

手取川における洪水前後の 航空レーザ測量を用いた河道状況調査

RIVER CHANNEL INCERSTIGATION BY USING AIRBORNE LIDER SURVEY BETWEEN BEFORE AND AFTER THE FLOOD IN TEDORI RIVER

大角一浩¹・能澤祐明¹・秋田麗子²・蛭田啓久²・鈴木浩二³
Kazuhiro OHKADO, Hiroaki NOZAWA, Reiko AKITA, Hirohisa HIRUTA and Koji SUZUKI

¹国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所 (〒920-8648 金沢市西念4-23-5)

²日本工営株式会社 河川・水工部 (〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2)

³中日本航空株式会社 調査測量事業本部 (〒480-0202 愛知県西春日井郡豊山町大字豊場字若宮17-1)

This study was conducted to provide quantitative analysis on the change of the river bed due to the flood. The analysis was done by using the Airborn lider survey and other investigations which were done before and after the flood respectively. As a result, tendency of the erosion at the water route was quantitatively understood. Moreover, it is clarified that the tree height and the moments of the running water are affect on the generation of driftwood.

Key Words : Airborne lider surver, Thalweg, Trees outflow, River channel survey

1. はじめに

手取川では、平成25年7月、近年の最大出水である平成10年9月洪水に次ぐ、大規模な洪水が生じた。金沢河川国道事務所では、本洪水を挟んで2ヶ月以内に2回の航空レーザ測量等の調査を実施した。本研究は、これら調査データを活用し、洪水による河道状況の変化を定量的に把握することを目的とした。本稿では、河道状況の変化として、河床変動と樹木流出について報告する。

2. 平成25年7月洪水及び事前・事後調査の概要

(1) 平成25年7月洪水の概要

平成25年7月29日、日本海から東日本にかけて梅雨前線がのび、前線に向かって南から暖かく湿った空気が流れ込んだため大気が不安定となり、同日未明より北陸地方を中心に強い雨が降り続けた。これにより石川県小松市内では24時間雨量199.5mm(小松地点)を観測し、この地点の観測史上最多の雨量を観測した。

一級水系手取川においても、基準地点の鶴来(河口より14.3km、流域面積747.6km²)では避難判断水位に迫る高い水位を記録した。(図-2) 最大流量(暫定値)は2,300m³/sであり、流量年超過確率は1/15相当、鶴来観測所における平均年最大流量1,100m³/sの2倍程度の洪水となった。

