

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560621

研究課題名(和文)大粗度を用いた中小河川の河道多様性創出法に関する研究

研究課題名(英文) Study on the method of creating river flow diversity in small and medium-sized rivers by using large roughnesses

研究代表者

富永 晃宏 (Tominaga, Akihiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60135530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：単調化した中小河川の河道に巨石および水制のような大粗度をインパクトとして与えることにより河道多様性を創出する手法について、実験および数値計算によって検討した。直線水路に大粗度を種々の設置方法により配置したときの粗度周辺の流れ構造を明らかにするとともに、これにより形成される河道形態についての多様性の評価と、治水への影響度の評価を行った。また、大粗度としての水制の機能に着目し、局所の洗掘軽減のための方策および河岸凹部の流れと土砂堆積の制御法についても検討し、多様で生態系豊かな河道を創造していくうえで有用な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The methods of creating river flow diversity were investigated experimentally and numerically by using large roughnesses such as boulders and groins as an impact in straightened small and medium-sized rivers. Flow structures around the roughnesses were clarified when large roughness elements were placed in a straight open channel with various patterns. The river-bed configurations created by such large roughnesses were made clear and evaluated in the sense of river diversity and flood effect. Furthermore, focusing on spur dike as the large roughness, measures to reduce local scour and to control flow structure and sediment deposition in a riverside concavity were investigated. Then, the useful knowledge was obtained for creating diversified and ecologically rich river course.

研究分野：水工学

キーワード：河道多様性 流れ構造 河床変動 大粗度 巨石 水制 中小河川

1. 研究開始当初の背景

中小河川の単調化した河道に何らかの構造物をインパクトとして与え、流速と水深に変化をもたらすことが、生態系にとって有効であることは明らかである。このような試みが多々実施されているが、その効果が十分評価されておらず、また治水への影響も的確に評価されていない。今回、河道多様性を創出する手段として大粗度を取り上げたのは、中小河川を対象としているため、川幅に余裕がなく、水制などの横断構造物では抵抗がかなり大きくなってしまふことから、長さとしては短い障害物を利用するという点と、施工の容易さも考慮してのことである。学術的に見ると、固定された水制に関する研究は実験的にも数値的にも多くあり、これまでに研究成果が蓄積されている。また、粗度の配置が流水抵抗に及ぼす影響は古くから研究があり、大粗度の抵抗についても検討がされている。しかし、移動床上に大粗度を配置すると、前面の洗掘により粗度自体が沈降し、洗掘孔に粗度が乗った状態で平衡状態に達するが、固定された粗度では洗掘が過大となり安定が失われる。このような移動床上の大粗度の安定形態とこれにより形成される流れ構造と河床変動が本研究の注目点である。また、大粗度の配置方法によっていかに多様な流れ場を創出できるか、それをどう評価するか、さらに治水への影響度をどう見積もるかという点について検討することも重要である。

2. 研究の目的

河道多様性を創出する手段としての巨石投入及び籠ブロックといった大粗度に着目し、これらを配置した場合に形成される河道形態及び流れ構造の多様性の評価と、治水への影響度の評価を行い、中小河川に有効な河道多様性創出方法の指針を得ることを目的とする。

具体的には、河道多様性の創出の手段として巨石を河床に設置する方法を想定し、様々な形状および形態の粗度を河床に設置する場合について、固定床においては、PIV 実験により詳細な流れ構造を捉え、粗度の周辺の渦構造、後流の範囲や乱れ特性について明らかにすること、移動床においては粗度周辺および背後に形成される河床形態と河床変動後の流れ構造を明らかにする。

粗度要素を流下方向に連続的に配置して河道の多様性を創出する方法については、流れ構造の多様性を評価する手法の提案を行うとともに、河床変動後の河道多様性を評価する方法の提案も行う。また、粗度要素群の治水に与える影響について検討する。

さらに、水制を一つの大粗度として考えた場合に、透過度を変化させてその流れ構造と河床変化への影響を調べるとともに、水制が

下流凹部の河川環境形成に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

研究は設定する粗度の条件により大きく分けて、巨石を想定した粗度要素を河床に様々な配置で設置した場合の流れ構造を調べるケース、単独の巨石粗度を移動床に設置した場合の河床変動を調べるケース、流下方向に連続した粗度配置により瀬・淵や蛇行形状を持つ多様な河道形態を形成するケース、水制を大粗度と見なし、水制周りの局所洗掘を適度に制御する方法を検討するケース、水制のような大粗度を、河岸凹部の流れを活性化し、土砂堆積を制御する構造物として利用するケースの5 ケースを設定した。

