

平成28年8月北海道豪雨災害における流路内の 流木集積状況と水理的条件に関する検討

HYDRAULIC CONDITIONS AND MECHANISMS OF WOODY DEBRIS JAM ON RIVER CHANNELS ON HOKKAIDO HEAVY RAIN DISASTER IN 2016

赤堀 良介¹・山口 里実²・久加 朋子³

Ryosuke AKAHORI, Satomi YAMAGUCHI and Tomoko KYUKA

¹ 正会員 愛知工業大学 工学部土木工学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

² 正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

³ 正会員 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

In this paper, the relationship between the hydraulic characteristics of river channels and the existing hypothesis of mechanisms of woody debris jam was evaluated by using the GIS analyses on the field observation and the numerical calculation results of the Hokkaido heavy rain disaster in 2016. The target regions were the confluence of the Satsunai River and the Tottabetsu River and the upstream region of the Otofuke River. The intensive field surveys of the geometries of river channels and the debris jam were executed on these sites, in which the aerial LiDAR systems or the on-site observation were applied. These high-resolution geometries and the exact distributions of the locations of debris jam were applied to the GIS, and the relationships between the information and the numerical results of the flow are quantitatively examined. The results confirmed the hypothesis of the existing study, in which the flow velocity around the water surface is the important factor of the transport of woody debris into the underwater.

Key Words : large woody debris, debris jam, filed observation, numerical calculation

1. はじめに

近年の豪雨災害時に、流木の集積による河道の閉塞が溢水による氾濫や被害を生じさせる例が報告されている¹⁾。砂防域での流木の閉塞に関しては先行研究が多数存在し、流木長と捕捉工や橋脚等の間隔の関係から条件が整理されてきたが^{2),3)}、前提となる勾配が大きく平野部の河道を対象とする場合にそのままの知見を適用することは難しかった。これに対し、平野部の河川を対象に、河道横断面の閉塞を誘発する立体的な流木集積機構に着目した研究が近年発表されており(木村ら⁴⁾)、筆者らも水面上の流木を潜り込ませようとする現象に関し、抗力を要因とするモーメントと浮力を要因とするそれとの大小関係が重要であることを推測してきた⁵⁾。これらは水理実験の安定した条件に基づく推測であり、実河川での現象を用いた検証が必要とされる。そこで本研究では出水時の流木堆積状況の観測事例に対し、地理情報システム(Geographical Information System, GIS)を用いて水理的な状況の検討を実施すると共に、上記のような集積条件が適用可能か検証を行っ

た。対象として平成28年8月北海道豪雨災害⁶⁾時における十勝川水系の札内川・戸蔭別川合流部(北海道帯広市)、および音更川上流域(北海道河東郡上士幌町)で観測された詳細な流木の集積状況の実測値を利用した。また対象地点では出水後に航空レーザー測量が実施されており、数値解析を用いての水理量の推測が可能である。本研究では、これらに基づく流木の集積情報と数値計算から得られた水理量の空間的分布との関連性について検討した。なお筆者らの知る限り、対象地点では流木が被害状況を拡大したという事実は報告されていない。ここでは氾濫の要因としての流木集積状況の検討は目的とせず、出水時の水理的条件が流木の集積状況に与える影響についての検討を目的とした。

