

橋脚での鉛直方向への流木集積機構の解明および2016年北海道豪雨災害時における実河川を対象とした流木流下機構に関する検討

赤堀 良介¹
Ryosuke AKAHORI

¹愛知工業大学工学部土木工学科 准教授

要 旨

出水時の流木による被害は多数報告されており、橋梁や取水施設等に集積し閉塞による氾濫や施設の破壊などを生じさせる例が知られている。本研究では、河道内での流木の発生から輸送、集積までを対象とした3年計画のうちの2年目として、前年度に実施した水理実験に対して追加実験を実施し、橋脚周辺での流木の集積機構が、表面流速の上昇に応じて、平面的で閉塞には至らない状況から、鉛直方向に集積し全面的な閉塞に至る状況へと変化する過程を検討した。この結果より、流木断面に作用するモーメントを用いた水面下への引き込みの機構について簡単な概念のモデルを提案した。また、近年のUAVを初めとした技術的な進歩により取得可能となった出水時の流木集積状況の面的な情報を基として、大規模出水時の流木の挙動に関してGISおよび数値解析による検討を実施した。ここでは2016年北海道豪雨災害時の実河川データを対象として、流れの数値解析から得た水理的条件と、既往の流木流下モデルによる検討を実施した。結果より、流木の集積状況が水深や流速などの基本的な水理条件に依存すること、および既往の簡易な流木モデルが出水時の流木挙動に関してのある程度の再現性を有していることが確認された。

《キーワード：流木；集積；橋脚；水理実験；PIV；PTV》

1. はじめに

本年度は、前年度に実施した水理実験の結果に対して新たに追加実験を実施し、さらなる検討を加えたほか、2016年北海道豪雨災害時の実測データを基とした流木の挙動の検討を実施した。まず前者に関して概要を記述する。構造物周辺での閉塞を生じさせる際の流木投入条件などに関しては先行研究が多く存在しているが¹⁾、砂防区間における流木捕捉工の評価に主眼を置いた例が多く、前提となる勾配やフルード数が大きいものが多い。また、運動方程式等を用いて流木の挙動に関し詳細な検討を行った例²⁾では、河道内の物理条件を用いた知見の適用が比較的容易であるが、対象が水面上の挙動に限定される場合が多い。赤堀ら³⁾の水理実験による既往の検討では、実際に河道が閉塞する際には、橋脚などの上流側で水面下に立体的な集積が生じることで河積を大きく阻害することが分かっており、前述の水面での移動のみを対象とするモデルではその過程を説明することはできない。このように、平野部を流れる河道では、水面近くを流れてきた流木が何らかの機構により構造物周辺で水面下に引き込まれ3次元的に集積していることが推測されるが、流れの状況と連動した集積のメカニズムの解明については十分に理解が進展していなかった。そこで本研究では橋脚模型を設置した開水路に流木模型を投入した前年度の水理実験の結果³⁾を基礎として、新たに引き込みの現象を定量化するための追加実験を実施し、河道閉塞を誘発する可能性の高い橋脚周辺での立体的な集積の発生状況について検討を行った。

また、後者に関してであるが、出水時の流木の挙動に関しては上記の通り多くの先行研究が存在しているものの、災害状況を包括的に数値化し検討した例や、単純化された水路を想定した局所的な集積現象を検討した例が多く、河道の改修や流木対策の構造物などの影響が現れるリーチスケール程度の流れの状況と流木の挙動の関連については十分な理解が得られていなかった。赤堀らのグループでは、水理実験の結果を基に、流木は基本的に自身の慣性の影響を受け、渦度の強い領域からはじかれ主流域に集中することなどを示したが⁴⁾、このような知見を現地に適応することは、これまで実際に流木の流下現象自体が詳細に観測された事例が少なく困難を伴った。一方、航空レーザー測量（以後LP）や、UAVによる高所撮影画像を利用したStructure from Motion – Multi View Stereo (SfM-MVS) による地形解析が現在急速に普及しており、ごく近年の水害においては、被災直後の微地形を含んだ面的な情報が入手可能な状況となってきた。本研究では、2016年8月北海道豪雨災害時の各種データを用いて、流木集積が生じた箇所における流れおよび流木挙動を数値解析から検討し、大規模出水時の流木の挙動に関して考察を行なった。

