

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289164

研究課題名(和文) 河川環境の自律的再生を誘導する河道の維持・改修技術の体系化

研究課題名(英文) Technology systematization for channel maintenance and restoration to invite self-rejuvenation of river ecosystem

研究代表者

道奥 康治 (MICHIOKU, Kohji)

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：40127303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：河川整備や利用などの人為影響が河川の流れ、地形、植生に及ぼす変化をもたらす原因を明らかにし、省力的な維持管理作業の枠組みで河床材料や植生など自然素材を用いた構造物と河川改修と河川環境を再生するための科学技術を検討した。河川地形が不可逆的に変化する複数水系の試験区間を対象として現地観測と河川水理解析を実施し、堰による湛水管理や合流点処理が地形の二極化機構を実験的・実証的に明らかにするとともに、水制工や微地形制御による河川環境の復元可能性を示唆した。治水管理の側面からは樹木の流速抵抗や相当粗度を観測値から逆算推定するための手法を提案した。本研究により持続可能な河川管理戦略への道筋がつけられた。

研究成果の概要(英文)：State-of-the-arts technologies for rejuvenating river ecosystem were developed by performing near-nature river works with aids of natural materials such as stones, boulders, logs, timbers, live trees, and so on. Through in-situ, laboratory and analytical investigations of complex interrelating systems between hydrodynamics, fluvial processes and ecosystem, it was found how the artificial impacts of water use and river restoration affect river morphology, sedimentation and riparian vegetation. Among findings in this study, it was shown that a huge sandbar developing in front of a tributary confluence could be efficiently regulated and removed by installing a tiny groyne in the upstream side of the confluence. Achievements from the present study are to provide a body of knowledge to establish a comprehensive design scheme and a labor-saving maintenance strategy for the near-nature river works.

研究分野：工学

キーワード：河川環境 水工構造物 多自然川づくり 地形解析 環境水理学

### 1. 研究開始当初の背景

多自然川づくり時代以前に整備された多くの河川では、みお筋・砂州が固定化し、陸地化した砂州上には草本・高木の過剰繁茂が進み洪水疎通能力を阻害している。河川敷とみお筋の高低差が増大して地形の二極化が進むと、水際遷移帯が失われ、砂州の樹林化、植物相の単調化など、生態レジームが構造的にシフトし、河川の生態系サービス機能が低下する。現行の河川管理では、日常の巡視で河川の変状を視覚的に点検し、堆積土砂の除去、洗堀箇所への補強、樹木伐採、夾雑物除去など、対処療法的に維持管理がなされているのが実状であり、河川整備が河川地形・生態系に及ぼすインパクト・レスポンスを科学的に予測・評価しながら戦略的に維持管理を実施しているわけではない。特に、ダム・堰などの横断工作物、合流部、大規模な河川改修の施工箇所では流砂過程に及ぼす河川整備の影響が大きく、河川地形変化を水理学的に予測し、河道の維持管理を繰り返しながら順応的かつ自律的に河川を再生することが望ましい。

研究代表者・分担者は本研究に着手する以前の段階より、地形の二極化や樹林化が著しい兵庫県・岡山県の河川中下流部をフィールドにして、河川の樹林化機構や自然石積の堰・水制を用いた水流制御に関する研究を実施し、その研究成果を河川管理にも実装してきた。また、河川管理者との持続的・省力的河川管理に関する意見交換を通して、課題と解決方を協議してきた。2013年6月の河川法改正によって河道の維持管理パラダイムが大きく変わり、河床材料や河畔植生など地先の自然素材を用いた維持修復を施して河川環境の自律的再生を促すための科学的知見を得ることは時期を得た研究企画と考えている。本研究で設定した加古川の試験区間を対象として、水流制御のための捨石護岸・水制を設置した場合の流れを予測するに際しては、研究代表者らが開発した河川流モデルの適用が可能な条件にあり、研究申請時には準備研究の目処が立った段階にあった。

河道の維持管理には多くの問題が課され技術の適正化・高度化が求められている。技術者数の減少が続く今日、維持管理業務の省力化・体系化は喫緊の課題である。こうした技術界の背景を勘案し、当初計画としては、維持・修復形式（インパクト）と流砂・生態系変化（レスポンス）との関係を流砂解析によってチャート化し、インハウス・エンジニアの技術的支援ツールを目指すこととした。

