

樹林化進行過程における浮遊砂輸送に関する 数値的検討技術の開発

Development of Numerical Technique for Suspended-sediment Transport on the Process of Excessive Growth of Riparian Vegetation

赤堀 良介¹

Ryosuke AKAHORI

¹ 愛知工業大学 工学部都市環境学科 准教授

要 旨

我が国の多くの河川で、近年の樹林化の進行が報告されている。河道の樹林化は、流路の抗力を増加させ治水安全度を低下させることが危惧されており、その対策は河川管理上の急務となっている。これまで、洪水攪乱頻度の低下や低水路の河床低下など、様々な水理的要因がその理由として検討されているが、ひとつの知見として、樹林化の過程では植生域での細粒土砂の安定化が重要であることが指摘されており、事態を予測・検討する上で、植生周辺での浮遊砂挙動の理解が必要となる。

本研究では、この植生内での流れの構造が有する空間的なスケールと、浮遊砂粒子の輸送特性との相対的なスケールが変化した場合の関連性に着目し、主に浮遊砂粒子の堆積が生じるメカニズムについて、杭群の直径や密生度を変化させた水理実験により検討を行った。その結果、植生内での堆積の発生が、Stokes数に代表される流れのスケールと粒子のスケールの関係に依存すること、またそのような流れのスケールはStrouhal数を用いて得られた植生構成要素の後流の周波数から評価可能であることが推測された。後者に関しては数値計算結果から局所的に算定可能な数であることから、植生内での浮遊砂の挙動の数値モデル化に際して、上記の知見が有益な情報をもたらすと考えられる。

《キーワード：樹林化；植生；浮遊砂》

1.はじめに

我が国の多くの河川で、近年の樹林化の進行が報告されている。道内の河川も例外ではなく、十勝川水系の最大支流の札内川などで急激な樹林化の進行が確認されている。札内川では、以前は礫河原が広がり複列砂州の網状流路が形成されていた。しかしながら最近の数十年間で、低水路の直線化や流路の固定化、単列砂州化が急激に進行し、それと同時に河道内植生の樹林化が顕著に現れた結果、札内川の特徴であった礫河原が急速に消失している¹⁾。河道の樹林化は、流路の抗力を増加させ治水安全度を低下させることが危惧されており、その対策は河川管理上の急務となっている。これまで、洪水攪乱頻度の低下や低水路の河床低下など、様々な水理的要因がその理由として検討されているが、ひとつの知見として、樹林化の過程では植生域での細粒土砂の安定化が重要であることが指摘されており²⁾、事態を予測・検討する上で、植生周辺での浮遊砂挙動の理解が必要となる。

植生と土砂輸送の関連に関しては、これまで植生群としての包括的な検討を中心に研究が進展してきた。谷ら³⁾による検討は、植生域に類似する密生した杭により構成された水制周辺での浮遊砂の挙動が、杭後流に影響を受けたものである事を示しており、その成果は浮遊砂の杭群周辺での拡散係数を杭群の有する空間的スケールで代表させることを試みるものであった。ただし、杭や杭間隔などの空間的スケールを浮遊砂拡散係数のパラメータとして用いることの妥当性に関しては検討が十分ではなく、植生や杭周辺での微細なスケールでの浮遊砂輸送のメカニズムの検討が必要とされていた。

本研究では、この植生内での流れの構造が有する空間的なスケールと、浮遊砂粒子の輸送特性との相対的なスケールが変化した場合の関連性に着目し、主に浮遊砂粒子の堆積が生じるメカニズムについて、杭群の直径や密生度を変化させた水理実験により検討を行った。

2.研究手法

本研究では寒地土木研究所第4実験棟内(札幌)に設置された水路により実験を行った。実験施設の概要を図-1に示す。水路は長さ15m、幅0.6m、高さ0.3mとし、主要部材は木材で構成した。下流端から6.0mから7.5m区間はPIV計測のため透明なアクリル部材により構築した。水路下流端には2.0m³程度の容量を有する水槽を設置し、水中ポンプ(鶴見製作所製KRS-63)により上流端から循環通水を行った。植生を模した透過性構造物として直径1cmの真鍮製円柱を千鳥状に並べて設置した。植生模型のおおよその配置状況と砂面計計測結果座標軸の設定を図-2に示す。水路床勾配は1/2000に固定し、下流端の堰上げの高さを調節し水深を9.3cm前後に設定した。本実験における実験条件を表-1に示す。