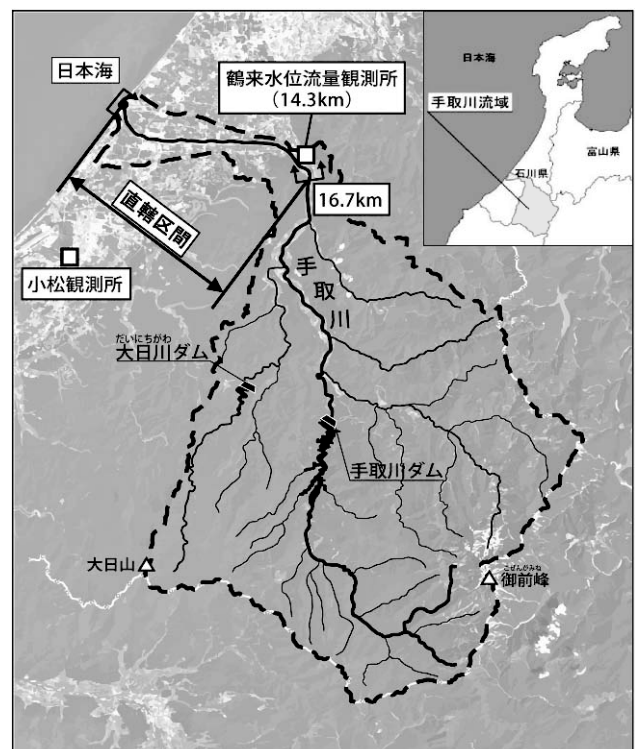


図-1 手取川流域位置図

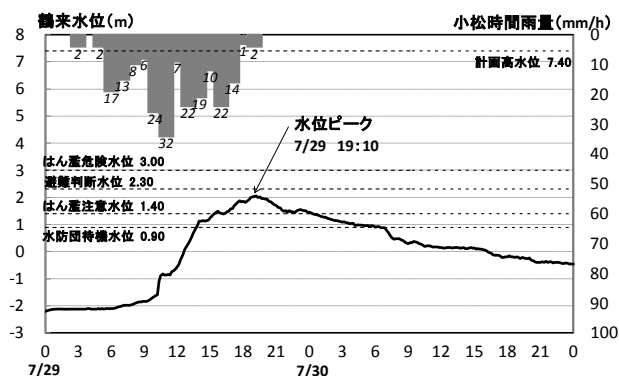


図-2 平成25年7月洪水の雨量及び水位時系列

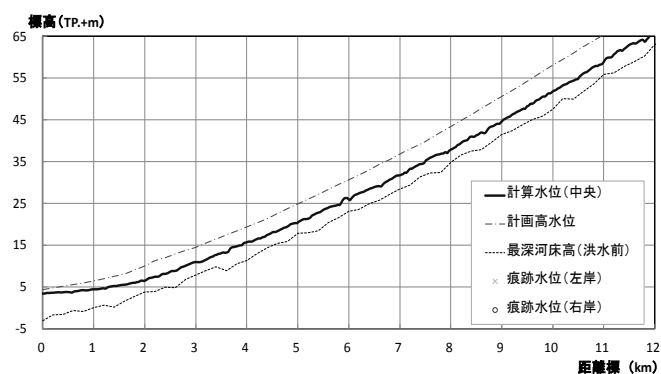


図-4 計算水位と痕跡水位縦断面図

表-1 洪水前後の調査項目・実施日一覧

調査項目	調査日	
	洪水前	洪水後
垂直写真撮影	6月17日	8月14日
航空レーザ測量	6月16～22日	8月10～11日
河川横断測量	平成24年12月	平成25年10月

(洪水発生；平成25年7月29日)

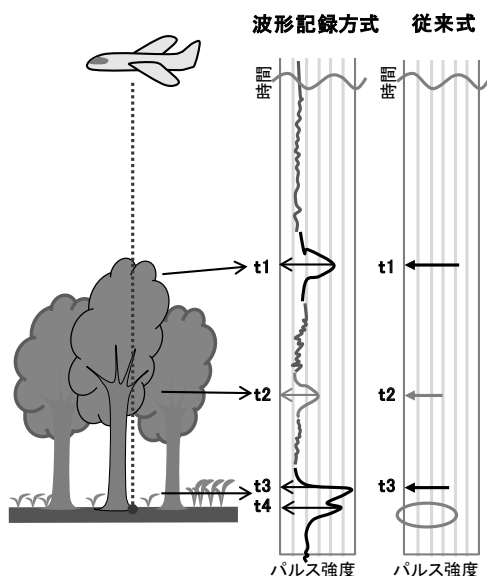


図-3 波形記録方式と従来式の違い (1パルスの例)

表-2 流況解析のモデル概要及び条件一覧

項目	本検討モデル
解析ソフト	iRIC 2.2.0.3653 Nays2D 4.2
解析範囲	手取川-0.2～16.7k (16.9km)
解析格子	横断方向30分割 (解像度；約5～10m) 縦断方向1,133分割 (約10～15m) 全33,990メッシュ
地形条件	洪水前地形，洪水後地形 (陸部；航空レーザ測量，水域；横断測量より合成)
Manning 粗度係数	低水路；セグメント毎の洪水逆算粗度より 植生域；高丈草本の場合 $n=0.060$
上流端流量	$2,300\text{m}^3/\text{s}$ (H25.7洪水 鶴来ピーク流量)
下流端水位	T.P.+0.825m (H25.7 金沢港潮位)
樹木影響	樹木植生密度；0.1 (密) 抵抗係数；1.2 (円柱)

(2) 洪水前後における調査の実施

本洪水に先立ち、金沢河川国道事務所では直轄範囲全区間（延長16.7km）の空中写真撮影及び航空レーザ測量を実施したところであった。また、定期横断測量についても前年冬季に実施していた。

