

# 実河川における流木観測データを用いた 流れの空間構造と流木流下機構の検討

## A STUDY ON SPATIAL FLOW STRUCTURES AND WOODY DEBRIS TRANSPORT BY USING OBSERVATIONAL DATA OF DEBRIS ON EXISTING RIVER FLOWS

赤堀 良介<sup>1</sup>・川村 里実<sup>2</sup>・土田 宏一<sup>3</sup>・白井 博彰<sup>3</sup>

Ryosuke AKAHORI, Satomi KAWAMURA, Koichi TSUCHIDA, Hiroaki SHIRAI

<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 正会員 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

<sup>3</sup> 正会員 株式会社 福田水文センター 調査部 (〒 011-0024 札幌市北区北 24 条西 15 丁目)

In this study, mechanisms of woody debris transport and spatial flow structures on an existing river, Nukabira River of the Saru River system, were investigated by using numerical models and reexamining observational results. The results of the field observation that the number of debris were counted in each sub-region of a monitoring area during a flood event in 2010 show that locations of highly concentrated areas of woody debris vary widely in response to the discharge and the debris size. The particle based numerical model of woody debris was additionally applied in order to investigate the details of the debris motions. The results of the calculation show that the woody debris concentrated to the regions where the vorticity was relatively low in the existing channel. The results also imply that the inertia of debris is one of the important issues, in particular in the cases where the discharge and the size of debris are small, because it determines the responsiveness of woody debris motions to small flow structures which was generated by the exposed incised channels.

**Key Words :** woody debris, field observation, flow structures, PTV, particle based model

### 1. はじめに

出水時の流木流下については、その発生から流木災害の被災に至るまでの現象は極めて複雑であるが、対象の重要性からこれまでも継続的に研究が行われてきた。従来は河道内における堆積状況に関する現地観測からの検討や<sup>1)</sup>、個々の流木の輸送過程などを対象とした検討など<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>を中心に研究が進められてきた。一方で、流れの改変に対する流木流下特性の変化といったリーチスケール規模の視点での研究例は少なく、河道改修を中心とした流木対策の予測検討などに結びつく成果は限られていた。このうち、流木の流れが有する空間構造の違いに対する挙動を検討した例として、流木に働く慣性と流れの構造に対する検討<sup>4)</sup>、流木と流れ場の相対的な空間スケールに関する検討などが存在する<sup>5)</sup>。前者では流木が慣性の影響を受けることから渦度の高い領域を避けること、後者では流木の長さが乱れに対する空間的なフィルターとして働くことで流下時の集中化を緩和することが判明している。しかし

ながら、これまで流木の集積に至る流下状況などに関しては現象がイベント期間を通して連続的に観察された例は少なく、水理実験や数値解析で得られた知見が、実河川の現象に対し妥当なものか十分に検証されていなかった。そこで、本研究では、例の少ない既往の流木観測データ<sup>6)</sup>に現れた、その空間的な特性に基づいて観測結果の再検討を行い、同じ河川を対象とした流れおよび流木の数値解析の結果と比較を行った。これにより、実河川における流木流下機構に対する流れの構造の影響を検討し、上記知見の適用性に関して検証を行った。

### 2. 観測対象および調査期間

2010年度に、土木研究所寒地土木研究所による橋梁上からのモニタリングによる流木流下観測が実施された<sup>6)</sup>。観測は2010年8月から12月にかけて複数回実施され、その観測対象は北海道内の尻別川留産橋と沙流川水系額平川アブシトエナイ橋であった。対象地域

