

ピアのない橋梁による洪水時の流木捕捉と 水位上昇に関する実験的研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO LOG ACCUMULATION

AT A BRIDGE WITHOUT A PIER DURING A FLOOD EVENT

橋本晴行¹・池松伸也²・喜多貢菜³・船田昂志⁴・西田悠人⁵・

ムハマド ファリド マリカル⁶

Haruyuki HASHIMOTO, Shinya IKEMATSU, Tsuguna KITA, Takashi FUNADA, Yuto NISHIDA
and Muhammad Farid MARICAR

¹元九州大学大学院工学研究院

E-mail: hashimoto.haruyuki@gmail.com

²九州大学工学部技術部 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

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広島県 (〒730-8511 広島市中区基町 10-52)

⁵福岡県 (〒812-8577 福岡市博多区東公園 7-7)

⁶ Civil Engineering Department, Hasanuddin University

Key Words: drift wood, woody debris, woody debris jam, log accumulation, bridge without a pier

1. はじめに

2012年7月14日福岡県八女市星野川流域, 2013年7月28日島根県津和野町名賀川流域, 2017年7月5日福岡県朝倉市赤谷川流域, 白木谷川流域などにおいて記録的な豪雨により斜面崩壊や河川氾濫が発生した。上流域では崩壊や土石流が多数発生し, 大量の土砂が樹木とともに河川に流れ込み洪水流に伴って流下した。特に流木は橋梁などの障害物にせき止められて群を形成し氾濫を助長した。さらに, 名賀川, 赤谷川, 白木谷川では流木と土砂による河道閉塞が発生し, 著しい流路変動を引き起こした。

著者らは流木と橋梁などの障害物との相互作用について現地調査を実施するとともに¹⁻⁵⁾, 水路実験を通じて捕捉流木群の形成過程やそれによる損失係数などを調べて来た^{6,7)}。しかしながら, 山地河川において見られるピア(橋脚)のない橋梁と流木との関係については未解明な点が多く残っている。本研究は, ピアのない橋梁模型を中心として水路実験を行

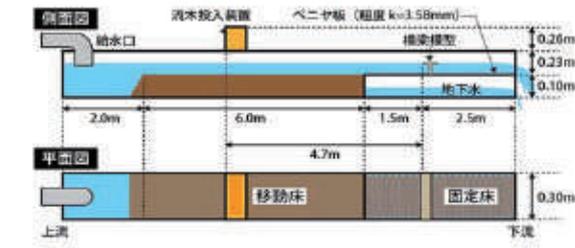
い, 流木捕捉の状況を再現し, そのメカニズムとそれによる水位上昇について調べることを目的としたものである。

2. 実験方法

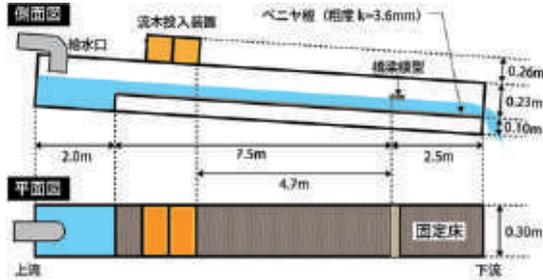
実験に用いた水路は, 長さ12m, 幅30cmの長方形断面水路である(図-1)。緩勾配の場合($I=0.6/100$), 下流端から上流4mまでの区間は3.6mmの粗度を貼り固定床とし, さらに4mから10mの区間は土砂(粒径 $d=3.6\text{mm}$, 比重 $\sigma/\rho=2.65$)を10cmの厚さで敷き移動床とした。一方, 急勾配の場合($I=1/100, 2.7/100$), 河床は3.6mmの粗度を貼り全て固定床とした。

この水路の下流端から2.5mの位置に橋梁模型を, 橋梁から4.7m上流に流木発生装置をそれぞれ設置した。

橋梁模型は福岡県八女市星野川¹⁾および島根県津和野町名賀川³⁾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