(1) 大粗度周辺の流れ構造に関する基礎的実験では、固定床に粗度要素を設置して、主に粗度下流の後流域の流れ構造を PIV 法を用いて検討した。粗度形状、粗度を複数設置した場合の横断間隔および縦断間隔の流れ構造に及ぼす影響と下流の低速域の確保状況や乱れ特性について検討した。またこのケースでは、粗度群が水位上昇に及ぼす影響を予測する数値計算法について検討した。

(2) 球粗度を移動床上に置いた場合に形成される河床形態について、粗度の設置位置や相対水深を変化させて検討した。また、洗掘に伴う粗度の移動や洗掘の進行過程を調べ、洗掘に伴う流れ構造の変化に着目した。

(3) 直線河道の一定区間に多様性を与えるために、粗度を河岸に一定間隔で設置する実験を行い、流れの周期的変化や形成された河床の多様性の評価を行った。ここでは粗度要素の透過性の違いにも着目した。

(4) 水制を河道多様性創出の手段とする場合に、過大な局所洗掘が支障をきたさないように、水制の上流側に構造物（導流工）を設置することにより洗掘を制御する方法について検討した。さらに、透過度が制御できる杭粗度を導流工として用い、背後の水制周辺の洗掘軽減効果に与える透過性の影響を検討した。

(5) 水制のような大粗度を、生態環境上有効な河岸凹部の流れと土砂堆積を制御するために利用する方法について検討した。水制は凹部の対岸に設置する場合と、凹部と同じ側に設置する場合について、相対水深の効果も含めて検討した。

4. 研究成果

(1) 大粗度周辺の流れ構造に関する基礎的実験では、立方体を2個並列に並べた場合、およびこの後方に1個追加して3個とした場合について、その横断方向間隔と縦断方向間隔とが背後の流れ構造に及ぼす影響を PIV 実験によって検討し、生息環境に与える指標とし

て粗度群背後に形成される低速域の大きさ、乱れ強度の大きな領域等を明らかにした。配列の仕方によって後流組織渦構造の干渉が変化し、粗度群をユニットとして考えた時の下流の平均流速、乱れ強度、組織渦構造が大きく変化することが示された。図-1は、粗度の流下方向間隔によって下流の乱れ強度が大きく変化する例を示す。また、粗度が水没する条件では低速域がかなり減少するため、河道全体を考えた配置の検討を行う必要があることが指摘された。出水時の大粗度及び透過型構造物の抵抗増加特性については、河床の平面的な巨石の割合、横断間隔、縦断間隔について系統的に変化させた実験を固定床で行い、配列による抵抗の増加率の違いが示され、2次元数値計算において大粗度前面の淀み領域と後方の止水域を考慮することで予測精度を向上させるモデルを提案した(図-2)。

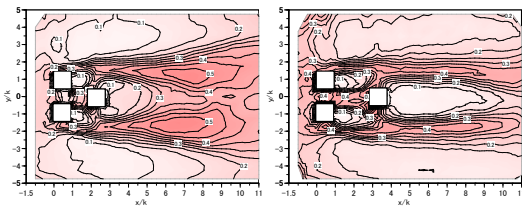


図-1 大粗度群下流の流下方向乱れ強度コンター

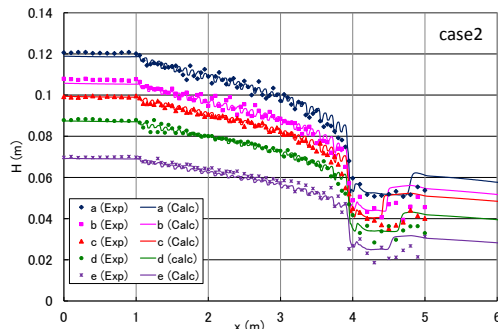


図-2 2次元数値計算結果と実験値の水位の比較

(2) 大粗度として球粗度の移動床実験では、局所洗掘の時間進行過程が明らかにされた。洗掘は球の同心円状に現れ、時間の経過とともに洗掘深及び洗掘範囲は対数的に拡大していく。変動過程の河床を固定した実験では、9分後の河床形状についてPIV実験が行われた。初期状態において、壁面側では球のすぐ横の間隙を抜ける流れにより局所的に底面流速が大きくなり、河道中央側では球のすぐ横を中心に下降流とともに底面流速の大きい領域が広がる(図-3)。