### 2. 研究の目的

大規模な地形改変やダム・井堰建設をともなう河川整備は、流れと土砂動態に及ぼす影響が大きい。みお筋・砂州が固定化して河川地形の二極化が進み樹林が繁茂するなど、治水・環境上の障害が多くの河川で顕在化している。こうした河川地形・河床材料の変化に

よって、樹林化や河積減少など治水上の障害とともに、内水面漁業、親水活動、河川生態系への影響があらわれており、環境修復が求められている。仮に、大規模な改修によって一過性の効果が得られたとしても、地形・河床材料変化の原因を定量的に特定しない限り、中長期にわたり持続する環境再生を期待することはできない。本研究では、レジーム・シフトが進む河川区間を対象に、維持管理の枠組みの中でみお筋・砂州の自力再生を果たすための河川の順応的維持改修技術を体系化する。堆積土砂の除去や地先の石礫材料を用いた水制工など、維持改修によって河川環境が自律的に再生されることを目指し、河川流・河床変動解析と現地観測を併用した順応的な維持・管理を図る。樹林化の主因である(1) 流量コントロールによる流況の平準化と(2) 河川改修による断面諸元の変化のうち、前者の影響がない加古川と両者の影響が及ぶ旭川をフィールドとして、水文・樹木消長・河川地形の現地観測を実施する。

本研究では第一に、河川に発生した人為影響（ダム・堰などの設置・改修、河川整備など）が河川環境（流れ、地形、植生）の経年変化をもたらした過程を再現し、原因を特定する。第二に、河川改修よりも小さな維持管理の事業規模の下で、堆積土砂の撤去・移動、河床材料や捨石など自然素材を用いた洗堀箇所の埋め戻しや水制工の設置によるみお筋・砂州の再生を繰り返し、「インパクト・レスポンス」解析をともなう順応的な維持管理方を提案する。以上の手順によって、複雑・不規則に推移する河川の地形・構造物の順応管理に適したPDCAサイクルが完成する。

### 3. 研究の方法

加古川、旭川の二水系を研究フィールドとして当該区間を管理する河川管理者から維持管理の実態をヒアリング調査するとともに、各区間で課題となっている河川環境・地形の非平衡的推移に関するデータセットを収集した。次に、地形の不可逆的変形が進行する合流部、樹林化が進む高水敷、アーミングや低水路の浸食が生態環境に大きな影響を及ぼすダム下流区間などを対象として、河床変動の長期解析を実施した。特に、大堰湛水と合流の影響を受ける加古川試験区間に関しては、水制工を含む合流点処理、樹林管理、土砂掘削など、河川の維持管理の枠組みによって河川環境の自律的再生の方向性を明らかにするために、20年程度の河川地形長期解析を試みた。

水理解析モデルに関するパラメータ同定に際しては、樹林粗度や交互配置された砂州地形の形状抵抗を評価する必要があるため、別途、水理模型実験、二次元二層流解析、三次元解析を実施し流水抵抗を定式化した。

合流部に関しては、河川再生を期して設置された石積水制の効果を解析的に検証した。有意な河床地形変化をともなう出水事象に

表-1 水制の設置条件

設置角度	施工位置	寸法	Case
直角水制	左岸	標準	E1
		高さ+2m	E2
		高さ+1m	E3
		高さ-1m	E4
		高さ-2m	E5
		長さ1.5倍	E6
		長さ0.5倍	E7
上向き水制		標準	F
下向き水制		標準	G
水制なし			H

関しては河川管理者に河川地形情報の提供を依頼した。一方、合流部と水制近傍では流れの局所性が顕著であることから移動床水理模型実験を実施した。

自律的な河川再生を促すための維持・修復方法を提案することを目指して、水理・地形・樹林・草木の現地資料を収集した。ダム下流区間においてはダムによる流量操作と河床材料変化との関係、維持管理掘削や置き砂が下流の環境因子に与えるインパクトに関する実証的知見を蓄積することができた。旭川では河道内植生の持続可能管理を目指して、これに要する河川工学的支援ツールを構築した。樹林化した河道を管理する上での最大の課題は樹木抗力の壁面粗度への等価換算であり、出水実績と二次元水理解析に基づいて粗度係数を同定する解析手法を提案した。

本研究で得られた成果は、国内外の論文集や国際会議に公開した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 堰湛水と合流の影響を受ける区間の水制工による河川環境再生の検討