実験では杭の直径(3mm、10mm)及び杭群の密生度(密、中、粗)を変化させた際の浮遊砂の挙動を観測し、杭群後流における浮遊砂輸送のメカニズムをPIV(Particle Image Velocimetry)解析により検討した。杭の配置条件を表-2に示す。水理条件が同じと仮定すると、同じ密生度であれば杭径によらず植生域に働く抗力はほぼ等しく、時間平均的な流れの分布は類似したものとなる。一方で、密生度が同等でも杭径が異なるケース間では、杭径に規定された後流により乱れの空間的なスケールが異なることが期待される。本研究における着目点である粒子に対する乱れのスケールの相対的な違いは、この杭の後流のスケール差により設定した。なお本研究では、PIVにおいて2種類の異なる粒子を使用した。一つ目の粒子は、比重1.02、粒径0.49mmの樹脂製粒子(三菱化学製:ダイヤイオンHP20)であり、流れ場の構造の把握を目的として使用した。二つ目の粒子は、比重約1.40、粒径0.14mmのPVC(塩化ビニル)粒子であり、浮遊砂のモデル粒子として用いた。これら粒子の条件を表-3に示す。また植生域での後者の堆積状況を確認するため、PVC粒子を用いた実験では、通水が安定した後に植生模型を設置し、そこから1時間程度放置した後にアクリル区間底面下からスチル写真を撮影した。さらに、通水終了後に湛水した状態から徐々に水路内を排水し、水路床に堆積したPVC粒子の基準面からの高さをレーザー砂面計により計測した。

本実験では水平に照射したレーザーシートの高さを変更することで、 $z=2.0\text{cm}$, 4.0cm , 8.0cm の計3層での流況撮影とPIV解析を行い、空間的な流れ場の把握を試みた。PIV解析には、市販のシステム(カトウ光研製FlowExpert)を用いて直接相互相関法を適用した。可視化光源としてYAGレーザー光源（日本レーザー製DPGL-8W）を用いたほか、PIV撮影機材として高速カメラ（Photoron 製Fastcam SA3）を使用し、撮影画素数を $1028 \times 1028\text{pixel}$ 、フレームレートを 250fps 、撮影時間を 10s 程度とした。 Δt （撮影時間間隔）の算定式(1)⁴⁾に $z=0.04\text{m}$ での杭後流せん断域での代表的な値（ $U = 0.1\text{m/s} - 0.15\text{m/s}$ ）と上記の撮影条件（ $\alpha = 0.0001\text{m/pixel}$ ）、および一般的な値（ $X_m = 5\text{pixel/frame}$ ）を代入すると、 $\Delta t = 0.0033\text{s} - 0.005\text{s}$ すなわち $200\text{fps} - 300\text{fps}$ となることから、本実験でのフレームレート等の設定は妥当であると考えられる。ここで U は想定される平均速度、 α は撮像面と物理平面の変換係数、 X_m は画像上の平均移動量である。

$$\Delta t = \alpha \Delta X_m / U \quad (1)$$

PIV解析により得られた流れ場の時空間的情報に対して、代表点の横断方向流速成分の時間変動を抽出した。これに対しFFT(高速フーリエ変換)を用いてスペクトル解析を行うことで、流れ場の乱れのスケールを検討した。

3.実験結果

(1) 浮遊砂粒子堆積状況の概況

ここでは表-2に示したケースのうち、杭径と密生度の設定から、代表して杭径 3mm かつ密生度が密、杭径 3mm かつ密生度が粗、杭径 10mm かつ密生度が密のケースの結果を示すものとする。以降、これら3ケースを、 3mm 密、 3mm 粗、 10mm 密と呼ぶ。図-3は、これらケースにおける通水終了時の浮遊砂粒子堆積状況をアクリルの底面の下から撮影したもの（反転表示）であり、図-4は通水中における堆積状況を 3mm 密、 10mm 密に関して拡大して示したものである。

まず、 3mm 密と 10mm 密の差異を見ると、 3mm 密では個々の杭の下流側を中心として植生域全体に粒子が堆積している部分が観察されるが、 10mm 密ではほとんど堆積が生じていないことが分かった。また 3mm 密と 3mm 粗の比較では、 3mm 密では各杭の下流側ごとに局所的にV字型に粒子の堆積が見られたのに対して、 3mm 粗の場合は杭を流下方向に繋いだ直線上に粒子の堆積が見られた。全体的に見た場合は、 3mm 密のケースでは植生領域内に高密度で杭が存在しているため、浮遊砂の堆積も領域内全体に均等に広がっているように見えるが、 3mm 粗の場合は杭群の設置数が少なく、特定の直線上に粒子が偏在した。