2. 流木の立体的集積に関する検討

(1) 研究手法

本研究の実験は3回の異なる実験群に分けて実施している。1回目の実験（以下「実験1」）では、2種類の水理条件を設定した上で、模型の横断方向の橋脚間長さと流木長との比率（以下、橋脚間/流木長比）、流木投入量の変化に着目した実験を実施した（表-1）。2回目の実験（以下「実験2」）では鉛直縦断面のParticle Image Velocimetry (PIV) 計測を実施し、流れの鉛直的な構造の影響について検討した。ここまで既報³⁾として前年度中に結果が整理されている。本年度実施した3回目の追加実験（以下「実験3」）（表-2）では橋脚間/流木長比は一定とし水理量の変化に着目した検討を行った。実験1及び2の詳細に関しては既報³⁾を参照されたい。以下、概略を述べる。

実験水路として、寒地土木研究所第4実験棟の可傾斜水路を用いた（図-1）。ほぼ中央にアクリルによる透視可能な区間をもうけ、そこに同様にアクリル材による橋梁模型を設置した。橋桁は水面に対して十分に高い位置に設置し、橋脚間長は8cm、10cm、12cmの3種類とした。流量は10.4L/s、勾配は1/2000であるが、水路の下流側に堰を設け水深と流速の変更を可能とした。流木模型は、長さ10cm、直径0.6cmの木材であり、比重を0.68とした。流木は上流側から手作業により5s間隔でランダムに散布した。

実験1では橋梁上空から水面を見下ろす形で高速カメラ（Photron, Fastcam SA3）を設置し、流木の白帯部分に対しParticle Tracking Velocimetry（PTV）による解析を適用し移動速度を算出した。実験2では同一条件のもと再実験を行い、底面から鉛直縦断面状にレーザーシートを照射し、側面からPIV計測を実施した。なおPTV, PIVともに、解析システムとして市販のシステム（カトウ光研, Flow Expert）を使用した。実験3では、堰上げによる水理量の変化に主眼を置き、観測項目については水位変化、捕捉流木の計量を実施した。

(2) 実験結果と検討

先に既往の結果³⁾を改めて示す。表-3および表-4は、実験1における流木投入量と橋脚間/流木長比で整理した、橋脚での捕捉率と橋脚上流側での水位上昇値を示した表である。補足率は橋梁模型により補足された流木数を投入流木の総数で除したもので、水位上昇値は水位計No.2での流木投入直前から実験終了時までの水位上昇量を示したものである。水位上昇量に応じて、各セルを緑、黄、赤とした。補足率は $Fr=0.19$ のケースで全体に大きくなるが、流木の集積による河道閉塞に起因する橋梁上流側での水位上昇については、 $Fr=0.38$ のケースで著しく大きくなるのがわかる。これは、前者では橋梁への集積に際し、ほとんどの流木が浮いた状態で水面位置に存在しているのに対し、後者では橋梁周辺で水面下に引き込まれた流木が鉛直方向の集積を生じ、これによる河積阻害のために大きな水位上昇が生じたことによる。

表-1 実験条件（実験1）

Fr	水深 (cm)	投入数 (本/5s)	橋脚間/流木長 (%)
0.19	9.4	2, 5, 10, 20, 40	80, 100, 120
0.38	6.0	5, 10, 20, 40, 80, 120	80, 100, 120

表-2 実験条件（実験3）

Fr	水深 (cm)	表面流速 (m/s)	投入数 (本/5s)	橋脚間/流木長 (%)
0.19	9.4	0.22	5, 10, 20, 40	80
0.22	8.6	0.25	5, 10, 20, 40	80
0.26	7.7	0.28	5, 10, 20, 40	80
0.31	6.9	0.32	5, 10, 20, 40	80
0.38	6.0	0.38	5, 10, 20, 40	80