球前部では局所的に河床に向かって下降流が発生し、球粗度周辺の洗掘には底面流速と河床に向かう下降流が大きく影響する。ある程度河床変動が進行した後においては、球前部の洗掘内では明確な馬蹄渦が発生しているが、その他の領域では初期状態より逆流

域が減少し、壁面や河床に沿った流れとなり、底面流速も減少することから、洗掘の進行が遅くなると推測された。

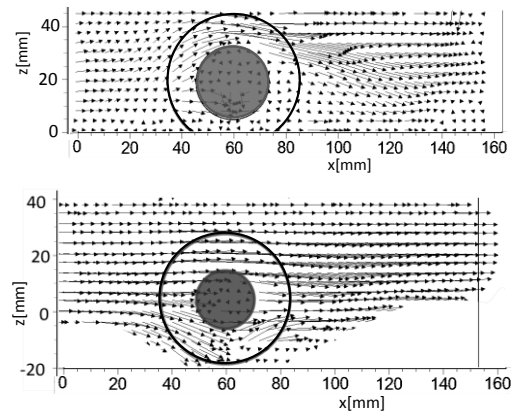


図-3 鉛直縦断面流速ベクトル
(上：平坦河床 $y=5\text{mm}$, 下：9分後河床 $y=15\text{mm}$)

(3) 直線河道の一定区間に多様性を与えるために、大粗度を河岸に一定間隔で設置する実験を行い、蛇行流れの創出と瀬・淵のある河道を形成することを試みた。蛇行流れ創出では兩岸に交互に粗度を設置し、その相対幅と間隔を変化させて、形成された河床形態の多様性の評価法を検討した。河床の横断勾配の変化を示す傾斜度 I_{sp} を定義した。

$$I_{sp} = \frac{1}{b^3} \int_{y_c-b/2}^{y_c+b/2} z_c(y-y_c) dy \quad (1)$$

ここに、 b は計算窓の幅、 y_c は水路中央位置、 z_c は初期河床からの偏差である(図-4)。その流下方向の標準偏差を用いて河道多様性を評価した。

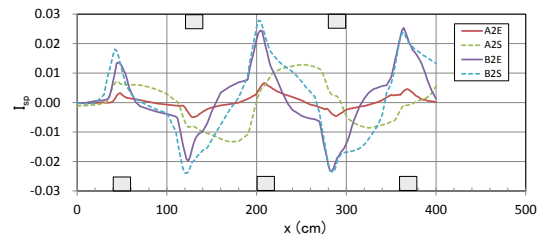


図-4 粗度によって形成された河道の傾斜度

蛇行流れ場については平水時の滞筋の変化率 B_m を定義した。

$$B_m = \frac{2}{B^2} \int_0^B D_h(y)(y-y_c) dy \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_h(y) = 1: h_0 - z_c > 0 \\ D_h(y) = 0: h_0 - z_c \leq 0 \end{cases}$$

ここに、 B は水路幅、 h_0 は仮想の平水位の水深である(図-5)。これから蛇行度を算出して評価する方法を提案した。また、粗度として木工沈床を一定間隔で片岸に設置した実