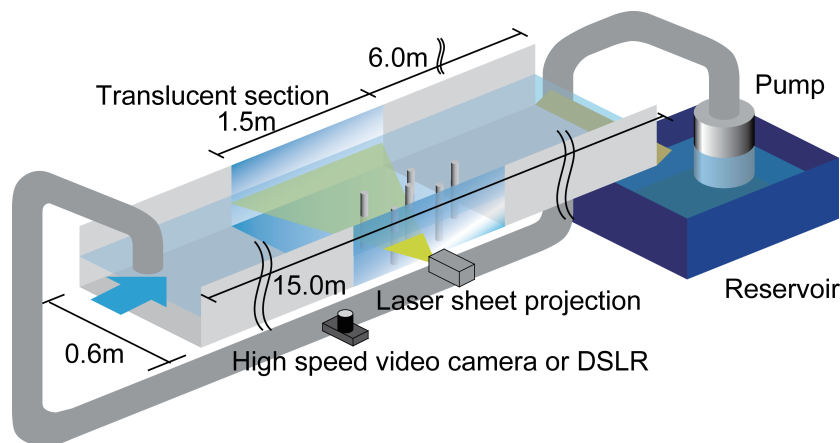


図-1 実験水路の概要

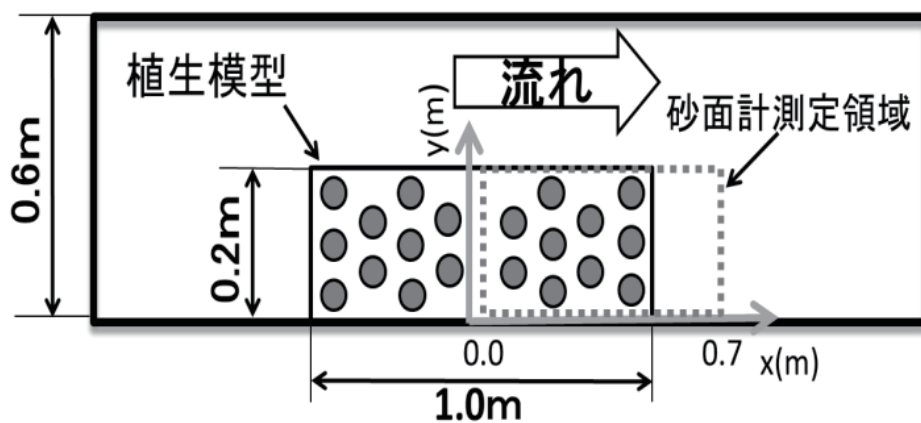


図-2 植生模型の設置状況および砂面計計測結果座標軸の設定

表-1 実験条件

長さ	幅	傾き	平均水深	流量
15m	0.6m	1/2000	0.093m	10.4l/s

表-2 杭の配置条件

杭径	縦(列)	横(数)	本数	杭群密生度
3mm	32	6	192	2.880→密
3mm	15	3	45	0.675→中
3mm	10	2	20	0.300→粗
10mm	17	3	51	2.550→密
10mm	7	2	14	0.700→中
10mm	3	2	6	0.300→粗

表-3 PIVに用いた粒子の物性値

材質	比重	平均粒径	Stokes数	沈降速度
HP20	1.02	0.49mm	0.202	0.001m/s
PVC	1.40	0.14mm	0.023	0.004m/s