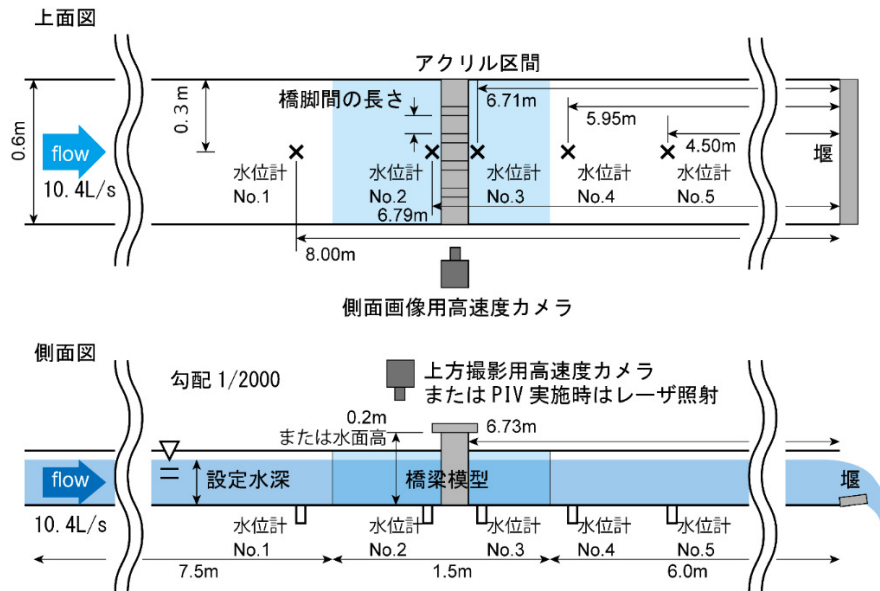


図-1 実験水路の概略図

表-3 実験1, $Fr=0.19$ での水位上昇値（水位計No.2）と捕捉率，水位上昇量：緑（ $\sim 0.1\text{cm}$ ），黄（ $0.1\text{cm} \sim 1.0\text{cm}$ ），赤（ $1.0\text{cm} \sim$ ）

投入量 (本/5s)	橋脚間/流木 80%	橋脚間/流木 100%	橋脚間/流木 120%
	水位増[捕捉率]	水位増[捕捉率]	水位増[捕捉率]
2	0.0 cm [0.17]	0.0 cm [0.10]	0.0 cm [0.00]
5	0.0 cm [0.42]	0.0 cm [0.00]	0.0 cm [0.02]
10	0.0 cm [0.81]	0.0 cm [0.72]	0.0 cm [0.40]
20	0.0 cm [0.91]	0.1 cm [0.86]	0.0 cm [0.75]
40	0.0 cm [0.93]	0.0 cm [0.90]	0.0 cm [0.88]

表-4 実験1, $Fr=0.38$ での水位上昇値（水位計No.2）と捕捉率，水位上昇量：緑（ $\sim 0.1\text{cm}$ ），黄（ $0.1\text{cm} \sim 1.0\text{cm}$ ），赤（ $1.0\text{cm} \sim$ ）

投入量 (本/5s)	橋脚間/流木 80%	橋脚間/流木 100%	橋脚間/流木 120%
	水位増[捕捉率]	水位増[捕捉率]	水位増[捕捉率]
5	0.2 cm [0.10]	0.1 cm [0.00]	0.0 cm [0.02]
10	0.2 cm [0.05]	0.1 cm [0.01]	0.0 cm [0.02]
20	1.6 cm [0.13]	0.2 cm [0.01]	0.0 cm [0.01]
40	2.0 cm [0.33]	0.1 cm [0.02]	0.1 cm [0.01]
80	2.8 cm [0.58]	0.1 cm [0.01]	0.2 cm [0.00]
120		0.3 cm [0.01]	0.0 cm [0.01]

次に実験3の結果について検討する。図-2は、捕捉率の違いについて、横軸に投入本数(本/5s)を取り、縦軸に表面流速をとった場合の分布をコンター図で示したものとなる。表面流速が0.25m/s以下の小さい領域では、ほとんどの条件で0.5を超える高い捕捉率を示した。図-3は、橋梁上流側での水位上昇値の違いについて、横軸に投入本数(本/5s)を取り、縦軸に表面流速をとった場合の分布をコンター図で示したものとなる。投入本数が多く、表面流速が大きいほど水位上昇が大きく、表面流速が0.32m/s($Fr=0.31$ に対応)を超えた程度から、水位上昇が5mmを超えるような大きな値を示すようになることがわかる。これらの結果より、表面流速が0.32m/sより高い実験群では鉛直的な集積の傾向を強く示し、0.25m/s以下の実験群では平面的な集積の傾向を強く示していることが示された。