験を行い、粗度間の水域の流速の頻度分布と標準偏差により多様性を評価し、粗度の透過性の影響を示した。

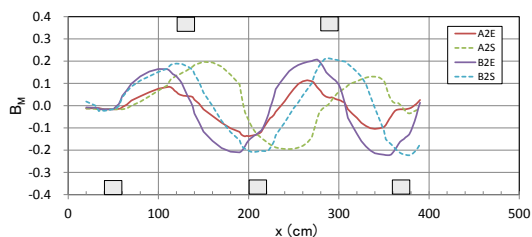


図-5 粗度によって形成された流路の澱筋変化率

(4) 水制の上流側に高さの低い水制（導流工と呼ぶ）を設置した実験では、導流工を適切な間隔で設置した場合、水制の局所洗掘が抑制されることが示された。水制周りの局所洗掘は、流れの急縮による底面せん断応力の増大と、水制前面に発生する下降流の2つの効果によることが示され、導流工はこれらのメカニズムを変化させることで洗掘抑制効果があることがわかった。すなわち、導流工による偏流が水制先端の底面せん断応力の増大を抑制する効果と、導流工を越流した流れが形成する横断渦が水制前面の下降流を抑制する効果の相互効果による。さらに、導流工の局所洗掘の抑制メカニズムについてLESモデルを用いた数値計算によって検討した。導流工の高さが大きくなるほど導流工前面の洗掘深が増大するものの、水制工の洗掘深は減少し、導流工高さが水制高さの1/2の時に全体の洗掘は最小となった（図-6）。しかし、固定床では導流工には水制の洗掘を抑制する効果が認められなかった。導流工の洗掘抑制効果は、水制工周辺の洗掘孔が拡大する過程において、導流工が馬蹄渦の発達を抑制することによって得られることが明らかにされた。

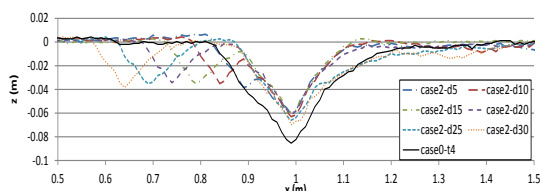


図-6 河床形状縦断方向変化（導流工高さ2cm）

さらに、透過度が制御できる杭粗度を導流工として用い、背後の水制周辺の洗掘軽減効果に与える透過性の影響を検討した。水制上流への杭群設置により明らかに洗掘深は減少したが、杭群密度については、密度が高いほど洗掘深を減少させた。水制と杭群の間の距離を変化させた実験では、洗掘深と洗掘堆積は水制と杭群の距離が水制長の4倍で最少と

なった（図-7）。

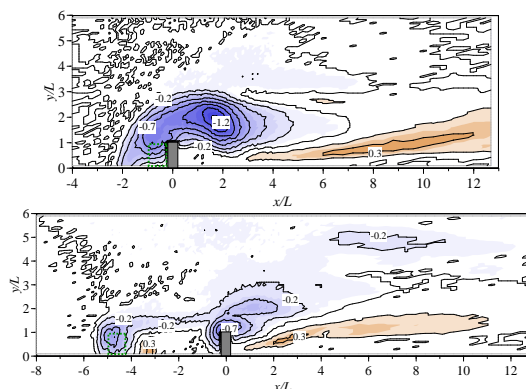


図-7 杭群による水制周辺の洗掘抑制効果
（上：杭群と水制の距離0、下：杭群と水制の距離＝水制長の4倍）

これらは、杭群設置により水制先端付近の流速減少効果による。同じ透過率で杭群の列数を変化させた場合、列数を4列から1列と少なくするほど洗掘深は減少した。これは杭群が流下方向に連続するほど上流の杭周りの洗掘を増長する効果により、杭群の列数が増大するほど洗掘が大きくなるという意外な結果を示した。

また、中小河川ではないが、木曾川のケレップ水制について、水路幅に比して長さが大きい長大水制周辺の流れと河床変動について検討する機会を得た。長大水制の下流における洗掘の生成はワンド環境を維持する上で重要な特性である。この水制下流の洗掘生成メカニズムについて、現地観測、3次元数値計算および室内実験により検討したが、明確な結論は得られなかった。

(5) 水制による河岸凹部の流れと土砂堆積の制御法について実験的に検討した。河岸凹部の対岸に水制がある場合は、水制設置により凹部内の再循環流の構造はほとんど変化せず、その流速が大きくなり、境界の水交換速度が増大した。この原因として、水制の縮流効果により凹部境界流速が加速される効果が最も大きい。非越流水制と越流水制では水制背後のはく離域の特性が大きく異なり、これが水制の凹部からの距離の影響を変化させることが示された。次に、凹部の側の上流に水制を設置した場合は、その長さと同部からの距離により凹部内再循環流への影響が異なることが分かり、適当な条件において凹部内の再循環渦を増大させることが示された。水制の長さおよび凹部との距離以上に、水制を越流するかしないかによってその効果は大きく変化し、越流した場合には、近い距離に水制を置くことで、強い再循環流が生じることが示された（図-8）。