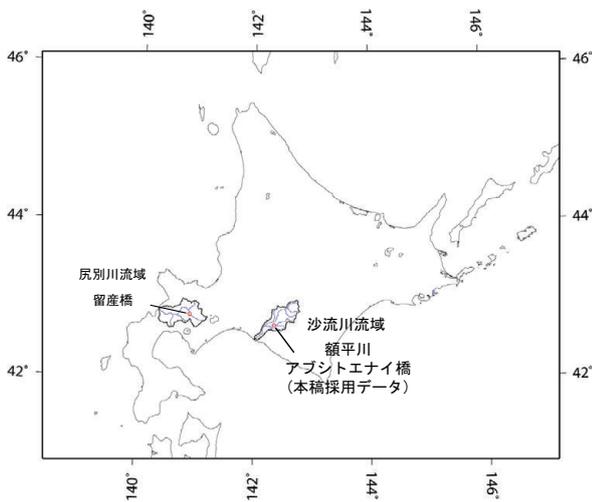


図-1 2010年流木観測<sup>6)</sup>実施対象地区

の位置を図-1に示す。本研究ではアブシトエナイ橋を対象とした2010年8月12日-13日の結果を用いる（アブシトエナイ橋は2003年の沙流川出水時に流木の堆積により橋桁を流失し<sup>7)</sup>、その後再建されている）。8月12日-13日にかけて、該当地域では小規模な出水が発生し、その間の流木の流下状況が橋上のビデオカメラにより撮影された。当時のデータ整理作業では、撮影された画像を図-2のように準備されたモニターに映し、領域区分別、流木のサイズ別に、10分間ごとの流下本数の計測が行われた。この橋梁上からの画像上の領域区分に対応する位置を、上空からの航空写真上に示したものが図-3である。当初の計数時に用いられた領域区分は、右岸（R領域）と左岸（L領域）の間の部分を、さらに3つの区分（A, B, C）に分けたものであったが、図-3からわかるように、この3領域は実際には非常に狭い領域を示しており、以降の検討ではA, B, Cの各領域をまとめてC'領域として扱った。

### 3. 観測結果の再検討

図-4は対象地点での8月12-13日の観測時におけるサイズごとの流木流下数変化と観測地点近傍の額平川観測所での水位を示したものである<sup>6)</sup>。観測期間中、8月12日19:00から8月13日5:40までの時間帯に関しては夜間の照明が十分でなかったためカメラアングルを変更しており、ここでは欠測として扱った。図-4では流木の流下領域による整理は行っておらず、全体的な流木流下数の傾向を示している。結果から、水位上昇のピーク（12日16:00）に先立ち流下数の総数のピーク（12日15:20）が現れる傾向が示されている。

上記は既往の結果であるが、本研究ではこれを以下のように整理した。図-5はアブシトエナイ橋観測地点での8月12日14:00~19:00（図-4中の時間帯a）における流木長が0m~5mの流木流下数変化と観測地点近

