

洪水時における河道内障害物による流木群の 集積過程に関する実験的研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO LOG ACCUMULATION PROCESS
AT A BRIDGE DURING A FLOOD EVENT

橋本晴行¹・楠窪正和²・喜多貢菜³・ムハマドファリドマリカル⁴
Haruyuki HASHIMOTO, Masakazu KUSUKUBO, Tsuguna KITA and M. Farid MARICAR

¹九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: hasimoto@civil.kyushu-u.ac.jp

²愛媛県庁 (〒790-8570 愛媛県松山市一番町 4 丁目 4-2)

³八千代エンジニアリング (株) 九州支店 (〒810-0062 福岡市中央区荒戸 2-1-5)

⁴九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

Key Words: landslide, flood, bridge, woody debris, driftwood, woody debris jam

1. はじめに

2012年7月14日に福岡県矢部川流域, 2013年7月28日に島根県高津川支支川名賀川流域では, 記録的な豪雨により河川氾濫や斜面崩壊が各地で発生した. 特に矢部川上流支川星野川では土砂崩れが河道に沿って多数発生し, 大量の崩壊土砂と樹木が河川に一気に流れ込み洪水流に伴って流下した. 流木は途中, 橋梁や植生などの障害物にせき止められて群を形成し, 水位上昇や河道閉塞の要因となり河川氾濫を助長させたりした.

著者らは, 従来, 福岡県矢部川流域と島根県名賀川流域において発生した流木氾濫について現地調査を行い, 氾濫した個々の流木のスケールや障害物により捕捉された流木群の特性について定性的な検討を行ってきた^{1, 2, 3, 4)}. しかしながら, 現地では水理量変動するとともに, 調査は災害後になるなど, 調査の精度に限界がある. 従って, 流木群の形成について, 制御された条件のもとで水路実験により基本的な現象を再現しそのメカニズムを調べることが重要である⁵⁾. このような観点から, 本研究は, 洪水時に流木が障害物に捕捉され群を形成していく過

程を水路実験により定量的に調べ, 流木とそれを捕捉した障害物との関係を明らかにしたものである. まず, 従来の流木の現地調査結果^{1, 2, 3, 4)}をもとに流木と橋梁の模型を用いて水路実験を行い, 橋梁によって生じた流木群の集積過程について調べた. ここで, 流木の供給方法が問題となる. 単独の流木模型を供給する例もあるが⁶⁾, 本実験では, 河道に沿った斜面崩壊から流木が河川に流れ込む状況を模擬し, 流木投入装置から水路に流木模型を群として一気に供給する方法を採用した. 最後に, 物体に作用する流体力の評価の際に用いられる「遮蔽面積」の概念を導入して, 橋梁などの障害物による流木の捕捉量を考察し, 橋梁などの河道内障害物による流木捕捉量の評価法を検討した.

2. 実験方法

流木が障害物に捕捉され群を形成していくメカニズムを調べ, 流木捕捉量 V_{wd} が規定される物理量を明らかにするため水路実験を行った. 実験で用いた水路を図-1に示す. 水路下流端から上流の0m~4mの区間には粗度を貼った固定床とし, 4m~10mの区

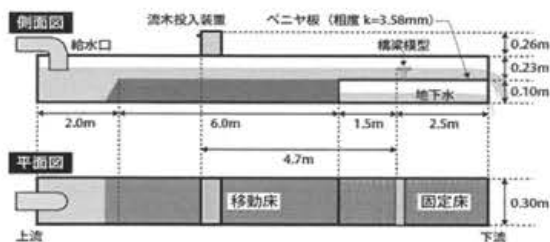
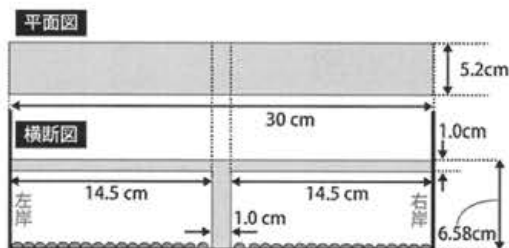
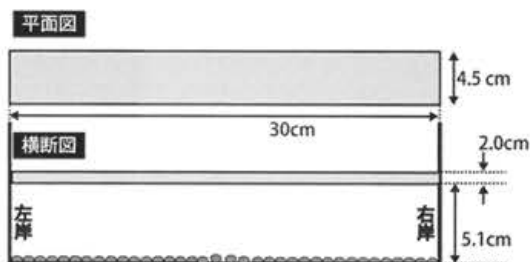