図-1 のように堰湛水の影響を受け左岸側から支川が直角に合流する加古川中流部においては右岸側に砂州が発達し地形の二極化が進行している。同図のように左岸側に表-1 の諸条件の下で水制を設置した場合の20年間の出水実績を外力として与え、河川地形長期変化を予測した。図-2 は水制の有無が地形に及ぼす影響を表わす。水制がない場合には砂州の比高が増大して地形の二極化が進行し、水制の地形制御機能を確認した。

水制による地形変化を定量的に評価するために、元地形から20年後の河川横断面積の変化量 $\Delta A$ と次式で定義される地形尖り度 $\beta$ を各断面に対して求めた。

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \mu)^4}{n \sigma^4} - 3$$

図-3 には実績寸法の直角水制が設置された場合 (Case-E1) と水制を設置しない場合 (Case-H) の横断地形尖り度 $\beta$ の20年間変化 $\Delta\beta$ の縦断方向分布を比較する。趨勢を設置しない場合には $\Delta\beta$ の変化量がより顕著であり、水制の設置によって地形の二極化が抑制されることがわかる。

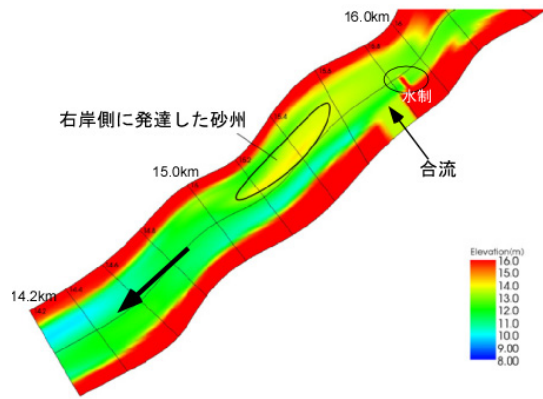


図-1 解析対象区間の初期地形

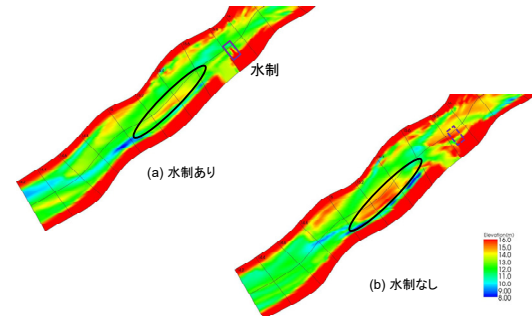


図-2 長期解析に基づく水制が河床地形に及ぼす影響

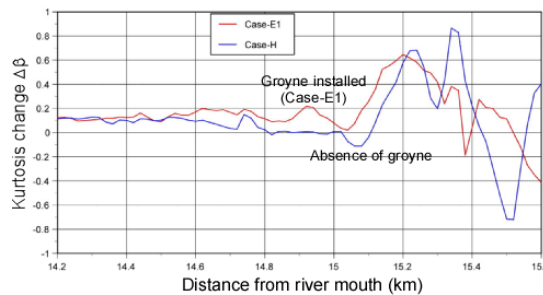


図-3 尖度変化量 $\Delta\beta$ の縦断方向分布 (水制の影響)

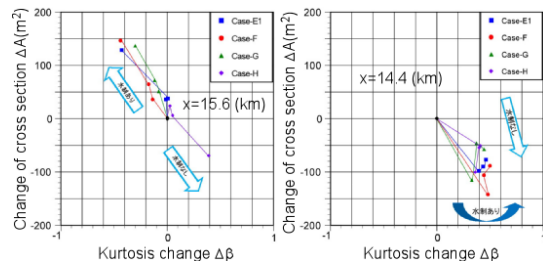


図-4 ( $\Delta\beta$ ,  $\Delta A$ )の経年変化 (水制設置条件の影響)

Case-E1(直角水制), F(上向き水制), G(下向き水制), H(水制なし)の4ケースにおける $\Delta A$ ,  $\Delta\beta$ の経年変化を図-4 の走時曲線上に示す。15.6km断面を見ると、水制を設置した3ケースいずれにおいても $\Delta A > 0$ ,  $\Delta\beta < 0$ となる傾向にある。このように、15.6km断面においては砂州が左岸側に移動しており、水制の局所洗掘によって地形の二極化が進んだものの、断面積の増加によって疎通能力は向上している。一方、14.4km断面においては、いずれのケースでも $\Delta\beta > 0$ であり、水制の設置条件に関わらず地形の二極化は抑制される傾向にあることがわかる。