2. 札内川・戸蔭別川合流部における検討

(1) 検討手法

対象地点では上流側(戸蔭別川右岸)と下流側(合流部)で破堤が生じ、農地への氾濫と札内川への還流が生じた⁶⁾(図-1)。ここでは流木堆積の位置および高さを

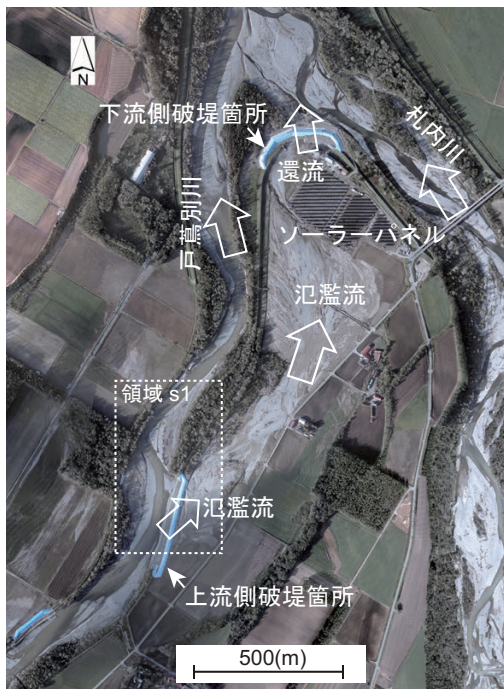


図-1 札内川・戸蔭別川合流点での出水後の状況，出水後オルソ画像（北海道開発局帯広開発建設部提供）に加筆

得るため，出水後の「オリジナルデータ」と，地盤高を示す1m解像度のメッシュデータ（1mメッシュDEM）を利用した（北海道開発局帯広開発建設部提供，図-2aおよびbに図示）。該当業務の製品仕様書では「オリジナルデータ」の定義を「航空レーザ計測により得られたランダムな点群データからノイズ（雲や多重反射などによるデータ）を除去して得られた3次元座標データ」としており，植生や堆積物の表面高さを含む。このデータ点はフットプリントが30cmから40cmで取得され，ランダムに配置されており，解析時にはGIS（ESRI社ArcGIS10.2）によるInverse Distance Weighted（IDW）補間を用いて1mメッシュの格子データへと変換した。なお地盤高を示す1mメッシュDEMは，周辺地盤高の値を用いて植生や堆積物高さを除去したものとなる。これらのオリジナルデータから1mメッシュDEMモデルを差し引くことで，流木の堆積位置や高さを検討した。

またiRIC⁷⁾ 付属のNays2Dを改良したソルバーを用いて水理量の空間分布を算出した。ピーク流量時の水理量を求めることを意図しているため，出水による流路変動を経た測量結果を地形として用いており，河床変動計算は実施していない。まず1mメッシュDEMの地盤高のうち，仮締切部分を周囲の地盤高に合わせ取り除き，氾濫時の破堤箇所を含む地形を作成した。計算格子は5mメッシュとした。計算条件としては，石田ら⁸⁾を参考に流量 $1500\text{m}^3/\text{s}$ とし，マニングの粗度係数0.03を与えた。解析では計算開始から7200sの間に $50\text{m}^3/\text{s}$ から $1500\text{m}^3/\text{s}$ まで流量を増加させ，その後3600s間，一定流量で計算を行なった。