平成25年7月洪水の発生を受け、洪水による河道状況の変化を捉えるため、急遽、洪水後調査を実施した。実施内容は、洪水前調査と同じとした（表-1）。

(3) 航空レーザ測量の実施手法

今回の調査では、堤防管理等への多面的な利用を考慮し、 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$ に1点以上と高密度に設定した。プラットフォームはヘリコプターとし、レーザシステムには植生下を高精度に取得する波形記録方式を使用した（図-3）。

3. 洪水時流況の把握

後述の地形条件、樹木条件を基に、平成25年7月洪水時流況の把握を目的とし、平面流況解析を実施した。

(1) 平面流況解析モデルの構築

平面分布を把握するため、浅水流モデルとした。計算モデル及び計算条件を表-2に示す。

(2) 解析モデルの妥当性確認

本洪水後には痕跡水位調査も実施した。流況解析による水面形と痕跡水位を比較すると（図-4）、場所によって0.3m程度の相違があるものの、全体的にはよく合致した。これより、本解析モデルによって洪水時水理量を把握するのは妥当と判断した。

(3) 平成25年7月洪水の流況概況

解析範囲における計算上の流速は平均 2.0m/s （最大 7.4m/s ）、水深は平均 1.76m （最大 7.4m ）となった。手取川では平均年最大流量 $1,100\text{m}^3/\text{s}$ が砂州の冠水する流量に相当するが、今回洪水（ $2,300\text{m}^3/\text{s}$ ）は全ての砂州が冠水し、洪水が低水路一杯に流れる状況であった。

4. 洪水による地形変化の把握

手取川では、近年、大きな河床変動は生じていない。ただし、複列砂州形態を呈する中上流域では、滞筋の固定化と深掘れ傾向が確認される。平均河床勾配1/150～1/200の急流河川であるため、河川管理上、滞筋の変化によって堤防・護岸への影響が及ばないかの監視が重要である。

(1) 洪水前後の河床高データの作成

同時期の横断測量、航空レーザ測量、空中写真の調査結果が得られることから、以下の手法で河床高の面的データを作成した。

- ・ 水面以上の範囲は、航空レーザ測量のDEMデータを用いる。
- ・ 水面以下の範囲は、横断測量を水域（空中写真により確認）に沿って縦断方向に線形補間したものを用いる。
- ・ 両データの境界部で標高の比高差が大きくなる箇所は、そのエリアについて横断方向に線形補間して調整する。

(2) 河床変化高分布の把握

以上の方法により、2時期の河床高分布データを作成し、その差分から洪水の前後における河床変化高の分布を算定した。

これにより、洪水前後の三次元的な地形変化を把握することができ、例えば、図-5のように、写真では読み取ることのできない河岸近傍の深掘れ箇所（11.8～12.0k付近）を明瞭に捉えることができる。

(3) 河床変化に関する統計的整理

直轄区間内の河床変動高の頻度分布は図-6に示すとおり、大半が変動高0.2m以内に収まったが、これを上回る侵食箇所が18%、堆積箇所が26%あった。

次に、絶対値0.2mを上回る河床変動箇所について、侵食箇所・堆積箇所に分け、洪水ピーク時の水深（洪水前地形に対する解析結果）の頻度分布を整理した（図-7）。

侵食箇所は水深帯の大きい滞筋に多くなる傾向が明瞭であり、特に、水深4m付近を境に侵食箇所が急増することが分かる。

これより、手取川で近年確認される滞筋の深掘れが、今回洪水においても進行したことが確認できる。また、埋戻し等により洪水時水深を低減させることが、対策の一つの方向性として見出すことができる。