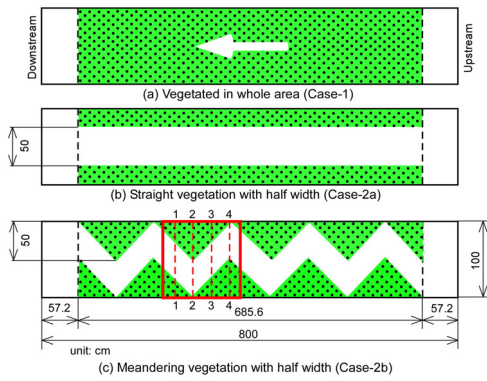


図-5 水理実験で想定した樹林の交互配置

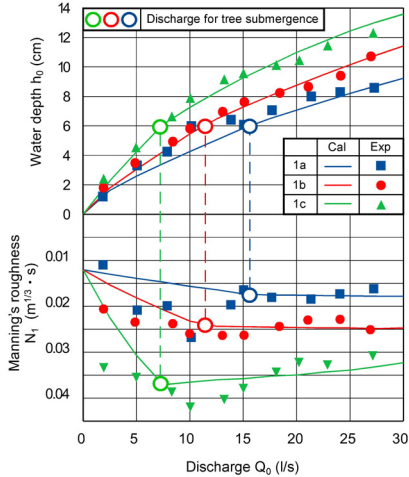


図-6 「水深-流量」( $h_0$ .vs. $Q_0$ ) (上図) ならびに「粗度係数-流量」( $N_1$ .vs. $Q_0$ ) (下図) におよぼす樹木特性量 ( $d, \Delta S, \lambda_{veg}$ ) の影響. 全面粗度の場合 (Case-1).

(2) 樹林ならびに砂州地形が疎通能力と流水抵抗に及ぼす影響

実河川での洪水流解析においては樹木や砂州地形がもたらす流水抵抗をモデル化する必要がある. モデルパラメータを同定するために, 図-5 のように樹木模型を全河床面 (Case-1), 兩岸直線 (Case-2a) ならびに交互 (Case-2b) に配置した場合の疎通能力と流速を計測した. 図-6 に Case-1 における「水深  $h_0$ —流量  $Q$ 」の関係ならびに「相当粗度係数  $n$ —流量  $Q$ 」の関係を二層流解析値と比較する. 図-7 には樹林帯が兩岸平行に配置される場合 (Case-2a) と交互配置された場合の同様の関係をあらわす. 両図から樹木抗力とその平面配置にともなう形状抵抗が良好に再現されていることが確認される. こうした流れの状況では樹木キャノピー周辺の流れの三次元性も卓越することを考慮し, iRIC Nays CUBE を用いた三次元解析を実施した. 図-8,9 には樹林の交互配置 (Case-2b) における「 $h_0$ — $Q$ — $n$ 」関係を水理実験, 二次元二層流解析 (2D2L), 三次元解析 (Nays-CUBE) の三者で比較している. 三次元性が卓越するために三次元解析の方が二次元二層流解析よりもやや高い再現性を示している. 図-10 には PIV 計測値と三次元数値解との比較例を示す. 樹林帯を含む開水路流では流れの三次元性が卓越するため, 三次元解析がより有効であることを確認した.

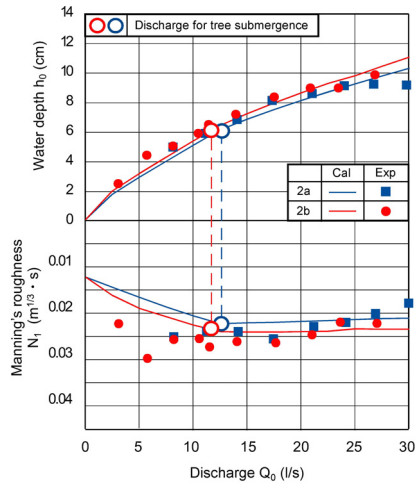


図-7 「水深-流量」( $h_0$ .vs. $Q_0$ ) (上図) ならびに「粗度係数-流量」( $N_1$ .vs. $Q_0$ ) (下図) におよぼす樹木特性量 ( $d, \Delta S, \lambda_{veg}$ ) の影響. 半面粗度の直線配置 (Case-2a) と交互配置 (Case-2b) の比較.