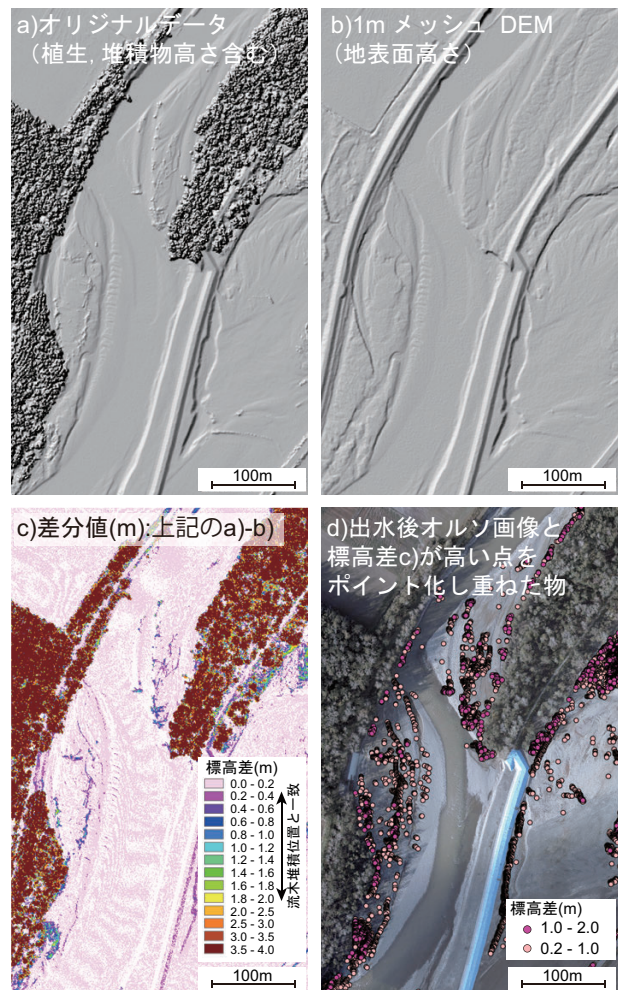


図-2 データ処理手順（図-1 領域s1を拡大），a) オリジナルデータに基づく陰影図，b) 1mメッシュDEMデータに基づく陰影図，c) a-bの差分値，d) 差分値c（堆積物高さ）をポイントデータに変換

(2) 検討結果

植生高さや流木堆積高さを含むオリジナルデータと，地盤高を示す1mメッシュDEMとの差分をコンター図として図-2cに示す。同時期のオルソ画像で判別可能な流木の集積箇所と図-2cを比較すると，差分が0.2mから2.0mの範囲（図-2cで濃いピンクから黄色の領域）が，流木の集積箇所とほぼ一致していた。上記差分のうち，値が0.2mから1.0mまでとなった領域と1.0mから2.0mとなった領域について，ポイントデータとして抽出したものが図-2dである。結果からは，0.2mから1.0mの範囲の流木は河道の砂州上の裸地に点在し，1.0mから2.0mの値となったものは河道周辺の低水路と植生域の境界付近に集中している様子が見られた。

計算結果の流速分布のうち1.6(m/s)から3.0(m/s)の範囲のみ不透過とし，その上下を透過色とした上で，そこに図-2dに例を示した流木集積箇所のポイントデータを重ねて計算領域全域で示したものが図-3である。数値計算結果の示す流速の値は河道の中央の主流路で大きく，低水路部で約5m/s程度，最大で6m/s程度の

値となった．ピーク時の流速分布は既往研究⁸⁾と概ね類似していた．図-3より，流木の集積高さが高い(紫：高さ1.0m以上のポイント)箇所が不透過色の流速の幅に存在しており，流速の速い河道の中央部ではほとんど観察されないことが示された．一方で堆積高さが低い単木と見られる箇所(ピンク：0.2m-1.0m)は砂州上に分布していた．次に，計算結果の水深分布のうち，1.0mから1.6mの範囲のみ不透過とし，その上下を透過色で着色した上で，流木集積箇所のポイントと重ねて示した図が図-4である．この図より，流木の集積高が高い箇所については，その高さが流量ピーク時の水深にほぼ近い値を取っていたことがわかる．これは，鉛直方向に水深と同程度の高さの集積が生じた結果であり，既往⁵⁾の水理実験との関連から，該当の流木集積が「立体的な集積」と呼ばれる水面から底面への流木の引き込みが生じた状況であったことが推測される．

ここで，流木堆積位置に該当する流速コンター図の計算結果を抽出し，オリジナルデータと1mメッシュDEMの差分値(堆積高さの推測値)を横軸に，該当箇所の流速コンターの値を縦軸として散布図を作成した(図-5)．ただし，図-5に示したプロットは元のプロット点そのものではなく，そのクラス毎の密度分布(プロット数で基準化)に比例した大きさで置き換えた．なお元プロットの数には面積に応じたものであり流木の体積を示す値ではない．また図-2cの結果から堆積高さの上限を2.0mとし，さらに密度分布が一定値(5.0×10^{-4})を下回る範囲は除去した．図-5では堆積高さが低い方が面積が大きいため左側の差分値が小さい領域で大きいプロットが目立つが，ここで着目すべきは差分値の大きさが大きい，すなわち流木集積高さが高い領域である．結果では差分値が大きくなるほど，該当箇所での流速の値が一定の範囲に向けて収束するように見られた．特に差分値が1.5mを超える領域では，下限を1.7m/s，上限を4m/sとする範囲に収束した．