なお、流速、流向でも同様の整理を行ったが、侵食・堆積を区分するような明瞭な傾向は見られなかった。

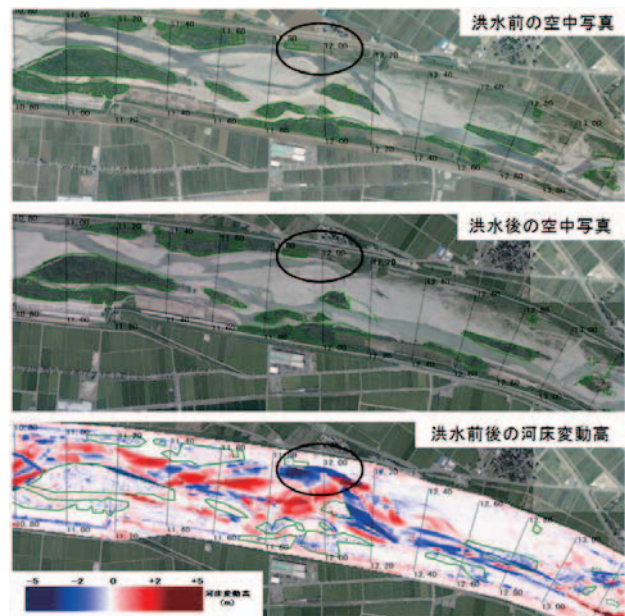


図-5 洪水前後の空中写真と河床変動高分布（11～13k付近）

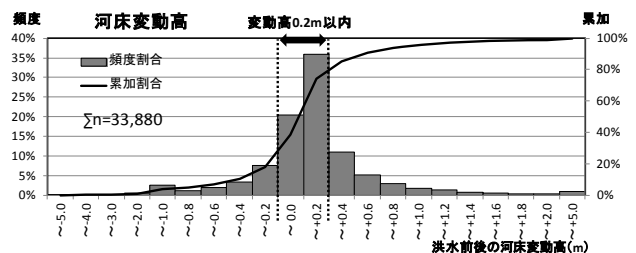


図-6 直轄区間全体の河床変動高の頻度分布

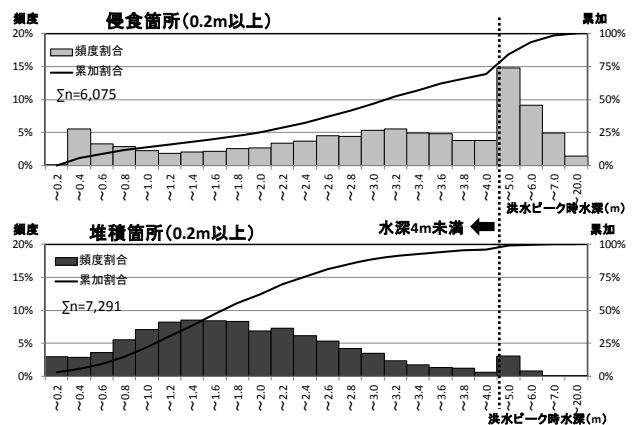


図-7 洪水前地形に対する洪水ピーク時水深の頻度分布

5. 洪水による樹木流出状況の把握

手取川では、河道改修が一段落した平成年代以降、河道内の樹林化が進んでいる。特に、ハリエンジュ、シンジュ、オニグルミの増大が目立つ。これに対応し、適宜、樹木伐開を実施しているが、適正な樹木管理を検討する上で、洪水時における樹木の挙動把握が重要である。

(1) 樹木群の把握手法

樹木群を特定する手法として、従来は空中写真や現地調査を用いるのが一般的であったが、近年では航空レーザ測量を活用した手法が多く報告されている。例えば、森林資源としての樹木本数・樹高・樹冠サイズ等の把握¹²⁾や、森林構造の把握³⁾、風倒木発生箇所の特定制⁴⁾、地すべり挙動監視の一環としての樹木移動量の把握⁵⁾などが挙げられる。

(2) 本研究における樹木群の判別手法

夏季に撮影する空中写真では、植生の色彩により、樹木か、高丈草本かを判読することが困難な場合がある(図-8)。今回はほぼ同時期の空中写真と航空レーザ測量が得られることから、両者を比較しながら樹木群を特定する手法をとった。

手取川の高丈草本の代表種はセイタカアワダチソウであるが、洪水直後の現地調査において、これの平均丈が1m程度であったことを踏まえ、航空レーザ測量におけるDSMとDEMの差分(フィルタリング高、図-9)が1m未満の箇所は草本の可能性が高いと判断した。

作業手順としては、まず、空中写真より草本を含む植生域を抽出した上で、航空レーザ測量のDSMとDEMの差分が1m未満の箇所を除き、樹木群の分布エリアとして設定した。