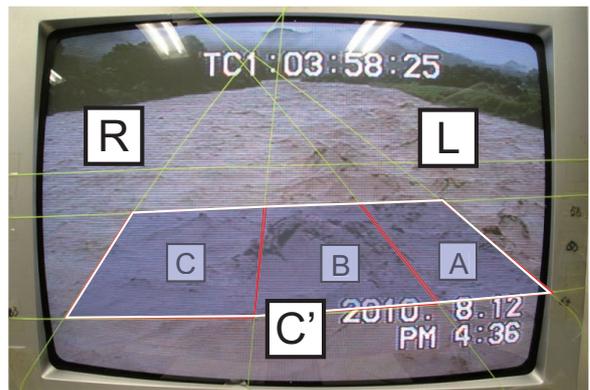


図-2 撮影動画からの流木計数時に用いたモニタ上の領域区分

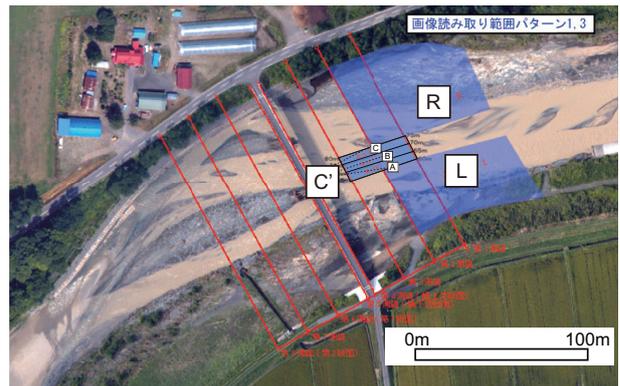


図-3 モニタ上の区分に該当する領域区分をアブシトエナイ橋を中心に航空写真に示したもの。赤い実線は寒地土木研究所による横断測量時の測線を示す

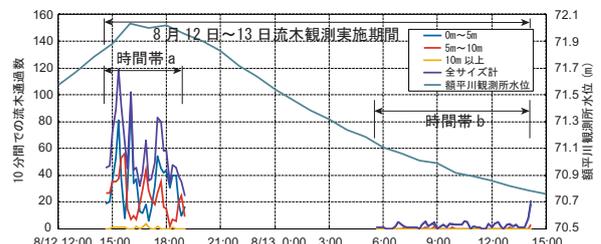


図-4 2010年8月12日~13日にかけての流木の計測数の変化<sup>6)</sup>

傍の額平川観測所での水位を示したものを、図-6は同時時間帯における流木長が5m~10mの流下数変化を示したものである。また図-7は8月13日5:00~15:00（図-4中の時間帯b）における流木長が0m~5mの流木流下数変化と観測地点近傍の額平川観測所での水位を示したものを、図-8は同時時間帯における流木長が5m~10mの流下数変化を示したものである。ここに示された結果からは、サイズの大きい流木（5m~10m）に関しては、水位ピーク周辺の時間帯においてR領域の通過数が卓越し、その後の水位のピークを過ぎた時間帯にはほとんど流木自体の流下が見られないこと、サイズの小さい流木（0m~5m）に関しては、水位のピークを迎えた時間帯（時間帯a中の12日16:00~17:00）でR領域の通過数が卓越するが、それ以外の時間帯においては他の領域へと通過数が分散すること、などが見受けら

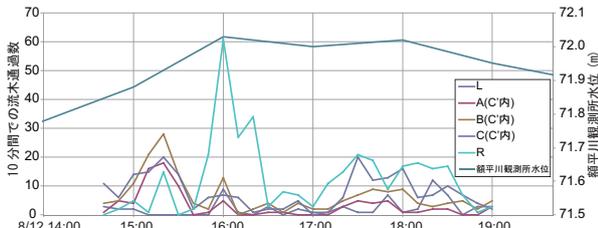


図-5 水位上昇からピークにかけて（図-4 中の時間帯 a）の領域ごとの流下数変化（流木長：0m～5m）

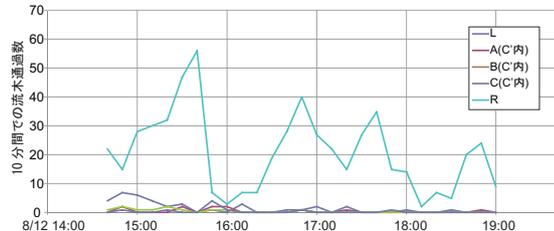


図-6 水位上昇からピークにかけて（図-4 中の時間帯 a）の領域ごとの流下数変化（流木長：5m～10m）

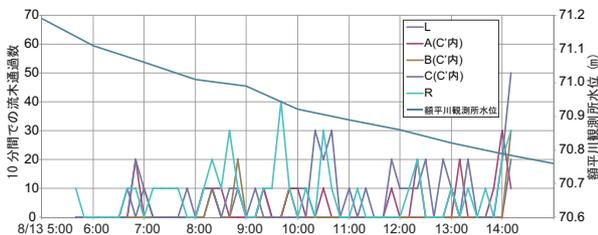


図-7 水位低下期（図-4 中の時間帯 b）の領域ごとの流下数変化（流木長：0m～5m）

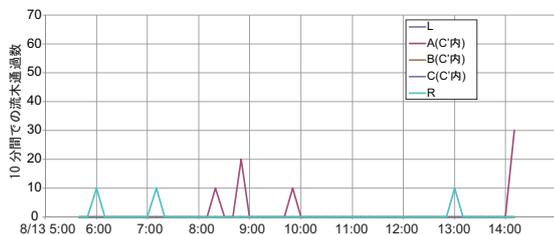


図-8 水位低下期（図-4 中の時間帯 b）の領域ごとの流下数変化（流木長：5m～10m）

れる。

この流木長および時間帯の違いによる通過箇所の割合を流木長ごとにまとめたものが表-1 および表-2 である。各表において、図-4 に示した観測時間帯全体（8月12日14:00～8月13日15:00）での割合と、水位ピークに到達した時間帯（12日16:00～17:00）の割合とに区分して表記している。表-1 より、流木長が0m～5mのケースでは、観測時間全体ではC'領域へと流下数が集中しているが、ピーク到達時では、R領域に集中して流下していることが分かる。一方、表-2 より5m～10mのケースでは、多くの時間帯を通してR領域を中心として流下数がカウントされており、ピーク到達時とそれ以外とで顕著な差は見られなかった。このように、流木のサイズと流量の変化により中心的な流下領域が変化することが示唆された。