3. 音更川上流部における検討

(1) 検討手法

対象地点(河東郡上土幌町内)は音更川上流部の四十号橋(SP4100)付近(図-6)である．ここではH28の豪雨災害により大規模な河岸侵食が生じ，左右岸連続で破堤が発生した^{9),10)}．この出水後に実施された流木堆積状況の現地調査結果¹¹⁾(北開水工コンサルタント提供)を元に，出水後の航空レーザー測量データ(十勝総合振興局帯広建設管理部提供)の結果と供にGISを用いた検討を行った．まずレーザー測量による標高データ(ランダム位置のポイントデータ)をGISに読み込み，Triangulated Irregular Network(TIN)により

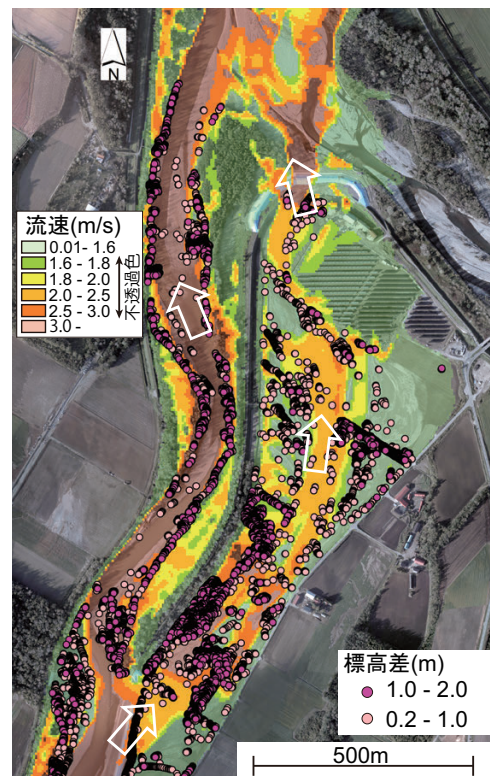


図-3 計算結果(流量 $1500\text{m}^3/\text{s}$) 流速分布のうち 1.6-3.0(m/s) のみ不透過色とし流木高さ情報と重ねたもの

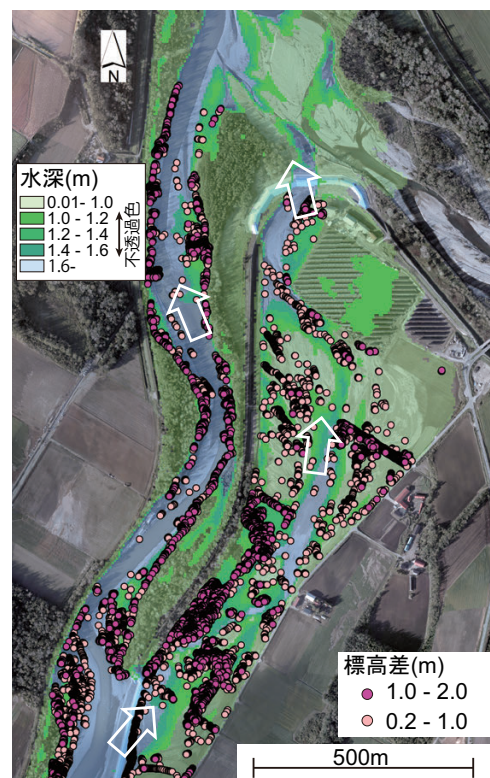


図-4 計算結果(流量 $1500\text{m}^3/\text{s}$) 水深分布のうち 1.0-1.6(m) のみ不透過色とし流木高さ情報と重ねたもの

補間した後に，1mメッシュのデータとして処理した．TINによる処理の理由は，ポイントデータの配置に空間的な粗密が見られたことによる．この値は出水後の仮締切の天端高を含んだものとなる．次に流木の集積