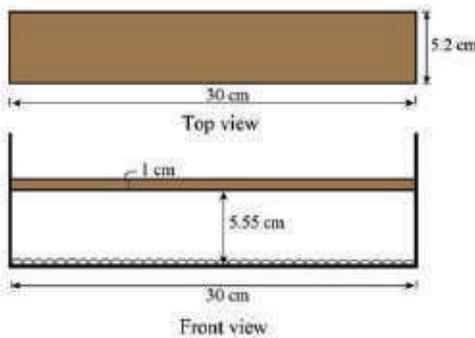


(a) 移動・固定床水路

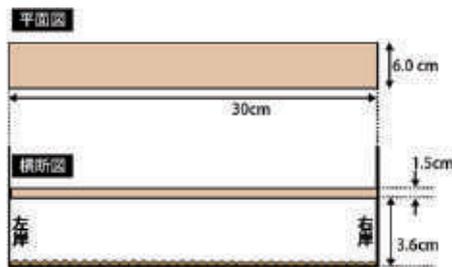


(b) 固定床水路

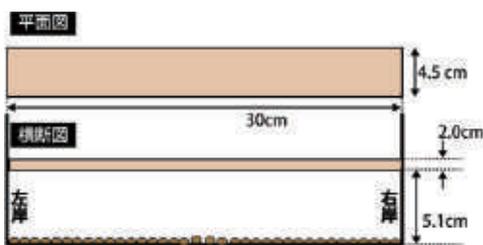
図-1 水路の縦断面図および平面図



(a) ピアのない(想定)星野川宮の上橋模型(縮尺:1/120)



(b) 名賀川(A地点³⁾)設置の橋梁模型(縮尺:1/44)



(c) 名賀川(C地点³⁾)設置の橋梁模型(縮尺:1/65)

図-2 橋梁模型

表-1 均一流木の条件

長さL (cm)	5	7	9	9	17
直径D (mm)	2	2	2	3	5
投下本数	25~800				

表-2 混合流木の条件

L (cm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
本数	45	45	45	45	45	45	45	45	45
投下本数	405								

表-3 実験条件

Case	水路	水路勾配	q(cm ² /s)	橋梁模型	L (cm)	D (mm)	Dc (cm)
1	移動・固定床	0.6/100	301	宮の上橋	5,7,9	2	5.55
1'	移動・固定床	0.6/100	200	宮の上橋(ピアあり)	5,7,9	2	5.55
2	固定床	1/100	321	名賀川C	9	3	5.1
3	固定床	2.7/100	289	名賀川A	17	5	3.6
4	移動・固定床	0.6/100	301	宮の上橋	混合流木		5.55

橋梁模型を示す。いずれも、ピアのない3種類の模型である。ここに、星野川宮の上橋は、実際は、ピアのある橋梁であるが、比較のためピアのない場合を想定した(図-2(a))。一方、他の模型(図-2(b, c))はピアのない実際の橋梁を模したものである。また、星野川宮の上橋、名賀川(C地点³⁾)の橋梁は、実際は欄干を有しているが、実験では、いずれのケースも欄干は無視されている。実験では、水路幅30cmの水路に橋梁模型を設置するため、いずれの模型も長さ30cmとなっている。従って、各模型の縮尺は図-2に示すとおりである。

表-1, 2は流木模型の条件を示したものである。流木模型として、直径Dや長さLが異なる檜の丸棒11種類を用いた。ここに、流木模型の湿潤時の比重は0.6~0.7であった。現地調査から $L \gg D$ となるように設定するとともに、簡単のため、枝は考慮しなかった。実験では、同一の模型を所定の本数混合した場合(‘均一流木’と呼称)(表-1)と長さの異なった模型を混合した場合(‘混合流木’と呼称)(表-2)について実験を行った。

実験条件を表-3に示す。ここにqは単位幅流量、Dcは河床と橋桁との間のクリアランスである。Case 1'は、比較のため実施した、ピアを有する橋梁模型に関する実験である。ここに、ピアのサイズは幅1cm、長さ5.2cm、高さ5.55cmとした。

実験では、上流から給水し、定常状態となった時点で、流木投入装置から所定の本数の流木模型を投入した。水位はポイントゲージにより、流量は下流端で定常時の流れを採取することにより測定した。