表-1 流木長 0m～5m の場合の領域ごとの流下割合

時間帯	領域 L	領域 C'	領域 R
全体	8%	54%	38%
ピーク	7%	26%	67%

表-2 流木長 5m～10m の場合の領域ごとの流下割合

時間帯	領域 L	領域 C'	領域 R
全体	6%	6%	88%
ピーク	5%	5%	90%

## 4. 数値解析による検討

### (1) 解析手法

本研究での数値解析は、流れ場の数値計算と流木挙動の数値計算の2段階の解析によって構成される。流れの解析には、iRIC<sup>8)</sup>に含まれる平面2次元の流れおよび河床変動計算ソルバーである Nays2D を基としてバイナリ出力機能を持たせたものを用いた。流量の値は対象期間では流量観測が実施されておらず、何らかの推測値が必要となる。当時、該当地点では寒地土木研究所により継続的な水文観測が行われ、その結果が H-Q 式 ( $Q = 27.72(H - 82.07)^2$ ,  $Q$ : 流量  $m^3/s$ ,  $H$ : 水位  $m$ ) および額平川観測所の水位と同地点での水位の関係式 ( $H_{Abushi} = 1.6685(H_{Nukabira} - 34.454)$ ,  $H_{Abushi}$ : アブシトエナイ橋水位  $m$ ,  $H_{Nukabira}$ : 額平川水位  $m$ ) として整理された。本研究での計算では、上記の結果を用いて、まず8月12日～13日の額平川観測所水位から対象地点のアブシトエナイ橋での水位を関係式により推測し、そこから H-Q 式を用いることで、当時の流量を推測した。今回は、水位ピーク時の流量として  $370.9m^3/s$  を得たほか、その半分程度の流量である  $180.3m^3/s$  による流況解析も行った。後者については、観測期間におけるピーク時間帯を除いた流量の平均値に該当する。

対象地点周辺の河道形状として、アブシトエナイ橋周辺でのレーザー測量結果（河道近傍を対象）と国土地理院による5mメッシュ標高データ（河道周辺の広い範囲を含む）を重ねたものを基礎とし、さらに2010年当時に寒地土木研究所が実施した20m間隔（アブシトエナイ橋を挟んで上下流に4測線ずつ測量した。図-3参照）での横断測量結果を用いることで修正を行った。修正の手順として、まず2010年実施の横断測量結果を GIS (ESRI社 Arc Desktop10.2) に取り込み、同GISの3D Analyst 機能を用いて Triangulated Irregular Network (TIN) による補間を行った。図-9に、レーザー測量による標高データ上に、横断測量結果から作成した TIN データを重ねたものを示す。アブシトエナイ橋の上下流

それぞれ60mの区間で、20m間隔の横断測量を元とした解像度の低い区間が見受けられるが、**図-3**に示された流路の水面位置との比較から、その領域の河道内でお筋の形状が表現されていることが分かる。その後、iRIC<sup>®</sup>のインターフェイス上で、これら地形データを重ね合わせ、2mメッシュの格子上に標高を与えた。計算領域は河道周辺地形を含む流下方向に約1100m、横断方向に約300mの矩形形状であり、上流側の短辺の一部に障害物を設定することで、河道部分からのみ流量を与えた。なお、計算にあたってはアブシトエナイ橋の橋脚部分に相当する格子も障害物として設定している。**図-3**に示されたC'領域は、この2本の橋脚の丁度中間に接続する位置に存在する。