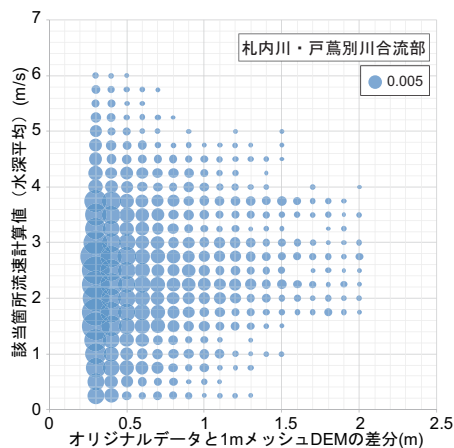


図-5 流木集積箇所の堆積高さと同箇所での水深平均流速（計算結果）による散布図、ただし元プロット点の密度分布に応じた面積のプロット点に置き換えたもの

状況に関しては前述の調査結果¹¹⁾を用いた。この調査では、流木の堆積状況が「樹木残存・流失」、「樹齢」および「積層」といった項目で調査され、これらの空間分布がGIS用のシェープファイルとして整理されている。ここでは、この項目のうち「積層」の項目で整理されたポリゴン情報を、流木の堆積状況として利用した。「積層」とは、流木の面積あたりの堆積本数を算出するための係数を示しており、たとえば、あるポリゴン面積に積層係数を乗じた場合に、ポリゴン領域内の堆積樹木本数を示すこととなる（ポリゴン内の流木堆積数＝ポリゴン面積×「積層」）。これは集積高さの間接的な指標になると考えられる。

流木集積データの検討と同時に、数値解析による水理量の空間分布の推定も実施した。上記の処理による出水後1mメッシュデータを基に地形を作成したほかは、iRIC⁷⁾を用いた手順は先と同じである。こちらも仮締切部分に関しては周囲の地盤高を参考に手作業でその分の標高を取り除き、氾濫時の破堤状況を考慮した地形を作成した。計算格子は2.5mメッシュとした。計算条件は、岡部ら¹⁰⁾を参考に流量763m³/sとし、マンニングの粗度係数0.03を与えた。解析では計算開始から3600s掛けて50m³/sから763m³/sまで流量を増加させ、その後一定流量で3600s間計算を行なった。

(2) 検討結果

計算結果の流速分布のうち1.6(m/s)-3.0(m/s)のみ不透過とし、その上下を透過色とした上で流木堆積情報のポリゴンを重ねたものが図-7である。なお図-6の領域o1で示す箇所を拡大して示した。流路中央部分が最大の流速を示しており、低水路の大部で流速は4.0m/s前後、最大で7.0m/s程度となった。ピーク時の流速分布は既往研究¹⁰⁾と概ね類似していた。この図より、濃色で示されたポリゴンの領域、すなわち流木の積層度

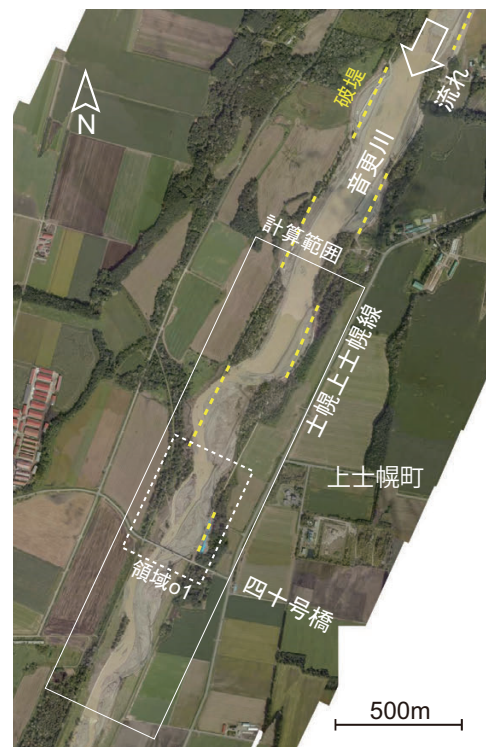


図-6 音更川上流部、出水後オルソ画像（十勝総合振興局帯広建設管理部提供）に加筆

が高い（流木が立体的に集積した）箇所が、概ねコンター図で不透過色により示された特定の流速の幅に存在していることが示された。また最も積層の高い箇所については図-7中に点線の円形で示す位置となるが、流速が先の範囲にあることと、橋梁や河道内の構造物が集積のきっかけとなったと推測されること、以上の2つの条件が重なった箇所となっている。