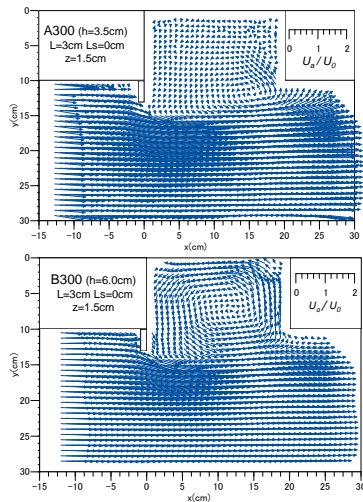


図-8 凹部付近の平面流速ベクトル
(上：水制非越流，長さ 3cm，水深 3.5cm，
下：水制越流，長さ 3cm，水深 6cm)

さらに、凹部上流に水制を設置するケースにおいて、浮遊砂となる条件で砂を流し、凹部内の土砂堆積実験を行った。水制非越流条件では特別なケースを除いて堆積量は大きく減少した。水制越流のケースでも堆積量は減少するが、堆積機構は複雑な流れ構造に依存するため、水制長、水制高さ、凹部との距離との関係は明確にならなかった。そこで、水制先端の横断方向流速および凹部内の上流壁に沿う流出流速が、凹部内の砂堆積量と相関があることが示された（図-9、10）。

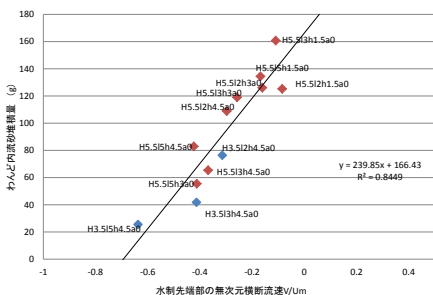


図-9 堆積量と水制先端の横断方向流速の関係

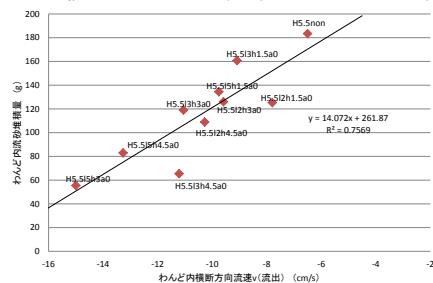


図-10 堆積量と凹部内流出方向流速の関係

以上、大粗度を用いた中小河川の河道多様性創出法について、様々な角度から検討した。全体として一つの系統的な方法というものを提案するのではなく、個々の要素的な技術

に対しての着目点を明らかにするという研究姿勢を取った。大粗度が引き起こす流れ構造と洗掘および堆積について新しい知見が得られている。これらの知見は、生態系豊かな多様な河道を創造していくうえで有用であり、検討すべき内容を示している。今後はこれらを統括して総合的な河道管理に結びつくような展開を行うことが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 富田和希, 富永晃宏, 導流工設置による水制工周辺の流れ構造と洗掘抑制効果, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.69, No.4, 2013, I_895-I_900
- ② Cai, F. and Tominaga, A., Three-dimensional flow structure around submerged box groyne with longitudinal block, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1, 査読有, Vol. 69, No. 4, 2013, I_61-I_66
- ③ 富永晃宏, 小島直也, 市川亜也佳, 開水路側岸凹部の流れ構造に及ぼす対岸水制の影響, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.69, No.2, 2013, pp.I_519-I_528
- ④ 富永晃宏, 市川亜也佳, 巨石群を底面に配置した開水路流の抵抗特性評価, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.70, No.4, 2014, pp.I_661-I_666
- ⑤ Sadat, S. H. and Tominaga, A., Influence of pile group density on minimizing local scour of a double spur dike group, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1, 査読有, Vol. 70, No. 4, 2014, I_85-I_90,
- ⑥ 富永晃宏, 市川亜也佳, 開水路における角柱粗度群背後の流れ構造に及ぼす配置法の影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.70, No.2, 2014, pp.I_717-I_726
- ⑦ 伊藤 猛, 富永晃宏, 大規模水制下流に発生する洗掘の発生機構に関する考察, 土木学会論文集B1 (水工学), 査読有, Vol. 71, No.4, 2015, pp.I_649-I_654
- ⑧ 富永晃宏, 庄建治朗, 加藤智道, 小島直也, 水制による河岸凹部の流れ構造の制御に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), 査読有, Vol.71, No.4, 2015, pp.I_649-I_654
- ⑨ Sadat, S. H. and Tominaga, A., Optimal distance between pile-group and spur-dike to reduce local scour, Journal of Japan Society of Civil Engin

eers, Ser.B1, 査読有, Vol.71, No.4, 2015, I_187-I_192

[学会発表] (計 19 件)