流木の計算には、既往研究<sup>4)</sup>に示された計算モデルを適用した。これは清水ら<sup>9)</sup>により提案された個別粒子的手法<sup>10)</sup>に対する応用に準じたもので、乱流中の粒子の運動方程式<sup>11)</sup>により流木を構成する個々の粒子に対してその運動を算出した後に、一つの流木を構成する粒子全体での重心の移動およびモーメントを算出し、**図-10**に示す手順により、あらためて流木を構成する粒子群としての移動を求めるものである。なお本研究でのモデルでは粒子同士の衝突のモデル化は含んでいない。また流木は5点の球状要素で代表されるものとし、流木長0m~5mを代表した長さが5mで直径が0.279mのケース、流木長5m~10mを代表した長さが10mで直径が0.450mのケースの、2ケースを検討した。流木の直径に関しては、既報<sup>6)</sup>における流木発生源での残存流木調査結果を用いてその長さから線形近似により算出した。なお流木を構成する要素の密度は900kg/m<sup>3</sup>とした。これら流木要素を計算領域の上流側から横断方向に直線状に投入し、その流下の様子を確認した。投入量は計算可能な総時間とポスト処理の兼ね合いから、60秒あたりで約18本程度とした。

## (2) 解析結果

赤堀ら<sup>5)</sup>の既往研究では、流路内での流木が渦度の強い領域を避けるように集中することが示されている。ここではまず流れ場の数値解析結果に基づき検討するものとし、流量370.9m<sup>3</sup>/sおよび180.3m<sup>3</sup>/sの各ケースにおけるベクトルと水深、および渦度の強さをそれぞれ示した(**図-11**、**図-12**、**図-13**、**図-14**)。これらから、180.3m<sup>3</sup>/sのケースは水深が浅く、**図-3**や**図-9**に示された水路内でのみお筋と、**図-12**の緑色の水深の深い部分がほぼ一致しており、低水路部に形成されたみお筋での流れが河積の主体となっていることが推測される。また、どちらの流量の場合にも流路の左右岸および橋脚の周辺で強い渦度が生じており、流量370.9m<sup>3</sup>/sのケースでその傾向がより顕著であることが分かる。

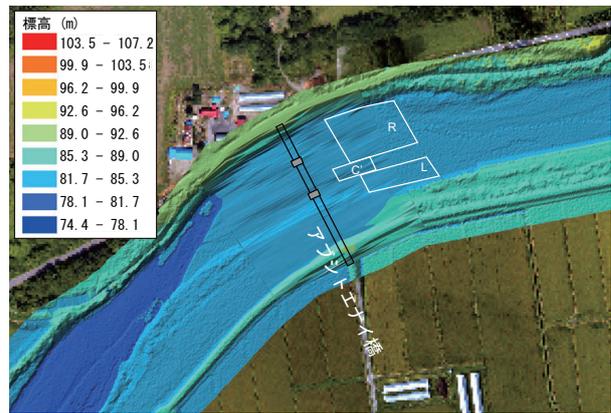


図-9 TINで処理された横断測量結果をレーザ測量結果に重ね合わせたもの、グレーの矩形が橋脚位置を示す

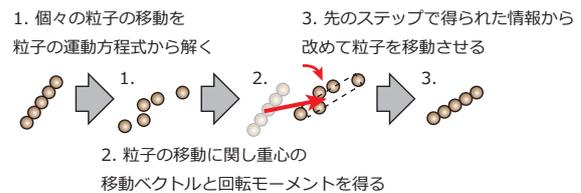


図-10 粒子拘束条件モデルにおける計算手順の概要



図-11 計算:流速ベクトルと水深の瞬間値, 流量370.9m<sup>3</sup>/s

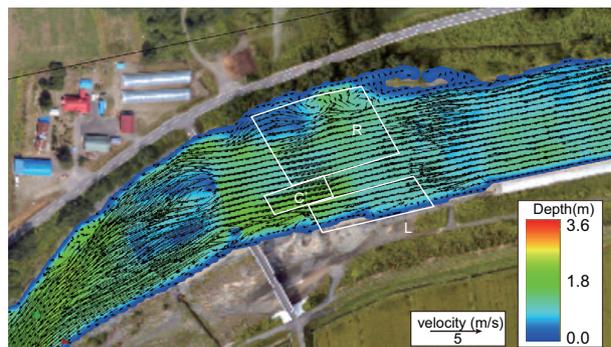


図-12 計算:流速ベクトルと水深の瞬間値, 流量180.3m<sup>3</sup>/s

この流れ場の時系列データと前述の流木モデルを用いて、長さや直径の異なる流木の流量による挙動の違いを検討した。**図-15**は流木流下状況の瞬間的な様子を、流量180.3m<sup>3</sup>/sにおける流木長10mのケースの結果について示したものである。