ここで、図-7に示した流木集積箇所のポリゴンをラスタ化し、そのメッシュ位置に該当する流速の計算結果を抽出した。この流木集積箇所の「積層」値を横軸に、該当箇所の流速を縦軸として散布図を作成した（図-8）。ただし、図-8に示したプロットは元のプロット点そのものではなく、そのクラス毎の密度分布（プロット数で基準化）に比例した大きさを示す。図-8の結果から、積層の値が高く（流木の集積高さが高いと推測）なるにつれて、該当する箇所での流速の値が、一定の範囲に収束していくことが示された。この状況は先の結果（図-5）と一致しており、流速の集積範囲の下限の値に関しては2.0m/sを超える値を示した。

4. 考察

原則的に植生付近で流木の立体的な集積が見られることから、透過性を有する領域が流木をせき止めることが必要条件の一つであることは容易に推測できる。一方で、図-5や図-8の右側の領域を見ると、流木の立体的集積が発達した領域には、流速などの水理量に何

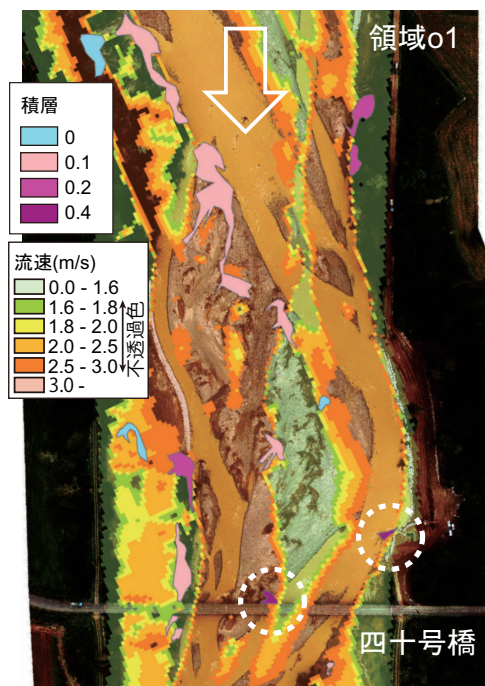


図-7 流速コンター図と流木集積ポリゴンのうち領域o1(図-6)を拡大したもの、点線内は積層0.4の範囲を示す

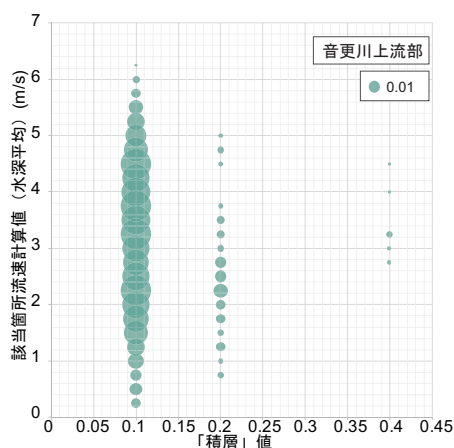


図-8 流木集積箇所の「積層」値と該当箇所での水深平均流速(計算結果)による散布図、ただし元プロット点の密度分布に応じた面積のプロット点に置き換えたもの

らかの理由での下限が存在していると考えられる。まず図-4の結果から、集積高さがピーク時の水深と関連していることが推測される。対象流域の河畔林の主な樹種としてドロノキ、オノエヤナギなどが想定されるが^{12),13)}、ドロノキに関しては、気乾比重が0.33~0.55、生材の比重が0.7とされている¹⁴⁾。ここから河畔林の比重が通常では1.0を下回ると推測すると、この立体的な流木の集積に関しては、水面を移動してきた流木が河床方向に引き込まれたことで、水深のスケールでの堆積が生じたと考えのが妥当である。この場合、立体的な集積条件に関わる水理量として、水面近傍での流木に働く抗力が重要となる。