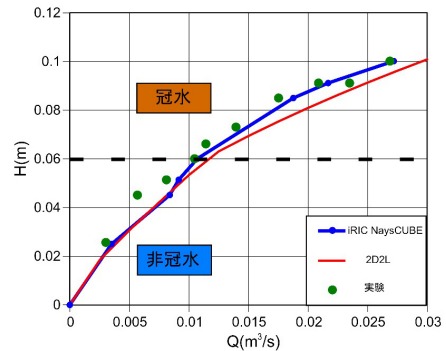


図-8 Case-2b における「流量—水位」関係. (「実験値—二次元二層流解析—三次元解析」の比較.)

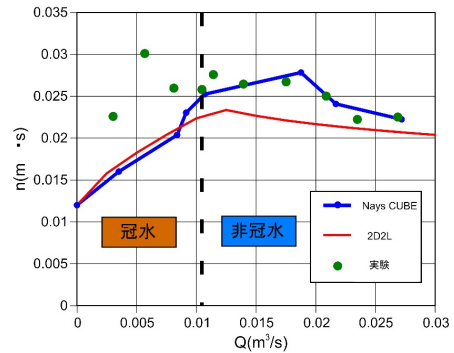


図-9 Case-2b における「流量—粗度係数」の関係

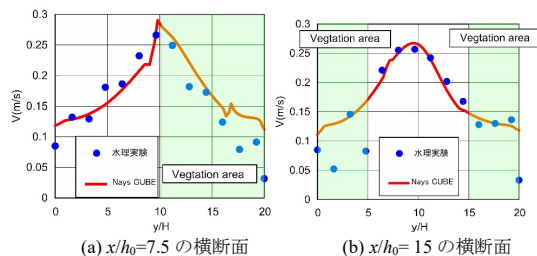



図-10 流速横断分布 (PIV 計測値と三次元数値解)

(3) 堰湛水と合流が流砂過程と地形に及ぼす影響に関する水理実験

試験区間と合流・大堰水位諸元との相似性を考慮して図-11 のような水路を用いて移動床水理実験を実施した. 流砂過程の相似性を確保するために歪模型が用いられ, 表-2 の水

表-2 合流部実験の水理条件

Run	本川流量 $Q_M (l/s)$	支川流量 $Q_T (l/s)$	堰高 $H_D (cm)$	水路上流端 の境界条件	水制
A-1	5.0	1.0	0.0	水路上流端 ( $X=-0.5m$ ) 左岸に本川幅 $B$ の1/4幅の 板を設置	無
A-2			1.0		
A-3			2.0		
A-1L			0.0		
A-2L			1.0		
A-3L			2.0		
A-4L	0.5	0.0		有	
A-5L	2.5				
A-6L	3.0	1.0	0.0		
B-1L	5.0	1.0	0.0		有
B-2L	3.0				

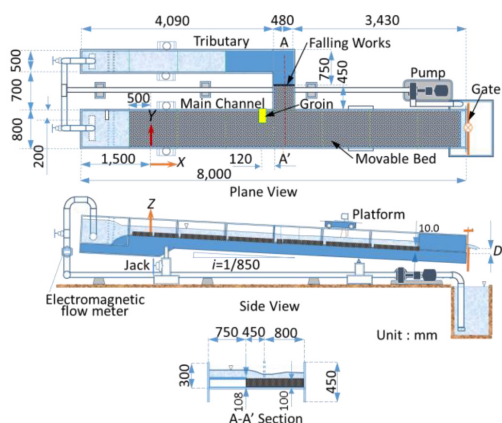


図-11 合流部の実験水路

理条件の下で流速分布や河床地形に及ぼす合流流量比と下流水位の影響を検討した。

図-12 は下流端水位の違いが河床地形に及ぼす影響をあらわす。下流端水位が大きくなると (RunA-2L) 小さい場合 (RunA-1L) よりも合流点上流側に形成される堆積域がより大きく発達することが確認される。この傾向は図-13 に示す数値解析でも再現されており、合流点に発達する砂州が大堰の影響により形成されたことが示唆される。

一方、合流点上流左岸側に設置される水制工が設置された RunB-1L では、図-14 に示すように水制が設置されていない場合 (図-12 の RunA-1L) よりも砂州の発達形成が抑制されていることを確認できる。