流木を鉛直下向きに引き込む条件に関して、簡単な考察を行う。流木の立体的な集積が始まる際の挙動として、i) 後発の流木が先行する流木に追いついて停滞した後に横断方向に向き、既に静止した先行する流木の下に潜り込むような状況、あるいは、ii) 後発の流木が既に静止した先行する流木に衝突し、ほぼ流下方向を向いたまま下向きにもぐり込むような状況、以上のいずれかが発生している。ここではi)のメカニズムに着目し、流木を横断面から見た動きを、車輪の段差乗り越えの問題(ただし上下を逆としたもの)のアナロジーと考える。流木の鉛直方向への引き込みに関しては、流木を水面に留める力(浮力と重力の差分)と、水面近傍の流れにより流木に働く流下方向の抗力の、流木断面の接触点Cまわりのモーメントを考える(図-4)。いま到達した流木の図心と水面までの角度を α 、先行する静止した流木において浮力と重力が釣り合う際の図心と水面までの角度を θ_0 、流木同士の接触角を θ'' とする。水面の揺動に合わせて微小な上下動を行うことで、この接触角は僅かに変動している。このとき、抗力 F_b による回転モーメントの大きさ($F_b \sin\theta'' \cdot d/2$)が、浮力と重力の差 F_v によるモーメント($F_v \cos\theta'' \cdot d/2$)の大きさより大きいと流木の引き込みが生じる。流木比重が0.68であると、重力とのつりあいから $\theta_0=0.29\text{rad}$ となる。 θ_0 と α を用いて θ'' を得る。円柱の抗力係数 C_D を1.0、流木の水面下投影面積を A とし、表面流速 U を実験の条件から入力すると、式($F_b = 1/2 \cdot \rho C_D U^2 A$)より F_b が定まる。これらより得たそれぞれのモーメントを θ'' に対して整理した(図-5)。表面流速0.38m/sのケースでは、ほぼ常に F_b が F_v を同程度か上回っているのに対し、表面流速0.22m/sのケースでは、接触角 θ'' がかなり大きい値にならない限りは F_b が F_v を上回ることが無い。水位計の変動をおおよそその接触角に換算すると、10度~25度前後となる(図-5中の網かけ部)。このような接触角の幅の中で、 F_b によるモーメントが F_v によるそれを十分上回るかが、鉛直下向きへの引き込みが生じる条件であるとする、表面流速が0.32m/s($Fr=0.31$ に対応)を超えた程度から大きな水位上昇が生じることが推測される。