ここで、既往研究⁵⁾を元に本事例での流木の立体的な集積の条件を検討する。まず後発の流木が停滞した

流木に追いついた後に横断方向に向き、停滞流木の下に潜り込むような状況に着目する。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-9)。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後発の流木が上下に動き得るとすると、この接触角 θ'' は $\theta'' = 0\text{rad}$ で安定しておらず、わずかに変動していると考えられる。このとき、抗力 F_D による回転モーメントの大きさ($F_D \sin \theta'' \cdot d/2$)が、浮力と重力の差 F_U によるモーメント($F_U \cos \theta'' \cdot d/2$)の大きさより大きいと流木の引き込みが生じる。流木の比重を仮定すると θ_0 が得られるが、この 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 U を与えると、式(1)より F_D が定まる。

$$F_D = 1/2 \cdot \rho C_D U^2 A \quad (1)$$

流木の比重に関し、乾燥した既存流木と出水時の新規流木との構成比について対象領域でのデータが存在しないことから、ここでは比重を一意に定めず、先の検討から0.5(ヤナギ科の気乾比重を想定)および0.7(ヤナギ科の生材比重を想定)の2ケースで考察する。重力とのつりあいから、比重0.5では $\theta_0 = 0\text{rad}$ 、また比重0.7では約 $\theta_0 = 0.33\text{rad}$ となる。また札内川と戸蔭別川との合流点での堆積した流木の長さをGIS上で確認したところ、概ね10mから15m程度であった。ここから流木の代表的な長さを12.5mとすると、永多ら¹⁵⁾が整理した北海道内のヤナギの生長量における胸高直径と樹高との関係式から直径 d は約18cmとなる。

これらより得た検討結果を θ'' に対して整理し、図-10に示す。比重0.5のケース(図-10上)では、表面流速2.4m/sのケースで、ほぼ常に F_D によるモーメントが F_U によるものを同程度か上回っており、比重0.7のケース(図-10下)では、表面流速2.0m/sのケースで F_D によるモーメントが F_U によるものを同程度か上回る結果となった。なお、 θ'' について、水路実験の結果から既往研究⁵⁾のケースでは 10° から 25° の範囲と推測している。実河川における水面振動に関しては研究事例¹⁶⁾は存在するものの、流木の揺動との関連については十分な知見が存在しない。このため、現時点では、上記の接触角の幅の中で、 F_D によるモーメントが F_U によるそれを上回ることが立体的集積の生じる条件であると仮定した。正確な θ'' の変動幅に関しては、今後の詳細な検討が必要となることを留意されたい。さて、図-10からは比重0.5では表面流速が2.4m/s、比重0.7