ここでは、水理実験を対象とした既往の研究<sup>5)</sup>と同様に、流木流下時の移動平均密度を空間的に検討することで、流れの状況に応じた流木の集中化の度合いを検討

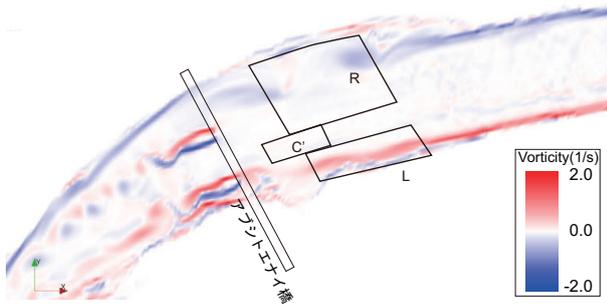


図-13 計算：渦度コンターの瞬間値，流量  $370.9\text{m}^3/\text{s}$

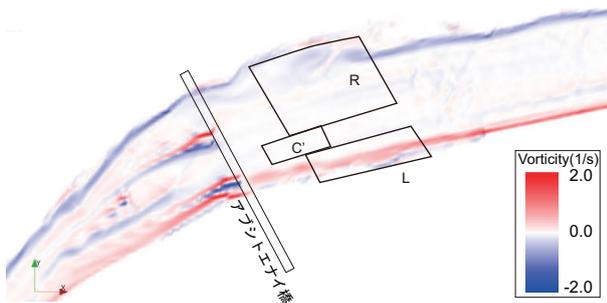


図-14 計算：渦度コンターの瞬間値，流量  $180.3\text{m}^3/\text{s}$

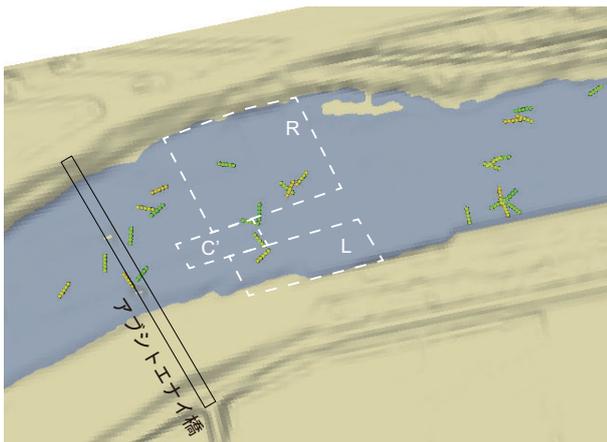


図-15 流量  $180.3\text{m}^3/\text{s}$ ，流木長  $10\text{m}$  のケースにおける流木流下状況の計算結果を可視化したもの

する。流木流下の数値解析結果を画像的に出力し、これに対して市販のシステム（カトウ光研製 Flow Expert）を用いて Particle Tracking Velocimetry (PTV) 解析を行った。この結果における流木の存在する位置の周辺において、約  $25\text{m}$  四方での密度（本数/ $\text{m}^2$ ）を移動平均により算出する。これらを解析時間内で時間平均し、さらに規格化のため同密度の最大値で除した。結果を図-16、図-17に示す。先に述べた通り、流量の違いと流木長の違いに応じて合計で4ケースの計算を行っているが、ここでは流木長  $5\text{m}$  のケースを代表として比較を行った。同様の結果の解析手法に関しては、水理実験との比較において良好な一致を示しており<sup>4)</sup>、絶対的な流木数の再現性を保証するものではないものの、空間内でどこに流木が集中しやすいかの傾向を探るに

あたり十分な信頼性を有していると考えられる。

これらの結果から、流量  $370.9\text{m}^3/\text{s}$  のケースでは、R領域、C'領域のそれぞれに導かれる2本の道筋に集中化しており、特にR領域の直上流側で非常に流木密度が高くなる領域が見られる。このR領域内の流木密度の高い部分は、図-13に示されたR領域内の渦度の高い部分を避ける形で存在しており、既往研究<sup>4)</sup>での流路内での流木が渦度の強い領域を避けるように集中するという知見と一致する。また流量  $180.3\text{m}^3/\text{s}$  のケースを含め、L領域では全体に渦度が高いことが示されているが、表-1および表-2に示された観測結果でも、L領域を通過する流木はほとんど見られず、こちらの結果も同じ知見で説明が可能である。