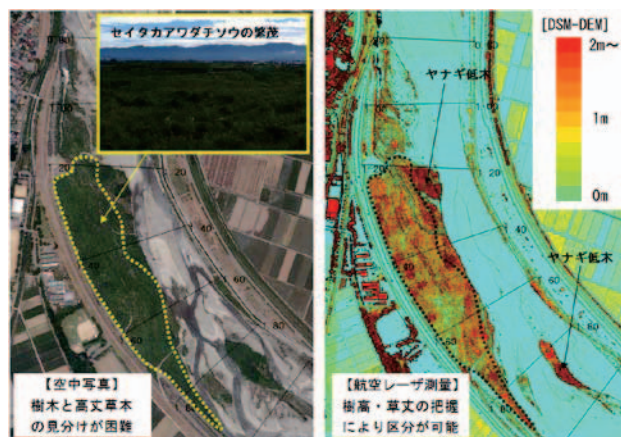


図-8 空中写真と航空レーザ測量の比較 (1.4k付近)

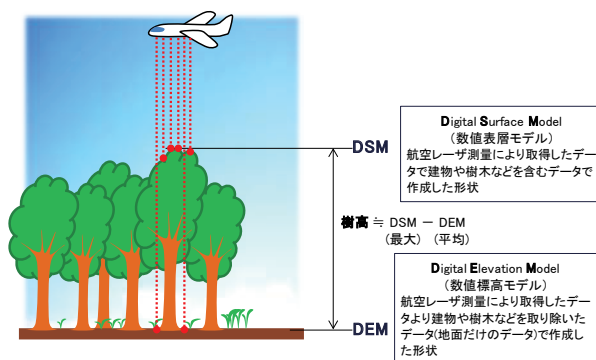


図-9 航空レーザ測量におけるDSM・DEMの模式図

(3) 洪水の前後二時期における樹木群位置の把握

樹木群の判別の結果、洪水前の樹木群面積110km²に対し、洪水後93km²となり、洪水前後で17km² (15%) 減少したことが分かった。

今回調査は、洪水を挟んで前後2ヶ月以内の調査であり、この間、樹木伐開を行っていないことから、樹木の変化は洪水による影響と判断してよい。このため、流出したと思われる範囲17km² (15%) を流出樹木群、残り93km² (85%) を残存樹木群として、以降の比較検討を行った。

図-10, 11に、樹木群の判定結果の一部抜粋と、同位置における洪水前後の現地写真を示す。流出と判定した箇所では、現地写真でも樹木が流出した状況が確認できる。なお、洪水後は各所で流木の堆積が確認された。

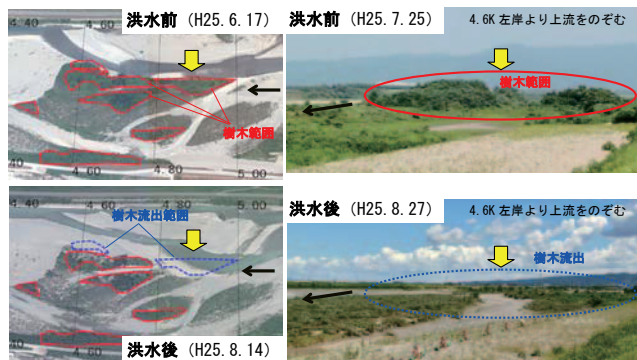


図-10 4.8k付近の状況 (左: 空中写真, 右: 現地写真)

6. 樹木流出・残存箇所の統計的整理

(1) 樹高に関する統計的整理

樹木流出箇所、残存箇所のそれぞれで樹高の頻度分布を整理すると図-12のとおりである。なお、平均化処理したことで1m未満のものも存在する。

これより、流出した樹木群の樹高の大半は3~4m以下の低木であり、残存した樹木群はそれ以上の高木が多いことが分かる。樹木が高木化すると自然には流出しにくい実態がうかがわれる。