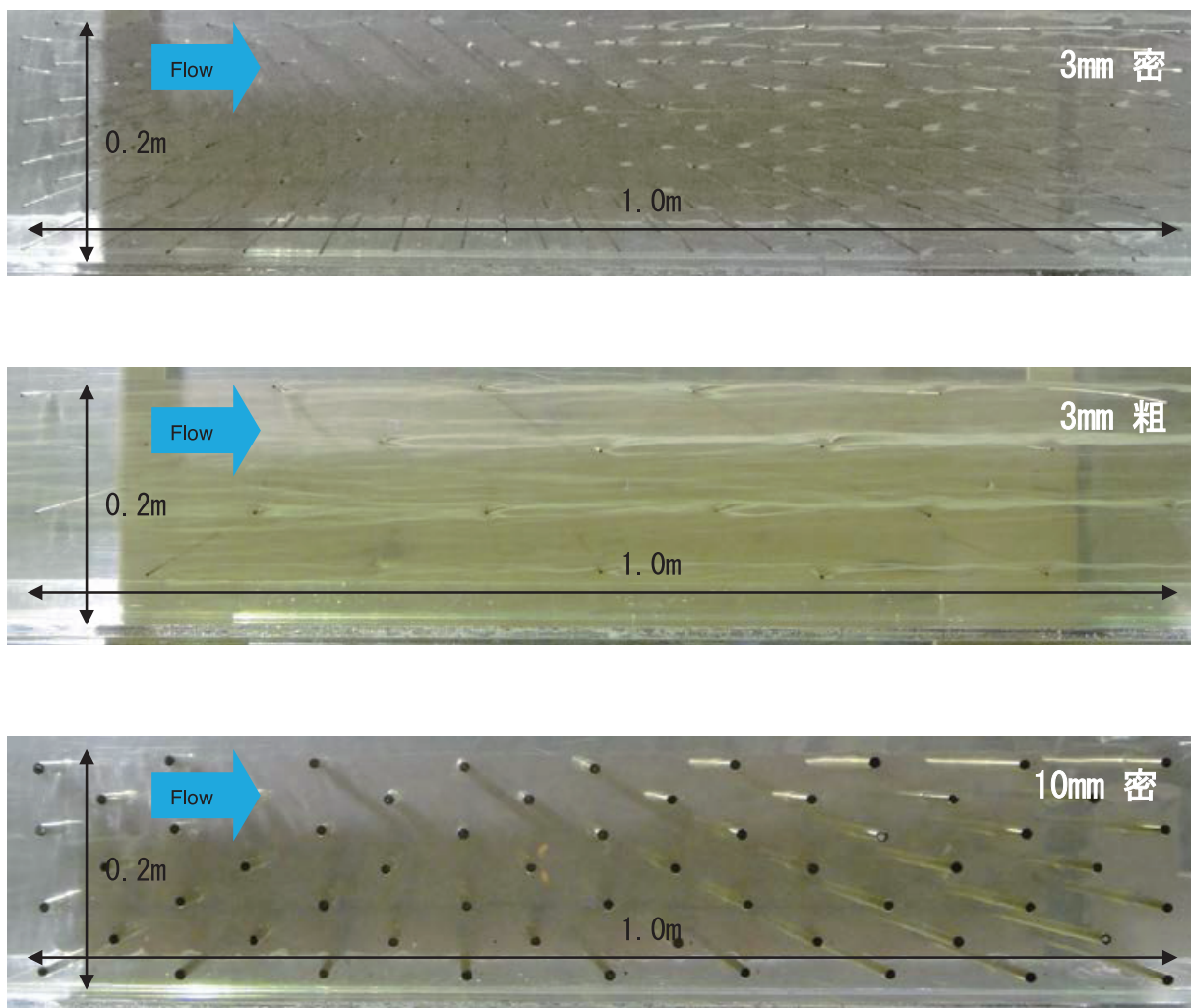


図-3 通水1時間後の浮遊砂粒子（PVC）の堆積状況：上）3mm密，中）3mm粗，下）10mm密（アクリル底面の下から撮影したものを反転）

図-3で示した結果に対し，レーザー砂面計により粒子の堆積高さを計測した結果を図-5に示す．どのケースにおいても，粒子の堆積量はわずか，もしくは堆積が無いという結果であるが，3mm粗においては数値の上で堆積状況が確認出来るのに対し，3mm密のケースに関しては，明確な堆積は計測されなかった．また10mm密のケースでは図-3と同様に堆積はほとんど確認出来なかった．

これらの結果から，目視で粒子の堆積が確認されたのが3mm密と3mm粗のケースであり，砂面計による計測で数値的に実測されたのが3mm粗のケースとなった．ただし，砂面計の計測に関しては，計測を行った際の横断方向の測線間隔等の影響も考えられることから，今後の詳細な検討が必要とされる．

(2) PIV解析からの検討

次に， $z=4.0\text{cm}$ の平面（水深の40%程度）で撮影された実験の動画に対してPIV解析を行い，流速の変動および空間分布におけるパターンを求めた．おおよその解析範囲は図-2に示された植生設置域のうち，下流端部分の約9cm四方のエリアである．