図-1 水路図



(a) 星野川に設置の宮ノ上橋の模型 (縮尺: 1/120)



(b) 名賀川 (C 地点⁴⁾) に設置の橋の模型 (縮尺: 1/65)

図-2 実験に使用した橋梁模型

間は土砂 (粒径 $d=3.6\text{mm}$) を 10cm の厚さで敷き移動床とした。この水路の所定の位置に橋梁模型と流木発生 (落下) 装置を設置した。橋梁模型は矢部川支川星野川および高津川支支川名賀川に設置された 3 基の橋梁をモデルとし、縮尺を勘案してアクリル板で作製した。図-2 に代表的な橋梁模型を示す。

流木発生 (落下) 装置は厚さ 1mm の鉄板で 4 区画に仕切られており、Case 1, 2 の場合 1 区画に最大 200 本、Case 3 では最大 25 本、Case 4 では最大 160 本ずつ、下流側の区画から順に流木模型を配置した。

ここに、Case 1, 2 は星野川、Case 3, 4 は名賀川の橋梁模型を用いた実験である。

流木模型には檜の丸棒を用い、そのスケールは橋梁模型の縮尺をもとに、流木の現地調査結果を参考に、長さ と直径の組み合わせをそれぞれ (7cm , 2mm)、(9cm , 3mm)、(17cm , 5mm) の 3 種類とした。

実験では、流木発生 (落下) 装置に所定の本数の流木模型を流れに垂直な向きに一様に密に配置し、装置のストッパーを外して流れの表面に一気に落下させた。落下の方法は、瞬間的に一度に全流木を落下させる場合と、ある時間間隔 ($\Delta t=2, 10$ 秒) に分けて断続的に複数回 (4 回) 落下させる場合の 2 ケースを行った。後者は、実際の洪水時における流木の状況により近い状態を想定したものである。

流木を複数回 (4 回) 落下させる場合は、落下装置の下流側の区画から赤、青、緑、黄色の順に着色流木模型を配置した。宮ノ上橋の場合 200 本毎、名賀川 C 地点⁴⁾ の場合 160 本ずつ配置し、総計、宮ノ上橋の場合 800 本、名賀川 C 地点の場合 640 本配置した。

表-1 は、橋梁模型ごとに、実験条件を示したもので、単位幅流量、水路勾配、流木模型などの実験条件を示す。ここに、Case 1 は星野川宮ノ上橋を、Case 2 は宮ノ上橋の場合で、橋脚がない仮想的なケースである。また、Case 3 は名賀川 A 地点⁴⁾、Case 4 は名賀川 C 地点⁴⁾ の橋梁をモデルとし、現地の状況に対応して橋脚のない模型とした。橋脚のない模型の場合は、流木を捕捉させるため試行錯誤した結果、橋げたを越流させる必要があった。そのため、流量を大きめに設定した。参考のため、同表には、固定床面から橋げたまでの高さ、流木が存在しない場合の固定床面から測った水位も示している。

なお、本研究の対象は山地河川である。従って本実験で設定される水深 h は流木長 L に対して小さく、 $h < L$ の条件を満足している。

表-1 実験条件

実験ケース	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
橋梁模型	宮ノ上橋(橋脚あり)	宮ノ上橋(橋脚なし)	名賀川A地点(橋脚なし)	名賀川C地点(橋脚なし)
勾配	0.63/100	0.63/100	2.7/100	1.0/100
単位幅流量 $q(\text{cm}^2/\text{s})$	約200 (越流なし)、約300 (越流あり)	約300 (越流あり)	約290 (越流あり)	約315 (越流あり)
捕捉流木がない場合の水位 (cm)	4.5, 6.2 (橋梁から $x=5\text{cm}$ 上流地点)	5.9 ($x=5\text{cm}$ 上流地点)	4.1 ($x=10\text{cm}$ 上流地点)	7.3 ($x=10\text{cm}$ 上流地点)
固定床面から橋桁までの高さ (cm)	5.6	4.4	3.6	5.1
流れの状態	常流	常流	射流	常流
流木模型	長さ $L=7\text{cm}$ 直径 $D=2\text{mm}$	$L=7\text{cm}$ $D=2\text{mm}$	$L=17\text{cm}$ $D=5\text{mm}$	$L=9\text{cm}$ $D=3\text{mm}$
流木の状態	表乾状態	表乾状態	表乾状態	表乾状態
投下流木本数	100, 200, 300, 400, 500, 600, 800	200, 400, 600, 800	25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200	160, 200, 320, 640
投下回数	1回, 4回	1回	1回	1回, 4回