一方で流量  $180.3\text{m}^3/\text{s}$  のケースでは、R領域へと繋がる集中化の道筋が徐々に消滅し、逆にC'領域に差し込むような密度が高い道筋が明瞭に現れる様子が示されている。これは、流量が少ない時間帯に短い流木がC'領域に流木が集中するという表-1の示す観測結果と矛盾せず、モデルの挙動が現地での流下状況のある程度再現していることが推測される。ただし図-14ではC'領域に向けて流木をはじくような渦度の高い領域は明確には示されておらず、このような流木の挙動を、渦度の分布のみに由来するものと考察することは難しい。

次に、個々の流木の挙動が示す乱れの特性を検討する。PTV解析結果は個別の流木要素ごとに離散的にベクトルを示すが、これを上記の画像解析システムの機能を用いてオイラー的な格子上の情報に変換する。この格子上の情報に変換された流木流下ベクトルの時系列データから得られた横断方向流速成分の乱流強度を示したものが、図-18、図-19である。図-18の流量  $370.9\text{m}^3/\text{s}$  のケースと比較すると、図-19の  $180.3\text{m}^3/\text{s}$  のケースではC'領域の上流側で強い乱れの分布を示しており、 $5\text{m}$  の流木の挙動が横断方向に関して強く変動していることが示された。既往研究<sup>5)</sup>では、流木の挙動を規定する要素のうち重要なものとして慣性力を挙げており、流木のサイズが小さく、流速が遅くなる該当のケース（流量  $180.3\text{m}^3/\text{s}$ ，流木長  $5\text{m}$ ）では、最も慣性力が小さくなることが推測される。これは、その逆のケースと比較して流れの有する乱れの影響を受けやすくなることを意味しており、すなわちスケールの小さい流れの構造に対しても追従しやすい傾向にあると考えられる。図-11と図-12の比較から示されたように、流量が少なく水位が低い状況では低水路部に形成されたみお筋に応じた流れへと向かう急変が生じることが推測され、慣性の影響が少ない  $5\text{m}$  以下の流木のみがこれに追従することで流木流下状況の差が示されたと考えられると、観測結果および数値解析結果のいずれとも矛盾しない。

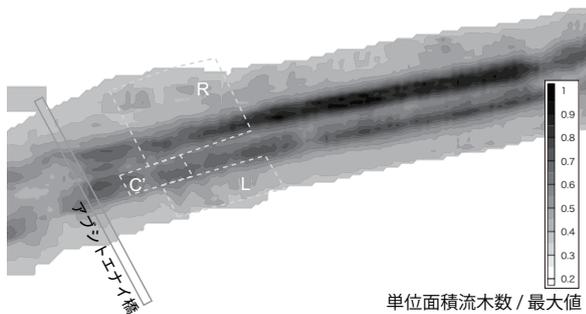


図-16 単位面積あたりの流木本数に関し 25m 四方での移動平均を取ったもの。時間平均をとり領域内の最大値で基準化 (流量  $370.9\text{m}^3/\text{s}$ , 流木長: 5m)

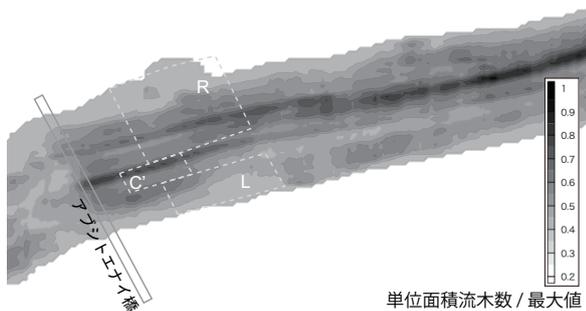


図-17 単位面積あたりの流木本数に関し 25m 四方での移動平均を取ったもの。時間平均をとり領域内の最大値で基準化 (流量  $180.3\text{m}^3/\text{s}$ , 流木長: 5m)