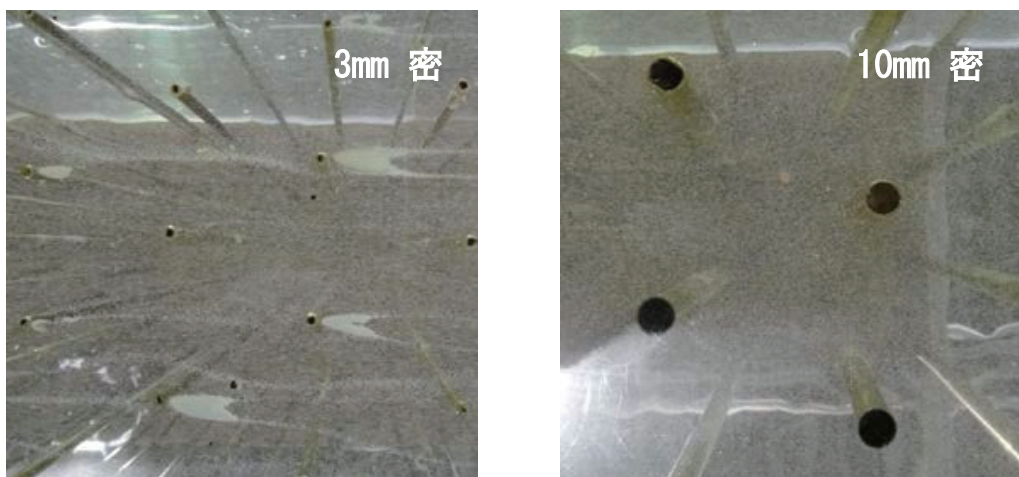


図-4 通水中の浮遊砂堆積状況の拡大：左) 3mm密, 右) 10mm粗

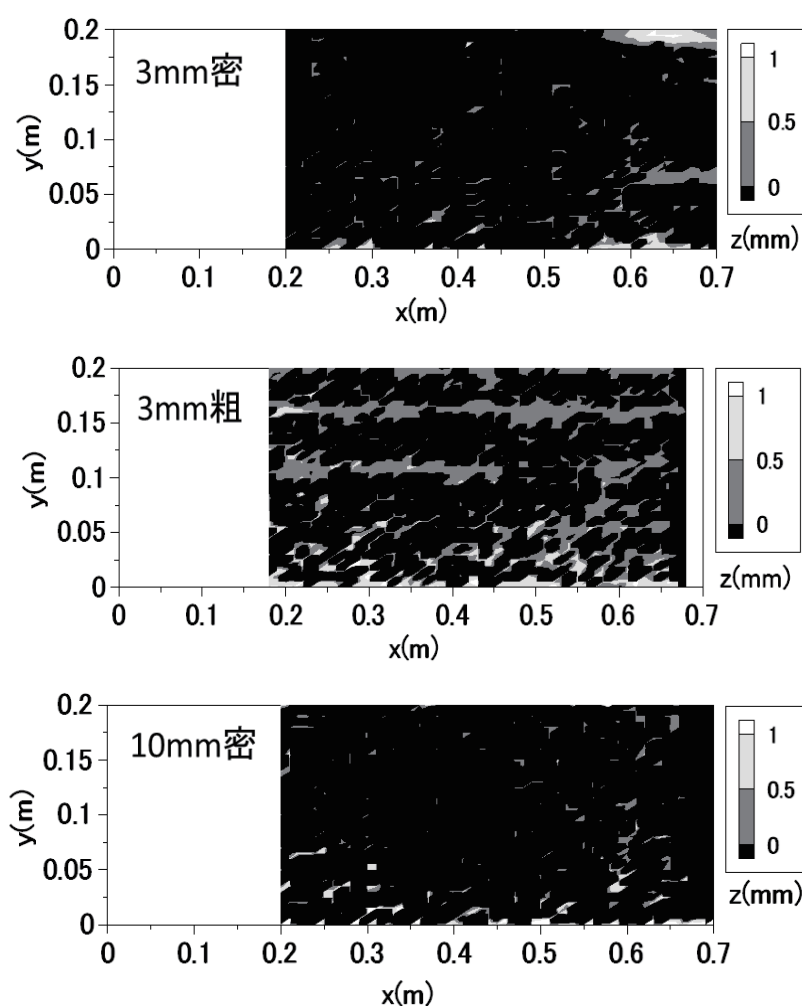


図-5 レーザー差面計による堆積高の計測結果：上) 3mm密, 中) 3mm粗, 下) 10mm密

図-5は、中立粒子(HP20)を用いた実験に対するPIV 結果に関して、 $z=4.0\text{cm}$ 平面における横断方向流速成分の瞬間値を抽出し、コンター図として示したものである。色の反転状況を目視することで、流速の正負の分布状況が確認可能であり、渦のような乱流中の大規模な構造が現れていると考えられる。

まず3mm密と10mm密の解析結果の比較であるが、3mm密のケースでは領域全体に空間的に細かい変動のパターンが見られるのに対し、10mm密のケースでは、その変動のパターン自体が相対的に大規模なものとなっていることがわかる。また、3mm密と3mm粗の解析結果の比較から、3mm粗のケースでは、杭下流側周辺に限られた幅で細かな変動パターンを生じており、その他の領域では3mm密と比べて比較的に変動のパターンが大きい形態を示していることがわかる。

ここでは上記の目視による検討に加えて、図-5内の×印箇所における点での、PIV解析された流速の時系列データ（ここでは横断方向成分）の変動に対してFFT(高速フーリエ変換)を用い、スペクトル解析を行った。この結果を示したものが図-6である。

3mm密、10mm密の解析結果の比較から、10mmのケースではピークが低周波側に位置するのに対し、3mmのケースではそれよりも高周波側にピークが位置している事が示された。3mm密と3mm粗の解析結果の比較では、どちらも同様に高周波にピークを有しており、変動については顕著な差異は見られなかった。

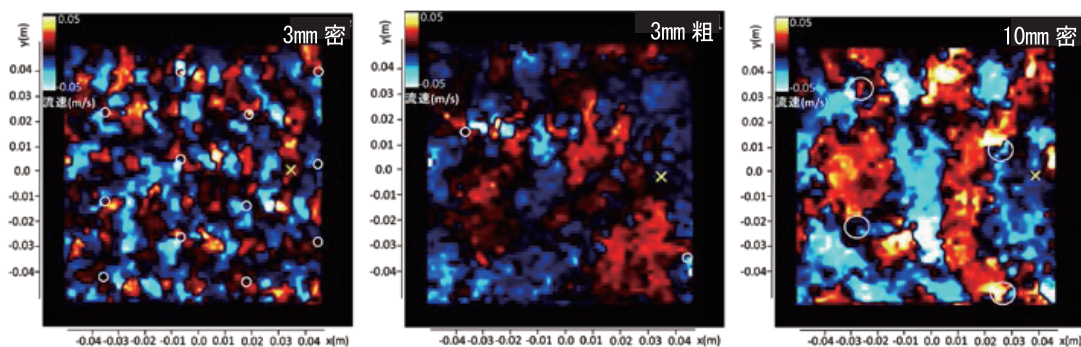


図-5 中立粒子(HP20)に対する $z=4.0\text{cm}$ 平面でのPIV解析結果、横断方向流速のコンター図として示す：
左) 3mm密、中) 3mm粗、右) 10mm密