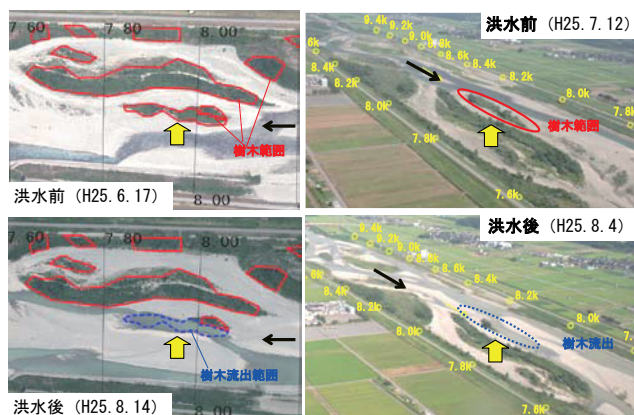


図-11 8.0k付近の状況 (左: 空中写真, 右: 現地写真)

樹木流出箇所における洪水ピーク時の計算水深は、平均2.7m（最大6.0m）となり、樹冠付近まで冠水した低木が流出に至った状況が推測される。なお、樹木残存箇所での計算水深は平均1.2m（最大6.0m）と小さい傾向にあり、後述する作用外力の関与が示唆される。

樹木の残存箇所における樹高は、洪水前後で大きな変化がなく、一様に樹木が傾いたり（樹高減少）、樹冠に浮遊物が付着した（樹高増大）等の現象は生じなかったものと推察する。

(2) 河床変動に関する統計的整理

樹木の流出箇所、残存箇所のそれぞれで、当該地点における洪水前後の河床変化高の頻度分布を整理すると図-13のとおりである。

樹木の残存箇所の河床変化高は±0.4m以内の範囲に集中するが、流出箇所は-5.0～+3.0mと広範囲に分布する。これより、樹木残存箇所では河床変動が抑制され、逆に、樹木流出箇所は大きく河床が変動したことが分かった。これは樹木根系によって基盤を安定させる機能が働いたことが推察される。

(3) 樹木流出に関わる水理量の算定

洪水時の樹木流出について、「河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案）」⁶⁾は、洪水時に樹木に作用する流水のモーメント M_d を式(1)で、樹木の倒伏限界モーメント M_c を式(2)により求め、 M_d が M_c を超えた場合に樹木が倒伏すると示している。

$$M_d = 1/4 \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot h_0^2 \cdot u^2 \quad (1)$$

$$M_c = \alpha \cdot D^2 \quad (2)$$

ここに、 M_d ：幹部分に作用するモーメント[kg・m]、 ρ ：水の密度=102[kg・s²/m⁴]、 C_D ：樹木の抗力係数、 D ：樹木の胸高直径、 h_0 ：水深または枝下高の小さい方[m]、 u ：流速[m/s]、 M_c ：樹木の倒伏限界モーメント[kg・m]、 α ：定数

式(2)の定数 α は、土木研究所が全国河川の実木の引き倒し試験より求めた値として2.5が示されている。桑原・竹林⁷⁾は、ヤナギを対象とした水理実験において、バネばかりで倒伏限界モーメントを計測し、これが妥当であることを示している。

以上より、本稿でも定数 $\alpha=2.5$ を用いて検討を行った。

また、現地情報が不足し、樹冠データ（樹高・枝下高・樹冠幅）や胸高直径、枝下高などをメッシュ毎に与えることが困難であるため、以下のとおり設定した。

- ・樹冠部分に作用するモーメントは考慮しない。
- ・モーメント算出の際の h_0 =水深とする。
- ・胸高直径 $D=10$ cmとする。（複数の群落組成調査において樹木胸高直径が10～20cmであることを踏まえ）