(4) 植生が繁茂した河道における粗度推定、洪水流解析の検討

樹林化が進む旭川においても治水上の課題が浮上しており、河川管理者の協力の下で治水計画に供する植生粗度の推定と洪水流解析手法を開発した。4次元変分法 (adjoint法) と逐次モンテカルロ法 (粒子フィルタ: PF, 融合粒子フィルタ: MPF) を適用することにより旭川の流水抵抗を推定し、汎用性や簡易性を考慮すれば、後者がより有効であることを示した。また、植生動態モデルを用いて植生高や密生度の平面分布を図-15 のように推定し、これを元にして旭川の洪水流況を再現して、観測値との整合を得た。一連の研究を通し、旭川に関しても管理上の課題が浮き彫りとなった。

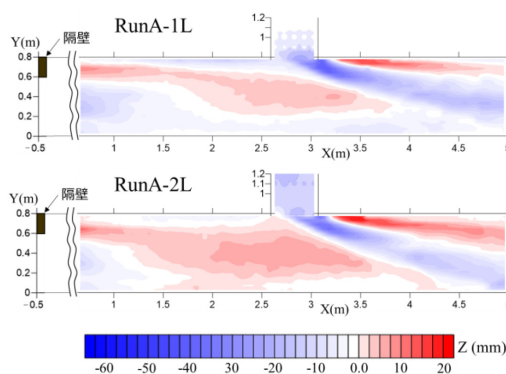


図-12 河床位の変化 (水理実験)

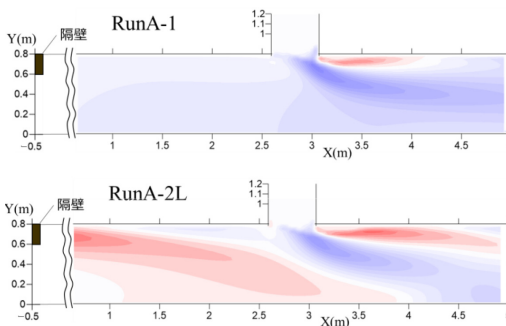


図-13 河床位の変化 (数値解析)

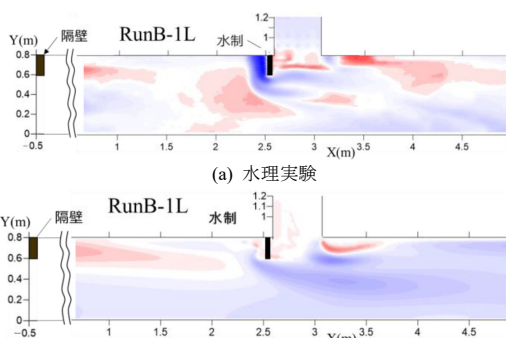


図-14 水制による砂州の抑制状況

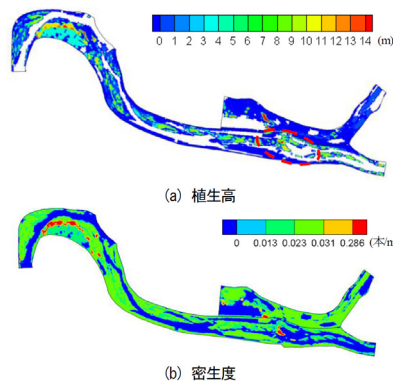


図-15 植生動態モデルから推定された植生分布 (旭川)

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 14件)

- 高田翔也・裨田佳一・道奥康治・久保裕基・岡本吉弘: 上流の河道形状と堰湛水の影響を受ける合流部の河床変動とその制御に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学),