ピア(橋脚)のない橋梁模型は、流木を捕捉させ

るためには、橋げたを浸水させる必要がある。そのため、水位が橋桁と同程度の高さとなるように、流量を設定した。また、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流木長 L は水深 h に対して同程度かあるいはそれ以上の長さとした。

3. 実験結果と考察

(1) ピア（橋脚）のない橋梁による流木捕捉

a) 流木捕捉と流れの状況

写真-1, 2 はピアのない橋梁モデルによる流木捕捉の状況を Case 3, 4 について示したものである。また図-3 は写真-1 の水面形の計測結果を示した。ここに図中の実線は流木捕捉後の水面形、破線は流木投下前の定常状態の水面形、点線は橋梁模型が存在しない場合の等流の水面形である。

流下してきた流木群は橋桁に衝突して一時的に滞留した後、縮流により橋桁の下側に押し出され、その一部は橋桁と河床とに同時に支持されて停止した。その結果、これに続く流木も捕捉されて群を形成した。流木が橋桁と河床とに同時に支持されない場合はほとんどの流木は流下した。また、流木が河床と橋桁とに同時に支持されるかどうかは確率的であった。

捕捉された流木は、上流側に傾斜したものと、下流側に傾斜した流木が斜交するように停止していたが、いずれも底面と橋梁、あるいはすでに停止した流木に接触した状態で捕捉されていた。

以上の結果、水面形はせきあげられ（図-3 中の実線の水面形）、上流 15cm で最大水深を示し、下流は等流時とほぼ等しい水面形となった。

b) 単独流木の挙動との比較

Case 1 の条件下で流木模型 ($L=7\text{cm}$, $D=2\text{mm}$) を単独で流下させ、流木の捕捉状況を観察した。単独流木が橋梁に達すると、流量が比較的小さい場合 ($290\text{ cm}^2/\text{s} \leq q \leq 300\text{ cm}^2/\text{s}$)、流木はほとんどのケースで橋桁の下を通過するが、流量が比較的大きい場合 ($325\text{ cm}^2/\text{s} \leq q \leq 350\text{ cm}^2/\text{s}$)、流木はほとんどのケースで橋桁の上を通過した。捕捉された場合は、単独流木と橋桁との間の摩擦に起因して停止した。一方、複数の流木を同時に流下させた流木群の実験では、流量の大きさに関わらず、ほとんどの流木が橋桁の下を通過した。これは、流木群が橋梁に衝突した際に一時的に橋桁に滞留することで、後続流に対して「障害物」となったことによるものと考えられる。

c) 流木捕捉率と投下流木本数、流木長との関係

図-4 は Case 1 ($L=7\text{cm}$)、Case 3 ($L=17\text{cm}$) の



写真-1 橋梁による均一流木の捕捉状況
(Case 3, 捕捉流木 95 本)



写真-2 橋梁による混合流木の捕捉状況 (Case 4)

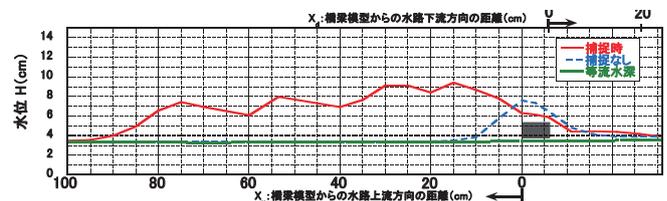
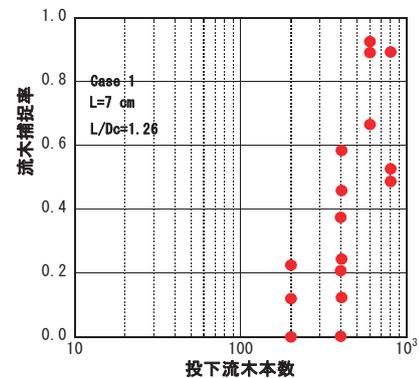
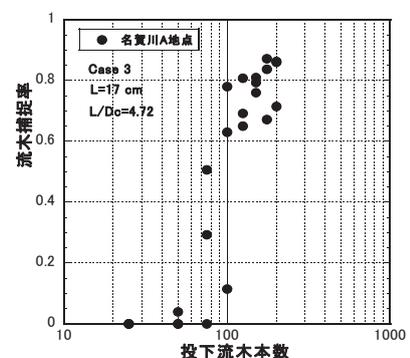