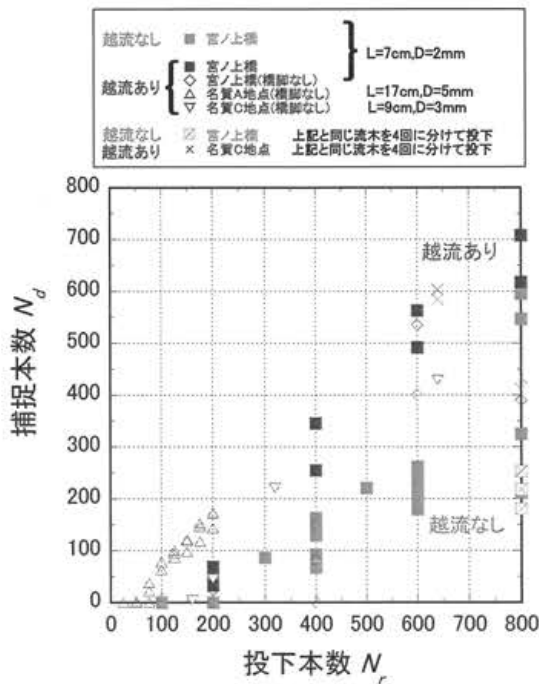


図-3 流木の捕捉本数と落下流木本数との関係

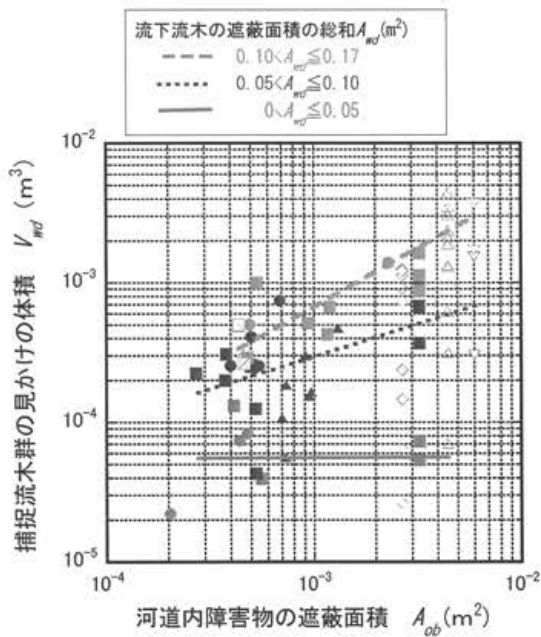


図-4 捕捉流木群の見かけの体積と河道内障害物（橋梁）の遮蔽面積との関係

3. 実験結果と考察

(1) 1度に流木群を落下させた場合

図-3は、流木モデルの落下本数 N_r と橋梁の捕捉流木本数 N_d との関係を示したものである。ここに、大部分のデータは、流木発生（落下）装置内の全流

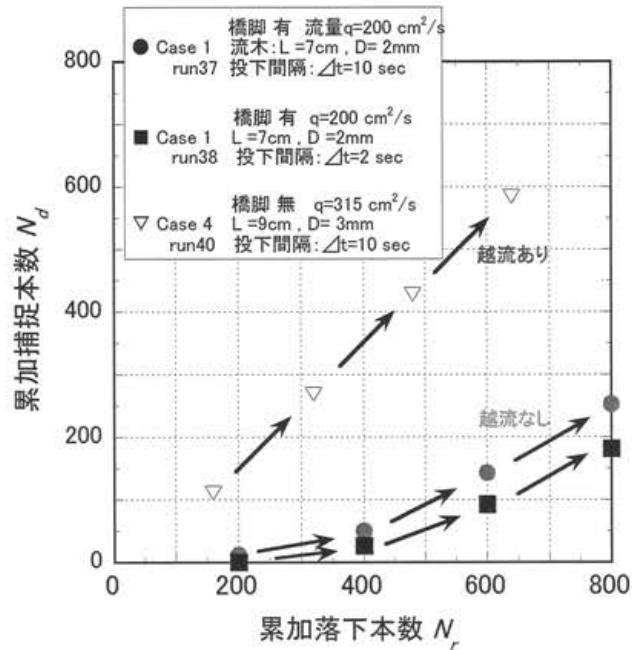
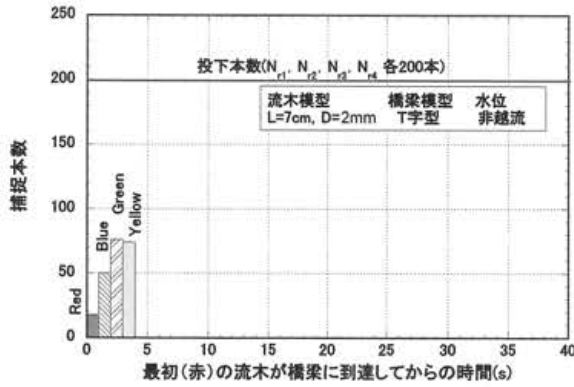


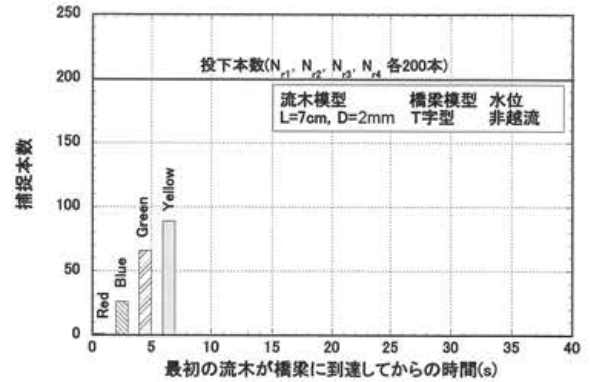
図-5 複数回に分けて流木を落下させた場合の流木の累加捕捉本数と累加落下本数との関係

木を1度に瞬間的に落下させた場合の実験であるが、比較のため、複数回に分けて落下させた実験のデータも一部含まれている。同じ落下流木本数でも捕捉流木本数にバラつきが見られるが、落下流木本数を増加させると捕捉流木本数は多くなる傾向にある。