- Vol.73, No.4, I 865-I\_870, 2017 (査読有) .
- 2) 吉田圭介・前野詩朗・間野耕司・山口華穂・赤穂良輔 : ALB を用いた河道地形計測の精度検証と流況解析の改善効果の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I\_1 565-I\_570, 2017 (査読有) .
  - 3) 平井康隆・前野詩朗・吉田圭介・岩城智大・小川修平・赤穂良輔 : 適正な分流量を維持するための百間川分流部の固定堰周辺における植生管理方策の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I\_1081-I\_1086, 2017 (査読有) .
  - 4) T.Akiyama, H.Yamasaki, M.Fukuoka, K.Kanda and F.Nakamura: Flow and sediment deposition characteristics of half cone type fishway during flood, Proc. Int. Conf. Science of Technology Innovation 2017, Nagaoka, Japan, p.144, 2017 (査読有) .
  - 5) H.Kubo, S.Takata, K.Kanda, Y.Okamoto and K.Michioku: Study on bed variation and its control at a river confluence associated with the upstream river topography and release of the barrage, Proc. Int. Symp. River Basin Studies, 2017, Gifu, Japan, p.36, 2017 (査読有) .
  - 6) K.Michioku: Towards a comprehensive design of nature-oriented river structures, Proc. 7th Civil Engineers Conference in the Asian Region, CD-ROM, 2016 (査読有) .
  - 7) K.Michioku, K.Kanda, S.Kometani and Y.Irie: Field measurement and numerical analysis on tree breakage modes during floods in a middle-stream reach: Proc. RIVER FLOW 2016, CD-ROM, ISBN 978-1-138-02913-2, pp.1860-1868, 2016 (査読有) .
  - 8) K.Yoshida, S.Maeno, K. Yamaguchi, T. Iwaki, S. Fujita, Y. Hirai: Forestation control works: secular change at the Gion area in the Asahi River, Proc. 20th IAHR-APD Congress, Srilanka, 2016 (査読有) .
  - 9) 吉田圭介・前野詩朗 : 洪水時の河道内植生による流水抵抗の逆推定手法の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I\_1075-I\_1080, 2016 (査読有) .
  - 10) K.Michioku, K.Kanda, S.Kometani, Y.Irie and C.Sakamoto: Manning's coefficient of alternatively arranged sandbars with tree vegetation, Proc. 36th IAHR World Congress, CD-ROM, 2015 (査読有) .
  - 11) 米谷駿一・道奥康治・神田佳一・入江良幸・坂本知奈美 : 樹木粗度を有する交互砂州地形の相当粗度, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, I\_631-636, 2015 (査読有) .
  - 12) 吉田圭介・前野詩朗・藤田駿佑・松山悟・岩城智大・平井康隆 : 旭川における植生分布の経年変化を考慮した洪水流の数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, pp.I\_1039-I\_1044, 2015 (査読有) .
  - 13) T.Uotani, K.Kanda and K.Michioku: Experimental and numerical study on

hydrodynamics of riparian vegetation, J. Hydrodynamics, Ser. B, Vol.26, Issue 5, pp.796-806, 2014 (査読有) .

- 14) T.Okuyama, K.Michioku, K.Kanda and S.Kometani: Analysis on historical changes in river morphology influenced by barrage construction and tributary confluence, Proc. 11th Intl. Conf. HydroScience and Eng., pp.633-641, ISBN 978-3-939230-32-8, 2014 (査読有)

[学会発表] (計 3 件)

- 1) 橋本俊平・道奥康治 : 樹木粗度が配された複断面開水路における流れの構造と抵抗特性に関する考察, 土木学会第 44 回関東支部研究発表会, 埼玉大学 (埼玉県・さいたま市), 2017 年 3 月 8 日
- 2) 久保裕基・高田翔也・神田佳一・道奥康治 : 上流の弯曲と堰湛水の影響を受ける合流部の流れ及び河床変動特性に関する研究, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演会, 東北大学 (宮城県・仙台市), 2016 年 9 月 7 日
- 3) 高田翔也・神田佳一・道奥康治 : 堰湛水区間における支川合流部の流れ特性に関する研究, 第 70 回土木学会年次学術講演会, 岡山大学 (岡山県・岡山市), 2015 年 9 月 16 日

[図書] (計 3 件)

- 1) K. Michioku (分担執筆) : Basics of open channel hydraulics, river training and fluvial geomorphology, ed. by Artur Radecki-Pawlik, Stefano Pagliara, Jan Radecky, "Hydrodynamics of River Structures Co, Science Publishers (印刷中) .

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件). ○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

[http://civil.ws.hosei.ac.jp/wp/staff\\_ichiran/kannkyosystem/mizukankyo/mizukankyo-intro](http://civil.ws.hosei.ac.jp/wp/staff_ichiran/kannkyosystem/mizukankyo/mizukankyo-intro)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

道奥 康治 (MICHIOKU, Kohji)  
法政大学・デザイン工学部・教授  
研究者番号 : 4 0 1 2 7 3 0 3

### (2) 研究分担者

前野 詩朗 (MAENO, Shiro)  
岡山大学・環境生命科学研究科・教授  
研究者番号 : 2 0 1 5 7 1 5 0

神田 佳一 (KANDA, Keiichi)  
明石工業高等専門学校・都市システム工学  
科・教授  
研究者番号 : 6 0 2 1 4 7 2 2