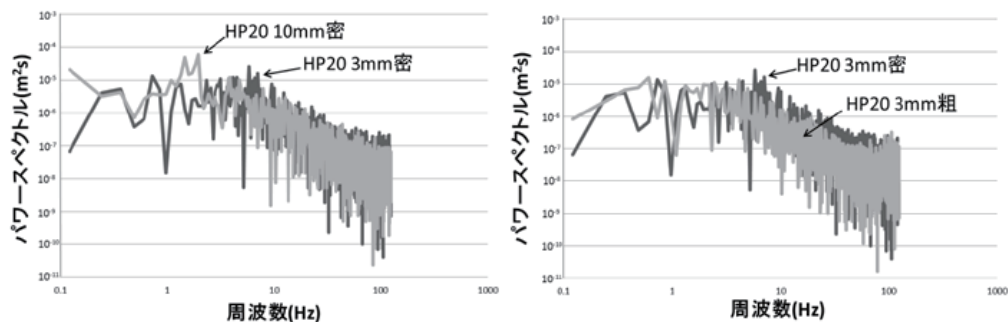


図-6 PIV解析結果の流速の変動（横断方向成分）に対するスペクトル解析の結果、
図-5中の×印箇所での変動に対して：左) 3mm密と10mm密の比較、右) 3mm密と3mm粗の比較

これらより、粒子の堆積が見られた3mm密、3mm粗のケースでは乱れのスケールが相対的に小さく（高周波にピーク）、粒子の堆積がいっさい見られなかった10mmのケースでは乱れのスケールが大きい（低周波にピーク）ことが示された。

次にStrouhal数 (S_t) を含む式(2)を用いて杭の後流の周波数を確認することで、上記の変動が植生を構成する杭要素の後流に由来することを確認する。

$$S_t = fd_p / U \quad (2)$$

ここで、 d_p は杭の直径、 U は杭周辺の流速、 f は物体後流の周波数である。

$S_t=0.21$, 杭の直径 d_p をそれぞれ 0.003m, 0.01m とし, PIV解析より得られた各ケースの流速 $U=0.089\text{m/s}$ (3mm密), 0.140m/s (3mm粗), 0.077m/s (10mm密) を用いて周波数を算出すると, 物体後流の周波数 f は, それぞれ $f=6.230\text{Hz}$, 9.800Hz , 1.617Hz となった. また, 図-6の解析結果で示された各杭の周波数のピーク値は, 3mm密で $f=5.859\text{Hz}$, 10mm密で $f=1.953\text{Hz}$ であった. 3mm粗についてはピーク値が明瞭でないため除外した.

ここで表-4により Strouhal数で求めた物体後流の周波数と解析で示された物体後流のピーク周波数を比較すると, 3mm粗を除いて3mm密の場合も10mm密の場合も, おおよそ両者が一致することが分かった.

以上より, 図-6で示された周波数のピークの位置が, Strouhal数で算出した値とほぼ一致することから, 浮遊砂粒子の植生域内での堆積を左右する乱れのスケールが, 植生を構成する杭の後流のスケールに依存していることが示された.

(3) 流れのスケールと粒子の応答に関して

ここまでの検討により, 流れの空間的構造が大きい状況では浮遊砂粒子の堆積が生じず, 構造が小さくなると植生域に堆積が生じることが確認された. 次に, 流れと粒子の相対的スケール比を定量的に検討するために, Stokes数を用いた検討を行う.

まず, 中立粒子 (HP20) に対するPIV解析の結果を時間平均したものから, 横断方向の一系列での流下方向流速の分布を抽出する. この際, 図-5に示したPIV計測領域の中から代表の杭列を一系列選び, そこからの相対的な流下方向の距離 $1d$ (杭直径を1倍した距離だけ, 代表の杭列から下流の位置) もしくは $4d$, $5d$ (直径の4倍もしくは5倍下流の位置) における結果を示したものが図-7である.

ここで乱流の時間スケール: $\tau_t = \delta y / \delta u$ の仮定のもと, Stokes数を式(3)により定義する. 杭下流側でのせん断の幅を δy , そこでの流速差を δu とし, 図-7の a)においてその例を示す.