流木が橋梁に捕捉されるためには落下本数が十分に存在する必要がある、ある限界以下で、本数が少なすぎると捕捉されにくくなる。さらに、流木の長さスケールが大きいほど捕捉流木本数が増加した。また橋梁の橋げたを越流した場合には、越流が無い場合と比べて捕捉流木本数が多くなった。これは、橋桁が浸水したことで流木をせき止める断面積が増加したからだと考えられる。このような観点から著者らは、水理学において物体に作用する流体力の評価の際に用いられる物体の「遮蔽面積」あるいは「投影面積」の概念を導入し、障害物の遮蔽面積を用いて流木捕捉量の評価法について考察することとする。Rusya et al.^{1,2)} は、実際の洪水氾濫時において河畔林、家屋、電柱などの障害物が捕捉した流木群の状況を調べ、同様な観点から捕捉流木量の評価法を定性的に調べている。本研究は水路実験によってそれを発展させ定量的に解明したものである。

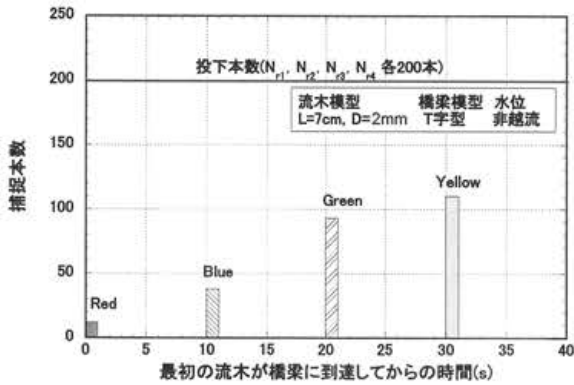
図-4は橋梁模型に捕捉された流木群の見かけの体積 V_{wd} と橋梁模型の遮蔽面積 A_{ob} との関係を調べたものである。障害物（橋梁）の遮蔽面積が大きくなると捕捉流木量は大きくなる傾向があるが、障害物（橋梁）の遮蔽面積 A_{ob} が同じでも捕捉流木量 V_{wd}