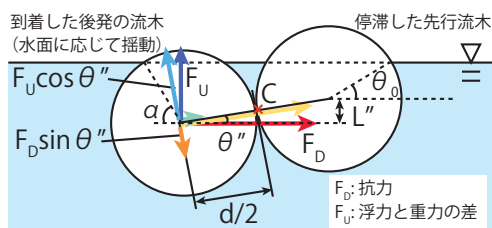


図-9 停滞した流木とそこに接触した流木の横断面模式図⁵⁾

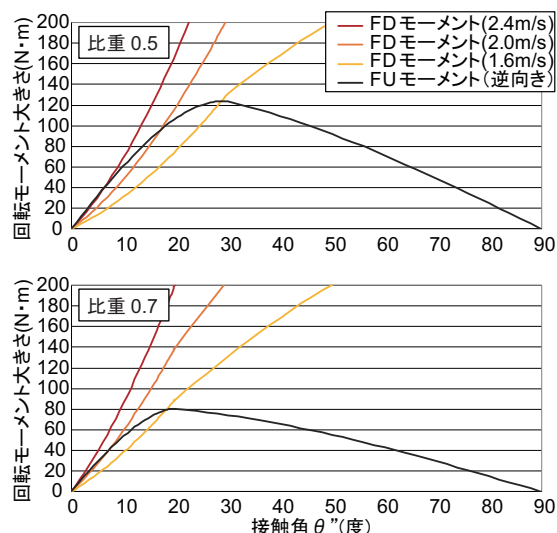


図-10 抗力 F_D と浮力と重力の差 F_U による接触点周りモーメントの比較、横軸は接触角、上：比重 0.5、下：0.7

では表面流速が 2.0m/s が、上記の条件であると考えられる。ここで、水深を 2.0m、勾配を 1/200 として流速の対数分布を仮定すると、上記の表面流速を有する流れに対しての水深平均流速は、それぞれ約 2.1m/s および 1.7m/s となる。数値解析結果の流速は水深平均の値を示していることから、再度、図-5 と図-8 を参照すると、どちらの地点の結果においても、図-10 における検討結果を水深平均に換算した流速 1.7m/s から 2.1m/s に掛けての領域が、集積高さが高い箇所（図-5 での横軸 1.5m から 2.0m、図-8 での横軸 4.0）での分布範囲の下限に近いことが分かった。結果から、流木の立体的集積における必要条件に関し、流木に働く抗力と浮力の関係から整理する手法が、実河川を対象とした場合も妥当性を有していることが示されたと考えられる。

5. まとめ

本研究では H28 北海道豪雨災害における氾濫箇所を観測された流木堆積データを用いて解析することで、既往研究⁵⁾に示された流木の立体的集積が生じる得る条件について検証した。結果から、流木の立体的集積が生じた箇所における特徴として、ピーク時の水深と堆積高さが関連し、かつ水面からの流木の引き込みが生じ得る特定の表面流速の範囲にあることが推測された。

この結果から、流木に働く抗力と浮力の関係から集積条件を整理する手法の妥当性が示されたと考えられる。

謝辞：本研究は北海道河川財団研究助成（代表：久加朋子）の補助を受けた。また、研究の実施にあたり北海道開発局帯広開発建設部、十勝総合振興局帯広建設管理部、および（株）北開水工コンサルタントから情報の提供と多大な支援を頂いた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部，国土交通省報道発表資料：平成 29 年 7 月九州北部豪雨は過去最大級の流木災害，<http://www.mlit.go.jp/common/001198670.pdf>，2017.
- 2) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆，水山高久：流木捕捉工の捕捉性能に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.63，No.3，pp.34-41，2010.
- 3) 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.
- 4) 木村一郎，北園和也：流木捕捉形態の流木リチャードソン数依存性と 3D-2D 型モデルの適用性，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol. 73，No. 2（応用力学論文集 Vol. 20），L.553-L.562，2017.
- 5) 赤堀良介：橋脚周辺における流木の 3 次元集積に関して，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74，No.4，L.679-L.684，2018.
- 6) 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>，2017.
- 7) iRIC software：<http://i-ric.org/ja/>
- 8) 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・戸蔭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，pp.1-6，2017.
- 9) 久加朋子，山口里実：側岸に繁茂する植生が流路変動に与える影響，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74，No.4，L.1135-L.1140，2018.
- 10) 岡部和憲，久加朋子，清水康行，長谷川和義，新庄興，山口里実：流量低下時における河道変動の応答特性～十勝川水系音更川を事例として～，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74，No.4，L.501-L.506，2018.
- 11) 村中孝寿，佐々木香織，岡部和憲，長谷川和義：音更川出水時における河道樹木の流失・堆積について，土木学会第 72 回年次学術講演会，pp.229-230，2017.
- 12) 新山馨：札内川に沿ったケシウヤナギの分布と生育地の土性，日本生態学会誌，Vol.39，No.3，pp.173-182，1989.
- 13) 高木麻衣，中村太士：ダムによる流量調節が河畔林に及ぼす影響について－北海道札内川の事例－，日林誌，85(3)，pp.214-221，2003.
- 14) 森林総合研究所：改定 4 版 木材工業ハンドブック，丸善株式会社，2004.
- 15) 永多朋紀，渡邊康玄，清水康行，井上卓也，船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72，No.4，L.1081-L.1086，2016.
- 16) 谷 昂二郎，藤田一郎：河岸から撮影された動画像を用いた実河川の自由水面挙動に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74，No.4，L.805-L.810，2018.

(2019. 4.2 受付)