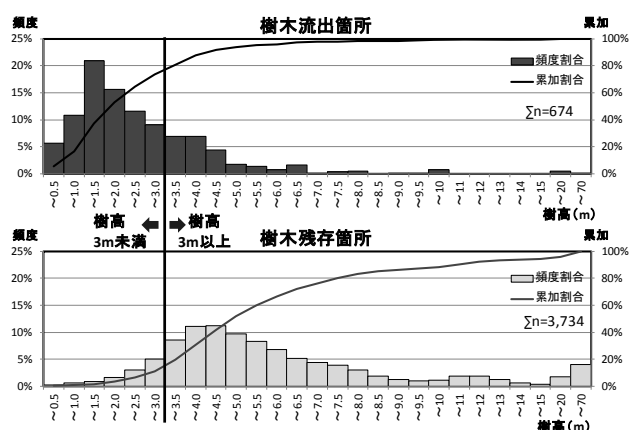


図-12 樹高の頻度分布

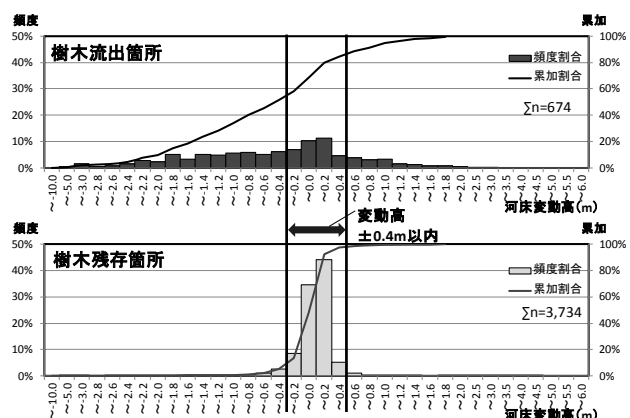


図-13 河床変動高の頻度分布

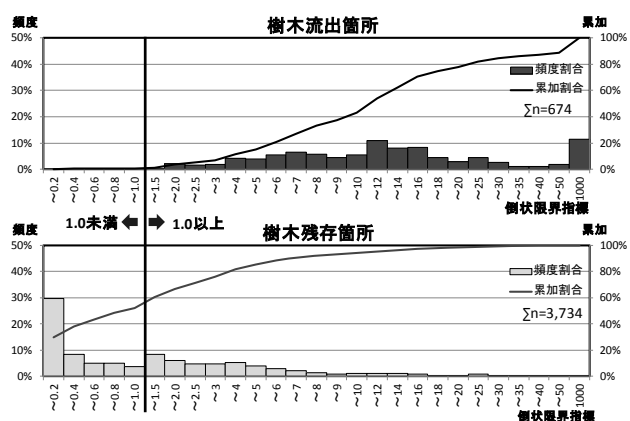


図-14 倒伏限界指標 M_d/M_c の頻度分布

(4) 水理量に関する統計的整理

上記に基づき、洪水ピーク時の倒伏限界指標 M_d/M_c をメッシュ毎に算出し、樹木流出箇所、残存箇所それぞれで頻度分布を整理すると図-14のとおりである。

樹木流出箇所は全般に M_d/M_c が大きく、残存箇所ではこれが小さい傾向が明瞭である。また、樹木倒伏の条件 $M_d/M_c \geq 1.0$ を満たす範囲でのみ、樹木流出箇所が分布するなど、既往の知見を裏付ける結果となった。

(5) 樹木流出を規定した要因の推定

以上の統計的整理より、樹木流出が多く生じたのは樹高3～4m未満の箇所、倒伏限界指標 M_d/M_c が1.0以上となる箇所であることが分かった。

次に、樹高、倒伏限界指標の2軸上に、樹木流出箇所、残存箇所をプロットすると図-15のとおりである。両要因について樹木流出しやすい条件が重なった右下エリアに、流出箇所が集中してプロットされることが分かる。

この結果を踏まえ、洪水前の樹木立地箇所を表-3の4区分に分け、洪水後の流出・残存について整理した。結果を図-16に示す。

これより、両要因の揃う領域 [D] における樹木流出率が高くなる傾向があることが分かる。このことは、現況地形に対応した水量と樹高の分布を把握することで、特定規模の洪水に対する樹木流出箇所を概ね予測可能であることを示唆している。

7. おわりに

(1) 結論

- ・平成25年7月洪水の直前・直後の調査データをもとに、洪水による河道状況の変化の定量的評価を行った。
- ・洪水を挟んで2ヶ月以内の調査であり、洪水以外の影響がほとんど混在しないデータであるため、分析により、一定の傾向を掴むことが出来た。
- ・レーザ測量に加え、空中写真、横断測量を行ったことで、地形再現や樹木判別を精度よく実施できた。
- ・河床変動に関し、滞筋の深掘れが本洪水でも生じたことを定量的に示した。
- ・本洪水で樹木群が残存した場所は、流出箇所に比べると河床変動高が小さく抑えられ、樹木根系による基盤の安定機能が働いたことが推定される。
- ・本洪水で樹木が流出したのは、樹高3～4m未満、倒伏限界指標 M_d/M_c が1.0以上の条件下であった。両条件を満たす箇所での樹木流出率は69%に及んだ。これより、地形と樹高を把握することで、一定規模洪水に対する樹木流出箇所の特定が可能と判断できる。

