要な役割を担うこと示唆された。

第 5 章では柔軟植生素を水路床上に一樣に配置した開水路流れを対象に水路実験を行い、植生素の柔軟性による植生揺動メカニズムおよび乱流構造の変化について考察した。PIV による乱流計測と同時に PTV による植生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。かぶり水深比の異なるケース間の流速計測結果の比較から、かぶり水深比の大きいケースほど柔軟植生上で発達する乱流構造の流下方向スケールが増加することが示された。また、かぶり水深比の大きい水理条件では、Monami と呼ばれる植生揺動の組織的な揺動形態が観察され、このことから柔軟植生上で流下方向に伸びた大規模な組織乱流構造が発達することが示唆された。

第 6 章では第 3 章と同じ配置の水路中央に遍在する柔軟植生群落を対象とし、植生素の柔軟性(曲げ剛性 EI)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・水平面 PIV 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素が大きく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、群落背後の水路床近傍に横断方向せん断領域 ($\partial u/\partial z$) が形成される。その結果、乱流混合による横断方向の運動量輸送 ($-\overline{uw}$) が活発になり、後流域の水路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 ($\partial u/\partial y < 0$) が形成される。また、浮遊砂投入実験の結果から、群落後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。

最後に、本研究の問題点と今後の課題について列挙する。

1. 2章では、半球粗度を千鳥格子状に配置した単純な粗度流れを対象に、各粗度要素近傍の流れ場について現象解明を行った。一方で、実際の礫床河川における粒子の輸送メカニズムを明らかにするためには、粗面の条件（粗度高さ、形状、配置等）を幅広く変化させて乱流構造や粒子輸送過程の変化について調べる必要がある。
2. 3-4章および6章では有限長の植生群落近傍の乱流構造や二次流の発達過程について調べたが、群落長さによって平均流構造の遷移過程や乱れの発達度が変化すると考えられる。本研究では各実験において1通りの群落長さのみを対象としているが、今後は群落長さを系統的に変化させることで流れの発達過程が乱流・二次流構造および浮遊砂堆積領域に及ぼす影響について考察する必要がある。
3. 3章および6章の浮遊砂堆積実験では、植生群落内部および背後における浮遊砂の堆積状況を目視により観察し、PIVによって明らかになった乱流・二次流構造との比較を行った。今後は浮遊砂堆積実験において堆積厚さや単位面積当たりの堆積重量を計測し、その空間分布を明らかにすることで、植生群落近傍における浮遊砂輸送への移流および乱流混合による寄与の定量的な評価を試みる。また、粒径の異なるケースや混合粒径のケースを対象に移動床実験を実施することで、乱流と土砂輸送の相互作用に関するより実用的な知見を得られる可能性がある。
4. 4章および6章では鉛直面PIVおよび水平面PIVによって水路内に遍在する植生群落近傍の二次流構造を明らかにしたが、このような二次流の形成メカニズムの解明には至っていない。本研究および既往研究の結果から、鉛直混合層および水平混合層の発達に伴う非一様な乱流構造が植生群落近傍の二次流の発達と関連しているものと推測される。今後は流下方向位置の異なる複数の横断面について二次流計測を実施し、平均流・乱流の遷移過程と二次流の発達過程の比較を行うことで、二次流の生成メカニズムについてより詳細に検討していく。
5. 5章では1縦断面内に対するPIVを通じて柔軟植生流れにおけるMonamiと乱流の組織構造の相互作用について考察した。一方で、植生流れではSub-channel構造とよばれる横断方向に非一様な乱流構造が発達することが知られている。このような乱流構造の空間スケールを明らかにするために、水平面内の流速計測などを通じて乱流構造やMonamiの横断方向スケールの評価、およびかぶり水深比(H/h)がSub-channel構造の発達に及ぼす影響について考察する必要がある。