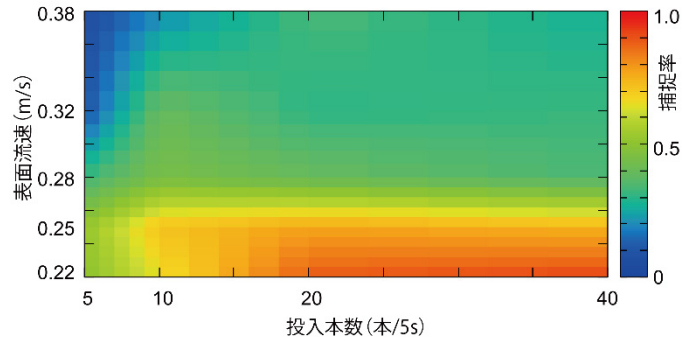


図-2 実験3における捕捉率の違いを投入本数と表面流速の関係でプロットしたコンター図

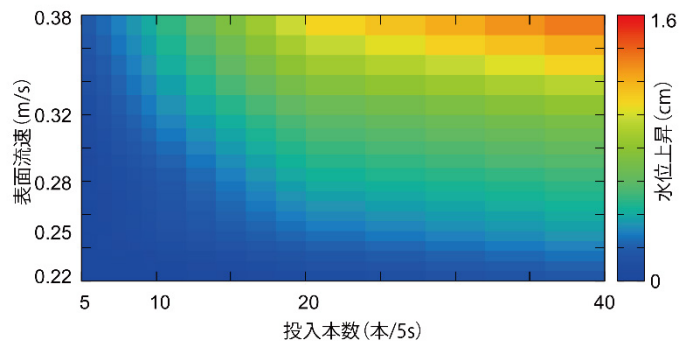


図-3 実験3における橋脚上流で水位上昇量を投入本数と表面流速の関係でプロットしたコンター図

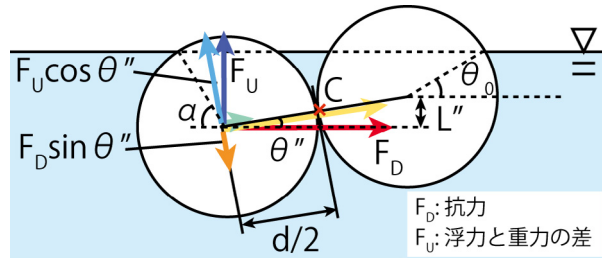


図-4 停滞した先行流木とそこに接触した流木の横断面模式図

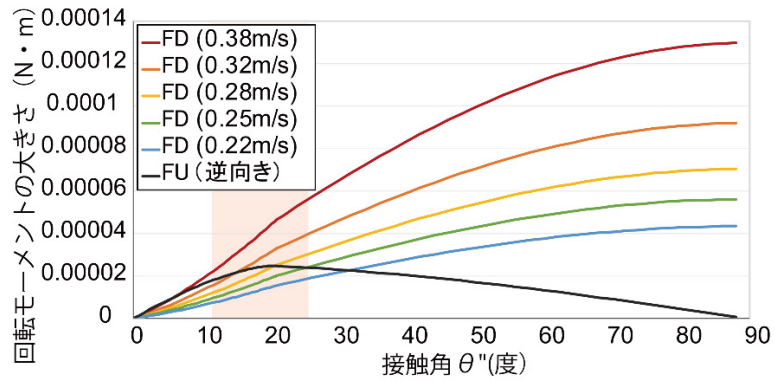


図-5 抗力FD と浮力と重力の差分FU による接触角に応じた接触点周りのモーメントの比較

3. 実河川における大規模出水時の流木の挙動の検討

(1) 研究手法

2016年8月北海道豪雨災害において、十勝川水系の札内川と戸蔦別川との合流点において破堤による氾濫が生じ、大量の流木の集積が観察された⁵⁾。ここでは、上流側（戸蔦別川右岸）と下流側（合流部）で2箇所破堤が生じ、上流側からは農地への氾濫が、下流側では札内川への還流が生じた（図-6）。本研究では、流木堆積状況の概況を得るため、札内川と戸蔦別川の合流点での出水後のLPデータ（北海道開発局帯広開発建設部提供）の結果を元にGIS（ESRI社ArcGIS10.2）を用いて検討を行った。ここでは、出水後LPのオリジナルデータを用いて、表面高さ（植生などを含む）数値標高モデル（DEM）から地盤高を示す数値標高モデルを差し引くことで、流木の堆積や高さを検討した。また、上記の出水後LPデータを基に、iRIC⁶⁾に含まれるNays2Dを用いて流れの解析を行なった。まず復旧後の地盤高の堤防部分から、周囲の地盤高を参考に破堤部分のみ取り除き、氾濫時の地形を作成した。これを5mメッシュで解像した格子データを作製し計算時の格子として用いた。計算条件は、石田⁷⁾らを参考に流量 1500m³/s とし、マンニングの粗度係数0.03を与え、固定床による解析を行なった。さらに、その流れの結果を元に拘束条件モデル⁸⁾を用いて流木の流下状況を検討した。この際の計算条件は、流木の長さ 13m、太さ 18cm、比重0.5、（オノエヤナギを想定）とし、上流側破堤箇所の直上流から河道を横断するように散布する条件とした。