図-3 流木捕捉時の水面形と等流水深
(Case 3, $L=17\text{cm}$, $D=5\text{mm}$ の捕捉流木 95 本)



(a) Case 1, $L/Dc=1.26$



(b) Case 3, $L/Dc=4.72$

図-4 流木捕捉（本数）率と投下流木本数との関係

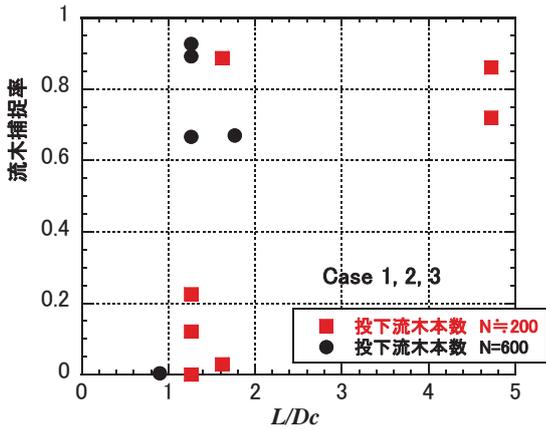


図-5 流木捕捉（本数）率と相対流木長との関係

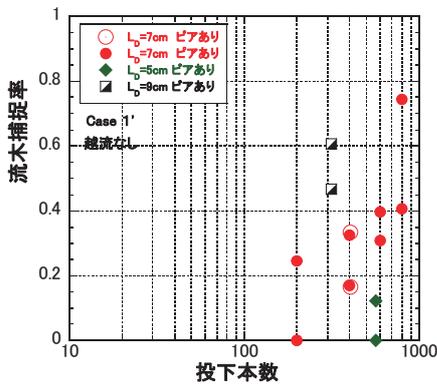
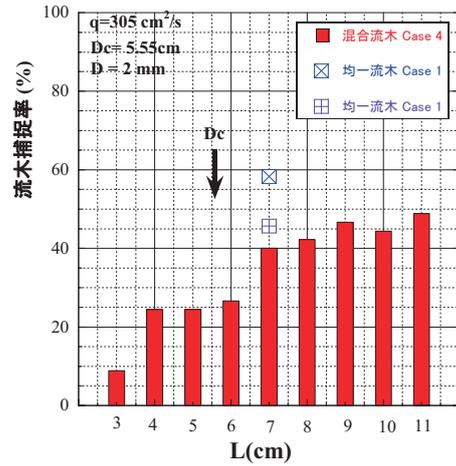


図-6 ピアを有した橋梁による流木捕捉（本数）率

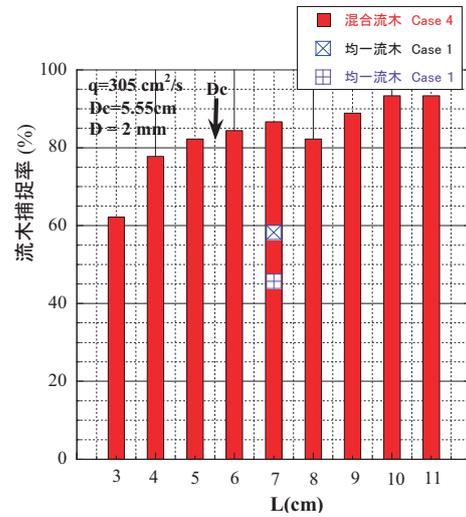
均一流木模型を用いた場合について流木捕捉率と投下流木本数との関係を示したものである。ここに、流木捕捉率は流木捕捉本数を投下流木本数で割った値である。データにはばつきが見られるが、投下流木本数を増加させると流木捕捉率は大きくなっている。

また、流木捕捉のためには投下流木本数に限界が存在し、その限界以上の流木本数が必要であることを示している。さらに、両者のグラフを比較すると、流木の長さ L が長いほど流木捕捉率は大きくなっている。