- ①Cai, F. and Tominaga, A., Experimental flow structures around box groyne with a longitudinal block, 18th IAHR-APD Congress, 2012.8.19, Juju island, Korea
- ②Sadat, S. H. and Tominaga, A., Effects of footing and its geometry on local scouring around spur dikes, 18th IAHR-APD Congress, 2012.8.19, Juju island, Korea
- ③ Tominaga, A. and Urayama, Y., Restraining effects of deposition in an artificial embayment by piling along its entrance, 18th IAHR-APD Congress, 2012.8.19, Juju island, Korea
- ④市川亜也佳, 富永晃宏, 複数の巨石による流れの相互作用について, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋
- ⑤富田和希, 富永晃宏, 導流工設置による水制周辺の洗掘抑制効果について, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋
- ⑥林秀明, 富田和希, 富永晃宏, 自然形成型水制を用いた淵の生成に関する研究, 平成25年度土木学会中部支部研究発表会, 2013年3月8日, 豊田市
- ⑦小島直也, 市川亜也佳, 富永晃宏, 河岸凹部の流れ構造に及ぼす対岸水制の影響について, 平成25年度土木学会中部支部研究発表会, 2013年3月8日, 豊田市
- ⑧Sadat, S. H. and Tominaga, A., Mitigation of local scour hazard at the foot of single spur dike by using optimum footing, International Symposium on River Sedimentation, 2013.9.2, Kyoto
- ⑨Tominaga, A. and Suetsugu, H., Creation of meandering configuration in straight rivers by using groynes on either bank, International Symposium on River Sedimentation, 2013.9.2, Kyoto
- ⑩小島直也, 市川亜也佳, 富永晃宏, 河岸凹部の流れ構造に及ぼす対岸水制の影響, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013年9月3日, 習志野
- ⑪Cai, F., Tominaga, A. and Sadat, S. H., Flow Structures and Local Scour Around Submerged Box Groyne with an Upstream Longitudinal Block, 35th IAHR Congress, 2013.9.9, Chengdu, China
- ⑫Sadat S. H., Tominaga, A. and Cai, F., Protective Pile Group for Scour Mitigation of Existing Spur Dike Group, 35th IAHR Congress, 2013.9.9, Chengdu, China
- ⑬加藤智道, 小島直也, 富永晃宏, 河岸凹部の流れ構造に及ぼす上流側水制の影響に

関する研究, 平成26年度土木学会中部支部研究発表会, 2014年3月7日, 岐阜市

- ⑭ Tominaga, A., Flow structure and bed deformation around a sphere on movable bed, River Flow 2014, 2014.9.3, Lausanne, Switzerland
- ⑮Ito, T. and Tominaga, A., Three-dimensional flow structures around large-scale groins on the flood plain in the Kiso River, River Flow 2014, 2014.9.3, Lausanne, Switzerland
- ⑯加藤智道, 小島直也, 富永晃宏, 河岸凹部の流れ構造に及ぼす上流側水制の影響に関する研究, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014年9月10日, 豊中
- ⑰Tominaga, A., Kojima, N. and Kato, T., Effects of spur dikes on flow structures in a riverside concavity zone, 19th IAHR-APD Congress, 2012.9.22, Hanoi, Vietnam
- ⑱Sadat, S. H. and Tominaga, A., Effects of upstream pile-group on mitigation of local scour around spur dike, 19th IAHR-APD Congress, 2012.9.22, Hanoi, Vietnam
- ⑲佐藤理佳子, 富永晃宏, 伝統的河川工法「木工沈床」周りの流れの構造, 平成26年度土木学会中部支部研究発表会, 2015年3月6日, 豊橋

6. 研究組織

(1)研究代表者

富永晃宏 (AKIHIRO TOMINAGA)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60135530