図-6 札内川・戸蔦別川合流点での2016年8月北海道豪雨災害後の被災状況

(2) 解析および計算結果と検討

図-7に出水後のLPデータに関し、表面高さ（植生などを含む）数値標高モデル（DEM）から地盤高を示す数値標高モデルを差し引いたコンター図を示す。これは植生や堆積した流木の高さを示すものと考えられる。この結果からは、流木の堆積高さは、ほぼ0.5m～1.5mの範囲に収まることが示されており、後述の数値計算結果が示す水深（図-8）との比較から、ほぼピーク流量時の水深と一致する高さに集積したことが示された。これは、鉛直方向に水深の高さだけ集積が生じた結果であり、前述の水理実験との関連からは、今回の流木集積が、立体的な集積と呼ばれる状況で生じていたことが推測される。図-8に流れの数値解析結果における、ピーク流量時の水深コンターと流速ベクトルを示す。前述の流木堆積箇所と、水深コンターおよび流速ベクトルを比較した結果、今回流木の堆積していた場所がピーク時に水深が浅く流れが遅い箇所と概ね一致することがわかった。また樹林帯の縁に当たる部分でも多くの集積が見られた。

図-9に拘束条件モデルによる流木計算結果の一例を同時刻における渦度のコンター図と共に示す。ここでは連続した画像から作成した動画による定性的な検討を行った。計算結果が示す範囲では、本川において流木が停滞していた主要な場所は、上流側破堤箇所の対岸（左岸）付近であることが示された。また農地での氾濫域において流木が停滞した状況は、図-6に見られる集積箇所と類似し、図-8における水深が浅く流速の遅い箇所と一致していた。渦度との比較に関しては、渦度の高い領域を避けた流木は順調に流下する様子が見られた。反対に、渦度が高い領域に引き込まれた流木に関しては、該当の箇所が水深の浅い領域と一致していることから、むしろ停滞を生じ、画像上では多くの流木が存在する状況となった。一方で樹林域での流木の集積に関しては、流木構成要素の接触を考慮しない本モデルでは停滞の状況が当然再現されない結果となった。

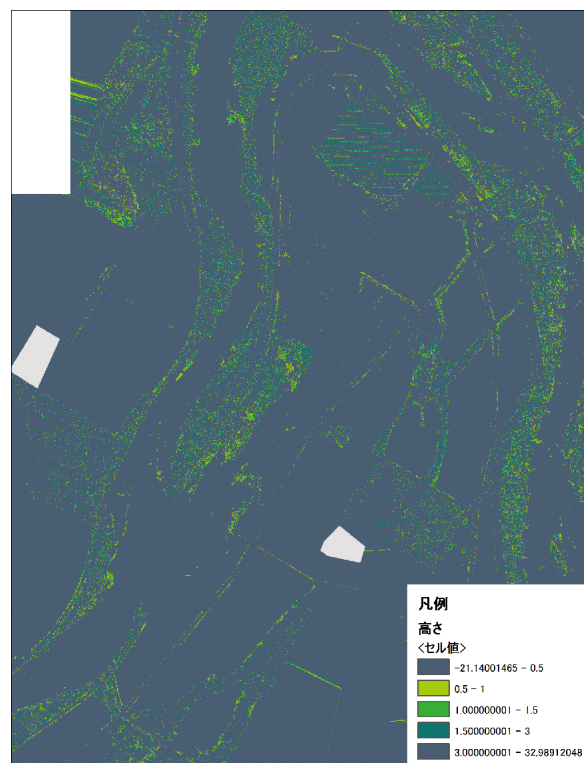


図-7 出水後のLPデータに関し植生等を含んだ表面高さから地盤高さを差し引いたもの

これらの結果より、本研究での対象では、流木の主要な流下域は渦度の低い領域に依存するが、停滞や集積が進行している箇所では、水深や流速が支配的要因であることが推測された。また流木の挙動に関しての既往モデルの適用性に関しては、本来意図した目的である流下状況や水量に依存する停滞について、妥当な再現性を有していることが確認された。