写真 - 1, 2 の観察結果に基づくと、橋桁と河床との間のクリアランス D_c に対する相対的な流木長 L/D_c が流木捕捉率を規定することが考えられる。従って、図-5 に、投下流木本数 $N=200, 600$ 本の場合に限定した流木捕捉率と相対的な流木長 L/D_c との関係を示す。バラツキはあるが、相対流木長が大きくなると流木捕捉率は増加する傾向がある。一方、流木が短くなり相対流木長が $L/D_c < 1$ となると、極めて捕捉されにくくなることも分かる。なお、2013年島根県津和野町名賀川の河道閉塞では $L/D_c = 4$ 程度³⁾,



(a) 流木長別の流木捕捉（本数）率



(b) 流木長別の流木捕捉（本数）率

図-7 混合流木を用いた時の流木長別流木捕捉率

2017年福岡県朝倉市白木谷川の河道閉塞では $L/D_c = 1.5 \sim 4.0$ 程度であった⁵⁾。従って、両災害地とも、一度、橋桁が浸水すると流木捕捉は極めて容易であったことが推測される。

さて図-6は、Case 1の橋梁模型にピア（橋脚）を有した場合について、均一流木模型を用いて水路実験を行い、流木捕捉率を調べた結果である。図-4, 5は橋桁を浸水させた実験であるが、図-6は橋桁を浸水させなかった実験である。すなわち、流木にとって、前者は横断方向の橋桁が障害物となり、後者は水深方向のピア（橋脚）が障害物となる。両者は全く状況が異なるが、同様な捕捉率の特性を有している。橋梁をはじめ河道の線形（河道の湾曲など）や河床の凹凸など流木にとって何らかの障害物が存在すれば、本数が多い流木ほど、また長い流木ほど捕捉されやすいことが分かる。

d) 長さの異なった混合流木の場合の流木捕捉率

流木模型として混合流木(表-2)を用いて,均一流木(Case 1)の場合と同様な水理条件下で2回同じ実験を行った(Case 4).その結果を図-7に流木長別の流木捕捉率として示す.ここに,比較のため,混合流木の平均長に相当する $L=7\text{ cm}$, $D=2\text{ mm}$ の均一流木を用いて同じ投下本数($N=405$ 本)の条件下でも実験を行った.長さの異なった流木を多数同時に流下させた混合流木の場合,均一流木の場合と同様に,長い流木ほど捕捉されやすく,捕捉率は大きくなっている.さらに, $L < Dc$ ($L/Dc < 1$)となるような短い流木も捕捉されている.均一流木の場合, $L/Dc < 1$ となるような短い流木は捕捉されにくい(図-5),混合流木の場合は,捕捉された長い流木が「障害物」となって短い流木も捕捉される状況になることが推察される.従って,長さの異なった流木が混合して流下する状況は,短い流木も含めて捕捉されやすい状況になることが理解される.さらに,橋本ら⁷⁾の指摘のように,実際河川において流木が連続的に流下すれば,より一層捕捉されやすくなる.

この2回の実験は同じ条件下で行われたにもかかわらず,捕捉率は大きく異なっている.ピアのない橋梁による流木捕捉は平均的な傾向はあるものの,その平均値のまわりに確率的に大きく変動することが示唆される.

(2) 捕捉流木群の損失係数

橋梁により捕捉された流木群は流れをせき止め,上流の水位をせき上げる.これは氾濫の原因となるため,せき上げ水深を正確に評価することが重要である.

以下,捕捉流木量は既知としてせき上げ水深について考察することとする.

まず,実験において水深と定常流量を測定することにより,捕捉流木群による水流のエネルギー損失を上下流の全水頭差 ΔE_{ud} として求めた. Case 1では橋梁から上・下流 10 cm の位置を検査面とし,その間にベルヌーイの定理,連続式を適用すると

$$\left(h_u + \frac{U_u^2}{2g}\right) = \left(h_d + \frac{U_d^2}{2g}\right) + \Delta E_{ud} \quad (1)$$

$$q = h_u U_u = h_d U_d \quad (2)$$

ここに, h_u , h_d は上下流の検査面の水深, U_u , U_d は上下流の検査面の流速, q は単位幅流量である.エネルギー損失から損失係数 f_D は次式により決定される.