## 5. まとめ

本研究では、既往の流木流下観測結果を新たに空間的な傾向の違いから検討することで、流木流下時における流れの構造が流木の流下機構に与える影響を検討した。観測結果からは、流量と流木のサイズの変化に応じて、流木が集中する領域が異なることが示された。この結果について、現地での地形データを用いた数値解析を行うことで要因を推測した。結果より、既往の知見である流木が渦度の高い領域を避ける傾向にあることが改めて確認された。また、質量が小さく移動速度が低いケース、すなわち短い流木が流量の少ない時間帯を流下する際には移動速度の変動が大きいことが示され、このような状況では慣性力の値が小さくなることから流況の急変に追従しやすいことが示唆された。流量が少ない場合には水位が下がり、低水路に形成されたみお筋が健在化することから、この傾向はさらに強調されると考えられる。以上より、流木の集中化する箇所は、流木のサイズと流量ハイドログラフの変動によって変化すると考えられ、対策の際にはこれらを十分に考慮する必要があると考えられる。

謝辞：本論文では、文部省科学研究費補助金若手研究 (B) (研究代表者:赤堀良介, 課題番号:25820231, 2013) の補助を受けた。記して感謝の意を表する。

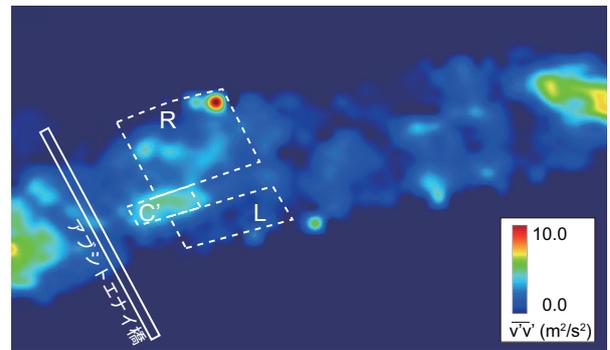


図-18 流木モデルに対する PTV 結果から得られた横断方向流速成分乱流強度 (流量  $370.9\text{m}^3/\text{s}$ , 流木長: 5m のケース)

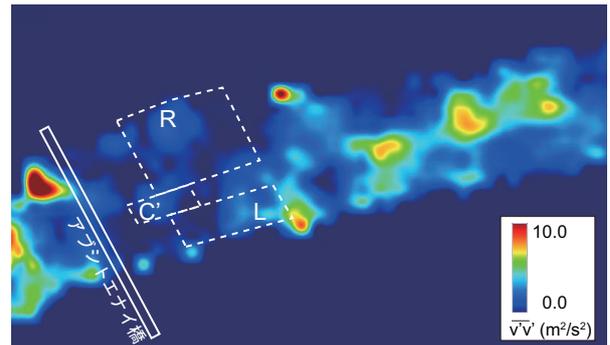


図-19 流木モデルに対する PTV 結果から得られた横断方向流速成分乱流強度 (流量  $180.3\text{m}^3/\text{s}$ , 流木長: 5m のケース)

## 参考文献

- 1) 福岡捷二, 新井田 浩: 流木類の流下・堆積とそれらの河道設計への利用, 土木学会論文集, No. 47 9/II-25, pp.51-60, 1993.
- 2) 澁谷 一, 香月 智, 大隅 久, 石川信隆, 水山高 久: 円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67, No.1, pp.113-132, 2011
- 3) 中川 一, 井上和也, 池口正晃: 流木群の流動に関する研究 (3) -流木の回転運動を考慮した解析-, 京都大学防災研究所年報, 第 37 号 B-2, pp.459-473, 1994.
- 4) 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.415-I.422, 2012.
- 5) 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, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, I.691-I.696, 2014.
- 6) 赤堀良介, 村上泰啓, 土田宏一, 白井博彰: 簡易型システムによる橋脚周辺および発生源における流木挙動の観測調査, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp.29-34, 2011.
- 7) 阿部修也, 渡邊康玄, 長谷川和義: 2003 年台風 10 号出水における沙流川での橋梁被害, 河川技術論文集, 第 11 巻, pp. 109-114, 2005.
- 8) iRIC software: <http://i-ric.org/ja/>
- 9) 清水義彦, 長田健吾: 流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.829-834, 2007.
- 10) 越塚誠一: 数値流体力学, 培風館, pp178-181, 1997.
- 11) Tchen, C.M.: Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid, Ph.D. thesis, Delft, 1947.

(2015. 4. 3受付)