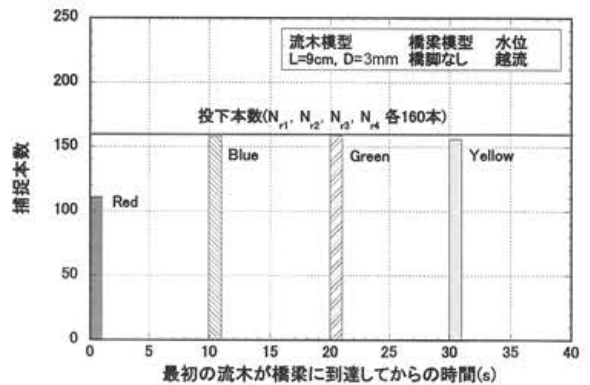
a. 流木を一度に落下させた場合 (Case1, $q=200\text{ cm}^2/\text{s}$)



c. 流木を4回落下させた場合 (Case1, $q=200\text{ cm}^2/\text{s}$)



b. 流木を4回落下させた場合 (Case1, $q=200\text{ cm}^2/\text{s}$)



d. 流木を4回落下させた場合 (Case4, $q=315\text{ cm}^2/\text{s}$)

図-6 橋梁に捕捉された流木本数の時間的な変化

には大きなバラツキが発生した。これは、流木スケール、落下流木本数 N_r (落下流木本数) が、障害物の遮蔽面積 A_{ob} とともに、捕捉流木量 V_{wd} を規定するパラメータであることを示唆している。従って、流木スケールと落下流木本数 (落下流木本数) を統合した物理量として、落下流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} (流木1本の遮蔽面積×落下本数) という概念を導入した。ここに、流木1本の遮蔽面積は、 L を流木の長さ、 D を直径として、 LD と評価した。以上の物理量をもとに考察すると以下の3点が分かった。

- ① 障害物の遮蔽面積 A_{ob} が同じ場合、落下 (流下) 流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} が大きいほど捕捉流木量 V_{wd} は大きくなる。
- ② 落下 (流下) 流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} が同じ場合、障害物の遮蔽面積 A_{ob} が大きいほど捕捉流木量 V_{wd} は大きくなる。
- ③ 落下 (流下) 流木の遮蔽面積の総和が小さくな

ると、流木が捕捉されにくくなる (図-3)。従って、障害物の遮蔽面積 A_{ob} が増加しても捕捉流木量 V_{wd} は明瞭に増加しない。

これらの結果から、捕捉流木量 V_{wd} は、落下 (流下) 流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} と障害物の遮蔽面積 A_{ob} に依存すると考えられる (図-4)。

(2) 複数回に分けて流木群を落下させた場合

実際の洪水時における流木の流下状況を想定して、流木発生 (落下) 装置内の全流木を複数回断続的にある時間間隔 ($\Delta t=2, 10$ 秒) に分けて落下させた。

図-5 は、流木を複数回 (4回) に分けて落下させた場合の、流木の累加捕捉本数 N_d と累加落下本数 N_r との関係を示したものである。また、図-6 は橋梁に捕捉された流木本数について着色流木別の変化を示している。ここに、宮ノ上橋の場合 (Case 1) 200 本毎、名賀川C地点の場合 (Case 4) 160 本毎落下させ、総計、宮ノ上橋の場合 800 本、名賀川C地点の場合 640 本落下させた。写真-1 は、宮ノ上橋の場合

(Case 1) の実験について、越流がない状態で流木が捕捉された状況を示したものである。

累加落下本数が多くなればなるほど累加捕捉本数は多くなる事が分かる。また、後半に到達した流木ほど多く捕捉されている。特に、越流がない場合に、後から流下してきた流木がより多く捕捉されている。すなわち、落下回数を重ねるにつれて捕捉本数の増加率が大きくなっている。これは、流下してくる流木がひとたび捕捉されると、それが後続の流木の新たな障害物となり、流下してくる流木を捕捉していくからと考えられる。したがって、流木が捕捉されるにつれて後続の流木に対する障害物の遮蔽面積 A_{ob} が増え、流木の捕捉量 V_{wd} が増加したものと考えられる。最初に落下した流木の捕捉量が最も少なかったのは障害物の遮蔽面積 A_{ob} が最小であったからである。