7 章 結論

(付録) 本論文に関連する論文リスト

【学位論文内容に関する主要査読付き論文】

1. **Matsumoto, K.**, Okamoto, T., and Sanjou, M.: Particle entrainment by bursting phenomena in open-channel flow over rough bed, *Environmental Fluid Mechanics*, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s10652-024-09986-w> (published online)
2. **松本知将**, 岡本隆明, 山上路生, 高田真志: 片側水没植生群落近傍の乱流・二次流構造と群落幅の影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 16, 23-16080, 2024.
3. **松本知将**, 岡本隆明, 山上路生, 岡田啓頌, 赤堀良介: 植生群落近傍の渦構造・浮遊砂堆積に与える植生剛性の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 78, No. 2, I_595-I_600, 2022.
4. **松本知将**, 岡本隆明, 赤堀良介, 山上路生: 植生高さによる乱流構造の遷移過程の変化およびその浮遊砂堆積への影響について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 77, No. 2, I_715-I_720, 2021.
5. 岡本隆明, **松本知将**, 大石哲也, 山上路生, 岡崎拓海: 半球粗度まわりの乱流構造が種子捕捉過程に与える影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 76, No. 1, pp. 118-128, 2020.

【学位論文内容に関するその他論文等】

1. **Matsumoto, K.**, Okamoto, T., and Sanjou, M.: Influence of vegetation height on turbulence structure and sediment deposition, *Proc. of the 40th IAHR World Congress*, Vienna, pp. 625-630, 2023.
2. **Matsumoto, K.**, Okamoto, T., and Sanjou, M.: PIV measurement of turbulent flow and particle motion over a rough wall, *Proc. of 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Osaka (online), paper 327 (6 pages), 2022.

謝辞

本論文の執筆，および博士後期課程の研究を進めるにあたり，多くの方々よりご指導・ご鞭撻を賜りました．ここに謝意を表します．

まず，本研究を遂行するにあたり，懇切丁寧なご指導を賜りました京都大学防災研究所気象・流域災害研究部門教授 山上路生先生に心より感謝の意を表します．先生には研究の方向性や実験手法について日頃より親身になってご指導いただいただけでなく，研究者として必要な心構えや姿勢についてもご教示いただきました．ここに重ねてお礼申し上げます．

京都大学防災研究所気候変動適応研究センター教授 川池健司先生および京都大学防災研究所気象・流域災害研究部門教授 中谷加奈先生には，ご多忙の中本論文を審査していただき，実際の河川・土砂管理への応用の観点から有益なご指摘をいただきました．心より感謝申し上げます．

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 後藤仁志先生にはご多忙の中，本研究で試みた基礎的な現象解明における理論的背景の重要性についてご教示いただきました．心より感謝申し上げます．同教授 立川康人先生には博士後期課程での研究や生活について，日頃より励ましの言葉をいただきました．深く感謝いたします．

京都大学名誉教授 戸田圭一先生には修士課程までの3年間にわたってご指導いただき，研究を進めていくうえで必要な資質や姿勢についてご教示いただきました．感謝申し上げます．名城大学理工学部准教授 岡本隆明先生には私が研究室に配属された当初より，水路実験や乱流解析手法の基礎から論文の添削に至るまで，丁寧にご指導いただきました．深く感謝申し上げます．九州大学大学院総合理工学研究院教授 杉原裕司先生には九州大学筑紫キャンパスにて共同実験をする機会を頂き，基礎研究の面白さを改めてご教示いただきました．心より感謝いたします．ラフバラ大学上級講師 Tim Marjoribanks 先生には，本論文の研究計画について有益なご助言をいただきました．深く感謝いたします．

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 岡崎拓海氏（現・大阪ガス）には，研究室配属当初の私に水路実験の基礎や解析手法について丁寧にご指導いただきました．深く感謝いたします．また，本論文を作成するうえで，実験の準備および実施，データ解析等で長時間にわたりご協力をいただいた京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 岡田啓頌氏（現・西松建設），高田真志氏，小川峻司氏，および京都大学工学部地球工学科 松浦祿蔵氏（現・Septeni Japan）をはじめとする，京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 水際地盤学分野研究室の皆様にも心からお礼を申し上げます．

最後に，博士後期課程へ進学時から在学中に至るまで，経済的・精神的に支えてくれた家族に感謝の意を表して，謝辞に代えさせていただきます．