$$S = \tau_p / \tau_t \quad (3)$$

表-4 解析時及びStrouhal数の計算時における各杭のピーク周波数

杭の直径	解析値(Hz)	計算値(Hz)
3mm密	5.859	6.230
3mm粗		9.800
10mm密		1.617

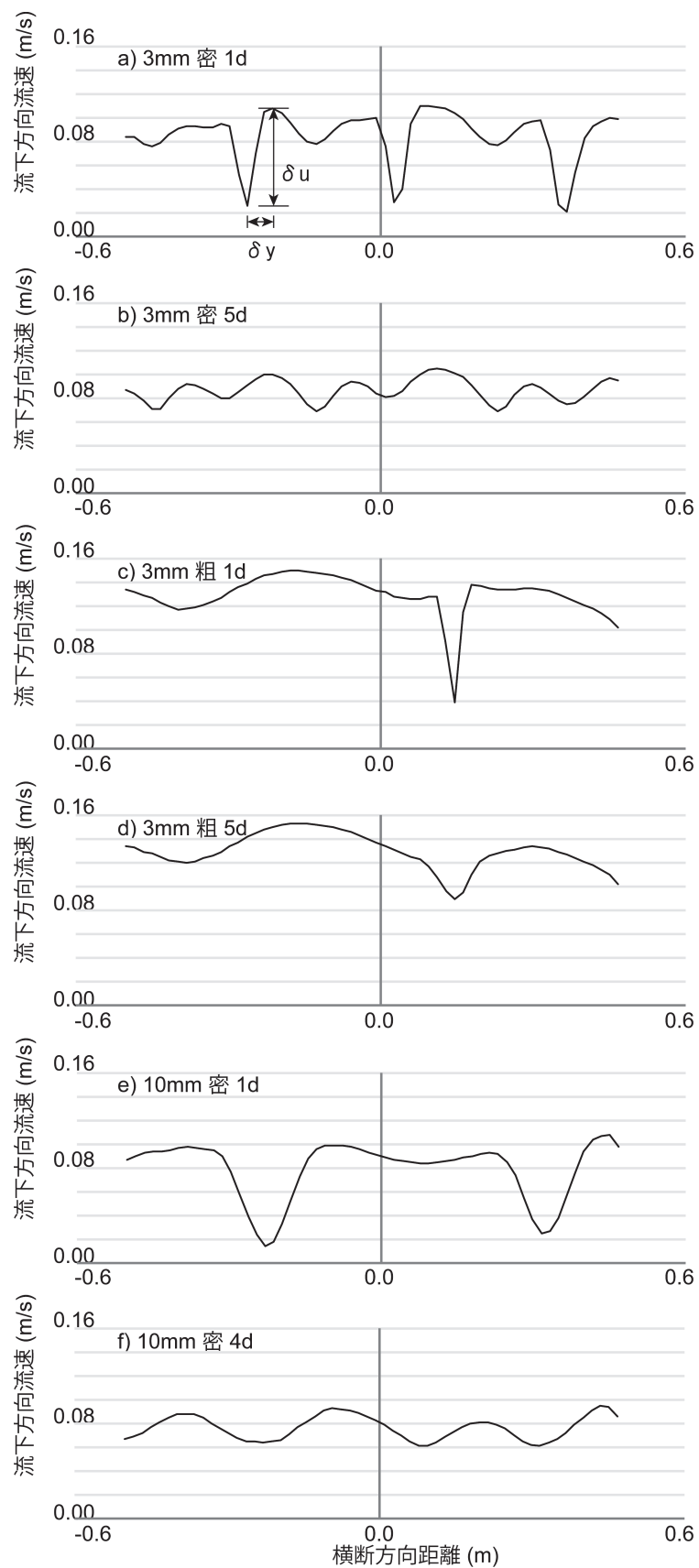
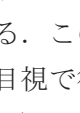
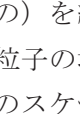
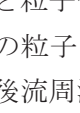
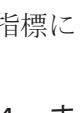


図-7 中立粒子に対するPIV計測結果の時間平均値における横断方向測線上での流下方向流速分布，
代表杭列からの流下方向距離に応じて示す：
上からa)3mm密の1d下流，b)3mm密の5d下流，c)3mm粗の1d下流，d)3mm粗の5d下流，
e)10mm密の1d下流，f)10mm密の4d下流の測線での結果

ここで S はStokes数、 $\tau_p = \sigma d^2 / (18\mu)$ は粒子応答時間、 σ は粒子密度、 d は粒子の直径、 μ は粘性係数とする。Stokes数は流れの変動に対する粒子の追従性を表す数であり、 $S \ll 1$ のときに流れに十分に追従する。このようにして得られた各ケースの測線ごとのStokes数（算定箇所数で平均）を横軸に、-3から目視で得られた同じ測線上での粒子の堆積幅の合計（ただし植生幅0.2mで基準化し、百分率で示したもの）を縦軸にし、結果をプロットしたものが-8である。結果から、Stokes数が大きくなるにつれて、粒子の堆積幅が増加していることが示された。これは、Stokes数が大きい状況（粒子の応答時間と乱れのスケールの比が相対的に近い状況）では浮遊砂の粒子が流れの変動に十分に追従できず、乱流による浮遊砂の状態が維持されないことが理由であると考えられる。また3mm密と粗の比較からは、単純に密生度が上がれば浮遊砂の堆積範囲が広がるというわけではないことを示している。

これまでの検討から、浮遊砂粒子の沈降がStokes数に代表される流れのスケールと粒子の応答の相対的なスケール差に影響されることがわかった。ただし、河道内での流況を検討する際に先の解析のように幹径のスケールで流速分布を解像する格子を作成することは現実的でなく、浮遊砂輸送の数値計算モデルを構築する際に、直接的にStokes数からのパラメータとして沈降条件を設定することは近い将来においても困難であることが予測される。このため、ここまでの知見を、なんらかの評価の容易なパラメータによって代表させる必要がある。平均的な流速が得られた場合に、Strouhal数から植生後流の周波数を算定することは比較的容易であることから、ここでは例としてStrouhal数から算出した後流の周波数と粒子体積幅との関連を検討する。各ケースの植生域における後流周波数（表-4）を横軸に、測線上での粒子の堆積幅の合計（-8と同様）を縦軸にし、結果をプロットしたものが-9である。結果から、後流周波数が増加するに従い堆積幅が増加する傾向が見られ、後流周波数のような比較的算出が容易な指標により植生域周辺での粒子堆積の評価を行うことの可能性が示された。