(2) 今後の課題・展望

今後は、樹木が流況や河床変動に対して及ぼした影響に関して分析を進めていく予定である。

本稿では、現地に近接したフィールド調査が不足し、机上検討を裏付けるための十分な検証材料が少なかった点を反省点と考えている。今後は、全体を限なく網羅するような定量的データの取得のみでなく、フィールド調査も意識して実施していきたい。

今後とも、現地から教訓と知見を得るため、モニタリングに積極的に取り組み、河川管理の効率化・高度化に結び付けていく所存である。

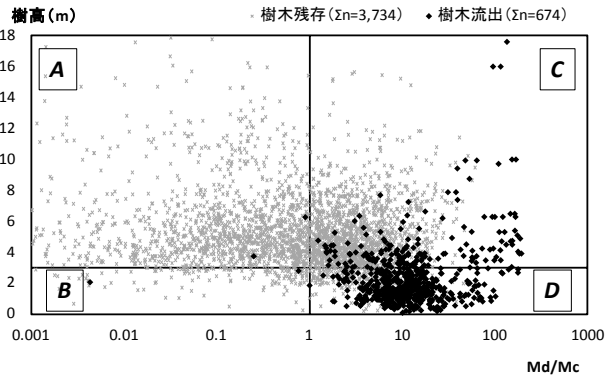


図-15 倒伏限界指標～樹高の散布図

表-3 樹高及び倒伏限界指標による区分

領域	樹高	倒伏限界指標	該当メッシュ数		樹木流出率
			全体	流出箇所	
A	3m以上	1.0未満	2,003	6	0%
B	3m未満	1.0未満	205	15	4%
C	3m以上	1.0以上	1,491	187	12%
D	3m未満	1.0以上	709	674	69%

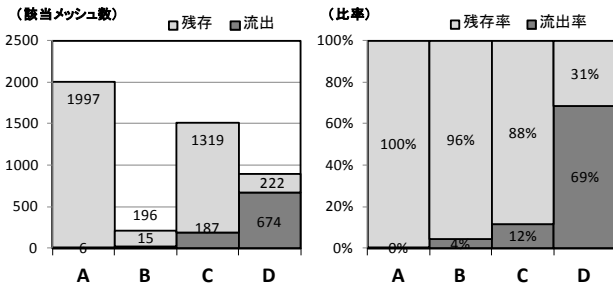


図-16 区分毎の該当数(左)と樹木の残存・流出率(右)

参考文献

1) 岩橋純子, 岡谷隆基, 乙井康成, 小荒井衛, 中埜貴元: 航空レーザ測量アーカイブデータから推測した樹高・樹木本数と現地状況の比較, CSIS DAYS 2013, 発表B04, 2013.

2) 大野勝正, 佐々木貢: 航空レーザ計測による効率的な森林資源の把握, 北海道から始める日本林業の再生, (1), 2013.

3) 平春, 平沼竜一, 後藤真太郎, 范海生: 航空機LIDARデータに含まれる森林構造の影響評価に関する研究, 地球環境研究, Vol.13, pp.73-81, 2011.

4) 鈴木浩二, 松村和樹, 松岡滋治: 航空レーザを用いた風倒木の判別, 砂防学会誌, Vol.61, No.1, pp.39-42, 2008.

5) 小飯塚哲郎, 石川一栄: 砂防事業における航空レーザ計測の実践的利活用について, H24北陸研究発表会, No.11, 2012.

6) 財団法人リバーフロント整備センター: 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), 山海堂, 1999.

7) 桑原正人, 竹林洋史, 岡部健士, 浅見ユリ子, 森下祐: 河道内樹木の流失限界に関する水理実験及び河床変動解析モデルの適用, 河川技術論文集, 第15巻, pp.159～164, 2009.

(2014. 4. 3受付)