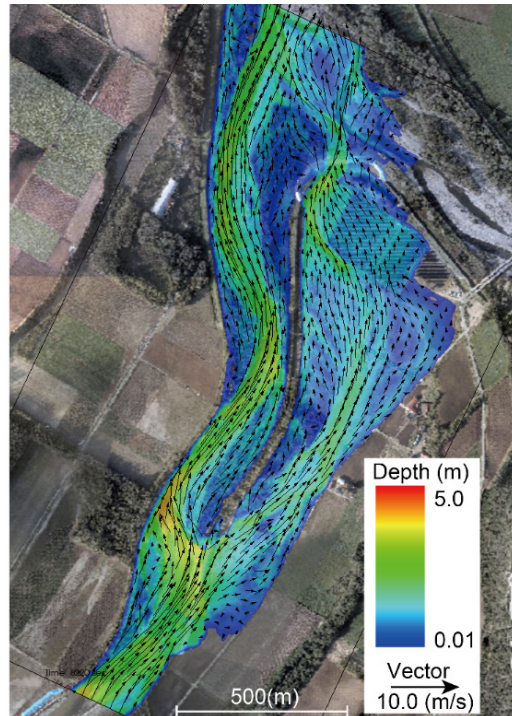


図-8 数値解析結果における1500m³/s時の水深および流速ベクトル

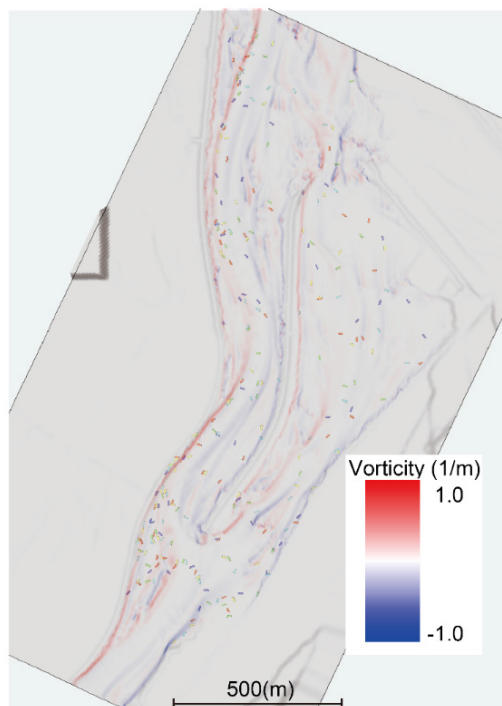


図-9 拘束条件モデルによる流木の流下状況と流れの解析から得られた同時刻の渦度コンター図

4. まとめ

本研究では、橋脚周辺での流木の鉛直方向の集積機構に関する検討、および実河川における大規模出水時の流木挙動に関しての面的な検討を実施した。前者の結果からは、流木の鉛直方向への引き込みが生じ得る条件に関しては、水面に存在する流木に働く流下方向の抗力と、流木を水面に留まらせる力（浮力と重力の差）が、流木同士の接触点を介して生じさせるモーメントによって検討可能であることが示唆された。また後者の結果から、実河川における出水時の流木の集積に関し、水深や流速といった水理量が支配的な要因であること、また既往の拘束条件モデルのような比較的単純な数値解析モデルにおいても、そのような挙動が再現可能である可能性が示された。

参考文献

- 1) 長谷川祐治・中谷加奈・竹林洋史・里深好文・藤田正治：流木の流下と橋梁への集積に関する実験，京都大学防災研究所年報（58），pp.350-357，2014.
- 2) 中川一，井上和也，池口正晃，坪野考樹：流木群の流動と堰止めに関する研究，水工学論文集，第38巻，pp.543-550，1994.
- 3) 赤堀良介，伊藤彰悟，太田元進，阿部孝章：橋脚での流木集積と閉塞発生機構に関する検討，第20回応用力学シンポジウム講演概要集，pp.149-150，2017.
- 4) 赤堀良介，初田直彦，清水康行，伊藤丹：水理構造物周辺の流れの構造に対する流木の応答，水工学論文集，第58巻，pp.I 691-I 696，2014.
- 5) 土木学会 水工学委員会，2016年8月北海道豪雨災害調査報告書，<http://committees.jsce.or.jp/report/taxonomy/term/50>
- 6) iRIC： <http://i-ric.org/ja/>
- 7) 石田義明，山口里実，久加朋子，岩崎理樹，清水康行，川村育男，泉典洋：札内川・戸蔦別川合流地点における堤防決壊と氾濫原からの還流による被害特性の検証，河川技術論文集，第23巻，p.1-6，2017.
- 8) 初田直彦，赤堀良介，清水康行：蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析，応用力学論文集，第15巻，pp. I. 451-I. 422，2012.