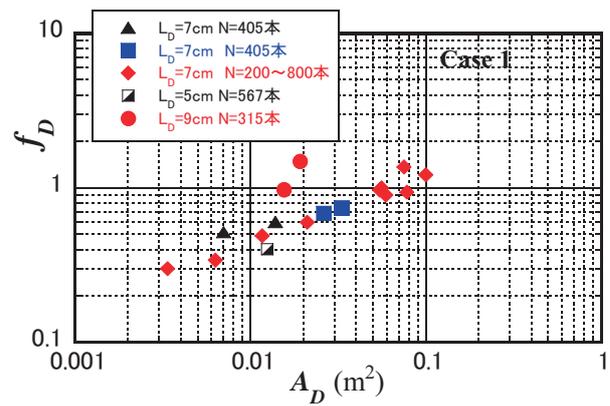


図-8 流木群の損失係数と投影面積の関係

$$\Delta E_{ud} = f_D \frac{U_d^2}{2g} \quad (3)$$

水位上昇は流木群に作用する抗力によるものと考えられる.通常,抗力は次式により表現される.

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 A_D C_D \quad (4)$$

ここに F は抗力, A_D は物体の投影面積, C_D は抗力係数である.したがって,損失係数 f_D は流木の投影面積の総和 A_D に依存すると考えられる.図-8に,損失係数 f_D と流木群の投影面積 A_D との関係を示す. A_D が増加するにつれて,損失係数 f_D も増加する.また,流木のスケールの違いによる相違も小さく,損失係数と流木群の投影面積との間には一義的な関係性があることがわかる.

4. 結論

山地河川において見られるピア(橋脚)のない橋梁模型について,流木群を流下させて水路実験を行い,橋梁による流木の捕捉状況を調べた.その結果,橋梁による流木捕捉率は投下流木本数と相対流木長 L/Dc に依存することを見いだした.しかしながら,実験データにバラつきが見られ,流木捕捉率が平均値のまわりに確率的に変動することが分かった.また,均一流木の場合,相対流木長 $L/Dc < 1$ となるような短い流木は捕捉されにくい,混合流木の場合は,先行して捕捉された長い流木が「障害物」となって後続の短い流木をも捕捉する特性があることが分かった.

橋梁の捕捉流木群による水位のせき上げを定量的に明らかにするため,捕捉流木群の上下流におけるエネルギー損失を調べ,その損失係数を求めた.損失係数は捕捉流木群の投影面積に一義的に依存する

ことを明らかにした。

実際河川への適用性を考える場合，橋梁による捕捉流木量やその損失係数の普遍的な評価が今後の課題である。また，実際の流木には根や枝が付随し，橋梁には欄干が存在している。これらは本実験では無視されており，これらの効果については今後検討していく必要がある。

参考文献

- 1) Rusyda, M.I., Hashimoto, H., Ikematsu, S. & Sakada, K.: Characteristics of woody debris deposition during the Yabe River Flood in Yame City, Japan: Northern Kyushu Flood Disaster in July, 2012. *Proc. of the 12th Int. Symposium on River Sedimentation*, pp.1989-1996, 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. *Proc. of the 35th Int. Association for Hydro-Environment Engineering and Research World Congress*, 2013.
- 3) 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.
- 4) Rusyda, M.I., Kusukubo, M., Maricar, M. F., Ikematsu, S. & Hashimoto, H.: Woody debris accumulation during the flood event in the Nayoshi River, Tsuwano Town, Japan. *Proc. of the 19th Congress of the Asia and the Pacific Division of the Int. Association for Hydro-Environment Engineering and Research*, 2014.
- 5) 永野博之, 福岡尚樹, 橋本晴行: 2017年九州北部豪雨により発生した朝倉市白木谷川流域の流木・土砂・水混相流の流出規模に関する研究, 河川技術論文集, 第24巻, 2018(投稿中)。
- 6) Rusyda, M.I., Hashimoto, H. & Ikematsu, S.: Log jam formation by an obstruction in a river. *River Flow 2014, Proc. of the 7th Int. Conference on Fluvial Hydraulics*, pp.717-724, 2014.
- 7) 橋本晴行, 楠窪正和, 喜多貢菜, ムハマド ファリド マリカル: 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, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 145-149, 2016.
(2018.5.18 受付)