4. まとめ

本研究では杭群により模擬された植生の背後における浮遊砂粒子の挙動に関して、杭の径や密生度を変化させることで条件を変更し、室内実験と画像解析をもとに検討を行った。結果から、植生域中の粒子の堆積の有無が、Stokes数に代表される流れ場の乱れのスケールと粒子の応答のスケールの相対的な関係に依存すること、またそのようなスケールの相対的な差は、Strouhal数を用いて得られるような、比較的容易に算出可能な杭後流の周波数特性と関連を有していることが示された。

今後は、これらの知見を実際の平面2次元の浮遊砂輸送モデルの構築へと適用し、植生域内での土砂輸送モデルに関しての精度向上を目指す予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所の協力を得た。記して感謝の意を表する。

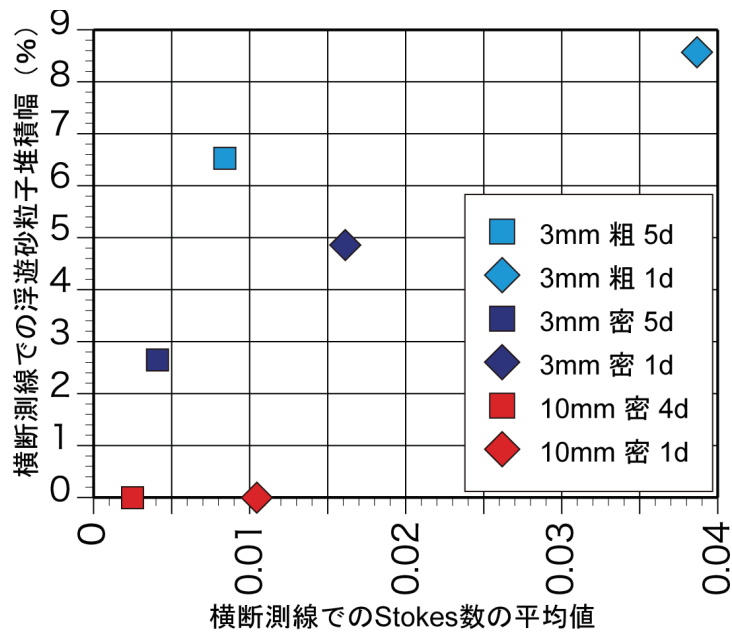


図-8 各ケースの横断測線ごとのStokes数の平均値と粒子堆積幅をプロットしたもの

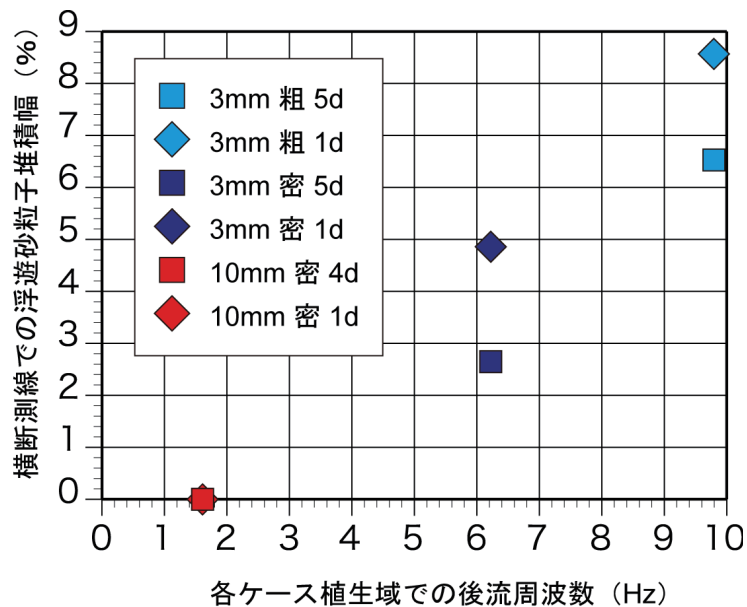


図-9 各ケースの植生域での後流周波数（表-4）と粒子堆積幅をプロットしたもの：

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部: 札内川自然再生(礫河原再生)計画書(案), 2012
- 2) 藤田光一, 渡辺敏, 李参熙, 塚原隆夫: 礫床河川の植生繁茂に及ぼす土砂堆積作用の重要度, 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 第4巻, pp.117-122, 1998.
- 3) 谷祖鵬, 赤堀良介, 池田駿介: 水制周辺における流れの瞬間構造と浮遊砂輸送の関係に関する研究, 混相流, 23巻5号, pp.615-626, 2010.
- 4) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版株式会社, 2002.