一方、越流がある場合には、橋脚に加えて橋げたも障害となり、越流がない場合に比較して捕捉流木本数の増加率は一層大きくなっている。

さて、図-3 は流木モデルの落下（流下）流木本数 N_r と橋梁の捕捉流木本数 N_d との関係を示したものであるが、同図には、複数回に分けて落下させた実験もプロットされている。瞬間的に1度に落下させた実験と比較すると、総落下本数が同じ場合は、1回で流木を落下させた実験の方が捕捉流木量は大きくなる事が分かる。特に、Case 1 の越流なしの実験の場合に明白である。これは、1回で流木を落下させた実験の方が落下（流下）流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} が大きくなるからである。一方、越流ありの実験で複数回落下させた Case 4 の実験は流木スケールが Case 1 より大きく、その結果、落下（流下）流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} も大きくなっており、捕捉流木量は増大している。

4. 結論

橋梁などの河道内障害物に捕捉される流木量は、流下流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} 、および障害物の遮蔽面積 A_{ob} に依存する。また、複数回流木が供給される場合、捕捉された流木が後続の流木の障害物となることから、障害物に捕捉される流木量 V_{wd} の増加量は増える。

ある障害物に供給される流木の遮蔽面積の総和 A_{wd} が把握できれば、その障害物の遮蔽面積 A_{ob} を求めることで流木の捕捉量 V_{wd} を推測できることが分かった。

本実験は流木災害の模型実験を行ったものではな

い。災害の実態から流木や障害物のスケールなど基本的なファクターを抽出し、それをもとに水路実験を実施して基本的な現象を再現し、普遍的な支配パラメータを探ることを目的としている。従って得られた結果が普遍的なものとなるよう、今後、さらに広範な条件下で実験を実施していく必要がある。

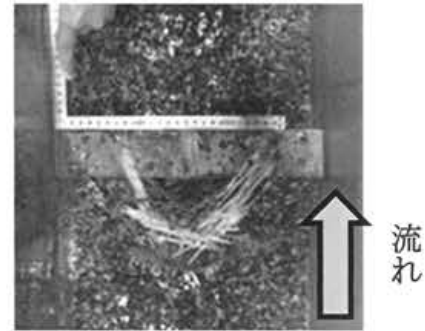


写真-1 橋梁に捕捉された流木群

(Case 1, $q=200\text{cm}^2/\text{s}$, 越流なし, 流木を4回に分けて落下)

参考文献

- 1) Rusyda, M.I., Hashimoto, H., Ikematsu, S., Sakada, K.: Characteristic of woody debris deposition during the Yabe River Flood in Yame City, Japan: northern Kyushu Flood Disaster in July, 2012, Proceedings of the 12th International Symposium on River Sedimentation, 2013.
- 2) Rusyda, M.I., Sakada, K., Ikematsu, S., Hashimoto, H.: An investigation into woody debris trapped by riparian trees during the Yabe River Flood in Japan, Proceedings of the 35th IAHR World Congress, Chengdu, 8-13, 2013.
- 3) 楠窪正和, 坂田賢亮, 池松伸也, 橋本晴行: 2012年7月九州北部豪雨により矢部川流域で発生した流木群の氾濫・堆積に関する調査, 第32回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp. 123-124, 2013.
- 4) 楠窪正和, 赤野久志, ムハマド イスラミ ルシダ, 池松伸也, 永野博之, 橋本晴行: 2013年7月島根県津和野町名賀川流域で発生した流木氾濫に関する調査, 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 103-108, 2014.
- 5) Rusyda, M.I., Hashimoto, H., Ikematsu S.: Log jam formation by an obstruction in a river, Proceedings of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, 2014.
- 6) Schmocker, L. and Hager, W.H.: Probability of drift blockage at bridge decks. Journal of Hydraulic Engineering 137(4): 269-274, 2011.

(2016. 5. 31 受付)